



# Reaktory do pirolizy odpadów i biomasy

## Reactors for waste and biomass pyrolysis

Dr hab. inż. Tomasz J. Jaworski

Tomasz J. Jaworski, Politechnika Śląska, Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, Tel. +48 32 2372122, email: tomasz.jaworski@polsl.pl



### W KILKU SŁOWACH

Na proces pirolizy wpływa wiele parametrów, które decydują o rodzaju oraz ilości otrzymanych produktów. W zależności od tych parametrów można otrzymać różne wydajności karbonizatu, oleju oraz gazu pirolitycznego. Kontrola tych parametrów jest ważna jeśli chcemy otrzymać np. więcej frakcji olejowej. Odpowiedni dobór parametrów pozwala na otrzymanie zamierzonego efektu pirolizy. Najważniejszym czynnikiem mającym wpływ na właściwości produktów pirolizy ma rodzaj użytego odpadu (paliwa). Istnieje jednak bardzo duża ilość czynników mających wpływ na efektywność pirolizy. Pozostałymi parametrami decydującymi o rodzaju i ilości otrzymanych produktów są: rodzaj reaktora, sposób ogrzewania, temperatura procesu, tempo nagrzewania, ciśnienie, sposób przygotowania wsadu, rozmiar cząstek, czas przebywania paliwa w reaktorze, natężenie przepływającego czynnika oraz katalizator w przypadku pirolizy biomasy.



### SUMMARY

The pyrolysis process is influenced by many parameters that decide about the type and quantity of received products. Depending on these parameters, may be obtained a different efficiency of char, oil and pyrolysis gas. Evaluating of these parameters is important to obtain, for example, more oil fractions. Proper selection of the parameters allows for getting the intended effect of pyrolysis. The most important factor, affecting the properties of pyrolysis products is the type of used waste (fuel). However, there are many factors that influence the efficiency of pyrolysis. Other parameters determining the type and quantity of obtained products are: reactor type, heating method, process temperature, heating rate, pressure, batch preparation method, particle size, reactor fuel residence time, flow rate, and catalyst in the case of biomass pyrolysis.

## Wstęp

Piroliza jest określana jako „proces transformacji termicznej bogatych w węgiel substancji organicznych, który odbywa się w podwyższonych temperaturach, w środowisku całkowicie pozbawionym tlenu lub przy jego pomijalnie małej obecności. Proces ten jest z natury endotermiczny (wymaga dostarczenia ciepła z zewnątrz) i przebiega w temperaturach do 1000°C. Podczas procesu pirolizy masa odpadów zostaje przekształcona w gaz pirolityczny, koks pirolityczny i fazę ciekłą”[1].

Na proces pirolizy wpływa wiele parametrów, które decydują o rodzaju oraz ilości otrzymanych produktów. W zależności od tych parametrów można otrzymać różne wydajności karbonizatu, oleju oraz gazu pirolitycznego. Kontrola tych parametrów jest ważna jeśli

chcemy otrzymać np. więcej frakcji olejowej. Odpowiedni dobór parametrów pozwoli na otrzymanie zamierzonego efektu pirolizy.

Najważniejszym czynnikiem mającym wpływ na właściwości produktów pirolizy ma rodzaj użytego odpadu (paliwa). Istnieje jednak bardzo duża ilość czynników mających wpływ na efektywność pirolizy. Pozostałymi parametrami decydującymi o rodzaju i ilości otrzymanych produktów są: rodzaj reaktora, sposób ogrzewania, temperatura procesu, tempo nagrzewania, ciśnienie, sposób przygotowania wsadu, rozmiar cząstek, czas przebywania paliwa w reaktorze, natężenie przepływającego czynnika oraz katalizator w przypadku pirolizy biomasy [2],[3].

## 2. Rodzaj użytego paliwa

Do procesu pirolizy można wykorzystać różne rodzaje paliwa w tym odpady. Rodzaje surowców do pirolizy można podzielić generalnie na trzy grupy: paliwa kopalniane np. węgiel, biomasa np. drewno, osady ściekowe oraz tworzywa sztuczne np. opony. Każdy z tych surowców różni się składem chemicznym i właściwościami fizycznymi, co wpływa na jakość otrzymanych produktów z pirolizy.

Podstawowymi surowcami wykorzystywanymi w procesie pirolizy są węgiel oraz biomasa. Porównując skład węgla i drewna (tab. 1) można zauważyć, że drewno posiada więcej substancji lotnych natomiast mniej węgla. Podczas procesu pirolizy tych dwóch surowców drewno wytwarza mniej karbonizatu, natomiast więcej części lotnych w odniesieniu do węgla [4]. Znajomość struktury chemicznej jak i ich zachowania podczas procesu pirolizy jest niezwykle istotna z punktu widzenia zastosowania optymalnych rozwiązań technologicznych, doboru odpowiednich parametrów (temperatury, czasu trwania procesu), efektywności procesu oraz uciążliwości dla środowiska [5].

Rodzaj paliwa	C %	H %	O %	S+N %	Wartość opałowa MJ/kg	Części lotne %
Biomasa	<50	6	43	0,3	14-19	70-80
Węgiel	75-96	1-6	1-18	0,8-2	32-35	1-45
Ciepło	PIROLIZA	Gaz palny, karbonizat i smoła	Gaz palny, karbonizat i smoła	Gaz palny, karbonizat i smoła	Gaz palny, karbonizat i smoła	Gaz palny, karbonizat i smoła

Tabela 1. Skład chemiczny węgla i biomasy [6]

### 3. Temperatura

Podczas procesu pirolizy należy odróżnić temperaturę reakcji od temperatury reaktora. Temperatura reaktora jest znacznie wyższa ze względu na potrzebę występowania gradientu temperatur, w celu przeniesienia ciepła. Dla szybkiej pirolizy dolna granica temperatury na rozkład drewna wynosi 435 °C dla osiągnięcia akceptowalnych wydajności cieczy co najmniej 50 % przy krótkim czasie reakcji. Wpływ temperatury jest dobrze poznany, dla większości form biomasy drzewnej produkt pirolizy osiąga maksymalną wydajność zazwyczaj w temperaturach 500 - 520 °C. Inna biomasa może mieć

maksymalne wydajności w innych temperaturach. Wpływ temperatury jest mniej poznany w kategoriach jakości produktów do wykorzystania jako paliwa [7].

### 4. Szybkość ogrzewania

Szybkość ogrzewania wpływa na drogę zachodzących reakcji, a więc na produkty końcowe. Piroliza jest klasyfikowana do wolnej przy nagrzewaniu rzędu 10 °C/ min i do szybkiej/ błyskawicznej przy szybkości ogrzewania zbliżającej się do 1000 °C/ min. Z licznie prowadzonych obserwacji pirolizy wynika, że wydajność karbonizatu wzrasta przy niskich szybkościach ogrzewania. Przy szybkim ogrzewaniu wzrasta wydajność części lotnych i zachodzi mniej reakcji wtórnych [8].

### 5. Czas przebywania w reaktorze

Czas przebywania decyduje o występowaniu wtórnych reakcji pirolizy. Podczas pirolizy mogą występować różne ścieżki reakcji takie

jak uwalnianie części lotnych z matrycy, hamowanie powstawania karbonizatu i autokatalityczna reakcja wtórna, ich stopień i zakres zależy od czasu przebywania niektórych produktów celulozowych w reaktorze [8].

### 6. Rozmiar cząstek

Wpływ rozmiaru cząstek na końcową wydajność produktów jest powiązana z przeniesieniem ciepła od ogrzewanej ścianki reaktora do biomasy w reaktorze. Większe cząstki ogrzewają się wolniej niż mniejsze cząstki. Średnia temperatura większych cząstek jest mniejsza i zostaje wyodrębnionych mniej lotnych związków podczas pirolizy [9]. Duży rozmiar cząstek powoduje także wydłużenie czasu przebywa





- INDUSTRIAL GAS FURNACES AND BURNERS,
- POURING AND BOTTOM POURING LADLE PREHEATING UNITS
- INCINERATORS AND THERMAL OXIDIZERS.

APGAZ Co. Ltd.,  
INDUSTRIAL GAS TECHNOLOGIES  
62-002 Suchy Las, ul. Sprzeczna 27 Poland  
apgaz@apgaz.pl, +48 61 8720056

[www.apgaz.pl](http://www.apgaz.pl)

## PIECOBUD



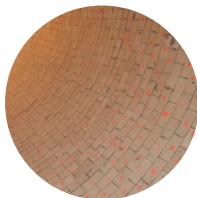
Przedsiębiorstwo PIECOBUD z siedzibą w Płocku od 25 lat świadczy szeroki wachlarz usług zarówno w zakresie inwestycji jak i remontów branży budownictwa ogniotrwałego oraz izolacji termicznych pieców i kotłów przemysłowych w każdej gałęzi przemysłu na terenie całego kraju oraz poza jego granicami.

PIECOBUD oferuje:

- 🔧 Projektowanie,
- 🔧 Dobór oraz dostawę niezbędnych materiałów
- 🔧 Wykonawstwo,
- 🔧 Nadzór nad realizacją projektu,
- 🔧 Wygrzewanie,
- 🔧 Prace serwisowe.

PIECOBUD to:

- 🔧 Solidne partnerstwo,
- 🔧 Dyspozycyjność,
- 🔧 Dbalność o bezpieczeństwo,
- 🔧 Jakość,
- 🔧 Najwyższej klasy specjaliści.



**Zapraszamy do współpracy!**

PIECOBUD  
09-411 Płock, ul. Zglenickiego 52 c

[www.piecobud.com](http://www.piecobud.com)  
e-mail: [info@piecobud.com](mailto:info@piecobud.com)  
tel. 24 366 04 40

reaktorze, co może skutkować występowaniem reakcji wtórnych w części lotnej uzyskanej z reakcji pierwotnych [8].

### 7. Rodzaj reaktora

Wraz z istniejącym zainteresowaniem technologią pirolizy, wiele konstrukcji reaktorów zostało zbadanych aby zoptymalizować wydajność pirolizy oraz umożliwić produkcję wysokiej jakości biooleju. Jednak każdy typ reaktora ma specyficzne cechy, i pewne rodzaje posiadają ograniczenia, a inne zalety w otrzymywaniu biooleju. Poniżej zostały zaprezentowane najpopularniejsze typy reaktorów do wolnej i szybkiej pirolizy [10].

#### Reaktor ze stałym złożem

Reaktor pirolizy ze stałym złożem zawiera system chłodzenia gazu i układ czyszczący. Technologia w reaktorze ze stałym złożem jest prosta, niezawodna i sprawdzona dla paliw, które mają jednolitą wielkość oraz małą zawartość zanieczyszczeń. W tego typu reaktorze, ciało stałe porusza się w dół w pionowej rurze i kontaktuje ze strumieniem gazu w przeciwnym kierunku. Typowy reaktor ze złożem stałym składa się z cegieł ogniotrwałych, stali lub betonu, zespołu doprowadzającego paliwo, jednostki odprowadzającej popiół i wylotu gazu. Reaktory ze stałym złożem generalnie działają z wysoką wydajnością węgla, długim czasem przebywania ciała stałego, niską prędkością gazu oraz niskim przeniesieniem popiołu. Ten typ reaktora jest używany na małą skalę do wytwarzania ciepła i energii. System chłodzenia i oczyszczania gazu składa się z filtracji przez cyklon, mokre płuczki i suche filtry. Głównym problemem w reaktorach ze stałym złożem jest usuwanie smoły. Jednak postęp w zakresie termicznego oraz katalicznego przekształcania smoły daje realne możliwości jej usuwania [10].

#### Reaktor ze złożem fluidalnym

Reaktor ze złożem fluidalnym, składa się z mieszaniny płyn - ciało stałe, które wykazuje właściwości takie jak płyn. Uzyskuje się to na ogół przez wprowadzenie płynu pod ciśnieniem przez cząstki stałe substancji. Reaktory fluidalne wydają się być popularne dla szybkiej pirolizy, jako że zapewniają szybki transfer ciepła, dobrą kontrolę reakcji pirolizy i czasu prze-



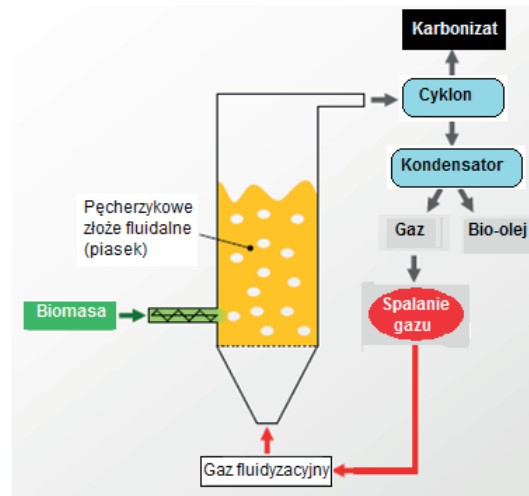
bywania, dużą powierzchnię kontaktu między cieczą a ciałem stałym na jednostkę objętości złoża, dobry transport ciepły wewnątrz systemu i dużą prędkość względną pomiędzy fazą ciekłą a stałą. Wyróżnia się kilka rodzajów reaktorów ze złożem fluidalnym [10]:

**Reaktor ze złożem fluidalnym pęcherzykowym**

Reaktory ze złożem pęcherzykowym (rys. 1) są stosowane w przetwórstwie ropy naftowej i chemicznej od ponad pięćdziesięciu lat i dlatego mają długą historię pracy. Reaktory charakteryzuje szybki transfer ciepła w połączeniu z jednolitymi temperaturami złoża, są to niezbędne atrybuty dla szybkiej pirolizy. Po wybraniu odpowiedniego rozmiaru złoża fluidyzacyjnego, przepływ gazu może być opracowany w taki sposób, że czas przebywania gazu / pary w wolnej sekcji powyżej złoża może być ustawiony na pożądaną wartość, zwykle w zakresie 0,5-2,0 sekund. Doświadczenia wykazały, że temperatura robocza 500 - 550 ° C w złożu i czas przebywania około 0,5 sekundy będą zwykle prowadzić do uzyskania największej wydajności cieczy. Jednak większe systemy mogą działać w nieco niższej temperaturze i dłuższym czasie przebywania par. Temperatura może również zmieniać się w zależności od rodzaju przetwarzanej biomasy. Z powodu długiej historii obsługi i prostej konstrukcji pracy, ten typ reaktora jest uważany, za bardzo niezawodny i praktycznie bezproblemowy jako system zdolny do przeprowadzenia szybkiej pirolizy biomasy. Istnieją jednak pewne ograniczenia praktyczne, które należy wziąć pod uwagę przy rozważaniu tej konstrukcji reaktorów na większą skalę. Wydajność reaktora zależy od ilości i skuteczności dostarczania ciepła. W reaktorze trzeba zastosować małe cząstki biomasy (mniejsze niż 2-3 mm) w celu osiągnięcia wysokiego stopnia ogrzewania [11].

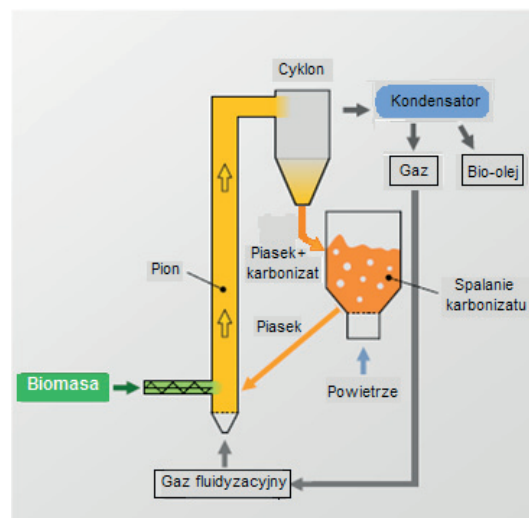
**Reaktor z szybkim ruchomym złożem fluidalnym (tzw. złożo cyrkulacyjne)**

Reaktory z ruchomym cyrkulacyjnym złożem fluidalnym mają podobne cechy do reaktorów ze złożem pęcherzykowym, z wyjątkiem krótszego czasu przebywania dla karbonizatu i par. Skutkuje to wyższą prędkością gazu i zawartością karbonizatu w biooleju w porównaniu do reaktorów z pęcherzykowym złożem fluidal-



Rys. 1. Schemat reaktora z pęcherzykowym złożem fluidalnym [12]

nym. Jedną z zalet jest to, że ten rodzaj reaktora jest odpowiedni dla bardzo dużych wydajności produkcyjnych, chociaż hydrodynamiki są bardziej skomplikowane. Istnieją zasadniczo dwa typy cyrkulacji reaktorów ze złożem fluidalnym: jedno obiegowy i dwu obiegowy. Rysunek 2 przedstawia schemat reaktora ze złożem fluidalnym cyrkulacyjnym, ruchomym z systemem jedno obiegowym [10].



Rys. 2. Schemat reaktora z ruchomym cyrkulacyjnym złożem fluidalnym w systemie jedno obiegowym [12]

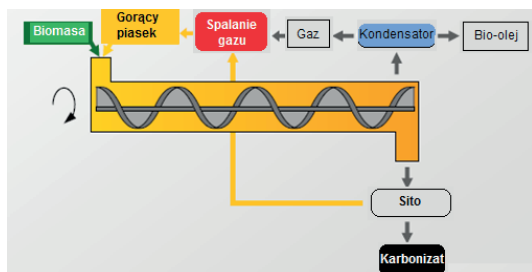
**Reaktor z przenośnikiem ślimakowym**

W tym typie reaktora przenośnik ślimakowy służy do przemieszczania surowca w cylindrycznej, podgrzewanej i pozbawionej tlenu rurze. Przejście surowca przez rurę podgrzewa go do pożądanego podczas pirolizy temperatury z zakresu 400-800° C. Dzięki użyciu wysokiej przewodności cieplnej nośników ciepła, ener-





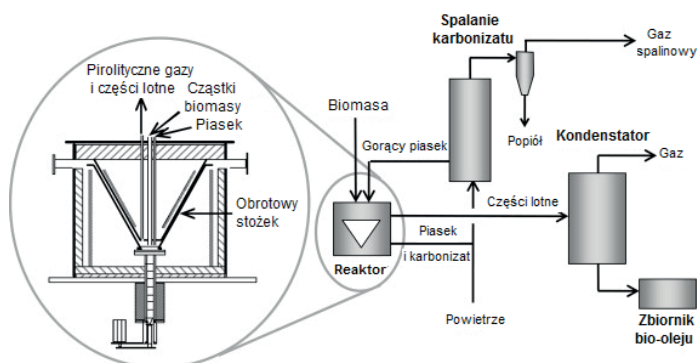
gia niezbędna do szybkiej pirolizy, jest gwałtownie przenoszona do biomasy. Generowane opary są szybko kierowane do kondensacji, w celu zminimalizowania czasu reakcji, a wytwarzany karbonizat jest oddzielany od nośnika ciepła niezależnie od reakcji rozkładu termicznego i trafia do systemu przechowywania. Schemat reaktora ślimakowego przedstawiony jest na rysunku 3 [10], 13].



Rys. 3. Schemat reaktora z przenośnikiem ślimakowym [12]

**Reaktor z obrotowym stożkiem**

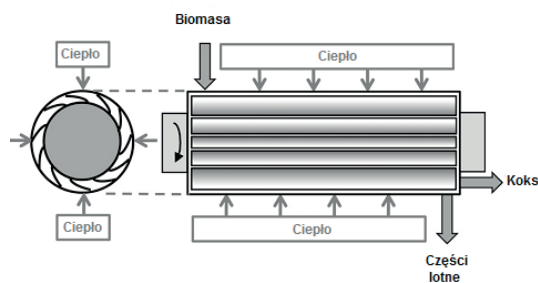
Reaktor opracowany dzięki wspólnej współpracy Uniwersytetu Twente w Holandii oraz firmie BTG. Cząstki biomasy są wprowadzane na dno reaktora razem z piaskiem, który działa jako nośnik ciepła. Następnie biomasa oraz piasek są mieszane w stożkowym reaktorze do pirolizy i przekształcane w pirolityczny olej, gaz i karbonizat. Wytworzone pary i gazy przechodzą przez kilka cyklonów przed wejściem do skraplacza, w którym pary są skraplane do biooleju. Piasek i karbonizat są transportowane do komory spalania, gdzie dodawane jest powietrze do spalania karbonizatu i ponownego ogrzania piasku. Gorący piasek jest następnie transportowany z powrotem do reaktora w celu zamknięcia procesu. Chociaż konstrukcja reaktora z obrotowym stożkiem (rys. 4) jest złożona uzyskuje się dużą wydajność biooleju 60-70% [15].



Rys. 4. Schemat reaktora z obrotowym stożkiem [15]

**Reaktor ablacyjny**

Piroliza w reaktorze ablacyjnym zasadniczo różni się w koncepcji w porównaniu z innymi metodami szybkiej pirolizy. We wszystkich innych metodach szybkość reakcji jest ograniczona przez szybkość ogrzewania cząstek biomasy, co wyjaśnia potrzebę użycia małych rozmiarów cząstek biomasy. Mechanizm działania w ablacyjnym reaktorze pirolizy jest porównywany do topienia masła na patelni, szybkość topienia może być znacznie przyspieszona przez przyciśnięcie i przesunięcie go na ogrzanej powierzchni patelni. W ablacyjnej pirolizie ciepło jest przenoszone z gorącej ścianki reaktora na „topioną” biomase, która jest z nią w kontakcie pod ciśnieniem. Kiedy biomasa jest przesuwana następuje odparowanie stopionej warstwy. Uzyskany produkt jest podobny do tego z pirolizy ze złożem fluidalnym. Temperatura ścianek w reaktorze ablacyjnym jest mniejsza niż 600° C. W tym typie reaktora nie ma górnej granicy wielkości cząstek biomasy, które mogą być przetwarzane. Uzysk biooleju w reaktorze ablacyjnym wynosi 70-75 % [15]. Schemat reaktora ablacyjnego przedstawiono na rysunku 5.



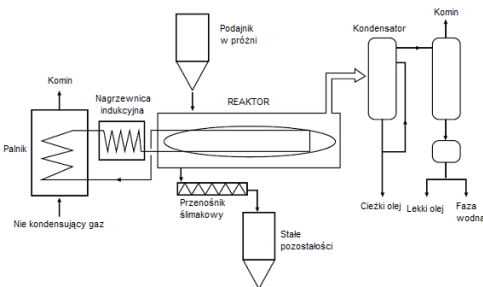
Rys. 5. Schemat reaktora ablacyjnego [15]

**Reaktor pirolizy próżniowej**

Pyrovac w Quebec w Kanadzie opracował proces pirolizy próżniowej do przekształcania biomasy na ciecz. Chociaż jest to powolny proces pirolizy (niższa szybkość przesyłania ciepła) generuje chemicznie podobny produkt ciekły, ponieważ krótszy czas przebywania pary zmniejsza występowanie reakcji wtórnych. Jednakże, powolna szybkość ogrzewania prowadzi także do niższych wydajności biooleju 30-45% w stosunku do 70% otrzymanego z technologii złoża fluidalnego. Sam proces jest bardzo skomplikowany mechanicznie, obejmujący ruchomą metalową taśmę, która przenosi biomase do komory próżniowej w wysokiej tempera-

turze. Istnieją również mieszadła mechaniczne, które okresowo mieszają biomasę na taśmie; cały transport mechaniczny jest wykonywany w temperaturze 500 ° C. Cechy konstrukcyjne tego typu reaktora posiadają wysokie koszty inwestycyjne i utrzymania. Praca w próżni wymaga odpowiednich urządzeń dowożących i rozładujących stałe produkty w celu utrzymania dobrego uszczelnienia w każdej chwili procesu. W tej konkretnej konstrukcji wydajność ogrzewania jest niska oraz sposób ogrzewania niepotrzebnie skomplikowany przez użycie palnika i grzejnika indukcyjnego z roztopionymi solami jako nośnika ciepła. Rozmiary cząstek użyte w tym rodzaju reaktora muszą mieć wielkość 2-5 cm [11].

Schemat reaktora próżniowego przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Schemat reaktora próżniowego [13]

### 8. Sposób ogrzewania

Istnieje szereg problemów technicznych związanych z rozwojem szybkiej pirolizy, z których najważniejszym jest sposób przenoszenia ciepła do reaktora. Piroliza jest procesem endotermicznym i wymaga znacznego wkładu ciepła do podwyższenia temperatury biomasy [15].

Istnieją dwa ważne wymagania dla wymiany ciepła w reaktorze do pirolizy:

- do reaktora ciepło przenosi nośnik ciepła;
- z nośnika ciepło przenoszone jest do biomasy poddawanej pirolizie.

W szybkiej pirolizie cząstki biomasy mogą być ogrzewane dwoma głównymi sposobami:

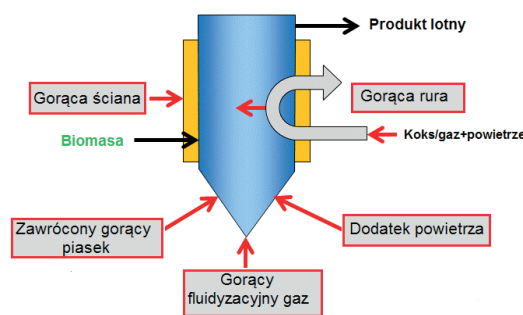
gaz - ciało stałe transfer ciepła jak w reaktorze przepływowym, gdzie ciepło jest pozyskiwane z gorącego gazu z pirolizy do cząstek biomasy głównie przez konwekcje. Ciało stałe - ciało stałe, wymiana ciepła zachodzi na drodze przewodzenia [7]. Oprócz konwekcji i przewo-

dzenia we wszystkich typach reaktorów zachodzi również przenoszenie ciepła przez promieniowanie [10].

Ciepło do reaktora pirolizy może zostać doprowadzone przez [15]:

- powierzchnie wymiany ciepła umieszczone w odpowiednich miejscach w reaktorze;
- ogrzewanie gazem fluidyzacyjnym w przypadku reaktorów ze złożem fluidalnym, tutaj nadmiar gorących gazów, może być potrzebny do dostarczenia odpowiedniej temperatury prowadząc do lokalnego przegrzania, a w konsekwencji do zmniejszenia wydajności cieczy lub potrzebne są bardzo wysokie przepływy gazu w wyniku niestabilnej hydrodynamiki reaktora, co także przyczynić może się do przegrzania. Częściowe ogrzewanie gazem jest zazwyczaj zadowalające i pożądane, aby zoptymalizować sprawność energetyczną reaktora.
- usunięcie i ponowne ogrzanie złoża (piasku) w oddzielnym reaktorze;
- dodanie pewnej ilości powietrza, które może spowodować tworzenie gorących miejsc i wzrost pęknięć prowadzących do powstania smół.

Możliwe sposoby ogrzewania reaktora do pirolizy ilustruje rysunek 7.



Rys. 7. Sposoby dostarczania ciepła do reaktora pirolizy [10]

### 9. Wpływ przepływającego gazu nośnego

Gaz płuczący ( nośny lub gaz usuwający) powoduje usunięcie substancji lotnych ze środowiska pirolizy. Płuczący przepływ gazu jest jednym z najważniejszych czynników, który wpływa na wydajność węgla. Zazwyczaj stosowane cząstki biomasy są większe niż 1 mm w rezultacie, może być znaczna odporność przenikania masy lotnych substancji organicznych z substratów. Niektóre z tych substancji lotnych

Literatura:  
 [1] [http://jfe-project.blogspot.com/2012\\_03\\_01\\_archive.html](http://jfe-project.blogspot.com/2012_03_01_archive.html) ( 15.05.2014).  
 [2] Nadziakiewicz J., Waclawiak K., Stelmach S.: Procesy termiczne utylizacji odpadów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.  
 [3] Lewandowski W. M., Ryms M., Meler P.: Termiczno-chemiczna piroliza do biopaliw ciekłych i gazowych, jako metoda podnoszenia sprawności konwersji energii biomasy. Nafta-Gaz, nr 8 2010, s. 675-680.  
 [4] M.W. van de Weerdhof: Modeling the pyrolysis process of biomass particles. Eindhoven University of Technology.  
 [5] [http://polymer-carbon.ch.pwr.wroc.pl/instrukcje/PLTRnW\\_piroliza.pdf](http://polymer-carbon.ch.pwr.wroc.pl/instrukcje/PLTRnW_piroliza.pdf) ( 15.03.2014).  
 [6] [http://polymer-carbon.ch.pwr.wroc.pl/instrukcje/SNE\\_techiczna.pdf](http://polymer-carbon.ch.pwr.wroc.pl/instrukcje/SNE_techiczna.pdf) ( 19.05.2014)  
 [7] Bridgwater A.V.: Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 51, 1999, s. 3-22.  
 [8] Sinha S. i inni: Modelling of Pyrolysis in Wood: A Review. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Hauz Khas, New Delhi, India.  
 [9] Zajec L.: Slow pyrolysis in a rotary kiln reactor: optimization and experiments. The School for Renewable Energy Science.  
 [10] Mohammad I. Jahurul i inni: Biofuels Production through Biomass Pyrolysis – A Technological Review. Energies 2012, 5, s. 4952-5001.  
 [11] Ringer M. i inni: Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis. National Renewable Energy Laboratory 2006.  
 [12] Ronsse F. i inni: Biomass pyrolysis and biochar characterization. Materiały konferencyjne Vienna 2013.  
 [13] Marshall A.J.: Commercial Application of Pyrolysis Technology in Agriculture 2013.  
 [14] <http://www.btg-btl.com/en/technology> ( 09.05.2014).  
 [15] Bridgwater A.V.: Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy 38, 2012, s.68-94.  
 [16] Qiang Yan i inni: Effects of Pyrolysis Conditions on Yield of Bio-Chars from Pine Chips. Forest Products Journal 61(5), 2011, s. 367-371.



mogą być ponownie adsorbowane i rekombinowane na powierzchni matrycy karbonizatu, powodując znaczące zmiany w jego strukturze. Zazwyczaj stosowanym gazem nośnym jest azot ale mogą to być również inne gazy dwutlenek węgla czy też wodór [16].

## 10. Podsumowanie

Wpływ parametrów prowadzenia procesu pirolizy dla jakości oraz ilości otrzymanych produktów jest znaczący. Przegląd literaturowy przeprowadzony w niniejszej pracy zwrócił uwagę na następujące wnioski:

- Z badań prowadzonych nad pirolizą celulozy, osadów ściekowych oraz opon wynika, że duży wpływ na wydajność oraz jakość produktów ma czas trwania pirolizy. Dłuższy czas pirolizy jest związany z występowaniem reakcji wtórnych i pogorszeniem się wydajności smoły oraz zmniejszeniem jej gęstości. Szybka piroliza sprzyja więc powstawaniu substancji ciekłych oraz gazowych, a wolna piroliza sprzyja powstawaniu karbonizatu. Czas pirolizy zależy głównie od wielkości cząstek, szybkości ogrzewania oraz temperatury końcowej.

- Temperatura procesu pirolizy wpływa na wartość opałową produktów. Podczas konwencjonalnej pirolizy opon zaobserwowano, że wraz ze wzrostem temperatury końcowej wzrasta wartość opałowa produktów.

- Badania nad wielkością cząstek podczas błyskawicznej pirolizy celulozy wykazują, że wraz ze wzrostem temperatury, mniejsze cząstki sprzyjają powstawaniu produktów gazowych, natomiast większe powstawaniu frakcji ciekłej. Podczas błyskawicznej pirolizy celulozy nie powstaje karbonizat, ponieważ czas reakcji jest zbyt krótki. Ważnymi substancjami uzyskanymi w procesie błyskawicznej pirolizy cząstek celulozy są oligosacharydy. Wydaje się, że podobny wpływ wielkości cząstek na produkty pirolizy ma zastosowanie również dla innych materiałów poddanych procesowi pirolizy.

- Sposób ogrzewania reaktora pirolizy wpływa na efektywność przenoszenia ciepła oraz na szybkość pirolizy więc także na ilość i jakość produktów. Innowacyjną metodą ogrzewania podczas procesu pirolizy może być ogrzewanie mikrofalowe. Może ono być stosowane

zarówno do pirolizy biomasy jak i tworzyw sztucznych. Ogrzewanie mikrofalowe nie tylko poprawia szybkość ogrzewania, ale wpływa na powstanie olefin o względnie wysokiej masie cząsteczkowej oraz wysokiego udziału wartościowych produktów, takich jak etylen, propylen, buten, węglowodory aromatyczne, itp. podczas pirolizy opon.

- Komercyjne instalacje do pirolizy biomasy nastawione są głównie na prowadzenie szybkiej pirolizy i uzyskanie dużych wydajności biooleju. Bioolej z szybkiej pirolizy jest gęsty i łatwo go magazynować oraz transportować. Dlatego powstało wiele konstrukcji reaktorów z różnymi sposobami ogrzewania, aby zmaksymalizować ilość biooleju oraz uzyskać jego jak najlepszą jakość.

- Produkty z procesu pirolizy są bardzo dobrą alternatywą do wykorzystania ich zamiast paliw kopalnych. Proces pirolizy odpadów niesie ze sobą wiele korzyści, które mogą wpłynąć na środowisko przyrodnicze m.in. zmniejszenie zużycia surowców kopalnych, oraz zmniejszenie objętości odpadów na składowiskach.

- Obserwacja parametrów pirolizy i ich wpływu na produkty z pirolizy dają konkretne informacje na temat możliwości wykorzystania uzyskanych produktów. Ogólnie rzecz biorąc zarówno z pirolizy celulozy, osadów ściekowych jak i zużytych opon uzyskane produkty można użyć do produkcji substancji chemicznych jak i paliw. Jednak w niektórych przypadkach np. z produktów ciekłych pirolizy opon należy dodatkowo usunąć związki siarki przed zastosowaniem ich jako paliwa.

