



Piotr KUNECKI<sup>1</sup>, Dorota CZARNA-JUSZKIEWICZ<sup>1</sup>, Rafał PANEK<sup>2</sup>, Magdalena WDOWIN<sup>1</sup>

## **Instalacja pomiarowa do sorpcji rtęci z gazów na sorbentach stałych**

Streszczenie: Problem emisji rtęci oraz potrzebę podjęcia działań w tym kierunku zauważono w roku 2013 w konwencji Minamata (UNEP 2013), stąd coraz częściej zaczynają pojawiać się prace i nowe przepisy nakazujące redukcję tego związku ze środowiska. W pracy przedstawiono problem usuwania rtęci z gazów odlotowych z uwagi na nowe restrykcje BREF/BAT, w których poruszono też problem potrzeby poszukiwania nowych wydajniejszych rozwiązań usuwania tego zanieczyszczenia. Zwrócono uwagę na problem występowania rtęci w spalinach w formie elementarnej oraz potrzebę realizowania testów laboratoryjnych. Zaprezentowano prototypową instalację do testów sorpcji rtęci elementarnej w czystym strumieniu gazu na sorbentach stałych. Instalację zbudowano w ramach projektu LIDER finansowanego przez Narodowe centrum Badań i Rozwoju w projekcie pt.: „Zastosowanie energetycznych surowców odpadowych do wychwytywania gazowych form rtęci ze spalin”. Instalacja służy do testów w warunkach laboratoryjnych, w której gazem nośnym rtęci elementarnej jest argon. Przy użyciu opisanej aparatury dokonano pierwszych testów na sorbencie zeolitowym. Testowanym materiałem był zeolit syntetyczny typu X otrzymany w wyniku dwustopniowej reakcji syntezy popiołu lotnego klasy C z wodorotlenkiem sodu. Aby zwiększyć powinowactwo chemiczne testowanego materiału względem rtęci, otrzymany materiał sorpcyjny poddano aktywacji jonami srebra ( $Ag^+$ ) metodą wymiany jonowej, stosując azotan srebra ( $AgNO_3$ ). Pierwszy test przeprowadzono w interwale czasowym 240 min. W tym czasie nie zarejestrowano przebiegu badanego złoża rtęcią, w związku z czym wnioskować można, że badany materiał może być obiecujący w opracowywaniu nowych rozwiązań wychwytywania rtęci w sektorze energetycznym. Przedstawione w artykule wyniki mogą być interesujące dla sektora energetycznego z uwagi na rozwiązanie kilku aspektów środowiskowych. Jednym z nich są testy sorpcji rtęci w celu opracowania nowych technologii oczyszczania spalin. Natomiast drugi aspekt porusza możliwość przedstawienia nowego kierunku zagospodarowania ubocznych produktów spalania, jakimi są popioły lotne.

Słowa kluczowe: sorbenty stałe, rtęć elementarna, gazy odlotowe, zeolity, popiół lotny

<sup>1</sup> Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków;  
e-mail: pkunecki@meeri.pl, dczarna@meeri.pl, wdowin@meeri.pl

<sup>2</sup> Politechnika Lubelska, Lublin; e-mail: r.panek@pollub.pl

## Measuring the installation for mercury sorption from gases on solid sorbents

Abstract: The issue of mercury emission and the need to take action in this direction was noticed in 2013 via the Minamata Convention. Therefore, more and more often, work and new law regulations are commencing to reduce this chemical compound from the environment. The paper presents the problem of removing mercury from waste gases due to new BREF/BAT restrictions, in which the problem of the need to look for new, more efficient solutions to remove this pollution was also indicated. Attention is paid to the problem of the occurrence of mercury in the exhaust gases in the elemental form and the need to carry out laboratory tests. A prototype installation for the sorption of elemental mercury in a pure gas stream on solid sorbents is presented. The installation was built as part of the LIDER project, financed by the National Center for Research and Development in a project entitled: "The Application of Waste Materials From the Energy Sector to Capture Mercury Gaseous Forms from Flue Gas". The installation is used for tests in laboratory conditions in which the carrier gas of elemental mercury is argon. The first tests on the zeolite sorbent were made on the described apparatus. The tested material was synthetic zeolite X obtained as a result of a two-stage reaction of synthesis of fly ash type C with sodium hydroxide. Due to an increase, the chemical affinity of the tested material in relation to mercury, the obtained zeolite material was activated with silver ions ( $\text{Ag}^+$ ) by an ion exchange using silver nitrate ( $\text{AgNO}_3$ ). The first test was specified for a period of time of about 240 minutes. During this time, the breakthrough of the tested zeolite material was not recorded, and therefore it can be concluded that the tested material may be promising in the development of new solutions for capturing mercury in the energy sector. The results presented in this paper may be of interest to the energy sector due to the solution of several environmental aspects. The first of them is mercury sorption tests for the development of new exhaust gases treatment technologies. On the other hand, the second aspect raises the possibility of presenting a new direction for the management and utilization of combustion by-products such as fly ash.

Keywords: solid sorbents, elemental mercury, flue gases, zeolites, fly ash

## Wprowadzenie

Rtęć uważana jest za jedną z najbardziej toksycznych substancji zanieczyszczających środowisko ze względu na jej długą trwałość, wysoką lotność, toksyczność neurologiczną i silną bioakumulację (Zheng i in. 2017; Xy i in. 2016; Liu i in. 2015; Liu i Adewuyi 2016; Yang i in. 2018). Głównym źródłem emisji antropogenicznego zanieczyszczenia Hg jest eksploatacja elektrowni węglowych, którą określa się na ponad 30% całej rtęci uwalnianej do środowiska (Liu i Wang 2014).

W gazach spalinowych z elektrowni węglowych rtęć występuje w trzech postaciach: rtęci elementarnej ( $\text{Hg}^0$ ), rtęci utlenionej ( $\text{Hg}^{2+}$ ) i rtęci związanej z pyłami ( $\text{Hg}_p$ ) (Zhao i in. 2016; Wdowin i in. 2014).  $\text{Hg}^{2+}$  można łatwo wychwycić za pomocą urządzeń do mokrego odsiarczania spalin (WFGD – *Wet Flue Gas Desulfurization*) z uwagi na wysoką rozpuszczalność w wodzie tej formy rtęci. Z kolei  $\text{Hg}_p$  można usunąć za pomocą jednostek kontroli pyłu, takich jak filtry elektrostatyczne (ESP) lub filtry tkaninowe (FF) (Du in. 2015). Problem ciągle stanowi forma elementarna rtęci  $\text{Hg}^0$ , która nie może być łatwo usunięta przez istniejące urządzenia kontrolujące emisję zanieczyszczeń powietrza ze względu na jej dużą lotność i niską rozpuszczalność w wodzie (Zeng i in. 2004). Dlatego obecne badania w zakresie kontroli zanieczyszczenia rtęcią zawartej w spalinach koncentrują się na opracowaniu skutecznych metod kontroli  $\text{Hg}^0$ . W ostatnich latach prowadzono prace nad wieloma metodami kontroli rtęci elementarnej (Gao i in. 2013; Liu i Adewuyi 2016; Shen i in. 2014; Yang i in. 2010; Liu i in. 2014; An i in. 2014; Zhao in. 2013; Wdowin i in. 2014; Żmuda i in. 2017;

Zhang i in. 2005; Vidic i Siler 2001; Eswaran i Stenger 2005; Jeon i in. 2008; McLarnon i in. 2005), były to głównie: adsorpcja, utlenianie katalityczne, fotokatalityczne utlenianie, usuwanie fotochemiczne, plazmowe usuwanie, mokre utlenianie itp. (Xu i in.2018).

Obecnie technologia wtrysku aktywnego węgla (AC) jest uważana za jedną z najbardziej efektywnych. Jednak wysokie koszty operacyjne ograniczają zastosowanie i rozwój tej technologii (Seneviratne i in. 2007). W związku z tym badanie i opracowanie bardziej opłacalnych adsorbentów do usuwania  $Hg^0$  ma istotne znaczenie naukowe i praktyczne (Yang i in. 2007). Dlatego wielu uczonych próbowało opracować niedrogie, obiecujące sorbenty zastępujące węgiel aktywny (AC), takie jak popiół lotny (Carey i in. 2000), zeolity (Morency 2002; Wdowin i in. 2014, 2015), bentonit (Jurng i in. 2002), sorbenty na bazie wapnia (Ghorishi i Sedman 1998) i biomasę (Duan.i in. 2017).

Biorąc pod uwagę nowe zaostżenia z roku 2017 dyrektywy IED (Dyrektywa 2010), która wprowadza obowiązek dostosowania się do zaleceń BREF/BAT nie tylko dla nowych instalacji, ale także i dla obecnie działających do kilku lat po zatwierdzeniu BREF, istotne jest zintensyfikowanie prac nad efektywnym rozwiązaniem dotyczącym usuwania rtęci ze spalin. Nowe limity emisji rtęci dla bloków energetycznych opalanych węglem to nawet  $1-2 \mu g/Nm^3$  dla nowych instalacji oraz  $1-7 \mu g/Nm^3$  dla tych istniejących (Żmuda i in. 2017). Limity te są różne w zależności od mocy danego bloku.

Tematyka badań nad usuwaniem rtęci ciągle się rozwija. Wiadome jest, że aby opracować efektywną wysokosprawną technologię należy przeprowadzić szereg badań zaczynając od laboratoryjnych kończąc na instalacjach pilotażowych i demonstracyjnych.

W ramach programu LIDER finansowanego przez Narodowe centrum Badań i Rozwoju w projekcie pt.: „Zastosowanie energetycznych surowców odpadowych do wychwytywania gazowych form rtęci ze spalin” (akronim MERCOFF), zbudowana została prototypowa instalacja testowa do badania sorpcji rtęci elementarnej w czystym strumieniu gazu na sorbentach stałych.

W niniejszym artykule opisano zasadę dziania instalacji oraz pierwsze testy.

## 1. Materiał badawczy

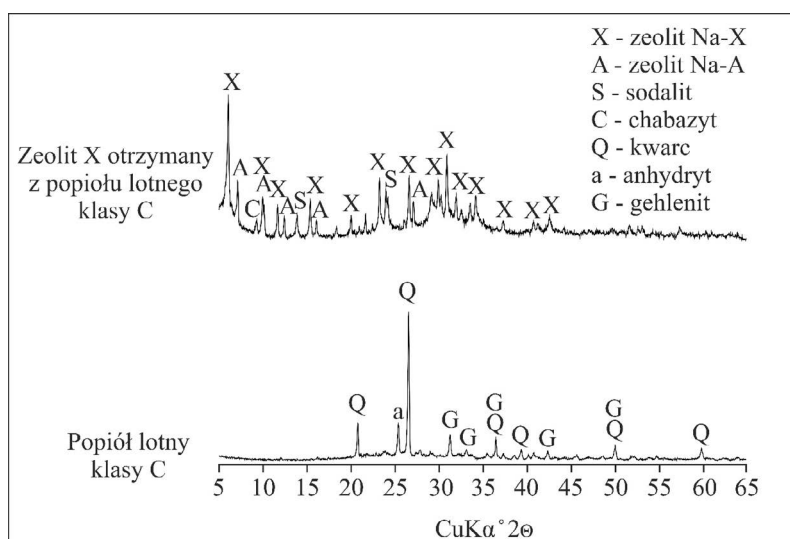
Materiał badawczy do testów usuwania rtęci stanowił zeolit syntetyczny otrzymany z popiołu lotnego klasy C w wyniku dwuetapowej reakcji syntezy przeprowadzonej w następujących warunkach: popiół lotny (PL) połączono z wodorotlenkiem sodu (NaOH) w stosunku NaOH/PL 1,5 oraz zhomogenizowano. Następnie przeprowadzono fuzję termiczną w temperaturze  $550^{\circ}C$  przez 1 h z tempem ogrzewania  $3^{\circ}C/min$ . Spiek po fuzji rozdrobniono i połączono z wodą destylowaną i z przesączem poreakcyjnym powstałym z podstawowej reakcji hydrotermalnej popiołu lotnego. Etap 2 przeprowadzono w temperaturze  $80^{\circ}C$  przez 6 h. Otrzymany materiał przepłukano wodą destylowaną i wysuszono w temperaturze  $105^{\circ}C$  przez 12 h.

Materiał badawczy w postaci zeolitu X dodatkowo zmodyfikowano jonami srebra w celu zwiększania jego powinowactwa chemicznego względem rtęci. Roztwór do aktywacji stanowiła mieszanka azotanu srebra i wody destylowanej o stężeniu 0,25 M. Czas kontaktu

zeolitu z roztworem aktywującym ustalono na 12 h, następnie próbkę zeolitu wypłukano wodą destylowaną oraz suszono w temperaturze 105°C przez 12 h.

Przy użyciu metody wykorzystującej zjawisko fluorescencji rentgenowskiej – XRF (ang. *X-ray Fluorescence*) określono skład chemiczny popiołu lotnego: SiO<sub>2</sub> 43,53; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 13,95; CaO 24,16; MgO 0,99; Na<sub>2</sub>O 0,00; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 7,40; TiO 2,13; SO<sub>3</sub> 7,84 (Kunecki i in 2017). Na podstawie normy ASTM C618 analizowany popiół lotny zakwalifikowano do klasy C (SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> w zakresie 50–70%, CaO > 10%).

Rentgenowska analiza składu fazowego – XRD (ang. *X-ray Diffraction*) wykonana metodą proszkową wykazała, że zarówno materiał wyjściowy jak i otrzymany materiał zeolito- wy posiada charakter wielofazowy (rys. 1). Dominującymi fazami popiołu lotnego klasy C są: kwarc, anhydryt oraz gehlenit. Nieznacznie podniesienie tła dyfraktogramu świadczy o znikomej zawartości amorficznej fazy szklistej. Dominującą fazą otrzymanego materia- łu zeolitowego jest zeolit X (typ FAU), który został zdiagnozowany w próbce na podsta- wie obecności charakterystycznych pików dyfrakcyjnych o wartościach  $d_{hkl}$ : 14,50; 8,85; 7,57; 5,75; 4,43; 3,82; 3,34; 2,98; 2,89; 2,80 Å. Akcesorycznie zaobserwowano również piki dyfrakcyjne charakterystyczne dla innych faz zeolitowych: zeolitu A (typ LTA), so- dalitu (typ SOD) oraz chabazytu (typ CHA). Podniesione tło świadczy o znacznej ilości fazy amorficznej – prawdopodobnie resztek nieprzereagowanego substratu. Rentgenowska analiza składu fazowego – XRD wykonana po procesie wymiany jonów Na<sup>+</sup> na Ag<sup>+</sup> (w ze- olicie X) nie wykazała różnic w składzie fazowym próbki – proces wymiany jonowej nie spowodował powstania nowych faz krystalicznych. Wymiana jonowa nie spowodowała tak- że widocznych zmian w kształcie pików dyfrakcyjnych co świadczy o braku wpływu na ich intensywności obserwowane na dyfraktogramie. Przedstawiony poniżej dyfraktogram

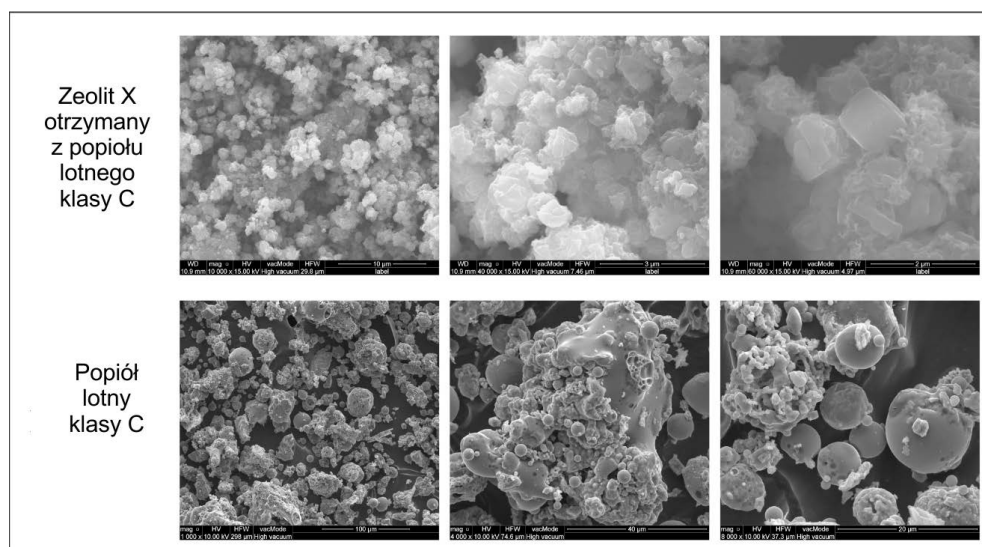


Rys. 1. Dyfraktogram składu mineralnego popiołu lotnego klasy C oraz otrzymanego zeolitu

Fig. 1. XRD diffraction patterns of fly ash C class and derived zeolite C class

reprezentuje więc zarówno otrzymany surowy zeolit X, jak i jego formę aktywowaną jonami srebra.

Obserwacja morfologii próbek wykonana przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego – SEM (ang. *Scanning Electron Microscopy*) wyposażonego w detektor elektronów wtórnych SE (ang. *Secondary Electron Detector*) wykazała w materiale wyjściowym obecność typowych dla popiołów lotnych form o budowie sferycznej (o rozmiarach do 20  $\mu\text{m}$ ) oraz większych form fazy szklistej. Kryształy otrzymanych zeolitów przyjmują formy kubiczne oraz rozbudowanych rozet, osiągające rozmiary do około 2  $\mu\text{m}$  (rys .2).



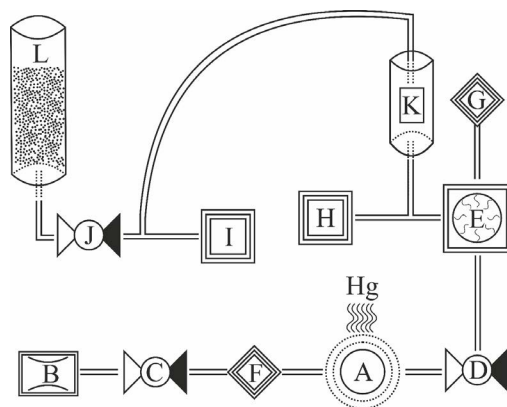
Rys. 2. Mikrofotografie SEM morfologii popiołu lotnego klasy C oraz otrzymanego zeolitu

Fig. 2. SEM microphotographs of morphologies of C class fly ash and derived zeolites

## 2. Instalacja badawcza

Zaprojektowana i zbudowana w ramach projektu prototypowa instalacja testowa ma na celu badanie właściwości sorpcyjnych syntezowanych sorbentów stałych względem rtęci elementarnej ( $\text{Hg}^0$ ) z uwagi na to, że ta forma rtęci jest dominująca i najtrudniejsza do usunięcia w gazach odlotowych.

System badawczy par rtęci SBPR-1 (rys. 3 i 4) został opracowany w celu prowadzenia badań sorpcji  $\text{Hg}^0$  w warunkach kontrolowanego przepływu i zmiany temperatury. Gazem nośnym w przedstawionym systemie jest argon. Sterowanie warunkami pomiarowymi oraz pomiary stężenia rtęci odbywają się w czasie rzeczywistym. Aparatura pomiarowo-sterująca systemem badawczym realizuje automatyczną procedurę badawczą.



Rys. 3. Schemat instalacji testowej do pomiarów par rtęci

Fig. 3. The scheme of the test installation for the measurement of mercury vapor



Rys. 4. Fotografia stanowiska badawczego (moduł analityczny)

Fig. 4. Photography of the test bench (analytical module)

Stanowisko badawcze przedstawione na rysunku 3 składa się z dwóch zespolonych obwodów zawierających:

- a) układ sterowania i analizatora par,
- b) elementy pomiarowo-wykonawcze.

Zbudowana instalacja składa się z następujących zasadniczych modułów (rys. 3 i 4):

- A) Generator par rtęci,
- B) Regulator przepływu gazu,
- C) Zawór 1 (normalnie zamknięty),
- D) Zawór 2 (normalnie zamknięty),
- E) Zespół chłodzący,
- F) Czujnik temperatury gazu wlotowego i par,
- G) Czujnik temperatury par,
- H) Czujnik ciśnienia 1,
- I) Czujnik ciśnienia 2,
- J) Zawór 3 (normalnie zamknięty),
- K) Zbiornik na materiał badawczy,
- L) Pochłaniacz rtęci.

Głównym elementem układu pomiarowo-sterującego jest sterownik PAC (ang. *Programmable Automation Controller*), który rejestruje sygnały mierzone takie jak: temperatury, ciśnienia, stężenie oraz kontroluje przepływ, temperaturę i steruje całym procesem.

Aparatura przystosowana jest do badań próbek o maksymalnej masie 0,5 g.

### 3. Testy sorpcji $Hg^0$

Na zaprojektowanej instalacji przeprowadzono wiele testów kalibracyjnych, w których materiałem testowym był komercyjnie w tym celu stosowany węgiel aktywny modyfikowany bromem. Następnie przy użyciu zeolitów X i A (surowych, nieaktywowanych) otrzymanych z popiołów lotnych klasy F i C przeprowadzono szereg kalibracji mających na celu dobranie odpowiednich parametrów aparatury takich jak: temperatura generatora par rtęci, ciśnienie, wielkość przepływu, masa stosowanego sorbentu. Pierwsze testy wykazały generalny brak powinowactwa surowych zeolitów względem par rtęci elementarnej.

Pierwszy test syntezowanych materiałów zeolitowych przeprowadzono przy użyciu 0,1 g zeolitu Na-X otrzymanego z popiołu lotnego klasy C oraz aktywowanego srebrem. Wielkość przepływu gazu nośnego z parami rtęci ustalono na 100 ml/minutę, zaś stężenie  $Hg^0$  wynosiło około  $30 \mu g/m^3$ . Czas eksperymentu ustalono na 240 min. W tym czasie złożo nie zostało przebite, co wskazuje na dobre, perspektywiczne właściwości sorpcyjne zastosowanego materiału. Dalsze testy będą kontynuowane celem określenia maksymalnej pojemności sorpcyjnej oraz oznaczenia pojemności złożowej i kinetyki procesu sorpcji.

### Wnioski

Przedstawiona w artykule instalacja testowa ma na celu przeprowadzać wstępne testy laboratoryjne przydatności badanych materiałów jako potencjalnych sorbentów rtęci w rozwiązaniach dla energetyki. Proponowane rozwiązanie stanowi jedynie etap pierwszy w opracowywaniu metodologii, ponieważ testy przeprowadzane są w czystym strumieniu gazu,



gdzie gazem nośnym dla rtęci jest argon. Jednak taka atmosfera dla testów jest bardzo istotna. W badanym środowisku mamy do czynienia jedynie z postacią rtęci w formie elementarnej, co pozwala zbadać wydajność testowanego materiału pod kątem dokładnie tej formy Hg. Jest to istotne z punktu widzenia gazów wylotowych ponieważ znaczna ilość rtęci w spalinach występuje w formie elementarnej.

Przeprowadzony pierwszy test na opisywanej aparaturze dał informację odnośnie do opracowania metodologii pomiarowej dla sorbentów zeolitowych (tj. wydłużenie czasu eksperymentu lub zwiększenie stężenia rtęci w strumieniu badanego gazu).

Istotne w tych rozważaniach są również otrzymane wstępne wyniki dla badanego zeolitu. Można wnioskować, że modyfikowane zeolity mogą stanowić obiecujący materiał w kierunku opracowywania nowych rozwiązań oczyszczania spalin.

Biorąc pod uwagę nadchodzącą w niedługim czasie politykę surowców odpadowych (w której opłaty za składowanie popiołu będą znacznie wyższe niż obecnie) istotne jest poszukiwanie nowych kierunków wykorzystania popiołów lotnych.

Ostatnim aspektem jest rozważanie ekonomii procesu. Wykorzystując do syntez materiałów zeolitowych materiał odpadowy możemy spodziewać się, że koszt wyprodukowania tego typu sorbentów będzie znacznie niższy porównując do komercyjnie dostępnych technologii.

Prace zostały zrealizowane w ramach projektu Lider finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju nr umowy LIDER/384/L-6/14/NCBR/2015.

## Literatura

- An i in. 2014 – An, J.T., Shang, K.F., Lu, N., Jiang, Y.Z., Wang, T.C., Li, J. i Wu, Y. 2014. Performance evaluation of non-thermal plasma injection for elemental mercury oxidation in a simulated flue gas. *Journal of Hazardous Materials* t. 268, s. 237–245.
- Carey i in. 2014 – Carey, T.R., Richardson, C.F. i Chang, R. 2000. Assessing sorbent injection mercury control effectiveness in flue gas streams. *Environmental Progress & Sustainable Energy* t. 19, s. 167–174.
- Du i in. 2015 – Du, W., Yin, L.B., Zhuo, Y.Q., Xu, Q.S., Zhang, L. i Chen, C.C. 2015. Performance of CuO<sub>x</sub>-neutral Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sorbents on mercury removal from simulated coal combustion flue gas. *Fuel Processing Technology* t. 131, s. 403–408.
- Tang i in. 2017 – Tang, H.J., Duan, Y.F., Zhu, C., Li, C.F., She, M., Zhou, Q. i Cai, L. 2017. Characteristics of a biomass-based sorbent trap and its application to coal-fired flue gas mercury emission monitoring. *International Journal of Coal Geology* t. 170, s. 19–27.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola). 2010.
- Eswaran, S. i Stenger, H.G. 2005. Understanding mercury conversion in SCR catalysts. *Energy Fuel* t. 19, s. 2328–2334.
- Gao i in. 2013 – Gao, Y.S., Zhang, Z., Wu, J.W., Duan, L.H., Umar, A., Sun, L.Y., Guo, Z.H. i Wang, Q. 2013. A critical review on the heterogeneous catalytic oxidation of elemental mercury in flue gases. *Environmental Science & Technology* t. 47, s. 10813–10823.
- Ghorishi, S.B. i Sedman, C.B. 1998. Low concentration mercury sorption mechanisms and control by calcium-based sorbents: application in coal-fired processes. *Journal of Air Waste Management* t. 48, s. 1191–1198.
- Jeon i in. 2008 – Jeon, S.H., Eom, Y.J. i Lee, T.G. 2008. Photocatalytic oxidation of gas-phase elemental mercury by nanotitanosilicate fibers. *Chemosphere* t. 5, s. 969–974.
- Jurng i in. 2002 – Jurng, J., Lee, T.G., Lee, G.W., Lee, S.J., Kim, B.H. i Seier, J. 2002. Mercury removal from incineration flue gas by organic and inorganic adsorbents. *Chemosphere* t. 47, s. 907–913.



- Kunecki i in. 2017 – Kunecki, P., Panek, R., Wdowin, M. i Franus, W. 2017. Synthesis of faujasite (FAU) and tschernichite (LTA) type zeolites as a potential direction of the development of lime Class C fly ash. *International Journal of Mineral Processing* t. 166, s. 69–78.
- Liu, Y.X. i Adewuyi, Y.G. 2016. A review on removal of elemental mercury from flue gas using advanced oxidation process: chemistry and process. *Chemical Engineering Research and Design* t. 112, s. 199–250.
- Liu i in. 2014 – Liu, Y.X., Pan, J.F. i Wang, Q. 2014. Removal of Hg<sup>0</sup> from containing-SO<sub>2</sub>/NO flue gas by ultraviolet/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process in an oval photochemical reactor. *AIChE Journal* t. 60, s. 2275–2565.
- Liu, Y.X. i Wang, Q., 2014. Removal of elemental mercury from flue gas by thermally activated ammonium persulfate in a bubble column reactor. *Environmental Science Technology* t. 48, s. 12181–12189.
- Liu i in. 2015 – Liu, Y.X., Wang, Y., Wang, Q., Pan, J.F., Zhang, Y.C., Zhou, J.F. i Zhang, J. 2015. A study on removal of elemental mercury in flue gas using fenton solution. *Journal of Hazardous Materials* t. 292, s. 164–172.
- McLarnon i in. 2008 – McLarnon, C.R., Granite, E.J. i Pennline, H.W. 2008. The PCO process for photochemical removal of mercury from flue gas. *Fuel Processing Technology* t. 87, z. 1, s. 85–89.
- Morency, J. 2002. Zeolite sorbent that effectively removes mercury from flue gases. *Filtration + Separation* t. 39, s. 24–26.
- UNEP 2013. Minamata Convention on Mercury, Text and Annexes. [Online] [http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/Booklets/Minamata%20Convention%20on%20Mercury\\_booklet\\_English.pdf](http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/Booklets/Minamata%20Convention%20on%20Mercury_booklet_English.pdf) [Dostęp: 2.06.2018].
- Seneviratne i in. 2007 – Seneviratne, H.R., Charpentreau, C., George, A., Millan, M., Dugwell, D.R. i Kandiyoti, R., 2007. Ranking low cost sorbents for mercury capture from simulated flue gases. *Energy Fuels* t. 21, s. 3249–3258.
- Shen i in. 2014 – Shen, B.X., Cai, J., Chen, J.H., Li, Z. i He, C. 2014. Removal of element mercury from simulated flue gas by clay modified with KBr and KI. *CIESC Journal* t. 2, s. 711–717.
- Tang i in. 2017 – Tang, H.J., Duan, Y.F., Zhu, C., Li, C.F., She, M., Zhou, Q. i Cai, L. 2017. Characteristics of a biomass-based sorbent trap and its application to coal-fired flue gas mercury emission monitoring. *International Journal of Coal Geology* t. 170, s. 19–27.
- Vidic, R.D. i Siler, D.P. 2001. Vapor-phase elementalmercury adsorption by activated carbon impregnated with chloride and chelating agents. *Carbon* t. 39, s. 3–14.
- Wei i in. 2018 – Wei, Y., Arshad, H., Jun, Z. i Yangxian, L. 2018. Removal of elemental mercury from flue gas using red mud impregnated by KBr and KI reagent. *Chemical Engineering Journal* t. 341, s. 483–494.
- Wen i in. 2018 – Wen, X., Arshad, H. i Yangxian, L. 2018. A review on modification methods of adsorbents for elemental mercury from flue gas. *Chemical Engineering Journal* t. 346, s. 692–711.
- Wdowin i in. 2014 – Wdowin, M., Franus, M., Panek, R., Bandura, L. i Franus, W. 2014. The conversion technology of fly ash into zeolites. *Clean Technologies and Environmental Policy* t. 16, z. 6, s. 1217–1223.
- Wdowin M. 2015. Zastosowanie zeolitów do separacji CO<sub>2</sub> i Hg z gazów odlotowych w procesach wychwytywania i składowania ditlenku węgla. *Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Środowiska. Monografie* nr 120.
- Xu i in. 2016 – Xu, Y., Zeng, X.B., Luo, G.Q., Zhang, B., Xu, P., Xu, M.H. i Yao, H., 2016. Chlorine-Char composite synthesized by co-pyrolysis of biomass wastes and polyvinyl chloride for elemental mercury removal. *Fuel* t. 183, s. 73–79.
- Xu i in. 2018 – Xu, W., Hussain, A. i Liu, Y., 2018. A review on modification methods of adsorbents for elemental mercury from flue gas. *Chemical Engineering Journal* t. 346, s. 692–711.
- Yang i in. 2007 – Yang, H.Q., Xu, Z.H., Fan, M.H., Bland, A.E. i Judkins, R.R., 2007. Adsorbents for capturing mercury in coal-fired boiler flue gas. *Journal of Hazardous Materials* t. 146, s. 1–11.
- Yang i in. 2010 – Yang, S., Zhang, J.Y., Zhao, Y.C., Yu, C. i Zhang, K., 2010. Pre-investigation of nanostructured TiO<sub>2</sub>-activated carbon composites for photocatalytic oxidation removal of mercury vapor. *Journal of Engineering Thermophysics* t. 31, s. 339–342.
- Yang i in. 2018 – Yang, W., Hussain, A., Zhang, J. i Liu, Y., 2018. Removal of elemental mercury from flue gas using red mud impregnated by KBr and KI reagent. *Chemical Engineering Journal* t. 341, s. 483–94.
- Zeng i in. 2004 – Zeng, H.C., Jin, F. i Guo, J., 2004. Removal of elemental mercury from coal combustion flue gas by chloride-impregnated activated carbon. *Fuel* t. 83, s. 143–146.
- Zhang i in. 2015 – Zhang, B., Xu, P., Qiu, Y., Yu, Q., Ma, J.J., Wu, H., Luo, G.Q., Xu, M.H. i Yao H., 2015. Increasing oxygen functional groups of activated carbon with non-thermal plasma to enhance mercury removal efficiency for flue gases. *Chemical Engineering Journal* t. 263, s. 1–8.
- Zhao i in. 2016 – Zhao, B., Yi, H.H., Tang, X.L., Li, Q., Liu, D.D. i Gao, F.Y. 2016. Copper modified activated coke for mercury removal from coal-fired flue gas. *Chemical Engineering Journal* t. 286, s. 585–593.

- Zhao i in. 2013 – Zhao, Y., Xue, F.M. i Ma, T.Z. 2013. Experimental study on Hg<sup>0</sup> removal by diperiodatocuprate (III) coordination ion solution. *Fuel Processing Technology* t. 106, s. 468–473.
- Zheng i in. 2017 – Zheng, X.B., Xu, Y., Zhang, B., Luo, G.Q., Sun, P., Zou, R.J. i Yao, H. 2017. Elemental mercury adsorption and regeneration performance of sorbents FeMnO<sub>x</sub> enhanced via non-thermal plasma. *Chemical Engineering Journal* t. 309, s. 503–512.
- Żmuda i in. 2017 – Żmuda, R., Adamczyk, W., Lelek, Ł., Mandrela, S. i Wdowin, M. 2017. Innowacyjna technologia oczyszczania spalin z rtęci jako rozwiązanie dla wymogów stawianym przez konkluzje BAT/BREF w polskiej energetyce. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 20, z. 4, s. 103–115.