

التوجيهات بشأن أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات
البيئية

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

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 أكاسيدات 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 10 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 تلقيم أولية. وقد يستثنى من ذلك عمليات الصهر الثانوية للنفايات 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

وصف العملية 2 -	7
خطوات التصنيع في إنتاج الرصاص 1-2	7
المعالجة الأولية للخام المرکز 1-1-2	8
الصهر 2-1-2	8
التنقية 3-1-2	8
منشأة تصنيع حمض الكبريتيك 4-1-2	8
خطوات التصنيع في إنتاج الزنك 2-2	11
الخلط والتحميص واستعادة الغبار 1-2-2	11
تنظيف الغاز 2-2-2	11
منشأة إنتاج حمض الكبريتيك 3-2-2	12
النض 4-2-2	13
خطوات التصنيع في إنتاج النحاس 3-2	13
تجفيف الخام المرکز 1-3-2	13
التحميص 2-3-2	14
الصهر 3-3-2	14
التحويل 4-3-2	14
التنقية والصب 5-3-2	14
تنظيف الخبث 6-3-2	15
منشأة تصنيع حمض الكبريتيك 7-3-2	15
خطوات التصنيع في إنتاج الذهب 4-2	16
التحميص 1-4-2	17
النض 2-4-2	17
التجريد وإعادة التشكيل 3-4-2	17
التنقية 4-4-2	18
الفرن 5-4-2	18
تقنيات ضبط الانبعاثات 3-	20
عملية بوليدين-نورزينك 1-3	20
الوصف 1-1-3	20
قابلية التطبيق 2-1-3	22
الأداء 3-1-3	23

4-1-3	الآثار الشاملة لوسائط متعددة	23
5-1-3	تكاليف التركيب والتشغيل	23
2-3	مرشح السليوم	24
1-2-3	الوصف	24
2-2-3	قابلية التطبيق	25
3-2-3	مستوى الأداء	25
4-2-3	تكاليف التركيب والتشغيل	25
5-2-3	الآثار الشاملة لوسائط متعددة	26
3-3	الكربون المنشط	26
1-3-3	الوصف	26
2-3-3	قابلية التطبيق	26
3-3-3	مستوى الأداء	26
4-3-3	تكاليف التركيب والتشغيل	27
5-3-3	المنافع المشتركة	27
6-3-3	الآثار الشاملة لوسائط متعددة	27
4-3	(مرشح من حجر الخفاف مكسو بطبقة من كبريتيد الرصاص (ثنائي التكافؤ)) DOWA عملية مرشح دووا	27
5-3	Jerritt process عملية جيريت	28
1-5-3	الوصف	28
2-5-3	قابلية التطبيق	28
3-5-3	الأداء	29
4-5-3	الآثار الشاملة لوسائط متعددة	29
5-5-3	تكاليف التركيب والتشغيل	29
6-3	المنافع المشتركة للتكنولوجيات الشائعة الرامية إلى تخفيض تلوث الهواء وتقنيات ضبط الزئبق في منشآت تصنيع الحمض	30
1-6-3	تكنولوجيات تخفيض التلوث	30
2-6-3	الجمع بين تنظيف الغاز ومنشآت تصنيع الحمض	30
4-	أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية	32
41-	لمحة عامة عن أفضل التقنيات المتاحة	32
41-1-	بعض الاعتبارات الأخرى في اختيار تقنيات ضبط الزئبق لعمليات الصهر والتحميص في قطاع المعادن غير الحديدية	33
42-	أفضل الممارسات البيئية	36
41-2-	نظم الإدارة البيئية	36

مزج المواد الأولية لضبط انبعاثات الزئبق -2-42	36
انبعاثات الزئبق إلى الغلاف الجوي -2-43	37
ضبط المواد الجسيمية -2-44	37
إدارة النفايات الناتجة عن ضبط تلوث الهواء والتخلص منها على نحو سليم بيئياً -2-45	38
رصد الزئبق في عمليات الصهر والتحميص المستخدمة في إنتاج المعادن غير الحديدية -5	39
أساليب القياس المباشر -1-51	39
أخذ العينات بواسطة جهاز الارتطام -1-51	39
مصادر المواد الماصة ونظم الرصد القائمة عليها -1-52	39
نظم الرصد المستمر للانبعاثات -1-53	40
الأساليب غير المباشرة للقياس -2-52	40
توازن الكتلة -2-51	40
النظم التنبؤية لرصد الانبعاثات -2-52	41
عوامل الانبعاث -2-53	41
المراجع -6	42

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 2013 (AMAP/UNEP 2013) مجرداً لانبعاثات العام 2010، ورغم أن هذا الجرد الأخير يعتمد على جرد الانبعاثات لعام 2005 الذي قُدِّم في تقرير من تقارير البرنامج للعام 2008 (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 10 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 4، مع السماح بمحتوى الزئبق في البطاريات الزرّية 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 المصاهر الثانوية. فعلى سبيل المثال، طلبت الوكالة الأمريكية لحماية البيئة إجراء اختبارات لانبعاثات الزئبق من عدة مصاهر ثانوية للرصاص في الولايات المتحدة في عام 2010، ووجدت أنه في حوالي 70 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 للتقليل من الانبعاثات وبالتالي لا تتم معالجة الصهر الثانوي بشكل منفصل في هذه الوثيقة التوجيهية.

2 - 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 المركزات 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 سيحري امتصاص الزئبق في المواد الجسيمية أو يترسب كمركبات زئبق قابلة للذوبان (مثل كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ)-المسمى أيضاً كلوريد الزئبقيك)، 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 3.

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 وسيوقف 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 3-1). ولا تتناول هذه الوثيقة التوجيهية إدارة هذه المواد، ولكنها بموجب المادة 11 من الاتفاقية ينبغي أن تخزن أو يتم التخلص منها كنفائات 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 كنفائات. أما الحمأة المحتوية على الزئبق فينبغي إدارتها بصورة سليمة بيئياً على نحو متوافق مع المواد الأخرى ذات الصلة من الاتفاقية.

2-1 خطوات التصنيع في إنتاج الرصاص

تتألف العملية الأساسية لإنتاج الرصاص من ثلاث مراحل رئيسية: المعالجة الأولية للخام المركّز؛ والتليد أو الصهر؛ والتنقية. ويظهر الشكل 1 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.

2-1-1 المعالجة الأولية للخام المرکز

في مرحلة المعالجة الأولية للخام المرکز، يجري خلط مركبات متنوعة لتركيز الرصاص من أجل تشكيل خليط متجانس يستخدم كمادة أولية لعملية الصهر. وتنتج عملية خلط المادة المرکزة محتوی معدنيًا أكثر تجانساً في مواد التلقيح 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 التحفيف، إما كزئبق في الحالة الغازية أو كمادة جسيمية.

2-1-2 الصهر

توجد عمليتان رئيسيتان لصهر مُركّزات الرصاص. وتتألف العملية التقليدية من تليد مُركّزات الرصاص المخلوطة أولاً لإزالة الكبريت والحصول على أكسيد الرصاص. ويجري بعد ذلك تلقيح أكسيد الرصاص الناتج بالتليد 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 المرکز إلى انطلاق تفاعل الاختزال اللاحق الذي ينتج السبائك باستخدام الفحم. وبالمقارنة مع عملية صهر الخام الناتج عن التليد 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 التليد 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.

2-1-3 التنقية

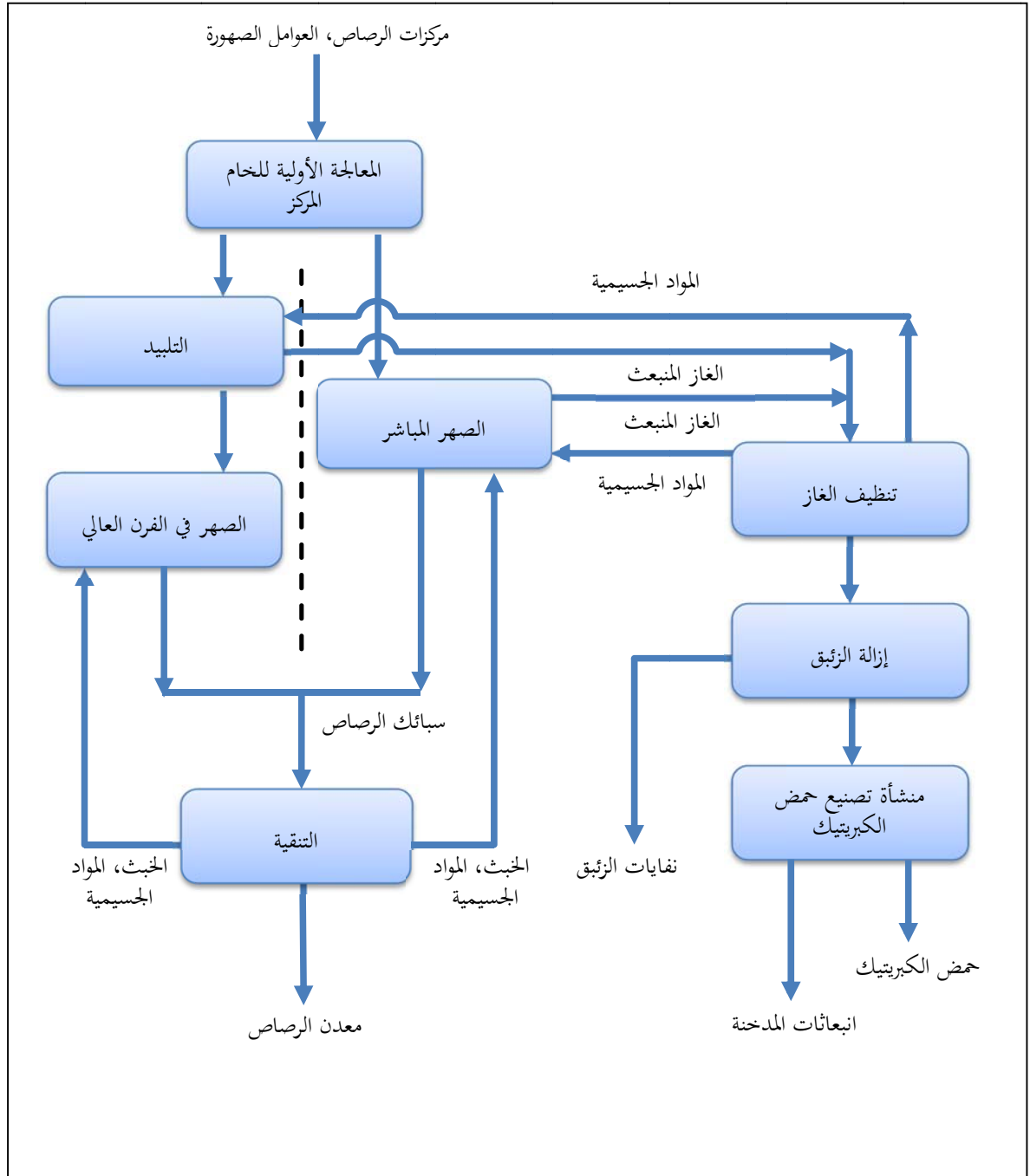
تجري تنقية سبائك الرصاص من خلال عدة مراحل من المعالجة الميثلورجية الحرارية لإزالة المعادن والشوائب الأخرى. وخلال مرحلة فصل النفايات، يجري تبريد سبائك الرصاص في حوض غلي حتى يتكون الخبث على السطح. ويكشط بعدئذ الخبث الذي يحتوي على أكسيد الرصاص وفلزات أخرى، ويؤخذ لمعالجته في مكان آخر لاسترداد المعادن الأخرى. 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.

2-1-4 منشأة تصنيع حمض الكبريتيك

تتم معالجة الغازات المنبعثة من منشآت الصهر أو التليد 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 كنفائات. 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 يحد في

العادة بقيم أقل من جزء واحد 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 نزره من الزئبق.



الشكل 1: العمليات التي ينطوي عليها الإنتاج الأساسي للرصااص

2-2 خطوات التصنيع في إنتاج الزنك

تتألف العملية الأساسية لإنتاج الزنك من خمس مراحل رئيسية: خلط الخام المرکز؛ والتحميص أو التليد والصهر؛ والنض والتنقية؛ والتحليل الكهربائي لاستخلاص المعدن؛ والتدوير والسبك. ويبين الشكل 2 تمثيلاً تخطيطياً للعمليات. ويتحرر الزئبق أساساً أثناء عملية التحميص ويجب احتجازه للتقليل إلى أدنى حد ممكن من انبعاثات الزئبق من المدخنة النهائية.

1-2-2 الخلط والتحميص واستعادة الغبار

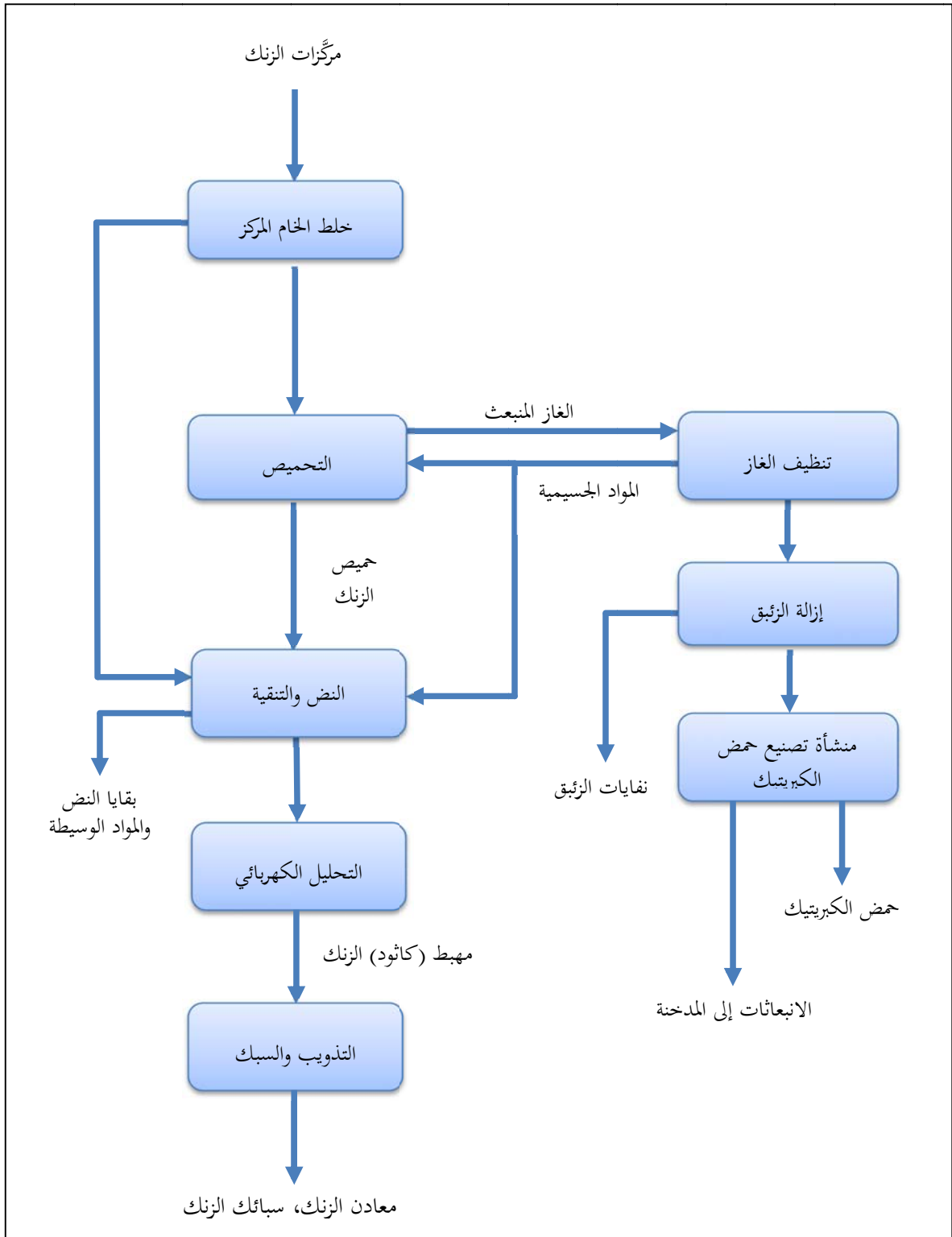
ويبين الشكل 2 تمثيلاً تخطيطياً لخطوات عمليات إنتاج الزنك. وللأغراض التجارية واللوجستية تقوم كل منشأة من منشآت استخلاص وتنقية الزنك بشراء مرکزات الخام من عدة جهات تعدين مختلفة. ويختلف محتوى الزئبق من كل منجم منفرد بين 1 و200 جزء في المليون، ولكن نطاق المحتوى قد يرتفع إلى نحو 1 000 جزء في المليون. وأساس 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 المرکزات 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 مرکزات الزنك بحقنها في فرن صهر ذي قاعدة مُميّعة (fluidized bed furnace) عند نقطة حرارة 950 درجة مئوية، حيث تتحول الكبريتيدات (بالتحميص) إلى أكسيدات وغاز ثنائي أكسيد الكبريت (SO_2). ولتجنب انتشار الانبعاثات، يتم تشغيل الفرن تحت ضغط سلبي. وعملياً تتبخّر جميع مركبات الزئبق الموجودة في المرکزات 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 مرکزات الزنك أو مركبات الكتل المعدنية الأخرى التي تحتوي على الزنك والرصاص، ثم يتم صهرها في فرن عال (Morgan 1968).

2-2-2 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 50 إلى 90 في المائة من إجمالي مدخلات الزئبق ينتهي بها المطاف في هذا المركز.



الشكل 2: العمليات التي ينطوي عليها الإنتاج الأساسي للزنك

3-2-2 منشأة إنتاج حمض الكبريتيك

بعد إزالة الزئبق يجري تحويل ثنائي أكسيد الكبريت إلى حمض الكبريتيك. وسيحتبس في الحمض نحو 90 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 2 في المائة من إجمالي مدخلات الزئبق ينتهي بها المطاف في الحمض. وعند العمل بالضوابط تكون انبعاثات الزئبق من المداخن عادة أقل من 0,1 جزءاً في المليون أو أقل من 100 ميكروغرام/متر مكعب في الظروف الطبيعية، وهو ما يمثل أقل من 0,25 في المائة من مدخلات الزئبق.

4-2-2 النض

في خطوة النض يجري تدوير مركز أكسيد الزنك، (المعروف باسم "حميص الزنك" (zinc calcine))، في الحمض. ويتم تنقية المحلول بالتثبيت في غبار معدن الزنك (مسحوق) الذي لا يحتوي على الزئبق ثم يرسل إلى منشأة للتحليل الكهربائي لاستعادة معدن الزنك. ويتم استعادة المعادن الأخرى -مثل النحاس والكادميوم 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 الاتفاقية. 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 تلقيم مباشر لمعادن غير محمضة تحتوي على الزئبق. وفي العادة تشكل مدخلات مركّزات المعادن غير المحمضة نحو 10 في المائة من مجموعة مدخلات المركّزات إلى عملية النض، ولكن هذه النسبة قد تزداد إلى 50 في المائة عند تطبيق النض المباشر. وينتهي الزئبق الموجود في هذه المركّزات غير المحمضة في بقايا النض، ككبريتيد زئبق غير قابل للانحلال تقريباً. ونظراً لعدم ذوبان الزئبق، لا توجد انبعاثات في الهواء من عملية النض. وتبعاً لكمية المركّزات غير المحمضة التي توجد في هذه المرحلة من التصنيع، سينتهي المطاف بنحو 5 إلى 50 في المائة من مدخلات الزئبق في مخلفات النض.

3-2 خطوات التصنيع في إنتاج النحاس

يمكن إنتاج النحاس الأولي بعمليات المعالجة المي탈ورجية الحرارية أو المعالجة المي탈ورجية بالسوائل. وتنتج قرابة 20 إلى 25 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 المتبلد، ليخرج مع الغاز الناتج عن التصنيع. وتبعاً لدرجات حرارة أجهزة التحفيف المستخدمة، يمكن أن ينبعث الزئبق أيضاً أثناء عملية التحفيف في المنشآت التي تستخدم مجففات الخامات المركزة.

يبين الشكل 3 عرضاً تخطيطياً لعدة عمليات مي탈ورجية حرارية متوازية في إنتاج النحاس:

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

1-3-2 تجفيف الخام المركز

تبدأ العملية المي탈ورجية الحرارية بخلط الخامات المركزة والمواد الصهورة لإنتاج مادة تلقيم أولية مستقرة ومتجانسة، ولا سيما عند معالجة مركّزات مختلفة تحتوي على تركيزات مختلفة من النحاس أو الشوائب. وبالنسبة لأوعية الصهر السريع، تخضع المركّزات لعملية تجفيف لتخفيف محتواها من الرطوبة. وفي هذه المرحلة يتم تجفيف الخام المركز إلى نسبة 0,2 في المائة من الرطوبة،

وتستخدم لذلك عادة المحففات الدوارة أو ذات الملفات المتعددة، أو ذات القاعدة المميعة، بحيث تعمل هذه المحففات على رفع درجة حرارة خروج المركبات إلى نطاق يتراوح بين 100 و200 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.

2-3-2 التحميص

لا يزال من الممكن استخدام بعض التقنيات القديمة التي يتم فيها تحميص المركبات قبل صهرها. وفي المرافق التي تجري فيها هذه العمليات، يتم أولاً تحميص المركبات المخلوطة لتحويل كبريتيدات النحاس إلى أكسيدات قبل معالجتها في المصهر. 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.

2-3-3 الصهر

بمجرد تحفيف خليط المركبات 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 3، تنطوي على مرحلة صهر وتحويل مستمرة بواسطة أفران متعددة، وينتج عنها النحاس المنقّط.

وبوجه خاص يشجع 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 1230-1250 درجة مئوية. وتؤدي هذه الحرارة إلى التطاير الكامل للزئبق الأولي ومركبات كبريتيد الزئبق. ويحتجز الغاز الناتج عن هذه العملية ويرسل إلى نظام تنظيف الغاز.

2-3-4 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.

2-3-5 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 99,995 في المائة.

2-3-6 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 متلبد 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 المنفط، يمكن أن ينتج تنظيف الخبث سبائك من خليط النحاس، وترسل هذه بعد ذلك إلى المصهر لكي تعاد معالجتها في أجهزة التحويل.

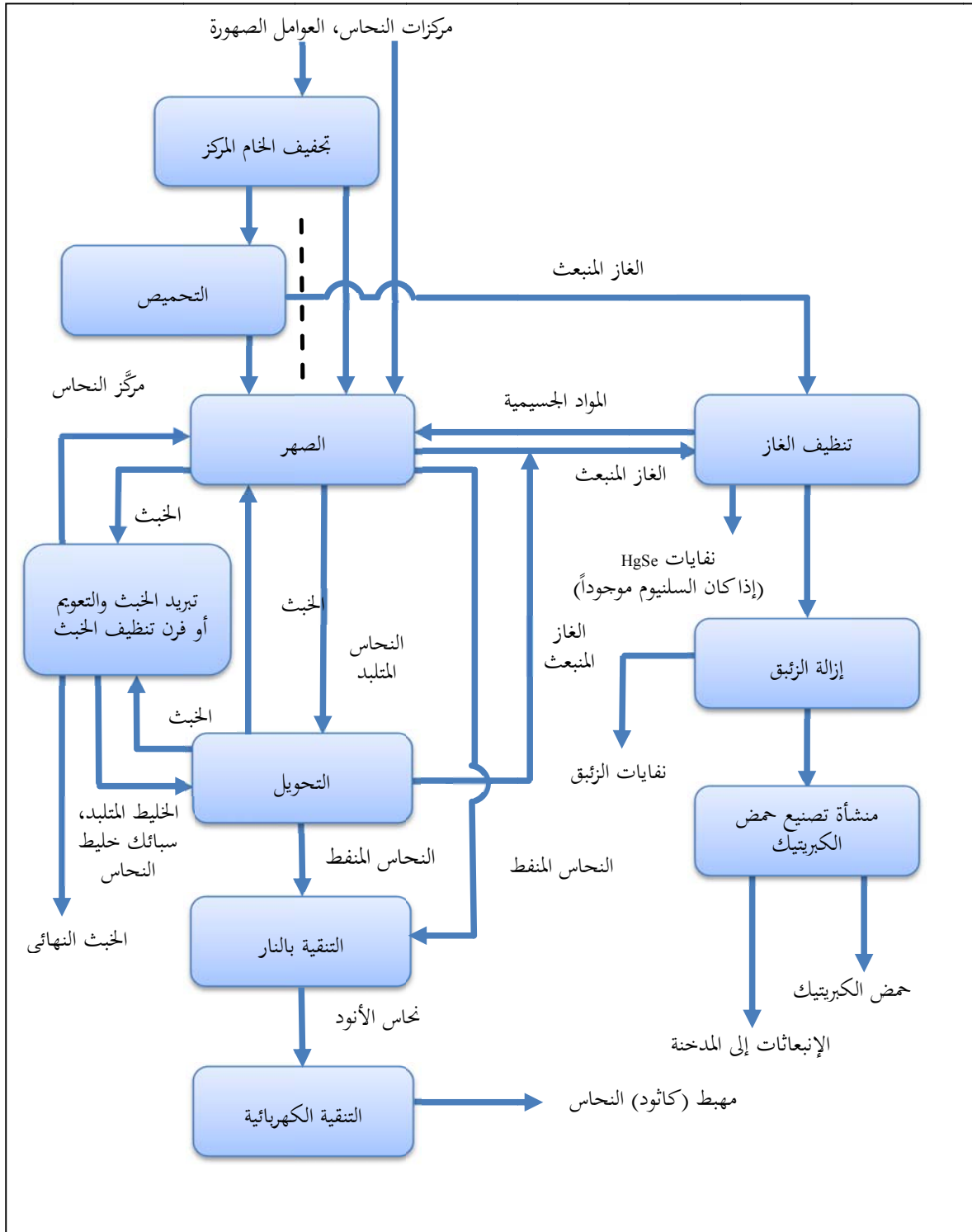
وكبديل لعملية المعالجة في فرن لتنظيف الخبث، يمكن أن يتم تنظيف الخبث باستخدام تقنيات للمعالجة المعدنية. فبعد انخفاض درجة حرارة الخبث ببطء، يتم سحقه وطحنه ومعالجته بالتعويم. وينتج هذا خاماً مركزاً يحتوي على النحاس، يعاد بعد ذلك إلى المصهر.

2-3-7 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 35 و40 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، ويكس في أبراج للتبريد.
- ويتحرر السلينيوم الموجود في مركبات النحاس أثناء عمليات الصهر والتحويل، ويكون موجوداً بعدئذ في غاز عملية الصهر كأكسيد السلينيوم. وينحل أكسيد السلينيوم في محلول الشطف الحمضي الضعيف ويحتزل في الحال بواسطة ثنائي أكسيد الكبريت ليشكل السلينيوم الأحمر، الذي يتفاعل بدوره مع الزئبق النقي لتشكيل سلينيد الزئبق (HgSe). وسلينيد 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 3: العمليات التي ينطوي عليها الإنتاج الأساسي للنحاس

4-2 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 4 نظرة عامة عن العمليات التي ينطوي عليها التصنيع.

2-4-1 التحميص

يجري تلقيم ركاز الذهب المطحون في جهاز التحميص، ويحتوي الركاز عادة على نسبة زئبق تتراوح بين صفر و100 جزء في المليون. وتعمل أجهزة التحميص عادة في نطاق درجات حرارة 500 - 600 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 99 في المائة بناءً على عمليات تركيب تجهيزات ضوابط مماثلة في العمليات التجارية القائمة.

2-4-2 النض

يضاف الماء إلى مخرجات جهاز التحميص في حوض رجّاج يجري فيه خلط الماء والمواد الصلبة الناتجة عن جهاز التحميص، لتكوين الملائط. ويرسل هذا الملائط 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 الملائط النهائي، بعد أن يستنفد منه الذهب والزئبق، بعملية معادلة وإزالة سمية، ثم يرسل كنفائات 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.

2-4-3 التجريد وإعادة التشكيل

يغسل الكربون المحمّل 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 700 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)).

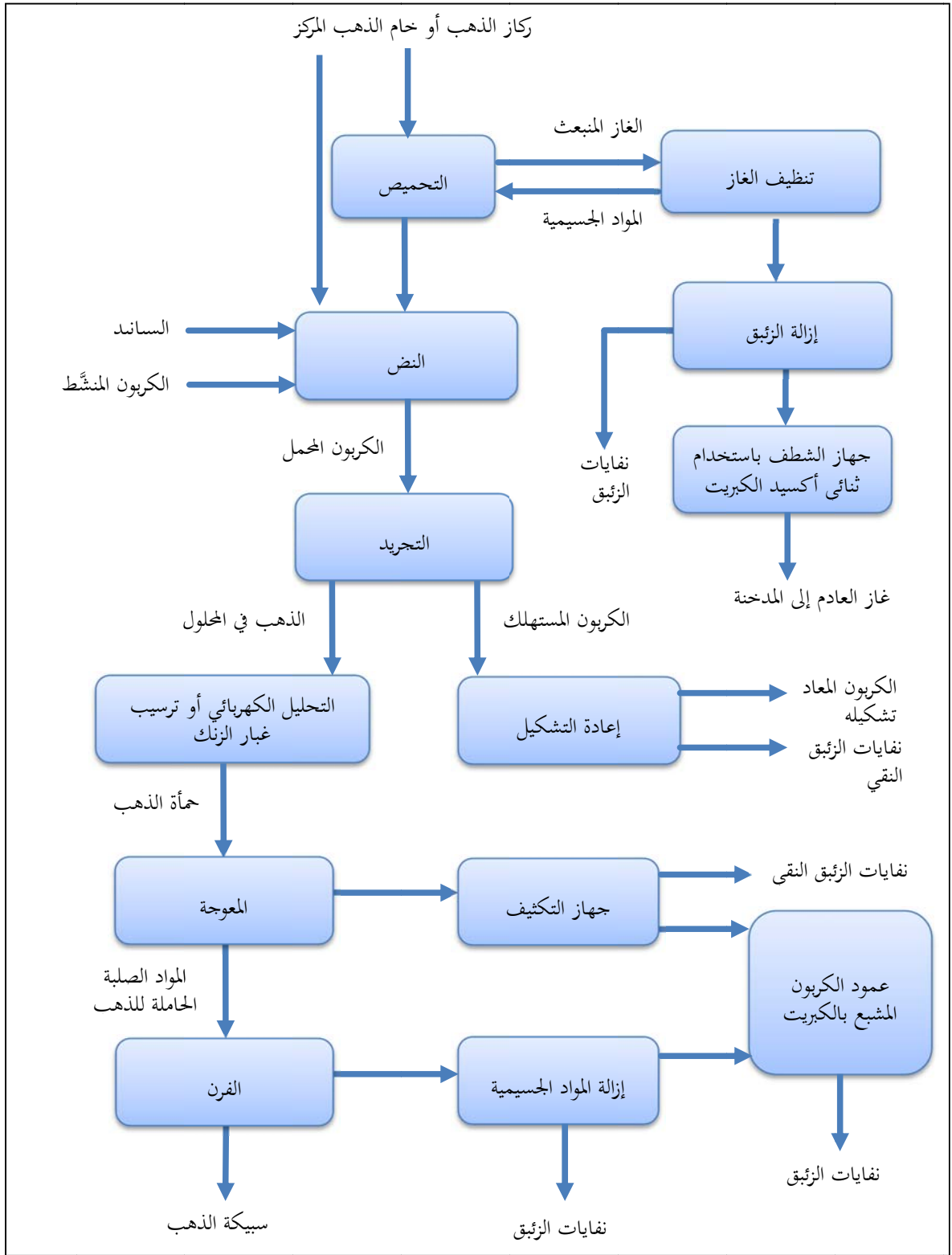
وينتظر أن تكون نسبة إجمالي الزئبق المزال من الفرن الحراري لإعادة تشكيل الكربون أكبر من 99 في المائة بناءً على التجارب المستفاد من الضوابط المماثلة في العمليات التجارية القائمة. وعلى الرغم من أن أفران إعادة تشكيل الكربون تتجاوز نطاق المرفق دال من اتفاقية ميناماتا، فمن المهم الإشارة إلى أنها قد تمثل مصدراً هاماً لانبعاثات الزئبق، في الحالات التي لا يتم فيها ضبط هذه الانبعاثات.

2-4-4 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 600 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. وينتظر أن تكون نسبة إجمالي الزئبق المزال من غازات المعوجة أكبر من 99 في المائة بناءً على عمليات تجهيز ضوابط مماثلة في إحدى المنشآت العاملة حالياً.

2-4-5 الفرن

يستخدم الفرن لتسخين المواد الصلبة المخففة 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. ويمرّ غاز المنفذ بعد ذلك من خلال وعاء يحتوي على الكربون المنشط المشرب بالكبريت، حيث يرتبط الزئبق كيميائياً مع الكبريت ليشكل مركب الزئبق المستقر. وينتظر أن تكون نسبة إجمالي الزئبق المزال من الغازات المنبعثة من منفذ الفرن أكبر من 99 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 يحتمل أن تشكل الأفران إلا مصدراً ضئيلاً من مصادر انبعاثات الزئبق.



الشكل 4: العمليات التي ينطوي عليها الإنتاج الأساسي للذهب

3- تقنيات ضبط الانبعاثات

توصف في الأقسام التالية التقنيات الرئيسية المستخدمة لتخفيف انبعاثات الزئبق في الهواء، والمتصلة بعمليات التحميص والصهر والتقية 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.

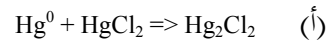
ويتطير الزئبق في درجات الحرارة السائدة في معظم عمليات تخفيف الانبعاثات، ولذلك تلزم تقنيات خاصة بالقطاع لإزالته. وفي حالة إزالة الزئبق قبل منشأة تصنيع حمض الكبريتيك، سيكون الزئبق المتبقي موجوداً في الحمض المنتج. وكثيراً ما تحدّد نوعية الحمض بمصطلحات مثل النوعية التجارية، النوعية التقنية، والنوعية الإلكترونية (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 1,0 جزء في المليون، أي ما يعادل حوالي 0,02 مليغرام لكل متر مكعب عادي في الغاز المنظّف،⁽¹⁾ على الرغم من أن بعض التطبيقات قد تتطلب تركيزات أقل بكثير.⁽²⁾

3-1 عملية بوليدين-نورزينك

3-1-1 الوصف

عملية بوليدين-نورزينك (التي تسمى أيضاً عملية جهاز أوتوتيك للشطف بالكلوريد أو عملية Outotec BN⁽³⁾) تزيل الزئبق النقي من الغازات الناتجة كنفائيات 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⁽⁴⁾ في البرج المعبأ. وتتم أكسدة الزئبق النقي الموجود على شكل بخار في الغازات الناتجة كنفائيات، 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 كنفائيات من القاعدة إلى القمة. ويعبأ البرج بمواد تغليف مصنوعة من البوليبروبيلين، (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 المتوج (شيفرون) أو طراز اللوح الشبكي (mesh-pad) عند منفذ خروج البرج لمنع خروج محلول الشطف من النظام. وتتم العملية في درجة حرارة 40 درجة مئوية أو أقل، ويقدر انخفاض الضغط بواسطة برج الشطف بنحو 1 كيلو باسكال.

¹ www.mercuryconvention.org/Portals/11/.../EG1/EU_information.pdf; accessed 24 March 2015

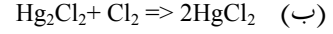
² http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/Properties/properties_acid_quality.htm; accessed 24 March 2015

³ <http://www.outotec.com/en/About-us/Our-technologies/Gas-cleaning/Mercury-removal/#tabid-2>. accessed 24 March 2015

⁴ http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/Properties/properties_acid_quality.htm; accessed 24 March 2015

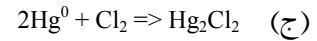
وينتج عن العملية كالميل غير قابل للانحلال في الماء. ويترسب من المحلول المائي وتتم إزالته في القسم السفلي من البرج كملاط كثيف. ويعاد بعد ذلك تدوير المحلول المائي إلى جهاز الشطف. وفي الظروف المثالية للعملية، يتفاعل الزئبق النقي بالكامل تقريباً مع كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ).

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):



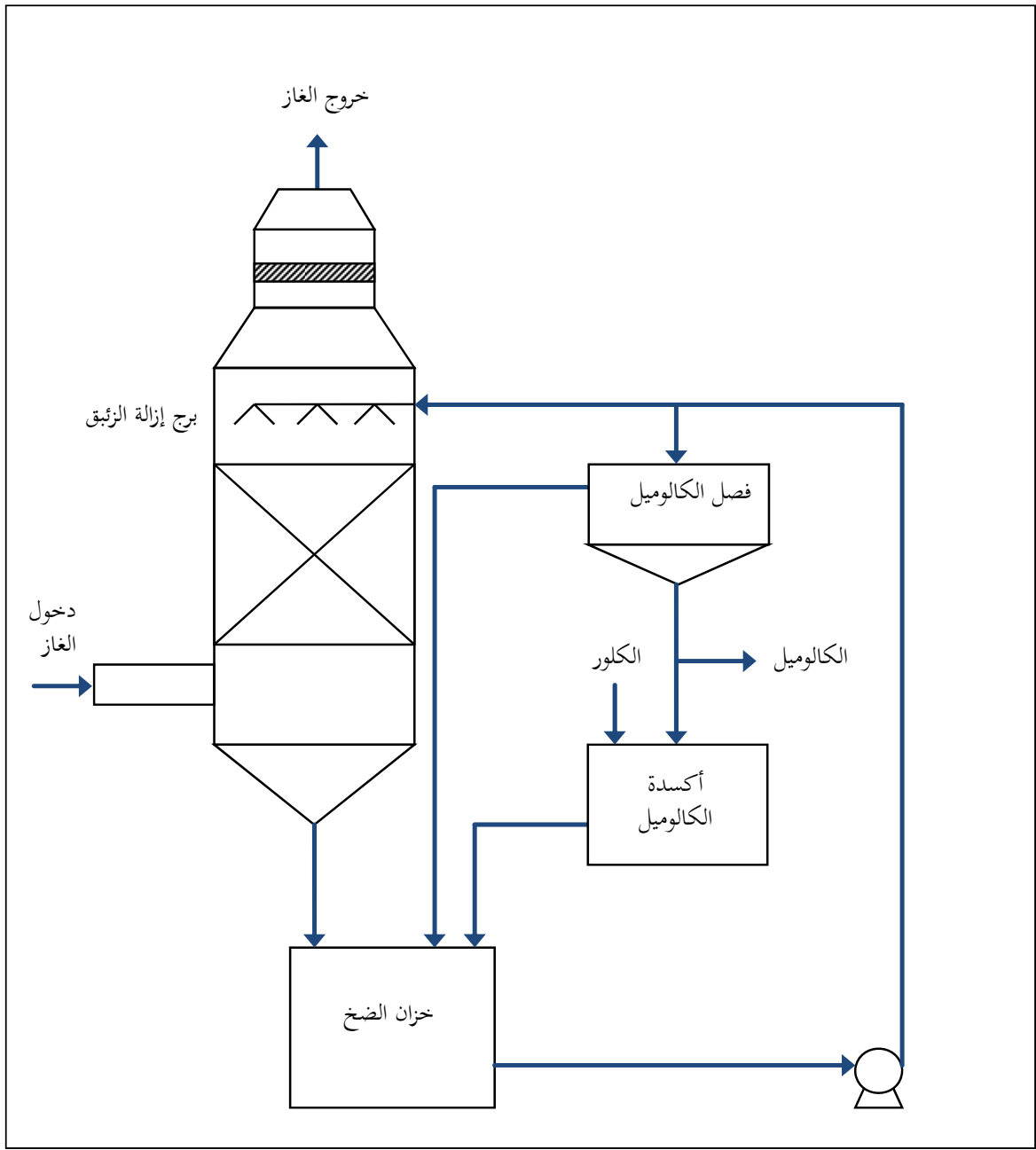
وبمجرد أن يعاد توليد محلول الكالوميل المعالج بالكامل، يتم ضخه إلى صهريج تخزين. وعند استنفاد تركيز كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) في دورة محلول الشطف، يضاف مجدداً محلول كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) الذي أعيد توليده من صهريج التخزين، وذلك للمحافظة على تركيز كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) في دورة الشطف.

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. وتكرر 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 5 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 5: رسم تخطيطي لعملية بوليدين-نورزينك التي تنطوي على استرداد كلوريد الزئبق (أحادي التكافؤ) Hg_2Cl_2 (Hultbom 2003)

2-1-3 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 40 منشأة صناعية في جميع أنحاء العالم.

3-1-3 الأداء

تعتمد كفاءة الإزالة على محتوى الزئبق في منفذ إدخال الغاز الناتج كنفائات، والذي يكون عادة 99,7 في المائة. وفي العادة يتراوح تركيز الزئبق عند منفذ خروج الغاز بين 0,3 و 0,5 جزءاً في المليون⁽⁵⁾ (Hultbom 2003; UNECE 2013). ويمكن أيضاً الوصول إلى تركيز زئبق يتراوح بين 0,3 و 0,5 جزءاً في المليون عند منفذ خروج الغاز، بتركيزات لمنفذ الدخول تتجاوز 100 مليغرام من الزئبق لكل متر مكعب من الغاز في الظروف العادية (100 mg/Nm³) (Hultbom 2003).⁽⁶⁾

الجدول 3

أداء عملية بوليدين-نورزينك في مصهر بوليدين رونسكار (Boliden Rönnskar) (BREF NFM 2014)⁽⁷⁾

كفاءة التقليل [النسبة المئوية]	بعد [µg/Nm ³]	قبل [ميكروغرام/متر مكعب في الظروف العادية] [µg/Nm ³]	تدفق الغاز 30 000 متر مكعب في الظروف العادية كل ساعة (Nm ³ /h)
99,7	30	9879	تركيز عال عند منفذ الدخول
74	13	51	تركيز منخفض عند منفذ الدخول

4-1-3 الآثار الشاملة لوسائط متعددة

تشمل الآثار الناتجة عن العملية والشاملة لعدة وسائط ما يلي:

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

5-1-3 تكاليف التركيب والتشغيل

نظراً لانخفاض درجة حرارة التشغيل (أقل من 40 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 لتعويض 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 كنفائات⁽⁴¹⁾ (Hultbom 2003) وتعرف هذه العملية بأنها مجدية اقتصادياً. وفي آروبيس هامبورغ (Aurubis Hamburg)، وصلت تكاليف الاستثمار في تركيب منشأة لإزالة الزئبق إلى 5 ملايين دولار (بما في ذلك أجهزة التثقيب والتسخين والمرشحات الكيسية، وأنظمة الحقن وجهاز الامتصاص والمراوح). (BREF NFM 2014).

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

(6) Nm³ هو المتر المكعب في الظروف العادية (normal cubic metre) ويشير إلى الغاز المقاس عند ضغط جوي 1 ودرجة حرارة صفر درجة مئوية.

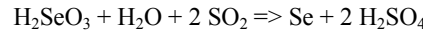
(7) لجنة الأمم المتحدة الاقتصادية لأوروبا، بروتوكول المعادن الثقيلة، المتاح على الرابط: http://www.unece.org/env/lrtap/hm_h1.html؛ جرى الاطلاع على الصفحة في 24 آذار/مارس 2015.

2-3 مرشح السليوم

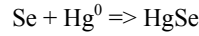
1-2-3 الوصف

تزيل عملية مرشح السليوم⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾ 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 سليد 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 حاملة مسامية مشابحة 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 سليد الزئبق (ثنائي التكافؤ):



ويكون زمن التماس مع المرشح حوالي 1-3 ثوان.

ويظل المرشح فعالاً حتى يصل مستوى الزئبق في المرشح إلى 10-15 في المائة. وتجري معالجة المرشح بعد ذلك لاسترداد الزئبق وإعادة توليد السليوم.

ويكون ضغط البخار للزئبق في درجات الحرارة من صفر إلى 100 درجة مئوية منخفضاً جداً بالمقارنة مع سليد 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 110 درجات مئوية في غازات مشبعة ببخار الماء. غير أنه ينبغي تجنب التكثف داخل المرشح.

ويكون انخفاض الضغط من رتبة 600 باسكال بالنسبة لمرشح من مرحلة واحدة بزمن احتجاز قدره 3 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 0,05 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 سليد الزئبق (ثنائي التكافؤ) (HgSe) في درجات حرارة تصل إلى حوالي 140 درجة مئوية (Hultbom 2003).

3-2-2 قابلية التطبيق

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

3-2-3 مستوى الأداء

تتوقف كفاءة الإزالة على زمن الاحتجاز. ومن أجل تحقيق مستويات كفاءة إزالة بنسبة 95 في المائة، تلزم في العادة فترة احتجاز قدرها ثلاث ثوان (Hultbom 2003). وفي العادة، تتحقق مستويات 90 في المائة لكفاءة الإزالة.⁽³⁸⁾ ويكون الحد الأدنى المتوقع لمتوسط تركيز الزئبق في منفذ خروج الغاز كل ساعة أقل من 0,01 (mg/Nm³) مليغرام في المتر المكعب في الظروف العادية (UNECE Heavy Metals Protocol 2013). وتبين الجداول التالية تخفيضات الزئبق القياسية.

الجدول 4

أداء عملية مرشح السليوم في منشأة بوليدين رونسكار⁽⁴¹⁾ (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 80,000 متر مكعب في الظروف العادية كل ساعة (Nm ³ /h)
95	48	1008	تركيز عال عند منفذ الدخول
71	12	42	تركيز منخفض عند منفذ الدخول

الجدول 5

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
99	50>	6000	تركيز عال عند منفذ الدخول

3-2-4 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 تتوافق 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 200 000 متر مكعب/ساعة، فتشير إلى استثمار أولي يبلغ حوالي 3 ملايين يورو، تضاف إليه تكلفة 70 طناً من السليوم بسعر 35 000 يورو للطن الواحد.

3-2-5 الآثار الشاملة لوسائط متعددة

تؤدي العملية إلى آثار محتملة على الهواء والمياه بسبب تبخر الزئبق النقي أو أكسيد الزئبق من إنتاج النفايات المؤلفة من سكيند 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.

3-3 الكربون المنشط

1-3-3 الوصف

الكربون المنشط المشرب بالكبريت⁽⁸⁾ 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 المصنّعين. وقد يلزم التخفيض المسبق لدرجة حرارة تيار الغاز. ثانياً، إذا كان تيار الغاز يحتوي على نسبة رطوبة أعلى من 10 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.

2-3-3 قابلية التطبيق

يمكن استخدام الكربون المنشط لإزالة جميع أشكال انبعاثات الزئبق: الغازية والجسيمية، والأولية والمؤكسدة. وهو قادر على امتصاص نسبة تتراوح بين 10 و40 في المائة من وزنه من الزئبق قبل أن يلزم استبداله. وبالإضافة إلى ذلك، فالكربون المشرب بالكبريت (15 إلى 20 في المائة بالوزن) يتسم بالكفاءة في تشكيل مادة ماصة مستقرة.

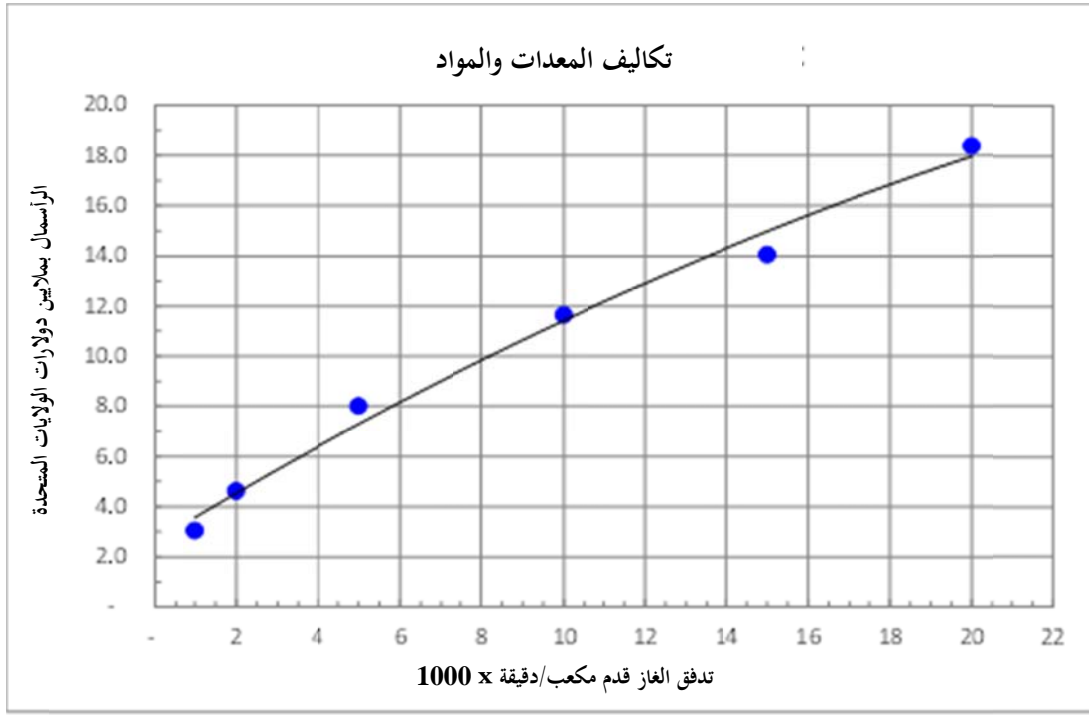
3-3-3 مستوى الأداء

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 99 في المائة من الزئبق، محققاً تركيزاً يبلغ 0,01 ملليغرام/متر مكعب. وتتباين مواصفات المصنّعين لامتناس الكربون للزئبق من 10 إلى 40 في المائة. وعلى الرغم من ذلك، يحمّل الكربون في العادة بنسبة 20 في المائة مقابل وزنه قبل أن يتم استبداله. ويجري التخلص من الماص المستهلك كنفائات 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.

(8) 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.

3-3-4 تكاليف التركيب والتشغيل

يمثل معدل التدفق الحجمي للغاز المراد معالجته أحد العوامل التي تدفع التكلفة الرأسمالية. ويخلص الشكل 6 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 6: التكاليف الرأسمالية للمعدات والمواد في مرشحات الكربون المنشط المشرب بالكبريت، باعتبارها تابعاً لتدفق الغاز (وحدة التدفق هي قدم مكعب/دقيقة، حيث 1 قدم مكعب/دقيقة = 1,3 متر مكعب/ساعة).

وتتمثل التكاليف الرئيسية للعملية في استبدال ما يستهلك من الكربون المنشط المشرب بالكبريت أو التخلص منه أو معالجته في المعوجات. ويعتمد معدل الاستبدال على محتوى الزئبق في تيار الغاز المتدفق. وتبلغ تكلفة استبدال الكربون المشرب بالكبريت في أمريكا الشمالية 6,6 دولارات/كيلوغرام.

3-3-5 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).

3-3-6 الآثار الشاملة لوسائط متعددة

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

3-3-4 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. وتقرر 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 99 في المائة لإزالة الزئبق، وتتراوح نسب تركيز انبعاثات الزئبق الناتجة عن ذلك بين 0,01 و 0,05 ميليغرام/متر مكعب في الظروف العادية (mg/Nm³).

وتم الحصول على التكاليف الإرشادية من مصادر القطاع الصناعي: تبلغ كلفة الاستثمار المبدئية لبرج دووا طاقته 200 000 متر مكعب في الساعة حوالي 5,5 ملايين دولار، وتضاف إلى ذلك تكلفة 500 متر مكعب من مواد الترشيح التي تبلغ 1 800 يورو للطن الواحد، ويبلغ متوسط عمرها النافع 5-10 سنوات.

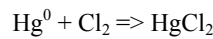
5-3 عملية جيريت (Jerritt process)

1-5-3 الوصف

تستخدم عملية جيريت حالياً في منجم واحد من مناجم الذهب، وهي مبنية في الشكل 7. وتزيل العملية الزئبق النقي من الغازات الناتجة ككفايات في جهاز التخميص 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 2009 من جانب الشركة الكندية يوكن-نيفادا غولد (Yukon-Nevada Gold Corporation) في منشأة تخميص الرصاص التابعة لها في وادي جيريت (إيلكو، نيفادا، الولايات المتحدة). وفي وقت لاحق، في عام 2010، 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 ككفايات، وذلك بواسطة محلول شطف مكون من الماء والكلور الذائب:



ويتألف البرج من وعاء أسطواني مقوى بألياف زجاجية عمودية، يمرر من خلاله الغاز الناتج ككفايات من القاعدة إلى القمة. ويعبأ البرج بمواد تغليف مصنوعة على شكل سروج من البوليبروبيلين. 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 الطراز الشبكي عند منفذ خروج البرج لمنع خروج محلول الشطف من النظام. وتجري العملية عند درجة حرارة 40 درجة مئوية، أو أقل. وينخفض الضغط بواسطة البرج بمقدار حوالي 1 كيلو باسكال.

ويعاد تدوير المحلول الحمضي إلى جهاز الشطف، ويزال من المحلول المعاد تدويره تيار صرف يعادل في حجمه للمحلول المتحكم بدرجة الحموضة والرذاذ المنزل 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).

2-5-3 قابلية التطبيق

يمكن تطبيق هذه العملية على جميع الغازات الناتجة ككفايات من جهاز التخميص، 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 تخميص جيريت، وهي فعالة أيضاً للمستويات المنخفضة من الزئبق التي تنتجها أجهزة جيريت لتجفيف الرصاص.

3-5-3 الأداء

تبلغ كفاءة الإزالة عادة 99,97 في المائة. ويتراوح تركيز الزئبق عند منفذ الخروج عادة بين 0,004 و 0,005 جزءاً في المليون.

3-5-4 الآثار الشاملة لوسائط متعددة

تشمل الآثار الناجمة عن العملية والشاملة لوسائط متعددة ما يلي:

- الآثار المترتبة على الهواء والمياه بسبب إنتاج نفايات الكالوميل الصلبة (يمكن تجنبها في حالة تطبيق التحليل الكهربائي على كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) أو بالتخلص من تيار الصرف الناتج عن جهاز الشطف في مشحّن جهاز التحميص).

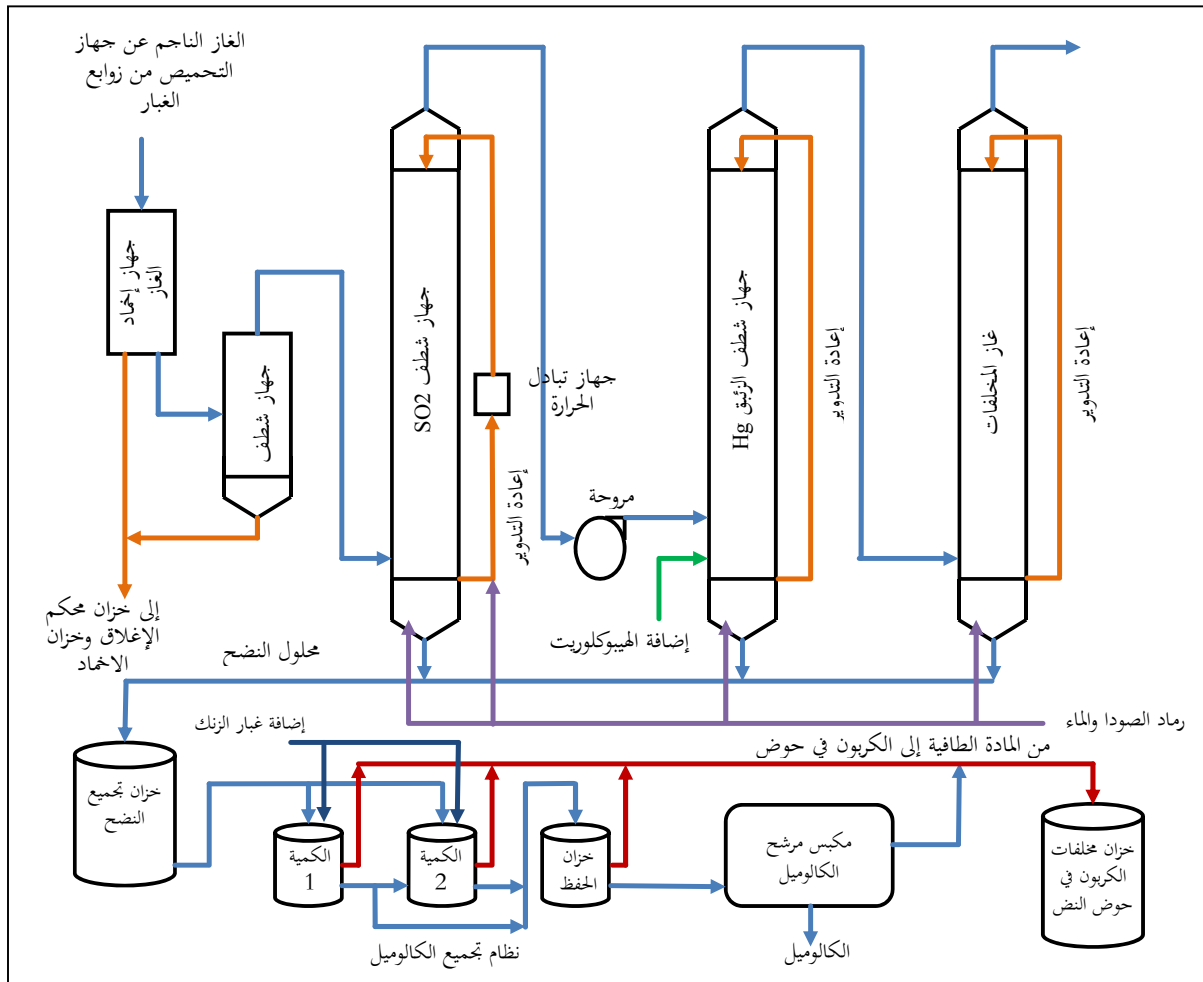
3-5-5 تكاليف التركيب والتشغيل

نظراً لانخفاض درجة حرارة التشغيل (أقل من 40 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.

تكون تكاليف التشغيل مستقلة عملياً عن مستوى الزئبق في الغاز الناتج كنفائات.



الشكل 7: رسم تخطيطي لعملية جيريت مع خيار استرداد كلوريد الزئبق Hg_2Cl_2

3-6 المنافع المشتركة للتكنولوجيات الشائعة الرامية إلى تخفيض تلوث الهواء وتقنيات ضبط الزئبق في منشآت تصنيع الحمض

3-6-1 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.

3-6-1-1 المرشحات الكيسية

يشيع 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.

3-6-1-2 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 وحماة 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 الجسيمي، وذلك عندما تعمل بالاقتران مع تقنيات أخرى مثل أجهزة الشطف وأجهزة تبريد الغاز.

3-6-1-3 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 وحماة. 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، متنسقة 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 السليسيوم.

3-6-2 الجمع بين تنظيف الغاز ومنشآت تصنيع الحمض

3-6-2-1 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⁽⁹⁾ 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 فعالة في بعض مصاهر النحاس والرصاص والزنك.

3-2-6-3 قابلية التطبيق

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

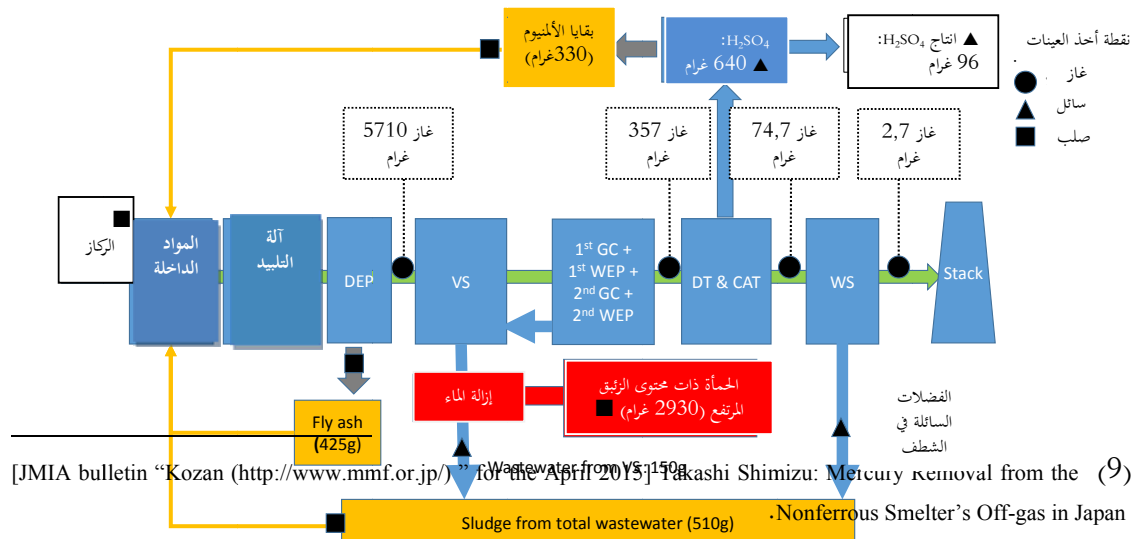
ويرد مثال على هذه المنشآت في دراسة يابانية مفصلة (Takaoka et al. 2012)، أجريت في مصهر للزنك يستخدم عملية الصهر بالفرن العالي، واستخدم فيها حساب شامل لتوازن كتلة الزئبق على النحو المبين في الشكل 8.

3-2-6-3 مستوى الأداء

تبين نتائج الدراسة اليابانية الفعالة للأسلوب الذي يجمع بين منشآت تنظيف الغاز وتصنيع الحمض في احتجاز الزئبق. ووجد أن التركيزات الإجمالية للزئبق في غازات الصهر تتراوح ضمن نطاق 1,7 إلى 6,1 (µg/Nm³) ميكروغرام/متر مكعب عادي (Takaoka et al. 2012).

3-2-6-3 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.



(نشرة JMIA عن نيسان/أبريل 2015 - تاكاشي شيميزو: إزالة الزئبق من الغازات الناتجة عن مصاهر المعادن غير الحديدية في اليابان).

الدليل: DEP: مرسب كهروستاتيكي جاف، VS: جهاز شطف من نوع فتوري (Venturi Scrubber)، GC: مربرد غاز (Gas Cooler)، WEP: مرسب كهروستاتيكي رطب، DT: برج تجفيف (Dehydration Tower)، CAT: عملية التحويل وبرج الامتصاص، WS: جهاز شطف رطب الشكل 8: توازن الكتلة للزئبق حول مواقع إنتاج حمض الكبريتيك في مصنع ياباني للزنك يستخدم عملية الصهر بالفرن العالي (Takaoka et al.2012)

3-2-5 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.

3-2-6 الآثار الشاملة لوسائط متعددة

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.

4- أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية

4-1 لمحة عامة عن أفضل التقنيات المتاحة

ترد في الجدول 5 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 3-6، قد تحقق المنافع المشتركة لتقنيات تخفيف التلوث بالغاز والجسيمات ومنشآت تصنيع الحمض أيضاً قدراً مقبولاً من الانبعاثات الطفيفة للزئبق.

الجدول 5

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)⁽³⁸⁾⁽⁴¹⁾ (UNECE 2013)

تقنيات التحكم بالانبعاثات	الوصف	الأداء القياسي (كفاءة إزالة الزئبق) ⁽¹⁾	المزايا/التعليقات	المساوي
عملية بوليدين-نورزينك	بناء على جهاز شطف رطب باستخدام تفاعل بين كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) والزئبق لتشكيل كلوريد الزئبق (أحادي التكافؤ) (كالوميل) الذي يترسب من المحلول المائي.	99,7 في المائة - تركيز منفذ الدخول: حوالي 9900 ميكروغرام/متر مكعب 74 في المائة - التركيز لمنفذ الدخول 51 ميكروغرام/متر مكعب	ثبتت على نطاق واسع	معالجة غاز الكلور معالجة الكالوميل التخلص من الكالوميل كفنايات خطرة
مرشحات السليوم	يتألف مرشح السليوم من مادة مسامية خاملة مشبعة بحمض السيلينوز، ويتم بعد ذلك تحفيظها لترسيب السليوم الأحمر غير المتبلور. ويتفاعل السليوم الأحمر غير المتبلور مع الزئبق في الغاز لتشكيل سلفيد الزئبق (HgSe).	95 في المائة - التركيز لمنفذ الدخول 1000 ميكروغرام/متر مكعب 71 في المائة - التركيز لمنفذ الدخول 42 ميكروغرام/متر مكعب	تناسب بوجه خاص التركيزات المنخفضة للزئبق في الغاز جرى تركيبها بنجاح في المنشآت الميتالورجية	تركيز محدود للزئبق عند منفذ الدخول يلزم التخلص السليم بيئياً من المرشح المستهلك.
طبقات الترشيح	الكربون المنشط معروف	97 في المائة	الكربون المنشط المشرب	يلزم التخلص من

المكونة من الكربون المنشط	جداً بخصائص الامتصاص. وبالنسبة لامتصاص الزئبق، يمكن للكربون المنشط أن يمتص 10-12 في المائة من وزنه.	- التركيز لمنفذ الدخول 1200 ميكروغرام/متر مكعب 93 في المائة - التركيز لمنفذ الدخول 37 ميكروغرام/متر مكعب	بالكبريت متاح تجارياً تزيل الزئبق النقي Hg^0 والأنواع الأخرى احتمال منخفض لارتشاح الزئبق من الكربون المستهلك	الكربون المستهلك في مدافن القمامة
تقنية دووا (DOWA)	تعتمد على امتصاص الزئبق في حجر خفاف مكسو بطبقة من كبريتيدات الرصاص.	97 في المائة - التركيز لمنفذ الدخول 50 ميكروغرام/متر مكعب 88 في المائة - التركيز لمنفذ الدخول 11 ميكروغرام/متر مكعب		غير مستخدمة على نطاق واسع التخلص من كبريتيد الزئبق ككفايات خطرة
تقنية جيريت (Jerritt)	تعتمد على تحويل الزئبق النقي إلى كلوريد الزئبق (ثنائي التكافؤ) عن طريق التفاعل مع الكلور الذائب Cl_2 .	97,99 في المائة	كفاءة عالية جداً في إزالة الزئبق	التخلص من المنتجات الثانوية على نحو يتفق مع المواد الأخرى ذات الصلة من الاتفاقية

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

4-1-1 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 يراد 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 المرسبات 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 6 بعض العوامل التي تؤثر على توزيع الزئبق في نظام تنظيف الغاز في بيئة المصهر.

الجدول 6: 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 ^o أو بدلاً من ذلك H ₂ S _(g)	تشكيل HgSe أو HgS (جسيمات)، التي تستعاد بواسطة المرشحات الكيسية أو المرسبات 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 ^o بعد برج بوليدين-نورزينك
عمل جهاز الترسيب الكهروستاتيكي الرطب	تلتزم الكفاءة العالية؛ وبدونها ستنتقل 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.

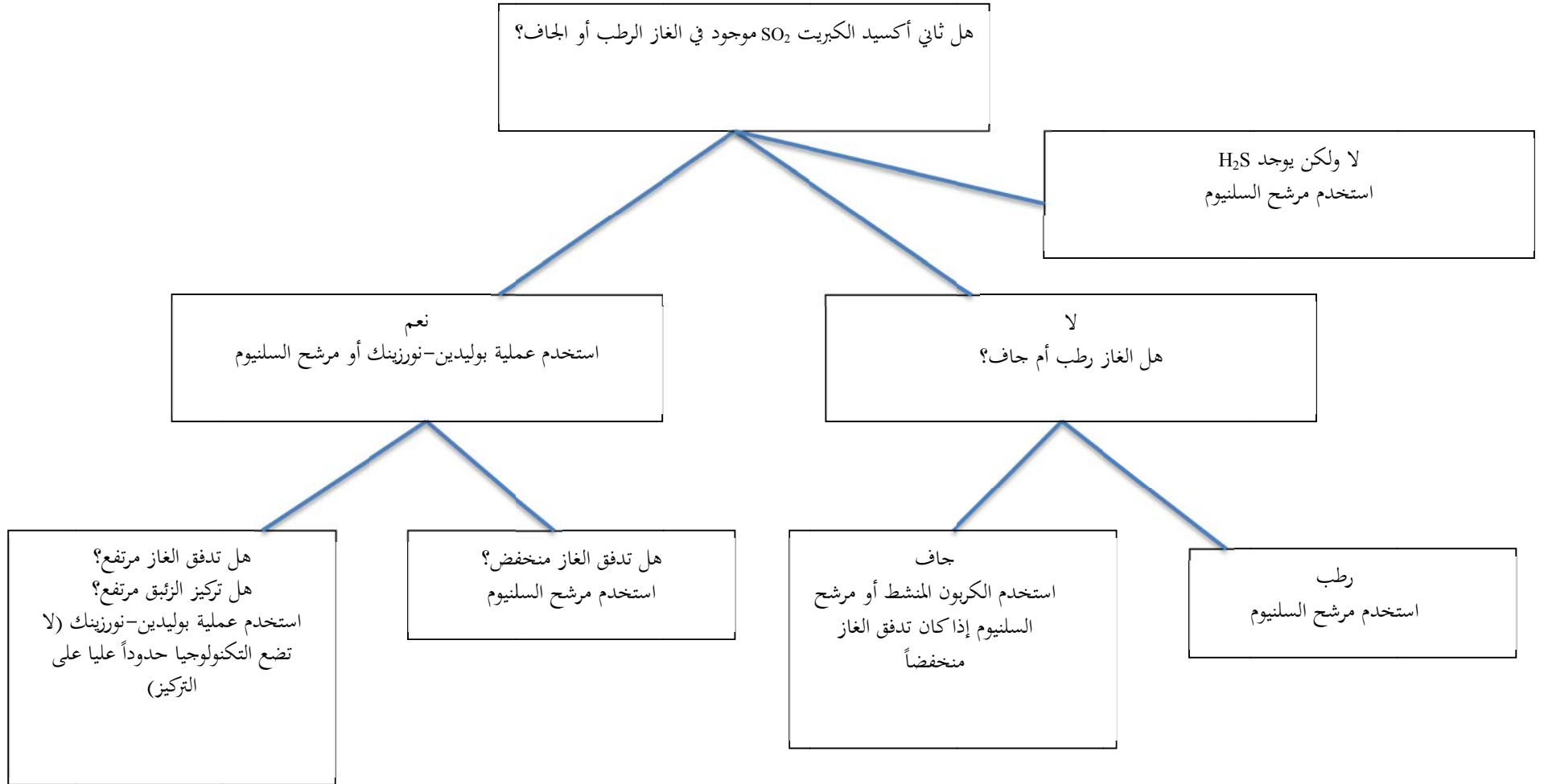
وتكون شروط نقاء الغاز اللازمة من أجل عمليات إزالة الزئبق هي نفسها تقريباً تلك المطلوبة لمنشآت تصنيع الحمض. وفيما يتعلق بالحالة المحددة لعملية بوليدين-نورزينك، تكون قياسات ضغط بخار الزئبق في السوائل الدائرة حساسة لدرجات الحرارة. ولهذا السبب، ينبغي أن تكون درجة حرارة الغاز الداخلة منخفضة قدر الإمكان. ويرد في الجدول 7 بيان للمتطلبات العادية بالنسبة لغاز منفذ الدخول إلى مرحلة إزالة الزئبق في عمليات بوليدين-نورزينك والثيوكبريتات ومرشح السليوم.

الجدول 7: جودة الغازات والخصائص اللازمة بالنسبة لغاز منفذ الدخول إلى مرحلة إزالة الزئبق في عمليات بوليدين-نورزينك والثيوكبريتات ومرشح السليوم (بيانات القطاع الصناعي المقدمة من أوتوتيك)

البارامتر	عملية بوليدين-نورزينك	عملية الثيوكبريتات	مرشح السليوم
الغبار	الحد الأقصى 1 مليغرام/متر مكعب في الظروف الطبيعية	الحد الأقصى 1 مليغرام/متر مكعب عادي (بعد مرحلة المرسب الكهروستاتيكي الرطب)	الحد الأقصى 10 مليغرام/متر مكعب عادي
رذاذ حمض الكبريتيك	الحد الأقصى 20 مليغرام/متر مكعب في الظروف الطبيعية	الحد الأقصى 20 مليغرام/متر مكعب عادي (بعد مرحلة المرسب الكهروستاتيكي الرطب)	الحد الأقصى 20 مليغرام/متر مكعب عادي
درجة حرارة الغاز	40 درجة مئوية كحد أقصى	ليست ذات أهمية حرجة	90 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 تلتزم فيها إزالة كبيرة للزئبق من الغاز. وكانت التكنولوجيات الثلاث الواردة في الوصف هي عملية بوليدين-نورزينك ومرشح السليوم 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 9.

ويراد من هذا الشكل أن يكون دليلاً عاماً لخيارات التكنولوجيا المحتملة وقد لا يكون مناسباً في كثير من الحالات، على سبيل المثال عندما يوجد السليوم 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 9: اعتبارات التحكم بالزئبق عندما يلزم مستوى عال من إزالة الزئبق، وتشمل الخيارات عمليات بوليدين - نورزينك ومرشحات السليوم والكربون المنشط

2-4 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 ممارسات بيئية مثلى 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.

1-2-4 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.

2-2-4 مزج المواد الأولية لضبط انبعاثات الزئبق

المرج هو عملية تشغيلية تنفذ لإنتاج مادة تلقيم 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 المرج 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 تلقيم 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 بالمرج، 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 الملاط 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 بناء 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 أمرجة دقيقة.

3-2-4 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 للتشغيل 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.

4-2-4 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.

4-2-5 إدارة النفايات الناتجة عن ضبط تلوث الهواء والتخلص منها على نحو سليم بيئياً

- من أجل منع الانبعاثات غير الضرورية، ينبغي أن تستخدم المنشآت الصناعية التهج 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 3 من الاتفاقية؛
 - والتخلص من نفايات الزئبق على نحو يتفق مع المواد الأخرى ذات الصلة من الاتفاقية.

5- 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 متماثلة، 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 التلقيح 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.

1-5 أساليب القياس المباشر

1-1-5 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.

2-1-5 مصادم 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 لتكيب 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.

3-1-5 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.

2-5 الأساليب غير المباشرة للقياس

1-2-5 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 تشج بيانات أساسية لاستخدامها في توازن الكتلة. ويمكن الحصول من موّرد 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).

وبسبب 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.

5-2-2 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 محمص، 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 وانبعاثات الزئبق. ولبحث الأخذ بالنظم التنبؤية لرصد الانبعاثات، ينبغي أولاً إجراء تحليل دقيق للوقوف على مدى عدم الموثوقية الذي تنطوي عليه هذه الطريقة في كل حالة على حدة.

5-2-3 عوامل الانبعاث

بالنسبة لقطاع صهر وتنقية المعادن غير الحديدية، قد تتباين الانبعاثات 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 الانبعاث، قد تتضمن الانبعاثات المقدرة هامشاً كبيراً للخطأ. وبصفة خاصة، ينبغي أن تعتبر التقديرات التي تستخدم عوامل الانبعاث العامة المنشورة إشارة تقديرية إلى مستويات الانبعاثات. وسيكون أحد النهج البديلة هو وضع عوامل انبعاث 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.