

# Wpływ recyrkulacji zewnętrznej spalin na proces spalania węgla w złożu stacjonarym w kotle komorowym małej mocy

Krystyna Kubica, Robert Mnich

Węgiel stanowi palną, heterogeniczną, osadową skałę pochodzenia organicznego. W postaci naturalnej składa się ze skomplikowanej w swojej strukturze cząsteczkowej kompleksowej mieszaniny substancji organicznej oraz nieorganicznej substancji mineralnej. Spalanie tak złożonej substancji w jego pierwotnej, nieprzetworzonej postaci jest źródłem emisji substancji szkodliwych, tym większej, im mniejsza jest sprawność procesu spalania oraz im mniejsze są techniczne możliwości oczyszczania spalin i niższa jakość spalanego paliwa [1], [2]. Na emisję zanieczyszczeń ma więc wpływ zarówno jakość paliwa, jak i organizacja samego procesu spalania; im jest ona mniej efektywna, tym więcej zanieczyszczeń jest generowanych w palenisku.

Do najbardziej emisjogennych źródeł zaliczane jest spalanie węgla w złożu stacjonarym, zwłaszcza spalanie przeciwprądowe w indywidualnych paleniskach oraz jednostkach energetycznych małej mocy. Jest ono przyczyną znaczącego zanieczyszczenia środowiska substancjami gazowymi, takimi jak: tlenki węgla, tlenki azotu, dwutlenek siarki oraz pyłami (TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, substancjami organicznymi (TOC), w tym wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi (WWA), dioksynami i furanami (PCDDs/Fs) zaliczanymi do tzw. trwałych związków organicznych (TZO, POPs - ang. Persistent Organic Compounds) i lotnymi związkami organicznymi VOCs (ang. Volatile Organic Compounds), grupującymi węglowodory alifatyczne C<sub>1</sub> - C<sub>10</sub>, benzen i jego homologi-BTX, aldehydy i ketony), oraz metalami ciężkimi [3].

Zazwyczaj niska sprawność kotłów i pieców, duża koncentracja zanieczyszczeń w spalinach, mała szybkość przepływu w kominach wysokości poniżej 10 m sprawia, że instalacje te stanowią bezpośrednie zagrożenie dla najbliższego otoczenia oraz są przyczyną znaczącego

udziału niskiej emisji w całkowitej, krajowej emisji zanieczyszczeń (zwłaszcza pyłów, WWA i VOCs).

W Polsce spala się średnio rocznie około 8 mln ton węgla w indywidualnych paleniskach. W perspektywie do 2015 r., wg symulacji opublikowanych w [4], spadnie procentowy udział paliw stałych w strukturze zużywanej energii pierwotnej, ale w liczbach bezwzględnych zużycie węgla pozostanie bez większych zmian. Zatem konieczne jest szukanie metod zmniejszenia uciążliwości dla środowiska instalacji energetycznych, zwłaszcza niewielkiej mocy, zasilanych tym paliwem stałym. W przypadku SO<sub>2</sub> ograniczenie emisji jest możliwe jedynie poprzez stosowanie paliwa o niskiej zawartości siarki lub usuwanie powstałych tlenków siarki ze spalin. Wielkość emisji pozostałych zanieczyszczeń pozostaje w ścisłym związku z organizacją procesu spalania. W kotłach małej mocy stosowanych w indywidualnym ogrzewnictwie usuwanie już powstałych zanieczyszczeń jest utrudnione zarówno ze względów technicznych jak i ekonomicznych. Stąd też w instalacjach małej mocy wytwarzających energię cieplną z paliw stałych niezbędne jest stosowanie pierwotnych metod ograniczania emisji zanieczyszczeń.

## Charakterystyka zanieczyszczeń

**Tlenki azotu (NO<sub>x</sub>).** Emisja tlenków azotu generuje około 40% summarycznych strat ekonomicznych wywołanych przez wprowadzane do środowiska zanieczyszczenia. Do grupy szkodliwych związków azotu emitowanych do atmosfery z procesów spalania zaliczany jest tlenek azotu NO, dwutlenek azotu NO<sub>2</sub>, oznaczane ogólnie jako NO<sub>x</sub> [5] oraz podtlenek azotu N<sub>2</sub>O [6], [7]. Szkodliwość tlenku azotu i dwutlenku azotu wynika przede wszystkim z faktu, że związki te są

bezwodnikami kwasów, odpowiednio: azotanowego i azotowego. W ten sposób NO<sub>x</sub> wraz z tlenkami siarki, po uwodnieniu, przyczyniają się do powstawania w troposferze zjawiska kwaśnych deszczy, które oddziałują destrukcyjnie na organizmy żywe i przyrodę nieożywioną. Istotny jest także wkład tlenków azotu w powstawanie efektu cieplarnianego. Tlenek azotu NO wchodzi w stratosferze, pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego Słońca, w katalityczne reakcje z ozonem, niszcząc jego powłokę ograniczającą absorpcję promieniowania nadfioletowego przez Ziemię [5] i równocześnie powoduje zwiększenie stężenia dwutlenku azotu. W wyniku tego podtlenek azotu jest drugim pod względem ilościowym związkiem azotu występującym w atmosferze.

Na podtlenek azotu zwrócono uwagę dopiero niedawno, z uwagi na gwałtowny wzrost jego stężenia w atmosferze obserwowany w ciągu ostatniego dziesięciolecia [6], [7]. Nie stwierdzono jego szkodliwego działania w stosunku do organizmów żywych, nie jest on także związkiem kwasotwórczym. Natomiast N<sub>2</sub>O jest zaliczany do grupy gazów cieplarnianych, z okresem życia w atmosferze wynoszącym 150 lat. Po przedostaniu się do stratosfery w wyniku zachodzących tam reakcji chemicznych ulega on konwersji do tlenku azotu, którego działanie już omówiono. Emisja tlenków azotu z procesów spalania w porównaniu z emisją naturalną, np. erupcje wulkanów, jest stosunkowo niewielka. Jednak uciążliwość tego zjawiska wynika z faktu, że źródła emisji są skupione na stosunkowo niewielkich obszarach, co prowadzi do powstawania lokalnie wysokich stężeń tlenków azotu [8].

W procesach spalania paliw rozróżnia się trzy mechanizmy tworzenia tlenków azotu [5]: paliwowy, termiczny i płomieniowy. Tlenki azotu powstające wg **mechanizmu paliwowego** są wynikiem utlenienia azotu zawartego w paliwie do NO [9]. **Mechanizm termiczny** generowania NO<sub>x</sub> przebiega w układzie N/O i jest skutkiem utleniania azotu N<sub>2</sub>,

zawartego w powietrzu wprowadzanym do komory spalania, w wysokiej temperaturze. Szybkość tworzenia termicznych tlenków azotu gwałtownie wzrasta w temperaturze ponad 1200°C [8]. Istotnym źródłem termicznych NO<sub>x</sub> w płomieniu są lokalne, silne maksima temperatury. Mechanizm termiczny tworzenia NO<sub>x</sub> został opisany w wielu pracach [10], [11]. Tworzenie tlenków azotu wg **mechanizmu płomieniowego** zachodzi z udziałem rodników powstałych w płomieniu, w reakcjach spalania paliwa w układzie N/O/C/H. Ich udział w całkowitej emisji NO<sub>x</sub> jest znikomy. W procesie spalania węgla tlenki paliwowe stanowią ponad 90% całkowitej ilości generowanych NO<sub>x</sub>, na ich ilość nie można w istotny sposób wpływać bezpośrednio. Natomiast w przypadku tlenków termicznych sposób organizacji procesu spalania, determinujący przebieg reakcji utleniania dostarczanego z powietrzem azotu, ma zasadnicze znaczenie.

**Zanieczyszczenia organiczne.** Jeżeli w przypadku tlenków azotu można mówić o reakcjach ich tworzenia, to opis mechanizmu powstawania związków organicznych jest bardziej skomplikowany. Zanieczyszczenia te powstają przede wszystkim w wyniku niepełnej termochemicznej konwersji substancji organicznych zawierających węgiel, w wyniku niecałkowitego spalania, które występuje w lokalnych niedoborach tlenu i/lub obszarach obniżonej temperatury [12]. Tak uproszczony opis mechanizmu tworzenia tych substancji można odnieść do procesu spalania realizowanego w kotłach pyłowych czy fluidalnych.

W kotłach małej mocy ze złożem stacjonarnym i techniką spalania przeciwnopłomowego zanieczyszczenia organiczne powstają w wyniku trzech głównych mechanizmów: nieprzereagowania w płomieniu lotnych produktów odgazowania węgla, częściowej ich pirolizy w strefie niedoboru tlenu oraz w wyniku pirosyntezy w płomieniu [1], [3]. Zanieczyszczenia organiczne obejmują, jak już wspomniano, szeroki wachlarz związków organicznych, do których zaliczane są zarówno VOCs, SVOCs, jak i wysokokondensowane substancje zaabsorbowane na pyłach [1], [3], [13]. Zawierają one związki o wysokim stopniu kancerogenności, jak np. benzo(a)piren i inne wielopierścieniowe węglowodory

aromatyczne (WWA) z grupy 16WWA wg EPA. Lotne związki organiczne (LZO; VOC) według Dyrektywy 1999/13/EC to grupa związków organicznych o prężności par równej lub wyższej od 0,13 kPa, w temperaturze 20°C. Szkodliwość VOCs związana jest z promowaniem przez nie powstawania w atmosferze fotoutleniaczy, które z kolei wywołują smog fotochemiczny [14]. Pod tym względem zajmują one pierwsze miejsce po NO<sub>x</sub>. VOCs przyczyniają się także powstawaniu efektu cieplarnianego. Najłżejszy ze związków zaliczanych do VOCs - metan zatrzymuje siedmiokrotnie więcej ciepła niż dwutlenek węgla, główny związek przyczyniający się do powstawania tego efektu [15]. Najważniejsze antropogeniczne źródła VOCs to procesy przemysłowe (ok. 46%) i motoryzacja (ok. 30%) [16].

Kolejną grupą zanieczyszczeń organicznych, szczególnie uciążliwych dla środowiska, są wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne. W przypadku spalania paliw stałych, zwłaszcza węgla w kotłach małej mocy, ich emisja jest znacząca [17]. Stanowią one poważne zagrożenie dla środowiska, zarówno ze względu na ich pośrednie stadium w procesie tworzenia sadzy, jak i wysoką aktywność kancerogenną po dostaniu się do organizmów żywych. Okres półtrwania WWA w atmosferze wynosi około 1 tygodnia, w środowiskach wodnych kilka miesięcy, a w osadach nawet powyżej 50 lat [18].

### Metody redukcji zanieczyszczeń emitowanych z procesów spalania

W celu obniżenia uciążliwości energetycznego przetwarzania paliw w instalacjach małej i średniej mocy oraz w energetyce zawodowej podejmuje się wielokierunkowe działania zarówno w zakresie zamiany źródła energii - paliwa, jak również optymalizacji techniczno-technologicznej procesu wytwarzania energii. Ogólnie rzecz biorąc, wszystkie metody zapobiegania emisji zanieczyszczeń z procesów spalania można podzielić na dwie grupy [5]:

- metody pierwotne-ukierunkowane na optymalizację parametrów procesu spalania dla uzyskania jak najmniejszego poziomu uciążliwości

dla środowiska (ograniczanie przy czyn), akceptowalną ekonomicznie i technicznie,

- metody wtórne - polegające na usuwaniu powstałych zanieczyszczeń ze spalin.

Metody wtórne charakteryzują się wysoką efektywnością, jednak w wyniku wysokiego stopnia ich złożoności są z reguły kosztowniejsze od metod pierwotnych. Do grupy metod pierwotnych zaliczana jest technika zawracania spalin w strefę spalania - recyrkulacja spalin, ukierunkowana na ograniczanie emisji tlenków azotu. Recyrkulacja jest techniką z powodzeniem stosowaną do obniżenia emisji tlenków azotu przy spalaniu paliw gazowych i płynnych [8]. Zawrócone spaliny obniżają maksymalną temperaturę w palenisku, wskutek czego zostaje zahamowane tworzenie tlenków azotu wg mechanizmu termicznego [19].

Rozróżnia się dwa sposoby realizacji tego procesu: recyrkulację wewnętrzną i zewnętrzną. **Recyrkulacja wewnętrzna** polega na zasysaniu gorących spalin przez płomień z jego otoczenia. W praktyce recyrkulacja wewnętrzna jest realizowana w ten sposób, że palnikowi nadaje się taką geometrię, która sprzyja tworzeniu się turbulencji w spalinach i zassanie części strumienia spalin z powrotem do płomienia. **Recyrkulacja zewnętrzna** polega na dostarczaniu do palnika schłodzonych spalin zewnętrznym przewodem. Konieczność stosowania dodatkowych urządzeń powoduje, że recyrkulacja zewnętrzna jest kosztowniejsza w realizacji od recyrkulacji wewnętrznej. Recyrkulacja spalin stosowana jest w instalacjach energetyki zawodowej i przemysłowej, brak natomiast doniesień o stosowaniu tej techniki w kotłach małej mocy.

Mając powyższe na uwadze podjęto badania nad wprowadzeniem metody recyrkulacji w kotle małej mocy ze złożem stacjonarnym, w którym zastosowano technikę spalania współprądowego. Spaliny powstające podczas spalania w tym kotle zawierają węglowodory, które powinny być prekursorami wolnych rodników węglowodorowych, redukujących NO [20]. Zastosowanie recyrkulacji w tego typu kotle powinno, oprócz ograniczenia emisji NO<sub>x</sub>, skutkować zmniejszeniem ładunku pozostałych zanieczyszczeń.

## Cześć eksperymentalna

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym kotłów małej mocy, w Laboratorium Atestacji Paliw i Urządzeń Grzewczych Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze, posiadającym Certyfikat Laboratorium Akredytowanego PCA nr L 81/4/02. Stanowisko jest wyposażone w [2]: emitor wysokości 5,5 m, wodną instalację odbioru ciepła, pomiar on linę składu spalin O<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sup>\*</sup>, CO<sub>2</sub>, VOCs, system pobierania próbek spalin w celu wyznaczania stężeń pyłu i zanieczyszczeń organicznych (TOC) i 16 WWA wg EPA oraz system ciągłego pomiaru, rejestracji i przetwarzania parametrów procesu spalania typu SIMATIC.

Do badań użyto kotła komorowego z okresowym, ręcznym załadunkiem paliwa typu EKO-C30, ze złożem stacjonarnym o mocy 30 kW, jako konstrukcji typowej, stosowanej w gospodarstwach domowych. Jednostka jest nowoczesna konstrukcyjnie, posiada ceramiczną komorę dopalania oraz rozdział powietrza dostarczanego do procesu spalania na pierwotne i wtórne. Powietrze pierwotne doprowadzane jest do komory spalania paliwa poprzez dysze rozmieszczone na jej przeciwległych ścianach oraz częściowo pod ruszt, a powietrze wtórne dostarczane jest do komory dopalania lotnych produktów niecałkowitego spalania. Do badań kocioł wyposażono w układ umożliwiający zastosowanie zewnętrznej recyrkulacji spalin, ze ściśle określoną ich ilością (rys. 1).

Powietrze spalania, które stanowiło także medium napędowe eżektora zasysającego recyrkulowane spaliny, było dostarczane do kotła za pomocą jednego wentylatora. W kotle następowało samoistne rozdzielanie powietrza spalania na strumień powietrza pierwotnego i powietrza wtórno.

Do badań użyto węgla stosowanego w ogrzewnictwie komunalnym i zalecanego przez producenta kotła, tj. węgla z *KWK Julian* o granulacji orzech (tab. 1).

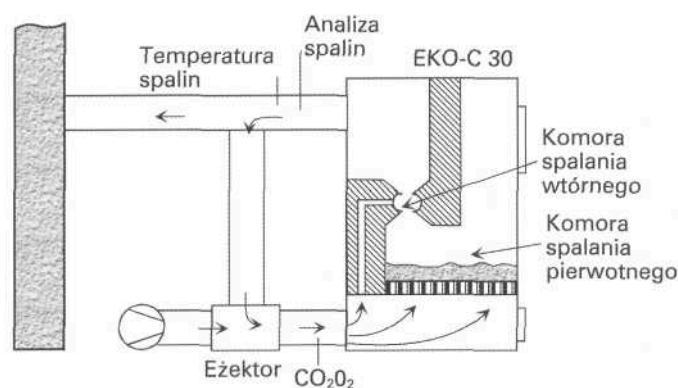
Stopień recyrkulacji spalin  $r$  określono na podstawie zależności [21]:

$$r = \frac{\dot{m}_{\text{spal}}}{\dot{m}_{\text{pow}} + \dot{m}_{\text{spal}}}$$

gdzie:

$\dot{m}_{\text{pow}}$  - strumień powietrza do spalania, kg/s;

$\dot{m}_{\text{spal}}$  - strumień recyrkulujących spalin, kg/s.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Badania nad wpływem recyrkulacji spalin na emisję zanieczyszczeń z procesu spalania węgla w złożu stacjonarnym, w testowanym kotle, przeprowadzono dla czterech stopni recyrkulacji spalin, w zakresie 0 - 35%. Testy prowadzono każdorazowo z zachowaniem około 90% obciążenia nominalnej mocy kotła. Określano wpływ recyrkulacji spalin na bilans energetyczny i na emisję zanieczyszczeń typu NO<sup>\*</sup> (w przeliczeniu na NO<sup>\*</sup>), VOCs (jako Cahb), CO, TOC i WWA.

Uzyskane wyniki przedstawiono w tabelach 2 i 3 oraz na rysunkach 2-5.

## Wyniki badań

Zastosowany w badaniach węgiel charakteryzował się bardzo dobrymi właściwościami jako paliwo: niską zawartością popiołu (2,4%) i siarki (0,29%) oraz wysoką wartością opałową.

Badany kocioł ma wysoką sprawność - 77,7%, charakterystyczną dla kotłów komorowych o zmodernizowanej konstrukcji, z dystrybucją powietrza pierwotnego i wtórnego. Jego efektywność energetyczna nieznacznie wzrasta, o 0,3%, w przypadku 19,5% stopnia recyrkulacji, następnie spada wraz ze wzrostem ilości recyrkulowanych spalin (tab. 2, rys. 2). Można jednak zauważyć, że różnice w obliczonych wartościach sprawności energetycznej mieszczą się w granicach niepewności pomiarowej, wyznaczonej dla tych pomiarów, na poziomie ("7-1,5%). Można dostrzec określoną tendencję do zmian sprawności energetycznej wraz ze zmianą ilości recyrkulowanych spalin, a co najważniejsze - zastosowanie recyrkulacji nie spowodowało obniżenia efektywności energetycznej badanego kotła.

Tabela 1  
Właściwości fizykochemiczne węgla o granulacji orzech z *KWK Julian*

	Własność	Symbol	Jednostka	Węgiel <i>KWK Julian</i> orzech		
Analiza techniczna	wilgość całkowita	W <sub>t</sub>	%	6,2		
	wilgość analityczna	W <sup>a</sup>	%	6,1		
	popiół	A <sup>a</sup>	%	2,4		
	zaw. części lotnych	V <sup>a</sup>	%	33,6		
	zaw. części lotnych	V <sup>def</sup>	%	36,7		
Analiza elementarna	węgiel	C <sup>a</sup>	%	73,8		
	wodór	H <sup>a</sup>	%	4,57		
	siarka całkowita	S <sub>t</sub> <sup>a</sup>	%	0,29		
	siarka popiołowa	S <sub>A</sub> <sup>a</sup>	%	0,15		
	siarka palna	S	%	0,14		
	azot	N <sup>a</sup>	%	1,31		
Ciepło spalania				Q <sub>s</sub> <sup>a</sup>	kJ/kg	29847
Wartość opałowa				Q <sub>a</sub>	kJ/kg	28618

Tabela 2  
Sprawność i straty energetyczne dla różnych stopni recyrkulacji spalin, %

Stopień recyrkulacji spalin	0	19,5	26,1	32,4
Strata kominowa	13,6	13,4	13,3	11,9
Strata niepełnego spalania	3,5	3,3	4,2	4,9
Strata niecałkowitego spalania	5,2	5,3	4,8	6,1
Sprawność	77,7	78,0	77,7	77,1

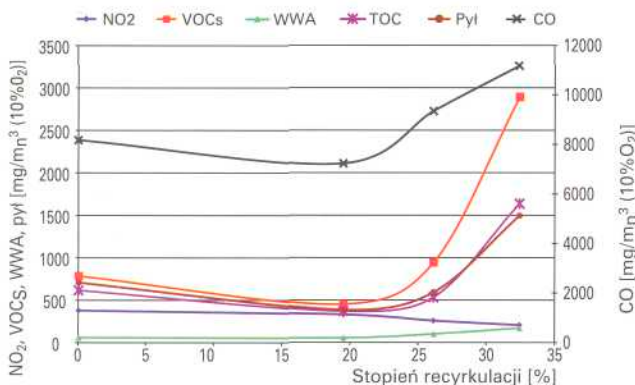
W całym zakresie stosowanych stopni recyrkulacji obserwuje się obniżenie wielkości straty kominowej, przy czym powyżej 25-procentowy spadek ten przybiera na szybkosci, co jest skutkiem znacznego spadku temperatury w czopuchu (rys. 3). Wartości strat niezupełnego i niecałkowitego spalania, w zakresie do 20% zawracanych spalin, pozostają na tym samym poziomie lub nawet lekko spadają (strata niezupełnego spalania); dla wyższych stopni recyrkulacji zaczynają wzrastać.

W przypadku zastosowania 19,5% stopnia recyrkulacji zaobserwowano obniżenie emisji sumarycznych zanieczyszczeń organicznych (TOC) - tab. 3, rys. 4. Obniżeniu uległy ilości emitowanego ładunku zanieczyszczeń organicznych (TOC) oraz ich składników, czyli lotnych związków organicznych (VOCs jako C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>), wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (16 WWA wg EPA). Mniejsza jest także koncentracja CO oraz cząstek stałych - pyłu w spalinach. W przypadku pyłu redukcja ładunku jest znacząca, podobnie jak sumarycznych zanieczyszczeń organicznych i VOCs, i sięga około 40 (rys. 5).

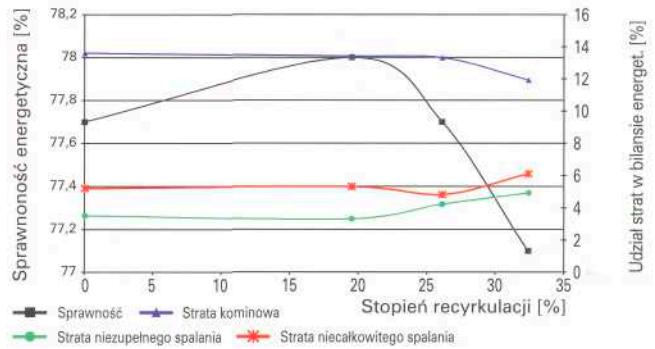
## Wnioski

Spalanie węgla w złożu stacjonarnym, spalanie przeciwprądowe, w przeciwieństwie do procesu spalania paliw gazowych czy ciekłych charakteryzuje się niestabilnością objawiającą się zmiennym zapotrzebowaniem na tlen w trakcie przebiegu procesu, zmiennym przebiegiem czasowym temperatury w złożu i - wskutek pirolizy i zgazowania substancji węglowej - zmiennym składem fazy gazowej.

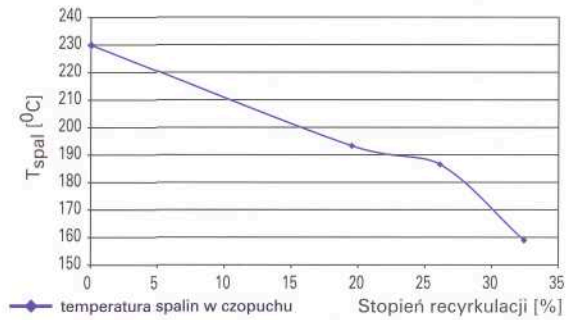
Rys. 4. Wpływ recyrkulacji spalin w procesie spalania węgla w złożu stacjonarnym na emisję zanieczyszczeń (stężenia w przeliczeniu na 10% O<sub>2</sub> w spalinach)



Rys. 2. Wpływ recyrkulacji spalin w procesie spalania węgla w złożu stacjonarnym na bilans energetyczny



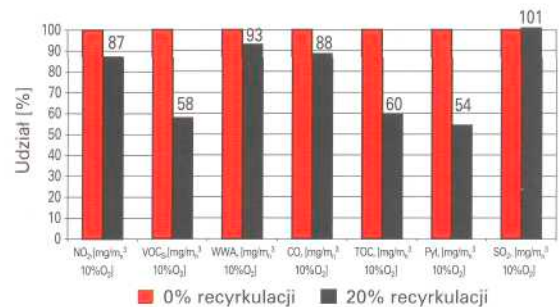
Rys. 3. Wpływ recyrkulacji spalin w procesie spalania węgla w złożu stacjonarnym na temperaturę spalin w czopuchu



Wyniki obliczeń bilansu energetyczno-emisyjnego dla stopni recyrkulacji spalin 0% i 19,5%

Tabela 3

Wyszczególnienie		Stopień recyrkulacji	
		0	19,5
Bilans energetyczny	strata kominowa, %	13,6	13,4
	strata niezupełnego spalania, %	3,5	3,3
	strata niecałkowitego spalania, %	5,2	5,3
	sprawność, %	77,7	78,0
Wskaźniki emisji (w przeliczeniu na 10% O <sub>2</sub> w spalinach)	NO <sub>2</sub>	374,8	326,5
	VOCs	780,9	450,4
	WWA	55,0	51,1
	CO	8174,9	7231,9
	TOC	613,1	365,5
	Pył	704,7	382,2
Wskaźniki emisji (w przeliczeniu na jednostkę paliwa)	NO <sub>2</sub>	5,2	4,5
	VOCs	10,7	6,1
	WWA	0,8	0,7
	CO	112,3	99,4
	TOC	8,4	5,0
	Pył	9,7	5,3
Wskaźniki emisji (w przeliczeniu na jednostkę energii)	NO <sub>2</sub>	180,2	156,9
	VOCs	375,5	216,5
	WWA	26,5	24,6
	CO	3930,7	3477,1
	TOC	294,8	175,7
	Pył	338,9	183,8
SO <sub>2</sub>	161,8	163,2	



Rys. 5. Porównanie emisji zanieczyszczeń w procesie spalania węgla w złożu stacjonarnym dla stopni recyrkulacji spalin 0 i 20%

Te właściwości powodują, że trudniej jest, niż w przypadku paliw gazowych i ciekłych lub też spalania pyłu węglowego, jednoznacznie określić wpływ pojedynczych czynników decydujących o przebiegu tego procesu. Jednocześnie piece oraz kotły małej mocy, w których stosuje się tę technikę spalania węgla są znaczącym źródłem emisji nie tylko gazów (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>), ale przede wszystkim pyłów (TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>25</sub>), metali ciężkich oraz zanieczyszczeń organicznych (TOC), w tym VOCs, oraz POPs (WWA, PCDDs/Fs).

Negatywny wpływ spalania węgla, w tych warunkach, na zdrowie mieszkańców i środowisko oraz brak możliwości szybkiej eliminacji tego typu urządzeń grzewczych małej mocy (względny ekonomiczne i społeczne) narzucają konieczność poszukiwania rozwiązań technicznych z grupy pierwotnych metod ograniczania emisji.

Jednym z takich rozwiązań może być, jak wykazały badania zaprezentowane w niniejszym artykule, recyrkulacja spalin. W przypadku kotłów, w których spalanie paliwa stałego przebiega zgodnie z techniką współprądowego spalania, udział recyrkulowanych spalin nie może być większy niż 20%. W tym zakresie recyrkulacja nie wpłynęła negatywnie na bilans energetyczny, a wręcz zaobserwowano wzrost sprawności energetycznej (głównie wskutek zmniejszenia się straty kominowej) - jednakże w granicach niepewności pomiarowej. Jednocześnie stwierdzono znaczące obniżenie ilości emitowanych, sumarycznych zanieczyszczeń organicznych (TOC), w tym VOCs i WWA oraz CO i pyłu.

Zawarte w recyrkulowanych spalinach związki organiczne i węglowodory są prekursorami wolnych rodników, które w reakcjach redukcji NO będą powodować obniżenie ładunku emitowanych NO<sub>x</sub> [20]. Zastosowanie stopni recyrkulacji wyższych od 20% powoduje znaczne pogorszenie procesu spalania. Wzrasta emisja zanieczyszczeń organicznych, co jest wynikiem za małej ilości tlenu w powietrzu dostarczanym do spalania w stosunku do zapotrzebowania. W konsekwencji wzrastają straty niepełnego i niecałkowitego spalania, pogarsza się bilans energetyczny.

Kotły komorowe, których reprezentantem był badany kocioł ECO-C30, stanowią zasadniczą, jeśli nie główną część zainstalowanych w indywidualnym ogrzewnictwie urządzeń generujących ciepło.

Wprowadzenie recyrkulacji do nowo budowanych kotłów mogłoby znacząco przyczynić się do ograniczenia niskiej emisji. Z uwagi na różnorodność konstrukcji kotłów komorowych niezbędne jest dokonanie optymalizacji stopnia recyrkulacji pod kątem maksymalizacji sprawności energetycznej i efektywności ekologicznej oraz efektywności ekonomicznej wprowadzanych rozwiązań. Badania w tym zakresie będą kontynuowane.

Badania wykonano w ramach grantu badawczego nr 8T10B04921, pt. „Badania nad wpływem recyrkulacji zewnętrznej spalin w procesie spalania węgla w złożu stacjonarnym na emisję NO<sub>x</sub>, VOCs i WWA” - dofinansowanego przez KBN.

#### Literatura

- [1] Kubica K.: Termochemiczne przemiany substancji organicznej węgla w procesie jego spalania w złożu stacjonarnym. *Karbo*, 9, 2000, 292-300
- [2] Kubica K.: Atestacja ekologiczno energetyczna paliw stałych i urządzeń grzewczych dla gospodarki komunalnej. *Karbo-Energochemia-Ekologia*, t. 41, 1996, 392
- [3] Ross A.B., Jones J.M., Chaiklangmuang S., Pourkashanian M., Williams A., Kubica K., Andersson J.T., Kerst M., Danihelka R., Bartle K.D.: Measurement and prediction of the emission of pollutants from combustion of coal & biomass in fixed bed furnace. *Fuel*, 81, 2002, 571-582
- [4] Jankowski B., Umer A., Niemyski M.: Rola paliw węglowych w gospodarce energetycznej kraju w perspektywie do roku 2015. *Karbo-Energochemia-Ekologia*, 2, 1997, 39-47
- [5] Tomeczek J.: Spalanie paliw ze szczególnym uwzględnieniem problemów ekologicznych. Ekspertyza PAN, Warszawa 1992
- [6] Arai N., Kitagawa K., Kobayashi N., Asai K., Matsunami A.: Recent Drastic Increase in Atmospheric Concentration of N<sub>2</sub>O in Japan. 4th ASEM-JSEM Thermal Engineering Joint Conference, Maui, Hawaii 1995
- [7] Nowak W., Janik M.: Powstawanie i destrukcja podtlenu azotu N<sub>2</sub>O w procesie spalania paliw. *Gospodarka Paliwami i Energią* 1995, nr 6
- [8] Tomeczek J., Gradoń B.: Możliwość wpływania na emisję tlenków azotu z komór spalania. Konferencja naukowo-techniczna „Zastosowanie niskoemisyjnych palników gazowych”, Ustroń-Jaszowiec 1998
- [9] Tomeczek J.: Ekologiczne aspekty użytkowania paliw w przemyśle. *Gospodarka Paliwami i Energią* 1997, nr 3
- [10] Zeldowicz J. B.: The Oxidation of Nitrogen in Combustion Explosions. *Acta Physicochemica USSR*, 1946, vol. 21, s. 577-628
- [11] Tomeczek J., Gradoń B.: The role of nitrous oxide in the mechanism of thermal nitric oxide formation within flame temperature range. *Combustion Science and Technology*, 125, 4-6, 1997, 159-180
- [12] Warnatz J., Maas U., Dibble R.W.: *Verbrennung*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg 1997
- [13] Kubica K.: Przemiany termochemiczne węgla i biomasy. Praca zbiorowa: Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy. Zabrze-Kraków, Wyd. IGSMiE PAN i IChPW, Zabrze-Kraków, 2003, s. 145-232
- [14] Schaefer K., Emeis S., Hoffmann H.: Validierung von VOC-Emissionsminderungsmaßnahmen bei Betankunfen und Transporten von Ottokraftstoffen, Fraunhofer Institut Atmosphärische Umweltforschung, Jahresbericht 2001
- [15] Alloway B.J.: *Chemical Principles of Environmental Pollution*. Blackie Academic & Professional, London 1993
- [16] Noll K. E.: *Fundamentals of Air Quality Systems*, American Academy of Environmental Engineers Publication, 1999
- [17] Kubica K. The effect of coal combustion process in stable bed conditions on generation and distribution of PaHs, *Proce. Of the II International Scientific Conference „Air Protection in Theory & Application*. Szczyrk, 2-4 June 1998, s. 399
- [18] IPCS, Environmental Health Criteria 202. Selected Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Geneva: WHO 1998
- [19] Kowalewicz A.: *Podstawy procesów spalania*. WNT, Warszawa 2000
- [20] Miller J.A., and Bowman C.T: Mechanisms and Modelling of Nitrogen Chemistry in Combustion. *Progr. Energy Comb. Sci.*, Vol. 15 (1989) pp. 287
- [21] Borkowski J., Kordylewski W.: Redukcja emisji NO<sub>x</sub> przez recyrkulację spalin w palniku olejowym. *Gospodarka Paliwami i Energią* 1995, nr 5