9. ODPADY I ICH SPALANIE

9.1. Odpady

Współczesne społeczeństwo wytwarza wiele rodzajów odpadów: komunalne, szpitalne, niebezpieczne i różne odpady przemysłowe. W Polsce definicje odpadów, zasady postępowania oraz opłaty związane z nimi określa ustawa *O odpadach* [49]. Są to substancje stałe lub ciekłe, za odpady uważa się także osady ściekowe. W Polsce (i w UE) odpady podzielono na 20 grup, które dalej dzieli się na podgrupy i na rodzaje. Jest im przyporządkowany określony kod [34]. Przepisy wykonawcze ustawy wydzielają kategorie i rodzaje odpadów, które według ich charakteru, składu, właściwości i działania kwalifikuje się jako niebezpieczne [34].

W Polsce wytwarza się około 140 mln Mg odpadów rocznie, w tym około 13 mln Mg odpadów komunalnych [60]. Dominującą grupę stanowią odpady stałe. Wiele składników odpadów ma znaczną wartość energetyczną, co pozwala je traktować jako paliwa lub surowce do wytwarzania paliw. Energetyczną waloryzację różnego typu odpadów oraz ocenę ich zasobów w Polsce podano w pracy [14].

9.1.1. Odpady komunalne

Odpady tego typu, powstające w gospodarstwach domowych, w obiektach użyteczności publicznej i obsługi ludności, a także wraki pojazdów mechanicznych i odpadki uliczne, ze względu na ich wartości energetyczne, można podzielić na:

- palne, np.: papier, tworzywa sztuczne, drewno, skóra, guma, żywność, tkaniny,
- niepalne, np.: szkło, ceramika, kamienie, betony i metale.

Skład odpadów komunalnych bardzo zależy od społeczeństwa, na przykład cechą charakterystyczną odpadów społeczeństw uprzemysłowionych jest duży udział składników organicznych i papieru (tab. 9.1) [60].

Tabela 9.1

Skład odpadów komunalnych zależnie od stopnia uprzemysłowienia kraju [60]

Udział składnika odpadów % wag.	Kraje uprzemysłowione	Kraje średnio uprzemysłowione	Kraje rozwijające się
Papier	35÷40	14÷30	1÷4
Szkło, ceramika	4÷9	2÷10	1÷6
Metale	3÷13	1÷5	1÷4
Tworzywa sztuczne	2÷10	4÷6	1÷4
Skóra, guma	0÷1	0÷2	0÷7
Tekstylia	2÷4	4÷10	1÷5
Drewno, kości	0÷4	0÷6	1÷7
Odpadki żywnościowe	50÷70	30÷60	5÷20
Razem nieorganiczne	20÷30	25÷60	35÷80
Inne	40÷20	10÷30	2÷40

Procedury wyznaczania składu stałych odpadów komunalnych i oznaczania ich wartości opałowej są w Polsce określone odpowiednimi normami [27, 28]. Obszerną analizę morfologii odpadów komunalnych w Polsce zawiera praca [55].

Jeżeli odpady komunalne mają być przetwarzane, należy wyróżnić w nich grupę odpadów wielkogabarytowych: sprzęt gospodarstwa domowego, elektronika użytkowa, wykładziny i meble. Specyficzną grupą odpadów palnych są drewniane elementy konstrukcyjne i meble, ponieważ zawierają one farby i lakiery oraz środki konserwujące drewno. Inny charakterystyczny rodzaj odpadów komunalnych to osady ściekowe. Różnorodność składu odpadów komunalnych pokazano w tabeli 9.2.

Tabela 9.2

Analiza elementarna ważniejszych składników odpadów komunalnych (według [46])

Składnik	C	H	O	N	Cl	S	Wilgoć %	Popiół %	Ciepło spalania MJ/kg
Papier	33,0	4,6	33,0	0,1	0,13	0,21	16	13	12,7
Tworzywa sztuczne	56,4	7,8	8,1	0,85	3,0*	0,3	15	9	18-45
Guma i skóra	43,1	5,4	11,6	1,34	5,0	1,2	10	22	19,6
Drewno	41,2	5,0	35,0	0,24	0,1	0,07	16	3	16,2
Tkaniny	37,2	5,0	27,1	3,1	0,3	0,3	25	2	15,3
Odpady ogrodowe	23,3	3,0	17,5	0,9	0,13	0,15	45	10	9,3
Odpadki żywnościowe	18,0	2,5	12,9	1,1	0,4	0,06	60	5	7,6

* W zależności od rodzaju tworzywa udział Cl w nim jest w zakresie 0÷45%.

Rozpatrując odpady komunalne jako paliwa, należy zwrócić uwagę na ich niektóre – istotne dla procesu spalania – cechy. Gęstość nasypowa wielu składników odpadów bardzo się różni, na przykład: metale 2670÷13800 kg/m^3, szkło 2650 kg/m^3, papier 940 kg/m^3, wełna około 700 kg/m^3. Gęstość tworzyw sztucznych zmienia się też w szerokim zakresie zależnie od typu tworzywa i produktu.

Bardzo różna jest porowatość składników odpadów komunalnych: papier, drewno, odpady ogrodowe, odpadki żywnościowe mają porowatość zbliżoną do porowatości biomasy, a niektóre materiały (tworzywa sztuczne, guma, metale) są nieporowate.

Ze względu na emisję dioksyn i furanów ze spalarni odpadów ważna jest zawartość chloru w odpadach (w tworzywach sztucznych, gumie i w skórze). Źródłem metali ciężkich (Cu, Cd, Co, Cr, Pb i Zn) są: papier, odpadki żywnościowe, guma i skóra.

Dla *energetycznego* wykorzystania odpadów ważna jest ich wartość opałowa. Największą wartość opałową mają tworzywa sztuczne, na przykład polipropylen 44 MJ/kg. Za kryterium palności odpadów przyjmuje się zwykle granicę ich **autotermicznego** spalania, którą ustalono umownie na 6,0 MJ/kg [21].

9.1.2. Odpady szpitalne (medyczne)

Odpady szpitalne pochodzą ze szpitali, klinik medycznych i weterynaryjnych, gabinetów dentystycznych, hospicjów i innych zakładów służby zdrowia. Największy udział mają w nich papier i tworzywa sztuczne, ale są też instrumenty medyczne, bandaże, krew, fragmenty ciał, zwłoki zwierząt i lekarstwa (tab. 9.3). Liczne dane o morfologii odpadów szpitalnych w Polsce można znaleźć w pracy [53]. Duża różnorodność morfologiczna odpadów medycznych powoduje, że w niektórych krajach dzieli się je na kategorie, biorąc pod uwagę stopień stwarzanego zagrożenia dla środowiska. W Polsce propozycję podziału na grupy odpadów medycznych przedstawiono w publikacji [53]. Zamieszczone w tabeli 9.3 dane wskazują, że efekt cieplny spalania większości odpadów medycznych może być znaczny.

Tabela 9.3

Ważniejsze składniki odpadów medycznych (według [53])

Składnik	Gęstość kg/m^3	Wilgoć %	Wartość opałowa MJ/kg
Fragmenty ciał	810÷1200	70÷90	1,9÷8,4
Tworzywa sztuczne	80÷2300	0÷1	22,7÷45,8
Wymazy, absorbenty	80÷1000	0÷30	13,0÷27,9
Alkohole i pochodne	800÷1000	0÷0,2	25,6÷32,6
Zwłoki zwierząt	500÷1300	60÷90	2,1÷14,9
Szkło	2800÷3600	0	0
Pościel i inne	320÷750	10÷50	9,3÷18,8
Papier, gaza i inne	80÷1000	6÷30	13,0÷27,9
Noże i igły	7300÷8100	0,1	0÷0,14
Różne płyny	1000÷1020	80÷100	0÷4,6

Z powodu występowania w niektórych odpadach szpitalnych ustrojów chorobotwórczych (bakterii, prątków, grzybów, wirusów i pasożytów) ważnym zagadnieniem jest ich bezpieczne magazynowanie i przemieszczanie. Odpady szpitalne poszczególnych typów powinny być magazynowane w specjalnych pojemnikach (plastikowych workach lub zbiornikach). Najważniejsze operacje przetwarzania odpadów szpitalnych to: **rozdrabnianie** i **sanitacja** [53]. Rozdrabnianie wykonuje się przede wszystkim w celu zwiększenia gęstości odpadów (od ok. 0,15 do 0,85 Mg/m^3) i ułatwienia ich sanitacji. Pojęcie sanitacji oznacza procesy wyjaławiania materiałów. W medycynie stosuje się najczęściej **wyjalawianie parowe** oraz **dezynfekcję** środkami chemicznymi.

9.1.3. Komunalne osady ściekowe

Osady z komunalnych oczyszczalni ścieków (osady ściekowe) stanowią jeden z trudniejszych problemów gospodarki odpadami z powodu: zwiększającego się strumienia osadów do zagospodarowania (2,5÷3,5 mln Mg uwodnionych osadów rocznie

w Polsce [4]), dużego uwodnienia osadów ściekowych (ponad 99%) i ich niekorzystnej dla środowiska naturalnego charakterystyki.

Osady ściekowe to organiczno-mineralna faza stała, wyodrębniona ze ścieków komunalnych w procesie sedymentacji [3]. Są one mieszaniną niesionych przez wodę substancji ciekłych i stałych różnego pochodzenia. W osadach ściekowych najwięcej jest protein, węglowodanów, tłuszczów i olejów. Ścieki zawierają niebezpieczne substancje organiczne i nieorganiczne, a nawet toksyczne oraz chorobotwórcze mikroorganizmy [4]. W tabeli 9.4 porównano skład elementarny osadów ściekowych i węgla kamiennego. Zwraca uwagę duży udział metali ciężkich w osadzie, ich udział może być jeszcze większy, jeżeli ścieki komunalne i przemysłowe będą zmieszane.

Tabela 9.4

Analiza elementarna węgla kamiennego i osadu w stanie suchym (według [4])

Składnik	C	H	N	S	Cl	O	Pb	Cd	Hg	Zn	Ni	As	Cu	Co	Cr
	% wag.						mg/kg s.m.								
Węgiel	79,2	4,7	1,8	0,9	0,7	7,6	20	<1	<2	15	3	5	23	<2	<2
Osad	30,9	4,6	4,5	1,1	0,1	26,5	211	2	<2	567	32	10	829	3	62

9.1.3.1. Przetwarzanie osadów ściekowych

Osady ściekowe mają agresywną, patologiczną oraz toksyczną charakterystykę i zawierają tylko od 0,25 do 12% substancji stałej. W celu umożliwienia ich transportu i przetwarzania osady poddaje się odwodnieniu, stabilizacji oraz kondycjonowaniu, żeby wyeliminować chorobotwórcze bakterie i zredukować fetor.

Odwadnianie osadów ściekowych to wieloetapowy proces obejmujący: zagęszczanie, odwadnianie właściwe i suszenie (tab. 9.5). Zagęszczanie polega na częściowym usunięciu wody, tak że osad zmniejsza objętość, nie tracąc płynnej konsystencji. Odwadnianie osadów odbywa się w wirówkach i prasach. Najczęściej stosowane suszarki osadów ściekowych mają konstrukcję bębnową lub fluidalną. Wysuszony osad ściekowy ma postać niemal bezwonnego granulatu o wartości opałowej około 20 MJ/kg s.m.

Istnieją trzy metody stabilizacji osadów: **fermentacja beztlenowa**, **wapnowanie** i **obróbka cieplna**. **Fermentacji beztlenowa** (metanowa) jest podstawowym sposobem stabilizacji osadów ściekowych, polegającym na biochemicznej konwersji części substancji organicznej w gaz i stabilną pozostałość. Gaz pofermentacyjny (ok. 2/3CH_4 i 1/3CO_2), mający w przybliżeniu wartość opałową około 23 MJ/m^3, nadaje się do energetycznego wykorzystania po oczyszczeniu z siarkowodoru [4]. Zmniejszona o około 50% objętości stała pozostałość osadu ma wartość opałową około 10,5 MJ/kg s.m. [3].

Tabela 9.5

Odwadnianie osadów (na podstawie [57])

Operacja	Substancja	Udział wody, %
–	osad	95
Zagęszczanie	zagęszczony osad	90
Mechaniczne odwadnianie	odwodniony osad	75
Kondycjonowanie	kondycjonowany osad	65
Suszenie	suszony osad	5

Wapnowanie osadów ściekowych polega na wykorzystaniu **wapna palonego** w procesie hydratacji

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 1{,}16\ MJ/kg_{CaO}$$

zapewniającego higienizację osadu przez niszczenie organizmów chorobotwórczych i pozbawienie fetoru, dzięki podniesieniu temperatury i wysokiemu pH (≈12). Zaletą wapnowania jest stabilizacja osadu przez jego zagęszczenie, wadą natomiast jest zwiększenie objętości osadu oraz zmniejszenie wartości opałowej. **Stabilizacja termiczna**, która polega na podgrzaniu osadu kolejno: najpierw do temperatury 30÷75 °C, a następnie – przy zwiększonym ciśnieniu – do 75÷190 °C, jest metodą energochłonną. Nie wpływa istotnie na jakość osadu, ale powoduje uwolnienie niektórych substancji organicznych, NH_3 i ciężkich metali w postaci odcieków [57].

9.1.4. Drewno poużytkowe

Grupę odpadów drzewnych zawierającą zużyte elementy drewniane, jak: opakowania, stolarka budowlana, elementy konstrukcyjne, zużyte meble i inne, określa się terminem drewno poużytkowe [8]. Konieczność zagospodarowania tych odpadów wynika ze skali wytwarzania drewna poużytkowego w Polsce (3 mln m^3/rok) oraz z ograniczeń w jego składowaniu. Jego wykorzystanie do celów energetycznych przez jego spalanie i zgazowanie to jeden z zasadniczych kierunków utylizacji. W tabeli 9.6 pokazano ważniejsze parametry energetyczne drewna poużytkowego [8].

Tabela 9.6

Właściwości energetyczne drewna poużytkowego [8]

Rodzaj drewna	Części lotne, %	Popiół, %	Wilgoć, %	Wartość opałowa, MJ/kg
Drewno „naturalne”	79,60	0,52	7,31	18,7
Elementy budownictwa ogrodowego	81,96	0,94	5,16	18,4
Podkłady kolejowe	84,65	0,54	6,75	20,1
Drewno rozbiórkowe-konstrukcyjne	81,24	1,03	9,30	18,1
Stare okna	79,65	7,46	7,98	17,5
Drzwi wewnętrzne	81,87	3,16	7,98	18,8
Stare zużyte meble	79,37	0,77	7,69	18,4

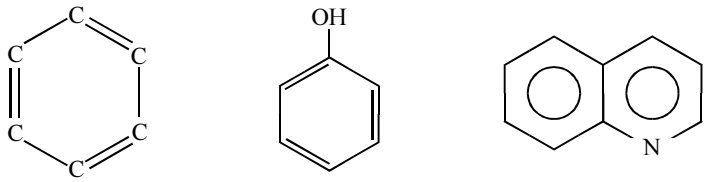
Bezpośrednie wykorzystanie drewna poużytkowego przez spalanie może jednak stwarzać zagrożenia emisji toksycznych zanieczyszczeń, wynikającymi głównie z obecności w nim syntetycznych substancji chemicznych wprowadzonych do drewna celem poprawy jego właściwości oraz ochrony przed korozją biologiczną. W Niemczech na przykład dokonano podziału drewna poużytkowego przeznaczonego do spalania na cztery grupy, z zależności od zawartości syntetycznych dodatków balastowych [8]:

I. odpady z „naturalnego” drewna, bez syntetycznych dodatków,
II. inne niż „naturalne” odpady drzewne, niezawierające PVC i impregnatów,
III. inne niż „naturalne” odpady drzewne, zawierające PVC, ale nie zawierające impregnatów,
IV. odpady drzewne zawierające impregnaty.

Zakwalifikowanie drewna do odpowiedniej grupy określa dopuszczalną technologię ich termicznego przekształcania. Tylko odpady z pierwszej grupy można spalać bez ograniczeń.

9.1.5. Odpady niebezpieczne

Jest wiele źródeł odpadów niebezpiecznych: zakłady przemysłowe, laboratoria badawcze, szpitale, gospodarstwa rolne (środki ochrony roślin) i domowe oraz inne. Lista tych odpadów jest bardzo obszerna, a do najczęściej spotykanych niebezpiecznych substancji odpadowych należą: rozpuszczalniki, agrochemikalia, konserwanty, ropopochodne szlamy, smoły, kwasy, związki metali ciężkich, chlorowcopochodne i wiele innych [34, 49]. Na rysunku 9.1 przedstawiono strukturę chemiczną trzech reprezentantów niebezpiecznych składników odpadów, na bazie węgla i wodoru.



Benzen Fenol Pirydyna

Rys. 9.1. Struktury chemiczne trzech związków chemicznych występujących w niebezpiecznych odpadach

Istnieje tak duża różnorodność odpadów niebezpiecznych, że trudno podać ich reprezentatywny skład; często występują w powiązaniu z innymi nieszkodliwymi materiałami, na przykład: drewno nasycone środkami konserwującymi oraz ziemia skażona związkami organicznymi typu: benzen, toluen i ksylen. Charakterystyczną cechą stałych odpadów niebezpiecznych jest w nich udział chloru i metali ciężkich [46]. Można podać jedynie bardzo ogólne cechy tych odpadów:

- większość stałych odpadów niebezpiecznych ma nieporowatą strukturę, ważna jest jednak porowatość nośników, w których występują,
- palna część odpadów niebezpiecznych jest podobna w swoich właściwościach do odpadowych paliw petrochemicznych, dlatego ich charakterystyki spalania są zbliżone do tego typu paliw [46].

Ciekłe substancje niebezpieczne to: oleje, emulsje, materiały smoliste, kleje, zużyte rozpuszczalniki i chemikalia stosowane w przemyśle fotograficznym [34].

9.1.5.1. Odpady zwierzęce

Zakaz stosowania mączek mięsno-kostnych w żywieniu zwierząt spowodował konieczność utylizacji odpadów pochodzenia zwierzęcego [50]. Według dyrektywy UE 90/667/EWG odpady pochodzenia zwierzęcego dzieli się na dwie kategorie:

- odpady wysokiego ryzyka (padlina),
- odpady niskiego ryzyka (odpady poubojowe).

Późniejsze dyrektywy UE zaliczają do materiału szczególnego ryzyka (SRM) materiał zagrożony BSE (czaszka, mózg, gałki oczne, migdałki, rdzeń kręgowy i jelita). Utylizacja odpadów poubojowych

jest dwuetapowa, w pierwszym etapie wytwarza się z odpadów produkty bezpieczne pod względem higienicznym, którymi są mączki i tłuszcze odpadowe. Drugi etap utylizacji polega na ich spaleniu [11].

Pierwszy z etapów odbywa się w wyodrębnionych zakładach utylizacyjnych. Proces utylizacji odpadów zwierzęcych polega na rozdrobnieniu odpadów, suszeniu, sterylizacji, prasowaniu – odtłuszczaniu, chłodzeniu i mieleniu. Biorąc pod uwagę złożoność stosowanych technologii wytwarzania z odpadów zwierzęcych mączek mięsno-kostnych i tłuszczów, można je zaliczyć do paliw z odpadów (tab. 9.7).

Tabela 9.7

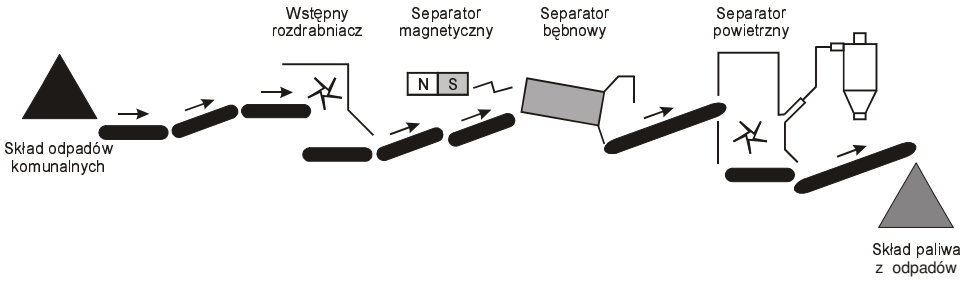
Parametry mączek mięsno-kostnych i tłuszczu (wg [11])

Parametr	Mączka mięsna	Mączka kostna	Tłuszcz
C, %	43,8	32,0	77,1
H, %	5,3	4,5	12,3
O, %	17,0	-	5,5
N, %	8,9	7,6	0,06
Cl, %	0,6	0,3	<0,09
Popiół, %	20,5	38,0	0,21
Wilgoć, %	3,4	4,0	0,31
Tłuszcz, %	11,8	14,0	98,0
Wartość opałowa, MJ/kg	20,0	14,0	38,0

9.1.6. Paliwa z odpadów

Istotną rolę w energetycznej utylizacji odpadów może pełnić przetwarzanie odpadów w paliwa. W Polsce wytworzone z odpadów komunalnych paliwa nazywa się PAKOM (paliwo komunalne), w literaturze obcej używa się nazwy RDF (ang. *Refuse Derived Fuel*) lub BRAM (niem. *Brennstaus Müll*) [23].

Istnieje kilka metod wytwarzania paliw z odpadów komunalnych, które różnią się stopniem technicznego skomplikowania. Najważniejszym etapem w przetwarzaniu odpadów komunalnych w paliwa jest rozdzielanie (segregacja) odpadów. Do segregacji odpadów stosuje się metody ręczne i mechaniczne. Ręcznie oddziela się niepalne części (szkło, kamienie i inne) oraz duże elementy (telewizory, lodówki, pralki i inne). Mechaniczne klasyfikatory (bębnowe lub powietrzne) rozdzielają odpady na frakcje. Metale żelazne są oddzielane magnetycznie (rys. 9.2.). Efektywność mechanicznych metod segregacji odpadów ocenia się na 80÷98% [7].



Rys. 9.2. Schemat instalacji do przetwarzania odpadów komunalnych w paliwo

Dalsza obróbka rozdzielonych odpadów to: rozdrabnianie, suszenie i zagęszczanie; to ostatnie odbywa się przez brykietowanie lub pelletyzowanie. W celu stabilizacji i zmniejszenia zagrożeń biologicznych, do paliw z odpadów dodaje się wapno, a poprawę właściwości energetycznych uzyskuje się przez dodanie węgla. W tabeli 9.8 porównano wybrane właściwości: nieprzetworzonych odpadów, paliwa z odpadów oraz młodego węgla kamiennego.

Tabela 9.8

Porównanie niektórych właściwości odpadów PAKOM oraz węgla (na podstawie [46])

Parametr	Węgiel kamienny	NPO*	PAKOM
Wykorzystana część odpadu, % wag.	–	100	67
Wykorzystana energia z odpadu, %	–	100	78
Składniki, % wag.			
C	63,8	27,5	32,2
H	4,0	3,7	4,3
O	9,6	20,6	25,3
N	1,0	0,45	0,37
S	0,4	0,83	0,79
Cl		0,50	0,58
Wilgoć, %	14,1	23,2	21,2
Popiół, %	7,0	23,4	15,9
Ciepło spalania, MJ/kg	25,9	11,2	13,2

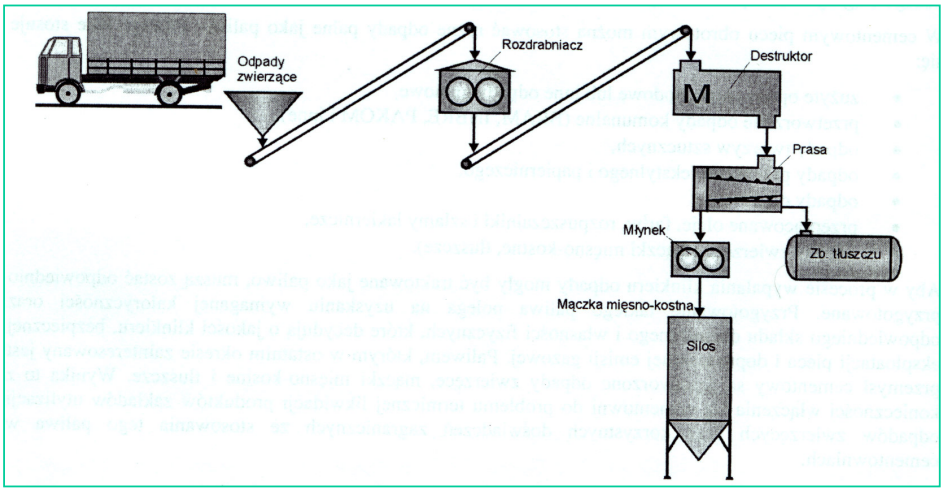
NPO* nieprzetworzone odpady.

Paliwa z odpadów komunalnych są bardziej jednorodne niż materiał wyjściowy (gęstość PAKOM jest w zakresie 160÷450 kg/m^3) [46]. Pod względem składu chemicznego, reaktywności (z analizy stosunków H/C i O/C) i wartości opałowej są zbliżone do biopaliw (drewna). Dominujące związki w tym paliwie to celuloza i hemicelulozy, dlatego rozkład termiczny zachodzi już w temperaturze 300÷400 °C. Udział węglowodorów aromatycznych jest niewielki, zależy od udziału tworzyw sztucznych, w których także bywa różny (na przykład nie ma ich w PCV). Paliwa typu PAKOM różnią się od biomasy mniejszą zawartością wody i większym udziałem substancji mineralnej. Ze względu na ich znaczną reaktywność mają skłonność do samozapłonu podczas składowania [7].

Udział azotu w paliwach typu PAKOM zależy głównie od udziału odpadów ogrodowych i resztek żywności, w których azot występuje w ugrupowaniach aminowych (–NH_2) [46]. Najważniejszymi źródłami siarki są guma i skóra. Źródłami chloru w paliwach z odpadów komunalnych są tworzywa sztuczne, przede wszystkim PCV (ang. *PVC*), a także guma, skóra oraz papier. Udział metali ciężkich w PAKOM może być znacznie większy niż w biomasie, a nawet w węglu.

Obecność tworzyw sztucznych PCV w odpadach komunalnych zawierających chlor jest najważniejszym źródłem emisji dioksyn i furanów podczas spalania. PCV należą do najtańszych i powszechnie stosowanych tworzyw, dlatego trudno ich uniknąć w odpadach. Można jednak znacznie zredukować emisję dioksyn i furanów, poddając wydzielone ze strumienia odpadów tworzywa sztuczne **termolizie** w temperaturze 330÷350 °C w obecności bitumitów. PCV ulegają w tych warunkach destrukcji, uwalniając chlorowodór, a pozostałość koksowa zostaje *wbudowana* w strukturę bitumitu. W rezultacie zawartość chloru w nowej strukturze maleje do około 0,2%, w porównaniu do 1,5÷3% Cl w odpadowych tworzywach sztucznych (tab. 9.2). Przykładem jest technologia przetwarzania PCV w paliwo na bazie procesu termolizy z użyciem paku węglowego. Uwalnia się w niej chlor, a pozostałość po zmieszaniu z miałem węglowym daje stabilny, zbliżony właściwościami do węgli energetycznych, produkt, zwany *Karboterm* [56].

Ze względu na dużą wartość opałową, znaczną produkcję (szacunkowo 440÷840 tys. Mg/rok) i odpowiednią dla użytkowania przemysłowego formę do paliw odpadowych należy zaliczyć mączki mięsno-kostne i tłuszcze odpadowe z odpadów zwierzęcych (tab. 9.7). Na rysunku 9.3 przedstawiono schemat przetwarzania odpadów zwierzęcych w mączki i tłuszcze odpadowe.



Rys. 9.3. Schemat instalacji do przetwarzania odpadów komunalnych w paliwo [11]

Znaczny potencjał dla wytwarzania paliw z odpadów istnieje w komunalnych osadach ściekowych, ze względu na ich kaloryczność i duży wytwarzany strumień (0,5 Mg m.s./rok). Z powodu ich dużej zawartości wody (ok. 65%) i mazistej postaci opracowano technologie przetwarzania osadów ściekowych w paliwa stałe. Przykładem jest technologia wytwarzania paliwa o nazwie PBS na bazie osadu ściekowego (50%) i mułu węglowego (50%). Muł węglowy jest odpadem z procesu wzbogacania węgla kamiennego w kopalniach (ocenia się jego zasoby w Polsce na 50 mln Mg) [56]. Składnikiem wiążącym było wapno palone, a produkt końcowy otrzymywano w postaci granulowanej. W tabeli 9.9 porównano właściwości paliwa odpadowego PBS oraz węgla brunatnego i kamiennego [48].

Tabela 9.9

Porównanie właściwości paliwa odpadowego PBS i węgli (stan roboczy) [48]

Parametr	Paliwo PBS	Węgiel brunatny	Węgiel kamienny
Wartość opałowa, MJ/kg	14,80	8,5÷16,6	16,7÷34
Wilgoć, %	10,92	15÷60	1,5÷20
Części lotne, %	33,50	7÷60	2,5÷45
Popiół, %	29,15	10÷35	3÷40
Siarka, %	0,64	0,7÷7	0,5÷6
Chlor, %	0,06	–	0,02÷0,4

Przykładów innych technologii otrzymywania paliw z odpadów można podać więcej, zainteresowani tą problematyką znajdą je w materiałach cyklicznej konferencji pt. „Paliwa z odpadów" organizowanej przez prof. J.W. Wandrasza ze współpracownikami.

9.2. Spalanie odpadów

Spalanie należy do metod **termicznego przekształcania** odpadów, które rozumie się jako proces rozkładu organicznych składników odpadów zachodzący w temperaturze powyżej 600 °C [49]. Można wyróżnić trzy ważniejsze grupy tych metod, w których podstawową rolę pełnią procesy:

- spalania,
- pirolizy,
- zgazowania.

Metody wykorzystujące procesy spalania, w porównaniu do dwóch pozostałych grup metod, mają istotne zalety:

- mniejszy koszt przekształcania odpadów,
- możliwość przekształcania większego strumienia odpadów,
- możliwość odzysku ciepła spalanych opadów.

Spalanie odpadów nie jest jednak pozbawione wad, przede wszystkim charakteryzuje się emisją zanieczyszczeń typowych dla spalania paliw kopalnych (CO_2, CO, NO_x, SO_2 i pyły), a ponadto emisją znacznie groźniejszych zanieczyszczeń, jak: metale ciężkie, WWA, PCDDs/PCDFs (dioksyny i furany) i PCBs (chlorowane bifenyle). Proces spalania odpadów nie jest łatwo kontrolować, ponieważ odpady zwykle są *trudnym* paliwem. Mimo tych wad, spalanie jest podstawową metodą termicznego przekształcania odpadów, natomiast piroliza i zgazowanie są stosowane w bardzo rozbudowanych systemach termicznego przekształcania odpadów. W wielu nowoczesnych technologiach piroliza i spalanie występują w następujących po sobie etapach [24, 26].

Metody termicznego przekształcania **odpadów niebezpiecznych** mają własną specyfikę, ponieważ ich najważniejszym celem jest zmniejszenie objętości i unieszkodliwianie (detoksyfikacja), natomiast efekt energetyczny ma znaczenie drugorzędne. Najczęściej stosowanymi metodami termicznego przekształcania niebezpiecznych odpadów są: incyneracja (spopielanie), piroliza, witryfikacja i spalanie płomieniowe. Do unieszkodliwiania niektórych typów odpadów stosuje się detonację. Ze względu na wysoką temperaturę efektywne jest zastosowanie plazmy do unieszkodliwienia wielu typów odpadów niebezpiecznych.

9.2.1. Mechanizmy spalania odpadów

Mechanizmy spalania wielu odpadów stałych, które stanowią główny składnik wytwarzanych w kraju odpadów, są podobne do mechanizmów spalania młodych węgli i biomasy. W uproszczeniu wyróżnia się trzy etapy spalania odpadów:

1. Dostarczone do paleniska odpady suszą się i nagrzewają do temperatury rozkładu termicznego.

2. Podczas termicznego rozkładu następuje wydzielanie się lotnych produktów, a stała pozostałość ma formę bogatego w węgiel koksu. W konwencjonalnych systemach spalania, w których udział tlenu jest w nadmiarze, w tym etapie następuje także spalanie lotnych produktów rozkładu termicznego.

3. W trzecim etapie spalana jest pozostałość koksowa, proces ten ma zwykle dyfuzyjny charakter – szybkość utleniania zależy od dostępu tlenu do porowatego wnętrza cząstek.

Największy udział w palnych częściach odpadów komunalnych oraz szpitalnych mają materiały celulozowe (50÷70%), inne palne składniki to tworzywa sztuczne oraz guma i skóra (p. 9.1). Wymienione materiały ulegają głębokiemu rozkładowi termicznemu (70÷80%) z wydzieleniem części lotnych, które stanowią o przebiegu procesu spalania.

9.2.1.1. Spalanie odpadów komunalnych

Spalanie lotnych produktów termicznego rozkładu

Szybkość rozkładu termicznego odpadów stałych podczas ich spalania jest kontrolowana przez strumień ciepła przejmowany od płomienia i nagrzanych stref paleniska. Cechą charakterystyczną wielu składników odpadów komunalnych jest ich niewielka grubość (papier, tekstylia, liście, guma i inne), co powoduje, że nagrzewają się szybko, praktycznie bez występowania gradientów temperatury. Istotną przeszkodą dla szybkiego przebiegu pirolizy odpadów komunalnych jest jednak ich zawilgocenie oraz obecność metali i innych inertnych ciał (kamienie, gruz i inne), które – akumulując ciepło – obniżają temperaturę pirolizy i mogą znacznie ją spowolnić.

Okazuje się, że obecność metali w odpadach może modyfikować proces pirolizy takich materiałów, jak papier i polietylen. Stwierdzono mianowicie, że w obecności glinu wymienione składniki odpadów wydzielały mniej lotnych produktów, a pozostałość koksowa była większa [26]. Wpływ obecności glinu na skład koksu z termicznego rozkładu papieru i polietylenu ilustrują formuły:

$$\text{koks} = C_{7,0}H_{3,03}O_{0,38}$$

$$\text{koks}_{Al} = C_{7,34}H_{1,51}O_{0,34}$$

indeks Al oznacza obecność glinu w odpadzie podczas spalania [46].

Spalane z odpadami tworzywa sztuczne i polimery mają także trochę zmieniony mechanizm rozkładu termicznego. Materiały te indywidualnie rozkładają się niemal w 100% do lotnych produktów, ale podczas spalania z odpadami 10÷15% ich masy tworzy pozostałość koksową [46].

Spalanie pozostałości koksowej

Spalanie pozostałości koksowej po termicznym rozkładzie odpadów jest procesem podobnym do procesu spalania pozostałości koksowej z biomasy. Koks z pirolizy odpadów jest reaktywny, a szybkość jego utleniania jest kontrolowana przez dyfuzję tlenu do wnętrza porowatych cząstek.

Na szybkość utleniania mogą mieć wpływ substancje nieorganiczne w materiale wyjściowym odpadów, na przykład inhibitory zmniejszające podatność drewna na spalanie lub tusz w papierze komputerowym. Stwierdzono, że niektóre gatunki tuszu zmniejszają prędkość utleniania pozostałości koksowej papieru [46].

Samozapłon odpadów komunalnych

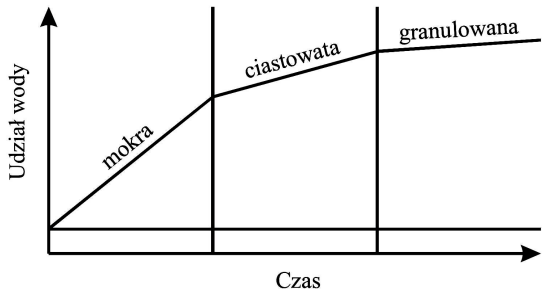
Znaczący udział materiałów celulozowych w odpadach komunalnych, które charakteryzują się dużą reaktywnością, oraz znaczne ich zawilgocenie stwarzają istotne zagrożenie pożarowe składowisk tych odpadów. Mechanizm samozapalenia odpadów zaczyna się od tlenia, przechodzącego w żarzenie, które przy dostępie tlenu staje się *otwartym* spalaniem.

9.2.1.2. Spalanie osadów ściekowych

Duża zawartość wody (75÷80%), substancji mineralnej (50% w suchej masie), części lotnych (90% w substancji palnej) oraz niewielki udział pierwiastka węgla (10%) czynią osady ściekowe paliwem bardzo różnym od węgla. Najważniejsze etapy spalania osadów ściekowych to: suszenie, wydzielanie i spalanie części lotnych oraz spalanie pozostałości koksowej o zawartości około 50% substancji mineralnej.

Suszenie osadów ściekowych

Przemiany fizyczne zachodzące podczas suszenia osadów ściekowych powodują, że rozróżnia się następujące stany osadów: mokry (70÷80% wody), ciastowaty (60÷65% wody) i granulowany (20÷25% wody) (rys. 9.4). Spalanie osadów ściekowych w stanie mokrym wymaga dostarczenia dodatkowego paliwa, ponieważ efekt cieplny spalania samych osadów nie wystarcza do ich wysuszenia [57]. Trudnym etapem suszenia jest przejście od ciastowatej do granulowanej postaci osadu, dlatego preferuje się spalanie osadów w piecach półkowych i w złożu fluidalnym, w których można spalać osady z zawartością wody nawet 60÷65%.



Rys. 9.4. Postać osadów ściekowych podczas suszenia

Odgazowanie i spalanie części lotnych

Rozkład termiczny osadów ściekowych zachodzi w znacznie niższej temperaturze niż w przypadku węgli. Przypuszcza się, że częściowo przebiega równolegle z procesem suszenia, zaczyna się bowiem już w temperaturze 150 °C, nie ma więc rozgraniczenia faz: suszenia i pirolizy, jak dla węgli [57].

W czasie rozkładu termicznego osadów ściekowych otrzymuje się substancje gazowe, ciekłe (olej) i koks, a więc podobnie jak w przypadku rozkładu innych substan-

cji organicznych. Ze zwiększeniem temperatury rozkładu zwiększa się udział substancji gazowych, a maleje udział substancji ciekłych i koksu (tab. 9.10). W produktach gazowych jest dużo CO, którego udział staje się dominujący w wyższej temperaturze rozkładu osadów ściekowych (tab. 9.11) [57].

Tabela 9.10

Zmiana produktów pirolizy wstępnie wysuszonego osadu ściekowego (na podst. [57])

Temperatura, °C	500	600	700	800	900
Części lotne, %	9	16	24	30	40
Olej, %	30	25	19	14	10
Koks, %	52	49	44	42	40

Szybkość wydzielania części lotnych z cząstek osadu bardzo zależy od udziału wody, na przykład odgazowanie mokrych cząstek osadu o średnicy 4÷20 mm trwa około 100÷300 s, natomiast odgazowanie wstępnie wysuszonego osadu o tych rozmiarach cząstek zajmuje tylko 50 s [17]. Czas odgazowania τ_{od} cząstek osadu, który zależy przede wszystkim od ich wymiaru geometrycznego d_p, można wyrazić wzorem

$$\tau_{od} = K_v \, d_p^N$$

w którym: K_v – współczynnik, N – wykładnik, który przyjmuje wartości: N = 0,27 i 0,72, odpowiednio dla suchego i mokrego osadu ściekowego [57].

Tabela 9.11

Zmiana składu lotnych produktów pirolizy wstępnie wysuszonego osadu ściekowego (na podst. [57])

Temperatura, °C	670	760	830
H_2, %	2,6	3,2	4,6
CO_2, %	18,3	15,4	7,3
CO, %	34,6	43,4	66,2
C_nH_m, %	36,0	31,1	16,5

Mechanizm spalania cząstek wstępnie suszonego osadu ściekowego jest zbliżony do mechanizmu spalania wilgotnego węgla brunatnego. Porównanie szybkości odgazowania i spalania części lotnych cząstek węgla kamiennego, węgla brunatnego, biomasy oraz osadów ściekowych wskazuje, że suszony osad ściekowy ma największą dynamikę tych procesów. Duża zawartość części lotnych w osadach ściekowych oraz duża dynamika ich termicznego rozkładu powodują, że wydzielanie i spalanie części lotnych jest zasadniczym etapem spalania osadów ściekowych i ma dominujący udział w wyzwalaniu energii cieplnej uzyskiwanej ze spalania osadów.

Spalanie pozostałości koksowej

Zwykle spalanie pozostałości koksowej zajmuje w procesie spalania paliw stałych najwięcej czasu, na przykład podczas spalania węgla proporcję czasów spalania części

lotnych i pozostałości koksowej można określić w przybliżeniu jako 1:10 (p. 5.1). Inaczej jest w przypadku spalania cząstek osadu ściekowego – spalanie cząstek koksu trwa krócej niż odgazowanie osadu i spalanie wydzielonych części lotnych. Wynika to z jednej strony ze stosunkowo powolnego tempa termicznego rozkładu osadów ściekowych, a z drugiej – z niewielkiego udziału węgla w karbonizacie osadów (ok. 10%). Sprzyjającym czynnikiem szybkiego utleniania cząstek koksu z osadów ściekowych jest ich duża porowatość, większa niż cząstek koksu węglowego [57].

9.2.1.3. Spalanie chlorowanych węglowodorów

Chlorowane węglowodory należą do składników odpadów komunalnych i szpitalnych, a także są produktami ubocznymi w przemyśle: chemicznym i farmaceutycznym. Mechanizm spalania tych związków jest skomplikowany, a produkty przejściowe i końcowe spalania zależą od temperatury procesu i udziału tlenu [1].

Termiczne przekształcanie chlorowanych węglowodorów łączy się z niebezpieczeństwem wprowadzania do atmosfery dioksyn i furanów. W celu ograniczenia emisji tych groźnych zanieczyszczeń do dopuszczalnego poziomu, należy ograniczyć udział chloru w podawanym do spalania strumieniu odpadów (paliwa) lub zapewnić całkowite spalanie chlorowanych węglowodorów, żeby w rezultacie chlor odzyskać. Chlor odzyskuje się ze spalin w formie chlorowodoru (HCl) przez absorpcję w wodzie lub w postaci gazowej (Cl_2).

Jakość spalania chlorowanych węglowodorów zależy od udziału chloru – im większa zawartość chloru, tym mniejsza wartość opałowa. Na przykład podczas produkcji monomeru chlorku winylu powstają odpady zawierające od 60 do 70% chloru, o wartości opałowej 8,4÷16,8 MJ/kg [19]. W pobliżu dolnego zakresu wartości opałowej proces spalania staje się niestabilny i dla podtrzymania wymaga dodatkowego paliwa. Źródłem emisji dioksyn i furanów są m.in. przeterminowane środki ochrony roślin. Insekcydy i fungicydy zawierają chlorowane fenole, a herbicydy polichlorowane difenyloetery. Spalanie tych związków w zbyt niskiej temperaturze (< 1100 °C), w warunkach niedostatku tlenu (< 6%), powoduje generowanie PCDDs/PCDFs. Inne chlorowane węglowodory, których niekontrolowane spalanie zagraża emisją dioksyn i furanów, to polichlorowane bifenyle (PCBs), występujące w olejach transformatorowych, w czynnikach chłodniczych i substancjach izolacyjnych [26].

9.2.2. Warunki bezpiecznego spalania odpadów

Spalanie odpadów należy do najtrudniejszych problemów techniki spalania, ponieważ powoduje emisję niebezpiecznych substancji do powietrza atmosferycznego oraz wymaga rozwiązania zagadnienia składowania stałych odpadów paleniskowych. Obawy przed negatywnymi skutkami spalania odpadów znalazły wyraz w ustawodawstwie, warunki przekształcania termicznego **niebezpiecznych odpadów** w paleniskach kotłowych i w spalarniach formułowane w Polsce są następująco [30]:

1. Czas utrzymania spalin w komorze spalania powinien wynosić co najmniej 2 sekundy w temperaturze:

a) nie niższej niż 850 °C – jeżeli zawartość chloru w związkach organicznych w przekształcanych odpadach nie przekracza 1% suchej masy odpadów,

b) nie niższej niż 1100 °C – jeśli zawartość chloru w związkach organicznych w przekształcanych odpadach przekracza 1% suchej masy odpadów.

2. Zawartość tlenu w gazach spalinowych nie może być mniejsza niż 6%.

Określono także warunki dla termicznego przekształcania niebezpiecznych odpadów w piecach obrotowych do produkcji cementu i wapna, w których wysoka temperatura i czas przebywania od 4 do 8 sekund zapewniają rozkład składników odpadów pochodzenia organicznego [30].

Zasady spalania odpadów komunalnych określa także Dyrektywa 89/369/EWG [12], w której wymaga się, żeby: – „temperatura gazu powstającego w wyniku spalania odpadów po ostatnim wtrysku powietrza potrzebnego do spalania podnosiła się w sposób kontrolowany i jednorodny, nawet w najbardziej niesprzyjających warunkach, do **co najmniej 850 °C**, **minimum przez dwie sekundy**, **w obecności co najmniej 6% tlenu**".

Zasady spalania odpadów niebezpiecznych określa Dyrektywa 94/67/EC [9] – warunki bezpiecznego spalania są takie same jak w Polsce, ale określono także ograniczenia emisji zanieczyszczeń: CO (średnia dobowa: 50 mg/m^3), pyłów, VOCs, HCl, HF, NO_x, SO_2, metali oraz dioksyn i furanów.

Temperatura spalania

Najważniejszym czynnikiem w procesie spalania odpadów jest **temperatura spalania**, która wpływa na skuteczność dopalania CO i emisję wielu lotnych zanieczyszczeń z paleniska, a także na udział części palnych w popiele. Od temperatury spalania zależy szybkość i stabilność spalania, a więc i parametry konstrukcyjne paleniska.

O znaczeniu temperatury spalania dla bezpiecznego przekształcania termicznego odpadów świadczy następujące wymaganie: *zakłady spalania odpadów komunalnych powinny być wyposażone w palniki pomocnicze. Palniki te muszą być włączone automatycznie, gdy temperatura gazów odlotowych spada poniżej 850 °C* [30].

Adiabatyczną temperaturę spalania można obliczyć na podstawie wartości opałowych i innych danych termodynamicznych składników odpadów, ale jest to wielkość mająca niewiele wspólnego z realną temperaturą spalania. W rzeczywistych warunkach występujących w paleniskach procesy spalania części lotnych i pozostałości koksowej odpadów są rozdzielone w czasie i mają różną temperaturę spalania. Ze względów praktycznych, a przede wszystkim dla celów projektowania instalacji spalania odpadów, niezbędne jest jednak przybliżone określenie średniej temperatury w palenisku, a raczej temperatury spalin na wylocie z paleniska.

Temperaturę spalin na wylocie z paleniska T_s, którą dalej będzie się nazywać krótko temperaturą spalania, można obliczyć, znając wartość opałową suchych odpadów

w stanie bezpopiołowym $W_{\mathrm{d}}^{\mathrm{daf}}$ oraz uwzględniając udział substancji mineralnej i wilgoci w odpadach. Po oznaczeniu wartości opałowej suchych odpadów przez $W_{\mathrm{d}}^{\mathrm{d}}$ oraz zawartości popiołu przez p otrzymuje się

$$W_{\mathrm{d}}^{\mathrm{d}} = W_{\mathrm{d}}^{\mathrm{daf}}(1-p)$$

i stąd oblicza się wartość opałową odpadów w stanie roboczym

$$W_{\mathrm{d}} = W_{\mathrm{d}}^{\mathrm{d}}(1-w) - r_n w$$

gdzie: w i r_n – udział wody w odpadach i entalpia parowania wody ($r_n \approx 2500$ kJ/kg) [21].

Temperaturę spalania (spalin na wylocie z paleniska) T_{s} wyznacza się z uproszczonego równania bilansu entalpii, po obliczeniu masy spalin m_{sp} i popiołu m_{p} powstających podczas spalania odpadów:

$$W_{\mathrm{d}} = m_{\mathrm{sp}} c_{\mathrm{sp}} (T_{\mathrm{s}} - T_{\mathrm{ot}}) + m_{\mathrm{p}} c_{\mathrm{p}} (T_{\mathrm{s}} - T_{\mathrm{ot}}) + Q_{\mathrm{str}}$$

gdzie: c_{s}, c_{p}, T_{ot} i Q_{str} – średnie ciepło właściwe spalin i popiołu, temperatura otoczenia i wielkość strat cieplnych w palenisku. Wartość strat cieplnych przyjmuje się jako 30÷50% ciepła wyzwolonego podczas spalania [21].

***Autotermiczność* spalania odpadów**

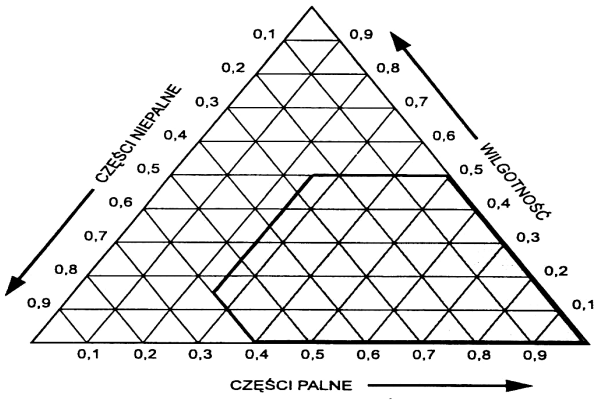
Z temperaturą spalania wiąże się ważne pojęcie ***autotermiczności*** procesu spalania odpadów, które oznacza możliwość stabilnego spalania odpadów bez konieczności podawania paliwa dodatkowego. Teoretyczne określenie warunków *autotermicznego* spalania w tak złożonym obiekcie jak spalarnia odpadów jest bardzo trudne, a wobec braku wielu informacji o właściwościach spalanych odpadów – prawie niemożliwe. Można jednak posługiwać się kryteriami zastępczymi *autotermiczności* spalania: **minimalną temperaturą spalania** lub **minimalną wartością opałową odpadów**.

Rozpatrując **minimalną temperaturę spalania** jako kryterium *autotermiczności* procesu spalania, można posłużyć się temperaturą samozapłonu paliw stałych [30]. W przypadku odpadów, które w dużej mierze składają się z materiałów celulozowych, temperatura samozapłonu wynosi 350÷600 °C [5]. Odpady komunalne zawierają sporo wody oraz materiałów inertnych (szkło, ceramika, metale inne); powoduje to, że proces spalania przebiega wolno, trzeba zgodzić się z wnioskiem z pracy [21], że bezpieczniej jest przyjąć, że dopiero temperatura spalania 850÷900 °C zapewnia *autotermiczność* spalania odpadów, kiedy straty ciepła wynoszą około 50% oraz około 600 °C – kiedy spalanie przebiega w warunkach bliskich adiabatycznym.

Kryterium **minimalnej wartości opałowej** wynika z doświadczeń w zakresie spalania odpadów [21]. Przyjmuje się, że proces spalania odpadów jest *autotermiczny*, kiedy ich wartość opałowa będzie co najmniej 6 MJ/kg [21, 24]. W rozważaniach nad temperaturą spalin wykazano, że najważniejsze znaczenie mają udziały: części pal-

nych, części mineralnych i wilgoci w odpadach. Te wielkości posłużyły do skonstruowania tzw. wykresu Tannera, który określa obszar spalania *atutotermicznego* (rys. 9.5).

Autotermiczność spalania odpadów jest pożądana, ponieważ umożliwia termiczne przekształcenie odpadów bez podawania dodatkowego paliwa i ułatwia odzyskanie części energii zawartej w palnych składnikach odpadów. Nie należy jednak utożsamiać warunków *autotermicznego* spalania odpadów z warunkami bezpiecznego ich przekształcania termicznego. Wiadomo bowiem, że procesy spalania paliw stałych mogą przebiegać w niskiej temperaturze 350÷600 °C (na przykład tlenie trocin w złożu [5]), niezależnie zatem od warunków *autotermiczności* spalania należy zadbać o zapewnienie takiej temperatury spalania, żeby zapewnić wymaganą skuteczność termicznego przekształcania odpadów.



Rys. 9.5. Zakres palności odpadów zależnie od udziału w nich składników palnych, wilgoci i części niepalnych

9.2.3. Piroliza odpadów

Zależnie od warunków proces pirolizy ma mniej lub bardziej endotermiczny charakter, dlatego w celu jego realizacji do układu musi być dostarczane ciepło. W przypadku pirolizy odpadów potrzebne ciepło uzyskuje się przez częściowe spalanie produktów pirolizy, dlatego piroliza odpadów odbywa się zwykle przy pewnym udziale tlenu (półspalanie). Rozróżnia się pirolizę niskotemperaturową (450÷700 °C) oraz wysokotemperaturową (900÷1100 °C) [43].

W wyniku rozkładu termicznego stałych odpadów w reaktorze pirolitycznym otrzymuje się: pozostałość stałą (karbonizat), produkty ciekłe (smoła, olej, alkohol i woda) i produkty gazowe (gaz pirolityczny). W czasie odgazowania następuje termiczny rozkład występujących w odpadach związków organicznych (C_mH_n) do prostszych substancji; przykładem występujących w tym procesie reakcji chemicznych są:

$$C_mH_n \rightarrow CH_4 + H_2 + 2C$$

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$$

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO$$

Udział poszczególnych frakcji produktów pirolizy oraz ich skład chemiczny zależą od rodzaju odpadów oraz od temperatury rozkładu. W tabeli 9.12 przedstawiono przykład uzyskanych produktów stałych, ciekłych i gazowych podczas pirolizy wzorcowej próbki palnej frakcji odpadów komunalnych w temperaturze 600 °C, analizę składu lotnych produktów podano natomiast w tabeli 9.13, w porównaniu do gazu koksowniczego [43].

Tabela 9.12

Charakterystyka produktów pirolizy palnej frakcji odpadów komunalnych [43]

Produkt	Karbonizat	Produkty ciekłe	Frakcja wodna	Produkty gazowe + straty
Udział, %	42,2	12,4	24,6	20,8
Charakterystyka	C: 41,1% H: 1,5% A: 40,0%	C: 74,8% H: 9,6% N: 0,3% temp. zapłonu: 72 °C	pH = 1,5% fenole: 51 mg/dm^3 chlorki: 8,3 g/dm^3	tab. 9.13

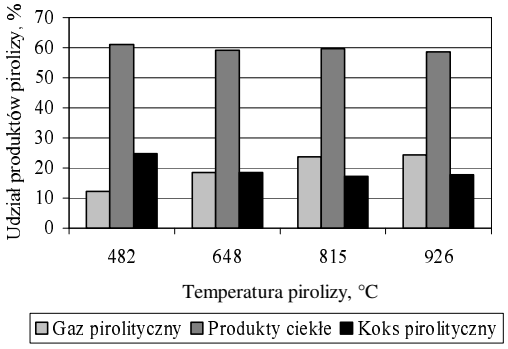
Ze wzrostem temperatury pirolizy zwiększa się udział lotnej frakcji produktów pirolizy (rys. 9.6) oraz składników palnych (przede wszystkim CH_4, CO i H_2), a zmniejsza się ilość karbonizatu (rys. 9.7). Najczęściej pirolizę odpadów prowadzi się w temperaturze około 600 °C. Uzyskany podczas pirolizy odpadów komunalnych gaz ma wartość opałową 12÷16 MJ/m^3 [58].

Tabela 9.13

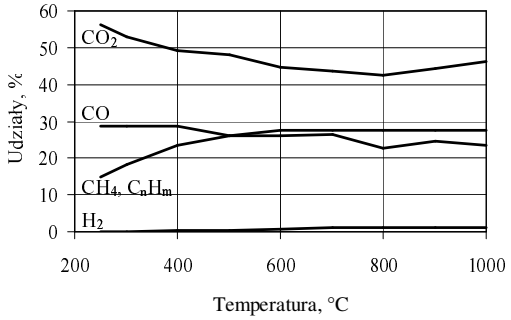
Porównanie niektórych danych gazów: pirolitycznego z odpadów i koksowniczego [43]

Parametr	Gaz pirolityczny	Gaz koksowniczy
CH_4, %	18,4	26,0
H_2, %	7,4	57,0
CO, %	22,8	6,5
CO_2, %	41,6	2,0
Inne, %	9,8	8,5
Wartość opałowa, MJ/m^3	13,0	17,0÷19,0

Zaletą pirolitycznego przekształcania odpadów jest lepsza możliwość kontroli procesu termicznego przekształcania odpadów i jego optymalizacji: warunków termicznego rozkładu (temperatura, atmosfera i ciśnienie), jak i później warunków spalania lub przetwarzania produktów pirolizy. Możliwość lepszej kontroli procesu pirolitycznego przekształcania powoduje, że emisja zanieczyszczeń gazowych i pyłowych jest mniejsza niż podczas spalania odpadów.



Rys. 9.6. Wpływ temperatury rozkładu termicznego odpadów komunalnych na udziały frakcji stałej, ciekłej i gazowej (na podst. [58])



Rys. 9.7. Wpływ temperatury rozkładu termicznego na udziały niektórych składników frakcji lotnej (na podst. [52])

Większe rozbudowanie instalacji pirolitycznego przekształcania odpadów w porównaniu do spalarni powoduje jednak, że metoda pirolityczna jest:

- mniej sprawna *energetycznie*,
- mniej wydajna,
- bardziej kosztowna.

Cechy te spowodowały, że piroliza znalazła zastosowanie do termicznego przekształcania niebezpiecznych odpadów, a także jako wstępny etap termicznego przekształcania w nowoczesnych spalarniach odpadów komunalnych. Na przykład w technologii DUOTHERM piroliza odpadów odbywa się z wykorzystaniem ciepła półspalania w pierwszym etapie procesu przekształcania termicznego [24].

9.2.3.1. Zgazowanie odpadów

Działając na odpady komunalne mieszaniną pary wodnej i tlenu lub powietrza w temperaturze ponad 1000 °C dokonuje się ich **zgazowania**, uzyskując produkt gazowy zbliżony do gazu syntezowego ($CO/H_2 \approx 1$). Najważniejsze reakcje chemiczne w procesie zgazowania odpadów to [58]:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$C_xH_y + (x + 1\ \ y)O_2 \rightarrow xCO_2 + 1\ \ yH_2O$$

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO$$

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$$

Jeżeli czynnikiem zgazowującym, obok pary wodnej, będzie powietrze, otrzymuje się gaz *słaby* (ok. 5 MJ/m^3), jeżeli natomiast użyje się tlenu, otrzymuje się gaz *mocny* (ok. 10 MJ/m^3). Stałą pozostałością po zgazowaniu jest popiół. Zgazowanie jest procesem przebiegającym, w porównaniu do spalania, bardzo wolno, dlatego znalazło zastosowanie przede wszystkim do termicznego przekształcania odpadów medycznych [52]. W niektórych nowoczesnych technologiach termicznej utylizacji odpadów (na przykład Thermoselect) zgazowanie następuje po etapie pirolizy [58].

9.2.3.2. Warunki termicznego przekształcania odpadów niebezpiecznych przez ich rozkład pirolityczny

W Polsce warunki przekształcania termicznego **niebezpiecznych odpadów** przez ich rozkład pirolityczny zostały zdefiniowane następująco [30]:

1. Zawartość organicznych związków chlorowców w parach i gazach odlotowych z procesu rozkładu pirolitycznego odpadów niebezpiecznych nie powinna przekraczać wartości 0,5 ng/m^3.
2. Gazy z procesu pirolitycznego powinny być wykorzystane jako paliwo pomocnicze w paleniskach kotłowni grzewczych: w przypadku braku możliwości takiego wykorzystania dopuszcza się spalanie gazów w pochodni.
3. Dopuszcza się bezpośrednie składowanie stałej pozostałości po rozkładzie pirolitycznym na składowisku odpadów, wyposażonym w instalacje do oczyszczania odcieków.

9.2.4. Współspalanie odpadów z innymi paliwami

Budowa samodzielnej spalarni odpadów jest bardzo kosztowną inwestycją, dlatego wykorzystuje się też możliwości termicznego przekształcania odpadów przez ich współspalanie z innymi paliwami, najczęściej z węglem lub biomasą w kotłach ciepłowniczych, a nawet w energetyce zawodowej i w cementowniach. Współspalanie odpadów z węglem może być jednak przyczyną problemów eksploatacyjnych:

- pogorszenie stabilności spalania,
- zwiększenie skłonności do szlakowania,
- zwiększenie korozji powierzchni ogrzewalnych,
- zwiększenie emisji NO_x, SO_2, CO i pyłu,
- znaczne zwiększenie emisji WWA, PCDDs/PCDFs i PCBs,
- *psucie* popiołu przez zmianę pH, wymywalność chlorków, fluorków i metali.

Spalanie odpadów komunalnych z węglem

Spalanie nieprzetworzonych odpadów komunalnych w paleniskach węglowych uważane jest za nieracjonalne z powodu dużych różnic między właściwościami tych paliw [36]. Lepsze efekty daje współspalanie węgla z paliwami z odpadów typu PAKOM (RDF), które mają właściwości zbliżone do węgla (p. 9.1). Podatność przemiałowa tych paliw umożliwia ich rozdrobnienie odpowiednie dla palenisk fluidalnych i cyklonowych (<6 mm). Ze względu na wymagany duży strumień paliwa do współczesnych kotłów energetycznych, udział paliw odpadowych w całkowitym strumieniu do kotła jest ograniczony do 5÷10% [36].

Doświadczenia zebrane w USA podczas spalania paliw typu RDF w kotłach z paleniskami cyklonowymi na węgiel brunatny do bloku o mocy 400 MW_e pokazały, że użycie paliw odpadowych nieznacznie zmniejsza sprawność kotła (wymagany większy nadmiar powietrza oraz większy jest udział wodoru w odpadach niż w węglu), ale emisja zanieczyszczeń z kotła zmienia się niewiele [36]:

- emisja SO_2 zmalała o około 15%,
- emisja NO_x, CO i CH praktycznie się nie zmieniła,
- udział pyłu w spalinach za elektrofiltrem zwiększył się o 50%,
- emisja WWA i PCBs nie zwiększyły się,
- emisja HCl zwiększyła się od 3 do 35 ppm,
- emisja PCDDs/PCDFs zwiększyła się niewiele,
- zwiększyła się emisja niektórych metali,
- właściwości popiołu lotnego nie pogorszyły się znacząco.

Uzasadnione jest więc stwierdzenie, że można spalać spreparowane odpady komunalne z węglem w kotłach energetycznych i ciepłowniczych, zmniejszając koszty wytwarzania energii, redukując emisję CO_2 i przyczyniając się do rozwiązania problemu odpadów komunalnych.

Współspalanie osadów ściekowych z węglem

W licznych badaniach i próbach wykazano w skali technicznej możliwość współspalania osadów ściekowych o różnym stopniu odwodnienia z węglem w kotłach pyłowych, fluidalnych i rusztowych [51, 54, 57].

Wyniki prób w wielu elektrowniach i elektrociepłowniach opalanych pyłem węglowym wskazują na możliwość wprowadzania około 30% suszonego osadu ściekowego do **kotła pyłowego**. Wyniki badań w skali półtechnicznej (2,5 MW_t) pozwoliły stwierdzić, że zasilanie palników pyłowych mieszanką pyłu węglowego oraz wysuszonego i zmielonego osadu ściekowego umożliwia stabilne działanie palnika w zakresie udziału osadu (0÷100%) [51]. Zwiększaniu strumienia osadów do kotła towarzyszyły efekty negatywne:

- zwiększenie emisji SO_2 i NO_x,
- znaczne zwiększenie szlakowania powierzchni ogrzewalnych.

Zwiększenie emisji NO_x i SO_2 wywołuje znaczny udział azotu (3,5%) oraz siarki (1,0%) w osadach ściekowych, przy mniejszej niż węgiel wartości opałowej

(12,2 MJ/kg). Skłonność do szlakowania podczas spalania osadów ściekowych wynika ze znacznego udziału w nich substancji mineralnej (ok. 40%) [51].

Ze względu na duże zawilgocenie węgla brunatnego (do 50%), szczególnie nadają się do współspalania osadów ściekowych z węglem **kotły pyłowe na węgiel brunatny**. W tym przypadku wilgotność osadów ściekowych może dochodzić do 60% [57].

Do udanych można też zaliczyć próby współspalania osadów ściekowych o zawartości wody od 10 do 70% i wartości opałowej około 11 MJ/kg s.m. z węglem kamiennym w **kotle rusztowym** OR-16 [54]. Z obawy o wygaszenie kotła udział osadu w mieszance z węglem ograniczono do 30%. Stwierdzono znaczne zwiększenie emisji CO, SO_2, NO_x i pyłu w wyniku współspalania osadu ściekowego z węglem (tab. 9.14).

Tabela 9.14

Porównanie emisji zanieczyszczeń podczas spalania węgla i mieszanki węgla z osadem w OR-16 (na podst. [54])

Składnik mg/m^3	Spalanie węgla	Spalanie węgla z osadem
CO	83,2	148,0
SO_2	1163,1	1591,8
NO_x	148,6	240,6
Pył	47,7	184,9

Zwiększenie emisji SO_2 i NO_x było spowodowane dużym udziałem azotu (>3,5%) i siarki (>1,1%) w użytych do spalania osadach. Kilkukrotne zwiększenie koncentracji pyłu w spalinach zostało spowodowane znacznym udziałem drobnej frakcji w osadach. Stwierdzono ponadto zwiększenie udziału metali w odciekach z żużli i popiołów, ale bez przekroczenia istniejących ograniczeń dla składowania odpadów [54].

W pracy [57] przedstawiono wyniki badań w skali laboratoryjnej i prób w większej skali współspalania osadów ściekowych z węglem w **kotłach fluidalnych**. Uzyskane wyniki są bardzo zachęcające, ponieważ udaje się prowadzić proces spalania osadów o udziale wody do 60% bez obawy o wygaszenie kotła.

Współspalanie osadów ściekowych z węglem jest więc możliwe, ale ze względu na stosunkowo duży udział siarki, azotu i metali w osadach, strumień osadów do kotła musi być ograniczony, żeby nie spowodować przekroczeń emisji zanieczyszczeń gazowych oraz nie *popsuć* popiołu. Duży udział substancji mineralnej w osadach ściekowych powoduje znaczne obciążenie spalin popiołem (ok. 60 g/m^3 [57]). Ograniczeniem wynikającym z dużego udziały wilgoci w osadach ściekowych jest groźba wygaszenia kotła.

Współspalanie odpadów szpitalnych w kotłowniach

Niedobrą praktyką jest spalanie odpadów szpitalnych w małych kotłach grzewczych opalanych węglem [13], ponieważ:

- temperatura spalania w nich jest zbyt niska,
- brak jest przy nich systemów oczyszczania spalin,
- praktycznie niemożliwa jest w nich kontrola warunków spalania.

Niekontrolowane spalanie odpadów szpitalnych z węglem w małych kotłach grozi emisją toksycznych zanieczyszczeń organicznych. Do najlepiej znanych, szkodliwych zanieczyszczeń emitowanych w takich warunkach spalania należą dioksyny i furany oraz chlorowane bifenyle (PCB) [26].

Współspalanie odpadów z węglem a emisja zanieczyszczeń

Współspalanie odpadów z węglem w paleniskach przeznaczonych do spalania węgla powoduje zwykle zwiększenie udziału w spalinach zanieczyszczeń typowych dla spalania węgla: CO, SO_2, NO_x i pyły [13], a ponadto pojawienie się takich zanieczyszczeń, które podczas spalania paliw kopalnych nie są uważane za znaczące (PCDDs/PCDFs, WWA, PCBs i metale ciężkie). Mechanizmy powstawania dioksyn i furanów podczas spalania odpadów komunalnych z węglem nie są dobrze znane, przypuszcza się, że spalanie węgla inhibituje proces powstawania tych zanieczyszczeń [29].

Podczas spalania papieru i materiałów celulozowych z węglem powstają węglowodory pierścieniowe i fenole. Uważa się, że kluczowe znaczenie dla powstawania dioksyn i furanów w tych warunkach ma obecność w spalinach molekularnego chloru, który wydziela się w reakcji Deacona

$$4HCl + O_2 \rightarrow 2H_2O + 2Cl_2$$

nabierającej znaczenia w temperaturze ponad 600 °C [29]. Reakcje chlorowania fenoli także przebiegają praktycznie w temperaturze powyżej 600 °C

$$C_6H_5OH + Cl_2 \rightarrow \text{chlorowane fenole}$$

Kondensacja i spalanie chlorowanych fenoli prowadzi do powstania dioksyn i furanów [29]. Inne niekorzystne efekty współspalania odpadów z węglem, to zmiana właściwości popiołów, polegająca na zwiększeniu **wymywalności** takich związków, jak: chlorki, fluorki i metale ciężkie, oraz na zmianie współczynnika pH odcieków. Efekty te można kontrolować zmniejszając strumień odpadów [36].

9.3. Spalarnie odpadów

9.3.1. Charakterystyka instalacji do termicznego przekształcania odpadów

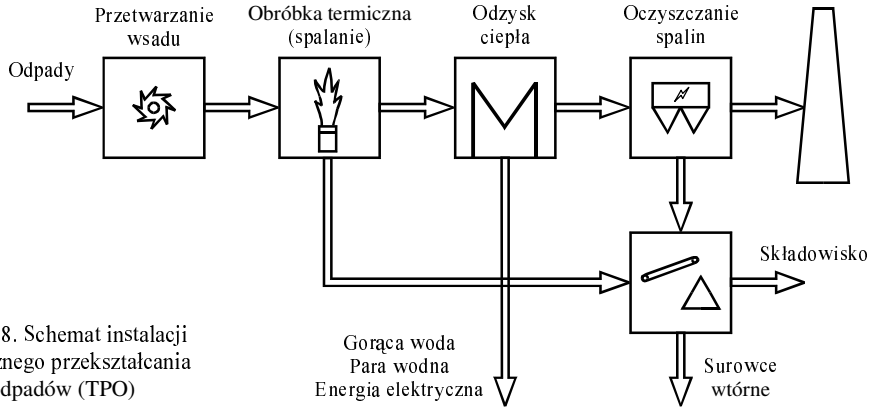
Współczesne instalacje termicznego przekształcania (utylizacji) odpadów (TPO) to skomplikowane systemy technologiczne czwartej generacji, które zapewniają:

- zmniejszenie objętości (do 90%) i masy (do 65%) odpadów,
- spopielenie części organicznej odpadów,
- odzysk efektu cieplnego spalania odpadów,
- spełnienie wymogów ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych,
- bezpieczeństwo składowania stałych pozostałości po przetwarzaniu.

Realizacja tych zadań wymaga znacznego rozbudowania instalacji TPO, w której wyróżnia się charakterystyczne węzły (rys. 9.8):

a) przygotowania wsadu,
b) obróbki termicznej,
c) odzysku energii,
d) oczyszczania spalin,
e) przekształcania stałych odpadów paleniskowych.

W spalarniach odpadów węzły obróbki termicznej i odzysku energii są zwykle zintegrowane (kotły). Najbardziej rozbudowany jest węzeł oczyszczania spalin, ma on bowiem zadania: odpylania, odsiarczania, katalitycznego dopalania: CO, dioksyn, WWA i VOCs oraz rozkładu NO_x, a ponadto usuwania metali ciężkich ze spalin.



Rys. 9.8. Schemat instalacji termicznego przekształcania odpadów (TPO)

Istnieje kilka typów instalacji TPO, które różnią się wydajnością od kilkudziesięciu kilogramów do kilkuset megagramów na godzinę [7]. Instalacje te można dzielić ze względu na różne czynniki, do najważniejszych należą:

I. Organizacyjne:
- spalarnie odpadów,
- współspalanie odpadów w: kotłowniach, elektrowniach i cementowniach.

II. Proces technologiczny:
- spalanie odpadów z nadmiarem powietrza,
- piroliza odpadów i dopalanie produktów pirolizy,
- zgazowanie odpadów.

III. Rodzaj spalanych odpadów:
- instalacje termicznego przekształcania odpadów komunalnych (TPOK),
- instalacje termicznego przekształcania osadów ściekowych i szlamów,
- instalacje termicznego przekształcania odpadów niebezpiecznych.

Bodźcem do rozwoju technik spalania odpadów jest Dyrektywa UE 1999/31/EC wprowadzająca ograniczenia składowania odpadów biodegradowalnych i wyznaczająca scenariusz tych ograniczeń w krajach UE [10].

W Polsce termiczne przekształcanie odpadów może być prowadzone w [30]:
- spalarniach odpadów niebezpiecznych,
- spalarniach odpadów komunalnych,
- spalarniach odpadów innych niż niebezpieczne i komunalne.

Dopuszcza się też termiczne przekształcanie odpadów innych niż niebezpieczne w innych niż spalarnie odpadów urządzeniach: piece cementowe, wapiennicze, konwertorowe, obrotowe i do wypalania cegły, baterie koksownicze, kotły energetyczne oraz domowe instalacje i urządzenia grzewcze, kuchnie i piece [31].

9.3.2. Węzły termicznej obróbki odpadów (paleniska)

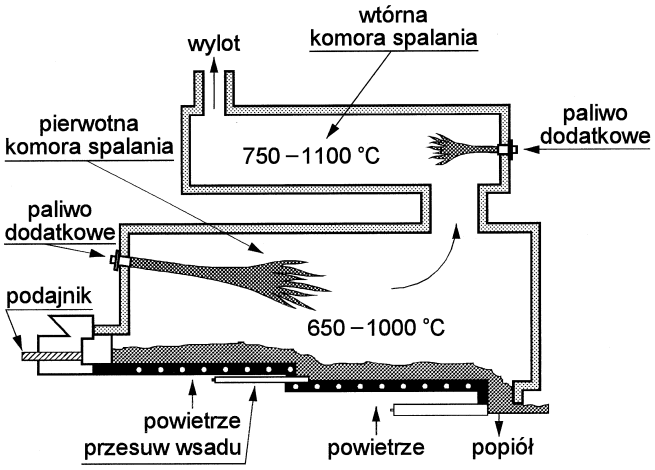
Węzeł termicznej obróbki odpadów w dużej mierze decyduje o charakterze całej instalacji TPO. Ze względów konstrukcyjnych dzieli się je następująco:
- paleniska komorowe,
- paleniska rusztowe,
- paleniska fluidalne,
- piece obrotowe,
- piece półkowe.

Paleniska komorowe

Paleniska komorowe częściej są stosowane do spalania odpadów niebezpiecznych (szpitalnych, chemicznych i innych). Wyróżnia się dwa typy palenisk komorowych:

a) strumieniowe (do spalania odpadów ciekłych),

b) przepychowe (rys. 9.9).



Rys. 9.9. Schemat paleniska komorowego typu przepychowego

Na rysunku 9.9 przedstawiono dwustopniową spalarnię typu pirolitycznego [40]. W pierwszej komorze paleniska (pirolitycznej) następuje termiczny rozkład i spopie-

lenie wsadu z niedoborem tlenu ($\lambda = 0{,}5 \div 0{,}8$), w drugiej (wtórnej) komorze gazowej produkty rozkładu dopalają się z nadmiarem powietrza (20÷100%). W celu utrzymania w palenisku temperatury 800÷1200 °C obie komory spalania są wyposażone w dodatkowe palniki do spalania oleju lub gazu.

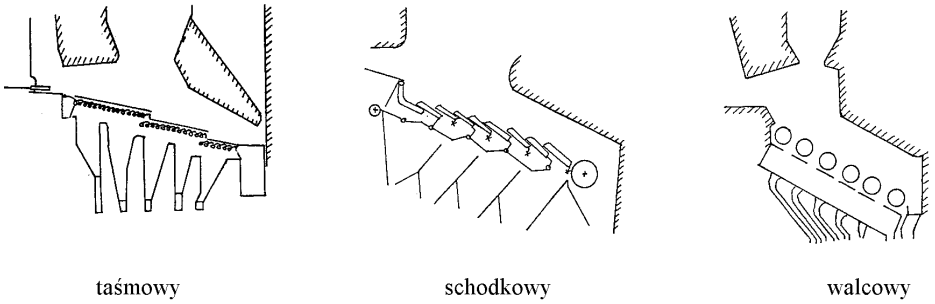
Zalety palenisk komorowych:
- prosta budowa,
- niewielki koszt,
- łatwość obsługi,
- łatwość kontrolowania warunków spalania.

Wady palenisk komorowych:
- ręczna obsługa,
- mała wydajność.

Paleniska rusztowe

Paleniska rusztowe zdecydowanie przeważają wśród urządzeń do spalania i odgazowania różnego typu odpadów. Istnieje wiele konstrukcji rusztów do spalania odpadów, do najważniejszych należą paleniska z rusztem (rys. 9.10):

a) taśmowo-kaskadowym,
b) posuwistym lub posuwisto-zwrotnym,
c) walcowym.



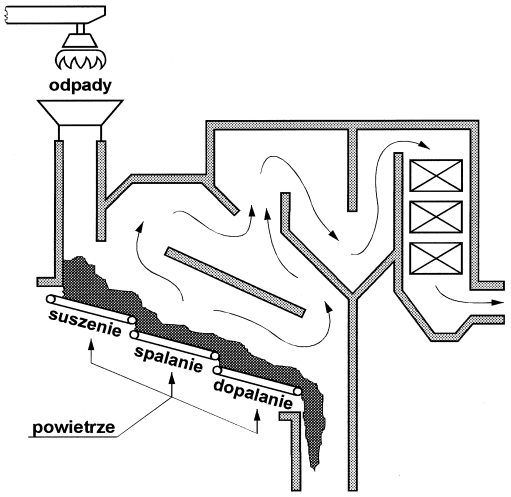
Rys. 9.10. Ważniejsze typy rusztów: taśmowo-kaskadowy, posuwisto-zwrotny i walcowy

Ruszty do spalania odpadów powinny charakteryzować się dużą powierzchnią oraz umożliwiać mieszanie odpadów podczas spalania. Do spalania odpadów komunalnych najczęściej są stosowane schodkowe ruszty posuwiste i posuwisto-zwrotne [41]. Obciążenie cieplne tych rusztów w zależności od rodzaju odpadu mieści się w zakresie 1÷1,5 MW/m^2, natomiast ich obciążenie masowe nie powinno przekraczać 140 g/(m^2·s) [47]. Przy tak znacznym obciążeniu cieplnym ruszty w dużych paleniskach są chłodzone.

Ze względu na jakość spalania lotnych produktów rozkładu odpadów (dopalanie CO, węglowodorów i powstawanie dioksyn i furanów) ważna jest organizacja prze-

pływu spalin w palenisku nad rusztem. Z tego względu wyróżnia się paleniska z przepływem spalin:

- współprądowym,
- przeciwprądowym,
- mieszanym (rys. 9.11).



Rys. 9.11. Palenisko rusztowe z mieszanym przepływem spalin

W palenisku rusztowym odpady przechodzą przez trzy strefy temperaturowe: w pierwszej strefie odbywa się ich suszenie, w drugiej odgazowanie i spalanie, a w ostatniej dopalanie [22, 39]. Dla dobrego wypalenia nadmiar powietrza powinien zawierać się w zakresie 100÷200%, dlatego w celu utrzymania wymaganej temperatury spalania (1000÷1200 °C) samo palenisko może być termicznie izolowane i wyłożone materiałem ogniotrwałym.

Zalety palenisk rusztowych:

- duża niezawodność,
- szeroki zakres zmian obciążenia cieplnego,
- możliwość spalania odpadów o różnych wymiarach i w różnej formie,
- nie wymagają znacznego rozdrobnienia odpadów.

Wady palenisk rusztowych:

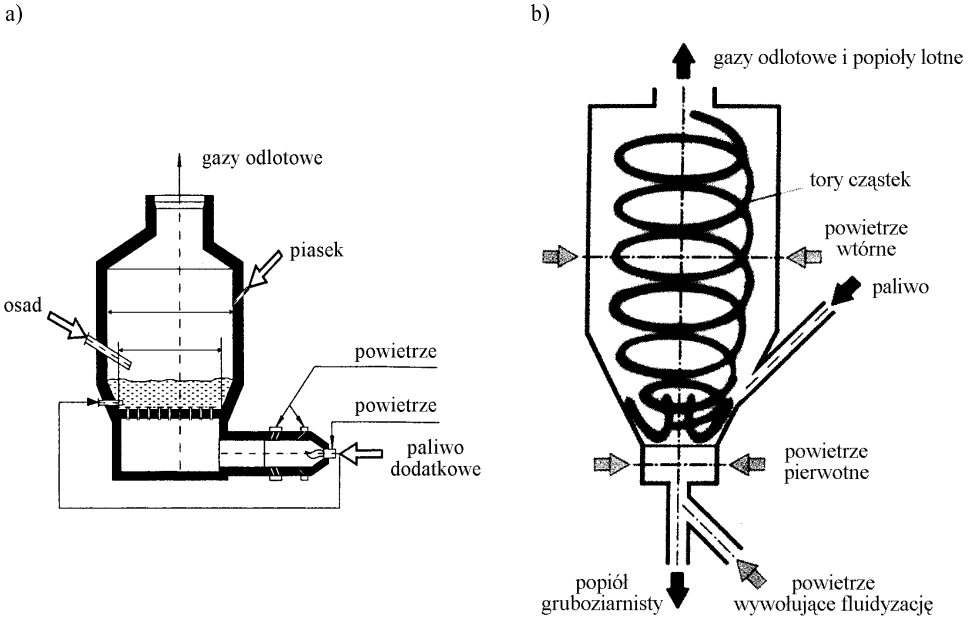
- skomplikowany napęd,
- wymagają starannej konserwacji,
- duży koszt.

Paleniska fluidalne

Paleniska fluidalne znajdują coraz większe zastosowanie do spalania różnego typu odpadów. Nadają się zwłaszcza do spalania odpadów bardzo wilgotnych: odpadów

ciekłych i szlamów oraz rozdrobnionych odpadów stałych. Stosuje się paleniska fluidalne ze złożem pęcherzykowym i cyrkulującym oraz specjalne konstrukcje paleniska fluidalnego [45].

Paleniska fluidalne mają duże zastosowanie do spalania osadów ściekowych (rys. 9.12a). Dobre mieszanie i kontakt z dużą powierzchnią materiału złoża zapewniają pełne wypalenie przy niewielkim nadmiarze powietrza (25÷50%). Przestrzeń nad złożem ułatwia dopalenie lotnych substancji organicznych i CO. Dzięki dużej pojemności cieplnej złoża proces spalania jest mało wrażliwy na zmiany strumienia odpadów i ich właściwości palnych. Istnieją także specyficzne rozwiązania palenisk fluidalnych do spalania odpadów, na przykład w cyrkulacyjnym (rotującym) złożu fluidalnym (rys. 9.12b). Niektóre firmy kotłowe rozwijają fluidalną technikę spalania w zastosowaniu do odpadów komunalnych i pochodnych, żeby była ona konkurencyjna w stosunku do palenisk rusztowych [20]. W przypadku tego typu odpadów niezbędne jest ich staranne przygotowanie do spalania przez segregację i rozdrobnienie.



Rys. 9.12. Paleniska fluidalne: a) do spalania osadów ściekowych, b) ze złożem cyrkulacyjnym (rotującym) [45]

Zalety palenisk fluidalnych:
- długi czas przebywania w palenisku,
- dobra skuteczność wypalenia mimo niskiej temperatury spalania (ok. 850 °C),

- możliwość spalania odpadów o zawartości wody do 60%,
- prostota konstrukcji.

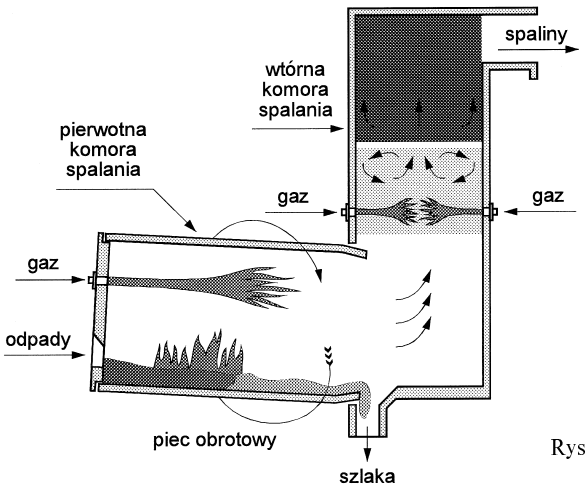
Wady palenisk fluidalnych:

- trudności eksploatacyjne,
- skomplikowany układ podawania paliwa,
- duża emisja pyłu,
- wymagają automatyki.

Piece obrotowe

Paleniska obrotowe typu *piec cementowy* mają postać długiego, pochyłego cylindra obracającego się (rys. 9.13). Typowe palenisko obrotowe do spalania odpadów ma 2,1÷3,7 m średnicy i 7,5÷20 m długości. Ceramiczna wykładzina z materiałów termoodpornych umożliwia uzyskanie w palenisku temperatury 1500 °C [45]. Obciążenie cieplne pieca obrotowego sięga 250÷400 kW/m^3. Piece obrotowe znalazły zastosowanie przede wszystkim do spalania i odgazowania: odpadów ciekłych (po rozpyleniu), szlamów i past oraz odpadów stałych.

Piece obrotowe zapewniają dobre wypalenie części stałych, ale na skutek słabego mieszania z powietrzem wypalenie gazów nie jest zadowalające, dlatego zwykle za paleniskiem obrotowym znajduje się wtórna komora spalania, w której dopalane są gazy (rys. 9.13). Ze względu na niedużą wydajność piece obrotowe rzadko są używane do spalania odpadów komunalnych, często natomiast są stosowane do spalania odpadów niebezpiecznych.



Rys. 9.13. Schemat instalacji do spalania odpadów z piecem obrotowym

Ze względu na przepływ spalin w piecu obrotowym rozróżnia się spalanie:

- współprądowe odpadów o dużej zawartości części lotnych i wartości opałowej ponad 9000 kJ/kg,

• przeciwprądowe odpadów o małej zawartości części lotnych i wartości opałowej mniejszej od 9000 kJ/kg.

Zalety pieców obrotowych:

• bardzo dobre wypalenie,
• uniwersalność (nadają się do spalania odpadów stałych, ciekłych i szlamów),
• duży zakres temperatury spalania: 800÷1300 °C,
• długi czas przebywania (0,5÷1,5 h),
• możliwość spalania odpadów o wilgotności do 60%,
• możliwość spalania odpadów o różnych kształtach i rozmiarach.

Wady pieców obrotowych:

• skomplikowana konstrukcja (konieczność napędu),
• mała wydajność: ≤ 6 Mg/h.

Piece półkowe

Piece półkowe to specyficzne konstrukcje przeznaczone do spalania odpadów w postaci szlamów (osady ze ścieków, osady tłuszczowe, oleje itp.). Można spalać w nich bardzo wilgotne odpady, a nawet rozdrobnione odpady stałe [18, 57].

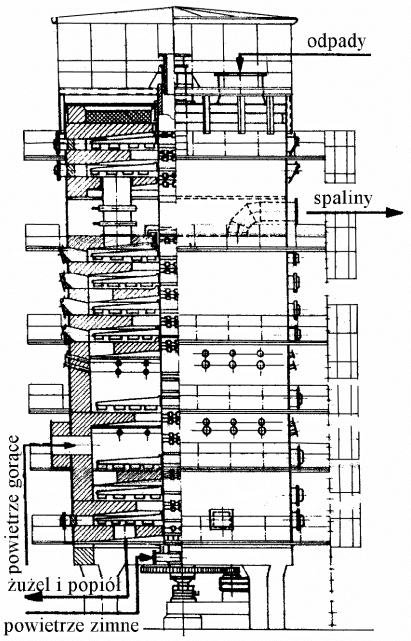
Piec półkowy jest stalowym, wyłożonym wewnątrz materiałem ogniotrwałym, cylindrem z zamocowanymi od 2 do 12 półkami (rys. 9.14). Centralnie obraca się w nim chłodzony powietrzem wał z umocowanymi do niego *grabiami*, które służą do przesypywania odpadów z półki na półkę. Podawane na najwyższą półkę odpady przemieszczają się stopniowo w dół pieca, w przeciwprądzie do gorących spalin. Po wysuszeniu w górnej części pieca, przesypywane są do strefy spalania (750÷900 °C), a następnie do strefy dopalania. U dołu pieca popiół jest chłodzony i gaszony w odżużlaczu. Ze względu na małą wydajność i złożoną budowę piece półkowe są zastępowane paleniskami obrotowymi i fluidalnymi.

Zalety pieców półkowych:

• dzięki istnieniu strefy suszenia pozwalają spalać bardzo wilgotne paliwa,
• długi czas przebywania,
• dobre wypalenie.

Wady pieców półkowych:

• skomplikowana konstrukcja,
• istnienie napędów,
• mała wydajność,
• duży koszt.



Rys. 9.14. Piec półkowy

Zakres zastosowań palenisk do spalania odpadów

Instalacje termicznego przekształcania odpadów powinny być wyposażone w paleniska odpowiednie dla danego typu odpadów. W tabeli 9.15 podano zakres zastosowania podstawowych typów palenisk do instalacji TPO. Warto jednak wiedzieć, że firmy oferujące instalacje TPO preferują własne rozwiązania techniczne, które zwykle przystosowują do spalania różnego typu odpadów.

Tabela 9.15

Zakres zastosowania palenisk do termicznego przekształcania odpadów [45]

Typ paleniska	Rodzaj odpadów			
	komunalne	szpitalne	niebezpieczne	osady ściekowe
Rusztowe	**	*	*	n
Piece obrotowe	*	*	**	*
Fluidalne	*	n	*	**
Pirolityczne	**	*	*	*

** – podstawowego przeznaczenia, * – stosowane, n – niestosowane

Inne kryterium oceny przydatności poszczególnych typów palenisk do spalania odpadów opiera się na ich cechach fizycznych (tab. 9.16.)

Tabela 9.16

Zakres zastosowania palenisk do spalania odpadów zależnie od ich stanu [18]

Rodzaj odpadów	Typ paleniska			
	komorowe strumieniowe	komorowe przepychowe	obrotowe	fluidalne
Stałe:				
– ziarniste, jednorodne,		*	*	*
– nieregularne, grube,		*	*	*
– związki organiczne z topliwym popiołem.		*	*	*
Gazowe:				
– ciężkie opary organiczne,	*	*	*	*
Ciekłe:				
– ciecze organiczne,	*	*	*	*
– wodne odpady z dużym udziałem części organicznej.	*	*	*	*
Stałe/szlamy:				
– szlamy			*	*

* – stosowane

9.3.3. Spalarnie odpadów komunalnych

Instalacje termicznej utylizacji (przekształcania) odpadów komunalnych (TUOK) dzieli się na dwie kategorie [7]:

- typu *masowego*, do spalania nieprzetworzonych odpadów *jak przychodzą*,
- do spalania paliw z odpadów typu PAKOM (RDF).

Instalacje TOUK typu masowego

W instalacjach TUOK typu *masowego* termiczne przetwarzanie odbywa się przez:

a) spalanie jednostadiowe,

b) spalanie dwustadiowe (system modułowy).

Ad a) Jest to obecnie najczęściej stosowany system termicznego przekształcania odpadów, w którym kompletne spalanie jest realizowane w pojedynczym palenisku. Przyjmuje się, że ekonomicznie uzasadniona dzienna wydajność tego typu instalacji TUOK powinna wynosić co najmniej 300 Mg [7]. Tak dużą wydajność spalania nieprzetworzonych odpadów komunalnych można osiągnąć w paleniskach rusztowych lub fluidalnych. W krajach UE w spalarniach typu *masowego* zdecydowanie przeważają paleniska rusztowe, ale rozwija się także fluidalna technologia spalania tych odpadów [20].

Ad b) W spalarniach typu modułowego spalanie nieprzetworzonych odpadów odbywa się dwustadiowo:

- w pierwszym stadium spalanie odbywa się z niedomiarem tlenu ($\lambda = 0{,}3 \div 0{,}8$),
- w drugim stadium dopalane są produkty pirolizy z nadmiarem powietrza.

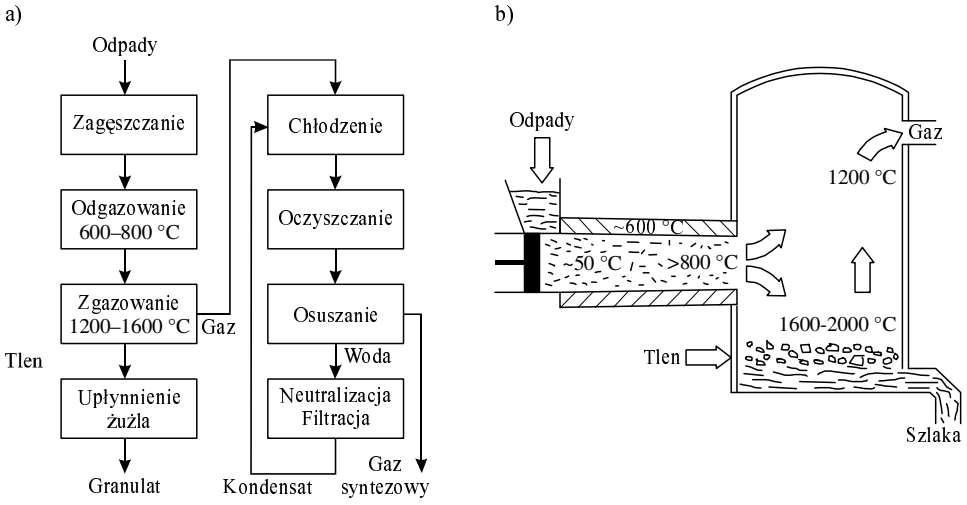
W stosunku do systemu jednostadiowego spalania odpadów, system modułowy umożliwia lepszą kontrolę warunków termicznego przekształcania odpadów oraz charakteryzuje się mniejszym pyleniem. Bardziej złożona konstrukcja modułowego węzła termicznego przekształcania odpadów powoduje, że wyposażone w nie instalacje TUOK mają mniejszą dzienną wydajność: od 10 do 100 Mg [7]. W pierwszym, pirolitycznym stadium spalania zastosowanie znalazły paleniska rusztowe, komorowe i piece obrotowe (tab. 9.17).

Tabela 9.17

Rodzaj paleniska w niektórych instalacjach TUOK

Instalacja	Rodzaj przetwarzania	Część pirolityczna instalacji
Öko-Gas-Verfahren	zgazowanie i spalanie	złoże fluidalne
Schwel-Brenn-Verfahren	piroliza i spalanie	piec obrotowy
Thermoselect	piroliza i zgazowanie	palenisko komorowe
Duotherm	piroliza i spalanie	palenisko rusztowe
NOELL-konversionverfahren	piroliza i zgazowanie	piec obrotowy

Istnieje drugi wariant modułowych instalacji TUOK, w którym realizowane są operacje: pirolizy i zgazowania odpadów. W celu uzyskania wymaganego stopnia zgazowania (< 5% C w popiele) w niektórych instalacjach TUOK wymagane jest wzbogacanie powietrza tlenem. W wyniku otrzymuje się oczyszczone paliwo gazowe, zbliżone właściwościami do gazu syntezowego. Kilka instalacji TUOK typu pirolitycznego – Thermoselect, NOEll-Konversionsverfahren i PKA-Verfahren – opisano w pracach [24, 26, 58]. W celu ilustracji na rysunku 9.15 przedstawiono w uproszczeniu strukturę instalacji Thermoselect oraz jej węzeł termicznego przetwarzania odpadów.



9.15. Instalacja Thermoselect: a) uproszczony schemat, b) węzeł przeróbki termicznej odpadów

Zalety instalacji TUOK typu pirolitycznego:

- mniejsza emisja toksycznych zanieczyszczeń organicznych (PCDDs/PCDFs, PCBs i WWA),
- lepsza możliwość usuwania z gazów pirolitycznych kwaśnych gazów (SO_2, H_2S, HCl, HF),
- możliwość *zeszklenia* popiołów i żużli.

Wady instalacji TUOK typu pirolitycznego:

- znaczna komplikacja instalacji w porównaniu z konwencjonalną spalarnią,
- konieczność wzbogacania powietrza tlenem,
- trudności w zagospodarowaniu gazu pirolitycznego,
- duże koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

Instalacje TOUK do spalania paliw odpadowych typu PAKOM (RDF)

Zwykle uzyskiwane z odpadów paliwa typu PAKOM (RDF) mają zredukowane rozmiary oraz zawierają mniej wilgoci i niepalnych składników niż odpady, co znacz-

nie przybliża ich właściwości do właściwości węgla i ułatwia spalanie. Najczęściej stosuje się do spalania „paliw z odpadów" paleniska rusztowe i fluidalne [7]. Paliwa odpadowe PAKOM z odpadów komunalnych mogą także być spalane w kotłach pyłowych, ponieważ poddają się mieleniu jak węgle.

Oddziaływanie instalacji TUOK na środowisko naturalne

Różnorodny skład odpadów komunalnych, występujący w nich chlor i pierwiastki ciężkie oraz trudne warunki ich spalania spowodowane dużym udziałem wilgoci i składników niepalnych powodują, że ważna jest kontrola emisji zanieczyszczeń z instalacji TUOK. Obawy budzi zwłaszcza emisja niektórych zanieczyszczeń organicznych (PCDDs/PCDFs, WWA i LZO). Bezpieczeństwo pracy instalacji spalania odpadów zapewnia się przez:

a) zapewnienie odpowiednich warunków termicznego przekształcania odpadów,
b) stosowanie instalacji usuwających zanieczyszczenia ze spalin,
c) kontrolę emisji zanieczyszczeń z TOUK.

Współczesne instalacje TUOK zapewniają zmniejszenie udziału substancji szkodliwych w spalinach znacznie poniżej poziomu ograniczeń określonych odpowiednimi aktami prawnymi.

W wyniku termicznego przetwarzania odpadów komunalnych powstaje znaczna ilość:

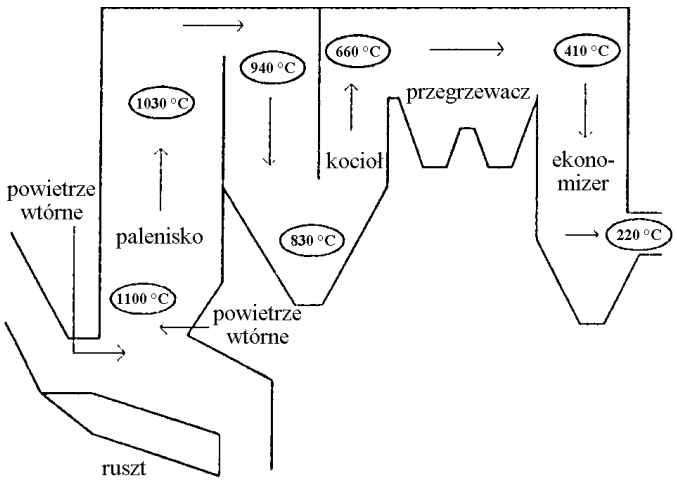
- żużlów (250÷350 kg/$Mg_{odpadów}$),
- lotnych popiołów (40÷80 kg/$Mg_{odpadów}$).

Żużle i popioły z instalacji TUOK zostały zaliczone do odpadów niebezpiecznych [34], ponieważ zawierają rozpuszczalne sole metali ciężkich (Zn, Ni, Cu, Fe, Cr, Cd i Pb), a odcieki z nich wykazują obecność fenoli, siarczków, chlorków i fluorków [25]. Na cząstkach lotnych popiołów kondensują natomiast WWA i PCDDs/PCDFs [44]. Prowadząc w ostatniej fazie przetwarzania spalanie odpadów z użyciem tlenu, można uzyskać przetopione popioły, które są bezpieczne do składowania oraz nadają się wykorzystania [24, 26].

Sprawność energetyczna TUOK

Najważniejsze zadania instalacji TUOK to unieszkodliwienie odpadów oraz zredukowanie ich objętości i masy, ale coraz większą uwagę zwraca się na odzysk energii, ponieważ pozwala to zmniejszyć koszty przetwarzania odpadów. Duże instalacje TUOK nie tylko dostarczają ciepło na potrzeby komunalne, ale pozwalają na generację energii elektrycznej o mocy kilkudziesięciu megawatów.

Sprawność energetyczna przetwarzania odpadów komunalnych nie jest duża, ponieważ nie jest to dobre paliwo, jest w nim dużo wilgoci i części niepalnych. Spalanie odpadów zwykle odbywa się z dużym nadmiarem powietrza, a obciążenie kotła często bywa odległe od nominalnego – to powoduje, że temperatura w palenisku jest niska (rys. 9.16). Sprawność odzysku ciepła w kotle rusztowym mieści się w zakresie 55÷65%, a sprawność wytwarzania energii elektrycznej nie przekracza 25%.



Rys. 9.16. Rozkład temperatury w kotle rusztowym do spalania odpadów komunalnych [7]

9.3.4. Spalarnie odpadów niebezpiecznych

Najważniejszym celem termicznego przekształcania odpadów niebezpiecznych jest ich unieszkodliwienie, natomiast odzysk ciepła i surowców to drugorzędne cele. Taka hierarchia ważności znalazła odzwierciedlenie w określeniu warunków termicznego przekształcania odpadów niebezpiecznych [9, 30]. Istnieje duża różnorodność metod termicznego przekształcania odpadów niebezpiecznych, do najważniejszych należą:

- incyneracja (spopielanie) w: paleniskach komorowych, piecach obrotowych, piecach półkowych, paleniskach fluidalnych i innych,
- piroliza,
- rozkład termiczny z zastosowaniem plazmy,
- detonacja.

Incyneracja jest rozumiana jako wysokotemperaturowy proces przekształcania organicznych składników odpadów przez:

a) spalanie (utlenienie do CO_2 i H_2O),

b) zgazowanie (głównie do CO i H_2).

Detonacja jest bardzo rzadko stosowanym sposobem unieszkodliwiania odpadów. Znajduje zastosowanie przede wszystkim do unieszkodliwiania odpadowych materiałów pirotechnicznych [38], ale można też wskazać przykłady jej stosowania do unieszkodliwiania przeterminowanych środków ochrony roślin [2].

Na wybór paleniska i rozwiązania całej instalacji termicznego przekształcania odpadów niebezpiecznych wpływają takie czynniki, jak: stan skupienia odpadów (stałe, ciekłe, półpłynne), ich wartość opałowa, zawartość szkodliwych składników (chlor, fluor, siarka i inne) oraz możliwość wykorzystania ciepła odpadowego [18].

Duże zastosowanie do spalania niebezpiecznych odpadów znalazły piece obrotowe, zwykle w połączeniu z wtórną komorą dopalania gazów (rys. 9.12). Mimo stosunkowo niskiej temperatury spalania (ok. 850 °C), zadanie termicznej neutralizacji toksycznych odpadów dobrze spełniają paleniska fluidalne. Dzięki wyrównanemu profilowi temperatury oraz dobremu mieszaniu w złożu fluidalnym uzyskuje się duży stopień neutralizacji (np. dla dioksyn 99,9999%) [22].

Efektywność danej instalacji lub danego procesu do termicznego przekształcania niebezpiecznych odpadów *DRE* (ang. *a destruction and removal efficiency*) definiuje się następująco [38]

$$DRE = (W_0 - W_k)/W_0 \cdot 100\%,$$

gdzie: W_0 i W_k – strumienie niebezpiecznych składników organicznych: w odpadach na wlocie do instalacji oraz wyprowadzanych do powietrza.

Ważnym parametrem dla termicznego przekształcania odpadów niebezpiecznych jest czas przebywania odpadów w komorze spalania t_r, na przykład dla pieców obrotowych czas przebywania odpadów stałych można obliczać ze wzoru

$$t_r = 0{,}19L/(NDS),$$

w którym: L – długość komory spalania, D – średnica, N – prędkość obrotowa, S – kąt nachylenia komory (m/m) [7].

Spalanie chlorowcopochodnych

Rozpowszechnienie chlorowanych węglowodorów w gospodarce (na przykład PCV) powoduje, że znajdują się one w odpadach komunalnych i stanowią odpady przemysłu chemicznego. Wartość opałowa chlorowcopochodnych jest znaczna (8,4÷16,8 MJ/kg), dlatego ich spalanie staje się trudne dopiero w ich dolnym zakresie. Największe zagrożenie dla środowiska naturalnego stwarza obecność chloru (do 70%), skutkująca emisją dioksyn i furanów [18]. Proces spalania chlorowanych węglowodorów powinien więc przebiegać w takich warunkach, żeby odzyskać chlor, zwykle w postaci chlorowodoru [18, 19].

Termicznej utylizacji chlorowanych węglowodorów poświęcono wiele prac, w których analizowano także dobór palenisk. Na przykład firma Steinmüller przedstawiła porównanie skuteczności termicznego przekształcania tworzyw sztucznych typu PCV (57% Cl) w różnego typu paleniskach w skali od 2 do 5 i wyróżniła piec obrotowy jako najbardziej skuteczny (tab. 9.18) [45]. Na możliwość spalania wilgotnego nadchloranu amonowego w piecu obrotowym wskazano w pracy [59].

Tabela 9.18

Ocena palenisk do termicznego przetwarzania tworzyw sztucznych typu PCW (na podst. [45])

Palenisko	Proces spalania	Wypalenie	Wydajność HCl	Odzysk ciepła	Pozostałości
Rusztowe	4	2	3	3	2
Fluidalne	5	5	2	4	2
Pyłowe	4	4	2	4	3
Piec obrotowy	4	5	5	4	5

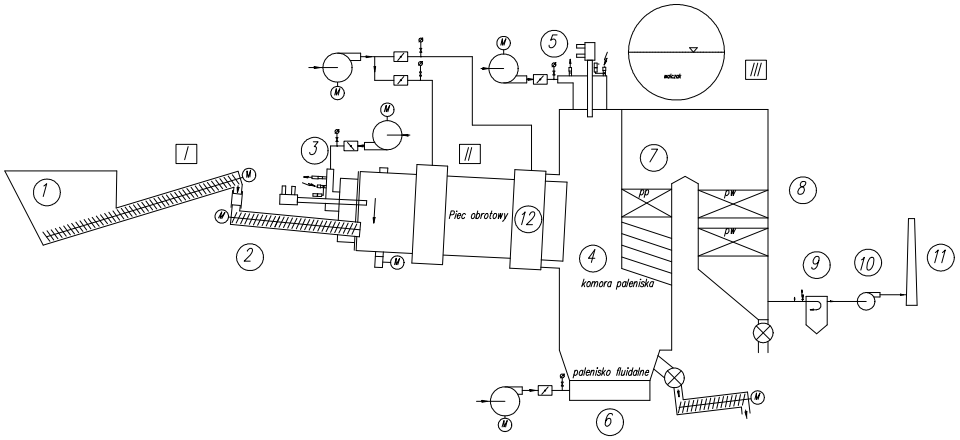
5 – bardzo doby, 4 – dobry, 3 – dostateczny, 2 – niedostateczny

Instalacje do likwidacji mączek i tłuszczów zwierzęcych

Skład chemiczny i właściwości fizyczne mączek mięsno-kostnych i tłuszczów zwierzęcych (tab. 9.7) powodują wymagania indywidualnego sposobu ich spalania. Duża wartość opałowa tych odpadów powoduje, że poszukuje się sposobów ich wykorzystania jako paliwa [11]. Istnieje możliwość spalania lub współspalania mączek mięsno-kostnych i tłuszczów zwierzęcych w następującego typu instalacjach:

- spalarnie odpadów zwierzęcych,
- spalarnie osadów ściekowych,
- elektrownie węglowe,
- cementownie.

Stwierdzono, że najlepszym paleniskiem spalania mączek mięsno-kostnych i tłuszczów zwierzęcych jest piec obrotowy, dlatego piece cementowe są wykorzystywane do utylizacji tego typu odpadów [11]. Na rysunku 9.17 przedstawiono schemat instalacji przeznaczonej do spalania mączek mięsno-kostnych i tłuszczów zwierzęcych [15].



Rys. 9.17. Schemat instalacji do spalania mięsno-kostnych i tłuszczów zwierzęcych [15]: I – układ doprowadzania odpadów, II – piec obrotowy, III – kocioł parowy, 1 – bunkier, 2 – podajnik ślimakowy, 3 – palnik, 4 – komora paleniskowa, 5 – palnik, 6 – ruszt fluidalny, 7 – przegrzewacz pary, 8 – podgrzewacz wody, 9 – odpylacz, 10 – wentylator, 11 – komin

Instalacja składa się z układu podawania odpadów I, pieca obrotowego II i kotła parowego III. Piec obrotowy, o średnicy 1,5 m i długości 8 m, wykonany ze stalowej rury i izolowany wewnątrz wymurówką ceramiczną, obraca się nachylony pod kątem 2° do poziomu. Dolny koniec pieca obrotowego jest wprowadzony do paleniska kotła parowego, którego lej żużlowy jest zakończony rusztem fluidyzującym. W stropowej części paleniska umieszczony jest palnik przystosowany do spalania tłuszczów.

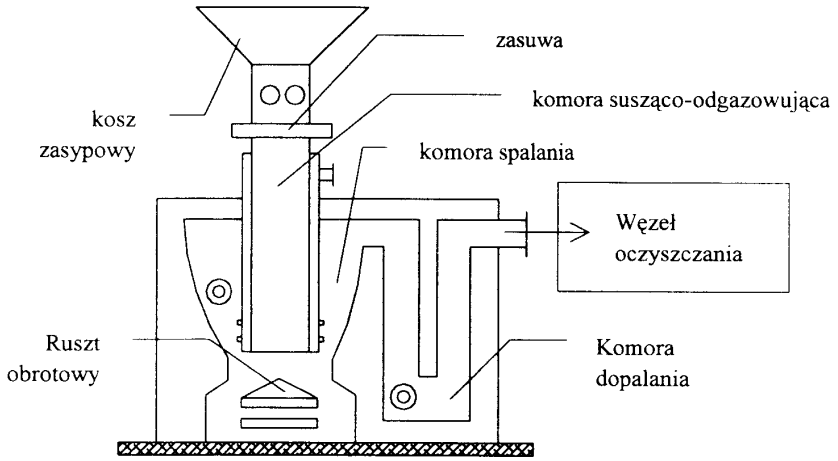
Mączka kostna i inne stałe odpady zwierzęce są podawane do pieca obrotowego, w którym są suszone i ulegają pirolizie w atmosferze redukującej. Przy końcu pieca obrotowego produkty rozkładu termicznego wpadają do paleniska kotłowego, gdzie się spalają, a karbonizat opada na ruszt fluidyzacyjny, na którym spala się w podawanym przez niego powietrzu. Wymaganą dla spalania gazów pirolitycznych temperaturę w palenisku kotłowym zapewnia spalanie w niej tłuszczów zwierzęcych. Dodatkowo palenisko jest wyposażone w stabilizujący temperaturę palnik olejowy [15].

Spalarnie odpadów medycznych

Celem termicznego przekształcania odpadów medycznych (szpitalnych) jest ich wyjałowienie i spopielenie. Z zasady stosuje się systemy dwustopniowe przekształcania odpadów: piroliza lub zgazowanie z częściowym spalaniem, a następnie dopalanie produktów rozkładu w warunkach kontrolowanych (temperatura >1200 °C, stężenie tlenu >6% O_2, czas przebywania >2 s) [59]. Różne są rozwiązania pierwszego stopnia obróbki termicznej obróbki odpadów medycznych (reaktora pirolitycznego) [52]:

- reaktory ze złożem przesuwnym,
- reaktory szybowe,
- reaktory obrotowe,
- reaktory fluidalne,
- reaktory przepływowe,
- reaktory komorowe.

Na rysunku 9.18 pokazano polskie rozwiązanie węzła termicznej obróbki odpadów szpitalnych o niewielkiej wydajności [52].



Rys. 9.18. Schemat instalacji spalania odpadów szpitalnych ze złożem przesuwnym [52]

Reaktorem pirolitycznym jest złoże przesuwne w formie rury zsypowej, umieszczonej w komorze spalania gazów pirolitycznych. U dołu rury zsypowej jest obrotowy ruszt. Odpady w rurze zsypowej, przejmując ciepło z komory spalania, suszą się i odgazowują. Pozostałość koksowa zsypuje się na ruszt dopalający. Gazy pirolityczne spalają się komorze spalania (ok. 850 °C), a następnie przepływają do komory dopalania (1200 °C). Stabilność spalania zapewnia pomocniczy palnik gazowy.

9.3.5. Rodzaje instalacji i urządzeń, w których dopuszcza się termiczne przekształcanie odpadów innych niż niebezpieczne

Istnieją uwarunkowania prawne umożliwiające współspalanie odpadów w licznych urządzeniach i instalacjach wyposażonych w paleniska rusztowe, komorowe i fluidalne (tab. 9.19) [31]. Wyjątek stanowią odpady niebezpieczne, które mogą być spalane tylko w spalarniach odpadów niebezpiecznych.

Tabela 9.19

Rodzaje instalacji i urządzeń, w których dopuszcza się termiczne przekształcanie odpadów [31]

Lp.	Rodzaj instalacji i urządzeń
1	Piece cementowe: obrotowe i szybowe
2	Piece wapiennicze: szybowe, obrotowe i z ruchomym rusztem
3	Wielkie piece: konwertorowe, obrotowe do utleniania rud
4	Kotły energetyczne i przemysłowe: rusztowe, pyłowe, fluidalne, kotły regeneracyjne (sodowe)
5	Piece do wypalania cegły
6	Baterie koksownicze
7	Domowe instalacje i urządzenia centralnego ogrzewania, kuchnie i piece

9.4. Emisja zanieczyszczeń podczas spalania odpadów

Podczas spalania odpadów wraz ze spalinami do powietrza wprowadzane są zanieczyszczenia typowe dla kotłów energetycznych (popiół lotny, SO_2, NO_x, CO_2 i CO), a ponadto mogą być emitowane zanieczyszczenia organiczne, takie jak: WWA i PCDDs/PCDFs. Niektóre odpady zawierają trujące metale ciężkie, które w przeważającej mierze pozostają w popiołach.

Podczas spalania odpadów występuje wielka różnorodność emitowanych związków organicznych. Na postawie temperatury wrzenia dzieli się je na trzy frakcje: lotne (LZO), *semilotne* i nielotne związki organiczne [37]. Niektóre z tych zanieczyszczeń uznano za niebezpieczne, dlatego na ich emisję nałożono ograniczenia.

W Polsce wielkość emisji poszczególnych zanieczyszczeń z instalacji spalania i współspalania odpadów (dotyczy to wszelkich instalacji termicznego przekształcania odpadów, jak spalarnie, instalacje do pirolizy, zgazowania i plazmowego rozkładu odpadów) reguluje Rozporządzenie Ministra Środowiska [35], które jest generalnie zgodnie z dyrektywą (2000/76/WE) UE w sprawie spalania odpadów. W rozporządzeniu *standardy emisyjne* (dopuszczalne udziały zanieczyszczeń w gazach odlotowych) przejściowo podano osobno dla: instalacji spalania odpadów (tab. 9.20), istniejących instalacji spalania odpadów komunalnych i instalacji, w których spalane są niektóre oleje odpadowe. *Standardy emisyjne* dla spalania odpadów są znacznie mniejsze niż dla spalania paliw kopalnych. Należy podkreślić, że rozporządzenie nie wyróżnia

standardów emisyjnych dla spalarni odpadów niebezpiecznych (z wyjątkiem NO_x w ograniczonym okresie). Odrębnym problemem są *standardy emisyjne* dla współspalania odpadów. W rozporządzeniu podano je odrębnie dla pieców do produkcji klinkieru cementowego, natomiast dla innych źródeł podano formułę, z której można wyliczyć *standardy emisyjne* dla poszczególnych grup instalacji [35].

Tabela 9.20

Standardy emisyjne z instalacji spalania odpadów [35]

Nazwa substancji	Udział w mg/m^3_u (dla dioksyn i furanów w ng/m^3_u), przy zawartości 11% O_2 w gazach odlotowych
	Średnie dobowe
Pył ogółem	10
Substancje organiczne w postaci gazów i par wyrażone jako całkowity węgiel organiczny	10
HCl	10
HF	1
SO_2	50
NO_x z istniejących instalacji o zdolności przerobowej >6 Mg/h lub z nowych instalacji	200[1]
NO_x z istniejących instalacji o zdolności przerobowej ≤6 Mg/h	400[1]
Metale ciężkie i ich związki wyrażone jako metal:	średnie próby o czasie trwania 0,5÷8 h
Cd+Tl	0,05
Hg	0,05
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V+Sn	0,5
Dioksyny i furany	średnie próby o czasie trwania 6÷8 h
	0,1

[1] Do 1.01.2007 r. dopuszczalnej wartości emisji dla NO_x nie stosuje się do spalarni odpadów niebezpiecznych.

Stałe odpady paleniskowe

Istotnym problemem są także powstające podczas spalania odpadów popioły i żużle, które są zakwalifikowane do odpadów niebezpiecznych [34]. Taka kwalifikacja spowodowana jest tym, że zawierają one niektóre trujące metale ciężkie, które w kontakcie z wodą dają odcieki do gleby. Ponadto na cząstkach popiołów osadzają się dioksyny i furany. Wymywalność tych zanieczyszczeń z popiołów zagraża skażeniem wód gruntowych [33], dlatego magazynowanie popiołów ze spalania odpadów wymaga składowiska odpadów niebezpiecznych [32]. Z tych samych powodów współspalanie odpadów z węglem także stwarza problemy, ponieważ utrudnia gospodarcze wykorzystanie popiołów [6].

Konieczność magazynowania popiołów ze spalania odpadów na składowiskach odpadów niebezpiecznych stanowi duże utrudnienie w eksploatacji spalarni odpadów, dlatego pracuje się nad alternatyw-

nymi sposobami, które zabezpieczą przed wymywaniem metali ciężkich. Do metod *immobilizacji* metali ciężkich w popiołach należą: stabilizacja z użyciem cementu i termiczna *immobilizacja*, zeolitizacja, pelletyzacja i termiczna obróbka oraz witryfikacja. Zwłaszcza witryfikacja, polegająca na przetapianiu popiołu do postaci szklistej, charakteryzuje się dużą skutecznością zabezpieczenia przed wymywaniem metali ciężkich [16].

Literatura

[1] Asejeva R.M., Zaikov G.E., *Gorenie polimernych materialov*, Nauka, Moskva 1981.
[2] Biegańska J., *Unieszkodliwianie odpadowych środków ochrony roślin metodą detonacyjnego spalania*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
[3] Bień J., Matysiak B., Wystalska K., *Stabilizacja i odwadnianie osadów ściekowych*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1999.
[4] Bień J.B., *Osady ściekowe*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
[5] Bowes P.C., *Selfheating: Evaluating and Controlling the Hazards*, Borehamwood, BRE, FRS, 1984.
[6] Cenni R. et al., *Legislative and environmental issues on the use of ash from coal and municipal sewage sludge co-firing as construction material*, Waste Management, Vol. 21, 2001.
[7] Chandler A.J. et al., *Municipal solid waste incinerator residues*, Elsevier, Amsterdam 1997.
[8] Cichy W., Wróblewska H., *Paliwa drzewne z odpadów pożytkowych – potencjał, właściwości, zagrożenia*, materiały IV międzynarodowej konferencji „Paliwa z odpadów", wyd. Helion, Gliwice 2003.
[9] Council Directive 94/67/EC of 16 December 1994 on the incineration of hazardous waste, Official Journal L 365, 1994.
[10] Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on landfill of waste, Official Journal L 182, 1999.
[11] Duda J., *Mączki mięsno-kostne paliwem w procesie wypalania klinkieru cementowego*, materiały IV międzynarodowej konferencji „Paliwa z odpadów", Helion, Gliwice 2003.
[12] Dyrektywa Rady 89/369/EWG z dnia 8 czerwca 1989 roku w sprawie zapobiegania zanieczyszczaniu powietrza przez nowe zakłady spalania odpadów komunalnych.
[13] Garczyński W., *Spalanie odpadów szpitalnych w świetle działalności kontrolnej Państwowej Inspekcji Ochrony Środowiska*, materiały III międzynarodowej konferencji „Spalanie odpadów – technologie i problemy", Szczyrk 30 września–2 października 1997, Szczyrk 1997.
[14] Jerzy J. i in., *Walory energetyczne odpadów komunalnych energia środowiskowa-kompleksowy zintegrowany system energetycznego zagospodarowania polskich odpadów komunalnych*, materiały III międzynarodowej konferencji „Spalanie odpadów – technologie i problemy", Szczyrk 30 września–2 października 1997, Szczyrk 1997.
[15] Karcz H., Sikorski W., Jodkowski W., *Instalacja do termicznej utylizacji odpadów zwierzęcych*, Journal of Transdisciplinary System Science SYSTEMS, Vol. 9, 2/1, 2004.
[16] Kordylewski W., Zacharczuk W., Kasprzyk K., *Modyfikacja popiołu i żużla metodą witryfikacji*, Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów, nr 3, 2003.
[17] Kozioł M., *Energetyczne, ekologiczne efekty współspalania osadów ściekowych z węglem w paleniskach kotłów rusztowych*, praca doktorska, Politechnika Śląska, KTUZO, Gliwice 2002.
[18] Krogulec N.J., *Spalanie odpadów przemysłowych*, Ochrona Powietrza, nr 1, 1994.
[19] Krogulec N.J., *Spalanie odpadów przemysłu chemicznego*, Ochrona Powietrza, nr 3, 1994.
[20] Lundqvist R.G., *Nowe rozwiązania w technologii kotłów fluidalnych ze złożem cyrkulacyjnym*, materiały III konferencji Użytkowników kotłów fluidalnych, Międzybrodzie Żywieckie, 24026.09.2003.
[21] Nadziakiewicz J., *Warunki autotermicznego spalania odpadów stałych*, Gospodarka Paliwami i Energią, nr 10, 2000.
[22] Niessen W.R., *Combustion and Incineration Processes*, Marcel Dekker, New York 1995.

[23] Nowak W., Wandrasz A.J., *Odpady jako źródło paliwa energetycznego*, materiały III międzynarodowej konferencji „Spalanie odpadów – technologie i problemy", Szczyrk 30 września–2 października 1997, Szczyrk 1997.
[24] Pająk T., *Termiczna utylizacja odpadów komunalnych*, Przegląd Komunalny, nr 3, 1998.
[25] Piecuch T., Dąbek L, Juraszka B., *Spalanie i piroliza odpadów oraz ochrona powietrza przed szkodliwymi składnikami spalin*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2002.
[26] Piecuch T., *Termiczna utylizacja odpadów*, Politechnika Koszalińska, Koszalin 1998.
[27] PN-93/Z-15006. *Odpady komunalne stałe. Badania właściwości palnych. Oznaczanie ciepła spalania i obliczanie wartości opałowej.*
[28] PN-93/Z-15006. *Odpady komunalne stałe. Oznaczanie składu morfologicznego.*
[29] Riley J.T. et al., *Chlorinated organic compounds evolved during the combustion of blends of refuse-derived fuels and coals*, J. of Thermal Analysis, Vol. 49, 1997.
[30] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 października 1998 r. w sprawie szczegółowych zasad usuwania, wykorzystywania i unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych, Dz. U. nr 145, poz. 942.
[31] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 29 stycznia 2002 r. w sprawie rodzaju odpadów innych niż niebezpieczne oraz rodzaju instalacji i urządzeń, w których dopuszcza się ich termiczne przekształcanie, Dz. U. nr 18, poz. 176.
[32] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 marca 2002 r. w sprawie wymagań dotyczących procesu termicznego przekształcania odpadów, Dz. U. nr 37, poz. 339.
[33] Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dn. 5.11.1991 w sprawie klasyfikacji wód oraz warunków jakim powinny odpowiadać ścieki wprowadzane do wód lub do ziemi, Dz. U., nr 116, poz. 503.
[34] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dn. 27.09.2001 r. w sprawie katalogu odpadów, Dz. U. nr 112, poz. 1206, 2001.
[35] Rozporządzenie Ministra Środowiska, z dn. 4 sierpnia 2003 r. w sprawie standardów emisji z instalacji, Dz. U., nr 163, poz. 1584.
[36] Ruth L.A., *Energy from municipal solid waste: a comparison with coal combustion technology*, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 24, 1998.
[37] Ryan J.V. et al., *Characterisation of organic emissions from hazardous waste incineration processes under the new EPA draft Risk Burn Guidance: measurement issues*, Waste Management, Vol. 20, 2000.
[38] Saxena S.C., Jotshi C.K., *Management and combustion of hazardous wastes*, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 22, 1996.
[39] Schroppe J.T., *Practical experience is the best teacher for the next generation*, Modern Power Systems, March 1999.
[40] Sekuła R., *Termiczna utylizacja odpadów toksycznych*, Ochrona Powietrza, nr 4, 1994.
[41] Skowron H., *Instalacje termicznej utylizacji odpadów komunalnych*, RAFAKO S.A., Racibórz 1999.
[42] Słupek S. et al., *Rotary kiln as a method of hazardous waste incineration*, Archivum Combustionis, Vol. 16, 1996.
[43] Stelmach S., Sobolewski A., *Piroliza – alternatywa spalania odpadów komunalnych*, Gospodarka Paliwami i Energią, nr 7, 1999.
[44] Syczewska K., Sikora A., *Spalanie odpadów a dioksyny*, materiały II sympozjum „Ograniczenie emisji zanieczyszczeń do atmosfery", Szklarska Poręba czerwiec 1994.
[45] *Termiczna utylizacja odpadów przemysłowych*, materiały firmy Stenmüller, Gummersbach 1996.
[46] Tillman D.A., *The Combustion of Solid fuels and Wastes*, Academic Press Inc., San Diego 1991.
[47] Tomas D., *Termiczna utylizacja odpadów*, RAFAKO S.A., Racibórz 2002.

[48] Troniewski L.,Wzorek M., *Osady ściekowe jako paliwo alternatywne dla przemysłu cementowego*, materiały konferencyjne „Energia a Środowisko w Technologiach Budowlanych", Szczyrk–Opole 2004, Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych w Opolu, Opole 2004.
[49] Ustawa z dn. 27.04.2001 r. *O odpadach*, Dz. U. nr 62, poz. 628.
[50] Ustawa z dn. 23 sierpnia 2001 r. o środkach żywienia zwierząt, Dz. U. nr 123, poz. 1350.
[51] Van de Kamp W.L., Morgan D.J., *The co-firing of pulverized bituminous coals with straw, waste paper and municipal sludge*, Combust. Sci. and Tech. Vol. 121, 1996.
[52] Wacławiak K., *Modelowanie procesu odgazowania w komorze pirolitycznej instalacji do unieszkodliwiania odpadów szpitalnych*, praca doktorska, Politechnika Śląska, ITC, Gliwice 1999.
[53] Wandrasz J.W., Gąska K., *Usuwanie i unieszkodliwianie odpadów medycznych*, Przegląd Komunalny, nr 3, 1998.
[54] Wandrasz J.W. i in., *Możliwości współspalania osadów z oczyszczalni ścieków z węglem w kotłach rusztowych*, Gospodarka Paliwami i Energią, nr 8, 2000.
[55] Wandrasz J.W., Wróblewicz T., *Wartość opałowa odpadów przeznaczonych do utylizacji termicznej, w funkcji rozwiązań systemowych zintegrowanej gospodarki stałymi odpadami komunalnymi*, Gospodarka Paliwami i Energią, nr 11, 1996.
[56] Wasielewski R., Sobolewski A., *Energetyczna waloryzacja odpadów tworzyw sztucznych*, Gospodarka Paliwami i Energią, nr 9, 1999.
[57] Werther J., Ogada T., *Sewage sludge combustion*, Prog. Energy Combust, Sci., 1999, Vol. 25.
[58] Wielgosiński G., *Pirolityczne instalacje termicznej utylizacji odpadów komunalnych – wady i zalety*, Problemy Ekologii, Vol. 3, nr 5, 1999.
[59] Wydako W., *Doświadczenia realizacyjne i eksploatacyjne stosowania instalacji do termicznego unieszkodliwiania odpadów specjalnych w Polsce*, materiały III międzynarodowej konferencji „Spalanie odpadów – technologie i problemy", Szczyrk 30 września–2 października 1997, Szczyrk 1997.
[60] Zarzycki R., Wielgosiński G., *Gospodarka odpadami komunalnymi w metropoliach polskich*, materiały III międzynarodowej konferencji „Spalanie odpadów – technologie i problemy", Szczyrk 30 września–2 października 1997, Szczyrk 1997.