

dr hab. inż. Grzegorz Wielgosiński, prof. ndzw. PŁ, Politechnika Łódzka

Problemy eksploatacji spalarni odpadów

W grudniu 2015 r. ruszyły pierwsze 4 nowoczesne spalarnie odpadów komunalnych w Krakowie, Bydgoszczy, Białymstoku i Koninie wybudowane w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko. Kolejne dwie, w Poznaniu i Szczecinie powinny ruszyć do końca 2016 r., a jednocześnie rozpoczęły się działania zmierzające do wybudowania kolejnych instalacji w Gdańsku, Rzeszowie, Olsztynie, Oświęcimiu i Warszawie.

Niemniej jednak wybudowanie instalacji to dopiero pierwszy krok. Następnymi są ich uruchomienie i dalej stabilna, bezpieczna eksploatacja. Doświadczenia eksploatacyjne w zakresie termicznego przekształcania odpadów komunalnych mamy niestety w naszym kraju niewielkie. Funkcjonująca od 2001 r. warszawska spalarnia to bardzo niewiele. Nieco większe doświadczenia eksploatacyjne pochodzą z funkcjonujących od lat w naszym kraju spalarni odpadów medycznych oraz innych odpadów niebezpiecznych. Większość z tych obiektów ma doświadczoną, od lat tą samą kadrę. W przypadku nowych spalarni trzeba będzie startować praktycznie od zera. Spalarnie odpadów są obiektami energetycznymi - rodzajem elektrociepłowni opalanych odpadami w miejsce klasycznego paliwa: węgla, czy biomasy. Pomimo, że skład pierwiastkowy spalanych odpadów często nie różni się od składu klasycznych paliw stałych, a pod względem wilgotności i wartości opałowej przypomina węgiel

brunatny, to jednak spalanie odpadów jest znacznie trudniejszym zadaniem niż spalanie paliw kopalnych. Odpady i paliwa wytworzone z odpadów często przez energetyków zaliczane są do tzw. paliw trudnych.

Choć z chemicznego punktu widzenia proces spalania paliw stałych przebiega praktycznie tak samo, nie-

zależnie od tego czy spalamy węgiel kamienny, węgiel brunatny, drewno, czy odpady lub paliwa wytworzone z odpadów (tzw. paliwa alternatywne) - to jednak o jakości przebiegu procesu spalania, a także o wielkości emisji decyduje konstrukcja urządzenia i sposób prowadzenia procesu spalania. Można by wręcz zaryzykować twierdzenie, że z tego punktu widzenia nie ma złych paliw. Są tylko złe (niewłaściwie dobrane lub zaprojektowane) urządzenia do ich spalania. Spalarni odpadów nie kupuje się „ze sklepowej półki”, tylko projektuje pod konkretną wydajność oraz charakterystykę spalanych odpadów. Oznacza to, że optymalne warunki pracy dla spalarni warszawskiej wcale nie muszą być optymalne dla spalarni w Krakowie, Szczecinie, czy Koninie. A to z kolei oznacza, że w każdym przypadku, często doświadczalnie, trzeba



Fot. NE

będzie zoptymalizować proces spalania pod kątem maksymalnego zbliżenia do ideału termodynamicznego - spalania całkowitego i zupełnego (tj. takiego spalania, w którym cała substancja palna zawarta w paliwie ulegnie utlenieniu, a gazy odlotowe z procesu spalania nie będą zawierać substancji palnych).

Spalarnia odpadów komunalnych to skomplikowany obiekt, a duża zmienność składu poddawanych spalaniu odpadów powoduje, że operator musi przez cały czas kontrolować jej pracę i precyzyjnie reagować na odstępstwa od optymalnych parametrów pracy. Aby było możliwe precyzyjne reagowanie na odstępstwa od optymalnych parametrów pracy konieczne jest dokładne poznanie zasad funkcjonowania spalarni, podstaw teoretycznych procesów w niej zachodzących, a także zwyczajne nauczenie się jej obsługi. Doświadczenie ze znacznie mniejszych spalarni odpadów niebezpiecznych pokazuje, że trwa to zazwyczaj około 6-8 miesięcy, nawet w przypadku obecności doskonałych instruktorów.

Spróbujmy zatem uporządkować wiedzę dotyczącą funkcjonowania spalarni odpadów pod kątem identyfikacji najważniejszych problemów eksploatacyjnych i sposobów ich rozwiązywania. Za najważniejsze, kluczowe elementy należy uznać:

- rozruch i wyłączenie instalacji,
- kontrolę warunków pracy i emisji,
- zmiany emisji dioksyn w wyniku tzw. efektu pamięci,
- problem korozji,
- remonty,
- ewentualne awarie.

■ Rozruch i wyłączenie instalacji

Przyjmuje się powszechnie, że rozruch instalacji i jej wyłączenie to kluczowe dwa elementy bezpiecznej i niskoemisyjnej eksploatacji instalacji. Rozruch spalarni odpadów trwa zazwyczaj ponad dobę, czasami nawet dwie i trzy doby, w zależności od wielkości instalacji. W pierwszym etapie, za pomocą palników

pomocniczych - gazowych lub olejowych rozgrzewa się komorę spalania (tj. ruszt, strefę spalania i dopalania, konwekcyjne ciągi kotła) do wymaganej prawem temperatury ponad 850°C. Zgodnie z przepisami, przed osiągnięciem tej temperatury nie wolno rozpocząć podawania do spalania odpadów. W miarę wzrostu temperatury uruchamia się również system oczyszczania spalin oraz na końcu odbiór ciepła z powierzchni ogrzewalnych kotła i pęczków rur wymienników ciepła. Przed wprowadzeniem odpadów do spalania powinno się uzyskać prawidłowy rozkład temperatur w instalacji, tak aby każdy jej element pracował w założonej wymaganej przez projekt temperaturze. Dopiero wtedy może rozpocząć się podawanie odpadów, przy jednoczesnej bardzo dokładnej kontroli dopływu powietrza i temperatur w poszczególnych punktach kontrolnych. Jest oczywiste, że nastawy przepływu powietrza, podział na powietrze pierwotne i wtórne będą musiały ulec zmianie przy spalaniu odpadów w stosunku do etapu rozgrzewania instalacji. Szczególnie ważnym jest niedopuszczenie do pojawienia się deficytu tlenu w strefie spalania, gdyż grozi to wysoką emisją tlenu węgla oraz sadzy. Pojawienie się wysokich stężeń tlenu węgla, a w szczególności pojawienie się sadzy spowoduje wysoką emisję mikrozanieczyszczeń organicznych (kłopoty z dotrzymaniem standardu emisyjnego TOC) oraz przede wszystkim trwającą nawet kilkanaście godzin wysoką emisję polichlorowanych dibenzo-p-dioksyn i polichlorowanych dibenzofuranów, a także innych podobnych związków - polichlorowanych bifenyli i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych.

Jest to związane z tzw. efektem pamięci w spalarniach odpadów, związanych z mechanizmem powstawania dioksyn - tzw. syntezą de novo (opis w dalszej części artykułu).

■ Kontrola warunków pracy i emisji

Jak już wspomniano, spalarnia odpadów powinna pracować w ta-

ki sposób, by proces spalania był jak najbardziej zbliżony do ideału termodynamicznego - spalania całkowitego i zupełnego. Dotrzymanie tego warunku daje szansę na znaczące ograniczenie emisji powstających zanieczyszczeń - głównie tlenu węgla oraz mikrozanieczyszczeń organicznych. W zależności od ilości podawanego do procesu spalania powietrza - zmienia się stężenie tlenu w strefie spalania i tym samym zmiana ulega również ilość powstających produktów niepełnego spalania, w tym tlenu węgla. Doświadczenia eksploatacyjne wielu spalarni odpadów pokazują, że optymalne stężenie tlenu, gwarantujące najniższe stężenia tlenu węgla to zazwyczaj 6-10%, co w oczywisty sposób przekłada się na strumień powietrza podawanego do spalania (zarówno pierwotnego, jak i wtórnego).

W przypadku zbyt małej ilości podawanego powietrza i tym samym zbyt niskiego stężenia tlenu w strefie spalania (złe natlenienie strefy spalania) obserwujemy gwałtowny wzrost stężenia tlenu węgla w miarę spadku stężenia tlenu. Z drugiej strony, w przypadku zbyt dużej ilości powietrza w strefie spalania mamy do czynienia z tzw. zimnym spalaniem, tj. wzrostem stężenia tlenu węgla i chłodzeniem strefy spalania przez nadmiar dopływającego powietrza. Obniżenie temperatury spalania to gwałtowny wzrost ilości powstających produktów niepełnego spalania. Jak wspomniano optymalne stężenie tlenu w strefie spalania to 6-10% objętościowych. Zapewnia ono minimalizację powstawania produktów niepełnego spalania - mikrozanieczyszczeń organicznych, gdyż ich stężenie w gazach odlotowych jest zawsze proporcjonalne do stężenia tlenu węgla. Wśród zidentyfikowanych produktów niepełnego spalania i związków będących wynikiem wtórnej syntezy w wysokiej temperaturze są zanieczyszczenia takie jak: węglowodory C₁ i C₂, akrylonitryl, acetonitryl, benzen, toluen, etylobenzen, ksylen, 1,2-dichlorobenzen, 1,4-dichlorobenzen, 1,2,4-trichlorobenzen, heksachlorobenzen, fenol, 2,4-dini-

trofenol, 2,4-dichlorofenol, 2,4,5-trichlorofenol, pentachlorofenol, chlorometan, chloroform, chlorek metylenu, czterochlorek węgla, 1,1-dichloroetan, 1,2-dichloroetan, 1,1,1-trichloroetan, 1,1,2-trichloroetan, 1,1,1,2-tetrachloroetan, 1,1-dichloroetylen, trichloroetylen, tetrachloroetylen, formaldehyd, aldehyd octowy, aceton, metyloetyloketon, chlorek winylu, ftalan dietylu, kwas mrówkowy, kwas octowy i wiele, wiele innych. Liczne badania prowadzone przez wielu badaczy w latach 90. ub.w. wykazały obecność ponad 350 różnego rodzaju związków chemicznych (organicznych) w spalinach ze spalarni odpadów w stężeniach powyżej 5 µg/m³. Podobne wyniki uzyskano dla spalania drewna i innych rodzajów biomasy. Niestety brak jest takich wyników badań dla procesu spalania węgla, choć należy oczekiwać, że sytuacja będzie podobna.

Znajomość chemizmu spalania oraz wpływu poszczególnych parametrów, prowadzenie procesu spalania na powstawanie zanieczyszczeń znacząco wpływa na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń powstających w procesie spalania, a tym samym ułatwia ich późniejsze usunięcie ze strumienia gazów odlotowych. Metody ograniczania emisji zanieczyszczeń z procesów technologicznych można generalnie podzielić na dwie grupy - metody pierwotne i metody wtórne. Metody pierwotne to wspomnianą już ingerencja w proces technologiczny i stworzenie takich warunków jego przebiegu, by ilość powstających zanieczyszczeń była możliwie najmniejsza. Natomiast metody wtórne, to zastosowanie konkretnych urządzeń i technologii w celu ograniczenia emisji zanieczyszczeń.

Metody pierwotne nabierają w ostatnich latach coraz większego znaczenia, gdyż z ekonomicznego punktu widzenia są one bardziej opłacalne (tańsze) od metod wtórnych, zwanych „technologiami końca rury”. Szczególnie istotną sprawą staje się aktualnie określenie wpływu parametrów prowadzenia procesu spalania na emisję

metali, wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA), dioksyn (PCDD/F) oraz innych substancji organicznych z procesu spalania. Liczne doniesienia literaturowe wskazują jednoznacznie, że dotrzymanie prawidłowych parametrów procesu spalania wpływa znacząco na obniżenie emisji substancji organicznych (w tym WWA i dioksyn) do atmosfery. Parametrem najlepiej charakteryzującym „prawidłowe warunki spalania” jest stężenie tlenku węgla w spalinach. Pozostałe parametry określające „dobre warunki spalania”, to przede wszystkim tzw. trzy T - temperatura, turbulencja oraz czas (*ang. time*) przebywania spalin w odpowiedniej temperaturze. Podstawowe znaczenie ma jednak zapewnienie warunków spalania bliskiego spalaniu całkowitemu i zupełnemu, przy zminimalizowaniu ilości powstającego tlenku węgla. Warunki takie panują przy prawidłowym natlenieniu strefy spalania, przy optymalnym stężeniu tlenu (dla spalania węgla 6-8%, współczynnik nadmiaru powietrza ok. 1,7-1,8). W przypadku spalania odpadów wymagane jest większe natlenienie strefy spalania i zapewnienie sumarycznego współczynnika nadmiaru powietrza rzędu 2,0-2,4 (stężenie tlenu w spalinach opuszczających strefę spalania i dopalania 10-13%). Badania prowadzone pod koniec lat 90. ub. w. wykazały bardzo ścisłą korelację pomiędzy stężeniem niektórych zanieczyszczeń w spalinach a stężeniem tlenku węgla, co jednoznacznie świadczy o wpływie warunków spalania na emisję zanieczyszczeń organicznych (w tym dioksyn i furanów, polichlorowanych bifenyli, wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i innych mikrozanieczyszczeń organicznych - produktów niepełnego spalania).

Kontrola emisji w spalarniach odpadów dokonywana jest za pomocą obligatoryjnego systemu ciągłego monitoringu umieszczonego na kominie, za systemem oczyszczania spalin, który w sposób ciągły rejestruje wielkość emisji, podobnie jak inne systemy kom-

puterowe w sposób ciągły nadzorują i rejestrują kluczowe parametry pracy (temperatury, przepływ spalin, ciśnienie, stężenie tlenu, itp.) spalania odpadów. Wielkość emisji zanieczyszczeń jest w całej Unii Europejskiej (także i w Polsce) ograniczona w identyczny sposób poprzez wymagania Dyrektywy 2000/76/WE. Jest ona przez cały czas, z częstotliwością co kilka sekund, rejestrowana w pamięci komputera nadzorującego proces. Wyniki tych pomiarów są na bieżąco pokazywane na ekranie monitora, a w wielu spalarniach są wysyłane specjalnym łączem do komputera inspekcji ochrony środowiska (w Polsce do właściwego Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska) nadzorującej daną spalarnię. Często także są na bieżąco wyświetlane na tablicy informacyjnej zlokalizowanej przy spalarni (np. w Warszawie, Wiedniu, itp.), gdzie okoliczni mieszkańcy mogą na bieżąco uzyskać informacje o aktualnej emisji. Przekroczenie wielkości dopuszczalnych jest natychmiast rejestrowane i ma kilka poważnych konsekwencji. Po pierwsze, system automatyki natychmiast blokuje wprowadzanie nowych partii odpadów do spalania. Po drugie, rozpoczyna się odliczanie czasu trwania zwiększonej emisji (jako awarii). Przepisy mówią, że najpóźniej w 4 godz. musi zostać uruchomiona procedura wyłączenia instalacji. Po trzecie, gdy łączny czas awarii przekroczy 60 godz. w ciągu roku (a rok trwa 8 760 godz.), instalacja z mocy prawa jest wyłączana. Jej ponowne dopuszczenie do eksploatacji wymaga przejścia długotrwałej i bardzo szczegółowej procedury dopuszczenia do eksploatacji. Opisane powyżej wymagania są identyczne we wszystkich krajach Unii Europejskiej i stanowią gwarancję poprawnej eksploatacji instalacji.

■ Zmiany emisji dioksyn w wyniku tzw. efektu pamięci

Stabilnie pracująca spalarnia odpadów, w optymalnych warunkach tech-

nologicznych, z wydajnym systemem oczyszczania spalin emituje niewielkie ilości dioksyn, uzyskując ich stężenie w spalinach na poziomie znacznie niższym od dopuszczalnego (0,1 ng TEQ/m³u). Okazuje się jednak, że każda zmiana parametrów pracy instalacji może powodować okresowy wzrost emisji dioksyn, z którym system oczyszczania spalin może sobie nie poradzić. Jest to zazwyczaj związane z tzw. efektem pamięci w spalarniach odpadów, będącym konsekwencją jednego z mechanizmów powstawania dioksyn - syntezą de novo. Podobnie wygląda sytuacja podczas wyłączania instalacji. Najczęściej popełnianym błędem jest natychmiastowe wstrzymanie podawania odpadów. Wyłączenie instalacji powinno przebiegać w sposób kontrolowany, poprzez systematyczne zmniejszanie podawania odpadów, włączenie palników pomocniczych i regulację parametrów, tak by nie dopuścić do gwałtownego spadku stężenia tlenu w strefie spalania, wzrostu stężenia tlenku węgla, czy wychłodzenia części instalacji, co również będzie sprzyjać wzrostowi stężenia tlenku węgla i pojawieniu się sadzy. Ze względu na nieuniknione zwiększone emisje podczas uruchamiania i wyłączania instalacji ilość wyłączeń powinna być ograniczona do minimum. Dobrze pracujące spalarnie wyłączane są zazwyczaj tylko raz w roku na trwający około 2-3 tygodni okresowy remont.

Wspomniane zjawisko „efektu pamięci” (system „pamięta”, że występowały w gazach odlotowych wysokie stężenia dioksyn) stało się przedmiotem licznych badań, których celem było wyjaśnienie tego zjawiska. W ich wyniku stwierdzono, że obserwowane zjawisko może mieć przyczyny dwojakiego rodzaju i stąd ostatecznie nazwano je:

- adsorpcyjny „efekt pamięci”,
- „efekt pamięci” de novo.

■ Adsorpcyjny „efekt pamięci”

Już w 1994 r. Vogg stwierdził, że system oczyszczania spalin, w szcze-

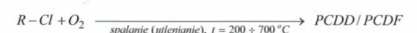
gólności kolumny absorpcyjnej (metoda mokra) mogą być wtórnym źródłem emisji dioksyn. Późniejsze badania wykazały, że polichlorowane dibenzo-p-dioksyny i polichlorowane dibenzofurany mają zdolność adsorpcji w tworzywach sztucznych, w szczególności polietylenie i polipropylenie, stosowanym jako chemoodporne elementy konstrukcyjne i wypełnienia absorberów w mokrym systemie oczyszczania spalin. Zjawisko to dało znać o sobie w sposób szczególnie odczuwalny podczas modernizacji jednej z belgijskich spalarni odpadów (IVAGO w Antwerpii) pod koniec lat 90. Pomimo zmodernizowania układu spalania i znacznego spadku stężenia dioksyn w strumieniu spalin opuszczających układ ich odpylenia, stężenia PCDD/Fs w emitorze praktycznie się nie zmieniły. Efekt dało dopiero gruntowne czyszczenie systemu mokrego oczyszczania spalin polegające na cyrkulowaniu w układzie (przy niepracującym węźle spalania) wodnego roztworu wodorotlenku sodowego z dodatkiem węgla aktywnego przez okres około 2 tygodni. Zaabsorbowane w elementach mokrego systemu oczyszczania spalin (wykonanych z polipropylenu) dioksyny uległy desorpcji i tym samym nie następowała już ich wtórna emisja do oczyszczonych gazów odlotowych. Ostatnie badania Guana wykazały, że dioksyny mogą nie tylko adsorbować się w tworzywach sztucznych, ale także mogą adsorbować się na metalowych elementach instalacji i następnie desorbować do strumienia gazu w przypadku zmniejszenia ich stężenia, np. na skutek poprawy warunków spalania, czy bardziej efektywnego usuwania dioksyn ze strumienia gazu na wcześniejszych etapach ich oczyszczania.

Adsorpcyjny „efekt pamięci” został twórczo wykorzystany przez Kreisza i Anderssona. Okazało się, że dodatek pylistego węgla aktywnego wprowadzonego do elementów wypełnienia kolumn absorpcyjnych wykonanych z polipropylenu skutecznie dodatkowo wiąże dioksyny zaabsorbowane w

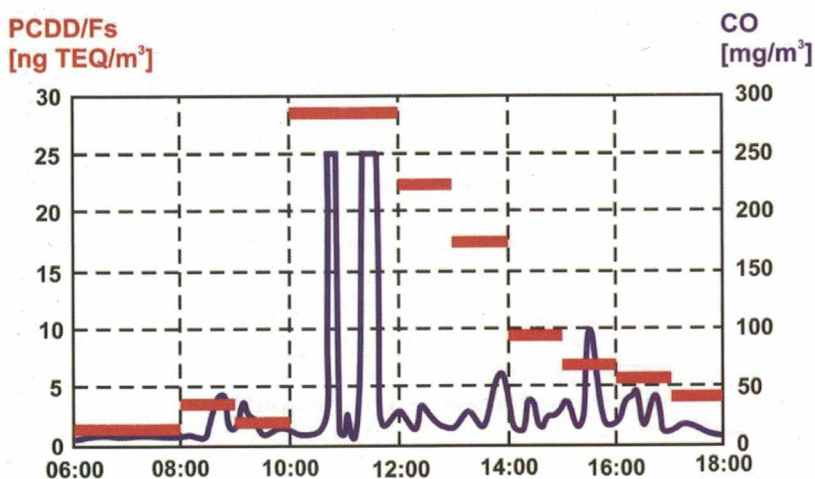
tworzywie siłami adsorpcji, uniemożliwiając ich wtórną desorpcję, nawet w warunkach drastycznego zachwiania warunków równowagi - do czystego powietrza. W ten sposób powstała znana dziś metoda usuwania dioksyn z gazów odlotowych zwana ADIOX®, oferowana przez szwedzką firmę Göta-Verken Miljö. Polega ona na zastosowaniu wypełnień kolumn absorpcyjnych wykonanych z polipropylenu z dodatkiem węgla. Cząsteczki dioksyn, które zostały zaabsorbowane w polipropylenie są dodatkowo adsorbowane na powierzchni węgla i skutecznie eliminowane ze strumienia gazów spalinowych w sposób trwały. Zużyte elementy, nasycone dioksynami są po wymianie spalane w spalarni odpadów. Ponieważ proces powstawania dioksyn jest procesem nierównowagowym, nie wpływa to na zwiększenie emisji PCDD/Fs z emitora spalarni. Metodę tę w latach 2001-2007 zastosowano już w kilkunastu spalarniach odpadów komunalnych i niebezpiecznych (między innymi Kloding, Thisted, Fasan, Glostrup w Danii, Umeå, Holstebro i Malmö w Szwecji, Tredi Salaise we Francji oraz Trondheim w Norwegii i innych) z dobrym skutkiem.

■ „Efekt pamięci” de novo

Zrozumienie „efektu pamięci” de novo wymaga dokładnego poznania i zrozumienia mechanizmów powstawania dioksyn w procesach spalania. Polichlorowane dibenzo-p-dioksyny i polichlorowane dibenzofurany powstają praktycznie w każdym procesie spalania paliw stałych i ciekłych (rzadziej gazowych), jeżeli w strefie odpowiednich temperatur pojawia się chlor, tlen i materia organiczna. Ogólny przebieg reakcji jest następujący:



W przypadku spalarni odpadów podany zakres temperatur wskazuje jednoznacznie, że synteza dioksyn przebiega poza strefą spalania. Badania prowadzone przez Hunsingera wyka-



Rys. 1. Przykładowa zależność zmian stężenia CO w pewnej instalacji spalania odpadów od czasu i konsekwencje tych zmian w postaci zmian stężeń PCDD/Fs

zały między innymi, że temperatura powyżej 900°C i deficyt tlenu powodują całkowity rozkład dioksyn, co oznacza, że synteza dioksyn może zachodzić dopiero za ostatnim doprowadzeniem powietrza do spalania i w temperaturach poniżej 900°C.

Na podstawie bardzo wielu wyników badań procesu powstawania dioksyn podczas spalania stwierdzono, że największa ilość dioksyn powstaje w wyniku tzw. syntezy de novo, tj. powstawania z cząsteczkowego węgla i organicznego lub nieorganicznego chloru w obecności popiołu lotnego w temperaturze 250-350°C. W procesie spalania, w temperaturach powyżej 900°C uwalniają się ze spalanych odpadów i innych paliw stałych i ciekłych rodniki węglowodorowe i gazy palne, które następnie biorą udział w wielu skomplikowanych reakcjach syntezy (halogenowania, oksyhalogenowania, utleniania, rekombinacji oraz dysproporcjonacji), w wyniku których powstają tzw. produkty niepełnego spalania, do których można zaliczyć fenole i chlorofenole, chlorobenzeny, alkilobenzeny, proste węglowodory alifatyczne, aldehydy i ketony, alkohole i proste kwasy karboksylowe. Chlorofenole, chlorobenzeny, czy polichlorowane bifenyle i polichlorowane naftaleny stanowią grupę prekursorów dioksyn, które w temperaturach 500-

700°C mogą łączyć się ze sobą, dając polichlorowane dibenzo-p-dioksyny i polichlorowane dibenzofurany. Prekursory te mogą reagować ze sobą zarówno w temperaturze 500-700°C w fazie gazowej, jak i na powierzchni popiołu lotnego w temperaturze 200-500°C.

Synteza de novo zachodzi w zakresie temperatur 200-500°C z cząstek węgla zawartego w popiele lotnym, które reagują z tlenem i chlorem na powierzchni katalizatora. Źródłem węgla w syntezie de novo jest najczęściej tzw. węgiel elementarny zawarty w cząstkach popiołu lotnego, jako uwęglona pozostałość po procesach termicznego rozkładu i utleniania w procesie spalania. W praktyce nie udaje się osiągnąć całkowitego wypalenia węgla zawartego w paliwie i niewielkie ilości niewypalonego węgla występują w gazach odlotowych w postaci sadzy. Kluczem do chlorowania cząstek w syntezie de novo jest reakcja Deacona katalitycznego utleniania powstałego podczas spalania chlorowodoru do chloru cząsteczkowego, zdolnego do prowadzenia reakcji chlorowania, którą katalizują przede wszystkim związki miedzi (Cu, CuCl, CuCl₂, CuO, Cu₂O i CuSO₄). W rzeczywistości na powierzchni popiołu lotnego znajduje się wiele metali, których wpływ na proces syntezy dioksyn jest różny. Jedne z nich katalizują proces syntezy de novo

lub katalizują proces chlorowania wcześniej powstałych niskoschlorowanych dioksyn (w syntezie w fazie gazowej) - np. miedź, cynk, molibden, mangan, żelazo, glin, magnez. Zaś inne katalizują rozkład powstałych dioksyn względnie ich odchlorowanie - np. chrom, wanad, wolfram, kobalt, nikiel. Synteza de novo jest reakcją wolną, wręcz bardzo wolną, a reakcja powstawania dioksyn np. z chlorofenoli jest od niej ok. 10²-10⁵ szybsza. Tak więc synteza de novo przebiega w instalacji spalania (nie tylko, bo również w innych procesach termicznych, np. metalurgicznych) poza strefą spalania w temperaturze 200-400°C, na cząstkach osiadłego popiołu lotnego. Według Goldfarba większość powstających w spalarniach odpadów dioksyn powstaje wg tego mechanizmu.

Zakłócenia w pracy instalacji, okresowe pojawienia się sadzy, wysokich stężeń tlenku węgla skutkuje bardzo często znacznym wzrostem emisji dioksyn. Wynika to z faktu, iż synteza de novo jest bardzo wolną reakcją chemiczną i powstała w okresie zakłóceń sadza może stanowić źródło węgla dla syntezy de novo przez bardzo długi okres czasu, powodując wzrost emisji dioksyn nawet o 200%, czy 500%. Ilustracje tego problemu pokazano na rys. 1. Przedstawia on wykres zmian stężenia CO oraz PCDD/Fs w instalacji, a także długotrwałe konsekwencje gwałtownego wzrostu stężenia CO (w analizowanym przypadku chwilowy wzrost stężenia CO do ponad 250 mg/m³ spowodował ponad 6-godz. podwyższoną emisję PCDD/Fs).

Rozruch instalacji spalania jest również poważnym źródłem emisji dioksyn do środowiska. Zimmermann przyjął, że jest to spowodowane osadzeniem sadzy w kotle (wymienniku ciepła) i stanowi to swoisty „efekt pamięci”. Doświadczalnie teorię tą potwierdziły badania Wikström. Późniejsze badania nad emisją dioksyn z procesu rozruchu instalacji oraz jej wyłączenia wykazały, że podwyższone stężenia dioksyn w spalinach (w skutek „efektu pamięci” de novo) mogą utrzymywać się nawet

przez kilka, czy kilkanaście godzin (w zależności od wielkości instalacji) od momentu osiągnięcia wymaganych parametrów pracy po rozruchu instalacji. Również zakłócenia w pracy instalacji objawiające się nagłym wzrostem stężenia tlenu węgla w spalinach powodują powstanie „efektu pamięci” de novo i podwyższoną nawet i o 1 000% (w stosunku do stanu z przed zakłócenia) emisję dioksyn przez okres kilku godzin.

Chwilowa emisja dioksyn ze spalarni odpadów nie jest wynikiem aktualnych warunków spalania. Ze względu na fakt, iż większość dioksyn powstaje w wyniku syntezy de novo, która jest reakcją wolną, powstawanie dioksyn i ich uwalnianie do strumienia gazów odlotowych trwa jeszcze długo po zoptymalizowaniu parametrów pracy spalarni i zminimalizowaniu ilości powstających dioksyn. Jest to więc wyraźny tzw. efekt pamięci de novo. W przypadku niestabilnej pracy spalarni wysokie stężenia dioksyn w spalinach można obserwować w długich okresach czasu.

■ Przeciwdziałanie „efektowi pamięci”

Można stwierdzić, że przeciwdziałanie efektowi pamięci jest zarówno proste, jak i trudne. Proste, gdyż znane są recepty na ograniczenie jego efektów. Najprostsze to unikanie elementów z tworzyw sztucznych w systemach oczyszczania spalin (przeciwdziałanie adsorpcyjnemu efektowi pamięci) oraz prawidłowe prowadzenie procesu spalania przy niskim stężeniu tlenu węgla w spalinach. Stosując się do tych wskazań, można w wielu wypadkach uniknąć zwiększonej emisji dioksyn podczas normalnej eksploatacji spalarni, za wyjątkiem etapu rozruchu instalacji. Unikanie elementów z tworzyw sztucznych w systemie oczyszczania gazów odlotowych jest całkowicie realne i wykonalne. Natomiast spalanie przy niskim stężeniu tlenu węgla jest dosyć trudne, w szczególności w małych spalarniach odpadów przy okresowym załadunku odpadów do spalania. Każda porcja

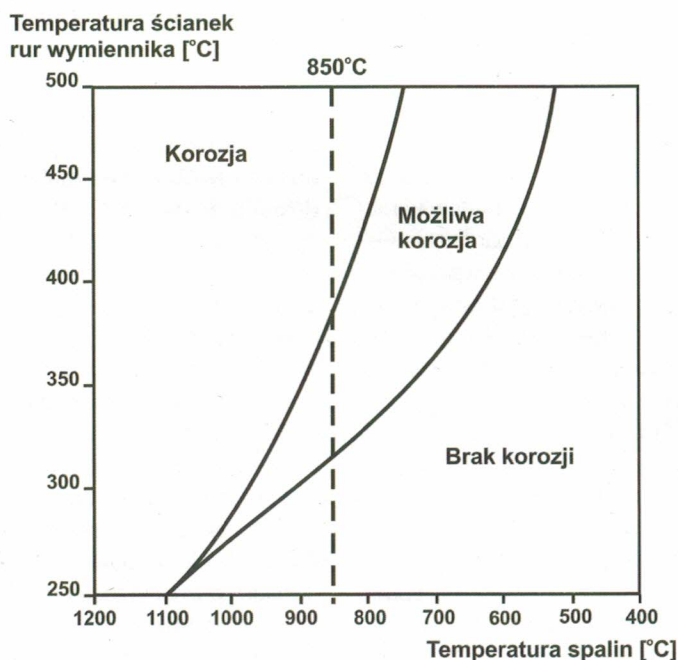
odpadów wprowadzona do komory spalania w pierwszym okresie da podwyższoną emisję tlenu węgla, a więc również i emisję sadzy, będącej źródłem węgla dla syntezy de novo. Jest to praktycznie nieuniknione, zwłaszcza w małych spalarniach odpadów medycznych. Szczególnie jest to widoczne po wprowadzeniu do komory spalania worka z odpadami zawierającego znaczne ilości tworzyw sztucznych. Szybkość spalania tych tworzyw jest tak duża, że w strefie spalania bardzo szybko pojawia się deficyt tlenu i tym samym emisja sadzy. Sadza ta, osadzając się w kotle, kanałach i w systemie oczyszczania spalin stanowi źródło węgla dla syntezy de novo przez znaczny okres czasu. Przeciwdziałania temu zjawisku w pewnym stopniu obecność pracujących palników w II stopniu spalania (komora dopalania, termoreaktor), dając szansę na przynajmniej częściowe utlenienie powstałej sadzy, tak aby jej depozyt w dalszej części instalacji nie stał się źródłem syntezy de novo. Osadzaniu sadzy i pyłu w strefie za kotłem instalacji spalania odpadów można również przeciwdziałać stosując wysokie prędkości przepływu spalin i prosty układ kanałów, tak aby pył i sadza nie miały miejsca do osadzenia się w układzie. Elementem sprzyjającym ograniczeniu emisji dioksyn powstałych w wyniku syntezy de novo (także w wyniku „efektu pamięci”) - w warunkach niestabilnej pracy instalacji) jest zastosowanie szybkiego i efektywnego schładzania spalin z temperatury ok. 400°C do temperatury poniżej 200°C. Szybkość schładzania spalin ma decydujące znaczenie dla ilości powstających dioksyn. Z danych literaturowych wynika, że w przypadku schładzania spalin w typowym wymienniku ciepła z normalną szybkością rzędu 100-200°C/s, stężenie dioksyn na wyjściu wynosi około 5 ng TEQ/m³, zaś dla osiągnięcia stężenia dioksyn równego ok. 1 ng TEQ/m³ potrzebne byłoby uzyskanie szybkości schładzania rzędu 500-1 000°C/s.

Małe spalarnie odpadów, w tym spalarnie odpadów medycznych czę-

sto pracują w systemie jednozmianowym. Z punktu widzenia emisji dioksyn, w tym emisji w wyniku „efektu pamięci” jest to nieporozumienie. Przyjmując czas rozruchu instalacji do osiągnięcia wymaganych prawem parametrów eksploatacyjnych (przede wszystkim temperatury), wymagane są około 2 godz. (minimum). Biorąc pod uwagę, że na tym etapie (również z pracy palników olejowych, czy gazowych) powstanie sadza, która osadzi się na elementach np. wymiennika ciepła, czy kanałach spalin i będzie stanowić surowiec do syntezy de novo, efekt pamięci etapu rozruchu trwać będzie minimum 6-8 godz. Oznacza to, że może się zdarzyć, że do końca pracy spalarni w danym dniu wielkość emisji dioksyn będzie podwyższona właśnie w wyniku efektu pamięci de novo. Co więcej, taka eksploatacja spalarni może powodować, że depozyt sadzy w instalacji będzie się systematycznie powiększać i tym samym emisja dioksyn będzie rosła, przekraczając znacznie wartość dopuszczalną 0,1 ng TEQ/m³. W tym przypadku czyszczenie instalacji (w szczególności wymiennika ciepła) przynosi pewien efekt, ale nie likwiduje zjawiska.

■ Problem korozji

Spalanie tak niejednorodnej materii jaką są odpady komunalne powoduje wiele problemów eksploatacyjnych. Pomijając zmienność wilgotności i wartości opałowej, z czym potrafimy sobie nieźle radzić intensywnie mieszając odpady komunalne pochodzące z różnych dzielnic miasta i różniące się pomiędzy sobą właściwościami w magazynie odpadów (tzw. bunkrze lub fosie), to w dalszym ciągu problemem pozostaje spora zawartość domieszek pierwiastków kwasotwórczych takich jak: chlor, fluor i brom, a także siarka. O ile podczas spalania węgla kamiennego, czy brunatnego podstawowym problemem jest stosunkowo wysoka zawartość siarki (rzędu 0,6-1,2%) przy względnie niskiej zawartości chloru



Rys. 2. Zakres temperaturowy występowania korozji w kotle spalarni odpadów

(ok. 0,1-0,2%), to w przypadku odpadów komunalnych zazwyczaj jest odwrotnie - chloru (a także fluoru i bromu) jest znacznie więcej niż siarki. Skutkiem tego jest oczywiście problem korozji. Czynnikiem korozyjnym są tu chlorowódz, bromowódz, czy fluorowódz oraz w mniejszym stopniu dwutlenek siarki oraz dwutlenek azotu. Ze względu na znaczne zawilgocenie spalin ze spalarni odpadów (powyżej 10% obj.), bardzo ważnym jest dopilnowanie, aby w instalacji nie został przekroczony punkt rosy, gdyż będzie to miejsce przebiegającej wręcz błyskawicznie korozji kwaśnej. Drugim elementem korozyjnym są sole (chlorki, bromki, fluorki) niektórych metali osadzające się w postaci pyłu, czy szlamu na elementach systemu odzysku ciepła (pęczkach rur wymienników, ścianach szczelnych i innych powierzchniach ogrzewalnych). Są one czynnikiem decydującym w przypadku tzw. korozji wysokotemperaturowej. Związana jest ona również ze znaczną różnicą temperatur pomiędzy czynnikiem grzejnym - gazami spalinowymi o temperaturze często bliskiej

1 000°C a powierzchnią rur i innych elementów wymiennika ciepła (300-400°C). Zakres temperaturowy występowania korozji wysokotemperaturowej pokazano na rys. 2.

Widać wyraźnie, że o ile w przypadku energetyki węglowej standardem stają się kotły na parametry nadkrytyczne (temperatura pary rzędu 500-600°C), to w przypadku bardziej zanieczyszczonych gazami kwaśnymi spalin ze spalarni odpadów nie ma co marzyć o parametrach nadkrytycznych pary. Standardem jest temperatura 360-440°C, gdyż podwyższenie parametrów wytwarzanej pary wymagałoby stosowania wyższych jakościowo, i tym samym znacznie droższych, gatunków stali w konstrukcji układu odzysku ciepła. Oczywiście problem korozji wysokotemperaturowej musi być rozwiązany przede wszystkim na etapie projektowania instalacji, to jednak zależna od operatora instalacji zmiany w obciążeniu kotła (szczególnie jego przeciążenie termiczne) może spowodować ewidentne szkody w postaci korozji w układzie odzysku ciepła.

■ Remonty

Silnie korozyjne właściwości gazów spalinowych z procesu spalania odpadów ze względu na znaczną zawartość chlorowodoru, bromowodoru, fluorowodoru, a także dwutlenku siarki i dwutlenku azotu powodują, że każda spalarnia odpadów wymaga systematycznych przeglądów, usuwania na bieżąco wszystkich pojawiających się usterek oraz corocznych 2-3 tygodniowych remontów. Remonty w spalarniach odpadów są zazwyczaj kosztowne, gdyż nierzadko trzeba wymienić całe pęczki rur wymienników ciepła, czy spore fragmenty powierzchni ogrzewalnych w kotle. Żadne półśrodki tu nie wchodzić w grę. Zaniedbania w remontach mszczą się w stosunkowo szybkim czasie w postaci poważnych awarii instalacji. Eksploatując spalarnie odpadów, trzeba rocznie przeznaczyć pewną (wcale nie małą) kwotę na remont. Jeżeli tę kwotę oznaczymy przez X, to w przypadku rezygnacji z remontu w którymś roku, bądź w przypadku znacznego ograniczenia jego zakresu w kolejnym, następnym roku nie wystarczy przeznaczyć kwoty 2·X na remont. Bardziej adekwatną kwotą będzie tu 3·X. Właściwie przeprowadzone remonty roczne pozwalają zazwyczaj bezpiecznie i bezawaryjnie eksploatować instalację przez kolejny rok. Trzeba tu również zwrócić uwagę na rosnące wymagania niezawodności instalacji. Efektem jest roczny czas pracy instalacji nie standardowe 7 500 godz., a coraz częściej osiągane 8 200-8 300 godz. na rok.

■ Awarie

Dane o awariach przemysłowych gromadzone przez wyspecjalizowany instytut Unii Europejskiej (EU Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, Ispra, Włochy) wskazują, że instalacje termicznego przekształcania odpadów komunalnych, pracujące wg sprawdzonej technologii rusztowej są wyjątkowo

bezpiecznymi instalacjami, a w okresie ostatnich 20 lat wydarzyły się jedynie 3 przypadki awarii - pożaru w spalarni odpadów. Jest to ilość porównywalna z ilością podobnych awarii (pożarów) w elektrowniach, czy elektrociepłowniach (ostatnia taka awaria - pożar - miała miejsce w Polsce w latach 90. w Elektrowni Turów, gdzie spłonęły 3 bloki energetyczne). Natomiast odnotowano całą serię awarii w prototypowych spalarniach odpadów komunalnych pracujących wg tzw. nowych technologii (pirolizy i zgazowania) w Fürth (technologia Simensa - Schwel-Brenn-Verfahren - 100 000 Mg/r.) i w Karlsruhe (technologia Thermoselect - 225 000 Mg/r.). Stało się to przyczyną zamknięcia tych instalacji. Literatura fachowa przyniosła ostatnio również informacje o serii awarii w prototypowej spalarni plazmowej w Ottawie (technologia Plasco - 25 000 Mg/r.), co stało się podstawą do wydania przez władze Ottawy decyzji o zamknięciu tej instalacji. W listopadzie 2015 r. dotarły również informacje o wstrzymaniu rozruchu pierwszej linii prototypowej instalacji zgazowania plazmowego Tees Valley koło Middlesbrough (liczne awarie) i jednoczesnym wstrzymaniu budowy drugiej linii. A miała być to najnowocześniejsza i zarazem największa instalacja plazmowa na świecie o wydajności około 600 000 Mg/r. (dwie linie).

Dostępny w internecie raport bezpieczeństwa dla wielkiej spalarni odpadów komunalnych w Dublinie (koniec budowy początkowo przewidziany na koniec 2010 r. odsuwa się na 2015-16 r.), jako jedyne istotne zagrożenie wskazuje możliwość pożaru w zasobniku z odpadami (na skutek nieoczekiwanej i niezgodnej z prawem obecności palnych i wybuchowych chemikaliów w odpadach komunalnych). Rzeczywiście 2 takie przypadki wydarzyły się w niemieckich spalarniach odpadów w ostatnich 10 latach. Zagrożenie w takim przypadku jest minimalne, gdyż zasobnik odpadów wyposażony jest w urządzenia gaśnicze (zraszacze wodne), a powietrze z zasobnika jest od-

prowadzane poprzez kocioł spalarni i system oczyszczania spalin.

Wnioski

Polskie doświadczenia w zakresie eksploatacji spalarni odpadów komunalnych są jak na razie bardzo niewielkie. Jedyna ciągle jeszcze warszawska spalarnia odpadów komunalnych funkcjonuje od 2001 r. Większe doświadczenia mamy w zakresie instalacji termicznego przekształcania odpadów medycznych oraz innych odpadów niebezpiecznych. Był okres, około 2000 r., kiedy w Polsce funkcjonowało ponad 200 tego typu obiektów. Większość z nich ze względu na wyeksploatowanie, brak systemu oczyszczania spalin, brak możliwości dotrzymania wymogów prawnych stawianych spalarniom odpadów zostały już dawno wyłączone. W chwili obecnej jest około 30-40 instalacji o wydajnościach od 100 do 4 000 kg/h. Jednakże doświadczenia eksploatacyjne spalarni odpadów medycznych, czy innych odpadów niebezpiecznych trudno porównywać z wymaganiami jakie stawia przed operatorem spalarnia odpadów komunalnych o wydajności 5-15 Mg/h z jednej linii. Dlatego też wszystkie nowe instalacje spalania odpadów komunalnych budowane są przy współudziale firm zagranicznych, posiadających bogate doświadczenie zarówno w budowie, jak i eksploatacji tego typu obiektów. Doświadczenia tego nie można w żaden sposób porównać z doświadczeniem operatora instalacji energetycznych: elektrowni, elektrociepłowni, czy kotłowni (ciepłowni osiedlowej, czy zakładowej), choć oczywiście spalarnie odpadów są obiektami energetycznymi pracującymi w kogeneracji - produkującymi zarówno energię cieplną, jak i elektryczną. Oczekujemy, że zagraniczne firmy biorące udział w konsorcjach budujących nasze nowe spalarnie odpadów prześlą nam to specyficzne „know-how”, które pozwoli w sposób efektywny i bezpieczny dla środowiska i ludzi eksploatować spalarnie odpadów,

które dziś są nieodzownym elementem nowoczesnego systemu gospodarki odpadami.

W niniejszym artykule zasygnalizowano jedynie najważniejsze problemy, aby uzmysłowić ewentualnym decyzyjcom, że spalarnia odpadów to nie przystawiona pralka automatyczna lub zmywarka, którą można uruchomić i po 2 godz. sprawdzić efekt jej działania. Spalarnia odpadów komunalnych to skomplikowany obiekt, a duża zmienność składu poddawanych spalaniu odpadów powoduje, że operator musi przez cały czas kontrolować jej pracę i precyzyjnie reagować na odstępstwa od optymalnych parametrów pracy. Aby jednak było to możliwe, konieczne jest dokładne poznanie zasad jej funkcjonowania, podstaw teoretycznych procesów w niej zachodzących i zwyczajne nauczanie się jej obsługi. Doświadczenie ze znacznie mniejszych spalarni odpadów niebezpiecznych pokazuje, że trwa to zazwyczaj około 6-8 miesięcy, nawet w przypadku obecności doskonałych instruktorów. Ale wydaje się, że od tego nie ma odwrotu.

□