



## Rozkład temperatury w reaktorze plazmy mikrofalowej – pomiary i modelowanie

Mateusz Wnukowski<sup>1,\*</sup>

REKOMENDOWANE PRZEZ: *prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kordylewski*

<sup>1</sup> Zakład Kocioł, Spalania i Procesów Energetycznych

\* *mateusz.wnukowski@pwr.edu.pl, tel. 42 69*

---

### STRESZCZENIE

Niniejsza praca dotyczy modelowania mającego na celu wyznaczenie temperatur panujących w reaktorze plazmy mikrofalowej. W symulacjach tych wykorzystano dwie metody: metodę, w której plazmę symulowano gorącym gazem oraz metodę, w której wykorzystano wewnętrzne źródło ciepła. Obydwie metody wykazały znaczącą różnicę między wynikami pomiarowymi a symulacyjnymi. Mimo to wykazano, że metoda wykorzystująca wewnętrzne źródło ciepła wydaje się metodą dokładniejszą i skuteczniejszą, ze względu na to, że otrzymane za jej pomocą wyniki mają rozkład bliski rzeczywistości, a same wartości mogłyby charakteryzować się dużo mniejszymi błędami przy odpowiednio dobranych założeniach symulacji. Analiza termiczna reaktora plazmy mikrofalowej ma kluczowe znaczenie dla procesów dekompozycji smół, które można w nim przeprowadzać.

**SŁOWA KLUCZOWE:** *plazma mikrofalowa, temperatura gazu, modelowanie.*

---

### 1. WPROWADZENIE

Plazma, dzięki swoim właściwościom, znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu i nauki. Jednym z takich zastosowań jest rozkład i reforming związków chemicznych – dotyczy to między innymi oczyszczania gazów, w tym również rozkładu smół. Smoły są ciężkimi związkami węglowodorowymi – zazwyczaj aromatycznymi – które powstają między innymi w procesie zgazowania [1]. Dzięki wysokiej temperaturze i dużemu stężeniu aktywnych cząstek (rodników i jonów) towarzyszącym plazmie jest ona intensywnie badana jako potencjalna metoda usuwania i reformingu smół [2]. W celu właściwego opisu takiego procesu istotna jest znajomość podstawowych parametrów plazmy.

Jednym z podstawowych parametrów opisujących plazmę jest temperatura. Ze względu na istotę plazmy charakteryzowana jest ona przez kilka różnych temperatur –

ma to szczególnie sens w przypadku plazmy nietermicznej. W przypadku plazmy równowagowej, i w pewnym przybliżeniu również w przypadku plazmy quasi-równowagowej, wszystkie temperatury są sobie równe [3]. Literatura powołuje kilka różnych temperatur, takich jak temperatura elektronów, temperatura gazu, temperatura rotacyjna, ciężkich cząstek czy też temperatura wzbudzenia [4]. Ze względu na swoją istotną wagę i powszechne użycie przy opisie plazmy najczęściej używa się jednak dwóch rodzajów temperatur: temperatury elektronów i temperatury gazu.

Temperatura gazu jest związana z energią jak została przekazana ciężkim cząsteczkom (cząsteczkom o masie równej bądź większej od protonu), w wyniku oddziaływania z elektronami powstałymi podczas wyładowania niezbędnego do zainicjowania plazmy [5]. W związku z tym, temperaturę tę często nazywa się temperaturą ciężkich cząstek. Temperatura ta jest szczególnie istotna dla procesów dekompozycji [6], [7]. To ona odpowiedzialna jest za kinetykę chemiczną procesów zachodzących w plazmie [6]. Zdecydowana większość płomienia plazmy ma temperaturę gazu – dzięki temu, oddziałuje ona na cząsteczki znajdujące się w plazmie przez najdłuższy czas i przez to ma znaczący wpływ na dekompozycję substancji organicznej. Jest to też najniższa z temperatur charakterystycznych dla plazmy. Druga z temperatur charakteryzuje tylko temperaturę – czyli średnią energię kinetyczną – wolnych elektronów i jest to najwyższa temperatura występująca w plazmie. Oddziaływanie elektronów powoduje silną jonizację i wzbudzenie cząsteczek oraz tworzenie rodników, co w znaczący sposób ułatwia inicjację procesów zachodzących w plazmie, w tym również procesów rozkładu. Proces ten ma jednak dominujące znaczenie tam gdzie stężenie elektronów jest duże, a więc blisko miejsca inicjacji plazmy. Jedną z podstawowych metod wyznaczania temperatury plazmy jest optyczna spektroskopia emisyjna (OES). Jest ona stosowana głównie do wyznaczania temperatury gazu (temperatury rotacyjnej). Technika OES bazuje na analizie atomowego widma emisyjnego, czyli obrazu promieniowania elektromagnetycznego wysyłanego przez ciało – w tym przypadku ciałem tym są atomy. W praktyce najczęściej wykorzystuje się emisję pasma spektroskopowego takich dwuatomowych indywiduów jak: OH, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, CN, NH, NO, CH, C<sub>2</sub> i SiH [8-10]. Otrzymane widma umożliwiają określenie temperatury gazu z zastosowaniem różnych metod. Jedną z bardziej bezpośrednich metod jest zastosowanie rozszerzenia Dopplera lub van der Waals'a [8], [11].

W pomiarach plazmy zdarza się również stosować termopary. Występuje to jednak w znikomych przypadkach, gdzie zakres temperaturowy plazmy umożliwia zastosowanie termopar. Przykładowo w pracy [8] wykorzystano termopary do pomiaru plazmy o temperaturze nie przekraczającej 950 K i jednocześnie wykazano, że otrzymane w ten sposób wyniki są bardzo zbliżone do tych otrzymanych za pomocą metod spektroskopowych.

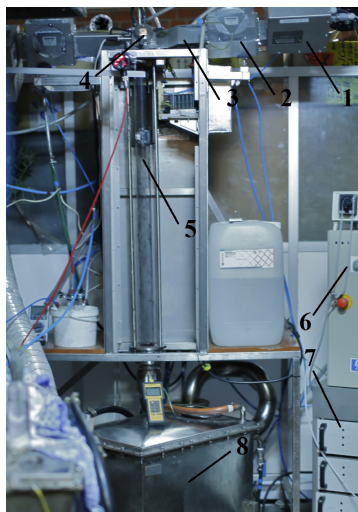
W pracach związanych z wykorzystaniem plazmy podejmuje się również próby jej modelowania. Modele te często różnią się swoją dokładnością i skomplikowaniem. Dość dużo prac związanych z modelowaniem poświęcono palnikom plazmowym prądu stałego [12]. Niektóre z modeli są uproszczone i nie oddają w pełni istoty plazmy, umożliwiają natomiast w pewnym przybliżeniu szybką i wstępną analizę bądź symulację zjawisk zachodzących w plazmie. Przykład takiego modelu został wykorzystany w pracy [13] gdzie za pomocą modelownia numerycznego badano stabilizację płomienia pyłowego za pomocą plazmy. Modele tego typu traktują z reguły plazmę jako zwykle źródło wysokiej temperatury, pomijając efekt jonizacji [13]. Znacznie mniej prac doty-

czy plazmy mikrofalowej. W jednej z nich, dotyczącej wzrostu węglowych nanorurek z wykorzystaniem plazmy mikrofalowej, stworzono dwuwymiarowy model reaktora w celu wyznaczenia panujących w nim temperatur i stężeń substratów [14].

W niniejszej pracy podjęto podobną próbę. Za pomocą programu ANSYS wykonano obliczenia numeryczne, w wyniku których otrzymano rozkład temperatury wzdłuż osi reaktora plazmy mikrofalowej. Dodatkowo w celu weryfikacji modelu dokonano pomiarów temperatury z wykorzystaniem termopar. Reaktor plazmy mikrofalowej służy badaniom nad rozkładem smół z wykorzystaniem technik plazmowych. Plazmę mikrofalową można traktować jako niskotemperaturową plazmę termiczną, w której występuje lokalna równowaga termodynamiczna [14],[15], a więc można założyć że wszystkie temperatury są sobie równe. Znajomość rozkładu temperatur panujących w reaktorze jest niezbędne w celu wyznaczenia kinetyki procesu rozkładu smół. Połączenie pomiarów z wykorzystaniem termopar oraz metod numerycznych miało na celu przybliżenie warunków termicznych panujących w reaktorze bez wykorzystywania skomplikowanych i drogich technik spektroskopowych. Co więcej, modelowanie numeryczne miało również na celu przybliżenie aerodynamiki gazów przepływających przez reaktor: ich prędkości oraz zawirowania strug. Ze względu na budowę reaktora oraz panujące w nim temperatury pomiar prędkości przepływu klasycznymi metodami pomiarowymi, jak rurka Prandtla czy Pitota, jest utrudniony, jeśli nie niemożliwy.

## 2. STANOWISKO POMIAROWE

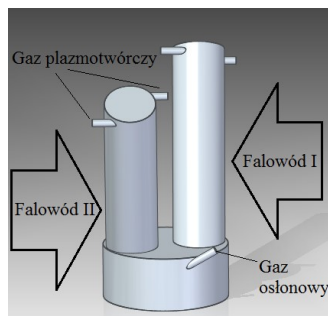
Pomiary dokonywane w ramach niniejszej pracy wykonywane były na reaktorze plazmy mikrofalowej. Rysunek 1 przedstawia zdjęcie stanowiska z wszystkimi ważniejszymi elementami. Na zdjęciu widać człony generujące mikrofałe – znajdują się



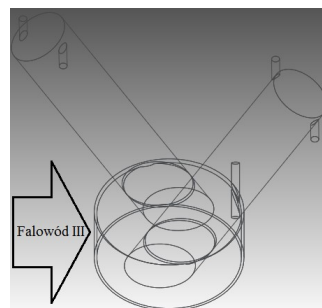
Rys. 1: Zdjęcie stanowiska z reaktorem

w górnej części reaktora po obu jego stronach. Człon taki składa się podstawowo z trzech elementów: magnetronu (1) o mocy 2 kW generującego mikrofałe o częstotliwości 2,45 GHz i wyposażonego w wentylator chłodzący; cyrkulatora (2) zasilanego wodą, którego zadaniem jest pochłanianie powracających fal, które mogłyby uszkodzić magnetron; falowodu (3) mającego za zadanie dostarczyć mikrofałe do gazu. Dodat-

kowo w tylnej części reaktora umieszczony jest trzeci reaktor „doładowujący” – reaktor ten nie generuje plazmy, ale dostarcza dodatkową energię do już zainicjowanej plazmy. W trakcie eksperymentu, w celu pomiaru mocy generatorów, gałęzie generujące mikrofałe wyposażone były dodatkowo w reflektometr umożliwiający pomiar mocy dostarczonej i odbitej. Pomiaru takiego dokonywano na jednej z gałęzi inicjujących plazmę, zakładając, że oba generatory plazmotwórcze mają taką samą moc, i na gałęzi wspomagającej plazmę. W górnej części reaktora widać głowicę wraz z miedzianą blaszką (4) zasłaniającą wejście grafitowych elektrod, które wprowadza się w celu skoncentrowania energii mikrofal i wzbudzenia plazmy – po zainicjowaniu plazmy elektrody są wysuwane z reaktora i nie biorą udziału w procesie. W środku reaktora znajduje się kwarcowa rura (5) o długości 1200 mm, średnicy zewnętrznej 60 mm i grubości ścianki 4 mm. Kwarcowa rura jest „sercem” reaktora, w którym wytworzona plazma oddziałuje na przepuszczany przez reaktor czynnik. Numerem (6) oznaczono szafę sterującą, za pomocą której załącza się generatory mikrofal i steruje ich mocą. Moc generatorów, której maksimum wynosi 2000 W, może być teoretycznie regulowana w zakresie 100, 66 i 33%. W praktyce odpalenie i utrzymanie plazmy wymaga ciągłej pracy dwóch generatorów plazmotwórczych w zakresie pełnej mocy. Generator doładowujący może pracować w dowolnym z wymienionych zakresów mocy. Szafa sterująca połączona jest ze źródłem zasilania (7). Każdy generator ma swój moduł zasilania. Ostatnim elementem widocznym na zdjęciu jest wodna chłodnica (8) mająca na celu schłodzenie gazu procesowego przed wyprowadzeniem go do wyciągu. Samą głowicę przedstawiono na rysunku 2 i 3. Głowica jest elementem reaktora, w którym generowana jest plazma.



Rys. 2: Szkic głowicy reaktora z uwzględnieniem dwóch falowodów



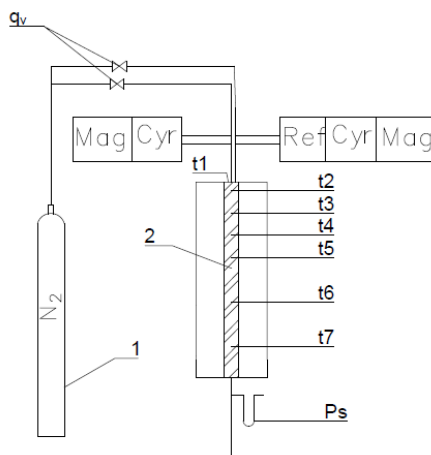
Rys. 3: Szkic głowicy reaktora z uwzględnieniem falowodu generatora wspomagającego

Składa się on z dwóch kwarcowych rurek, które wprowadzone są do głównej kwarcowej rury reaktora (rys. 3). Do każdej z rurek, w części znajdującej się nad rurą reaktora, doprowadzony jest falowód. Falowodem doprowadzane są mikrofałe. W górnej części rurek znajdują się dwa tangencjalne wloty, przez które doprowadzany jest gaz plazmotwórczy – w prowadzonych badaniach jako gazu plazmotwórczego użyto azotu. Kwarcowe rurki przepuszczają promieniowanie mikrofalowe, które następnie pochłanianie jest przez przepływający gaz. Na obu rysunkach widoczny jest również wlot gazu osłonowego. Gaz ten jest wprowadzany do reaktora tuż przy ścianie i pod kątem  $30^\circ$ . Zapewnia to wirowy ruch gazu po ścianie kwarcowej rury reaktora. Gaz ten ma zadanie osłonek ścianek reaktora przed zbyt dużym przegrzaniem w wyniku działania plazmy. Brak gazu osłonowego może skutkować uszkodzeniem kwarcowego reaktora. Na rysunku 3

widać strzałkę reprezentującą trzeci falowód. Falowodem tym mikrofałe doprowadzone są bezpośrednio do kwarcowej rury reaktora tuż pod wylotem z mniejszych kwarcowych rurek – mają one za zadanie wzmocnić plazmę. W praktyce zastosowanie trzeciego generatora powoduje wydłużenie płomienia plazmy oraz zwiększenie jej temperatury.

### 3. METODYKA POMIARÓW

Na rysunku 4 przedstawiono schemat stanowiska do pomiaru temperatur. W trak-



Rys. 4: Schemat stanowiska do pomiaru temperatury.

cie pomiarów reaktor zasilany był azotem o czystości technicznej z butli 200 bar (1). Gaz rozdzielany był na dwa strumienie: gaz plazmotwórczy i gaz osłonowy. Strumienie objętościowe azotu regulowane były za pomocą zaworów regulacyjnych oraz mierzone rotametrami. Na rysunku przedstawiono również schematycznie człon plazmotwórczy składający się z magnetronu (Mag), reflektometru (Ref) i cyrkulatora (Cyr). Rozkładu temperatur w rurze kwarcowej reaktora (2) dokonano z użyciem termopar. Użyto siedmiu punktów pomiarowych znajdujących się w następujących odległościach od szczytu rury kwarcowej: 0,5; 7,5; 20; 32,5; 45; 70 i 95 cm. Pomiaru temperatur dokonywano w osi reaktora – w odległości 3 cm od zewnętrznej ścianki rury kwarcowej. W przypadku gdy temperatura nie przekraczała 1000 °C używano termopary typu K ze względu na mniejszą bezwładność. W przypadku wyższych temperatur korzystano z termopar typu S. Odczytu temperatur dokonano za pomocą wielokanałowego rejestratora temperatury firmy APAR. Zastosowane termopary zostały sprawdzone pod kątem poprawności wskazań za pomocą piecyka kalibracyjnego w zakresie temperatury od 50 do 550 °C. Wyższy zakres temperatury nie był możliwy ze względu na ograniczenia fabryczne urządzenia. Pomiar temperatur w reaktorze odbywał się oddzielnie dla każdego punktu pomiarowego. Pomiar taki podyktowany był tym, że wprowadzone termopary wpływały na przepływ w reaktorze i zmieniały rozkład temperatur w nim występujący – innymi słowy, wprowadzenie termopary wpływało na pomiar dokonywany termoparą znajdującą się poniżej. Pomiarów we wszystkich punktach dokonano trzykrotnie. Dodatkowo dokonano również chwilowego pomiaru temperatury w punkcie t1 przy wyłączonym gazie osłonowym. Pomiarów dokonywano przy generatorze wspomagającym ustawionym na 33% pełnego zakresu mocy. Moc użyteczna (uwzględniająca odbicie

fal) generatorów podstawowych wynosiła około 1050 W (wartości te wahały się nieznacznie w trakcie trwania procesów ale nie przekraczały 100 W) i określona została za pomocą reflektometru. Moc generatora wspomagającego wynosiła 330 W. Pomiary zostały wykonane przy przepływie gazu osłonowego wynoszącym 35 l/min i takim samym strumieniu gazu plazmotwórczego. W trakcie badań dokonano również pomiaru ciśnienia statycznego panującego na wylocie reaktora za pomocą U-rurki. Pomiary wykazały, że ciśnienie to było równe (w granicach błędu odczytu) ciśnieniu atmosferycznemu.

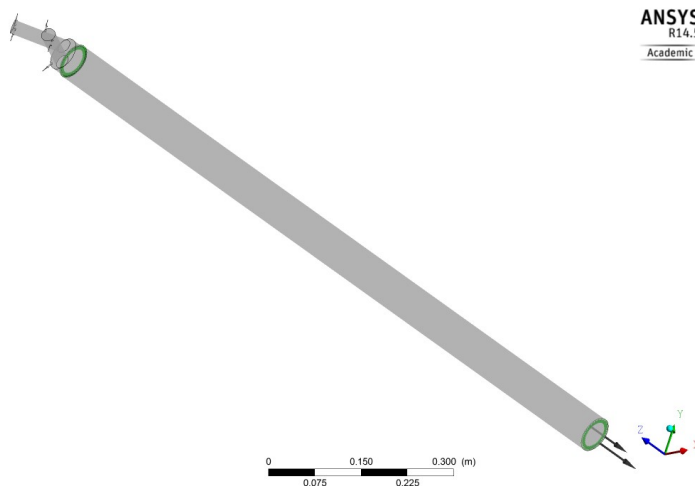
#### 4. MODELOWANIE

Próby modelowania plazmy mikrofalowej podjęto z użyciem programu ANSYS Fluent. W celu umożliwienia symulacji w modelu nie uwzględniano efektu jonizacji. Założenie takie zostało wprowadzone w innych pracach związanych z modelowaniem plazmy [13]. W prezentowanej pracy modelowanie zostało przeprowadzone dwoma metodami:

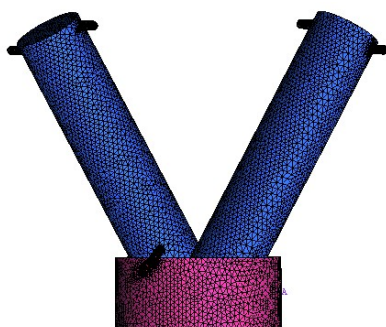
- „gorącego gazu”, w której plazmę symulował gorący gaz,
- „źródła ciepła”, w której wprowadzono objętościowe źródło ciepła o mocy odpowiadającej mocy mikrofal.

Pierwsza metoda była wykorzystywana już w innych pracach [13]. Jej podstawowym mankamentem jest fakt, że przed symulacją trzeba w przybliżeniu znać temperaturę gazu, a więc metoda ta nadaje się głównie do rozpatrywania strat ciepła, przepływów i procesów zachodzących w strumieniu plazmy. Druga metoda, zastosowana w pracy [14] ma tę zaletę, że przy znanej mocy można w modelu wprowadzić zimny gaz i oczekiwać, że model pozwoli wyznaczyć temperaturę, jaką osiąga gaz. Przed przystąpieniem do modelowania należało oszacować współczynnik przenikania ciepła. Dokonano tego na dwa sposoby. Pierwszy sposób uwzględniał klasyczne obliczenia związane z konwekcją wymuszoną, zakładając przepływ laminarny i termicznie rozwijający się. W drugim przypadku współczynnik został wyznaczony na podstawie bilansu energetycznego uwzględniającego strumień gazu, jego temperaturę na wlocie i wylocie rury oraz powierzchnię rury. Szczegółowe obliczenia przedstawiono w Załączniku 1. Wyznaczony obiema metodami współczynnik wynosił odpowiednio  $6,08 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  oraz  $4,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Na potrzeby symulacji przyjęto współczynnik na poziomie  $5,00 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

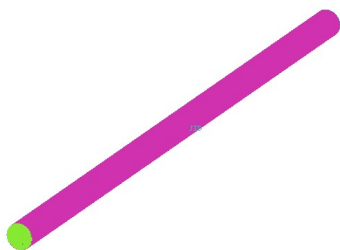
Symulacje wykonane w środowisku ANSYS dokonano na obiekcie odwzorowującym reaktor plazmy mikrofalowej i przedstawionym na rysunku 5. Obliczenia numeryczne wykorzystujące metody objętości skończonych wymagały stworzenia odpowiednich siatek. W tym celu prezentowany obiekt (rys. 5) rozbito na trzy części i do każdej z nich stworzono osobną siatkę. Częściami tymi są: głowica, wewnętrzna część rury kwarcowej oraz rura kwarcowa. Głowica reaktora została utworzona w domenie płynu (nie uwzględniano w niej ścianek). W głowicy znajdowało się pięć wlotów: cztery wloty gazu plazmotwórczego (po dwa na jedną kwarcową rurkę) oraz wlot gazu osłonowego. Wloty te widoczne są na rysunku 5. We wlotach tych zdefiniowane były parametry początkowe gazu, to jest: strumieni przepływu masowego oraz temperatura gazu. Podczas tworzenia siatki głowicy wykorzystano siatkę niestrukturalną tetragonalną. Siatkę tę, wraz z liczbą tworzących ją elementów i węzłów, przedstawiono na rys. 6. Kolejnym elementem wykorzystującym domenę płynu była wewnętrzna część rury. W tym elemencie zdefiniowany był wylot, który określono za pomocą względnego ciśnienia statycznego – wynosiło ono 0 Pa i zgadzało się z wynikami pomiarowymi. W tym elemencie wykorzystano siatkę strukturalną przedstawioną na rysunku 7. W oby-



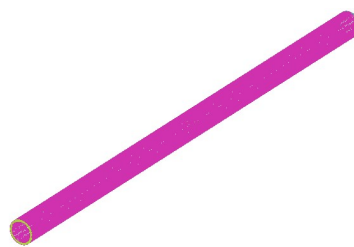
Rys. 5: Model reaktora wykorzystany w symulacjach



Rys. 6: Siatka głowicy składała się z 319 413 elementów i 76 475 węzłów



Rys. 7: Siatka strukturalna wewnętrznej przestrzeni rury kwarcowej składająca się 342 693 elementów i 331 600 węzłów



Rys. 8: Strukturalna siatka rury kwarcowej reaktora składająca się z 58 176 elementów i 48 000 węzłów

dwu elementach wykorzystujących domenę płynu jako płyn zastosowano azot będący gazem rzeczywistym. W ostatnim elemencie, rurze kwarcowej, również wykorzystano siatkę strukturalną – przedstawia ją rysunek 8. W elemencie tym wykorzystano domenę

ciała stałego, co wiązało się z określeniem właściwości fizycznych kwarcu.

W obliczeniach numerycznych dokonanych programem ANSYS zastosowano 2500 kroków iteracyjnych – po około 2000 kroków zbieżność kolejnych iteracji była na stałym poziomie. W modelu założono przepływ turbulentny z wykorzystaniem metody k-Epsilon. Należy zaznaczyć, że w modelach nie uwzględniono promieniowania gazu. Co prawda gazy dwuatomowe nie promieniują, to jednak ich zjonizowane formy już tak. Proces ten jest jednak skomplikowany w opisie i wymaga znajomości stopnia zjonizowania gazu. Zaniedbania jonizacji gazu i związanego z nią promieniowania może znacząco rzutować na otrzymane wyniki. W obliczeniach nie uwzględniono również promieniowania rury kwarcowej, które jednak nie powinno mieć dużego wpływu (wykazały to również wstępne symulacje) i często jest zaniedbywane [14].

## 5. WYNIKI

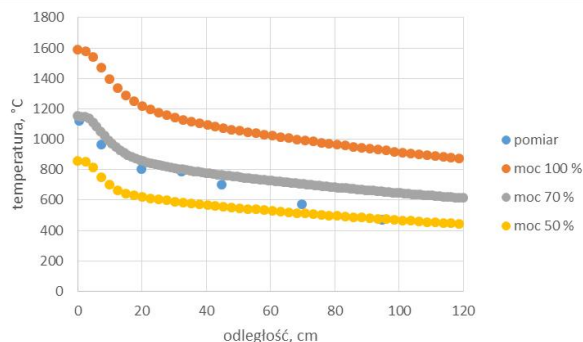
W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów temperatury. Pomiarów dokonywane były przy mocy 2430 W (dwa generatory podstawowe po 1050 W i generator wspomagający o mocy 330 W). Pomiarów dokonano trzykrotnie. W tabeli 1 umieszczono wyniki średnie wraz z maksymalnym błędem względnym wynikającym z niepowtarzalności pomiarów. Błąd ten wynikał z niedokładności wprowadzenia termopary w osł rury, która wynikała z konstrukcji obudowy reaktora, a duże gradienty temperatur w plazmie powodowały, że nawet niewielkie wychylenie termopary mogło zmienić wynik pomiaru o kilkanaście stopni. Warto zaznaczyć, że pomiary są obarczone również błędem samych termopar (który jest jednak bardzo mały i zgodnie z danymi producenta wynosi około jednego stopnia) oraz błędem wynikającym z oddawania ciepła przez termopary w formie promieniowania – błędów tych jednak nie uwzględniono w wynikach, zakładając największy wpływ błędów wynikających z niedokładności pomiaru.

Tab. 1: Wyniki pomiaru temperatury wzdłuż osi reaktora

Odległość, cm	Temperatura, °C	Błąd, %
0,5	1118	2,0
7,5	962	1,4
20,0	803	1,3
32,5	783	2,1
45,0	701	0,4
70,0	571	1,1
95,0	466	0,8

Symulacje wykonane z użyciem metody ze „źródłem ciepła” zakładały, że głowica reaktora jest objętościowym źródłem ciepła o mocy  $14 \text{ MW/m}^3$  – wielkość ta wynika z mocy generatorów i objętości głowicy. Pierwsze wyniki symulacji wykazały znacząco zawyżoną temperaturę w reaktorze. Wynikało to z założenia o braku jonizacji – w symulacji cała energia szła na podgrzanie gazu, w rzeczywistości duża część energii zużywana jest na dysocjację/jonizację cząsteczek. Literatura podaje, że ilość energii przypadająca na dysocjację cząstek w plazmie może wynosić od 15 do 57% [13]. Dlatego też, w kolejnych symulacjach założono, że moc będzie mniejsza o 50 i o 30%, co w rezultacie daje moc na poziomie odpowiednio 7 i  $9,8 \text{ MW/m}^3$ . W rzeczywistości jest bardzo prawdopodobne, że część mikrofal jest również rozpraszana, np. w falowodzie – świadczyć może o tym jego silne podgrzanie w trakcie procesu. Otrzymane wyniki prezentuje rysunek 9. Na wykresie tym widać, że funkcja opisująca rozkład tem-

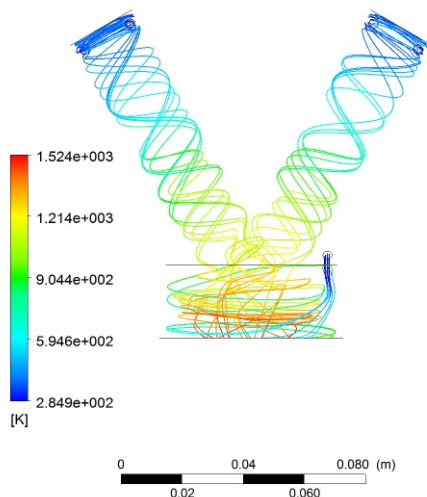




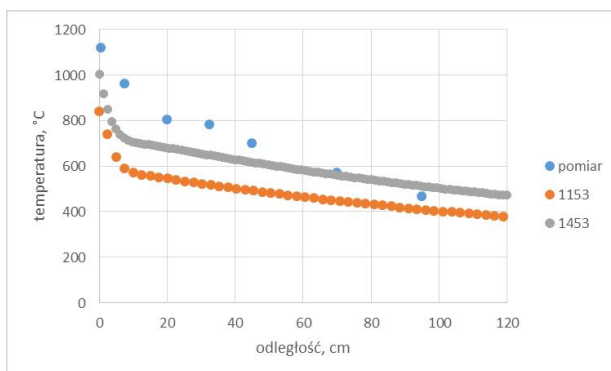
Rys. 9: Porównanie wyników pomiarowych z wynikami otrzymanymi w symulacji z wykorzystaniem źródła ciepła

peratury wzdłuż osi reaktora ma zbliżony przebieg do rzeczywistego rozkładu. Widać również, że przy założeniu 100% mocy temperatura jest wyższa od rzeczywistej o nawet 400 °C. Z drugiej strony, w przypadku założenia mocy na poziomie 50% temperatura w górnych częściach reaktora jest niższa od rzeczywistej o nawet ponad 200 °C. Wynik najbardziej zbliżony do rzeczywistych otrzymano przy mocy na poziomie 70% – w górnych partiach reaktora temperatury prawie się pokrywają. W dalszych odległościach od szczytu rury, we wszystkich trzech przypadkach, widać, że przebieg funkcji zaczyna się wyraźnie różnić. Spadek temperatury wzdłuż osi jest dużo łagodniejszy w przypadku symulacji niż w przypadku rzeczywistym. Wpływ na to może mieć parę czynników. Po pierwsze, należy mieć na uwadze, że są to znacznie uproszczone symulacje, w których poczyniono założenia mogące wypaczyć wynik. Po drugie, w rurze kwarcowej znajdują się otwory o średnicy 6 mm wywiercone na potrzeby pomiarowe, których nie uwzględniono w symulacji, a które mogą mieć wpływ na transport ciepła. Po trzecie, wyniki symulacji dotyczą warunków ustalonych, natomiast pomiary rzeczywiste były prowadzone co najwyżej kilka minut ze względu na możliwość uszkodzenia elementów reaktora przy jego ciągłej, dłuższej pracy. Oznaczać to może, że poszczególne elementy reaktora mogły nie zdążyć wygrzać się do swojej maksymalnej temperatury. Korzystając z wyników otrzymanych za pomocą symulacji uwzględniającej, że 70% mocy mikrofal zużywanych jest na podgrzanie gazu, a reszta na dysocjację cząsteczek, wyznaczono, że maksymalna temperatura gazu przepływającego przez głowicę wynosi 1251 °C (1524 K) co przedstawiono na Rysunku 10. Temperatura ta jest o tyle wiarygodna, że zgodnie z informacjami podawanymi przez producenta rur kwarcowych [16] chwilowa temperatura ich pracy wynosi 1250 °C. Nie znaczy to jednak, że temperatura w głowicy nie może być wyższa (co ewentualnie może skutkować stopniową degradacją kwarcu), a tym bardziej niższa niż 1250 °C.

Z użyciem metody „gorącego gazu” przeprowadzono dwie symulacje. W pierwszej założono, że gaz plazmotwórczy na wlocie do głowicy ma temperaturę 1153 °C, czyli taką jaką zmierzono przy wyłączonym gazie osłonowym. W drugiej rozpatrzono sytuację, w którym temperatura była o 300 °C wyższa i wynosiła 1453 °C. Otrzymany rozkład temperatur wzdłuż osi reaktora zestawiono z wynikami pomiarowymi na rysunku 11. Wyniki pokazują, że temperatury otrzymane w symulacji są za niskie w górnej części rury. Co więcej, widać, że rozkłady nie mają zbliżonego kształtu. W przypadku symulacji w górnej części reaktora następuje ostrzejszy spadek temperatury



Rys. 10: Temperatura strumienia gazu otrzymana w modelu ze źródłem ciepła

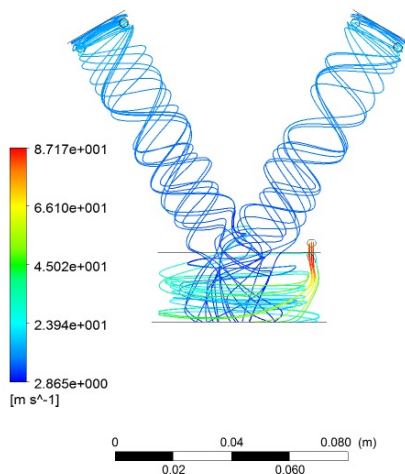


Rys. 11: Porównanie wyników pomiarowych z wynikami otrzymanymi w symulacji z wykorzystaniem gorącego gazu

niż w rzeczywistości. Wynika to z faktu, że w symulacji wprowadzany był zimny gaz osłonowy (288 K), który szybko chłodził gaz plazmotwórczy. W rzeczywistości gaz osłonowy był podgrzewany przez mikrofałę generatora doładującego. Odwrotną sytuację, to znaczy łagodniejszy spadek temperatury w symulacji niż w rzeczywistości, można zaobserwować w dalszej części reaktora — sytuacja ta występowała również przy wykorzystaniu metody ze źródłem ciepła i została opisana we wcześniejszym akapicie.

Konstrukcja głowicy reaktora sugeruje występowanie silnych zawirowań w przepływie. Efekt ten został wyraźnie uwidoczniony na przykładzie przedstawionym na rysunku 12. Przykład ten dotyczy symulacji, w której zastosowano źródło ciepła o mocy na poziomie 70%. Widać na nim wyraźne zawirowania, które widoczne były również na wcześniejszych rysunkach (rys. 10), wynikające z tangencjalnego ułożenia wlotów gazu plazmotwórczego oraz stycznego do obwodu rury usytuowania wlotu gazu osłonowego.

Rysunek przedstawia również rozkład prędkości strumieni, które, wynosząc nawet kilkadziesiąt m/s, uzasadniają wybór modelu przepływu turbulentnego, który zastosowano w obliczeniach numerycznych.



Rys. 12: Prędkość strumieni gazu otrzymana w modelu ze źródłem ciepła

## 6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki prób numerycznych symulacji cieplno-przepływowych reaktora plazmy mikrofalowej. Próby te zakończyły się częściowym sukcesem.

Wykonane symulacje pozwoliły zwizualizować strukturę strug gazu przepływających przez reaktor – określono kształt zawirowań i oszacowano prędkości przepływającego gazu. Występujące w reaktorze silne zawirowania mogą mieć znaczący wpływ na rozkład smół. Występujący ruch wirowy, szczególnie silny w dolnej części głowicy, skutkuje wydłużeniem czasu przebywania cząstek w strefie wysokiej temperatury i oddziaływania plazmy, a tym samym może wydłużyć czas reakcji i zwiększyć stopień konwersji smół.

W symulacjach wykorzystano dwa modele. Model z wykorzystaniem gorącego gazu wykazał dużą rozbieżność wyników symulacyjnych z rzeczywistymi. Jego zastosowanie wymagałoby dokładnej znajomości temperatury gazów przepływających przez głowicę — umożliwiłoby to symulację zjawisk zachodzących w reaktorze, np. rozkładu smół — natomiast przydatność tego typu modelu w przybliżeniu temperatury panującej w reaktorze jest bardzo ograniczona.

Znacznie bardziej obiecujący wydaje się model wykorzystujący wewnętrzne źródło ciepła. Symulacje z jego wykorzystaniem skutkowały otrzymaniem wyników, które były zbliżone do wyników pomiarowych – szczególnie w górnej części reaktora. Wymagało to jednak poczynienia pewnych założeń – na potrzeby symulacji obniżono moc dostarczoną do gazów zakładając, że część energii mikrofal zużywana jest na proces jonizacji gazu. Teoretycznie, takie rozwiązanie mogłoby być przydatne w szacowaniu stopnia jonizacji gazu. W praktyce jednak, takie szacunki powinny być poparte dokładniejszymi pomiarami uwzględniającymi bilans energii mikrofal, w tym przede wszystkim ich rozpraszania i pochłaniania na drodze falowód-głowica. Należy rów-

nież zaznaczyć, że w przeprowadzonych symulacjach zakładano równomierny rozkład mocy cieplnej w głowicy, podczas gdy w rzeczywistości większa część mocy przypada na rurki kwarcowe zasilane z generatorów podstawowych niż na dolną część głowicy zasilaną generatorem „doładującym”. Stworzenie bardziej rozbudowanej siatki modelu powinno jednak rozwiązać ten problem. Zastosowanie modelu wewnętrznego źródła ciepła umożliwiło również oszacowanie maksymalnej temperatury gazu przepływającego przez reaktor. Dane te są szczególnie istotne w przypadku prób wyznaczenia kinetyki rozkładu smół, szczególnie że wyznaczenie tej temperatury nie jest możliwe przy wykorzystaniu standardowych technik pomiarowych i wymaga zastosowania metod spektroskopowych. Należy jednak mieć na uwadze, że otrzymana w ten sposób temperatura jest mało wiarygodna i w istocie wymagałaby potwierdzenia, np. właśnie przez wykorzystanie technik OES.

Podsumowując, wykorzystanie wewnętrznego źródła ciepła w obliczeniach numerycznych, związanych z modelowaniem plazmy wydaje się obiecującym rozwiązaniem. Powinno ono jednak zawierać bardziej skomplikowane modele, uwzględniające bardziej rozbudowane siatki czy też wpływ promieniowania. Co więcej, ocenienie dokładności tego typu symulacji, a tym samym ich przydatności, wymaga weryfikacji wyników przez rzeczywiste pomiary umożliwiające wyznaczenie takich parametrów, jak temperatura plazmy czy też stopień jej jonizacji. Otrzymane w ten sposób wyniki, np. przez zastosowanie OES, umożliwiłyby ocenę dokładności modelu i jego ewentualną korekcję.

## LITERATURA

- [1] Prabir B., *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design*, Oxford: Elsevier, 2010.
- [2] Pikoń K., Czekalska Z., Stelmach S., Ścierański W., *Zastosowanie metod plazmowych do oczyszczania gazu procesowego ze zgazowania biomasy*, *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 12, s.61–72, 2010.
- [3] Stryczewska H.D., *Technologie plazmowe w energetyce i inżynierii środowiska*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009.
- [4] Meichsner J., *Nonthermal Plasma Chemistry and Physics*, 2012, CRC Press.
- [5] Calzada M.D., Saez M., Garcia M.C., *Characterization and study of the thermodynamic equilibrium departure of an argon plasma flame produced by a surface-wave sustained discharge*, *Journal of Applied Physics*, 88 (1), s.34–39, 2000.
- [6] Yurebo C., Garcia M.C., Varo M., Martinez P., *Gas temperature determination in microwave discharges at atmospheric pressure by using different Optical Emission Spectroscopy techniques*, *Spectrochimica Acta Part B*, 90, s.61–67, 2013.
- [7] Rincon R., Marinas A., Munoz J., Calzada M.D., *Hydrogen production from ethanol decomposition by microwave plasma TIAGO torch*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, s.11441–11453, 2014.
- [8] Moon S.Y., Choe W., *A comparative study of rotational temperatures using diatomic OH, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub><sup>+</sup> molecular spectra emitted from atmospheric plasmas*, *Spectrochimica Acta Part B*, 58, s.249–257, 2003.
- [9] Jasiński M., Czyłkowski D., Hrycak B., Dors M., Mizeraczyk J., *Atmospheric pressure microwave plasma source for hydrogen production*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, s.11473–11483, 2013.

- [10] Su L., Kumar R., Ogungbesan B., Sassi M., *Experimental investigation of gas heating and dissociation in a microwave plasma torch at atmospheric pressure*, Energy Conversion and Management, 78, s.695–703, 2014.
- [11] Yubero C., Dimitrijević M.S., García M.C., Calzada M.D., *Using the van der Waals broadening of the spectral atomic lines to measure the gas temperature of an argon microwave plasma at atmospheric pressure*, Spectrochimica Acta Part B, 62, s.169–176, 2007.
- [12] Ibrahimoglu B., Cucen A., Zeki M., *Numerical Modelling of DC Arc Plasma Torch with MHD Module*, International Plasma Technologies Congress, April 2014.
- [13] Golec T., *Modelowanie numeryczne plazmowej stabilizacji płomienia pyłowego*, Sprawozdanie szczegółowe z realizacji projektu badawczego Nr 4T10B01725, Warszawa, 2005.
- [14] Hinkov I., Farhat S., Lungu C.P., Gicquel A., Silva F., Mesbahi A., Brinza O., Porosnicu C., Anghel A., *Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes*, Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology, 4, s.169–209, 2014.
- [15] Kobel P., Mączka T., *Zastosowanie plazmy niskotemperaturowej w technice spalania*, Archiwum Spalania, 9 (3/4), s.161–180, 2009.
- [16] <http://www.conductance.pl/oferta-szklo-kwarcowe.html/rury-kwarcowe.html>, z dnia 17.04.2015.
- [17] Cengel Y., Heat and Mass Transfer: A Practical Approach. University of Nevada-Reno: McGraw-Hill, 2006.

## ZAŁĄCZNIK 1

Przed przystąpieniem do modelowania należało oszacować współczynnik przenikania ciepła. Dokonano tego na dwa sposoby. Pierwszy sposób uwzględniał klasyczne obliczenia związane z konwekcją wymuszoną. Na podstawie danych, które przedstawiono w tabeli Z1 założono przepływ laminarny i termicznie rozwijający się. Należy zaznaczyć, że o ile w samej głowicy przepływ może być turbulentny, to w główne rurze o średnicy wewnętrznej 52 mm, w której to właśnie modelowany będzie rozkład temperatury, przepływ ten odpowiada przepływowi laminarnemu. Właściwości azotu wyznaczono za pomocą strony [http://www.peacesoftware.de/einigewerte/stickstoff\\_e.html](http://www.peacesoftware.de/einigewerte/stickstoff_e.html) dla średniej temperatury panującej w reaktorze przy żądanych przepływach. Założenie średniej arytmetycznej temperatury uzasadnione było tym, że rozkład temperatury w reaktorze jest bliski liniowemu (rys. 11, tabl. 1). W celu wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła skorzystano ze wzoru [17]:

$$Nu = \frac{hD}{k} = 3,66 + \frac{0,065\left(\frac{D}{L}\right)RePr}{1 + 0,04\left[\left(\frac{D}{L}\right)RePr\right]}, \quad (1)$$

gdzie:  $h$  - współczynnik przenikania ciepła,  $k$  - współczynnik przewodzenia ciepła,  $D$  - średnica wewnętrzna rury (52 mm),  $L$  - długość rury (1200 mm),  $Re$  - liczba Reynoldsa,  $Pr$  - liczba Prandtla.

Liczbę Reynoldsa wyznaczono ze wzoru [17]:

$$Re = \frac{v_m \cdot D}{\nu}, \quad (2)$$

gdzie:  $v_m$  - prędkość średnia w przekroju wyznaczona na podstawie przepływu masowego,  $\nu$  - lepkość kinematyczna.

Długość rozwoju przepływu termicznego wyznaczono za pomocą wzoru [17]:

$$L_t \approx 0,005 Re Pr D. \quad (3)$$

Tab. Z1: Dane związane z wyznaczaniem współczynnika przenikania ciepła.

Przepływ, l/min	70	60	50	40	30
Średnia temperatura, °C	717	706	677,5	677	643,5
Gęstość, kg/m <sup>3</sup>	0,3406	0,3442	0,3550	0,3552	0,3685
Współczynnik przewodzenia ciepła, W/(K·m)	0,0653	0,0648	0,0633	0,0632	0,0614
Lepkość kinemtyczna ( $\nu$ , m <sup>2</sup> /s)	122·10 <sup>-6</sup>	119·10 <sup>-6</sup>	114·10 <sup>-6</sup>	114·10 <sup>-6</sup>	107·10 <sup>-6</sup>
Liczba Prandtla	0,7368	0,7365	0,7355	0,7355	0,7343
Liczba Reynoldsa	794	686	582	537	412
Długość rozwoju przepływu termicznego, m	1,52	1,31	1,11	1,03	0,79
Liczba Nusselta	4,845	4,709	4,571	4,511	4,335
Współczynnik przenikania ciepła, W/(m <sup>2</sup> ·°C)	6,08	5,87	5,56	5,48	5,12

Analiza podanych wyników pokazuje, że przepływ osiągał rozwój termiczny najwcześniej po 79 cm przy strumieniu 30 l/min. W związku z tym, że jest to zdecydowanie ponad połowa długości reaktora, w obliczeniach wzięto współczynniki wyznaczone dla przepływu niewykształconego termicznie. W drugim przypadku współczynnik przenikania ciepła wyznaczono na podstawie zmierzonych temperatur. W metodzie tej wyznaczono energię gazu wpływającego i wypływającego ze wzoru:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot T, \quad (4)$$

gdzie:  $\dot{m}$  – strumień masowy gazu,  $C_p$  – pojemność ciepła gazu przy stałym ciśnieniu. Następnie wyznaczono współczynnik ze wzoru:

$$h = \frac{Q_i - Q_e}{S \cdot \Delta T}, \quad (5)$$

gdzie:  $Q_i$  – ciepło gazu na wejściu,  $Q_e$  – ciepło gazu na wyjściu,  $S$  – powierzchnia wymiany ciepła,  $\Delta T$  – różnica między średnią temperaturą w reaktorze a temperaturą na zewnątrz reaktora.

Wyznaczone w ten sposób straty ciepła i współczynniki przenikania ciepła przedstawiono w tabeli Z2.

Tab. Z2: Współczynnik ciepła i straty ciepła wyznaczone eksperymentalnie

Przepływ, l/min	70	60	50	40	30
Ciepło strat, W	582	589	680	652	649
$h$ , W/(m <sup>2</sup> ·°C)	4,25	4,08	4,70	4,32	4,24

Jak widać na podstawie danych zebranych w tabelach Z1 i Z2 współczynniki otrzymane obydwoma metodami są zbliżone. Na potrzeby modelowania przyjęto, że współczynnik ten wynosi 5 W/[m<sup>2</sup>·°C]. Co więcej, modele wykonano tylko dla przypadku, w którym przepływ wyniósł 70 l/min.