

Distr.: General
12 April 2017

Arabic
Original: English

برنامج الأمم المتحدة للبيئة



مؤتمر الأطراف في اتفاقية ميناماتا
بشأن الزئبق
الاجتماع الأول

جنيف، ٢٤-٢٩ أيلول/سبتمبر ٢٠١٧

البند ٥ (أ) '٣' من جدول الأعمال المؤقت*

مسائل تعرض على مؤتمر الأطراف لكي يتخذ إجراءً
بشأنها في اجتماعه الأول: مسائل تنص عليها
الاتفاقية: التوجيهات المشار إليها في الفقرتين ٨ (أ)
و ٨ (ب) من المادة ٨

التوجيهات المتعلقة بانبعاثات الزئبق (المادة ٨) المشار إليها في الفقرتين ٨ (أ) و ٨ (ب)

مذكرة من الأمانة

١ - تنص الفقرة ٨ من المادة ٨ من اتفاقية ميناماتا بشأن الزئبق، المتعلقة بالانبعاثات، على أن يعتمد مؤتمر الأطراف، في اجتماعه الأول، توجيهات بشأن أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية، آخذاً في الاعتبار أي اختلافات بين المصادر الجديدة والقائمة والحاجة إلى التقليل إلى أدنى حد ممكن من الآثار الشاملة لعدة أوساط؛ وبشأن دعم الأطراف في تنفيذ التدابير الواردة في الفقرة ٥، وبخاصة تحديد الأهداف وتحديد القيم الحدية للانبعاثات.

٢ - ونظرت لجنة التفاوض الحكومية الدولية لإعداد صك عالمي ملزم قانوناً بشأن الزئبق، في دورتها السابعة، في مشروع التوجيهات الذي أعده فريق الخبراء التقنيين وقدم إلى اللجنة في شكل تقرير لفريق الخبراء التقنيين عن وضع التوجيهات المطلوبة بمقتضى المادة ٨ من الاتفاقية (UNEP(DTIE)/Hg/INC.7/6)، و (UNEP(DTIE)/Hg/INC.7/6/Add.1، و (UNEP(DTIE)/Hg/INC.7/6/Add.2). واتفق على أن يقدم إلى مؤتمر الأطراف في دورته الأولى مشروع التوجيهات الوارد في الوثيقة UNEP(DTIE)/Hg/INC.7/6/Add.1 المعدل بصيغته الواردة في المرفق الثالث بتقرير لجنة التفاوض الحكومية الدولية لإعداد صك عالمي ملزم قانوناً بشأن الزئبق عن أعمال دورتها السابعة (UNEP(DTIE)/Hg/INC.7/22/Rev.1) ومشروع التوجيهات بشأن دعم الأطراف في تنفيذ التدابير المبينة في الفقرة ٥ من المادة ٨، ولا سيما في تحديد الأهداف وتحديد القيم الحدية

* UNEP/MC/COP.1/1

للانبعاثات (UNEP(DTIE)/Hg/INC.7/6/Add.2)، لاعتمادها. ويرد مشروع مقرر لاعتماد التوجيهات في شكل المرفق الأول لهذه المذكرة بينما ترد التوجيهات بشأن أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية في المرفق الثاني؛ وترد التوجيهات بشأن تنفيذ التدابير المبينة في الفقرة ٥ من المادة ٨ في المرفق الثالث^(١).

الإجراء المقترح اتخاذه من جانب مؤتمر الأطراف

١ - قد يرغب مؤتمر الأطراف في أن يعتمد رسمياً التوجيهات المتعلقة بالفقرة ٨ من المادة ٨ بالصيغة التي قدمتها لجنة التفاوض الحكومية الدولية.

(١) استنسخت التوجيهات الواردة في المرفقات دون تحريرها بصورة رسمية.

مشروع المقرر ا م - ١/[xx]: توجيهات تتعلق بانبعاثات الزئبق

إن مؤتمر الأطراف،

إذ يسلم بأهمية الرقابة على انبعاثات الزئبق في تحقيق هدف الاتفاقية،

يقرر اعتماد التوجيهات المتعلقة بالمادة ٨، وبخاصة فقرتيها ٨ (أ) و ٨ (ب)، بشأن أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية، آخذاً في الاعتبار أي اختلافات بين المصادر الجديدة والقائمة والحاجة إلى التقليل إلى أدنى حد ممكن من الآثار الشاملة لعدة أوساط، وبشأن دعم الأطراف في تنفيذ التدابير الواردة في الفقرة ٥، وبخاصة في تحديد الأهداف وتحديد القيم الحدية للانبعاثات، بالصيغة التي قدمتها لجنة التفاوض الحكومية الدولية.

المرفق الثاني

مشروع توجيهات بشأن أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية مع الأخذ في الاعتبار أي اختلافات بين المصادر الجديدة والقائمة والحاجة إلى التقليل إلى أدنى حد ممكن من الآثار الشاملة لعدة أوساط

الفصل الأول

مقدمة

٦.....	مقدمة	١ -
٦.....	غرض الوثيقة	١-١
٦.....	هيكل التوجيهات	٢-١
٦.....	الأشكال الكيميائية للزئبق	٣-١
٧.....	لماذا نشعر بالقلق بسبب انبعاثات الزئبق؟	٤-١
٨.....	مصادر انبعاثات الزئبق التي يغطيها هذا التوجيه	٥-١
٨.....	الأحكام ذات الصلة في اتفاقية ميناماتا	٦-١
١٢.....	اعتبارات في اختيار أفضل التقنيات المتاحة وتنفيذها	٧-١
١٢.....	مستويات الأداء	٨-١
١٣.....	أفضل الممارسات البيئية	٩-١
١٣.....	التأثيرات بين الوسائط	١٠-١
١٣.....	تقنيات ضبط الملوثات المتعددة	١١-١
١٤.....	الاتفاقات الدولية الأخرى	١٢-١
١٤.....	١-١٢-١ اتفاقية بازل بشأن التحكم في نقل النفايات الخطرة والتخلص منها عبر الحدود	١٢-١
١٤.....	٢-١٢-١ اتفاقية التلوث الجوي البعيد المدى العابر للحدود	١٢-١
١٥.....	١٣-١ شراكة الزئبق العالمية التابعة لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة	١٣-١

١ - مقدمة

١-١ غرض الوثيقة

تقدّم هذه الوثيقة التوجيهات المتعلقة بأفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لمساعدة الأطراف على الوفاء بالتزاماتها بموجب المادة ٨ من اتفاقية ميناماتا بشأن الزئبق (ويشار إليها أدناه باسم "الاتفاقية")، التي تتعلق بالضبط والتخفيض، حيثما أمكن، لانبعاثات الزئبق أو مركبات الزئبق في الغلاف الجوي من المصادر الثابتة التي تدرج في فئات المصادر الواردة في المرفق دال للاتفاقية. وتم إعداد هذا التوجيه واعتماده وفقاً لمتطلبات المادة ٨: وهي لا تنشئ متطلبات إلزامية ولا تحاول أن تضيف إلى التزامات الطرف بموجب المادة ٨ أو تنقص منها. وتقتضي الفقرة ١٠ من المادة ٨ أن تراعي الأطراف هذه التوجيهات، وتقتضي من مؤتمر الأطراف أن يقيها قيد الاستعراض وأن يحدثها حسب الاقتضاء، بحيث تراعي الظروف التي لا تغطيها التوجيهات في الوقت الحاضر.

وعند تحديد أفضل التقنيات المتاحة، على كل طرف أن يأخذ في الحسبان ظروفه الوطنية وفقاً لتعريف أفضل التقنيات المتاحة الوارد في الفقرة ٢ (ب) من المادة ٢، الذي يراعي صراحة الاعتبارات الاقتصادية والتقنية لطرف ما أو لمرفق ما موجود على أراضي ذلك الطرف. ويُعترف بأن بعض تدابير الرقابة الوارد وصفها في هذه التوجيهات قد لا تكون متاحة لجميع الأطراف لأسباب تقنية أو اقتصادية. ويتاح الدعم المالي وبناء القدرات ونقل التكنولوجيا والمساعدة التقنية على النحو المبين في المادتين ١٣ و ١٤ من الاتفاقية.

٢-١ هيكل التوجيهات

تم ترتيب هذه التوجيهات في سبعة فصول. وهذا الفصل التمهيدي يشمل معلومات عامة عن تحديات الزئبق وأحكام الاتفاقية، وخاصة تلك الأحكام المتصلة بإطلاقات الزئبق في الهواء. ويقدم أيضاً بعض المعلومات الشاملة، بما في ذلك الاعتبارات المنطبقة في اختيار وتنفيذ أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية.

ويقدم الفصل ٢ معلومات عامة عن التقنيات الشائعة لضبط الإطلاقات المنطبقة عموماً على جميع فئات المصادر التي تغطيها المادة ٨، ويقدم الفصل ٣ معلومات عن العناصر المشتركة في ضبط إطلاقات الزئبق في الغلاف الجوي من هذه المصادر.

وتتطرق الفصول ٤ و ٥ و ٦ و ٧ إلى فئات المصادر المذكورة في المرفق دال. ويتم عرض كل فئة منها في فصل مستقل، رغم أن التوجيه المتعلق بمرافق الطاقة العاملة بحرق الفحم والمرجل الصناعية العاملة بحرق الفحم ترد في فصل واحد، نظراً لأوجه التشابه في العمليات ووسائل الضبط المنطبقة.

ويحتوي التذييل ألف على معلومات عن بعض التكنولوجيات التي اعتبرت غير مكتملة بما فيه الكفاية لإدراجها في متن التوجيهات، ولكنها قد تكون موضعاً للاهتمام في المستقبل.

وتتوفر أيضاً في وثيقة منفصلة معلومات إضافية في شكل دراسات حالات، رغم أن هذه الدراسات لا تشكّل جزءاً من التوجيهات الرسمية.

٣-١ الأشكال الكيميائية للزئبق

الزئبق هو عنصر من العناصر، ولكن يمكن أن نجده في أشكال كيميائية مختلفة. وتتناول الاتفاقية الزئبق النقي ومركبات الزئبق، ولكن ذلك يحدث فقط في حالة الانبعاثات والإطلاقات البشرية المنشأ للزئبق ومركباته^(٢). وعلى سبيل المثال، تشمل مركبات الزئبق غير العضوي الأكاسيد أو الكبريتيدات أو الكلوريدات. وفي هذه التوجيهات، يشير "الزئبق" إلى كل من الزئبق النقي

(٢) انظر نص الاتفاقية، المادتان ١ و ٢.

ومركبات الزئبق ما لم يتضح من السياق أن المقصود هو شكل محدد من الزئبق. ويتفق ذلك مع نطاق المادة ٨ بشأن الانبعاثات، التي تتناول الضبط والتخفيض، حيثما أمكن، لانبعاثات الزئبق ومركبات الزئبق، ويشار إليها في كثير من الأحيان بعبارة "الزئبق الكلي".

ويتباين الشكل الكيميائي لانبعاثات الزئبق من الفئات الواردة في المرفق دال حسب نوع المصدر وحسب عوامل أخرى. والزئبق النقي الغازي هو أكثر الأشكال شيوعاً من الانبعاثات البشرية المنشأ في الغلاف الجوي (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، ٢٠١٣). وتأخذ الانبعاثات الباقية شكل الزئبق المؤكسد الغازي أو الزئبق الملصق بجزئيات منبعثة. وفترات بقاء هذه الأشكال في الغلاف الجوي أكثر من فترات بقاء الزئبق النقي الغازي وتترسب على الأرض أو المسطحات المائية بسرعة أكبر بعد إطلاقها (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، التقييم العالمي للزئبق، ٢٠٠٣). ويمكن أن يمر الزئبق النقي في الغلاف الجوي بعملية تحول ليصبح زئبقاً مؤكسداً يترسب بسهولة أكبر.

ويمكن أيضاً أن نجد الزئبق في مركبات عضوية - مثل ميثيل أو إثيل الزئبق، وهما من أكثر الأشكال سمية. والمركبات العضوية من الزئبق لا تنبعث من مصادر تشملها المادة ٨ من الاتفاقية، ولكن الزئبق النقي أو المؤكسد يمكن، بعد ترسيبهما، أن يتحولا في بعض الظروف إلى مركبات عضوية بسبب البكتيريا في البيئة.

١-٤ لماذا نشعر بالقلق بسبب انبعاثات الزئبق؟

تم الإقرار بأن الزئبق مادة كيميائية تثير انشغالاً عالمياً بسبب انتقالها البعيد المدى في الجو، وقدرتها على التراكم بيئياً في النظم الإيكولوجية وآثارها السلبية الكبيرة على صحة الإنسان والبيئة^(٣).

ويتسم الزئبق بالسمية على الجهاز العصبي المركزي والطرقي في حالة التركيزات الكبيرة سواء كان في شكله الأولي أو في أشكاله العضوية، ويمكن أن ينتج عن استنشاق بخار الزئبق آثار سيئة على الأجهزة العصبية والهضمية والمناعية، وعلى الرئتين والكليتين. وحتى لو كانت مركبات الزئبق العضوية بتركيزات أقل فإنها يمكن أن تؤثر على الأعضاء في مرحلة النمو، مثل الجهاز العصبي الجنيني. ويوجد الزئبق أيضاً على نطاق واسع في كثير من النظم الإيكولوجية - وتم قياس مستويات مرتفعة من الزئبق في العديد من أنواع أسماك المياه العذبة والأسماك البحرية في كل أنحاء العالم. ويتراكم الزئبق إحيائياً ولذلك يوجد بتركيزات أكبر في الكائنات العضوية في قمة سلسلة الغذاء^(٤). ويحدث معظم التعرض البشري من خلال تناول السمك.

وتأتي أهم إطلاقات الزئبق البشرية المنشأ على الصعيد العالمي من خلال الانبعاثات في الهواء، ولكن الزئبق يتسرب أيضاً من مختلف المصادر بصورة مباشرة إلى الماء والأراضي. وبعد أن يدخل الزئبق في البيئة فإنه يصبح ثابتاً وينتشر في أشكال مختلفة بين الهواء والماء والرواسب والتربة والكائنات الحية. وتضيف الانبعاثات والإطلاقات من أي مصدر محلي تقريباً إلى التجميع العالمي للزئبق الذي يتواصل حشده وترسيبه على الأرض وفي الماء، ثم إعادة حشده مرة أخرى. وتمثل التيارات النهرية والمحيطية أيضاً وسائل للنقل الطويل المدى. وحتى البلدان التي تشهد الحد الأدنى من انبعاثات الزئبق والمناطق البعيدة عن النشاط الصناعي قد تتأثر تأثيراً سلبياً أيضاً. وعلى سبيل المثال، لوحظت مستويات عالية من الزئبق في القطب الشمالي^(٥)، بعيداً عن مصادر أي انبعاثات كبيرة.

(٣) في دياحة الاتفاقية، على سبيل المثال.

(٤) يمكن الاطلاع على مزيد من المعلومات عن الآثار الصحية للزئبق في الموقع: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/en>.

(٥) برنامج الأمم المتحدة للبيئة (٢٠١٣) التقييم العالمي للزئبق.

ويمكن أن نتوقع من تنفيذ تدابير ضبط أو تخفيض انبعاثات الزئبق تحقق فوائد واضحة من ناحية الصحة العامة والبيئة. وهذه الفوائد تنطوي على قيمة اقتصادية. وقد تم وضع تقديرات كمية في بعض البلدان والمناطق لحجم هذه الفوائد^(٦)، ولكن يصعب جداً وضع تقدير عالمي لهذه الفوائد بقيمة نقدية. ولكن من المرجح أن تكون قيمة هذه الفوائد كبيرة.

ومع ذلك فإن تنفيذ تدابير ضبط انبعاثات الزئبق سوف تنطوي عادة على قدر من التكلفة. وقد تكون هذه التكلفة إما تكاليف رأسمالية لإنشاء تكنولوجيات الضبط أو تكاليف متزايدة لتشغيل المرافق وصيانتها أو كلا التكاليفتين. وتتضمن الفصول المتعلقة بكل فئة من فئات المصادر أمثلة لهذه التكاليف بالنسبة لمنشآت محدّدة، في حالة توفر المعلومات الموثوقة. ولكن التكاليف الفعلية تتوقف على الأرجح على الظروف المحدّدة التي تحيط بكل مرافق؛ وهكذا فإن الأرقام المذكورة ينبغي أن تؤخذ باعتبارها مؤشراً عريضاً فقط لحجم التكاليف المرجح. وبالنسبة لأي حالة محدّدة، سيتعيّن الحصول على معلومات محدّدة للمرفق المحدّد المعني. ومن المعترف به أن هذه التكاليف سوف تقع عموماً على مشغّل المرفق المحدّد، في حين أن المزايا الموصوفة أعلاه تعود إلى المجتمع عموماً.

٥-١ مصادر انبعاثات الزئبق التي يغطيها هذا التوجيه

تتعلق الاتفاقية بانبعاثات وإطلاقات الزئبق البشرية المنشأ وحدها (فالمصادر الموجودة طبيعياً، مثل البراكين، تندرج خارج نطاق الاتفاقية)، وتتناول المادة ٨ خمس فئات محدّدة للمصادر ويرد بيانها في المرفق دال للاتفاقية. وتتضمن القائمة الأولى منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمرآجل الصناعية العاملة بحرق الفحم وعمليات الصهر والتحميص المستخدمة في إنتاج المعادن غير الحديدية^(٧)، ومرافق ترميد النفايات ومرافق إنتاج آجر الاسمنت. وتصف الفصول ٤ و ٥ و ٦ و ٧ هذه العمليات بالتفصيل. ويمكن أن ينبعث الزئبق من هذه المصادر إذا كان موجوداً في الوقود والمواد الخام المستخدمة في العمليات المصاحبة أو في النفايات المحروقة في منشآت الترميد.

وتنشأ الانبعاثات في الجو أيضاً من مصادر أخرى غير مذكورة في المرفق دال - مثل التعدين الحربي والضييق النطاق للذهب، الذي قد يكون أكبر مصدر وحيد للانبعاثات، أو من العمليات الصناعية التي يستعمل فيها الزئبق في إطار العملية، كعامل حفاز على سبيل المثال. وتتناول مواد أخرى في الاتفاقية هذه المصادر، وهي مصادر لا تغطيها هذه التوجيهات.

ويقدّم التقييم العالمي للزئبق الصادر عن برنامج الأمم المتحدة للبيئة في عام ٢٠١٣ تقديرات لانبعاثات الزئبق البشرية المنشأ في الغلاف الجوي. ولكن الفئات المستعملة في هذا التقييم لا تناظر تماماً الفئات المعروضة في المرفق دال.

٦-١ الأحكام ذات الصلة في اتفاقية ميناماتا

تتناول الاتفاقية جميع جوانب دورة حياة الزئبق من مصدر بشري، ويتعيّن دراسة أحكامها ككل.

فهناك أحكام بشأن مصادر إمداد الزئبق والاتجار فيه؛ والمنتجات المضاف إليها الزئبق وعمليات التصنيع التي تستخدم الزئبق؛ والتعدين الحربي والصغير النطاق للذهب؛ والانبعاثات والإطلاقات؛ والتخزين المؤقت السليم بيئياً للزئبق؛ ونفايات الزئبق؛ والمواقع الملوثة. وهناك أيضاً أحكام بشأن الضبط وسجلات الجرد والإبلاغ من جانب الأطراف وتبادل المعلومات والمعلومات العامة والوعي والتثقيف والبحوث والتطوير والرصد والجوانب الصحية. وهناك أيضاً أحكام تتصل بالموارد المالية وبناء القدرات والمساعدة التقنية ونقل التكنولوجيا.

(٦) على سبيل المثال، K. Sundseth, J.M. Pacyna, E.G. Pacyna M. Belhaj and S. Astrom. (2010). Economic benefits from decreased mercury emissions: Projections for 2020. Journal of Cleaner Production. 18: 386-394
(٧) لهذه الأغراض، تشير "المعادن غير الحديدية" إلى الرصاص والزنك والنحاس الأحمر والذهب الصناعي.

وتقدّم المادة ٢ التعاريف التالية للزئبق ومركبات الزئبق، وأفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية:

”(ب) ‘أفضل التقنيات المتاحة’ تعني التقنيات الأكثر فعالية في منع، وحيثما يكون ذلك غير عملي، في الحد من انبعاثات وإطلاقات الزئبق في الهواء والماء والأراضي وأثر تلك الإطلاقات والانبعاثات على البيئة ككل، مع مراعاة الاعتبارات الاقتصادية والتقنية لطرف ما أو لمرفق ما موجود على أراضي ذلك الطرف. وفي هذا السياق:

”أفضل‘ يعني الأكثر فعالية في تحقيق مستوى عام مرتفع من حماية البيئة ككل؛

”التقنيات المتاحة‘، فيما يتعلق بطرف معيّن ومرفق معيّن على أراضي ذلك الطرف، تعني التقنيات التي تستخدم على نطاق يمكّن من التنفيذ في قطاع صناعي ذي صلة في ظل ظروف صالحة اقتصادياً وتقنياً، مع أخذ التكاليف والفوائد في الاعتبار، سواء استخدمت تلك التقنيات أو تم استحداثها، أو لم تستخدم أو تستحدث، على أراضي الطرف المعني، بشرط أن تكون متاحة لمشغل المرفق وفقاً لما يحدده ذلك الطرف؛

”التقنيات‘ تعني التكنولوجيات المستخدمة والممارسات التشغيلية والطرائق التي تُصمّم بها المنشآت وتُبنى وتصان ويجري تشغيلها وإخراجها من الخدمة؛

”(ج) ‘أفضل الممارسات البيئية‘ تعني تطبيق أنسب خليط من تدابير واستراتيجيات التحكم البيئي؛

”(د) ‘الزئبق‘ يعني الزئبق النقي (Hg(0), CAS No. 7439-97-6)؛

”(هـ) ‘مركب الزئبق‘ يعني أي مادة تتكون من ذرات من الزئبق ومن ذرة أو أكثر من عناصر كيميائية أخرى لا يمكن فصلها إلى مركبات مختلفة إلا من خلال تفاعلات كيميائية“.

وفيما يلي نص الفقرات من ١ إلى ٦ من المادة ٨ من الاتفاقية والمرفق دال.

المادة ٨

الانبعاثات

تُعنى هذه المادة بالضبط والتخفيض، حيثما أمكن، لانبعاثات الزئبق أو مركبات الزئبق المشار إليها غالباً بعبارة ”الزئبق الكلي“، في الغلاف الجوي، من خلال تدابير تهدف إلى ضبط الانبعاثات من المصادر الثابتة التي تدرج في فئات المصادر الواردة في المرفق دال.

لأغراض هذه المادة:

(أ) ”الانبعاثات“ تعني انبعاثات الزئبق ومركبات الزئبق في الغلاف الجوي؛

(ب) ”المصدر ذو الصلة“ يعني مصدراً يندرج في فئة من فئات المصادر الواردة في المرفق دال، ويجوز لأي طرف إذا ما اختار ذلك أن يضع معايير لتحديد المصادر المشمولة بفئة للمصادر مدرجة في المرفق دال طالما اشتملت المعايير المتعلقة بأي فئة على نسبة ٧٥ في المائة على الأقل من الانبعاثات الصادرة من تلك الفئة؛

(ج) ”المصدر الجديد“ يعني أي مصدر ذي صلة يندرج في فئة واردة في المرفق دال، بدأ بناؤه أو إجراء تعديلات كبيرة عليه قبل سنة واحدة على الأقل من تاريخ:

’١‘ دخول هذه الاتفاقية حيز النفاذ بالنسبة للطرف المعني؛ أو

٢' دخول تعديل على المرفق دال حيز النفاذ بالنسبة للطرف المعني ليصبح المصدر خاضعاً لأحكام هذه الاتفاقية بمقتضى ذلك التعديل لا غير؛

(د) "تعديل كبير" يعني إجراء تعديل على مصدر ذي صلة تنتج عنه زيادة كبيرة في الانبعاثات، باستثناء أي تغيير في الانبعاثات الناجمة عن استرداد منتج فرعي. ويُترك للطرف أمر البت فيما إذا كان التعديل كبيراً أو لا؛

(هـ) "المصدر القائم" يعني أي مصدر ذي صلة لا يُعتبر مصدراً جديداً؛

(و) "القيمة الحدية للانبعاثات" تعني وضع حد لتركيزات الزئبق أو لمركبات الزئبق أو كتلتها أو معدل انبعاثاتها الناجمة عن مصدر ثابت للانبعاثات، والمعبر عنها غالباً بعبارة "الزئبق الكلي".

يتخذ أي طرف لديه مصادر ذات تدابير لضبط الانبعاثات ويجوز له أن يقوم بإعداد خطة وطنية تُحدّد التدابير التي ستتحقق لضبط الانبعاثات والغايات والأهداف والنتائج المتوخاة منها. وتُعرض أي خطة على مؤتمر الأطراف في غضون أربع سنوات من تاريخ دخول الاتفاقية حيز النفاذ بالنسبة لذلك الطرف. وإذا وضع طرف خطة تنفيذ عملاً بالمادة ٢٠، يجوز للطرف أن يضمنها الخطة المعدّة عملاً بهذه الفقرة.

فيما يتعلق بالمصادر الجديدة لكل طرف، يشترط الطرف استخدام أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لضبط الانبعاثات وتخفيضها، وحيثما أمكن، في أقرب وقت ممكن من الناحية العملية، بحيث لا يتجاوز خمسة أعوام من تاريخ دخول الاتفاقية حيز النفاذ بالنسبة لذلك الطرف. ويجوز للطرف أن يستخدم قيماً حدية للانبعاثات تتسق وتطبيق أفضل التقنيات المتاحة.

يُدرج كل طرف، فيما يتعلق بمصادره القائمة، في أي خطة وطنية تديراً أو أكثر من التدابير التالية وأن يُنفذ ما يلي، مراعيًا في ذلك ظروفه الوطنية والجدوى الاقتصادية والتقنية للتدابير وملاءمة تكاليفها، وذلك في أقرب وقت ممكن من الناحية العملية، ولكن في موعد أقصاه عشرة أعوام بعد تاريخ دخول الاتفاقية حيز النفاذ بالنسبة له:

(أ) هدف كمي لضبط، وحيثما أمكن، لخفض الانبعاثات من المصادر ذات الصلة؛

(ب) القيم الحدية للانبعاثات بغية ضبط، وحيثما أمكن، خفض الانبعاثات من المصادر ذات الصلة؛

(ج) استخدام أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لضبط الانبعاثات من المصادر ذات الصلة؛

(د) استراتيجية لضبط الملوثات المتعددة يمكن أن توفر منافع مشتركة لضبط انبعاثات الزئبق؛

(هـ) تدابير بديلة لخفض الانبعاثات من المصادر ذات الصلة.

يجوز للأطراف أن تُطبّق نفس التدابير على جميع المصادر القائمة ذات الصلة، أو يجوز لها أن تعتمد تدابير مختلفة وفقاً لفئات المصادر المختلفة. ويكون الهدف من تلك التدابير المطبّقة من جانب الطرف إحراز تقدّم معقول في خفض الانبعاثات مع مرور الوقت.

المرفق دال

قائمة بالمصادر الثابتة لانبعاثات الزئبق ومركباته في الغلاف الجوي

فئة المصادر الثابتة:

محطات توليد الطاقة التي تعمل بالفحم الحجري؛

المراجل الصناعية التي تعمل بالفحم الحجري؛

عمليات الصهر والتحميص المستخدمة في إنتاج المعادن غير الحديدية؛^{1/}

مرافق ترميد النفايات؛

مرافق إنتاج خبث الاسمنت (الكلنكر)

^{1/} لأغراض هذا المرفق، تشير "المعادن غير الحديدية" إلى الرصاص والزنك والنحاس والذهب الصناعي.

٧-١ اعتبارات في اختيار أفضل التقنيات المتاحة وتنفيذها

يشكّل تعريف "أفضل التقنيات المتاحة" الوارد في المادة ٢ من الاتفاقية، والمعروض في القسم ١-٦ أعلاه، أساساً لقيام أي طرف بتحديد أفضل التقنيات المتاحة لأي مرفق في داخل أراضيه.

واستخدام أفضل التقنيات المتاحة من أجل الحد والتخفيض، حيثما أمكن، من الانبعاثات أمر مطلوب بالنسبة للمصادر الجديدة على النحو المحدد في الفقرة ٢ (ج) من المادة ٨ وهو واحد من عدة تدابير يمكن أن يلجأ إليها الطرف لاستعمالها بالنسبة للمصادر القائمة، على النحو المحدد في الفقرة ٢ (هـ) من المادة ٨. ويجوز لأي طرف أن يُطبّق نفس التدابير على جميع المصادر القائمة ذات الصلة أو أن يعتمد تدابير مختلفة في صدد فئات مختلفة من المصادر. ويهدف هذا القسم إلى دعم الأطراف في اختيار وتنفيذ أفضل التقنيات المتاحة.

ويمكن أن نتوقع أن تشمل عملية اختيار أفضل التقنيات المتاحة وتنفيذها الخطوات العامة التالية.

- الخطوة ١: تحديد المعلومات عن المصدر أو فئة المصدر. وقد يشتمل ذلك، دون أن يقتصر، على معلومات بشأن العمليات أو المواد الداخلة أو المواد الأولية أو الوقود، وعن مستويات النشاط الفعلي المتوقع، بما في ذلك كمية الناتج. ويمكن أن تشمل المعلومات الأخرى ذات الصلة العمر المتوقع للمرفق، والتي يرجح أن تتسم بأهمية خاصة في حالة النظر في مرفق قائم، وأي متطلبات أو خطط للحد من الملوثات الأخرى.
- الخطوة ٢: تعيين المدى الكامل لخيارات تقنيات الحد من الانبعاثات ومجموعات هذه الخيارات التي تتسم بأهمية للمصدر موضع النظر، بما في ذلك التقنيات الموصوفة في فصول هذا التوجيه بشأن التقنيات الشائعة وفئات المصادر المحددة.
- الخطوة ٣: من بين هذه الخيارات، تعيين الخيارات المحدية تقنياً، مع إيلاء النظر إلى التقنيات المنطبقة على نوع المرفق داخل القطاع، وكذلك على أي تحديدات مادية قد تؤثر على اختيار بعض التقنيات.
- الخطوة ٤: من هذه الخيارات، يتم اختيار تقنيات الضبط التي تتسم بأكثر قدر من الفعالية للحد من انبعاثات الزئبق وتخفيضها إن أمكن، مع مراعاة مستويات الأداء المذكورة في هذه التوجيهات، وللتوصل إلى مستوى عام مرتفع من حماية صحة الإنسان والبيئة ككل.
- الخطوة ٥: تحديد تلك الخيارات التي يمكن تنفيذها في ظروف مجدية اقتصادياً وتقنياً، مع مراعاة التكاليف والفوائد وما إن كان يمكن لمشغل المرفق الوصول إليها حسبما يرى الطرف المعني. ويلاحظ أن الخيارات التي يقع عليها الاختيار قد تختلف في حالة المرافق الجديدة والمرافق القائمة. وينبغي أيضاً إيلاء الاعتبار إلى ضرورة الصيانة السليمة والمراقبة التشغيلية للتقنيات، وكذلك الحفاظ على الأداء المتحقق مع مرور الوقت.

٨-١ مستويات الأداء

تشمل الفصول المنفردة عن كل فئة من فئات المصادر معلومات عن مستويات الأداء التي تحققت في المرافق التي تقوم بتشغيل تقنيات التحكم الموصوفة في هذه الفصول، في حالة توفر هذه المعلومات. وليس المقصود هو تفسير هذه المعلومات باعتبارها توصيات بشأن القيمة الحدية للانبعاثات. ويرد تعريف "القيمة الحدية للانبعاثات" في الفقرة ٢ (و) من المادة ٨ باعتبارها "وضع حد لتركيزات الزئبق أو مركبات الزئبق أو كتلتها أو معدل انبعاثاتها الناجمة عن مصدر ثابت للانبعاثات والمعبر عنها غالباً بعبارة 'الزئبق الكلي'". وتنص الفقرة ٤ من هذه المادة على أنه يجوز لأي طرف أن يستخدم قيماً حدية للانبعاثات تتسق وتطبق أفضل التقنيات المتاحة من أجل ضبط الانبعاثات وتخفيضها، حيثما أمكن. وتُدرج الفقرة ٥ من هذه المادة القيم الحدية للانبعاثات في قائمة التدابير التي يجوز للطرف أن يختار واحداً أو أكثر منها لتطبيقها على المصادر القائمة لديه. وإذا

اختار أي طرف أن يستعمل القيم الحدية للانبعاثات فينبغي له أن ينظر في العوامل المشابهة لتلك الموصوفة في القسم السابق فيما يتعلق باختيار أفضل التقنيات المتاحة وتطبيقها.

ويمكن الاطلاع على التوجيه بشأن الطريقة التي يمكن بها للأطراف أن تحدّد الأهداف وأن تضع القيم الحدية للانبعاثات بالنسبة للمصادر القائمة بموجب الاتفاقية في وثيقة منفصلة عنونها: "توجيه بشأن توفير الدعم للأطراف في تنفيذ التدابير الواردة في الفقرة ٥، وخاصة في تحديد الأهداف وفي وضع قيم الحدود القصوى للانبعاثات" (كانت موضع الإعداد في أيلول/سبتمبر ٢٠١٥).

٩-١ أفضل الممارسات البيئية

تُعرّف الاتفاقية "أفضل الممارسات البيئية" بأنها تعني "تطبيق أنسب خليط من تدابير واستراتيجيات التحكم البيئي"

والصيانة الجيدة للمرافق ومعدات القياس تُعتبر أمراً هاماً في التشغيل الفعال لتقنيات الضبط والرصد. ولا غنى عن العاملين المدربين تدريباً جيداً الذين يدركون ضرورة إيلاء الاهتمام إلى العمليات، وذلك من أجل كفاءة الأداء الجيد. والتخطيط الدقيق والالتزام من جميع المستويات داخل المنظمة التي تقوم بتشغيل المرفق ستساعد أيضاً على الحفاظ على الأداء، وكذلك عمليات المراقبة الإدارية وغير ذلك من ممارسات إدارة المرفق.

وترد المعلومات المتعلقة بأفضل الممارسات البيئية المتصلة بكل فئة من فئات المصادر في الفصل المتعلق بالفئة المعنية.

١٠-١ التأثيرات بين الوسائط

يمكن ضبط أو تخفيض انبعاثات الزئبق من فئات المصادر المذكورة في المرفق دال باستخدام التقنيات الموصوفة في هذه التوجيهات. وترد في الفصول المعنية المعلومات المتعلقة بالتأثيرات فيما بين الوسائط في صدد كل فئة من فئات المصادر. أما فيما يتعلق بالزئبق الذي يتم إزالته من غازات المدخن فيظهر في مكان آخر - وذلك مثلاً في المراحل الصلبة مثل الرماد المتطاير أو رماد القاع أو المراحل السائلة أو المراحل المختلطة بين الصلب والسائل مثل الحمأة. ونظراً لأن الزئبق يتركز بدرجة أكبر في هذه المواد عنه في المواد المدخلة، لذا ينبغي الاهتمام بتجنب إمكانية إطلاق الزئبق من خلال النض أو عمليات النقل بين الوسائط وغير ذلك من المكونات موضع القلق والناجحة عن التخلص من هذه الترسبات، أو عن استخدامها كعناصر مكوّنة في عمليات أخرى. وينبغي أن يضع المنظمون هذه العوامل في الاعتبار عند تعريف أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية. ويمكن أن تكون بعض المواد الأخرى ذات أهمية في شأن نفايات الزئبق، وخاصة المادة ١١.

١١-١ تقنيات ضبط الملوثات المتعددة

توجد تقنيات يمكن استخدامها لضبط انبعاثات مجموعة من الملوثات مثل الجسيمات الدقيقة والملوثات العضوية وثاني أكسيد النيتروجين وثاني أكسيد الكبريت والمعادن الثقيلة، بما فيها الزئبق. وينبغي النظر في مزايا استخدام التقنيات التي يمكن بها ضبط عدة ملوثات في وقت واحد من أجل الحصول على فوائد مشتركة مع ضبط الزئبق. وفي تقييم هذه التقنيات ينبغي أيضاً النظر في عوامل مثل كفاءة ضبط الزئبق وضبط الملوثات الأخرى وأي عواقب معاكسة محتملة، مثل تقليل الكفاءة في إطار النظام الشامل للتأثيرات الشاملة لعدة أوساط.

وتتضمن الفقرة ٥ من المادة ٨ استخدام استراتيجية لضبط الملوثات المتعددة يمكن أن توفرّ منافع مشتركة لضبط انبعاثات الزئبق باعتبارها خياراً لإدارة الانبعاثات من المصادر القائمة.

١٢-١ الاتفاقات الدولية الأخرى

قد تكون الأطراف في الاتفاقية أطرافاً أيضاً في اتفاقات بيئية أخرى عالمية أو إقليمية متعددة الأطراف ذات صلة وقد يتعيّن وضع هذه الاتفاقات الأخرى في الاعتبار إلى جانب اتفاقية ميناماتا. وعلى سبيل المثال، تغطي أحكام اتفاقية استكهولم المتعلقة بالملوثات العضوية الثابتة كثيراً من نفس فئات المصادر الواردة في المرفق دال لاتفاقية ميناماتا، ولذلك سيتعيّن على البلدان الأطراف في الاتفاقيتين أن تأخذ أيضاً في الاعتبار أي أحكام ذات صلة من تلك الاتفاقية^(٨).

وهناك اتفاقان يتصلان بهذا الموضوع وقد تكون بعض أطراف اتفاقية ميناماتا أطرافاً فيهما أيضاً وهما اتفاقية بازل المتعلقة بالتحكم في نقل النفايات الخطرة والتخلص منها عبر الحدود واتفاقية التلوث الجوي البعيد المدى عبر الحدود، التي اعتمدت في إطار لجنة الأمم المتحدة الاقتصادية لأوروبا.

١-١٢-١ اتفاقية بازل بشأن التحكم في نقل النفايات الخطرة والتخلص منها عبر الحدود

تهدف اتفاقية بازل إلى حماية صحة الإنسان والبيئة من الآثار الضارة الناجمة عن توليد وإدارة ونقل النفايات الخطرة وغيرها من النفايات والتخلص منها عبر الحدود.

ويمكن أن يولّد تنفيذ تدابير ضبط وتقليل انبعاثات الزئبق نفايات قد تتسم بالخطورة. ومعالجة هذه النفايات تندرج في نطاق الفقرة ٣ من المادة ١١ من اتفاقية ميناماتا التي تقتضي من الأطراف إدارة نفايات الزئبق بطريقة سليمة بيئياً، على أن تؤخذ في الاعتبار الالتزامات والمبادئ التوجيهية الموضوعية بموجب اتفاقية بازل، وتقتضي من أطراف اتفاقية بازل عدم نقل نفايات الزئبق عبر الحدود الدولية إلا لغرض التخلص السليم بيئياً منها طبقاً لتلك المادة ولاتفاقية بازل. وتتصل المبادئ التوجيهية التقنية، التي وضعت بموجب اتفاقية بازل بشأن إدارة النفايات، بإدارة الحمأة وغير ذلك من النفايات الناجمة عن التقاط الزئبق من المصادر ذات الصلة، ويمكن أن تكون ذات قيمة كبيرة في التقليل من الآثار الشاملة لعدة أوساط التي قد تنجم عن سوء إدارة هذه النفايات^(٩).

١-١٢-٢ اتفاقية التلوث الجوي البعيد المدى العابر للحدود

تهدف اتفاقية التلوث الجوي البعيد المدى العابر للحدود إلى الحد من تلوث الهواء وخفضه تدريجياً بقدر الإمكان ومنعه بما في ذلك التلوث بعيد المدى عبر الحدود الذي ينشأ عن مجموعة من الملوثات. وبموجب هذه الاتفاقية، تم اعتماد بروتوكول المعادن الثقيلة في عام ١٩٩٨ في آرهوس، الدانمرك، ودخل حيز النفاذ في عام ٢٠٠٣. ويستهدف هذا البروتوكول ثلاثة معادن: الكاديوم والرصاص والزئبق. وفئات المصادر الثابتة التي يغطيها البروتوكول تشمل المصادر ذات الصلة المذكورة في المرفق دال لاتفاقية ميناماتا.

ويتمثل أحد الالتزامات الأساسية التي يضطلع بها الأطراف في بروتوكول المعادن الثقيلة في تخفيض انبعاثاتها من هذه المعادن الثلاثة إلى أدنى من مستوياتها في عام ١٩٩٠ (أو أي سنة بديلة في الفترة بين عامي ١٩٨٥ و١٩٩٥). ويهدف البروتوكول إلى تقليل انبعاثات الكاديوم والرصاص والزئبق من المصادر الصناعية (صناعة الحديد والصلب وصناعة المعادن غير الحديدية وصناعة الاسمنت وصناعة الزجاج وصناعة الكلور والقلويات) وعمليات الاحتراق (توليد الطاقة والمراحل الصناعية) وترميد النفايات. ويفرض البروتوكول قيماً حدية صارمة لانبعاثات المصادر الثابتة ويشير بأفضل التقنيات المتاحة لهذه المصادر. وتم

(٨) يمكن الاطلاع على توجيهات تفصيلية بشأن استخدام أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية للوفاء بمتطلبات تلك الاتفاقية في الموقع: <http://chm.pops.int/Implementation/BATandBEP/Overview/tabid/371/Default.aspx>.

(٩) توجد المبادئ التوجيهية التقنية في الموقع:

<http://www.basel.int/Implementation/Publications/TechnicalGuidelines/tabid/2362/Default.aspx>

تعديل البروتوكول في عام ٢٠١٢ لتطبيق أوجه مرونة من أجل تسهيل انضمام أطراف جديدة، وخاصة البلدان من أوروبا الشرقية والقوقاز ووسط آسيا. وفي عام ٢٠١٢ تم أيضاً اعتماد وثيقة توجيه بشأن أفضل التقنيات المتاحة من أجل ضبط انبعاثات المعادن الثقيلة من فئات المصادر التي يغطيها البروتوكول.

١٣-١ شراكة الزئبق العالمية التابعة لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة

دعا مجلس إدارة برنامج البيئة إلى إقامة شراكات بين الحكومات وأصحاب المصلحة الآخرين كوسيلة للحد من المخاطر التي تتعرض لها صحة البشر والبيئة نتيجة لإطلاقات الزئبق في البيئة^(١٠). والهدف الشامل لشراكة الزئبق العالمية التي نشأت عن ذلك هو حماية صحة البشر والبيئة العالمية من انبعاثات الزئبق ومركباته من خلال الحد من الانبعاثات العالمية من الزئبق الناجم عن استخدامات بشرية في الهواء والمياه والأراضي، والقضاء بصورة نهائية على هذه الانبعاثات حيثما يكون ذلك ممكناً.

وتندرج في هذه الشراكة في الوقت الحاضر ثماني أولويات محدّدة للعمل (أو مجالات شراكة)، منها أربع أولويات تتصل بصورة خاصة بهذه التوجيهات: أي ضبط الزئبق الناتج عن حرق الفحم؛ وإدارة نفايات الزئبق؛ وإمدادات وتخزين الزئبق؛ وتخفيض الزئبق الناشئ عن صناعة الاسمنت.

وقد تم النظر في الخبرات المكتسبة داخل هذه المجالات في إطار الشراكة، إلى جانب التوجيه المتصل الذي وضع في إطار الشراكة، عند النظر في صياغة هذه المبادئ التوجيهية المتعلقة بأفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية.

ويمكن الاطلاع على مزيد من المعلومات في:

<http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Mercury/GlobalMercuryPartnership/tabid/1253/Default.aspx>

(١٠) قرار مجلس إدارة برنامج الأمم المتحدة للبيئة ٩/٢٣.

الفصل الثاني

التقنيات الشائعة

التقنيات الشائعة لخفض الانبعاثات

يقدم هذا الفصل معلومات عامة عن تقنيات الضبط المنطبقة على جميع فئات المصادر الثابتة المدرجة في المرفق دال. ويمكن الاطلاع على معلومات إضافية تتصل بأي قطاع بالتحديد في الفصل المتعلق بالقطاع المعني.

ومن الضروري لدراسة جميع الخيارات المحتملة المتصلة بالقطاع موضع الاهتمام أن يتم النظر في كلا التقنيات الشائعة الموصوفة في هذا القسم والتقنيات المحددة الموصوفة لكل قطاع.

ويتباين مدى قدرة أجهزة تنظيف الغبار على التقاط انبعاثات الزئبق المرتبط بالجسيمات. وعموماً تطبق معظم تقنيات تنظيف الغبار في جميع القطاعات. وتتوقف درجة ضبط الزئبق على الحالة الكيميائية وشكل الزئبق، أي ما إن كان الزئبق مؤكسداً أو أولياً. ويتم التقاط معظم الزئبق النقي في أجهزة تنظيف الغبار: ويمكن تعزيز كفاءة هذه الأجهزة لإزالة الزئبق من خلال أكسدة الزئبق الغازي. وأكثر التقنيات شيوعاً لتخفيف الغبار هي مرشحات الأكياس والمرسبات الكهروستاتيكية (ESP).

ومن التقنيات الشائعة عبر القطاعات لإزالة الزئبق بالتحديد استعمال الكربون المنشط، سواء تم حقنه في تيار غاز المدخنة أو في طبقة الترشيح. ولتحسين كفاءة الإزالة في الكربون المنشط يمكن استعمال عوامل الأكسدة (بمحفنها مثلاً في تيار غاز المدخنة أو تكثيفها على الكربون المنشط).

المرشحات القماشية

تستخدم مرشحات الأكياس (المرشحات القماشية والمرشحات النسيجية) عملية الترشيح لفصل جسيمات الغبار عن الغازات. وهي تمثل واحدة من أكثر الوسائل المتوفرة لجمع الغبار كفاءة وتحقيقاً لفعالية التكاليف، ويمكن أن تحقق كفاءة جمع تفوق من 99,99 في المائة للجسيمات الدقيقة جداً. وتدخل الغازات جهاز الترشيح وتمر في الأكياس القماشية. ويمكن صنع الأكياس من مواد مختلفة (مثل القطن المنسوج أو الملبد أو المواد التركيبية أو الألياف الزجاجية) حسب خصائص غاز المدخنة.

ولتحسين القدرة على ترشيح الغبار وزيادة العمر يتم في كثير من الأحيان تبطين مادة المرشح. وأكثر المواد شيوعاً هي الحجر الجيري الخامل كيميائياً (كربونات الكالسيوم). إذ أنه يزيد كفاءة جمع الغبار عن طريق تكوين ما يسمى كُسب المرشح. ويحسّن كُسب المرشح التقاط الجسيمات الدقيقة ويؤثر الحماية لمادة المرشح نفسها من الرطوبة أو الجسيمات الساحجة. وبدون التبطين المسبق فإن مادة المرشح تسمح للجسيمات الدقيقة بأن تتسرب من خلال نظام المرشح الكيسي، وخاصة في بداية العملية، نظراً لأن الكيس لا يستطيع أن يقوم إلا بجزء فقط من عملية الترشيح ويترك الأجزاء الأكثر دقة لكُسب المرشح الذي يعزز عمل المرشح.

وتمر الزئبق الغازي أساساً من خلال مرشح كيسي. ولذلك ينبغي من أجل زيادة كفاءة العملية تحويل الزئبق الغازي إلى شكل مؤكسد بقدر المستطاع، بحيث يمكن أن يلتصق بالجسيمات. وكفاءة المرشح الكيسي يمكن أن تزيد بتدابير مختلفة، مثل الاقتران بالحقن الجاف أو شبه الجاف (التحفيف بالرشح) وتوفير ترشيح إضافي وتركيب سطح تفاعلي على كسب المرشح.

المرسبات الكهروستاتيكية

تستعمل المرسبات الكهروستاتيكية القوى الكهروستاتيكية لفصل ذرات الغبار عن غازات العادم. وتتدفق الغازات المحملة بالغبار من خلال الممر الذي يتشكل بالكثودات التصريف والتجميع. وتتلقى الجسيمات المحمولة جواً شحنة سالبة مع مرورها من خلال المجال المؤيّن بين الإلكترودات. وهذه الجزيئات المشحونة تنجذب إلى إلكترود أرضي أو مشحون إيجابياً وتلتصق به. ويتم

إزالة المادة المتجمعة على الإلكترودات بجز أو ذبذبة إلكترودات التجميع، سواء بصورة مستمرة أو في فترات محددة سلفاً. ويمكن عادة تنظيف المرسبات بدون وقف تيار الهواء.

والعوامل الرئيسية التي تؤثر على كفاءة الجمع في المرسبات الكهروستاتيكية هي المقاومة الكهربائية وتوزيع حجم الجزيئات. والعوامل الأخرى التي تؤثر على هذه الكفاءة هي درجات الحرارة ومعدل تدفق غاز المدخنة ومحتوى الرطوبة وعوامل التكثيف في تيار الغاز أو زيادة سطح التجميع.

ويعمل المرسب الرطب بتيارات هوائية مشبعة ببخار الماء (نسبة رطوبة نسبية تبلغ مائة في المائة). وهذه المرسبات الرطبة تستعمل بصورة شائعة لإزالة قطرات السوائل مثل رذاذ حامض الكبريت من تيارات الغاز في العمليات الصناعية. وتستعمل المرسبات الرطبة بصورة شائعة أيضاً عندما تحتوي الغازات على نسبة رطوبة مرتفعة أو تحتوي على جسيمات دقيقة قابلة للاشتعال أو جسيمات لزجة بطبيعتها.

أجهزة التنظيف الرطبة

يوجد نوعان مختلفان من أجهزة التنظيف الرطبة المستعملة، أحدهما يستعمل أساساً لإزالة الغبار ويستعمل الآخر لإزالة المركبات الغازية الحمضية.

وفي المنظفات الرطبة لإزالة الغبار يتلامس سائل التنظيف (وهو الماء عادة) مع تيار غازي يحتوي على جسيمات الغبار. وينتج عن الاتصال القوي لتيار الغاز والسائل كفاءة عالية في إزالة الغبار. وتؤدي عملية الترطيب إلى تجمع الجسيمات الدقيقة مما يسهل جمعها. ومن أمثلة أجهزة التنظيف المذكورة أجهزة فينتوري أو أجهزة ثيسين أو أجهزة راديال فلو. ويمكن أن تكون كفاءة إزالة الغبار التي تتسم بها هذه الوحدات أكثر من ٩٨ في المائة، ولكن التركيز النهائي للغبار يكون مرتفعاً نسبياً (أكثر من ٥ ملغ/اللمتر المكعب العادي).

والمنظفات الرطبة المخصصة أساساً لإزالة المركبات الغازية الحمضية (وهي غالباً منظفات من نوع أبراج الرش) تزيل الملوثات مثل ثنائي أكسيد الكبريت وكلوريد الهيدروجين والهافنيوم. ويستخدم سائل لامتصاص المركبات. وهي كثيراً ما تنظف الغاز الذي تم تنظيف الغبار منه بالفعل.

والغازات "المنظفة" بواسطة نوعي أجهزة التنظيف تمر عادة من خلال مزيل الرذاذ لإزالة قطرات المياه من تيار الغاز. أما الماء الناتج من نظام التنظيف فيتم تنظيفه وتصريفه أو إعادة تدويره في جهاز الغاز.

ويمكن تحسين امتصاص الزئبق النقي بإضافة مركبات الكبريت أو الكربون المنشط لسائل جهاز التنظيف (ميللر وآخرون، ٢٠١٤).

والتهاطل هو تدبير آخر يستخدم كثيراً لإزالة الزئبق المؤكسد من مياه التنظيف. ويمكن أن تعمل مركبات الكبريت كعامل للتبلد، عند إضافتها إلى مياه الغسل لتحويل الزئبق القابل للذوبان بكفاءة إلى مركب غير قابل للذوبان. وهناك احتمال آخر لربط الزئبق مباشرة بعد تحويله في مرحلة السيولة ويتمثل في إضافة الكربون المنشط إلى مياه التنظيف (بيتيغ، ٢٠١٤).

ويمكن أن تحدث إعادة انبعاث الزئبق في حالة وجود مركبات الاختزال مثل الكبريت في مياه التنظيف. وفي هذه الحالة، يمكن تحويل الزئبق مرة أخرى إلى زئبق أولي وإعادة إطلاقه (تيسر وآخرون، ٢٠١٤). ويمكن تجنب ذلك من خلال كفاءة وجود أيونات يمكن أن يتفاعل معها الزئبق ليكون مركبات مثل الفلوريد أو الكلوريد أو البروميد أو اليوديد.

ملخص أجهزة تنظيف الغبار

يقدم الجدول ١ معلومات عن أداء أجهزة تنظيف الغبار

الجدول ١

أداء أجهزة تنظيف الغبار معبراً عنه بمتوسط تركيزات الغبار في الساعة

تركيزات الغبار بعد التنظيف (ملغ/م ^٣)	
٥ - ١ >	المرشحات النسيجية
١ >	المرشحات النسيجية، النوع الغشائي
١٥ - ٥ >	المرسبات الكهروستاتيكية الجافة
٥ - ١ >	المرسبات الكهروستاتيكية الرطبة
٢٠ >	أجهزة تنظيف الغبار عالية الكفاءة

المصدر: أخذ من وثيقة التوجيه بشأن أفضل التقنيات المتاحة لضبط انبعاثات المعادن الثقيلة ومركباتها من فئات المصادر المذكورة في المرفق الثاني لبروتوكول المعادن الثقيلة (ECE/EB.ALR//116, 2013)^(١١)

عوامل الإذابة والأكسدة

الكربون المنشط مذيب فعال لالتقاط الزئبق من غاز المداخن. ويمكن حقن الكربون المنشط في تيار غاز المداخن قبل دخول أجهزة تنظيف الغبار أو المرشحات الكيسية أو المرسبات الكهروستاتيكية أو يمكن توزيع غاز المداخن في كل أجزاء طبقة ترشيح كربونية. وفعالية الكربون المنشط لضبط الزئبق تتوقف على درجة الحرارة. وبالتحديد فإن التقاط الزئبق أو قدرة إزالة مادة ماصة بعينها تتزايد نمطياً مع انخفاض درجة حرارة غاز المدخنة. وتحدد درجة حرارة غاز المدخنة أساساً بتصميم المنشأة وعوامل التشغيل. وحسب خصائص المنشأة، مثل العناصر التي يتكون منها غاز المدخنة وتشغيل جهاز ضبط الغبار، تكون إزالة الزئبق فعالة نسبياً عند درجات حرارة تقل عن ١٧٥ درجة مئوية مع استخدام الكربون المنشط المعياري. وتوجد مواد ماصة من الكربون المنشط خاصة لدرجات الحرارة العالية من أجل التقاط الزئبق في درجات حرارة تزيد عن ١٧٥ درجة مئوية وتصل عموماً حتى ٣٥٠ درجة مئوية.

وجميع أنواع الكربون المنشط قابلة للاشتعال، وهي قابلة للاشتعال الذاتي وقابلة للانفجار في ظروف معينة. وتتوقف مخاطر النيران والانفجار على خصائص الاحتراق والانفجار في المنتج المسحوق، وكذلك على العمليات المستعملة وأحوال المنشأة. فالكربون المنشط بنوعية جيدة يخضع لقدر كبير من عمليات التجهيز وينطوي على درجة أقل من مخاطر النيران والانفجار بالمقارنة مع الكربون من النوعية المنخفضة. ولكن أنواع الكربون المنشط جزئياً يمكن أن تنطوي على مخاطرة عالية وقد تتطلب تعاملاً خاصاً. وينبغي اختيار المادة الماصة بعناية واستخدامها حسب التوجيهات المناسبة للتعامل، بما في ذلك استخدام معدات منع النيران والانفجار (مثل تجنب تيارات الهواء منخفضة السرعة عن طريق طبقات الترشيح وتجنب الترسيبات الكبيرة الحجم في العملية من خلال استمرار التصريف من القواديس ورصده من أجل تجنب مخاطر النيران، وجودة الصيانة الروتينية لتنظيف التناثر). وتخفيف الكربون بمواد خاملة يمكن أن يكبح إمكانية الانفجار. وفي التطبيقات التي يضاف فيها الكربون المنشط إلى تدفقات الغاز التي تنطوي على كميات قليلة من غاز العمليات قد يكون من المفيد خلط الكربون بمواد ماصة غير قابلة للاشتعال (ليكاتا وآخرون، ٢٠٠٧؛ ديرين وآخرون، ٢٠٠٨).

ويمكن تعزيز التقاط الزئبق بإضافة عوامل الأكسدة (مثل الهالوجينات) إلى غاز المدخنة أو استخدام الكربون المنشط المحقون بالهالوجين أو الكبريت. ويرد وصف هذه التقنيات بمزيد من التفصيل في الفصول الخاصة بالقطاعات. وهناك خطر محتمل من

(١١) يلاحظ وجود خلاف بشأن مستويات الأكسجين المستعملة للتمثيل عن كمية التخفيف الحاصل، وينبغي القيام بمزيد من البحث.

إمكانية ظهور الديوكسين والفيوران نتيجة ذلك، وخاصة في المنتجات الثانوية، مثل الرماد والحماة. وينبغي أن يؤخذ ذلك في الاعتبار.

وينبغي التعامل مع نفايات الكربون المنشط وفقاً للمادة ١١ (نفايات الزئبق) ووفقاً لأي لوائح وطنية معمول بها. ويوضح الجدول ٢ الأداء الأدنى المتوقع لتقنيات الكربون المنشط من أجل إزالة الزئبق.

الجدول ٢

الأداء الأدنى المتوقع لتقنيات الكربون المنشط لإزالة الزئبق معبراً عنه بمتوسط تراكيز الزئبق في الساعة

محتوى الزئبق بعد التنظيف (ملغ/م ^٣)	
> ٠,٠١	مرشح كربوني
> ٠,٠١	مرشح كربوني محقون بالكبريت
> ٠,٠٥	حقن الكربون + فصل الغبار
٠,٠٠١	حقن الكربون المنشط المبروم + فصل الغبار

المصدر: أخذ من وثيقة التوجيه بشأن أفضل التقنيات المتاحة لضبط انبعاثات المعادن الثقيلة ومركباتها من فئات المصادر المذكورة في المرفق الثاني لبروتوكول المعادن الثقيلة (ECE/EB.AIR/116, 2013)

وتتوقف درجة ضبط الزئبق في الجدول ٢ إلى حد كبير على الحالة الكيميائية للزئبق وشكله (على سبيل المثال، ما إن كان الزئبق مؤكسداً أو مرتبطاً بجسيمات)، وعلى التركيز الأولي. ويتوقف تطبيق هذه التدابير على العمليات المحددة ويكون أكثر أهمية عندما تكون تراكيز الزئبق في غاز المدخنة مرتفعة. وتتضمن وثائق القطاعات أمثلة لمستويات أداء فرادى التقنيات أو مجموعات التقنيات.

الفصل الثالث

الرصد

رصد انبعاثات الزئبق

١ - مقدمة

رصد انبعاثات الزئبق هو عنصر مكون رئيسي لتمكين أي طرف من تقييم أداء التدابير التي يطبقها. ولذلك يصف هذا الفصل التقنيات العامة التي قد ينظر الطرف في تطبيقها لرصد الانبعاثات. وبالإضافة إلى ذلك، يجري تناول تقنيات رصد الانبعاثات الخاصة بفتات المصادر الثابتة المذكورة في المرفق دال في الفصول ذات الصلة من هذه التوجيهات. ولا تشمل المادة ٨ التزامات محددة بشأن رصد الانبعاثات. ولكن الفقرة ٦ من هذه المادة تقضي بأن تحقق التدابير التي يطبقها أي طرف تقدماً معقولاً في خفض الانبعاثات مع مرور الوقت. وبالإضافة إلى ذلك، تقضي الفقرة ١١ بأن يبلغ كل طرف (عملاً بالمادة ٢١) عن فعالية التدابير التي اتخذها في سبيل ضبط، وحيثما أمكن، خفض انبعاثات الزئبق ومركبات الزئبق من المصادر الثابتة المدرجة في فئات المصادر المذكورة في المرفق دال.

واستفادت عملية إعداد التوجيهات من الخبرات ذات الصلة على المستويين الوطني والإقليمي. ويشار بإحالة مرجعية إلى بعض هذه الخبرات لأغراض الاطلاع. ولا تمس الإحالة المرجعية إلى هذه المعلومات بأي حال من الأحوال باستقلالية مؤتمر الأطراف أو استقلالية طرف ما وفقاً للمادة ٨. وتستند أي مناقشات بشأن التكاليف إلى المعلومات التي كانت متاحة وقت إعداد وثيقة التوجيهات. وتجدر الإشارة إلى أنه من المتوقع أن تتغير التكاليف مع مرور الوقت.

٢ - نظرة عامة

يمثل رصد انبعاثات الزئبق جانباً جوهرياً في التنفيذ الشامل لأفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية من أجل ضبط انبعاثات الزئبق في البيئة ومن أجل الحفاظ على مستوى مرتفع من كفاءة تشغيل تقنيات التخفيف المستعملة. وينبغي أن يجري رصد انبعاثات الزئبق وفقاً لأفضل الممارسات العامة مع استعمال أساليب معتمدة أو مقبولة. وتلزم بيانات تمثيلية وموثوقة وسريعة عن رصد انبعاثات الزئبق من أجل تقييم وكفاءة فعالية تقنيات ضبط انبعاثات الزئبق المستعملة في أي مرفق.

وينبغي أن تضطلع جميع مصادر انبعاثات الزئبق ذات الصلة برصد الانبعاثات. وفي حين أن هذه المقدمة تتضمن قائمة التقنيات فإن كل مصدر معني يمكن أن يتخذ التقنيات والممارسات المنطبقة بوجه خاص من أجل الرصد، والتي يشار إليها في فرادى الفصول التي تتألف منها هذه التوجيهات.

١-٢ الخطوات العامة في إجراء رصد انبعاثات الزئبق

الخطوة الأولى في إجراء رصد انبعاثات الزئبق هي إنشاء خط أساس للأداء، سواء من خلال أخذ قياسات مباشرة لتركيزات الزئبق في تيارات الغاز أو استخدام القياسات غير المباشرة لتقدير انبعاثات المرفق. وبعد ذلك، يؤخذ مزيد من القياسات في فترات زمنية محددة (يومياً أو أسبوعياً أو شهرياً على سبيل المثال) لتوصيف تركيز الزئبق في الغاز أو انبعاثات الزئبق في ذلك الوقت. وعندئذ يتم الرصد بتجميع وتحليل بيانات قياس الانبعاثات لملاحظة الاتجاهات في الانبعاثات وأداء التشغيل. وإذا أشارت القياسات إلى وجود أشياء تبعث على القلق، مثل زيادة تركيزات الزئبق مع مرور الوقت أو فترات ذروة لانبعاثات الزئبق تصاحب بعض عمليات المنشأة فعندئذ ينبغي اتخاذ إجراء سريع من جانب المرفق لتصحيح الحالة.

٢-٢ اعتبارات في اختيار نهج القياس أو الرصد

ينبغي أن يبدأ اختيار نهج القياس أو الرصد ببحث النتائج المرجوة. ويمكن القيام بقياسات دورية قصيرة الأجل، في فترات زمنية قصيرة مثل ساعة واحدة أو يوم واحد، من أجل توفير مردود سريع من المعلومات لتحسين العملية إلى الحد الأمثل. والقياسات الطويلة الأجل، مثل القياسات التي تجري على مدى عدة أشهر أو على مدى سنة، مع استعمال معدات تقام بصورة دائمة على أساس شبه مستمر، قد تكون مرغوبة من أجل التبليغ عن جرد الانبعاثات. والرصد المستمر للانبعاثات الذي يجري تنفيذه في الوقت الحاضر في بعض البلدان يمكن استخدامه لضبط العملية إذا كانت انبعاثات الزئبق تتباين تبايناً كبيراً، وذلك على سبيل المثال بسبب التغير السريع في مستوى الزئبق في مواد التغذية الأولية.

وبالإضافة إلى ذلك، يلزم وضع الخصائص المحددة للموقع في الاعتبار عند اختيار أكثر أساليب الرصد ملاءمة وتخطيط حملة أخذ العينات. وحسب العمليات المستخدمة يمكن أن يوجد الزئبق في شكل زئبق ملتصق بالجسيمات أو زئبق أولي غازي (Hg^0) أو في شكله الغازي المؤين، Hg^+ أو Hg^{2+} أو بخليط من هذه الأشكال. وقد تكون الفواصل متباينة إلى حد كبير بين المرافق التي تقوم بعمليات متشابهة. وفي بعض العمليات قد يكون من المفيد قياس هذه الأنواع المختلفة من الزئبق بصورة فردية، وذلك مثلاً بتوفير مُدخلات تساعد في اتخاذ قرارات بشأن تكنولوجيات الضبط الفعالة أو إجراء تقييمات للمخاطرة.

وينبغي أن تكون نقطة جمع العينات في مكان يسهل الوصول إليه وأن تفي باشتراطات الصحة والسلامة المهنيين وأن تفي بالاشتراطات التنظيمية وأن تسمح باستعادة العينات التمثيلية. ومن الأمثل أن تستخدم نفس نقاط جمع العينات في الحملات التالية لجمع العينات من أجل كفاءة إمكانية المقارنة بين النتائج. ولمنع تخفيف العينات وتجنب الوصول إلى نتائج منخفضة زائفة ينبغي ألا يتسرب الهواء المحيط إلى نقاط العينة. ويفضل أن توضع ملامح تدفق سرعة الغاز في الاعتبار عند تعيين موقع العينة من أجل تجنب المناطق التي تتسم باضطراب التدفق، مما يؤثر على الصفة التمثيلية للعينة. وتتوافر معلومات تفصيلية عن تصميم وإنشاء نقاط القياس في التوجيه الأوروبي EN 15259: 2007^(١٢): نوعية الهواء - قياس انبعاثات المصادر الثابتة - اشتراطات أقسام ومواقع القياس وهدف وخطة وتقرير القياس". وينطبق هذا التوجيه على القياسات المستمرة وكذلك القياسات غير المستقرة.

وللحصول على بيانات تمثيلية، ينبغي تحديد توقيت العينة ومدتها وتكرارها من خلال دراسة عدة بارامترات، تشمل أسلوب القياس والرصد المستعمل، وموقع القياس، وظروف تشغيل المرفق، والتباينات العملية والاشتراطات الخاصة بالموقع، لتوضيح مدى الامتثال بموجب العملية التنظيمية المنطبقة. وينبغي أن تؤخذ العينات في ظروف تمثل العمليات العادية للمرفق. وإذا كانت الانبعاثات متباينة إلى حد كبير أو إذا كانت الانبعاثات تؤخذ من عملية متقطعة فينبغي استعمال عينة ذات مدة أطول أو جمع مزيد من العينات (مثل العينات المأخوذة عبر المجموعة المتقطعة بأكملها) من أجل الحصول على متوسط قياس يمكن الوثوق به. وبالإضافة إلى ذلك قد يستلزم انخفاض تركيزات الزئبق في تيار العينة فترات أطول من أجل توفير كتلة عينة إجمالية تزيد عن حد الكشف المستخدم في الأسلوب المطبق. وبالإضافة إلى ذلك، توفر العينات المركبة الدورية - أكثر من نصف ساعة أو ١٢ ساعة أو ٢٤ ساعة على سبيل المثال - نتائج تمثيلية بدرجة أكبر مقارنة بالعينات المأخوذة بصورة عشوائية.

ويمكن أن تتباين انبعاثات الزئبق بصورة هامة داخل المرفق الواحد مع مرور الوقت أو بين المرافق التي تقوم بعمليات متشابهة، بسبب تباين محتوى الزئبق في المواد الداخلة في العملية. ويمكن أن تتغير تركيزات الزئبق بصورة سريعة في الوقود أو المواد الخام

(١٢) اللجنة الأوروبية للتوحيد القياسي EN 15259: 2007: نوعية الهواء، قياس انبعاثات المصادر الثابتة - اشتراطات أقسام ومواقع القياس وهدف وخطة وتقرير القياس، ١٨ آب/أغسطس ٢٠٠٧:

http://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT:22623&cs=106F3444821A456A90F21590F3BFF8582

أو المدخلات الأخرى مثل النفايات. وأثناء إجراء قياس الانبعاثات ينبغي أيضاً توثيق محتوى الزئبق في مدخلات العملية للمساعدة على ضمان الجودة. ويجب أثناء جمع العينات الحرص بقدر الإمكان على كفاءة تشغيل العملية في ظروف تمثيلية وأن تكون تراكيز الزئبق في تيارات المدخلات ممثلة لمواد التغذية العادية، وعلى الإقلال إلى أدنى حد من الانبعاثات الهاربة. وإذا لم تكن ظروف التشغيل نمطية فإن الاستقراء الخارجي لبيانات العينة قد يتيح نتائج بهامش أكبر من الخطأ.

وينبغي توثيق ظروف التشغيل طوال حملة جمع العينات. وينبغي القيام بتسجيل دقيق للبارامترات المحددة، مثل معدل تدفق الغاز الحجمي ودرجة حرارة الغاز ومحتوى بخار الماء في الغاز والضغط الاستاتيكي لأنبوب الغاز والضغط الجوي^(١٣)، وذلك من أجل تحويل تراكيز الزئبق التي يتم قياسها إلى ظروف مرجعية معيارية (صفر درجة مئوية، ١ ضغط جوي، محتوى الأكسجين المقاس أو المرجعي وعلى قاعدة غاز جافة). ويمكن تحديد كمية الزئبق التي يجري إطلاقها بضرب تركيز الزئبق في غاز العادم وقسمته على معدل تدفق الغاز الحجمي الذي يمر من المدخنة، على النحو التالي:

على سبيل المثال:

$$E_{Hg} = C_{Hg} \times F \times T$$

حيث:

$$E_{Hg} = \text{الانبعاثات الثابتة للزئبق (كغ/سنة)}$$

$$C_{Hg} = \text{تركيز الزئبق في تيار الغاز (كغ/م}^3\text{)}$$

$$F = \text{معدل التدفق الحجمي لتيار الغاز (م}^3\text{/ساعة)}$$

$$T = \text{وقت التشغيل سنوياً (ساعة/سنة)}$$

وتعتمد الأساليب الأكثر مباشرة في رصد الانبعاثات على أخذ العينات عند مصدر ثابت، مثل أنبوب المدخنة. ولا يجري عادة قياس الانبعاثات المنتشرة، بما فيها الانبعاثات الهاربة، في العادة، والمنهجيات الموجودة فعلاً لقياس الانبعاثات المنتشرة تؤدي نمطياً إلى نتائج تنطوي على درجة كبيرة من عدم التأكد. وهكذا، ينبغي أن يلاحظ أن نتائج رصد الانبعاثات من المصادر الثابتة قد لا تقدم بيانات كاملة عن مجموع انبعاثات الزئبق من المرفق.

وينبغي أن يستند اختيار أسلوب الرصد إلى عدة عوامل، مثل خصائص الموقع ومحددات العملية وتأكيد القياس واعتبارات التكلفة والمتطلبات التنظيمية ومتطلبات الصيانة. ولمقارنة انبعاثات الزئبق من المرفق مع مرور الوقت، ينبغي استعمال أساليب متسقة لأخذ العينات في السنوات اللاحقة.

٢-٣ أساليب القياس المباشر

تعتبر أساليب القياس المباشر عموماً أكثر التقنيات موثوقة لرصد انبعاثات الزئبق. وعند إجراء هذه الأساليب بطريقة صحيحة فإنها يمكن أن توفر بيانات تمثيلية موثوقة تؤدي إلى قياس أكثر دقة لانبعاثات الزئبق الفعلية من المرفق.

٢-٣-١ القياسات قصيرة الأجل

٢-٣-١-١ أخذ العينات بجهاز الارتطام

تؤخذ عينات انبعاثات الزئبق بجهاز الارتطام من مصدر ثابت بالقيام يدوياً بجمع عينة من غاز العادم من فتحة خروج مثل أنبوب المدخنة أو المجرى بنظام المعاينة المتساوية الحركة، حيث يكون تيار غاز العينة الذي يتم استخراجها بنفس سرعة التيار الرئيسي. وتأخذ المعاينة المتساوية الحركة في الاعتبار التغيرات في معدل تدفق الغاز وتحميل بعض الجسيمات في الغاز. ولكن هذا الأسلوب ليس مناسباً في حالة الغازات التي تحمل الجسيمات بصورة كثيفة.

ويتطلب هذا الأسلوب استعمال قطار معاينة معقد لاستعادة الزئبق من تيار الغاز في شكل محلول يتم إرساله بعدئذٍ إلى التحليل في المختبر. وفي حين أن هذا الأسلوب يسمح بدقة جيدة في قياس تركيز الزئبق فإنه يتطلب حضوراً مستمراً أثناء فترة جمع العينة. ومن مزايا هذا الأسلوب أن الاستعادة تكون ممكنة في حالتي وجود الزئبق في شكل غازي وفي وجود الزئبق أو ملتصقاً بجسيمات دقيقة. وبسبب تعقد هذا الإجراء يتجه إجراء اختبار المصدر إلى أن يكون في فترات دورية فقط (مرة أو مرتين في السنة على سبيل المثال). وعموماً، تعين المرافق خبراء استشاريين متخصصين في اختبار المصدر من أجل أخذ العينات وإجراء التحليل.

ويتم إدخال مسبار وصنبور عينة في مجرى الغاز الخارج لاستخراج عينة تمثيلية في فترة زمنية محددة. ونظراً لأن أخذ العينات بجهاز الارتطام لا يجري عادة إلا بضعة مرات في السنة كحد أقصى فإن العينات ينبغي أن تؤخذ عند تشغيل العملية في حالة مستقرة للسماح للاستقراء الخارجي للبيانات خلال سنة تشغيل. وينبغي توثيق ظروف التشغيل قبل حملة أخذ العينات وأثناءها وبعدها. وفي الولايات المتحدة، تتمثل الممارسة العامة في أخذ ثلاث عينات بجهاز الارتطام، تمتد كل منها لعدة ساعات في ظروف تشغيل نمطية، وحساب متوسط النتائج للتوصل إلى قيمة التركيز النهائية. والدقة في تجهيز جهاز الارتطام والتعامل مع المحاليل بعد ذلك تتسم بأهمية حاسمة لنجاح أساليب الارتطام. وتتصل أخطاء القياس في كثير من الأحيان بضياح الزئبق من المحاليل. ولذلك فمن الجوهرى تجنب أي ضياح للعينة نظراً لأن ذلك سيسبب نتائج اختبار منخفضة بصورة مضللة.

ونظراً لأن هذا الأسلوب ليس من أساليب الرصد المستمر للانبعاثات فإن النتائج التي يتم الحصول عليها لا تقدم بيانات بشأن انبعاثات الزئبق أثناء الأنشطة غير المنتظمة، مثل التآرجحات الواسعة في الإنتاج وبدء العمليات أو إغلاق المنشأة أو اضطراب العمل فيها. وينبغي أن يلاحظ أن انبعاثات الزئبق المتولدة أثناء هذه الأحداث يمكن أن تكون أعلى أو أقل بدرجة كبيرة عن ظروف التشغيل العادية.

ولكن يمكن حتى في ظروف الأحوال المستقرة العادية أن يحدث تباين كبير في أحجام الزئبق المنبعثة عندما يتذبذب محتوى الزئبق في الوقود أو مواد التغذية الأولية في فترات قصيرة من الوقت. وبالتحديد، قد يحدث في مرافق ترميد النفايات والاسمنت التي تستخدم وقود الفضلات أن يصعب التنبؤ بمحتوى الزئبق الذي يدخل النظام أو المرفق. وبالمثل، قد يتغير الزئبق في تغذيات الأفران بسرعة حسب المركّزات التي يجري تجهيزها، في حالة قطاع المعادن غير الحديدية. وفي هذه الحالات، فإن النتائج المتجمعة من أخذ العينات بجهاز الارتطام قد لا توفر بيانات تمثيلية في حالة استقراءها خارجياً في فترة طويلة من الوقت (مثل المتوسطات الثانوية). وهكذا، فإن زيادة عدد مرات أخذ العينات (على سبيل المثال زيادتها إلى ثلاثة قياسات في السنة طوال سنوات كثيرة) يمكن أن يوفر فهماً أفضل لانبعاثات المصدر الفعلية مع مرور الوقت.

وللحصول على القيمة القصوى وأغراض الاستثمار ينبغي إجراء اختبار انبعاثات الزئبق في المصدر أثناء حملات أكثر اتساعاً لجمع العينات للملوثات الهوائية مثل الجسيمات الدقيقة وأكاسيد النتروجين وثنائي أكسيد الكبريت والمركبات العضوية المتطايرة. وقد تؤدي إضافة اختبار الزئبق عند إجراء هذه الحملات الأكثر اتساعاً لأخذ عينات الملوثات الهوائية إلى زيادة تكاليف تشغيل المرفق. وتتوقف التكاليف الفعلية على عوامل مختلفة مثل أسلوب أخذ العينات وعدد مرات المعاينة وخدمات الدعم وأساليب التحليل وتجهيز الموقع.

الأساليب المرجعية الموجودة:

- الأسلوب EN13211:2001/AC: 2005 - نوعية الهواء - انبعاثات المصادر الثابتة - الأسلوب اليدوي لإجمالي تركيز مجموع الزئبق^(١٤)

(١٤) اللجنة الأوروبية للتوحيد القياسي، EN 13211:2001/AC:2005: نوعية الهواء - انبعاثات المصادر الثابتة - الأسلوب اليدوي لإجمالي تركيز مجموع الزئبق، ١٥ شباط/فبراير ٢٠٠٥.

هذا هو الأسلوب المرجعي المستعمل في أوروبا لقياس مجموع الزئبق. وينطبق هذا الأسلوب على مدى تركيزات مجموع الزئبق من ٠,٠٠١ إلى ٠,٥ مللي غرام/م^٣ في غازات العادم. والعملية أسلوب يدوي لتحديد تركيز الزئبق الكلي باستعمال محلول مائي حمضي من برمغنات البوتاسيوم أو ثاني كرومات البوتاسيوم من أجل أخذ عينة الزئبق في طور البخار مع استخدام مرشح ورقي لجمع الزئبق الملتصق بالجسيمات. وينبغي أن يكون زمن أخذ العينة بين ٣٠ دقيقة وساعتين.

- وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة الأسلوب ٢٩ - (USEPA Method 29) - انبعاثات المعادن من المصادر الثابتة^(١٥)

في هذا الأسلوب يتم جمع انبعاثات الجزيئات بطريقة متساوية الحركة في المسبار وعلى مرشح ساخن، ثم يتم جمع الانبعاثات الغازية في محلول حمضي مائي من بيروكسيد الهيدروجين (بعد تحليله لاكتشاف جميع المعادن بما فيها الزئبق) ومحلول حمضي مائي من برمغنات البوتاسيوم (بعد تحليله للزئبق فقط). ويتم هضم العينات التي تمت استعدادها وتحليل أجزاء ملائمة لاكتشاف الزئبق بواسطة مطيافية الامتزاز الذري بالبخار البارد (ويشار إليها أيضاً باسم CVAAS) ولاكتشاف مختلف المعادن الأخرى باستخدام المطيافية الكتلية البلازمية المقرونة بالحث (ويشار إليها أيضاً باسم ICP-MS). وهذا الأسلوب يناسب قياس تركيزات الزئبق التي تتراوح بين قرابة ٠,٢ إلى ١٠٠ ميكروغرام/م^٣. ونظراً لأن هذا الأسلوب يجمع الزئبق المؤكسد في محلول بيروكسيد الهيدروجين فإنه يلائم تحديد مختلف أنواع الزئبق.

- وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، (US EPA SW-846 Method 0060) - تحديد المعادن في انبعاثات المداخن^(١٦)

يستعمل هذا الأسلوب لتحديد تركيز المعادن في انبعاثات المداخن من وحدات ترميد النفايات الخطرة وعمليات الاحتراق المشابهة. وفي هذا الأسلوب، يتم سحب عينة من تيار غاز المدخنة بطريقة متساوية الحركة من خلال مسبار نظام ترشيح. ويتم جمع انبعاثات الجسيمات في المسبار وعلى مرشح ساخن وجمع الانبعاثات الغازية في سلسلة من أجهزة الارتطام المبردة. ويكون جهازان من أجهزة الارتطام فارغين، بينما يحتوي جهازان آخران منها على محلول مائي من حامض النيتريك المخفف مقترناً بيروكسيد الهيدروجين المخفف، ويحتوي جهازا ارتطام آخران على محلول من برمغنات البوتاسيوم الحمضي، في حين يحتوي جهاز الارتطام الأخير على مخفف.

ويتهم هضم العينات المسترجعة وتحليل أجزاء ملائمة لاكتشاف الزئبق بواسطة مطيافية CVAAS. ويمكن تحليل الأجزاء الباقية لاكتشاف المعادن الأخرى بمطيافية الانبعاثات الذرية البلازمية المقرونة بالحث (ICP-AES) أو مطيافية الامتزاز الذري اللهي (FLAA) أو المطيافية الكتلية ICP-MS.

- الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد الأسلوب ASTM D6784-02 - (اعتمد مرة أخرى في ٢٠٠٨) - أسلوب الاختبار الموحد بشأن الزئبق النقي والمؤكسد والجسيمات ومجموع الزئبق في غاز المداخن المولدة من مصادر ثابتة تعمل بحرق الفحم (طريقة أونتريو هيدرو)^(١٧)

في هذا الأسلوب يتم سحب عينة من تيار غاز المدخنة بطريقة متساوية الحركة من خلال مسبار ونظام ترشيح مع الحفاظ على درجة حرارة تبلغ ١٢٠ درجة مئوية أو درجة حرارة غاز المدخنة (أيهما أكبر)، وبعد ذلك يتم استخدام سلسلة من أجهزة

http://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:25042,6245&cs=19B884B499893080A.731C45504F6F2FB2

(١٥) وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة الأمريكية، "الأسلوب ٢٩ - الانبعاثات المعدنية من المصادر الثابتة"

<http://www.epa.gov/ttn/emc/methods/method29.html>

(١٦) وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، "Method 0060 - تحديد المعادن من انبعاثات المداخن".

<http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/0060.pdf>.

(١٧) الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد (ASTM) "أسلوب الاختبار الموحد بشأن الزئبق النقي والمؤكسد والجسيمات ومجموع الزئبق في غاز المداخن المولدة من مصادر ثابتة تعمل بحرق الفحم (طريقة أونتريو هيدرو)"; ٢٠٠٨. <http://www.astm.org/Standards/D6784.htm>

الارتطام في حمام ثلج. ويتم جمع الزئبق المرتبط بالجسيمات في النصف الأمامي من قاطرة أخذ العينة. ويتم جمع الزئبق المؤكسد في أجهزة ارتطام تحتوي على محلول كلوريد البوتاسيوم المائي المبرد.

ويتم جمع الزئبق النقي في أجهزة ارتطام تالية (يحتوي واحد من أجهزة الارتطام على محلول حمضي مائي مبرد من بيروكسيد الهيدروجين وتحتوي ثلاثة أجهزة على محاليل مائية مبردة من برمنغنات البوتاسيوم). ويتم استعادة العينات وهضمها ثم تحليلها لاكتشاف الزئبق باستخدام مطيافية CVAAS أو مطيافية الفلورة الذرية بالبخار البارد (CVAFS). وينطبق نطاق هذا الأسلوب على تحديد انبعاثات الزئبق النقي والمؤكسد والعالق بالجسيمات والزئبق الكلي من مصادر ثابتة تعمل بالفحم بتركيزات تتراوح من قرابة ٠,٢ إلى ١٠٠ ميكروغرام/م^٣.

• المعايير الصناعية اليابانية - الأسلوب k0222 (المادة ٤ (١) - أساليب تحديد الزئبق في غاز المداخن (أسلوب الامتزاز الرطب والامتزاز الذري بالبخار البارد)^(١٨)

يستخدم هذا الأسلوب المرجعي من اليابان لقياس مجموع الزئبق في طور البخار في غاز العينة. وفي هذا الأسلوب، يتم جمع زئبق طور البخار في محلول حمضي مائي من برمنغنات البوتاسيوم (أخذ عينات غير محدودة بطريقة متساوية الحركة). ويتم جمع الغبار الذي يحتوي على الزئبق الملصق بالجسيمات في غاز المدخنة على مرشح وفقاً للأسلوب المرجعي JIS Z 8808: ٢٠١٣^(١٩) "أساليب قياس تركيز الغبار في غاز المدخنة". ويتم هضم العينات المستعادة وتحليل أجزاء ملائمة لاكتشاف الزئبق بمطيافية الامتزاز الذري بالبخار البارد.

٢-٣-١-٢ أخذ العينات بالمصائد الماصّة

توفر المصائد الماصّة قياساً متوسط تركيز الزئبق على مدى فترة أخذ العينات بطريقة تشبه أساليب أجهزة الارتطام. وبالإضافة إلى ذلك، توفر المصائد الماصّة استقراراً أكبر للاحتفاظ بالزئبق وبروتوكولاً أكثر بساطة لأخذ العينات، مما يسمح بأخذ العينات دون حضور أحد على مدى فترات طويلة من الزمن.

وتستعمل المصائد الماصّة لقياس انبعاثات الزئبق من مصادر ثابتة ذات تركيزات منخفضة من الجسيمات. وعموماً، تؤخذ العينات في أي موقع يلي جهاز التحكم بالجسيمات.

ونظراً، يتم استخراج عينات مزدوجة باستعمال مسابر تُدخل إلى تيار الغاز. وهذه المسابر تحتوي على مصائد ماصّة، تعمل على تركيز الزئبق من الغاز. وتتكون المادة الماصّة أساساً من كربون مُهلجن. وتهدف المصائد الماصّة العادية إلى قياس الزئبق الغازي، ولكن بسبب تشغيل أسلوب أخذ العينات، يمكن سحب الجسيمات التي تحتوي على زئبق في المصائد الماصّة. ويتم تحليل هذه الجسيمات ويضاف المقدار الذي تم قياسه إلى مقادير القاعدة الكربونية للحصول على قيمة الزئبق الكلي. ومع ذلك فإن أسلوب المصيدة الماصّة لا يجمع الجسيمات بطريقة متساوية ولهذا فهو ليس أسلوباً دقيقاً لقياس الزئبق الملصق بالجسيمات. ورغم ذلك، ونظراً لأنه من المنتظر أن تقوم المرافق المعنية بتشغيل أجهزة فعالة لضبط الجسيمات فلا بد وأن يوجد حد أدنى من الزئبق الذي تحمله الجسيمات في مجرى الغاز.

وفي نهاية فترة أخذ العينة يتم تغيير المصائد الماصّة يدوياً ويجري تحليل المصائد الماصّة المستعملة لمعرفة محتوى الزئبق. وإذا كانت نتائج تحليلي الأنابيب الماصّة متوافقتين ضمن مدى محدد فعندئذٍ يتم حساب متوسط النتيجة للحصول على القيمة النهائية. وتشمل الأساليب التحليلية لمحتوى الزئبق الأساليب الكيميائية الرطبة التقليدية أو أنظمة الانتزاز الحراري الصغيرة، التي يمكن أن توفر نتائج فورية. ومن المزايا الواضحة لهذا الأسلوب أنه يمكن بسرعة تدريب القائمين بتشغيله على إجراء أخذ العينات. وتمثل ميزة أخرى في أن النتائج التي يتم الحصول عليها من تحليل الانتزاز الحراري يمكن أن تُعرف عندما يكون القائم بالاختبار لا يزال

(١٨) رابطة المعايير اليابانية، "JIS K0222؛ ١٩٩٧؛ أساليب تحديد الزئبق في غاز المداخن"، ٢٠ آب/أغسطس ١٩٩٧.

(١٩) رابطة المعايير اليابانية، "JISZ8808: ٢٠١٣؛ أساليب قياس تركيز الغبار في غاز المدخنة"، ٢٠ آب/أغسطس ٢٠١٣.

في الميدان. ويفيد ذلك في الاختبارات الهندسية ذات الظروف المتباينة أو في التدقيقات المتعلقة باختبارات الدقة النسبية لرصد الزئبق.

وتوفّر المصائد الماصّة درجة جيدة من الحساسية والدقة للزئبق عبر مجموعة واسعة من التركيزات. ولكن يلزم معرفة التركيزات المتوقّعة بحديها الأدنى والأقصى في غاز المدخنة لكي يمكن اختيار المصيدة الماصّة الصحيحة وزمن اختيار العينة الصحيح. وعلى سبيل المثال، إذا كان التركيز كبيراً للغاية أو كان وقت أخذ العينة طويلاً للغاية فقد يكون ذلك أكثر من قدرة امتصاص الزئبق في المصيدة الماصّة. ويؤدي ذلك في حالة حدوثه إلى إبلاغ قيم أقل عن تركيز الزئبق الفعلي. ومن ناحية أخرى، عندما يكون وقت أخذ العينة من غاز المدخنة قصيراً مع انخفاض شديد في تركيزات الزئبق، فإن ذلك يمكن أن يؤدي إلى التقاط قدر ضئيل للغاية في المصائد، وهو ما يمكن أن يؤثر سلباً على دقة تحليل المصيدة.

الأساليب المرجعية الموجودة:

- وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، الأسلوب 30B - تحديد انبعاثات مجموع الزئبق في طور البخار من مصادر الاحتراق العاملة بالفحم باستخدام المصائد الماصّة^(٢٠)

هذا الأسلوب هو عملية لقياس مجموع انبعاثات الزئبق في طور البخار من مصادر احتراق تعمل بالفعل باستخدام عينات المصائد الماصّة والتقنيات التحليلية الاستخلاصية أو الحرارية. وهذا الأسلوب مصمم حصراً للاستعمال في ظروف الانخفاض النسبي للجسيمات (مثل أخذ العينات بعد جميع أجهزة ضبط التلوث). والأسلوب 30 B هو أسلوب مرجعي يستخدم في تدقيقات مراجعة اختبارات الدقة النسبية (RATAs) لنظم الرصد المستمر لانبعاثات (CEMS) الزئبق في حالة البخار ونظم الرصد بالمصائد الماصّة المركّبة في المراحل التي تعمل بحرق الفحم وهو ملائم أيضاً لاختبار انبعاثات الزئبق في هذه المراحل. وفي الحالات التي قد توجد فيها كميات كبيرة من الزئبق العالق بالجسيمات ينبغي استخدام أسلوب متساوي الحركة لأخذ عينات الزئبق.

- المعايير الصناعية اليابانية JIS K0222 (المادة ٤ (٢) - أساليب تحديد الزئبق في غاز المداخن (ملغمة الذهب وأسلوب الامتزاز الذري بالبخاري البارد)^(٢١)

يستعمل هذا الأسلوب المرجعي من اليابان مادة ماصة تحتوي على الذهب وقياس تركيز الزئبق النقي في طور البخار (Hg^0) في غاز المداخن. وبعد غسل عينة الغاز بالماء وإزالة الزئبق المؤكسد في طور البخار (Hg^{2+}) من العينة الغازية، يتم حبس الزئبق الموجود في طور البخار في غاز العينة بواسطة المادة الماصّة كملغمة ذهب. ويتم تسخين المادة الماصّة ويقاس بخار الزئبق بمطيافية الامتزاز الذري بالبخاري البارد.

٢-٣-١-٣ الاختبار الآلي

يمكن استعمال الاختبار الآلي من أجل القياسات القصيرة الأجل لتركيزات الزئبق في طور البخار الموجود في الغاز. وفي هذا الأسلوب، يتم استخلاص عينة غازية بصورة مستمرة ونقلها إلى جهاز تحليل متنقل يقوم بقياس الزئبق النقي والزئبق المؤكسد (Hg^0 و Hg^{2+})، سواء بصورة منفصلة أو في نفس الوقت. ويستعمل جهاز التحليل المتنقل تقنية قياس تشبه التقنية المستعملة في الرصد المستمر للانبعاثات (انظر الفرع ٢-٤ أدناه).

- وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة - الأسلوب 30A - تحديد انبعاثات الزئبق الكلي في طور البخار من مصادر ثابتة (إجراء التحليل الآلي)^(٢٢)

(٢٠) وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، الأسلوب 30 B، <http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/Meth30B.pdf>.

(٢١) رابطة المعايير اليابانية، JIS K0222؛ ١٩٩٧؛ أساليب تحديد الزئبق في غاز المداخن، ٢٠ آب/أغسطس ١٩٩٧.

الأسلوب 30 A هو عملية لقياس انبعاثات الزئبق الكلي الموجود على شكل بخار، وذلك من مصادر ثابتة وباستعمال جهاز تحليلي يستخدم المعدات الآلية. وهذا الأسلوب مناسب بصورة خاصة لإجراء اختبارات الانبعاثات وتنفيذ تدقيقات مراجعة اختبار الدقة النسبية لنظم الرصد المستمر للانبعاثات ونظم الرصد بالمصيدة الماصة في مصادر الاحتراق العاملة بالفحم. ويشمل هذا الأسلوب على اشتراطات ضمان الجودة ومراقبة الجودة.

٢-٣-٢ القياسات الطويلة الأجل

٢-٣-٢-١ نظم رصد المصائد الماصة

تستعمل نظم رصد المصائد الماصة لرصد انبعاثات الزئبق من مصادر تتسم بانخفاض تركيزات الجسيمات. ويتم إنشاء هذه النظم بصورة دائمة في نقطة ملائمة لجمع العينات، مع استخدام المصائد الماصة لتوفير عينات متسقة وتمثيلية. وبعكس استعمال المصائد الماصة لأغراض القياسات القصيرة الأجل في فترة قصيرة من الوقت، يتم تشغيل نظم الرصد بالمصائد الماصة على أساس دائم في فترات زمنية محددة، قد تتراوح بين ٢٤ و ١٦٨ ساعة^(٢٣)، أو حتى ١٤ يوماً للحصول على عينات بتركيز زئبقي منخفض. وكما يحدث في الأساليب الاستخلاصية الأخرى ينبغي اختيار موقع نقطة العينة بعناية من أجل توفير بيانات تمثيلية ومفيدة.

وتقدّر تكلفة إنشاء نظام رصد بالمصائد الماصة بحوالي ١٥٠.٠٠٠ دولار. وباستخدام بيانات الولايات المتحدة من عام ٢٠١٠ تتراوح تكاليف التشغيل السنوية لنظام رصد بالمصائد الماصة لمنشآت الطاقة العاملة بالفحم بين ٢٦.٠٠٠ دولار و ٣٦.٠٠٠ دولار وتتراوح تكاليف العمالة السنوية للتشغيل بين ٢١.٠٠٠ دولار و ٣٦.٠٠٠ دولار^(٢٤).

الأساليب المرجعية الموجودة

- وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة PS-12b (مواصفة الأداء 12b) - المواصفات وإجراءات الاختبار لرصد انبعاثات مجموع الزئبق في طور البخار من المصادر الثابتة باستعمال نظام رصد مصائد ماصة^(٢٥)

تستعمل مواصفة الأداء هذه لوضع مستويات مرجعية للأداء ولتقييم مدى قبول نظم الرصد بالمصائد الماصة المستعملة لرصد انبعاثات الزئبق الكلي الموجود في طور البخار في تيارات غاز المدخن من المصادر الثابتة. وهذا الأسلوب مناسب لقياسات الزئبق الطويلة الأجل التي يصل زمن جمع العينة فيها إلى ١٤ يوماً من أجل رصد المستويات المنخفضة من انبعاثات الزئبق.

٢-٤ القياسات المستمرة

٢-٤-١ نظم الرصد المستمر للانبعاثات

تستعمل نظم الرصد المستمر للانبعاثات من أجل رصد الانبعاثات الغازية من المصادر الثابتة على مدى فترات طويلة. ولا يقيس هذا الأسلوب الرصدي الزئبق العالق بالجسيمات. وفي إطار هذا الأسلوب الآلي يتم أخذ عينات تمثيلية بصورة مستمرة أو في فترات زمنية محدّدة باستعمال مسبار يوضع في تيار الغاز. ولذلك فإن هذه النظم مفيدة للرصد غير المنقطع

(٢٢) وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، الأسلوب 30A، <http://www.epa.gov/ttnemc01/promgate/Meth30A.pdf>.

(٢٣) وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، مواصفة الأداء 12B، ص ١٣. <http://www.epa.gov/ttn/emc/perfspec.html>.

(٢٤) ب. أمار، وس. سينيور و ر. ألفونسو وج. شتودت (٢٠١٠) NESCAUM Report (تقرير رابطة الشمال الشرقي لتنسيق إدارة استخدام الهواء) "Technologies for Control and Measurement of Mercury Emissions from Coal-Fired Power Plants in the United States: A 2010 Status Report"، تموز/يوليه ٢٠١٠، الصفحات ٢-٢٢. <http://www.nescaum.org/activities/major-reports>.

(٢٥) وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة - مواصفة الأداء 12B. <http://www.epa.gov/ttn/emc/perfspec.html>.

لانبعاثات الزئبق، التي يمكن أن تتباين في فترات زمنية قصيرة بسبب تغيير تركيزات الزئبق في المواد الخام أو الوقود أو المواد الكاشفة. وعلى سبيل المثال، يمكن أن تكون نُظُم الرصد المستمر مفيدة أثناء الترميد المشترك للنفايات كوقود بسبب التغيير السريع لمحتوى الزئبق في النفايات. وقد أدت اشتراطات الرصد والتبليغ حسب اللوائح إلى تزايد استعمال هذا الأسلوب في الولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي بين بعض المصادر على مدى السنوات العشر الأخيرة. وعلى الرغم من أن تكلفة الإنشاء والتشغيل قد تكون مرتفعة مقارنة بالأساليب الأخرى فإن نُظُم الرصد المستمر توفر أكبر قدر من البيانات التي يتم توليدها في الوقت الفعلي عبر مختلف أنواع عمليات التشغيل وتقلب سير العمليات.

وينبغي اختيار موقع نقطة العينة بدقة من أجل الحصول على بيانات تمثيلية ومفيدة. وفي أي مرفق معقّد يضم العديد من المخارج التي يحتل أن ينبعث منها الزئبق قد تكون تكلفة إنشاء نُظُم رصد مستمر في كل مخرج مرتفعة. وباستخدام بيانات الولايات المتحدة من عام ٢٠١٠، تُقدّر التكلفة العامة لإنشاء نظام جديد للرصد المستمر لانبعاثات الزئبق في منشأة طاقة تعمل بالفحم بحوالي ٥٠٠ ٠٠٠ دولار، منها ٢٠٠ ٠٠٠ دولار لأغراض النظام، بما في ذلك بدء التشغيل، والتدريب ونُظُم المعايرة، وما بين ٢٠٠ ٠٠٠ و ٣٠٠ ٠٠٠ دولار لإعداد الموقع^(٢٦). وتخفض التكاليف إلى حد كبير في النُظُم الأحدث، حيث لا يتطلب الأمر أعمال معايرة يومية. وتشير المعلومات الأخيرة من أحد مقدمي معدات قياس الزئبق في الاتحاد الأوروبي إلى تكلفة تبلغ حوالي ١٥٠ ٠٠٠ يورو (١٧٠ ٠٠٠ دولار) تشمل النظام نفسه والبنية التحتية اللازمة والإنشاء، وتوفير الخدمات، والمعايرة، والتحقق من الصحة^(٢٧).

وفي المرافق ذات المداخن المتعددة والتي تكون فيها نُظُم الرصد المستمر للانبعاثات مجدية اقتصادياً وتقنياً، وتنتج أيضاً معلومات مفيدة، ينبغي أن توضع نُظُم الرصد المستمر في المخارج التي تخرج منها معظم انبعاثات الزئبق أو الكمية الأكبر من انبعاثاته في المرفق. وعلى الرغم من أن نُظُم الرصد المستمر لن توفر في هذه الحالات معلومات من جميع مخارج الغاز فإن البيانات المتجمعة قد توفر إشارة مفيدة في الوقت الحقيقي لاتجاهات أداء العملية وكفاءة ضبط الزئبق.

وبالنسبة لنُظُم الرصد المستمر لانبعاثات الزئبق، يتم ترشيح العينة المستخلصة لإزالة الجسيمات الدقيقة وبعد ذلك يتم توجيه عينة البخار الناجمة عن ذلك إلى جهاز لتحليل الزئبق. وعموماً، ينبغي أن تظل أجهزة تحليل نُظُم الرصد المستمر للانبعاثات خاضعة للتحكم المستمر في درجة الحرارة من أجل تجنب الأخطاء الأدائية وانحراف النتائج. وينبغي أن يلاحظ أن هذه الأجهزة التحليلية لا تكتشف الزئبق إلا في طور البخار (Hg^0) و (Hg^{2+})، وأي زئبق عالق بالجسيمات في العينة سيتم حبسه في المرشح. ولكن نظراً لأن المرافق المعنية ينبغي أن تعمل بأجهزة فعالة لضبط الجسيمات الدقيقة فلن تكون هناك تركيزات كبيرة من الجسيمات في الانبعاثات النهائية للمدخن وبالتالي لن يكون هناك الكثير من الزئبق العالق بالجسيمات في تيار الغاز النهائي. ويمكن استعمال نُظُم الرصد المستمر لأخذ عينات غاز المدخن الجاف أو غاز المدخن المشبع بالماء، كما يحدث بعد استعمال جهاز غسيل رطب. ولكن نُظُم الرصد المستمر المستعملة لرصد الغاز المشبع بالماء تتطلب مسبار ترشيح ثابت خاص لتجنب الانسدادات بسبب تكثف الماء. وينبغي أن يلاحظ أن بعض نُظُم الرصد المستمر يمكن أيضاً أن تعاني من التداخل من مواد أخرى في تيار الغاز.

وتقوم أنظمة الرصد المستمر لانبعاثات الزئبق بقياس غاز الزئبق النقي (Hg^0) باستعمال الامتزاز الذري بالبخار البارد (CVAA) أو الفلورة الذرية بالبخار البارد (CVAF). وبناءً على ذلك، يجب احتزال الزئبق المؤكسد الغازي (Hg^{2+}) في غاز العينة ليصبح

(٢٦) ب. أمار، وس. سينيور ور. ألفونسو وج. شتودت (٢٠١٠) NESCAUM Report (تقرير رابطة الشمال الشرقي لتنسيق إدارة

استخدام الهواء) "Technologies for Control and Measurement of Mercury Emissions from Coal-Fired Power Plants in the United States: A 2010 Status Report"، تموز/يوليه ٢٠١٠، الصفحات ٧-٢، <http://www.nescaum.org/activities/major-reports>

(٢٧) ف. غيرتر وأ. ج. سيك، ألمانيا، رسالة شخصية. أيلول/سبتمبر ٢٠١٥.

Hg⁰ قبل أن يمكن قياسه. ويشار إلى هذه العملية باسم تحويل غاز العينة. ويحدث الاختزال عند تمرير غاز العينة سواء عبر خلية اختزال حراري في درجة حرارة عالية أو عبر جهاز ارتظام يحتوي على مادة كيميائية مختزلة مثل الكلوريد.

ويمكن استخدام نُظُم الرصد المستمر للانبعاثات لتوفير البيانات عن انبعاثات الزئبق بصورة مستمرة، أو على مدى فترات زمنية محددة، أي كل نصف ساعة أو كل ساعة على سبيل المثال. والجدير بالملاحظة أن البيانات المأخوذة من نُظُم الرصد المستمر يمكن إرسالها على أساس مستمر إلى نظام مراقبة العملية من خلال حلقة تأثيرات مرتدة لتوضيح اتجاهات تشغيل ضبط العملية في الوقت الفعلي وللمساعدة في الحفاظ على ذروة كفاءة التشغيل.

ويجب معايرة نُظُم الرصد المستمر معايرة صحيحة لكفالة دقة البيانات. ويتحقق ذلك بمقارنة القراءات مع العينات التي تؤخذ في نفس الوقت من نفس نقطة جمع العينات، والتي يتم تحليلها بعد ذلك بأساليب اختبار المصدر اليدوية ذات الصلة. وقد تتوفر بعض معايير غاز المعايرة وفي هذه الحالة يمكن استخدامها لمعايرة الأداء بصورة مباشرة. وينبغي القيام بإجراءات الصيانة ومراقبة الجودة بصورة منتظمة حسب المواصفات التي تضعها السلطة المعنية أو جهة التصنيع، وذلك من أجل تقليل انحراف البيانات إلى أدنى حد.

الأساليب المرجعية الموجودة:

- وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة - PS-12a (مواصفة الأداء 12a) - المواصفات وإجراءات الاختبارات لنُظُم الرصد المستمر لمجموع انبعاثات الزئبق في طور البخار في المصادر الثابتة^(٢٨).

تستعمل مواصفة الأداء هذه لتقييم مقبولية نُظُم الرصد المستمر للزئبق الكلي الموجود في طور البخار، والتي تقام في المصادر الثابتة في وقت الإنشاء أو بعده بقليل، وكلما تحدد ذلك وفق المقتضيات التنظيمية. وتقيس نُظُم الرصد المستمر مجموع تركيز الزئبق بالميكروغرام في المتر المكعب للزئبق في طور البخار، بغض النظر عن المواصفات، وتسجل النتائج في الظروف المعتادة على أساس رطب أو جاف. وهذا الأسلوب لا يقيس الزئبق الملتصق بالجسيمات.

- EN 14884:2005 - نوعية الهواء - انبعاثات المصادر الثابتة - تحديد الزئبق الكلي: نُظُم القياس الأوتوماتية^(٢٩)

يصف هذا المعيار الأوروبي إجراءات ضمان النوعية المتصلة بنُظُم القياس المستمر للانبعاثات لتحديد الزئبق الكلي في غاز المداخن من أجل تلبية بالاشتراطات المتعلقة بعدم اليقين التي تنص عليها اللوائح أو التشريعات الوطنية أو غير ذلك من الاشتراطات بشأن القيم التي يتم قياسها. ويتمشى هذا المعيار مع المعيار العام بشأن ضمان نوعية نُظُم القياس المستمر للانبعاثات (EN14181:2014 - انبعاثات المصادر الثابتة - ضمان نوعية نُظُم القياس الأوتوماتية^(٣٠)).

والمعيار EN 14181:2014 مُصمَّم لكي يستعمل بعد اجتياز نُظُم القياس المستمر للانبعاثات لاختبار الملاءمة (QAL1)، على النحو المحدد في EN 15267^(٣١) لإثبات ملاءمة النظام للغرض المقصود قبل إنشائه في الموقع. ويصف المعيار EN14181:2014

(٢٨) وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، مواصفة الأداء 12A. <http://www.epa.gov/ttn/emc/perfspec.html>.

(٢٩) اللجنة الأوروبية للتوحيد القياسي، "EN 14884:2005 نوعية الهواء - انبعاثات المصادر الثابتة - تحديد مجموع الزئبق: نُظُم القياس الأوتوماتية"، ٢٨ تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠٠٥.

http://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT:22225&cs=1D527AD08718E6354287EA554A53ADF26

(٣٠) اللجنة الأوروبية للتوحيد القياسي، "EN 14181:2014: انبعاثات المصادر الثابتة - ضمان نوعية نُظُم القياس الأوتوماتية"، ١١ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٤.

http://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT:33416&cs=1D563C09742AECB59945D4E1D645A5DCB

(٣١) EN 15267-1 نوعية الهواء - شهادة صلاحية نُظُم القياس الأوتوماتية - الجزء ١: المبادئ العامة، EN 15267-2: نوعية الهواء - شهادة صلاحية نُظُم القياس الأوتوماتية - الجزء ٢: التقييم الأولي لنظام إدارة النوعية لصانع نظام القياس الأوتوماتي والمراقبة بعد إصدار شهادة الصلاحية لعملية التصنيع، EN 15267-3: نوعية الهواء - شهادة صلاحية نُظُم القياس الأوتوماتية - الجزء ٣: معايير الأداء وإجراءات الاختبار لنُظُم القياس الأوتوماتية لرصد الانبعاثات من المصادر الثابتة.

إجراءات ضمان النوعية المطلوبة لكفالة قدرة نظام القياس المستمر للانبعاثات على الوفاء بمقتضيات عدم اليقين بشأن القيم التي يتم قياسها، على النحو المحدد في تشريعات الاتحاد الأوروبي أو التشريع الوطني.

- الأسلوب 2005: EN 13211:2001/AC: 2005 - نوعية الهواء - انبعاثات المصادر الثابتة - الأسلوب اليدوي لتحديد تركيز الزئبق الكلي^(٣٢)

يحدد هذا المعيار الأوروبي أسلوباً مرجعياً يدوياً لتحديد تركيز كتلة الزئبق في غازات العادم من الأنايب والمدخن. وهذا هو الأسلوب المرجعي للقياسات المقارنة لمعايرة نظم القياس المستمر لانبعاثات الزئبق. وقد سبق إدراج هذا الأسلوب في الفرع ١-٢-١-١ بشأن أخذ العينات بجهاز الارتظام.

- JIS K0222 (المادة ٤ (٣) - أساليب تحديد الزئبق في غاز المدخن (أسلوب الرصد المستمر)^(٣٣)

يقيس هذا الأسلوب المرجعي من اليابان مجموع الزئبق في طور البخار من مصادر ثابتة على أساس مستمر باستعمال مطيافية الامتصاص الذري بالبخار البارد. وفي هذا الأسلوب، يتم اختزال الزئبق المؤكسد في طور البخار (Hg^{2+}) في غاز العينة إلى زئبق أولي (Hg^0) من خلال تمرير غاز العينة عبر كلوريد الصفيح.

٥-٢ أساليب القياس غير المباشر

أساليب القياس غير المباشر الموصوفة أدناه تساعد في تقدير انبعاثات الزئبق من عملية أو من مرفق. وعموماً، لا تعتبر معظم أساليب القياس غير المباشر عادة تقنيات موثوقة ودقيقة مثل تقنيات القياس المباشر لرصد انبعاثات الزئبق. وبالعكس أساليب القياس المباشر لا تتيح أساليب القياس غير المباشر معلومات عن تراكيز الزئبق في غازات المدخل أو معدلات الانبعاث الكلية. وعند تنفيذ أساليب القياس المباشر التي سبق ذكرها وفقاً لإجراءات الاختبار الصحيحة فإن هذه الأساليب توفر بيانات أكثر تمثيلية لانبعاثات الزئبق عن معظم أساليب القياس غير المباشر. ومع ذلك، فإن الأساليب الهندسية التي لا تستعمل في القياس تفيد كأدوات للتحري والفحص من أجل رصد أداء العملية عموماً وتقدير كفاءة تخفيض الزئبق. ولأغراض التبليغ، يمكن استخدام أساليب القياس غير المباشر المذكورة لتوفير تقدير عام للانبعاثات على مستوى المرفق إذا كانت أساليب القياس المباشر غير متوفرة أو غير منطوقة.

١-٥-٢ توازن الكتلة

يجرى توازن الكتلة من خلال تطبيق قانون حفظ الكتلة على أي نظام (مثل أي مرفق أو عملية أو معدة). وفي مثل هذا النظام فأى زئبق يدخل في مواد التغذية الأولية أو الإضافات أو الوقود يجب أن يخرج عن طريق المنتجات أو النواتج الثانوية أو النفايات أو الانبعاثات والإطلاقات. ولذلك يتم تحديد انبعاثات وإطلاقات الزئبق بحساب الفارق بين المدخل والمخرج والتراكم والاستنزاف. والمعادلة العامة لأي توازن كتلة هي على النحو التالي:^(٣٤)

$$M_{in} = M_{out} + M_{accumulated/depleted}$$

(٣٢) اللجنة الأوروبية للتوحيد القياسي، "EN 13211:2001/AC:2005: نوعية الهواء - انبعاثات المصادر الثابتة - الأسلوب اليدوي لتحديد تركيز مجموع الزئبق"، ١٥ شباط/فبراير ٢٠٠٥،

http://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:25042,6245&cs=19B884B499893080A.731C45504F6F2FB2

(٣٣) رابطة المعايير اليابانية، "JIS K0222:1997؛ أساليب تحديد الزئبق في غاز المدخن"، ٢٠ آب/أغسطس ١٩٩٧.

(٣٤) هيئة البيئة في كندا، "Guide for Reporting to the National Pollutant Release Inventory (NPRI) (دليل تقديم التقارير إلى القائمة الوطنية لإطلاق الملوثات) 2012 and 2013 قانون حماية البيئة الكندي، ١٩٩٩ (CEPA 1999)"، ٢٠١٣، الصفحة ١٨. <https://www.ec.gc.ca/inrp-npri/default.asp?lang=En&n=28C24172-1>

حيث:

$$M_{in} = \text{كتلة الزئبق الداخل إلى المرفق في المواد الأولية أو الوقود أو الإضافات، إلخ.}$$

$$M_{out} = \text{كمية الزئبق الخارج من المرفق في المنتجات النهائية والمنتجات الثانوية والنفايات والانبعاثات والإطلاقات}$$

$$(M_{out} = M_{product} + M_{by-product} + M_{waste} + M_{emissions} + M_{releases})$$

$$M_{accumulated/depleted} = \text{كمية الزئبق المتراكم أو المستنزف داخل المرفق}$$

ولحساب انبعاثات الزئبق في نظام يستخدم توازن الكتلة، ينبغي تتبع تركيزات الزئبق ومعدلات تدفق الكتلة في جميع التيارات الأخرى (مثل المنتجات، والمنتجات الثانوية، والنفايات السائلة، والحماة) وتسجيلها على مدى فترة محدّدة. ويتم حساب بيانات كتلة الزئبق بضرب تركيز الزئبق في معدل تدفق كتلة التيار والفترة الزمنية (سنة واحدة مثلاً). ومن مزايا استعمال أسلوب توازن الكتلة أنه يجعل من الممكن تقدير انبعاثات الزئبق بالنسبة لكلا المصادر الثابتة وغير الثابتة (بما في ذلك الانبعاثات المتسرّبة)، إذا كان الطرف يرغب في تقدير الانبعاثات من مصادر غير ثابتة أيضاً.

وفي نظام يشمل مصادر انبعاثات متعددة وبيانات محدودة من مداخن أو أنابيب المخرج، يمكن أن يوفرّ نهج توازن الكتلة معلومات مفيدة وتمثيلية بشأن تدفقات الزئبق على مدى فترة طويلة من الوقت، أي سنة على سبيل المثال. وفي العمليات التي يمكن أن تتباين الانبعاثات فيها تبايناً كبيراً مع مرور الوقت، فإن النتائج التي يتم الحصول عليها من توازن كتلة سنوي كامل قد توفرّ بيانات أكثر تمثيلاً للانبعاثات عن القياسات المباشرة المضبوطة زمنياً، مثل اختبار المداخن السنوي. وعلى سبيل المثال، واجهت مرافق الاسمنت في الاتحاد الأوروبي قراءات غير موثوقة نتيجة استعمال أساليب القياس المباشر بسبب ارتفاع درجة عدم اليقين في قياس حجم الانبعاثات عند المدخنة. وبالنسبة لهذه المرافق، أدى استعمال أسلوب توازن الكتلة إلى انخفاض درجة عدم اليقين النسبي في تقدير انبعاثات الزئبق مقارنة بأساليب القياس المباشر.

ولكن قد يصعب تحقيق القياسات الدقيقة التمثيلية لمحتوى الزئبق في الأنواع المتباينة من الوقود أو مواد التغذية. وبالإضافة إلى ذلك، ينبغي، في الحالات التي تشهد إعادة تدوير حمولات الزئبق الداخلي في العملية (كما يحدث في حالة المخزونات والمنتجات الوسيطة والحماة)، مراعاة الحرص لتفسير وجود الزئبق في هذه التيارات. وقد يصعب التوصل إلى أرقام نهائية لتوازن الكتلة في العمليات المعقدة التي تشهد تدفقات عديدة من المدخلات والمخرجات، أو عندما تكون البيانات تقديرية.

٢-٥-٢ نظم رصد الانبعاثات المتوقعة

يشار إلى نظم رصد الانبعاثات المتوقعة أيضاً باسم الرصد البارامترية، وتعمل بإنشاء أوجه الترابط بين بارامترات تشغيل العملية ومعدلات انبعاثات الزئبق، باستعمال الرصد المستمر للبارامترات البديلة وعوامل الانبعاثات واختبار المصدر. ويمكن أن يكون هذا الأسلوب مفيداً في الدلالة على كفاءة ضبط الزئبق في الوقت الحقيقي. ولا يوجد في الواقع جمع مستمر لعينات الزئبق في هذا الأسلوب. وفي المرافق الحديثة، يجري نمطياً رصد بارامترات مثل استعمال الوقود ودرجة حرارة الأفران وضغط الغاز ومعدل التدفق على أساس مستمر باستعمال نظم ضبط العملية لضمان الكفاءة التشغيلية. وفي حين أن هذه الأنواع من المؤشرات قد تكون نقاط بداية مفيدة فإن اختيار البارامترات ذات الصلة والترابطات المناظرة لمعدلات انبعاثات لزئبق ستكون فريدة على الأرجح في كل عملية أو مرفق.

وفي بعض أنواع العمليات حيث لا يوجد تباين كبير في محتوى الزئبق في المواد الأولية والوقود وغير ذلك من التيارات المدخلة، يمكن أن تتيح نظم رصد الانبعاثات المتوقعة وسيلة مفيدة بتقديم دلائل عن اتجاهات انبعاثات الزئبق. وعلى سبيل المثال، تقوم بعض المرافق في قطاع الذهب الصناعي في الولايات المتحدة برصد كفاءة أجهزة تنظيف كلوريد الزئبق مع تتبع قياسات ضغط المحلول المدخل في جهاز التنظيف ودرجة حرارة الغاز المدخل وتركيز كلوريد الزئبق (II) في المحلول الخارج من جهاز التنظيف.

ولكن نُظِم رصد الانبعاثات المتوقعة قد لا تكون أسلوباً موثوقاً لرصد انبعاثات الزئبق في التطبيقات التي يمكن أن يتباين فيها محتوى الزئبق في الوقود أو المواد الأولية تبايناً كبيراً في فترات قصيرة من الوقت. وعلى سبيل المثال، نجد في مرافق ترميد النفايات ومرافق الإسمنت التي تستعمل وقود النفايات أن محتوى الزئبق الداخِل في النظام أو المرفق يكون عادة غير قابل للتنبؤ به. وفي منشآت الطاقة التي تعمل بالفحم يمكن أن تتباين انبعاثات الزئبق استجابة للتغيرات في محتوى الزئبق في الفحم. وبالمثل، نجد في قطاع المعادن غير الحديدية أن الزئبق في مواد تغذية الأفران يمكن أن يتغير بسرعة حسب التركيزات التي تجري معالجتها. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تتباين انبعاثات الزئبق في عمليات كثيرة بسبب تقلبات درجة الحرارة والتغيرات في أنواع الزئبق. ونتيجة لذلك، فإن إنشاء الترابط بين البارامترات البديلة وانبعاثات الزئبق قد لا يؤدي إلى نتائج تمثيلية. وفي حالة التفكير في نُظِم رصد الانبعاثات المتوقعة ينبغي أولاً القيام بتحليل دقيق لتحديد مدى عدم التيقن في الأسلوب على أساس كل حالة على حدة وينبغي مقارنة هذه النُظِم بانتظام مع أسلوب اختبار مرجعي. وعندما يمكن إنشاء مجموعة كافية وشاملة من البيانات المرجعية لتوفير قاعدة كبيرة لصياغة خوارزمية نُظِم رصد الانبعاثات المتوقعة يمكن عندئذ توقع تحسن نوعية البيانات المتوفرة من خلال هذه النُظِم.

٢-٥-٣ عوامل الانبعاثات

في حين أن استعمال عوامل الانبعاثات لا يمثل أسلوب رصد بحد ذاته فإن هذه التقنية الهندسية يمكن استعمالها لتوفير تقدير عام مفيد لانبعاثات الزئبق من أي نظام أو مرفق.

وتستعمل عوامل الانبعاثات لوضع تقدير لنوعية الانبعاثات التي يتم إطلاقها من أحد المصادر على أساس المستويات النمطية للانبعاثات من ذلك النشاط. وفي حالة الزئبق، يمكن التعبير عن عوامل الانبعاثات باعتبارها كتلة الزئبق التي يتم إطلاقها مقسومة على: كتلة أو حجم مواد المدخلات المستهلكة؛ أو كتلة أو حجم مواد المخرجات المتولدة.

ويمكن أن نتوقع من عوامل الانبعاثات الخاصة لكل موقع، التي تضعها المرافق على أساس بيانات اختبار الانبعاثات الفعلية ومعلومات نشاط المصدر، أن توفر تقديرات أكثر دقة عن عوامل الانبعاثات العامة المنشورة. وسيطلب الأمر وضع عوامل انبعاثات خاصة بكل موقع من خلال الاختبار أثناء فترات التشغيل العادي، بغرض توفير تمثيل أفضل للمعدل المتوسط لانبعاثات الزئبق من عملية بعينها أو مرفق بعينه. وعندما تتوفر بيانات قياس كل موقع بالتحديد فسيكون من الأفضل استعمال الحسابات المستندة إلى هذه القيم التي تم قياسها بدلاً من استعمال العوامل المنشورة العامة.

وعندما لا تتوفر عوامل الانبعاثات الخاصة بكل موقع فإن عوامل الانبعاثات المنشورة قد تستخدم لتوفير تقديرات تقريبية للانبعاثات. وقد تتوفر عوامل الانبعاثات المنشورة عن العملية الشاملة أو عن جهاز بعينه لضبط الزئبق. ولكن ينبغي أن يلاحظ أن هذه العوامل العامة تقدم تقديرات للانبعاثات تنطوي على درجة عالية من عدم التأكد.

وبعد ما سبق، يمكن القول بأنه في العمليات التي قد تنطوي على تباين في محتوى الزئبق في الوقود أو المواد الأولية، قد لا توفر عوامل الانبعاثات تقديرات موثوقة لانبعاثات الزئبق. وعلى سبيل المثال، فإن محتوى الزئبق في الوقود قد يتباين تبايناً كبيراً في غضون فترات قصيرة في ترميد النفايات في صناعة الإسمنت التي تستعمل وقود النفايات.

والمعادلة العامة لتقدير انبعاثات الزئبق باستعمال أحد عوامل الانبعاثات هي ما يلي:

$$E_{Hg} = BQ \times CEF_{Hg} \text{ or}$$

$$E_{Hg} = BQ \times EF_{Hg} \times (100 - CE_{Hg})/100$$

حيث:

E_{Hg} = انبعاثات الزئبق (كيلوغرام أو غير ذلك من وحدات الكتلة)

BQ = معدل النشاط أو الكمية الأساسية (وحدة الكمية الأساسية)

CEF_{Hg} = عوامل انبعاثات الزئبق المضبوطة (kg/BQ) [حسب نوع جهاز ضبط الانبعاثات الذي تم تركيبه]

$$EF_{Hg} = \text{عوامل انبعاثات الزئبق غير المضبوطة (kg/BQ)}$$

$$CE_{Hg} = \text{كفاءة ضبط انبعاثات الزئبق الشاملة (النسبة المئوية)}$$

٢-٥-٤ التقديرات الهندسية

يمكن أيضاً الحصول على تقديرات عامة لانبعاثات الزئبق باستعمال المبادئ الهندسية ومعرفة العمليات الكيميائية والفيزيائية ذات الصلة وتطبيق القوانين الكيميائية والفيزيائية المعنية ومعرفة الخصائص التي يميّز بها كل موقع على حدة.

وعلى سبيل المثال، يمكن تقدير الانبعاثات السنوية للزئبق من استعمال الوقود على النحو التالي:

$$E_{Hg} = Q_F \times \% Hg \times T$$

حيث

$$E_{Hg} = \text{الانبعاثات السنوية للزئبق (كغ/سنة)}$$

$$Q_F = \text{معدل استعمال الوقود (كغ/ساعة)}$$

$$\% Hg = \text{النسبة المئوية للزئبق في الوقود، بالوزن}$$

$$T = \text{وقت التشغيل (ساعة/سنة)}$$

ولا ينبغي النظر في استعمال التقديرات الهندسية إلاّ باعتبارها تقريباً عاماً سريعاً ينطوي على درجة عالية من عدم التأكد. ولتحسين دقة هذه التقديرات، ينبغي مقارنة النتائج التي يتم الحصول عليها من التقديرات الهندسية دورياً مع البيانات التي يتم الحصول عليها من أساليب القياس المباشر. وعندما تتوفر المعلومات الخاصة بكل موقع على حدة فمن المنتظر أن توفر هذه البيانات معلومات أكثر فائدة وستكون الأفضل من ناحية فهم معدلات انبعاثات المصدر الفعلية. والتقديرات الهندسية هي الملاذ الأخير عندما لا توجد بيانات عن الانبعاثات أو عوامل الانبعاثات.

٢-٥-٥ التبليغ عن الانبعاثات

التبليغ عن الانبعاثات يمثل جزءاً جوهرياً من دورة رصد الانبعاثات على مستوى المرفق.

وعندما يكون من الواجب إثبات الالتزام بتدبير قانوني أو تنظيمي فإن المشغل يضطلع عموماً بالمسؤولية عن التبليغ عن نتائج الرصد إلى السلطة المختصة. وبالإضافة إلى ذلك، تشكّل البيانات على مستوى المرفق عنصراً جوهرياً في قوائم جرد الانبعاثات الوطنية التي يتم تجميعها باستعمال نهج صاعد من أسفل إلى أعلى. وحتى إذا لم يكن التبليغ عن الانبعاثات مطلوباً صراحة فإنه يعتبر من أفضل الممارسات لتقاسم البيانات بصورة طوعية مع السلطات المعنية ومع الجمهور المعني.

والتبليغ عن رصد الانبعاثات ينطوي على تلخيص وعرض نتائج الرصد والمعلومات المتصلة بذلك، مثل ضمان الجودة وأساليب ضبط الجودة، بطريقة فعالة، وفقاً لاحتياجات الجمهور المقصود. وينبغي أن يكون التقرير واضحاً وشفافاً ودقيقاً. وينبغي عرض النتائج في نسق مفيد يوضح المعلومات.

وينبغي التعبير عن انبعاثات الزئبق بطريقة أو أكثر من الطرق التالية: تركيز الزئبق في الغاز الخارج؛ كتلة الزئبق المنبعثة بالنسبة لكمية الناتج الذي يتم إنتاجه (عامل الانبعاث)؛ وكتلة انبعاثات الزئبق في فترة زمنية معيّنة (يومية أو سنوية على سبيل المثال).

وينبغي مناقشة اعتبارات النوعية المتصلة بأخذ العينات والتحليل والنتائج في التقرير. وبالإضافة إلى ذلك، ينبغي تقديم نتائج القياس في نسق يمكّن من مضاهاة انبعاثات الزئبق مع بارامترات تشغيل العملية.

وينبغي توفير الوضوح بشأن الأسلوب المستعمل (على سبيل المثال، المعايير المستعملة لأخذ العينات وتحليلها) والظروف التي تحيط بعملية جمع البيانات، مثل: ظروف العملية؛ ومعدل الإنتاج أثناء أخذ العينة؛ والحوادث أو الأعطال أثناء أخذ العينات في عملية الإنتاج أو نُظم التخفيف؛ والتباينات في المواد المدخلة.

الفصل الرابع

منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم

توجيه بشأن أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لضبط انبعاثات الزئبق من منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم

موجز

تشكّل منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم مصدراً كبيراً وهاماً من مصادر انبعاثات الزئبق في الجو. وفي عام ٢٠١٠، كان حرق الفحم سبباً في انبعاثات قرابة ٤٧٥ طناً من الزئبق في كل أنحاء العالم، وجاء معظمها من توليد الطاقة واستعمال المراجل الصناعية (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، ٢٠١٣). ويمثل ذلك حوالي ٤٠ في المائة من مجموع الانبعاثات العالمية البشرية المنشأ. وتحتوي أنواع الفحم المستعملة للإحراق في كل أنحاء العالم على كميات نزره من الزئبق التي تنبعث في حالة عدم ضبطها إلى الغلاف الجوي.

ويقدّم هذا الفصل توجيهاً بشأن أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية للضبط، والتخفيض حيثما أمكن، لانبعاثات الزئبق من منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم التي يغطيها المرفق دال للاتفاقية.

ومعظم منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم هي منشآت كبيرة لإنتاج الطاقة الكهربائية، وبعضها يعمل أيضاً لتوفير التدفئة. وتوفّر المراجل الصناعية الحرارة أو تُجهّز البخار لتلبية احتياجات المرفق الذي أنشئت فيه.

وتتأثر انبعاثات الزئبق من منشآت الاحتراق العاملة بحرق الفحم بعدد من المتغيرات، منها تركيز الزئبق وأنواعه في الفحم؛ ونوع الفحم وتكوينه؛ ونوع تكنولوجيا الاحتراق؛ وكفاءة الضبط في نُظم ضبط التلوث القائمة. ولكن تكنولوجيات ضبط انبعاثات الزئبق تتشابه بصورة عامة في حالة جميع المراجل التي تعمل بحرق الفحم بغض النظر عن تطبيقها في منشآت الطاقة أو المرافق الصناعية.

وتستعمل بالفعل نُظم ضبط تلوث الهواء على نطاق واسع في عدد من البلدان لتقليل انبعاثات ملوثات الهواء التقليدية بخلاف الزئبق، مثل الجسيمات وأكاسيد النيتروجين وثنائي أكسيد الكبريت. وحتى عندما تكون هذه النُظم غير مصممة في المقام الأول لالتقاط الزئبق فإنها توفّر منفعة مشتركة من ناحية تقليل انبعاثات الزئبق، نظراً لأنها تستطيع أن تلتقط بعض الزئبق من غازات المداخن. وقد استحدثت تقنيات مخصصة لضبط الزئبق ويجري تطبيقها في عدد من البلدان لتوفير ضبط إضافي للزئبق في الحالات التي لا تتمكن فيها تقنيات المنافع المشتركة من توفير تخفيضات كافية وموثوقة للزئبق.

ويناقش هذا الفصل مجموعة من أفضل التقنيات المتاحة المستعملة لضبط الزئبق ويوفّر معلومات إرشادية بشأن أدائها من ناحية الانبعاثات وتكاليفها التقديرية. ويصف أيضاً العناصر الهامة في أفضل الممارسات البيئية لتشغيل المرافق العاملة بحرق الفحم. وأخيراً، يقدّم هذا الفصل مجموعة مختارة من التقنيات الناشئة لضبط انبعاثات الزئبق ويناقش رصد انبعاثات الزئبق في السياق المحدّد للمنشآت العاملة بحرق الفحم.

المحتويات

٣٨.....	مقدمة
٣٩.....	العمليات المستعملة في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمرجل الصناعية العاملة بحرق الفحم، بما في ذلك دراسة المواد المدخلة وسلوك الزئبق في العمليات
٣٩.....	خصائص الفحم
٤١.....	تحولات الزئبق أثناء حرق الفحم
٤٤.....	قائمة تقنيات تخفيض انبعاثات الزئبق
٤٤.....	غسل الفحم
٤٤.....	مساهمة نُظم ضبط تلوث الهواء في إزالة الزئبق
٤٩.....	أجهزة ضبط الجسيمات
٥٢.....	أجهزة ضبط ثنائي أكسيد الكبريت
٥٣.....	الاحتزال الحفزي الانتقائي لضبط أكاسيد النيتروجين
٥٥.....	تقنيات تعزيز المنافع المشتركة
٥٥.....	خلط الفحم
٥٦.....	المواد المضافة لأكسدة الزئبق
٥٧.....	المواد المضافة إلى جهاز التنظيف الرطب لضبط إعادة انبعاثات الزئبق
٥٨.....	الحفاز الانتقائي لأكسدة الزئبق
٥٩.....	حقن الكربون المنشط للضبط المخصص للزئبق
٦٠.....	حقن المادة الماصة بدون معالجة كيميائية
٦١.....	حقن مادة ماصة معالجة كيميائياً
٦٢.....	تقييدات انطباق حقن الكربون المنشط
٦٣.....	تكلفة تكنولوجيات ضبط الزئبق
٦٤.....	تكاليف تكنولوجيات ضبط الزئبق في إطار المنافع المشتركة
٦٦.....	تكاليف تقنيات تعزيز المنافع المشتركة وحقن الكربون المنشط
٦٨.....	أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لحرق الفحم
٦٨.....	أفضل التقنيات المتاحة
٦٨.....	التدابير الأولية لتقليل محتوى الزئبق في الفحم
٦٨.....	تدابير تقليل انبعاثات الزئبق أثناء الاحتراق
٦٨.....	إزالة الزئبق بواسطة المنافع المشتركة لُنظم ضبط تلوث الهواء التقليدية
٦٨.....	التكنولوجيات المخصصة لضبط الزئبق
٦٩.....	أفضل الممارسات البيئية
٦٩.....	معاملات العمليات الرئيسية
٦٩.....	اعتبارات كفاءة الطاقة في المنشأة بأكملها

٧٠.....	صيانة أجهزة ضبط تلوث الهواء وكفاءتها في الإزالة
٧٠.....	الإدارة السليمة بيئياً للمنشأة
٧٠.....	الإدارة السليمة بيئياً لمخلفات احتراق الفحم
٧١.....	رصد انبعاثات الزئبق
٧١.....	الرصد المستمر للانبعاثات
٧٢.....	رصد المصيدة الماصة
٧٢.....	أخذ العينات بجهاز الارتطام
٧٢.....	توازن الكتلة
٧٣.....	النظم التنبؤية لرصد الانبعاثات
٧٣.....	عوامل الانبعاثات
٧٣.....	التقديرات الهندسية
٧٤.....	المراجع

قائمة الأشكال

- الشكل ١- استعمال مختلف رُتب الفحم (مؤسسة الفحم العالمية ٢٠١٤)..... ٣٩
- الشكل ٢- تحولات الزئبق المحتملة أثناء الأحتراق وما بعد الأحتراق (غالبريث وزيفارليك، ٢٠٠٠)..... ٤٢
- الشكل ٣- رسم تخطيطي لعملية تشكيلية نمطية من منشآت طاقة تعمل بحرق الفحم في اليابان (إيتو وآخرون، ٢٠٠٦) (منقح)..... ٤٦
- الشكل ٤- تركيز الزئبق في غاز المدخنة من منشآت الطاقة التي تعمل بحرق الفحم باستعمال مجموعة FGD+ESP+SCR ومجموعة FGD+LLT-ESP+SCR..... ٤٧
- الشكل ٥- إزالة الزئبق بالمرسب الكهروستاتيكي كدالة على مقدار الكربون غير المحروق (النسبة المئوية للفاقد عند الإشغال) في الرماد المتطاير (سنيور وجونسون، ٢٠٠٨)..... ٥٠
- الشكل ٦- الأثر المحتمل لخلط الفحم على التقاط الزئبق في نظام التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة..... ٥٦
- الشكل ٧- أداء الإضافات القائمة على البروم والكلور مع تنوع الفحم (الفحم دون القيري من حوض نهر باوادر (PRB)؛ فحم اللغيت من تكساس (TxL)؛ فحم اللغيت من ولاية داكوتا الغربية (NDL))..... ٥٧
- الشكل ٨- رسم يوضح امتصاص/امتزاز زئبق غاز المدخنة عبر جهاز تنظيف رطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (كينز و آخرون، ٢٠١٤)..... ٥٨
- الشكل ٩- اختبار كفاءة إزالة الزئبق كدالة على معدل حقن الفحم المنشط..... ٦١
- الشكل ١٠- مقارنة أداء الكربون المنشط غير المعالج وأداء الكربون المنشط المعالج في إزالة الزئبق..... ٦٢

قائمة الجداول

- الجدول ١- محتوى الزئبق في أنواع الفحم (مغ/كغ)..... ٤٠
- الجدول ٢- نظرة عامة على المنافع المشتركة لإزالة الزئبق في نُظم ضبط تلوث الهواء..... ٤٥
- الجدول ٣- كفاءة إزالة الزئبق حسب المجموعات النمطية لأجهزة ضبط تلوث الهواء في الصين (بالنسب المئوية) جانغ وآخرون، (٢٠١٥)..... ٤٨
- الجدول ٤- مستويات الانبعاثات المتحققة من خلال تقنيات المنافع المشتركة (بيانات جمعها الفريق العامل للزئبق الصغري، ٢٠١٥)..... ٤٨
- الجدول ٥- مقارنة خصائص الفحم دون القيري والفحم القيري..... ٥٥
- الجدول ٦- مستويات انبعاثات منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم التي تُطبَّق حقن الكربون المنشط..... ٦٠
- الجدول ٧- تكاليف أجهزة ضبط تلوث الهواء في منشآت الطاقة (يوان/كيلوواط، يوان ٢٠١٠)، الصين (أنكورا وآخرون، ٢٠١٥)..... ٦٥
- الجدول ٨- التكلفة الرأسمالية لتكنولوجيا المنافع المشتركة في الولايات المتحدة (دولار/كيلوواط، بدولارات عام ٢٠١٢) (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ٢٠١٣)..... ٦٥
- الجدول ٩- تكاليف مجموعات أجهزة ضبط تلوث الهواء موزعة على مختلف الملوثات في وحدة طاقتها ٦٠٠ ميغاواط، الصين (ملايين يوان ريميمب، يوان عام ٢٠١٠) (أنكورا وآخرون، ٢٠١٥)..... ٦٥
- الجدول ١٠- التكلفة النسبية لمختلف أساليب إزالة الزئبق..... ٦٦
- الجدول ١١- التكلفة الرأسمالية لحقن الكربون المنشط في الولايات المتحدة (دولار/كيلوواط، بدولارات عام ٢٠٠٧)..... ٦٧
- الجدول ١٢- تكاليف التشغيل لُنظم حقن الكربون المنشط (في منشأة طاقتها ٢٥٠ ميغاواط) يعقبها إما مرسب كهروستاتيكي أو مرشح نسيجي للفحم القيري (اللجنة الدولية المشتركة، ٢٠٠٥)..... ٦٧

١ - مقدمة

يقدم هذا الفرع التوجيهات المتعلقة بأفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية للضبط، والتخفيض كلما أمكن ذلك، لانبعاثات الزئبق من منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم، التي يغطيها المرفق دال للاتفاقية.

ومنشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم في المراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم هي مصدر كبير من مصادر الانبعاثات المحلية والإقليمية والعالمية للزئبق في الجو، حيث ينبعث منها أكثر من ٧٤٠ طناً مترياً من الزئبق في أنحاء العالم (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، ٢٠١٣ أ). والفحم المستعمل في الاحتراق في كل أنحاء العالم يتضمن كميات نزرة من الزئبق التي تنبعث أثناء عملية الحرق (مع ملوثات أخرى) في حالة عدم ضبطها.

ومعظم منشآت الطاقة التي تعمل بحرق الفحم هي منشآت كبيرة لإنتاج الكهرباء؛ وبعضها يوفر أيضاً التدفئة (منشآت تجمع بين التدفئة والطاقة الكهربائية وتدفئة الأحياء السكنية إلخ). وتوفر المراجل الصناعية التدفئة أو بخار العملية اللازم للإنتاج المحلي في المرفقات التي تقام فيها هذه المراجل. وتستهلك المراجل المقامة في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم نمطياً كميات أكبر من الفحم عن معظم المراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم، مع احتمال زيادة انبعاثات الزئبق. ومع ذلك، فإن عدد المراجل الصناعية يزيد عادة عن عدد منشآت الطاقة. وهناك فارق آخر وهو أن مراجل منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم هي في الأغلب مراجل تعمل بوقود واحد في حين أن المراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم مصممة في كثير من الأحيان من أجل استعمال خليط أكثر تنوعاً من مختلف أنواع الوقود وتستخدمها (مثل نواتج الوقود الثانوية والنفايات والأخشاب) بالإضافة إلى الفحم (أمار وآخرون، ٢٠٠٨).

ومن منظور الجدوى التقنية، يمكن استخدام نفس التكنولوجيات للسيطرة على انبعاثات الزئبق من جميع المراجل العاملة بحرق الفحم، أيًا كانت وظائفها. وفي عدد من البلدان، تكون تزويد منشآت الطاقة والمراجل الصناعية الكبيرة مزودة بالفعل بنظم ضبط تلوث الهواء نتيجة السياسات المتبعة بشأن تلوث الهواء. وحتى عندما تكون هذه النظم غير مصممة لالتقاط الزئبق فإنها قادرة على التقاط بعض الزئبق الناتج عن الاحتراق وهو ما يؤثر مباشرة على تقليل انبعاثات الزئبق في الجو (ما يسمى بالمنافع المشتركة التي تنتج للزئبق من نظم ضبط تلوث الهواء). ومن ناحية أخرى، لا تكون المراجل الصناعية الأصغر العاملة بحرق الفحم عادة مجهزة بأجهزة فعالة لضبط الانبعاثات، وسيؤثر ذلك على دراسة كيفية معالجة انبعاثات الزئبق من هذه المنشآت. وتؤثر عدة عوامل على مقدار الزئبق الذي قد ينبعث من منشآت متشابهة تحرق كميات متماثلة من الفحم. وتشمل هذه العوامل ما يلي:

- تركيز الزئبق في الفحم
- نوع الفحم وتكوينه
- نوع تكنولوجيا الاحتراق
- وجود نظم ضبط تلوث الهواء وكفاءة قيامها بإزالة الزئبق

وستكون العوامل المذكورة أعلاه موضع الدراسة في بقية هذه الوثيقة بتفصيل أكبر في سياق تحديد أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية.

العمليات المستعملة في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمرآجل الصناعية العاملة بحرق الفحم، بما في ذلك دراسة المواد المدخلة وسلوك الرئيق في العمليات

١-١ خصائص الفحم

الفحم مورد معقّد من موارد الطاقة ويمكن أن يتباين إلى حد كبير في تكوينه حتى ولو كان من نفس عرق المنجم. وتتحدّد نوعية الفحم بتكوينه ومحتواه من الطاقة. ويستند تحديد رتبة الفحم إلى درجة تحول مادة النبات الأصلية إلى كربون. وتعرّف الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد أربعة أنواع أساسية من الفحم: الليغيت، ودون القيري، والقيري، والأنثراسيت (الصلب) (الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد D388) وفي بعض البلدان، يسمى فحم الليغيت والفحم دون القيري باسم "الفحم البني"، ويسمى الفحم القيري والصلب باسم "الفحم القاسي". وسوف تستخدم تسميات الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد في كل أجزاء هذه الوثيقة.

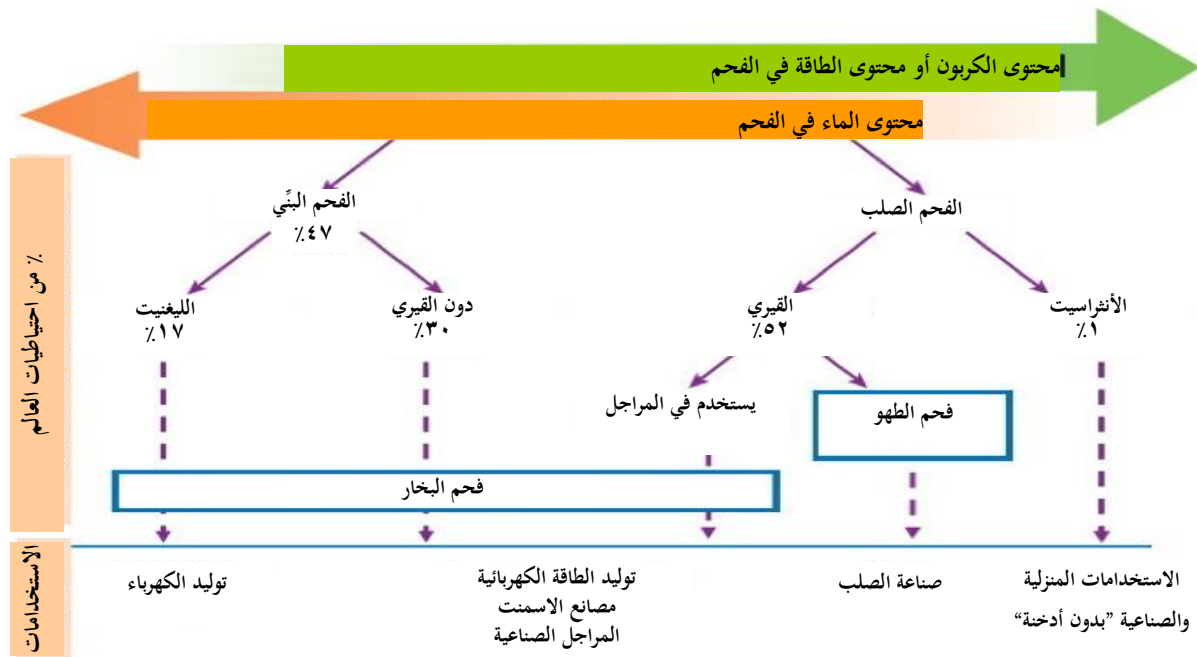
ويتضمن الليغيت نمطياً ٢٥-٣٥ في المائة من الكربون الثابت (وزناً بوزن) ويحتوي على أقل مقدار من الطاقة (أقل من ١٩,٢٦ ميغاجول/كغ قيمة حرارية إجمالية). ويستعمل عموماً لتوليد الكهرباء أو تدفئة المناطق الواقعة بالقرب من المناجم.

ويحتوي الفحم غير القيري نمطياً على ٣٥-٤٥ في المائة من الكربون الثابت (وزناً بوزن) وتتراوح قيمة التدفئة بين ١٩,٢٦ و ٢٦,٨٠ ميغاجول/كغ قيمة حرارية إجمالية. ويستعمل على نطاق واسع لتوليد الكهرباء وكذلك في المراحل الصناعية.

ويحتوي الفحم القيري على ٢٥-٨٦ في المائة من الكربون الثابت (وزناً بوزن) وتتراوح قيمته الحرارية بين ٢٦,٨٠ و ٣٢,٦٦ ميغاجول/كغ قيمة حرارية إجمالية. وهذا الفحم القيري، مثله مثل الفحم دون القيري، يستعمل على نطاق واسع لتوليد الكهرباء وفي المراحل الصناعية.

ويتضمن الأنثراسيت مقداراً كبيراً جداً من الكربون الثابت يصل إلى ٨٦-٩٧ في المائة (وزناً بوزن). وهو أصلب أنواع الفحم ويعطي أكبر قدر من الحرارة عند حرقه (أكثر من ٣٢,٦٦ كيلوجول/كغ قيمة حرارية إجمالية)، ولكنه أصعب أنواع وقود الفحم في الحرق بسبب انخفاض المحتوى المتطاير.

الشكل ١ يعرض الاستخدام النمطي لمختلف أنواع الفحم (رابطة الفحم العالمية، ٢٠١٤). وكما يتضح من ذلك الشكل ١ تشير التقديرات إلى أن الفحم بنوعيه القيري ودون القيري المستعمل في منشآت توليد القوى الكهربائية وفي المراحل الصناعية يشكل أكثر من ٨٠ في المائة من احتياطات الفحم المعروفة في كل أنحاء العالم.



الشكل ١ - استعمال مختلف رتب الفحم (مؤسسة الفحم العالمية ٢٠١٤).

ويمثل محتوى الزئبق أحد المعالم الرئيسية التي تؤثر على مقدار انبعاثات الفحم غير المضبوطة. ويقدم الجدول ١، الذي تم تعديله من "تيوالت وآخرون (٢٠١٠)" البيانات المتاحة علناً بشأن محتوى الزئبق في الفحم.

الجدول ١ - محتوى الزئبق في أنواع الفحم (مغ/كغ)

المرجع	المدى	متوسط جميع العينات	نوع الفحم	البلد
Nelson, 2007; Tewalt et al., 2010	٠,٣١-٠,٠١	٠,٠٧٥	قيري	أستراليا
Finkelman, 2004; Tewalt et al., 2010	(٨) ٠,٩٦-٠,٠٢	٠,١٩	قيري	الأرجنتين
Finkelman, 2004; Tewalt et al., 2010	(٢٨) ٠,١٥-٠,٠٤	٠,١٠	قيري	بوتسوانا
Finkelman, 2004; Tewalt et al., 2010	(٢٣) ٠,٨١-٠,٠٤	٠,٢٠	قيري	البرازيل
	(٤٥) ٠,٩٤-٠,٠٦	٠,٣	دون قيري	
Tewalt et al., 2010	(١٢) ٠,١٢-٠,٠٣٣	٠,٠٥٨		كندا
	(١٩) ٢,٢-٠,٠٣	٠,٢١	قيري	
Tewalt et al., 2010	(٤) ٠,٠٥٧-٠,٠٢٢	٠,٠٣٣	دون قيري	شيلي
Zhang et al., 2012; UNEP, 2011	(٤٨٢) ٢,٢٤٨-٠,٠١	٠,١٧	قيري/دون قيري	الصين
Finkelman, 2004	(١٦) ٠,١٧-٠,٠٢ <	٠,٠٦٩	دون قيري	كولومبيا
Finkelman, 2003	(١٦) ٠,٧٩-٠,٠٣ >	٠,٣٣٨	ليغنيت	الجمهورية التشيكية
Tewalt et al., 2010	(٢١) ٠,٣٨-٠,٠٣	٠,١٢٦	قيري	
Tewalt et al., 2010	(٢٤) ٠,٣٧-٠,٠٢	٠,١٢	قيري	مصر
Tewalt et al., 2010	(٣) ٠,٠٧١-٠,٠٣	٠,٠٤٤	قيري	فرنسا
Pirrone et al., 2001	١,٤-٠,٧		قيري	ألمانيا
MUNLV 2005	٠,٠٩	٠,٠٥	ليغنيت	
	(٥) ١,٢-٠,٠٩١	٠,٣٥٤	قيري	
Tewalt et al., 2010	(١٩) ٠,٣١-٠,٠٤	٠,١٣٨	دون قيري	هنغاريا
	(١٢) ٠,٤٤-٠,٠٧٥	٠,٢٤٢	ليغنيت	
	(٩٩) ٠,٨٦-٠,٠٢	٠,١٠٦	قيري	
Tewalt et al., 2010; UNEP, 2014	(٨) ٠,٠٩٣-٠,٠٥٣	٠,٠٧١	ليغنيت	الهند
Finkelman, 2003; Tewalt et al., 2010	(٨) ٠,١٩-٠,٠٢	٠,١١	ليغنيت	إندونيسيا
US EPA, 2002	(٧٨) ٠,٠٥-٠,٠١	٠,٠٣	دون قيري	
Tewalt et al., 2010	(٥٧) ٠,٧٣-٠,٠٢	٠,١٦٨	قيري	إيران
Ito et al., 2004	(٨٦) ٠,٢١-٠,٠١	٠,٠٤٥٤	قيري	اليابان
Tewalt et al., 2010	(١٥) ٠,١٤-٠,٠٣ >	٠,٠٨	قيري	كازاخستان
	(٥) ٠,١-٠,٠٣	٠,٠٧٣	قيري	
Tewalt et al., 2010	(٩) ٠,١٣-٠,٠٦٢	٠,٠٨٢	دون قيري	نيوزيلندا
Tewalt et al., 2010	(٣٦) ٠,٢٢-٠,٠٢	٠,٠٩٧	قيري	منغوليا
Finkelman, 2004	(١٥) ٠,٦٣-٠,٠٤	٠,٢٧	أنثراسيت+قيري	بيرو
Finkelman, 2004	٠,١-٠,٠٤ >	٠,٠٤	دون قيري	الفلبين
Bojkowska et al., 2001	٠,١٦٣-٠,٠١٣	٠,٠٨٥	قيري	بولندا
Finkelman, 2004	(١١) ٠,٤٦-٠,٠٧	٠,٢١	ليغنيت+دون قيري	رومانيا
UNEP, 2013b	(٢٣) ٠,٢٥-٠,٠٢ >	٠,١٢	قيري/	روسيا

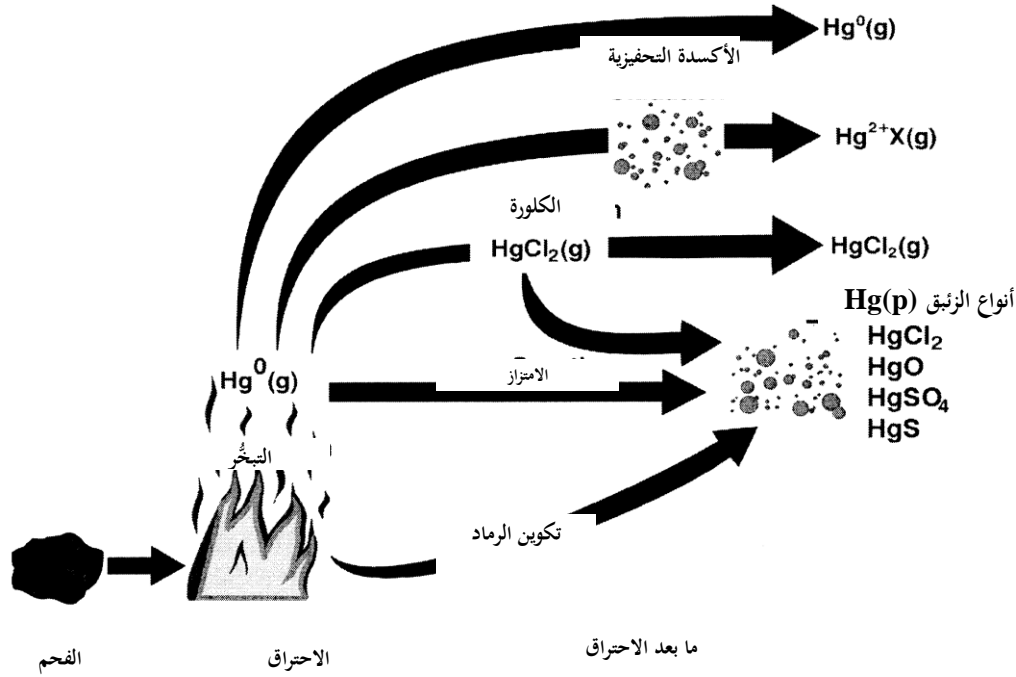
المرجع	المدى	متوسط جميع العينات	نوع الفحم	البلد
Romanov et al., 2012			دون قيري	
Finkelman, 2004	(٧) ٠,١٣-٠,٠٣	٠,٠٨	قيري	الجمهورية السلوفاكية
Tewalt et al., 2010	(٨) ٠,١٤-٠,٠٣٢	٠,٠٥٧	ليغنيت	جنوب أفريقيا
Leaner et al., 2009; Tewalt et al., 2010	(٤٠) ٠,١-٠,٠٢٣	٠,١٥٧	قيري	تنزانيا
Finkelman, 2004	(٧٥) ٠,٢٢-٠,٠٣	٠,١٢	ليغنيت	تايلند
Tewalt et al., 2010	(٢٣) ٠,٦-٠,٠٢	٠,١٣٧	ليغنيت	تركيا
Tewalt et al., 2010	(١٤٩) ٠,٦٦-٠,٠٣	٠,١٢	قيري	المملكة المتحدة
Tewalt et al., 2010	(٨٤) ٠,٦-٠,٠١٢	٠,٢١٦	دون قيري	الولايات المتحدة الأمريكية
US EPA, 1997	(٦٤٠) ٨,٠-٠,٠١	٠,١	ليغنيت	
US EPA, 1997	(١٨٣) ١,٠-٠,٠٣	٠,١٥	قيري	
US EPA, 1997	(٣٥٢٧) ٣,٣-٠,٠١>	٠,٢١	أنثراسيت	
US EPA, 1997	(٥٢) ٠,٣٠-٠,١٦	٠,٢٣	أنثراسيت	
Tewalt et al., 2010	(٦) ٣٤-٠-٠,٠٢>	٠,٣٤٨	قيري	فيت نام
Tewalt et al., 2010	(١٤) ٣,٦-٠,٠٣>	٠,٦	أنثراسيت	زامبيا
Tewalt et al., 2010	(٦) ٠,١٥-٠,٠٣>	٠,٠٨	قيري	زيمبابوي

ملاحظة: ينبغي توخي الحذر عند تفسير معلومات تركيزات الزئبق الواردة أعلاه، نظراً لأن مجموعات عينات الفحم لمختلف البلدان تتباين تبايناً واسعاً. وبالإضافة إلى ذلك، فإن المعلومات غير متوافرة علمياً لتوضيح ما إن كانت تركيزات الزئبق المبلغ عنها تستند إلى الفحم الجاف أو أرقام الفحم كما وردت. وهذه البيانات قد لا تُمثّل الفحم من منظور حرق الفحم الفعلي. ويوضح الرقم الموضوع بين قوسين في عمود "المدى" عدد العينات.

تحولات الزئبق أثناء حرق الفحم

العناصر الرئيسية القابلة للاشتعال في الفحم هي الكربون الأوّلي والهيدروجين ومركباتهما.

ويُمثل الشكل ٢ (غالبريث وزيجارليك، ٢٠٠٠) مخططاً توضيحياً للتحولات الفيزيائية والكيميائية التي يمر بها الزئبق أثناء حرق الفحم، وبعد ذلك في غاز المدخنة الناتج. ويرتبط الزئبق أساساً بالعناصر المعدنية غير العضوية في الفحم، رغم أنه أشير إلى وجود رابطة بين الزئبق والعناصر العضوية في الفحم الموجودة في شكل مركبات عضوية زئبقية (سوين، ١٩٩٠؛ غروين وكريغ، ١٩٩٤؛ وفينكلمان، ١٩٩٤). وبناءً على ذلك فإن البيريت (FeS_2) هو المعدن الغالب الذي يستضيف الزئبق في الفحم. وفي حالات نادرة من التحصيص الشاذ للزئبق قد يوجد أيضاً كبريتيد الزئبق (HgS) (كولكر وآخرون، ٢٠٠٦؛ كولكر، ٢٠١٢ والمراجع المذكورة فيه). ونظراً لأن المستقبلات المعدنية (وربما الزئبقية العضوية) للزئبق تتحلل أثناء الاشتعال (< ١٤٠٠ درجة مئوية)، فإن الزئبق يتطور ليصبح زئبقاً أولياً (Hg^0). ولا تؤثر طريقة وجود الزئبق في الفحم على آلية تحول الاحتراق الأوّلي المذكور.



الشكل ٢ - تحولات الزئبق المحتملة أثناء الاحتراق وما بعد الاحتراق (غالبريث وزيفارليك، ٢٠٠٠)

ويمكن تصنيف انبعاثات الزئبق من المراحل التي تعمل بحرق الفحم إلى ثلاثة أشكال: الزئبق النقي الغازي (Hg^0) والزئبق المؤكسد الغازي (Hg^{2+}) والزئبق العالق بالجسيمات (Hg_p) الذي قد يكون زئبقاً أولياً أو مؤكسداً. والكميات النسبية لهذه الأشكال الرئيسية الثلاثة للزئبق في غازات المداخن هي ما يسمى تنوعات الزئبق. ومن المفترض أن بروميد أو كلوريد الزئبق هي الآلية الغالبة للتحويل الكيميائي للزئبق التي تؤثر على تنوعات الزئبق. وتنطوي الآليات المحتملة الأخرى على تفاعلات الزئبق مع أسطح جسيمات الرماد حيث تتوفر الأنواع الكيميائية المتفاعلة والعوامل المحفزة ومواقع الامتزاز النشط لتحويل الزئبق النقي إلى زئبق مؤكسد، وكذلك تحويل الزئبق النقي والمؤكسد إلى زئبق عالق بالجسيمات (غالبريث وزيفارليك، ٢٠٠٠).

وتحدث مرحلة الأكسدة في الطور الغازي أساساً عن طريق أنواع الكلور الموجودة أصلاً في الفحم، مع انخفاض حرارة الغازات المارة عبر أجهزة التسخين المسبق للهواء وأجهزة ضبط التلوث. ويتوقف مدى أكسدة الزئبق في الطور الغازي إلى حد كبير على رتبة الفحم وتركز الكلور الموجود في الفحم وظروف تشغيل المراحل (مثل نسبة الهواء إلى الوقود ودرجة الحرارة). وعلى سبيل المثال، توصلت دراسة عن قياسات تنوعات الزئبق من ١٤ نظاماً مختلفاً لحرق الفحم إلى وجود نسبة تتراوح من ٣٠ إلى ٩٥ في المائة من الزئبق المؤكسد في المرحلة السابقة لأجهزة ضبط تلوث الهواء (بريستبو وبلوم، ١٩٩٥). وأظهرت دراسة استقصائية للمؤلفات ذات الصلة بالموضوع أن أكسدة الزئبق تتراوح أساساً في نطاق ٤٥-٨٠ في المائة، حيث يأخذ الشكل المؤكسد من الزئبق في معظم الأحيان شكل كلوريد الزئبق (سينيور وآخرون، ٢٠٠٤). وتستخدم أشكال مختلفة من إحراق أو إشعال الفحم في منشآت الطاقة والمراحل الصناعية. وهذه الأساليب تشمل:

- الإشعال المعلق للفحم المسحوق (إشعال الفحم المسحوق)
- الإشعال بالوقود (أي الإشعال من حاملة وقود ثابتة أو تتحرك ببطء)
- الإشعال على قاعدة مميعة (سواء في شكل يحدث الفقاعات أو قاعدة مميعة دوارة)
- الإشعال الإعصاري للفحم المجروش

وينتج معظم البخار المتولد على نطاق كبير في منشآت الطاقة من خلال إشعال الفحم المسحوق. وفي المرحل الذي يعمل بالفحم المسحوق يتم سحق الفحم المطحون جيداً ليصبح مسحوقاً ناعماً ويتم ضخه مباشرة إلى محارق منفردة حيث يختلط بهواء إحراق سبق تسخينه، ثم يتم إحراقه في شكل لهب. وتستعمل طاقة التسخين الناتجة عن عملية الاحتراق لإنتاج البخار الذي يدفع مولدات توربينياً مجهّزاً لإنتاج الكهرباء. وتوضح الاختبارات الميدانية أن صورة التنوعات تتباين بشدة بين المراحل المختبرة التي تعمل بالفحم المسحوق (وانغ وآخرون، ٢٠١٠).

والإشعال بجهاز الوقود لا يزال يستعمل في بعض أجزاء العالم، وذلك أساساً في المراحل الصغيرة. وفي نظام الإشعال بالوقاد يمر الهواء الساخن في اتجاه صاعد من خلال فتحات في حامله الوقود. وتوضع أجهزة ترطيب في المناطق الواقعة أسفل حامله الوقود من أجل الوصول إلى التوجيه الصحيح لتدفق الهواء. ويضيف الإحراق فوق النار (أي الهواء الذي يضاف فوق الشبكة الحاملة للوقود) مزيداً من الاضطراب للغازات الصاعدة من الشبكة الحاملة للوقود ويوفّر الهواء المطلوب لجزء الوقود الذي يشتعل بشكل معلق. وعموماً، تنتج الوقودات كمية أقل من الجسيمات لكل وحدة من الوقود المشتعل وتنتج جسيمات أكبر مقارنة بإشعال الفحم المسحوق، لأن الإشعال يحدث في طبقة وقود ساكنة بدون انتقال كميات كبيرة من الرماد إلى غازات العادم.

والإشعال على طبقة مميّعة مفيد خصيصاً في أجل التعامل مع أنواع الفحم من نوعية منخفضة (دون حاجة إلى التحفيف). وفي جهاز إشعال ذي قاعدة مميّعة من نوع طبقة الفقاعات، يتم تنظيم حجم جسيمات الفحم وسرعة الهواء الرأسي لإنشاء سطح أفقي منفصل يعمل على فصل الطبقة النشطة عن التدفق المسحوب من الفرن المفتوح الواقع فوقها. والآلية الأساسية لضبط درجة حرارة الطبقة السفلى ونقل الحرارة إلى جدران جهاز الاحتراق وإلى أي سطح تسخين مغمور في سطح قاعدة مرجل الطبقة المميّعة هي التباين في موحودات المواد الصلبة. ويمكن التحكم في درجة حرارة جهاز الاحتراق ذي القاعدة المميّعة في نطاق ضيق. ويوضّح قياس تركيزات الزئبق المأخوذة في الموقع من مرجل ذي قاعدة مميّعة دوارة أن زئبق الجسيمات هو نوع الزئبق الغالب في غاز مدخنة المرجل (دوان وآخرون، ٢٠١٠).

وفي الإشعال الإعصاري، يتم حرق الفحم المحروش (ولكن غير المسحوق) في غرفة احتراق تدور بسرعة تحت درجات حرارية عالية، وتحوّل معظم المادة المعدنية في الفحم إلى خبث سائل. بعد ذلك تدخل الغازات الساخنة إلى الفرن حيث تشع الحرارة إلى جدران الفرن وتحمل الحرارة إلى البخار المتولد، الذي يدفع مولدات توربينياً مجهّزاً لإنتاج الكهرباء. وتولّد المراحل الإعصارية رماداً متطايراً يقل عن الرماد المتطاير الصادر عن مراحل الفحم المسحوق لكل وحدة من الفحم المحروق، لأن معظم المادة المعدنية في المرجل الإعصاري يتحول إلى خبث سائل يتم جمعه من قاع غرفة الاحتراق الإعصاري.

قائمة تقنيات تخفيض انبعاثات الزئبق

يصف هذا القسم نُهج التعامل مع تخفيض انبعاثات الزئبق وتكنولوجيات الضبط التي يمكن النظر فيها لتحديد أفضل التقنيات المتاحة لأي طرف أو مرفق (انظر القسم ٥ أدناه). وتشمل معالجة الفحم والفوائد المشتركة مع إزالة الزئبق والتقنيات المخصصة لإزالة الزئبق.

غسل الفحم

يقلل غسل الفحم المحتوى من الرماد ويحسن قيمة التسخين وهو ما يزيد من كفاءة المراحل (ساتيامورتي، ٢٠٠٧). وفي حين أن غسل الفحم يستهدف في المقام الأول التقليل من الرماد ومحتوى الكبريت في الفحم فإنه يمكن أن يقلل أيضاً من محتوى الزئبق في الفحم، ويحدث ذلك بالفعل في بعض الحالات. ويتضمن الفحم الخام شوائب معدنية مثل الصخور والصلصال التي يشار إليها باعتبارها من الرماد. وينبغي حسب الاقتضاء معالجة هذا الفحم الخام (أو تنظيفه) لتقليل المحتوى من الرماد وزيادة قيمة التسخين وتقليل الجسيمات والكبريت وكذلك احتمال تقليل المحتوى من الزئبق للوصول في نهاية المطاف إلى انبعاثات أقل عند حرق الفحم في المرجل. وبالإضافة إلى ذلك، فإن إزالة الشوائب المعدنية يقلل أيضاً تكاليف التشغيل والصيانة ويبطئ تدهور نظام المرجل. ولكن ينبغي أن يلاحظ أن معظم أنواع اللغنيت والفحم البني لا تتقبل أساليب غسل الفحم التقليدية (مؤسسة المهندسين الكيميائيين، ١٩٩٧).

ويمكن أيضاً أن تزيل أساليب غسل الفحم التقليدية بعض الزئبق المصاحب للمواد المعدنية غير القابلة للاشتعال. ومع ذلك فإن هذه الأساليب لن تقوم نمطياً بإزالة الزئبق المصاحب لهيكل الكربون العضوي في الفحم (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ٢٠٠٢). وتتشهد إحدى الجملات بيانات اختبار ٢٦ عينة فحم قيري من الولايات المتحدة أظهرت اتساع نطاق مقدار الزئبق الذي تمت إزالته بغسل الفحم (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ١٩٩٧). وقد تأكد هذا الاتجاه بدراسة أخرى (مؤسسة الولايات المتحدة للمسح الجيولوجي، ٢٠١٤)، خلصت إلى أن غسل الفحم يتصف بالفعالية في تقليل تركيزات العناصر المصاحبة للكبريت مثل الزئبق. ولكن دراسة أخرى تذكر انخفاضاً متوسطاً للزئبق على أساس الطاقة بنسبة ٣٧ في المائة (توول- أونيل وآخرون، ١٩٩٩).

والتباين في انخفاضات الزئبق المذكورة أعلاه قد يكون تابعاً لنوع العملية المستعملة لغسل نوع معين من الفحم ورتبة الفحم وطبيعة الزئبق في مصفوفة الفحم. وباختصار، فإن إزالة بعض الزئبق من الفحم أمر ممكن في حالة استخدام الأساليب التقليدية لغسل الفحم. ولكن فعالية إزالة الزئبق أثناء غسل الفحم بالطريقة التقليدية تتباين بصورة واسعة حسب مصدر الفحم وطبيعة الزئبق الموجود فيه.

الآثار الشاملة لعدة أوساط نتيجة غسل الفحم

يولّد غسل الفحم ملاماً من النفايات المحتوية على الزئبق. وهناك احتمال لتلوث التربة أو المياه الجوفية في حالة عدم إدارة ملاط غسيل الفحم بطريقة آمنة.

مساهمة نظم ضبط تلوث الهواء في إزالة الزئبق

تعمل نظم ضبط تلوث الهواء التي تقام أساساً لضبط ثنائي أكسيد الكبريت أو كلوريد الهيدروجين أو الجسيمات الدقيقة على إزالة الزئبق من غاز المداخن. ويسمى ذلك المنافع المشتركة لإزالة الزئبق. وتتحقق المنافع المشتركة لإزالة الزئبق من معدات ضبط تلوث الهواء غير الزئبقية في معظم الأحيان بطريقتين أساسيتين: إزالة الزئبق المؤكسد في جهاز تنظيف رطب لإزالة الكبريت من غاز المداخن وإزالة الزئبق العالق بالجسيمات الدقيقة في جهاز لضبط الجسيمات الدقيقة، مثل المرسب الكهروستاتيكي أو المرشح النسيجي. والمنافع المشتركة لإزالة الزئبق يمكن أن تتحقق أيضاً بأجهزة الامتصاص المحففة بالرش. ويمكن تحقيق كميات متباينة من إزالة الزئبق حسب تشكيلة معدات مكافحة التلوث. ويتضمن الجدول ٢ (سريفاستافا وآخرون، ٢٠٠٦؛ المكتب الأوروبي للمكافحة المتكاملة للتلوث ومنعه، ٢٠١٣) لمحة عامة عن حجم المنافع المشتركة لإزالة الزئبق بالنسبة لتشكيلات مختلفة من نظم ضبط تلوث الهواء. وينبغي أن يلاحظ أن المنافع المشتركة لإزالة الزئبق كما ترد في الجدول ٢ تتباين حسب خصائص الفحم والبارامترات التشغيلية لنظم ضبط تلوث الهواء.

الجدول ٢ - لمحة عامة عن المنافع المشتركة لإزالة الزئبق في نُظم ضبط تلوث الهواء

التقاط الزئبق النوعي	معدات الضبط الموجودة
التقاط جيد للزئبق العالق بالجسيمات؛ التقاط أفضل من أنواع الفحم المرتفع الكلور عن أنواع الفحم المنخفضة الجودة	ESPc فقط
التقاط منخفض	ESPh فقط
التقاط جيد للزئبق المؤكسد	FF فقط
بوجه عام، التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور بفضل وجود زئبق مؤكسد قابل للذوبان في غاز المدخنة. والتقاط سيئ نسبياً من أنواع الفحم المنخفضة الجودة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة.	ESPc + wet FGD
بوجه عام، التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور. بفضل وجود الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة. والتقاط سيئ نسبياً من أنواع الفحم المنخفضة الجودة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة. ويمكن أن يتأكسد الزئبق النقي عبر المرشح النسيجي ويتم التقاطه في جهاز التنظيف الرطب.	ESPh + wet FGD
بوجه عام، التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور. ويُنتظر أن تقل المنافع المشتركة للالتقاط من أنواع الفحم المنخفضة الجودة.	SDA + FF
بوجه عام، التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور بفضل وجود زئبق مؤكسد قابل للذوبان في غاز المدخنة. والتقاط سيئ نسبياً من أنواع الفحم المنخفضة الجودة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة. ويمكن أن يتأكسد الزئبق النقي عبر المرشح النسيجي ويتم التقاطه في جهاز التنظيف الرطب.	FF + Wet FGD
التقاط جيد للزئبق العالق بالجسيمات، والتقاط أفضل من أنواع الفحم المرتفع الكلور عن الأنواع المنخفضة الجودة.	SCR + ESPc
التقاط منخفض	SCR + ESPh
التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة الذي يدعمه الاختزال الحفزي الانتقائي. ويتحسن الالتقاط من أنواع الفحم المنخفض الجودة بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة. والتقاط جيد للزئبق العالق بالجسيمات	SCR + ESPc + wet FGD
التقاط مرتفع جداً من أنواع الفحم المرتفعة الكلور بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة الذي يدعمه الاختزال الحفزي الانتقائي. ويتحسن الالتقاط من أنواع الفحم المنخفض الجودة بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة. والجمع بين المبادل الحراري والمرسب الكهروستاتيكي بدرجة حرارة شديدة الانخفاض يُعزّز التقاط الزئبق العالق بالجسيمات والزئبق في طور البخار.	SCR + HEX + LLT-ESP + wet FGD
التقاط جيد عموماً من أنواع الفحم المرتفعة الكلور ويقل الالتقاط في الأنواع المنخفضة الجودة. ويُعزّز الاختزال الحفزي الانتقائي الالتقاط حيث يؤكسد الزئبق النقي إلى زئبق مؤكسد، نظراً لتوفر الكلور في غاز المدخنة	SCR + SDA + FF

التقاط الزئبق النوعي

معدات الضبط الموجودة

التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة الذي يدعمه الاحتزال الحفزي الانتقائي ويتحسن الالتقاط في حالة أنواع الفحم المنخفضة الجودة بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة.

SCR + ESPh + wet FGD

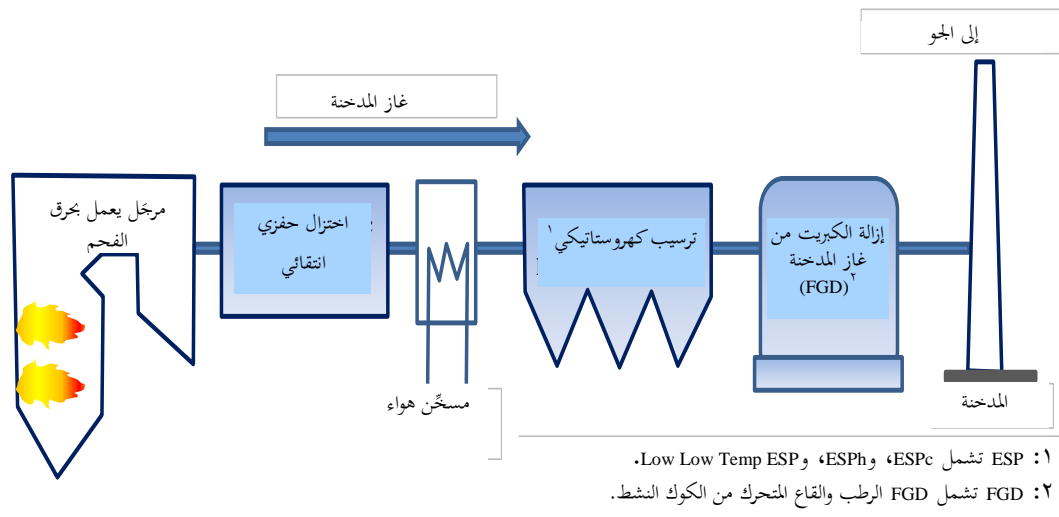
التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة الذي يدعمه الاحتزال الحفزي الانتقائي. ويتحسن الالتقاط من أنواع الفحم المنخفضة الجودة بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة. والتقاط جيد للزئبق العالق بالجسيمات

SCR + FF + wet FGD

المفتاح:

ESP = المرسب الكهروستاتيكي، ESPc = المرسب الكهروستاتيكي في الجانب البارد؛ ESPh = المرسب الكهروستاتيكي في الجانب الساخن؛ FF = المرشح النسيجي؛ SCR = الاحتزال الحفزي الانتقائي؛ SDA = جهاز امتصاص التحفيز بالرش (جهاز التنظيف الجاف)؛ FGD الرطب = جهاز التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة؛ HEX = التبادل الحراري؛ LLT-ESP = المرسب الكهروستاتيكي بدرجة حرارة شديدة الانخفاض وتعني صفة منخفض الضبط بنسبة أقل من ٣٠ في المائة، وتعني مرتفع/جيد الضبط بنسبة أكثر من ٧٠ في المائة، وتعني "معتدل" الضبط بنسبة ٣٠ إلى ٧٠ في المائة.

وترد تشكيلات نُظُم ضبط تلوث الهواء المعروضة في الجدول ٢ (FGD+ESPh+SCR) بصورة تخطيطية في الشكل ٣ أدناه. ويرد أدناه (إيتو وآخرون، ٢٠٠٦). وعلى سبيل المثال، حققت هذه المجموعة من الأجهزة في اليابان كفاءة في إزالة الزئبق بمتوسط ٧٤ في المائة (إيتو وآخرون، ٢٠٠٦). ولذلك يمكن أن تضبط تقنيات المنافع المشتركة ملوثات الهواء المتعددة، بما فيها الزئبق.

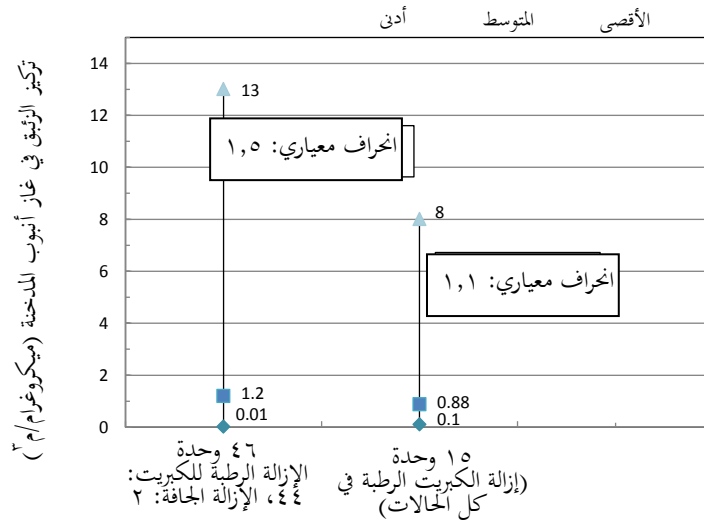


الشكل ٣- رسم تخطيطي لتشكيلة نمطية من منشآت طاقة تعمل بحرق الفحم في اليابان (إيتو وآخرون، ٢٠٠٦) (منفتح)

ويمكن أن يتحقق مستوى مرتفع من المنافع المشتركة لإزالة الزئبق بجمع الاحتزال الحفزي الانتقائي والمرسبات الكهروستاتيكية في الجانب البارد (ESPc) وأجهزة التنظيف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (FGD). والجمع بين هذه التقنيات أمر نمطي تماماً في المنشآت المتقدمة للطاقة التي تعمل بحرق الفحم في بعض البلدان ويستعمل على نطاق واسع في اليابان على سبيل المثال، كما يتضح في الشكل ٤. والجمع بين الاحتزال الحفزي الانتقائي والمرسب الكهروستاتيكي وإزالة الكبريت من غاز المدخنة كما يتضح من هذه الأمثلة يمكن أن يحقق كفاءة إزالة تبلغ ٥٠-٩٠ في المائة في حالة أكاسيد النيتروجين وأكثر من ٩٩ في المائة في حالة الجسيمات الدقيقة العالقة و٧٦-٩٨ في المائة في حالة ثنائي أكسيد الكربون، إلى جانب كفاءة عالية لإزالة الزئبق

بمتوسط ٧٤ في المائة، ويؤدي ذلك إلى ١,٢ ميكروغرام/م^٣ من تركيز الزئبق في غاز المدخنة في هذا المثال. وبالإضافة إلى ذلك، فإن الجمع بين الاختزال الحفزي الانتقائي والمرسب الكهروستاتيكي بدرجة حرارة شديدة الانخفاض، الذي تبلغ درجة حرارة تشغيله ٩٠ درجة مئوية بالإضافة إلى التنظيف الرطب لإزالة الكبريت يمكن أن يحقق كفاءة إزالة للزئبق بمستوى مرتفع إلى حد كبير يصل إلى ٨٧ في المائة، مما يؤدي إلى ٠,٨٨ ميكروغرام/م^٣ من تركيز الزئبق في غاز المدخنة في هذه الحالة بالتحديد. والمرسب الكهروستاتيكي بدرجة حرارة شديدة الانخفاض، الذي يتطلب تبريد غاز المدخنة، يحسّن ضبط الجسيمات من خلال تقليل حجم الغاز وتخفيض مقاومة الرماد بسبب تكثف ثلاثي أكسيد الكبريت وامتزاز الرطوبة للرماد المتطاير، وزيادة الرطوبة للرماد المتطاير، كما يزيد امتصاص الزئبق في الرماد المتطاير بسبب انخفاض درجة حرارة غاز المدخنة. ويؤدي ذلك أيضاً إلى تجنب التكاليف المصاحبة لإعادة تسخين غاز المدخنة أو عمليات التعديل الرجعي التي يتطلبها أنبوب المدخنة الرطب. وفي الحالات التي لا تتطلب إعادة تسخين عادم التنظيف الرطب لإزالة الكبريت فإن الحرارة المستعادة يمكن استخدامها في المرجل أو التوربين البخاري لتحسين كفاءة الوحدة، مما يؤدي إلى زيادة صافي الناتج (ناكاياما وآخرون، ٢٠٠٦، وأيواتسوكي وآخرون، ٢٠٠٨).

ويظهر الشكل ٤ اتساع نطاق تركيزات الزئبق. ويرجع ذلك إلى أن هذه الوحدات تشمل وحدات أقدم أو أصغر تعطي التركيزات الأعلى. ومن ناحية أخرى، فإن الوحدات اللتين تعملان بطبقة متحركة من الكوك النشط (بيترز، ٢٠١٠)، وهي جهاز التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة، يوضح أداءً أكثر ارتفاعاً عن جهاز التنظيف الرطب لإزالة الكبريت. والأداء في هذه الحالة أكثر ارتفاعاً عن المجموعة التي تشمل المرسب الكهروستاتيكي بدرجة حرارة شديدة الانخفاض وجهاز التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (معهد البحوث المركزي لصناعة الطاقة الكهربائية واتحاد شركات الطاقة الكهربائية في اليابان، ٢٠١٢).



ملحوظة: المرسب الكهروستاتيكي في مجموعة FGD+ESP+SCE يشمل ESPh يشمل ESPc، وLLT-ESP وESPh درجة حرارة التشغيل في ESPh تبلغ ٣٠٠-٤٠٠ درجة مئوية و١٣٠-١٨٠ درجة مئوية في ESPc و٩٠-١٠٠ درجة مئوية في LLT-ESP

الشكل ٤ - تركيز الزئبق في غاز المدخنة من منشآت الطاقة التي تعمل بحرق الفحم باستعمال مجموعة FGD+ESP+SCR ومجموعة FGD+LLT-ESP+SCR

ويُلخص الجدول ٣ كفاءة إزالة الزئبق لأجهزة ضبط تلوث الهواء في منشآت حرق الفحم في الصين. ويتضح من الجدول أنه في بعض الحالات يحقق الجمع بين المرسبات الكهروستاتيكية والإزالة الرطبة للكبريت من غاز المدخنة كفاءة في إزالة الزئبق تصل إلى ٨٨ في المائة. والجمع بين الاختزال الحفزي الانتقائي والمرسبات الكهروستاتيكية والإزالة الرطبة للكبريت، وهي مجموعة تستعمل بصورة واسعة في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم في الصين، يمكن أن يحقق كفاءة أكبر لإزالة الغاز، تصل على

سبيل المثال إلى ٩٥ في المائة. ولوحظ أيضاً ارتفاع كفاءة إزالة الزئبق في حالة الجمع بين الاختزال الحفزي الانتقائي والمرشحات النسيجية والتنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة.

الجدول ٣ - كفاءة إزالة الزئبق حسب المجموعات النمطية لأجهزة ضبط تلوث الهواء في الصين (بالنسب المئوية) جانغ وآخرون، ٢٠١٥)

عدد الاختبارات	الانحراف المعياري	الحد الأقصى	الحد الأدنى	المتوسط	مجموعة أجهزة ضبط تلوث الهواء
٨	١٨	٥٩	٧	٢٣	التنظيف الرطب للحسيمات العالقة
٦٤	١٩	٨٣	١	٢٩	المرسبات الكهروستاتيكية في الجانب البارد
١٠	٣٠	٩٢	٩	٦٧	المرشحات النسيجية
١٩	٢٢	٨٨	١٣	٦٢	المرسبات الكهروستاتيكية في الجانب البارد + التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة
٣	١٠	٩٧	٧٧	٨٦	المرشحات النسيجية + التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة
٤	٢٤	٩٥	٣٦	٦٩	الاختزال الحفزي الانتقائي + المرسبات الكهروستاتيكية + التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة
٢	٩	٩٩	٨٦	٩٣	الاختزال الحفزي الانتقائي + المرشحات النسيجية + التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة
١		٦٨	٦٨	٦٨	المرسبات الكهروستاتيكية الباردة + القاعدة المسيلة الدائرية - التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة + المرشحات النسيجية

ويوضح الجدول ٤ أدناه قيم قياس انبعاثات الزئبق لمختلف منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم، التي تم التوصل إليها من خلال المنافع المشتركة لوسائل ضبط التلوث. والأمثلة المختارة في هذا الجدول توضح أن تقنيات الضبط ذات المنافع المشتركة تحقق في بعض الحالات تركيزات منخفضة من الزئبق في غاز المدخنة.

الجدول ٤ - مستويات الانبعاثات المتحققة من خلال تقنيات المنافع المشتركة (بيانات جمعها الفريق العامل للزئبق الصفري، ٢٠١٥)

المنشأة	نوع الفحم	مستوى الانبعاثات (مغ/متر عادي ^٣) (التسوية إلى ٥٦٪ من محتوى O ₂)	حجم المرجل (ميغاواط حراري)	تقنية معالجة غاز المدخنة
Federico II - برينديسي، إيطاليا	فحم صلب	٠,٦٩	١٧٠٠	ESP+SCR+wFGD
Torrevaldaliga Nord، إيطاليا	فحم صلب	٠,٩٩	١٤٢٠	FF+SCR+wFGD
Impianto termoelettrico di Fusina، إيطاليا	فحم صلب	٠,٨	٤٣١	FF+SCR+wFGD
Heyden، ألمانيا	فحم صلب	٠,٥	٢١٥٠	ESP+SCR+wFGD
FHKW Mellach، النمسا	فحم صلب	٠,٥	٥٤٣	FF+SCR+wFGD
Brindisi BR III & BR II، إيطاليا	فحم صلب	٠,٥	٨٥٧	ESP+SCR
Krefeld، ألمانيا (مرجل صناعي)	فحم صلب	٠,٢	١٠٥	FF
Salem Harbour، الولايات المتحدة الأمريكية	فحم صلب	٠,٢ - ٠,٤	٣٠٠	ESP
Power plant Tusimice، الجمهورية التشيكية	لغنيت	٢,٦	٨٩٠	ESP+wFGD
Neurath، ألمانيا	لغنيت	٣,٠	٨٥٥	ESP+wFGD
Teplarna Tabor، الجمهورية التشيكية	لغنيت	٣,٣	١٩٩	ESP

ملحوظة: تستند جميع القيم إلى عينات دورية باستثناء Salem Harbour، التي تستند قيمتها إلى رصد مستمر للانبعاثات. والبيانات الواردة هي عن سنة ٢٠١٠.

أجهزة ضبط الجسيمات

يوجد نوعان رئيسيان من أجهزة ضبط الجسيمات وتشمل المرسبات الكهروستاتيكية والمرشحات النسيجية. وتستخدم أجهزة التنظيف الرطب للجسيمات أيضاً في المراحل العاملة بحرق الفحم.

المرسبات الكهروستاتيكية

تُصمَّم المرسبات الكهروستاتيكية نمطياً لتحقيق أكثر من ٩٩ في المائة من الكفاءة في جمع الجسيمات، رهناً بمختلف العوامل المعروضة في القسم التمهيدي. وكفاءة جمع الجسيمات في المرسبات الكهروستاتيكية تُمثل أيضاً دالة على المحتوى الكبريتي في الفحم، الذي يؤثر على مقاومة الرماد المتطاير. فالفحم الذي يحتوي على مقادير متوسطة إلى مرتفعة من الكبريت ينتج رماداً متطائراً يسهل جمعه. أما الفحم الذي يحتوي على كبريت منخفض فينتج رماداً متطائراً بمقاومة أعلى وتزداد صعوبة جمعه. ويمكن أيضاً تغيير مقاومة الرماد المتطاير من خلال تقليل درجة الحرارة في المرسبات أو بتكثيف الجسيمات قبل دخولها في المرسب بثلاثي أكسيد الكبريت (SO_3) أو حامض الكبريت (H_2SO_4) أو الماء أو الصوديوم أو النشادر (NH_3).

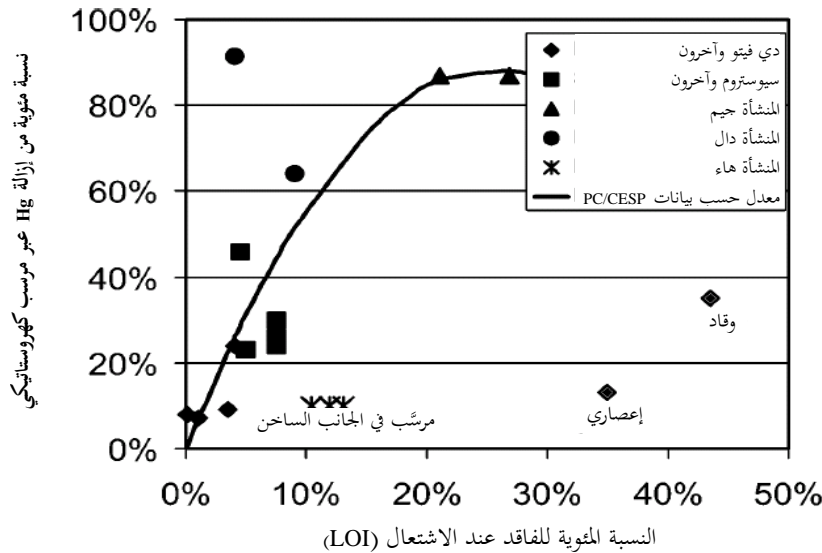
وبالنسبة لأي رماد متطاير من الفحم تكون كفاءة جمع الجسيمات في المرسب دالة على حجم الجسيمات. فالجسيمات التي تزيد عن ١ ميكرومتر - ٨ ميكرومتر يتم جمعها نمطياً بكفاءات تبلغ ٩٥ إلى ٩٩,٩ في المائة. ولكن الجسيمات التي يقترب حجمها من ٠,٣ ميكرومتر تدخل في منطقة تحميل سيئة تقلل كفاءة الجمع لتصل إلى ٨٠-٩٥ في المائة (لوليس، ١٩٩٦).

ويمكن استعمال المرسب الكهروستاتيكي في أحد موقعين في نظام المرجل: ما يسمى مرسب "الجانب البارد" (ESPC) ومرسب "الجانب الساخن" (ESPh). ويتم تركيب مرسب الجانب البارد في اتجاه خروج مسخّن الهواء (درجة حرارة غاز المدخنة تتراوح بين ١٣٠ درجة مئوية و ١٨٠ درجة مئوية). ويتم تركيب مرسب الجانب الساخن في المنبع لمسخّن الهواء (تتراوح درجة حرارة غاز المدخنة بين ٣٠٠ درجة مئوية و ٤٠٠ درجة مئوية) ويمكن ذلك من الاستفادة من انخفاض مقاومة الرماد المتطاير في درجات الحرارة الأعلى. ويتسم ذلك بأهمية خاصة في الوحدات التي تعمل بحرق فحم منخفض الكبريت، مما يؤدي إلى رماد متطاير بمقاومة كهربائية أعلى. والمرسب الكهروستاتيكي الرطب هو نوع جديد من المرسبات ويتسم بكفاءة أعلى لجمع الجسيمات الدقيقة (ألتمان وآخرون، ٢٠٠١ وستايل وآخرون، ٢٠٠٣). ولكن لم يتم بعد القيام بقياسات في الموقع بشأن إزالة الزئبق داخل المرسب الرطب.

ولوحظت مستويات متباينة من إزالة الزئبق في المرسبات الكهروستاتيكية. ويتوقف مستوى إزالة الزئبق على ما إن كان المرسب الكهروستاتيكي في الجانب البارد أو في الجانب الساخن، وعلى نوع الفحم المحروق، ونوع المرجل، وعوامل أخرى مثل محتوى الكبريت في الفحم ومستوى الكربون غير المحروق في الرماد المتطاير. والمرسب في الجانب الساخن يكون عموماً أقل فعالية في إزالة الزئبق عن المرسب المقام في الجانب البارد. وعلى سبيل المثال، فعلى الرغم من أن مستوى إزالة الزئبق المبلّغ عنها باستعمال مرسب كهروستاتيكي يعمل على الفحم القيرى تبلغ ٣٠ في المائة فإن نطاق الإزالة المقاسة يتراوح بين صفر إلى حوالي ٦٠ في المائة (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ٢٠٠١). وقد يكون المدى المقاس لإزالة الزئبق، وخاصة في حالة المرسب الكهروستاتيكي، دالة على إمكانية تحسين التقاط الزئبق نتيجة زيادة كفاءة أداة تجميع الجسيمات. ومن المهم أن نفهم أداء جمع الجسيمات في أي جهاز نظراً لأن ذلك يؤثر بدوره على قدرة الجهاز على تقليل انبعاثات الزئبق.

وتشير النمذجة الأساسية لإزالة الزئبق في المرسبات الكهروستاتيكية إلى أن تقييدات انتقال الكتلة قد تؤدي، حتى في الظروف المثالية، إلى تقييد إمكانية التقاط الزئبق بالجسيمات المتجمعة على الإلكترويدات في المرسب الكهروستاتيكي (كلاك، ٢٠٠٦ وكلاك، ٢٠٠٩). فالمرسبات تقوم بإزالة الزئبق العالق بالجسيمات (Hg_p) فقط في عملية جمع الجسيمات. وهذا الزئبق العالق يرتبط تفضيلاً بالكربون غير المحروق. وقدرة امتزاز الزئبق في الجزيئات غير العضوية (الرماد المتطاير) هي قدرة منخفضة نمطياً بالمقارنة بالكربون غير المحروق في الرماد المتطاير. وقد لوحظت علاقة بين كمية الكربون غير المحروق وإزالة الزئبق عبر المرسبات

الكهروستاتيكية في حالة الرماد المتطاير من الفحم القيري (سنيور وجونسون، ٢٠٠٨). ويتضح هذا السلوك في الشكل ٥ الذي يوضح النسبة المئوية للالتقاط (النسبة المئوية للزئبق الداخل إلى المرسب) كدالة على مقدار الكربون غير المحروق. وفي الشكل ٥، يتم التعبير عن الزئبق غير المحروق باعتباره فاقداً مقاساً عند الاشتعال (LOI). وكما نرى فإن الشكل يبين أن التقاط الزئبق يتراوح بين ٢٠ و ٤٠ في المائة في مرسب يلتقط رماداً متطيراً يحتوي على حوالي ٥ في المائة من الكربون غير المحروق. ومع ارتفاع محتوى الكربون غير المحروق، يمكن أن نرى أن التقاط الزئبق يصل إلى نسبة ٨٠ في المائة؛ وهو ما يحتمل أن يكون دالة على الهالوجينات الموجودة (فوستين وآخرون، ٢٠٠٣).



الشكل ٥ - إزالة الزئبق بالمرسب الكهروستاتيكي كدالة على مقدار الكربون غير المحروق (النسبة المئوية للفاقد عند الاشتعال) في الرماد المتطاير (سنيور وجونسون، ٢٠٠٨)

وبالإضافة إلى مقدار الكربون غير المحروق، فإن خصائص الكربون غير المحروق، مثل مساحة السطح وحجم الجسيمات والمسامية والتركيب الكيميائي قد تؤثر على مقدار الزئبق الملتقط في المرسب الكهروستاتيكي (لو وآخرون، ٢٠٠٧). وتوصلت هذه الدراسة إلى أنه في حين محتوى الكربون غير المحروق في الرماد المتطاير يتناقص مع انخفاض حجم الجسيمات فإن محتوى الزئبق من الكربون غير المحروق يتزايد عموماً مع انخفاض حجم الجسيمات. وبالإضافة إلى ذلك، تبين أن حجم الجسيمات في الكربون غير المحروق كان عاملاً كبيراً يؤثر على امتزاز الزئبق. وهكذا فإن زيادة كفاءة المرسب وزيادة الناتجة عن ذلك في التقاط الرماد المتطاير الدقيق والكربون غير المحروق سيسبب على الأرجح انخفاضاً في انبعاثات الزئبق. ولكن ينبغي أن يلاحظ أن معظم كتلة الكربون غير المحروق هي في الجسيمات الكبيرة جداً.

وهناك عوامل أخرى تحكم مقدار الزئبق الملتقط في الرماد المتطاير (والذي تتم إزالته بعد ذلك من غاز المدخنة) وهي نوع المرسب المستعمل (مرسب في الجانب البارد أو الجانب الساخن) واستعمال ثلاثي أكسيد الكربون كعامل في تكييف غاز المدخنة، ونوع الفحم. ويلاحظ ارتفاع التقاط الزئبق نظيفاً في المرسبات المقامة على المراحل التي تعمل بحرق فحم يتسم بمحتويات أعلى من الهالوجين وينتج مستويات أعلى من الكربون غير المحروق في غاز المدخنة. ويدعم هذان العاملان تشكيل الزئبق المؤكسد والزئبق العالق بالجسيمات، وهما أكثر سهولة في الالتقاط في المرسب الكهروستاتيكي عن الزئبق النقي. وينشأ عن ذلك أنه إذا أمكن تحسين أداء المرسب فسيكون من الممكن إزالة مقدار إضافي من الزئبق من غاز المدخنة. وستكون كمية هذا الزئبق الإضافي المزال دالة على مقدار الجسيمات التي تمت إزالتها بالمرسب الكهروستاتيكي. ويمكن استخدام النهج المنخفضة التكلفة مثل التوازي الدقيق للصفائح وتعديل نمط الطرق، وإزالة التسريبات الداخلية، بين هُجج أخرى، من أجل تحسين كفاءة جمع الجسيمات في المرسبات (زيكوف وآخرون، ٢٠٠٤؛ داي ولايمن، ٢٠٠٨). ودرجات الحرارة المنخفضة في نظام جهاز الضبط (أقل من ١٥٠ درجة مئوية) تُعزِّز أيضاً ضبط الزئبق، وقد استخدمت المرسبات ذات درجة الحرارة شديدة

الانخفاض أيضاً في اليابان لتحقيق كفاءة عالية في إزالة التراب والزئبق (معهد البحوث المركزي لصناعة الطاقة الكهربائية واتحاد شركات الطاقة الكهربائية في اليابان، ٢٠١٢).

وينبغي أن يلاحظ أن الآثار الإيجابية لثلاثي أكسيد الكبريت على التقاط الجسيمات قد يقابلها جزئياً تنافس ثلاثي أكسيد الكبريت مع الزئبق على الامتصاص في الرماد المتطاير.

المرشحات النسيجية

توفّر المرشحات النسيجية كفاءة عالية في إزالة الجسيمات الدقيقة بالمقارنة مع المرسبات الكهروستاتيكية ولا سيما بالنسبة للجزيئات دون الميكرونية.

ولوحظ أن إزالة الزئبق في المرشحات النسيجية أعلى عموماً منها في المرسبات الكهروستاتيكية. والمرشحات النسيجية أكثر فعالية في إزالة الجسيمات الدقيقة (الجسيمات دون الميكرونية، وهو الأمر الأكثر أهمية) من المرسبات الكهروستاتيكية، وهي تتجه عموماً إلى إزالة قدر أكبر من زئبق الطور الغازي عما تزيله المرسبات. وبالإضافة إلى طول وقت الاتصال فإن المرشحات النسيجية توفّر اتصالاً أفضل (حيث يخرق الغاز كُسب الفلتر) من المرسبات (حيث يمر الغاز على سطح الكُسب). ونتيجة لذلك تترجح أكسدة الزئبق النقي الغازي وتحويله إلى شكل يمكن التقاطه في حالة استعمال الفلتر النسيجي. وعلى سبيل المثال، أظهرت دراسة قارنت بين التقاط الزئبق في المرسبات الكهروستاتيكية والمرشحات النسيجية في منشآت الطاقة التي تعمل بحرق الفحم في الصين نسبة التقاط تتراوح من ١ إلى ٣٣ في المائة في المرسبات وبين ٩ و ٩٢ في المائة في المرشحات (جانغ وآخرون، ٢٠١٥). ويبلغ متوسط كفاءات إزالة الزئبق في المرسبات والمرشحات في منشآت الطاقة الصينية العاملة بحرق الفحم ٢٩ في المائة و ٦٧ في المائة على التوالي (جانغ وآخرون، ٢٠١٥).

ويمكن أيضاً أن تتكامل المرشحات النسيجية مع المرسبات الكهروستاتيكية لتصبح مرسبات-مرشحات، وهو ما يجري استخدامه في الصين على نطاق مشابه لنطاق استخدام المرشحات النسيجية. وتبلغ كفاءة إزالة الزئبق في المرسبات-المرشحات درجة متوسطة بين كفاءة المرسبات وكفاءة المرشحات. ويمكن تحقيق إزالة الزئبق بنسبة ٤٣ في المائة في المتوسط عند استعمال المرسبات-المرشحات (جانغ، ٢٠١٥).

أجهزة التنظيف الرطب للجسيمات

معظم المراحل الصناعية الصغيرة والمتوسطة الحجم في الصين مجهزة بأجهزة تنظيف رطب للجسيمات من أجل تقليل انبعاثات الجسيمات. وتتشابه العمليات الكيميائية في نظام جهاز التنظيف الرطب للجسيمات مع نظيرتها في التنظيف الرطب للكبريت من غاز المدخنة. ولكن أجهزة التنظيف الرطب التقليدية للجسيمات تستعمل الماء فقط كمادة ماصة، مما يجعل إعادة انبعاث الزئبق النقي كبيرة. وأوضحت القياسات في الموقع كفاءة إزالة الزئبق بمتوسط يبلغ ٢٣ في المائة (بين ٧ و ٥٩ في المائة) عند استعمال أجهزة التنظيف الرطب للجسيمات في المراحل الصناعية العاملة بحرق الفحم في الصين.

وأجهزة التنظيف الرخامية المتكاملة (IMS) هي نوع خاص من أجهزة التنظيف الرطب للجسيمات للإزالة المتزامنة للجسيمات وثنائي أكسيد الكبريت، وتستعمل على نطاق يتزايد اتساعاً في منشآت الطاقة بحرق الفحم في الصين لأنها اقتصادية من الناحية التكنولوجية. وتستعمل أجهزة التنظيف الرخامية محلولاً قلوياً كمادة ماصة، وهو أكثر فعالية في التقاط الزئبق المؤكسد، ويشبه التنظيف الرطب للكبريت. وكفاءة أجهزة التنظيف الرخامية في إزالة الزئبق يمكن أن تكون أعلى من أجهزة التنظيف الرطب التقليدية للجسيمات نتيجة قدرتها على ضبط ثنائي أكسيد الكبريت، ولكن لم تجر بعد قياسات في الموقع.

التأثيرات عبر الوسائط لأجهزة ضبط الجسيمات

توجد آثار محتملة عبر الوسائط تنطبق على أجهزة ضبط الجسيمات. ويمكن أن يعاد انبعاث الزئبق في الرماد المتطاير إذا تم تسخين الرماد المتطاير المتجمّع في أجهزة ضبط الجسيمات أثناء إعادة الاستخدام. وعلى سبيل المثال، يمكن إطلاق الزئبق العالق بالرماد المتطاير في الهواء إذا استخدم كمادة خام في فرن الإسمنت. وهناك أيضاً احتمال أن يرشح الزئبق من الرماد المتطاير إلى المياه الجوفية. وتلزم الإدارة السليمة للرماد المتطاير المتجمّع في أجهزة ضبط الجسيمات.

أجهزة ضبط ثنائي أكسيد الكبريت

ترد أدناه تقنيتان رئيسيتان تستعملان لتخفيض انبعاثات ثنائي أكسيد الكبريت: الأولى هي التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة والثانية هي التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة، أو جهاز التنظيف الجاف.

التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة

في المنشآت المجهّزة بالتنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة يمكن زيادة مقدار المنافع المشتركة للإزالة من خلال زيادة جزء الزئبق المؤكسد في محتوى الزئبق الكلي لغاز المدخنة أو من خلال تحسين فعالية ضبط الجسيمات (سلوس، ٢٠٠٩). ويمكن تحقيق زيادة جزء الزئبق المؤكسد بإضافة مركبات كيميائية (عوامل مؤكسدة) أو بأكسدة الزئبق على العوامل الحفّازة (أمار وآخرون، ٢٠١٠). ويمكن أن يوضع العامل الحفّاز في غاز المدخنة لغرض وحيد وهو أكسدة الزئبق أو يمكن إقامته لغرض آخر (مثلاً لضبط انبعاثات أكاسيد النيتروجين) وبالتالي توفير منافع مشتركة. وتشغيل التنظيف الرطب لإزالة الكبريت يتطلب إنشاء جهاز لضبط الجسيمات عند منبع جهاز التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (سريفاستافا ويوسفستس، ٢٠٠١).

وكما ذكرنا من قبل، تتسم المركبات الغازية للزئبق المؤكسد عموماً بأنها قابلة للذوبان في الماء، ولهذا فإنه من المتوقع أن تستطيع نُظُم التنظيف الرطب لإزالة الكبريت التقاطها بكفاءة (ريدنغر وآخرون، ١٩٩٩؛ ودفيتو وروسنهوفر ١٩٩٩). ولكن الزئبق النقي الغازي غير قابل للذوبان في الماء وبالتالي لا يمتص في حمأة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت. ويتضح من البيانات المأخوذة من المرافق الفعلية أنه يمكن أن تتوقع التقاط الزئبق المؤكسد بمتوسط ٧٥ في المائة بين (٦٧ و ٩٣ في المائة) في نُظُم التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة على أساس الكالسيوم (شين وآخرون، ٢٠٠٧؛ وكيم وآخرون، ٢٠٠٩؛ ووانغ وآخرون، ٢٠١٠؛ وسلوس، ٢٠١٥)، رغم وجود حالات حدث فيها قياس التقاط أقل بكثير نتيجة توازن كيميائي غير موات في جهاز التنظيف (مكسا وفوجي وارا، ٢٠٠٤).

وقد تم إثبات أن الزئبق المؤكسد قد يتم اختزاله في بعض الظروف إلى زئبق أولي في أجهزة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة، ويمكن بعد ذلك إعادة انبعاثه (مولان وآخرون، ٢٠٠٣). وهكذا فإن الوصول إلى الاستراتيجية المثلى للمنافع المشتركة يعني في بعض الأحيان الحفاظ، في حالة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت، على كمية الزئبق المؤكسد في النظام من أجل منع إعادة انبعاث الزئبق. وقد تحدث إعادة انبعاث الزئبق عند امتصاص الزئبق المؤكسد في حمأة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت، وتحويله إلى زئبق أولي، ونقله بعد ذلك إلى الطور الغازي للخروج من جهاز التنظيف.

والأثر الصافي لإعادة الانبعاث هو انخفاض مستوى إزالة الزئبق بواسطة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة. ويتوقف حدوث ومدى إعادة انبعاث الزئبق من التنظيف الرطب لإزالة الكبريت على الخواص الكيميائية للتنظيف الرطب لإزالة الكبريت (ريننغر وآخرون، ٢٠٠٤). ويبدو أيضاً أن هناك إمكانية متزايدة لإعادة انبعاث الزئبق في التنظيف الرطب لإزالة الكبريت مع حدوث تراكيز كبيرة للزئبق في مرحلة السيولة (شانغ وآخرون، ٢٠٠٨). وفي بعض الحالات، يتعيّن إضافة عوامل كيميائية أو كربون منشط إلى سائل التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من أجل ضبط إعادة الانبعاث.

التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة

تستعمل مجففات الرش نمطياً لضبط انبعاثات ثنائي أكسيد الكبريت من المصادر التي تحرق الفحم المحتوي على درجات منخفضة إلى متوسطة من الكبريت، أو في المنشآت الأصغر التي تعمل بحرق الفحم. ويمكن إزالة ما يصل إلى نحو ٩٥ في المائة من الزئبق باستخدام مجموعات تتألف من أجهزة امتصاص التجفيف بالرش والمرشحات النسيجية في المراحل العاملة بحرق الفحم القيري. ولكن يلاحظ التقاط للزئبق بدرجة أقل كثيراً (حوالي ٢٥ في المائة) في الوحدات العاملة بأجهزة امتصاص التجفيف بالرش والمرشحات النسيجية في المراحل العاملة بحرق اللغنيت أو غيره من أنواع الفحم المنخفضة الجودة ذات محتوى

الكولر المنخفض (سنيور، ٢٠٠٠). وتنظيف أنواع الهالوجين في أجهزة امتصاص التحفيز بالرش قد يجعل عملية الأكسدة وما يليها من التقاط الزئبق (معظمه في شكل زئبق أولي من هذه الأنواع من الفحم) عند مخرج المرشح النسيجي أقل فعالية. وأحياناً، يكون التقاط الزئبق من الفحم المنخفض الجودة بواسطة المرشحات النسيجية وحدها أعلى مما يتحقق في الجمع بين أجهزة امتصاص التحفيز بالرش والمرشحات النسيجية (سريفستاوا وآخرون، ٢٠٠٦).

وهناك تكنولوجيا لأجهزة التنظيف الجاف لإزالة الكبريت تزايد استعمالها في الآونة الأخيرة في منشآت حرق الفحم، وهي أجهزة التنظيف الجاف الدوارة. وكما يحدث في حالة أجهزة امتصاص التحفيز بالرش فإن أجهزة التنظيف الجاف الدوارة تحتوي على غرفة تفاعل ومرشح نسيجي للتقاط المنتجات الثانوية والرماد. والصفة التي تميز أجهزة التنظيف الجاف الدوارة هي أن مواد التفاعل التي تدخل إلى غرفة التفاعل يتم تحويلها إلى سائل في غرفة التفاعل قبل أن تمر إلى المرشح النسيجي. ويستخدم رش المياه على أرضية غرفة التفاعل من أجل ضبط درجة حرارة المفاعل. ومواد التفاعل هي الجير الرطب ومواد صلبة أعيد تدويرها من المرشح النسيجي. ويوجد في أجهزة التنظيف الجاف الدوارة تركيزات صلبة تزيد عن ما يوجد في أجهزة امتصاص التحفيز بالرش الأمر الذي يحقق تخفيضات لثنائي أكسيد الكربون بنسب تصل إلى ٩٨ في المائة، بالمقارنة مع تخفيض حده الأقصى ٩٥ في المائة تحققه أجهزة امتصاص التحفيز بالرش. وبالإضافة إلى ذلك فإن أجهزة التنظيف الدوارة يمكن أن تعالج غاز المدخنة الناتج عن فحم يحتوي نسبة كبريت أعلى من تلك التي تعالجها أجهزة امتصاص التحفيز بالرش لأن التقاط ثنائي أكسيد الكبريت لا تحدده حسابات التكافؤ الكيميائي للحمأة (إيك، ٢٠٠٩).

والتقاط الزئبق في أجهزة التنظيف الدوارة في سياق المنفعة المشتركة يشابه من حيث الحجم التقاطه في منظفات أجهزة امتصاص التحفيز بالرش التي تحقق قدراً كبيراً من التقاط الزئبق المؤكسد. وبناءً على ذلك، يمكن تحقيق درجة أعلى بكثير من المنافع المشتركة للتقاط الزئبق في حالة أنواع الفحم المرتفعة الكولر عما يحدث في حالة أنواع الفحم المنخفضة الكولر (بابكوك باور، ٢٠١٢).

آثار أجهزة ضبط ثنائي أكسيد الكبريت الشاملة لعمدة أوساط

في نظام التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة يتطلب الاحتفاظ بالزئبق من خلال نظام التنظيف الرطب معالجة عالية الجودة لمياه الفضلات والحمأة للتأكد من أن التأثير لن يقتصر على مجرد انتقال الزئبق من الهواء إلى الماء.

ولدى استخدام جبس إزالة الكبريت لإنتاج ألواح التبتين، ينشأ احتمال إعادة انبعاث الزئبق الذي يحتويه هذا الجبس. ولدى استخدام نظام امتصاص التحفيز بالرش مع المرشح النسيجي ينشأ احتمال نضّ الزئبق من الرماد المتطاير المتجمّع في المرشح إلى المياه الجوفية. ولذلك تقوم الحاجة إلى الإدارة السليمة بيئياً لرماد المتجمّع في المرشحات النسيجية.

آثار أجهزة ضبط ثنائي أكسيد الكبريت الشاملة لعمدة أوساط (غير المتصلة بالزئبق)

يؤدي تشغيل نظام إزالة الكبريت من غاز المدخنة عموماً إلى زيادة استهلاك الطاقة، وهذه الزيادة تبلغ نمطياً ٥ في المائة.

الاختزال الحفزي الانتقائي لضبط أكاسيد النيتروجين

صُمّمت تكنولوجيا الاختزال الحفزي الانتقائي، من أجل تقليل أكاسيد النيتروجين من خلال التفاعل المعزّز حفزياً لأكاسيد النيتروجين مع غاز النشادر (NH_3)، مما يؤدي إلى اختزال أكاسيد النيتروجين إلى الماء والنيتروجين. ويحدث هذا التفاعل على سطح الحفاز، الذي يوضع في أنبوب تفاعل. وفي ظروف معينة، تبين أن حفّازات الاختزال الحفزي الانتقائي تغير تنوّعات الزئبق حيث تدعم أكسدة الزئبق النقي إلى زئبق مؤكسد، وخاصة في حالة الفحم المرتفع الكولر. وينبغي أن يلاحظ أن الاختزال الحفزي الانتقائي نفسه لا يزيل الزئبق. وبدلاً من ذلك، فإن هذا الاختزال يؤدي، من خلال زيادة مقدار الزئبق

المؤكسد، إلى تحسين التقاط الزئبق في أجهزة ضبط الجسيمات وأنظمة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة، مما يؤدي إلى تعزيز إزالة الزئبق (شو، ٢٠٠٤؛ فافال وآخرون، ٢٠١٣).

ونظراً لأن المعاملات التشغيلية للاختزال الحفزي الانتقائي (مثل درجة الحرارة وتركيز غاز النشادر في غاز المدخنة وحجم قاعدة الحفاز وعمر الحفاز) ستتحدد عموماً بموجب استراتيجية ضبط أكاسيد النيتروجين، فإن المعامل الذي ينطوي على أفضل احتمال للوصول إلى الإزالة المثلى للزئبق هو محتوى الكلور في الفحم. وكما يرد في القسم الوارد أدناه المتعلق بخلط الفحم والذي يستند إلى بيانات من الولايات المتحدة، فإن أكسدة الزئبق النقي إلى زئبق مؤكسد تزيد في حالة الفحم القيري عنها في حالة الفحم دون القيري. وهكذا فإن الحد الأقصى من المنافع المشتركة للأنظمة الحالية للاختزال الحفزي الانتقائي قد تتحقق من خلال الخلط الصحيح للفحم أو من خلال إضافية البروميد (فوستين وآخرون، ٢٠٠٦). ويجري تصميم حفازات الاختزال الحفزي الانتقائي للوصول إلى الحد الأمثل من كلا إزالة أكاسيد النيتروجين وأكسدة الزئبق.

واستخدام الاختزال الحفزي الانتقائي يزيد من مدى أكسدة الزئبق والتقاطه، وخاصة مع زيادة جزء الفحم القيري في الخليط الذي يجمع بين نوعي الفحم القيري ودون القيري. وأثبتت دراسة ميدانية في منشأة مرافق كبيرة تعمل بحرق خليط من الفحم بنسبة ٦٠ في المائة من الفحم دون القيري إلى ٤٠ في المائة من الفحم القيري في مرحلتين متشابهين (واحد منهما يعمل بنظام الاختزال الحفزي الانتقائي والآخر لا يعمل به) وجود زيادة في نسبة الزئبق المؤكسد من ٦٣ في المائة في حالة عدم وجود الاختزال الحفزي الانتقائي لتصل إلى ٩٧ في المائة في حالة وجود هذا الاختزال. وعموماً، ترتفع أكسدة الزئبق في نظم الاختزال الحفزي الانتقائي مع زيادة النسبة المئوية للفحم القيري في أي خليط من الفحم القيري ودون القيري. وعلى سبيل المثال، في حالة خليط من الفحم بنسبة ٦٥ من الفحم دون القيري إلى ٣٥ من الفحم القيري كان الارتفاع بمقدار ٤٩ نقطة مئوية (من ١٣ إلى ٦٢ في المائة). ولكن في حالة خليط بنسبة ٧٩:٢١، كانت الزيادة ١٤ نقطة مئوية فقط، (أي من ٦ إلى ٢٠ في المائة) (سير وآخرون، ٢٠٠٨).

ومن الممكن أن يحقق الفحم دون القيري غير المخروط في وحدة لا تعمل بنظام الاختزال الحفزي الانتقائي نسبة تتراوح بين صفر و ٤٠ في المائة من الزئبق المؤكسد (معهد شركات الهواء النظيف، ٢٠١٠). وفي دراسة ميدانية أخرى، أظهرت الاختبارات التي أجريت في ثلاث منشآت تعمل بحرق الفحم القيري، أكسدة للزئبق عبر الاختزال الحفزي الانتقائي، بنسبة تصل إلى ٩٠ في المائة وأكثر. وكانت إزالة الزئبق الناتجة عن ذلك في أجهزة التنظيف الرطب التالية تتراوح من ٩٢ إلى ٨٤ في المائة مع تشغيل نظام الاختزال الحفزي الانتقائي مقارنة بنسبة ٤٣-٥١ في المائة بدون تشغيل هذا الاختزال. ولكن المنشآت العاملة بحرق الفحم دون القيري أظهرت تغييراً ضئيلاً في تنوعات الزئبق عبر مفاعلات الاختزال الحفزي الانتقائي (لاودال، ٢٠٠٢).

وأظهرت القياسات الموقعية في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم في الصين أن معدل أكسدة الزئبق النقي داخل نظام الاختزال الحفزي الانتقائي كانت في نطاق ٣٤-٨٥ في المائة، وتأثرت بمحتوى الزئبق الكلي والكلور في الفحم ومعدل حقن غاز النشادر في نظام الاختزال الحفزي الانتقائي (جانغ وآخرون، ٢٠١٣).

آثار أجهزة ضبط أكاسيد النيتروجين الشاملة لعدة أوساط

مع أكسدة الزئبق باستخدام الاختزال الحفزي الانتقائي ينشأ احتمال لزيادة محتوى الزئبق في الرماد المتطاير والجبس الناجم عن إزالة الكبريت من غاز المدخن. والحفاز المستخدم في عملية الاختزال قد يكون خطراً بطبيعته. وحفاز عملية الاختزال ينبغي إعادة توليده أو التخلص منه بطريقة سليمة بيئياً.

آثار أجهزة ضبط أكاسيد النيتروجين الشاملة لعدة أوساط (غير المتصلة بالزئبق)

يؤدي تشغيل نظام الاختزال الحفزي الانتقائي عموماً إلى زيادة استهلاك الطاقة وهذه الزيادة تبلغ نمطياً ٣ في المائة.

تقنيات تعزيز المنافع المشتركة

يمكن تحقيق تعزيز المنافع المشتركة من خلال خلط الفحم أو مضافات الفحم أو بعدد من التقنيات الأخرى التي يرد وصفها أدناه.

خلط الفحم

يستعمل خلط الفحم (أو تبديله) في منشآت الطاقة في إطار استراتيجية تهدف إلى تلبية حدود انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) بطريقة تحقق منافع مشتركة، شريطة أن يكون خلط الفحم متوافقاً مع تصميم منشأة الطاقة. ونمطياً، يتم خلط أنواع الفحم القيري المرتفعة الكبريت بأنواع فحم دون قيري منخفضة الكبريت لتخفيض انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت. ومن الآثار الجانبية غير المرغوبة لهذه الاستراتيجية الرامية إلى ضبط انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت أن تنوعات الزئبق قد تتغير وبذلك تقل كمية الزئبق المؤكسد وتزيد كمية الزئبق النقي، وهو ما يضر بالتقاط الزئبق في نُظم إزالة الكبريت من غاز المدخنة الواقعة في المرحلة التالية. ولكن خلط الفحم قد يستخدم أيضاً لزيادة كمية الزئبق المؤكسد في غاز المدخنة. وبالإضافة إلى المحتوى من الزئبق، فإن بعض خصائص الفحم، مثل المحتوى من الكلور والبروم أو المحتوى القلوي، تتسم بالأهمية من ناحية إزالة الزئبق وينبغي أن تكون معروفة. والفحم القيري ينتج نمطياً جزءاً أكبر من الزئبق المؤكسد في غاز المدخنة عما ينتجه الفحم دون القيري. ونظراً لأن الزئبق المؤكسد قابل للذوبان في الماء فإنه أكثر سهولة للالتقاط في نُظم التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة. وبالتالي فإن كفاءة التقاط الزئبق في نُظم التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة تتوقف إلى حد كبير على جزء الزئبق المؤكسد في مدخل نظام التنظيف الرطب (ميلار وآخرون، ٢٠٠٦).

ويناقش أدناه مثال لخلط الفحم المستخدم لتحسين إزالة الزئبق في معدات ضبط تلوث الهواء الواقعة في المرحلة التالية. ويوضح الجدول (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، ٢٠١٠) بيانات بشأن خصائص الفحم دون القيري النمطي (من ولاية ويومنج، الولايات المتحدة) والفحم القيري (من ولاية إيلينوي، الولايات المتحدة). وينبغي أن يلاحظ أن الخصائص التي يتضمنها الجدول ٥ ترد لأغراض التوضيح فقط وستتباين حسب مصدر الفحم.

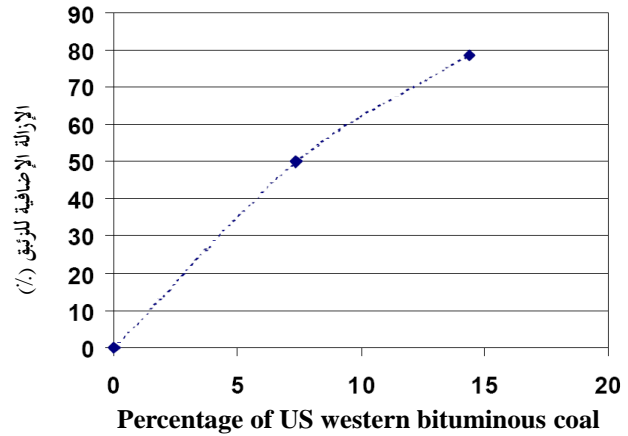
الجدول ٥ - مقارنة خصائص الفحم دون القيري والفحم القيري

المحتوى	الفحم دون القيري النسبة المئوية من الوزن	الفحم القيري النسبة المئوية من الوزن
البروم ^أ	٠,٠٠٦	٠,٠٢
الكلور ^أ	٠,٠٠٣	٠,١٠٠
الكبريت ^أ	٠,٣٧	٤,٠٠
أكسيد الكالسيوم (CaO)	٢٦,٦٧	٣,٤٣
أكسيد المغنيسيوم (MgO)	٥,٣٠	٣,٠٧
أكسيد الصوديوم (Na ₂ O)	١,٦٨	٠,٦٠
الزئبق (Hg) جزء من المليون	٠,١	٠,١

أ التحليل النهائي، كما ورد، النسبة المئوية من الوزن.

وينبغي أن يلاحظ من الجدول ٥ أنه رغم أن محتوى الزئبق في هذه البيانات المتوسطة لا يتغير ويصل إلى ٠,١ جزء من المليون في كلا نوعي الفحم فإن محتوى الكلور يتباين بصورة كبيرة من ٠,٠٠٣ في المائة من الوزن في حالة الفحم دون القيري ليصل إلى ٠,١ في المائة من الفحم القيري. وبالإضافة إلى ذلك فإن محتوى المادة القلوية (مثل أكسيد الكالسيوم) يتباين من ٣,٤٣ في المائة في الفحم دون القيري ليصل إلى ٢٦,٦٧ في المائة في الفحم القيري حسب الوزن. ويوضح ذلك أن انخفاض محتوى الكلور قد يؤدي إلى انخفاض أكسدة الزئبق وبالتالي ارتفاع النسبة المئوية للزئبق الأولي. وخلط الفحم القيري بالفحم دون القيري يوفر مزايا مزدوجة من ارتفاع تركيز الكلور وانخفاض القلوية. وفي سياق ضبط الزئبق، سيكون هدف خلط الفحم هو زيادة تركيز الهالوجين بخلط الفحم ذي المحتوى العالي نسبياً من الهالوجين بالفحم المنخفض الهالوجين الذي قد يستعمل في المنشأة.

ويوضح الشكل أدناه اتجاه زيادة التقاط الزئبق في نظام التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (التنظيف الجاف بالإضافة إلى المرشح النسيجي) مع زيادة جزء الفحم القيري في خليط الفحم القيري-دون القيري (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، ٢٠١١). ويمكن أن نرى أن خلط الفحم ينطوي على إمكانية زيادة التقاط الزئبق بنسبة تصل إلى ٨٠ في المائة. ومرة أخرى، يجدر بالملاحظة أن القيم الإضافية لإزالة الزئبق هي ذات طابع توضيحي وأن القيم الإضافية الفعلية لإزالة الزئبق قد تتباين حسب مصدر الفحم المستخدم في الخلط.



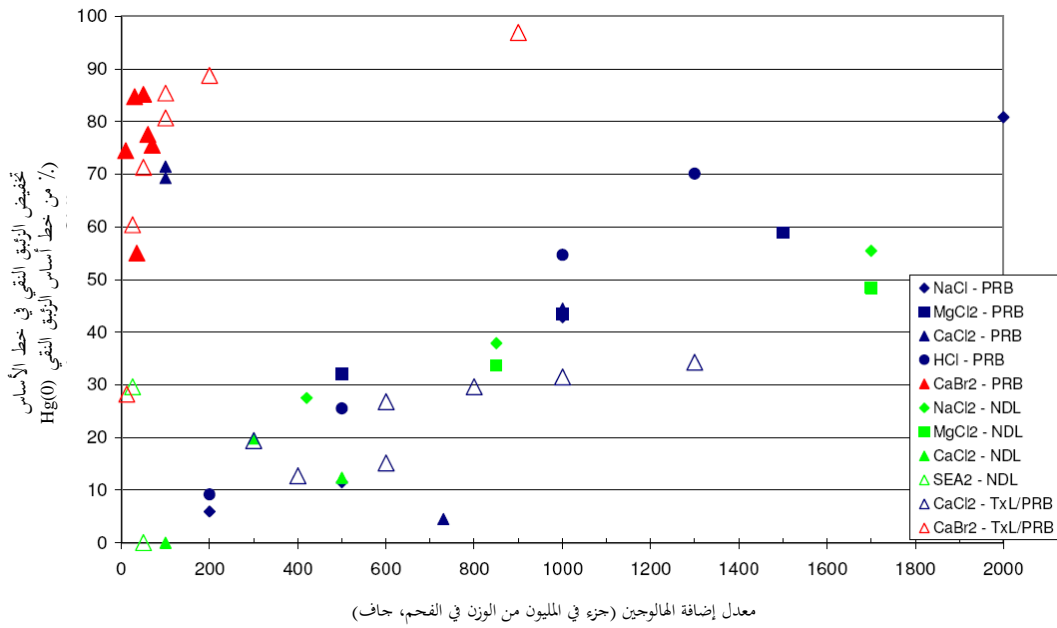
الشكل ٦ - الأثر المحتمل لخلط الفحم على التقاط الزئبق في نظام التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة
وهكذا فإن خلط الفحم يمكن أن ينطوي على زيادة أكسدة الزئبق في المنشآت التي تحرق الفحم المنخفض الكلور والمرتفع الكالسيوم. وخصائص أنواع الفحم المختلفة تؤدي دوراً رئيسياً في تحديد تنوعات الزئبق. وهذا بدوره يمكن أن يؤثر تأثيراً هائلاً على مقدار الزئبق الذي يتم التقاطه في الأجهزة القائمة لضبط التلوث مثل نُظْم إزالة الكبريت من غاز المدخنة. وقد يكون الأثر أكثر وضوحاً في المنشآت المجهزة بنُظْم الاختزال الحفزي الانتقائي كما سيناقش أدناه.

المواد المضافة لأكسدة الزئبق

تزيد كمية الزئبق الملتقط عموماً مع زيادة مقدار الهالوجينات في الفحم. وبالتالي يتم إضافة الهالوجينات إضافية مثل أملاح البروم أو الكلور في كثير من الأحيان لدعم زيادة الالتقاط في أنواع الفحم التي تحتوي على تركيزات الهالوجين منخفضة. وقد يضاف كلوريد الهيدروجين (HCl) أو كلوريد الأمونيوم (NH₄Cl). وتدعم مضافات الهالوجين تكوين الزئبق المؤكسد والزئبق العالق بالجسيمات، الذي يلتقط بسهولة أكبر في الأجهزة المقامة عند مخارج هذه العملية. وقد تكون مضافات الهالوجين مفيدة بصفة خاصة لتحسين إزالة الزئبق في الوحدات التي تعمل بحرق الفحم المنخفض الهالوجين. فيمكن رش المواد المضافة على الفحم أو إضافتها كمادة صلبة لتيار الفحم إما في المرحلة السابقة لجهاز سحق الفحم أو حقنها في المرحل.

ويُعتَقَد أن البروم يتميز عن الكلور من ناحية أنه يتفاعل بصورة أكثر نشاطاً مع الزئبق من الكلور (فوستين وآخرون، ٢٠٠٢؛ فوستين وآخرون، ٢٠٠٣؛ فوستين وآخرون، ٢٠٠٣؛ بوشمال وآخرون، ٢٠٠٥). ومن المعتقد أن مسار الأكسدة غير المتجانس يتسم بالأهمية في ظروف غاز المدخنة الناتج عن حرق الفحم رغم أن محتوى الكلور في الفحم يزيد نمطياً عن محتوى البروم (فوستين وآخرون، ٢٠٠٦؛ ريني وفوستين، ٢٠٠٨؛ سينيور وآخرون، ٢٠٠٨، فوستين وآخرون ٢٠١٠). وأُجريت اختبارات كاملة النطاق باستخدام محلول مائي يحتوي على بروميد الكالسيوم بنسبة ٥٢ في المائة من الوزن، وذلك كمادة مضافة سابقة للاحتراق بتركيز بنسبة ٢٥ جزء من المليون بمستوى معادل الفحم، وزادت بذلك نسبة تخفيض انبعاث الزئبق من ٥٥ إلى ٩٧ في المائة في وحدة بقوة ٦٠٠ ميغاواط تعمل بحرق الفحم القيري ومجهزة بنظام اختزال حفزي انتقائي وتنظيف رطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (ريني وفوستين، ٢٠٠٩). وأثبتت الاختبارات الكاملة النطاق التي قام بها معهد بحوث الطاقة الكهربائية في الولايات المتحدة في ١٤ وحدة تعمل بحرق الفحم المنخفض الكلور أن أكثر من

٩٠ في المائة من أكسدة زيتبق غاز المدخنة ترجع إلى إضافات البروميد بما يعادل ٢٥-٣٠٠ جزء من المليون في الفحم (شانغ وآخرون، ٢٠٠٨).



الشكل ٧ - أداء الإضافات القائمة على البروم والقائمة على الكلور مع أصناف الفحم (الفحم دون القيري من حوض نهر باوذر (PRB)؛ فحم اللغيت من تكساس (TxL)؛ فحم اللغيت من ولاية داكوتا الغربية (NDL))

ويوضح الشكل مقارنة لأداء المواد المضافة البرومية والكلورية في المراحل العاملة بحرق الفحم التي تحرق أنواعاً مختلفة من الفحم؛ وهذه المقارنة تقدّم النسبة المئوية لتخفيض خط أساس الزئبق النقي كتابع لمعدل إضافة الهالوجين (معهد بحوث الطاقة الكهربائية، ٢٠٠٦؛ فستين ولنداو، ٢٠٠٦؛ شانغ وآخرون، ٢٠٠٨). وكما يمكن أن نرى في الشكل، فبالنسبة لأي مقدار من إضافات الهالوجين كان البروم أكثر فعالية بكثير من الكلور في تقليل مقدار زئبق خط الأساس. وأمكن تحقيق تخفيض بنسبة ٨٠ في المائة في الزئبق النقي في خط الأساس بإضافة أقل من ٢٠٠ جزء من المليون من الإضافات القائمة على البروم. ويتطلب الأمر مقداراً أكثر بكثير من المواد المضافة القائمة على الكلور (قيمة مضاعفة تقريباً) لتحقيق نفس المستوى من تخفيض خط أساس الزئبق النقي.

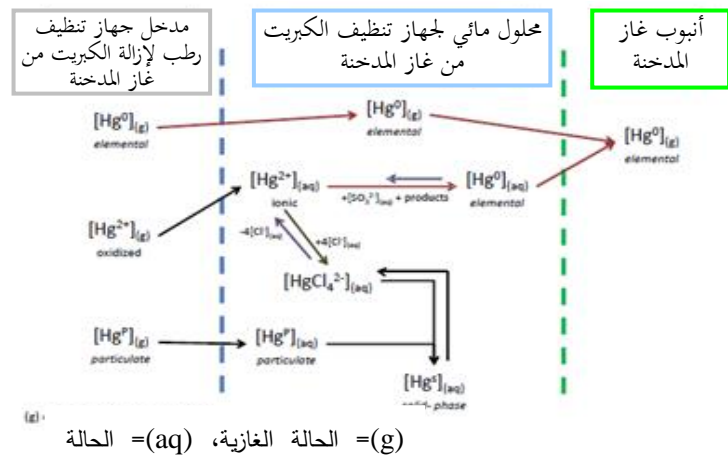
الآثار الشاملة لعدة أوساط الناجمة عن المواد المضافة لأكسدة الزئبق

ينطوي استخدام مضافات أكسدة الزئبق على آثار محتملة على المرجل ونُظم ضبط تلوث الهواء والانبعاثات وقياس الانبعاثات. فهو يؤدي إلى زيادة إمكانية التآكل في أجهزة التسخين المسبق للهواء ونُظم التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (سريني فاسان وديهن، ٢٠١٣). وتؤدي مضافات البروم أو الكربون المنشط المبروم إلى زيادة البروم في الرماد المتطاير (دومبروفسكي وآخرون، ٢٠٠٨). وقد تنبعث الهالوجينات المضافة إلى الفحم من أنبوب المدخنة (ICR، ٢٠١٠). ويمكن أن تكون قياسات الزئبق عسيرة جداً في وجود البروم في غاز المدخنة. وهناك أيضاً إمكانية تصريف البروم في نظام إزالة الكبريت من غاز المدخنة ليشكل نواتج فرعية للتطهير في منشآت مياه الشرب في اتجاه المصب من منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم وإمكانية التأثير على الملوثات الأخرى مثل السليسيوم (ماك تيغ وآخرون، ٢٠١٤؛ وريتشاردسون وآخرون، ٢٠٠٧) والوثيقة المرجعية لأفضل التقنيات المتاحة، ٢٠١٣). ولا يزال النطاق الكامل لأوجه عدم التيقن العلمي المصاحب لانبعاثات الملوثات من إضافات البروم غير واضح.

المواد المضافة إلى جهاز التنظيف الرطب لضبط إعادة انبعاث الزئبق

يتمثل أساس مساهمة المنافع المشتركة التي توفرها أجهزة التنظيف الرطب لثاني أكسيد الكبريت في امتصاص الزئبق المؤكسد ثم الاحتفاظ بهذا الزئبق المؤكسد في حالة سائلة. ومع ذلك، فهناك الكثير من الحالات الموثقة التي لم تتمكن فيها أجهزة التنظيف من الاحتفاظ بكل الزئبق في الطور السائل الذي تم امتصاصه. وتقاس هذه الحالة باعتبارها تركيزاً أعلى للزئبق الأولي الخارج من جهاز التنظيف بالمقارنة مع الكمية الداخلة إلى الجهاز ويُطلق عليها "إعادة انبعاث الزئبق" (كينز وآخرون، ٢٠١٤).

وفي إعادة انبعاث الزئبق من جهاز تنظيف رطب يتم احتزال الزئبق الأيوني القابل للذوبان إلى شكل أولي غير قابل للذوبان، وينتج عن ذلك إطلاقه مرة أخرى في غاز المدخنة. ويوضح الشكل أدناه المسار الكيميائي الذي يمكن أن يحدث من خلاله الامتصاص وإعادة الانبعاث.



الشكل ٨ - رسم يوضح امتصاص/امتزاز زئبق غاز المدخنة عبر جهاز تنظيف رطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (كيزر وآخرون، ٢٠١٤)

وقد بُذلت جهود كثيرة لتطوير التقنيات والمنتجات من أجل تجنب إعادة انبعاث الزئبق، وتم تسويق عدد منها تجارياً. ومن ناحية المبدأ، تستند جميع هذه التقنيات إلى أسلوب تقليل محتوى الزئبق القابل للذوبان في سائل جهاز التنظيف. ويجري ذلك سواء من خلال امتصاص الزئبق الأيوني في جسيمات أو ترسيب الزئبق الأيوني من السائل (شيثان وآخرون، ٢٠١٤).

وفي تقنية الامتصاص يتم امتصاص الزئبق بالكربون المنشط. ويضاف الكربون المنشط إلى سائل جهاز التنظيف سواء مباشرة في خطوط محلول جهاز التنظيف أو بحقنه في غاز المدخنة في منبع جهاز التنظيف. ويتم إزالة الكربون المنشط من جهاز التنظيف عن طريق خطوة إزالة المياه.

وتم تعيين عدد من عوامل الترسيب وهذه العوامل يمكن تجميعها في خمس فئات: الفئة الأولى هي الكبريتيدات غير العضوية؛ والثانية الكبريتيدات العضوية؛ والثالثة المركبات العضوية التي تحتوي على النيتروجين والكبريت؛ والرابعة المركبات العضوية التي تحتوي على الأكسجين والكبريت؛ والخامسة هي البوليمرات ذات الوزن الجزيئي المنخفض التي تحتوي على الكبريت (كيزر وآخرون، ٢٠١٤).

آثار مضافات أجهزة التنظيف الرطب الشاملة لعدة أوساط

يخرج الزئبق الملتصق من جهاز التنظيف سواء في المرحلة السائلة أو المرحلة الصلبة، حسب المادة المضافة في جهاز التنظيف.

الحفاز الانتقائي لأكسدة الزئبق

من المعروف للجميع أن محفزات الاحتزال الحفزي الانتقائي تستطيع أن تؤكسد الزئبق النقي المنبعث من المراحل العاملة بحرق الفحم في حالة غازية وفي شكل جسيمات (لودال وآخرون، ٢٠٠٢). ولكن معدل أكسدة الزئبق على حفاز الاحتزال الحفزي الانتقائي يتناسب مع أكسدة ومعدل التحويل لثنائي أكسيد الكبريت الذي يشكل ثلاثي أكسيد الكبريت، ويمكن أن يسبب الرائحة الكريهة في جهاز تسخين الهواء وتآكل أنبوب المدخنة وإحداث سحب دخان واضحة في أنبوب المدخنة.

ولذلك تم تطوير نوع خاص من حفاز الاحتزال يحقق درجة عالية من أكسدة الزئبق ودرجة عالية من إزالة أكاسيد النيتروجين وينخفض فيه في الوقت نفسه تحول ثنائي أكسيد الكبريت إلى ثلاثي أكسيد الكبريت (ويعرف باسم الحفاز الانتقائي لأكسدة

الزئبق). وأساس هذا النهج هو أكسدة أكبر قدر ممكن من الزئبق النقي لإتاحة إزالة الزئبق المؤكسد بعد ذلك عن طريق نُظم ضبط تلوث الهواء الواقعة في مخرج الحفاز (فافال وآخرون، ٢٠١٣).

والحفازات الاختزالية الانتقائية الخاصة التي تستخدم من أجل أكسدة الزئبق، وتقوم بزيادة معدل أكسدة الزئبق مع الحفاظ على قدرتها الأصلية على الاختزال تُعزز إزالة الزئبق في تقنيات المنافع المشتركة (برتول، ج.، ٢٠١٣). وفي بعض المنشآت القائمة في أمريكا الشمالية تم بالفعل التخلي عن الحفازات المستعملة في الاختزال لتحل محلها حفازات اختزال تحقق أكسدة مرتفعة للزئبق. وتؤكد أن الاستبدال الجزئي يمكن أيضاً أن يُخفّض تركيز الزئبق في غاز أنبوب المدخنة (فافال وآخرون، ٢٠١٣).

آثار حفاز أكسدة الزئبق الانتقائي الشاملة لعدة أوساط

من المحتمل أن استعمال حفاز أكسدة الزئبق الانتقائي يؤدي إلى زيادة محتوى الزئبق في الرماد المتطاير وجبس نظام إزالة الكبريت من غاز المدخنة. وينبغي إعادة توليد الحفاز المستخدم أو التخلص منه بطريقة سليمة بيئياً.

حقن الكربون المنشط للضبط المخصص للزئبق

قد تستخدم المواد الماصة المعالجة كيميائياً أو غير المعالجة كيميائياً لحقتها من أجل التوصل إلى إزالة الزئبق. ويتم تطبيق حقن المواد الماصة في غاز مدخنة المراجل العاملة بحرق الفحم من أجل ضبط الزئبق في المراجل في ألمانيا منذ تسعينيات القرن الماضي (ويرلنغ، ٢٠٠٠) وتم تنفيذه في الولايات المتحدة في أكثر من مائة نظام كامل (مكتب مساءلة الحكومة، ٢٠٠٩؛ أمار وآخرون، ٢٠١٠). ومنذ حوالي عام ٢٠٠٥ ظلت تكنولوجيا حقن الكربون المنشط تُطبّق تجارياً في الولايات المتحدة (معهد شركات الهواء النظيف، ٢٠١٠، وأمار وآخرون، ٢٠١٠). وبالإضافة إلى ذلك، تم توضيح هذه التكنولوجيا في منشأة طاقة كهربائية روسية تعمل بحرق الفحم الروسي (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ٢٠١٤). ومنذ عام ٢٠٠٧، ظل حقن الكربون المنشط يُستعمل بشكل روتيني في عدد من الولايات المتحدة الأمريكية، مثل ماساتشوسيتس ونيوجيرسي وكونيتيكت، في كثير من المراجل القائمة العاملة بحرق الفحم وتستخدم الفحم القبري أو دون القبري، وذلك للوفاء بالقيم الحدية التنظيمية للانبعاثات في مدى ١.١-٣.٣ غرام لكل جيغاواط-ساعة (أو ما يمثل ٨٥-٩٥ في المائة من الضبط). وقد تم إثبات الامتثال التنظيمي لهذه القيم الحدية من خلال قياسات باستخدام نُظم الرصد المستمر للانبعاثات أو أساليب المصائد الماصة (إدارة حماية البيئة في ولاية ماساتشوسيتس، ٢٠١٥؛ مع ورود تقارير مشاهجة من إدارات الحماية في ولايتي نيوجيرسي وكونيتيكت). ويستدعي حقن الكربون المنشط وجود جهاز ضبط جسيمات في المرحلة اللاحقة من النظام.

ويوضح الجدول ٦ أدناه قيم انبعاثات أربع منشآت للطاقة تعمل بحرق الفحم وتُطبّق تقنيات مخصصة لتخفيض الزئبق في الولايات المتحدة.

الجدول ٦ - مستويات انبعاثات منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم التي تُطبق حقن الكربون المنشط

اسم	نوع الفحم	مستوى الانبعاثات بعد تسويته (ميللغرام/مترعادي ^٣) بعد تسويته إلى ٦٪ من محتوى O ₂	فترة تحديد المتوسط	حجم المرحل	تقنية معالجة غاز المدخنة
Oak Grove، المرحل ١ الولايات المتحدة	اللغنيث	< ٠,٨٠ في ٢٠١٢	شهرياً/مستمر	٨٧٠	FF+SCR+FGD + ACI
PPI Montana Corette (الولايات المتحدة الأمريكية)	دون القيري	٠,٩	مستمر	١٦٣	C-PAC مع ACI ESP
Brayton Point، الوحدات ١ و ٢ و ٣ (مجمعة)، ماساتشوسيتس، الولايات المتحدة الأمريكية	القيري	٠,٢	سنوياً، متوسط متحدد كل ١٢ شهراً	١ ٣٥٠	ACI+ SCR+ESP+SD A
Bridgeport Harbor، الوحدة رقم ٣، كونيتيكت، الولايات المتحدة الأمريكية	قيري	٠,٥-٠,٢	دورياً	٤٠٠	ACI + ESP

ملحوظة: C-PAC: كربون منشط مسحوق موافق للإسمنت؛ البيانات عن سنة ٢٠١٠ باستثناء Oak Grove.

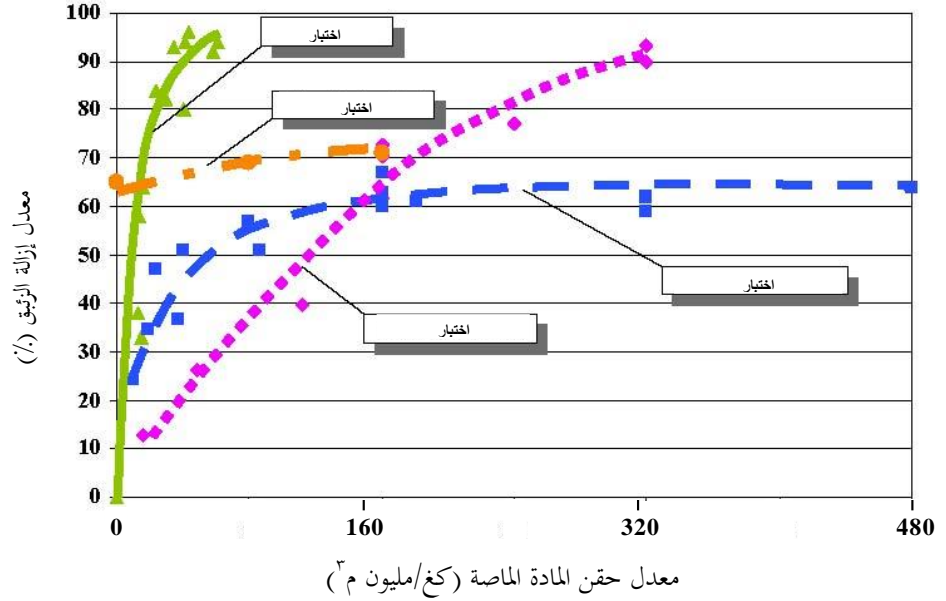
حقن المادة الماصة بدون معالجة كيميائية

تشمل العوامل التي تؤثر على أداء أي مادة ماصة بعينها بالنسبة لالتقاط الزئبق، الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة الماصة، ومعدل حقن هذه المادة، ومعاملات غاز المدخنة (مثل درجة الحرارة وتركيزات أنواع الهالوجين وتركيز ثلاثي أكسيد الكبريت) وتشكيلة النظام القائم لضبط تلوث الهواء (بافيليش وآخرون، ٢٠٠٣؛ وسريفاستافا وآخرون، ٢٠٠٦ ومارتن، ٢٠٠٩).

ويقدم الشكل ملخصاً لعدد من الاختبارات التي أُجريت منذ أكثر من ١٠ سنوات على حقن الكربون المنشط غير المعالج في أربع منشآت للطاقة (بليزانت بريري (Pleasant Prairie) وغاستون (Gaston)، وسالم هاربور (Salem Harbour) وبرايون بوينت (Brayton Point)). وكفاءة إزالة الزئبق بحقن الكربون المنشط غير المعالج تتوقف كثيراً على رتبة الفحم ونوع نظام ضبط الجسيمات المستعمل في المنشأة. وتستخدم منشأة الطاقة في بليزانت بريري فحم حوض ريفر باوذر (PRB) المنخفض الكبريت، وجُهزت منشأة الطاقة بمرسب كهروستاتيكي في الجانب البارد. وفحم PRB هو فحم دون قيري منخفض الرتبة يتسم بمحتوى منخفض من الكلور ومحتوى مرتفع من الكالسيوم، وهو ما يجعل من العسير أكسدة الزئبق النقي بالكلور في غاز المدخنة. ولم يكن حقن الكربون المنشط فعالاً لضبط الزئبق في هذه المنشأة حيث استمرت انبعاثات الزئبق تتألف في الأغلب من الزئبق النقي، نظراً لأن الكربون المنشط غير المعالج لا يتسم بالفعالية في التقاط الزئبق النقي غير المتفاعل. وفي صورة معاكسة لذلك بوضوح نجد منشأة الطاقة في غاستون التي أثبتت أن حقن الكربون المنشط كان فعالاً للغاية في ضبط انبعاثات الزئبق من هذه المنشأة التي تعمل بحرق الفحم القيري المنخفض الكبريت وكانت مجهزة بمرسب كهروستاتيكي في الجانب الساخن ووضع بعده مرشح نسيجي مصمم خصيصاً يسمى الجهاز الصغير المختلط لجمع الجسيمات (COHPAC). ويجري حقن الكربون المنشط غير المعالج في مخرج المرسب الكهروستاتيكي في الجانب الساخن لأن درجة الحرارة في المدخل مرتفعة للغاية. واستخدم جهاز COHPAC لإزالة الكربون المحقون. وأظهرت منشأة الطاقة في غاستون تطبيق جهاز COHPAC كوسيلة فعالة لضبط الزئبق في المنشأة.

وفي بعض الحالات كان انخفاض إزالة الزئبق بالكربون المنشط غير المعالج نتيجة الجمع بين المستويات الأقل من الكلور في الفحم دون القيري في الولايات المتحدة وتحميد أنواع الهالوجين بارتفاع مستويات الصوديوم والكالسيوم في الرماد المتطاير من الفحم دون القيري. ونتيجة لذلك لا يوجد الكثير من الكلور الحُر في تيار غاز المدخنة من أجل أكسدة الزئبق. ومن الضروري أن تتم أكسدة الزئبق (بكلورة السطح كخطوة أولية) من أجل التقاط الزئبق النقي بواسطة الكربون المنشط غير المعالج، وعموماً تتزايد كفاءة التقاط الزئبق بالكربون المنشط غير المعالج حسب كمية الزئبق المؤكسد في غاز المدخنة (وزارة الطاقة، الولايات المتحدة، ٢٠٠٥).

وهكذا فإن التقاط الزئبق بالكربون المنشط غير المعالج قد يكون محدوداً في المنشآت التي تعمل بحرق أنواع منخفضة الرتبة من الفحم، مثل اللغنيت والفحم دون القيري.



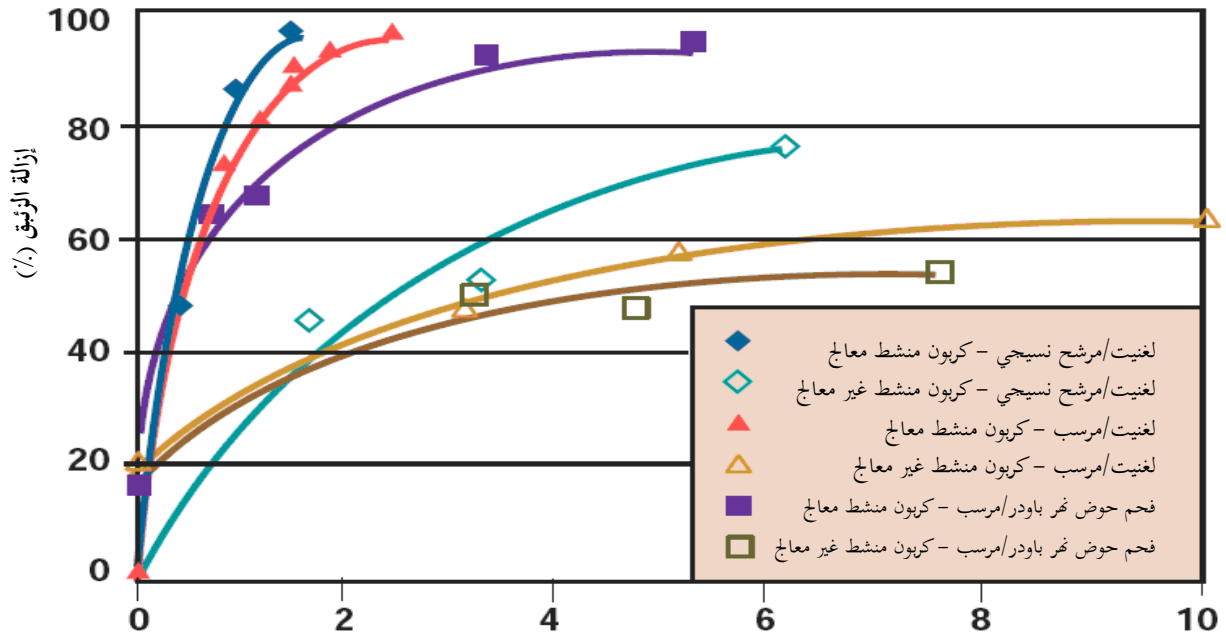
الشكل ٩ - اختبار كفاءة إزالة الزئبق كدالة على معدل حقن الفحم المنشط

حقن مادة ماصة معالجة كيميائياً

للتغلب على التقييدات الموصوفة أعلاه والمصاحبة لاستعمال الكربون المنشط غير المعالج لضبط الزئبق في منشآت الطاقة تم تطوير مواد ماصة من الكربون المنشط المعالج (نيلسون، ٢٠٠٤ ونيلسون وآخرون ٢٠٠٤). وكانت البرومة هي المعالجة الأكثر استعمالاً والتي أثبتت أنها أكثر فعالية في تعزيز أداء الكربون المنشط. ومقارنة بالكربون المنشط غير المعالج، فإن الكربون المنشط بالبروم:

- يوسّع فائدة حقن المادة الماصة إلى حالات قد لا يكون فيها الكربون المنشط غير المعالج فعالاً؛
- يمكن عموماً تشغيله بمعدلات حقن أقل، مما يؤدي إلى تقليل عدد الآثار على المنشأة وتخفيض المحتوى الكربوني في الرماد المتطاير الملتقط؛
- يؤدي إلى تحسين الأداء عند استخدام أنواع الفحم المنخفضة الكلور.

وقد لوحظ تحسن في أداء ضبط الزئبق أثناء الاختبارات الميدانية الكاملة النطاق على الكربون المنشط المعالج كيميائياً الذي يحقن في منبع جهاز قائم للجسيمات (فيلبي وآخرون، ٢٠٠٨). ويتضح ذلك في الشكل ١٠. وكما يمكن أن يشاهد من هذا الشكل، تحقق تحسن في كفاءة التقاط الزئبق باستعمال معدلات حقن منخفضة نسبياً من الكربون المنشط المعالج في منشآت الطاقة التي تعمل بحرق الفحم المنخفض الكلور. وحقن الكربون المنشط المعالج ما يزيد عن ٩٠ في المائة من التقاط الزئبق عند معدل حقن يبلغ حوالي ٥٠ مغ/م^٣ (فيلبي، ٢٠٠٨). وتطلب الأمر معدلات حقن أعلى للوصول إلى كفاءة عالية لإزالة الزئبق عند استعمال كربون منشط غير معالج، وفي بعض الحالات، لم يكن من الممكن تحقيق التقاط بنسبة ٧٥ في المائة.



الشكل ١٠ - مقارنة بين أداء الكربون المنشط غير المعالج وأداء الكربون المنشط المعالج في إزالة الزئبق

تقييدات انطباق حقن الكربون المنشط

رغم أن أسلوب حقن الكربون المنشط يجري تنفيذه تجارياً في تطبيقات عديدة ومتنوعة فإن بعض القضايا لا تزال مطروحة، بما في ذلك إمكانية تسويق الرماد المتطاير لصانعي الخرسانة وتأثير ثلاثي أكسيد الكربون على أداء نظم حقن الكربون المنشط.

وتوضع الأنظمة النمطية لحقن الكربون المنشط في منبع أجهزة ضبط الجسيمات الدقيقة، وهو ما يؤدي إلى اختلاط المادة الماصة مع الرماد المتطاير. وفي حين أن هذا لا يشكل مصدراً للقلق في حالة عدم بيع الرماد المتطاير لإنتاج الخرسانة، فإن هذه الخلطة يمكن أن تؤثر سلباً على استعمال الرماد المتطاير في إنتاج الخرسانة. وتتسم نوعية الخرسانة بالحساسية بصورة خاصة إزاء المحتوى الكربوني، وتتأثر أيضاً بالمساحة السطحية للكربون الموجود في الرماد المتطاير.

ويتمثل أحد الأساليب الفعالة للقضاء على التلوث بالرماد المتطاير في وضع مرشح نسيجي إضافي في مخرج المرسب الكهروستاتيكي الموجود أو حقن الكربون المنشط بعد جهاز الجسيمات الدقيقة وفي النظام الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة، الذي قد يؤثر على نوعية الجبس الناتج من نظام إزالة الكبريت (ميلر وآخرون، ٢٠١٤؛ وميمنا وآخرون، ٢٠١٤). وبالإضافة إلى ذلك، فإن كمية الفحم المنشط المعالج المطلوبة لتخفيض الزئبق بمقدار يزيد عن ٨٥ في المائة قد تنخفض لتصل إلى ٨ مغ/م^٣ في بعض المنشآت التي تعمل بحرق الفحم المنخفض الزئبق وتستخدم مرشحات نسيجية لضبط الجسيمات الدقيقة. وفي هذه الحالات، فإن وجود الكربون المنشط في الرماد المتطاير قد لا يؤثر على بيع الرماد المتطاير لأغراض الخرسانة.

وقد تم تطوير مواد كربونية ماصة متوافقة مع الخرسانة تسمح لبعض منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم بمواصلة تسويق الرماد المتطاير لأغراض إنتاج الخرسانة (نيلسون وآخرون، ٢٠٠٦؛ ولاندرث وآخرون، ٢٠١٢). وتستخدم هذه المواد تجارياً في الولايات المتحدة.

وجرت أيضاً اختبارات على بعض المواد الماصة الأخرى غير الكربونية المخصصة للحفاظ على نوعية الرماد المتطاير وتسمح في الوقت نفسه بمعدلات حقن مواد ماصة قادرة على تحقيق ما يصل إلى قرابة ٨٥ في المائة من إزالة الزئبق (كانغ وآخرون؛ ٢٠٠٧). وبالمثل، تم تطوير تقنيات للقيام بمعالجة لاحقة للرماد المتطاير من أجل إزالة الكربون غير المحروق والكربون المنشط. وتشمل هذه التقنيات المعالجة الحرارية للرماد المتطاير والفصل الكهروستاتيكي للكربون عن الرماد المتطاير.

وأظهرت الاختبارات أن ثلاثي أكسيد الكبريت في غاز المدخنة، حتى وإن كان بتركيزات منخفضة، يمكن أن يخل بأداء نُظْم حقن الكربون المنشط ويبدو أن ثلاثي أكسيد الكبريت يتنافس مع الزئبق على مواقع الامتزاز في سطح المادة الماصة، وبذلك يقلل من أدائه. وقد تكون هذه الظاهرة هامة بصورة خاصة بالنسبة لتطبيقات حقن الكربون المنشط في المنشآت العاملة بحرق الفحم الذي يحتوي على نسبة عالية من الكبريت. وأحد الحلول الممكنة لمسألة الخلل الذي قد يسببه ثلاثي أكسيد الكبريت يتمثل في الجمع بين حقن المواد الماصة للزئبق والمواد القلوية. ويجري استعمال بعض المواد القلوية كما أشير في فيلي وجونز (٢٠٠٩). وتشمل هذه المواد هيدروكسيد الكالسيوم (Ca(OH)₂) وبيكربونات الصوديوم (NaHCO₃) وسيسيكربونات الصوديوم (ترونا).

آثار حقن الكربون المنشط الشاملة لعدة أوساط

يمكن أن يؤدي حقن الكربون المنشط غير المتوافق مع الخرسانة إلى عدم القدرة على استعمال الرماد المتطاير في الخرسانة ولذلك يمكن أن تزيد كميات الرماد المتطاير المرسل إلى مدافن القمامة. وتشير الاختبارات التي أجريت على نوعين من الكربون المنشط التجاري إلى أن الزئبق الملتقط بواسطة الكربون المنشط مستقر بدرجة كافية لتوفير عزل دائم للزئبق في المواد الماصة من الكربون المنشط بعد التخلص منه (غرايدون وآخرون، ٢٠٠٩؛ ووكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ٢٠٠٦؛ ووكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ٢٠٠٩).

وحقن الكربون المنشط في منبع جهاز ضبط الجسيمات يؤثر على نوعية الرماد المتطاير كنتيجة لخلط الكربون المنشط والرماد المتطاير. ويوجد احتمال لانبعاث زئبق ثانوي من الرماد المتطاير عند تعرضه لدرجات حرارة مرتفعة أثناء إعادة استعمال الرماد المتطاير، وذلك مثلاً عند استعمال الرماد المتطاير لصناعة الأسمنت أو صناعة الطوب (فلوغوفت - هاسيت وآخرون، ٢٠٠٧).

تكلفة تكنولوجيات ضبط الزئبق

يمكن تحقيق ضبط انبعاثات الزئبق كمنفعة مشتركة لإزالته في المعدات القائمة بالفعل والتي قد تكون أقيمت لأغراض مختلفة. وتحديد تكلفة إزالة الزئبق في سياق المنافع المشتركة أمر معقد لأن الأمر يتطلب دراسة توزيع النفقات بين تكاليف ضبط الزئبق وتكاليف ضبط الملوثات الأخرى مثل الجسيمات أو ثنائي أكسيد الكبريت أو أكاسيد النيتروجين (سلوس، ٢٠٠٨). وعادة يمكن النظر إلى تخفيض الزئبق من خلال آثار المنافع المشتركة (إقامة تكنولوجيات مثل أجهزة إزالة الكبريت من غاز المدخنة والاختزال الحفزي الانتقائي التي تقلل أيضاً انبعاثات الزئبق) باعتباره ضعيفاً من ناحية التكلفة بل وقد يكون بدون تكلفة. ويرجع ذلك إلى أن التكنولوجيات ذات التكلفة الرأسمالية العالية مثل الاختزال الحفزي الانتقائي وأجهزة إزالة الكبريت من غاز المدخنة تضاف عموماً لغرض ضبط أكاسيد النيتروجين أو أكاسيد الكبريت، على التوالي، ولن تضاف لأغراض ضبط الزئبق فقط. وبدلاً من ذلك، فإن ضبط الزئبق يمكن أن يتحقق من خلال تكنولوجيات مخصصة مثل حقن الكربون المنشط وتكلفة أقل كثيراً شريطة وجود جهاز لضبط الجسيمات. ويكون تخصيص التكاليف لهذا الغرض الأخير أكثر سهولة.

وهناك ثلاثة عناصر من التكلفة تنشأ عن تطبيق تكنولوجيا مخصصة لضبط انبعاثات الزئبق: التكلفة الرأسمالية، والتكلفة الثابتة للتشغيل والصيانة، والتكلفة المتغيرة للتشغيل والصيانة. وبالنسبة لحقن الكربون المنشط، يُقدَّر أن التكلفة المتغيرة للتشغيل والصيانة صغيرة رغم أنها تشكل عنصراً كبيراً من مجموع التكلفة (وكالة حماية البيئة، ٢٠٠٥؛ وأمار وآخرون، ٢٠١٠) وأن التكاليف الرأسمالية منخفضة نسبياً. ويتوقف ذلك على نوع التطبيق. ويمكن أن تتباين المتطلبات للمواد الماصة تبايناً كبيراً بين مختلف المواقع. والعناصر الكبرى للتكلفة المتغيرة للتشغيل والصيانة هي تكاليف المادة الماصة وتكاليف التخلص. وقد يكون هناك أيضاً ضياع لبعض الإيرادات من مبيعات الرماد المتطاير بسبب تلوث الرماد المتطاير بالكربون المنشط. وللتغلب على ذلك، تم تطوير ما يسمى الكربونات المنشطة "المتوافقة مع الخرسانة"، إلى جانب تكنولوجيات لفصل الكربون المنشط عن الرماد المتطاير.

تكاليف تكنولوجيات ضبط الزئبق في إطار المنافع المشتركة

التكاليف الرأسمالية الفعلية لضبط تلوث الهواء في أي مرفق بعينه هي في أكثر الأحيان تكاليف الملكية وتكاليف متفق عليها أثناء المفاوضات المباشرة بين بائعي التكنولوجيا وعملائهم. ولكن جانباً كبيراً من المعلومات المتعلقة بالتكاليف متاح للجمهور وترد هذه المعلومات أدناه. وينبغي الالتزام ببعض المبادئ التوجيهية العامة عند تقييم هذه البيانات:

- قد تتباين التكاليف الرأسمالية لأي إنشاء جديد حسب عوامل الزيادة عن الحاجة المستخدمة للتصميم وحسب خيارات التمويل المتاحة السائدة محلياً (مثل معدلات الرسوم الرأسمالية)؛
- قد تتباين التكاليف الرأسمالية لتركيب أي تعديل رجعي حسب الأحوال القائمة في الموقع مثل توفر المساحة وما يسمى "عامل صعوبة التعديل الرجعي"؛
- تتباين التكلفة المتوسطة لمعدات الضبط مع عامل قدرة المصنع، حيث تتناقص التكلفة المتوسطة عموماً مع زيادة عامل القدرة (سليبي، ٢٠١٤).

وتتباين تكاليف تكنولوجيات الضبط تبايناً واسعاً عند التطبيق في البلدان المختلفة. ويوضح الجدولان ٧ و ٨ تكاليف تكنولوجيا المنافع المشتركة في الصين والولايات المتحدة. ويمكن أن نرى أن التكلفة الرأسمالية لجهاز التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة الذي يقام في وحدة طاقتها ٦٠٠ ميغاواط قد تكون أقل بمقدار ٢٠ ضعفاً في الصين عنها في الولايات المتحدة. وينبغي أن يلاحظ أنه عند النظر في نشر أفضل التكنولوجيات المتاحة على الصعيد الوطني أو حتى على صعيد المنطقة فإنه ينبغي أن يوضع في الاعتبار نطاق التكاليف لأي تكنولوجيا من أفضل التكنولوجيات المتاحة وليس رقماً محدداً. وفي هذا السياق، ينبغي اعتبار القيم الواردة في الجدولين ٧ و ٨ إرشادية فقط، وينبغي أيضاً الإشارة إلى بيانات التكاليف الأخرى (مثل وزارة التجارة والصناعة في الولايات المتحدة (٢٠٠٠)؛ وسرجنت ولوندي (٢٠٠٧)).

ومع ذلك، فإن نُظْم ضبط تلوث الهواء التقليدية غير مخصصة لضبط انبعاثات الزئبق ولذلك فإن مجموع تكاليف تكنولوجيات ضبط الزئبق في إطار المنافع المشتركة يتعيَّن توزيعها على ملوثات الهواء المختلفة. واستخدمت دراسة صينية (أنكوارا وآخرون، ٢٠١٥) أسلوب توزيع معادل التلوث على أساس الأثر الصحي والبيئي لكل ملوث من الملوثات ووَزَّعت مجموع التكلفة الثانوية على الزئبق العالق بالجسيمات (PM₁₀) وثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين (انظر الجدول ٩).

الجدول ٧ - تكاليف أجهزة ضبط تلوث الهواء في منشآت الطاقة (يونان/كيلوواط، يونان ٢٠١٠)، الصين (أنكورا وآخرون، ٢٠١٥)

أجهزة ضبط تلوث الهواء	القدرة (ميغاواط)	التكلفة الرأسمالية (يونان ريمينب/كيلوواط)	تكلفة التشغيل والصيانة (يونان ريمينب/كيلوواط - سنة)
مرسب كهروستاتيكي	١٠٠ >	٨±١٠٨	٢±٧
مرسب كهروستاتيكي	٣٠٠ >	٧±١٠٠	٢±٦
مرسب كهروستاتيكي	٣٠٠ >	٧±٩٤	٢±٥
مرشح نسيجي	١٠٠ >	٨±٩١	٤±١٠
مرشح نسيجي	٣٠٠ >	٧±٨٠	٣±٩
مرشح نسيجي	٣٠٠ >	٦±٧١	٣±٩
جهاز رطب لإزالة الكبريت	١٠٠ >	١٧٨±٧٣٦	٢٩±٧٤
جهاز رطب لإزالة الكبريت	٣٠٠ >	٩٩±٤١٠	٢٢±٥٦
جهاز رطب لإزالة الكبريت	٣٠٠ >	٣٧±١٥١	١٤±٣٦
اختزال حفزي انتقائي	١٠٠ >	٢٩±١٢٣	١٨±٤٣
اختزال حفزي انتقائي	٣٠٠ >	٢٣±٩٩	١٣±٣١
اختزال حفزي انتقائي	٣٠٠ >	١٨±٧٥	٨±٢٠

الجدول ٨ - التكلفة الرأسمالية لتكنولوجيا المنافع المشتركة في الولايات المتحدة (دولار/كيلوواط، بدولارات عام ٢٠١٢) (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ٢٠١٣)

التكنولوجيا	حجم الوحدة، ميغاواط	نوع الفحم	مجموع التكلفة الرأسمالية (دولار/كيلوواط)	مجموع تكاليف الصيانة والتشغيل الثابتة والمتغيرة (دولار/ميغاواط ساعة)
الجهاز الرطب لإزالة الكبريت	٥٠٠	قيري	٥٣١	١١,٥٢
جهاز إزالة الكبريت بواسطة امتصاص التحفيف بالرش	٥٠٠	دون القيري	٤٧٠	١٠,٤٥
اختزال حفز انتقائي	٥٠٠	قيري	٢٧٤	١,٨٥
مرشح نسيجي	٥٠٠	قيري	١٩٥	١,٠٢

الجدول ٩ - تكاليف مجموعات أجهزة ضبط تلوث الهواء موزعة على مختلف الملوثات في وحدة طاقتها ٦٠٠ ميغاواط، الصين (ملايين يونان ريمينب، يونان عام ٢٠١٠) (أنكورا وآخرون، ٢٠١٥)

مجموعة أجهزة ضبط تلوث الهواء	مجموع التكلفة السنوية	التكاليف موزعة على إزالة Hg	التكاليف موزعة على إزالة PM10	التكاليف موزعة على إزالة SO2	التكاليف موزعة إزالة أكاسيد النيتروجين NOx
مرسب كهروستاتيكي	٨,٣٢٤	٠,٤٧٩	٧,٨٤٥	-	-
مرشح نسيجي	٩,٢٤١	١,١٦٧	٨,٠٧٥	-	-
مرسب + جهاز تنظيف رطب لإزالة الكبريت	٣٩,٨٧١	١,٦١٣	١١,٥٧١	٢٦,٦٨٧	-
اختزال حفزي انتقائي + مرسب + تنظيف رطب لإزالة الكبريت	٥٦,٩٩٢	٢,٢٠٠	١٤,٦٣٦	٣٣,٧٥٩	٦,٣٩٦
مرشح نسيجي + تنظيف رطب لإزالة الكبريت	٤٠,٧٨٩	٢,١٨١	١١,٧٥٩	٢٦,٨٤٩	-
اختزال حفزي انتقائي + مرسب نسيجي + تنظيف رطب لإزالة الكبريت	٥٧,٩٠٩	٢,٨٧٤	١٤,٨١١	٣٣,٨١٧	٦,٤٠٧

تكاليف تقنيات تعزيز المنافع المشتركة وحقن الكربون المنشط

تتألف تكاليف حقن الكربون المنشط من عنصرين: العنصر الأول هو التكاليف الرأسمالية اللازمة لتخزين المادة الماصة ومعدات الحقن؛ والعنصر الثاني هو التكاليف الثابتة والمتغيرة للتشغيل والصيانة (المصاحبة للمادة الماصة المستهلكة). ولتقييم تكلفة إزالة الزئبق عن طريق المنافع المشتركة، يجب التمييز بين تكاليف الاستثمار والتشغيل والصيانة في نظم ضبط تلوث الهواء، مثل أجهزة إزالة الكبريت من غاز المدخنة والاختزال الحفزي الانتقائي، وهي تكاليف محددة بصورة واضحة، وتكاليف تعزيز أو تحسين إزالة الزئبق في هذه النظم.

ويصعب عموماً تقييم تكاليف تقنيات تعزيز المنافع المشتركة نظراً لأن هذا التقييم يتوقف على متغيرات عديدة مثل مصدر الفحم ونوعيته، ومدى التجديدات المطلوبة في الأجهزة القائمة لضبط الجسيمات (في حالة المرسب) أو أنظمة التشغيل الخاصة بالموقع لنظام إزالة الكبريت من غاز المدخنة. ونتيجة لذلك، تم التوصل إلى تكاليف نسبية أولاً للنهج التي جرت مناقشتها في هذه الوثيقة؛ وتظهر هذه النهج في الجدول ١٠، وهي تستند في جملة أمور إلى المعلومات المعروضة في الوثيقة التوجيهية لتحسين الأمثل للعمليات (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، ٢٠١٠). والتكاليف الرأسمالية النسبية وتكاليف التشغيل والصيانة الإضافية التي تظهر في الجدول ١٠ ينبغي أن تعامل باعتبارها مؤشرات على الاتجاهات ولا ينبغي تفسيرها بأنها مبادئ توجيهية منطبقة عالمياً على اختيار النهج التي تحقق فعالية التكلفة لضبط انبعاثات الزئبق من منشآت العاملة بحرق الفحم أو المراحل الصناعية العاملة بحرق الفحم التي قد توجد في بلدان مختلفة. إذ أن الظروف الاقتصادية السائدة محلياً (مثل تكلفة اللوازم والمواد وكفاءة العمالة وتكلفتها وتكلفة النقل، إلخ)، ينبغي أن تؤخذ في الاعتبار دائماً عند اختيار أحد خيارات ضبط الزئبق، مع الاعتراف بأن الكثير من الأسواق لمعدات ضبط الانبعاثات وشركات البناء الهندسية هي أسواق عالمية أيضاً (باسينا وآخرون، ٢٠١٠).

الجدول ١٠ - التكلفة النسبية لمختلف أساليب إزالة الزئبق

النهج	التكلفة الرأسمالية	تكلفة التشغيل والصيانة	تعليقات
غسل الفحم	معتدلة	منخفضة	الغسل أقل تكلفة عن المعالجة الكيميائية
خلط الفحم	منخفضة جداً	منخفضة جداً	قد تتطلب تعديلاً و/أو تجديداً في أجهزة السحق
إضافات أكسدة الزئبق	منخفضة جداً	منخفضة	المضافات المهلجنة تزيد كثيراً من أكسدة والتقاط الزئبق
إضافات ضبط الانبعاثات	منخفضة جداً	منخفضة	ينبغي التخفيف من إمكانية إعادة انبعاث الزئبق
حفاز الأكسدة الانتقائية للزئبق وحفاز الاختزال الحفزي الانتقائي*	منخفضة	منخفضة	يشير فقط إلى الحفاز الخاص بالزئبق، وقد يتطلب خلط الفحم
حقن الكربون المنشط	منخفضة	منخفضة إلى معتدلة	توجد مشكلة في الحفاظ على نوعية الرماد. وتكاليف إضافية أعلى بسبب المواد الماصة "المتوافقة مع الخرسانة"

* مع نظام رطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة في المرحلة التالية.

الجدول ١١ - التكلفة الرأسمالية لحقن الكربون المنشط في الولايات المتحدة (دولار/كيلوواط، بدولارات عام ٢٠٠٧)

التكنولوجيا	حجم الوحدة، ميغاواط			
	٧٠٠	٥٠٠	٣٠٠	١٠٠
حقن الكربون المنشط	٥-٢	٥-٢	٦-٢	٨-٣

ملاحظات:

البيانات في الجدول ١١ مأخوذة من الجداول ٥-١٦ في وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ٢٠١٠. نطاقات التكلفة تنطبق على حقن الكربون المنشط المسحوق المعدل مع استخدام مرشح نسيجي أو مرسب كهروستاتيكي في الجانب البارد الحالة موضع النظر تنطبق على الفحم القيري والافتراضات الأخرى في EPA Base Case v.4.10

والحساسية المنخفضة نسبياً للتكلفة الرأسمالية لحقن الكربون المنشط بالنسبة لحجم الوحدة، كما يتضح من الجدول ١١، قد يمكن تفسيرها بأنها ناتجة عن فعالية التكلفة المقارنة لإزالة الزئبق عن طريق حقن الكربون المنشط (تكلفة إزالة كتلة وحدة من الزئبق) في الوحدات الصغيرة والكبيرة (مثل المراحل الصناعية الصغيرة مقابل مراحل المرافق الكبيرة في منشآت الطاقة). والتحليلات المتعمقة لتكاليف حقن الكربون المنشط لضبط انبعاثات الزئبق (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ٢٠١٠) التي أخذ منها الجدول ١١، أظهرت التكاليف الرأسمالية في عام ٢٠٠٧ في نطاق يتراوح من ٢ إلى ٨ دولار/كيلوواط حسب التشكيلة ونوع الفحم المنشط (عادي أو معدل) وحجم الوحدة (من ١٠٠ إلى ٧٠٠ ميغاواط). وينبغي أن يلاحظ أن قيم التكلفة الواردة في الجدول ١١ لا تشمل التكلفة الرأسمالية للمرشحات النسيجية أو المرسبات الكهروستاتيكية. وتكلفة إنشاء مرشح نسيجي جديد أو حجرة مرشحات كيسية هي ٥٥-٧٠ دولار/كيلوواط بغض النظر عن حجم المنشأة. وبالنسبة لنفس نطاق المتغيرات، توصلت الدراسة إلى تكلفة ثابتة للتشغيل والصيانة تتراوح من ٠,٠٣ إلى ٠,١ دولار/كيلوواط/سنة

والتكلفة الفعلية لضبط الزئبق بالكربون المنشط تتوقف أيضاً على نظام ضبط الجسيمات المستعمل. ويوضح الجدول ١٢ تكاليف التشغيل للمرشحات النسيجية الخاصة بالمرسب الكهروستاتيكي والجهاز المتطور المختلط لجمع الجسيمات (COHPAC). وتنطبق التقديرات على منشأة طاقتها ٢٥٠ ميغاواط بقدرة ٨٠ في المائة على حرق الفحم القيري وتفترض أن تكلفة النظام المتطور المختلط لجمع الجسيمات ستكون حوالي ٥٠ دولار/كيلوواط (١٢,٥ مليون دولار).

الجدول ١٢ - تكاليف التشغيل لنظم حقن الكربون المنشط (في منشأة طاقتها ٢٥٠ ميغاواط) يعقبها إما مرسب كهروستاتيكي أو مرشح نسيجي للفحم القيري (اللجنة الدولية المشتركة، ٢٠٠٥)

مرسب كهروستاتيكي	جامع جسيمات هجين متقدم	
٧٠	٩٠	إزالة الزئبق، النسبة المئوية
١٦٠	٤٨	معدل حقن مسحوق الكربون المنشط، kg/Macm
٧٩٠.٠٠٠	٧٩٠.٠٠٠	تكلفة حقن مسحوق الكربون المنشط، بالدولار
٢ ٥٦٢.٠٠٠	٧٩٦.٠٠٠	تكلفة الكربون المنشط، بالدولار

وتتوقف تكاليف المادة الماصة على خصائص الفحم ونوع نظم ضبط تلوث الهواء الموجودة في المنشأة ومستوى التقاط الزئبق المطلوب. وأورد جونز وآخرون (٢٠٠٧) تكاليف الكربون من مختلف جهات التوريد وهي تتراوح من ٠,٣٧ دولار/كغ إلى ٢,١١ دولار/كغ.

ويؤثر نوع الفحم المنشط على كل من معدل الحقن وتكلفة التشغيل. ويمكن أن يصل سعر وحدة الكربون المنشط المبروم إلى ٣٠ في المائة أعلى من الكربون المنشط غير المعالج. ولكن أداء الكربون المنشط المبروم يمكن أن يكون أفضل كثيراً من أداء الكربون المنشط غير المعالج في بعض أنواع الفحم (شانغ وآخرون، ٢٠٠٨).

أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لحرق الفحم

يرد في الفصل التمهيدي لهذه الوثيقة التوجيهية، وصف المبادئ العامة لاختيار أفضل التقنيات المتاحة لفئات المصادر الثابتة المدرجة في المرفق دال. ونركز هنا على اختيار وسائل ضبط الزئبق في قطاع حرق الفحم.

أفضل التقنيات المتاحة

توجد أربعة أنواع من تدابير ضبط انبعاثات الزئبق في الجو من منشآت الطاقة والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم.

التدابير الأولية لتقليل محتوى الزئبق في الفحم

ينطوي النوع الأول على إزالة الزئبق قبل الحرق. ويمثل غسل الفحم أو اختياره أو خلطه تكنولوجيات فعالة لتحسين كفاءة استعمال الفحم وتقليل انبعاثات ملوثات الهواء. ولكن مدى تطبيق غسل الفحم في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم كان منخفضاً إلى حد بعيد، وظلت نسبة غسل الفحم تنمو ببطء لأن غسل الفحم بحد ذاته لا يشكل إحدى أفضل الممارسات المتاحة. ومع ذلك، فإن الجمع بين غسل الفحم وتدابير الضبط الأخرى الموصوفة أدناه يمكن أن يوفر تخفيضاً معقولاً في انبعاثات الزئبق.

تدابير تقليل انبعاثات الزئبق أثناء الاحتراق

ينطوي النوع الثاني من تدابير الضبط على إزالة الزئبق أثناء الاحتراق. واستخدام مرجل القاعدة المميعة يؤدي دوراً هاماً في إزالة الزئبق في المراحل التالية. ومن المهم بصفة خاصة النسب المئوية المرتفعة لزئبق الجسيمات في غاز المدخنة من الطبقة المميعة مقارنة بحرق الفحم المسحوق. ويؤدي ارتفاع الزئبق الموجود في شكل جسيمات إلى ارتفاع كفاءة إزالة الزئبق في المرشحات النسيجية أو المرسبات الكهروستاتيكية في المراحل التالية. ولكن ينبغي أن يلاحظ أن استعمال مرجل القاعدة المميعة لا يشكل بحد ذاته إحدى أفضل التقنيات المتاحة.

إزالة الزئبق بواسطة المنافع المشتركة لنظم ضبط تلوث الهواء التقليدية

النوع الثالث من تدابير إزالة الزئبق ينطوي على استعمال نظم ضبط تلوث الهواء، والتي تستعمل أساساً لإزالة الجسيمات (المرسبات الكهروستاتيكية أو المرشحات النسيجية أو الجمع بينهما) وثاني أكسيد الكبريت (التنظيف الجاف أو الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة) وأكاسيد النيتروجين (الاختزال الحفزي الانتقائي)، ولكنها يمكن أن تؤدي إلى تخفيضات كبيرة لانبعاثات الزئبق على سبيل المنافع المشتركة. وفي بعض البلدان، تكون إزالة الزئبق في إطار المنافع المشتركة هي التدبير الأول الذي يتم النظر فيه من أجل تخفيض انبعاثات الزئبق من منشآت الطاقة والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم.

ويوضح القسم ٣-٢ أعلاه مستويات الانبعاثات وكفاءة الإزالة التي تتحقق من خلال تطبيق نظم ضبط تلوث الهواء. ويثبت ذلك أن الجمع بين الاختزال الحفزي الانتقائي والمرسبات الكهروستاتيكية وتنظيف الكبريت من غاز المدخنة، والتي تستعمل على نطاق واسع في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم في أوروبا والولايات المتحدة والصين واليابان، يمكن أن تحقق كفاءة في إزالة الفحم تصل إلى ٩٥ في المائة وتصل بالزئبق إلى تركيز يقل عن ١ ميكروغرام/متر مكعب عادي في غاز المدخنة من المنشآت التي تحرق فحم اللغيت.

التكنولوجيات المخصصة لضبط الزئبق

ينطوي النوع الرابع من تدابير الضبط على تكنولوجيات مخصصة لتخفيض انبعاثات الزئبق في الغلاف الجوي، بما في ذلك تكنولوجيا حقن الكربون المنشط أو استعمال المواد المضادة. وفي الوقت الحاضر، يتم تسويق تكنولوجيا حقن الكربون المنشط تجارياً واعتمادها على نطاق واسع في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم في الولايات المتحدة، حيث امتثلت هذه

التكنولوجيات بنجاح للقيم الحدية التنظيمية للانبعاثات التي تُمثل ٨٥-٩٥ في المائة من الضبط على مدى يزيد عن خمس سنوات (إدارة حماية البيئة في ولاية ماساتشوستس، ٢٠١٥). وتوضح عمليات تكنولوجيا حقن الكربون المنشط المستخدمة في الولايات المتحدة أن تركيز الزئبق في غاز المدخنة بعد حقن الكربون المنشط والمرشحات النسيجية قد تنخفض لتكون أقل من ١ ميكروغرام/متر مكعب عادي.

أفضل الممارسات البيئية

إن استراتيجيات إدارة ضبط التلوث الفعالة والمرافق ذات الصيانة الجيدة والمشغلون المدربون تدريباً جيداً واستمرار الاهتمام بالعمليات جميعها عوامل هامة في الضبط والتخفيض، حيثما أمكن، لانبعاثات الزئبق أو مركبات الزئبق الناجمة عن حرق الفحم. ولهذا فإن هذه الممارسات، المنطبقة على المصادر القائمة والجديدة، تعتبر من أفضل الممارسات البيئية وينبغي القيام بها بطريقة تتسق مع تطبيق أفضل التقنيات المتاحة.

مُعَامِلَاتِ الْعَمَلِيَّاتِ الرَّئِيسِيَّةِ

الخطوة الأولى في تحديد أفضل الممارسات البيئية لعملية حرق الفحم هي تعيين معاملات العمليات الرئيسية (بما في ذلك ضبط مدخلات الزئبق في الفحم والرصد المتصل بذلك)، سواء من عمليات التحري الخاصة بكل موقع أو من الاختبارات التي تجري في مرافق مشاهمة في أماكن أخرى. واستناداً إلى عمليات التحري والاختبار، ينبغي إدخال التدابير التي تمكّن من ضبط مُعَامِلَاتِ الْعَمَلِيَّاتِ الرَّئِيسِيَّةِ فِي نِظَامِ الْإِدَارَةِ.

اعتبارات كفاءة الطاقة في المنشأة بأكملها

تعرف كفاءة الطاقة في منشأة تعمل بحرق الفحم بأنها النسبة بين ناتج المنشأة (أي الكهرباء الصافية والحرارة الصافية أو كلاهما) ومقدار طاقة المصدر (بالفحم) التي تزود بها المنشأة في نفس الوقت. وتتباين كفاءة التوربين البخاري (التي تستند إلى قيمة أكثر انخفاضاً لتسخين الفحم) في منشأة جديدة تعمل بحرق الفحم المسحوق من ٣٩ إلى ٤٧ في المائة، حسب ظروف البخار (رابطة صناعة الكهرباء في أوروبا - Eurelectric، ٢٠٠٣). والمنشآت المقامة حديثاً والمصممة لظروف البخار دون الحرج تعمل في الطرف الأدنى، في حين أن المنشآت المصممة لظروف البخار فوق الحرج وفوق الحرج للغاية تعمل في الطرف الأعلى من نطاق الكفاءة المذكور. أما مراحل الاحتراق ذات القاعدة المميّعة الدوارة فتعمل نمطياً بمعدل يزيد عن ٤٠ في المائة من الكفاءة. وحتى وقت قريب في عام ٢٠١٤ لم يصمم سوى حوالي النصف من جميع منشآت الطاقة الجديدة العاملة بحرق الفحم للتشغيل المرتفع الكفاءة بانبعثات منخفضة (وكالة الطاقة الدولية، ٢٠١٢).

وتقل كفاءة المنشآت مع تقدمها في العمر بما يتطلب مزيداً من الفحم لتوليد نفس مقدار الناتج. وبالنسبة لأي منشأة طاقة أو مرجل صناعي يعمل بحرق الفحم، فإن مقدار انبعاثات الزئبق غير الخاضعة للضبط من المنشأة أو المرجل يتصل اتصالاً مباشراً بمقدار الفحم المحروق. ويعني ذلك أنه إذا أمكن تقليل كمية الفحم المحروق فسوف يتم أيضاً تخفيض إجمالي انبعاثات الزئبق من منشأة الطاقة أو المرجل الصناعي. وهذا التخفيض في مقدار الفحم المحروق يمكن تحقيقه بالتدابير المتخذة لتحسين كفاءة الطاقة في منشأة الطاقة أو المرجل الصناعي القائم.

وكذلك فإن التصميم الذي يتسم بكفاءة الطاقة وصيانة المعدات وتحسين الكفاءة يتيح تخفيض جميع الملوثات المنبعثة من نفس مقدار الفحم المستعمل، بما في ذلك غازات الاحتباس الحراري مثل ثاني أكسيد الكربون، بالإضافة إلى تخفيض انبعاثات الزئبق. وإذا تم ترقية مستوى المنشأة لأسباب تجارية أو اقتصادية فإن ذلك سيؤدي إلى طاقة أكثر وانبعثات أقل من نفس مقدار الفحم المستعمل (سلوس، ٢٠٠٩).

ويمكن أن تشمل أمثلة تدابير تحسين كفاءة الطاقة في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم أو في المراحل الصناعية، القياسات التفصيلية لتعيين الفاقد الحراري وإصلاح التسريبات في أنابيب غاز المدخنة وتحديث أجهزة تسخين الهواء وتركيب صفائح جديدة للتوربينات وإصلاح أو ترقية جهاز التكثيف ووضع تغليف جديد لبرج التبريد أو تحسين الكفاءة الكهربائية للمنشأة.

ويتيسر الاحتراق عالي الكفاءة من خلال وضع نظام لرصد مُعاملات التشغيل الرئيسية، مثل أول أكسيد الكربون، ومعدل التدفق الحجمي ودرجة الحرارة والمحتوى من الأكسجين. ويرتبط المستوى المنخفض من أول أكسيد الكربون بارتفاع كفاءة الاحتراق من حيث اكتمال احتراق فحم التغذية. وتتوقف كفاءة الاحتراق على عدة عوامل تشمل ظروف البخار ونوع الفحم والمناخ المحلي في الموقع وعمر المنشأة وقدرتها الإنتاجية وأسلوب تشغيلها (الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، ٢٠١٣).

صيانة أجهزة ضبط تلوث الهواء وكفاءتها في الإزالة

بالإضافة إلى تحسين كفاءة الطاقة، يتيح تحسين كفاءة أجهزة ضبط تلوث الهواء فرصة لتحقيق أكبر قدر ممكن من إزالة الزئبق. وتحقق كمية إضافية من إزالة الزئبق نتيجة تشغيل المعدات القائمة بالفعل في منشآت الطاقة أو المراحل الصناعية من أجل ضبط تلوث الهواء والمصممة أصلاً للحد من الانبعاثات غير الزئبقية مثل الجسيمات أو ثنائي أكسيد الكبريت أو أكاسيد النيتروجين. ويمكن، حسب معدات ضبط تلوث الهواء المتاحة، أن تشمل هذه النهج تخفيض متطلبات الطاقة الطفيلية لأجهزة ضبط تلوث الهواء وتحديث أو ترقية مستوى المرسبات الكهروستاتيكية أو المرشحات النسيجية، وتغيير تصميم وتشغيل الاختزال الحفزي الانتقائي أو الجمع بين هذه النهج (سلوس، ٢٠٠٦).

الإدارة السليمة بيئياً للمنشأة

من أجل تحسين منع انبعاثات الزئبق وضبطها يلزم نظام إدارة بيئية لمنشأة الطاقة العاملة بحرق الفحم أو المرجل الصناعي العاملة بحرق الفحم ليحدد بوضوح المسؤوليات على جميع المستويات. وبعض التدابير المنطبقة بصورة شائعة تختص بتحسين تشغيل المرجل، مثل تنفيذ دورات التفتيش والصيانة الملائمة. وتنطوي ممارسات التشغيل والصيانة على إمكانية تحسين أداء المنشأة، بما في ذلك تحسين الكفاءة والموثوقية، وكذلك تخفيض تكاليف التشغيل والصيانة الشاملة نفسها. ولكن ليس من الممكن تجنب تدهور معدات المنشأة، ويتوقف معدل حدوث هذا التدهور كثيراً على ممارسات التشغيل والصيانة. وتشمل بعض ممارسات التشغيل والصيانة الجيدة على سبيل المثال صيانة خط البخار ومعالجة المياه ووجود بروتوكول يمكن الاعتماد عليه للقيام بالرصد والتبليغ. وبالإضافة إلى ذلك، قد تكون تحسينات العمليات ضرورية لتقليل الاختناقات والتأخيرات.

وينبغي تخصيص الموارد الكافية لتنفيذ أفضل الممارسات البيئية ومواصلة تطبيقها، وينبغي تدريب العاملين تدريباً ملائماً يتصل بواجباتهم. ومن الأمور الهامة وجود بروتوكولات للتدقيق عن بُعد وفي الميدان من جانب طرف ثالث مستقل من أجل كفاءة اتباع أفضل الممارسات البيئية في الواقع.

الإدارة السليمة بيئياً لمخلفات احتراق الفحم

الإدارة السليمة بيئياً لمخلفات احتراق الفحم أمر هام من أجل تقليل احتمالات زيادة مخاطر إعادة انبعاث الزئبق وغير ذلك من المشاكل المحتملة.

وطوال عملية ضبط انبعاثات الزئبق من المصادر العاملة بحرق الفحم تجري إزالة الزئبق من غاز المدخنة وتحويله إلى مخلفات حرق الفحم، بما في ذلك رماد قاعدة المرجل والرماد المتطاير والحماة الناشئة عن التنظيف الرطب للكبريت من غاز المدخنة. والحماة الناشئة عن التنظيف الرطب للكبريت من غاز المدخنة وغير ذلك من مخلفات حرق الفحم يتم تخزينها في الموقع أو إعادة استخدامها، بوسائل منها مواصلة تجهيزها وتحويلها إلى ألواح تبطين من الجبس. وفي هذه الحالة الأخيرة، قد يكون من الضروري، بعد ترشيح الحماة من الجبس الناشئ عن جهاز تنظيف الكبريت، القيام باستخراج الزئبق من الفضلات السائلة

حسب المستويات الموجودة. ويمكن أن يتحقق ذلك عن طريق المعالجة الكيميائية أو التبادل الأيوني أو الترشيع الغشائي. وفي عمليات إنتاج ألواح التبطين المصنوعة من الجبس، وهو الاستخدام الآخر لمخلفات حرق الفحم، بما في ذلك تخزين مخلفات حرق الفحم في الموقع، يوجد احتمال إعادة إطلاق الزئبق الذي تحتويه هذه المخلفات.

وفي عمليات إنتاج ألواح الجبس قد ينطلق جزء من الزئبق مرة أخرى لأن عمليات الإنتاج تشمل في كثير من الأحيان وحدات عالية الحرارة. وتبيّن من إحدى الدراسات أن مجموع فقدان الزئبق عبر منشأة إنتاج ألواح التبطين يمثل حوالي ٥ في المائة من محتوى الزئبق الداخل إلى جبس جهاز تنظيف الكبريت من غاز المدخنة (مارشال، ٢٠٠٥). ولكن أشارت دراسة أخرى قام بها ليون وآخرون (٢٠١٣) إلى أن ١٢-٥٥ في المائة من مجموع الزئبق في جبس تنظيف الكبريت من غاز المدخنة سينبعث أثناء عملية إنتاج ألواح الجبس وأظهرت دراسة ثالثة أن الإطلاقات تتراوح من ٢ إلى ٦٦ في المائة من الزئبق الداخل إلى جبس تنظيف الكبريت من غاز المدخنة (ساندرسن وآخرون، ٢٠٠٨). ونظراً للتباين الممكن في معدلات الإطلاق فإن إنتاج ألواح التبطين باستخدام جبس تنظيف الكبريت لا يعتبر من أفضل الممارسات البيئية إلا إذا ثبت أن إعادة إطلاق الزئبق ستكون بالحد الأدنى أو سيتم التقاطها أثناء عملية إنتاج ألواح التبطين.

وفي حالة تخزين مخلفات حرق الفحم في الموقع قد تنشأ إمكانية الآثار الشاملة لعدة أوساط (مثل نض الزئبق في المياه الجوفية). وخلصت دراسة استمرت لعدة سنوات وتناولت خصائص مخلفات حرق الفحم إلى أن أي إطلاق محتمل للمعادن من مخلفات حرق الفحم في البيئة يتأثر بظروف النض (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ٢٠٠٦؛ ووكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ٢٠٠٨؛ ووكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، ٢٠٠٩)^(٣٥). وتتأثر ظروف النض بدرجة الحموضة وبمقدار الاتصال بالمياه (أي نسبة السوائل إلى الجوامد). وعند التقييم على نطاق درجة حموضة يمتد من ٥,٤ إلى ١٢,٤ (النطاق المعقول لإدارة مخلفات حرق الفحم) لم تعد نتائج نض الزئبق المعايير القائمة بشأن تركيز الزئبق في مياه الآبار في الولايات المتحدة. وفي هذه الدراسات نفسها تبيّن أن بعض نتائج نض بعض المعادن الثقيلة الأخرى، مثل الزرنيخ، كانت تتجاوز المعايير القائمة بشأن التركيز في مياه الآبار في الولايات المتحدة. وينبغي أن يلاحظ أن البيانات المعروضة لا تشمل أي محاولة لتقدير كمية أي من العناصر المكونة التي قد تصل إلى خزان للمياه الجوفية أو بئر لمياه الشرب. وسيطلب الأمر وضع نماذج لنقل المياه الجوفية ومآلها، بحيث تشمل النظر في عوامل إضافية كثيرة - بما في ذلك طريقة إدارة الرماد المتطاير - من أجل تقييم المخاطر المحتملة. ويمكن النظر في تخزين مخلفات احتراق الفحم بأسطح صماء في الموقع باعتبار ذلك أحد جوانب الإدارة السليمة بيئياً.

رصد انبعاثات الزئبق

تناقش الجوانب العامة والشاملة للاختبار والرصد والتبليغ في الفصل التمهيدي لهذه الوثيقة. وهذا القسم يقتصر على الجوانب المحددة لرصد انبعاثات الزئبق ومنشآت الطاقة والمرآجل الصناعية العاملة بحرق الفحم.

الرصد المستمر للانبعاثات

رصد الزئبق باستخدام أدوات الرصد المستمر للانبعاثات هو رصد فعال لتيارات غاز المدخنة الناتجة عن الاحتراق (ساروناك، ٢٠٠٧). ولأغراض الامتثال للانبعاثات توضع أجهزة الرصد المستمر للانبعاثات في أنبوب المدخنة لتقيس تيار غاز بتركيز جسيمات منخفض.

(٣٥) قامت وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة بصياغة أساليب اختبار النض المستخدمة في هذه الدراسة في اختبارات معيارية تُعرف باسم أساليب "LEAF". وهذه الأساليب تحمل الأرقام ١٣١٦-١٣١٣ ويمكن الاطلاع عليها في: http://epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/new_meth.htm

ولأغراض التحسين الأمثل للعمليات المتعلقة بالزئبق تستعمل أجهزة الرصد المستمر للانبعاثات أحياناً لأخذ عينة من تيار الغاز المحمّل بالجسيمات قبل جهاز ضبط الجسيمات. وتكنولوجيا مجس الترشيح التي يشيع استعمالها لهذا الغرض هي مرشح القصور الذاتي. وتستعمل هذه التكنولوجيا تقنية تسريع غاز العينة وتعتمد على قوى القصور الذاتي للجسيمات وعلى استخدام مرشح ملبّد لفصل الغاز والجسيمات.

والرصد المستمر لغاز العينة المشبّع بالماء من جهاز تنظيف رطب هو أسلوب يمارس بصورة شائعة رغم أنه يتطلب إجراءات أكثر تفصيلاً. ويستعمل مجس مرشح ثابت خاص لتجنب الانسداد من تكثف المياه ويستخدم هذا المرشح نمطياً دورة تنظيف متكررة لوسائط المرشح باستعمال الهواء المضغوط. وتستعمل جميع تطبيقات الرصد المستمر خطوط عيّنات مسخّنة مع تنظيم دقيق لدرجة حرارة العينة من أجل تجنب تكثف المياه وامتزاز الزئبق المؤكسد في هذا الماء نتيجة ذلك.

ويوفّر جهاز الرصد المستمر للانبعاثات لمشعل حرق الفحم تحليلاً للزئبق في الوقت الحقيقي ويمكن أن يستعمل هذا التحليل في حلقة التأثيرات المترتبة مع معدات حقن المادة الماصة أو معدات تلقيح المواد المضافة إلى الفحم. وتسمح هذه السمة بالضبط الدقيق لتكثيف انبعاثات الزئبق رغم التغيّرات في تركيز الزئبق في الوقود.

ويتيح الرصد المستمر أيضاً مزايا تتمثل في الحساسية للتركيزات المنخفضة من الزئبق التي تصل إلى ٠.٥ ميكروغرام/م^٣، والقياسات القائمة على تنوعات الزئبق والموثوقية العالية للنتائج عند معاييرها بمنهجية دينامية لتسمير الزئبق.

رصد المصيدة الماصة

أثبتت المصائد الماصة لرصد الزئبق في تيارات غاز حرق الفحم أنها توفّر بيانات دقيقة وقابلة للاستنساخ عن انبعاثات الزئبق، حتى عند تركيزات منخفضة جداً (ساروناك، ٢٠٠٧). ومن الممكن القيام بالرصد باستعمال مجموعة من المصائد خلال فترة أخذ عينات تمتد عدة أيام في منشآت حرق الفحم.

أخذ العينات بجهاز الارتطام

كان استخدام أساليب الارتطام لرصد الزئبق في منشآت احتراق الفحم هو الأسلوب الأبرز تاريخياً. وأساليب الارتطام غير ملائمة للفترات الطويلة لأخذ العينات وهي تقتصر في الممارسة العملية على عدة ساعات (ساروناك، ٢٠٠٧).

وتستخدم أساليب كثيرة من أساليب الارتطام لجمع الزئبق العالق بالجسيمات والزئبق المؤكسد والزئبق النقي بصورة منفصلة وهي لذلك مفيدة في منشآت حرق الفحم من أجل تحديد تنوع الزئبق.

وتستعمل أساليب الارتطام سلسلة من أجهزة ارتطام متعددة لتسمح بقدر معيّن من مراقبة الجودة.

توازن الكتلة

قياسات توازن الكتلة في منشآت حرق الفحم ليست أسلوباً مباشراً لرصد انبعاثات الزئبق في الهواء ويمكن أن نتوقع انخفاض دقة الانبعاثات المحسوبة من توازن الكتلة.

والبيانات المطلوبة للقيام بقياس توازن الكتلة للزئبق في منشآت حرق الفحم متوفرة بسهولة في بعض المناطق لأن محتوى الزئبق من تيارات النفايات الصلبة والسائلة من المنشأة يخضع للتنظيم. وتشمل تيارات النفايات رماد القاعدة والرماد المتطاير ونفايات مياه أجهزة التنظيف ومنتجات أجهزة التنظيف مثل الجبس والنفايات الصلبة لأجهزة التنظيف. ويجري قياس الزئبق من الفحم المحترق بانتظام أيضاً في بعض المناطق وهو ضروري لحساب توازن الكتلة.

وتتوقف دقة توازن الكتلة بشدة على أخذ العينات التمثيلية من الفحم وتيارات النفايات وعلى الاستقرار الصحيح للعينات. ويجب اتباع إجراءات خاصة لتجنب ضياع الزئبق من العينات التي يتم جمعها. ويمكن تحقيق دقة أكبر لنتائج توازن الكتلة

بزيادة عدد العينات التي يتم جمعها وتحليلها. ويمكن توقع حدوث تباين كبير في محتوى الفحم من الزئبق، ولهذا يتطلب الأمر تحليلاً متكرراً للفحم للحصول على القيمة الدقيقة لمُدخلات الزئبق. ويجب القيام برصد دوري لانبعاثات الزئبق في الهواء من أجل إثبات صحة حسابات توازن الكتلة.

وبالنظر إلى عدد تيارات المواد التي تتطلب الرصد وتواتر أخذ العينات من أجل التوصل إلى توازن كتلة دقيق، فقد يكون استعمال أسلوب توازن الكتلة لرصد انبعاثات الزئبق في الهواء في منشآت حرق الفحم أكثر صعوبة من استعمال أسلوب الرصد المباشر لغاز المدخنة.

النظم التنبؤية لرصد الانبعاثات

الرصد التنبؤي للانبعاثات هو أداة فرز جيدة لمنشآت حرق الفحم ولكنها ليست وسيلة دقيقة لرصد انبعاثات الزئبق في الهواء بسبب التباين الواسع لمحتوى الزئبق في الفحم.

والنظم التنبؤية لرصد الانبعاثات مفيدة لتقدير انبعاثات الزئبق في الهواء استعداداً لوضع المصيدة الماصة أو غير ذلك من أنشطة الرصد. ويسمح التقدير الجيد لنطاق الانبعاثات في الهواء بزيادة كفاءة اختبار المصيدة الماصة.

عوامل الانبعاثات

لا تمثل عوامل الانبعاثات وسيلة دقيقة لرصد انبعاثات الزئبق في الهواء في تيارات غاز حرق الفحم. ويرجع ذلك إلى تباين محتوى الزئبق في الفحم والتباين الواسع لالتقاط الزئبق داخل معدات ضبط الانبعاثات المقامة في منشأة حرق الفحم. وهذه النقطة الأخيرة تجعل من الصعب جداً تطبيق عوامل الانبعاثات عبر أسطول منشآت حرق الفحم.

التقديرات الهندسية

التقديرات الهندسية ليست أسلوباً دقيقاً لرصد انبعاثات الزئبق في الهواء من منشآت حرق الفحم.

- ACAP (2004). Assessment of mercury releases from the Russian Federation. Russian Federal Service for Environmental, Technological and Atomic Supervision, Danish Environment Protection Agency for Arctic Council, COWI, December 2004.
- Ake, Terrence; Sulfur Dioxide Control for Small Utility Boilers, Air and Waste Management Association, 2009.
- Amar, P, C. Senior and R. Afonso (2008). NESCAUM Report: Applicability and Feasibility of NO_x, SO₂, and PM Emissions Control Technologies for Industrial, Commercial, and Institutional (ICI) Boilers (<http://www.nescaum.org/activities/major-reports>).
- Amar, P, C. Senior, R. Afonso and J. Staudt (2010). NESCAUM Report "Technologies for Control and Measurement of Mercury Emissions from Coal-Fired Power Plants in the United States: A 2010 Status Report".
- Ancora, M. P., L. Zhang, S.X. Wang, J. Schreifels and J.M Hao (2015). Economic Analysis of Atmospheric Mercury Emission Control for Coal-Fired Power Plants in China. *Journal of Environmental Sciences* vol. 27, issue 7, pp125–134..
- ASTM D388 (2012). Standard Classification of Coals by Rank.
- Babcock Power, Circulating Dry Scrubbers (CDS) Webinar Presentation, 2012 Mid-Atlantic Regional Air Management Association, 19 July 2012.
- Bertole, C., 2013; SCR Catalyst Management and Improvement to Achieve and Maintain Mercury Oxidation Levels, May 2013 (2013).
- Bojkowska, I., Sokolowska, G., 2001. Mercury in mineral raw materials exploited in Poland as potential sources of environmental pollution (In Polish), *Biuletyn PIG*, No. 5, p. 53.
- Brown, T. D., D.N. Smith, R.A. Hargis, Jr., W.J. O'Dowd. (1999). 1999 Critical Review: Mercury Measurement and Its Control: What We Know, Have Learned, and Need to Further Investigate, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol., 49, pp. 1–97.
- Buschmann, J., Lindau, L., Vosteen, B.W. (2006). The KNXTM Coal Additive Technology –a Simple Solution for Mercury Emissions Control, *Power Gen USA*, December 2005.
- Celebi, M. (2014). "Coal Plant Retirements and Market Impacts", The Brattle Group, presented to Wartsila Flexible Power Symposium, Vail, CO, February 2014.
- Chang, R., Dombrowski, K., Senior, C. (2008). Near and Long-Term Options for Controlling Mercury Emissions from Power Plants, The MEGA Symposium, Baltimore, MD, 2008.
- Chathen, A., Blythe, G., Richardson, M., Dene, C., (2014). Scrubber Additives for Mercury Re-Emission Control, The MEGA Symposium, Baltimore, MD, August 2014.
- Chu, P. (2004). Effects of SCRs on Mercury, Mercury Experts Conference, Glasgow, Scotland, May 2004.
- Clack, H.L. (2006). Mass Transfer within ESPs: Trace Gas Adsorption by Sorbent-covered Plate Electrodes, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 56, pp. 759–766.
- Clack, H.L. (2009). Mercury Capture within Coal-Fired Power Plant Electrostatic Precipitators: Model Evaluation, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, pp. 1460–1466.
- CRIEPI and FEPC (2012). Data evaluated by CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry) in 2012, based on the data provided by FEPC (the Federation of Electric Power Companies of Japan).
- DeVito, M.S., Rosenhoover, W.A. (1999). Hg Flue Gas Measurements from Coal-fired Utilities Equipped with Wet Scrubbers, 92nd Annual Meeting of the Air & Waste Management Association, St. Louis, MO, June 1999.
- Deye, C.S., Layman C.M. (2008). A Review of Electrostatic Precipitator Upgrades and SO₂ Reduction at the Tennessee Valley Authority Johnsonville Fossil Plant, The MEGA Symposium, Baltimore, MD, 2008.
- Dombrowski, K., S. McDowell, et al. (2008). The balance-of-plant impacts of calcium bromide injection as a mercury oxidation technology in power plants. A&WMA MEGA Symposium. Baltimore, MD.
- Duan, Y. F. , Zhuo, Y. Q., Wang, Y. J. , Zhang, L. , Yang, L. G., Zhao, C. S., 2010. Mercury Emission and Removal of a 135MW CFB Utility Boiler. *Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion* 2010, 189–194.
- Eurelectric, 2003, Efficiency in Electricity Generation, EURELECTRIC "Preservation of Resources" Working Group, in collaboration with VGB, July 2003.

- European IPPC Bureau (EIPPCB) (2013). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants—first draft (not adopted), June 2013
http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP_D1_June2013_online.pdf.
- Favale, A., Nakamoto, T, Kato, Y., and Nagai Y. (2013), Mercury Mitigation Strategy through the Co-Benefit Of Mercury Oxidation With SCR Catalyst, Power Engineering, January 2013.
- Feeley, T., III, Brickett, L.A., O’Palko, B.A., Jones, A.P. (2008). DOE/NETL’s Mercury Control Technology R&D Program – Taking Technology from Concept to Commercial Reality, presented at the MEGA Symposium, Baltimore, MD, 2008.
- Feeley, T. J. and Jones, A. P. (2009). An Update on DOE/NETL’s Mercury Control Technology Field Testing Program. U.S. Department of Energy, available at <https://www.netl.doe.gov/File%20Library/NewsRoom/Updated-netl-Hg-program-white-paper-FINAL-July2008.pdf>.
- Feng, W., Kwon, S., Feng, X., Borguet, E., M.ASCE, R. D. V. (2006). Sulfur Impregnation on Activated Carbon Fibers through H₂S Oxidation for Vapor Phase Mercury Removal. *Journal of Environmental Engineering*, 292–300.
- Finkelman B. Personal communication: USGS, 2003 // United Nations Environment Programme (UNEP). Toolkit for Identification and Quantification of Mercury Releases. Geneva, Switzerland: UNEP, 2005.
- Finkelman B. Personal communication: USGS, 2004 // United Nations Environment Programme (UNEP). Toolkit for Identification and Quantification of Mercury Releases. Geneva, Switzerland: UNEP, 2005.
- Galbreath, K.C. and Zygarlicke, C.J. (2000). Mercury Transformations in Coal Combustion Flue Gas, *Fuel Process. Technol.*, 65–66, 289.
- GAO (2009). Preliminary Observations on the Effectiveness and Costs of Mercury Control Technologies at Coal-fired Power Plants, United States Government Accountability Office, GAO-09-860T, Washington, DC, 2009.
- Ghorishi, S. B., Keeney, R. M., Serre, S. D., Gullett, B. K., Jozewicz, W. S. (2002). Development of a Cl-Impregnated Activated Carbon for Entrained-Flow Capture of Elemental Mercury, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 36, pp. 4454.
- Graydon J. W., Zhang, X. Z., Kirk, D. W., Jia, C.Q. (2009). Sorption and stability of mercury on activated carbon for emission control. *Journal of hazardous materials*, 168(2-3): 978–82
- ICAC (2010). Enhancing Mercury Control on Coal-fired Boilers with SCR, Oxidation Catalyst, and FGD, Institute of Clean Air Companies. Available at: www.icac.com.
- ICAC (2010a). Commercial Bookings List, June 2010. Available at: www.icac.com/files/members/Commercial_Hg_Bookings_060410.pdf.
- ICAC (2012). Sorbent Injection Technology for Control of Mercury Emissions from Coal-Fired Boilers. Available at: www.icac.com.
- IEA, 2012, High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation-Technology Roadmap, International Energy Agency, Paris, France, 2012.
- IJC, International Joint Commission (2005) Consultation on emissions from coal-fired electrical utilities. Background report from the International Joint Commission and the Commission for Environmental Cooperation, International Air Quality Advisory Board, Montreal, QC, Canada, vp (Apr 2005).
- Institution of Chemical Engineers, Controlling Industrial Emissions-Practical Experience SS143 (Symposium). 1997.
- Ito S., Yokoyama T., Asakura K. (2006). Emission of mercury and other trace elements from coal-fired power plants in Japan, *Science of the Total Environment*, vol.368, pp. 397–402.
- Jia B J, Chen Y, Feng Q Z, Liu L Y (2013) Research progress of plasma technology in treating NO, SO₂ and Hg₀ from flue gas. *Applied Mechanics and Materials*, 295-298: 1293–1298.
- Jones A P, Hoffman JW, Smith D N, Feeley T J, Murphy J T (2007) DOE/NETL’s Phase II mercury control technology field testing program: preliminary economic analysis of activated carbon injection. *Environmental Science and Technology*; 41 (4); 1365–1371.
- Kang, S.; Edberg, C.; Rebula, E.; Noceti, P. (2007). Demonstration of Mer-Cure™ Technology for Enhanced Mercury Control, DOE/NETL Mercury Control Technology Conference, Pittsburgh, PA, 11–13 December 2007.
- Keiser, B., Glesmann, S., Taff, B., Senior, C., Ghorishi, B., Miller, J., Mimna, R., Byrne, H., Improving Capture of Mercury Efficiency in WFGDs by Reducing Mercury Reemissions, ICAC, June 2014
- Kilgroe, J. D., C. B. Sedman, R. K. Srivastava, J. V. Ryan, C. Lee and S. A. Thorneloe (2001). Control of mercury emissions from coal-fired electric utility boilers: interim report including errata dated 3-21-02. Carbon, U.S.

Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Air Pollution Prevention and Control Division, 5: 33.

Ko K B, Byun Y, Cho M, Hamilton I P, Shin D N, Koh D J, and Kim K T (2008) Pulsed Corona Discharge for Oxidation of Gaseous Elemental Mercury. Chemistry Faculty Publications. Paper 2.
http://scholars.wlu.ca/chem_faculty/2.

Landreth, R. and Royer, D., (2012). Extended use of concrete-friendly C-PAC sorbent at PPL Montana Corette Station, MEGA Symposium, Baltimore, MD, 2012.

Laudal, D.L.; Thompson, J.S.; Pavlish, J.H.; Brickett, L.; Chu, P.; Srivastava, R.K.; Lee, C.W.; Kilgroe, J.D. (2002) Evaluation of Mercury Speciation at Power Plants Using SCR and SCR NOx Control Technologies, 3rd International Air Quality Conference, Arlington, Virginia, September 9–12, 2002.

Lawless, P. (1996). Particle Charging Bounds, Symmetry Relations, and Analytic Charging Rate Model for the Continuum Regime, *J. Aerosol Sci.*, vol. 27, no. 2, pp. 191–215, 1996.

Leaner, J.J., Dabrowski, J.M., Mason, R.P., Resane, T., Richardson, M., Ginster, M., Gericke, G., Petersen, C.R., Masekoameng, E., Ashton, P.J., Murray, K., (2009). Mercury Emissions from Point Sources in South Africa, In: Pirrone, N., and Mason, R. (eds.) *Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere*, Springer.

Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement- Kalk und Kraftwerken in Nordrhein-Westfalen, 2. Auflage Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, September 2005.

Liu X.L., Wang S.X., Zhang L., Wu Y., Duan L., Hao J.M. (2013) Speciation of mercury in FGD gypsum and mercury emission during the wallboard production in China. *Fuel*, vol. 111, pp. 621–627.

Lu, Y., Rostam-Abadi, M., Chang, R., Richardson, C., Paradis J. (2007). Characteristics of Fly Ashes from Full-Scale Coal-Fired Power Plants and Their Relationship to Mercury Adsorption, *Energy & Fuels*, vol. 21, pp. 2112–2120.

Marshall, J., Blythe, G.M., and Richardson, M. (2005). Fate of Mercury in Synthetic Gypsum Used for Wallboard Production. Topical report, Task 1 Wallboard Plant Test Results, DE-TC26-04NT42080, April 2005.

Martin, C. (2009). Activated Carbon Injection for Mercury Control from Coal-Fired Boilers, An Overview, Presented at the Energy Efficiency and Air Pollutant Control Conference, Wroclaw, Poland, September 2009.

Massachusetts Department of Environmental Protection (2015). Annual Compliance Reports for SO₂, NO_x, and Mercury Emissions from Coal-Fired Power Plants (also, similar annual compliance reports from power plants in States of New Jersey and Connecticut).

McTigue, N. E., Cornwell, D. A., Graf, K., & Brown, R. (2014). Occurrence and consequences of increased bromide in drinking water sources. *JOURNAL AWWA*, 106, 11.

Miller, C., Feeley, III, T., Aljoe W., Lani, B., Schroeder, K., Kairies, C., McNemar, A., Jones A., Murphy, J. (2006). Mercury Capture and Fate Using Wet FGD at Coal-Fired Power Plants, DOE/NETL Mercury and Wet FGD R&D, Pittsburgh, PA, August 2006.

Nakayama, Y., Nakamura, S., Takeuchi, Y., Itoh, M, Okino, S., Honjo, S. (2006). MHI High Efficiency System; Proven technology for multi pollutant removal, The MEGA Symposium, Baltimore, MD, 2006.

Napolitano, S. (1998). "Analyzing Electric Power Generation under the CAAA", US EPA, March 1998.

Nelson P. F. (2007) Atmospheric emissions of mercury from Australian point sources. *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 1717–1724.

Nelson, S., Landreth, R., Zhou, Q., Miller, J. (2004). Accumulated Power-Plant Mercury-Removal Experience with Brominated PAC Injection, Joint EPRI DOE EPA Combined Utility Air Pollution Control Symposium, The MEGA Symposium, Washington, DC, 2004.

Nelson, S.; Landreth, R.; Liu, X.; Tang, Z.; Miller, J.; Brickett, L. (2006). Brominated Sorbents for Small Cold-Side ESPs, Hot-Side ESPs, and Fly Ash Use in Concrete, DOE/NETL Mercury Control Technology Conference, Pittsburgh, PA, December 11–13, 2006.

Niksa, S., Fujiwara, N. (2004). The Impact of Wet FGD Scrubbing On Hg Emissions From Coal-Fired Power Stations, The MEGA Symposium, Washington, DC, 2004.

Nolan, P., Downs, W., Bailey, R., Vecchi, S. (2003). Use of Sulfide Containing Liquors for Removing Mercury from Flue Gases, US Patent 6,503,470, 7 January 2003.

Pacyna, J., Sundseth, K., Pacyna, E.G., Jozewicz, W., Munthe, J., Belhaj, M., Astrom, S. (2010). An Assessment of Costs and Benefits Associated with Mercury Emission Reductions from Major Anthropogenic Sources, *Journal of the Air & Waste Management*, vol. 60, pp. 302–315, 2010.

- Peters, H. James (2010) Regenerative Activated Coke Technology with No Water Consumption, RMEL Spring Conference, Santa Fe NM, 17 March 2010 (<http://www.hamonusa.com/sites/default/files/Regenerative%20Activated%20Coke%20Technology%20with%20No%20Water%20Consumption.pdf>).
- Pirrone N, Munthe J, Barregård L, Ehrlich H C, Petersen G, Fernandez R, Hansen J C, Grandjean P, Horvat M, Steinnes E, Ahrens R, Pacyna J M, Borowiak A, Boffetta P., Wichmann-Fiebig M. EU ambient air pollution by mercury (Hg) - position paper. Italy: Office for Official Publications of the European Communities, 2001.
- Redinger, K.E., Evans, A., Bailey, R., Nolan, P. (1997). Mercury Emissions Control in FGD Systems, EPRI/DOE/EPA Combined Air Pollutant Control System, Washington, DC, 1997.
- Richardson, S. D., Plewa, M. J., Wagner, E. D., Schoeny, R., & DeMarini, D. M. (2007). Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 636(1), 178–242.
- Rini, M.J., Vosteen, B.W. (2008). Full-scale Test Results From a 600 MW PRB-fired Unit Using Alstom's KNX™ Technology for Mercury Emissions Control, The MEGA Symposium 2008, Baltimore, MD, 2008.
- Rini, M.J., Vosteen, B.W. (2009). Full-Scale Test Results from a 600 MW PRB-fired Unit Using Alstom's KNX™ Technology for Mercury Control, MEC-6 Conference, Ljubljana, Slovenia, April 2009.
- Romanov, A., Sloss, L. and Jozewicz, W. (2012). Mercury emissions from the coal-fired energy generation sector of the Russian Federation. *Energy & Fuels*, vol. 26, pp. 4647–4654.
- Rupesh, K. (2013). Fuels and its Combustion in Boiler, Steag, 2013. Available at: <http://www.eecpowerindia.com/codelibrary/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/Session%20%20%20module%20-%20Fuels%20and%20its%20Combustion%20in%20Boiler.pdf>.
- Sargent & Lundy (2007). Flue Gas Desulfurization Technology Evaluation (Dry Lime vs. Wet Limestone FGD), Project Number 11311-001 (2007).
- EPRI (2006). Status of Mercury Control Technologies: Activated Carbon Injection and Boiler Chemical Additives, Technical Report of EPRI (2006).
- Sarunac, Nenad, Evaluation and Comparison of US and EU Reference Methods for Measurement of Mercury, Heavy Metals, PM_{2.5} and PM₁₀ Emission From Fossil-Fired Power Plants, Lehigh University, February 2007.
- Satyamurty, M. (2007). Coal Beneficiation Technology – 2007 Initiatives, Policies and Practices, presented at Workshop on Coal Beneficiation and Utilization of Rejects: Initiatives, Policies and Practice, Ranchi, India, 22–24 August 2007.
- Senior, C.L. (2000). Behavior of Mercury in Air Pollution Control Devices on Coal-fired Utility Boilers, Power Production in the 21st Century Conference, Snowbird, UT, USA, 2000.
- Senior, C. (2004). Modelling Mercury Behavior in Combustion Systems: Status and Future Prospects, In Proceedings of the Mercury Experts Conference MEC-1, Glasgow, Scotland, May 2004.
- Senior, C., Fry, A., Cauch, B. (2008). Modeling Mercury Behavior in Coal-Fired Boilers with Halogen Addition, The MEGA Symposium, Baltimore, MD, August 2008.
- Senior, C., Johnson, S. (2008). Impact of Carbon-in-Ash on Mercury Removal across Particulate Control Devices in Coal-Fired Power Plants, *Energy & Fuels*, vol. 19, pp. 859–863, 2005.
- Serre, S., Lee CW, Chu, P., Hastings T. (2008). Evaluation of the Impact of Chlorine on Mercury Oxidation in a Pilot-Scale Coal Combustor – The Effect of Coal Blending, The MEGA Symposium, Baltimore, MD, August 2008.
- Singer, J.G. (1991). Combustion Fossil Power, 1991.
- Sloss, L. (2008). Economics of Mercury Control, Clean Coal Centre, ISBN: 978-92-9029-453-5, January 2008.
- Sloss, L. (2009). Implications of emission legislation for existing coal-fired plants, Clean Coal Centre, ISBN: 978-92-90290464-1, February 2009.
- Sloss, L. (2015). The emerging market for mercury control, IEA, CCC, February 2015.
- Srinivasan, N. and Dene. C. (2013). Bromine Related Corrosion Issues, July 2013. Available at: <http://aepvents.com/files/presentations/2013-general-session-bromine-addition-for-mercury-capturesrinivasan-and-dene-epri-1378922295.pdf>.
- Srivastava, R., Martin, B., Princiotta, F, Staudt, J. (2006). Control of Mercury Emissions from Coal-Fired Electric Utility Boilers, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40, pp. 1385–1392, 2006.

- Srivastava, R.K., Jozewicz, W. (2001). Flue Gas Desulfurization: The State of the Art, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol.51, no.12, pp.1676–1688, 2001.
- Tewalt, S.J., Belkin, H.E., SanFilipo, J.R., Merrill, M.D., Palmer, C.A., Warwick, P.D., Karlsen, A.W., Finkelman, R.B., and Park, A.J., comp., 2010, *Chemical analyses in the World Coal Quality Inventory, version 1: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1196*, <http://pubs.usgs.gov/of/2010/1196/>.
- Timpe, R.C.; Mann, M.D.; Pavlish, J.H. (2001). Organic Sulfur and HAP Removal from Coal Using Hydrothermal Treatment, *Fuel Process. Technol.*, vol. 73, no.2, pp.127–141, 2001.
- Toole-O’Neil, B., Tewalt, S.J., Finkelman, R.B., Akers, R. (1999). Mercury Concentration in Coal-Unraveling the Puzzle, *Fuel*, vol. 78, pp. 47–54, 1999.
- UK Department of Trade and Industry (2000), *Flue Gas Desulphurization (FGD) Technologies, Technology Status Report No.12*.
- UNEP (2008). *The Global Atmospheric Mercury Assessment: Sources, Emissions and Transport*. United Nations Environmental Programme, Chemicals Branch, DTIE, Geneva, Switzerland, December, 2008.
- UNEP (2010). *Process Optimization Guidance Document*, United Nations Environmental Programme, Chemicals Branch, Geneva, Switzerland, January 2011.
- UNEP (2011). *Reducing mercury emissions from coal combustion in the energy sector*. United Nations Environmental Programme, Chemicals Branch, Geneva, Switzerland, February 2011. Available at: http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Mercury/Documents/coal/FINAL%20Chinese_Coal%20Report%200-%2011%20March%202011.pdf.
- UNEP (2013a). *Global mercury assessment 2013: sources, emissions, releases, and environmental transport*. United Nations Environmental Programme, Chemicals Branch, Geneva. Available at: <http://www.unep.org/PDF/PressReleases/GlobalMercuryAssessment2013.pdf>.
- UNEP (2013b). *Reducing mercury emissions from coal combustion in the energy sector of the Russian Federation*. United Nations Environmental Programme, Chemicals Branch, Geneva. Available at: <http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Mercury/Documents/coal/Report%20Demo-Toliatti%20FINAL%20Report%2027%20Nov%202013.pdf>.
- US DOE (2005). Feeley, J. III, Brickett, L.A, O’Palko A., Murphy J.T., *Field Testing of Mercury Control Technologies for Coal-Fired Power Plants*, Mercury R&D Review Meeting, December 2005.
- USEPA (1997). *Mercury Study Report to Congress, Volume I*, Office of Air Quality Planning and Standards and Office of Research and Development, Research Triangle Park, NC, EPA-452/R-97-004b, December 1997.
- USEPA (2001). *Database of information collected in the Electric Utility Steam Generating Unit Mercury Emissions Information Collection Effort*, OMB Control No. 2060–0396, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC, April 2001. Available at: <http://www.epa.gov/ttn/atw/combust/ultox/utoxpg.html>.
- USEPA (2002). *Control of Mercury Emissions from Coal-Fired Electric Utility Boilers: Interim Report Including Errata Dated 3-31-02*, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-01-109, April 2002.
- USEPA (2005). *Multipollutant Emission Control Technology Options for Coal-fired Power Plants*, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-05-034, March 2005.
- USEPA (2006). *Characterization of Mercury-Enriched Coal Combustion Residues from Electric Utilities Using Enhanced Sorbents for Mercury Control*, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-06-008, February 2006.
- USEPA (2008). *Characterization of Coal Combustion Residues from Electric Utilities Using Wet Scrubbers for Multi-Pollutant Control*, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-08-077, July 2008.
- USEPA (2009). *CUECost Workbook Development, Documentation*, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-09-131, September 2009. <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1005ODM.pdf>.

- USEPA (2009a). Characterization of Coal Combustion Residues from Electric Utilities-Leaching and Characterization Data, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-09-151, December 2009.
- USEPA (2010). Documentation for EPA Base Case v.4.10 Using the Integrated Planning Model, EPA 430R10010.
- USEPA (2013). Documentation for EPA Base Case v.5.13 Using the Integrated Planning Model EPA# 450R13002. <http://www.epa.gov/airmarkets/programs/ipm/psmodel.html>.
- USGS (2014). Collaborative Studies for Mercury Characterization in Coal and Coal Combustion Products, Republic of South Africa, U.S. Geological Survey, Eastern Energy Resources Science Center, Reston, VA 20192, USA, January 2014.
- Vassileva, S.V.; Eskenazy, G.M.; Vassileva, C.G. (2000). Contents, modes of occurrence and origin of chlorine and bromine in coal. *Fuel*, vol. 79, pp 903–921.
- Vosteen, B.W., Beyer, J. et al. (2002). Process for Removing Mercury from Flue Gases, Patent Application DE 102 33 173, July 2002.
- Vosteen, B.W., Beyer, J., Bonkhofer, Th.-G., Pohontsch, A., Wieland, A. (2003). Hg-Rückhaltung im reingasseitigen SCR-Katalysatorbett hinter der Rauchgaswäsche einer Sonderabfallverbrennungsanlage, *VGB PowerTech* 4/2003, 76-91. April 2003.
- Vosteen, B. W., Beyer, J., Bonkhofer, Th.-G., Kanefke, R., Ulrich, R. (2003b). Mercury-Related Chemistry in Waste Incineration and Thermal Process Flue Gases, Poster, Air Quality Conference VI, Arlington VA, September 2003.
- Vosteen, B. W., Kanefke, R. (2003c). Bromgestützte Quecksilberabscheidung aus den Abgasen von Verbrennungsanlagen, Studie im Auftrag des Landesumweltamts Nordrhein-Westfalen, Cologne, Germany, December 2003, available at: http://vosteen-consulting.de/sites/Vosteen-Consulting/de_1958.asp.
- Vosteen, B.W., Lindau, L. (2006). Bromine Based Mercury Abatement-Promising Results from Further Full Scale Testing, MEC-3 Conference, Katowice, Poland, June 2006.
- Vosteen, B.W.; Kanefke, R.; Koeser, H. (2006b). Bromine-enhanced Mercury Abatement from Combustion Flue Gases – Recent Industrial Applications and Laboratory Research, *VGB PowerTech* 3/2006, 70-75. March 2006.
- Vosteen, B.W. (2010). Chinese Coals Need Bromine for Co-Benefit Mercury Capture, paper # C2-8 in Proceedings of 13th Electric Utilities Environmental Conference (EUEC), Phoenix, AZ, February 1-3, 2010. Wang Y., Duan Y., Yang L., Jiang Y., Wu C., Wang Q., Yang X. (2008). Comparison of Mercury Removal Characteristic between Fabric Filter and Electrostatic Precipitators of Coal-fired Power Plants, *J Fuel Chem Technol*, vol. 36, no. 1, pp. 23–29, 2008.
- Wang, S., Zhang, L., Wu, Y., Ancora, M., Zhao, Y., Hao, J. (2010). Synergistic Mercury Removal by Conventional Pollutant Control Strategies for Coal-fired Power Plants in China, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 60, no.6, pp. 722–730.
- Wang, S. X., Zhang, L., Li, G. H., Wu, Y., Hao, J. M., Pirrone, N., Sprovieri, F., Ancora, M. P. (2010) Mercury emission and speciation of coal-fired power plants in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(3): 1183–1192.
- WCA (2014). World Coal Association. Available at <http://www.worldcoal.org/coal/what-is-coal/>
- Xu F, Luo Z, Cao W, Wang P, Wei B, Gao X, Fang M, Cen K (2009) Simultaneous oxidation of NO, SO₂ and Hg₀ from flue gas by pulsed corona discharge, *Journal of Environmental Sciences*, 21: 328–332.
- Zhang, L., Wang, S. X., Meng, Y., Hao, J.M. (2012). Influence of Mercury and Chlorine Content of Coal on Mercury Emissions from Coal-Fired Power Plants in China. *Environ. Sci. Technol.*, 46 (11), pp. 6385–6392.
- Zhang, L., Wang, S. X., Wang, F. Y., Yang, H., Wu, Q. R., Hao, J. M. (2013). Mercury transformation and removal in three coal-fired power plants with selective catalytic reduction systems. The 11th International Conference on Mercury as a Global Pollutant, Edinburgh, Scotland, UK, 2013.
- Zhang, L., Wang, S.X., Wang, L., Wu, Y., Duan, L., Wu, Q.R., Wang, F. Y., Yang, M., Yang, H., Hao, J.M, Liu, X. (2015). Updated emission inventories for speciated atmospheric mercury from anthropogenic sources in China. *Environ Sci Technol.*, 49(5):3185-94. doi: 10.1021/es504840m.
- Zhang, L. (2015). Mechanism of mercury transformation and synergistic removal from coal combustion. Postdoctoral Research Report, Beijing, China, 2015.
- Zhuo, Y. (2007). Hg Emission from Six Coal-fired Power Plants in China and Its Implications, Mercury Emission from Coal, The 4th International Experts' Workshop MEC-4, Tokyo, Japan, 13 –15 June 2007.

ZMWG (2015) ZMWG Comments on Guidance on BAT/BEP for Coal-fired power plants and Coal-fired industrial boilers 1 August 2015; http://mercuryconvention.org/Portals/11/documents/BAT-BEP%20draft%20guidance/Submissions/ZMWG_3.pdf

Zykov, A.M., Kolchin, K.I., Tumanovsky, A.G., Jozewicz, W. (2004). Joint Russian-American Project to Enhance Performance of Electrostatic Precipitators Used at Power Plants in the Newly Independent States, The MEGA Symposium, Washington, DC, 2004.

الفصل الخامس

عمليات الصهر والتحميص المستخدمة في إنتاج المعادن غير الحديدية (الرصاص والزنك والنحاس والذهب المنتج صناعياً على النحو المحدد في المرفق دال من الاتفاقية)

المجموعات الفرعية لصهر المعادن غير الحديدية (النحاس والذهب والرصاص والزنك)

أفضل التكنولوجيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية ودراسات الحالات الفردية

موجز

يتمثل الهدف الرئيسي لعملية الصهر في تحويل الفلزات المركزة من حالتها الأصلية إلى معادن نقية؛ وبالتالي، يعتبر الصهر شكلاً من أشكال الميتالورجيا الاستخراجية. وتوجد الفلزات في الطبيعة عادة على هيئة أكسيدات أو كبريتيدات أو كربونات، ويتطلب الصهر حدوث تفاعل كيميائي في وجود عامل مختزل لتحرير الفلز. ويوجد الزئبق بكميات ضئيلة في أغلب المواد المعدنية الخام تقريباً، ويمكن أن تؤدي العملية الحرارية إلى إطلاق هذا الزئبق في الغلاف الجوي.

ويمثل إنتاج المعادن بوجه عام، وإنتاج المعادن غير الحديدية بوجه خاص، مصدراً كبيراً لانبعاثات الزئبق البشرية المنشأ، وتشير التقديرات إلى أنه مسؤول عن حوالي ١٠ في المائة من الانبعاثات العالمية. ويُعترف بأن هذا التقدير ينطوي على قدر كبير من عدم المؤثوقية، وأنه ستلزم بيانات خاصة بكل موقع لإدارة الزئبق على مستوى المنشآت المحلية.

ويقدم هذا الفصل التوجيهات المتعلقة بخيارات ضبط الزئبق الناتج من قطاع المعادن غير الحديدية (وبخاصة النحاس، والزنك والذهب الصناعي، على النحو الوارد في الاتفاقية). والهدف منه أن يوفر للأطراف في اتفاقية ميناماتا المبادئ التوجيهية للتعرف على أفضل التكنولوجيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية، من أجل تمكينها من تلبية التزاماتها بموجب الاتفاقية.

وتقتصر المبادئ التوجيهية على الإشارة إلى الانبعاثات الناجمة عن عمليات الصهر والتحميص المستخدمة في إنتاج المعادن غير الحديدية المشار إليها أعلاه. فالعمليات الأخرى غير الصهر والتحميص، مثل عمليات المعالجة الميتالورجية بالسوائل قد تؤدي أيضاً إلى انبعاثات الزئبق ولكنها غير مدرجة في المرفق دال من الاتفاقية. ولذلك لا ترد معالجة هذه العمليات الأخرى ضمن هذه المبادئ التوجيهية.

وفي العادة ينتج صهر المعادن في قطاع المعادن غير الحديدية كميات لا تذكر من انبعاثات الزئبق، لأن عمليات إعادة التدوير لهذه المعادن تستخدم الخردة المعدنية وكميات خبث المعادن كمواد تلميم أولية. وقد يستثنى من ذلك عمليات الصهر الثانوية للنفائات الإلكترونية ولكن يرجح أن التقنيات المستخدمة لتخفيض الانبعاثات من عمليات الصهر الثانوية لن تختلف اختلافاً كبيراً عن تلك المستخدمة للصهر الأولي.

ويعرض هذا الفصل العمليات المطلوبة في إنتاج المعادن التي تغطيها المبادئ التوجيهية (النحاس والزنك والرصاص والذهب الصناعي). ويشمل أيضاً تقنيات الضبط بما في ذلك التقنيات المصممة خصيصاً لضبط انبعاثات الزئبق، وكذلك تقنيات ضبط الملوثات الأخرى التي قد تصاحبها منافع مشتركة في التقليل من انبعاثات الزئبق. ويقدم فيه وصف للتكنولوجيات الناشئة، والتوجيهات المتعلقة بأفضل التكنولوجيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية. وتقدم أيضاً المعلومات المتعلقة بالرصد التي تخص قطاع المعادن غير الحديدية.

المحتويات

٨٥.....	مقدمة	١-١
٨٥.....	وصف العملية	١-٢
٨٦.....	خطوات التصنيع في إنتاج الرصاص	١-٢-١
٨٦.....	المعالجة الأولية للخام المرکز	١-٢-١-١
٨٧.....	الصهر	١-٢-٢
٨٧.....	التنقية	١-٢-٣
٨٧.....	منشأة تصنيع حمض الكبريتيك	١-٢-٤
٨٩.....	خطوات التصنيع في إنتاج الزنك	٢-٢
٨٩.....	الخلط والتحميص واستعادة الغبار	٢-٢-١
٨٩.....	تنظيف الغاز	٢-٢-٢
٩٠.....	منشأة إنتاج حمض الكبريتيك	٢-٢-٣
٩١.....	النض	٢-٢-٤
٩١.....	خطوات التصنيع في إنتاج النحاس	٣-٢
٩١.....	تجفيف الخام المرکز	٣-٢-١
٩٢.....	التحميص	٣-٢-٢
٩٢.....	الصهر	٣-٢-٣
٩٢.....	التحويل	٣-٢-٤
٩٢.....	التنقية والصب	٣-٢-٥
٩٣.....	تنظيف الخبث	٣-٢-٦
٩٣.....	منشأة تصنيع حمض الكبريتيك	٣-٢-٧
٩٤.....	خطوات التصنيع في إنتاج الذهب	٤-٢
٩٥.....	التحميص	٤-٢-١
٩٥.....	النض	٤-٢-٢
٩٥.....	التحريد وإعادة التشكيل	٤-٢-٣
٩٦.....	التنقية	٤-٢-٤
٩٦.....	الفرن	٤-٢-٥
٩٨.....	تقنيات ضبط الانبعاثات	٣-٣
٩٨.....	عملية بوليدين-نورزينك	٣-٣-١
٩٨.....	الوصف	٣-٣-١-١
١٠٠.....	قابلية التطبيق	٣-٣-١-٢

١٠١	الأداء	٣-١-٣	
١٠١	الآثار الشاملة لعدة أوساط	٤-١-٣	
١٠١	تكاليف التركيب والتشغيل	٥-١-٣	
١٠٢	مرشح السليسيوم	٢-٣	
١٠٢	الوصف	١-٢-٣	
١٠٣	قابلية التطبيق	٢-٢-٣	
١٠٣	مستوى الأداء	٣-٢-٣	
١٠٣	تكاليف التركيب والتشغيل	٤-٢-٣	
١٠٤	الآثار الشاملة لعدة أوساط	٥-٢-٣	
١٠٤	الكربون المنشط	٣-٣	
١٠٤	الوصف	١-٣-٣	
١٠٤	قابلية التطبيق	٢-٣-٣	
١٠٤	مستوى الأداء	٣-٣-٣	
١٠٥	تكاليف التركيب والتشغيل	٤-٣-٣	
١٠٥	المنافع المشتركة	٥-٣-٣	
١٠٥	الآثار الشاملة لعدة أوساط	٦-٣-٣	
١٠٥ ...	عملية مرشح دووا (DOWA) (مرشح من حجر الخفاف مكسو بطبقة من كبريتيد الرصاص (ثنائي التكافؤ))	٤-٣	
١٠٦	عملية جيريت (Jerritt process)	٥-٣	
١٠٦	الوصف	١-٥-٣	
١٠٦	قابلية التطبيق	٢-٥-٣	
١٠٧	الأداء	٣-٥-٣	
١٠٧	الآثار عبر الوسائط	٤-٥-٣	
١٠٧	تكاليف التركيب والتشغيل	٥-٥-٣	
١٠٨	المنافع المشتركة للتكنولوجيات الشائعة الرامية إلى تخفيض تلوث الهواء وتقنيات ضبط الزئبق في منشآت تصنيع الحمض	٦-٣	
١٠٨	تكنولوجيات تخفيض التلوث	١-٦-٣	
١٠٨	الجمع بين تنظيف الغاز ومنشآت تصنيع الحمض	٢-٦-٣	
١١١	أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية		٤-٤
١١١	لمحة عامة عن أفضل التقنيات المتاحة		١-٤
١١٢	بعض الاعتبارات الأخرى في اختيار تقنيات التحكم بالزئبق لعمليات الصهر والتحميص في قطاع المعادن غير الحديدية	١-١-٤	
١١٦	أفضل الممارسات البيئية	٢-٤	
١١٦	نظم الإدارة البيئية	١-٢-٤	

١١٦	٢-٢-٤ مزج المواد الأولية للتحكم في انبعاثات الزئبق	
١١٧	٣-٢-٤ انبعاثات الزئبق إلى الغلاف الجوي	
١١٧	٤-٢-٤ التحكم بالمواد الجسيمية	
١١٨	٥-٢-٤ إدارة النفايات الناتجة عن التحكم بتلوث الهواء والتخلص منها على نحو سليم بيئياً	
١١٩	٥-١-٥ رصد الزئبق في عمليات الصهر والتحميص المستخدمة في إنتاج المعادن غير الحديدية	
١١٩	١-٥ أساليب القياس المباشر	
١١٩	١-١-٥ أخذ العينات بواسطة جهاز الارتظام	
١١٩	٢-١-٥ مصائد المواد الماصة ونظم الرصد القائمة عليها	
١٢٠	٣-١-٥ نظم الرصد المستمرة للانبعاثات	
١٢٠	٢-٥ الأساليب غير المباشرة للقياس	
١٢٠	١-٢-٥ توازن الكتلة	
١٢١	٢-٢-٥ النظم التنبؤية لرصد الانبعاثات	
١٢١	٣-٢-٥ عوامل الانبعاث	
١٢٢	٦-١-٥ المراجع	

يوجد الزئبق كعنصر نزر في أغلب المواد المعدنية الخام تقريباً، ولذلك يحتمل أن تؤدي العمليات الحرارية وغيرها من عمليات الصهر إلى إطلاق الزئبق في الغلاف الجوي. وتهدف عملية الصهر بشكل رئيسي إلى تحويل المعادن من حالتها الأصلية الخام في الركازات إلى معادن نقية، وبالتالي يعتبر الصهر شكلاً من أشكال الميتالورجيا الاستخراجية. وتوجد الفلزات في الطبيعة عادة على هيئة أكسيدات أو كبريتيدات أو كربونات، ويتطلب الصهر حدوث تفاعل كيميائي في وجود عامل مختزل لتحرير الفلز.

يقدم تقرير برنامج الأمم المتحدة للبيئة عن التقييم العالمي للزئبق لعام ٢٠١٣ (AMAP/UNEP 2013) جرداً لانبعاثات العام ٢٠١٠، ورغم أن هذا الجرد الأخير يعتمد على جرد الانبعاثات لعام ٢٠٠٥ الذي قُدّم في تقرير من تقارير البرنامج للعام ٢٠٠٨ (AMAP/UNEP 2008)، ويتشابه معه في المجموع، فهو يتضمن اختلافات لا يستهان بها عنه في عدد من القطاعات الرئيسية. وتظهر البيانات الواردة في كل من قوائم الجرد أن إنتاج المعادن بوجه عام، وإنتاج المعادن غير الحديدية بوجه خاص، يمثل مصدراً كبيراً لانبعاثات الزئبق البشرية المنشأ، وتشير التقديرات إلى أنه مسؤول عن حوالي ١٠ في المائة من الانبعاثات العالمية. ويُعترف بأن هذا التقدير ينطوي على قدر كبير من عدم المؤثوقية، وأنه ستلزم بيانات خاصة بكل موقع لإدارة الزئبق على مستوى المنشآت المحلية.

وتعالج هذه الوثيقة التوجيهية خيارات ضبط الزئبق الناتج من قطاع المعادن غير الحديدية (وبخاصة النحاس، والزنك والذهب الصناعي، على النحو الوارد في الاتفاقية). وتهدف إلى أن توفر للأطراف في اتفاقية ميناماتا التوجيهات المتعلقة بتحديد أفضل التكنولوجيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لتمكينها من الوفاء بالتزاماتها بموجب الاتفاقية.

وتقتصر المبادئ التوجيهية على الإشارة إلى الانبعاثات الناجمة عن عمليات الصهر والتحميص المستخدمة في إنتاج المعادن غير الحديدية المشار إليها أعلاه. فالعمليات الأخرى غير الصهر والتحميص، مثل عمليات المعالجة الميتالورجية بالسوائل قد تؤدي أيضاً إلى انبعاثات الزئبق ولكنها غير مدرجة في المرفق دال من الاتفاقية.

وتنتج عمليات الصهر الثانوية للمعادن كميات لا تذكر من انبعاثات الزئبق لأنها في الواقع عمليات إعادة تدوير للمعادن تستخدم الخردة المعدنية ومواد خبث المعادن كمدخلات. والحالة الوحيدة التي قد تنتج عنها كميات قليلة من إطلاقات الزئبق تحدث خلال إعادة تدوير بطاريات الزنك التي تحتوي على كميات ضئيلة من العنصر. وبالنظر إلى الشروط التي تفرضها المعاهدة على المنتجات (الخاضعة للمراقبة بموجب المادة ٤، مع السماح بمحتوى الزئبق في البطاريات الزئبقية المصنوعة من الزنك وأكسيد الفضة المذكورة في المرفق ألف)، يتوقع أن ينخفض محتوى الزئبق في البطاريات بشكل كبير أيضاً.

وتدعم ذلك البيانات المتاحة فيما يتعلق بانبعاثات الزئبق من المصادر الثانوية. فعلى سبيل المثال، طلبت الوكالة الأمريكية لحماية البيئة إجراء اختبارات لانبعاثات الزئبق من عدة مصاهر ثانوية للرصاص في الولايات المتحدة في عام ٢٠١٠، ووجدت أنه في حوالي ٧٠ في المائة من الحالات، كانت الانبعاثات دون الحد الأدنى الممكن كشفه.

وفي بعض الحالات، قد يسفر الصهر الثانوي للمواد الإلكترونية عن انبعاثات كبيرة من الزئبق. ولكن في مثل هذه الحالات، يستخدم الكربون المنشط عادة لتقليل من الانبعاثات وبالتالي لا تتم معالجة الصهر الثانوي بشكل منفصل في هذه الوثيقة التوجيهية.

٢ - وصف العملية

تعتمد تشكيلة عمليات الصهر والتحميص على ظروف الموقع والخصائص المحددة للخامات أو الخامات المركزة التي يجري تصنيعها، وكثيراً ما ينطوي ذلك على خطوات متعددة. ويورد هذا القسم وصفاً عاماً وموجزاً لعمليات الصهر والتحميص ذات الصلة في قطاعات الرصاص والزنك والنحاس والذهب الصناعي.

والمرحلة الأولى في تصنيع ركازات الرصاص والزنك والنحاس هي إنتاج الخامات المركزة. بعدئذ كثيراً ما تعالج المركبات في البداية باستخدام عمليات درجات الحرارة العالية مثل التحميص أو التليد أو الصهر. ونظراً لارتفاع درجة الحرارة، سيتحول الزئبق إلى بخار ويكون بالتالي موجوداً في غازات العادم.

ومن غازات العادم سيجري امتصاص الزئبق في المواد الجسيمية أو يترسب كمركبات زئبق قابلة للذوبان (مثل كلوريد الزئبق ثنائي التكافؤ) -المسمى أيضاً كلوريد الزئبق ثنائي التكافؤ، كما يمكن أن يوجد أيضاً كزئبق أولي. ويمكن في العادة إزالة الأصناف المؤكسدة من الزئبق باستخدام معدات الشطف (Scrubbers) أو المرشحات الكهروستاتيكية الرطبة. في حين يمكن إزالة الزئبق المرتبط بالجسيمات عن طريق حجرات المرشحات الكيسية (baghouses). ولكن الزئبق النقي يمر من خلال جميع هذه المعدات القياسية المستخدمة لتنظيف الغازات. ولذلك قد تلزم مرحلة ثانية لإزالة الزئبق من أجل تخفيض محتوى الزئبق إلى تركيزات مقبولة إذا كان موجوداً في الركاز. وتقدم الخيارات المتعلقة بذلك في القسم ٣.

ولا يمكن إزالة الزئبق النقي بفعالية من تيار غازي بدرجة حرارة الوسط المحيط عن طريق الشطف بالماء وحده، وذلك لأن قابلية ذوبانه في الماء منخفضة. ويتمثل أحد الاحتمالات في امتصاص الزئبق بواسطة عوامل امتزاز من قبيل الكربون المنشط. وأحد الاحتمالات الأخرى هو أكسدة الزئبق بإحدى الطرق المناسبة، لكي يمكن بعدئذ جمعه في محلول أو على شكل مركب صلب.

وإذا جرى تصنيع المواد الخام الكبريتيدية، سيحتوي الغاز على ثنائي أكسيد الكبريت، الذي يستخدم عادة لإنتاج حمض الكبريتيك. وإنتاج حمض الكبريتيك الملبي للمعايير التجارية، يشترط انخفاض محتوى الحمض من الزئبق وسيتوقف ذلك على الاستخدام النهائي للحمض.

والتقنيات الرامية إلى الحد من انبعاثات الزئبق الناجمة عن الصهر والتحميص في القطاعات غير الحديدية قد تسفر أيضاً عن إنتاج المواد المحتوية على الزئبق. ومن الأمثلة على ذلك الكالوميل (calomel) (كلوريد الزئبق أحادي التكافؤ)، الناتج عن عملية بوليدين-نورزينك (Boliden-Norzink process) (انظر القسم ١٠). ولا تتناول هذه الوثيقة التوجيهية إدارة هذه المواد، ولكنها بموجب المادة ١١ من الاتفاقية ينبغي أن تخزن أو يتم التخلص منها ككفايات على نحو سليم بيئياً.

وقد يوجد الزئبق أيضاً في المياه المستعملة الناتجة عن هذه العمليات، وسيطلب إجراءات مماثلة للتخزين والإدارة. وتجري عادة معالجة مياه الصرف الناتجة عن مناطق مختلفة من المنشآت الصناعية، وذلك لإزالة العناصر الضارة، مثل المعادن الثقيلة، وبقايا الزيوت أو الكميات النزرية من الكواشف الكيميائية. وكثيراً ما يترسب الزئبق كمركب كبريتيد الزئبق الذي لا يذوب بسهولة في الماء ويزال بالسكب والترشيح. ويجري تخزين الحمأة الأخيرة الناتجة عن معالجة مياه الصرف على النحو المناسب ككفايات. أما الحمأة المحتوية على الزئبق فينبغي إدارتها بصورة سليمة بيئياً على نحو متوافق مع المواد الأخرى ذات الصلة من الاتفاقية.

٢-١ خطوات التصنيع في إنتاج الرصاص

تتألف العملية الأساسية لإنتاج الرصاص من ثلاث مراحل رئيسية: المعالجة الأولية للخام المركز؛ والتليد أو الصهر؛ والتنقية. ويظهر الشكل ١ تمثيلاً تخطيطياً للعملية. ويتحرر الزئبق بصورة أساسية أثناء عمليتي التليد والصهر، وينبغي احتجازه (أو التقاطه) لتقليل الانبعاثات الصادرة عن المدخنة النهائية إلى أدنى حد ممكن.

٢-١-١ المعالجة الأولية للخام المركز

في مرحلة المعالجة الأولية للخام المركز، يجري خلط مركبات متنوعة لتركيز الرصاص من أجل تشكيل خليط متجانس يستخدم كمادة أولية لعملية الصهر. وتنتج عملية خلط المادة المركزة محتوى معدنياً أكثر تجانساً في مواد التلقيم الأولية وتقلل من طفرات الشوائب التي قد تسبب اضطرابات في عمليات الإنتاج أو اختلالات بيئية أو مشكلات في جودة المنتج. وخلال الخلط، يمكن إضافة مواد خام أخرى، مثل العوامل الصهورة أو المواد الجسيمية المستردة من المراحل النهائية بواسطة أجهزة ضبط التلوث. واعتماداً على متطلبات العملية، يمكن تخفيف مُركّزات الرصاص المخلوطة لتخفيض محتواها من الرطوبة. ويمكن أن تُطلق بعض انبعاثات الزئبق أثناء التخفيف، إما كزئبق في الحالة الغازية أو كمواد جسيمية.

٢-١-٢ الصهر

توجد عمليتان رئيسيتان لصهر مركّزات الرصاص. وتتألف العملية التقليدية من تلييد مركّزات الرصاص المخلوطة أولاً لإزالة الكبريت والحصول على أكسيد الرصاص. ويجري بعد ذلك تلقيم أكسيد الرصاص الناتج بالتلييد إلى فرن الصهر العالي، حيث يجري اختزاله باستخدام فحم الكوك إلى سبائك من الرصاص.

والعملية الثانية، الأحدث تطوراً، هي الصهر المباشر لمركّزات الرصاص (وتعرف أيضاً بالصهر السريع). وفي الصهر المباشر، تتم عمليتا أكسدة الرصاص واختزاله داخل فرن واحد. وتؤدي الحرارة المنطلقة من أكسدة الكبريت الموجود في المركّز إلى انطلاق تفاعل الاختزال اللاحق الذي ينتج السبائك باستخدام الفحم. وبالمقارنة مع عملية صهر الخام الناتج عن التلييد في الفرن العالي، تستخدم عملية الصهر المباشر طاقة أقل، وتولد انبعاثات منخفضة في الهواء نتيجة لإحكام إغلاقها واحتجاز الغازات المنبعثة على نحو أفضل.

وتحتوي الغازات المنبعثة من عمليات التلييد أو الصهر المباشر على المواد الجسيمية، وثنائي أكسيد الكبريت، والزئبق وغير ذلك من الشوائب. ويجب أن تخضع الغازات المنبعثة لعملية تنظيف الغاز قبل إنتاج حمض الكبريتيك.

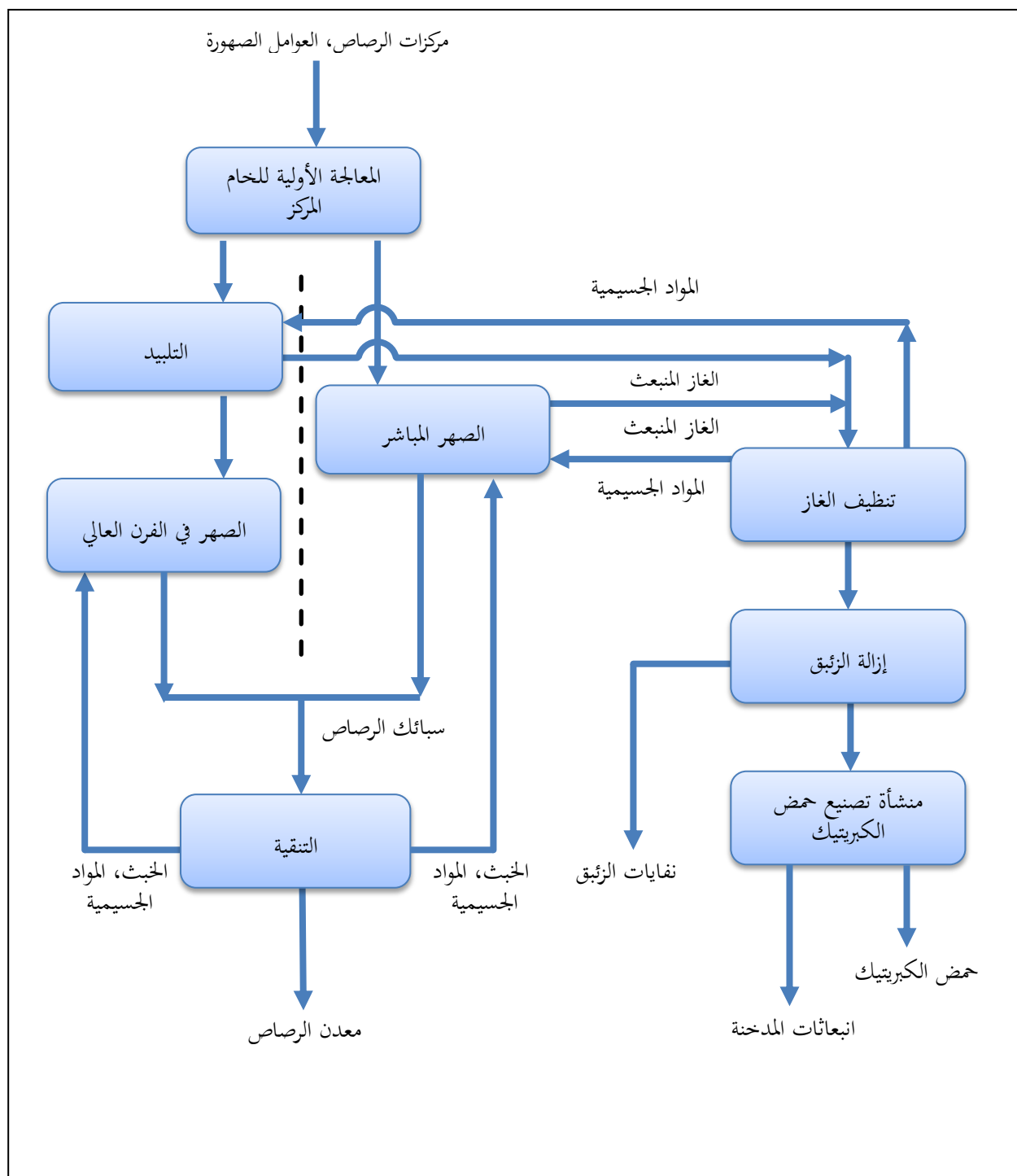
٢-١-٣ التنقية

تجري تنقية سبائك الرصاص من خلال عدة مراحل من المعالجة الميثلورجية الحرارية لإزالة المعادن والشوائب الأخرى. وخلال مرحلة فصل النفايات، يجري تبريد سبائك الرصاص في حوض غلي حتى يتكون الخبث على السطح. ويكشط بعدئذ الخبث الذي يحتوي على أكسيد الرصاص وفلزات أخرى، ويؤخذ لمعالجته في مكان آخر لاسترداد المعادن الأخرى. وتخضع سبائك الرصاص إلى عمليات تنقية أخرى بإضافة عدد من المواد الكاشفة خلال مراحل مختلفة لإزالة شوائب معدنية معينة. ويمكن بعدئذ صب الناتج النهائي من الرصاص النقي في أشكال معينة أو خلطه مع معادن أخرى لإنتاج السبائك المعدنية. ويمكن بدلاً من ذلك أيضاً تنفيذ عملية التنقية باستخدام تقنية التنقية الكهربائية التي تنتج أقطاباً مهبطية (كاثود) من الرصاص. ولا يتوقع حدوث انبعاثات كبيرة من الزئبق أثناء مرحلة التنقية.

٢-١-٤ منشأة تصنيع حمض الكبريتيك

تتم معالجة الغازات المنبعثة من منشآت الصهر أو التلييد لإزالة المواد الجسيمية ومعظم المعادن، بما في ذلك الزئبق، وتجري هذه المعالجة باستخدام أجهزة تنظيف الغازات مثل معدات الشطف والمرسبات الكهروستاتيكية. فإذا ظل الغاز يحتوي على كميات كبيرة من الزئبق، فهو يخضع بعد ذلك لمرحلة إزالة الزئبق، حيث يزال العنصر كنفائيات. وينبغي أن تكون إدارة المواد المحتوية على الزئبق، بما في ذلك تخزينها والتخلص منها، والتجارة فيها، متسقة مع المواد الأخرى ذات الصلة في الاتفاقية.

وبعد إزالة الزئبق، يحتوي الغاز على تركيز عالٍ من ثنائي أكسيد الكبريت، الذي يجري تحويله عادة إلى حمض الكبريتيك في منشأة تصنيع الحمض. وأي كمية باقية من الزئبق ستظل موجودة في الحمض. ولكن تركيز الزئبق في النوعيات التجارية يحدد في العادة بـ 100 جزء من الزئبق لكل مليون جزء من الحمض، ولذلك تكون الإزالة الفعالة للزئبق مطلوبة قبل منشأة تصنيع الحمض. ومن المتوقع أن تحتوي الانبعاثات الصادرة من المدخنة النهائية على تركيزات نزرة من الزئبق.



الشكل ١ - العمليات التي ينطوي عليها الإنتاج الأساسي للرصاص

٢-٢ خطوات التصنيع في إنتاج الزنك

تتألف العملية الأساسية لإنتاج الزنك من خمس مراحل رئيسية: خلط الخام المرَكَّز؛ والتحميص أو التليد والصهر؛ والنض والتنقية؛ والتحليل الكهربائي لاستخلاص المعدن؛ والتذويب والسبك. ويبين الشكل ٢ تمثيلاً تخطيطياً للعمليات. ويتحرر الزئبق أساساً أثناء عملية التحميص ويجب احتجازه للتقليل إلى أدنى حد ممكن من انبعاثات الزئبق من المدخنة النهائية.

١-٢-٢ الخلط والتحميص واستعادة الغبار

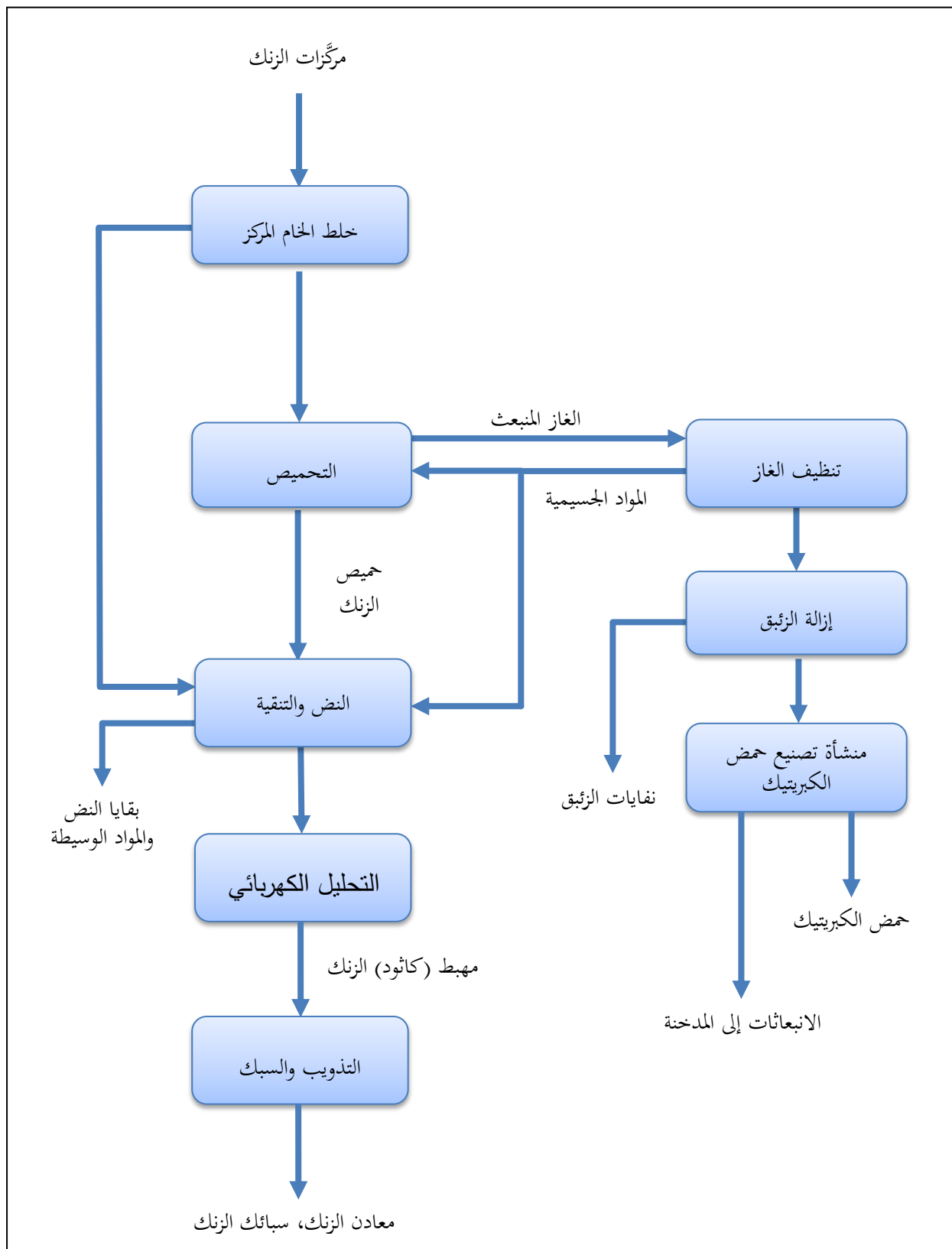
ويبين الشكل ٢ تمثيلاً تخطيطياً لخطوات عمليات إنتاج الزنك. وللأغراض التجارية واللوجستية تقوم كل منشأة من منشآت استخلاص وتنقية الزنك بشراء مرَكَّزات الخام من عدة جهات تعدين مختلفة. ويختلف محتوى الزئبق من كل منجم منفرد بين ١ و ٢٠٠ جزء في المليون، ولكن نطاق المحتوى قد يرتفع إلى نحو ١٠٠٠ جزء في المليون. وأساس العمليات السلسلة، المدارة بيئياً والتي تتسم بالفعالية هو كفاءة إدخال جميع الشوائب، بما في ذلك الزئبق، في عمليات الزنك بمعدلات خاضعة للمراقبة. والخلط هو إحدى العمليات الراسخة لتجهيز المدخلات وتهدف إلى خلط المرَكَّزات ذات النوعيات المختلفة. وتحول هذه العملية دون حدوث زيادات كبيرة وغير متوقعة في الشوائب، مما قد يسبب اضطرابات في العمليات أو اختلالات بيئية أو قد يؤدي إلى مشاكل في نوعية الإنتاج.

يجري تحميص مرَكَّزات الزنك بحقنها في فرن صهر ذي قاعدة مُمَيَّعة (fluidized bed furnace) عند نقطة حرارة ٩٥٠ درجة مئوية، حيث تتحول الكبريتيدات (بالتحميص) إلى أكسيدات وغاز ثنائي أكسيد الكبريت (SO_2). ولتجنب انتشار الانبعاثات، يتم تشغيل الفرن تحت ضغط سلبي. وعملياً تتبخر جميع مركبات الزئبق الموجودة في المرَكَّزات في هذا الفرن. ويسترد الغبار، الذي يعرف أيضاً باسم المواد الجسيمية، من تيار الغاز. ويذهب هذا الغبار إلى قسم النض، مع أكسيدات الزنك الناتجة عن التحميص. ويتدفق الغاز متجهاً إلى مرحلة تنظيف الغاز.

وبالمقابل، في عملية الصهر بالفرن العالي (Imperial Smelting)، يجري أولاً تليد مرَكَّزات الزنك أو مركبات الكتل المعدنية الأخرى التي تحتوي على الزنك والرصاص، ثم يتم صهرها في فرن عال (Morgan 1968).

٢-٢-٢ تنظيف الغاز

في عملية تنظيف الغاز بالسوائل تجري إزالة آخر آثار الغبار باستخدام أجهزة إزالة المواد الجسيمية مثل معدات الشطف والمرسبات الكهروستاتيكية. وتحتوي مياه الصرف الناتجة عن هذا التنظيف للغاز على الزئبق وغيره من المعادن الثقيلة، وتجري معالجتها في منشأة لمعالجة المياه المستعملة أو تحقن في فرن تحميص لجمع أكبر قدر من الزئبق منها عن طريق عملية مخصصة لإزالة الزئبق. وفيما يلي وصف لأنواع المختلفة من عمليات إزالة الزئبق. وتعمل هذه الوحدات لإزالة الزئبق على تخفيض تركيز الزئبق إلى مستويات منخفضة. وينتج عن عملية إزالة الزئبق على هذا النحو الزئبق المركز. ونحو ٥٠ إلى ٩٠ في المائة من إجمالي مدخلات الزئبق ينتهي بها المطاف في هذا المركز.



الشكل ٢- العمليات التي ينطوي عليها الإنتاج الأساسي للزنك

٣-٢-٢ منشأة إنتاج حمض الكبريتيك

بعد إزالة الزئبق يجري تحويل ثنائي أكسيد الكبريت إلى حمض الكبريتيك. وسيحتبس في الحمض نحو ٩٠ في المائة من الزئبق المتبقي في تيار الغاز. ومن أجل الامتثال للنوعيات التجارية من حمض الكبريتيك، ينبغي أن يكون تركيز الزئبق في الحمض أقل

من جزء واحد في المليون. وأقل من ٢ في المائة من إجمالي مدخلات الزئبق ينتهي بها المطاف في الحمض. وعند العمل بالضوابط تكون انبعاثات الزئبق من المداخن عادة أقل من ٠,١ جزءاً في المليون أو أقل من ١٠٠ ميكروغرام/متر مكعب في الظروف الطبيعية، وهو ما يمثل أقل من ٠,٢٥ في المائة من مدخلات الزئبق.

٢-٢-٤ النض

في خطوة النض يجري تذيب مركّز أكسيد الزنك، (المعروف باسم "حميص الزنك" (zinc calcine))، في الحمض. وتتم تنقية المحلول بالتثبيت في غبار معدن الزنك (مسحوق) الذي لا يحتوي على الزئبق ثم يرسل إلى منشأة للتحليل الكهربائي لاستعادة معدن الزنك. وتتم استعادة المعادن الأخرى - مثل النحاس والكاديوم والرصاص والفضة والكوبالت والنيكل - في أجزاء منفصلة وتجري تنقيتها بعد ذلك في منشآت أخرى. والبقايا النهائية لعملية النض، ستحتوي أساساً على الحديد على هيئة الجاروسيت والغيوثايت، وكبريتات الرصاص وسيليكات الرصاص، وستتطلب الإدارة على نحو يتسق مع المواد ذات الصلة من الانفاقية. وفي كثير من الأحيان يعاد تدوير البقايا الناتجة عن النض، التي قد تحتوي على بعض الزئبق، في عملية صهر الرصاص. وقد تنطوي عملية النض أيضاً على تقييم مباشر لمعادن غير محمصة تحتوي على الزئبق. وفي العادة تشكل مدخلات مُركّزات المعادن غير المحمصة نحو ١٠ في المائة من مجموعة مدخلات المُركّزات إلى عملية النض، ولكن هذه النسبة قد تزداد إلى ٥٠ في المائة عند تطبيق النض المباشر. وينتهي الزئبق الموجود في هذه المُركّزات غير المحمصة في بقايا النض، ككبريتيد زئبق غير قابل للانحلال تقريباً. ونظراً لعدم ذوبان الزئبق، لا توجد انبعاثات في الهواء من عملية النض. وتبعاً لكمية المُركّزات غير المحمصة التي توجد في هذه المرحلة من التصنيع، سينتهي المطاف بنحو ٥ إلى ٥٠ في المائة من مدخلات الزئبق في مخلفات النض.

٢-٣ خطوات التصنيع في إنتاج النحاس

يمكن إنتاج النحاس الأولي بعمليات المعالجة المي탈ورجية الحرارية أو المعالجة المي탈ورجية بالسوائل. وتنتج قرابة ٢٠ إلى ٢٥ في المائة من النحاس الأولي بتقنيات المعالجة المي탈ورجية بالسوائل مثل نض الركازات المكونة من أصناف الأكسيد. وتستخدم الأنواع المتبقية لتصنيع النحاس العمليات المي탈ورجية الحرارية. وبالنظر إلى أن العمليات المي탈ورجية التي تستخدم السوائل لا تنطوي على صهر أو تحميص، فهي غير مشمولة بالمرفق دال من اتفاقية ميناماتا، وهي بالتالي خارج نطاق هذه الوثيقة التوجيهية.

وتكون ركازات النحاس التي تتطلب المعالجة بالعمليات المي탈ورجية الحرارية محتوية على الكبريتيدات. وعند استخدام العملية المي탈ورجية الحرارية، سيتحرر الزئبق الموجود في الخام المركز وذلك أساساً خلال عملية صهر الخام المركز وتحويل الخليط المتلد، ليخرج مع الغاز الناتج عن التصنيع. وتبعاً لدرجات حرارة أجهزة التحفيف المستخدمة، يمكن أن ينبعث الزئبق أيضاً أثناء عملية التحفيف في المنشآت التي تستخدم محففات الخامات المركزة.

يبين الشكل ٣ عرضاً تخطيطياً لعدة عمليات مي탈ورجية حرارية متوازنة في إنتاج النحاس:

- التحميص والصهر والتحويل
- الصهر والتحويل
- الصهر إلى النحاس مباشرة

٢-٣-١ تجفيف الخام المركز

تبدأ العملية المي탈ورجية الحرارية بخلط الخامات المركزة والمواد الصهورة لإنتاج مادة تليق أولية مستقرة ومتجانسة، ولا سيما عند معالجة مُركّزات مختلفة تحتوي على تركيزات مختلفة من النحاس أو الشوائب. وبالنسبة لأوعية الصهر السريع، تخضع المُركّزات لعملية تجفيف لتخفيف محتواها من الرطوبة. وفي هذه المرحلة يتم تجفيف الخام المُركّز إلى نسبة ٠,٢ في المائة من الرطوبة،

وتستخدم لذلك عادة المجففات الدوارة أو ذات الملفات المتعددة، أو ذات القاعدة المميّعة، بحيث تعمل هذه المجففات على رفع درجة حرارة خروج المركّزات إلى نطاق يتراوح بين ١٠٠ و ٢٠٠ درجة مئوية. وبعدئذ يرسل الخام المركز إلى وعاء الصهر ويزال الغبار من الغاز المستخدم في عملية التحفيف في حجرات المرشحات الكيسية أو في المرسبات الكهروستاتيكية وبالنسبة للمرافق التي تستخدم تقنيات إيزاسميت (IsaSmelt) أو التكنولوجيات المماثلة، لا يجري تحفيف خليط الخام المركز قبل أخذه إلى وعاء الصهر لتحويله إلى خليط منصهر من المعدن المتبلد والخبث.

٢-٣-٢ التحميص

لا يزال من الممكن استخدام بعض التقنيات القديمة التي يتم فيها تحميص المركّزات قبل صهرها. وفي المرافق التي تجري فيها هذه العمليات، يتم أولاً تحميص المركّزات المخلوطة لتحويل كبريتيدات النحاس إلى أكسيدات قبل معالجتها في المنصهر. والغاز المستخدم في عملية التحميص، الذي يحتوي على ثنائي أكسيد الكبريت والقليل من الزئبق، تتم معالجته باستخدام معدات الشطف والمرسبات الكهروستاتيكية لإزالة المواد الجسيمية. ويرسل الغاز بعدئذ إلى منشأة تصنيع الحمض.

٢-٣-٣ الصهر

بمجرد تحفيف خليط المركّزات والمواد الصهورة، يتم صهره لتكوين الخام المتبلد (أو لتحويله في حالات قليلة إلى النحاس المنقّط)، ويتم ذلك عادة في فرن صهر وفي وسط مغدّى بالأكسجين. وتوجد عدة أنواع لعمليات صهر النحاس، وتشمل الصهر السريع والصهر في حوض من الخام المتبلد المنصهر. وإحدى العمليات الأخرى غير المبينة في الشكل ٣، تنطوي على مرحلة صهر وتحويل مستمرة بواسطة أفران متعددة، وينتج عنها النحاس المنقّط.

وبوجه خاص يشيع استخدام الصهر السريع على نطاق واسع، لأنه تقنية تتسم بالكفاءة، فالحرارة المنطلقة من أكسدة الكبريتيدات المعدنية تدفع عملية الصهر. وبالإضافة إلى إنتاج الخليط المتبلد (أو النحاس المنقّط في حالات أقل)، ينتج الخبث عن عملية الصهر. وتعمل أفران الصهر ضمن نطاق درجات الحرارة ١٢٣٠-١٢٥٠ درجة مئوية. وتؤدي هذه الحرارة إلى التطاير الكامل للزئبق الأولي ومركبات كبريتيد الزئبق. ويحتجز الغاز الناتج عن هذه العملية ويرسل إلى نظام تنظيف الغاز.

٢-٣-٤ التحويل

بالنسبة لعمليات الصهر التي تنتج خليط النحاس المتبلد، ينقل الخليط المتبلد بعد ذلك إلى المرحلة التالية: تحويل الخليط المتبلد أو سبيكة خليط النحاس (التي تنتج من تنظيف ما هو معروف بـ "المباشر إلى المنقّط") إلى النحاس المنقّط. ومن النواتج الفرعية لهذه العملية إنتاج خبث التحويل، الذي تعاد معالجته لاسترداد النحاس في فرن لتنظيف الخبث أو يعاد إلى فرن الصهر. ويخضع الغاز المتولد من أجهزة التحويل إلى عملية لإزالة المواد الجزئية، ثم يخلط في النهاية مع الغازات المتولدة من فرن الصهر قبل أن يدخل نظام تنظيف الغاز الخاص بمنشأة حمض الكبريتيك.

٢-٣-٥ التنقية والصب

تجري بعد ذلك تنقية النحاس المنقّط في أفران الأنود (anode furnaces)، وتتم هذه العملية في المقام الأول للتخلص من الأكسجين والكبريت والملوثات النزرة. وتجري معالجة غازات عمليات أفران الأنود بواسطة أجهزة الشطف الرطب ثم تنظيفها بعد ذلك بالمرسبات الكهروستاتيكية الرطبة أو في حجرات المرشحات الكيسية. ويجري صب النحاس بعد ذلك على شكل أقطاب الأنود الموجبة. والمرحلة النهائية من إنتاج النحاس هي التنقية الكهربائية لأقطاب الأنود وتحويلها إلى أقطاب كاثود سالبة تكون نسبة النحاس فيها أكثر من ٩٩,٩٩٥ في المائة.

٢-٣-٦ تنظيف الخبث

يمكن معالجة الخبث المنصهر الذي ينتج عن أفران الصهر وأجهزة التحويل في فرن للتنظيف الكهربائي للخبث، وذلك لاسترداد النحاس والمعادن الثمينة الأخرى الموجودة في الخبث. وهذا يسفر عن إنتاج خليط معدني متبلد عالي النوعية من أجل نقله إلى أجهزة التحويل. وقد يتحول الخبث النهائي إلى حبيبات مع الماء. ويرسل الخبث إما للتخلص منه أو يستخدم كمادة من مواد الركام.

وفي العمليات التي تنفذ الصهر المباشر إلى النحاس المنقّط، يمكن أن ينتج تنظيف الخبث سبائك من خليط النحاس، وترسل هذه بعد ذلك إلى المصهر لكي تعاد معالجتها في أجهزة التحويل.

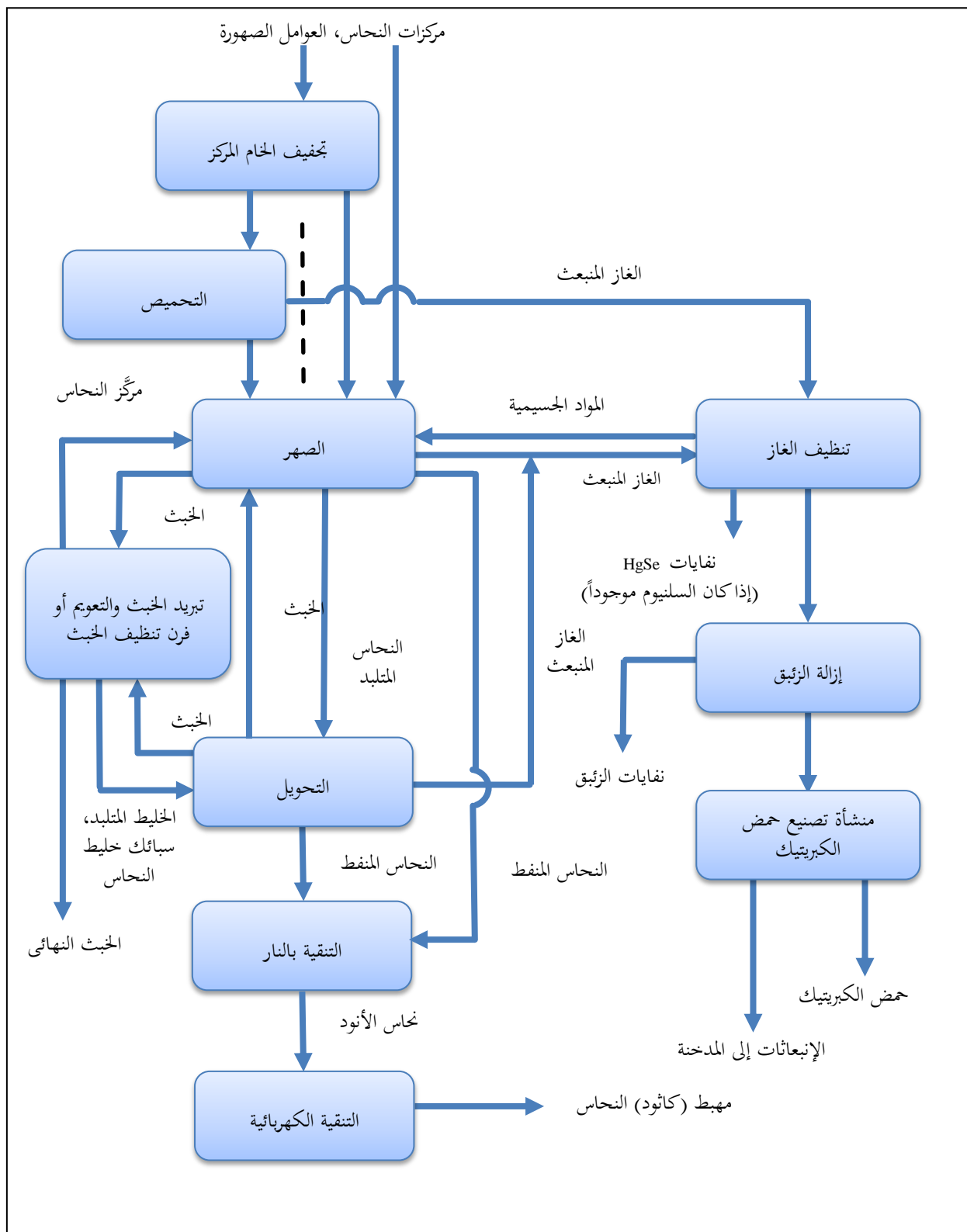
وكبدل لعملية المعالجة في فرن لتنظيف الخبث، يمكن أن يتم تنظيف الخبث باستخدام تقنيات للمعالجة المعدنية. فبعد انخفاض درجة حرارة الخبث ببطء، يتم سحقه وطحنه ومعالجته بالتعويم. وينتج هذا خاماً مركزاً يحتوي على النحاس، يعاد بعد ذلك إلى المصهر.

٢-٣-٧ منشأة تصنيع حمض الكبريتيك

توجه غازات عمليتي الصهر والتحويل إلى قسم تنظيف الغاز في منشأة تصنيع حمض الكبريتيك. ويجري أولاً تبريد الغاز الناجم عن العمليات ومعالجته لإزالة المواد الجسيمية والمعادن وبخار الحمض باستخدام أجهزة تنظيف الغاز مثل أجهزة الشطف والمرسبات الكهروستاتيكية الرطبة. وأثناء تنظيف الغاز، يتم تخفيض درجة حرارته إلى نطاق يتراوح بين ٣٥ و ٤٠ درجة مئوية. وفي هذه المرحلة يزال معظم الزئبق القادم من المصهر عن طريق الآليات الثلاث التالية:

- ويتفاعل جزء من الزئبق لتكوين كبريتات الزئبق الصلبة، التي تزال من الحمأة.
- ويجري تكثيف الزئبق النقي بالإخماد والتبريد السريع في أجهزة الشطف، ويكسد في أبراج للتبريد.
- ويتحرر السليوم الموجود في مركّزات النحاس أثناء عمليات الصهر والتحويل، ويكون موجوداً بعدئذ في غاز عملية الصهر كأكسيد السليوم. وينحل أكسيد السليوم في محلول الشطف الحمضي الضعيف ويختزل في الحال بواسطة ثنائي أكسيد الكبريت ليشكل السليوم الأحمر، الذي يتفاعل بدوره مع الزئبق النقي لتشكيل سلفيد الزئبق (HgSe). وسلفيد الزئبق هو مركب قابليته منخفضة للغاية للذوبان في الماء، ومستقر في الأوساط الحمضية.

وفي أعقاب تنظيف الغاز، قد تلزم تكنولوجيا محددة لإزالة الزئبق، قبل إنتاج الحمض، وذلك لإزالة الزئبق المتبقي في غاز العمليات من أجل تلبية المعايير التجارية. ومن المتوقع أن تحتوي الانبعاثات الصادرة من المدخنة النهائية على تركيزات نزره من الزئبق. وينبغي أن تتم إدارة المخلفات والحمأة الناتجة عن عمليات تنظيف الغاز أو إزالة الزئبق، بما في ذلك تخزينها والتخلص منها، والتجارة فيها، على نحو متسق مع المواد الأخرى ذات الصلة في الاتفاقية.



الشكل ٣- العمليات التي ينطوي عليها الإنتاج الأساسي للنحاس

٢-٤ خطوات التصنيع في إنتاج الذهب

تتطلب بعض ركازات الذهب معالجة أولية قبل عملية النض، في حين يمكن إخضاع الركازات الأخرى مباشرة لعملية النض. وسيركز هذا القسم على تلك الركازات التي تتطلب التحميص كمعالجة أولية سابقة للنض، بالنظر إلى أن المرفق دال من اتفاقية ميناماتا يغطي التحميص. ويبين الشكل ٤ لمحة عامة عن العمليات التي ينطوي عليها التصنيع.

٢-٤-١ التحميص

يجري تلقيم ركاز الذهب المطحون في جهاز التحميص، ويحتوي الركاز عادة على نسبة زئبق تتراوح بين صفر و ١٠٠ جزء في المليون. وتعمل أجهزة التحميص عادة في نطاق درجات حرارة ٥٠٠ - ٦٠٠ درجة مئوية، حيث تستخدم الحرارة في أكسدة الكبريت والكربون الموجودين في الركاز، وبالتالي يمكن نض الذهب واسترداده. وتؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى تطاير الزئبق الموجود في الركاز. وتتم معالجة الغازات الناتجة عن عملية التحميص بخطوات متعددة، بعضها ينفذ لضبط الملوثات المرافقة، وتعالج أيضاً بعمليات في وحدات معينة تطبق قدر الإمكان لتقليل انبعاثات الزئبق إلى أدنى حد ممكن. ويرد وصف هذه الضوابط بمزيد من التفصيل في دراسة الحالة المقدمة بشكل منفصل. ويتوقع أن تكون نسبة إجمالي الزئبق المزال من الغازات المنبعثة أكبر من ٩٩ في المائة بناءً على عمليات تركيب تجهيزات ضوابط مماثلة في العمليات التجارية القائمة.

٢-٤-٢ النض

يضاف الماء إلى مخرجات جهاز التحميص في حوض رجّاح يجري فيه خلط الماء والمواد الصلبة الناتجة عن جهاز التحميص، لتكوين الملاط. ويرسل هذا الملاط إلى سلسلة من الأحواض يجري فيها نض الذهب منه - بواسطة حلقة الكربون في حوض النض - باستخدام السيانيد. وبمجرد ذوبانها، يجري امتصاص مركبات الذهب والزئبق على الكربون المنشط. وتتم معالجة الملاط النهائي، بعد أن يستنفد منه الذهب والزئبق، بعملية معادلة وإزالة سمية، ثم يرسل كنفائيات إلى مرفق تجميع المخلفات. أما الزئبق القابل للانحلال في السيانيد الذي يتبقى في مخلفات محلول النض فستكون مساهمته ضئيلة في زئبق الغلاف الجوي، وذلك بسبب انخفاض ضغط بخار المركب المكون من السيانيد والزئبق.

٢-٤-٣ التجريد وإعادة التشكيل

يغسل الكربون المحلّل الناتج عن حلقة الكربون في حوض النض ثم ينقل إلى حوض يتم فيه تجريد الذهب والزئبق عن الكربون ويعادان إلى المحلول. وينتج عن هذا محلول ترتفع نسبة محتواه من الذهب، ويمكن استخلاص الذهب منه بالتحليل الكهربائي أو الترسيب على النحو المبين أدناه. وبعد إزالة الذهب من الكربون (التجريد)، يرسل الكربون إلى فرن حراري لإعادة تشكيله حرارياً ويعاد تدويره مرة أخرى إلى مرحلة النض.

ويبقى بعض الزئبق الذي تم امتصاصه في الكربون بعد تجريده. والفرن الحراري المستخدم لإعادة تشكيل الكربون عبارة عن وعاء مغلق يسخن الكربون إلى درجات حرارة أعلى من ٧٠٠ درجة مئوية، فيجفف بذلك الكربون ويزيل ما تبقى من الزئبق الممتص بتحويله إلى شكل غازي. ولا يحتوي الوعاء على الأكسجين، الأمر الذي يسمح بتجفيف الكربون دون أكسدته أو إحراقه. ويجري طرد الغاز ثم تبريده؛ ويتكثف بذلك الزئبق النقي ويجمع في دوارق صناعية محكمة الإغلاق. وينبغي أن تكون إدارة المواد المحتوية على الزئبق، بما في ذلك تخزينها والتخلص منها، والتجارة فيها، متسقة مع المواد الأخرى ذات الصلة في الاتفاقية.

أما الزئبق الغازي المتبقي فيمر عبر وعاء يحتوي على كربون منشط مشرب بالكبريت. فيرتبط الزئبق في الغاز كيميائياً مع الكبريت ليشكل مركب الزئبق المستقر (cinnabar) (كبريتيد الزئبق (ثنائي التكافؤ)).

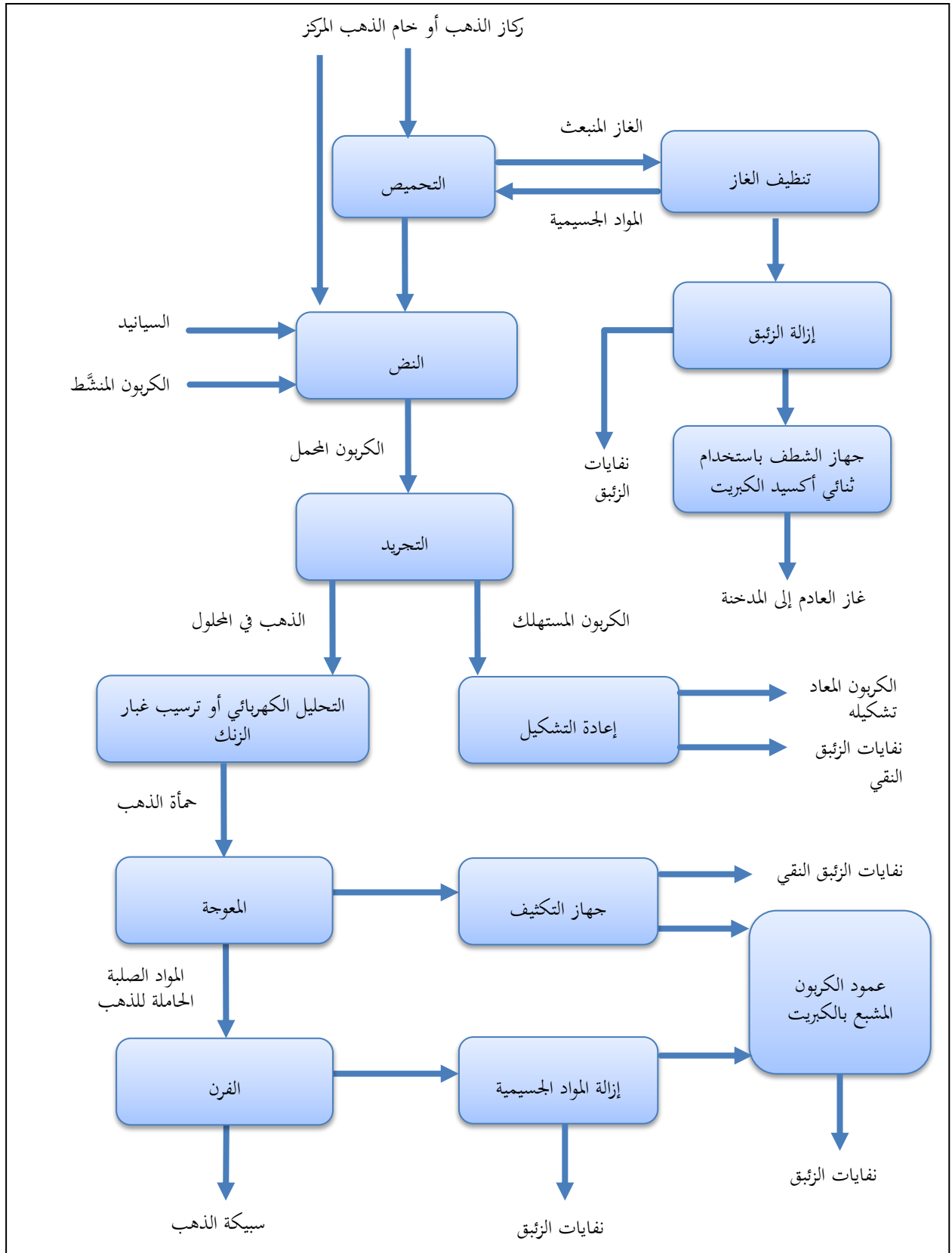
وينتظر أن تكون نسبة إجمالي الزئبق المزال من الفرن الحراري لإعادة تشكيل الكربون أكبر من ٩٩ في المائة بناءً على التجارب المستفاد من الضوابط المماثلة في العمليات التجارية القائمة. وعلى الرغم من أن أفران إعادة تشكيل الكربون تتجاوز نطاق المرفق دال من اتفاقية ميناماتا، فمن المهم الإشارة إلى أنها قد تمثل مصدراً هاماً لانبعاثات الزئبق، في الحالات التي لا يتم فيها ضبط هذه الانبعاثات.

٢-٤-٤ التنقية

تتم بعد ذلك تنقية حمأة الذهب الناجمة عن التحليل الكهربائي أو الترسيب باستخدام غبار الزنك، ومعالجتها في وعاء معوجة. وتسخن الحمأة في المعوجة إلى درجة حرارة أعلى من ٦٠٠ درجة مئوية، لتجفيف المواد الصلبة، ويزال الزئبق من منفذ للغاز. ويجري الغاز عبر المنافذ إلى معدات معالجة الغاز لإزالة الزئبق منه، ثم ترسل المواد الحاملة للذهب إلى فرن للتنقية. وفي البداية يُبرّد غاز المعوجة ويكثف، ويجمع الزئبق منه بحالته العنصرية. أما ما تبقى من الزئبق الذي لم يتكثف فيمر عبر وعاء يحتوي على كربون منشط مشرب بالكبريت. فيرتبط الزئبق في الغاز كيميائياً مع الكبريت ليشكل مركب الزئبق المستقر. ومنتظر أن تكون نسبة إجمالي الزئبق المزال من غازات المعوجة أكبر من ٩٩ في المائة بناءً على عمليات تجهيز ضوابط مماثلة في إحدى المنشآت العاملة حالياً.

٢-٤-٥ الفرن

يستخدم الفرن لتسخين المواد الصلبة المجففة الحاملة للذهب التي تنتج من المعوجات إلى درجة حرارة أعلى من درجة انصهار جميع المكونات في الشحنة، من أجل تحقيق الفصل النهائي للذهب عن جميع الشوائب. والغاز المنطلق من المنفذ يمر أولاً من خلال المرشحات الكيسية لإزالة المواد الجسيمية، بما في ذلك الزئبق المرتبط بالجسيمات. ويمرّز غاز المنفذ بعد ذلك من خلال وعاء يحتوي على الكربون المنشط المشرب بالكبريت، حيث يرتبط الزئبق كيميائياً مع الكبريت ليشكل مركب الزئبق المستقر. ومنتظر أن تكون نسبة إجمالي الزئبق المزال من الغازات المنبعثة من منفذ الفرن أكبر من ٩٩ في المائة بناءً على عمليات تجهيز ضوابط مماثلة في منشآت عاملة أخرى. وينبغي التخلص من النفايات المحتوية على الزئبق بطريقة سليمة بيئياً. ولأغراض التوضيح، تجدر الإشارة إلى أن الانبعاثات من الفرن غير مشمولة ضمن المرفق دال من اتفاقية ميناماتا. وعلاوة على ذلك، لا يحتتمل أن تشكل الأفران إلا مصدراً ضئيلاً من مصادر انبعاثات الزئبق.



الشكل ٤ . العمليات التي ينطوي عليها الإنتاج الأساسي للذهب

٣- تقنيات ضبط الانبعاثات

توصف في الأقسام التالية التقنيات الرئيسية المستخدمة لتخفيف انبعاثات الزئبق في الهواء، والمتصلة بعمليات التحميص والصهر والتنقية المستخدمة في قطاع المعادن غير الحديدية. وتعتمد هذه التقنيات بوجه عام، على أحد أشكال أكسدة الزئبق وعلى التفاعلات مع مواد مثل كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ). ولا تشمل هذه القائمة التقنيات المعترف بها لتقليل انبعاثات الزئبق في الهواء بفضل المنافع المشتركة لاحتجاز الملوثات الأخرى- مثل مركبات الكربون العضوية أو غيرها من المواد الجسيمية. ويقدم أيضاً قسم شامل يتعلق بتقنيات ضبط الملوثات المتعددة التي تقدم منافع مشتركة بالنسبة لاحتجاز انبعاثات الزئبق.

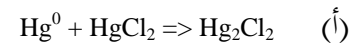
ويتطير الزئبق في درجات الحرارة السائدة في معظم عمليات تخفيف الانبعاثات، ولذلك تلزم تقنيات خاصة بالقطاع لإزالته. وفي حالة إزالة الزئبق قبل منشأة تصنيع حمض الكبريتيك، سيكون الزئبق المتبقي موجوداً في الحمض المنتج. وكثيراً ما تحدّد نوعية الحمض بمصطلحات مثل النوعية التجارية، النوعية التقنية، والنوعية الإلكترونية (الموصلية الكهربائية)، والنوعية لاستخدام البطاريات، والنوعية الغذائية وما إلى ذلك. وهذه المصطلحات عامة بطبيعتها وقد تختلف من موردٍ إلى آخر ومن بلدٍ إلى آخر. وتعتمد مواصفات المنتج على الاستخدام المحتمل للحمض، وتكون مواصفات التركيز المبلغ عنها في العادة أقل من ١,٠ جزء في المليون، أي ما يعادل حوالي ٠,٠٢ ميليغرام لكل متر مكعب عادي في الغاز المنظّف،^(٣٦) على الرغم من أن بعض التطبيقات قد تتطلب تركيزات أقل بكثير.^(٣٧)

٣-١ عملية بوليدين-نورزينك

٣-١-١ الوصف

عملية بوليدين-نورزينك (التي تسمى أيضاً عملية جهاز أوتوتيك للشطف بالكلوريد أو عملية Outotec BN^(٣٨)) تزيل الزئبق النقي من الغازات الناتجة ككفايات من مصاهر الركاز الأولي، وذلك بتحويل الزئبق إلى كلوريد الزئبق (أحادي التكافؤ) أو Hg₂Cl₂ (المعروف أيضاً باسم "الكالوميل"). وينتج الكالوميل من تفاعل الزئبق مع كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) HgCl₂. ويتم بعد ذلك استرداد كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) من بعض الكالوميل عن طريق الأكسدة مع الكلور، ثم يعاد إلى عملية تنظيف الغاز.

وتتم هذه العملية^(٣٩) في البرج المعبأ. وتتم أكسدة الزئبق النقي الموجود على شكل بخار في الغازات الناتجة ككفايات، وذلك بواسطة محلول شطف مكون من الماء وكلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ):



ويتألف البرج من وعاء أسطواني مقوى بألياف زجاجية عمودية، يمرر من خلاله الغاز الناتج ككفايات من القاعدة إلى القمة. ويعبأ البرج بمواد تغليف مصنوعة من البوليبيروبيلين، (تكون في العادة على شكل سروج). وفي الجزء العلوي من البرج يرش محلول الشطف فوق مواد التغليف بواسطة مجموعة من فوهات الرش. ويستخدم جهاز لإزالة البخار من الطراز المتموج (شيفرون) أو طراز اللوح الشبكي (mesh-pad) عند منفذ خروج البرج لمنع خروج محلول الشطف من النظام. وتتم العملية في درجة حرارة ٤٠ درجة مئوية أو أقل، ويقدر انخفاض الضغط بواسطة برج الشطف بنحو ١ كيلو باسكال.

(٣٦) www.mercuryconvention.org/Portals/11/.../EG1/EU_information.pdf; accessed 24 March 2015

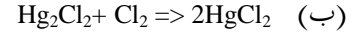
(٣٧) http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/Properties/properties_acid_quality.htm; accessed 24 March 2015

(٣٨) <http://www.outotec.com/en/About-us/Our-technologies/Gas-cleaning/Mercury-removal/#tabid-2>. accessed 24 March 2015

(٣٩) http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/Properties/properties_acid_quality.htm; accessed 24 March 2015

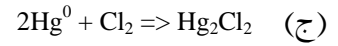
وينتج عن العملية الكالوميل غير قابل للانحلال في الماء. ويترسب من المحلول المائي وتتم إزالته في القسم السفلي من البرج كملاط كثيف. ويعاد بعد ذلك تدوير المحلول المائي إلى جهاز الشطف. وفي الظروف المثالية للعملية، يتفاعل الزئبق النقي بالكامل تقريباً مع كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ).

ومن الضروري الحفاظ على تركيز عال لكلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) في دورة محلول الشطف من أجل تحقيق عملية أكسدة فعالة. ولذلك تتم معالجة نصف الملاط بغاز الكلور من أجل أكسدة ترسبات كلوريد الزئبق (أحادي التكافؤ) مرة أخرى إلى كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ):



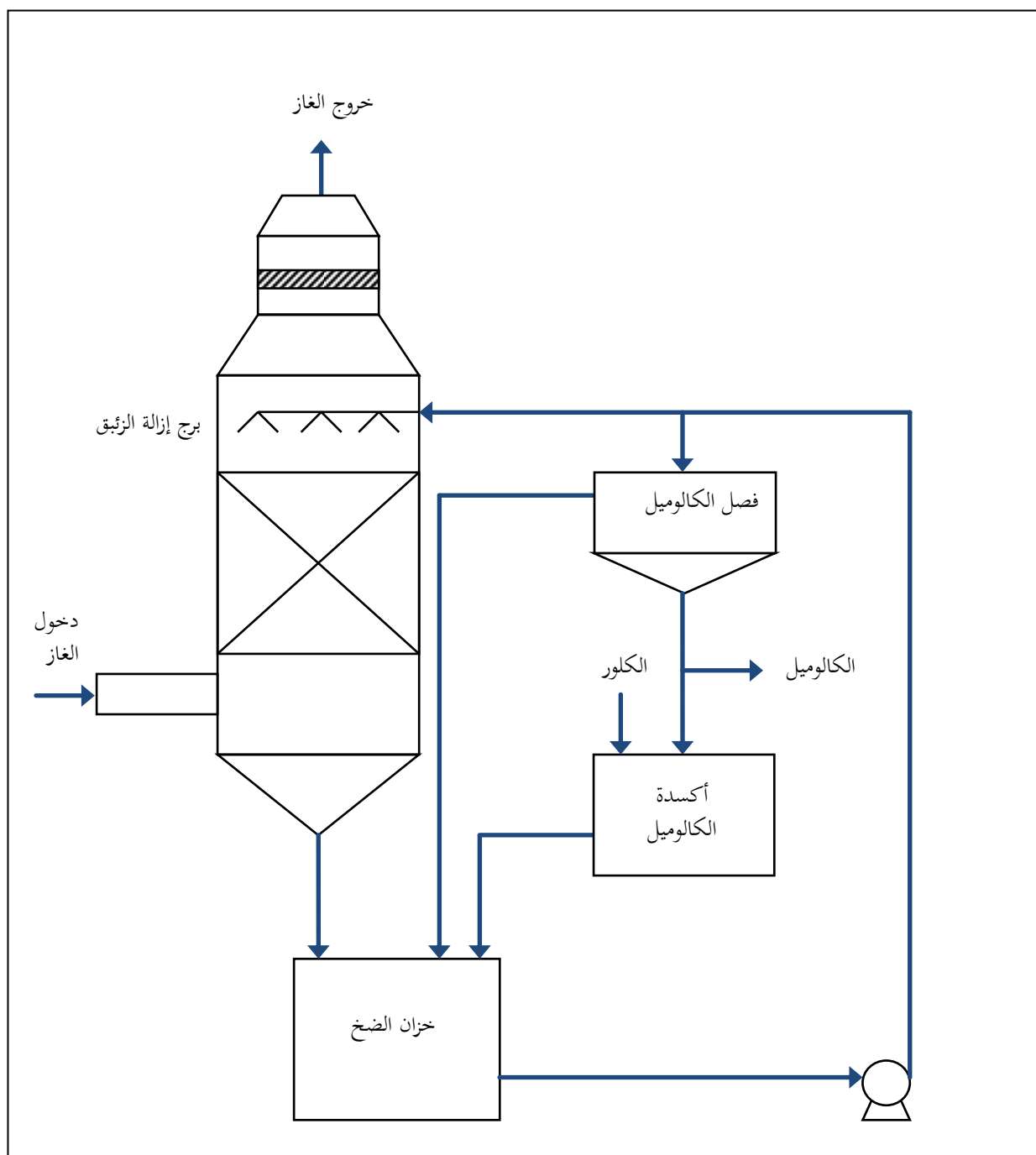
وبمجرد أن يعاد توليد محلول الكالوميل المعالج بالكامل، يتم ضخه إلى صهريج تخزين. وعند استنفاد تركيز كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) في دورة محلول الشطف، يضاف مجدداً محلول كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) الذي أعيد توليده من صهريج التخزين، وذلك للمحافظة على تركيز كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) في دورة الشطف.

والناتج الصافي للتفاعل من خطوتي العملية (أ) و(ب) كما يلي:



ويوجه النصف المتبقي من ملاط الكالوميل إلى حوض ترسيب. وعندما يفيض السائل المرشح يعاد إلى صهريج الضخ الموجود في برج الشطف. وفي أسفل حوض الترسيب، يترسب في حوض مخروطي كلوريد الزئبق (أحادي التكافؤ) غير القابل للانحلال. وتمرر المواد الصلبة إلى حوض ترسيب ثانٍ لكي يتم تركيزها مجدداً. ويمكن إضافة غبار الزنك لتعزيز عملية الترسيب. وتعباً المواد الصلبة الناتجة في حوض الترسيب الثاني في أسطوانات تخزين تمهيداً لبيعها أو لمزيد من التجهيز داخل المنشأة. وفي النهاية يمكن التخلص من نضح الكالوميل بصورة نهائية أو استخدامه لإنتاج الزئبق النقي. ويخزن الزئبق بعد ذلك في أوعية تخزين محكمة. يوضح الشكل ٥ رسماً تخطيطياً لعملية بوليدين-نورزينك.

وينبغي أن تؤخذ في الاعتبار أيضاً المخاطر المترتبة على صحة العمال من احتمال التعرض لكلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) أو للكلور (وكلاهما شديد السمية).



الشكل ٥. رسم تخطيطي لعملية بوليدين-نورزينك التي تنطوي على استرداد كلوريد الزئبق (أحادي التكافؤ) Hg_2Cl_2 (Hultbom 2003)

٣-١-٢ قابلية التطبيق

يمكن أن تطبق هذه العملية على جميع الغازات الناتجة عن عمليات المصاهر، ولا سيما على غازات العمليات التي تحتوي على ثنائي أكسيد الكبريت SO_2 . وهي تقنية فعالة لمستويات مختلفة من مدخلات الزئبق، وكذلك للمحتويات العالية من الزئبق وتستخدم بفعالية في نحو ٤٠ منشأة صناعية في جميع أنحاء العالم.

تعتمد كفاءة الإزالة على محتوى الزئبق في منفذ إدخال الغاز الناتج كنفائيات، والذي يكون عادة ٩٩,٧ في المائة. وفي العادة يتراوح تركيز الزئبق عند منفذ خروج الغاز بين ٠,٣ و ٠,٥ جزءاً في المليون^(٤٠) (Hultbom 2003; UNECE 2013). ويمكن أيضاً الوصول إلى تركيز زئبق يتراوح بين ٠,٣ و ٠,٥ جزءاً في المليون عند منفذ خروج الغاز، بتركيزات لمنفذ الدخول تتجاوز ١٠٠ مليغرام من الزئبق لكل متر مكعب من الغاز في الظروف العادية (100 mg/Nm³) (Hultbom 2003).^(٤١)

الجدول ١

أداء عملية بوليدين-نورزينك في مصهر بوليدين رونسكار (Boliden Rönnskar) (BREF NFM 2014)^(٤٢)

كفاءة التقليل [النسبة المئوية]	بعد [µg/Nm ³]	قبل [ميكروغرام/متر مكعب في الظروف العادية] [µg/Nm ³]	تدفق الغاز ٣٠٠٠٠ متر مكعب في الظروف العادية كل ساعة (Nm ³ /h)
٩٩,٧	٣٠	٩٨٧٩	تركيز عال عند منفذ الدخول
٧٤	١٣	٥١	تركيز منخفض عند منفذ الدخول

٣-١-٤ الآثار الشاملة لعدة أوساط

تشمل الآثار الناتجة عن العملية والشاملة لعدة أوساط ما يلي:

- الآثار على الهواء والماء بسبب إنتاج نفائيات الكالوميل الصلبة، عن طريق نض أو تبخير الزئبق.

٣-١-٥ تكاليف التركيب والتشغيل

نظراً لانخفاض درجة حرارة التشغيل (أقل من ٤٠ درجة مئوية)، تستخدم بصورة أساسية المواد البلاستيكية من أجل الإنشاء.

وتكون تكاليف التشغيل منخفضة لأنها تقتصر على ما يلي:

- استهلاك الطاقة الكهربائية لمضخات التدوير؛
- زيادة استهلاك الطاقة الكهربائية في المراوح للتعويض عن انخفاض الضغط الذي يحدثه برج الشطف؛
- استهلاك غاز الكلور من أجل استرداد كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ).

وتكون تكاليف التشغيل مستقلة عملياً عن مستوى الزئبق في الغاز الناتج كنفائيات^(٤١) (Hultbom 2003) وتعرف هذه العملية بأنها مجدية اقتصادياً. وفي آورويس هامبورغ (Aurubis Hamburg)، وصلت تكاليف الاستثمار في تركيب منشأة لإزالة الزئبق إلى ٥ ملايين دولار (بما في ذلك أجهزة التثقيب والتسخين والمرشحات الكيسية، وأنظمة الحقن وجهاز الامتصاص والمراوح). (BREF NFM 2014).

(٤٠) <http://www.outotec.com/en/About-us/Our-technologies/Gas-cleaning/Mercury-removal/>; accessed 24 March 2015

(٤١) Nm³ هو المتر المكعب في الظروف العادية (normal cubic metre) ويشير إلى الغاز المقاس عند ضغط جوي ١ ودرجة حرارة صفر درجة مئوية.

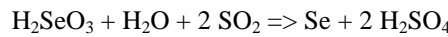
(٤٢) لجنة الأمم المتحدة الاقتصادية لأوروبا، بروتوكول المعادن الثقيلة، المتاح على الرابط: http://www.unece.org/env/lrtap/hm_h1.html جرى الاطلاع على الصفحة في ٢٤ آذار/مارس ٢٠١٥.

٢-٣ مرشح السليوم

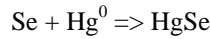
١-٢-٣ الوصف

تزيل عملية مرشح السليوم^{(٣٧)(٣٨)} المحتوى المنخفض من الزئبق النقي الموجود في الغازات الناتجة كنفائات في مصاهر الركازات الأولية، وذلك بتحويل حمض السيلينيوز إلى السليوم الأحمر غير المتبلور الذي يتفاعل مع الزئبق الغاز لتكوين سلفيد الزئبق (ثنائي التكافؤ).

ومرشح السليوم هو مرشح بطبقة ترشيح ثابتة (fixed bed filter) وذو مساحة سطحية كبيرة مصممة لتحقيق اتصال لصيق للغاية مع المادة الفعالة. ويستخدم مادة خاملة مسامية مشابهة لما يستخدم كدعامة للمواد الحفازة. وتشرب هذه المادة بالسليوم الأحمر غير المتبلور. ويتحقق التشريب بتجفيف محلول حمض السيلينيوز بوجود ثنائي أكسيد الكبريت SO₂ لترسيب السليوم الأحمر غير المتبلور:



ويتفاعل السليوم الأحمر غير المتبلور مع الزئبق في الغاز لتشكيل سلفيد الزئبق (ثنائي التكافؤ):



ويكون زمن التماس مع المرشح حوالي ١-٣ ثوان.

ويظل المرشح فعالاً حتى يصل مستوى الزئبق في المرشح إلى ١٠-١٥ في المائة. وتجري معالجة المرشح بعد ذلك لاسترداد الزئبق وإعادة توليد السليوم.

ويكون ضغط البخار للزئبق في درجات الحرارة من صفر إلى ١٠٠ درجة مئوية منخفضاً جداً بالمقارنة مع سلفيد الزئبق HgSe. والسليوم مناسب تماماً كمادة ضبط لأن ضغط بخاره منخفض جداً أيضاً عند درجات الحرارة هذه، مما يجعل فقدان السليوم منخفضاً جداً. ويمكن للمرشح أن يعمل في درجات حرارة تصل إلى ١١٠ درجة مئوية في غازات مشبعة ببخار الماء. غير أنه ينبغي تجنب التكثف داخل المرشح.

ويكون انخفاض الضغط من رتبة ٦٠٠ باسكال بالنسبة لمرشح من مرحلة واحدة بزمن احتجاز قدره ٣ ثوان.

ويمكن لمرشح السليوم أن يجعل غازات النفايات الناتجة من المصاهر خالية تقريباً من الزئبق. ويمكن تطبيقه أيضاً كخطوة معالجة ثانية للغازات الناتجة كنفائات من أجل تخفيض محتوى الزئبق قبل دخول الغاز لاحقاً في مصنع حمض ينتج الحمض الخالي من الزئبق.

وبالمقارنة مع مواد الطبقات الثابتة الأخرى الممتصة للزئبق مثل الكربون المنشط، يتميز السليوم بتفاعله بشكل انتقائي مع الزئبق وحده. ولا تحدث تفاعلات جانبية غير مرغوبة لأن السليوم ليس له نشاط محفز معروف. وبهذا يكون من الممكن مثلاً استخدام مرشح السليوم لإزالة الزئبق في غازات رطبة تحتوي على ثنائي أكسيد الكبريت SO₂. بينما في الكربون المنشط، يتأكسد ثنائي أكسيد الكبريت SO₂ إلى ثلاثي أكسيد الكبريت SO₃، الذي يندمج بدوره مع بخار الماء مشكلاً حمض الكبريتيك، مما يؤدي إلى انسداد المرشح (Hultbom 2003).

وبدلاً من ذلك، سيتطلب تحقيق تراكيز زئبق تبلغ ٠,٠٥ مليغرام في المتر المكعب في الظروف العادية (mg/Nm³) تبريد الغاز بشدة إلى درجات حرارة أقل بكثير من درجة الصفر مئوية لفصل جسيمات مركبات الزئبق والزئبق السائل. ويمكن تحقيق نفس المستوى المتبقي بجمع الزئبق على شكل سلفيد الزئبق (ثنائي التكافؤ) (HgSe) في درجات حرارة تصل إلى حوالي ١٤٠ درجة مئوية (Hultbom 2003).

٣-٢-٢ قابلية التطبيق

ثبتت قابلية التطبيق في ما لا يقل عن ست منشآت في جميع أنحاء العالم.

٣-٢-٣ مستوى الأداء

تتوقف كفاءة الإزالة على زمن الاحتجاز. ومن أجل تحقيق مستويات كفاءة إزالة بنسبة ٩٥ في المائة، تلزم في العادة فترة احتجاز قدرها ثلاث ثوان (Hultbom 2003). وفي العادة، تتحقق مستويات ٩٠ في المائة لكفاءة الإزالة^(٣٨) ويكون الحد الأدنى المتوقع لمتوسط تركيز الزئبق في منفذ خروج الغاز كل ساعة أقل من ٠,٠١ (mg/Nm³) مليغرام في المتر المكعب في الظروف العادية (UNECE Heavy Metals Protocol 2013). وتبين الجداول التالية تخفيضات الزئبق القياسية.

الجدول ٢

أداء عملية مرشح السليوم في منشأة بوليدين رونسكار^(٤١) (مصهر نحاس-رصاص-زنك) (BREFNFM2014)

كفاءة التقليل [النسبة المئوية]	بعد [µg/Nm ³]	قبل [ميكروغرام/متر مكعب في الظروف العادية] [µg/Nm ³]	تدفق الغاز ٨٠,٠٠٠ متر مكعب في الظروف العادية كل ساعة (Nm ³ /h)
٩٥	٤٨	١٠٠٨	تركيز عال عند منفذ الدخول
٧١	١٢	٤٢	تركيز منخفض عند منفذ الدخول

الجدول ٣

النتائج القياسية لعملية مرشح السليوم (Hultbom 2003)

كفاءة التقليل [النسبة المئوية]	بعد [µg/Nm ³]	قبل [ميكروغرام/متر مكعب في الظروف العادية] [µg/Nm ³]	تدفق الغاز
٩٩	٥٠>	٦٠٠٠	تركيز عال عند منفذ الدخول

٣-٢-٤ تكاليف التركيب والتشغيل

تتناسب تكلفة الاستثمار مع كمية تدفق الغاز.

وعندما تصبح كتلة السليوم مشبعة بالزئبق يجب استبدالها. وهذا يمثل التكلفة الرئيسية لهذه التكنولوجيا، وهي تتناسب أساساً مع الكمية المزالة من الزئبق (Hultbom 2003).

وكثيراً ما تتم مقارنة تكاليف تركيب مرشح السليوم مع التكاليف المرتبطة بعملية بوليدين-نورزينك في الحالات التي تكون فيها التقنيتان هما الأنسب. وفي الحالات التي تنخفض فيها معدلات تدفق الغاز، تكون تكلفة الاستثمار النسبية أقل من عملية بوليدين-نورزينك، لأن هذه الأخيرة طريقة شطف تتطلب معدات أكثر. ويكون العكس صحيحاً بالنسبة لمعدلات التدفق المرتفعة، لأن تكلفة توسيع نطاق جهاز الشطف أقل من نظيرتها لمرشحات الطبقات الثابتة (Hultbom 2003).

وبالنسبة لمعدلات تدفق الغاز الأكثر ارتفاعاً التي تترافق مع كميات عالية من الزئبق الوارد تكون عملية بوليدين-نورزينك هي الأكثر اقتصاداً؛ وعلى الرغم من ذلك، يذكر أنه من الممكن الجمع بين عمليتي بوليدين-نورزينك ومرشح السليوم من أجل تلبية أكثر المطالب صرامة في مجال إزالة الزئبق (Hultbom 2003).

وتذكر مصادر القطاع التكلفة الإرشادية لمرشح سليوم تبلغ سعته ٢٠٠ ٠٠٠ متر مكعب/ساعة، فتشير إلى استثمار أولي يبلغ حوالي ٣ ملايين يورو، تضاف إليه تكلفة ٧٠ طناً من السليوم بسعر ٣٥ ٠٠٠ يورو للطن الواحد.

٣-٢-٥ الآثار الشاملة لعدة أوساط

تؤدي العملية إلى آثار محتملة على الهواء والمياه بسبب تبخر الزئبق النقي أو أكسيد الزئبق من إنتاج النفايات المؤلفة من سلفيد الزئبق الصلب (ثنائي التكافؤ). ويجب تحويل النفايات إلى حالة الاستقرار قبل مواصلة معالجتها. وينبغي أن تكون إدارة المواد المحتوية على الزئبق، بما في ذلك تخزينها والتخلص منها، والتجارة فيها، متسقة مع المواد الأخرى ذات الصلة في الاتفاقية.

٣-٣ الكربون المنشط

٣-٣-١ الوصف

الكربون المنشط المشرب بالكبريت^(٤٣) هو أحد التكنولوجيات المثبتة المستخدمة في قطاع الذهب الصناعي لضبط انبعاثات الزئبق في الهواء. ويمكن تطبيق الكربون المنشط إما في وسط الطبقة الثابتة أو عن طريق الحقن بالكربون. ويتفاعل الزئبق الموجود في الانبعاثات الغازية مع الكربون المشرب بالكبريت أثناء مروره في الطبقة المسطحة، مكوناً كبريتيد الزئبق (ثنائي التكافؤ) (HgS). ويتميز الكربون المنشط بأنه يزيل جميع أنواع انبعاثات الزئبق في الهواء، بما في ذلك الزئبق المؤكسد، والمرتبطة بالجسيمات، والزئبق النقي.

وتقوم تكنولوجيا الضبط هذه باحتجاز الزئبق على هيئة كبريتيد الزئبق المستقر (HgS) الذي يتم امتصاصه في الكربون المنشط المشرب بالكبريت. ويمثل هذا تطوراً متقدماً وتكنولوجيا مثبتة يشيع استخدامها في قطاع المعادن غير الحديدية، ولها تطبيقات كثيرة في قطاع تعدين الذهب، إلى جانب بعض الاستخدامات الأخرى في المعادن الأخرى. ويشيع استخدام هذه التكنولوجيا أيضاً في قطاع الطاقة.

وعندما يستخدم أحد المصادر الكربون المنشط، يلزم في البدء التغلب على بعض القيود. أولاً، تختلف درجات حرارة التشغيل القصوى بحسب المصنعين. وقد يلزم التخفيض المسبق لدرجة حرارة تيار الغاز. ثانياً، إذا كان تيار الغاز يحتوي على نسبة رطوبة أعلى من ١٠ في المائة، تلزمه معالجة مسبقة لتقليل نسبة الرطوبة. وأخيراً، يترافق استخدام الكربون المنشط لضبط الزئبق مع خطر اندلاع الحرائق؛ ولكن العديد من المنشآت دأبت لسنوات طويلة على استخدام الكربون المنشط دون وقوع أي حوادث. ويمكن بالإدارة السليمة، تخفيف حدة هذه المخاطر والتقليل منها إلى أدنى حد ممكن.

٣-٣-٢ قابلية التطبيق

يمكن استخدام الكربون المنشط لإزالة جميع أشكال انبعاثات الزئبق: الغازية والجسيمية، والأولية والمؤكسدة. وهو قادر على امتصاص نسبة تتراوح بين ١٠ و ٤٠ في المائة من وزنه من الزئبق قبل أن يلزم استبداله. وبالإضافة إلى ذلك، فالكربون المشرب بالكبريت (١٥ إلى ٢٠ في المائة بالوزن) يتسم بالكفاءة في تشكيل مادة ماصة مستقرة.

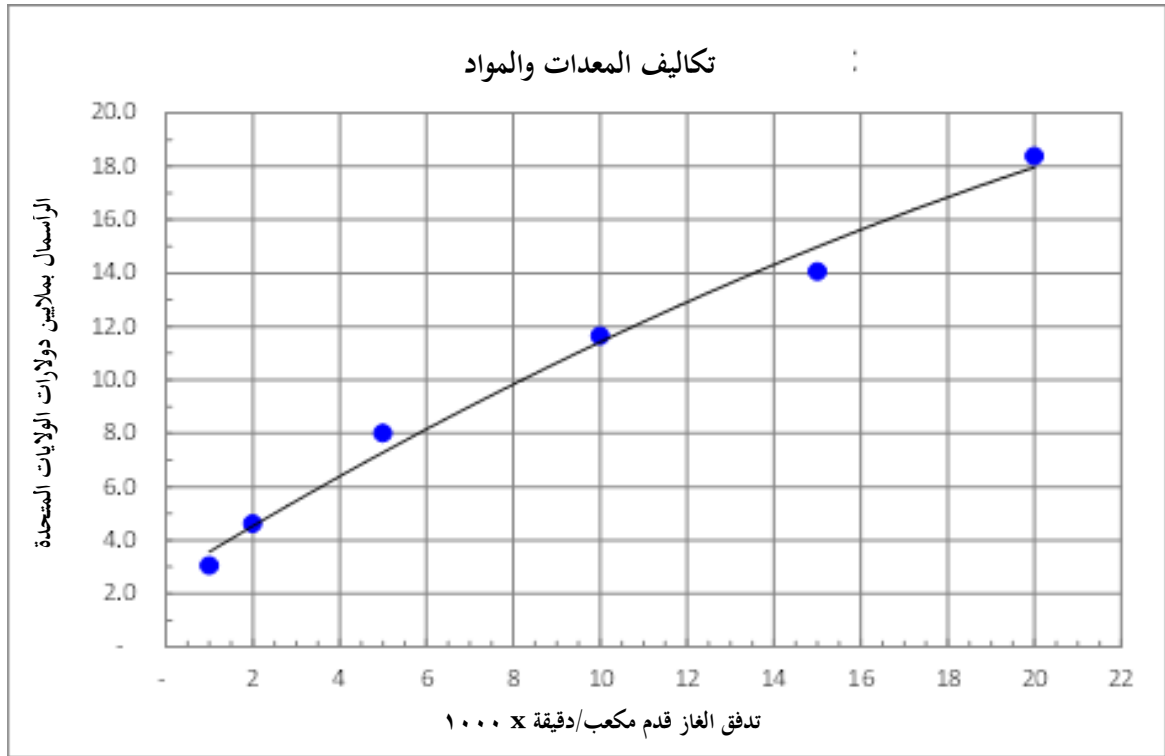
٣-٣-٣ مستوى الأداء

يمكن لنظام امتصاص من الكربون المشرب بالكبريت إذا كان مصمماً بشكل جيد ويخضع للصيانة بشكل سليم، ويقع في اتجاه مسار الغاز من المكثف، أن يحتجز ٩٩ في المائة من الزئبق، محققاً تركيزاً يبلغ ٠,٠١ مليغرام/متر مكعب. وتباين مواصفات المصنعين لامتصاص الكربون للزئبق من ١٠ إلى ٤٠ في المائة. وعلى الرغم من ذلك، يحمل الكربون في العادة بنسبة ٢٠ في المائة مقابل وزنه قبل أن يتم استبداله. ويجري التخلص من الماص المستهلك كنفايات خطيرة، أو يمرر في معوجة لاسترداد الزئبق النقي. وينبغي أن تكون إدارة المواد المحتوية على الزئبق، بما في ذلك تخزينها والتخلص منها، والتجارة فيها، متسقة مع المواد الأخرى ذات الصلة في الاتفاقية.

(٤٣) هناك أنواع أخرى من الكربون المنشط، بما في ذلك الكربون المنشط المشبع بالهالوجين والفلوريد واليود والبروم، وهذه تستخدم أيضاً لضبط الزئبق ولكن ليس من الواضح ما إذا كان قطاع المعادن غير الحديدية يستخدم فعلياً هذه الأنواع من الكربون المنشط. وقد يكون المكان الأنسب لهذه الأنواع في قسمنا المتعلق بالتكنولوجيات الناشئة. ولهذا السبب، سيكون تركيز هذا الفصل على الكربون المشبع بالكبريت.

٤-٣-٣ تكاليف التركيب والتشغيل

يمثل معدل التدفق الحجمي للغاز المراد معالجته أحد العوامل التي تدفع التكلفة الرأسمالية. ويلخص الشكل ٦ المعدات والمواد في نظام ينطوي على الشطف، والتبريد، والتكثيف، وطبقات امتصاص الكربون. ولا يشمل ذلك تكاليف الإنشاء والتركيب بالنظر إلى التباين الناجم عن الطبيعة الجغرافية والطابع المعقد للمشاريع المرافقة.



الشكل ٦: التكاليف الرأسمالية للمعدات والمواد في مرشحات الكربون المنشط المشرب بالكبريت، باعتبارها تابعاً لتدفق الغاز (وحدة التدفق هي قدم مكعب/دقيقة، حيث ١ قدم مكعب/دقيقة = ١,٣ متر مكعب/ساعة).

وتتمثل التكاليف الرئيسية للعملية في استبدال ما يستهلك من الكربون المنشط المشرب بالكبريت أو التخلص منه أو معالجته في الموجات. ويعتمد معدل الاستبدال على محتوى الزئبق في تيار الغاز المتدفق. وتبلغ تكلفة استبدال الكربون المشرب بالكبريت في أمريكا الشمالية ٦,٦ دولارات/كيلوغرام.

٥-٣-٣ المنافع المشتركة

يعتبر الكربون المنشط الذي لم يشرب بالكبريت وسيلة فعالة للغاية لإزالة المركبات العضوية مثل الديوكسينات والفيورانات والمركبات العضوية المتطايرة الموجودة في تيار الغاز. وإذا كانت المركبات العضوية موجودة في الغاز، يركب ما يعرف باسم "طبقة الكربون المنشط للتنظيف المسبق" من أجل إزالة هذه المركبات العضوية قبل المرور بالطبقة المشربة بالكبريت المخصصة لاحتجاز الزئبق. وبدون وجود طبقة التنظيف المسبق، يتم امتصاص المركبات العضوية في الكربون المنشط المشرب بالكبريت فتقل بعدئذ قدرته على إزالة الزئبق، الأمر الذي يزيد من التكاليف الناشئة عن ازدياد تواتر استبدال طبقات الكربون (Krumins et al. 2013).

٦-٣-٣ الآثار الشاملة لعدة أوساط

المواد المستهلكة المحملة بالزئبق من الكربون المشرب بالكبريت قد يلزم التخلص منها كنفائيات خطيرة. وينبغي أن تكون إدارة المواد المحتوية على الزئبق، بما في ذلك تخزينها والتخلص منها، والتجارة فيها، متسقة مع المواد الأخرى ذات الصلة في الاتفاقية.

٤-٣ عملية مرشح دووا (DOWA) (مرشح من حجر الخفاف مكسو بطبقة من كبريتيد الرصاص (ثنائي التكافؤ))

عملية كبريتيد الرصاص (ثنائي التكافؤ) هي إحدى وسائل الوسائط الجافة التي تستخدم لإزالة الزئبق من غازات الصرف المتولدة في مصاهر المعادن غير الحديدية. وتتمر الغازات التي تحتوي على الزئبق المتطاير عبر برج معبأ بكرات مكسوة بكبريتيد

الرصاص، مثل حبيبات الخفاف، من أجل تحقيق تماس فعال مع الغاز. وعند ملامسة الغاز لكبريتيد الرصاص (ثنائي التكافؤ) يتحول الزئبق الذي يتميز بضغط بخار عالٍ إلى كلوريد الزئبق الذي يكون ضغط بخاره منخفضاً جداً. وبالنسبة لعملية كبريتيد الرصاص (ثنائي التكافؤ) تم قياس كفاءة ٩٩ في المائة لإزالة الزئبق، وتتراوح نسب تركيز انبعاثات الزئبق الناتجة عن ذلك بين ٠,٠١ و ٠,٠٥ ميليغرام/متر مكعب في الظروف العادية (mg/Nm³).

وتم الحصول على التكاليف الإرشادية من مصادر القطاع الصناعي: تبلغ كلفة الاستثمار المبدئية لبرج دووا طاقته ٢٠٠ ٠٠٠ متر مكعب في الساعة حوالي ٥,٥ ملايين دولار، وتضاف إلى ذلك تكلفة ٥٠٠ متر مكعب من مواد الترشيح التي تبلغ ١ ٨٠٠ يورو للطن الواحد، ويبلغ متوسط عمرها النافع ٥-١٠ سنوات.

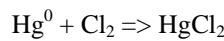
٣-٥ عملية جيريت (Jerritt process)

٣-٥-١ الوصف

تستخدم عملية جيريت حالياً في منجم واحد من مناجم الذهب، وهي مبنية في الشكل ٧. وتزيل العملية الزئبق النقي من الغازات الناتجة كنفائات في جهاز التحميص عن طريق تحويل الزئبق إلى كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) HgCl₂. وينتج كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) من تفاعل الزئبق مع الكلور الذائب، Cl₂. وتتم بعد ذلك معالجة التيار المنصرف المحتوي على كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) بالتحليل الكهربائي المباشر لاسترداد الزئبق النقي، أو تتم معالجته بغبار الزنك لترسيب كلوريد الزئبق (أحادي التكافؤ) أو يعاد إلى جهاز مثخن لاسترداد قيم الذهب التي قد يحتوي عليها.

وقد تم تطوير عملية جيريت وتركيبها لأول مرة في عام ٢٠٠٩ من جانب الشركة الكندية يوكن-نيفادا غولد (Yukon-Nevada Gold Corporation) في منشأة تحميص الرصاص التابعة لها في وادي جيريت (إيلكو، نيفادا، الولايات المتحدة). وفي وقت لاحق، في عام ٢٠١٠، جرى تركيب هذا النظام في محفف الرصاص التابع للشركة.

وتتم هذه العملية في البرج المعبأ. وتتم أكسدة الزئبق النقي الموجود على شكل بخار في الغازات الناتجة كنفائات، وذلك بواسطة محلول شطف مكون من الماء والكلور الذائب:



ويتألف البرج من وعاء أسطواني مقوى بألياف زجاجية عمودية، يمر من خلاله الغاز الناتج كنفائات من القاعدة إلى القمة. ويعبأ البرج بمواد تغليف مصنوعة على شكل سروج من البوليبيروبايلين. وفي الجزء العلوي من البرج يرش محلول الشطف فوق مواد التغليف بواسطة مجموعة من فوهات الرش.

ويستخدم جهاز لإزالة البخار من الطراز المتوج (شيفرون) أو الطراز الشبكي عند منفذ خروج البرج لمنع خروج محلول الشطف من النظام. وتجري العملية عند درجة حرارة ٤٠ درجة مئوية، أو أقل. وينخفض الضغط بواسطة البرج بمقدار حوالي ١ كيلو باسكال.

ويعاد تدوير المحلول الحمضي إلى جهاز الشطف، ويزال من المحلول المعاد تدويره تيار صرف يعادل في حجمه للمحلول المتحكم بدرجة الحموضة والرذاذ المزيل للرطوبة. وفي الظروف المثالية للعملية، يتفاعل الزئبق النقي بالكامل تقريباً مع الكلور الذائب. وينبغي أن تؤخذ في الاعتبار أيضاً المخاطر المترتبة على صحة العمال من احتمال التعرض لكلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) (الشديد السمية).

٣-٥-٢ قابلية التطبيق

يمكن تطبيق هذه العملية على جميع الغازات الناتجة كنفائات من جهاز التحميص، ولا سيما غازات الصرف التي أزيل منها ثنائي أكسيد الكبريت بواسطة عملية الشطف. وتتسم التقنية بالفعالية في المستويات العالية من مدخلات الزئبق التي تنتج من أجهزة تحميص جيريت، وهي فعالة أيضاً للمستويات المنخفضة من الزئبق التي تنتجها أجهزة جيريت لتجفيف الرصاص.

٦-٣ المنافع المشتركة للتكنولوجيات الشائعة الرامية إلى تخفيض تلوث الهواء وتقنيات ضبط الزئبق في منشآت تصنيع الحمض

١-٦-٣ تكنولوجيات تخفيض التلوث

يرد قسم شامل عن التكنولوجيات الشائعة الرامية إلى تخفيض التلوث والتي توفر منافع مشتركة لاحتجاز انبعاثات الزئبق في الفصل الذي يتناول التكنولوجيات الشائعة في الوثيقة التوجيهية المتعلقة بأفضل التكنولوجيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية. ويناقش القسم الحالي إمكانية تطبيق هذه التقنيات في قطاع المعادن غير الحديدية.

١-١-٦-٣ المرشحات الكيسية

يشجع استخدام المرشحات الكيسية في قطاع المعادن غير الحديدية، لأن هذه التقنية توفر كفاءة الجمع الأعلى بين أساليب ضبط المواد الجسيمية. ويمكن إزالة قوالب الغبار المتجمعة على المرشح دورياً باستخدام طرق من قبيل تدفق الهواء في الاتجاه المعاكس، والرج الميكانيكي، والاهتزاز، وتيارات النبض الهوائية. ويمكن إعادة تدوير قوالب الغبار بعد ذلك في عملية جهاز الصهر لاسترداد القيم المعدنية التي قد توجد فيها. وهذه التقنية فعالة لاحتجاز الزئبق الموجود على شكل جسيمات، أو الزئبق الممتص على الجسيمات.

٢-١-٦-٣ المرسبات الكهروستاتيكية

تستخدم المرسبات الكهروستاتيكية الجافة والرطبة على نطاق واسع في قطاع المعادن غير الحديدية، وذلك كمرحلة أولى في إزالة المواد الجسيمية. وفي المرسبات الكهروستاتيكية الجافة، يزال الغبار المتجمع على الصفائح المشحونة بالطرق أو الاهتزاز. ويعاد تدوير الغبار في العادة في عملية الصهر.

وفي المرسبات الكهروستاتيكية الرطبة، يزال الغبار بغسل الصفائح، ويتم الغسل بالماء عادة. وتنتج من ذلك نفايات سائلة وحمأة يمكن بعدئذ إعادة تدويرها في العملية إذا كانت تحتوي على مواد ذات قيمة، أو التخلص منها. وفي حالات معينة، تبين أن المرسبات الكهروستاتيكية الرطبة تزيل الزئبق بفعالية بشكله الغازي أو الجسيمية، وذلك عندما تعمل بالاقتران مع تقنيات أخرى مثل أجهزة الشطف وأجهزة تبريد الغاز.

٣-١-٦-٣ أجهزة الشطف

من المعتاد استخدام أجهزة الشطف الرطبة في قطاع المعادن الحديدية، وذلك لأغراض غازات التبريد وإزالة المواد الجسيمية والشوائب مثل ثلاثي أكسيد الكبريت (SO_3)، وحمض الهيدروكلوريك (HCl)، وفلوريد الهيدروجين (HF) كجزء من عملية تنظيف الغاز التي تسبق إنتاج حمض الكبريتيك. وينتج عن هذه التقنية نفايات سائلة وحمأة. ويمكن إعادة استخدام النفايات السائلة في جهاز الشطف، في حين يمكن إعادة تدوير الحمأة في عملية الصهر أو التخلص منها. وينبغي أن تكون إدارة المواد المحتوية على الزئبق، بما في ذلك تخزينها والتخلص منها، والتجارة فيها، متسقة مع المواد الأخرى ذات الصلة في الاتفاقية.

وأجهزة الشطف الرطبة فعالة في احتجاز الزئبق الموجود على شكل جسيمات، أو الزئبق الممتص على الجسيمات. ولكن هذه الأجهزة ليست فعالة كثيراً في إزالة الزئبق النقي الغازي من تيار الغاز ما لم يكن الغاز محتويًا على مركبات السليوم.

٢-٦-٣ الجمع بين تنظيف الغاز ومنشآت تصنيع الحمض

١-٢-٦-٣ الوصف

يمثل الجمع بين معدات تنظيف الغاز ومنشآت تصنيع الحمض أحد التكنولوجيات التي أثبتت فعاليتها في ضبط انبعاثات الكبريت في قطاع تصنيع المعادن غير الحديدية، وهو من الأساليب الشائعة الاستخدام في جميع أنحاء العالم. وفي ظل ظروف معينة، وجد أن تشغيل منشآت تصنيع الحمض مع معدات تنظيف الغاز أثبتت فعاليتها في احتجاز الزئبق من تيار الغاز باستخدام التقنيات التقليدية لضبط المواد الجسيمية، وكانت نتيجة ذلك تحقيق كفاءة في إزالة الزئبق تعادل تلك الناتجة عن استخدام أفضل التقنيات المتاحة المخصصة لإزالة الزئبق. وفي هذه الحالات، التي تسمح بها خصائص الركاز وشروط التصنيع، تتم إزالة الزئبق كله تقريباً خلال تنظيف الغاز وقبل تصنيع الحمض، في حين يزال الزئبق المتبقي بالتنظيف الإضافي للغاز بعد إرسال المواد إلى منشأة تصنيع الحمض.

وأظهرت دراسة استقصائية أجريت مؤخراً في اليابان^(٤٤) أن العديد من الشركات تعتمد بنجاح على منشآت تنظيف الغاز وتصنيع حمض الكبريتيك من أجل إزالة الزئبق من غازات الصهر الناتجة في منشآت صهر المعادن. وتظهر الدراسة الاستقصائية أن استخدام هذا الأسلوب يؤدي إلى احتجاز الزئبق بصورة فعّالة في بعض مصاهر النحاس والرصاص والزنك.

٢-٢-٦-٣ قابلية التطبيق

إن مصانع حمض الكبريتيك المقترنة مع منشآت تنظيف الغاز لإزالة الزئبق بشكل فعّال، جرى تطبيقها على نحو فعال في مصاهر النحاس والزنك والرصاص في جميع أنحاء العالم.

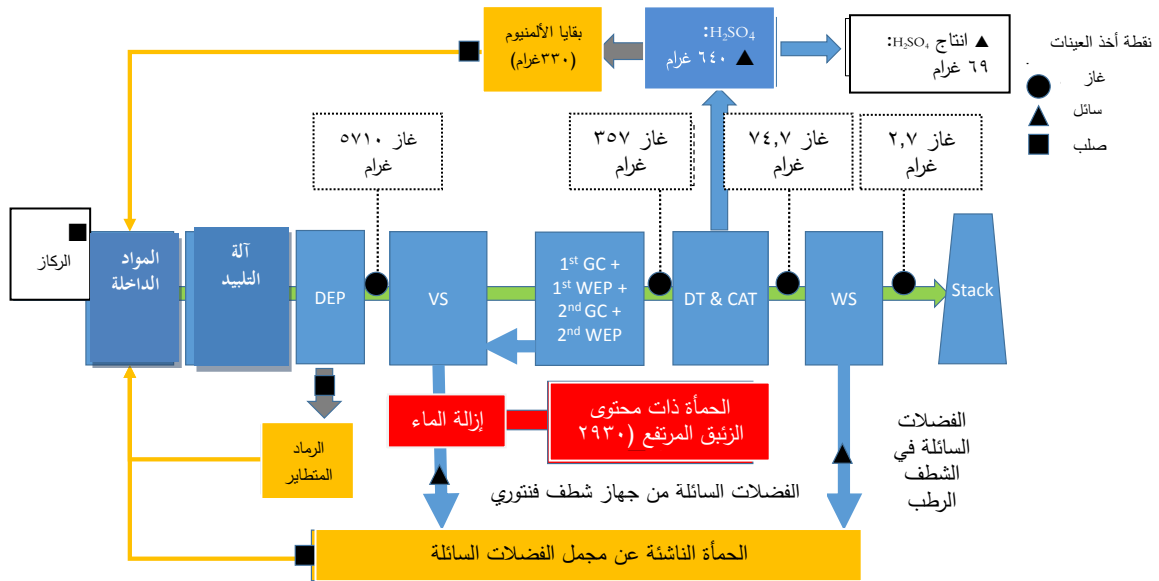
ويرد مثال على هذه المنشآت في دراسة يابانية مفصلة (Takaoka et al. 2012)، أجريت في مصهر للزنك يستخدم عملية الصهر بالفنر العالي، واستخدم فيها حساب شامل لتوازن كتلة الزئبق على النحو المبين في الشكل ٨.

٣-٢-٦-٣ مستويات الأداء

تبين نتائج الدراسة اليابانية الفعّالة المحتملة للأسلوب الذي يجمع بين منشآت تنظيف الغاز وتصنيع الحمض في احتجاز الزئبق. ووجد أن التركيزات الإجمالية للزئبق في غازات الصهر تتراوح ضمن نطاق ١,٧ إلى ٦,١ (µg/Nm³) ميكروغرام/متر مكعب عادي (Takaoka et al. 2012).

٤-٢-٦-٣ التكاليف

يمثل الجمع بين منشآت تنظيف الغاز وصناعة حمض الكبريتيك تكنولوجيا قياسية لالتقاط ثنائي أكسيد الكبريت من غاز التصريف الناتج في المصاهر التي تعالج المركبات الكبريتيدية. وفي الحالات التي تتيح فيها هذه التكنولوجيا المقترنة استرداد الزئبق بكفاءة تعادل استخدام أفضل التكنولوجيات المتاحة الخاصة باحتجاز الزئبق، لن تلزم استثمارات رأسمالية إضافية في إزالة الزئبق.



الدليل: DEP: مرسب كهروستاتيكي جاف، VS: جهاز شطف من نوع فنتوري (Venturi Scrubber)، GC: مبرد غاز (Gas Cooler)، WEP: مرسب كهروستاتيكي رطب، DT: برج تجفيف (Dehydration Tower)، CAT: عملية التحويل وبرج الامتصاص، WS: جهاز شطف رطب

الشكل ٨- توازن الكتلة للزئبق حول مواقع إنتاج حمض الكبريتيك في مصنع ياباني للزنك يستخدم عملية الصهر بالفنر العالي (Takaoka et al. 2012)

(٤٤) JMIA bulletin "Kozan (<http://www.mmf.or.jp/>)" for the April 2015 Takashi Shimizu: Mercury Removal from the Nonferrous Smelter's Off-gas in Japan. (نشرة JMIA عن نيسان/أبريل ٢٠١٥ - تاكاشي شيميزو: إزالة الزئبق من الغازات الناتجة عن مصاهر المعادن غير الحديدية في اليابان).

٣-٦-٢-٥ المنافع المشتركة

الجمع بين منشآت تنظيف الغاز وتصنيع حمض الكبريتيك وسيلة فعالة جداً لاحتجاز ثنائي أكسيد الكبريت. وفي الواقع، يكون الغرض الأساسي من إنشاء مصنع لحمض الكبريتيك هو جمع ثنائي أكسيد الكبريت وإنتاج حمض الكبريتيك الذي يمكن بيعه.

٣-٦-٢-٦ الآثار الشاملة لعدة أوساط

هناك آثار محتملة على الهواء والمياه بسبب إنتاج نفايات الزئبق الصلبة (الحمأة). وينبغي أن تكون إدارة المواد المحتوية على الزئبق، بما في ذلك تخزينها والتخلص منها، والتجارة فيها، متسقة مع المواد الأخرى ذات الصلة في الاتفاقية.

٤ - أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية

٤-١ لمحة عامة عن أفضل التقنيات المتاحة

ترد في الجدول ٣ لمحة عامة عن التقنيات التي يمكن النظر فيها لتحديد أفضل التكنولوجيات المتاحة للتقليل من الزئبق في قطاع المعادن غير الحديدية. وعلى النحو الموصوف في القسم ٥، قد تحقق المنافع المشتركة لتقنيات تخفيف التلوث بالغاز والجسيمات ومنشآت تصنيع الحمض أيضاً قدرأ مقبولأ من الانبعاثات الطفيفة للزئبق.

الجدول ٣

ملخص لتقنيات التحكم الموجهة حصراً إلى الزئبق في عمليات الصهر والتحميص للمعادن غير الحديدية (يبين الأداء القياسي للانبعاث، وقد لا يظهر ذلك جميع الحالات الممكنة)^{(٣٨)(٤١)} (UNECE 2013)

المساوي	المزايا/التعليقات	الأداء القياسي (كفاءة إزالة الزئبق) ^(١)	الوصف	تقنيات التحكم بالانبعاثات
معالجة غاز الكلور معالجة الكالوميل التخلص من الكالوميل كفائيات خطرة	ثبتت على نطاق واسع	٩٩,٧ في المائة تركيز منفذ الدخول: حوالي ٩٩٠٠ ميكروغرام/متر مكعب ٧٤ في المائة - التركيز لمنفذ الدخول ٥١ ميكروغرام/متر مكعب	بناء على جهاز شطف رطب باستخدام تفاعل بين كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) والزئبق لتشكيل كلوريد الزئبق (أحادي التكافؤ) (كالوميل) الذي يترسب من المحلول المائي.	عملية بوليدين- نورزينك
تركيز محدود للزئبق عند منفذ الدخول يلزم التخلص السليم بيئياً من المرشح المستهلك.	تناسب بوجه خاص التركيزات المنخفضة للزئبق في الغاز جرى تركيبها بنجاح في المنشآت الميتالورجية	٩٥ في المائة - التركيز لمنفذ الدخول ١٠٠٠ ميكروغرام/متر مكعب ٧١ في المائة - التركيز لمنفذ الدخول ٤٢ ميكروغرام/متر مكعب	يتألف مرشح السليوم من مادة مسامية خاملة مشبعة بمحمض السيلينوز، ويتم بعد ذلك بتجفيفها لترسيب السليوم الأحمر غير المتبلور. ويتفاعل السليوم الأحمر غير المتبلور مع الزئبق في الغاز لتشكيل سليد الزئبق (HgSe).	مرشحات السليوم
يلزم التخلص من الكربون المستهلك في مدافن القمامة	الكربون المنشط المشرب بالكبريت متاح تجارياً تزيل الزئبق النقي Hg ⁰ والأنواع الأخرى احتمال منخفض لارتشاح الزئبق من الكربون المستهلك	٩٧ في المائة - التركيز لمنفذ الدخول ١٢٠٠ ميكروغرام/متر مكعب ٩٣ في المائة - التركيز لمنفذ الدخول ٣٧ ميكروغرام/متر مكعب	الكربون المنشط معروف جداً بخصائص الامتصاص. وبالنسبة لامتصاص الزئبق، يمكن للكربون المنشط أن يمتص ١٠-١٢ في المائة من وزنه.	طبقات الترشيح المكونة من الكربون المنشط
غير مستخدمة على نطاق واسع التخلص من كبريتيد الزئبق ككفائيات خطرة		٩٧ في المائة - التركيز لمنفذ الدخول ٥٠ ميكروغرام/متر مكعب ٨٨ في المائة - التركيز لمنفذ الدخول ١١ ميكروغرام/متر مكعب	تعتمد على امتصاص الزئبق في حجر حقاف مكسو بطبقة من كبريتيدات الرصااص.	تقنية دووا (DOWA)
التخلص من المنتجات الثانوية على نحو يتفق مع المواد الأخرى ذات الصلة من الاتفاقية	كفاءة عالية جداً في إزالة الزئبق	٩٧,٩٩ في المائة	تعتمد على تحويل الزئبق النقي إلى كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) عن طريق التفاعل مع الكلور الذائب Cl ₂ .	تقنية جيريت (Jerritt)

(أ) تستند بيانات الأداء إلى بيانات مصهر بوليدين رونسكارفيركن (Boliden's Rönnskärsvärken) للنحاس والرصاص والزنك، حسبما جرى الإبلاغ عنها في الوثيقة (UNECE 2013).

٤-١-١ بعض الاعتبارات الأخرى في اختيار تقنيات ضبط الزئبق لعمليات الصهر والتحميص في قطاع المعادن غير الحديدية

يرد في الفصل التمهيدي من هذه الوثيقة التوجيهية وصف المبادئ العامة لاختيار أفضل التقنيات لمصادر الانبعاث الثابتة المدرجة في المرفق دال. وهنا تجري مناقشة بعض جوانب كيمياء الزئبق التي قد يكون لها تأثير على اختيار ضوابط التحكم

بالزئبق في قطاع المعادن غير الحديدية. وهذه الجوانب لا يراود لها أن تكون ملزمة، كما أنها قد تكون أقل قابلية للتطبيق بالنسبة لبعض المعادن الواردة في المرفق دال، ولا سيما الذهب.

قد يوجد الزئبق بشكله الأولي (Hg^0) أو بشكله المؤكسد (Hg^{2+}) في الغازات الناتجة عن عمليات الصهر والتحميص، أو في مرحلة الغاز أو الجسيمات. وفي كثير من الحالات يزال الزئبق بكفاءة في نظم تنظيف الغاز العادية المستخدمة في تلك العمليات للتحكم بالغازات الحمضية (SO_2, NO_x) وبالجسيمات الدقيقة. ولذلك من الضروري أن يكون أداء هذه النظم جيداً، لتحقيق محتوى متبق منخفض من الزئبق في الغاز المنظف. ويكون هذا مهماً بوجه خاص في نظم المرشحات الكهروستاتيكية الرطبة والنظم الرطبة لتنظيف الغازات. وتتسم كفاءة تنظيف الغاز بالأهمية أيضاً لأن الشوائب الموجودة في الغاز قد تؤدي إلى تفاعلات جانبية غير مرغوب فيها في مرحلة إزالة الزئبق. فعلى سبيل المثال، مرشح السليوم الذي يعد من المرشحات ذات الطبقة الثابتة، حساس لترسبات الغبار على الجسيمات المسامية الفعالة.

وتكون إزالة الزئبق النقي أصعب بكثير من إزالة الزئبق المؤكسد، وتصمم معظم التكنولوجيات التجارية لإزالة الزئبق النقي الموجود على شكل بخار، وتعتمد على تنظيف الغاز التقليدي في المراحل الأولية لتحقيق معدلات إزالة مرتفعة للزئبق. ويجري تركيب مرحلة إزالة الزئبق في العادة في الحالات التي يكون فيها تنظيف الغاز غير كاف لإزالة كميات كافية من الزئبق بسبب محتوى الزئبق في المواد الأولية أو خصائص الركاز.

ويلخص الجدول ٤ بعض العوامل التي تؤثر على توزيع الزئبق في نظام تنظيف الغاز في بيئة المصهر.

الجدول ٤: بعض العوامل التي تؤثر على توزيع الزئبق في نظام تنظيم الغاز (حسب (Holmström et al. 2012))

خصائص الغاز	النتائج بالنسبة لتوزيع الزئبق
وجود Se أو S^0 أو بدلاً من ذلك $H_2S_{(g)}$	تشكيل HgS أو $HgSe$ (جسيمات)، التي تستعاد بواسطة المرشحات الكيسية أو المرشحات الكهروستاتيكية الرطبة
محتوى عال جداً من الزئبق النقي في نظام تبريد الغاز	تشكيل وتكثف الزئبق النقي السائل في جميع أجزاء النظام
درجة الحرارة العالية للغاز بعد تبريده في برج بوليدين-نورزينك	ينتج عن ذلك محتوى عال نسبياً من Hg^0 بعد برج بوليدين-نورزينك
عمل جهاز الترسيب الكهروستاتيكي الرطب	تلزم الكفاءة العالية؛ وبدونها ستنقل الجسيمات الغنية بالزئبق إلى الحمض
وجود الزئبق المؤكسد في غاز العمليات الذي يصل إلى المرشحات الكيسية	سيؤدي إلى وجود المزيد من الزئبق في غبار المرشحات الكيسية.

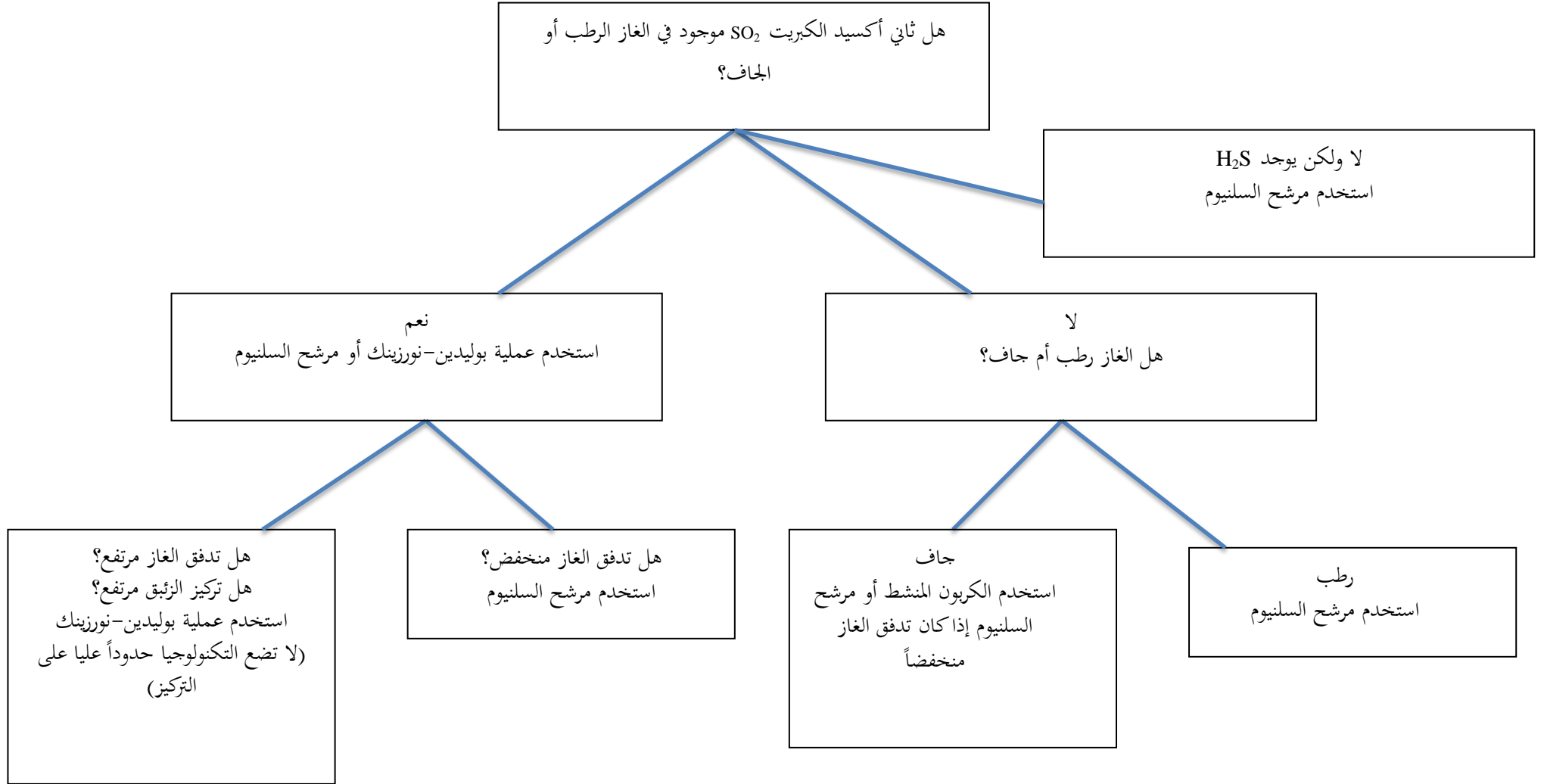
وتكون شروط نقاء الغاز اللازمة من أجل عمليات إزالة الزئبق هي نفسها تقريباً تلك المطلوبة لمنشآت تصنيع الحمض. وفيما يتعلق بالحالة المحددة لعملية بوليدين-نورزينك، تكون قياسات ضغط بخار الزئبق في السوائل الدائرة حساسة لدرجات الحرارة. ولهذا السبب، ينبغي أن تكون درجة حرارة الغاز الداخل منخفضة قدر الإمكان. ويرد في الجدول ٥ بيان للمتطلبات العادية بالنسبة لغاز منفذ الدخول إلى مرحلة إزالة الزئبق في عمليات بوليدين-نورزينك والثيوكبريتات ومرشح السليوم.

الجدول ٥: جودة الغازات والخصائص اللازمة بالنسبة لغاز منفذ الدخول إلى مرحلة إزالة الزئبق في عمليات بوليدين-نورزينك والثيوكبريتات ومرشح السلينيوم (بيانات القطاع الصناعي المقدمة من أوتوتيك)

البارامتر	عملية بوليدين-نورزينك	عملية الثيوكبريتات	مرشح السلينيوم
الغبار	الحد الأقصى ١ مليغرام/متر مكعب في الظروف الطبيعية	الحد الأقصى ١ مليغرام/متر مكعب عادي (بعد مرحلة المرسب الكهروستاتيكي الرطب)	الحد الأقصى ١٠ مليغرام/متر مكعب عادي
رذاذ حمض الكبريتيك	الحد الأقصى ٢٠ مليغرام/متر مكعب في الظروف الطبيعية	الحد الأقصى ٢٠ مليغرام/متر مكعب عادي (بعد مرحلة المرسب الكهروستاتيكي الرطب)	الحد الأقصى ٢٠ مليغرام/متر مكعب عادي
درجة حرارة الغاز	٤٠ درجة مئوية كحد أقصى	ليست ذات أهمية حرجة	٩٠ درجة مئوية كحد أقصى

وصفت مؤسسة أوتوتيك، الموزع الرئيسي لتقنيات ضبط الزئبق في عمليات الصهر، أسلوباً لاختيار التكنولوجيا (Holmström et al. 2012) في الحالات التي تلزم فيها إزالة كبيرة للزئبق من الغاز. وكانت التكنولوجيات الثلاث الواردة في الوصف هي عملية بوليدين-نورزينك ومرشح السلينيوم المستخدم في طبقة ثابتة بوجود تدفقات غازية صغيرة نسبياً؛ ومرشح من الكربون المنشط لاستخدامه في طبقة ثابتة أو بحقن الكربون المنشط في مرحلة سابقة للمرشح الكيسي. ووفقاً لأوتوتيك يتحدد الخيار (Holmström et al. 2012) بالظروف التي تجري بها العملية ويمكن توضيح ذلك ببساطة في المخطط البياني المقدم في الشكل ٩.

ويراد من هذا الشكل أن يكون دليلاً عاماً لخيارات التكنولوجيا المحتملة وقد لا يكون مناسباً في كثير من الحالات، على سبيل المثال عندما يوجد السلينيوم في المركز. وقد لا تكون هذه التكنولوجيات ضرورية عندما يقترن تشغيل معدات تنظيف الغاز مع منشآت تصنيع حمض الكبريتيك على نحو يتحكم بشكل كاف بانبعاثات الزئبق والكبريت.



الشكل ٩. اعتبارات التحكم بالزئبق عندما يلزم مستوى عال من إزالة الزئبق، وتشمل الخيارات عمليات بوليدين - نورزينك ومرشحات السليوم والكربون المنشط

٤-٢ أفضل الممارسات البيئية

يصف هذا القسم أفضل الممارسات البيئية المستخدمة بوجه عام من أجل ضبط انبعاثات الزئبق إلى الجو الناجمة عن عمليات الصهر والتحميص المستخدمة في إنتاج المعادن غير الحديدية، وللتقليل من تلك الانبعاثات حيثما أمكن ذلك.

ومن أجل وضع وتنفيذ أفضل ممارسات بيئية محددة يلزم التخطيط الدقيق والالتزام على جميع المستويات في المؤسسة. وقد يتيسر وضع أفضل الممارسات البيئية عن طريق النظر فيما يتوجب تطبيقه من القواعد التنظيمية والممارسات الإدارية لمنشآت التصنيع.

٤-٢-١ نظم الإدارة البيئية

نظام الإدارة البيئية هو نهج منظم إزاء إدارة الجوانب البيئية في عملية تشتمل عادة على ما يلي: استعراض الأهداف البيئية للمؤسسة؛ وتحليل مخاطرها وآثارها البيئية ومتطلباتها القانونية؛ ووضع الغايات البيئية والمقاصد المستهدفة للحد من الآثار البيئية والامتثال للمتطلبات القانونية؛ ووضع برامج يهدف إلى تحقيق هذه الغايات والمقاصد المستهدفة؛ ورصد وقياس التقدم المحرز في تحقيق الغايات؛ وكفالة غرس الوعي البيئي والكفاءة البيئية لدى العاملين؛ واستعراض التقدم المحرز للنظام وتحسينه بشكل متواصل. وقد تشمل توصيات التنفيذ ما يلي:

- وضع وتنفيذ برامج الصيانة الوقائية والتنبؤية والتصحيحية لتشغيل نظم تخفيض التلوث على نحو فعال؛
- وصيانة معدات الإنتاج من أجل تيسير تشغيلها بشكل طبيعي والتقليل إلى أدنى حد ممكن من حالات الخلل في العمليات؛
- وتحسين الإدارة التشغيلية، ووضع خطط للطوارئ وتدريب القائمين على التشغيل بشكل منظم؛
- وتنفيذ برنامج لمنع التسربات وتطبيق نظام جيد لإدارة الشؤون الداخلية في جميع أقسام المنشأة؛
- ووضع خطة رصد لإجراء قياسات للزئبق في المراحل ذات الصلة من العملية؛
- وضع وتعهد سجل عام لانبعاثات الزئبق في كل مستوى معني من مستويات العمليات والمنشأة.

٤-٢-٢ مزج المواد الأولية لضبط انبعاثات الزئبق

المزج هو عملية تشغيلية تنفذ لإنتاج مادة تليق أولية مستقرة ومتجانسة عن طريق مزج الركازات أو الخامات المركزة المتفاوتة في نوعيتها، حيث تمزج الركازات مع الخلائط المركزة والعوامل الصهورة أو تمزج معها مواد ثانوية ومواد أولية أخرى. وقد يستخدم المزج لضبط انبعاثات الزئبق عندما يكون تركيز الزئبق في المواد الأولية للصهر مختلفاً اختلافاً شديداً أو عندما يكون تركيز الزئبق في هذه المواد أعلى مما هو مرغوب. ومعالجة مادة تليق أولية مستقرة ومتجانسة تيسر ظروف تشغيل مستقرة تعمل فيها ضوابط التلوث بمزيد من الكفاءة. وبالإضافة إلى ذلك، فالانخفاض الإجمالي لمحتوى الزئبق في مادة الصهر الأولية سيؤدي إلى انخفاض تركيز الزئبق في الغاز الناتج عن العملية ويقلل من انبعاثات الزئبق من المدخنة النهائية. وفي حالات معينة قد يكون محتوى الزئبق في الركاز منخفضاً جداً، وقد لا تلزم تدابير تحكم إضافية لتحقيق انبعاثات منخفضة.

وبالنسبة للمصادر التي تقوم بالمزج، ينبغي أن مراعاة الاعتبارات التالية:

- قد يشكل المزج عملية تثير الكثير من الغبار، وينبغي استخدام مستويات مرتفعة للتطويق وانتزاع المواد الجسيمية وإزالة الغبار. وينبغي إعادة الغبار المتجمع إلى العملية.
- ويمكن استخدام المزج الرطب لتفادي إنتاج الغبار. وفي بعض الحالات، ينتج الملائط الذي يزال منه الماء ويستخدم بعد ذلك في عملية لتشكيل الحبيبات (pelletizing process).

- ولتحقيق المزج الدقيق، ينبغي أن تؤخذ قبل ذلك عينات من كل مادة من مواد التلقيح الأولية لتحليل محتوى المعدن في كل مادة، بما في ذلك الشوائب مثل الزئبق. وينبغي التخطيط لعمليات المزج عن طريق الجمع بين نسب ملائمة من مواد التلقيح الأولية بناءً على تلك النتائج. ويمكن استخدام منشآت المزج، وأجهزة قياس تدفق الكميات بنظام قياس فقدان الوزن، وأجهزة قياس الوزن على أحزمة النقل، وتتبع الكميات المحملة من أجل التوصل إلى أمزجة دقيقة.

٣-٢-٤ انبعاثات الزئبق إلى الغلاف الجوي

ينبغي تطبيق تدابير واستراتيجيات الضبط للتقليل من توليد انبعاثات الزئبق. ويجب توخي الحرص في تصميم وحدات تنظيف الغاز، بما في ذلك المداخن، لكي تناسب الظروف الجوية والطبوغرافية والبيئية للمواقع. والانبعاثات الهاربة من المصادر الثابتة التي يمكن احتجازها بشكل معقول باستخدام نظم التغطية والتطويق المناسب للوحدات ينبغي أن تحتجز بهذه الوسائل. وتشمل توصيات التنفيذ ما يلي:

- تحقيق التصميم الأمثل للعملية من أجل تقليل انبعاث الغازات الناجمة ومحتوى الملوثات فيها؛ والتصميم لتشغيل المستمر عندما يكون ذلك مجدياً تقنياً واقتصادياً؛
- وتشغيل الأفران وأجهزة التفاعل تحت ضغط سلبي وتطبيق تقنيات مناسبة لتنظيف الغاز على الغازات المستخرجة؛
- وإحكام إغلاق الأفران وأجهزة التفاعل، والتعديل التحديثي للأفران القائمة بأقصى قدر ممكن من الإغلاق المحكم؛
- وتنفيذ رصد المعايير لمنع تكثف غازات الصرف وتآكل الأنابيب بفعل الرطوبة الزائدة؛
- وتنفيذ برنامج لكشف التسرب وإصلاح التسربات حسب الاقتضاء؛
- وتطبيق الإجراءات التصحيحية على أي معدات تنتج عنها كمية كبيرة من الانبعاثات الهاربة.

٤-٢-٤ ضبط المواد الجسيمية

يعد ضبط المواد الجسيمية مهماً لأن المواد الجسيمية تحمل الزئبق المرتبط بالجسيمات. وينبغي النظر في أساليب ضبط المواد الجسيمية أثناء مرحلة التخطيط، كما ينبغي رصد انبعاثاتها. وينبغي للمنشآت الصناعية أن تنفذ تحسينات مستمرة في أساليب ضبط المواد الجسيمية خلال العمليات بما في ذلك ما يلي:

- تحديد المصادر المحتملة للمواد الجسيمية وفحصها بانتظام؛
- واستخدام نظم انتزاع الغبار المجهزة بضوابط مناسبة للجسيمات من أجل إزالة الجسيمات من مناطق العمل والمباني؛
- واستخدام حيزات الضغط السلبي على الوحدات التي تولد مواد جسيمية من أجل منع فيضان الغازات الحاملة للجسيمات؛
- وتركيب حاويات المرشحات الكيسية المؤلفة من أكثر من حجرة لإتاحة الفحص والصيانة خلال العمليات؛
- وصيانة أداء حاويات المرشحات الكيسية عن طريق الفحص والاستبدال الدوري لأكياس الترشيح.

٤-٢-٥ إدارة النفايات الناتجة عن ضبط تلوث الهواء والتخلص منها على نحو سليم بيئياً

من أجل منع الانبعاثات غير الضرورية، ينبغي أن تستخدم المنشآت الصناعية النهج التالية من أجل إدارة البقايا المتولدة من أجهزة ضبط تلوث الهواء والتخلص منها على النحو المناسب:

- التخزين والنقل السليم لنفايات الزئبق الناجمة عن أجهزة ضبط تلوث الهواء (مثلاً الزئبق النقي السائل المستعاد من المعوجات أو كلوريد الزئبق (أحادي التكافؤ) الناتج من عملية بوليدين-نورزينك)؛
- وعدم التجارة في الزئبق إلا على نحو يتوافق مع المادة ٣ من الاتفاقية؛
- والتخلص من نفايات الزئبق على نحو يتفق مع المواد الأخرى ذات الصلة من الاتفاقية.

٥ - رصد الزئبق في عمليات الصهر والتحميص المستخدمة في إنتاج المعادن غير الحديدية

تناقش الجوانب العامة والشاملة للفحص والرصد والإبلاغ في الفصل التمهيدي من هذه الوثيقة. وستجري في هذا القسم مناقشة الجوانب المحددة لرصد انبعاثات الزئبق التي تكون مركزية بالنسبة لعمليات تصنيع المعادن غير الحديدية.

وفي قطاع صهر وتحميص المعادن غير الحديدية، تشمل مواد المدخلات التي قد تحتوي على الزئبق المركّزات والعوامل الصهورة والوقود. وبالإضافة إلى المعادن المصنّعة، قد تشمل مسارات الإنتاج مساحيق المعادن، والمركبات المعدنية، وحمض الكبريتيك، والأسمدة. وقد تشمل مسارات الإنتاج الثانوية أنواع الخبث، والكالوميل (كلوريد الزئبق (أحادي التكافؤ) Hg_2Cl_2)، وقد تشمل مسارات النفايات أنواع الخبث والكالوميل والحمأة والترسبات الناتجة عن معدات التحكم بالتلوث.

ويمكن أن تتفاوت انبعاثات الزئبق بدرجة كبيرة في المنشأة الواحدة بمرور الزمن أو بين المنشآت المختلفة التي تقوم بعمليات مماثلة، وذلك بسبب تباين محتوى الزئبق في المواد الداخلة في العملية. وقد تتغير تركيزات الزئبق بسرعة في المركّزات أو الوقود أو المدخلات الأخرى مثل الخردة المعدنية. وعند إجراء عمليات أخذ العينات، يجب توخي الحرص، قدر الإمكان، من أجل ضمان تنفيذ هذه العملية في حالة مستقرة ممثلة لظروف التشغيل العادية، أن تكون تركيزات الزئبق في مسار المدخلات ممثلة لمدخلات التلقيم العادية، وأنه يجري تقليل الانبعاثات الهاربة إلى أدنى حد ممكن. فإذا كانت ظروف التشغيل غير نمطية، قد يعطي استقراء أخذ العينات نتائج تحتوي على هامش خطأ كبير.

ونظراً لتنوع العمليات المستخدمة في قطاع صهر وتحميص الفلزات غير الحديدية، يمكن أن توجد تباينات كبيرة في العمليات، حتى فيما بين المرافق التي تقوم بتصنيع نفس المنتجات المعدنية. وينبغي أن تؤخذ الخصائص المحددة لكل موقع في الاعتبار عند اختيار أنسب طريقة للرصد وعند التخطيط لحملة أخذ العينات. وبالإضافة إلى جمع البيانات المتعلقة بانبعاثات الزئبق، يوصى أيضاً بتوثيق معدلات إنتاج المعدن لإتاحة حساب انبعاثات الزئبق لكل طن من المعدن.

١-٥ أساليب القياس المباشر

١-١-٥ أخذ العينات بواسطة جهاز الارتطام

كان أخذ العينات بالارتطام مع مواد كيميائية ولا يزال هو أسلوب أخذ العينات التقليدي المستخدم لقياس تركيزات الزئبق في الغاز ضمن قطاع صهر وتحميص المعادن غير الحديدية. ونظراً لتعقيد هذه الطريقة وتكلفتها، يستخدم أخذ العينات بالارتطام على نحو أقل تواتراً، مثلاً فصلياً أو سنوياً. وبينما يقدم هذا الأسلوب عادة بيانات موثوقة خلال فترة أخذ العينات، فقد لا تكون النتائج ممثلة للواقع إذا كانت تركيزات الزئبق متباينة خلال فترة زمنية قصيرة.

٢-١-٥ مصائد المواد الماصة ونظم الرصد القائمة عليها

في قطاع صهر المعادن غير الحديدية، يمكن أن يستخدم نظام الرصد القائم على المواد الماصة بشكل فعال من أجل تقديم البيانات عن تركيزات الزئبق في غازات العادم خلال فترة من الزمن. وعلى الرغم من أن هذه الطريقة لا تقدم النتائج في الوقت الحقيقي، فالبيانات التي يتم الحصول عليها ستشير إلى الأداء التشغيلي خلال الفترة الزمنية المحددة السابقة. وبهذا الأسلوب القائم على حلقة التأثيرات المرتدة، يمكن إجراء التعديلات على العملية حسب الحاجة.

ويكون الرصد القائم على مصيدة المادة الماصة فعالاً في تيارات الغاز التي تحتوي على تركيز منخفض من المواد الجسيمية. وفي منشأة لتصنيع المعادن غير الحديدية، تكون المدخنة النهائية عادة هي المكان المناسب لتكوين نظام الرصد القائم على مصيدة المادة الماصة. ففي هذه المرحلة، ينبغي أن يحتوي الغاز المنظف الخارج من المدخنة على مستويات منخفضة من الزئبق والمواد الجسيمية والملوثات الأخرى.

٣-١-٥ نظم الرصد المستمر للانبعاثات

لا يجري بعد استخدام نظم الرصد المستمر للانبعاثات على نطاق واسع في قطاع صهر وتحميص المعادن غير الحديدية. ويشيع استخدامها لقياس المستويات المنخفضة من تركيز الزئبق في معدلات تدفق عالية للعدم، مثلما هو الحال في صناعة الطاقة من احتراق الفحم. وبالمقارنة، تصدر الكثير من مرافق صهر المعادن غير الحديدية انبعاثات من غازات أكثر تعقيداً من الناحية الكيميائية، مع معدلات تدفق أقل ومستويات أعلى من تركيز الزئبق في تيارات غازية أكثر تعقيداً.

وفي المنشآت التي تعمل فيها مداخن متعددة، قد يكون من الأنسب تركيب نظم الرصد المستمر للانبعاثات على المدخنة النهائية لرصد الانبعاثات في البيئة. وفي تلك المرحلة النهائية من العملية، ينبغي أن يكون الغاز قد خضع لعمليات التنظيف فتكون معظم ملوثات الهواء الموجودة في غاز المدخنة قد أزيلت بالفعل، مثلاً عن طريق أجهزة ضبط المواد الجسيمية وفي مراحل إزالة الزئبق وتصنيع الحمض. وبالتالي فالبيانات التي يتم الحصول عليها ستقدم بيانات إرشادية في الزمن الحقيقي عن الأداء الفعلي. وإذا كانت كمية الزئبق الموجودة في تيار مدخلات المواد الأولية معروفة، يمكن حساب كفاءة إزالة الزئبق باستخدام بيانات الرصد المستمر للانبعاثات.

٢-٥ الأساليب غير المباشرة للقياس

١-٢-٥ توازن الكتلة

على الرغم من أن توازن الكتلة يقدم بيانات لفترة زمنية محددة وليس على أساس الوقت الحقيقي، فمن الممكن أن يكون مفيداً كأداة إرشادية لتتبع كفاءة الأداء التشغيلي وكفاءة إزالة الزئبق، بشرط أن يكون محتوى الزئبق في مواد المدخلات الأولية والمنتجات وغيرها من التيارات الأساسية كافياً لإتاحة الحساب بموثوقية.

وينبغي لممارسة التشغيل العادية في منشأة لصهر وتنقية المعادن غير الحديدية أن تتضمن بالفعل عمليات منتظمة لأخذ العينات والاختبار (التحليل الكيميائي) لمحتويات المعادن في مواد المدخلات الأولية والمنتجات وغيرها من التيارات الأساسية، من أجل كفاءة التحكم الفعال بالعملية. وبإدراج الزئبق كمادة يراد تحليلها في هذه التيارات تنتج بيانات أساسية لاستخدامها في توازن الكتلة. ويمكن الحصول من موارد الوقود على المعلومات المتعلقة بالمحتوى الكيميائي للوقود الذي تم شراؤه. وبالنظر إلى أن منشأة الصهر أو التنقية تنفذ في العادة تحليلاً اختبارياً محلياً لمحتوى المعدن في المدخلات والمخرجات الرئيسية بصفة يومية، ينبغي أن تنظر المنشأة في تنفيذ اختباراتها الخاصة للزئبق بتكلفة إضافية.

ولحساب الانبعاثات السنوية للزئبق الصادرة عن أحد المنشآت باستخدام توازن الكتلة، ينبغي تتبع وتسجيل معدلات تدفق الكتلة من جميع التيارات على مدى عام كامل، الأمر الذي يستلزم مستويات عالية من الجهد. وبالإضافة إلى ذلك، ينبغي تتبع جميع التيارات التي يمكن أن يتراكم الزئبق فيها. ويمكن حساب كتلة الزئبق عن طريق ضرب تركيز الزئبق في معدل تدفق كتلة التيار والفترة الزمنية (سنة واحدة مثلاً).

ويسبب التباين الأساسي في قياسات تدفقات كتلة الزئبق، وقياسات تراكم الزئبق، والتدفقات المتعددة للمدخلات والمخرجات، قد يصعب التوصل إلى رقم نهائي مؤكد لتوازن الكتلة. وبالنسبة للعمليات المضبوطة جيداً حيث لا يمثل معدل انبعاث الزئبق سوى جزءاً بسيطاً من معدل مدخلات الزئبق، تكون القياسات المباشرة لتيارات العادم عن طريق أخذ العينات أنسب من استكمال حساب توازن الكتلة.

٢-٢-٥ النظم التنبؤية لرصد الانبعاثات

قد لا تكون النظم التنبؤية لرصد الانبعاثات طريقة موثوقة لرصد انبعاثات الزئبق في قطاع صهر وتنقية المعادن غير الحديدية. ففي هذا القطاع قد يتغير محتوى الزئبق في المواد الأولية المدخلة إلى الأفران بشكل كبير خلال فترات زمنية قصيرة، تبعاً للمركبات

التي تتم معالجتها. وحتى في المرافق التي تعالج المركبات الواردة من منجم مخصص، قد يتباين محتوى الزئبق بشكل كبير حسب الموقع الذي يتم تعدينه في كتلة الركاز. ونتيجة لذلك، قد لا يمكن الحصول على نتائج ممثلة للواقع بإنشاء الروابط بين البارامترات البديلة وانبعثات الزئبق. ولبحث الأخذ بالنظم التنبؤية لرصد الانبعثات، ينبغي أولاً إجراء تحليل دقيق للوقوف على مدى عدم الموثوقية الذي تنطوي عليه هذه الطريقة في كل حالة على حدة.

٣-٢-٥ عوامل الانبعث

بالنسبة لقطاع صهر وتنقية المعادن غير الحديدية، قد تتباين الانبعثات بدرجة كبيرة في المنشأة الواحدة على مر الزمن، أو بين المنشآت المتعددة التي تقوم بعمليات متماثلة، وذلك بسبب تغير محتوى الزئبق في تيارات المدخلات. وبناء على ذلك، فعند استخدام عوامل الانبعث، قد تتضمن الانبعثات المقدرة هامشاً كبيراً للخطأ. وبصفة خاصة، ينبغي أن تعتبر التقديرات التي تستخدم عوامل الانبعث العامة المنشورة إشارة تقديرية إلى مستويات الانبعثات. وسيكون أحد النهج البديلة هو وضع عوامل انبعث خاصة بموقع محدد بناء على بيانات فعلية من أخذ العينات وعلى المعلومات المتعلقة بنشاط المصدر.

- UNEP (2008). Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment, Arctic Monitoring and Assessment Programme/UNEP Chemicals Branch, 159 pp.
- UNEP (2013). Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013, Arctic Monitoring and Assessment Programme/UNEP Chemicals Branch, vi + 263 pp.
- BREF NFM (2014). Best Available Techniques Reference Document for the Non Ferrous Metals Industries (BREF NFM), available at: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/NFM_Final_Draft_10_2014.pdf, IPTS, Joint Research Centre (JRC), European Commission, Seville, Spain, 1242 pp.
- Coleman, R.T.J. (1978). Emerging Technology in the Primary Copper Industry. Prepared for the U.S, EPA; data2.collectionscanada.ca/pdf/pdf001/p000001003.pdf; accessed on 7 April 2014, Habashi, F. (1978). Metallurgical plants: how mercury pollution is abated. *Environmental Science & Technology* 12, pp. 1372–1376.
- Holmström, Å., L. Hedström, A. Målsnes (2012). Gas Cleaning Technologies in Metal Smelters with Focus on Mercury. Sino-Swedish Cooperation on Capacity Building for Mercury Control and Management in China (2012–2013). Outotec.
- Hultbom, K. B. (2003). Industrially proven methods for mercury removal from gases. EPD congress, The Minerals, Metals & Materials Society (TMS).
- Krumins T. , C. Stunguris, L. Zunti and S Blaskovich (2013). Mercury removal from pressure oxidation vent gas at Newmont Mining Corporation's Twin Creek Facility. *Proceedings of Materials Science and Technology*. Montreal QC; The Minerals, Metals and Materials Society, 129-144
- Morgan, S. (1968). The Place of the Imperial Smelting Process in Non-ferrous Metallurgy.
- Reimers, J. H., et al. (1976). A review of Process Technology in Gases in the Nonferrous Metallurgical Industry for the Air Pollution Control Directorate, nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91018I2W.txt; accessed on 7 April 2014, Jan H. Reimers and Associates Limited, Metallurgical Consulting Engineers, Oakville, Ontario, Canada.
- Schulze, A. (2009). Hugo Petersen – Competence in gas cleaning systems downstream nonferrous metallurgical plants. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy – Sulphur and Sulphuric Acid Conference 2009, pp. 59–76.
- Sundström, O. (1975). Mercury in Sulfuric Acid: Bolden Process Can Control Hg Levels during or after Manufacture. *Sulfur* No. 116, The British Sulfur Corp., January–February 1975: pp. 37–43.
- Takaoka, M., D. Hamaguchi, R. Shinmura, T. Sekiguchi, H. Tokuchi (2012). Removal of mercury and sulfuric acid production in ISP zinc smelting. International Conference on Mercury as a Global Pollutant, Abstract 16-PP-107.
- UNECE (2013). Guidance document on best available techniques for controlling emissions of heavy metals and their compounds from the source categories listed in annex II to the Protocol on Heavy Metals, UN Economic Commission for Europe: Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, 33 pp.

الفصل السادس

مرافق حرق النفايات

موجز

لحددت مرافق حرق النفايات في اتفاقية ميناماتا على أنها واحدة من المصادر الصناعية الرئيسية لانبعاثات الزئبق. وأدرجت هذه الفئة في المرفق دال بالاتفاقية.

وتشمل الأعراض المحتملة لحرق النفايات خفض كيميائياً أو استعادة الطاقة منها أو تدميرها أو على الأقل، التقليل إلى أدنى حد ممكن من المكونات الخطرة، والتطهير واستعادة بعض المخلفات.

ولتحقيق أفضل النتائج لحماية البيئة ككل فإن من الضروري تنسيق عملية حرق النفايات مع أنشطة المراحل الأولى (مثلاً تقنيات إدارة النفايات) وأنشطة المراحل النهائية (مثل التخلص من المخلفات الصلبة لحرق النفايات).

وعند النظر في مقترحات لإنشاء أفران جديدة لحرق النفايات فإنه يتعين إيلاء الاعتبار لبدائل مثل الأنشطة الرامية للتقليل إلى أدنى حد ممكن من توليد النفايات، بما في ذلك استعادة الموارد وإعادة استخدامها وإعادة تدويرها وفصل النفايات وتعزيز المنتجات التي لا تولد الزئبق أو تساهم بكميات أقل منه في مسارات النفايات. كذلك يتعين إيلاء الاعتبار لتُهَج تمنع دخول الزئبق إلى النفايات التي سيتم حرقها.

ويتطلب التصميم والتشغيل السليمان بيعاً لأفران حرق النفايات استخدام أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية معاً، وهما أمران متداخلان إلى حد ما، بهدف منع انبعاثات المواد الضارة مثل الزئبق أو التقليل منها إلى أدنى حد ممكن.

وتشمل أفضل الممارسات البيئية لحرق النفايات اتخاذ الإجراءات الملائمة خارج الموقع مثل الإدارة العامة للنفايات ودراسة الآثار البيئية لتحديد الموقع واتخاذ الإجراءات في الموقع مثل فحص النفايات والمناولة الجيدة للنفايات وتشغيل الفرن والممارسات المتعلقة بالإدارة ومناولة المخلفات.

أما أفضل التقنيات المتاحة لحرق النفايات فتشمل الاختيار الجيد للموقع وإدخال النفايات والتحكم فيها وتقنيات الحرق ومعالجة غازات المدخن والمخلفات الصلبة والنفايات السائلة. ويمكن أن تشمل أفضل التقنيات المتاحة للتحكم في انبعاثات الزئبق من مرافق حرق النفايات أجهزة الشطف العالية الكفاءة مع إضافة مكونات في محلول جهاز الشطف، وأجهزة الشطف مع حقن المواد الكيميائية المحتوية على البروم داخل غرفة الاحتراق، أو حقن الكربون المنشط مع المرشح النسيجي. ويمكن، في حال وجود مستويات عالية من الزئبق في الغاز الخام، استخدام توليفة من التقنيات المذكورة أعلاه.

وتحدث إطلاقات الزئبق من أفران حرق النفايات الصلبة البلدية المصممة والمشغلة مع أخذ أفضل الممارسات البيئية وأفضل التقنيات المتاحة في الاعتبار، وذلك بصورة أساسية من خلال الرماد المتطاير ورماد القاع وكسب المرشح الناتج عن معالجة المياه العادمة. وبناءً على ذلك فإن من الأهمية بمكان توفير حيز تصريف آمن لهذه الأنواع من النفايات، وذلك مثلاً من خلال المعالجة المسبقة لها والتخلص النهائي منها في مدافن نفايات مخصصة تُصمَّم وتشغل بأفضل التقنيات المتاحة.

وباستخدام توليفة مناسبة من التدابير الأولية والثانوية المشار إليها في هذا الفصل يمكن تحقيق انبعاثات الزئبق إلى الهواء بمقادير لا تزيد عن ١ إلى ١٠ ميكروغرام/م^٣ (عند أكسجين بنسبة ١١ في المائة) وذلك باستخدام أفضل التقنيات المتاحة. وتجدد الإشارة كذلك إلى أنه في ظروف التشغيل الطبيعية يمكن تحقيق انبعاثات أقل من ذلك المستوى باستخدام منشأة حرق نفايات جيدة التصميم.

جدول المحتويات

١٢٦.....	مقدمة.....	-١
١٢٦.....	العمليات المستخدمة في مرافق حرق النفايات، بما في ذلك النظر في المواد المدخلة وسلوك الزئبق في هذه العملية.....	-٢
١٢٦.....	توصيف عام للنفايات التي يمكن أن تنتج عنها انبعاثات زئبق أو مركبات زئبق عند حرقها.....	١-٢
١٢٦.....	١-١-٢ التسلسل الهرمي للنفايات.....	
١٢٧.....	٢-١-٢ مدخل إلى أنواع النفايات المختلفة فيما يتعلق بانبعاثات الزئبق من مرافق حرق النفايات.....	
١٢٩.....	عملية الحرق.....	٢-٢
١٢٩.....	١-٢-٢ مدخل إلى تقنية الحرق العام.....	
١٣١.....	٢-٢-٢ المعالجة المسبقة للنفايات من أجل حرقها.....	
١٣٢.....	٣-٢-٢ توصيف أنواع أفران حرق النفايات.....	
١٣٦.....	٤-٢-٢ حرق مسارات نفايات محددة.....	
١٤١.....	تقنيات التحكم في الانبعاثات.....	-٣
١٤١.....	١-٣ تقنيات إزالة الغبار (الجسيمات الدقيقة العالقة).....	
١٤٢.....	٢-٣ تقنيات التنظيف الرطب.....	
١٤٣.....	٣-٣ حقن الكربون المنشط.....	
١٤٥.....	٤-٣ إضافة البروم إلى المرجل.....	
١٤٦.....	٥-٣ المرشحات ذات القاعدة الثابتة.....	
١٤٧.....	٦-٣ أمثلة توضيحية لقيم الانبعاثات المنجزة بالتقنيات المبينة أعلاه.....	
١٤٩.....	٧-٣ استخدام المخلفات الصلبة لعملية الحرق والتخلص منها.....	
١٤٩.....	١-٧-٣ معالجة المخلفات الصلبة لغازات المداخن.....	
١٥٠.....	٢-٧-٣ التثبيت والتصليد.....	
١٥٠.....	٣-٧-٣ استخدام رماد القاع والرماد المتطاير.....	
١٥٠.....	٤-٧-٣ التخلص النهائي من المخلفات.....	
١٥١.....	٨-٣ تقنيات المعالجة البديلة لمسارات النفايات التي يمكن أن تولد عند حرقها انبعاثات للزئبق ومركبات الزئبق.....	
١٥١.....	أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لمرافق حرق النفايات.....	
١٥١.....	٩-٣ مدخل إلى أفضل التقنيات المتاحة لحرق النفايات.....	
١٥٢.....	١٠-٣ المعالجة المسبقة للنفايات قبل حرقها.....	
١٥٢.....	١١-٣ أفضل التقنيات المتاحة لمدخلات النفايات والتحكم فيها.....	
١٥٢.....	١٢-٣ أفضل التقنيات المتاحة لحرق النفايات.....	
١٥٣.....	١-١٢-٣ اشتراطات عامة لتقنيات الحرق.....	

١٥٣	تقنيات حرق النفايات الصلبة البلدية.....	٢-١٢-٣	
١٥٤	تقنيات حرق النفايات الخطرة.....	٣-١٢-٣	
١٥٤	تقنيات حرق حمأة مياه المجارى.....	٤-١٢-٣	
١٥٤	حرق النفايات الطبية.....	٥-١٢-٣	
١٥٥	أفضل التقنيات المتاحة لمعالجة غازات المداخن.....	١٣-٣	
١٥٦	تطوير وتحسين تقنيات المعالجة القائمة.....	١-١٣-٣	
١٥٧	مستويات الأداء المرتبطة باستخدام أفضل التقنيات المتاحة.....	٢-١٣-٣	
١٥٧	مدخل إلى أفضل الممارسات البيئية.....	١٤-٣	
١٥٨	ممارسات إدارة النفايات.....	١-١٤-٣	
١٦١	الوقاية من مخاطر الحرائق.....	٢-١٤-٣	
١٦٣	تقنيات رصد الزئبق.....		-٤
١٦٣	الطرق المباشرة.....	١-٤	
١٦٤	الطرق غير المباشرة.....	٢-٤	
١٦٥	التقنيات الأكثر ملاءمة للرصد في قطاع حرق النفايات.....	٣-٤	
١٦٧	المراجع.....		-٥

١ - مقدمة

يتعلق هذا القسم بالحرق المخصص للنفايات فقط ولا يتعلق بالأوضاع الأخرى التي تتم فيها معالجة النفايات حرارياً، مثلاً، عمليات الحرق المشترك في أفران الإسمنت ومنشآت الحرق الكبيرة، التي يتم تناولها في الأقسام المتعلقة بهذه العمليات.

ويعرف الحرق المفتوح على أنه حرق أي نوع من النفايات في الهواء الطلق أو في مدافن قمامة مفتوحة، وفي أجهزة حرق تتراوح مما يعرف بـ "براميل الحرق" وأفران الحرق المشيدة محلياً والتي تفتقر للتحكم في الملوثات، إلى الأفران الصغيرة التي تستخدم لحرق النفايات الطبية ولا تسمح بالحرق الكامل. إن الحرق المفتوح لنفايات الرئبق والمنتجات المضاد إليها الرئبق يساهم بصورة كبيرة في حدوث إطلاقات الرئبق من المنتجات.

وبناء على ذلك فإن الحرق المفتوح يعتبر "ممارسة بيئية سيئة" ويتعين عدم التشجيع عليه نظراً لأنه يمكن أن يؤدي إلى انبعاث مواد سامة إلى البيئة. ولا تتناول وثيقة التوجيهات هذه مزيداً من التفاصيل عن ممارسات الحرق المفتوح والحرق في أجهزة حرق بسيطة التشييد.

ويتطير الرئبق في عملية الحرق ولذلك يتعين اتخاذ إجراءات معينة قبل الحرق وأثناءه وبعده للتقليل من هذه الانبعاثات. والتقنيات الأساسية الوحيدة ذات الصلة لمنع انبعاثات الرئبق إلى الهواء قبل الحرق هي التقنيات التي تمنع أو تتحكم، إذا أمكن، في إدخال الرئبق في النفايات.

وفيما يتعلق بأفران الحرق القائمة فإنه يتعين على الأطراف تنفيذ تدبير أو أكثر من التدابير المدرجة في الفقرة ٥ من المادة ٨ من الاتفاقية. ويجوز للطرف أن يطبق نفس التدابير على جميع المصادر القائمة ذات الصلة، كما يجوز له أن يعتمد تدابير مختلفة فيما يتعلق بفئات المصادر المختلفة. وينبغي أن يكون هدف التدابير التي يطبقها الطرف تحقيق تقدم معقول على صعيد خفض الانبعاثات مع مرور الوقت. ويمكن أن يشمل ذلك استخدام أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية واستراتيجية لمكافحة العديد من الملوثات من شأنها أن تحقق منافع مشتركة لضبط الانبعاثات أو تدابير أخرى ممكنة، على أن يكون الهدف هو تحقيق تقدم معقول في خفض الانبعاثات مع مرور الزمن.

أما فيما يتعلق بأفران الحرق الجديدة، عندما يبدأ التشييد أو يجري إدخال تعديلات أساسية قبل سنة على الأقل من تاريخ دخول الاتفاقية حيز النفاذ بالنسبة للطرف، فإنه يتعين على الأطراف استخدام أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية للتحكم في الانبعاثات ومنعها، إذا أمكن.

٢- العمليات المستخدمة في مرافق حرق النفايات، بما في ذلك النظر في المواد المدخلة وسلوك الرئبق في هذه العملية

١-٢ توصيف عام للنفايات التي يمكن أن تنتج عنها انبعاثات رئبق أو مركبات رئبق عند حرقها

١-١-٢ التسلسل الهرمي للنفايات

يبين التسلسل الهرمي تطور المادة أو المنتج خلال المراحل المتتابعة لإدارة النفايات، وهو يمثل الجزء الأخير من دورة كل منتج. والهدف الأساسي من التسلسل الهرمي للنفايات هو استخلاص أكبر قدر من المنافع العملية من المواد وتوليد أقل قدر ممكن من النفايات. ومن شأن التطبيق الجيد للتسلسل الهرمي للنفايات أن تكون له العديد من الفوائد: فهو يمكن أن يساعد في منع انبعاثات الرئبق من النفايات التي قد تحتوي على الرئبق أو الملوثة به، وأن يخفض إنتاج غازات الاحتباس الحراري وأن يخفض الملوثات الجوية الأخرى وأن يوفر الطاقة وأن يحفظ الموارد وأن يوجد فرص العمل وأن يحفز تطوير التكنولوجيات الخضراء. ويشتمل التسلسل الهرمي للنفايات على المراحل التالية:

- **المنع:** إن منع تكون النفايات هو أكثر النقاط أهميةً في التسلسل الهرمي للنفايات، فالمنع أو الخفض يقللان إلى أدنى حد ممكن من توليد نواتج النفايات في المقام الأول. ويقود المنع عادةً إلى أدنى قدر من التكاليف البيئية والاقتصادية خلال دورة المادة نظراً لأنه لا يستوجب جمع المواد أو معالجتها. وبذات القدر فإن المنع يؤدي أيضاً إلى تحقيق فوائد كبيرة من حيث كفاءات الإنتاج واستخدام الموارد، حيث ينطوي على استخدام مواد أقل في التصميم والتصنيع ومحاولة المحافظة على المنتجات لفترات أطول واستخدام مواد أقل خطورةً.
- **إعادة الاستخدام:** تمثل إعادة الاستخدام المباشر للاستخدامات البديلة للمواد من مسار النفايات الخيار التالي الأكثر ملاءمةً، وهو أي عملية تستخدم فيها مرة أخرى المنتجات أو المواد التي لا تشكل نفايات لنفس الأغراض المخصصة لها. ويتطلب إعادة استخدام المواد من مسار النفايات في الغالب الجمع مع المعالجة الطفيفة أو بدونها، ويشتمل على فحص وتنظيف وإصلاح وترميم بنود أو قطع غيار كاملة. ويتعين عدم إعادة استخدام المواد الملوثة بالزئبق.
- **إعادة التدوير:** تمثل إعادة التدوير الأولية التالية، وتنطبق على أي نشاط يتضمن جمع أشياء مستعملة أو معاد استعمالها أو غير مستعملة يمكن اعتبارها ما لم يحدث ذلك نفايات. وتشمل إعادة التدوير فرز ومعالجة المنتجات القابلة لإعادة التدوير وتحويلها إلى مواد أولية ومن ثم إعادة تصنيع هذه المواد الأولية لإنتاج منتجات جديدة.
- **الاستعادة:** تنقسم استعادة النفايات إلى عدة فئات: استعادة المواد واستعادة الطاقة. والخيار المفضل هو الخيار الأفضل للبيئة وصحة الإنسان. إن استعادة المواد هي نشاط مفضل في أغلب الحالات ويشتمل على أنشطة من قبيل إعادة التدوير وإنتاج السماد العضوي. وبوجه عام تتطلب أنشطة الإدارة هذه نظاماً لجمع النفايات وطريقة لمعالجة المواد وتحويلها إلى منتجات جديدة. أما استعادة الطاقة، ومن ذلك الحرق، فهي في العادة الخيار الأقل تفضيلاً. ويمكن تحويل النفايات غير القابلة لإعادة التدوير إلى حرارة وكهرباء ووقود يمكن الاستفادة منه من خلال العديد من العمليات، بما في ذلك التحلل اللاهوائي والتحويل إلى غاز والتحلل الحراري.
- **التخلص:** التخلص هو الملاذ الأخير ولا يُنظر في اللجوء إلى التخلص إلا بعد استكشاف كل الاحتمالات الأخرى. والتخلص هو أي عملية تشتمل على رمي النفايات وحرقها دون استعادة الطاقة. وقد تكون هناك حاجة للمعالجة المسبقة قبل التخلص النهائي من النفايات ويعتمد ذلك على نوع النفايات. ويمثل طمر النفايات الشكل الأكثر شيوعاً للتخلص من النفايات والخيار النهائي للتخلص.

٢-١-٢ مدخل إلى أنواع النفايات المختلفة فيما يتعلق بانبعاثات الزئبق من مرافق حرق النفايات

٢-١-٢-١-٢ النفايات البلدية

النفايات الصلبة البلدية، التي تعرف على نحو أكثر شيوعاً بالأوساخ أو القمامة، تتكون من الأشياء اليومية التي تستخدم ثم تُرمى مثل مواد تغليف المنتجات وقصاصات الحشائش والأثاث والثياب والقوارير والنفايات الغذائية والصحف والأجهزة والدهانات والبطاريات وأشياء أخرى لا حصر لها. وتأتي هذه الأشياء من المنازل والمدارس والمستشفيات والشركات التجارية والمنشآت الأخرى. ويمكن تقسيم صناعة النفايات الصلبة البلدية إلى أربعة مكونات هي: إعادة التدوير، وإنتاج السماد العضوي، والطر، وتحويل النفايات إلى طاقة عن طريق الحرق. والخطوات الأولية في دورة النفايات هي التوليد، والجمع، والفرز والفصل، والنقل، والتخلص. ويحتوي عدد من النفايات البلدية على مواد خطرة إضافةً إلى مواد كيميائية عضوية مثل مبيدات الآفات. ويمكن أن تحتوي العقاقير التقليدية ومستحضرات التجميل والأشياء الأخرى على مواد خطرة أيضاً.

ومن مصادر الزئبق في النفايات الصلبة البلدية ما يلي: البطاريات المنزلية ومصابيح الإنارة الكهربائية ومخلفات الدهانات ومقاييس الحرارة (الثيرموترات) والثيرموستات والأصبغ واستخدامات طب الأسنان والطلاءات الورقية الخاصة ومفاتيح الإنارة

الزئبقية وبطاريات الأفلام وغيرها. وتتراوح تراكيز الزئبق في النفايات الصلبة البلدية عادةً من ٠,١٥ إلى ٢ ملغم/كغم (Muenhor et al. 2009).

٢-٢-١-٢ النفايات الخطرة

النفايات الخطرة هي النفايات التي لها القدرة على الإضرار بصحة الإنسان والبيئة، ولذلك يتعين إدارتها بطريقة سليمة بيئياً. ويمكن أن تكون النفايات الخطرة من السوائل أو المواد الصلبة أو الغازات أو الحمّات. ويمكن رمي هذه النفايات مع منتجات تجارية مثل سائل التنظيف أو مبيدات الآفات، أو مع المنتجات الثانوية لعمليات التصنيع. ويمكن الحصول من الفصل الثاني من المبادئ التوجيهية التقنية لاتفاقية بازل على توجيهات ومعلومات إضافية عن النفايات التي تعتبر خطرة، إضافةً إلى نطاق نفايات الزئبق التي تشملها تلك الاتفاقية (اتفاقية بازل، ٢٠١٥).

٣-٢-١-٢ النفايات من المعدات الكهربائية والإلكترونية

يمكن أن تحتوي المعدات الكهربائية والإلكترونية على الزئبق إضافةً إلى مواد أخرى خطرة. وغالباً ما تُجمع النفايات الكهربائية والإلكترونية بشكل منفصل ولا تُحرق في العادة بل تخضع لعمليات استعادة وإعادة تدوير - بيد أن هذه التوجيهات لا تتناول العمليات التي تهدف إلى استعادة المواد. ويمكن جمع المعدات الكهربائية والإلكترونية مع النفايات البلدية، وإذا عُرف أن هذه المعدات تحتوي على زئبق وتدخل في مسارات النفايات فإنه يتعين التعامل معها وفقاً للمادة ١١ من اتفاقية ميناماتا. بيد أن المعدات الكهربائية والإلكترونية تُحرق في بعض الأحيان مع النفايات البلدية ومن شأنها أن تطلق انبعاثات الزئبق.

٤-٢-١-٢ النفايات الطبية المحتوية على الزئبق أو الملوثة به

تُعرّف النفايات الطبية عموماً بأنها أي نفايات صلبة تتولد أثناء الفحص أو العلاج أو التلقيح للإنسان أو الحيوان، وفي البحوث المتعلقة بذلك أو عند إنتاج أو اختبار المواد البيولوجية. وتصنف منظمة الصحة العالمية النفايات الطبية ضمن الفئات التالية: النفايات الحادة والمعدية والباثولوجية والمشعة والصيدلانية وغيرها (في الغالب نفايات النظافة الصحية الناتجة في المستشفيات) (WHO, 2014, p. 4). ويمكن أن تتفاوت الفئات المحددة التي تصنف ضمنها النفايات الطبية باختلاف البلدان (فمثلاً المواد الحادة لا تصنف على أنها نفايات خطرة في كل البلدان). وكقاعدة عامة فإن ما يتراوح من ٧٥ إلى ٩٠ في المائة من النفايات التي تنتجها مرافق الرعاية الصحية هي نفايات عامة غير خطرة (غير معدية، غير خطرة) مقارنةً بالنفايات البلدية. وهناك فقط جزء صغير من نفايات الرعاية الصحية يعتبر خطراً ومن شأنه أن يقود إلى مخاطر صحية (Emmanuel, 2012).

ويمكن للنفايات الطبية الخطرة أن تؤثر على الإنسان بطرق غير معدية. ويشمل هذا النوع من النفايات المواد الحادة التي تُعرف عموماً على أنها الأشياء التي لها القدرة على ثقب الجلد أو تمزيقه ويمكن أن تشمل الإبر والحقن والمعدات الطبية المتخلص منها مثل المباحض والمشارط وأطباق الاستزراع والأجهزة الزجاجية الأخرى. وقد تشمل النفايات الطبية الخطرة أيضاً المواد الكيميائية. ويمكن أيضاً أن تعتبر بعض النفايات الطبية الخطرة نفايات معدية اعتماداً على استخدامها وتعرضها للأنسجة البشرية أو الحيوانية قبل رميها. وفي بعض الأحيان تكون النفايات الصيدلانية القديمة خطرة وقد تحتوي على الزئبق.

ويستخدم الزئبق بعدة طرق خاصة بالقطاع الطبي منها:

- الزئبق في أجهزة القياس: يوجد الزئبق في الكثير من أجهزة القياس الطبية الشائعة مثل أجهزة قياس ضغط الدم وأجهزة قياس درجة الحرارة (خصوصاً أجهزة قياس درجة حرارة الجسم ولكن أيضاً الأجهزة الأخرى) وفي عدد من الأجهزة المعدية المعوية مثل الأنابيب المعوية ذات الوزن الزائد وأنابيب توسيع المريء وأنابيب التغذية وأنابيب ميلر أبوت. وكما هو الحال في الأنواع الأخرى من الأجهزة فقد استخدم الزئبق بصورة تقليدية في هذه الأجهزة بسبب خواصه الفيزيائية الفريدة، بما في ذلك قدرته على تقديم قياسات عالية الدقة.

- الزئبق في بعض أنواع العقاقير التقليدية: قد تحتوي بعض العقاقير التقليدية على الزئبق رغم أن عدداً من الهيئات التنظيمية فرضت ضوابط على ذلك.
- الزئبق في ملاغم الأسنان: ملغم الأسنان المعروف باسم الـ "الحشوة الفضية" هو مادة فضية اللون تستخدم لحشو الأسنان التي يوجد بها تسوس. ويصنع ملغم الأسنان من جزأين متساويين تقريباً: الزئبق السائل ومسحوق يحتوي على الفضة والقصدير والنحاس والزنك ومعادن أخرى. وظل الملغم هو أحد أكثر حشوات الأسنان شيوعاً في الاستخدام. وفي حالة إحراق ملغم الأسنان يمكن أن ينبعث الزئبق إلى الهواء من مداخن الفرن.
- مركبات الزئبق في بعض المواد الحافظة ومواد التثبيت والكواشف المستخدمة في المستشفيات: تستخدم بعض مركبات الزئبق في شكل مواد حافظة في العقاقير والمنتجات الأخرى بما في ذلك اللقاحات.

٢-١-٢-٥ حمأة مياه المجاري

حمأة مياه المجاري هي منتج ثانوي مباشر لمعالجة مياه المجاري المنزلية في مرفق معالجة المياه العادمة. ويمكن لملغم الأسنان أن يساهم في زيادة كمية الزئبق في حمأة مياه المجاري في حال وضعت نفايات الملاجم في مسار المياه العادمة بدلاً من فصلها. ونظراً للعمليات الفيزيائية والكيميائية التي تنطوي عليها المعالجة فإن حمأة مياه المجاري تميل إلى تركيز المعادن الثقيلة مثل الزئبق والكاديوم والرصاص وغيرها وكذلك المركبات العضوية النزرة التي لا تتحلل بيولوجياً بسهولة إضافةً إلى الكائنات الحية التي قد تكون مسببة للأمراض (الفيروسات والبكتيريا وغيرها) الموجودة في المياه العادمة. وتتراوح المستويات النموذجية للزئبق في حمأة مياه المجاري من ٠,٦ إلى ٥٦ ملغم/كغم من الحمأة الجافة (Hisau; Lo, 1998). وأبلغ أيضاً عن تراكيز تتراوح من ١ إلى ٤ ملغم/كغم من المادة الجافة (Werther; Saenger 2000).

٢-١-٢-٦ الخشب الخردة

ينتج الخشب الخردة في مواقع إنشاء الهياكل الخشبية السكنية والتجارية وقد يشتمل على أشياء مثل أطر النوافذ المطلية بدهانات محتوية على الزئبق. وتنتج عمليات الهدم في العادة نفايات خشب تُجمع نتيجةً لطبيعتها غير المتناسقة مع المواد الأخرى وهي غير قابلة دوماً لإعادة الاستخدام. وإذا لم تكن الأخشاب ملوثة بمواد خطيرة مثل الزئبق (مثل أطر النوافذ المطلية بالدهانات المحتوية على الزئبق) فمن الممكن إعادة استخدامها، مثلاً في ألواح الخشب. أما الأخشاب الملوثة فقد تُحرق في منشأة حرق أو يُنخلص منها في مدافن قمامة مخصصة لهذا الغرض.

٢-١-٢-٧ النفايات الصناعية الشائعة

في بعض الأحيان تحرق النفايات الصناعية المحتوية على الزئبق أو الملوثة به، مثل الدهانات والمذيبات والبتروكيمياويات والكربون المنشط المستعمل، مع النفايات البلدية ويمكن أن تطلق بالتالي انبعاثات زئبق ومواد خطيرة أخرى.

٢-٢ عملية الحرق

٢-٢-١ مدخل إلى التقنية العامة للحرق

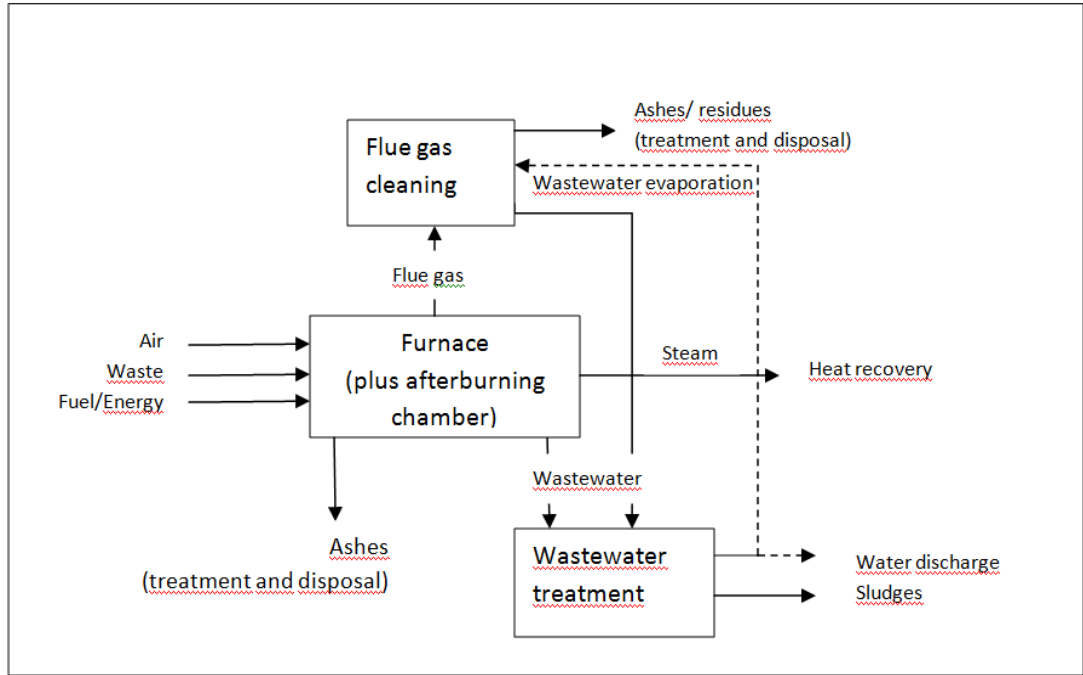
يستخدم الحرق لمعالجة نطاق واسع جداً من النفايات. وفي العادة يشكل الحرق في حد ذاته جزءاً واحداً فقط من نظام معقد لمعالجة النفايات يسمح في مجموعه بالإدارة الشاملة لمجموعة واسعة من النفايات التي تتشكل في المجتمع. والهدف من حرق النفايات هو معالجة النفايات بطريقة تقلل كميتها ومخاطرها مع احتجاز (وبالتالي تركيز) أو تدمير المواد التي قد تكون خطيرة والتي تنطلق أو قد تنطلق أثناء عملية الحرق. ومن شأن عملية الحرق أيضاً أن تسهل استعادة الطاقة والمعادن والمواد الكيميائية من النفايات.

وتوجد أفران الحرق في أشكال متعددة من أنواع الأفران وأحجامها وتوليفات المعالجات المستخدمة فيها ما قبل الحرق وما بعده. ويوجد كذلك تداخل كبير بين التصميمات المختارة لحرق النفايات الصلبة البلدية والنفايات الخطرة وحمأة مياه البحار.

وتُصمم أفران الحرق في العادة لتوفير احتراق كامل الأكسدة في درجات حرارة تتراوح عموماً من ٨٥٠م إلى ٢٠٠م. ويمكن أن يشمل هذا المدى درجات حرارة يحدث فيها التخمص والذوبان. ويشكل التغويز (التحويل إلى غاز بدون احتراق) والتحلل الحراري معالجات حرارية بديلة تحد من كمية هواء الاحتراق الأولي الضرورية لتحويل النفايات إلى غاز معالجة يمكن استخدامه كمادة وسيطة كيميائية أو حرقه مع استعادة الطاقة. ومقارنةً بالحرق فإن هذين النظامين لا يستخدمان كثيراً وقد أبلغ عن وجود صعوبات في التشغيل في بعض المنشآت. ويمكن أن تتميز منشآت حرق النفايات بالوظائف التالية: نقل النفايات والتخزين والمعالجة المسبقة والحرق واستعادة الطاقة وتنظيف غاز المداخن وإدارة المخلفات الصلبة ومعالجة المياه العادمة. وهناك تأثير كبير لطبيعة النفايات المدخلة على كيفية تصميم وتشغيل كل عنصر فيها.

إن النفايات هي بشكل عام مادة غير متجانسة إلى حد كبير وتتكون بصورة أساسية من مواد عضوية ومعادن وفلزات ومياه. وأثناء الحرق تتكون غازات المداخن التي تحتوي على أغلب طاقة الوقود المتاحة في شكل حرارة. وفي الاحتراق الكامل الأكسدة تكون المكونات الرئيسية لغاز المداخن هي بخار الماء والنتروجين وثاني أكسيد الكربون والأكسجين. واعتماداً على تركيبة المادة المحترقة وظروف الاحتراق ونظام تنظيف غاز المداخن المستخدم تنبعث غازات حمضية (أكاسيد الكبريت وأكاسيد النتروجين وكلوريد الهيدروجين) والجسيمات الدقيقة العالقة (بما في ذلك الفلزات المرتبطة بهذه الجسيمات) والفلزات المتطايرة، إضافةً إلى مجموعة واسعة من المركبات العضوية المتطايرة. واتضح أيضاً أن حرق النفايات الصلبة البلدية والنفايات الخطرة يشكل مصدراً محتملاً رئيسياً لانبعاثات الزئبق. ويمكن أن تكون الانبعاثات كبيرة جداً في حال عدم التحكم في المدخلات من المصادر المحتملة (النفايات المحتوية على الزئبق مثلاً في المنتجات ونفايات الأخشاب المعالجة) أو عدم إزالتها قبل الحرق. وتجدر الإشارة إلى أن الزئبق يوجد في الشكل العنصري والمتأكسد والجسمي في غاز المداخن. ويتميز الزئبق الموجود في الشكل المتأكسد - أساساً في شكل كلوريد زئبقيك في غازات مداخن أفران الحرق - بأنه سهل الإزالة عموماً مقارنةً بالزئبق النقي.

واعتماداً على درجات الحرارة أثناء المراحل الرئيسية لعملية الحرق تتبخر الفلزات المتطايرة والمركبات غير العضوية (مثل الأملاح) بشكل كامل أو جزئي. وتنقل هذه المواد من النفايات المدخلة إلى غاز المداخن والرماد المتطاير الذي يحتوي عليها. وينتج رماد متطاير متخلف (غبار) ورماد صلب أثقل (رماد القاع). وتتفاوت نسب المخلفات الصلبة إلى حد كبير وفقاً لنوع النفايات وتصميم المعالجة التفصيلي. وهناك إطلاقات أخرى هي المخلفات من معالجة غاز المداخن وتنقيته، وكسب المرشح من معالجة المياه العادمة، والأملاح وإطلاقات المواد في المياه العادمة. ولذلك فإن من الأهمية بمكان توفير حيز تصريف آمن لهذه الأنواع من النفايات المحتوية على الزئبق (انظر الفرع ٣-٧). الشكل ١ يبين مخطط تدفق مبسط لفرن حرق النفايات.



الشكل ١ - مخطط تدفق مبسط لفرن حرق النفايات

٢-٢-٢ المعالجة المسبقة للنفايات من أجل حرقها

خلط النفايات

يمكن أن تشمل التقنيات المستخدمة لخلط النفايات ما يلي:

- خلط النفايات الخطرة السائلة للوفاء بمتطلبات الإدخال للمنشأة
- خلط النفايات في مستودع باستخدام كُلاب أو آلة أخرى.

ويمكن أن يساعد خلط النفايات في أغراض تحسين عملية التلقيح وسلوك عملية الاحتراق وتفادي تركيزات الرُبُق العالية في النفايات المحترقة. وينطوي خلط النفايات الخطرة دون شك على مخاطر، كما أنه يتعين خلط أنواع النفايات المختلفة بناءً على وصفة. أما في المستودعات فإن النفايات تَخَلط باستخدام الرافعات داخل المستودع نفسه. ويمكن لمشغلي الرافعات تحديد الحمولات التي من المحتمل أن تسبب مشاكل (مثل النفايات المربوطة والأشياء المنفصلة التي لا يمكن أن تُخلط أو التي تسبب مشاكل في التحميل والتلقيح) ومن ثم يتأكدون من إزالتها أو تقطيعها أو خلطها بشكل مباشر (حسب الاقتضاء) مع النفايات الأخرى. بيد أنه يصعب على مشغلي الرافعات أنفسهم تحديد النفايات المحتوية على الرُبُق.

تقطيع النفايات البلدية المختلطة

يمكن تقطيع النفايات البلدية المختلطة غير المعالجة بشكل غير كامل من خلال تمرير النفايات المنقولة عبر المقصات التماسحية أو آلات التقطيع أو الطواحين أو المقصات الدوارة أو المطاحن. ويحسن التقطيع تجانس النفايات مما يؤدي إلى احتراق واختزال أكثر تناسقاً وانبعثات أكثر ثباتاً من الفرن. ومن شأن ضمان انبعثات غاز أولي ذي تركيب أكثر تناسقاً السماح بزيادة كفاءة عملية تنظيف غاز المداخن. إن الكثير من النفايات تحتوي على كميات ذات قيمة من المعادن الحديدية وغير الحديدية، وهي معادن يمكن أن تكون جزءاً أصيلاً من النفايات نفسها (مثلاً حاويات الطعام والشراب في النفايات الصلبة البلدية) أو يمكن أن تنشأ من عملية تعبئة النفايات في براميل (مثل النفايات الخطرة) أو حاويات معدنية أخرى.

وعند تقطيع النفايات القادمة فإنه يمكن إزالة المعادن قبل الحرق للسماح بإعادة التدوير. ويمكن فصل المعادن من خلال استخدام ما يلي:

- المغناطيسات المعلقة للمواد الحديدية الكبيرة مثل البراميل المقطعة؛
- المغناطيسات البرميلية للمواد الحديدية الصغيرة والثقيلة مثل البطاريات والمسامير والقطع المعدنية وغيرها؛
- آلات الفصل العاملة بالتيارات الدوامية للمعادن غير الحديدية - خصوصاً الألمنيوم والنحاس اللذان يستخدمان في التعبئة والمكونات الكهربائية.

تقطيع النفايات الخطرة المطحونة والمعبأة

يمكن إجراء معالجة مسبقة للنفايات السائلة المعبأة والنفايات الصلبة المعبأة أو السائبة بهدف إنتاج خليط يؤمن تلقياً متواصلًا للفرن. ويمكن معالجة النفايات الملائمة حتى تصبح قابلة للضخ لحقنها عن طريق الضخ في الفرن أو يمكن أن تُقَطَّع بهدف إضافتها إلى مستودع الحرق في عملية تنفصل فيها المواد الصلبة عن السوائل ومن ثم تلجم في الفرن بشكل منفصل باستخدام الكلابات والضخ على التوالي.

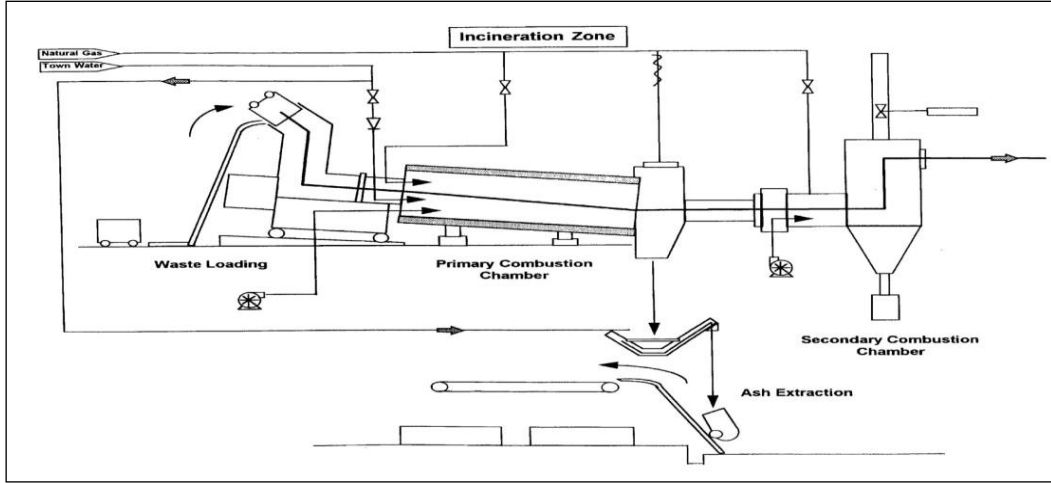
وتُقطَّع المنصات النقالة المحتوية على نفايات سائلة معبأة ذات لزوجة منخفضة إلى متوسطة إلى أطوال تتراوح من ٥ إلى ١٠ سم، ومن ثم يمكن فرز النفايات المقطعة قبل نقلها إلى الصهاريج. ويمكن استخدام المواد البلاستيكية التي تعزل عن النفايات كمصدر للطاقة في عملية الحرق كما يمكن إزالة المعادن الحديدية من أجل إعادة التدوير، وذلك باستخدام المغناطيسات. وفي حالات أخرى لا تفرز النفايات مثل الزيوت العادمة بل تُضخ بدلاً من ذلك إلى الفرن في شكل خليط من السوائل والنفايات الصلبة المقطعة مع إضافة سوائل مُحَقَّقَة (European Commission, 2006, Waste Incineration).

٢-٢-٣ توصيف أنواع أفران حرق النفايات

تبين الأقسام التالية عمليات الحرق المستمرة. ومن المعروف أن عمليات الحرق على دفعات تستخدم في بعض الأحيان بيد أن هذه العمليات ترتبط في العادة بانطلاق انبعاثات كبيرة في بداية العملية ونهايتها ولن يتم التطرق لها مرة أخرى في هذا الفصل.

٢-٢-٣-١ الأفران الدوارة لحرق النفايات

تستخدم الأفران الدوارة بصورة أكثر شيوعاً لحرق النفايات الخطرة التي تشتمل على الكثير من أنواع النفايات الطبية (الشكل ٢)، لكن في بعض الأحيان تستخدم أيضاً الأفران الشبكية (بما في ذلك الحرق المشترك مع النفايات الأخرى) لحرق النفايات الصلبة، كما تستخدم الأفران ذات القاعدة المميعة لحرق بعض المواد التي سبق معالجتها. وتستخدم الأفران الثابتة أيضاً بشكل واسع النطاق في المرافق داخل المنشآت الكيميائية.



الشكل ٢- نظام الفرن الدوار لحرق النفايات (www.hitemptech.com)

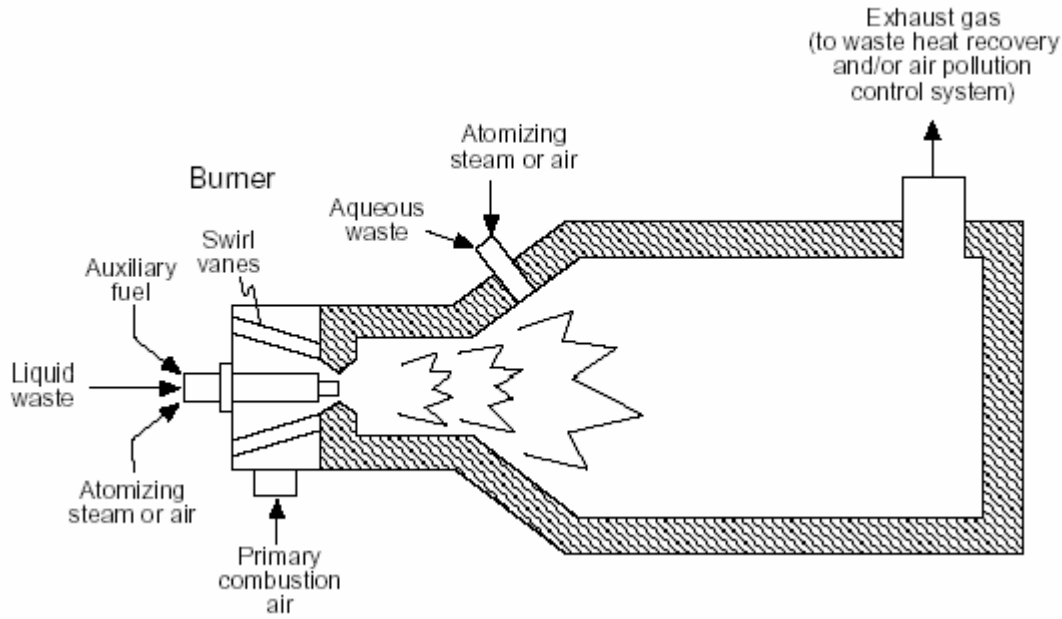
ونظراً للتركيبية الخطرة (وغير الموثوق بها في الغالب) لمسارات النفايات القادمة، يجري التركيز بصورة أكبر على معايير القبول، والتخزين، والمناولة والمعالجة المسبقة مقارنةً بما عليه الحال في النفايات الصلبة البلدية. وفي حالة النفايات المنخفضة الطاقة قد تكون هناك حاجة لاستخدام وقود مساعد.

وفي الأفران الدوارة تُدخل النفايات الصلبة أو الحمأة أو النفايات المعبأة في حاويات أو النفايات القابلة للضغط في النهاية العلوية للبرميل المائل. وتتراوح درجات الحرارة في الفرن عادةً من ٨٥٠م° (٥٠٠م° عند استخدام الفرن كجهاز تغويز) إلى ١٢٠٠م° (كفرن عالي الحرارة لصهر الرماد). ويسمح الدوران البطيء للبرميل بوقت مكوث يتراوح من ٣٠ إلى ٩٠ دقيقة، كما تسمح غرفة الاحتراق الثانوي التي تلي الفرن بأكسدة غازات الاحتراق. وهنا يمكن حقن النفايات السائلة أو أنواع الوقود المساعد مع الهواء الثانوي للحفاظ على فترة مكوث دنيا قدرها ثانيان ودرجات حرارة تتراوح من ٨٥٠م° إلى ١١٠٠م° مما يسمح عملياً بتفكيك معظم المركبات العضوية المتبقية. ويمكن أن تحدد مسبقاً متطلبات ظروف الاحتراق، كما هو وارد في الأمر التوجيهي (2010/75/EU) الصادر عن الاتحاد الأوروبي بشأن حرق النفايات. وفي معظم الحالات تشيد الأفران الدوارة وغرف ما بعد الاحتراق في شكل غرف ثابتة الحرارة مبطنة بالسيراميك. وبعد غرفة الاحتراق تمر غازات المدخن عبر منطقة فراغية حتى الوصول إلى درجة حرارة قدرها زهاء ٧٠٠م°. بعد ذلك تُرتب حزم الحرق مثل المبخرات والمسخنات الفوقية والمسخنات الأولية لمياه التلقيم. ونظام مرحل حرارة النفايات والإمداد بالطاقة يشبه نظم الحرق الشبكية. وتتراوح طاق فرن الحرق من ٠,٥ إلى ٣ طن في الساعة (لأفران حرق نفايات الرعاية الصحية).

٢-٢-٣-٢ أفران الحرق بحقن السوائل

تستخدم أفران الحرق بحقن السوائل، كما هو الحال في الأفران الدوارة، لحرق النفايات الخطرة عادةً. وعملياً يمكن أن تستخدم أفران الحرق بحقن السوائل للتخلص من أي نفايات سائلة أو شبه سائلة قابلة للاحتراق (مثل السوائل والملاط والحمأة). وعادةً ما تشمل نظم الأفران التي تعمل بحقن السوائل، التي قد تكون أبسط أنواع أجهزة الحرق، نظاماً لحرق النفايات ونظاماً للوقود المساعد ونظاماً للإمداد بالهواء، وغرفة احتراق، ونظاماً لضبط تلوث الهواء، كما هو مبين في الشكل ٣. وتلقم النفايات السائلة وتُبخ في غرفة الاحتراق عبر فوهات فرن النفايات. وتبخ هذه الفوهات النفايات وتمزجها مع هواء الاحتراق. ويحدث البخ عادةً بوسائل ميكانيكية مثل كأس دوارة أو نظم بخ تعمل بالضغط، أو من خلال فوهات ثنائية المائع تستخدم الهواء عالي الضغط أو البخار. ومع وجود مساحة سطحية كبيرة نسبياً تتبخر الجسيمات المبخوخة بسرعة مشكلةً مزيجاً من أبخرة النفايات شديدة القابلية للاحتراق مع هواء الاحتراق. وعادةً تتراوح فترة المكوث في غرفة الاحتراق من ٠,٥ إلى ٢ ثانية، وتتراوح درجات الحرارة من ٧٠٠م° إلى ١٦٠٠م°، وذلك من أجل ضمان الاحتراق الكامل للنفايات السائلة. ويمكن أن تتجاوز معدلات تلقيم

النفايات السائلة ٢٠٠٠ ل/الساعة. وإذا كان محتوى الطاقة في النفايات غير كافٍ للحفاظ على احتراق كافي ودرجات حرارة ملائمة للاحتراق يتم استخدام وقود إضافي مثل زيت الوقود أو الغاز الطبيعي. وفي بعض الحالات يتم ترشيح النفايات المحتوية على كميات كبيرة من المواد الصلبة قبل الحرق لتفادي انسداد الفوهات (US EPA 2005).



الشكل ٣- فرن نموذجي يعمل بحقن السوائل

فرن الحرق الشبكي

هناك أنواع مختلفة من أفران الحرق الشبكي وتحديدًا: الأفران الشبكية المتحركة والثابتة

الأفران الشبكية المتحركة

منشأة الحرق النموذجية للنفايات الصلبة البلدية هي الفرن الشبكي المتحرك. وفي هذا الفرن تتحرك النفايات عبر غرفة الاحتراق وهذه الحركة تسمح بعملية احتراق كاملة وأكثر كفاءةً.

ويمكن تصميم الوحدات لتكون ذات قدرات متفاوتة. وأحد الأمثلة على ذلك هو مرجل شبكي متحرك مفرد يمكنه معالجة ما يصل إلى ٣٥ طنًا من النفايات في الساعة، كما يمكنه أن يعمل لمدة ٨٠٠٠ ساعة في السنة بفترة توقف مقررة واحدة فقط من أجل الفحص والصيانة وتستمر شهراً واحداً تقريباً. وتُدخل النفايات عن طريق رافعة نفايات عبر ما يعرف بـ"الحلق" في أحد طرفي الشبكة ومن هناك تنتقل نحو الأسفل عبر الشبكة الهابطة إلى حفرة الرماد في الطرف الآخر، وهنا يزال الرماد باستخدام محبس مائي. ويرد جزء من هواء الاحتراق (هواء الاحتراق الأولي) عبر الشبكة من الأسفل.

هذا التدفق الهوائي يهدف أيضاً إلى تبريد الفرن الشبكي نفسه، فالتبريد مهم من أجل القوة الميكانيكية للشبكة، وهناك الكثير من الأفران الشبكية المتحركة تبرد داخلياً عن طريق المياه أيضاً. ويُدخل هواء الاحتراق الثانوي إلى داخل المرجل بسرعة عالية عبر فوهات فوق الفرن الشبكي حيث يسهل الاحتراق الكامل للغازات المداخن من خلال إحداث اضطراب يحسن عملية المرج، ومن خلال ضمان كمية زائدة من الأكسجين. وفي الأفران ذات المواقد المتعددة أو المتدرجة يُدخل هواء الاحتراق الثانوي في غرفة منفصلة أسفل غرفة الاحتراق الأولي.

وفي بلدان الاتحاد الأوروبي (المفوضية الأوروبية، ٢٠٠٠) يتعين تصميم منشآت الحرق بحيث تضمن وصول غازات المداخن إلى درجة حرارة قدرها ٨٥٠م على الأقل لمدة ثانيتين بهدف ضمان التفكك الجيد للمواد العضوية السامة. ومن أجل الامتثال لهذا الشرط في كل الأوقات فإنه يتعين تركيب أفران مساعدة احتياطية (تزود بالزيت غالباً كمصدر للوقود) وتشعل هذه الأفران داخل المرحلة عندما تصبح درجة حرارة النفايات منخفضة جداً بحيث لا يمكنها الوصول إلى درجة الحرارة المشار إليها من دون دعم. بعد ذلك تبرد غازات المداخن في السخانات الفوقية حيث تتحول الحرارة إلى بخار يؤدي إلى تسخين النظام عادةً إلى درجة ٤٠٠م عند ضغط قدره ٤٠٠٠ كيلوباسكال لتوليد الكهرباء في التوربين.

وعند هذه النقطة تصبح درجة حرارة غاز المداخن في حدود ٢٠٠م ويمرر إلى نظام تنقية غازات المداخن. وفي الغالب تتكون منشآت الحرق من العديد من خطوط المراحل المنفصلة (مراحل ومنشآت لمعالجة غازات المداخن)، وذلك بحيث يستمر إدخال النفايات إلى أحد خطوط المرحلة بينما تجري صيانة الخطوط الأخرى أو إصلاحها أو تطويرها.

الأفران الشبكية الثابتة

أقدم وأبسط أنواع أفران الحرق كانت عبارة عن خلية مبطنه بالطوب مع شبكة معدنية ثابتة فوق حفرة رماد سفلية، وتوجد بها أيضاً فتحة علوية أو جانبية للتعبئة وفتحة أخرى جانبية لإزالة المواد الصلبة غير القابلة للاحتراق التي تسمى المخلفات الصلبة. وحالياً استبدلت الكثير من الأفران الصغيرة التي كانت توجد سابقاً في مباني الشقق السكنية بمطاحن لدك النفايات.

٢-٢-٣ أفران الحرق ذات القاعدة المميعة

تستخدم الأفران ذات القاعدة المميعة على نطاق واسع لحرق النفايات الناعمة المكونات مثل الوقود المستخرج من النفايات وحمأة مياه البحار. واستخدمت هذه الطريقة لعقود وبصورة رئيسية لحرق أنواع الوقود المتجانسة. إن الفرن ذا القاعدة المميعة هو غرفة احتراق مبطنه في شكل أسطوانة رأسية. وفي القسم السفلي يستخدم الهواء لتمييع طبقة قاعدية من مادة خاملة (مثل الرمل أو الرماد) موضوعة فوق شبكة معدنية أو لوحة توزيع. ويجري باستمرار تلقيم النفايات المراد حرقها في القاعدة الرملية المميعة من الأعلى أو من الجانب. ويدخل هواء مسخن مسبقاً في غرفة الاحتراق من خلال فتحات في لوحة القاعدة مشكلاً قاعدة مميعة مع الرمل الموجود في غرفة الاحتراق.

بعد ذلك تضخ النفايات في المفاعل من خلال مضخة أو ملقم نجمي أو حامل أنبوبي لولبي. ويحدث التحفيف والتطاير والاشتعال والاحتراق في القاعدة المميعة. وتتراوح درجة الحرارة في الحيز الخالي فوق القاعدة (المساحة العلوية) عادةً من ٨٥٠م إلى ٩٥٠م. وفوق المادة القاعدية المميعة تُصمم المساحة العلوية بحيث تسمح باحتجاز الغازات ضمن نطاق احتراق. أما في طبقة القاعدة نفسها فإن درجة الحرارة تكون أقل وقد تصل إلى زهاء ٦٥٠م.

ونظراً لطبيعة المفاعل الجيدة المزج فإن نظم الحرق ذات القاعدة المميعة تتميز عموماً بتوزيع متناسق لدرجات الحرارة والأكسجين مما يفضي إلى تشغيل مستقر. وفي حالة النفايات غير المتجانسة يتطلب الاحتراق ذي القاعدة المميعة إجراء عملية تحضير للنفايات لكي تستوفي مواصفات الحجم. وفي بعض أنواع النفايات يمكن إنجاز ذلك عن طريق توليف بين الجمع الانتقائي للنفايات أو المعالجة المسبقة مثل التقطيع. ويمكن لبعض أنواع القواعد المميعة (مثل القاعدة المميعة الدوارة) استقبال نفايات ذات جسيمات أكبر حجماً مقارنةً بغيرها، وفي هذه الحالة لا يلزم إلا تخفيض تقريبي لكمية النفايات أو لا يلزم القيام بأي إجراء.

٢-٢-٤ النظم ذات الوحدات التجميعية

نظم الحرق ذات الوحدات التجميعية هي نوع شائع من أفران حرق النفايات البلدية تستخدم على نطاق واسع في الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا وآسيا. وتتكون أفران الحرق ذات الوحدات التجميعية من غرفتي احتراق مركبتين عمودياً (غرفة أولية

وغرفة ثانوية). وعادةً تتراوح طاقة الحرق في النظم ذات الوحدات التجميعية من ١ إلى ٢٧٠ طن في اليوم. وهناك نوعان رئيسيان من أنواع النظم ذات الوحدات التجميعية، النظم ذات الهواء الزائد والنظم ذات الهواء الناقص.

وتتكون نظم الوحدات التجميعية ذات الهواء الزائد من غرفتي احتراق أولية وثانوية تعمل كل منهما بمستويات هواء تزيد عن متطلبات الاحتراق النظيف (أي هواء زائد بنسبة ١٠٠ إلى ٢٥٠ في المائة). أما في نظم الوحدات التجميعية ذات الهواء الناقص (أو الخاضع للتحكم) فإن الهواء يصل إلى الغرفة الأولية بمستويات لا تكفي للاحتراق النظيف. وتدخل نواتج الاحتراق غير الكامل في غازات الاحتراق التي تتكون في غرفة الاحتراق الأولية ومن ثم تمر إلى غرفة احتراق ثانوية. ويضاف الهواء الزائد إلى الغرفة الثانوية ويكتمل الاحتراق من خلال درجات الحرارة العالية التي يتم الوصول إليها بإضافة وقود مساعد (الغاز الطبيعي في العادة). وتعطي درجة الحرارة العالية والمتناسقة في الغرفة الثانوية، مضافاً إليها المزج القوي لغازات الاحتراق، أفضلية لتشكيل وانبعثات المستويات المنخفضة من الجسيمات الدقيقة العالقة والملوثات العضوية.

٢-٢-٤ حرق مسارات نفايات محددة

٢-٢-٤-١ حرق النفايات البلدية

رغم أنه في الكثير من المناطق يظل طمر بقايا النفايات غير المعاد تدويرها الوسيلة الرئيسية للتخلص من حرق النفايات الصلبة البلدية، إلا أن إحراق المخلفات وطمرها لاحقاً أصبح ممارسة شائعة في الكثير من البلدان المتقدمة والصناعية.

ويكون حرق النفايات الصلبة البلدية مصحوباً في العادة باستعادة بعض الطاقة المولدة للحرارة ("نفايات إلى طاقة") في شكل بخار و/أو توليد الكهرباء. كذلك يمكن تصميم أفران الحرق بحيث تتقبل الأنواع المعالجة من الوقود المشتق من النفايات الصلبة البلدية إضافةً إلى الحرق المشترك مع أنواع الوقود الأحفوري. ويمكن أن يتفاوت حجم أفران حرق النفايات البلدية من وحدات صغيرة الحجم تعالج دفعات فردية تصل إلى بضعة أطنان في اليوم إلى وحدات كبيرة جداً تتميز بقدرات تليم يومي مستمر بما يزيد عن ألف طن.

وتتمثل الفوائد الأساسية لحرق النفايات الصلبة البلدية في تدمير المواد العضوية (بما في ذلك المواد السامة) وخفض كمية النفايات وتركيز الملوثات (مثل المعادن الثقيلة) وتحويلها إلى كميات صغيرة نسبياً من الرماد، وبالتالي إيجاد حيزات تصريف آمنة في حال التخلص من هذه المواد بطريقة جيدة. أما الطاقة المستعادة فيمكن أن تشكل فائدة إضافية مهمة.

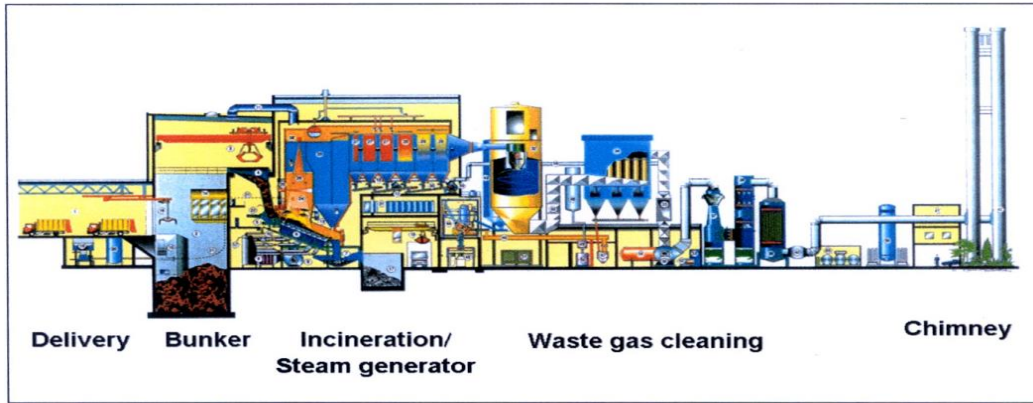
٢-٢-٤-١-١ اعتبارات تشغيل أفران حرق النفايات الصلبة البلدية

في الكثير من أفران حرق النفايات الصلبة البلدية يجري أيضاً حرق أجزاء أخرى من النفايات مثل النفايات السائبة (مثلاً من منشآت فرز النفايات) أو حمأة مياه المجارىر أو النفايات الطبية أو الجزء المولد لحرارة عالية الناتج عن المعالجة المسبقة للنفايات (مثلاً من منشآت التقطيع). وهذه النفايات يتعين تقييمها بعناية قبل حرقها للتأكد مما إذا كانت منشأة حرق النفايات (بما في ذلك معالجة غاز المداخن ومعالجة المياه العادمة والمخلفات) مصممة لمعالجة هذه الأنواع من النفايات وما إذا كانت المنشأة قادرة على إنجاز المعالجة دون الإضرار بصحة الإنسان أو البيئة. ومن البارامترات المهمة محتوى الكلور والهيدروجين والكبريت، ومحتوى المعادن الثقيلة، ومحتوى المواد المولدة للحرارة (القيمة الحرارية المنخفضة) وسلوك الاحتراق.

ويمكن أن يقود التركيز العالي للهيدروجين إلى تكوين مركبات مهرومة مثل الديوكسينات الثنائية البنزين المتعددة الهيدروجين والفيورانات الثنائية البنزين المتعددة الهيدروجين (CSTEE, 2002).

ويتطير الزئبق أثناء عملية الحرق ولذلك يتعين اتخاذ إجراءات محددة قبل عملية الحرق وبعدها لخفض هذه الانبعاثات. ومن شأن تجاهل الحدود القصوى لمنشأة الحرق أن يفرضي إلى مشاكل في التشغيل (مثل الحاجة للإغلاق المتكرر لتنظيف الشبكة

المعدنية أو المبدلات الحرارية) أو يؤدي إلى أداء بيئي سيئ (مثلاً انبعاثات كبيرة إلى المياه، ارتفاع قابلية الرماد المتطاير على الارتشاح). ويبين الشكل ٤ المخطط النموذجي لفرن حرق نفايات صلبة بلدية كبير.



الشكل ٤- فرن حرق نفايات صلبة بلدية نموذجي (المصدر: المفوضية الأوروبية ٢٠٠٦)

٢-٢-٤-١-٢ تصاميم أفران حرق النفايات الصلبة البلدية

يمكن حرق النفايات الصلبة البلدية في العديد من أنظمة حرق النفايات، بما في ذلك الأفران الشبكية النقلة والأفران الدوارة والأفران ذات القاعدة المميعة. وتتطلب تكنولوجيا الأفران ذات القاعدة المميعة (انظر القسم الفرعي ٢-٢-٣-٤) أن تكون أحجام جسيمات النفايات الصلبة البلدية ضمن مدى معين - وهذا يتطلب عادةً درجة من المعالجة المسبقة مع الجمع الانتقائي للنفايات. وتتراوح طاقات الاحتراق في أفران حرق النفايات الصلبة البلدية في العادة من ٩٠ إلى ٢٧٠٠ طن من النفايات الصلبة البلدية في اليوم (نظم الوحدات التجميعية: من ٤ إلى ٢٧٠ طن في اليوم).

وقد جرى تطوير عمليات أخرى وتستند إلى فصل الأطوار التي تحدث أيضاً في فرن الحرق: تجفيف النفايات، وتطايرها، وتحللها الحراري، وتكربنها، وتأكسدها. ويجري كذلك اللجوء للتغوية باستخدام عوامل تغوية مثل البخار والهواء وأكاسيد الكربون أو الأكسجين. وتهدف هذه العمليات إلى خفض كميات غازات المداخن وتكاليف معالجة غازات المداخن ذات الصلة. والكثير من هذه التطورات لم يعد يُطبَّق لتعرضه للمشاكل التقنية والاقتصادية عند التوسيع على نطاقات تجارية وصناعية. وتستخدم بعض هذه العمليات على أساس تجاري (مثلاً في اليابان) بينما يجري اختبار عمليات أخرى في المنشآت الإرشادية في أوروبا لكنها تظل تساهم بقدر ضئيل من قدرات المعالجة الكلية مقارنةً بالحرق.

٢-٢-٤-٢ حرق النفايات الخطرة

تُحرق النفايات الخطرة عادةً في الأفران الدوارة أو في الأفران الشبكية. وهناك أنواع أخرى من أفران الحرق المستخدمة لحرق النفايات الخطرة منها الأفران ذات القاعدة المميعة، والوحدات العاملة بحقن السوائل، ووحدات الحرق الثابتة. وقبل قبول النفايات الخطرة لمعالجتها يتعين أن تقيّم أفران الحرق التجارية المادة وأن تحدد خصائصها. وفي العادة يتعين على الجهة المنتجة تقديم الوثائق ذات الصلة، بما في ذلك منشأ النفايات، ورمزها أو توصيفاتها الأخرى، وتحديد الأشخاص المسؤولين عنها، ووجود مواد خطيرة معينة فيها. كذلك يتعين تعبئة النفايات بشكل جيد لتفادي احتمالات التفاعل والانبعاثات أثناء النقل.

ويعتمد التخزين في موقع الفرن على طبيعة النفايات وخواصها الفيزيائية. وتخزن النفايات الخطرة الصلبة في العادة في مستودعات تُنشأ بحيث تمنع التسرب إلى أي وسط بيئي وتغلق بإحكام للسماح بإزالة هواء المستودع وتوجيهه إلى عملية الاحتراق. أما النفايات السائلة فتخزن في حقول صهاريج وغالباً في جو من الغازات الحاملة (مثل النيتروجين) وتنقل إلى فرن الحرق عن طريق الأنابيب. ويمكن تلقيم بعض أنواع النفايات مباشرةً إلى الفرن في الحاويات التي تنقل بها. ويجب أن تكون المضخات والأنابيب والمعدات الأخرى التي قد تلامس النفايات غير قابلة للتآكل وقابلة للتنظيف ولأخذ العينات منها. ويمكن أن تشمل عمليات

المعالجة المسبقة معادلة النفايات أو تخفيفها أو تصليدها. ويمكن أن تستخدم آلات التقطيع وآلات الخلط الميكانيكية لمعالجة الحاويات أو لخلط النفايات لضمان احتراق أكثر كفاءةً.

وتحرق النفايات الخطرة أيضاً في الأفران الإسمنتية. ويجري تناول هذا التطبيق في الفصل المتعلق بالإسمنت في وثيقة التوجيهات.

٢-٢-٤-٣ حرق حمأة مياه المجاري

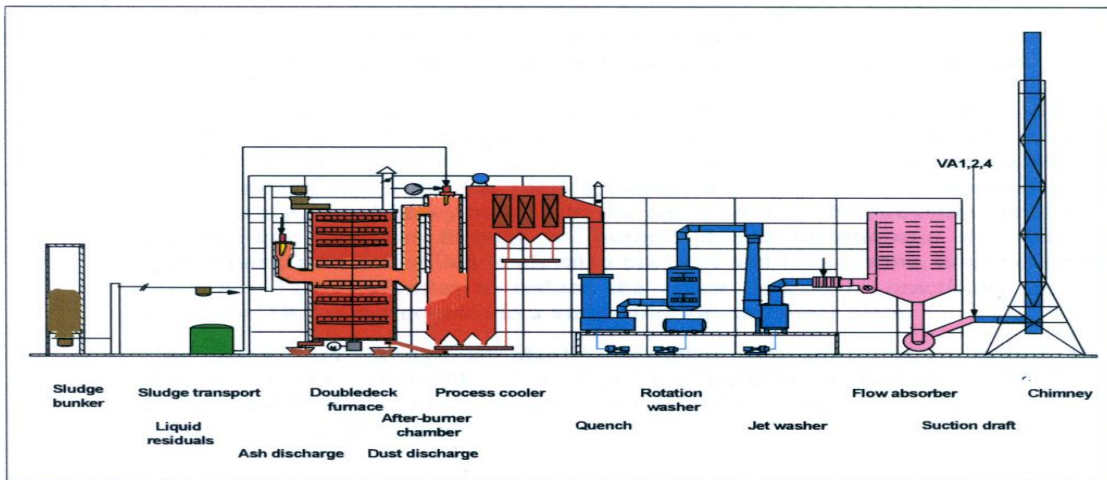
يجري التخلص من حمأة مياه المجاري المنزلية بعدة طرق، بما في ذلك استخدامها في الأراضي الزراعية بعد المعالجة المسبقة لها، والتخلص السطحي منها (مثلاً في المساحات الخضراء وعن طريق الطمر)، وإحراقها، والتخلص منها مع النفايات الصلبة البلدية، والحرق المشترك. ويمارس حرق حمأة مياه المجاري في عدة بلدان، إما لوحده أو عن طريق الحرق المشترك في أفران حرق النفايات الصلبة البلدية أو في منشآت الحرق الأخرى (مثل منشآت توليد الطاقة العاملة بالفحم الحجري، أفران الإسمنت). ويعتمد التخلص الفعال من حمأة مياه المجاري عن طريق هذه العملية على عدد من العوامل من بينها مزج أو عدم مزج الحمأة مع مسارات النفايات الصناعية (فالمزج من شأنه أن يزيد من كميات المعادن الثقيلة)، والموقع (المواقع الساحلية يمكن أن تسمح بوصول المياه المالحة)، والمعالجة المسبقة (أو عدمها)، والمناخ (خفض التركيز عن طريق مياه الأمطار) (EU IED, 2010).

وينطوي حرق حمأة مياه المجاري على بعض الاختلافات مقارنةً بحرق النفايات الصلبة البلدية والنفايات الخطرة، فقابلية تغير محتوى الرطوبة وقيمة الطاقة والامتزاج المحتمل مع النفايات الأخرى (مثل النفايات الصناعية في حال كانت نظم المجاري مترابطة) هي عوامل تحتاج إلى اعتبارات خاصة في المناولة والمعالجة المسبقة.

وتتكون المخلفات الصلبة لعملية حرق حمأة مياه المجاري بصورة رئيسية من الرماد المتطاير ورماد القعر (من الحرق في الأفران ذات القاعدة المميعة) ومخلفات معالجة غازات المداخن (انظر توصيف حرق النفايات الصلبة البلدية في الفرع ٢-٢-٤-١ أعلاه). ويتعين الجمع بطريقة ملائمة بين التدابير المناسبة لتنقية غازات المداخن لضمان تطبيق أفضل التقنيات المتاحة (انظر الفرع ٥-٥ أدناه).

٢-٢-٤-٤ تصميم وتشغيل أفران حرق حمأة مياه المجاري

يمكن لفرن حرق حمأة مياه المجاري النموذجي أن يعالج ما يصل إلى ٨٠.٠٠٠ طن من الحمأة (٣٥ في المائة مواد صلبة جافة) في السنة. وتتمثل تكنولوجيات الحرق المفضلة فيما يخص حمأة مياه المجاري في الفرن ذي المواقد المتعددة (الشكل ٥) ونظم الأفران ذات القاعدة المميعة، رغم أن الأفران الدوارة تستخدم أيضاً في تطبيقات أصغر حجماً.



الشكل ٥ نموذج لفرن حرق حمأة مياه المجاري المتعدد المواقد (المفوضية الأوروبية، ٢٠٠٦)

واعتماداً على نسبة المواد الصلبة الجافة (الجفاف) يتم توفير وقود مساعد، هو في العادة زيت التدفئة أو الغاز الطبيعي. وتراوح درجات حرارة التشغيل المفضلة من ٨٥٠م إلى ٩٥٠م مع فترة مكوث قدرها ثانيتان، رغم أن بعض المرافق ذات القاعدة المميعة قادرة على العمل عند درجات حرارة تصل إلى ٨٢٠م دون حدوث انخفاض في مستوى أدائها. ومن شأن التشغيل عند درجة حرارة أعلى من ٩٨٠م أن يؤدي إلى انتشار الرماد (European Commission 2006).

وتحرق حمأة مياه المجاري مع النفايات الصلبة البلدية في الأفران ذات القاعدة المميعة وفي أفران الحرق (الشبكية) الضخمة. وفي الحالة الثانية تكون النسبة النموذجية هي نسبة ٣:١ (حمأة إلى نفايات)، حيث تُدخل الحمأة المجففة إلى داخل غرفة الحرق في شكل غبار أو تُمرر الحمأة الجافة إلى الفرن الشبكي عن طريق رشاشات. وفي بعض الحالات قد تخلط الحمأة الجافة أو المجففة مع النفايات الصلبة البلدية في المستودع أو المخزن القمعي المؤقت قبل وصولها إلى فرن الحرق. وتمثل طرق التقييم نسبة كبيرة من الاستثمار الرأسمالي الإضافي المطلوب للحرق المشترك.

٢-٢-٤-٤-١ المعالجة المسبقة لحمأة مياه المجاري

تكتسب المعالجة المسبقة، خصوصاً عملية إزالة المياه والتجفيف، أهمية خاصة في تحضير الحمأة للحرق، فالتجفيف يخفض كمية الحمأة ويزيد من الطاقة الحرارية للمنتج. وفي العادة تلزم إزالة الرطوبة لتصل إلى ٣٥ في المائة على الأقل في المواد الصلبة الجافة من أجل توفير الطاقة الحرارية اللازمة للحرق الذاتي. وقد تكون هناك حاجة لتجفيف إضافي إذا كان من المخطط حرق الحمأة مع النفايات الصلبة البلدية.

وقد تجرى بعض المعالجات المسبقة للحمأة قبل نقلها إلى مرفق الحرق، وهذه قد تشمل الفرز والاهتضام اللاهوائي والهوائي وكذلك إضافة المواد الكيميائية اللازمة للمعالجة.

وتخضع الإزالة الفيزيائية للماء حجم الحمأة وتزيد من قيمتها الحرارية. وتشمل عمليات الإزالة الميكانيكية للماء دوارق الترشح وأجهزة الطرد المركزي والمرشحات الحزامية وحجرات المرشحات العاصرة. وكثيراً ما تضاف المواد المحسنة (مثل عوامل التجميع) قبل إزالة المياه لتيسير التجفيف. وتنتج الإزالة الميكانيكية للماء عادة نفايات صلبة جافة بنسبة ٢٠ إلى ٣٥ في المائة (European Commission, 2006).

وينتج التجفيف طاقة حرارية تعزز إزالة المياه وتحسن حالة الحمأة. وتنتج الحرارة اللازمة للتجفيف في مرفق الحرق في الغالب من عملية الحرق نفسها. ويمكن أن تكون عمليات التجفيف مباشرة (عن طريق ملامسة الحمأة لحامل حراري) أو غير مباشرة (مثلاً عن طريق حرارة ناتجة من منشأة لتوليد البخار). وفي التجفيف المباشر يتعين تنظيف مزيج الأبخرة والغازات لاحقاً.

ويطلب الحرق الذاتي للحمأة توفر نفايات صلبة جافة بنسبة ٣٥ في المائة. ورغم أن الإزالة الميكانيكية للماء يمكن أن تصل إلى هذه العتبة إلا أنه قد يستخدم التجفيف الإضافي للحمأة حتى الوصول إلى نفايات صلبة جافة بنسبة ٨٠ إلى ٩٥ في المائة من أجل زيادة القيمة الحرارية. أما الحرق المشترك مع النفايات الصلبة البلدية فهو يتطلب عادةً تجفيفاً إضافياً للحمأة.

٢-٢-٤-٥ حرق نفايات الأخشاب

يمكن حرق نفايات الأخشاب المحتوية على الزئبق أو الملوثة به في أفران الحرق الشبكية أو في الأفران ذات القاعدة المميعة عند درجات حرارة مشابهة لدرجات حرق النفايات البلدية.

وهناك تقنية أخرى مستخدمة هي التحليل الحراري، وتنتج في هذه الحالة عادة ثلاثة نواتج: الغازات وزيت التحليل الحراري والفحم، وتعتمد نسب هذه النواتج إلى حد كبير على طريقة التحليل الحراري وخصائص الكتلة الحيوية وبارامترات التفاعل. ويستخدم التحليل الحراري السريع أو الومضي لزيادة كمية الغازات أو النواتج السائلة إلى أقصى حد ممكن بحسب درجة الحرارة المستخدمة.

٢-٤-٦ سلوك الزئبق أثناء عملية الحرق

يناقش هذا القسم سلوك الزئبق أثناء عملية الحرق. ووفق ما هو مبين في القسم ٣ فإن قدرة الضوابط المختلفة على احتجاز الانبعاثات ترتبط بتكون الزئبق في غازات المداخن.

ونظراً لانعدام الثبات الحراري والكيميائي لمركبات الزئبق فإنه عندما تزيد درجة الحرارة عن ٧٠٠م إلى ٨٠٠م لا يتبقى سوى الزئبق النقي، وهذا يعني أن الزئبق يوجد داخل غرفة الاحتراق في فرن حرق النفايات بشكله الأولي فقط. والزئبق هو عنصر شديد التطاير ولذلك فهو يكاد لا يوجد إلا في الطور الغازي ضمن غازات المداخن. وعند مرور غازات المداخن عبر قسم استعادة الحرارة تبرد هذه الغازات ومن ثم يتفاعل الزئبق النقي اعتماداً على وجود المكونات الأخرى لغازات المداخن ودرجة الحرارة وتركيبه الرماد ليتحول إلى زئبق مؤكسد. وتتميز مركبات الزئبق المؤكسد عموماً بعدم الثبات في غازات المداخن وفي الظروف الجوية (Galbareth, Zygarlicke 1996).

وفي ظل ظروف معينة يمكن للزئبق الأولي أن يتأكسد، إلا أن حجم تحوله يعتمد على درجة الحرارة وفترة المكوث والرماد والكربون غير المحترق إضافة إلى وجود مكونات في الطور الغازي بما في ذلك الكلور أو ثاني أكسيد الكبريت. ويعتمد توزيع الزئبق النقي والزئبق المتأكسد في شكل كلوريد الزئبقيك، بشكل كبير، على كمية كلوريد الهيدروجين في غازات المداخن، حيث تميل نسبة الزئبق المتأكسد والزئبق الكلي إلى الازدياد مع زيادة تركيز كلوريد الهيدروجين (Nishitani et al., 1999). ونظراً للمحتوى المنخفض من كلوريد الهيدروجين في منشآت حرق حمأة مياه المجاري فإن كمية الزئبق النقي تكون كبيرة جداً.

٣- تقنيات التحكم في الانبعاثات

إن نوع عمليات المعالجة المطبقة على غازات المداخن بمجرد خروجها من غرفة الاحتراق وترتيب هذه العمليات هما عاملان مهمان على صعيد التشغيل الأمثل للأجهزة ولفعالية الكلفة العامة للمنشأة. وتشمل بارامترات حرق النفايات التي تؤثر على اختيار التقنيات: نوع النفايات، وتركيبها، وقابليتها للتغير، ونوع عملية الاحتراق، وتدفق غازات المداخن ودرجات حرارتها، والحاجة إلى معالجة المياه العادمة وتوفر هذه المعالجة. ولتقنيات المعالجة التالية تأثيرات مباشرة أو غير مباشرة على منع انبعاثات الرئيق أو تخفيضها. وتشمل أفضل التقنيات المتاحة تطبيق أنسب توليفة من نظم تنظيف غازات المداخن. ويرد بيان عام لعدد من التقنيات في مقدمة هذه الوثيقة التوجيهية (الفرع ١)، أما المعلومات التي تعتبر خاصة بحرق النفايات فتد في الفروع التالية.

٣-١ تقنيات إزالة الغبار (الجسيمات الدقيقة العالقة)

إزالة الغبار من غازات المداخن ضرورة لجميع العمليات في فرن حرق النفايات. وقد أظهرت أجهزة الترسيب الكهروستاتيكية والمرشحات النسيجية فعاليةً كتقنيات احتجاز للجسيمات الدقيقة العالقة في غازات مداخن أفران الحرق. وللاطلاع على المبادئ العامة لهذه التقنيات انظر مقدمة هذه الوثيقة.

ومن أجل إزالة الرئيق بكفاءة أكبر من غاز المداخن تستخدم أجهزة الترسيب الكهروستاتيكية والمرشحات النسيجية معاً جنباً إلى جنب مع التقنيات الأخرى (انظر الفروع ٣-٤ إلى ٣-٥ أدناه).

ويتعين رصد عملية انخفاض الضغط في المرشحات النسيجية ودرجة حرارة غاز المداخن (في حال استخدام نظام تنظيف في المراحل العليا) لضمان وجود كُسب المرشح وعدم وجود تسرب أو بلل في الأكياس.

إن المرشحات النسيجية عرضة للتلف بالمياه والتآكل، ويتعين الإبقاء على تدفقات الغازات عند نقطة أعلى من نقطة تشكل الندى (١٣٠م - ٤٠م) لمنع هذه التأثيرات. وتتسم بعض مواد المرشحات بمقاومة أكبر للتلف.

التأثيرات الشاملة لوسائط متعددة على ارتشاح الرئيق من الرماد المتطاير (EC, 2006, Waste Incineration).

يتعين معالجة الرماد المتطاير المتولد من نظم تنظيف غاز المداخن بعناية نظراً لقابليته لرشح الرئيق في الأرض والمياه الجوفية.

التأثيرات الشاملة لوسائط متعددة (بخلاف تلك المرتبطة بالرئيق)

تتسم أجهزة الترسيب الكهروستاتيكية والمرشحات النسيجية المستخدمة في إزالة الغبار بالاستهلاك العالي للطاقة نتيجةً للتحميل الكهروستاتيكي والانخفاض الكبير في الضغط وتنقية الهواء النبضية العالية الضغط. وتبلغ كمية المخلفات من ١٢ إلى ٢٠ كغم/طن من النفايات المدخلة.

تكاليف التركيب والتشغيل (EC, 2006, Waste Incineration)

تقدر تكاليف الاستثمار في فرن حرق نفايات صلبة بلدية ذي خطين بطاقة كلية قدرها ٢٠٠ ٠٠٠ طن/السنة كما يلي:

أجهزة الترسيب الكهروستاتيكية (ثلاثية المجال): ٢,٢ مليون يورو

أجهزة الترسيب الكهروستاتيكية (ثنائية المجال): ١,٦ مليون يورو

المرشحات النسيجية: ٢,٢ مليون يورو (من غير الواضح ما إذا كان هذا المبلغ يشمل مبرد غاز المداخن في المراحل الأولى)

الفوائد المشتركة لاستخدام المصافي النسيجية بالاقتران مع التحفيز عن طريق الرش أو حقن مادة ماصة شبه جافة

فيما يخص فصل الملوثات الأخرى مثل الغبار والمعادن الثقيلة الأخرى والمركبات العضوية المرتبطة بالغبار تتميز المرشحات النسيجية بميزة إضافية عند اقتراحها بحقن مادة ماصة جافة أو شبه جافة (التجفيف بالرش) وهي توفير ترشيح إضافي وسطح تفاعلي على كُسب المرشح.

٢-٣ تقنيات التنظيف الرطب

يمكن احتجاز الزئبق الغازي عن طريق الامتزاز في جهاز تنظيف رطب. وفي المرحلة الأولى تزيد كفاءة إزالة الزئبق المؤكسد في شكل كلوريد الزئبق (الذي يمثل بشكل عام مركب الزئبق الرئيسي بعد حرق النفايات) عن ٩٥ في المائة (EC, 2006, Waste Incineration). أما معدل إزالة الزئبق النقي فتتراوح فقط من صفر إلى ١٠ في المائة، ويعود ذلك بصورة رئيسية إلى التكتيف عند درجة حرارة تشغيل جهاز التنظيف التي تتراوح من ٦٠ إلى ٧٠م.

ويشكل الترسب أحد التدابير الأخرى التي كثيراً ما تستخدم للتقليل إلى أدنى حد ممكن من تركيز الزئبق المؤكسد في مياه التنظيف. ويضاف عامل تنفل (غالباً مركب كبريتي) إلى مياه الشطف ويحول الزئبق الذائب إلى مركب غير قابل للذوبان بدرجة كفاءة معقولة، خصوصاً في المرحلة الثانية. ولربط الزئبق مباشرة بعد تحويله إلى الطور الغازي توجد طريقة أخرى ممكنة وهي إضافة الكربون المنشط إلى مياه الشطف (Bittig 2014). ويمكن تفادي انبعاث الزئبق الذائب مرة أخرى إلى غاز المداخن من خلال مزج الزئبق الذائب مع عوامل العزل مثل الكبريتيدات العضوية (Keiser et al., 2014).

ومن خلال تطبيق التدابير المذكورة أعلاه يمكن تحسين امتزاز الزئبق النقي وزيادته من ٢٠ في المائة إلى حد أقصى قدره ٣٠ في المائة. وتبلغ كفاءة الإزالة الكلية للزئبق (المعدني والمتأكسد) زهاء ٨٥ في المائة (EC, 2006, Waste Incineration).

التأثيرات الشاملة لوسائط متعددة

الجدول ١ يبين التأثيرات غير المتعلقة بالزئبق الشاملة لوسائط متعددة

الجدول ١

التأثيرات غير المتعلقة بالزئبق والشاملة لوسائط متعددة

٢ - ٣ كغم (هيدروكسيد الصوديوم) أو ١٠ كغم أكسيد الكالسيوم أو ٥ - ١٠ كغم حجر جيرى لكل طن من مدخلات النفايات	استهلاك الكاشف
١٠ - ١٥ ل/طن من مدخلات النفايات	كمية المخلفات:
١٠٠ - ٥٠٠ ل/طن من مدخلات النفايات	استهلاك المياه:
٢٥٠ - ٥٠٠ ل/طن من مدخلات النفايات	الانبعاثات إلى المياه:

المصدر: WT BREF 2005

وتتكون المياه العادمة الناجمة عن المعالجة في عملية الحرق بصورة رئيسية من استخدام تقنيات التنظيف الرطب. ويمكن تفادي إطلاق المياه العادمة من خلال حقنها في غاز المداخن باستخدام جهاز ماص رشاش أو نظام مشابه. وعلى سبيل المثال في ألمانيا لا يوجد سوى عدد قليل من منشآت الحرق التي تحدث فيها إطلاقات من المياه العادمة الناتجة عن معالجة غاز المداخن.

وفي حال عدم حقن المياه العادمة في غاز المداخن يتعين معالجة النفايات السائلة لجهاز التنظيف في منشأة معالجة فيزيائية-كيميائية. وإزالة الزئبق يتعين تطبيق ترسيب من مرحلتين. ويمكن، من خلال توليفة من الترسيب ذي المرحلتين والترشيح الفائق أو جهاز التبادل الأيوني الخاص بالزئبق، الوصول إلى تراكيز تقل عن ١ ميكروغرام/ل (Marson et al, 2013, Riethman, 2013,) (Owens et al, 2013, Scheidereit 2014).

الجدول ٢ يبين تكاليف التركيب والتشغيل

الجدول ٢

تكاليف التركيب والتشغيل

التعليقات	تكاليف الاستثمار التقديرية	عنصر معالجة غاز المداخن
يشمل معالجة المياه العادمة	٥ مليون يورو	جهاز تنظيف رطب من مرحلتين
يشمل معالجة المياه العادمة	٧ مليون يورو	جهاز تنظيف رطب من ثلاث مراحل
	١,٥ مليون يورو - ٢ مليون يورو	منشأة تبخير خارجية لنفايات الشطف السائلة
يعتقد أن تقديرات التكاليف منخفضة	١,٥ مليون يورو	جهاز ماص رشاش للتبخير الداخلي للنفايات السائلة

المصدر: EC, 2006, Waste Incineration

معلومات من جهة مصنعة لمنشآت الحرق لعام ٢٠١٤

منشأة تعالج ٢٠٠.٠٠٠ طن بخطين للحرق ومعالجة غاز المداخن: مرشح نسيجي + جهاز تنظيف ذي مرحلتين: ١٦ مليون يورو - ١٨ مليون يورو

المنافع المشتركة لاستخدام المواد المشربة بالكربون

من أجل فصل الغازات الحمضية والغبار والمكونات المرتبطة بالغبار يمكن أن يحقق استخدام المواد المشربة بالكربون، أو الكربون المنشط، أو فحم الكوك في مواد التعبئة لجهاز التنظيف تخفيضاً بنسبة ٧٠ في المائة لكمية الديوكسينات الثنائية البنزين المتعددة الكلور والفيورانات الثنائية البنزين المتعددة الكلور في جهاز التنظيف بيد أن ذلك قد لا يظهر في الإطلاقات الكلية (European Commission, 2006).

٣-٣ حقن الكربون المنشط

ورد في الفصل التمهيدي لهذه الوثيقة وصف عام لاستخدام الكربون المنشط لتحسين إزالة الزئبق. وتنطوي تقنية الكربون المنشط على حقن هذا الكربون أو فحم الكوك في موقد الفرن قبل الدخول إلى مرشح كيسي (انظر الفرع ٣-١ أعلاه) أو جهاز آخر لإزالة الغبار. ونتيجة لذلك يُمتاز معظم الزئبق في طبقة المرشح، وبناءً على ذلك تُغلف المرشحات النسيجية عادةً مسبقاً بكواشف قبل بدء التشغيل لضمان تحقيق أداء يفضي إلى خفض كبير بالفعل عند البدء في تلقيم النفايات.

ومن المهم وجود مزيج جيد من المواد الممتزة مع غاز المداخن ومدة تلامس كافية بهدف تحقيق ترسيب ناجح. ويشكل تحديد جرعة المواد الممتزة القائمة على الكربون في غاز المداخن قبل دخول المرشح النسيجي في المراحل التالية، أي بعد جهاز التنظيف، خطوةً أخيرةً راسخةً في عملية تنظيف الغاز.

إن دراسة المزيج المكون لغاز المداخن مهمة للغاية في تقييم كفاءة الكربون المنشط في ضبط انبعاثات الزئبق. وبصورة عامة يعتبر ضبط مركبات الزئبق المؤكسدة أكثر سهولة من ضبط الزئبق النقي. ويكتسب المحتوى الهالوجيني للنفايات أهميةً في تحديد حجم الأكسدة التي تحدث. وكثيراً ما يوجد المحتوى الهالوجيني العالي في غازات المداخن، وبالتالي النسب العالية من الزئبق المؤكسد، في أفران حرق النفايات البلدية. ويمكن أن تصل كفاءة الإزالة عند حقن الكربون المنشط مع استخدام المرشحات النسيجية إلى ٩٥ في المائة.

وقد اتضح أن الحقن المنفصل للكربون المنشط، المتحكم فيه من خلال الرصد المستمر للزئبق في الغاز الأولي، فعال للغاية في عملية حرق النفايات. وبهذه الطريقة يمكن تكييف الكمية المضافة من الكربون المنشط مع تراكيز الزئبق في الغاز الأولي. إضافة إلى ذلك فإنه في حالة حدوث زيادات حادة في تراكيز الزئبق في الغاز الأولي يمكن حقن كربون منشط عالي الفعالية مشرباً بنسبة قدرها ٢٥ في المائة تقريباً من الكبريت. وتجمع هذه بين الطريقة التخفيض الفعال للزئبق وتخفيض تكاليف التشغيل الناتج عن خفض استخدام المواد الممتزة. وتجدر الإشارة إلى أن تكاليف الاستثمار في جهاز لقياس غازات الزئبق يمكن أن تكون أقل كثيراً مقارنةً بتكاليف جهاز الغازات النظيفة نظراً لعدم ضرورة أجهزة القياس المختبرة من حيث الملاءمة (Esser-Schmittmann 2012).

وعلى وجه الخصوص فإنه في الحالات التي تنطوي على تراكيز عالية نسبياً من الزئبق النقي في غاز المداخن، مثلاً في منشآت حرق حمأة مياه المجارى، لا يمكن تحقيق كفاءات حرق مرضية إلا عند استخدام كربون منشط مشرب بحامض الكبريتيك أو بهالوجين (مثل البروم).

وأظهرت الاختبارات أن معدل خفض الزئبق يزداد مع انخفاض درجة حرارة غاز المداخن وأن كفاءة الخفض تكون أعلى بكثير عندما تكون تراكيز الزئبق عالية في الغاز الأولي (Takaoka et al. 2002).

وتزداد كفاءة الإزالة للممترات الكربونية عند استخدام مرشح نسيجي بدلاً من جهاز ترسيب كهروستاتيكي، وذلك بسبب فترة المكوث الأطول التي تسمح بتلامس أكبر بين المادة الممتزة وغاز المدخنة المحمل بالزئبق. ونتيجة لذلك لا تكون هناك حاجة إلا لثلث كمية المادة الممتزة لاحتجاز نفس الكمية من الزئبق مقارنةً بجهاز الترسيب الكهروستاتيكي (LCP BREF Draft 2013).

ولزيادة فعالية إزالة الزئبق من غازات المداخن يستخدم كربون منشط مطور خصيصاً وهو مشرب بحامض الكبريتيك أو الكبريت العنصري أو البروم. وفي هذه الحالة فإن إزالة الزئبق مدفوعة بالامتزاز الكيميائي، وكذلك بالامتزاز الفيزيائي. وقد أظهرت الاختبارات أن كفاءة خفض الزئبق يمكن أن تزداد إلى ٩٩ في المائة.

التأثيرات الشاملة لوسائط متعددة (غير المتعلقة بالزئبق)

تبلغ المعدلات النموذجية لاستهلاك الكربون ٣ كغم/طن من النفايات عند حرق النفايات الصلبة البلدية. وقد أبلغ عن مستويات تتراوح من ٠,٣ إلى ٢٠ كغم/طن من النفايات الخطرة (EC, 2006, Waste Incineration).

تكاليف التركيب والتشغيل

بالنسبة لمنشأة تعالج ٢٠٠ ٠٠٠ طن من النفايات بخطين للحرق ومعالجة غاز المداخن: تتراوح تكاليف معالجة غاز المداخن الجاف، بما في ذلك تخزين المواد الممتزة، ونظم تحديد الجرعات، والتحكم في حقن المواد الممتزة، والمرشح النسيجي، وتصريف الرماد، بين ٥,٥ مليون يورو و٦ مليون يورو كتكاليف تركيب.

وتبلغ تكاليف تركيب منشآت تخزين الكربون المنشط زهاء ٥٠ ٠٠٠ يورو للمنشآت الصغيرة (التخزين في حاويات) وزهاء ١٠٠ ٠٠٠ يورو لمنشآت أكبر حجماً (التخزين في صوامع) (بيانات من ألمانيا، ٢٠١٤).

وتعتمد تكاليف التشغيل على نوع الكربون المستخدم. ففي حالة فحم الكوك المستخدم في المواقد تبلغ التكلفة نحو ٣٠٠ يورو للطن، وفي حالة الكربون المشرب بحامض الكبريتيك المخفف (٥ في المائة) تبلغ التكلفة نحو ٤٠٠ يورو للطن، وفي حالة الكربون المشرب بكمية كبيرة من الكبريت تبلغ التكلفة نحو ٢٠٠٠ يورو للطن، وفي حالة الكربون المنشط المبروم تبلغ التكلفة نحو ١٥٠٠ يورو للطن.

ويُقدَّر استخدام الكربون المشرب بكميات منخفضة من حامض الكبريتيك لمنشأة حرق تعالج ٣٠٠.٠٠٠ طن من النفايات الصلبة البلدية بـ ٣٠ طن/السنة لمنشأة تستخدم مرشح بوليسي وبـ ٢٠٠ طن/السنة لمنشأة مجهزة بنظام جاف لمعالجة غازات المداخن (بيانات من ألمانيا، ٢٠١٤).

المنافع المشتركة

يمكن أيضاً تحقيق فصل المركبات العضوية المتطايرة مثل الديوكسينات في غاز المداخن. ومن المعتاد إضافة الكواشف القلوية مع الكربون، وهذا يسمح بخفض الغازات الحمضية في نفس الخطوة من العملية، بمثابة جهاز متعدد الوظائف.

٣-٤ إضافة البروم إلى المرجل

من شأن إضافة البروم داخل الفرن أن تحسن تأكسد الزئبق أثناء مروره بمرجل غاز المدخنة، الأمر الذي يشجع بالتالي تحول الزئبق الغازي الأولي غير القابل للذوبان إلى بروميد زئبقي قابل للذوبان في الماء، وكذلك إلى مركبات زئبق قابلة للامتزاز. وعلى ذلك يمكن تحسين إزالة الزئبق بواسطة أجهزة الضبط الموجودة في المراحل النهائية، مثل أجهزة التنظيف الرطبة. وهناك خيار على صعيد إضافة الهالوجينات وهو إضافة البروم أو المركبات الهالوجينية الأخرى إلى النفايات (Vosteen 2006).

وتجدر الإشارة إلى أن عملية إضافة البروم إلى المرجل وحدها لا تخفض انبعاثات الزئبق في حد ذاتها، أي باحتجاز الزئبق النقي في شكل بروميد زئبقي. إن إضافة البروم للمرجل تعزز عملية تأكسد الزئبق وبالتالي تخفض بصورة غير مباشرة انبعاثات الزئبق في النظم الرطبة القائمة لضبط تلوث الهواء مثل أجهزة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت أو أجهزة التنظيف الجاف لإزالة الكبريت؛ وبالتالي فإضافة البروم للمرجل تحسن كفاءة الكربون المنشط المحقون في الوحدات المحتوية على أجهزة تنظيف الجسيمات الدقيقة العالقة (أجهزة الترسيب الكهروستاتيكية، المرشحات النسيجية) (LCP BREF Draft Version 2013).

وفي منشآت حرق النفايات تكون هذه التقنية مفيدة عندما تحتوي النفايات على مستويات قليلة من الهالوجينات، ولذلك فإنها تستخدم بصورة رئيسية في منشآت حرق حمأة مياه البحار ومنشآت حرق النفايات الخطرة التي تحرق النفايات عند مستويات منخفضة من الهالوجينات. وعلى سبيل المثال في منشأة إحراق ألمانية لمعالجة النفايات الخطرة يجري رصد غاز المداخن بصورة مستمرة. ويتم الرصد بعد جهاز التنظيف الرطب ولكن قبل الاختزال الحفزي الانتقائي في المرحلة التالية نظراً لأن الأجهزة التي تقوم بهذا الاختزال تحتجز الزئبق الذي ينطلق ببطء مرة أخرى بعد ذلك. وفي حال اكتشاف زيادة كبيرة في كمية الزئبق بعد جهاز التنظيف الرطب فإنه يتعين حقن مركبات برومية في المرجل، وهذا يؤدي إلى تقليل انبعاثات الزئبق بدرجة كبيرة في غاز المدخنة المنظف (Vosteen, 2006). بيد أن هذه التقنية غير فعالة في حال حدوث زيادات حادة قصيرة جداً للزئبق في غازات المدخنة نظراً لأن هذه الزيادات تتجاوز نظام معالجة غازات المدخنة قبل أن تتاح إمكانية لحدوث تفاعل.

وأبلغ بشكل عام عن أنه عند استخدام البروم/الزئبق بنسب كتلية تزيد عن ٣٠٠ فإنه يمكن تحقيق أكسدة الزئبق بشكل كامل. وقد اتضح مؤخراً في منشأتين فرنسيتين لحرق النفايات الخطرة، تستخدمان بصورة رئيسية التنظيف الجاف لغاز المدخنة، أن كفاءة إزالة الزئبق عند استخدام الكربون المنشط بلغت ١٠٠ في المائة تقريباً، واتضح هذه الكفاءة في وجود الزئبق المؤكسد فقط تقريباً (Chaucherie et al., 2015). كذلك تم الوصول إلى كفاءة إزالة مشابهة قدرها ٩٩,٨ في المائة باستخدام نظام تنظيف متعدد المراحل.

وقد يؤدي استخدام البروم في هذه العملية إلى تكون الديوكسينات المتعددة البروم أو الديوكسينات والفيورانات المتعددة الهالوجينات وهي مركبات غير مرغوب فيها. وتجدر الإشارة إلى أنه يتعين التحكم في انبعاثات هذه المواد، إذا حدثت.

التأثيرات الشاملة لوسائط متعددة

ويمكن أن تصبح قياسات الزئبق صعبة للغاية في حال وجود البروم في غاز المداخن. وقد يحدث البروم تآكلاً في شبكة الأنابيب ونظام تسخين الهواء ونظام إزالة الكبريت من غاز المداخن. ويتزايد التآكل الناتج عن وجود البروم بشكل عام مع زيادة محتوى البروم والزئبق في الرماد المتطاير (LCP BREF Draft Version, 2013).

تكاليف التركيب والتشغيل

يمكن أن يكون استخدام عملية حقن الكربون المنشط بالاقتران مع إضافة البروم إلى المرجل أكثر فعاليةً من حيث الكلفة بالمقارنة مع استخدام إحدى الطريقتين بشكل منفرد بهدف تحقيق نفس مستوى الأداء.

٣-٥ المرشحات ذات القاعدة الثابتة

تستخدم المرشحات ذات القاعدة المتحركة العاملة بفحم الكوك المنشط كعملية تنظيف ثانوية في غازات مداخن منشآت حرق النفايات البلدية والخطرة. وباستخدام نظام الامتزاز هذا يمكن ترسيب مواد تدخل في تركيب غاز المداخن بتركيزات منخفضة بكفاءة تبلغ ٩٩ في المائة. ويستخدم فحم اللغنيت، المنتج في عملية فحم الكوك بالفرن ذي الموقد، في أجهزة الامتصاص ذات القاعدة المتحركة.

ويمر غاز المداخن عبر حشوة من كوك الفرن الحبيبي - وهو فحم كوك ناعم بقطر ١,٢٥ مم - ٥ مم. ويستند الأثر الترسبي لكوك الفرن بصورة رئيسية إلى آليتي الامتزاز والترشيح. وعليه فإن من الممكن تقريباً ترسيب جميع مكونات غاز المداخن ذات الصلة بالانبعاثات، وعلى وجه الخصوص المحتويات المتخلفة من حامض الهيدروكلوريك، وحامض الهيدروفلوريك، وأكاسيد الكبريت، والمعادن الثقيلة (بما في ذلك الزئبق)، إلى مستويات تصل في بعض الأحيان إلى ما دون المستوى الذي يمكن كشفه.

ويوجه غاز المداخن إلى حشوة فحم الكوك المنشط فوق طبقة توزيع مجهزة بمجموعة من الأقماع المزدوجة حيث يتدفق الغاز عبرها من القاعدة إلى القمة بينما يمر كوك الموقد عبر جهاز الامتصاص من القمة إلى القاعدة، وهذا يجعل من الممكن توفر توزيع مثالي لغاز المداخن في كامل المقطع العرضي لجهاز الامتصاص، مع الاستخدام الأمثل لطاقة جهاز الامتصاص وبأقل استهلاك ممكن لفحم الكوك المنشط.

وهناك ميزة أساسية لنظام القاعدة المتحركة وهي كفاءته العالية مع كل أنواع الانبعاثات نظراً للكمية الضخمة من فحم الكوك المنشط، حيث لا تكون للتباينات الناتجة عن الحرق وعمليات تنقية غاز المداخن في المراحل الأولية والمرتبطة بالتشغيل أي آثار ضارة.

ويسبب احتواء مرشحات القاعدة الثابتة على الكربون ينشأ احتمال لاندلاع حرائق. ونتيجةً لمخاطر اندلاع الحرائق والتكاليف العالية المرتبطة بذلك فإن هذه النظم لا تُركب إلا في القليل من المنشآت. ويتعين توخي الحذر لتفادي اندلاع أي حريق، بما في ذلك من خلال تركيب نظام ترطيب.

الآثار الشاملة لوسائط متعددة (بخلاف تلك المرتبطة بالزئبق) (WT BREF 2005)

تشمل الآثار الشاملة لوسائط متعددة بخلاف تلك المرتبطة بالزئبق ما يلي:

- استهلاك الطاقة: ٣٠ - ٣٥ كيلوواط ساعة/طن من مدخلات النفايات
- استهلاك الكواشف: ١ كغم/طن من مدخلات النفايات
- كمية المخلفات: ٠ - ١ كغم/طن من مدخلات النفايات

تكاليف تركيب وتشغيل مرشح الكوك

تقدر تكاليف الاستثمار في مرشح الكوك بفرن لحرق النفايات الصلبة البلدية بطاقة ١٠٠.٠٠٠ طن/السنة بـ ١,٢ مليون يورو. وتبلغ تكاليف الاستثمار في مرشح رطب واحد ذي قاعدة ثابتة (خالية) (بخط حرق قدره ٥٠.٠٠٠ طن/السنة) زهاء مليون يورو (EC, 2006, Waste Incineration).

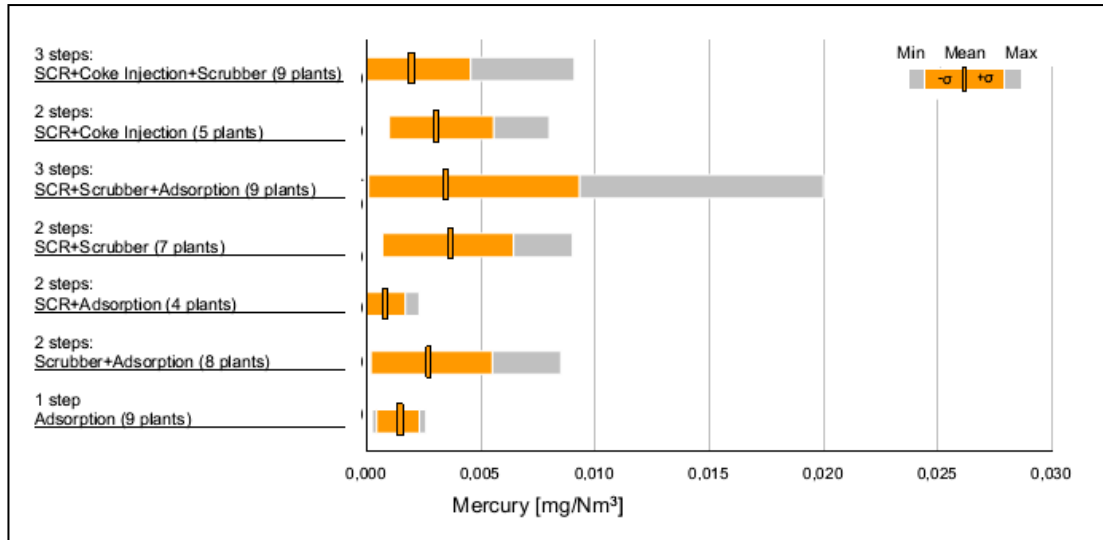
المنافع المشتركة

تشمل المنافع المشتركة لاستخدام مرشح ذي قاعدة متحركة يعمل بفحم الكوك المنشط فصل المركبات العضوية المتطايرة، مثل الديوكسينات، في غاز المداخن.

٦-٣ أمثلة توضيحية لقيم الانبعاثات المنجزة بالتقنيات المبينة أعلاه

توضح الجداول والأشكال التالية الأداء المنجز من خلال تطبيق التقنيات المشار إليها أعلاه. ويبين الشكل ٦ القيم المتوسطة السنوية لانبعاثات الزئبق لمختلف التقنيات التجميعية أو ذات الخطوة الواحدة الرامية للتحكم في غازات النفايات في ٥١ منشأة في ألمانيا تستخدم لحرق النفايات البلدية والطبية والخطرة. وجميع هذه المنشآت مجهزة بقياسات مستمرة للزئبق. ولكل توليفة تقنيات يرد متوسط جميع القيم المبلغ عنها (الخط متوسط) جنباً إلى جنب مع الانحراف المعياري (باللون البرتقالي) والقيم الدنيا والقصى (باللون الرمادي).

وتبلغ القيمة المتوسطة السنوية للانبعاثات زهاء ٢,٥ ميكروغرام/نانومتر^٣ (المتوسط السنوي استناداً إلى المتوسطات اليومية)، وهي متشابهة لكل توليفات تقنيات التحكم المركبة، وتطلق أكثر من ٩٠ في المائة من المنشآت أقل من ١٠ ميكروغرام/م^٣. وجميع توليفات التقنيات المستعملة ملائمة لخفض الزئبق وفق ما تشير إليه النطاقات الضعيفة لقيم الانبعاثات السنوية المبلغ عنها لكل توليفة.



الشكل ٦- مقارنة بين تقنيات التحكم في غازات النفايات الرامية لخفض الزئبق (عدد المنشآت بين قوسين) (Daschner et al., 2011)

ويظهر الجدولان ٣ و ٤ بيانات القياس الفعلية من أفران حرق النفايات الصناعية والبلدية في اليابان. بيد أنه في حالة أفران حرق النفايات الصناعية يوجد انحراف كبير في تراكيز الزئبق في غاز المداخن. وتجدد الإشارة إلى أن الكربون المنشط لا يستخدم في كل هذه المنشآت، منشآت حرق النفايات البلدية ومنشآت حرق النفايات الخطرة. وعادةً ما يكون الأداء أفضل في المنشآت التي يجري فيها حقن الكربون المنشط.

الجدول ٣

توزيع تركيز الزئبق (ملغم/متر^٣ عادي) في غاز المداخن عن طريق تكنولوجيا معالجة غاز المداخن (فرن لحرق النفايات البلدية)

نوع معالجة غاز المداخن	القيم الدنيا	الوسط الحسابي	القيم القصوى	الانحراف المعياري
مرشح نسيجي + حقن الجير المطفأ (جاف) (٨٦ فرنًا)	٠,٠٠٠٥	٠,٠١٧٦	٠,١٦٥	٠,٠٢٢
مرشح نسيجي + جهاز تنظيف (٣٢ فرنًا)	٠,٠٠٠٢	٠,٠١١٤	٠,٠٧٤	٠,٠١٥
مرشح نسيجي + (جبر مطفأ أو جهاز تنظيف) + المعالجة بالكربون المنشط (٢٢٩ فرنًا)	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٨١	٠,٢٤٩	٠,٠٢٠
جهاز ترسيب كهروستاتيكي + جهاز تنظيف (٩ أفران حرق)	٠,٠٠٠٤	٠,٠١٥٤	٠,٠٤٧	٠,٠١٤
جهاز ترسيب كهروستاتيكي + جهاز تنظيف + المعالجة بالكربون المنشط (١١ فرنًا)	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٤٣	٠,٠١٤	٠,٠٠٤

المعالجة بالكربون المنشط: حقن الكربون المنشط، برج امتزاز الكربون المنشط أو امتزاز فحم الكوك المنشط

الجدول ٤

توزيع تركيز الزئبق (ملغم/متر^٣ عادي) في غاز المداخن عن طريق تكنولوجيا معالجة غاز المداخن (فرن لحرق النفايات الصناعية)

نوع معالجة غاز المداخن، رخصة الشركة	القيم الدنيا	المتوسط الحسابي	القيم القصوى	الانحراف المعياري
مرشح نسيجي (بنظام جاف أو رطب) نفايات صناعية ^أ (١٨ فرنًا)	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٥٧	٠,٠٤٦	٠,٠١٠
مرشح نسيجي (بنظام جاف أو رطب) نفايات معدنية أو نفايات صناعية خطرة (١٥ فرنًا)	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٦٢	٠,٠٣٩	٠,٠٠٨٤
مرشح نسيجي + جهاز تنظيف (مع إضافة عامل خلايبي سائل) نفايات صناعية أو نفايات معدنية أو نفايات صناعية خطرة (٥ أفران)	٠,٠٠٠٤	٠,٠٠٦٤	٠,٠٣٥	٠,٠٠٧٧
جهاز ترسيب كهروستاتيكي + جهاز تنظيف نفايات صناعية أو نفايات معدنية أو نفايات صناعية خطرة (٧ أفران)	٠,٠٠٠١	٠,٠٣٥	٠,٢١٠	٠,٠٥١

أ- مصطلح "النفايات الصناعية" هنا لا يشمل النفايات الصناعية الخطرة

*١: أفران حرق مع معالجة لغاز المداخن عن طريق المرشحات النسيجية وواحد أو أكثر مما يلي: أجهزة تنظيف (غسل بالمياه أو بالمواد القلوية)، أو حقن الكربون المنشط، أو برج لامتزاز الكربون المنشط، أو مفاعل حفاز

*٢: أفران حرق مع معالجة لغاز المداخن عن طريق توليفة من المرشحات النسيجية ومحلول تنظيف يضاف مع عامل خلايبي سائل بهدف إزالة الزئبق.

*٣: أفران حرق مع معالجة لغاز المداخن عن طريق توليفة من أجهزة الترسيب الكهروستاتيكي (الجافة أو الرطبة) وأجهزة التنظيف. ويوجد في بعض أفران الحرق أيضاً حقن للكربون المنشط (متواصل) أو أبراج لامتزاز الكربون المنشط.

أظهرت التجارب في منشأة يابانية لحرق النفايات بوقاد آلي تعالج النفايات البلدية ومزودة برج رش وتتبع حقن هيدروكسيد الكالسيوم والكربون المنشط قبل المرشح النسيجي، مستويات انبعاثات تتراوح من ٠,٤ إلى ١١,٣ ميكروغرام/م^٣ (Takaoka 2002).

ويظهر الشكل والجدولان في الفرع ٣-٦ أنه يمكن في جميع المنشآت تقريباً الوصول إلى تركيزات أقل من ١٠ ميكروغرامات/م^٣، خصوصاً عند استخدام الكربون المنشط إضافة إلى التقنيات الأخرى. وأظهرت بعض المنشآت في أوروبا واليابان تركيزات لانبعثات الزئبق أقل من ١ ميكروغرام/م^٣.

٣-٧ استخدام المخلفات الصلبة لعملية الحرق والتخلص منها

رغم أن هذه التوجيهات معنية أساساً بالانبعاثات إلى الهواء إلا أنه يتعين إيلاء الاعتبار أيضاً للتأثيرات عبر الوسائط. ووفقاً لذلك فإن الفرع التالي يقدم معلومات عن إدارة النفايات المتخلفة من عملية الحرق، بما في ذلك منع مخاطر الارتشاح أو التوزع عبر البيئة من خلال عدد من المسارات، أو التقليل إلى أدنى حد ممكن من هذه المخاطر.

وتشمل النفايات والمخلفات من عملية الحرق العديد من أنواع الرماد (مثلاً رماد القعر، رماد المرجل، الرماد المتطاير) والمخلفات من عمليات معالجة غاز المداخن الأخرى (مثل الجبس من أجهزة التنظيف الرطب)، بما في ذلك النفايات السائلة في حالة نظم التنظيف الرطبة.

ونظراً لأن المكونات موضع الاهتمام قد تتفاوت إلى حد كبير فإنه يوصى بشكل عام بالإبقاء على فصل المخلفات من أجل معالجتها وإدارتها والتخلص منها. إن وجود وتركيز الرُبُق ومركباته في هذه المخلفات (عند معالجتها بشكل منفصل) هو تابع لوجودها في النفايات الواردة ولاحتجازها أثناء معالجة غاز المداخن. ويتعين معالجة مخلفات عملية ضبط تلوث الهواء على وجه الخصوص بطريقة تهدف إلى تفادي حدوث تبخر إضافي أو تسرب للرُبُق ومركباته.

ويمكن أن يحدث إطلاق للملوثات من هذه المواد الجافة إلى البيئة من خلال عدد من المسارات، بما في ذلك: الغبار الذي تدرره الرياح، أو الارتشاح إلى المياه الجوفية، أو الامتصاص من جانب النباتات، أو الابتلاع المباشر من جانب الإنسان والحيوانات الأليفة والبرية. ويتعين إدارة هذه المواد مع إيلاء الاعتبار الواجب لهذه الإطلاقات المحتملة.

٣-٧-١ معالجة المخلفات الصلبة لغاز المداخن

أحد المخلفات الرئيسية لمعالجة غاز المداخن (أو مخلفات ضبط تلوث الهواء) هو الرماد المتطاير. وتؤدي إزالة الرماد المتطاير من غاز المداخن، عن طريق استخدام أجهزة التنظيف الجافة أو أجهزة الفرز الدوامة أو المرشحات النسيجية في أفران حرق النفايات، إلى تكون مواد حسيمية صلبة جافة ودقيقة تكتسب مجموعة من الخواص والملوثات اعتماداً على مصدر الاحتراق الذي أنتجها. وعلى عكس رماد القعر تحتوي مخلفات أجهزة ضبط تلوث الهواء، بما في ذلك الرماد المتطاير وحمات أجهزة التنظيف، على تركيزات عالية نسبياً من المعادن الثقيلة والملوثات العضوية الثابتة والكلوريدات والكبريتيدات. وتؤدي الإزالة المنفصلة للرماد المتطاير والمخلفات من مراحل تنظيف غاز المداخن (مثلاً مراحل إزالة الغازات الحمضية والديوكسينات) إلى منع امتزاج أجزاء النفايات ذات التلوث المنخفض مع الأجزاء الشديدة التلوث. ويصل معظم الرُبُق الموجود في مسارات النفايات في النهاية إلى المخلفات عند تطبيق تدابير لخفض التلوث (European Commission 2006, Song, Kim et al. 2004).

وفي سويسرا تنتشر على نطاق واسع معالجة الرماد المتطاير بالمياه العادمة الحمضية الواردة من جهاز التنظيف. ولتفادي تلوث الرُبُق للرماد المعالج يجري في البداية تنظيف المياه العادمة الحمضية بمرشح ذي عناصر أسطوانية (candle filter) تليه وحدة تبادل أيوني خاصة بالرُبُق. ويمكن استخدام هذه المياه، التي أزيل منها الرُبُق، لغسل المعادن الثقيلة من الرماد المتطاير. بعد ذلك تعالج مياه الغسل في وحدة تشغيل وترسيب تقليدية. ويجري استخدام جهاز تبادل أيوني ثاني بهدف التنظيف النهائي للمياه العادمة.

ويمكن إضافة الرماد المتطاير المنظف إلى النفايات في منشأة حرق النفايات لتدمير المكونات العضوية في الرماد المتطاير (Bühler et al. 2015, Adam et al. 2010, BSH 2015).

وفي الكثير من البلدان يجري التخلص من الرماد المتطاير في مدافن قمامة مخصصة. بيد أنه لاستيفاء معايير أفضل التقنيات المتاحة فقد يتعين على الأرجح إجراء معالجة مسبقة لهذا الغرض (انظر مثلاً Song, Kim et al. 2004)، حسب معايير القبول الوطنية المتعلقة بمدافن القمامة. ويمكن الاطلاع على معلومات أكثر تفصيلاً عن إدارة مخلفات أفران حرق النفايات المحتوية على الرُبُق في التوجيهات التقنية للإدارة السليمة بيئياً لنفايات الرُبُق في اتفاقية بازل (أمانة اتفاقية بازل ٢٠١٥).

٣-٧-٢ التثبيت والتصليد

تشمل خيارات المعالجة والتخلص فيما يخص المخلفات الصلبة من نظم التحكم في غاز المداخن التصليد أو التثبيت بالإسمنت البورتلاندي (أو المواد الأخرى البوزولانية) وحده أو بمواد مضافة أخرى أو عدد من المعالجات الحرارية، يليها التخلص الملائم الذي يتوافق مع معايير القبول الوطنية المتعلقة بمدافن القمامة (استناداً إلى الإطلاقات المتوقعة من المخلفات المعالجة). ويمكن تحديد مدى الحاجة إلى هذا النوع من المعالجة استناداً إلى تقييم احتمال إصدار إطلاقات من هذه المخلفات. ويمكن الاطلاع على معلومات أكثر تفصيلاً عن طرائق المعالجة في التوجيهات التقنية للإدارة السليمة بيئياً لنفايات الزئبق في اتفاقية بازل (أمانة اتفاقية بازل ٢٠١٥).

٣-٧-٣ استخدام رماد القع والرماد المتطاير

نظراً للاختلافات في تركيز الملوثات فإن خلط رماد القع مع الرماد المتطاير سيؤدي إلى تلويث رماد القع ولذلك يمنع خلطهما في الكثير من البلدان، ويمكن للجمع والتخزين المنفصلين لهذه المخلفات أن يوفر للمشغلين عدداً أكبر من خيارات التخلص منها، وعندما يراد استخدام رماد القع مرة أخرى (كمادة بناء مثلاً) فإن الخلط مع المخلفات الأخرى لمعالجة غاز المداخن لا يشكل عادةً واحداً من أفضل التقنيات المتاحة. ويجري التخلص من رماد القع (حبت أفران الحرق ذات القاعدة المميعة) في مدافن قمامة في الكثير من البلدان ولكن يمكن إعادة استخدامه في البناء ومواد تشييد الطرق بعد إجراء معالجة مسبقة. بيد أنه قبل الشروع في هذا الاستخدام يتعين إجراء تقييم للمحتوى وقابلية الارتشاح كما يتعين تحديد المستويات العليا للمعادن الثقيلة والملوثات العضوية الثابتة. وتشمل تقنيات المعالجة المسبقة المعالجة الجافة والرطبة والحرارية، كذلك الفرز والسحق والفصل للمعادن.

وينطوي استخدام الرماد المتطاير وخليط مخلفات حرق النفايات لأغراض البناء على مخاطر بيئية محتملة بسبب تلوثهما بالمعادن الثقيلة. وهناك أمثلة تبين أن مثل هذه الممارسة يمكن أن ينتج عنها تلوث بيئي خطير (Pless-Mulloli, Edwards et al. 2001; Watson (2001; Petrlik and Ryder 2005; Shaheen et al. 2014).

ويجب عدم استخدام رماد القع أو الرماد المتطاير من أفران حرق النفايات كمادة محسنة للتربة مطلقاً في التطبيقات الزراعية أو ما شابهها في حال تعدى تركيز الزئبق في الرماد المستويات المثيرة للقلق لأن إضافة الرماد إلى التربة قد تؤدي لاحقاً إلى انتشاره في التربة مع أي ملوثات موجودة فيه. وفي الاستخدامات الزراعية يمكن للنباتات أن تمتص الملوثات مما يؤدي إلى تعرض الإنسان والحيوانات التي تستهلك هذه النباتات للملوثات (Skinner et al, 2007). ويمكن للحيوانات التي تنقر الحب أو ترعى العشب أن تبتلع الملوثات بصورة مباشرة مما يؤدي لاحقاً إلى تعرض الإنسان لها عند استهلاكه لهذه الحيوانات أو منتجاتها (مثل الحليب والبيض) (de Vries et al., 2007).

٣-٧-٤ التخلص النهائي من المخلفات

في حال وجود عملية إعادة تدوير للمواد بخلاف الزئبق في النفايات فإنه يتعين اتخاذ تحوطات ملائمة لمنع انبعاثات الزئبق من هذه العملية. وعند التخلص من هذا النوع من المواد في مدافن قمامة فإنه يتعين الأخذ في الاعتبار إجراء تقييم لاحتمال إصدار إطلاقات ومدى ملائمة مدفن القمامة للمواد. ويمكن الاطلاع على معلومات أكثر تفصيلاً في المبادئ التوجيهية التقنية للإدارة السليمة بيئياً للنفايات التي تتكون من الزئبق النقي والنفايات التي تكون محتوية على أو ملوثة بالزئبق أو مركباته (اتفاقية بازل، ٢٠١٥).

٨-٣ تقنيات المعالجة البديلة لمسارات النفايات التي يمكن أن تولد عند حرقها انبعاثات للزئبق ومركبات الزئبق

يبين هذا الفرع بعض تكنولوجيات المعالجة البديلة المتوفرة تجارياً في الوقت الحالي. والهدف من أي تكنولوجيا معالجة بديلة هو إنجاز نفس القدر من التدمير للمركبات العضوية مع التحكم في الإطلاقات المحتملة للزئبق المتخلف.

وفيما يخص النفايات البلدية تتمثل البدائل الممكنة للحرق فيما يلي:

- استراتيجيات إدارة النفايات الصفرية التي تهدف إلى القضاء على توليد النفايات من خلال تطبيق العديد من التدابير، بما في ذلك الصكوك التشريعية والاقتصادية (سياسات الاقتصاد الدائري والتأمين على إعادة التدوير) (Greyson, 2007; Matete and Trois, 200; Allen, Gokaldas et al, 2012)
- التقليل إلى أدنى حد ممكن من النفايات والفصل وإعادة التدوير في المصدر لخفض كمية النفايات التي تحتاج إلى التخلص النهائي منها؛
- المعالجة الميكانيكية البيولوجية التي تخفض كمية النفايات بطرق ميكانيكية وبيولوجية وتولد مخلفات تحتاج إلى المزيد من الإدارة (Bilitewski, Oros et al. 2010)؛ (Velis, Longhurst et al. 2009).

أما فيما يخص النفايات الطبية فإن البدائل الممكنة لاستخدام الحرق هي:

- تعريض النفايات لبخار مشبع تحت ضغط في وعاء ضغط أو جهاز تعقيم؛
- نظم متقدمة للتعقيم بالبخار. وتجمع أجهزة التعقيم المتطورة أو نظم التعقيم المتقدمة بالبخار بين المعالجة بالبخار بعمليات ما قبل التنظيف بالمكنسة الكهربائية ومختلف أنواع المعالجة الميكانيكية قبل وأثناء وبعد المعالجة بالبخار؛
- المعالجة بالموجات الميكروية؛
- التعقيم الحراري الجاف

ويرد وصف جيد لهذه البدائل في المبادئ التوجيهية المتعلقة بأفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية في اتفاقية استكهولم (اتفاقية استكهولم، ٢٠٠٨) وفي خلاصة تكنولوجيات معالجة/تدمير نفايات الرعاية الصحية الصادرة عن برنامج الأمم المتحدة للبيئة (Emmanuel, 2012). وطور برنامج الأمم المتحدة للبيئة أيضاً برنامجاً تفاعلياً قائماً على برنامج إكسل، ييسر استخدام التقييم المستدام لمنهجية التكنولوجيات من أجل اختيار تكنولوجيات معالجة نفايات الرعاية الصحية (Emmanuel, 2012).

وفيما يتعلق بالنفايات الخطرة ترد بعض البدائل الممكنة في الفصل الثالث الخاص بالمبادئ التوجيهية التقنية بشأن نفايات الزئبق في اتفاقية بازل (اتفاقية بازل، ٢٠١٥) وعلى وجه الخصوص فيما يتعلق بالتربة الملوثة بالزئبق وأيضاً في الدراسة التي أجراها بيل للمواقع الملوثة في كازاخستان (Bell, 2015).

أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لمرافق حرق النفايات

٩-٣ مدخل إلى أفضل التقنيات المتاحة لحرق النفايات

يهدف هذا الفرع إلى المساعدة في تحديد أفضل التقنيات التي تنطبق على عملية حرق النفايات. وتشمل أفضل التقنيات المتاحة لحرق النفايات تصميم وتشغيل وصيانة منشأة حرق النفايات على نحو يقلل عملياً إلى أدنى حد ممكن من انبعاثات الزئبق.

وعند النظر في أفضل التقنيات المتاحة لحرق النفايات فإن من المهم الأخذ في الاعتبار أن الحل الأمثل لنوع محدد من منشآت حرق النفايات يتفاوت وفقاً للظروف المحلية. ولا يقصد من التقنيات الواردة هنا أن تكون بمثابة قائمة مرجعية تشير إلى أفضل الحلول على المستوى المحلي نظراً لأن ذلك سيتطلب دراسة الظروف المحلية لدرجة لا يمكن بيانها في وثيقة تتناول بشكل عام أفضل التقنيات المتاحة. وبناءً على ذلك فإن مجرد الجمع بين فرادى العناصر المبينة هنا بوصفها أفضل التقنيات المتاحة، دون

أخذ الظروف المحلية في الاعتبار، لن يفضي على الأرجح إلى تقديم حل أمثل على النطاق المحلي فيما يتعلق بالبيئة ككل (European Commission, 2006).

وعند الجمع بطريقة مثلى بين التدابير الأولية والثانوية المرتبطة بأفضل التقنيات المتاحة أُبلغ عن مستويات لانبعاثات الزئبق لا تزيد عن ١٠ ميكروغرام/م^٣ (عند أكسجين بنسبة ١١ في المائة) (Daschner et al., 2011). ولوحظ كذلك أنه في ظروف التشغيل العادية يمكن تحقيق انبعاثات تقل عن ١ ميكروغرام/م^٣ في منشأة حرق نفايات جيدة التصميم (انظر الفرع ٥-٥-٢ أدناه). وتوجد في جميع أنحاء العالم الكثير من منشآت حرق النفايات يتم تصميمها وتشغيلها وفقاً لمعظم البارامترات التي تحدد أفضل التقنيات المتاحة وتلبي مستويات الانبعاثات المتعلقة بها. ومن المنتظر أن تحقق المنشآت الجديدة هذه المستويات.

ويمكن أن تنطوي منشآت حرق النفايات الصغيرة، بما في ذلك أفران حرق النفايات الطبية، على مشاكل في تطبيق أفضل التقنيات المتاحة. ويمكن أن تشكل بعض التقنيات غير المتعلقة بحرق النفايات بدائل مجدية وسليمة بيئياً لعملية الحرق، وفق ما هو مبين في المبادئ التوجيهية التقنية للإدارة السليمة بيئياً لنفايات الزئبق في اتفاقية بازل (انظر الفرع ٣-٧ من هذه الوثيقة) وفي الفرع الثاني من المبادئ التوجيهية لاتفاقية استكهولم بشأن أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية.

٣-١٠ المعالجة المسبقة للنفايات قبل حرقها

يشكل الخلط (مثلاً الخلط باستخدام الرافعة) أو المعالجة المسبقة الإضافية (مثلاً مزج بعض السوائل والنفايات ذات القوام المعجوني، أو تقطيع بعض النفايات الصلبة) للنفايات غير المتجانسة إلى الدرجة المطلوبة للوفاء بمواصفات تصميم المنشأة المستقبلية، خطوة مهمة. وتشترط المعالجة المسبقة على الأرجح عندما تكون المنشأة مصممة لنفايات متجانسة بمواصفات محددة على نطاق ضيق.

٣-١١ أفضل التقنيات المتاحة للنفايات المدخلة والتحكم فيها

يتعين الأخذ في الاعتبار الممارسات العامة التالية لمدخلات النفايات والتحكم فيها عند التعامل مع أفضل التقنيات المتاحة لمناولة النفايات المحتوية على الزئبق أو الملوثه به:

- الإبقاء على الموقع في حالة مرتبة ونظيفة عموماً؛
- تحديد ضوابط للتحكم في النفايات المدخلة والالتزام بها، وفقاً لأنواع النفايات التي يمكن أن ترد إلى المنشأة. وهذا يمكن أن يشمل:

- وضع قيود على المدخلات المراد معالجتها وتحديد المخاطر الرئيسية؛
- التواصل مع موردي النفايات لتعزيز ضبط جودة النفايات الواردة؛
- التحكم في نوعية النفايات الملقمة في موقع الحرق؛
- فحص النفايات الواردة وأخذ عينات منها واختبارها.

٣-١٢ أفضل التقنيات المتاحة لحرق النفايات

هناك معاوضة محتملة يمكن إجراؤها على صعيد تشغيل أفران حرق النفايات. ومن أجل تحقيق أكبر قدر من التدمير يتعين أن يكون الاحتراق كاملاً. وتبين الفروع التالية، أولاً، الاعتبارات العامة التي تقود على الأرجح إلى إنجاز أكبر قدر ممكن من الاحتراق. ويرد بعد ذلك وصف لاعتبارات معينة لفرادى مسارات النفايات. ويعتمد اختيار تقنية حرق ما على نوع النفايات المراد حرقها.

٣-١٢-١ اشتراطات عامة لتقنيات الحرق

الشروط التالية مهمة لتحقيق أفضل احتراق:

- التأكد من أن تصميم الفرن ملائم بصورة جيدة لخصائص النفايات المراد معالجتها؛
- الإبقاء على درجات الحرارة في مناطق احتراق الطور الغازي ضمن المدى الأفضل بهدف إنجاز التأكسد الكامل للنفايات (مثلاً ٨٥٠م - ٩٥٠م في الأفران الشبكية لحرق النفايات الصلبة البلدية، ١٠٠م - ٢٠٠م عندما يكون محتوى الكلور في النفايات عالياً)؛
- السماح بفترة مكوث كافية (مثلاً ثانيتين على الأقل) مع المزج الشديد في غرف الاحتراق بهدف إكمال عملية الحرق؛
- التسخين المسبق للهواء الأولي والثانوي للمساعدة في الاحتراق عند الضرورة؛
- المعالجة المستمرة وليس على دفعات ما أمكن، للتقليل إلى أدنى حد ممكن من الإطلاقات عند بدء التشغيل وعند الإغلاق؛
- تركيب نظم لرصد بارامترات الاحتراق المهمة مثل الحرارة وانخفاض الضغط ومستويات أول أكسيد الكربون والأكسجين، وكذلك سرعة الشبكة المعدنية، عند الاقتضاء؛
- السماح بتدخلات التحكم لتعديل النفايات الملقمة وسرعة الفرن الشبكي ودرجة الحرارة وحجم وتوزيع الهواء الأولي والثانوي؛
- تركيب أفران حرق أوتوماتيكية مساعدة للحفاظ على درجة الحرارة المثلى في غرف الاحتراق؛
- استخدام الهواء في المستودعات ومرافق التخزين كهواء احتراق؛
- تركيب نظام يوقف أوتوماتيكياً تليم النفايات عندما تكون بارامترات الاحتراق غير ملائمة.

٣-١٢-٢ تقنيات حرق النفايات الصلبة البلدية

ترد فيما يلي اعتبارات خاصة بحرق النفايات الصلبة البلدية:

- ثبت بشكل جيد ملائمة أفران الحرق (ذات الشبكة المعدنية المتحركة) لحرق النفايات الصلبة البلدية غير المتجانسة وهي تتمتع بتاريخ تشغيلي طويل؛
- تتمتع الأفران الشبكية المبردة بالمياه بميزات إضافية تتمثل في التحكم الأفضل في عملية الاحتراق والقدرة على معالجة النفايات الصلبة البلدية ذات المحتوى الحراري العالي؛
- يمكن للأفران الدوارة الشبكية أن تعالج النفايات الصلبة البلدية غير المتجانسة لكن بكميات أقل مقارنةً بأفران الحرق الضخمة أو الأفران الشبكية المتحركة؛
- تتميز الأفران الشبكية الثابتة المزودة بنظم ناقل (مثل المكابس) بعدد أقل من الأجزاء المتحركة إلا أن النفايات قد تكون بحاجة إلى المزيد من المعالجات المسبقة (مثل التقطيع والفصل)؛
- تستخدم التصميمات ذات الوحدات التجميعية المحتوية على غرف احتراق ثانوي على نطاق واسع في التطبيقات الصغيرة. واعتماداً على الحجم فإن بعض هذه الوحدات قد تحتاج إلى التشغيل على دفعات.

- تستخدم الأفران ذات القاعدة المميعة والأفران المزودة بجهاز ناشر أو ذات الوقاد الآلي على نطاق واسع للنفايات الناعمة المتناسقة مثل الوقود المشتق من النفايات.

٣-١٢-٣ تقنيات حرق النفايات الخطرة

ترد فيما يلي اعتبارات خاصة بحرق النفايات الخطرة:

- تستخدم الأفران الدوارة على نطاق واسع لحرق النفايات الخطرة وبمقدورها معالجة المواد السائلة وذات القوام المعجوني وكذلك المواد الصلبة (انظر الأقسام الفرعية ٢-٢-٣-١ إلى ٢-٢-٣-٥)؛
- ويشيع استخدام أفران الحرق التي تعمل بضخ السوائل لحرق النفايات الخطرة؛
- ويمكن تشغيل الأفران المبردة بالمياه عند درجات حرارة عالية ويمكنها معالجة نفايات ذات قيم طاقة عالية؛
- ويمكن تحسين تناسق (واحتراق) النفايات من خلال استخدام براميل التقطيع وغيرها من النفايات الخطرة المعبأة؛
- ويساعد نظام التلقيح المتساوي (مثلاً أجهزة النقل اللولبية التي تسحق وتوفر كمية ثابتة من النفايات الخطرة الصلبة للفرن) في ضمان توفير تلقيح مستمر ومتحكم فيه للفرن وكذلك ضمان المحافظة على ظروف احتراق موحدة.

٤-١٢-٣ تقنيات حرق حمأة مياه المجاري

ترد فيما يلي اعتبارات خاصة بحرق حمأة مياه المجاري:

- تستخدم على نطاق واسع الأفران ذات القاعدة المميعة والأفران ذات المواقد المتعددة في المعالجة الحرارية لحمأة مياه المجاري؛
- وتسمح الأفران الدوارة ذات القاعدة المميعة بمرونة أكبر للوقود مقارنةً بذات القاعدة الفوارة إلا أنها تحتاج إلى فراغات دوامية للحفاظ على مواد طبقة القاعدة؛
- يتعين اتخاذ الحذر عند استخدام الوحدات ذات القاعدة الفوارة لتفادي الانسداد؛
- من شأن استخدام الحرارة المستعادة من العملية للمساعدة في تخفيف الحمأة أن يقلل من الحاجة إلى استخدام وقود إضافي؛
- تكنولوجيات الإمداد مهمة عند الحرق المشترك لحمأة مياه المجاري في أفران حرق النفايات الصلبة البلدية. ومن التقنيات التي ثبتت ملاءمتها: نفخ الحمأة المخففة في الفرن في شكل غبار؛ والتزويد بالحمأة المسحوبة عن طريق الرشاشات وتوزيعها ومزجها على الفرن الشبكي؛ ومزج الحمأة المسحوبة أو المخففة مع النفايات الصلبة البلدية وتلقيحهما معاً (European Commission 2006).

٥-١٢-٣ حرق النفايات الطبية

ترد فيما يلي اعتبارات خاصة بحرق النفايات الطبية:

- عند استخدام الشبكات المعدنية يجب أن يُراعى في تصميم هذه الشبكات ضمان التبريد الكافي من خلال السماح بتغيير إمدادات الهواء الأولي، والهدف الرئيسي من ذلك هو التحكم في عملية الاحتراق وليس تبريد الشبكة نفسها. وبشكل عام تكون الشبكات المعدنية المبردة هوائياً التي تتميز بحسن توزيع تيار تبريد الهواء مناسبة للنفايات التي يصل صافي القيمة الحرارية فيها إلى زهاء ١٨ ميغاجول/كغ. أما النفايات ذات المحتوى الحراري الأعلى (مثلاً أكثر من

زهاء ١٨ ميغاجول/كغ) فقد تحتاج إلى تبريد بالمياه (أو بسائل آخر) بهدف تفادي الحاجة إلى مستويات زائدة من الهواء الأولي للتحكم في درجة حرارة الشبكة - أي المستويات التي تنتج عنها إمدادات هوائية أكبر من المستويات المثلى للتحكم في الاحتراق؛

- ويتعين استخدام تصاميم لغرف الاحتراق تسمح باحتواء النفايات ورجها ونقلها، مثل الأفران الدوارة - المزودة أو غير المزودة بالتبريد بالماء. ويمكن أن يكون التبريد بالماء في الأفران الدوارة ملائماً في الأوضاع التالية:
 - عندما يكون صافي القيمة الحرارية للنفايات الملقمة عالياً (أي أكبر من ١٥ - ١٧ غيغاجول/طن)؛
 - عند استخدام درجات الحرارة العالية - أي أعلى من ١٠٠ م° (مثلاً لتحويل نفايات معينة إلى خبث أو تدميرها)؛

- ويمكن حرق النفايات الطبية في أفران حرق النفايات الصلبة البلدية من خلال استخدام الأفران ذات الشبكات المعدنية، بيد أنه يتعين إجراء بعض التعديلات الخاصة. وفي حالة حرق النفايات الطبية المعدنية في فرن حرق النفايات البلدية فإنه يتعين تعقيم هذه النفايات أولاً أو تلقيمها في الفرن داخل حاويات ملائمة عن طريق التحميل الأوتوماتيكي (اتفاقية استكهولم، ٢٠٠٨). ويجب تفادي الخلط السابق للنفايات الطبية المحتوية على الزئبق أو الملوثات به مع أنواع النفايات الأخرى، كما يجب تفادي المناولة المباشرة لها.

٣-١٣ أفضل التقنيات المتاحة لمعالجة غاز المداخن

يبين هذا القسم الفرعي التقنيات التي يمكن النظر في استخدامها عند اختيار أفضل التقنيات المتاحة لمعالجة غاز المداخن في منشآت حرق النفايات. وتنطبق هذه التقنيات بشكل عام على المرافق الجديدة والقائمة، ما لم يذكر خلاف ذلك. ويشتمل هذا القسم أيضاً على توجيهات بشأن تطوير المرافق القائمة.

ويشيع استخدام المرشحات النسيجية التي تكتسب أفضلية عندما تكون مقترنة بحقن المواد الممتزة شبه الجافة أو الجافة حيث توفر هذه المرشحات ترشيحاً إضافياً وسطحاً تفاعلياً على كُسب المرشح. وعند اقترانها مع النظم الرطبة يمكن تصميم أجهزة الترسيب الكهروستاتيكية وتشغيلها أيضاً لتحقيق انبعاثات زئبق منخفضة. وللمرشحات النسيجية مزايا مقارنةً بأجهزة الترسيب الكهروستاتيكية، خصوصاً عند تغليفها مسبقاً بغلاف من الكربون المنشط بهدف امتصاص الملوثات المتطايرة، كما أن هناك ميزة إضافية وهي تحقيق تخفيض جيد مباشرةً بعد مرحلة بدء التشغيل. وتتميز النظم الجافة وشبه الجافة بعدم حاجتها إلى معالجة النفايات السائلة لاحقاً، بيد أن درجة حرارة المنفذ إلى المرشحات النسيجية في هذه التوليفة مهمة. وتلزم عادةً درجات حرارة تزيد عن ١٣٠ م° إلى ١٤٠ م° لمنع التكتف والتآكل في الأكياس.

وعند استخدام نظام جاف يمكن خفض انبعاثات الزئبق بما يزيد عن ٩٥ في المائة عن طريق حقن الكربون المنشط (الذي يمكن أيضاً تشريبه بمواد ممتزة مثل الكبريت أو البروم أو غيرها) الممزوج بكربونات هيدروجين الصوديوم أو هيدروكسيد الكالسيوم في المراحل التي تسبق المرشح النسيجي. ومن الضروري إجراء صيانة مستمرة وفعالة لنظم ضبط الغبار.

وفي المرحلة الأولى لجهاز تنظيف عالي الكفاءة تزيد كفاءة إزالة الزئبق المؤكسد في شكل كلوريد الزئبقيك - وهو عادةً مركب الزئبق الرئيسي بعد حرق النفايات - عن ٩٥ في المائة. وتبلغ الكفاءة الكلية لإزالة الزئبق (العنصري والمتأكسد) زهاء ٨٥ في المائة.

وكإجراء إضافي للتقليل إلى أدنى حد ممكن من الزئبق في مياه جهاز التنظيف ولتجنب إعادة الانبعاث من الزئبق القابل للذوبان يمكن ترسيب الزئبق المتأكسد باستخدام عامل ترسيب مناسب مثل الكبريتيد وإضافة الكربون المنشط.

ويمكن أن تؤدي إضافة البروم إلى النفايات أو المرجل إلى زيادة معدلات تأكسد الزئبق خصوصاً عند وجود تركيزات منخفضة من الهالوجينات في النفايات، وبالتالي تعزيز إزالة الزئبق في أجهزة الضبط في المراحل التالية مثل أجهزة التنظيف (انظر أيضاً

الفرع ٣-٤). وتستخدم هذه التقنية بصورة أساسية في وحدات الاحتراق الأحادي في منشآت حرق النفايات الخطرة وحمأة مياه المجارى.

وباستخدام هذه التطبيقات أُبلغ عن تركيز زئبق يقل عن ١٠ ميكروغرام/م^٣ (متوسط سنوي) (UNECE, 2013). وبشكل عام فإن استخدام المرشحات النسيجية يمكن أن يؤدي إلى مستويات منخفضة ضمن مدى الانبعاث المشار إليه. وبالنسبة للكثير من النفايات يلزم عادةً الامتناز باستخدام الكواشف القائمة على الكربون للوصول إلى هذه المستويات للانبعاثات. وتتميز بعض مسارات النفايات بتركيزات زئبق شديدة التغير ولذلك قد تكون هناك ضرورة للمعالجة المسبقة للنفايات في هذه الحالات لمنع تجاوز الحد الأقصى لطاقة نظام معالجة غاز المداخن.

وفي حالة النفايات المحتوية على مستويات عالية من الزئبق، مثل النفايات الخطرة أو الطبية، قد يكون من الملائم الجمع بين خطوات متعددة لمعالجة غاز المداخن. وعلى سبيل المثال يمكن استخدام جهاز تنظيف يحتوي على مكونات تأكسد وكربون منشط محقون المرشح النسيجي.

ويورد الجدول ٥ التدابير الأكثر ملاءمةً لخفض الانبعاثات الثانوية. وفي حالة إعادة إحراق مخلفات معالجة غاز المداخن يتعين اتخاذ تدابير ملائمة لتفادي إعادة تدوير الزئبق وتراكمه في المنشأة.

ويؤدي استخدام الاحتزال الحفزي الانتقائي من أجل ضبط أكاسيد النيتروجين أيضاً إلى خفض انبعاثات الزئبق وبشكل هذا منفعة مشتركة بتغيير الزئبق إلى شكل يمكن جمعه عن طريق المرشحات النسيجية أو ترسيبه عن طريق أجهزة التنظيف الرطبة.

ويتعين رصد انخفاض الضغط في المرشحات النسيجية ودرجة حرارة غاز المداخن (في حال استخدام نظام تنقية في المراحل الأولية)، وذلك للتأكد من وجود كُسب المرشح ومن عدم وجود تسرب أو تبلل في الأكياس.

وفي حال توقع حدوث تركيزات زئبق قصوى مؤقتة، يتعين النظر في احتجاز وحقن كربون منشط أو فحم مشرب بالكبريت كإجراء احتياطي.

وتعتمد كفاءات التخفيض على مدخلات الزئبق وتركيزاته في الغاز الأولي وظروف التشغيل.

الجدول ٥

تدابير التحكم وكفاءات التخفيض لغازات المداخن في عمليات حرق النفايات البلدية والطبية والخطرة

كفاءة التخفيض	تدابير التحكم
أكبر من ٨٥ في المائة	أجهزة تنظيف عالية الكفاءة مع وجود مكونات في محلول جهاز التنظيف
أكبر من ٩٠ في المائة	جهاز تنظيف + حقن مواد كيميائية تحتوي على البروم في غرفة الاحتراق
أكبر من ٩٥ في المائة	حقن الكربون المنشط + مرشح نسيجي

المصدر: المفوضية الأوروبية ٢٠٠٦

٣-١٣-١ تطوير وتحسين تقنيات المعالجة القائمة

توجد العديد من الخيارات لتحسين معالجة غاز العادم في المنشآت القائمة. وفي النظم المزودة بجهاز ترسيب كهروستاتيكي يمكن تبديل هذا الجهاز بمرشح نسيجي. وفي مسار غاز المداخن قبل المرشح النسيجي يتعين إضافة مواد ممتزة قائمة على فحم الكوك (أو مواد ذات تأثير مكافئ) لخفض انبعاثات الزئبق. وللتقليل إلى أدنى حد ممكن من مخاطر نشوب حرائق يمكن استخدام مزيج مع كواشف الحجر الجيري.

وفي حال وجود انبعاثات زئبق عالية في المرافق المزودة بجهاز تنظيف فقط يمكن تركيب توليفة من محاقن المواد المضافة مع المرشحات النسيجية في المراحل النهائية.

ويتميز كلا التدبيرين بفائدة إضافية تتمثل في إمكانية إزالة الملوثات الحمضية والعضوية أيضاً من غاز المداخن. بيد أنه بسبب المخاطر الكبيرة لاندلاع حرائق فإن إضافة مرشح ذو قاعدة ثابتة مزود بالكربون المنشط أو كوك اللغيت تتطلب تدابير أمنية إضافية.

٣-١٣-٢ مستويات الأداء المرتبطة باستخدام أفضل التقنيات المتاحة

عند استخدام توليفة التقنيات المبينة في الفرع ٥-٥ أبلغ عن تركيزات زئبق في الغاز التنظيف لا تزيد عن ١٠ ميكروغرام/م^٣. وبين الشكل والجدول في الفرع ٣-٦ أنه يمكن في كل المنشآت تقريباً الوصول إلى تركيزات تقل عن ١٠ ميكروغرام/م^٣، خصوصاً عند استخدام الكربون المنشط مع التقنيات الأخرى. ووصلت تركيزات الزئبق في بعض المنشآت في أوروبا واليابان إلى أقل من ١ ميكروغرام/م^٣ عند استخدام الكربون المنشط.

٣-١٤ مدخل إلى أفضل الممارسات البيئية

تُعرف اتفاقية ميناماتا أفضل الممارسات البيئية بأنها تطبيق التوليفة الأنسب من تدابير واستراتيجيات التحكم البيئية. ويتعين النظر في اتخاذ مجموعة التدابير المتدرجة التالية عند تطبيق أفضل الممارسات البيئية:

- وضع هياكل أساسية تنظيمية ذات اختصاصات كافية للسماح باستخدام أفران حرق النفايات ومراقبة ورصد انبعاثات الزئبق بشكل منتظم؛
- تقديم المعلومات والتثقيف لعامة الناس والمستخدمين ومقرري السياسات عن التبعات البيئية لاختيار أنشطة معينة وللخيارات المتعلقة بالمنتجات والتخلص النهائي؛
- وضع وتطبيق قوانين الممارسات البيئية الجيدة التي تشمل كل جوانب النشاط في فترة عمر المنتج؛
- وضع بطاقات الوسم لإرشاد العاملين في مناولة مسار معين من النفايات من أجل توجيه المكونات إلى المعالجة السليمة؛
- وضع بطاقات الوسم التي ترشد المستهلكين إلى المخاطر البيئية مما يمكنهم من اتخاذ قرار مستنير بشأن الاختيار؛
- استخدام الموارد، بما في ذلك الطاقة؛
- إدماج نظم جمع النفايات والتخلص منها في العمليات السكنية والتجارية والصناعية للتأكد من أن جميع النفايات تدار بطريقة سليمة بيئياً؛
- تفادي استخدام المواد الخطرة أو المنتجات التي تحتوي على مواد خطرة وتفاذي توليد النفايات الخطرة؛
- إعادة التدوير والاستعادة وإعادة الاستخدام؛
- تطبيق الصكوك الاقتصادية أو نظم إصدار التراخيص أو القيود أو عمليات الحظر أو نظم إصدار الشهادات أو المعايير أو الأدوات السياسية الأخرى؛
- تقييم دورة حياة الزئبق بوصفها جانباً مهماً من جوانب الإدارة السليمة بيئياً لنفايات الزئبق، بهدف خفض مدخلات الزئبق في عملية حرق النفايات (انظر المبادئ التوجيهية التقنية لاتفاقية بازل)؛
- إدراك أهمية المشاركة العامة في عمليات إصدار التراخيص. وتشمل الممارسات الفعالة لتعزيز الوعي والمشاركة ما يلي: نشر إعلانات مسبقة في الصحف اليومية؛ ونشر المعلومات على مستوى المنازل؛ وطلب تقديم تعليقات بشأن خيارات التصميم والتشغيل؛ وتنظيم عروض لنشر المعلومات في الأماكن العامة؛ والاحتفاظ بسجلات لإطلاقات

الملوثات ونقلها؛ وعقد اجتماعات عامة متكررة ومنتديات للمناقشة. ويتعين أن تعمل السلطات ومقترحي مشاريع الحرق مع جميع أصحاب المصلحة، بما في ذلك جماعات الصالح العام. ويجب أن تكون المشاورات مع عامة الناس شفافة وذات مغزى وصریحة إذا أريد لها أن تكون فعالة.

٣-١٤-١ ممارسات إدارة النفايات

يتعين أخذ التُّهَج المبينة أدناه في الاعتبار، بوصفها جزءاً من الاستراتيجيات الشاملة لمنع توليد النفايات والتحكم فيها، وتطبيقها على النفايات المحتوية على الزئبق أو الملوثة به.

ولكي تكون إدارة النفايات مستدامة، لا ينبغي أن تقتصر معالجتها على استخدام حلول تقنية في المراحل النهائية، بل يجب تطبيق نهج متكامل، وهو نهج يمكن وصفه بأنه نهج هرمي، وفقاً لما هو مبين في الفرع ١-٢-١. ويتعين التعامل مع النفايات المحتوية على الزئبق أو الملوثة به وفقاً للمادة ١١ من الاتفاقية.

٣-١٤-١-١ تقليل النفايات إلى أدنى حد ممكن

إن خفض الكمية الكلية للنفايات، المراد التخلص منها، بأي وسيلة من شأنه أن يساعد في تخفيض الإطلاقات وكذلك المخلفات الناجمة عن أفران الحرق.

٣-١٤-١-٢ الفصل وإعادة التدوير في المصدر

شرعت مؤسسات الرعاية الصحية في الكثير من البلدان الصناعية في التخلص التدريجي من استخدامات الزئبق والإدخال التدريجي لمنتجات أو أجهزة بديلة فعالة لتفادي استخدام الزئبق. وهناك فائدة للبدائل الخالية من الزئبق تتمثل في خفض توليد النفايات المحتوية على الزئبق. وأدخلت الكثير من مؤسسات الرعاية الصحية كذلك ممارسات تنظيف وإدارة للتحكم في إطلاقات الزئبق من المصادر التي لا تزال موجودة في مرافقها. وتؤدي هذه السياسات والممارسات إلى تحقيق خفض كبير في إطلاقات الزئبق وانبعاثاته إلى البيئة. والفصل وإعادة التدوير في المصدر يمثلان جزءاً مهماً من نهج متكامل لإدارة النفايات في قطاع الرعاية الصحية مما يفضي إلى التقليل إلى أدنى حد ممكن من النفايات الخطرة التي تحتاج إلى معالجة خاصة بسبب خواصها المعدية وفق ما هو مبين في الجدول ٦ (Emmanuel, 2012).

مستوى العزل	النسبة المئوية من النفايات الخطرة للرعاية الصحية	النسبة المئوية من النفايات العامة غير الخطرة
ضعيف	٦٠	٤٠
جيد	٢٥	٧٥
دقيق	١٥	٨٥

المصدر: (Emmanuel, 2012)

الجدول ٦: التصنيفات النموذجية اعتماداً على ممارسات الفصل

وتساعد الجهود الرامية إلى منع إدخال الزئبق ضمن مدخلات النفايات في خفض انبعاثات الزئبق الكلية من عمليات الحرق، ولذلك فإن التدابير الرامية لمنع الزئبق من الوصول إلى مدخلات النفايات تكتسب أهمية خاصة. ويمكن أن تشمل هذه التدابير نظم الجمع المنفصل أو التصنيف الجيد للنفايات في كل المراحل السابقة للحرق، وفصل النفايات في المرافق كتقنية أساسية.

ويمكن تحقيق خفض كبير في محتوى الزئبق في النفايات المراد حرقها من خلال الجمع المنفصل لمسارات النفايات التي يتحمل أن تكون ملوثة بكميات كبيرة من الزئبق وكذلك تحويل النفايات المحتوية على زئبق إلى مرافق تدير النفايات بطريقة سليمة بيئياً. ويمكن جمع النفايات التالية بشكل منفصل:

- البطاريات المحتوية على الزئبق؛
- المصابيح المحتوية على الزئبق؛
- الأجهزة الكهربائية (المفاتيح الكهربائية وغيرها) التي تحتوي على الزئبق؛
- النفايات التي قد تكون ملوثة من المنازل والمؤسسات البلدية (الدهانات القديمة والورنيش، ومبيدات الحشرات، والمذيبات، والمواد الكيميائية المخترية المستعملة من المدارس، الخ.)

٣-١-١٤-٣ فحص النفايات وتحديد خصائصها قبل حرقها

يتعين الأخذ في الاعتبار الممارسات العامة التالية لمدخلات النفايات والتحكم فيها عند تحديد أفضل التقنيات المتاحة لمناولة النفايات المحتوية على الزئبق أو الملوثة به. وعند وضع ضوابط جودة على مدخلات النفايات وتطبيقها، ووفقاً لنوع النفايات التي يمكن أن تصل إلى المنشأة، من المهم وضع قيود على مدخلات عملية الحرق وتحديد المخاطر الرئيسية، وكذلك التواصل مع موردي النفايات لتعزيز ضبط جودة النفايات الواردة.

إن المعرفة التفصيلية بخصائص ومميزات النفايات الواردة أمر ضروري. ويمكن أن تتفاوت خصائص مسار نفايات معين بشكل كبير من بلد إلى آخر ومن منطقة إلى أخرى. وفي حال اعتبار نفايات معينة أو مكونات معينة للنفايات غير ملائمة للحرق، مثل النفايات المشار إليها في المادة ١١ من الاتفاقية، فإنه يتعين اتخاذ إجراءات لكشف هذه المواد وفصلها في مسار النفايات أو المخلفات قبل عملية الحرق إلا إذا كان المراد معالجة النفايات حرارياً لاستعادة الزئبق وفق ما هو مبين في المبادئ التوجيهية التقنية للإدارة السليمة بيئياً لنفايات الزئبق الصادرة عن اتفاقية بازل. ويتعين كذلك إجراء تفتيش وأخذ العينات وإجراء تحاليل بصورة روتينية، وهذا ينطبق أيضاً على النفايات الخطرة. ومن الضروري أيضاً الاحتفاظ بقوائم الشحن وسجلات المعاملات والمداومة على تحديثها. ويبين الجدول ٧ بعض التقنيات التي يمكن تطبيقها على أنواع النفايات المختلفة.

الجدول ٧

نماذج لتقنيات التفتيش (EC 2006)

نوع النفايات	التقنيات	التعليقات
النفايات البلدية المختلطة	الفحص بالنظر في المستودعات الفحص بالعينة لفرادى الشحنات عن طريق التفريغ المنفصل قياس وزن النفايات حال تسلمها أخذ العينات وتحليلها بشكل دوري لتحديد خواصها الرئيسية أو المواد الأساسية فيها	يمكن أن تنطوي الشحنات الصناعية أو التجارية على مخاطر عالية
نفايات بلدية معالجة مسبقاً نفايات وأنواع وقود مشتقة من نفايات	الفحص بالنظر أخذ العينات وتحليلها بشكل دوري لتحديد خواصها الرئيسية أو المواد الأساسية فيها	
النفايات الخطرة	الفحص بالنظر أخذ العينات وتحليلها من كل ناقلات النفايات السائبة الفحص العشوائي للعبوات البرميلية فك العبوات المغلفة وفحصها تقييم بارامترات الاحتراق إجراء اختبارات المزج على النفايات السائلة قبل تخزينها التحكم في نقطة اشتعال النفايات في المستودعات فرز مدخلات النفايات لتحديد تركيبها العنصري، مثلاً باستخدام الفلورة	تعتبر الإجراءات المكثفة والفعالة ذات أهمية خاصة لهذا القطاع. وقد تكون المنشآت التي تستقبل مسارات نفايات فردية قادرة على اعتماد إجراءات أبسط

التعليقات	التقنيات	نوع النفايات
	السينية المشتتة للطاقة (المطياف) (EDXRF)	
	أخذ العينات وتحليلها بشكل دوري لتحديد خواصها الرئيسية أو المواد الأساسية فيها	حمأة مياه المجاري
	التحكم في العملية للتكيف مع تباين الحمأة	

٣-١-١٤-٤ إزالة المواد غير القابلة للاحتراق في الفرن

تعتبر إزالة المعادن الحديدية وغير الحديدية في الموقع ممارسة شائعة في أفران حرق النفايات الصلبة البلدية حيث تساعد في منع هذه النفايات، التي يمكن أن تحتوي على الزئبق في شكل شوائب، من دخول فرن حرق النفايات.

٣-١-١٤-٥ المناولة والتخزين السليمين

تعتبر المناولة السليمة ضرورية، خصوصاً للنفايات الخطرة، ويتعين التصنيف والفرز بالشكل الملائم للسماح بالمعالجة الآمنة.

ويتعين إحكام إغلاق مناطق التخزين بشكل جيد مع التحكم في التصريف ومقاومة العوامل الجوية. ويتعين أيضاً الأخذ في الاعتبار تركيب نظم كشف الحرائق والتحكم فيها في هذه المناطق، إضافةً إلى وجود إمكانية ملائمة للاحتفاظ بمياه إطفاء الحرائق الملوثة في الموقع. ويتعين تصميم مناطق التخزين والمناولة بحيث تمنع تلوث الأوساط البيئية وتيسر عملية التنظيف في حالات الانسكاب. ويمكن التقليل إلى أدنى حد ممكن من الروائح وإطلاقات الملوثات العضوية الثابتة المتطايرة إلى الأوساط البيئية من خلال استخدام هواء المستودع في عملية الحرق.

٣-١-١٤-٦ تقليل فترات التخزين إلى أدنى حد ممكن

رغم أن وجود إمدادات ثابتة من النفايات أمر مهم لضمان التشغيل المستمر وتوفير ظروف احتراق مستقرة في الأفران الكبيرة لحرق النفايات الصلبة البلدية إلا أن تراكم وتخزين أنواع معينة من النفايات لفترات طويلة غير مستحب. ومن شأن التقليل إلى أدنى حد ممكن من فترة التخزين أن يساعد في منع التعفن والتفاعلات غير المرغوب فيها وتدهور الحاويات وبطاقات الوسم. وتساعد إدارة الكميات الواردة من النفايات والتواصل مع الموردين في ضمان عدم تجاوز فترات التخزين المعقولة (مثلاً من أربعة إلى سبعة أيام للنفايات الصلبة البلدية).

٣-١-١٤-٧ تحميل النفايات

في حالة المرافق التي تقبل النفايات الصلبة البلدية غير المتجانسة يكون الخلط والتحميل الجيدين في قمع التلقيم أمراً في غاية الأهمية. ويتعين أن يتمتع مشغلو رافعة التحميل بالخبرة ويتخذوا الموقع الملائم ليتمكنوا من اختيار الخليط المناسب من أنواع النفايات من أجل المحافظة على تشغيل الفرن بأقصى كفاءة.

وينطوي نهج أفضل الممارسات البيئية لحرق النفايات المحتوية على الزئبق أو الملوثة على الأمور التالية:

- منع توليد النفايات قبل الحرق؛
- ممارسات تشغيل فرن الحرق وإدارته؛
- ممارسات التشغيل والإدارة بعد الحرق.

٣-١-١٤-٨ ممارسات تشغيل وإدارة فرن حرق النفايات

التشغيل الصحيح مهم جداً لتحقيق بارامترات التصميم. وبشكل عام يتعين على الجهة المصنعة أو المصممة للمعدات أن تقدم دليلاً يناقش ممارسات التشغيل، بما في ذلك إجراءات بدء التشغيل وإجراءات الإغلاق والتشغيل العادي وعملية تحديد الأعطال وإصلاحها وإجراءات الصيانة وقطع الغيار الموصى بها وغير ذلك. ويجب أن يكون المشغولون قادرين على التوقع

الدقيق للقيمة الحرارية والمميزات الأخرى للنفايات المراد حرقها لضمان تحقيق بارامترات تصميم فرن حرق النفايات. ويمكن تحقيق ذلك من خلال استخدام نتائج برنامج رصد التلقيم فيما يخص الملوثات والبرامترات الرئيسية حيث تزداد معدلات أخذ العينات والتحليل مع ازدياد تغير التقيم. ويمكن الاطلاع على معلومات تفصيلية في الأقسام الفرعية ٢-٢-٢ إلى ١-٣-٢ إلى ٢-٢-٣ أعلاه.

٣-١٤-١-٩ اختيار موقع منشأة الحرق

يمكن أن يؤثر موقع فرن الحرق بشكل كبير على انتشار سحب المداخن الذي يؤثر بدوره على التركيزات والترسبات وتعرض العمال والمجتمع المحلي في المناطق المحيطة. وإضافةً إلى معالجة العوامل الفيزيائية التي تؤثر على الانتشار يتعين أن تعالج مسألة تحديد الموقع أيضاً المسائل المتعلقة بالأذونات والملكية وسهولة الوصول والملاءمة وأن تأخذ في الاعتبار الآثار الاجتماعية والصحية والآثار البيئية الأخرى. وتهدف أفضل ممارسات تحديد الموقع إلى إيجاد موقع لفرن الحرق يقلل إلى أدنى حد ممكن من المخاطر المحتملة على الصحة العامة والبيئة (EPA 1997).

٣-١٤-١-١٠ التصميم

تعتبر الخطط والرسومات الملائمة وضبط الجودة أموراً مهمة في تشييد أفران حرق النفايات، ويجب أن يشمل ذلك الرسومات الثلاثية الأبعاد ونطاقات المسموحات وقوائم المواد وسائر الدراسات التحضيرية. ومن خلال التصميم والتشغيل الجيدين على هذا النحو يتوقع أن تتمكن أفران حرق النفايات من الوصول إلى درجات الحرارة المرغوبة وفترات المكوث المطلوبة وسائر الشروط الضرورية للتقليل إلى أدنى حد ممكن من انبعاثات الزئبق إلى البيئة وتفادي تشكل الخبث وتكتل الرماد (في الغرفة الأولية)، وتفادي التلف في المواد المقاومة للانصهار، والتقليل إلى أدنى حد ممكن من استهلاك الوقود.

٣-١٤-١-١١ عمليات التفتيش والصيانة المنتظمة للمنشأة

يتعين إجراء عمليات تفتيش روتينية من جانب المشغل وعمليات تفتيش دورية من جانب السلطة فيما يتعلق بالفرن وأجهزة ضبط التلوث لضمان تكامل النظام والأداء الجيد لفرن الحرق ومكوناته. وبغض النظر عن جودة تصميم المعدات فإن البلى والتلف أثناء الاستعمال العادي وممارسات التشغيل والصيانة غير الجيدة ستؤدي إلى تدهور المكونات وانخفاض جودة عملية الاحتراق وزيادة الانبعاثات، ويثير أيضاً مخاطر محتملة على المشغلين وعامة الناس.

٣-١٤-١-١٢ تدريب المشغلين

يعتبر التدريب المنتظم للموظفين ضرورياً من أجل التشغيل الجيد لأفران حرق النفايات. والتشغيل الصحيح لفرن الحرق ضروري للتقليل إلى أدنى حد ممكن من الانبعاثات والمخاطر الأخرى. ويجب عدم تشغيل عملية الحرق أو الإشراف عليها إلا من جانب مشغلين مدربين ومؤهلين. ويتعين على المشغل أن يكون موجوداً في الموقع أثناء تشغيل فرن الحرق. وبدون التدريب والدعم الإداري الجيد لا يمكن أن تحقق أفران حرق النفايات المعالجة الجيدة والانبعاثات المقبولة.

٣-١٤-٢ الوقاية من مخاطر الحرائق

يمكن للحرائق التي تندلع في مستودعات تخزين النفايات في منشآت حرق النفايات أن تسبب تلوثاً كبيراً، مثلاً التلوث بالزئبق والمعادن الثقيلة الأخرى والمركبات العضوية الخطرة، وغير ذلك، في المناطق المجاورة للمنشأة. وللتقليل إلى أدنى حد ممكن من مخاطر هذه الحرائق يمكن أخذ التدابير التالية في الاعتبار بوصفها من أفضل الممارسات البيئية:

- استخدام نظم أوتوماتيكية للكشف عن الحرائق في مستودعات النفايات، مثل الكاميرات التي تعمل بالأشعة تحت الحمراء

- تركيب عدد زائد عن الحاجة من أجهزة الرصد في مستودعات النفايات
- استخدام نظم أوتوماتيكية للكشف عن الحرائق في المرشحات النسيجية ومرشحات الكوك ذات القاعدة الثابتة، مثل أجهزة التحكم في الحرارة، وغرف الأجهزة الكهربائية والتحكم، وغير ذلك من مجالات المخاطر المحددة مثل أجهزة الإنذار من الدخان
- نظم أوتوماتيكية لمكافحة الحرائق مثلاً باستخدام الغازات الخاملة. وتتخذ هذه التدابير في بعض الحالات وبصورة أكثر شيوعاً عند تخزين نفايات سائلة قابلة للاشتعال ولكن أيضاً في أماكن الخطر الأخرى
- توفير كميات كافية من مياه الإطفاء
- الاحتفاظ بكميات كافية من مياه الإطفاء
- توفير فتحات كافية لخروج غاز المداخن والحرارة (تُغلق عند ظروف التشغيل العادية)
- توفير فتحات كافية على جدران المستودع لتسهيل الإطفاء في حالات الحرائق (تُغلق في ظروف التشغيل العادية)
- وجود خيار لضرب طوق حول منشأة الحرق لتسهيل عمل دائرة خدمات الحرائق

٤- تقنيات رصد الزئبق

يناقش الفصل التمهيدي لهذه الوثيقة الجوانب العامة والشاملة لعمليات الاختبار والرصد والإبلاغ. أما الجوانب المحددة المميزة لعمليات حرق النفايات فستناقش في الفرع التالي.

٤-١ الطرق المباشرة

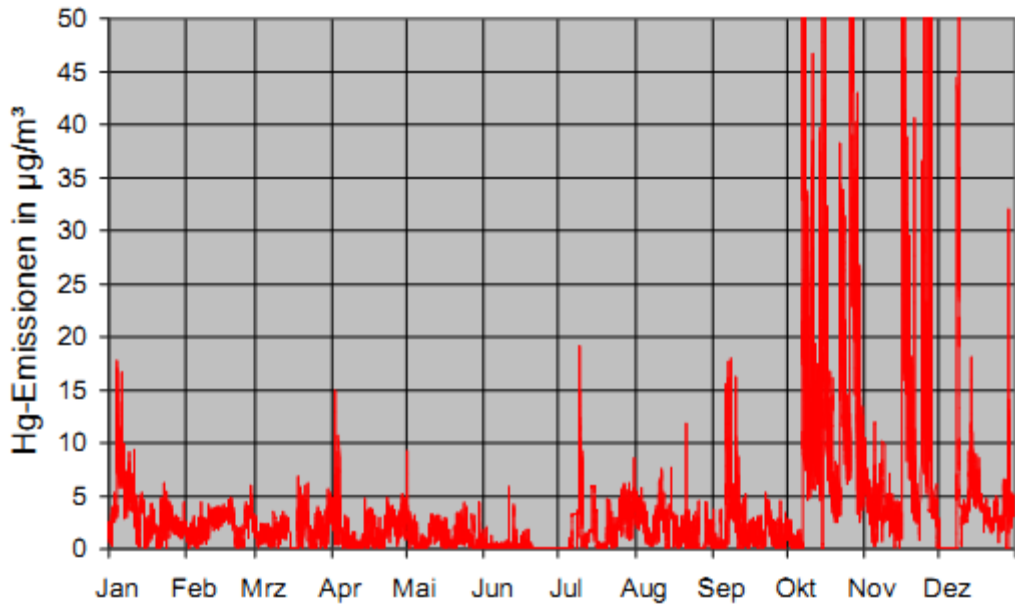
يمكن إجراء قياسات الزئبق المباشرة بشكل مستمر أو متقطع.

نظم الرصد المستمر للانبعاثات

يتميز الرصد المستمر بأنه يساعد على ضمان التشغيل الجيد لمنشأة معالجة غاز المداخن والاكتشاف المبكر لأي تغير في محتوى الزئبق في النفايات.

ورغم التدابير الرامية للتحكم في مدخلات الزئبق في منشآت حرق النفايات أو التقليل منها إلى أدنى حد ممكن، إلا أن كميات كبيرة من الزئبق لا تزال تمر من فترة لأخرى عبر مستودعات النفايات إلى عملية الحرق ومن ثم إلى غاز المداخن، لتغيّر بذلك مستوى انبعاثات الزئبق.

وبمساعدة أجهزة قياس مستويات الزئبق التي تعمل بشكل مستمر يمكن كشف مثل هذا التلوث ومن ثم البدء باتخاذ التدابير المضادة بالسرعة المطلوبة. ويبين الشكل ٩ التباين الذي يظهر خلال سنة واحدة في تراكيزات الزئبق في الغاز النظيف في منشأة لحرق النفايات في هامبورغ. ويمكن ملاحظة مستويات قصوى واضحة خصوصاً في شهري تشرين الأول/أكتوبر وتشرين الثاني/نوفمبر.



الشكل ٩- بيانات انبعاثات الزئبق من خط واحد في منشأة حرق نفايات في هامبورغ عام ٢٠١٤.

وفي بعض البلدان تجهز غالبية منشآت حرق النفايات بأجهزة تعمل باستمرار، وفي حال اكتشاف مستويات عالية من الزئبق في غاز المداخن يمكن عندئذ اتخاذ تدابير مضادة. وتشمل هذه التدابير المضادة على سبيل المثال ما يلي:

- زيادة كمية المواد الممتزة المحقونة في مسار غاز المداخن؛
- استخدام الكربون المنشط المشرب بالكبريت الذي يتميز بكفاءة أعلى في اختزال الزئبق؛
- إضافة البروم إلى عملية الاحتراق لتحسين عملية تأكسد الزئبق.

وفي حال اكتشاف مستويات عالية جداً من الزئبق في النقاط الساخنة في النفايات فإنه يتعين إخلاء هذه النقاط. أما في حال اكتشاف مستويات عالية من الزئبق في نظام تنظيف غاز المداخن فإنه يتعين النظر في تنظيف غاز المداخن لإزالة الزئبق. وعند ملاحظة مستويات عالية من الانبعاثات يتعين على مشغل المنشأة إجراء فحص لنظامي الرصد والتشغيل لتحديد السبب واتخاذ إجراءات تصحيحية. ويتعين على المشغل أيضاً رصد المدخلات وإخطار ناقلي النفايات بشأن رصد المدخلات. وقد ثبت أن هذه التدابير فعالة في معظم الحالات وتنتج عنها حدوث انخفاض كبير في عدد الحالات الانبعاثات التي تتجاوز المستويات القياسية للانبعاثات الضارة.

وتستخدم نظم الرصد المستمر للانبعاثات في بعض الأحيان في أخذ عينات من مسار الغاز المحمل بالجسيمات قبل جهاز التحكم في هذه الجسيمات (انظر 3-3)، وهذا يتيح الاستجابة الفورية مثلاً من خلال حقن كربون منشط أو مركبات مهلجنة.

قياس المصادر الثابتة (أجهزة الارتطام)

من الناحية التاريخية ظل استخدام أجهزة الارتطام لرصد الزئبق في منشآت حرق النفايات هو الخيار المفضل. ولكن بسبب تعقيد هذه الطريقة وتكلفتها العالية فإن أخذ العينات عن طريق هذه الأجهزة يتم على فترات طويلة، غالباً كل ثلاثة أشهر أو سنوياً. واستخدام جهاز ارتطام مخصص لقياس المصادر الثابتة، لفحص الأداء الجيد لمنشأة معالجة غاز المداخن، غير ممكن إلا خلال فترات قصيرة لأخذ العينات. ولا يمكن في العادة اكتشاف الزيادات الحادة لكميات الزئبق في غاز المداخن ولذلك لا يمكن اتخاذ تدابير بديلة. بيد أن أجهزة الارتطام غير ملائمة لأخذ العينات في فترات طويلة وهي عملياً تقتصر على عدة ساعات.

نظم المصائد الماصة

تتيح نظم المصائد الماصة مراقبة التشغيل الجيد لمنشآت معالجة غازات المداخن بعد فترة لأخذ العينات. ورغم أن هذه النظم لا تعطي نتائج فورية إلا أن البيانات المستقاة منها يمكن أن تشير إلى مستوى أداء التشغيل خلال فترة زمنية سابقة محددة. ومن خلال نهج حلقة التأثيرات المرتدة هذا يمكن إدخال التعديلات المطلوبة على العملية عند الحاجة. ومقارنةً بأجهزة الارتطام فإن مصائد المواد الماصة توفر عملية احتجاز أكثر استقراراً للزئبق وبروتوكولاً أبسط لأخذ العينات. ويسمح هذا البروتوكول بتشغيل أجهزة الرصد دون رقابة خلال فترات طويلة وهو أمر غير ممكن في حال استخدام أجهزة الارتطام.

ولا يشجع استخدام هذا النظام في الاتحاد الأوروبي بسبب عدم وجود متطلبات قانونية لاستخدامه، لكن من المحتمل أنه يُستخدم في مناطق أخرى من العالم.

٤-٢ الطرق غير المباشرة

توازن الكتلة

من الصعب للغاية تطبيق توازن الكتلة بسبب التباينات الكبيرة المحتملة لمستوى الزئبق في مدخلات النفايات والصعوبة الشديدة التي يتسم بها تنفيذ الرصد الموثوق به لمستويات الزئبق في النفايات غير المتجانسة.

الرصد التنبؤي للانبعاثات

لا يمكن إجراء الرصد التنبؤي للانبعاثات (الرصد الباراميتري) في منشآت حرق النفايات نظراً لعدم وجود ارتباط بين الملوثات الأخرى والزئبق في غاز المداخن. يضاف إلى ذلك أن محتوى الزئبق في المواد الأولية بالفرن يمكن أن يتغير بشكل كبير خلال فترات قصيرة اعتماداً على تركيز الزئبق في النفايات.

عوامل الانبعاث

فيما يخص أغراض الرصد لا ينبغي استخدام عوامل الانبعاث لتحديد انبعاثات الزئبق من منشآت حرق النفايات بسبب المحتوى المتغير للزئبق في النفايات.

التقديرات الهندسية

تعتبر التقديرات الهندسية طريقة غير دقيقة لرصد انبعاثات الزئبق في الهواء في منشآت حرق النفايات.

٣-٤ التقنيات الأكثر ملاءمةً للرصد في قطاع حرق النفايات

يشكل الرصد المستمر والرصد المتقطع معاً جزءاً من عملية تنفيذ أفضل التقنيات المتاحة.

وتعتبر القياسات المستمرة مناسبة لعدة أسباب. وعلى وجه الخصوص تمكّن هذه القياسات من القيام بما يلي:

- رصد التشغيل الجيد لمنشأة معالجة غاز المداخن؛
- الكشف الفوري عن تغيرات محتوى الزئبق في النفايات؛
- الكشف عن التركيزات المرتفعة للزئبق الناتجة عن الإدخال الخاطيء للنفايات الملوثة.

وتطلب العديد من البلدان بالفعل إجراء رصد مستمر للزئبق في منشآت حرق النفايات المقامة لديها. وتعتبر هذه البلدان تقنيات الرصد المستمر أفضل التقنيات المتاحة. والغالبية العظمى من البلدان التي تجري عمليات رصد الزئبق تستخدم الرصد المتقطع، ومن أمثلته أخذ العينات عن طريق أجهزة الارتطام.

إن عمليات الرصد المستمر هي وحدها الكفيلة بضمان الكشف عن مستويات الزئبق المرتفعة في الغاز النظيف والغاز الأولي بهدف التحكم الفعال فيها. وفي هذه الحالات قد تستخدم مادة ممتزة مثل الكربون المنشط المطلي بالكبريت.

ويمكن أن يكون القياس المستمر للزئبق الطريقة الأكثر فعالية خصوصاً في حالات النفايات الخطرة والنفايات الطبية والنفايات التجارية والبلدية المختلطة، وكذلك بالنسبة لجميع أنواع النفايات الأخرى (بما في ذلك المدخلات غير القانونية) في حال عدم التأكد من خلوها من الزئبق.

أما طرق القياس المتقطعة فهي مستخدمة أيضاً. ويمكن الرصد باستخدام مصائد المواد الماصة واختبارات المصادر الثابتة (أجهزة الارتطام) من مراقبة التشغيل الجيد لمنشأة معالجة غاز المداخن خلال فترات أخذ العينات. ومن غير المرجح أن تكشف طرق القياس المتقطعة هذه عن ارتفاع مستويات الزئبق في غاز المداخن، وهي بالتالي لا تتيح اتخاذ تدابير مضادة.

أما الطرق غير المباشرة مثل توازن الكتلة، والرصد التنبؤي للانبعاثات، وعوامل الانبعاث، والتقديرات الهندسية فهي غير مفيدة كطرق قياس في منشآت حرق النفايات.

- Adam, F., et al. (2010). KVA-Rückstände in der Schweiz – Der Rohstoff mit Mehrwert- Bundesamt für Umwelt (BFU), Bern.
- Allen, C., V. Gokaldas, A. Larracas, L. A. Minot, M. Morin, N. Tangri, B. Tyler and B. Walker (2012). On the Road to Zero Waste: Successes and Lessons from around the World. Berkeley, GAIA, p. 88.
- Andersson, S., P. Lindgren (2010). Simultaneous Dioxin and Mercury Removal in Wet Scrubbers (Paper # 56), Air and Waste Management Association -PUBLICATIONS- VIP THEN CP; p.189; pp. 515–524
- APGEN (Applied PhytoGenetics) (2003). Letter from David Glass, APGEN, to Walter Kovalick, EPA Technology Innovation Office (TIO), regarding the field study of Eastern cottonwood trees to treat mercury contaminated soil at a Superfund site in Danbury, Connecticut.
- Basel Convention Secretariat. (2015). Technical Guidelines on the Environmentally Sound Management of wastes consisting of, containing or contaminated with mercury and mercury compounds. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal, UNEP, Geneva
- Bell, L. (2015). Identification and Management of mercury, PCB and dioxin contaminated sites in Kazakhstan: A Collective Impact approach to civil society engagement. Contaminated sites and their management. Case studies: Kazakhstan and Armenia. Prague-Karaganda, Arnika - Toxics and Waste Programme.
<http://english.arnika.org/contaminated-sites>
- Bittig, M., and S. Heap (2014). Maßnahmen zur Minderung luftseitiger Emissionen unter besonderer Berücksichtigung von Quecksilber, Feinstaub und Stickoxiden, Energie aus Abfall, Band 11.
- Bilitewski, B., C. Oros and T. H. Christensen (2010). Mechanical Biological Treatment. Solid Waste Technology and Management, John Wiley and Sons, pp. 628–638.
- Bühler, A., et al. (2015). Schwermetalle aus der Flugasche zurückgewinnen – saure Flugaschewäsche – FLUWA-Verfahren – ein Zukunftsweisendes Verfahren in der Abfallverbrennung,
<http://www.bsh.ch/upload/public/0/71/BSH-Umweltservice-AG-Saure-Flugaschenwaesche-FLUWA-Verfahren.pdf>.
- BSH (2015). BSH Umwelt Service AG – Quecksilber-Abscheidung.
<http://www.bsh.ch/upload/public/0/71/BSH-Umweltservice-AG-Selektive-Quecksilber-Ionentaucher.pdf>.
- Chaucherie, X., et al. (2014). Mercury abatement at two French rotary kiln hazardous waste incineration plants with mainly dry flue gas cleaning, VDI Conference, 15–16 April 2014 in Düsseldorf, Germany.
- Daschner, R., et al.: Emissionen und Abgasreinigungsverfahren bei der Abfallverbrennung, Technische Sicherheit Bd. 1 (2011) Nr. 1/2 Jan./Febr. Emission Control – Thermal Waste Treatment – Fundamentals – VDI 3460 Part 1, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normkontrollausschuss KRdL; VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, and 3: Emissionsminderung II VDI Handbuch Energietechnik.
- Emmanuel, J. (2012). Compendium of Technologies for Treatment/Destruction of Healthcare Waste. Osaka, UNEP DTIE: 225.
- European Commission (2006). Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques for Waste Incineration, July 2005, Seville, Spain, eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm.
- European Commission (2000). Waste Incineration Directive 2000/76/EC.
- European Commission (2010). Industrial Emissions Directive 2010/75/EU.
- European Commission (2013). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants Draft 1 (June 2013) Joint Research Centre – Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau, Seville, Spain.
- Esser-Schmittman, W. (2012). Quecksilberabscheidung aus Feuerungsprozessen mittels Chemisorption an Aktivkohle und anderen Sorbentien. Berliner Planungs- und Immissionsschutzkonferenz am 19. und 20. November 2012.
- Federal Remediation Technologies Reference Guide and Screening Manual, Version 4.0. 2004. *In Situ* Biological Treatment – Phytoremediation. Federal Remediation Technologies Roundtable. June 2004.
<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-3.html>.
- Fundamentals – VDI 3460 Part 1, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normkontrollausschuss KRdL; VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, and 3: Emissionsminderung II VDI Handbuch Energietechnik

Galbreath, K.C., and C. Zygarlicke (1996). Mercury speciation in coal combustion and gasification flue gases. *Environmental Science and Technology* 30, pp. 2421–2426.

Gebhardt, P. Quecksilberemissionen durch die Müllverbrennung, Ingenieurbüro für Umweltschutztechnik, Salzböden, September 2005.

GORE™ Mercury Control System, Overview, February 2014.

Greyson, J. (2007). An economic instrument for zero waste, economic growth and sustainability. *Journal of Cleaner Production* 15 (13–14): pp.1382–1390.

Hall, B., P. Schager and O. Lindqvist (1991). Chemical Reactions of Mercury in Combustion Flue Gases. *Water, Air and Soil Pollution*, 56, pp. 3–14.

Health Care Without Harm (2001). Non-Incineration Medical Waste Treatment Technologies. Health Care Without Harm. Washington D.C., 118 pp.

Health Care Without Harm Europe (2004). Non-Incineration Medical Waste Treatment Technologies in Europe. Health Care Without Harm Europe. Prague, 44 pp.

Heaton, A.C.P., C.L. Rugh, T. Kim, N.J. Wang and R.B. Meagher (2003). Toward detoxifying mercury-polluted aquatic sediments with rice genetically engineered for mercury resistance. *Environmental Toxicology and Chemistry* 22 (12), pp. 2940–2947.

Hubbard, J., S. Tsadwa, N. Willis, and M. Evans (1990). Site Sampling and Treatability Studies for Demonstration of WasteChem's Asphalt Encapsulation Technology Under EPA's SITE Program. *Journal of the Air Waste Management Association* 40(10), pp.1436–1441.

ITRC (1998). Technical Guidelines for On-site Thermal Desorption of Solid Media and Low Level Mixed Waste Contaminated with Mercury and/or Hazardous Chlorinated Organics. The Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group – Low Temperature Thermal Desorption Work Team, 68 pp.

Kalb, P.D., and P. Colombo (1997). Composition and Process for the Encapsulation of Radioactive Hazardous and Mixed Wastes. United States Patent 5,649,323.

Kalogirou, E. (2012). The development of WtE as an integral part of the sustainable waste management worldwide, Recuwatt Recycling and Energy Conference, Mataró, Spain, 4 October 2012.

Kalb, P.D., D. Melamed, B.R. Patel and M. Fuhrmann (2002). Treatment of Mercury-Containing Wastes. United States Patent 6,399,849.

Keiser, B.; Glesmann, S.; Taff, B.; Senior, C.; Ghorishi, Behroos, Mimna, Richard; Miller, J.; Byrne, H. (2014): Improving Capture of Mercury Efficiency of WFDGs by reducing Mercury Reemissions, Institute of Clean Air Companies (ICAC), 6/2014.

<http://www.greatlakes.com/deployedfiles/ChemturaV8/GreatLakes/GeoBrom/GeoBrom%20Brochures/ICAC%20Improving%20Capture%20of%20Mercury%20Efficiency%20of%20WFDGs.pdf>.

Khairiraihanna et al. (2015). Removal performance of elemental mercury by low-cost adsorbents prepared through facile methods of carbonisation and activation of coconut husk; *Waste Management and Research* 2015, vol. 33(1), pp. 81–88.

Klaist: Vorbeugender chemischer Holzschutz in: Johann Müller (Hrsg.): Holzschutz im Hochbau. Grundlagen – Holzschädlinge – Vorbeugung – Bekämpfung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2005.

Licata, A., et al. (2007). Safety aspects in the use of carbonaceous sorbents during waste gas treatment, *Metallurgical Plant and Technology* 3, pp. 144–152.

Looney, B.B., et al. (2001). Ultralow Concentration Mercury Treatment Using Chemical Reduction and Air Stripping. WSRC-MS-2001-00388. 24 April 2001.

Mattigod, S.V., G. Fryxell, R. Skaggs, K. Parker, J. Liu and X Feng (2003). Mercury Removal from Waste Streams Using a Novel Synthetic Nanoporous Sorbent. Industrial Water Conference. Las Vegas, Nevada, United States, December 2003.

Löthgren, C.-J., et al. (2007). Mercury Speciation in Flue Gases after an Oxidative Acid Wet Scrubber, *Chemical Engineering and Technology*, 30(1), pp. 131–138.

Marsan, R. et al. 2012: Maintaining High Level Mercury Capture in wFGD Absorber, *STEAG Energy Services LLC*. APC Round Table Expo Presentation. Reinhold Environmental Ltd. Baltimore, 16./17.7.2012.

- Meng, X., Z. Hua, D. Dermatas, W. Wang and H.Y. Kuo (1998). Immobilization of mercury (II) in contaminated soil with used tire rubber. *Journal of Hazardous Materials*. 57, pp. 231–241.
- Miller, C.M., S.E. Duirk and K.H. Gardner (2000). Chromium leaching from a silicone foam-encapsulated mixed waste surrogate. *Environmental Science and Technology* 34(3), pp. 455–460.
- Miller et al (2014). Mercury Control with Brominated PAC and Injection Upstream of a WET FGD System. Presented at the Power Plant Pollutant Control “MEGA” Symposium, 19–21 August 2014, Baltimore, United States.
- Mineur, M., et al. Betriebliche Erfahrungen zur Minderung von Quecksilberemissionen bei der Hausmüllverbrennung VDI Wissensforum, Oktober 2012, Würzburg, Germany.
- Muenhor, D., et al (2009). Mercury contamination and potential impacts from municipal waste incinerator on Samui Island, Thailand, *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, March, 44, pp. 376–387.
- Material Safety Data Sheet according to EU Directive 1907/2006/EC, Article 31 on PRAVO
- Nethe, L.-P.. Optimierung der Quecksilberabscheidung in der Rauchgasreinigung von Verbrennungsanlagen durch den Einsatz schwefelhaltiger Zusatzkomponenten, Texocon Potsdam, January 2009.
- Nishitani, T., et al. (1999). The relationship between HCl and mercury speciation in flue gas from municipal solid waste incinerators. *Chemosphere*, 39, (1), pp. 1–9.
- Orebaugh, E.G. 1993. Lead Macroencapsulation Conceptual and Experimental Studies. WSRC-RP-93-227. Aiken, SC, Westinghouse Savannah River Company, January 1993.
- Owens, M.; Goltz, H. R.; Mingee, D.; Kelly, R. (2011): Trace Mercury Removal from Flue Gas Desulfurization Wastewater. Degremont Technologies, Dow Chemical Company, Degremont North American Research & Development, Internetpublikation, 5.5.2011, 5.5.2011. http://www.degremont-technologies.com/IMG/pdf/tech_infilco_FGD-Mercury.pdf.
- Petrik, J., and R. Ryder (2005). After Incineration: The Toxic Ash Problem. Prague, Manchester, IPEN Dioxin, PCBs and Waste Working Group, Arnika Association, 59 pp. http://english.arnika.org/files/documents/ASH_report.pdf
- Pless-Mulloli, T., R. Edwards, O. Pöpke and B. Schilling (2001). Report on the analysis of PCDD/F and heavy metals in soil and egg samples from Newcastle allotments: Assessment of the role of ash from Byker incinerator, 50 pp.
- Reinhold Environmental Ltd. 2012. Maintaining high level mercury capture in wFGD Absorber. 2012 APC Round Table & Expo Presentation, 16–17 July 2012 in Baltimore, United States.
- Riethmann, Thomas (2013): Untersuchungen zur Sorption von Quecksilber aus Verbrennungsabgasen und Nebenprodukten in Entschwefelungsanlagen. *Dissertation am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik, Universität Stuttgart*. Shaker Verlag. Aachen. 11/2013. <http://www.shaker.de/de/content/catalogue/index.asp?lang=de&ID=8&ISBN=978-3-8440-2302-2>,
- Robles, I., M.G. García, S. Solís, G. Hernández, Y. Bandala, E. Juaristi, and E. Bustos (2012). Electroremediation of mercury polluted soil facilitated by complexing agents. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, pp. 2276–2287.
- Sahu, S.K., R.C. Bhangare, P.Y. Ajmal, S. Sharma, G.G. Pandit, and V.D. Puranik (2009). Characterization and quantification of persistent organic pollutants in fly ash from coal fueled thermal power stations in India. *Microchemical Journal* 92, pp. 92–96.
- Schager, P. Report No. FBT-91-20, Status energiverk, National Energy Administration Sweden, 1990.
- Schmid (2014). Information provided by Susanne Schmidt, Stadtentwässerung Frankfurt, on 10 October 2013.
- Schneiderei, D. (2014): Pilotanlage – Versuchsergebnisse – Kraftwerk Heyden - Wasserrecht 2013 – Erweiterung Pilotanlage; bereitgestellt per E-mail an C. Tebert von Bezirksregierung Detmold, 28.4.2014.
- SEF (2013). Description of the sewage sludge incineration plant in Frankfurt Sindlingen <http://www.stadtentwaesserung-frankfurt.de/index.php/anlagen/abwasserreinigung/sewa-sindlingen.html?limitstart=0>
- Shaheen, S.M., P.S. Hooda and C.D. Tsadilas (2012). Opportunities and challenges in the use of coal fly ash for soil improvements: A review. *Journal of Environmental Management* 145, pp. 249–267.
- Siebert, J. (2005). An Examination of Using In-Situ Thermal Desorption to Remediate Mercury Contaminated Soils Through Laboratory Experiments and Numerical Modeling. Masters Thesis. University of Texas at Austin, United States, May 2005.
- Skinner, K., et al. (2007). Mercury uptake and accumulation by four species of aquatic plant. *Environmental Pollution* 145, pp. 234–237.

- Smith, L.A., J.L. Means, A. Chen, B. Alleman, C.C. Chapman, J.S. Tixier, S.E. Brauning, A.R. Gavaskar, and M.D. Royer (1995). Remedial Options for Metals-Contaminated Sites. Lewis Publishers, Boca Raton, United States.
- Snowman Network BRGM (2014). Enhanced knowledge in mercury fate and transport for improved management of Hg soil contamination.
- Song, G.-J., et al. (2004). Characteristics of ashes from different locations at the MSW incinerator equipped with various air pollution control devices. *Waste Management* 24(1), pp. 99–106.
- Stockholm Convention (2008) Guidelines on Best Available Techniques and Provisional Guidance on Best Environmental Practices relevant to Article 5 and Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants; Section V Guidance/guideline by source category; Source categories in Part II of Annex C Part II Source category (a) Waste Incinerators.
- Takaoka, M., et al. (2002). Control of mercury emissions from a municipal solid waste incinerator in Japan, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 52, pp. 931–940.
- Takaoaka, M., et al. (2012). Mercury emission from sewage sludge incineration in Japan, *Journal of Material Cycles and Waste Management* 14, pp. 113–119.
- United States Department of Energy (1998). Innovative Technology Summary Report. Plasma Hearth Process at the Science and Technology Research (STAR) Center, Idaho Falls, Idaho. November 1998. <http://costperformance.org/pdf/itsr26.pdf>.
- United States Environmental Protection Agency (EPA), Office of Research and Development (1997). Engineering Bulletin, Technology Alternatives for the Remediation of Soils Contaminated with Arsenic, Cadmium, Chromium, Mercury, and Lead. Cincinnati. EPA-540-S-97-500. March. <http://www.epa.gov/clariton/clhtml/pubtitleOSWER.html>.
- United States Environmental Protection Agency (EPA) (2005). Technical Support Document for HWC MACT Standards Vol. 1 Description of Source Categories, Washington D.C., September 2005.
- United States Environmental Protection Agency (EPA), Office of Research and Development (2004). Minergy Corporation Glass Furnace Technology Evaluation Report. EPA/540/R-03/500. March. http://costperformance.org/pdf/20040702_353.pdf.
- United States Environmental Protection Agency (EPA) (1995). Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE) Technology Capsule, Geosafe Corporation In Situ Vitrification Technology. Office of Research and Development. EPA/540/R-94/520. March. http://www.epa.gov/ORD/SITE/reports/540_r94_520.pdf.
- United States Environmental Protection Agency (EPA), Office of Solid Waste and Emergency Response (2002). Arsenic Treatment Technologies for Soil, Waste, and Water. EPA-542-R-02-004. September 2002.
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) (1998). Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution on Persistent Organic Pollutants. New York and Geneva. www.unece.org/env/lrtap/full%20text/1998.POPs.e.pdf.
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) (2013). Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Guidance document on best available techniques for controlling emissions of heavy metals and their compounds from the source categories listed in annex II to the Protocol on Heavy Metals, UN ECE/EB.Air/116, July 2013.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2005). Basel Convention Technical Guidelines: General technical guidelines for the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants (POPs).
- Velis, C. A., P. J. Longhurst, G. H. Drew, R. Smith and S. J. T. Pollard (2009). Biodrying for mechanical–biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. *Bioresource Technology* 100(11), pp. 2747–2761.
- Vosteen, B., et al. Bromine-enhanced mercury abatement from combustion flue gases – recent industrial applications and laboratory research, *VGB Power Tech* Volume 86, Issue 3/2006.
- De Vries, W., et al (2007). Critical soil concentration of cadmium, lead and mercury in view of health effects on humans and animals. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 191, pp. 91–130.
- Wagh, A.S., D. Dingh and S.Y. Jeong (2000). Mercury Stabilization in Chemically Bonded Phosphate Ceramics. Invited paper for Environmental Protection Agency’s Workshop on Mercury Products, Processes, Waste, and the Environment: Eliminating, Reducing and Managing Risks, Baltimore, MD, 22–23 March 2000.
- Watson, A. (2001). Comments on the “Report on the analysis of PCDD/PCDF and Heavy Metals in Soil and Egg samples related to the Byker incinerator”. <http://www.greenpeace.org.uk/media/reports/alan-watson-comments-on-the-byker-ash-report>.

Werther, J., and M. Sanger (2000). Emissions from sewage sludge combustion in Germany – status and future trends, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 33 (1), pp. 1–11.

Wirling, J. Safety aspects in the use of carbonaceous sorbents for entrained-phase adsorption, *Stahl und Eisen* 126 (2006) Nr. 6, pp. 47–54.

WHO (2014). *Safe management of wastes from health-care activities*, edited by Y. Chartier et al. – 2nd ed.

الفصل السابع

مرافق إنتاج كريات الكلنكر

موجز

يُحرق الحجر الجيري والمكونات المعدنية الأخرى لتشكيل كريات الكلنكر التي تُطحن بعد ذلك ثم تُمزج مع مواد مضافة معينة لتكوين المنتج النهائي، أي الإسمنت. وتستخدم أنواع مختلفة من الوقود لتوفير الحرارة اللازمة لعملية الإنتاج.

ويؤدي إنتاج كريات الكلنكر إلى انطلاق انبعاثات زئبق إلى الهواء منشؤها المواد الخام والوقود المستخدم. ووفقاً لأحكام الاتفاقية فإنه يتعين تطبيق أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية في المرافق المشيدة حديثاً أو المرافق التي أدخلت عليها تعديلات كبيرة بهدف التحكم في انبعاثات الزئبق أو تخفيضها إذا أمكن ذلك. وعلاوةً على ذلك يجوز للأطراف أن تستخدم أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية كواحدة من مجموعة من التدابير في المرافق القائمة لإنتاج كريات الكلنكر بهدف إحراز تطور معقول على صعيد تخفيض الانبعاثات مع مرور الوقت.

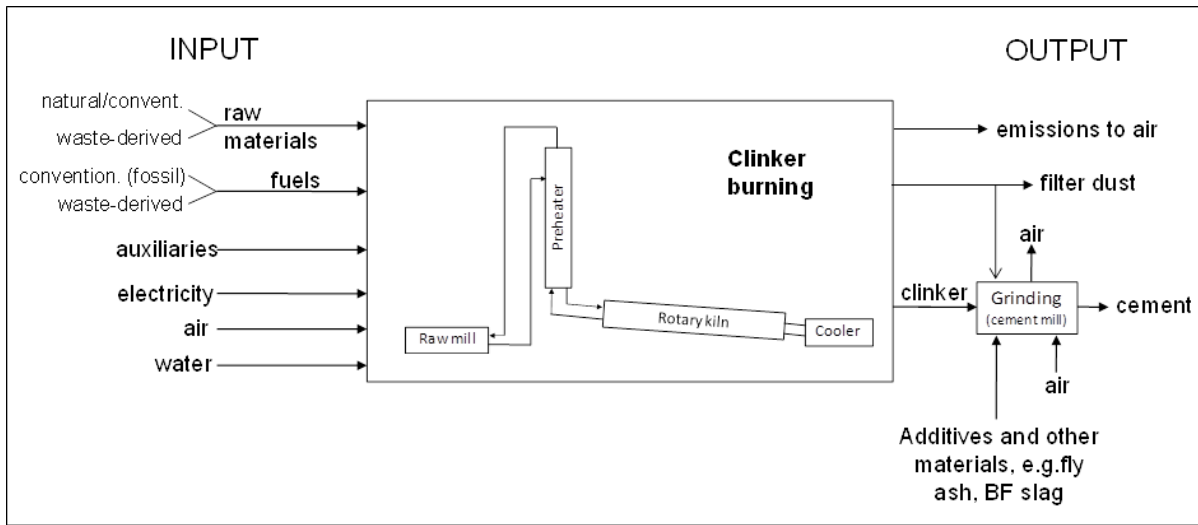
وبناءً على ذلك يهدف هذا الفصل إلى بيان خيارات أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية الرامية إلى التحكم في انبعاثات الزئبق إلى الهواء من مرافق إنتاج كريات الكلنكر. ويبدأ الفصل بتقديم عرض عام لعملية إنتاج الإسمنت وبيّن سلوك الزئبق في هذه العملية حيث يجري عرض استراتيجيات التحكم في الملوثات الأولية والثانوية والمتعددة فيما يخص انبعاثات الزئبق وتحديد خيارات أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية. وإضافةً إلى ذلك ترد معلومات خاصة بالقطاع عن رصد انبعاثات الزئبق، كما يرد كذلك تذييل يحتوي على معلومات إضافية عن سلوك الزئبق في مرافق إنتاج كريات الكلنكر، مع موجز للأشكال الكيميائية للزئبق المنبعث من العديد من منشآت إنتاج الإسمنت.

١٧٤	.....	مقدمة	١
١٧٥	.....	العمليات المستخدمة، بما في ذلك النظر في مدخلات المواد وسلوك الزئبق في العملية	
١٧٥	.....	عرض عام لعملية إنتاج الإسمنت	
١٧٥	.....	عملية إنتاج كريات الكلنكر	
١٧٦	.....	وصف عملية حرق كريات الكلنكر	
١٧٦	.....	وصف أفران كريات الكلنكر الدوارة	
١٧٧	.....	دخول الزئبق في العملية وسلوكه أثناءها	
١٧٧	.....	محتوى الزئبق في مختلف مسارات المدخلات	
١٧٨	.....	سلوك الزئبق وتوازناته	
١٨٠	.....	تدابير التحكم في انبعاثات الزئبق	
١٨٠	.....	التدابير الأولية	
١٨٠	.....	التحكم في المدخلات	
١٨٢	.....	التدابير الثانوية	
١٨٢	.....	إزالة الغبار	
١٨٤	.....	الإزالة المتكررة للغبار عن طريق حقن مادة ممتزة	
١٨٧	.....	حقن المادة الممتزة مع تركيب حجرة مرشح كيسي	
١٩٠	.....	تدابير التحكم في الملوثات المتعددة	
١٩٠	.....	أجهزة التنظيف الرطبة	
١٩٢	.....	الاختزال الحفزي الانتقائي	
١٩٣	.....	مرشح الكربون المنشط	
١٩٥	.....	أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية	
١٩٥	.....	التدابير الأولية	
١٩٥	.....	التدابير الثانوية	
١٩٦	.....	تدابير ضبط الملوثات المتعددة	
١٩٧	.....	الرصد	
١٩٧	.....	مقدمة	
١٩٧	.....	نقاط أخذ عينات الزئبق في عملية إنتاج الإسمنت	
١٩٧	.....	الأشكال الكيميائية للزئبق في عملية إنتاج الإسمنت	
١٩٨	.....	أخذ عينات الزئبق وطرق قياس مستوى الزئبق في عملية إنتاج الإسمنت	
١٩٨	.....	توازن المواد (الطريقة غير المباشرة)	

١٩٩	الطرق اليدوية لأخذ القياسات العشوائية للزئبق (طرق أجهزة الارتظام)
٢٠٠	القياسات على المدى البعيد
٢٠٠	نظم الرصد عن طريق مصائد المواد الماصة (المتنزة)
٢٠٠	نظم الرصد المستمر لانبعاثات الزئبق
٢٠٢	تذييل
٢٠٢	سلوك الزئبق في منشآت إنتاج كريات الكلنكر
٢٠٨	أشكال الزئبق الكيميائية المنبعثة
٢١٠	المراجع

١- مقدمة

يتطلب إنتاج الإسمنت استخدام كميات كبيرة من المواد لحرق كريات الكلنكر التي تمزج مع مواد مضافة معينة لكي تعطي المنتج النهائي: الإسمنت (الشكل ١). وقد أصبح الإسمنت مادة لا غنى عنها في تشييد المباني ومكونات البنى التحتية (الجسور، الأنفاق، السدود، مجاري الصرف الصحي، منشآت الطاقة، وغيرها). وفي الوقت الحالي لا يبدو أن هناك بديل للإسمنت. وقد ظلت الجهود تبذل لعدة عقود لتحسين عملية إنتاج كريات الكلنكر وترشيدها، ومن الناحية البيئية يتعلق هذا أساساً بتخفيض استهلاك الطاقة والتقليل إلى أدنى حد ممكن من الانبعاثات، خصوصاً إلى الهواء. أما من الناحية الاقتصادية فإن التركيز ينصب على استبدال أنواع الوقود التقليدي ببدائل، خصوصاً استخدام الوقود المشتق من النفايات ذي القيمة الحرارية الكافية، أو ما يسمى كذلك بأنواع الوقود البديلة. وضمن نطاق ضيق تستبدل المواد الخام التقليدية كذلك بأنواع أخرى من النفايات تسمى أيضاً المواد الخام البديلة. وفي بعض الحالات تعالج أنواع الوقود البديلة والمواد الخام البديلة كجزء من الهياكل الأساسية لإدارة النفايات أو حسب توفرها.



الشكل ١. المدخلات والمخرجات الرئيسية لمنشآت إنتاج الإسمنت (Schoenberger, 2015)

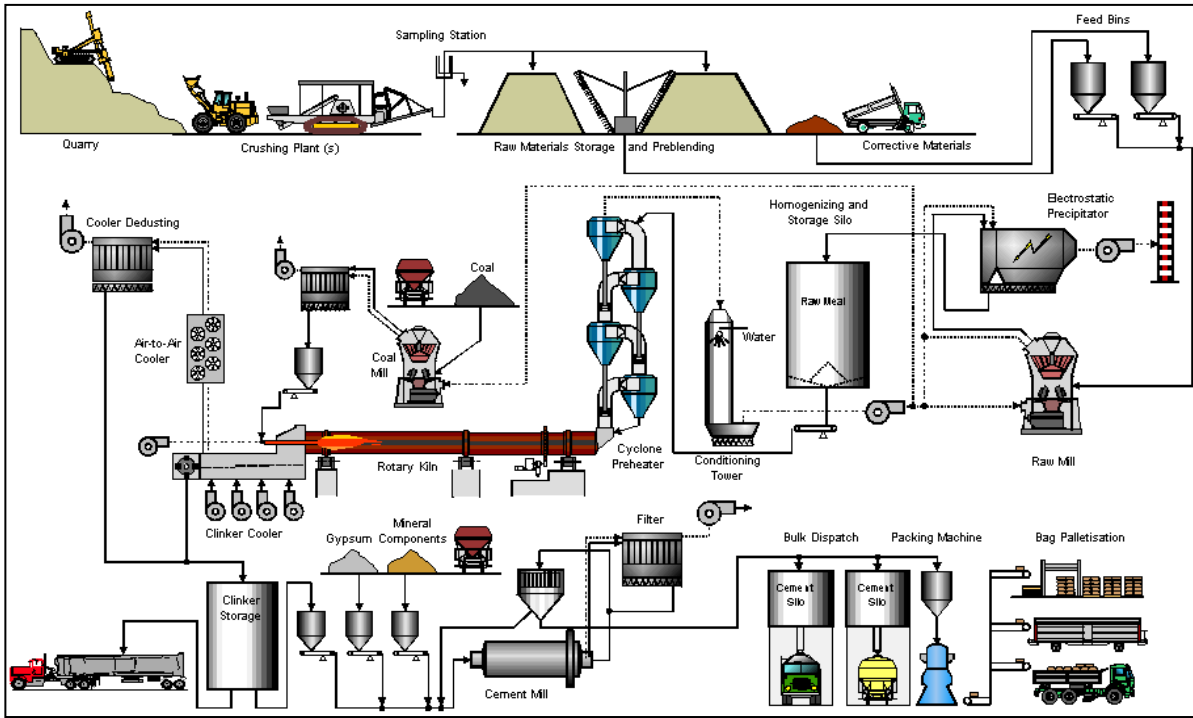
إن استخدام أنواع الوقود البديلة أو المواد الخام البديلة لن يؤدي بالضرورة إلى زيادة (أو تخفيض) انبعاثات الرئيق، إذ إن مستوى هذه الانبعاثات يعتمد ببساطة على المحتوى النسبي للرئيق لهذه المواد. ويعرف استخدام المواد الخام وأنواع الوقود المشتقة من النفايات في عملية حرق كريات الكلنكر بالمعالجة المشتركة بينما يعرف استخدام أنواع الوقود المشتقة من النفايات أحياناً بالحرق المشترك.

العمليات المستخدمة، بما في ذلك النظر في مدخلات المواد وسلوك الرقيق في العملية

عرض عام لعملية إنتاج الإسمنت

تشتمل عملية إنتاج الكلنكر والإسمنت، على التوالي، على العمليات الفرعية التالية:

- المواد الخام (الطبيعية والمشتقة من النفايات) - قلع الأحجار، التخزين، متطلبات الجودة، التحكم والتجهيز
- أنواع الوقود (التقليدي والمشتق من النفايات) - التخزين، متطلبات الجودة، التحكم والتجهيز
- نظم الأفران وعمليات الحرق في الأفران وتقنيات خفض الانبعاثات
- طحن الإسمنت - التخزين، متطلبات الجودة، التحكم والتجهيز
- التغليف والنقل السريع



الشكل ٢. منظر عام للأعمال في مصنع إسمنت (BREF CLM, 2013)

تركز هذه الوثيقة على عملية إنتاج الكلنكر بوصفها المصدر الرئيسي لانبعاثات الرقيق إلى الهواء.

عملية إنتاج كريات الكلنكر

تبدأ التفاعلات الكيميائية الأساسية لعملية إنتاج الإسمنت بتفكيك كربونات الكالسيوم (CaCO_3) الموجودة في المواد الخام عند درجة حرارة ٩٠٠م تقريباً مما يؤدي إلى تكون أكسيد الكالسيوم (CaO ، الجير) وانطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، وتعرف هذه العملية بعملية التكلس. تلي هذه العملية عملية تكون كريات الكلنكر حيث يتفاعل أكسيد الكالسيوم عند درجات حرارة عالية (عادةً بين ٤٠٠م و ٥٠٠م) مع السيليكا وأكسيد الألمنيوم وأكسيد الحديد لتكوين سيليكات والومينات وفريتات الكالسيوم لتشكيل الكلنكر البورتلاندي (SC BAT Cement, 2008).

وبصورة أساسية تتألف عملية إنتاج الكلنكر من عملية حرق الكلنكر نفسها (الحرق المسبق، وعملية الحرق في الفرن مع التكليس المسبق أو بدونه، ومع تحويله لغازات الفرن أو بدونها)، يلي ذلك تبريد كريات الكلنكر. وتنقل كريات الكلنكر المحروقة إلى داخل طاحونة الإسمنت حيث تُطحن مع مواد مضافة لإنتاج المنتج النهائي (أي الإسمنت).

وصف عملية حرق كريات الكلنكر

توجد أربعة مسارات معالجة رئيسية لتصنيع الإسمنت - العمليات الرطبة وشبه الرطبة وشبه الجافة والجافة - ويتحدد اختيار العملية، إلى حد كبير، وفقاً لحالة المواد الخام (جافة أم رطبة)، وفق ما هو مبين أدناه:

١- في العملية الرطبة تطحن المواد الخام مع الماء لتكوين ملاط رقيق القوام قابل للضخ بمحتوى مائي يتراوح من ٢٨ إلى ٤٢ في المائة. وينقل هذا الملاط مباشرةً إلى الفرن. وتتراوح الطاقة الإنتاجية لهذه العملية من ١٠٠ إلى ٦٠٠ طن في اليوم. وتتطلب العملية الرطبة قدرًا أكبر من الطاقة ولذلك تكون أكثر كلفة في التشغيل؛

٢- وفي العملية شبه الرطبة يتم أولاً نزع المياه في مكابس الترشيح. وتتراوح نسبة المحتوى المائي المتخلف من ١٨ إلى ٢٣ في المائة. وينتج كُسب المرشح في شكل حبيبات ويلقم في سخان شبكي للتسخين المسبق. وقد طور و. ليليب وشركة بوليسيس هذا النوع من الأفران مع السخانات الشبكية ونتيجةً لذلك أصبحت تعرف بأفران ليبول (Locher, 2000, p 58). وتتراوح الطاقة الإنتاجية لهذه العملية من ١٠٠ إلى ٣٠٠٠ طن/اليوم؛

٣- في العملية شبه الجافة يحول الدقيق الخام الجاف إلى حبيبات بالمياه وتلقم هذه في السخان الشبكي للتسخين المسبق قبل الفرن. وتعرف الأفران من هذا النوع أيضاً بأفران ليبول. ويجري تخفيض المحتوى المائي لمادة التلقيم بشكل إضافي إلى ما نسبته ١١ إلى ١٤ في المائة. وتتراوح الطاقة الإنتاجية لهذه العملية من ٥٠٠ إلى ٣٢٠٠ طن/اليوم. وتتحوّل المنشآت التي تستخدم العمليات شبه الجافة على الأرجح إلى التقنيات الجافة عند الحاجة إلى التوسع أو إلى إدخال تحسينات كبيرة؛

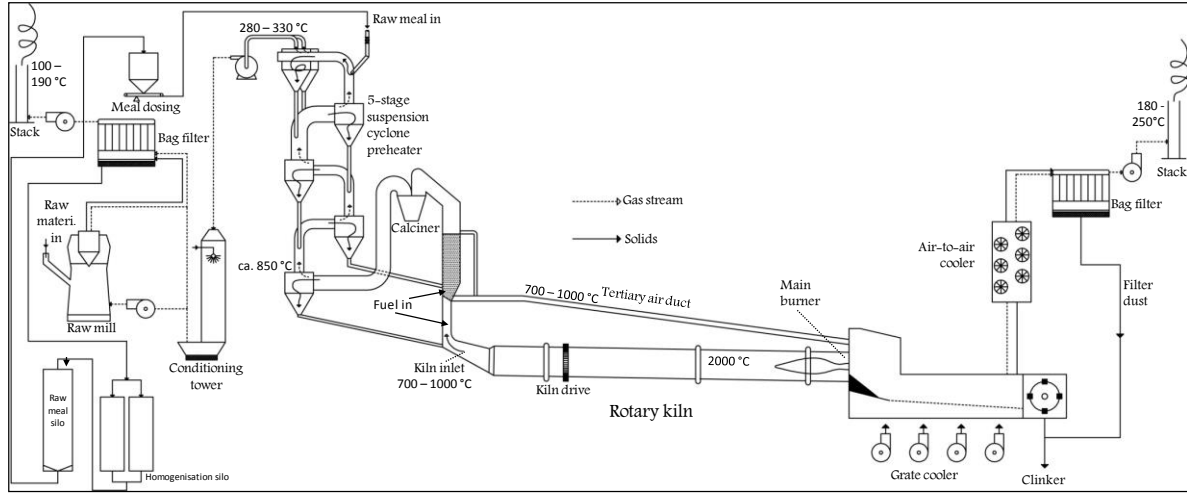
٤- في العملية الجافة تُطحن المادة الخام ويُخفف إلى دقيق خام في شكل مسحوق قابل للتدفق بمحتوى مائي أقل من ١ في المائة. ويُلقم الدقيق الخام الجاف في سخان دوامي للتسخين المسبق (من أربع إلى ست مراحل) أو في فرن للتكليس المسبق، أو نادراً، في فرن طويل جاف. وتتميز الأفران المزودة بسخانات للتسخين المسبق بكفاءة أكبر في استهلاك الطاقة وهي أفقر كثيراً (٤٠ إلى ١٠٠م). والغالبية العظمى من الأفران الموجودة هي أفران معالجة جافة، يمكن أن تتراوح طاقتها الإنتاجية من ٥٠٠ إلى أكثر من ١٠٠٠٠ طن/اليوم.

إن غالبية الأفران هي أفران دوارة ذات عملية قصيرة للمعالجة الجافة. ولا تقدم هذه الوثيقة وصفاً للأفران ذات الأعمدة الرأسية نظراً لانخفاض كفاءتها في استهلاك الطاقة وأدائها البيئي السيئ.

وصف أفران كريات الكلنكر الدوارة

الأفران الدوارة هي أنابيب فولاذية مبطنه بمادة مقاومة للانصهار بقطر يصل إلى ستة أمتار تقريباً ونسبة الطول إلى القطر بين ١:١٠ و ١:٣٨، وتقام بشكل مائل بانحدار يتراوح من ٢,٥ إلى ٤ في المائة وتدور بتدور يتراوح من ٠,٥ إلى ٥,٠ - وعادةً ١,٢ إلى ٣ - دورات في الدقيقة. ونتيجةً لميلان الأنبوب ودورانه تتحرك المادة المراد حرقها والتي تُلقم في مدخل الفرن عبر الأنبوب إلى الأسفل باتجاه شعلة الاحتراق في المخرج (Locher, 2000, p 55; Ullmann's, 1986; BREF CLM 2013). وبناءً على ذلك يتدفق مسار الغاز في شكل تيار عكسي نحو المواد الصلبة. وتكون جميع الأفران الطويلة الرطبة والجافة مجهزة بعناصر داخلية (سلاسل وصلبان) لتحسين عملية انتقال الحرارة.

وقد طُورت تكنولوجيا أجهزة التكليس المسبق، المبينة في الشكل ٣، في ستينيات القرن الماضي بهدف زيادة الطاقة الإنتاجية في فرن بحجم معين. وقبل عام ١٩٩٣ في أوروبا جرى تزويد الكثير من الأفران ذات الأربع مراحل المحتوية على جهاز تسخين دوّامي للتسخين المسبق، ومعظم هذه الأفران ذات الخمس مراحل، وجميع الأفران ذات الست مراحل على قلفتها، بجهاز للتكليس المسبق وقناة هوائية ثلاثية (Erhard/Scheuer, 1993). ومنذ ذلك الوقت يجري تحسين أجهزة التكليس المسبق. وتزود المنشآت الجديدة دائماً بتكنولوجيا التكليس المسبق حيث توضع أجهزة التكليس المسبق بين الفرن وجهاز التسخين المسبق بينما يرد الهواء الساخن من مبرد الفرن عبر القناة الهوائية الثلاثية (الشكل ٣). وتوفر هذه الأجهزة مرونة في استخدام مختلف أنواع الوقود البديلة (المشتقة من النفايات) التي قد تكون ذات قيمة حرارية أقل.



الشكل ٣. نظام فرن جاف مزود بجهاز تكليس مسبق (Schoenberger, 2015)

دخول الزئبق في العملية وسلوكه أثناءها

محتوى الزئبق في مختلف مسارات المدخلات

يمكن أن يكون الزئبق موجوداً في كل أنواع مسارات المدخلات الكتلية، وفي المواد الخام الطبيعية وتلك المشتقة من النفايات وكذلك في أنواع الوقود التقليدي والمشتق من النفايات (بما في ذلك أنواع الوقود المشتقة من النفايات الخطرة). ومعنى هذا أن الزئبق يدخل نظم إنتاج كريات الكلنكر عن طريق نقط التلقيح الرئيسية الثلاث، أي عن طريق المواد الخام وفرن الحرق الرئيسي ونظام الحرق الثانوي.

واستناداً إلى المصادر المتاحة يرد في الجدول ١ محتوى الزئبق ومسارات المدخلات الكتلية. وتؤكد هذه البيانات أن جميع المدخلات يمكن تحتوي على الزئبق. بيد أنه تجدر الإشارة إلى أن محتويات الزئبق يمكن أن تكون أعلى أو أقل بكثير من القيم الواردة في الجدول.

US PCA, 2006	CH Buwal, 1999			Oerter, 2007	Bref CLM, 2013		Renzori et al., 2010		FZKA, 2003			المصدر
	متوسط	متوسط	أقصى	أدنى	المتين الخمسین	أقصى	أدنى	أقصى	أدنى	متوسط	أقصى		أدنى
مواد خام طبيعية أو تقليدية												
٠,٠١٧				٠,٠٢	٠,١٣	٠,٠١ >	٠,٤	٠,٠٠٥ >	٠,٠٤	٠,١	٠,٠٠٥	حجر جيرى
٠,٠٥٢									٠,٠٣	٠,١	٠,٠٠٥	تراب كلسى
				٠,٠٩	٠,١٥	٠,٠٢	٠,٤٥	٠,٠٠٢	٠,٢	٠,٥	٠,٠١	طين
٠,٠٢٩				٠,٠٣			٠,٥٥	٠,٠٠٥ >	٠,٠٢	١	٠,٠١	رمل
							٠,٠٨	٠,٠٠٥ >				جبس
٠,٠٧٨				٠,١٧			٠,٨	٠,٠٠١	٠,٥	١		ركاز الحديد
	٠,٠٧	٠,٦	٠,٠٢	٠,٠٣	٠,٥	٠,٠١	١	٠,٠١	٠,٠٦	١	٠,٠٠٨	دقيق خام
مواد خام بديلة												
									٠,٣	٤,٤	٠,٠٣	رمال سبك مستعملة
							١,٣	٠,٠٣	٠,١	١,٣	٠,٠٦	جبس صناعي لامائي
٠,١٢							٠,٢	٠,٠٠٥ >	٠,٦	١	٠,٠١	خبث الفرن العالي
									٠,٣	١,٤	٠,٠٠٣	رماد من عمليات الحرق، رماد القاع من اللغثيت
٠,٢				٠,٣٤			٠,٨	٠,٠٠٢ >	٠,٣	٢,٤	٠,٠٤	رماد متطاير من الفحم
وقود تقليدي												
	٠,٤٢	٣,٣	٠,١	٠,٤	٣,٣	٠,١	١٣	٠,١	٠,٣	٣	٠,٠١	فحم الأنتراسيت
				٠,٠٩			٠,١١	٠,٠٣	٠,٢	٠,٧	٠,٠١	اللغثيت
	٠,٠٠٦							٠,٠٠٦				الزيت الثقيل
				٠,٥ >			٠,٧١	٠,٠١	٠,٠٥	٠,٠٩	٠,٠١	الكوك البترولي
أنواع وقود بديلة												
				٠,١٧			٠,٤	٠,٠١	٠,٤	١	٠,١	إطارات تالفة
		٠,٢	٠,٠٠١	٠,١					٠,٣	٢	٠,٠١	زيت عادم
	٠,٣٧	٠,٣١	١	٠,١٨					٠,٢	١	٠,٠١	أخشاب تالفة
									٠,٠٣	١,٤	٠,٠١ >	فتات النفايات البلدية والتجارية والصناعية
				٠,٢٥								فتات النفايات الصناعية
				٠,٢٦								فتات النفايات البلدية
									٠,٠٢			اللحم ومسحوق العظام
	٢,٦	٥	١				١,٤٥	٠,٣١		٢,٥	٠,٣	الحمأة البلدية
							٠,٢٢	٠,٠٦ >				وقود سائل مشتق من النفايات
							٢,٧٧	٠,٠٧ >				وقود صلب مشتق من النفايات
٠,٠٥٧							٠,٣	٠,٠٥	٠,٢	٠,٣	٠,٠٥	طفل زيتي (أيضاً مادة خام)

الجدول ١ -

متوسط قيم ونطاقات محتوى الزئبق في المواد الخام الطبيعية والبديلة وأنواع الوقود التقليدية والبديلة وفقاً لمختلف المصادر،

القيم هي جزء من المليون (ppm)

Legend: Min – minimum; Max – maximum; Av – average

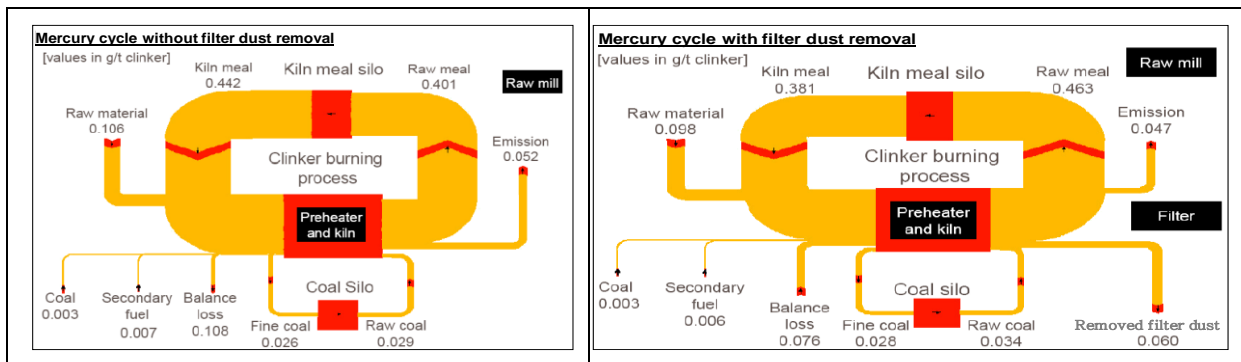
سلوك الزئبق وتوازناته

بسبب التطاير العالي للزئبق الأولي ومعظم مركبات الزئبق يكون محتوى الزئبق في كريات الكلنكر صفرًا أو ضئيلاً للغاية (Weisweiler/Keller, 1992; Kirchartz, 1994, pp 57 and 63; Locher, 2000, p 156; Eriksen et al., 2007; Renzoni et al., 2010, pp 57, X and XIII) وعند حرق المواد الخام والوقود يتصاعد الزئبق وتتشكل دورة زئبق خارجية.

ونتيجةً لهذه الدورة الخارجية يتركز الزئبق بين جهاز التسخين المسبق وأجهزة تقليل الغبار (جهاز الترسيب الكهروستاتيكي أو المرشح الكيسي)، كثيراً ما يسمى ببساطة مرشح الغبار. بيد أن جزءاً من الزئبق ينبعث دائماً مع غاز المدخن من الفرن. وفي حال عدم طرح أي غبار من المرشح فإن جميع مدخلات الزئبق تقريباً ستنبعث في النهاية مع غاز المدخن (Weisweiler/Keller, 2013; Paone, 2008; Linero, 2011; ECRA, 1992). والسبب في ذلك هو أن الزئبق لا ينتهي به المطاف في كريات الكلنكر حيث أن السبيل الوحيد لخروج الزئبق من النظام هو الانبعاث مع غاز المدخن. ولمعرفة كمية الزئبق في الدورة الخارجية ونسبة انبعاثاته مع غاز المدخن يتعين حساب توازنات الزئبق.

ويجب التأكيد على أن تحقيق توازن في الزئبق يحتاج إلى وقت كبير نظراً لأنه يتعين تنفيذه في ظروف مستقرة قد يتطلب الوصول إليها زهاء الشهر (Paone, 2008). وبناءً على ذلك يجب تنفيذ التوازن لمدة أسبوع على الأقل حيث يلزم أخذ العينات بتواتر كبير (مثلاً أخذ متوسطات لكل ساعة) بهدف معرفة التباينات. وفي واقع الحال فإن فترة الدراسة الطويلة هذه لا يتم الالتزام بها غالباً.

وقد نُشر توازن للزئبق في شكل مخططات سانكاي في عام ٢٠٠٢ (Schäfer/Hoenig, 2002) وجرت الإشارة إلى هذا التوازن في مرات عديدة (Oerter, 2007; Renzoni et al., 2010; Oerter/Zunzer, 2011; Zheng et al., 2012; Hoenig, 2013; ecr, 2013). وترد هذه المخططات في الشكل ٤ أدناه. والمخطط هو نتاج لما يعرف بـ"توازن الكتلة الخارجية" التي تمثل فيها المواد الخام وأنواع الوقود المدخلات، أما المخرجات فتشمل كريات الكلنكر والغبار المزال (في حالة تحويله الكلور أو عند إزالة غبار المرشح) والانبعاثات إلى الهواء من الفرن، وطاحونة المواد الخام، والمبرد وتحويله الكلور (Sprung, 1988). ويظهر المخطط على اليسار توازن



الشكل ٤. مخططات سانكاي لتوازن الزئبق في منشأة لإنتاج كريات الكلنكر مع إزالة غبار المرشح وبدون إزالته (Schäfer/Hoenig, 2002)

وجرى تنفيذ توازن الزئبق من خلال عمليات رصد مستمرة للزئبق في المدخنة ومن خلال أخذ مئات العينات الصلبة (Schäfer/Hoenig, 2001). ويشير المخطط الأيسر في الشكل ٤ إلى أنه خلال فترة تنفيذ التوازن انبعثت فقط نصف مدخلات الزئبق. بيد أنه في غياب التحكم سينبعث الزئبق كله في نهاية الأمر عبر المدخنة.

ويبين المخطط في الجانب الأيمن أن دورة الزئبق تُخَفَّض بإزالة غبار المرشح من النظام.

ويشير الشكل ٤ أيضاً إلى أن صومعة تلقيم الفرن تمثل مستودعاً كبيراً للزئبق.

وفي كلتا الحالتين فإن فاقد التوازن يمثل الزئبق المخزّن في مستودع الفرن أثناء فترة تحقيق التوازن وأوجه عدم اليقين المرتبطة بتحديد جميع التدفقات الكتلية (للمدخلات والمخرجات) وتركيزات الزئبق.

ويرد في التذييل المزيد من التفاصيل عن سلوك الزئبق في منشآت إنتاج كريات الكلنكر.

تدابير التحكم في انبعاثات الزئبق

يصف هذا الفرع تدابير التحكم المطبقة على المصادر القائمة والجديدة والرامية إلى تخفيض انبعاثات الزئبق إلى الجو من عملية إنتاج كريات الكلنكر. وتعتبر تدابير التحكم في الانبعاثات تدابير إضافية أو تدابير تستخدم بالاقتران مع تدابير التحكم في الانبعاثات التي أشير إليها في الفرع الافتتاحي للوثيقة التوجيهية بشأن أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية على أنها تدابير تحكم عامة في الانبعاثات من جميع فئات المصادر.

ويمكن باستخدام تقنيات رصد الانبعاثات المحددة في الفرع ٥ من هذا الفصل والفرع الافتتاحي في الوثيقة التوجيهية بشأن أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية تحديد مستوى التحكم في الزئبق أو خفضه في عملية إنتاج كريات الكلنكر التي يُطبَّق فيها واحد أو أكثر من التدابير المبينة هنا.

التدابير الأولية

التحكم في المدخلات

يدخل الزئبق إلى نظام الفرن في شكل عنصر نزر موجود بصورة طبيعية في المواد الخام، وإلى حد أقل، في أنواع الوقود. ويمثل الاختيار لجميع المواد الداخلة إلى الفرن والتحكم بها بهدف تخفيض مدخلات الزئبق، وكذلك استخدام الأجهزة الفعالة للتحكم في التلوث الجوي من الأمور المهمة للغاية لخفض انبعاثات الزئبق من مرافق إنتاج كريات الكلنكر.

ويمكن للكثير من الأفران خفض الانبعاثات من خلال استبدال مكونات بعينها مثل الطين أو الرمل بمواد خام تحتوي على مستويات أقل من الزئبق مقارنةً بالمواد المستخدمة في الوقت الحالي. ولا يرجح استبدال المادة الخام الأساسية وهي الحجر الجيري على استبدال المواد المضافة الأخرى. فالحجر الجيري يشكل ما نسبته ٧٥ إلى ١٠٠ في المائة من المادة الخام المستخدمة في إنتاج كريات الكلنكر، ولأسباب اقتصادية تشيد معظم المنشآت في مواقع مصادر الحجر الجيري. ولن يكون شراء الحجر الجيري من مناطق أخرى مجدياً من الناحية الاقتصادية بسبب تكاليف النقل. وإضافةً إلى ذلك تكون محاجر الحجر الجيري مملوكة في أغلب الأحيان لمنشأة إنتاج الإسمنت أو الشركة الأم ولذلك لا تكون متاحة لمنشآت إنتاج الإسمنت الأخرى المملوكة لجهات أخرى. وتكتسب خصائص الحجر الجيري، بما في ذلك محتواه من الزئبق، أهمية خاصة عند اختيار موقع أي مرفق جديد.

وتتفاوت تركيزات الزئبق في المواد الخام (الحجر الجيري أو التراب الكلسي أو الطين) بشكل كبير من محجر إلى آخر. وهناك حالات تتفاوت فيها تركيزات الزئبق بشكل كبير داخل عرق ترسيب واحد ولذلك يلزم تعدين هذه الترسبات في بعض الأحيان بشكل انتقائي. وفي هذه الحالات يمكن، من حيث المبدأ، بعد الاستكشاف وإجراء التحليلات للمحجر تحديد أجزاء معينة من المحجر تحتوي على تركيزات أكبر من الزئبق ومن ثم استخدام الحجر الجيري من مناطق تكون التركيزات فيها أقل. بيد أنه في الكثير من الحالات يكون مثل هذا الإجراء معقداً للغاية ولا يمكن تنفيذه دائماً.

أما المواد الخام الأخرى بخلاف الحجر الجيري (مثل الطين والصخر الطيني والرمل وركاز الحديد) فهي تُشتري عادةً من مصادر متعددة خارج الموقع وتنتقل إلى المنشأة. ولذلك قد تتمتع المنشآت بإمكانية الوصول إلى مواد ذات محتوى أقل من الزئبق رغم أنه

يتعين تحديد مدى جدوى ذلك على أساس مميزات الموقع المحدد. وقد يلزم استخدام ما يعرف بالمواد "التصحيحية" ومنها البوكسيت أو ركاز الحديد أو الرمل لتعديل التركيب الكيميائي للخليط الخام لكي يلبي متطلبات العملية ومواصفات المنتج. وضمن نطاق محدود تحل المواد الخام البديلة محل المواد الخام الطبيعية ومواد التصحيح.

وفي الحالات التي يؤدي فيها استخدام المواد الخام البديلة إلى حدوث زيادة كبيرة في كميات الرئيق الداخلة إلى النظام قد يتعين استبدالها بمواد بديلة أخرى. وعلى سبيل المثال قد يتميز الرماد المتطاير بمحتوى عالٍ أو منخفض من الرئيق مقارنةً بالمواد الخام التي يحل محلها، ولذلك قد يتعين اختيار مصدر الرماد المتطاير بحذر.

وتستخدم عملية إنتاج الإسمنت أنواع الوقود التقليدية مثل الفحم والغاز وكوك البترول والزيوت، إضافةً إلى أنواع وقود بديلة مثل الإطارات وغيرها من أنواع الوقود المشتقة من النفايات. ولذلك تعتبر عملية اختيار أنواع الوقود، بما في ذلك أنواع الوقود البديلة، التي ينخفض محتواها من الرئيق، إلى جانب استخدام نظام لتأكيد الجودة لضمان ملاءمة خصائص الوقود المستخدم من الأمور المهمة للغاية من أجل تخفيض انبعاثات الرئيق من مرافق إنتاج كريات الكلنكر.

وبشكل عام تحدّد في تراخيص منشأة إنتاج الإسمنت المواد الخام وأنواع الوقود المشتقة من النفايات التي يسمح للمنشأة باستخدامها أو حرقها. ويمكن أن يكون محتوى الرئيق في المواد الخام وأنواع الوقود البديلة مقيداً أيضاً في التصريح الذي قد ينص كذلك على اشتراطات بإجراء تحاليل دورية وعلى أنه ينبغي الالتزام بمحدود قصوى معينة، في حال تغيير المادة الخام أو الوقود. وعلى سبيل المثال ينص التصريح الممنوح لمنشأة سيمينتا (Cementa AB)، سلايت، السويد، على حد أقصى للرئيق يبلغ أقل من ٢ جزئين من المليون في بعض أنواع الوقود المحددة المشتقة من النفايات مثل البلاستيك والإطارات والزيوت العادم (Permit (Cementa AB, 2007).

وترد في الجدول ٢ أمثلة للقيم القصوى لمحتوى الرئيق في النفايات المستخدمة في منشآت إنتاج الإسمنت في بعض البلدان.

الجدول ٢:

أمثلة للقيم القصوى لمحتوى الرئيق في بعض النفايات المستخدمة في منشآت إنتاج الإسمنت، القيم هي ملغرام/كغ

من المادة الجافة [جزء من المليون] (BREF CLM, 2013)

نوع النفايات	النمسا	ألمانيا	سويسرا
البلاستيك	٢	١,٢	
الورق	٢	١,٢	
الزيوت المستعمل، المذيبات	٢	١	
حمأة مياه المجاري	٣		
النفايات القابلة للاحتراق بشكل عام	٠,٥		٠,٥
النفايات المستخدمة كمواد خام			٠,٥

الفوائد البيئية المتحققة

تؤدي مستويات الرئيق المنخفضة المنتظمة في مدخلات المواد إلى انبعاثات رئيق منخفضة. وفي عام ٢٠١٤ بلغت نسبة أنواع الوقود البديلة المستخدمة في منشأة سيمينتا، سلايت، بالسويد ٦٠ في المائة. ونظراً لمحتوى الرئيق المنخفض في الحجر الجيري وأساليب التحكم الفعال في المدخلات فقد بلغت انبعاثات الرئيق ٠,٠٠١٤ ملغم رئيق/نانومتر^٣ (قيمة متوسطة خلال فترة

أخذ العينات، قياسات دورية في ظروف مرجعية ٢٧٣ كلفن، ١٠١,٣ كيلوباسكال، ١٠ في المائة أكسجين وغاز جاف). وتحتوي المنشأة أيضاً على جهاز تنظيف رطب لخفض كمية ثاني أكسيد الكبريت بيد أن تأثير هذا الجهاز على انبعاثات الزئبق لم يخضع للتحليل.

القابلية للتطبيق

يمكن تطبيق عملية التحكم في المدخلات في كل منشآت إنتاج الإسمنت.

المنشأة المرجعية

سيمينتا (Cementa AB): سلايت، السويد

التدابير الثانوية

إزالة الغبار

إحدى التكنولوجيات المعتمدة للحد من تراكم مستويات الزئبق في غبار الفرن تتمثل في الإزالة الانتقائية المتكررة أو ما يعرف بـ "استنزاف" غبار الفرن المشبع بالزئبق.

ويستخلص غبار الفرن المشبع بالزئبق من الغبار والزئبق الدائرين في الفرن (انظر الشكل ٤)، وعقب استخلاص الغبار يعاد مرة أخرى مباشرة في مرحلة الطحن النهائية (بعد الفرن) مع كريات الكلنكر والجبس.

ويمكن تنفيذ الإزالة المتكررة للغبار بتشكيلة من اثنتين:

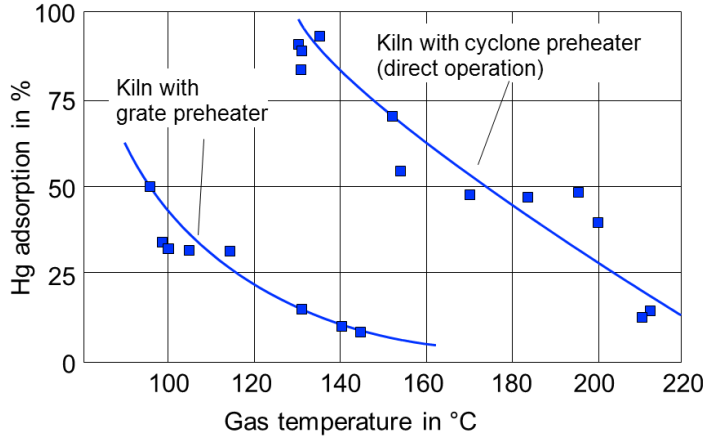
١ - إزالة الغبار "مع عدم تشغيل طاحونة المواد الخام" (الفرن يعمل لوحده): وتكون هذه الطريقة فعالة في إزالة الزئبق. ويحتوي الغبار الذي يجمع من جهاز التسخين المسبق على تراكيز زئبق عالية نسبياً نظراً لعدم تعرضه للتخفيف داخل طاحونة المواد الخام.

٢ - إزالة الغبار "مع تشغيل طاحونة المواد الخام" (يعمل كل من الفرن وطاحونة المواد الخام بشكل متناسق نظراً لأن غازات الفرن تجفف الدقيق الخام داخل طاحونة المواد الخام): هذه الطريقة أقل فعالية في إزالة الزئبق. ويُخفف غبار جهاز التسخين المسبق، المخصَّب بالزئبق المتجمع، داخل طاحونة المواد الخام. وتجدر الإشارة إلى أن هذه الحالة تقسم أيضاً إلى ثلاثة تشكيلات:

- المنشآت المزودة بطاحونة مواد خام رأسية ← جميع غازات الفرن تمر عبر طاحونة المواد الخام ← توجد كمية قليلة جداً من الزئبق في غبار المرشح ← من الأفضل استخدام الإزالة المتكررة للغبار أثناء وقف تشغيل طاحونة المواد الخام فقط؛ وهذا ينطبق أيضاً على المنشآت المحتوية على الطواحين الكروية والمواد الخام ذات المحتوى العالي من الرطوبة؛
- المنشآت المزودة بطواحين كروية للمواد الخام ← بعض غازات الفرن قد لا تمر عبر طاحونة المواد الخام ← يمكن النظر في استخدام بعض عمليات الإزالة المتكررة للغبار أثناء تشغيل طاحونة المواد الخام على مسار التحويلة في حال كان هذا المسار مزوداً بمرشح غبار منفصل؛
- المنشآت المزودة بمرشح مستنزف منفصل عن الفرن الرئيسي ومرشح طاحونة المواد الخام. يُلِّقَّم غاز جهاز التسخين المسبق في هذا المرشح المستنزف الأصغر حجماً. وتكون الإزالة المتكررة للغبار من هذا المرشح ناجحة مادام الغاز المتبقي كله يمر عبر طاحونة المواد الخام.

وتعتبر درجة الحرارة في جهاز تجميع الغبار مهمة حيث أن ضغط بخار الزئبق ينخفض بشدة عند انخفاض درجات الحرارة (انظر الشكل ٦-٥ في التذييل). علاوةً على ذلك فإن الشكل ٥ يظهر أن امتزاز الزئبق على سطح الغبار يزداد مع انخفاض درجات الحرارة. وينطبق هذا التأثير بصورة رئيسية على الزئبق المؤكسد وبدرجة أقل على الزئبق النقي. ولتحقيق كفاءة جيدة عند استخدام تكنولوجيا الإزالة المتكررة للغبار فإنه يتعين أن تكون درجة حرارة الغاز أقل من ١٤٠ م° والأفضل أن تكون أقل من أو تساوي ١٢٠ م°. وأثناء تشغيل طاحونة المواد الخام تكون درجة حرارة الغاز في المرشح عادةً بين ٩٠ م° و ١٢٠ م°، أما عند عدم تشغيل طاحونة المواد الخام فتكون درجة حرارة الغاز عادةً بين ١٤٠ و ١٧٠ م° ويمكن أن تصل إلى ٢٠٠ م°. وهذا يعني أن تحقيق فعالية عملية الإزالة المتكررة للغاز يتطلب خفض درجة الحرارة أثناء وقف تشغيل طاحونة المواد الخام في برج لتكييف الهواء أو من خلال استخدام هواء درجة حرارته بين ١٢٠ و ١٤٠ م°. أما خفض درجة الحرارة إلى أقل من ١٤٠ م° باستخدام التكييف بالماء فيؤدي في أغلب الأحيان إلى تآكل النظام بسبب تكاثف حامض الكبريتيك، إلا إذا تم عزل جدران جهاز تجميع الغبار والقنوات بشكل جيد للغاية. وكثيراً ما يتعين تسخين الأوعية القمعية لجهاز جمع الغبار، ولهذا السبب يجب اتخاذ تدابير تقنية ملائمة لتفادي التآكل.

ويمكن إزالة الغبار المترسب من النظام بشكل مستقل عن نوع المرشح. وفي بعض الحالات التي تستخدم فيها أجهزة الترسيب الكهروستاتيكية ثبت أن الفعالية تكون أفضل عند إزالة الغبار وحده من القسم الأخير (وهو عادةً الجزء الأنعم من الغبار ومساحته السطحية النوعية أعلى)، ولكن هذه الفعالية لم تلاحظ في حالات أخرى. ويتعين تجميع الغبار في مستودع منفصل لضمان المرونة فيما يتعلق باستخداماته اللاحقة. وفي الكثير من منشآت إنتاج الإسمنت يستخدم الغبار في شكل مادة معدنية مضافة إلى الإسمنت وهو أمر يتوافق مع معظم المعايير المتعلقة بالإسمنت. أما إذا لم يكن ذلك ممكناً فمن الممكن استخدام الغبار لإنتاج منتجات أخرى مثل بعض المواد اللاصقة، وإذا كان هذا الخيار غير وارد أيضاً فيتعين عندئذ معالجة الغبار بوصفه نفايات.



الشكل ٥. مقارنة بين امتزاز الزئبق في أجهزة شبكية ودوامية للتسخين المسبق اعتماداً على درجة حرارة الغاز النظيف (Kirchartz, 1994)

ويمكن تحسين كفاءة هذه التقنية من خلال إضافة مواد ممتزة ذات مساحة سطحية كبيرة تتميز بخواص كيميائية محددة (مثلاً الكربون المنشط أو المواد الممتزة القائمة على الكالسيوم) لزيادة كمية الزئبق المرتبط بالجسيمات (انظر الفرع ٣-٢-٢).

المنافع البيئية المتحققة

المنفعة البيئية الرئيسية هي خفض انبعاثات الزئبق. وقد تكون إمكانية التخفيض كبيرة ويعتمد ذلك بشكل رئيسي على درجة حرارة غاز المداخن ونسبة الغبار المنقول (المزال) بشكل متكرر ونسبة طريقة التشغيل المباشرة والمركبة (انظر الشكل ٦-٩ في التذييل). ويتعين تحديد كفاءة الإزالة خلال فترة زمنية تصل إلى عدة أيام أو أسابيع على الأقل. وأثبتت التجارب أنه باستخدام هذه التقنية يمكن خفض انبعاثات الزئبق بنسبة ١٠ إلى ٣٥ في المائة (Oerter/Zunzer, 2012; Schäfer/Hoenig, 2001). وتظهر التجارب المستمدة من منشآت إنتاج الإسمنت في ألمانيا أن استخدام هذه التقنية يخفض أيضاً الانبعاثات الجوية للمركبات الأخرى مثل الأمونيا.

الآثار الشاملة لوسائط متعددة

عندما يستخدم الغبار المزال بشكل متكرر كمادة مضافة إلى الإسمنت فإن الزئبق ينتقل إلى المنتج النهائي. وإذا توزع الغبار بالتساوي في المنتج النهائي فإن تركيز الزئبق يصبح مماثلاً لتوزيعه في المواد الخام الأصلية. ويتعين رصد محتوى الزئبق في المنتج النهائي. ويرتبط الزئبق بالمكونات بمجرد إضافة الماء إلى الإسمنت. أما إذا لم يكن ممكناً استخدام الغبار المزال في المنتج النهائي فإنه يتعين عندئذٍ التخلص منه بطريقة سليمة.

القابلية للتطبيق

يمكن من حيث المبدأ تطبيق تقنية الإزالة المتكررة للغبار في جميع منشآت إنتاج الإسمنت، وهي تقنية أكثر فعالية في الأفران الاحتوية على أجهزة التسخين المسبق وأجهزة التكليس المسبق خلال فترة توقف تشغيل طاحونة المواد الخام أو في سلسلة وقف تشغيل الطاحونة عند استخدام جزء من غاز العادم فقط في طاحونة المواد الخام. وفي التشكيلات الأخرى (مثلاً في الأفران الجافة الطويلة) تكون هذه التكنولوجيا أقل فعالية نظراً لأن درجة حرارة الغاز العادم تكون أعلى من ٢٠٠م. وتعتمد الكفاءة التي يمكن تحقيقها على عدد من البارامترات من ضمنها:

- العلاقة بين الزئبق المؤكسد والزئبق النقي في الغاز العادم
- العلاقة بين العمليات عند تشغيل طاحونة المواد الخام وعند إيقاف تشغيلها
- العلاقة بين طاحونة المواد الخام والقدرة الإنتاجية للفرن
- درجة حرارة الغاز العادم التي يمكن الوصول إليها في العمليات أثناء إيقاف تشغيل طاحونة المواد الخام
- وجود مستودع منفصل للغبار المزال
- احتمالات استخدام الغبار
- مستوى تخصيص النظام بالزئبق (التخصيب الأقل يعني أنه يتعين إزالة المزيد من الغبار أو المزيد من الدقيق الخام من النظام)

التكاليف

بالنسبة للمرافق التي لا تنفذ بالفعل عملية إزالة الغبار يلزم الاستثمار الإضافي في نظم نقل الغبار ومستودعات التخزين ومعدات تحديد الجرعات لطاحونة الإسمنت.

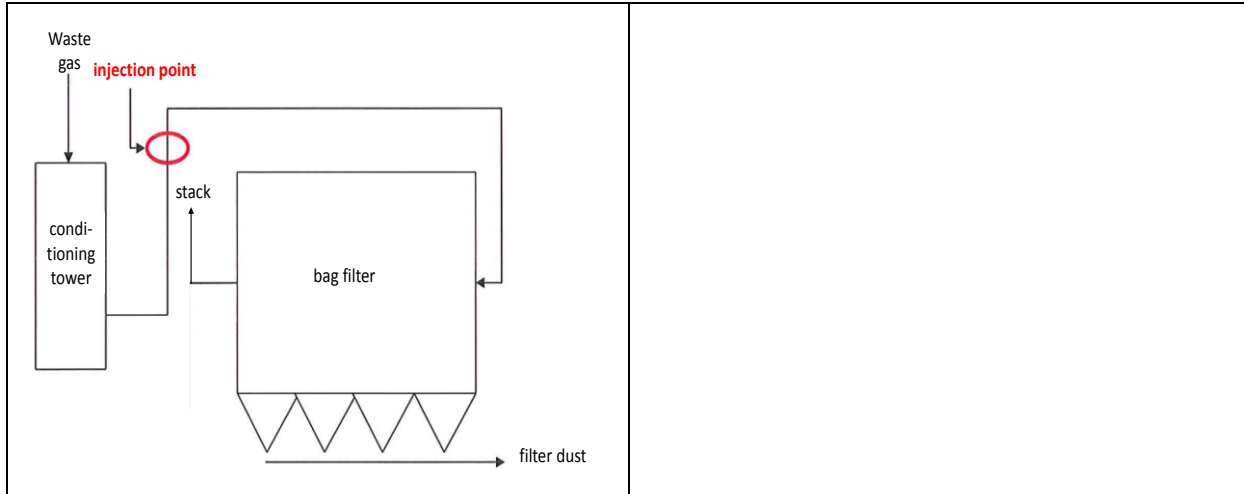
المنشآت المرجعية

- سيميكس (Cemex): بروكسفيل، فلوريدا، الولايات المتحدة

الإزالة المتكررة للغبار عن طريق حقن مادة ممتزة

يمكن من خلال الإزالة المتكررة للغبار بالاقتران مع حقن مادة ممتزة تحقيق كفاءة إزالة أعلى للزئبق مقارنةً باستخدام الإزالة المتكررة للغبار وحدها. وفي العادة تحقن المواد الممتزة أثناء العمل مع وقف تشغيل طاحونة المواد الخام بهدف خفض الانبعاثات القصوى في وضعية التشغيل هذه، الأمر الذي يؤدي أيضاً إلى تخفيض كمية المادة الممتزة الضرورية لضبط انبعاثات الزئبق بالمستويات المرغوب فيها. وباستثناء حالات قليلة جداً (في ظروف مدخلات محددة) لا تكون هناك حاجة لحقن مواد ممتزة عند العمل مع تشغيل طاحونة المواد الخام نظراً لأن احتجاز الزئبق في طاحونة المواد الخام يكفي لضبط انبعاثات الزئبق بالمستويات المرغوب بها.

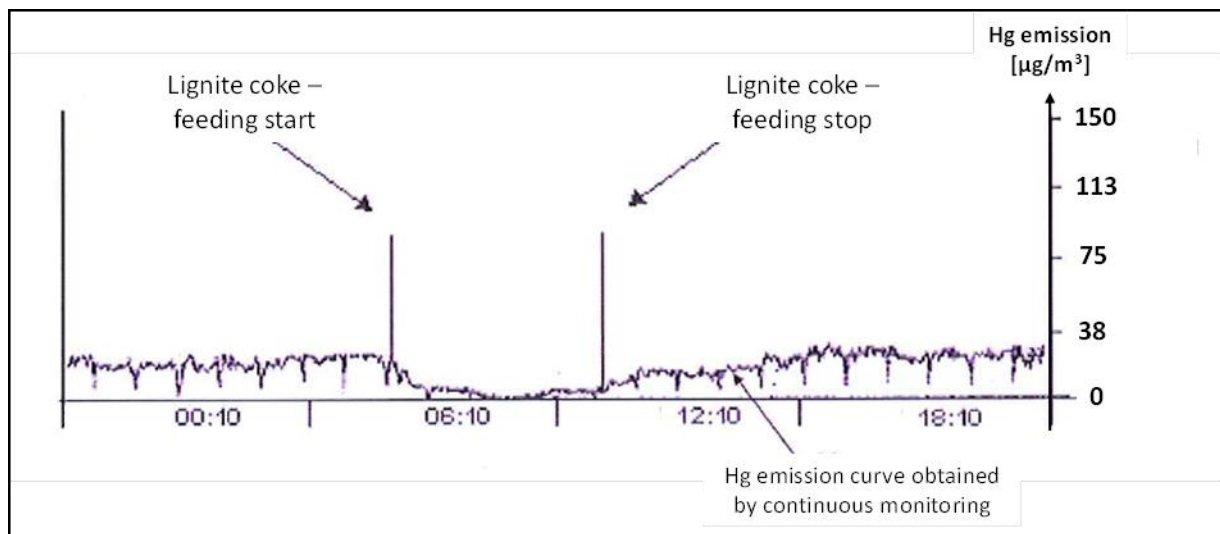
وتتاح في الأسواق أنواع متعددة من المواد الممتزة مثل الكربون، والكربون المنشط، واللغنيت المنشط (كوك اللغنيت)، والزيوليتات، والخلائط المعدنية المتفاعلة المحتوية على صلصال نشط أو مركبات كالسيوم نشطة.



الشكل ٦. رسم توضيحي لحقن اللغنيت المنشط (كوك اللغنيت) داخل غاز المداخن بين برج التكييف والمرشح الكيسي (Lafarge Wössingen, 2015)

ويجب المحافظة على أقل درجة حرارة ممكنة لغاز المداخن، ويفضل أن تكون أقل من ١٣٠م بهدف تحقيق كفاءة امتزاز عالية. ويمكن إجراء عملية الحقن من خلال كيس كبير يحتوي على المادة الممتزة ووحدة تقديم الجرعات.

وبعد الشروع في تقديم جرعات المادة الممتزة يمكن أن يلاحظ الانخفاض في انبعاثات الزئبق خلال بضع دقائق (الشكل ٧).



الشكل ٧. مثال لخفض انبعاثات الزئبق من خلال حقن كوك اللغنيت؛ وأمكن الوصول إلى منحنى الانبعاثات الموضح من خلال الرصد المستمر للزئبق في الغاز العادم من المداخن (based on Lafarge Wössingen, 2015)

ويتطلب استخدام المواد الممتزة إزالة الغبار الملوث بالمادة الممتزة المحملة بالزئبق. ولهذا يمكن اعتبار حقن المواد الممتزة تدبيراً لتعزيز كفاءة الاحتجاز لعملية إزالة الغبار. ونظراً لأن تقنية الإزالة المتكررة للغبار تعمل بشكل أفضل مع الزئبق المؤكسد مقارنةً بالزئبق النقي فإنه يمكن مضاعفة القدرة على الامتزاز من خلال استخدام مواد مضافة من قبيل البروم أو الكبريت أو مركبات أكثر تعقيداً تتميز بخواص كيميائية مماثلة. وفي عدد قليل من منشآت إنتاج الإسمنت جرى استخدام مواد ممتزة مشربة بمركبات البروم أو الكبريت بهدف تحسين كفاءة احتجاز الزئبق.

وعند السعي لتخفيض الانبعاثات القصوى قد تدوم فترة إضافة الجرعات لساعات قليلة فقط في اليوم. بعد ذلك يمكن على الأرجح إضافة الغبار المحتوي على المادة الممتزة المشبعة بالزئبق إلى طاحونة الإسمنت. أما في حالات الحقن المستمر فقد يتعين التخلص من الغبار المحتوي على المادة الممتزة المشبعة بالزئبق بشكل منفصل لأن إضافة كميات كبيرة من الغبار المحتوي على المادة الممتزة المشبعة بالزئبق إلى الإسمنت قد يضر بجودة الإسمنت. وفي حال استخدام الغبار المزال كمكون من مكونات الإسمنت في طاحونة الإسمنت فإنه يتعين رصد الآثار المحتملة على جودة الإسمنت.

المنافع البيئية المتحققة

يمكن من خلال الإزالة المتكررة للغبار مع حقن مادة ممتزة الوصول إلى انبعاثات منخفضة للغاية من الزئبق حيث يمكن خفض انبعاثات الزئبق بما نسبته ٧٠ إلى ٩٠ في المائة (Lafarge Wörsingen, 2015). ويعتمد مستوى الانبعاثات على التركيز المستهدف الذي صُمم النظام لتحقيقه. ففي ألمانيا رُكبت بعض منشآت الإسمنت نظماً لحقن المواد الممتزة مصممة للإبقاء على مستويات انبعاثات الزئبق عند أقل من ٠,٠٣ ميليغرام/متر^٣ عادي كقيمة متوسطة يومية وعند ٠,٠٥ ميليغرام/متر^٣ عادي كقيمة متوسطة لكل نصف ساعة عند ظروف مرجعية بدرجة حرارة ٢٧٣ كلفن، وضغط جوي ١,٠١,٣ كيلوباسكال، و ١٠ في المائة أكسجين وغاز جاف. وفي منشأة لافارج فوسنيغين لإنتاج الإسمنت في فالتزباختال بألمانيا أمكن الوصول إلى تركيز زئبق يقل عن ٢٨ ميكروغرام/متر^٣ عادي (قيمة متوسطة يومية عند درجة حرارة ٢٧٣ كلفن، وضغط جوي ١,٠١,٣ كيلوباسكال، و ١٠ في المائة أكسجين وغاز جاف).

الآثار الشاملة لوسائط متعددة

عندما يستخدم الغبار المزال كمادة مضافة إلى الإسمنت فإن المادة الممتزة والزئبق ينتقلان إلى المنتج النهائي. وإذا توزع الغبار بالتساوي في المنتج النهائي فإن تركيز الزئبق يصبح مماثلاً لتوزيعه في المواد الخام الأصلية. ويتعين في هذه الحالة رصد محتوى الزئبق في المنتج النهائي. وفي كل الأحوال يجب ألا تكون هناك أي انبعاثات للزئبق في الجو من هذه المنتجات. علاوةً على ذلك يتعين رصد تأثير المادة الممتزة على جودة الإسمنت والتحكم فيه. وإذا لم يكن ممكناً استخدام الغبار المزال في المنتج النهائي فإنه يتعين عندئذٍ التخلص منه بطريقة سليمة.

القابلية للتطبيق

تنطبق هذه التقنية في المنشآت القائمة والجديدة. وأبلغ عن استخدام المواد الممتزة لخفض الانبعاثات الجوية للزئبق بصورة رئيسية في الولايات المتحدة الأمريكية وألمانيا.

تعتبر الإزالة المتكررة للغبار مع حقن مادة ممتزة أعلى كلفة من عملية إزالة الغبار وحدها. ونظراً لأن فعالية إزالة الغبار تعتمد بشكل كبير على العوامل المحددة في الموقع، يطبق الحقن بالمواد الممتزة على نطاق أوسع ويمكن من خلاله تحقيق مستويات أقل من انبعاثات الزئبق الإجمالية.

التكاليف

عند السعي لخفض الانبعاثات القصوى، في الحالات التي تتم فيها إضافة جرعات المادة الممتزة لساعات قليلة فقط في اليوم، تكون تكاليف التشغيل منخفضة. ويتعين فقط تغطية تكاليف الكهرباء (المراوح ووحدات إضافة الجرعات) واستهلاك المادة الممتزة (زهاء طن واحد في اليوم). وتبلغ تكاليف التشغيل التقديرية زهاء ٠,٢ يورو لكل طن من كريات الكلنكر (١ طن من كوك اللغيت المنشط، ١٦٨ كيلوواط ساعة و ٣٠٠ ٢ طن من كريات الكلنكر في اليوم، وفق الأسعار في ألمانيا في عام ٢٠١٥). وعند هذه المستويات يمكن على الأرجح إضافة المادة الممتزة الداخلة في تركيب غبار المرشح إلى طاحونة الإسمنت. ونتيجة لذلك لا تترتب تكاليف تخلص إضافية.

أما في حالة الحقن المستمر، فإذا لم يكن ممكناً إضافة الغبار المحتوي على المادة الممتزة المحملة بالزئبق إلى طاحونة الإسمنت فيتعين التخلص منه بطريقة سليمة.

وتبلغ تكاليف الاستثمار (الشراء والتركيب) في نظام حقن المواد الممتزة زهاء ٥٠ ٠٠٠ دولار - ١٠٠ ٠٠٠ دولار اعتماداً على الجهة الموردة وطاقة المنشأة.

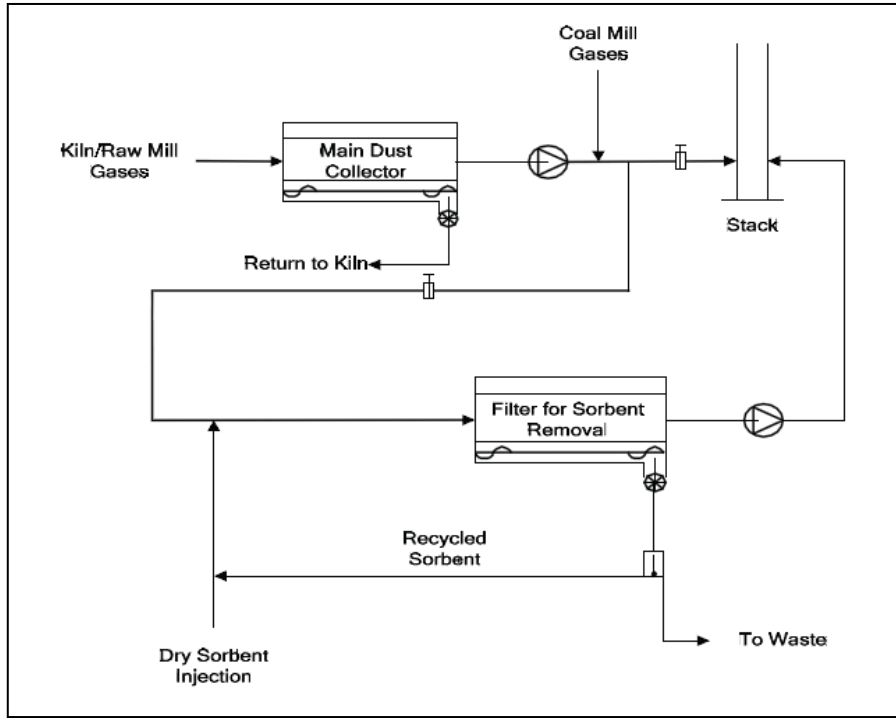
المنشآت المرجعية

- منشأة لافارج فوسنيجين لإنتاج الإسمنت، فالترباختال، ألمانيا (بيعت في عام ٢٠١٥ لشركة سي آر إتش (CRH))
- شركة سيميكس (Cemex OstZement GmbH)، رودرسدورف، ألمانيا
- شركة هولسيم (Holcim Zementwerk Beckum-Kollenbach)، ألمانيا (قبل سيميكس)
- شركة ليهاي للإسمنت (Lehigh Cement): كوبرتينو، كاليفورنيا، الولايات المتحدة
- شركة ليهاي للإسمنت (Lehigh Cement): تيهاشابي، كاليفورنيا، الولايات المتحدة

حقن المادة الممتزة مع تركيب حجرة مرشح كيسي

في هذه التقنية تحقن المادة الممتزة في المراحل التي تلي الأجهزة الرئيسية لضبط الجسيمات بوجود مرشح تنقية لإزالة المادة الممتزة المحملة بالزئبق. واعتماداً على متطلبات إزالة انبعاثات الزئبق يمكن حقن المادة الممتزة بشكل مستمر أو بهدف لتخفيف حالات الانبعاثات القصوى التي تحدث عادةً أثناء التشغيل مع إيقاف طاحونة المواد الخام.

ولتفادي اختلاط المادة الممتزة المحملة بالزئبق مع غبار جهاز التسخين المسبق تُحقن المادة الممتزة (مثل الكربون المنشط) داخل غاز المداخن بعد الجهاز الرئيسي لضبط الغبار، ويستخدم مرشح غبار ثانوي أو ما يعرف بمرشح "تنقية" كيسي لاحتجاز الكربون المستعمل. وليس من الشائع استخدام مرشح غبار ثان في صناعة الإسمنت بسبب تكاليف الاستثمار الإضافية. الشكل ٨ أدناه يبين استخدام حقن المادة الممتزة مع مرشح كيسي للتنقية.



الشكل ٨. حقن الكربون المنشط في المراحل التي تلي مرشح الغبار مما يتطلب مرشحاً إضافياً لإزالة المادة الممتزة (Paone, 2009, p 55)

هناك عدد من المتغيرات التي تؤثر على امتزاز الزئبق على المادة الممتزة وتؤثر بالتالي على كفاءة التحكم في الزئبق. وتشمل هذه المتغيرات (Zheng, 2011):

- تنوعات الزئبق وتركيزها
- الخواص الفيزيائية والكيميائية للمادة الممتزة ومن ذلك توزيع أحجام الجسيمات وتركيبية المسامات وتوزيعها وخصائص السطح
- درجة حرارة غاز المداخن
- تركيبة غاز المداخن
- تركيز المادة الممتزة (أي معدل الحقن)
- فترة التلامس بين المادة الممتزة والزئبق
- كفاية توزيع المادة الممتزة داخل مسار الغاز المحتوي على الزئبق

إضافةً إلى ذلك يؤثر نوع المرشح الكيسي ونسبة الهواء إلى النسيج في المرشح أيضاً على كمية الزئبق التي يمكن امتزازها، ولذلك يجب أن يكون مرشح التنقية الكيسي ذا حجم مناسب.

ومن واقع نتائج دراسة لتقييم بارامترات التصميم الرئيسية لمعدات كاملة للتحكم في انبعاثات الزئبق في منشأة لإنتاج الإسمنت في الولايات المتحدة وُجد أنه من حيث تحقيق تحكم أكبر في انبعاثات الزئبق لا يتشابه أداء الكربون المنشط غير المعالج مع أداء الكربون المنشط المعالج بالهالوجينات، ومن ثم يمكن تفادي مشكلات أخرى محتملة مرتبطة باستخدام الهالوجينات، ومنها مثلاً مشاكل التآكل (US Cement, 2007). إضافةً إلى ذلك فإن درجة حرارة غاز المداخن يجب أن تكون منخفضة لتحقيق معدلات امتزاز عالية (Renzoni et al, 2010).

المنافع البيئية المتحققة

يمكن من خلال استخدام حقن الكربون المنشط مع مرشح تنقية كيسي إزالة ما نسبته ٩٠ في المائة من الزئبق (Barnett, 2013).

الآثار الشاملة لوسائط متعددة

يتعين التخلص بطريقة سليمة من الغبار المحمل بالزئبق الناتج عن هذه العملية.

القابلية للتطبيق

يمكن تطبيق هذه التقنية في جميع أفران الإسمنت. واعتماداً على المتطلبات الإجمالية لإزالة انبعاثات الزئبق يمكن حقن المادة الممتازة بشكل مستمر أو بهدف تخفيض حالات الانبعاثات القصوى التي تحدث عادةً عند التشغيل مع إيقاف طاحونة المواد الخام.

وفي الولايات المتحدة نجحت منشأة لإنتاج الإسمنت في تركيب وتشغيل نظام لحقن الكربون المنشط يتم فيه حقن الكربون المنشط داخل غاز المداخن بعد جهاز رئيسي لضبط الغبار يليه مرشح تنقية كيسي، من أجل التحكم في انبعاثات الزئبق. ونظام الفرن المستخدم في المنشأة هو نظام يتكون من نظام للتسخين المسبق والتكليس المسبق يشتمل على فرن دوّار وبرج لجهاز التسخين والتكليس المسبق، ونظام التحكم في تلوث الهواء المرتبط بذلك. والمنشأة مجهزة بطاحونة مواد خام موازية حيث توجه الغازات من نظام الفرن مباشرةً إلى طاحونة المواد الخام لتوفير الحرارة اللازمة لتجفيف المواد الخام. وفي حالات التشغيل عندما تكون طاحونة المواد الخام متوقفة (زهاء ١٥ في المائة من الإطار الزمني السنوي للتشغيل) لا تمر الغازات عبر طاحونة المواد الخام بل تتوجه مباشرةً إلى المرشح الكيسي. وتستهلك المنشأة عادةً ١,٥ مليون طن أمريكي في السنة من المواد الخام وطاقاتها الإنتاجية ١ مليون طن أمريكي من كريات الكلنكر سنوياً (US Cement, 2007).

التكاليف

يتضمن التحليل الصادر عن وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة بشأن تكلفة تركيب نظام لحقن الكربون المنشط للتحكم في الزئبق في فرن إسمنت استخدام مرشح تنقية كيسي. وقُدّرت تلك التكاليف باستخدام تكاليف وضعت أصلاً لمراجّل المرافق الكهربائية. وباستخدام معدلات تدفق الغاز العادم كعامل مشترك، تم توسيع تكاليف الضبط للمرافق الكهربائية بهدف استخلاص تكاليف الضبط لأفران الإسمنت البورتلاندي. ووضعت عوامل التكاليف الرأسمالية والسنوية (دولار/طن أمريكي من كريات الكلنكر) باستخدام تكاليف المرجل وبيانات تدفق الغاز لمراجّل بأحجام مختلفة. وفي الولايات المتحدة وُجد أن تكاليف الاستثمار الكلية لتركيب نظام لحقن الكربون المنشط مع مرشح تنقية كيسي في فرن جديد بطاقة إنتاجية قدرها ١,٢ مليون طن أمريكي في السنة، تعادل ٣,٢ مليون دولار (بقيم دولارات الولايات المتحدة الأمريكية لعام ٢٠٠٥). ووجد أن التكاليف السنوية تعادل ١,١ مليون دولار (US Cement, 2010 Cost).

وفي الوثائق المرجعية لأفضل التقنيات المتاحة (BREF CLM, 2013) تراوحت تكاليف الاستثمار في نظام لمرشحات الغبار (مرشح كيسي أو جهاز ترسيب كهروستاتيكي) من ٢,١ مليون يورو إلى ٦ مليون يورو لفرن طاقته ٣٠٠٠ طن/اليوم.

المنشأة المرجعية

- آس جروف لإنتاج الإسمنت: ديوركي، أريغون (الولايات المتحدة الأمريكية)

تدابير التحكم في الملوثات المتعددة

يمكن لأجهزة التحكم في تلوث الهواء المركبة لإزالة أكاسيد النيتروجين وأكاسيد الكبريت أن تحقق أيضاً منافع مشتركة على صعيد احتجاز الزئبق، وهي فعالة على نحو خاص فيما يتعلق بانبعاثات الزئبق المؤكسد.

أجهزة التنظيف الرطبة

أجهزة التنظيف الرطبة هي تقنية معتمدة لإزالة الكبريت من غاز المداخن في عمليات إنتاج كريات الكلنكر حيث يكون التحكم في انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت ضرورياً.

وفي جهاز التنظيف الرطب تُمتص أكاسيد الكبريت عن طريق سائل أو ملاط رقيق القوام يُرش في برج رشاش. وتكون المادة الماصة هي كربونات الكالسيوم. وتقدم نظم التنظيف الرطب أعلى كفاءات لإزالة للغازات الحمضية القابلة للذوبان بين جميع طرق إزالة الكبريت من غاز المداخن وتتميز بأقل عدد من عوامل عناصر التفاعل الزائدة وأقل معدل لإنتاج النفايات الصلبة. بيد أن أجهزة التنقية الرطبة تخفض أيضاً بشكل كبير مستويات كلوريد الهيدروجين والغبار المتخلف والأمونيا، وبدرجة أقل، المعادن، بما في ذلك انبعاثات الزئبق.

وُرش الملاط الرقيق القوام عكس تيار الغاز العادم ويُجمع في صهريج لإعادة التدوير في فعر جهاز التنظيف، حيث يتأكسد الكبريتيت الناتج بالهواء إلى كبريتات ويكون ثاني هيدرات كبريتات الكالسيوم. ويُفصل ثاني الهيدرات، وحسب الخواص الفيزيائية والكيميائية للجبس، يمكن استخدام هذه المادة في طحن الإسمنت وتعاد المياه إلى جهاز التنظيف.

وتتميز المركبات الغازية للزئبق المؤكسد بقابليتها للذوبان في الماء ويمكن امتصاصها في الملاط المائي الرقيق لنظام جهاز التنظيف الرطب ولذلك يمكن إزالة جزء من أبخرة الزئبق المؤكسد في الطور الغازي بكفاءة. أما الزئبق النقي الغازي فهو غير قابل للذوبان في الماء ولذلك لا يمكن امتصاصه في هذا النوع من الملاط. وقد يتفاوت توزيع الزئبق بين الزئبق المؤكسد والزئبق النقي إلى حد كبير بين الأفران ويعتمد ذلك أيضاً على ظروف المعالجة عند تشغيل الفرن، وهذه كلها تؤثر على كمية الزئبق التي تزال في جهاز التنظيف الرطب. وفي عمليات إزالة الكبريت الرطبة ينتج الجبس كنتاج ثانوي ويستخدم كمادة بديلة للجبس الطبيعي تضاف إلى كريات الكلنكر في الطاحونة النهائية.

المنافع البيئية المتحققة

في الولايات المتحدة جرى تركيب خمسة أفران إسمنت مزودة بأجهزة تنظيف رطبة للحجر الجيري بهدف التحكم في انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت، وتتحكم هذه الأجهزة بتحكم أيضاً في انبعاثات الزئبق الجوية. واستناداً إلى اختبارات المداخن وبيانات من أجهزة التنظيف الخمسة المشار إليها فإن ما يصل إلى ٨٠ في المائة من الانبعاثات الجوية الكلية للزئبق يجري التحكم فيها بصورة مشتركة (أي تزال) (Barnett, 2013). وتكون كفاءة الإزالة أقل في منشآت إنتاج الإسمنت التي تحتوي على تركيزات عالية من الزئبق النقي في الغاز العادم.

القابلية للتطبيق

يستخدم جهاز التنظيف الرطب عادةً في منشآت إنتاج الإسمنت التي تتميز بانبعاثات عالية من ثاني أكسيد الكبريت.

وفيما يخص منشآت إنتاج الإسمنت تكون هذه التقنية أكثر فعاليةً عندما تكون الغالبية العظمى من انبعاثات الزئبق في شكل أكاسيد، أما إذا كانت هناك مستويات كبيرة من الزئبق النقي فإن أجهزة التنظيف الرطب لا تكون فعالة ما لم تستخدم مواد مضافة لأكسدة الزئبق.

الآثار الشاملة لوسائط متعددة

- انتقال الزئبق إلى المنتجات الثانوية مثل الجبس

الآثار الشاملة لوسائط متعددة (بخلاف تلك المرتبطة بالزئبق)

- زيادة استهلاك الطاقة
- زيادة إنتاج النفايات من عملية إزالة الكبريت من غاز المداخن، وإنتاج نفايات إضافية عند إجراء الصيانة
- زيادة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون
- زيادة استهلاك المياه
- الانبعاثات المحتملة إلى المياه وزيادة مخاطر تلوث المياه
- زيادة تكاليف التشغيل
- استبدال الجبس الطبيعي

التكاليف

في عام ٢٠٠٠ أبلغ أن تكاليف الاستثمار في جهاز التنظيف بشركة كاسيل للإسمنت (بما في ذلك التعديلات على المنشأة) بلغت ٧ ملايين يورو بينما بلغت تكاليف التشغيل زهاء ٠,٩ يورو لكل طن من كريات الكلنكر. وفي عام ١٩٩٨ بلغت تكاليف الاستثمار التي تكبدتها شركة سيمينتا (Cemeta AB) في السويد زهاء ١٠ ملايين يورو بينما بلغت تكاليف التشغيل زهاء ٠,٥ يورو لكل طن من كريات الكلنكر. وبتكيزات أولية لثاني أكسيد الكبريت تصل إلى ٣٠٠٠ ملغم/م^٣ عادي و طاقة إنتاجية للفرن تبلغ ٣٠٠٠ طن من كريات الكلنكر في اليوم، بلغت تكاليف الاستثمار في أواخر تسعينيات القرن الماضي ٦ ملايين يورو - ١٠ ملايين يورو بينما بلغت تكاليف التشغيل ٠,٥ إلى ١ يورو لكل طن من كريات الكلنكر. وفي منشأة مرجعية لإنتاج الإسمنت تبلغ طاقتها الإنتاجية ١٠٠ ١ طن في اليوم ومزودة بجهاز تنظيف رطب يعمل على خفض أكاسيد الكبريت بنسبة ٧٥ في المائة وُجد أن تكاليف الاستثمار بلغت ٥,٥ مليون طن بينما بلغت تكاليف التشغيل المتغيرة ٠,٦ يورو لكل طن من كريات الكلنكر وبلغت التكاليف الإجمالية ٣ يورو لكل طن من كريات الكلنكر (بيانات لعام ٢٠٠٠، فترة عمر قدرها ١٠ سنوات، معدل الفائدة ٤ في المائة، ويشمل ذلك الكهرباء وتكاليف العمالة والحجر الجيري). وفي عام ٢٠٠٨ أبلغت صناعة الإسمنت في أوروبا عن تكاليف استثمار تراوحت بين ٦ ملايين يورو و ٣٠ مليون يورو وتكاليف تشغيل تراوحت بين ١ يورو و ٢ يورو لكل طن من كريات الكلنكر (BREF CLM 2013).

وفي الولايات المتحدة وجد أن تكاليف الاستثمار الكلية لترتيب جهاز تنظيف رطب في فرن جديد بطاقة إنتاجية قدرها ١,٢ طن أمريكي في السنة، بما في ذلك تكاليف نظام الرصد المستمر للانبعاثات، بلغت ٢٥,١ مليون دولار للفرن (بقيمة دولار الولايات المتحدة في عام ٢٠٠٥). أما التكاليف السنوية، بما في ذلك تكاليف الرصد، فقد بلغت ٣,٦ مليون دولار للفرن (US Cement, 2010 Cost).

المنشآت المرجعية

- سيمينتا (Cemeta AB): سلايت، السويد
- هولسيم (Holcim): ميدلوثيان، تكساس، الولايات المتحدة
- مصنع ليهاي للإسمنت (Lehigh Cement): مدينة ماسون، أيوا، الولايات المتحدة

الاختزال الحفزي الانتقائي

يخضع الاختزال الحفزي الانتقائي انبعاثات أكاسيد النيتروجين عن طريق حقن الأمونيا أو اليوريا في مسار الغاز حيث يحدث تفاعل على سطح المادة الحفازة عند درجة حرارة تتراوح من 300 - 400 م تقريباً. وتستخدم تقنية الاختزال الحفزي الانتقائي على نطاق واسع لخفض مستويات أكاسيد النيتروجين في صناعات أخرى (محطات الطاقة العاملة بالفحم، أفران حرق النفايات) واستخدمت في صناعة الإسمنت منذ تسعينيات القرن الماضي (CEMBUREAU, 1997; Netherlands, 1997) في ست منشآت لإنتاج الإسمنت في العالم (ألمانيا وإيطاليا والولايات المتحدة). وتتكون المادة الحفازة في الاختزال الحفزي الانتقائي من جسم خزفي مدمم بمركبات تفاعلية حفزية مثل خامس أكسيد الفاناديوم (V_2O_5) أو أكاسيد الفلزات الأخرى. والغرض الرئيسي من تقنية الاختزال الحفزي الانتقائي هي الاختزال الحفزي لأول أكسيد النيتروجين وثاني أكسيد النيتروجين في الغازات العادمة وتحويلهما إلى نيتروجين.

وفي صناعة الإسمنت يعطى الاعتبار بشكل أساسي لنظامين: تشكيلة منخفضة الغبار بين وحدة إزالة الغبار والمدخنة، وتشكيلة كثيرة الغبار بين جهاز التسخين المسبق ووحدة إزالة الغبار. وتتطلب نظم الغاز العادم القليل الغبار إعادة تسخين الغازات العادمة بعد إزالة الغبار وهو أمر قد يؤدي إلى تكبد تكاليف طاقة إضافية وفقدان للضغط. أما أنظمة الغبار الكثير فلا تحتاج لإعادة التسخين نظراً لأن درجة حرارة غاز المداخن في مخرج نظام جهاز إعادة التسخين تكون عادةً ضمن المدى المطلوب لعمل الاختزال الحفزي الانتقائي. ومن جانب آخر فإن كمية الغبار الكبيرة قبل المرشح لا تمثل مشكلةً في نظم الغبار القليل، ولذلك فإن هذه النظم تسمح بوقت تشغيل أطول بكثير للمادة الحفازة. علاوةً على ذلك فإنها تُركَّب عند درجات حرارة منخفضة (تدفقات حجمية أصغر) مما يسمح باستخدام عدد أقل من طبقات المادة الحفازة.

ومن واقع التجارب في قطاع إنتاج الطاقة من المعروف جيداً أن هناك أثر جانبي يتمثل في تأكسد الزئبق النقي إلى حد ما على سطح المواد الحفازة في عملية الاختزال الحفزي الانتقائي. وهذا الزئبق المؤكسد يتعرض للإزالة على الأرجح في أجهزة ضبط تلوث الهواء المركبة في المراحل النهائية مثل مرشح الغبار. وهذا يعني أنه عند استخدام تقنية الاختزال الحفزي الانتقائي يتحول الزئبق النقي إلى أشكال كيميائية يكون احتجازها أسهل.

وفي الوقت الحاضر تُجرى بحوث مكثفة لتحسين قابلية تطبيق تكنولوجيا الاختزال الحفزي الانتقائي من أجل تخفيض أكاسيد النيتروجين في صناعة الإسمنت. وتشير الدراسات التي أجريت في منشآت أوروبية لإنتاج الإسمنت (ألمانيا والنمسا وإيطاليا) إلى حدوث التأثير المؤكسد للزئبق الأولي عند استخدام تقنية الاختزال الحفزي الانتقائي في الغازات العادمة لمنشآت الإسمنت. ولا يمكن تحقيق إزالة الزئبق إلا بوضع نظام للاحتجاز بعد المادة الحفازة في الاختزال الحفزي الانتقائي، وهذا معناه أن هذه التقنية تعمل بالاقتران مع الاختزال الحفزي الانتقائي الكثير الغبار وليس مع الاختزال الحفزي الانتقائي (القليل الغبار) في المراحل الأخيرة.

المنافع البيئية المتحققة

إحدى المنافع البيئية غير مباشرة تتمثل في التحول الجزئي للزئبق الأولي إلى زئبق مؤكسد، وهذه العملية لها أثر جانبي يتمثل في تحسين عملية احتجاز الزئبق بالتوافق مع إزالة الغبار وجهاز التنظيف الرطب.

الآثار الشاملة لوسائط متعددة (بخلاف تلك المرتبطة بالزئبق)

يزداد الطلب على الطاقة في منشأة الإسمنت بمقدار 5 - 6 كيلوواط ساعة لكل طن من كريات الكلنكر، مما يقلل من كفاءة استخدام الطاقة في هذه العملية ويزيد من الانبعاثات غير المباشرة لغازات الاحتباس الحراري. علاوةً على ذلك تنتج كميات إضافية من النفايات التي تحتوي على معادن نادرة.

تجربة التشغيل

توجد أربعة أجهزة اختزال حفزي انتقائي قيد التشغيل حالياً في منشآت لإنتاج الإسمنت في أوروبا، وهناك بضعة أجهزة أخرى قيد التشغيل (أو قيد التجريب) حول العالم. بيد أن تحديد حجم التأثير المؤكسد للزئبق يحتاج للمزيد من الدراسة.

القابلية للتطبيق

لا يمكن تحقيق الأثر الجانبي لتأكسد الزئبق إلا في منشآت إنتاج الإسمنت المجهزة بنظام اختزال حفزي انتقائي كثير الغبار نظراً لأن هذا النظام يركب في المراحل التي تسبق نظام تجميع الغبار. ويمكن تعزيز خفض مستوى الزئبق بالترافق مع إزالة الغبار أو مع استخدام جهاز التنظيف الرطب.

التكاليف

أظهرت نتائج استخدام تقنية الاختزال الحفزي الانتقائي مستوى تكاليف يتراوح من ١,٢٥ إلى ٢ يورو لكل طن من كريات الكلنكر، ويعتمد ذلك على حجم المنشأة وكفاءة إزالة أكاسيد النيتروجين المطلوبة. وتعتمد اقتصاديات تقنية الاختزال الحفزي الانتقائي على تكاليف الاستثمار. ويؤدي استخدام المواد الحفازة إلى ازدياد تكاليف التشغيل بسبب الاستهلاك العالي للطاقة الناتج عن انخفاض الضغط وهواء التنظيف للمادة الحفازة. وقد انخفضت تكاليف التشغيل النوعية لتقنية الاختزال الحفزي الانتقائي لتصل إلى زهاء ١,٧٥ يورو - ٢ يورو لكل طن من كريات الكلنكر (BREF CLM, 2013).

المنشآت المرجعية

- الاختزال الحفزي الانتقائي الكثير الغبار: شفينك تزيمنت كي جي: ميرغلشتيتن، ألمانيا
- لافارج: جوبا، الينوي، الولايات المتحدة

مرشح الكربون المنشط

بالامتزاز على الكربون المنشط، يمكن أن تزال من الغازات العادمة ملوثات من قبيل ثاني أكسيد الكبريت، والمركبات العضوية، والمعادن (بما في ذلك المعادن المتطايرة مثل الزئبق والثاليوم)، والأمونيا، ومركبات الأمونيوم، وكلوريد الهيدروجين، وفلوريد الهيدروجين، والغبار المتخلف (بعد جهاز الترسيب الكهروستاتيكي أو المرشح النسيجي). ويصمم مرشح الكربون المنشط في شكل طبقة قاعدية مضغوطة ذات جدران فاصلة قابلة للتركيب في وحدات. ويسمح تصميم المرشح في شكل وحدات بتكثيف أحجام المرشح وفقاً لكميات الغازات والطاقات الإنتاجية المختلفة للفرن (BREF CLM, 2013).

ومن حيث المبدأ يتكون جهاز الامتزاز من طبقات ترشيح عديدة معبأة بكوك اللغنيت. وتنقسم كل طبقة ترشيح إلى طبقة رقيقة (٣,٠م) وطبقة سميكة (٢,١م). ويتعرض الغاز العادم من المرشح الكيسي للضغط عن طريق المروحة ليمر من خلال كوك اللغنيت الممتز، ويبلغ ارتفاع الطبقة زهاء ٢٠م. وفي طبقة الترشيح الرقيقة الأولى يُنظف الغاز العادم مسبقاً بينما تتواصل في طبقة الترشيح السميكة الثانية إزالة الملوثات من الغاز العادم. أما كوك اللغنيت المشبع فيعاد تدويره خارجياً ويستبدل بكوك جديد أو معاد تدويره. وهذا التبديل يجري بصورة شبه مستمرة في خطوات صغيرة (كل ٣ ساعات). ويتم إدخال الكوك الجديد إلى طبقات الترشيح السميكة باستخدام أحواض توزيع وينتقل إلى أسفل طبقة الترشيح (زهاء ٠.٣ متر/اليوم). أما في الطبقات الرقيقة فإن الكوك ينتقل إلى الأسفل حتى زهاء ١,٢ متر/اليوم، ولهذا السبب تسمى طبقة الامتزاز المتحركة. وفي قعر طبقات الترشيح السميكة يتم سحب كوك اللغنيت ويعاد تدويره بواسطة الناقلات الرافعة إلى الطبقات الرقيقة مرة أخرى. وبالتالي تُنجز عملية تشغيل عكس التيار. وفي عام ٢٠٠٧ استبدل جهاز الترسيب الكهروستاتيكي السابق بمرشح كيسي جيد التصميم للوصول إلى محتويات غبار منخفضة قبل بلوغ جهاز الامتزاز.

المنافع البيئية المتحققة

الميزة الأهم في مصفاة الكربون المنشط هي الإزالة المتزامنة الفعالة لطيف واسع من الملوثات، ولذلك تكون كفاءة الإزالة عالية جداً. وهناك فقط بعض الهيدروكربونات الشديدة التطاير القصيرة السلسلة (جزئياً تحتوي على ذرة كربون واحدة إلى ٤ ذرات كربون) لا تُحتجز بكفاءة، كما أن البنزين أيضاً لا يُزال بالكامل. أما جميع الملوثات العضوية الأخرى، بما في ذلك الملوثات العضوية الثابتة والفلزات الثقيلة المتطايرة، خصوصاً الزئبق والثاليوم، فتُمتز بكفاءة تصل إلى أكثر من ٩٠ في المائة. إضافةً إلى ذلك يُخفض مستوى ثاني أكسيد الكبريت بما يزيد عن ٩٠ في المائة (Schoenberger, 2009).

الآثار الشاملة لوسائط متعددة

يتعين التخلص بطريقة سليمة من نفايات من قبيل الكربون المنشط المستعمل المحتوي على الزئبق وملوثات أخرى مثل الديوكسينات الثنائية البنزين المتعددة الكلور والفيورانات الثنائية البنزين المتعددة الكلور.

الآثار الشاملة لوسائط متعددة (بخلاف تلك المرتبطة بالزئبق)

تعتبر زيادة استهلاك الكهرباء بسبب انخفاض الضغط في جهاز الامتزاز أهم أثر من الآثار الشاملة لوسائط متعددة.

القابلية للتطبيق

يوجد مرشح الكربون المنشط الوحيد المركب في صناعة الإسمنت في شركة لإنتاج الإسمنت في سيغينثال بسويسرا. وفرن سيغينثال هو فرن دوّامي من أربع مراحل مزود بجهاز للتسخين المسبق، وتبلغ طاقة الفرن الإنتاجية ٢٠٠٠ طن من كريات الكلنكر في اليوم. وتشير القياسات إلى كفاءة عالية في إزالة ثاني أكسيد الكبريت والفلزات والديوكسينات/الفيورانات الثنائية البنزين المتعددة الكلور. وخلال تجربة مدتها ١٠٠ يوم تراوحت تراكيز ثاني أكسيد الكبريت في مدخل المرشح من ٥٠ إلى ٦٠٠ مليغرام/م^٣ عادي، بينما كانت التراكيز في المخرج دائماً أقل بكثير من ٥٠ مليغرام/م^٣ عادي. وانخفضت تراكيز الغبار من ٣٠ مليغرام/م^٣ عادي إلى أقل بكثير من ١٠ مليغرام/م^٣ عادي (BREF CLM, 2013). ويمكن تركيب مرشح كربون منشط في كل نظم الأفران الجافة. ومن المهم بوجه خاص رصد ومراقبة درجة الحرارة وأول أكسيد الكربون في هذه العمليات بهدف الحرائق في مرشح الكوك (BREF CLM, 2013).

التكاليف

يشتمل النظام المركب في سيغينثال أيضاً على عملية خفض غير حفزي انتقائي، وفي عام ١٩٩٩ مولت مدينة زيوريخ ما نسبته ٣٠ في المائة تقريباً من تكاليف الاستثمار الكلية البالغة زهاء ١٥ مليون يورو. والهدف من الاستثمار في هذا النظام الرامي إلى خفض الانبعاثات هو تمكين شركة إنتاج الإسمنت من استخدام حمأة مياه المجارى المتحللة كوقود. ويمكن أن ينتج عن ذلك زيادة في تكاليف التشغيل (BREF CLM, 2013).

المنشآت المرجعية

المنشأة المرجعية الوحيدة في قطاع إنتاج الإسمنت هي مرشح الكربون المنشط (جهاز الامتزاز ذو طبقة الترشيح المتحركة المحتوية على كوك اللغنيث) في مصنع هولسيم للإسمنت في سيغينثال، سويسرا. بيد أن أجهزة الامتزاز ذات طبقة الترشيح المتحركة المحتوية على كوك اللغنيث استخدمت أيضاً في قطاعات أخرى، وعلى وجه الخصوص في قطاع حرق النفايات.

أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية

يمكن خفض انبعاثات الزئبق من خلال اتخاذ تدابير أولية من قبيل التحكم في كمية الزئبق في المدخلات إلى الفرن وتدابير ثانوية من قبيل إزالة الغبار وحقن المواد الممتازة. ويمكن أيضاً التحكم في الزئبق عن طريق المنافع المشتركة الناتجة بتطبيق تقنيات ضبط الملوثات المتعددة مثل أجهزة التنظيف الرطب والاختزال الحفزي الانتقائي ومرشحات الكربون المنشط.

وتظهر انبعاثات الزئبق المبلغ عنها أن غالبية منشآت إنتاج الإسمنت حول العالم تطلق انبعاثات زئبق أقل من ٠,٠٣ مليغرام/م^٣ عادي. وفي تقرير رينزوني وآخرين عن الزئبق في صناعة الإسمنت (Renzoni et al., 2010) وجد أن الكثير من القيم كانت أقل من ٠,٠٠١ مليغرام زئبق/م^٣ عادي (أقل من المستوى القابل للكشف) وأن القليل جداً من القيم كانت أعلى من ٠,٠٥ مليغرام زئبق/م^٣ عادي.

وبالنسبة لمستوى الأداء الإرشادي المرتبط بأفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية، للتحكم في انبعاثات الزئبق إلى الهواء من مرافق إنتاج كريات الكلنكر القائمة والجديدة، فهو أقل من ٠,٠٣ ملغم زئبق/نانومتر^٣ كمتوسط يومي أو كمتوسط خلال فترة أخذ العينات عند ظروف مرجعية بدرجة حرارة ٢٧٣ كلفن وضغط جوي ١٠١,٣ كيلوباسكال و ١٠ في المائة أكسجين وغاز جاف.

ويمكن الوصول إلى مستوى الأداء الإرشادي عادةً باستخدام التقنيات الواردة في هذه الوثيقة التوجيهية. بيد أن هناك عوامل محددة قد لا تسمح للمنشأة بالوصول إلى مستوى الانبعاثات المشار إليه. من هذه العوامل على سبيل المثال:

- ارتفاع محتوى الزئبق في ترسبات الحجر الجيري المحلية؛
- تصميم المنشأة وطريقة التشغيل وظروفها؛
- أوقات أخذ العينات عند رصد انبعاثات الزئبق إلى الجو.

التدابير الأولية

يوفر الاختيار والضبط الدقيقين للمواد الأولية وأنواع الوقود الداخلة للفرن وسيلة فعالة لخفض انبعاثات الزئبق والحد منها. ولخفض مدخلات الزئبق إلى الفرن يمكن اتخاذ التدابير التالية:

- تطبيق اشتراطات القيم الحدية لمحتوى الزئبق في المواد الخام والوقود؛
- تطبيق نظام ضبط الجودة لمواد المدخلات، خصوصاً المواد الخام وأنواع الوقود المشتقة من النفايات، من أجل ضبط محتوى الزئبق في مواد المدخلات؛
- استخدام مواد مدخلات ذات محتوى زئبق منخفض ما أمكن، وتفادي استخدام النفايات ذات المحتوى العالي من الزئبق؛
- التعديلات الانتقائية عند وجود تركيزات متفاوتة من الزئبق في المحجر، ما أمكن؛
- اختيار مواقع المرافق الجديدة بحيث تأخذ في الاعتبار محتوى الزئبق في محجر الحجر الجيري.

التدابير الثانوية

هناك عدد من التدابير الثانوية التي يتعين وضعها في الاعتبار، حسب الاقتضاء.

ويمكن تخفيض انبعاثات الزئبق إلى الهواء من خلال إزالة الغبار وكذلك جمع الغبار بدلاً من إعادته إلى مواد التقليل الخام. وإحدى الطرق لزيادة فعالية عملية إزالة الغبار هي خفض درجة حرارة الغاز المتصاعد بعد برج التكييف إلى ١٤٠ م° لتحسين

عملية ترسيب الزئبق ومركباته أثناء ترشيح الغبار. ويمكن استخدام الغبار الذي يتم جمعه في طاحونة الإسمنت النهائية أو في إنتاج منتجات أخرى. وإذا لم يكن ذلك ممكناً فإنه يتعين معالجة الغبار بوصفه نفايات والتخلص منه بطريقة ملائمة.

تؤدي إزالة الغبار المقترنة بحقن المواد الممتازة إلى إزالة الزئبق بكفاءة أعلى مقارنةً بعملية إزالة الغبار وحدها. وتُحقن المواد الممتازة عادةً أثناء العمل مع وقف تشغيل طاحونة المواد الخام بهدف خفض قيم الانبعاثات القصوى التي تحدث أثناء طريقة التشغيل هذه. ويمكن أن تؤدي إزالة الغبار مع حقن المواد الممتازة إلى تحقيق مستويات منخفضة للغاية من انبعاثات الزئبق حيث يمكن خفض انبعاثات الزئبق بنسبة تتراوح من ٧٠ إلى ٩٠ في المائة. ويعتمد مستوى الانبعاثات على التركيز المستهدف الذي صُمم النظام لتحقيقه.

وعند استخدام حقن المواد الممتازة مع وجود مرشح تنقية كيسي، تُحقن المادة الممتازة داخل غاز المداخن بعد الجهاز الرئيسي لضبط الغبار مع استخدام مرشح غبار ثاني أو مرشح تنقية كيسي لاحتجاز المادة الممتازة المستعملة. واعتماداً على اشتراطات الإزالة الكلية لانبعاثات الزئبق يمكن حقن المادة الممتازة بشكل مستمر، أو يمكن الحقن لخفض الانبعاثات القصوى، التي تحدث عادةً أثناء العمل مع وقف تشغيل طاحونة المواد الخام. ويمكن أن يؤدي حقن الكربون المنشط مع تركيب مرشح تنقية كيسي إلى كفاءة ضبط تصل إزالة الزئبق بها إلى ٩٠ في المائة. وعند استخدام هذه التكنولوجيات يجب الأخذ في الاعتبار أن إمكانية استخدام الغبار المزال في إنتاج الإسمنت قد تكون محدودة وأنه من الممكن أن تنتج كمية إضافية من النفايات.

والمواد المضادة، مثل البروم، التي تزيد من تأكسد الزئبق، يمكن أن تزيد أيضاً من كفاءة المواد الممتازة المحقونة في إزالة الزئبق.

تدابير ضبط الملوثات المتعددة

يمكن لأجهزة ضبط تلوث الهواء المركبة لإزالة أكاسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين أن تحقق أيضاً منافع مشتركة تتمثل في احتجاز الزئبق.

ويعتبر جهاز التنظيف الرطب تقنيةً معتمدةً لإزالة الكبريت من غاز المداخن في عملية تصنيع الإسمنت. والمركبات الغازية للزئبق المؤكسد هي مركبات قابلة للذوبان في الماء ويمكن امتصاصها في الملائم المائي لنظام جهاز التنظيف الرطب وبذلك يمكن أن يزال بكفاءة جزء كبير من أجرة الزئبق المتأكسد في الطور الغازي. أما الزئبق النقي في الطور الغازي فلا يذوب في الماء ولذلك لا يُمتص في هذا النوع من الملائم إلا بعد استخدام مواد مضافة مؤكسدة للزئبق.

وتحتل تقنية الاحتزال الحفزي الانتقائي مستويات أول أكسيد النيتروجين وثاني أكسيد النيتروجين من خلال مادة حفازة في الغازات العادمة لتحويلها إلى نيتروجين، وكتأثير جانبي يتأكسد الزئبق النقي إلى حد ما. وهذا الزئبق المؤكسد يمكن إزالته بشكل أفضل من مسار الغازات في مرحلة تالية مثل مرشح الغبار أو جهاز التنظيف الرطب. وهذا التأثير الجانبي يمكن استخدامه مع تقنية الاحتزال الحفزي الانتقائي الكثيرة الغبار وليس مع تقنية الاحتزال الحفزي المنخفضة الغبار (في المرحلة الختامية).

وعن طريق الامتزاز على الكربون المنشط يمكن أن تزال من الغازات العادمة ملوثات من قبيل ثاني أكسيد الكبريت، والمركبات العضوية، والمعادن (بما في ذلك المعادن المتطايرة مثل الزئبق والثاليوم)، والأمونيا، ومركبات الأمونيوم، وكلوريد الهيدروجين، وفلوريد الهيدروجين، والغبار المتخلف (بعد جهاز الترسيب الكهروستاتيكي أو المرشح النسيجي). ويصمم مرشح الكربون المنشط في شكل طبقة قاعدية مضغوطة ذات جدران فاصلة قابلة للتركيب في وحدات. ويسمح تصميم المرشح في شكل وحدات بتكثيف أحجام المرشح وفقاً لكميات الغازات والطاقت الإنتاجية المختلفة للفرن.

وعند استخدام هذه التقنيات يتعين أخذ الآثار الجانبية في الاعتبار، ومن ذلك تحول مسارات الزئبق من جهاز التنظيف الرطب إلى منتجات مثل الجبس، أو إنتاج نفايات إضافية مثل الكربون المنشط المستعمل الذي يتعين التخلص منه بطريقة ملائمة.

الرصد

مقدمة

تناقش الجوانب العامة والشاملة للاختبارات والرصد والإبلاغ في الفصل المتعلق بالرصد في المبادئ التوجيهية بشأن أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية. أما الجوانب المحددة المميزة لعمليات إنتاج الإسمنت فستناقش في هذا الفرع.

يؤثر الهدف من أي خطة للإبلاغ عن الانبعاثات تأثيراً مهماً على نوع عملية الرصد المختارة لمنشأة معينة. ووفقاً لذلك فإن الاختبارات والرصد تشتمل على طريقة توازن المواد (استناداً إلى أخذ العينات من المدخلات وتحليلها) وقياسات الانبعاثات (المخرجات) في المدخنة.

ويمكن أن تحدّد القيم القصوى لانبعاثات الزئبق من عملية لإنتاج الإسمنت في شكل متوسط لفترة زمنية معينة (مثلاً ٨ ساعات، ١٢ ساعة، ٢٤ ساعة، ٣٠ يوماً) أو يمكن تحديدها لفترة زمنية أقصر (مثلاً ٣٠ دقيقة) لمنع مستويات الذروة العالية. ويمكن أيضاً تحديد القيم القصوى للانبعاثات من حيث كمية الزئبق لكمية كريات الكلنكر المنتجة (مثلاً مليغرام/طن من كريات الكلنكر المنتجة)، كما هو الحال في الولايات المتحدة، ومن حيث التركيز (س ميكروغرام/متر^٣ عادي، عند نسبة مئوية قدرها ص من الأكسجين، على أساس المادة الجافة) في المدخنة كما هو الحال في أوروبا. وفي بعض الحالات توضع قيم حدية أيضاً لكمية الزئبق في المواد الخام والوقود، خصوصاً عند استخدام مواد بديلة. وعند اختبار ورصد انبعاثات الزئبق في الجو من عملية إنتاج الإسمنت ويجب أن يؤخذ في الاعتبار جميع الشروط الخاصة للحالة المعينة قيد الاختبار أو الرصد في مرفق ما.

نقاط أخذ عينات الزئبق في عملية إنتاج الإسمنت

وفقاً لمدخلات الزئبق ومخرجاته في عملية إنتاج كريات الكلنكر التي نوقشت في جزء سابق من هذه الوثيقة، فإن النقاط الرئيسية لأخذ عينات الزئبق في عملية إنتاج الإسمنت هي:

- لنهج توازن المواد: المواد الخام وأنواع الوقود غير المعالجة، والغبار الذي يجمع ويزال من النظام
- لقياس الانبعاثات؛ الانبعاثات من المداخن

وتعتبر قياسات الانبعاثات مهمة للمقارنة مع القيم الحدية للانبعاثات، في حال تحديدها. ويبين الشكل ١ في الفصل ١ مخططاً للمدخلات والمخرجات الرئيسية لنظام منشأة لإنتاج الإسمنت، وهي نقاط محتملة لرصد الزئبق.

الأشكال الكيميائية للزئبق في عملية إنتاج الإسمنت

بالنسبة لطريقة توازن المواد يعتبر الارتباط الكيميائي للزئبق في المواد الصلبة قليل الأهمية نظراً لأن مخاطر فقدان جزء من الزئبق أثناء أخذ العينات والتحليل هي مخاطر ضئيلة. بيد أنه يتعين توخي الحذر أثناء تخزين ومعالجة عينات تحتوي على الزئبق نظراً لأن بعض هذه العينات قد يفقد نتيجةً للامتزاز على الحاويات أو لتسخين العينات أثناء المعالجة (مثلاً الطحن).

وفيما يتعلق بقياسات غازات المداخن يمكن أن يوجد الزئبق في شكل زئبق أولي أو في الشكل المؤكسد (زئبقوز أو زئبكيك)، أو في شكل بخار (انظر التذييل). كذلك يمكن أن يوجد الزئبق في شكل ممتز مرتبط بالجسيمات. ويجب أن يشتمل أخذ العينات وتحليلها على الزئبق الكلي. ونظراً لأن التحليل والكشف يتعلقان بالزئبق النقي فإن الزئبق المؤكسد يجب تحويله إلى الزئبق النقي. ومن المفترض أن مركبات الزئبق المؤكسدة التي تنتج في فرن الإسمنت هي، على سبيل المثال، ثاني كلوريد الزئبق، وأكسيد الزئبق، وثاني بروميد الزئبق، وثاني يوديد الزئبق، وكبريتيد الزئبق، وكبريتات الزئبق. ورغم أن طرق أخذ العينات المنفصلة (العينات العشوائية) يمكن أن تعالج الطور البخاري والطور الصلب على حد سواء إلا أن نظم قياسات الانبعاثات المستمرة تقيس الطور

البخاري فقط نظراً لاستخدام مرشح جسيمات لحماية الجهاز. ويمكن للجهاز أن يقيس بدقة كافية الزئبق الغازي في حال تخفيض مستوى الغبار بكفاءة نظراً لأن الزئبق المرتبط بالجسيمات قليل جداً في تراكيزات الغبار المنخفضة.

أخذ عينات الزئبق وطرق قياس مستوى الزئبق في عملية إنتاج الإسمنت

بالنسبة لتوازن المواد تشمل طرق أخذ العينات وقياس الزئبق في عملية إنتاج الإسمنت أخذ عينات صلبة، وعمليات تحليل المواد الخام غير المعالجة وأنواع الوقود وغبار المرشح المزال؛ أما على صعيد قياس الانبعاثات فهي تشمل أخذ العينات العشوائية، والطريقة شبه المستمرة والطريقة المستمرة لرصد غازات المدخنة، وضبط العمليات، ودرجة حرارة الغاز في مرشح الغبار.

توازن المواد (الطريقة غير المباشرة)

المسارات الرئيسية التي يغادر من خلالها الزئبق نظام فرن الإسمنت هي انبعاثات المدخن وغبار الفرن، في حال إزالته من نظام الفرن.

ومن شأن التوازن الكتلي للزئبق في النظام أن يعطي تقديرات أفضل للانبعاثات مقارنةً بالقياسات العشوائية لغازات المدخن. ويؤثر تغير مستويات الزئبق في أنواع الوقود ومدخلات المواد ونسبة تمثيلية العينات على نتائج العينة العشوائية.

ويتعين في طريقة توازن المواد أن تؤدي العينات المأخوذة من المواد الخام وأنواع الوقود والغبار المتجمع، إلى إيجاد عينة جيدة التمثيل. وعند الحرق المشترك للنفايات يمكن أن تتغير التركيبة بشكل أكبر ويتعين بذل عناية أكبر لضمان الحصول على عينة جيدة التمثيل.

وعند أخذ العينات من المدخلات في عملية إنتاج الإسمنت يمكن استخدام معايير الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد، والمعايير الأوروبية لأخذ العينات والتحضير الأولي للعينات الصلبة للتحليل، التي وضعت لأخذ العينات في عملية إنتاج الفحم (المعياران ASTM D2234^(٤٥) وD2013^(٤٦)، والمعيار EN 932-1^(٤٧)).

ويتعين أخذ العينات بشكل دوري ويمكن أن يشمل ذلك أخذ عينة مركبة بنهاية فترة معينة. وعلى سبيل المثال يمكن أخذ عينات من المواد الخام وأنواع الوقود والغبار المجموع يومياً أو أسبوعياً، اعتماداً على التفاوت في محتوى الزئبق. وفي حال أخذت عينات أسبوعية من مكونات المواد الخام وأنواع الوقود فإن العينات الشهرية المركبة ستنتج من العينات الأسبوعية. ويتعين أن تُحل كل عينة شهرية مركبة لتحديد تراكيزات الزئبق الممثلة للشهر المحدد.

وقد تكون الأساليب التحليلية المستخدمة في تحديد تركيز الزئبق هي تلك التي وضعتها وكالة حماية البيئة أو الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد، ومن هذه الأساليب EPA 1631^(٤٨) أو 7471b^(٤٩). ويُجرى التحليل الكيميائي عن طريق التنظير الطيفي للامتصاص الذري للبخار البارد (CVAAS) أو التنظير الطيفي للفلورة الذرية للبخار البارد (CVAFS) أو من خلال القياس الطيفي الكتلي للبلازما المقرونة عن طريق الحث (ICP-MS).

(٤٥) ASTM Method D2234: الممارسات القياسية لجمع عينة إجمالية من الفحم.

(٤٦) ASTM Method D2013: الطريقة القياسية لتحضير عينات الفحم للتحليل.

(٤٧) المعيار الأوروبي EN 932-1: اختبارات الخواص العامة للعينات المجمعة. طرق لأخذ العينات.

(٤٨) US.EPA Method 1631: الزئبق في الماء عن طريق التأكسد والتنظيف والاحتجاز، والقياس الطيفي للفلورة الذرية للبخار البارد. التنقيح هاء، آب/أغسطس ٢٠١٢.

(٤٩) US.EPA Method 7471b: الزئبق في النفايات الصلبة أو شبه الصلبة (تقنية البخار البارد اليدوية). التنقيح ٢، شباط/فبراير ٢٠٠٧.

ويساوي معدل المدخلات الشهرية (مدخلات كتلة الزئبق في الشهر) حاصل ضرب تركيز الزئبق في العينات الشهرية وكتلة كل من مكونات المواد الخام والوقود الداخلة في العملية. أما معدل مدخلات الزئبق لاثني عشر شهراً متتالية (مدخلات كتلة الزئبق في السنة) فيساوي مجموع السجلات الفردية الشهرية الاثني عشر.

المميزات^(٥٠): تكاليف سنوية منخفضة مقارنةً بالطريقتين المستمرة وشبه المستمرة (على افتراض أخذ عينات شهرياً وعينة واحدة مركبة لأسبوع في الشهر)، ومستوى تمثيل متوسط الدقة لمتوسطات الانبعاثات على المدى البعيد، ودقة متوسطة، وتعطى النتائج بصورة رئيسية للزئبق الكلي؛

المساوي: دقة منخفضة عند مستويات الانبعاثات المنخفضة. وقد لا يكون هذا الأسلوب قابلاً للاستخدام لتحديد الامتثال للقيم الحدية للانبعاثات، بناءً على كيفية تحديد القيم الحدية لتلك الانبعاثات.

الطرق اليدوية لأخذ القياسات العشوائية للزئبق (طرق أجهزة الارتظام)

تؤدي الطرق اليدوية لأخذ العينات من غازات المداخن وتحليلها في عملية إنتاج الإسمنت دوراً مهماً في التأكد من الامتثال في البلدان النامية، وتستخدم هذه الطرق بانتظام لهذا الغرض. وفي عدد قليل من البلدان المتقدمة (ألمانيا والولايات المتحدة) تقضي اللوائح التنظيمية بتغيير الاشتراطات من أخذ عينات عشوائية من غاز المداخن إلى أخذ العينات وتحليلها بشكل مستمر (نظم الرصد المستمر للانبعاثات باستخدام جهاز تحليل أو مادة ممتزة محتجزة) لضمان تحديد خصائص الانبعاثات بشكل أفضل. ويمكن أن يشكل قياس انبعاثات الزئبق بالطرق اليدوية جزءاً من حملة سنوية لقياس انبعاثات الملوثات الأخرى في عملية إنتاج الإسمنت.

ووضعت معايير القياسات العشوائية للزئبق بصورة رئيسية في أوروبا والولايات المتحدة. بيد أن اليابان وضعت أيضاً معايير خاصة بها، وهي معايير قد تختلف من حيث شكل الزئبق المقيس. وفي الفصل المتعلق بالرصد في الوثيقة التوجيهية بشأن أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية يرد عرض وبيان موجز لطرق الاختبار المعتادة المتعلقة بأخذ العينات وقياس الزئبق في انبعاثات المداخن في أوروبا (الطرق الأوروبية) وفي الولايات المتحدة (الطرق التي وضعتها وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة والجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد)، وهي الطرق التي يمكن استخدامها في منشآت إنتاج الإسمنت.

وفيما يخص الأفران المحتوية على طواحين مواد خام مركبة بطريقة متوازنة هناك مسألة رئيسية مرتبطة بأي نوع من أنواع أخذ العينات من غازات المداخن وهي أن انبعاثات الزئبق تتفاوت عادةً بشكل كبير اعتماداً على طريقة تشغيل طاحونة المواد الخام. ومن الضروري إجراء الاختبارات عند العمل مع تشغيل طاحونة المواد الخام وعند العمل مع وقف تشغيل طاحونة المواد الخام لتحديد مستوى الانبعاثات على المدى البعيد.

المميزات: أقل قيمة للتكاليف السنوية مقارنةً بالتوازن الكتلتي، طرق مستمرة وشبه مستمرة، يُحدّد الزئبق عادةً كجزء من حملة قياس كبرى تشمل عدة ملوثات مما يقلل من التكاليف، وقد استخدمت القياسات العشوائية في جميع أنحاء العالم، وتتراوح الدقة عند المستويات المنخفضة من الانبعاثات من متوسطة إلى عالية، ومن الممكن تحديد توزيع الزئبق في النظام.

(٥٠) مميزات ومساوي جميع الطرق، لمحطات الطاقة العاملة بالفحم، تستند أساساً إلى: E. Mazzi, Glesmann, S., Bell, A (2006). Canada Wide Standards Mercury Measurements methodologies for coal-fired power plants. EPRI-EPA-DOE-AW&MA Power Plant Air Pollutant Control "MEGA" Symposium, 28-31 August 2006, Baltimore, Maryland, United States. <http://www.ires.ubc.ca/files/2010/05/MazziMegapaper152006final.pdf>.

المساوي: نظراً لأن النتائج تتعلق فقط بفترة زمنية قصيرة فإنها لا تعطي صورة واضحة عن الانبعاثات مع الزمن، وتكون الدقة منخفضة فيما يخص متوسط التمثيل على المدى البعيد، وقد لا تكون هذه الطريقة قابلة للاستخدام لتحديد الامتثال للقيم الحدية للانبعاثات، وذلك حسب كيفية تحديد القيم الحدية لتلك الانبعاثات.

القياسات على المدى البعيد

نظم الرصد عن طريق مصادم المواد الماصة (الممتزة)

تستخدم الطريقة شبه المستمرة مادة ممتزة لاحتجاز انبعاثات الزئبق، من أجل مواصلة تحليلها عن طريق التنظير الطيفي للفلورة الذرية للبخار البارد (CVAFS). ويمكن لهذه الطريقة أن تحدد بشكل دقيق خصائص الانبعاثات من عملية إنتاج الإسمنت، كما أنها قد لا تكون غالية الثمن مقارنةً بنظام الرصد المستمر للانبعاثات، وهي أسهل من حيث التشغيل والصيانة. ويرد وصف للطرق المرجعية في الفصل المتعلق بالرصد في الوثيقة التوجيهية بشأن أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية.

وفي الولايات المتحدة اعتمدت نظم الرصد القائمة على مصادم المواد الممتزة لرصد انبعاثات الزئبق في منشآت إنتاج الإسمنت. بيد أن هذه النظم غير معتمدة كنظم لرصد انبعاثات الزئبق في الاتحاد الأوروبي، بسبب تعريف القيمة الحدية للانبعاثات على أنها متوسط يومي وتحديداتها في بعض المستويات القصوى الوطنية بمدة أقصر من ذلك. وكما هو الحال في الولايات المتحدة تُعرّف القيمة الحدية للانبعاثات على أنها متوسط (مستمر) لمدة ٣٠ يوماً، والقياس بهذا النظام مقبول ومستخدم على نطاق واسع.

المميزات: تكاليف سنوية متوسطة مقارنةً بالطرق الأخرى المدرجة، دقة عالية لمستويات الزئبق المنخفضة، وتمثيل متوسط إلى عالي لمتوسط الانبعاثات على المدى البعيد، ودقة عالية.

المساوي: احتمال انسداد مصيدة المادة الممتزة بسبب الانبعاثات العالية للزئبق في نهاية المطاف، مثلاً عند وقف تشغيل الطاحونة، وقد لا يمكن استخدام هذه الطريقة لبيان الامتثال للقيم الحدية للانبعاثات، وذلك حسب كيفية تحديد القيم الحدية لتلك الانبعاثات، ولا تقدم هذه الطريقة بيانات مستمرة عن الزئبق يمكن استخدامها لتشغيل أجهزة التحكم في الزئبق بالطريقة الأكثر كفاءةً.

نظم الرصد المستمر لانبعاثات الزئبق

يمثل الرصد المستمر للانبعاثات أداةً مهمةً للحصول على معلومات جديدة عن تباين انبعاثات الزئبق، المرتبطة بالزمن وبالتشغيل، من مصادر ثابتة وأداة مهمة أيضاً للتحكم في أجهزة خفض مستويات الزئبق. وفي أوروبا تشترط بعض البلدان، مثل النمسا وألمانيا، تطبيق نظم الرصد المستمر لانبعاثات الزئبق في منشآت إنتاج الإسمنت التي تستخدم أنواع وقود بديلة.

وفي ألمانيا يتعين تزويد أفران الإسمنت التي تستخدم أنواع وقود بديلة بنظام رصد مستمر لانبعاثات الزئبق منذ عام ٢٠٠٠. وابتدع أول جيل من نظم الرصد المستمر لانبعاثات الزئبق في تسعينيات القرن الماضي وخضع لاختبارات ملائمة في الفترة بين عامي ١٩٩٤ و ٢٠٠١. وأظهرت التجارب أنه على الرغم من إنجاز اختبارات الملائمة بنجاح إلا أن هناك صعوبات نشأت على أرض الواقع فيما يتعلق بالتشغيل المستقر الطويل الأجل للنظام. وجرى تعديل الأجهزة وتحسينها مع مرور الوقت كجزء من الخبرة المكتسبة من استعمالها.

وفي عام ٢٠١٣ وافقت الولايات المتحدة على قانون نهائي يشتمل على معايير وطنية لانبعاثات الملوثات الجوية الخطرة لصناعة الإسمنت البورتلاندي، ويتضمن القانون القيم الحدية القصوى الخاصة بالزئبق. ووفقاً لهذا القانون يُطلب إلى منشآت إنتاج الإسمنت الخاضعة لقيود على انبعاثات الزئبق أن تمتثل لمعايير الزئبق من خلال تشغيل نظام للرصد المستمر لانبعاثات الزئبق أو نظام رصد قائم على مصادم المواد الممتزة.

المزايا: درجة دقة متوسطة إلى عالية عند المستويات المنخفضة، وتمثيل عال للمتوسطات طويلة الأجل، ودقة متوسطة إلى عالية، ويعطي النظام بيانات مستمرة يمكن استخدامها لتشغيل أجهزة التحكم في الزئبق بالطريقة الأكثر كفاءةً.

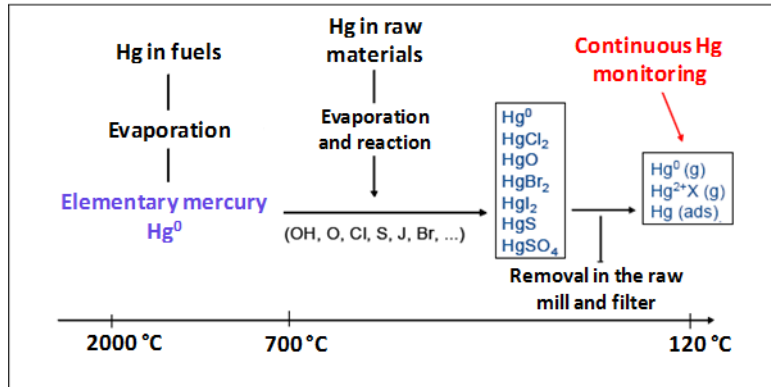
المساوى: تكاليف سنوية عالية بالمقارنة مع الطرق الأخرى، وإجراءات دورية لتأكيد الجودة، وتتطلب المعايرة والصيانة موظفين ذوي خبرة، ويحتاج النظام للمعايرة عند العمل مع تشغيل طاحونة المواد الخام وعند العمل مع وقف تشغيلها نظراً لأن مستويات الزئبق تتجاوز عادةً مدى الطاحونة المعايرة عند التشغيل أثناء العمل مع وقف تشغيل الطاحونة.

تذييل

سلوك الزئبق في منشآت إنتاج كريات الكلنكر

نظراً لأن درجة الحرارة هي أهم مُعامل لتحديد سلوك الزئبق ومركباته في نظام إنتاج كريات الكلنكر ستشرح أشكال الزئبق المختلفة وظروف تفاعلها وفقاً لخصائص درجات الحرارة (انظر الشكل ٦-١)، وذلك بدءاً من الطرف الحار مع المرجل الرئيسي للفرن الدوار وانتهاء عند مرشح الغبار وانبعاثات المداخن.

إضافةً إلى ذلك يتضمن الشكل ٦-١ قطاعاً جانبياً لدرجات الحرارة ويقدم عرضاً عاماً غير شامل للمواد المحتملة الشريكة في التفاعل ونواتج التفاعل ذات الصلة بكل منها. وكذلك يشير الشكل إلى أنه، من حيث المبدأ، توجد ثلاث فئات من أشكال الزئبق: الزئبق النقي (Hg^0)، ومركبات الزئبقوز (Hg^+)، ومركبات الزئبقيك (Hg^{2+}).



الشكل ٦-١. تفاعلات التحول المحتملة للزئبق في عملية إنتاج كريات الكلنكر (Renzoni et al., 2010; Oerter/Zunzer, 2011; ECRA, 2013)

وتوجد ثلاث نقاط ممكنة لمداخلات الزئبق (الموقد الرئيسي، والحرق الثانوي والتكليس المسبق، والدقيق الخام) وهي نقاط تعتبر مهمة وستناقش تبعاً لذلك.

الموقد الرئيسي والفرن الدوار

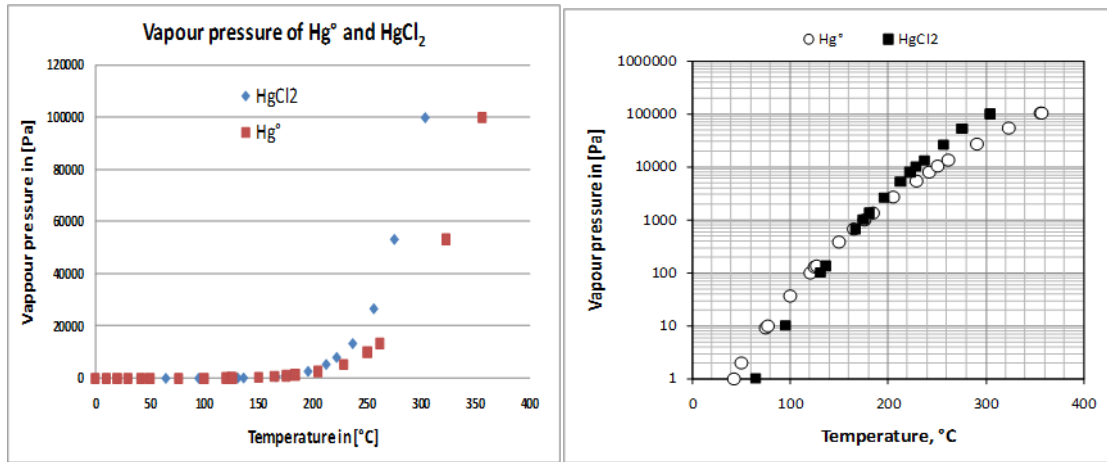
تشير حسابات التعادل الديناميكي الحراري إلى أنه عند درجة حرارة تزيد عن ٧٠٠م إلى ٨٠٠م لا يوجد إلا الزئبق النقي في الطور الغازي (Martel, 2000; Schreiber et al., 2005; Krabbe, 2010). وهذا الأمر مهم للموقد الرئيسي والفرن الدوار الذي تصل درجات حرارة الغاز فيه إلى ٢٠٠٠م (انظر الشكل ٣). وبناء على ذلك فإن جميع مركبات الزئبق التي تدخل إلى النظام عن طريق الموقد الرئيسي ستتحول إلى زئبق أولي وستغادر الفرن لتدخل إلى جهاز التسخين المسبق. ووفق ما أشير إليه في السابق فإنه لا يوجد عملياً أي زئبق في كريات الكلنكر.

جهاز التسخين المسبق

تتوفر في جهاز التسخين المسبق ظروف تفاعل معقدة ويتراوح قطاع درجات الحرارة للطور الغازي من حوالي ٩٠٠م إلى ١٠٠٠م في مدخل الفرن و ٢٧٠م إلى ٤٥٠م بعد جهاز التسخين المسبق. وفي حال وجود تحويلة لغاز الكلور في المنشأة فإن جزءاً من الزئبق النقي يمكن أن يستخلص ويُمتز بشكل جزئي في غبار المرشح بينما ينبعث جزء منه إلى الهواء. ويمكن أن يتحول الزئبق النقي من الفرن بشكل جزئي إلى مكونات كيميائية أخرى في جهاز التسخين المسبق.

وقد جرى في السابق بيان مدخلات الزئبق عبر الموقد الرئيسي. أما نقطة الدخول التالية فهي عملية الحرق الثانوي التي يمكن أن تكون عملية تلقيم الوقود (التقليدي أو المشتق من النفايات) في مدخل الفرن أو في جهاز التكليس المسبق (انظر الشكل ٣). وعند درجات حرارة تزيد عن ٧٠٠م إلى ٨٠٠م يتحول الزئبق الموجود في الوقود إلى الزئبق النقي الذي يمكن أن يتحول بدوره، وفق ما هو مبين أعلاه، إلى مركبات زئبق أخرى في جهاز التسخين المسبق.

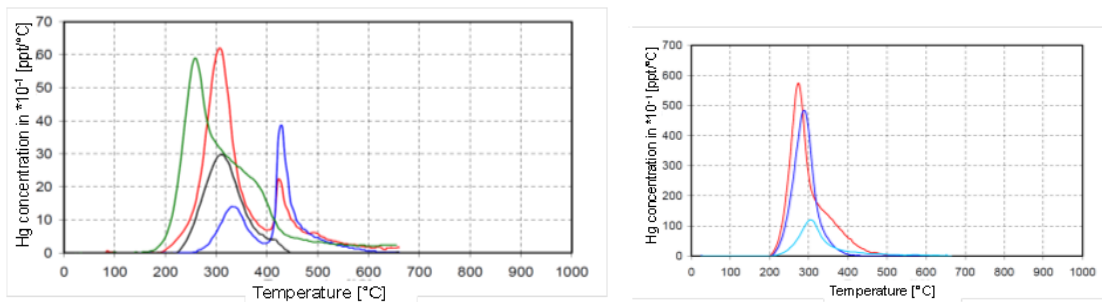
وفي منشآت إنتاج كريات الكلنكر تميل أشكال الزئبق الرئيسية إلى أن تكون هي الزئبق النقي وثاني كلوريد الزئبق وأكسيد الزئبق، أما أشكال الزئبق الأخرى فهي أقل أهمية (ECRA 2013). وتتميز جميع هذه الأشكال بالتطاير العالي. ويتفكك أكسيد الزئبق عند درجات حرارة تزيد عن ٤٠٠م.



الشكل ٦-٢. اعتماد ضغط بخار الزئبق النقي وثاني كلوريد الزئبق على درجة الحرارة (المخطط الأيسر بالمقياس الخطي والمخطط الأيمن بالمقياس اللوغاريتمي) (Holleman-Wiberg, 1985; CRC Handbook, 1976; CRC Handbook, 1995; CRC Handbook, 2012)

ويزداد ضغط بخار الزئبق النقي وكلوريد الزئبق أسياً مع درجة الحرارة. ويوضح هذا بالشكل ٦-٢ الذي يظهر المنحنيات المعنية بالمقياسين الخطي واللوغاريتمي.

وتبين الأرقام التطاير العالي لأشكال الزئبق هذه. ووفقاً لذلك تتطاير هذه الأشكال في جهاز التسخين المسبق وتبقى في الطور الغازي. وقد تأكدت هذه الخواص الفيزيائية والكيميائية من خلال اختبارات التطاير للدقيق الخام الذي يشكل المدخل الثالث. وتشير هذه الاختبارات إلى أن الدقيق الخام يحتوي على أشكال مختلفة من الزئبق تتطاير بين درجة حرارة قدرها ١٨٠م إلى ٥٠٠م. ويظهر المخطط الأيسر في الشكل ٦-٣ منحنيات تطاير الزئبق في أربعة أنواع مختلفة من الدقيق الخام.

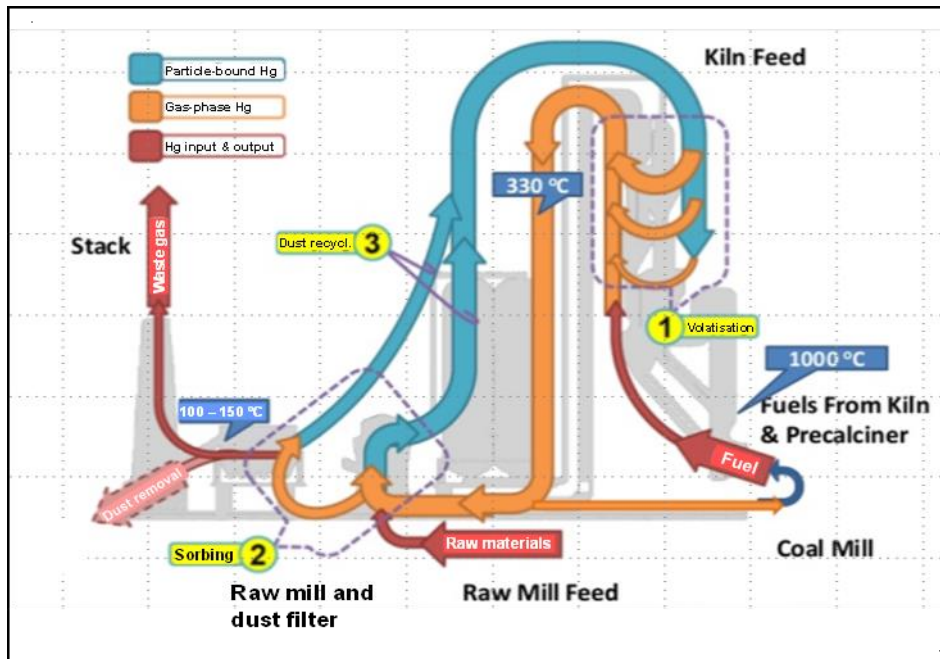


الشكل ٦-٣. منحنيات تطاير الزئبق لأربع وجبات خام (المخطط الأيسر) وثلاثة من أنواع غبار المرشح (المخطط الأيمن) (AiF, 2008)

ويظهر من المقارنة أن منحنيات تطاير أنواع غبار المرشح أضيّق (١٨٠م إلى ٤٠٠م) مما يدل على وجود الزئبق النقي وكلوريد الزئبق وأكسيد الزئبق التي يجري امتزازها على سطح جسيمات الغبار (المخطط الأيمن بالشكل ٦-٣).

ويعني المدى الحراري المذكور آنفاً لتطاير أشكال الزئبق أن معظم الزئبق الموجود في الدقيق الخام يتطاير أصلاً في المخروطين العلويين في جهاز التسخين المسبق (AiF, 2008; Paone, 2008; Renzoni et al., 2010). وبسبب حركات التفاعل فإن التطاير قد لا يكون بنسبة ١٠٠ في المائة في جهاز التسخين المسبق ولكنه يقترب من هذه النسبة ويكتمل كلياً في الفرن.

وقد أشير بالفعل إلى أن الزئبق يتراكم بين جهاز التسخين المسبق ومرشح الغبار بسبب تكون الدورة الخارجية المشار إليها سابقاً. ويعني انخفاض درجة حرارة الغاز والامتزاز أن الزئبق يزال إلى حد معين (ويعتمد ذلك بصورة أساسية على درجة حرارة الغاز) مع غبار المرشح الذي يعاد تدويره إلى الدقيق الخام الذي يُلّغَم إلى جهاز التسخين المسبق حيث يتطاير الزئبق مرة أخرى. وبذلك تتشكل دورة زئبق خارجية، وفق ما هو مبين في الشكل ٦-٤، حيث يمكن النظر في إعادة تدوير غبار المرشح وإزالته.



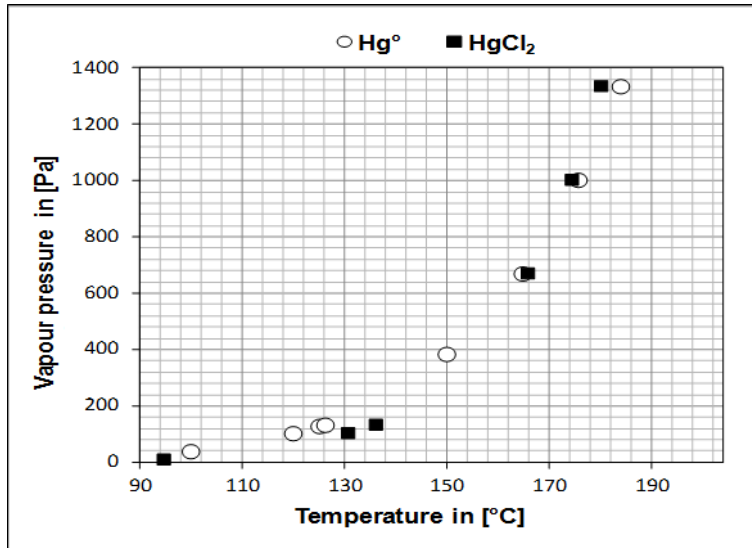
الشكل ٦-٤. دورة الزئبق الخارجية في منشأة لإنتاج كريات الكلنكر مع أخذ إعادة تدوير غبار المرشح وإزالته في الاعتبار، استناداً إلى (Sikkema et al., 2011)

ويتميز الغاز المتصاعد من جهاز التسخين المسبق بمحتوى غبار خاص بالكلنكر يتراوح من ٥ إلى ١٠ في المائة، أي ٥٠ إلى ١٠٠ غم من الغبار لكل كيلوغرام من كريات الكلنكر. وتتميز المنشآت الحديثة بدوامات حلزونية علوية أكثر كفاءة. وفي هذه الحالات يبلغ محتوى الغبار الخاص بكريات الكلنكر أقل من ٥ في المائة. بيد أنه بعد جهاز التسخين المسبق مباشرةً تظل معظم أشكال الزئبق في الطور الغازي بالكامل تقريباً وغير مرتبطة بالجسيمات. وتستعاد حرارة غاز المداخن بشكل إضافي من خلال التبادل الحراري، أي من خلال مرورها عبر طاحونة المواد الخام لتجفيف الدقيق الخام. وفي كل النظم الحديثة تقريباً التي تحتوي على طاحونة بأسطوانة دوارة لا يتم تكييف الغاز قبل طاحونة المواد الخام، كما أن المياه تُرش في طاحونة المواد الخام للتحكم في درجة الحرارة عند المخرج. أما في النظم المحتوية على طواحين بالكراوات فإن المياه تُرش أحياناً للتحكم في درجة الحرارة عند المخرج في الطاحونة، ولكن يتم في الغالب تعديل كمية الغاز الحار المتجه إلى طاحونة المواد الخام للتحكم في درجة الحرارة عند المخرج بينما يحوّل باقي الغاز متجاوزاً الطاحونة، ليمر في الغالب عبر برج تكييف قبل المرشح (أو يقترب من غاز الطاحونة عند

المخرج قبل أن يتجه إلى المرشح). ويستخدم حقن المياه في برج التكييف دائماً بشكل مباشر (عند العمل مع وقف تشغيل طاحونة المواد الخام).

ويؤدي التبريد في طاحونة المواد الخام أو برج التكييف إلى أول تحول كبير لأشكال الزئبق من الطور الغازي إلى جسيمات الغبار. وتنتج كمية صغيرة من الغبار أيضاً من برج التكييف.

ويحدث التبادل الحراري للغاز في طاحونة المواد الخام ومن ثم تنخفض درجة حرارة الغاز أكثر. وفي المدى الحراري من صفر درجة مئوية إلى ٤٠٠م° اتضح أن ضغط البخار يزداد بصورة أسية. وينطبق ذلك أيضاً على المدى الحراري الذي تعمل فيه مرشحات الغبار - من ٩٠م° إلى ١٩٠م° تقريباً (الشكل ٦-٥).



الشكل ٦-٥ - اعتماد ضغط بخار الزئبق النقي وثاني كلوريد الزئبق على درجة الحرارة بين ٩٠م° و ١٩٠م° (Schoenberger, 2015)

وبالنظر إلى المنحنى يبدو منطقياً أن تقليل درجة حرارة غاز المداخن إلى أدنى حد سيؤدي إلى ارتفاع نسبة الزئبق المرتبط بالجسيمات الذي يمكن إزالته في مرشح الغبار. وفي ظروف الإزالة المثلى تزال جسيمات الغبار بكمية كبيرة جداً. ولذلك عندما تنخفض درجة حرارة غاز المداخن إلى أقل من ١٣٠م° تصل كفاءة إزالة الزئبق إلى أكثر من ٩٠ في المائة (Kirchartz, 1994, p. 79; Oerter, 2007; Hoenig, 2013; ECRA, 2013).

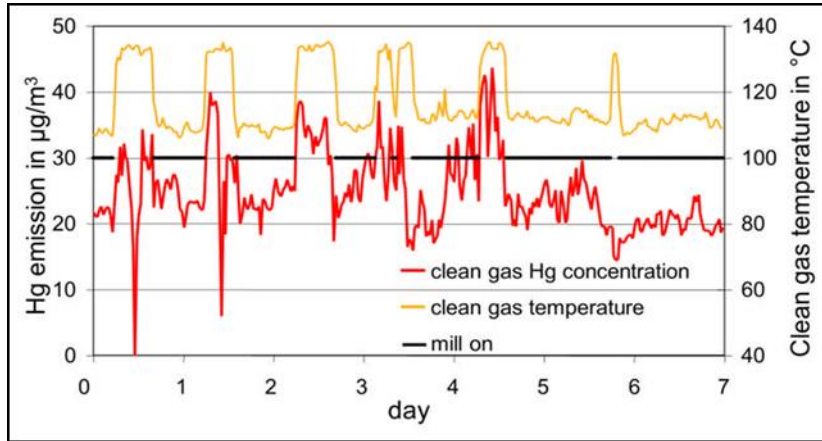
وفي وضع التشغيل المركب (عند تشغيل طاحونة المواد الخام) يمر الغاز العادم عبر طاحونة المواد الخام بهدف تجفيف المواد الخام. وفي الغالبية العظمى من الحالات توجد عادةً تحويلة لبعض غازات جهاز التسخين المسبق حول طاحونة المواد الخام وهذه الغازات قد لا تخضع للتبريد إلى نفس الدرجة قبل أن تخرج بالغاز العادم من طاحونة المواد الخام قبل المرشح.

ومن المستودع، ومع الدقيق الخام، يعود الزئبق إلى جهاز التسخين المسبق حيث يتطاير مرةً أخرى ويزال مرةً أخرى أيضاً. وعلى هذه النحو تتشكل الدورة. ولذلك فإن المستودع يعمل كحيز فاصل كبير وخزان ويحتوى على الجزء الرئيسي من إجمالي الزئبق الموجود في كامل النظام في أي وقت من الأوقات (انظر الشكل ٦-٤).

وفي حالة التشغيل المباشر يمر الغاز من جهاز التسخين المسبق بشكل كامل عبر برج التكييف، وليس طاحونة المواد الخام، ويتجه إلى مرشح الغبار، وهناك لا يخضع الغاز للتبريد إلى نفس الدرجة مقارنةً بوضع التشغيل المركب. ووفقاً لذلك فمن ناحية

نجد أن غبار جهاز التسخين المسبق (مع محتواه من الزئبق) لا يتعرض للتخفيف بالدقيق الخام، ومن الناحية الأخرى نجد أن درجة حرارة الغاز (غاز المداخن) أعلى نظراً لعدم حدوث تبادل حراري في طاحونة المواد الخام.

وقد دُرست العلاقة بين الدورة الخارجية، وتراكم الزئبق، وتأثير درجة حرارة غاز المداخن، وطريقتي التشغيل، وقُدّمت بشكل شامل لأول مرة في عام ٢٠٠١ (Schäfer/Hoenig, 2001). وأعيد نشر الأشكال الواردة في هذا المؤلف عدة مرات (VDZ Activity Report, 2002; Oerter, 2007; Renzoni et al., 2010; Oerter/Zunzer, 2011; Hoenig, 2013; ECRA, 2013). ويبين الشكل ٦-٦ أحد هذه المخططات للتشغيل مع إعادة تدوير غبار المرشح المزال، أي عبر فترة قدرها أسبوع واحد مع منحني انبعاثات الزئبق (تُحدد القيم بشكل مستمر)، ودرجات حرارة غاز المداخن ذي الصلة، والفترات الزمنية لطريقتي التشغيل المركب والتشغيل المباشر.



الشكل ٦-٦. انبعاثات الزئبق من فرن دوار جاف لإنتاج كريات الكلنكر بدون إعادة تدوير غبار المرشح لمدة أسبوع واحد مع بيان درجة حرارة غاز المداخن بعد جهاز الترسيب الكهروستاتيكي (درجة حرارة الغاز النظيف) والفترات الزمنية للعمل مع تشغيل طاحونة المواد الخام، استناداً إلى (Schäfer/Hoenig, 2001, also quoted in VDZ Activity Report, 2002; Oerter, 2007; Renzoni et al., 2010; Oerter/Zunzer, 2011; Hoenig, 2013; ECRA, 2013)

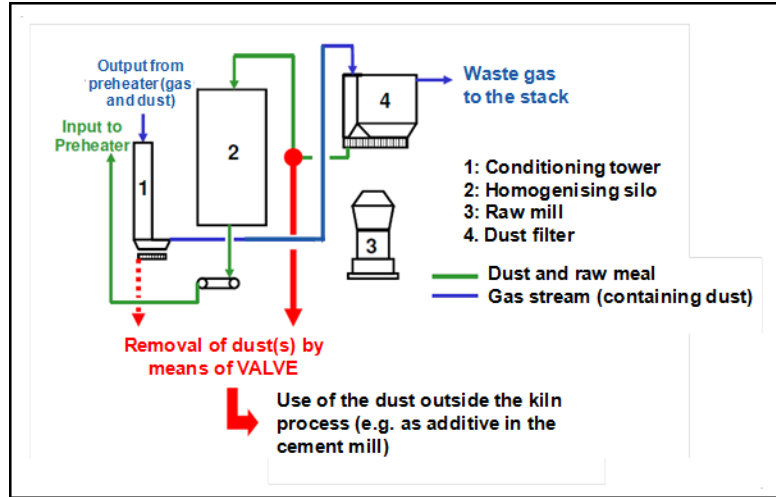
وقد اتضح بجملاء أن درجة حرارة غاز المداخن والانبعاثات تكون أعلى في طريقة التشغيل المباشر. ويعود ذلك أيضاً إلى تراكم الزئبق في الدورة الخارجية أثناء طريقة التشغيل المركب. وبلغت النسبة الزمنية في طريقة التشغيل المباشر زهاء ٢٦ في المائة. ويرتبط الجزء الأقصر من طريقة التشغيل المباشر في الغالب مع عوامل تراكم أعلى. ويبين المثال من عام ٢٠٠١ بوضوح أن انبعاثات الزئبق أعلى أثناء طريقة التشغيل المباشر لكن الفرق أقل من المعامل ٢، بينما أبلغ عن عوامل أعلى بكثير من منشآت أخرى: حتى المعامل ٤٠٠ (Linero, 2011).

وتعود أسباب العوامل المختلفة لما يلي:

- محتوى الغبار في الغاز المتصاعد من جهاز التسخين المسبق: الدوامات الحلزونية الجديدة أو المعدلة في جهاز التسخين المسبق تقود إلى محتويات غبار منخفضة، ولذلك فإنه بعد الترسيب عند درجات حرارة منخفضة يصبح تركيز الزئبق في الغبار عالياً.
- نسبة التشغيل المركب إلى التشغيل المباشر: تكون هذه النسبة بين ٥٠:٥٠ و ٩٠:١٠. أما في النسب الأعلى فإن الزئبق يمكن أن يتراكم أكثر في الدورة الخارجية، وعليه فإن معامل انبعاثات الزئبق بين التشغيل المركب والتشغيل المباشر يزداد.
- درجة حرارة غاز المداخن: كلما انخفضت درجة حرارة غاز المداخن انخفض ضغط البخار وازداد ترسيب أنواع الزئبق على جسيمات الغبار.

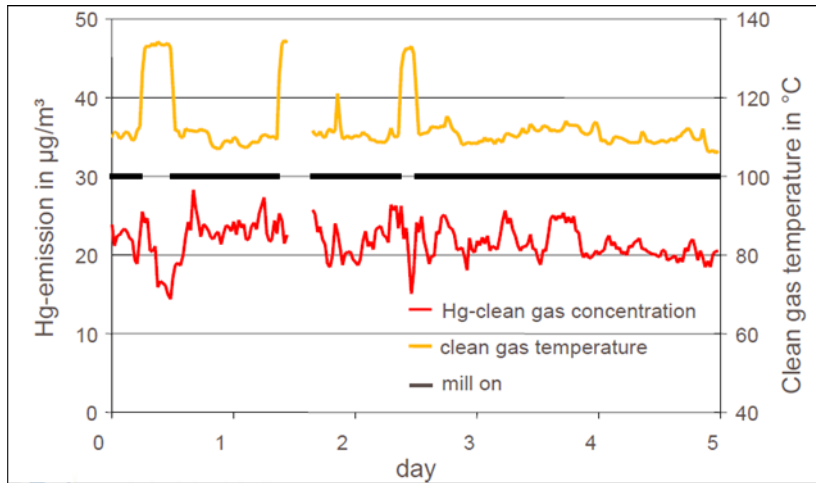
- كفاءة الإزالة لمرشح الغبار: في السابق كانت تركيزات الغبار المنبعث تتراوح من ٥٠ إلى ١٠٠ ملغم/م^٣ عادي. ومنذ أن بدأ استخدام المصافي الكيسية الجيدة التصميم أمكن الوصول لتركيزات غبار أقل من ١٠، بل أقل من ١ ميلليغرام/م^٣ عادي. وبالتوافق مع درجات الحرارة المنخفضة لغاز المداخن فإن ذلك من شأنه أن يسهم أيضاً في خفض انبعاثات الزئبق.

وثمة عامل مهم آخر هو إزالة غبار المرشح من خلال صمام وحجم هذه الإزالة. الشكل ٦-٧ يظهر مخططاً لاستخدام صمام لإزالة غبار المرشح.



الشكل ٦-٧. مخطط لتركيب صمام لإزالة غبار المرشح (Waltisberg, 2013)

وبناءً على ذلك فإن انبعاثات الزئبق تصبح أكثر استقراراً وفق ما هو مبين في الشكل ٦-٨. بيد أن الفترة الزمنية المشار إليها هي فترة قصيرة نسبياً (خمسة أيام) كما أن نسبة التشغيل المركب إلى التشغيل المباشر عالية (٨٨:١٢) في ذلك الوقت (٢٠٠١).

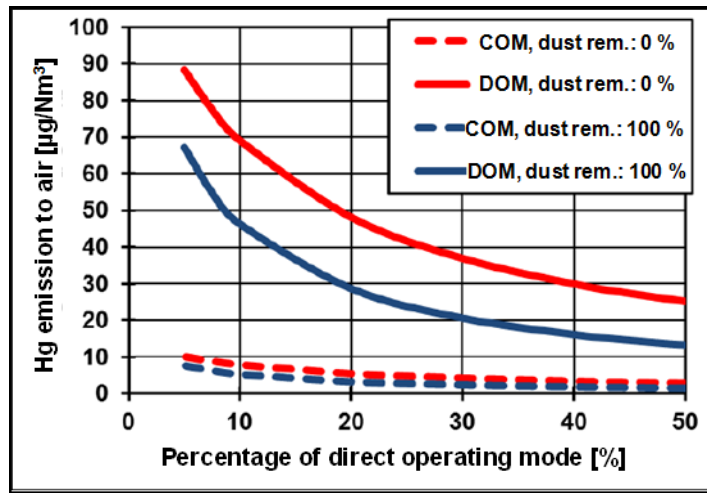


الشكل ٦-٨. انبعاثات الزئبق من فرن دوار جاف لإنتاج كريات الكلنكر مع إعادة تدوير غبار المرشح لمدة خمسة أيام ومع بيان درجة حرارة غاز المداخن بعد جهاز الترسيب الكهروستاتيكي (درجة حرارة الغاز النظيف) والفترات الزمنية للعمل مع تشغيل طاحونة المواد الخام، استناداً إلى (Schäfer/Hoenig, 2001, also quoted in VDZ Activity Report, 2002; Oerter, 2007; Renzoni et al., 2010; Senior et al., 2010; Oerter/Zunzer, 2011; Hoenig, 2013; (ECRA, 2013

إن تأثير عملية إزالة الغبار هو تأثير واضح.

ويظهر الشكل ٦-٩ التأثير المحسوب، على انبعاثات الزئبق، لنسبة التشغيل المباشر بدون إزالة الغبار ومع إزالة الغبار بنسبة ١٠٠ في المائة أثناء التشغيل المباشر. ويكون الفرق عند تطبيق طريقة التشغيل المركب ضئيلاً جداً بينما يصبح كبيراً في طريقة التشغيل المباشر. وفي حال عدم إزالة الغبار فإن انبعاثات الزئبق إلى الهواء تزداد بشكل كبير، شريطة أن تكون كفاءة الإزالة في مرشح الغبار ثابتة. ونتيجةً لإزالة الغبار فإنه يمكن خفض انبعاثات الزئبق بنسبة تتراوح من ٣٥ إلى ٤٠ في المائة اعتماداً على الظروف الفردية. والشكل ٦-٩ يقدم نموذجاً مع بعض الافتراضات. وفي حالات أخرى يمكن أن تكون نسبة التخفيض أقل أو أكثر، مثلاً ٧٨ في المائة وفق ما أبلغ عنه في أماكن أخرى (Renzoni et al., 2010, p X). وتظهر الحالات العملية بشكل أساسي انخفاضات بنسب تتراوح من ١٠ إلى ٣٥ في المائة.

ويعتمد تركيز الزئبق في غبار المرشح أيضاً على الظروف الفردية. فإذا كانت كفاءة إزالة الزئبق في مرشح الغبار أكثر من ٩٠ في المائة ودرجة حرارة غاز المداخن زهاء ١٠٠م° ونسبة التشغيل المركب إلى التشغيل المباشر ٩٠:١٠ ولم يكن مستوى مدخلات الزئبق منخفضاً، فإنه يمكن الوصول إلى تركيز للزئبق في غبار المرشح يصل إلى ٤٠ ملغم/كغم (Renzoni et al., 2010, p XI).



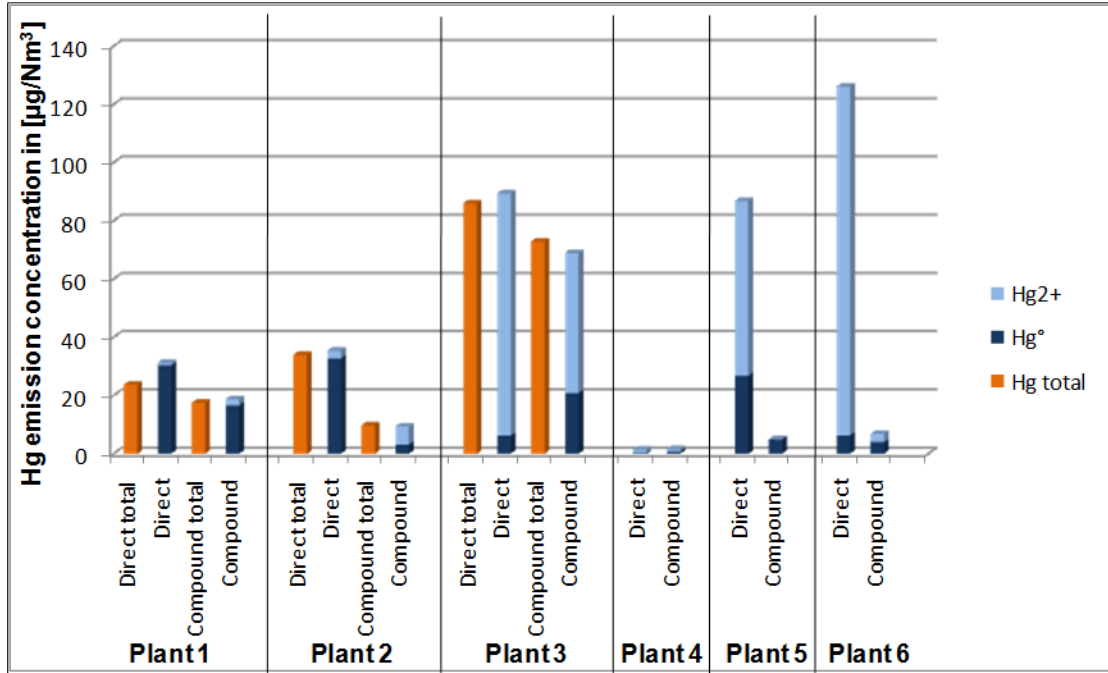
الشكل ٦-٩ - تأثير نسبة التشغيل المباشر بدون إزالة الغبار وبنسبة إزالة للغبار تبلغ ١٠٠ في المائة أثناء التشغيل المباشر

الرموز: COM - طريقة التشغيل المركب؛ DOM - طريقة التشغيل المباشر

أشكال الزئبق الكيميائية المنبعثة

يعتمد انتقال الزئبق الجوي وترسبه بشكل كبير على ما إذا كان الزئبق في شكله الأولي أو المؤكسد (UNEP Hg Assessment, 2013, p. 19). فالزئبق النقي يبقى في الغلاف الجوي فترة طويلة تكفي لانتقاله حول العالم (تشير التقديرات الحالية لعمر الزئبق في الغلاف الجوي إلى أنه يتراوح من ٠,٥ إلى ١,٥ سنة)، أما الزئبق المؤكسد والمرتبطة بالجسيمات فيتميز بفترة عمر أقصر بكثير (من ساعات إلى أيام) ولذلك يكون عرضة للإزالة السريعة من خلال الترسيب الرطب أو الجاف (UNEP Hg, 2008, p. 65). وبناءً على ذلك فإن الزئبق النقي في شكله الغازي يعتبر ملوثاً عالمياً بينما تترسب مركبات الزئبق المؤكسد وتلك المرتبطة بالجسيمات محلياً (UNEP Hg, 2008, p. 65). ونظراً للصلة الوثيقة بين ارتباط الزئبق واحتجازه فإن من المهم معرفة أشكال الزئبق المنبعثة من منشآت إنتاج الإسمنت.

وترد في الشكل ٦-١٠ البيانات ذات الصلة التي جمعت من مصادر مختلفة. وتوجد منشآت يسود فيها الزئبق النقي وأخرى يسود فيها الزئبق المؤكسد. وتعتمد نسبة الزئبق النقي إلى الزئبق المؤكسد المنبعث على الظروف الفردية، مما يعني عدم وجود علاقة بين الاثنين.



الشكل ٦-١٠. انبعاثات الزئبق النقي والزئبق المؤكسد إلى الهواء وفقاً لمصادر مختلفة

بيان مصادر البيانات:

المنشأة ١ والمنشأة ٢: Oerter/Zunzer, 2011

المنشأة ٣: VDZ Activity Report, 2002

المنشأة ٤: Mlakar et al., 2010

المنشأة ٥ والمنشأة ٦: Linero, 2011

- AiF, 2008: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), AiF-Forschungsvorhaben-Nr. 14547 N: Betriebstechnische Möglichkeiten zur Minderung von Hg-Emissionen an Drehrohranlagen der Zementindustrie (2008)
- Barnett, 2013: Barnett, K. (official of the US-EPA), Final Portland Cement Rule 2013, http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/RoundTableMercury_6_24-13-final.pdf
- BREF CLM, 2013: Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries, (2013), online: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CLM_Published_def.pdf
- CEMBUREAU, 1997: BAT for the cement industry, November 1997 / Information for cement and lime BREF 2001
- CRC Handbook, 1976: CRC Handbook of Chemistry and Physics 1976-1977, CRC Press, Inc., 57rd edition (1976), D-185, D-191
- CRC Handbook, 1995: CRC Handbook of Chemistry and Physics 1995–1996, CRC Press, Inc., 76rd edition (1995), 6–77, 6–110
- CRC Handbook, 2012: CRC Handbook of Chemistry and Physics 2012-2013, CRC Press, Taylor&Francis Group Boca Raton, United States, 93rd edition (2012), 6–88, 9–92
- ECRA, 2013: Hoenig, V., Harrass, R., Zunzer, U., Guidance Document on BAT-BEP for Mercury in the Cement Industry, Technical report of the European Cement Research Academy (ecra) on behalf of WBCSD Cement Sustainability Initiative (2013)
- Erhard/Scheuer, 1993: Erhard, H.S., Scheuer, A., Brenntechnik und Wärmewirtschaft, Zement-Kalk-Gips 46 (1993) No. 12, pp. 743–754
- Eriksen et al., 2007: Eriksen, D.Ø., Tokheim, L.-A., Eriksen, T.A., Meyer, J., Qvenild, C., Assessment of mercury emissions at Norcem's cement kiln by use of 203Hg-tracer, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 273 (2007) No. 3, pp. 739–745
- Hoenig, 2013: Hoenig, V., Sources of mercury, behavior in cement process and abatement options, Presentation at the event "Cement Industry Sector Partnership on Mercury, Partnership Launch Meeting" of European Cement Research Academy on 19 June 2013, http://www.unep.org/hazardoussubstances/Portals/9/ECRA_WBCSD-CESI%20Mercury_20130618_upload.pdf
- Holleman-Wiberg, 1985: Holleman, A.F., Wiberg, E., Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 91.-100. Verbesserte und stark erweiterte Auflage, Walter de Gruyter, Berlin/New York (1985), pp. 1042–1049
- Kirchartz, 1994: Kirchartz, B., Reaktion und Abscheidung von Spurenelementen beim Brennen des Zementklinkers, VDZ-Schriftenreihe der Zementindustrie, (1994) Heft 56, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf, Germany
- Krabbe, 2010: Krabbe, H.-J., Grundlagen zur Chemie des Quecksilbers am Beispiel von Rauchgasreinigungsanlagen, Manuscript of the presentation at the 'VDI Wissensforum – Messung und Minderung von Quecksilberemissionen' on 28 April 2010 in Düsseldorf, Germany (2010)
- Lafarge Wössingen, 2015: Lafarge Zement Wössingen GmbH. Wlazbachtal/Germany, personal communication (2015)
- Linero, 2011: Linero, A.A., Synopsis of Mercury Controls at Florida Cement Plants, Manuscript for presentation at the 104th Annual Conference and Exhibition of the Air and Waste Management Association in Orlando, Florida, United States, on 22 June 2011
- Locher, 2000: Locher, F.W., Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Verlag Bau und Technik (2000)
- Martel, 2000: Martel, C., Brennstoff- und lastspezifische Untersuchungen zum Verhalten von Schwermetallen in Kohlenstaubfeuerungen, VDI Fortschritts-Berichte, Reihe 15, Nr. 225 (2000)
- Mlakar et al., 2010: Mlakar, L.T., Horvat, M., Vuk, T., Stergaršek, A., Kotnik, J., Tratnik, J., Fajon, V., Mercury species, mass flows and processes in a cement plant, Fuel 89 (2010) pp. 1936–1945
- Netherlands, 1997: Dutch notes on BAT for the production of cement clinker: Information for cement and lime BREF 2001
- Oerter, 2007: Oerter, M., Influence of raw materials on the emissions of mercury, presentation at the seminar of the European Cement Research Academy (ecra) on 26 April 2007
- Oerter/Zunzer, 2011: Oerter, M., Zunzer, U., Messung und Minderung von Quecksilber in der Zementindustrie, manuscript and presentation at the VDI Fachkonferenz „Messung und Minderung von Quecksilber-Emissionen“ on 13 April 2011
- Paone, 2008: Paone, P., Heavy metals in the cement industry: A look at volatile cycles and simple mitigation techniques, <http://www.asocem.org.pe/bivi/sa/dit/icem/01-04-2008.pdf>

- Paone, 2009: Paone, P., Mercury reduction technologies for cement production, 7th Colloquium of Managers and Technicians of Cement Plants – “Development, innovation and sustainability: the three cornerstones of cement industry” in Malaga, Spain, in November 2009
- Permit Cementa AB, 2007: Permit from Stockholms Tingsrätt, M 26737-05, issued to Cementa AB, Slite, in 2007
- Renzoni et al., 2010: Renzoni, R., Ullrich, C., Belboom, S., Germain, A., Mercury in the Cement Industry, Report of the University of Liège independently commissioned by CEMBUREAU (2010), online: www.unep.org/hazardoussubstances/Portals/9/Mercury/A_Inventories/CEMENT%20Industry%20-%20Hg%20report%20CEMBUREAU%20April%202010.pdf
- SC BAT Cement, 2008: Secretariat of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, Guidelines on Best Available Techniques and provisional Guidance on Best Environmental Practices relevant to Article 5 and Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, Section V.B. – Part II Source category (b): Cement kilns firing hazardous waste (2008)
- Schoenberger, 2009: Schoenberger, H., Integrated pollution prevention and control in large industrial installations on the basis of best available techniques – The Sevilla Process, *Journal of Cleaner Production* 17 (2009) pp. 1526–1529
- Schoenberger, 2015: Schoenberger H., Personal communication, 2015
- Schreiber et al., 2005: Schreiber, R.J., Kellet, C.D., Joshi, N., Inherent Mercury Controls Within the Portland Cement Kiln System, Research & Development Information, Skokie, Illinois, United States, Portland Cement Association, Serial No. 2841 (2005)
- Schäfer/Hoenig, 2001: Schäfer, S., Hoenig, V., Operational factors affecting the mercury emissions from rotary kilns in the cement industry, *Zement Kalk Gips* 54 (2001) No. 11, pp. 591–601
- Schäfer/Hoenig, 2002: Schäfer, S., Hoenig, V., Effects of process technology on the behaviour of mercury in the clinker burning process: Technical Field 6: Sustainability and cement production; Presentation slides and documentation in: *Process Technology of Cement Manufacturing: VDZ Congress 23-27 September 2002* in Düsseldorf, Germany, Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (Hrsg.), Verlag Bau+Technik (2003) pp. 484–488
- Sikkema et al., 2011: Sikkema, J.K., Alleman, J.E., Ong, S.K., Wheelock, T.D., Mercury regulation, fate, transport, transformation, and abatement within cement manufacturing facilities: Review, *Science of the Total Environment* 409 (2011) pp. 4167–4178
- Sprung, 1988: Sprung, S., Spurenelemente, *Zement-Kalk-Gips* 41 (1988) No. 5, pp. 251–257
- Ullmann's, 1986: Locher, F.W.; Kropp, J., Cement and Concrete, in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5th ed., Vol. A 5 (1986) pp. 489–537
- UNEP Hg, 2008: UNEP, Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment (2008),
- UNEP Hg Assessment, 2013: UNEP, Global Mercury Assessment: Sources, emissions, releases, and environmental transport (2013), <http://www.unep.org/PDF/PressReleases/GlobalMercuryAssessment2013.pdf>
- US Cement, 2007: USEPA, Letter from F.L Steitman, Vice President, Environmental Affairs, Ash Grove Cement Company to Keith Barnett, SSPD/USEPA. October 1, 2007 accessed at www.regulations.gov, [EPA-HQ-OAR-202-0051-3371]
- US Cement, 2010: USEPA, Summary of Environmental and Cost Impacts for Final Portland Cement NESHAP and NSPS, 6 August 2010 available online at http://www.epa.gov/ttn/atw/pcem/summary_impacts.pdf
- VDZ Activity Report, 2002: Verein deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), Activity Report 1999-2001 (2002)
- Waltisberg, 2013: Waltisberg, J., personal communications (2013)
- Weisweiler/Keller, 1992: Weisweiler, W.; Keller, A., Zur Problematik gasförmiger Quecksilber-Emissionen aus Zementwerken, *Zement-Kalk-Gips* (45 (1992) No. 10, pp. 529–532
- Zheng, 2011: Zheng Y., Mercury Removal from Cement Plants by Sorbent Injection upstream of a Pulse Jet Fabric Filter, PhD Thesis at the Technical University of Denmark (2011), <http://wwwx.dtu.dk/upload/kt-chec/phd%20thesis,%20yuanjing%20zheng,%20endelig%20version,%20klar%20til%20print.pdf> (accessed 23 January 2014)
- Zheng et al., 2012: Zheng, Y.; Jensen, A.D.; Windelin, C.; Jensen, F., Review of technologies for mercury removal from flue gas from cement production processes, *Progress in Energy and Combustion Science* 38 (2012) pp. 599–629

التذييل ألف

التقنيات الناشئة

حدد الخبراء التقنيون الذين يضعون التوجيهات بشأن أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية تقنيات عديدة أظهرت بالفعل فعالية واعدة لمراقبة الزئبق، على الرغم من احتمال كونها لا تزال في مرحلة البداية أو التجربة. وهذه التقنيات الناشئة إما مخصصة لمراقبة انبعاثات الزئبق أو مصممة لمراقبة انبعاثات الملوثات المتعددة. وترد أدناه معلومات عن بعض هذه التقنيات. ومن المعروف أن هذه التقنيات قد لا تكون متوفرة حتى الآن على نطاق واسع، وستحتاج بعض الأطراف إلى بناء القدرات والتدريب لتمكينها من إبقاء هذه التقنيات قيد الاستعراض وتقييم مدى ملاءمتها.

التقنيات الناشئة لحرق الفحم

توجد الكثير من التقنيات الناشئة لمراقبة انبعاثات الزئبق في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم. ورغم أن بعض هذه التقنيات قد تكون ما زالت في مرحلة البداية أو التجريبية فقد أظهرت بالفعل فعالية واعدة في مراقبة الزئبق وانخفاضاً في التكلفة. والتقنيات الناشئة إما مخصصة لمراقبة انبعاثات الزئبق أو مصممة لمراقبة انبعاثات ملوثات متعددة. وترد أدناه معلومات عن بعض هذه التقنيات.

المواد الماصة غير الكربونية

الأكسيدات المعدنية، مثل ثنائي أكسيد التيتانيوم، هي مواد ماصة غير كربونية لزئبق غاز المدخنة. وأظهرت الدراسات التي أجريت في المختبرات وعلى صعيد التجربة في الولايات المتحدة (سوريا وونغ وآخرون، ٢٠٠٩) كفاءة عالية في التقاط الزئبق تصل إلى ٩٤ في المائة باستعمال ثنائي أكسيد التيتانيوم مع التشعيع فوق البنفسجي. وتستعمل أيضاً المواد الماصة التي تستند إلى النحاس من أجل ضبط انبعاثات الزئبق في غاز المداخن العاملة بحرق الفحم. وتبين أن أكسيدات النحاس المشربة على المواد الماصة المحايدة لأكسيد الألومونيوم ($CuO_x-Al_2O_3$) تُعزِّز الأكسدة الحفازة للزئبق الأولي في وجود كلوريد الهيدروجين، وكان معدل امتزاز الزئبق أكثر من ٧٥ في المائة من المرحلة الأولى من عملية إزالة الزئبق (دو وآخرون، ٢٠١٥). ويمكن أيضاً خلط المواد الماصة غير الكربونية بالكربون المنشط لتعزيز الأداء. وخليط أكسيد النحاس-أكسيد الألومونيوم والكربون المنشط يمكن أن يزيل أكثر من ٩٠ في المائة من الزئبق النقي بتكلفة أقل في التطبيقات الصناعية (دو وآخرون، ٢٠١٥).

البلازما غير الحرارية

يتيح استعمال البلازما غير الحرارية تكنولوجيا واعدة لأكسدة الزئبق النقي. وقد تم الإقرار بالبلازما غير الحرارية باعتبارها عملية ممكنة لإزالة أكسيد النيتروجين وثنائي أكسيد الكبريت والزئبق النقي في آن واحد. والأنواع النشطة كيميائياً مثل الأوكسجين والهيدروكسيل والهيدروبيروكسيل والأوزون، التي تتشكل من تفريغ شحنة هالة نبضية، تحفز على أكسدة الزئبق النقي. ويمكن أن يدعم كلوريد الهيدروجين أكسدة الزئبق بسبب ذرات الكلور الناتجة في عملية البلازما (كو وآخرون، ٢٠٠٨). ومعدل أكسدة الزئبق النقي بنظام تفريغ شحنات حاجز العزل الكهربائي (DBD) يبلغ في المتوسط حوالي ٥٩ في المائة (جيا وآخرون، ٢٠١٣). وأظهرت دراسة أخرى أن معدلات أكسدة أكسيد النيتروجين وثنائي أكسيد الكبريت والزئبق النقي بنظام تفريغ شحنة الهالة النبضية (BCD) بلغت ٤٠ و ٩٨ و ٥٥ في المائة على التوالي (زو وآخرون، ٢٠٠٩).

فحم الكوك المعالج بالسيريوم

فحم الكوك هو مادة ماصة متجددة لضبط ملوثات متعددة (أكسيد النيتروجين وثنائي أكسيد الكبريت والزئبق النقي). وفحم الكوك المنشط الذي لم يستعمل من قبل يمكن أن يزيل ٣٠-٤٠ في المائة من الزئبق النقي، وإذا تم تحميل الكوك المنشط بنسبة ٥ في المائة من ثنائي أكسيد السيريوم فإن أداءه يمكن أن يحقق كفاءة مستقرة في إزالة الزئبق تزيد عن ٦٠ في المائة (هوا وآخرون، ٢٠١٠).

الوحدة المركبة البوليمرية الماصة

تستعمل هذه التقنية تركيباً من مواد ماصة وبوليمرية (SPC) تتركب في وحدات وتوضع في مخرج نظام ضبط تلوث الهواء القائم. والوسائط المركبة البوليمرية الماصة يمكن أن تمتص كلا الزئبق النقي والمؤكسد. ويمكن تكديس هذه الوحدات، ولكل وحدة إمكانية محدّدة لالتقاط الزئبق. ولذلك يتوقف مقدار إزالة الزئبق على عدد الوحدات المستعملة.

ويمكن تطبيق التقنية المركبة البوليمرية الماصة بالاشتراك مع نُظم ضبط تلوث الهواء الأخرى. ودرجة الحرارة المثلى لامتناز الزئبق في هذه التقنية هي ٨٥ درجة مئوية وعندما تكون درجة حرارة غاز المدخنة أعلى من ذلك فيمكن تركيب مبرّد بخاري عند منبع الوحدات.

وتتمتع سلسلة من الوحدات المركبة البوليمرية الماصة بقدرة على تقليل انبعاثات الزئبق بنسبة ٩٠ في المائة أو أكثر. ومن سمات التقنية المركبة البوليمرية الماصة أن الزئبق المتجمع يتم فصله عن بقايا احتراق الفحم مثل ماء جهاز التنظيف والجبس والرماد المتطاير. وفي الوقت الحاضر يجري تركيب التقنية المركبة البوليمرية الماصة على منشآت طاقة تعمل بحرق الفحم وتبلغ قدرتها قرابة ١٠٠٠ ميغاواط (الفريق العامل المعني بالزئبق الصفري، ٢٠١٥).

العمليات الناشئة والعمليات الأخرى للصهر وعمليات التحميص المستخدمة في إنتاج المعادن غير الحديدية (الرصاص والزنك والنحاس والذهب المنتج صناعياً على النحو المحدد في المرفق دال من الاتفاقية)

ينظر هذا القسم في عمليات إزالة الزئبق الناشئة أو التي لا تطبق على نطاق واسع.

أجهزة الشطف باستخدام السليوم

جهاز الشطف باستخدام السليوم (Sundström, 1975; Reimers et al., 1976; Coleman, 1978; Habashi, 1978) هو جهاز شطف رطب يستخدم التفاعل بين الزئبق والسليوم الصلب غير المتبلور في حمض الكبريتيك. ويستخدم أساساً لإزالة التركيزات المرتفعة من بخار الزئبق. ويحافظ على تركيز الحمض ضمن نطاق يتراوح بين ٢٠ و ٤٠ في المائة. ويجب الإبقاء على تركيز الحمض ضمن هذه الحدود لأن التركيزات المنخفضة تؤدي إلى تكوين السليوم والكبريت لمركبات معقدة وشديدة القابلية للذوبان، الأمر الذي يجعل الحمض غير فعال في التفاعل مع الزئبق الموجود في الغاز. أما في التركيزات الأعلى من الحمض، فتؤدي قوة أكسدة الحمض إلى تشكيل ثنائي أكسيد السليوم أو السليوت.

وإذا كان الغاز الذي يخضع للمعالجة يحتوي على ما يكفي من السليوم، قد لا تلزم إضافة السليوم إلى محلول الشطف. وتتراوح نسبة كفاءة جهاز شطف السليوم في إزالة الزئبق بين ٩٠ و ٩٥ في المائة، الأمر الذي تنتج عنه تركيزات زئبق تبلغ حوالي ٠,٢ ملليغرام/متر مكعب. أما في حالة التركيزات المنخفضة للزئبق الوارد، فقد تكون كفاءة الإزالة أقل من ٩٠ في المائة.

الإزالة بالتفاعل مع حمض الكبريتيك

الوصف

جرى تطوير عدد من التقنيات لضبط انبعاثات الزئبق الناجمة عن الصهر والتحميص، وذلك على أساس التفاعل مع حمض الكبريتيك. وتجري عملية بولكم (Bolkem process) في منشأة الحمض، حيث تتحقق الإزالة من حمض الكبريتيك بنسبة ٩٩ في المائة. ويأتي الحمض من قسم الامتصاص في منشأة تصنيع الحمض ويؤكسد الزئبق في درجة حرارة الوسط المحيط. ويحتوي الحمض الناتج على الزئبق، ويجري تخفيفه إلى ٨٠ في المائة، ويترسب الزئبق ككبريتيد مع الثيوكبريتات. وبعد ترشيح كبريتيد الزئبق، يعاد الحمض إلى مرحلة الامتصاص. ولذلك لا يتم استهلاك الحمض في العملية.

ويمكن إزالة الزئبق أيضاً قبل خطوة الغسل في مصنع الحمض.^(٥١) ويجري غسل الغاز الذي تبلغ درجة حرارته حوالي ٣٥٠ درجة مئوية عكس اتجاه التيار بواسطة حمض كبريتيك الذي يبلغ تركيزه ٩٠ في المائة في درجة حرارة ١٩٠ درجة مئوية، وذلك داخل برج معبأ. ويتكون الحمض في الموقع نفسه من ثلاثي أكسيد الكبريت (SO₃) الموجود في الغاز. وتقوم العملية على تحويل الزئبق النقي في الغاز إلى كبريتات. ويعاد تدوير الحمض حتى يصبح المحلول مشبعاً بكبريتات الزئبق الأحادي التكافؤ HgSO₄ ويبدأ الترسيب. وبعد ذلك يجري فصل بلورات كبريتات الزئبق الأحادي HgSO₄ في جهاز تخزين. وبالإضافة إلى إزالة الزئبق، ستم إزالة الملوثات الأخرى الموجودة في الغاز في جهاز الشطف. ويمكن استرداد الزئبق عن طريق خلط المواد الصلبة مع أكسيد الكالسيوم، ثم التسخين لتقطير الزئبق من الخليط، لكي يتم بعد ذلك التعامل معه وفقاً للاتفاقية.

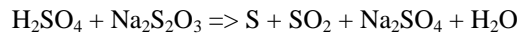
وفي طريقة بديلة، يمكن ترسيب الزئبق وإزالة حمأة الزئبق من الحمض المبرد ثم تمريرها بعمليتي ترشيح وغسل. ثم يعاد تدوير جزء من الحمض للاستخدام في خطوة الشطف. وفي طريقة معدلة من هذه العملية، يزال الزئبق من الغازات عن طريق الغسل بمحلول من أيونات السليوم، وينتج من ذلك معدن السليوم إلى جانب سلييد الزئبق (ثنائي التكافؤ).

(٥١) http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/GasCleaning/gcl_hg.htm (جرى الاطلاع عليها في ١٦ نيسان/أبريل

ووصف شولز أيضاً عملية ثيوكبريتات (2009). وفي هذه العملية تعتمد كفاءة امتصاص الزئبق على قوة الحمض ودرجة حرارته. وتزداد كفاءة الامتصاص كلما انخفضت درجة الحمض وازداد تركيزه. ولتجنب تراكم الزئبق في الحمض الناتج من الضروري أن يتم امتصاص بخار الزئبق في وحدة برج تحفييف ذات مرحلتين، تعمل مع تركيزات مختلفة للحمض، حيث يكون تركيز الحمض في برج التحفييف الثاني أعلى من تركيزه في وحدة الامتصاص التالية في العملية.

ويجب تنظيف حمض أبراج التحفييف المحتوي على الزئبق قبل تصريفه إلى دورة الامتصاص. ولذلك يتم جمع تيارات الحمض ومعالجتها في وحدات تفاعل مع ثيوكبريتات الصوديوم ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

وتجرى عملية تجريد بواسطة الهواء للكمية الكلية من حمض برجي التحفييف، وذلك في برج تجريد من أجل إزالة ثنائي أكسيد الكبريت الذائب. ويجري تصريف الحمض الذي تم تجريده إلى حوض تفاعل يضاف إليه محلول مؤلف من ٤٠ في المائة من ثيوكبريتات الصوديوم ووسط مساعد للترشيح. ويتشكل الكبريت وفقاً للتفاعل التالي:



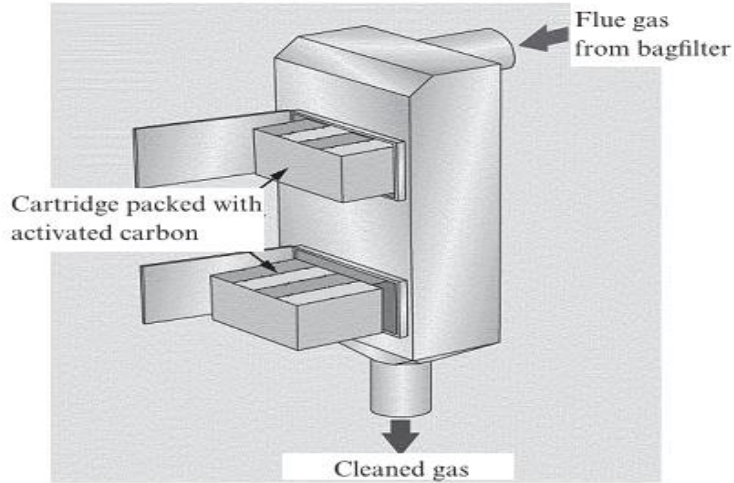
ويتفاعل الكبريت مع الزئبق في الحمض ليشكل كبريتيد الزئبق (ثنائي التكافؤ) الذي يترسب. وتكون درجة الحرارة في هذه المرحلة ٥٠ درجة مئوية في حين يبلغ تركيز الحمض نحو ٨٠ في المائة من الوزن. ويفيض الحمض الذي تمت معالجته إلى أحواض تخمير حيث يكتمل التفاعل.

وقد أدرجت هذه العمليات في هذا القسم. ولكن لا توجد معلومات واضحة عن عدد منشآت الصهر والتحميص التي تستخدمها في الوقت الحالي.

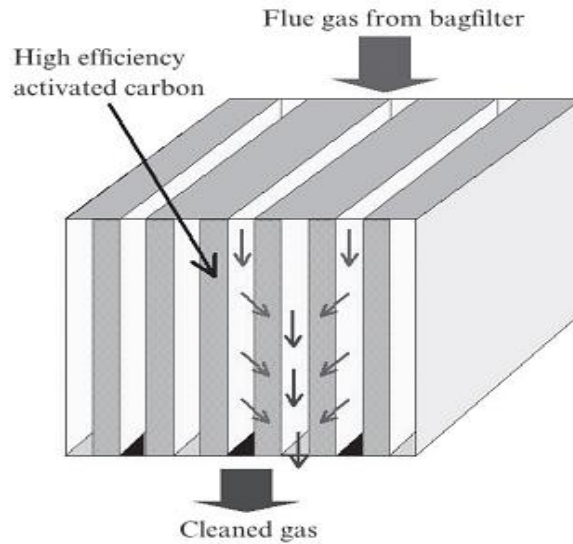
التقنيات الناشئة لمرافق حرق النفايات

١-١ الكربون المنشط الممتاز العالي الكفاءة

تم تطوير كربون منشط ممتاز عالي الكفاءة وأطلق عليه الاسم التجاري "JFE-Gas-Clean-DX"، حيث يعبأ الكربون المنشط في كنانات ذات طبقة قاعدية ثابتة وهيكل يسمح بالتدفق الجانبي مما يؤمن تلامساً فعالاً بين غاز المداخن والكربون المنشط. ويقدم الشكل ١ مخططاً توضيحياً لشكل الجهاز بينما يبين الشكل ٨ كنانة الكربون المنشط. ويتكون الجهاز من كنانة كربون منشط ذات حجم صغير يمكن فصلها وتركيبها بسهولة في علبه الجهاز. ويتحقق التلامس العالي الكفاءة بين غاز المداخن والكربون المنشط من خلال وضع قاعدة ثابتة وهيكل يسمح بالتدفق الجانبي.



الشكل ١. جهاز الامتزاز باستخدام الكربون المنشط



الشكل ٢. كنانة معبأة بالكربون المنشط

وكما يظهر من الشكل ٢ فإن غاز المداخن يتوزع بشكل منتظم عند مروره عبر الطبقات الرقيقة المتعددة من الكربون المنشط المركبة في كنانة الكربون المنشط. ونتيجةً لذلك ترتفع كفاءة التلامس بين الكربون المنشط والكميات النزرية من المواد الضارة في غاز المداخن ومن الضروري تحقيق خفض كبير في استخدام كمية الكربون المنشط. وهناك ميزة إضافية حيث أن استخدام

طبقات رقيقة من الكربون المنشط يقلل من فقدان الضغط مقارنةً بجهاز الكربون المنشط التقليدي ذي القاعدة المتحركة الذي يصل فقدان الضغط فيه إلى زهاء ٢ - ٣ كيلوباسكال. ونظراً لأن الفقدان في الضغط لا يتعدى ٥,٥ كيلوباسكال لكل كنانة كربون منشط فإنه يمكن الإبقاء على استهلاك الطاقة الكهربائية عند مستوى منخفض. ولمنع انسداد طبقة القاعدة المعبأة بالكربون المنشط بسبب الغبار فإن الطريقة الرئيسية لتطبيق هذا الجهاز هي تركيبه بعد المرشح الكيسي. ولهذا السبب يتعين استخدام كربون منشط يتميز بكفاءة عالية في منع الاشتعال، للسماح بمعالجة حتى درجات حرارة قصوى تبلغ ٢٠٠م، وهذه هي درجة حرارة المرشحات الكيسية الشائعة.

وأظهرت التجارب في منشأة لحرق النفايات تركيزات زئبق أقل من الحد الأدنى القابل للكشف والبالغ ٥ ميكروغرام/م^٣ في الغاز النظيف عند تركيز في المنفذ قدره ٦٥ ميكروغرام/م^٣. وأمكن الإبقاء على تركيزات الزئبق أقل من الحد الأدنى القابل للكشف بعد ستة أشهر في منشأة حرق النفايات.

المنافع المشتركة

تشمل المنافع المشتركة خفض كميات المواد الضارة الأخرى مثل الديوكسينات والمعادن الثقيلة الأخرى.

٢-١ فحم جوز الهند كبديل للكربون المنشط القائم على الفحم

تم تطوير فحم من ألياف جوز الهند ومن لب جوز الهند ليكون بديلاً عن الكربون المنشط. ويعد قشر جوز الهند من النفايات الناتجة عن عملية معالجة جوز الهند ويوجد على نطاق واسع في المناطق المدارية.

وأظهرت التجارب أن قدرة لب جوز الهند على امتزاز الزئبق النقي أفضل من قدرة ألياف جوز الهند في ظروف التجربة. وفي هذه التجارب كانت قدرة فحم لب جوز الهند على امتزاز الزئبق النقي (٣١٤٢ ميكروغرام/غرام) وهذا أعلى بكثير من قدرة الكربون المنشط القائم على الفحم (١١٩ ميكروغرام/غرام)، وقد يشير هذا إلى أن أنواع الفحم المنشط من لب جوز الهند يمكن أن تشكل في المستقبل مصدراً محتملاً للمواد الممتازة، التي ستحل محل المواد الممتازة الحالية مثل الكربون المنشط (Khairiraihanna et al. 2015).

المنافع المشتركة

يمكن أن يوفر استخدام نفايات من قبيل قشر جوز الهند فوائد اقتصادية إضافةً إلى تقليله من مشاكل التخلص من النفايات نتيجةً لتقليل كميات المواد المضافة. بيد أنه يتعين أيضاً التخلص من فحم جوز الهند الملوث بالزئبق بطريقة ملائمة.

Coal

Du W, Yin L B, Zhuo Y Q, Xu Q S, Zhang L, Chen C H (2015) Performance of CuOx–neutral Al₂O₃ sorbents on mercury removal from simulated coal combustion flue gas. *Fuel Processing Technology*, 131: 403–408

Hua X Y, Zhou J S, Li Q K, Luo Z Y, Cen K F (2010) Gas-Phase Elemental Mercury Removal by CeO₂ Impregnated Activated Coke. *Energy Fuels*, 24 (10): 5426–5431

Jia B J, Chen Y, Feng Q Z, Liu L Y (2013) Research progress of plasma technology in treating NO, SO₂ and Hg₀ from flue gas. *Applied Mechanics and Materials*, 295-298: 1293–1298

Ko K B, Byun Y, Cho M, Hamilton I P, Shin D N, Koh D J, and Kim K T (2008) Pulsed Corona Discharge for Oxidation of Gaseous Elemental Mercury. Chemistry Faculty Publications. Paper 2. http://scholars.wlu.ca/chem_faculty/2.

Suriawong A, Smallwood M, Li Y, Zhuang Y, Biswas P (2009) Mercury capture by nano-structured titanium dioxide sorbent during coal combustion: lab-scale to pilot scale studies. *Aerosol and Air Quality Research*, 9:394–403

Xu F, Luo Z, Cao W, Wang P, Wei B, Gao X, Fang M, Cen K (2009) Simultaneous oxidation of NO, SO₂ and Hg₀ from flue gas by pulsed corona discharge, *Journal of Environmental Sciences*, 21: 328~332.

ZMWG (2015) ZMWG Comments on Guidance on BAT/BEP for Coal-fired power plants and Coal-fired industrial boilers 1 August 2015; http://mercuryconvention.org/Portals/11/documents/BAT-BEP%20draft%20guidance/Submissions/ZMWG_3.pdf

Smelting and roasting processes used in the production of non-ferrous metals (lead, zinc, copper and industrial gold as specified in Annex D to the Convention)

Coleman, R.T.J. (1978). Emerging Technology in the Primary Copper Industry. Prepared for the U.S, EPA; data2.collectionscanada.ca/pdf/pdf001/p000001003.pdf; accessed on 7 April 2014, Habashi, F. (1978).

Metallurgical plants: how mercury pollution is abated. *Environmental Science & Technology* 12, pp. 1372–1376.

Habashi, F. (1978). Metallurgical plants: how mercury pollution is abated. *Environmental Science & Technology* 12, pp. 1372–1376.

Reimers, J. H., et al. (1976). A review of Process Technology in Gases in the Nonferrous Metallurgical Industry for the Air Pollution Control Directorate, nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91018I2W.txt; accessed on 7 April 2014, Jan H. Reimers and Associates Limited, Metallurgical Consulting Engineers, Oakville, Ontario, Canada.

Schulze, A. (2009). Hugo Petersen – Competence in gas cleaning systems downstream nonferrous metallurgical plants. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy – Sulphur and Sulphuric Acid Conference 2009, pp. 59–76.

Sundström, O. (1975). Mercury in Sulfuric Acid: Bolden Process Can Control Hg Levels during or after Manufacture. *Sulfur* No. 116, The British Sulfur Corp., January–February 1975: pp. 37–43.

المرفق الثالث

توجيهات بشأن توفير الدعم للأطراف في تنفيذ التدابير الواردة في الفقرة ٥ من المادة ٨، وخاصة في تحديد الأهداف وفي وضع قيم حدية للانبعاثات

المعلومات المحددة المتصلة بالفقرة ٥ من المادة ٨

يرجح أن تحتاج الأطراف إلى معلومات تتعلق تحديداً بضبط انبعاثات الزئبق وخفضه في نهاية الأمر من أجل تنفيذ التدابير الواردة في الفقرة ٥ من المادة ٨. وترد أدناه المعلومات المذكورة التي تشكل جزءاً من الدعم التقني المقدم إلى الأطراف.

ألف - هدف كمي لضبط، وحيثما أمكن، لخفض الانبعاثات من المصادر ذات الصلة

يعتبر تحديد الأهداف الكمية مقياساً يمكن استخدامه في خفض انبعاثات الزئبق بمرور الوقت. ويمكن وضع أهداف لكي يتم تحقيقها على مدى فترة زمنية قصيرة أو فترة زمنية أطول (سنوات متعددة). ويمكن أن تتخذ هذه الأهداف الكمية عدداً من الأشكال المختلفة، تشمل تحديد حدود قصوى لمجموع الانبعاثات على مدى فترة سنة. وقد توضع الأهداف أيضاً على أساس تحقيق تخفيض في الانبعاثات بنسبة مئوية معينة. وفي هذه الحالة، لا بد من تحديد خط أساس واضح من أجل قياس التقدم المحرز نحو الهدف. كما يمكن أن تحدد الأهداف كمتوسط مستوى انبعاثات يتم تحقيقه، على أساس تركيز انبعاثات معين أو على أساس أي أنواع أخرى من عوامل الانبعاثات. ويمكن أن ينطبق الهدف على مصدر فردي، أو على مجموعة مصادر داخل فئة مصادر تحت المرفق دال، أو حتى داخل مجموعة مصادر عبر فئات مصادر متعددة تحت المرفق دال.

ومن الأشكال الأخرى التي يمكن أن يتخذها الهدف هو تطبيق تدابير تدرجية معينة يمكن تحديدها كميًا لضبط مصادر متعددة على مدى فترة زمنية محددة.

ويمكن أن يستند وضع الهدف على نتائج بيئية وصحية محددة أو على أساس ضبط متوقع للانبعاثات أو خفض متوقع فيها نتيجة لتحقيق الهدف. ويمكن أيضاً تحديد الهدف الكمي باستخدام نهج تصاعدي يشمل مستويات الأداء المتوقعة المرتبطة باستخدام أفضل التقنيات المتاحة.

وينبغي التأكيد على أن وضع الهدف لا ينفى ضرورة ضبط الانبعاثات من جميع المصادر المعنية.

وفيما يمكن التوصية بتدابير استراتيجية، من المحتمل أيضاً التوصية بالمرونة من حيث تدابير الضبط المستخدمة لتحقيق الهدف. وقد يكون من المجدي تنفيذ تدابير الضبط بصورة متسلسلة، يبدأ بأقل تدابير الضبط تكلفة وتستمر حتى يتم تحقيق خفض كاف لبلوغ الهدف المطلوب. وينبغي أن يشمل وضع الهدف آلية جاهزة للإبلاغ عن التقدم المحرز والنجاح المحقق من حيث القدرة على تحقيق الهدف. وفي حين يتعين أن يرتبط الهدف الكمي بضبط الانبعاثات من المصادر المعنية وخفضها، حيثما أمكن ذلك عملياً، هناك عوامل أخرى يمكن وضعها في الاعتبار عند وضع الهدف، ويشمل ذلك النتائج البيئية والصحية المرغوبة.

باء - القيم الحدية للانبعاثات بغية ضبط، وحيثما أمكن، خفض الانبعاثات من المصادر ذات الصلة

و"القيمة الحدية للانبعاثات"، كما هي معرفة في الفقرة ٢ (هـ) من المادة ٨، تعني وضع حدّ لتركيزات الزئبق أو مركبات الزئبق أو كتلتها أو معدل انبعاثاتها الناجمة عن مصدر ثابت للانبعاثات، والمعبر عنها غالباً بعبارة "الزئبق الكلي".

ويمكن تحديد القيم الحدية للانبعاثات من قبل طرف على المستوى الوطني، أو من قبل دولة أو مقاطعة، أو مرفق فردي في إطار استعراض تشغيله المستمر أو الموافقة عليه. وفيما توفر القيم المحددة على المستوى الوطني درجة عالية من الاتساق، توفر القيم المحددة على أساس إقليمي أو على أساس المرفق الواحد قدراً أكبر من المرونة التي تراعي الظروف الخاصة في تلك المنطقة أو في ذلك المرفق.

يمكن أن توضع القيم القصوى للانبعاثات بطرق عديدة منها كنسبة مئوية من مدخل المادة، أو كنسبة مئوية من قيم إنتاج المرفق، أو كتركيز لانبعاثات الملوث في الهواء. والقيمة الرقمية الحقيقية لقيمة الحدود القصوى للانبعاثات قد تختلف تبعاً للظروف الوطنية أو لظروف المرافق كلاً على حدة.

والبلدان التي تستخدم قيم حدود قصوى للانبعاثات عادةً ما تقوم بتحديد قيم تتوافق مع أفضل التقنيات المتاحة، على النحو المعرف في إطارها التنظيمية. ومن ثم، يتم استعراض قيم الحدود القصوى للانبعاثات بصورة منتظمة لتضع في الاعتبار التقدم المحرز في ضوابط الانبعاثات باستخدام التقنيات المتاحة. وتجدر الإشارة إلى أن استخدام قيم الحدود القصوى للانبعاثات لا يعني أي إلزام بتطبيق أي تقنيات بعينها. فقيم الحدود القصوى للانبعاثات هي نصح قائم على تحقيق النتائج يضع مستوى معين من الضبط على الانبعاثات، وهذا يمكن تحقيقه عبر مجموعة من التقنيات أو الاستراتيجيات.

وبما أن قيمة الحد الأقصى للانبعاثات توضع على أساس أفضل التقنيات المتاحة، فمن غير المجدي التوصية باستخدام مستويات فعلية لهذه القيم على المستوى العالمي. وينبغي أن يتم الاختيار على ضوء مستويات الانبعاثات التي يتم تحقيقه باستخدام أفضل التقنيات المتاحة لذلك الطرف أو لذلك المرفق المذكور في الوثيقة التوجيهية بشأن أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية، الموضوعة بموجب الفقرة ٨ (أ) من المادة ٨، التي [اعتمادها مؤتمر الأطراف في اجتماعه الأول].

ويجب أن يكون وضع قيمة الحد الأقصى للانبعاثات مصحوباً بألية مناسبة لرصد الانبعاثات والابلاغ عنها ومقارنتها بقيمة الحد الأقصى للانبعاثات.

جيم - استخدام أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لضبط الانبعاثات من المصادر ذات الصلة

يمكن الحصول على المعلومات التقنية المتصلة بالفقرة ٥ (ج) من المادة ٨، بشأن استخدام أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لضبط الانبعاثات من المصادر ذات الصلة بالوثيقة التوجيهية بشأن أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية. وعلى وجه التحديد، يرد التوجيه بشأن وضع أفضل التقنيات المتاحة في الفرع التمهيدي لذلك التوجيه، فيما يرد وصف التقنيات في الفصل المتعلق بالتقنيات العامة وفي فصول معينة متعلقة بالقطاعات.

دال - استراتيجية لضبط ملوثات متعددة تحقق منافع مشتركة لضبط انبعاثات الزئبق

تعرض في الوثيقة التوجيهية بشأن أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية تقنيات ضبط الملوثات المتعددة التي تحقق منافع مشتركة فيما يتعلق بالزئبق. فبالنسبة للأطراف التي تختار استخدام هذا التدبير لضبط أو خفض انبعاثات الزئبق قد يكون من المفيد الحصول على معلومات بشأن مستويات الزئبق التي تم تحقيقها باستخدام استراتيجيات الضبط المذكورة حتى يتسنى توضيح مدى فعالية هذه الاستراتيجيات. وتوفر الوثيقة التوجيهية بشأن أفضل التقنيات/أفضل الممارسات البيئية معلومات في هذا الصدد.

هاء - تدابير بديلة لخفض الانبعاثات من المصادر ذات الصلة

ويجوز لأي طرف أن يختار أي تدبير بديل آخر لخفض الانبعاثات من المصادر ذات الصلة، وفقاً للفقرة ٦ من المادة ٨، وذلك لإظهار أن التدابير التي يطبقها ذلك الطرف تحقق تقدماً معقولاً في خفض الانبعاثات بمرور الوقت. وقد تشمل التدابير، على سبيل المثال، إغلاق المرافق الأصغر (التي قد تكون قديمة أو تتسم بضعف تقنيات الضبط فيها) واستبدالها بمرافق ذات كفاءة أكبر حجماً أو أحدث وتتميز بضوابط انبعاثات أفضل، مما ينتج عنه خفض عام لانبعاثات الزئبق على المستوى الوطني. وقد يختار الطرف أيضاً التصدي للانبعاثات من المصادر ذات الصلة بإغلاق المصانع واستبدال مساهمتها، على سبيل المثال، بإمدادات طاقة من خلال تطوير مصادر طاقة بديلة أو ممارسات إدارة نفايات لا تعتمد على الترميد.