

# **Politechnika Warszawska**

## **Metody Komputerowe w Spalaniu** Analiza laminarnej prędkości spalania wodoru w zależności od współczynnika ekwiwalencji

**Adrian Kowalczyk**

Prowadzący: dr mgr. Mateusz Żbikowski

Data oddania: **03.06.2025 r.**

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wprowadzenie</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Metodyka obliczeń</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Analiza wyników</b>	<b>3</b>
3.1	Laminarna prędkość spalania . . . . .	3
3.1.1	Freeflame . . . . .	3
3.1.2	Burnerflame . . . . .	5
3.1.3	Wyniki eksperymentalne . . . . .	6
3.2	Profil stężenia wodoru . . . . .	7
3.3	Wydzielanie ciepła . . . . .	8
3.4	Zmienność lepkości dynamicznej . . . . .	10
3.5	Profil temperatury . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Porównanie metod symulacji w Cantera</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Wnioski</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>13</b>

# 1 Wprowadzenie

Spalanie wodoru jest istotnym procesem w badaniach nad ekologicznymi źródłami energii. Laminarną prędkość spalania ( $SL$ ) można wyznaczyć w różnych warunkach, uwzględniając m.in. współczynnik ekwiwalencji ( $\phi$ ). W niniejszym raporcie przeprowadzono analizę wpływu  $\phi$  na prędkość spalania oraz dokonano porównania dwóch metod symulacji procesów spalania w **Cantera**: **BurnerFlame** oraz **FreeFlame**.

## 2 Metodyka obliczeń

Symulacje zostały przeprowadzone przy użyciu modelu **FreeFlame** w **Cantera**, dla mieszanki wodoru z powietrzem w temperaturze 300K i ciśnieniu atmosferycznym. Przyjęte wartości  $\phi$  obejmowały zakres od 0.4 do 4.0. Symulacje przy użyciu modelu **Burnerflame** zostały przeprowadzone dla tych samych warunków brzegowych, a prędkość przepływu ustalono na 0.5 m/s. Przeprowadzone będzie porównanie obu metod i wyciągnięcie wniosków, która metoda do jakich przypadków jest lepsza. Laminarną prędkość spalania obliczono poprzez analizę profilu prędkości płomienia.

## 3 Analiza wyników

### 3.1 Laminarna prędkość spalania

#### 3.1.1 Freeflame

$\phi$	Długość płomienia [m]	Laminarną prędkość spalania [m/s]
0.4	0.0800	0.1145
0.6	0.0800	0.8515
0.8	0.0800	1.9207
1.0	0.0800	2.4171
1.2	0.0800	2.9934
1.4	0.0800	3.2512
1.6	0.0800	3.2599
2.0	0.0900	3.0836
3.0	0.0900	2.2577
4.0	0.0800	1.7451

Table 1: Porównanie długości płomienia i prędkości spalania dla różnych wartości  $\phi$  (metoda spalania Freeflame) .

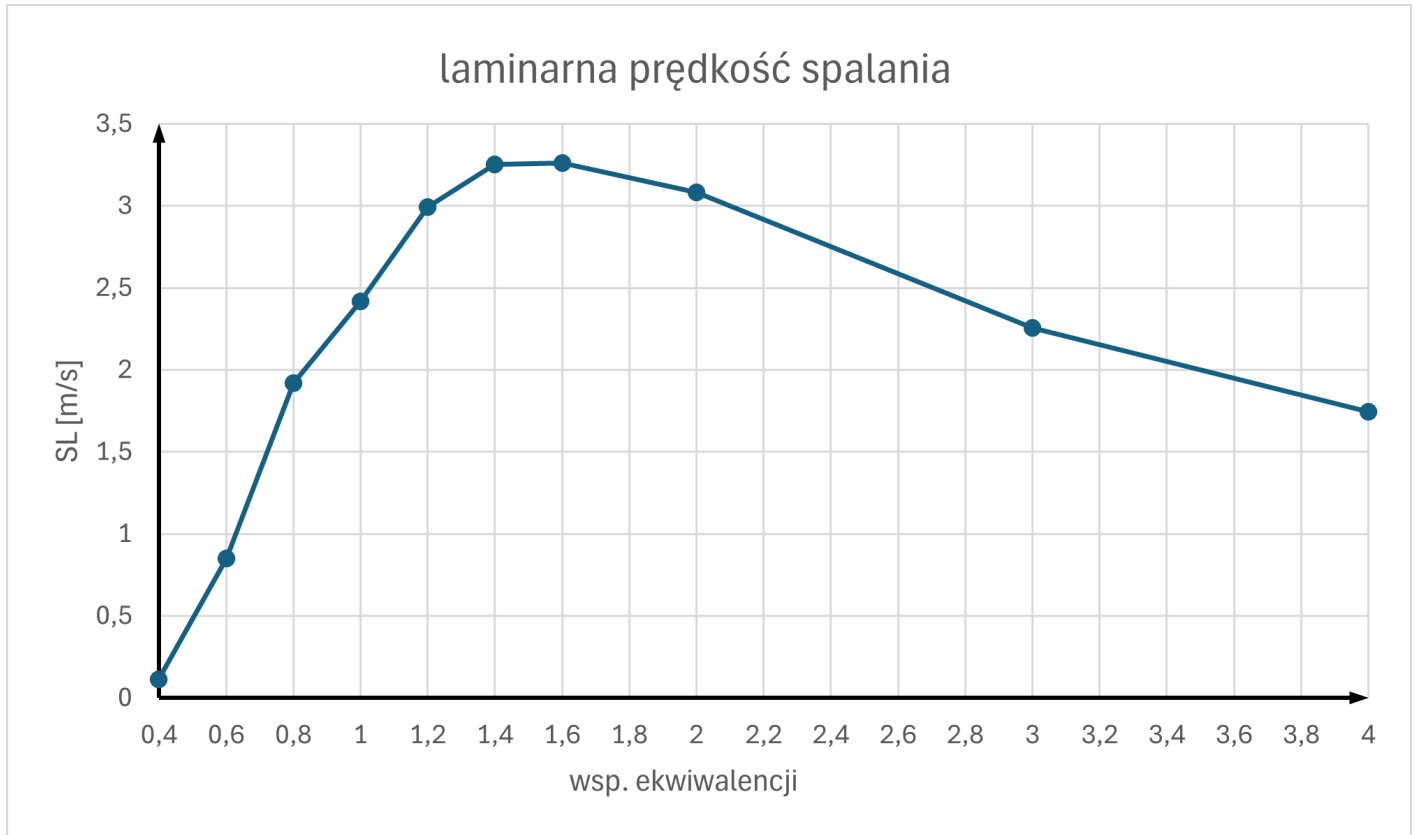


Figure 1: Wykres prędkości spalania dla różnych wartości  $\phi$  (metoda spalania Freeflame) .

Wyniki pokazują, że laminarną prędkość spalania wzrasta wraz ze współczynnikiem ekwiwalencji, osiągając maksimum dla  $\phi = 1.6$  (3.2599 m/s). Następnie dla mieszanki bogatszej niż stechiometryczna ( $\phi > 2.0$ ) prędkość spalania zaczyna spadać. Jest to spowodowane nadmiarem paliwa w stosunku do dostępnego utleniacza, co ogranicza intensywność reakcji spalania.

Analiza długości płomienia powstała na bazie analizy profilu temperatury. Wyniki pokazują, że pozostaje ona stosunkowo stała dla  $\phi$  w zakresie 0.4 – 1.6, wynosząc około 0.0800 m. W przypadku bardziej bogatych mieszanek,  $\phi = 2.0$  oraz  $\phi = 3.0$ , długość płomienia wzrasta do 0.0900 m. Może to wynikać z większej ilości wydzielanego ciepła, które wpływa na strukturę płomienia.

$\phi$	Laminarną prędkość spalania [m/s]
0.4	0,5
0.6	2,5311
0.8	2,6196
1.0	2,6922
1.2	2,4527
1.4	2,281
1.6	2,2179
2.0	2,1537
3.0	2,0889
4.0	2,0416

Table 2: Porównanie długości płomienia i prędkości spalania dla różnych wartości  $\phi$ .

### 3.1.2 Burnerflame

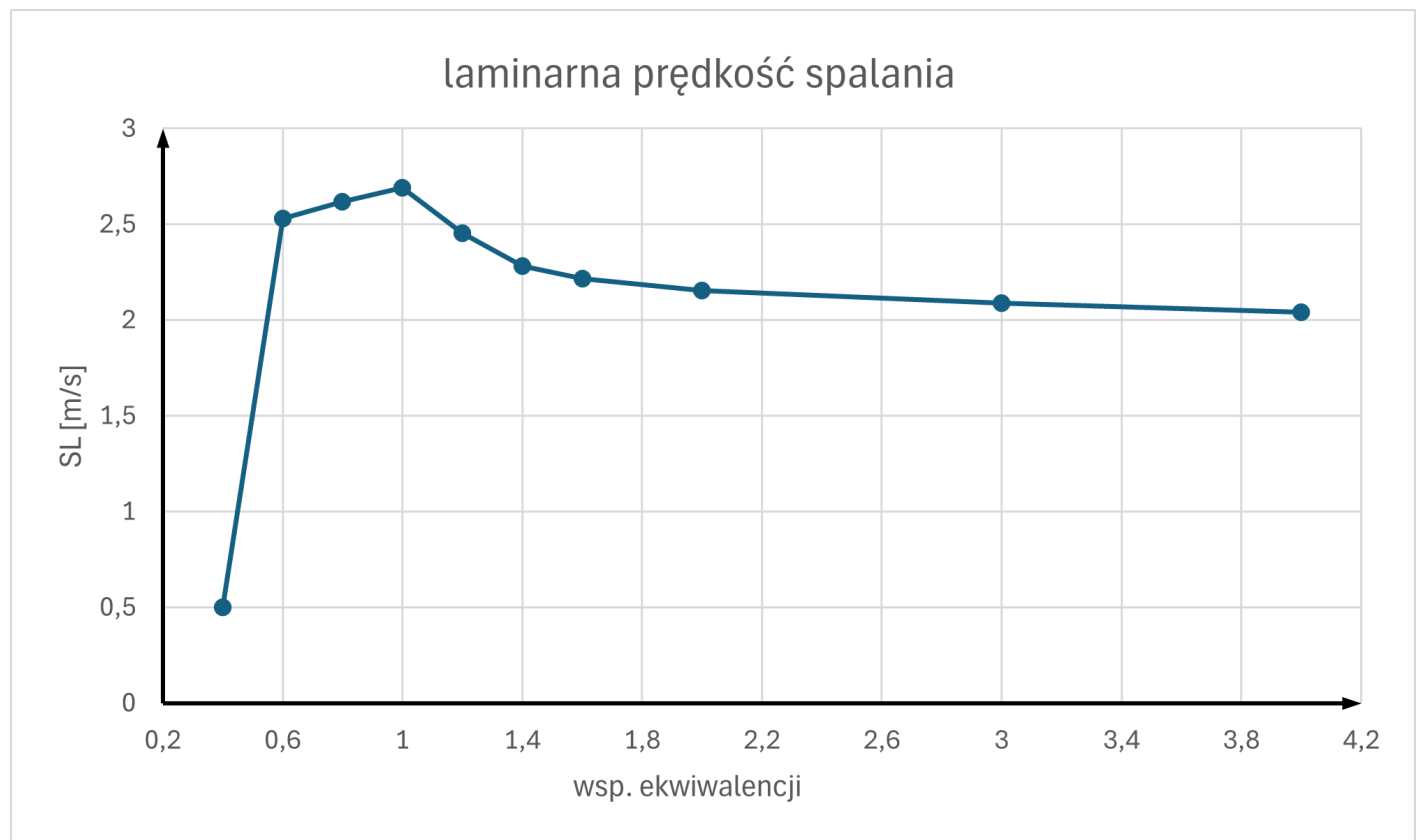
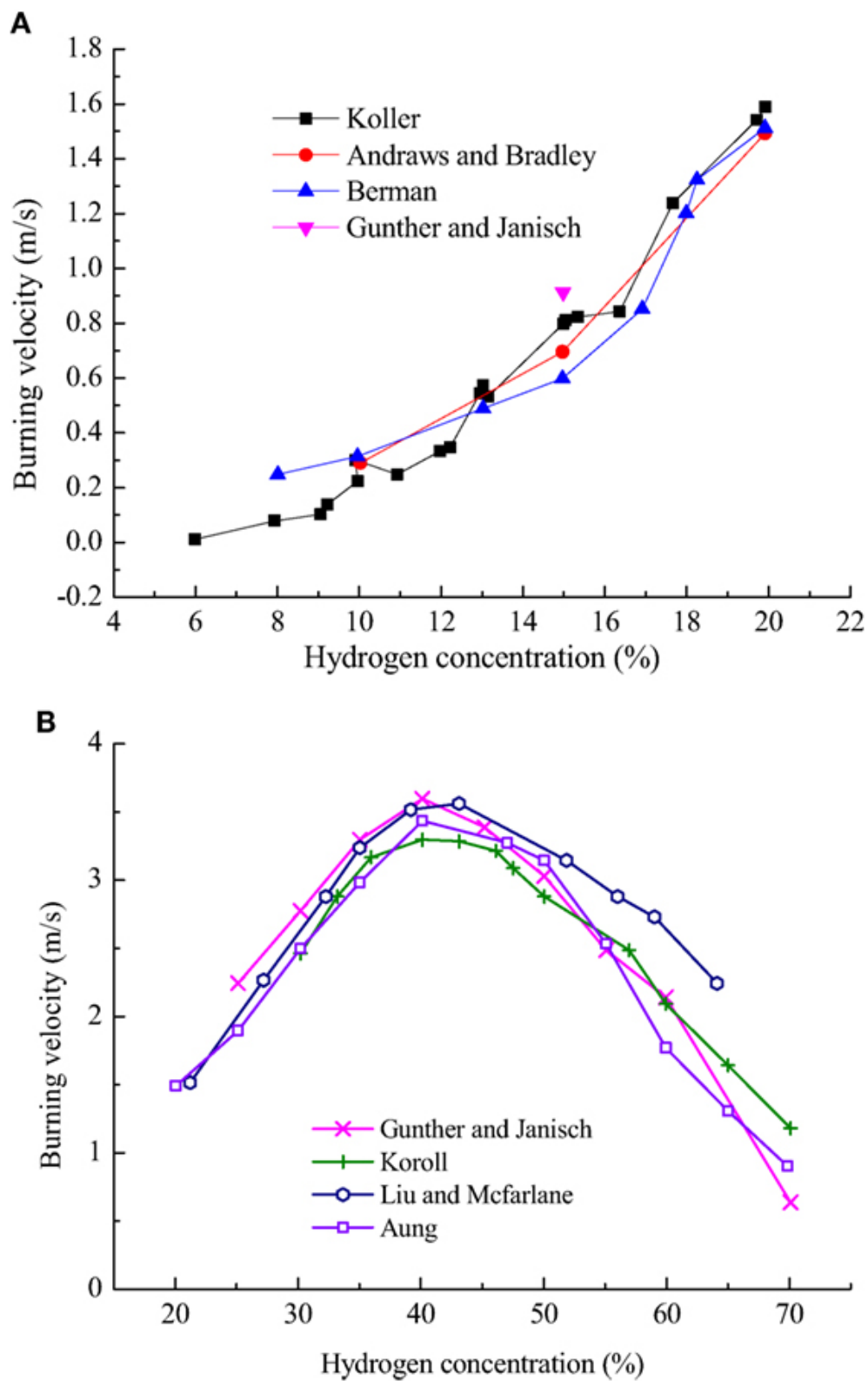


Figure 2: Wykres prędkości spalania dla różnych wartości  $\phi$ .

Na podstawie wyników można zauważyć, że dla  $\phi = 0.4$  nie dochodzi do zapłonu mieszanki, przez co laminarna prędkość spalania dla tego punktu jest równa zadanej prędkości przepływu. Kolejne wartości prędkości wyglądają rozsądnie. Maksymalna wartość laminarnej prędkości spalania występuje dla  $\phi = 1$  (2,6922 m/s). Następnie dla mieszanek bogatych prędkość spalania zaczyna spadać hiperbolicznie. Porównując wyniki do wyników eksperymentalnych należy stwierdzić, że metoda ta jest obarczona błędami, ponieważ z badań wynika, że maksymalne wartości laminarnej prędkości spalania osiąga się w przybliżeniu dla ( $\phi = 1.6$ ).

## 3.1.3 Wyniki eksperymentalne

Figure 3: Wykres prędkości spalania dla różnych wartości  $\phi$ .

$$\phi = \frac{(F/A)_{\text{rzeczywisty}}}{(F/A)_{\text{stech}}}$$

$$(F/A)_{\text{stech}} = \frac{1}{2.38} \approx 0.420$$

$$(F/A)_{\text{rzeczywisty}} = \frac{0.40}{0.60} = 0.667$$

$$\phi = \frac{0.667}{0.420} \approx \boxed{1.59}$$

### 3.2 Profil stężenia wodoru

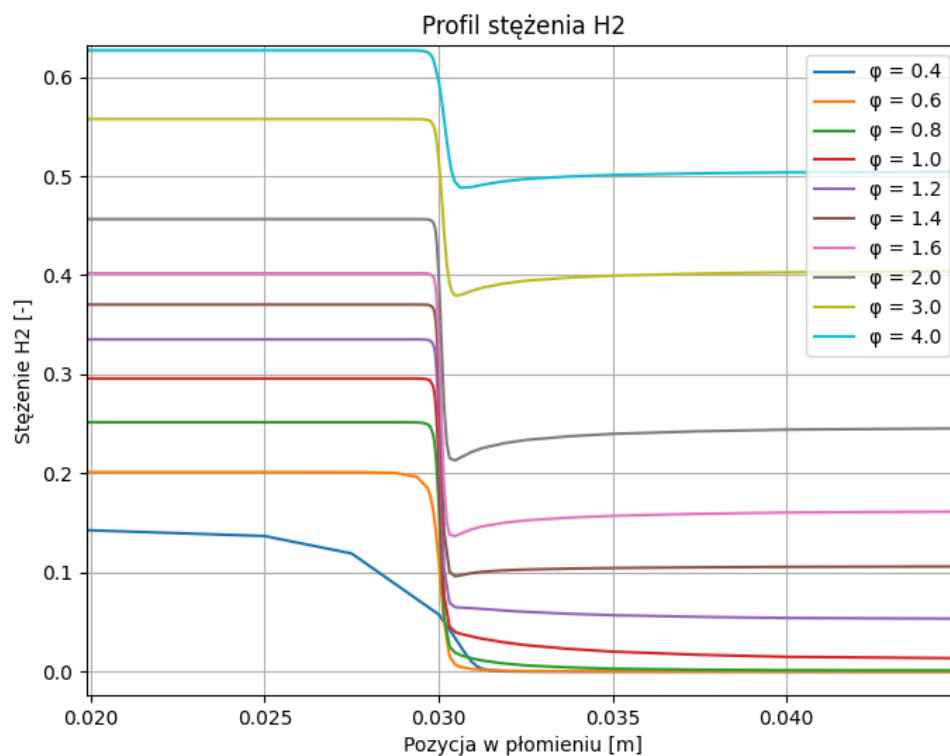


Figure 4: Profil stężenia wodoru (H<sub>2</sub>) w płomieniu w zależności od współczynnika ekwiwalencji. (Metoda Freeflame)

Na wykresie 4 przedstawiono rozkład stężenia wodoru wzdłuż płomienia dla różnych wartości współczynnika ekwiwalencji. Widać, że dla bogatszych mieszanek ( $\phi > 1$ ) zawartość paliwa w początkowej fazie spalania jest wyższa, co zwiększa ilość dostępnego wodoru w strefie reakcji. W mieszanekach ubogich ( $\phi < 1$ ) spalanie przebiega szybciej, a stężenie wodoru gwałtownie maleje.

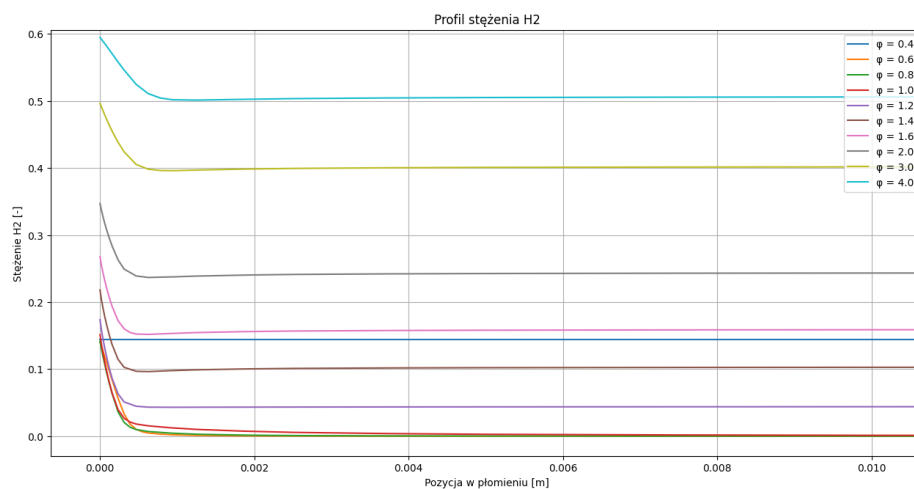


Figure 5: Profil stężenia wodoru ( $H_2$ ) w płomieniu w zależności od współczynnika ekwiwalencji. (Metoda Burnerflame)

Proces spalania w tej metodzie występuje od razu, a nie jak w poprzednim przypadku w okolicach 3cm od początku analizowanego przypadku. Pomimo różnic stężenie wodoru w spalinach jest bardzo zbliżone co świadczy o poprawnym procesie spalania.

### 3.3 Wydzielanie ciepła

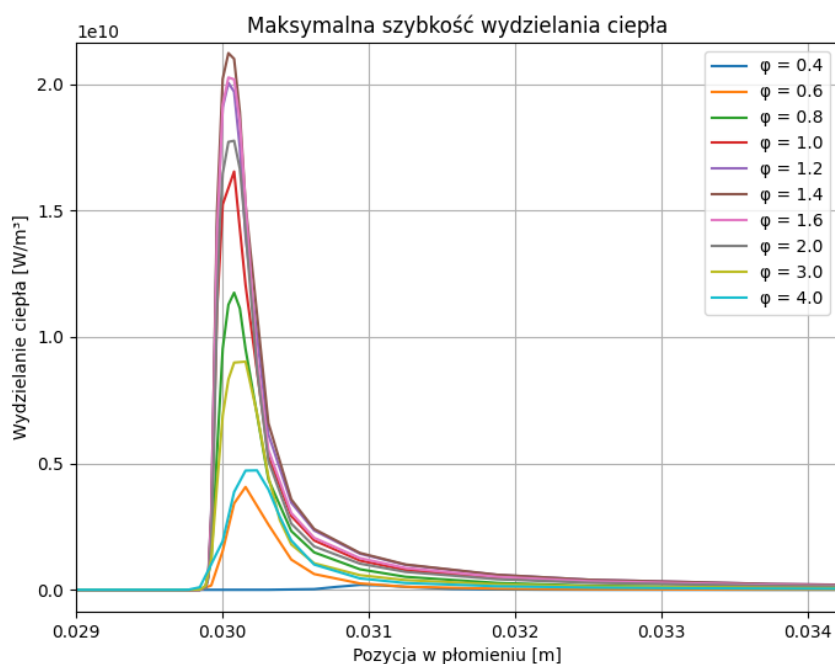


Figure 6: Maksymalna szybkość wydzielania ciepła w płomieniu w zależności od współczynnika ekwiwalencji. (Metoda Freeflame)



Wykres 6 pokazuje intensywność wydzielania ciepła w różnych warunkach spalania. Można zauważyć, że dla  $\phi \approx 1.2 - 1.6$  osiągane są największe wartości. Bogate mieszanki sprzyjają wzrostowi wydzielania ciepła, co może wpływać na stabilność płomienia oraz jego długość.

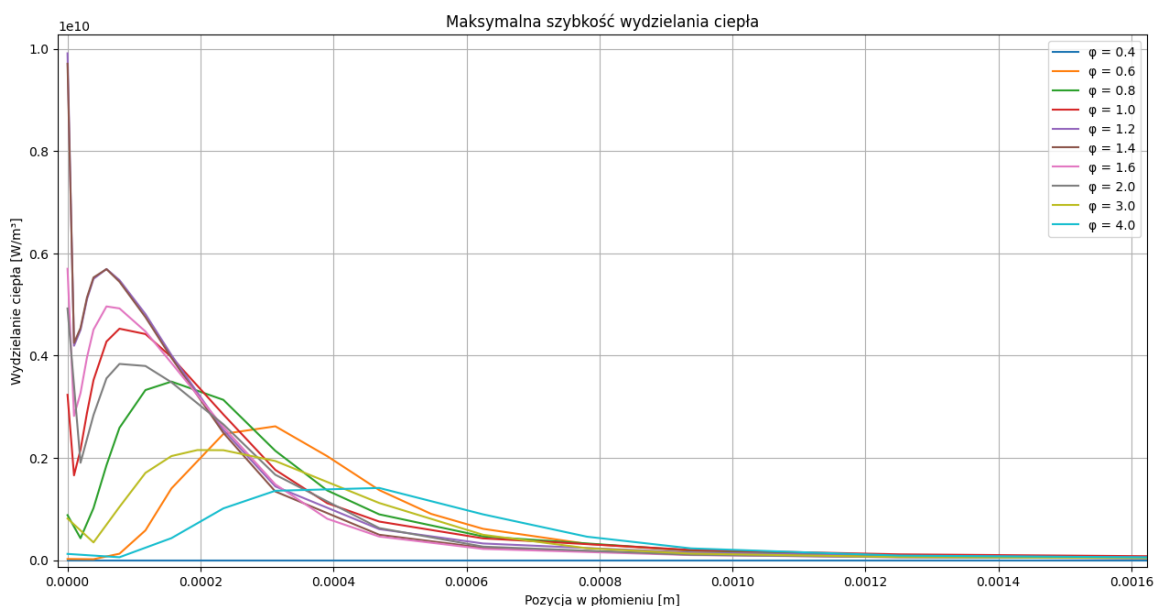


Figure 7: Maksymalna szybkość wydzielania ciepła w płomieniu w zależności od współczynnika ekwiwalencji.(Metoda Burnerflame)

Na powyższym wykresie widoczne jest ustalenie się spalania na "garbie". Zauważalna jest tendencja w tej metodzie spalania, że najefektywniejsze spalanie jest dla mieszanki stechiometrycznej, co nie jest zgodne z doświadczeniami. Bogatsze i uboższe mieszanki osiągają niższe wartości wydzielania ciepła i przesunięte są wzdłuż kierunku  $u$  spalania.

### 3.4 Zmienność lepkości dynamicznej

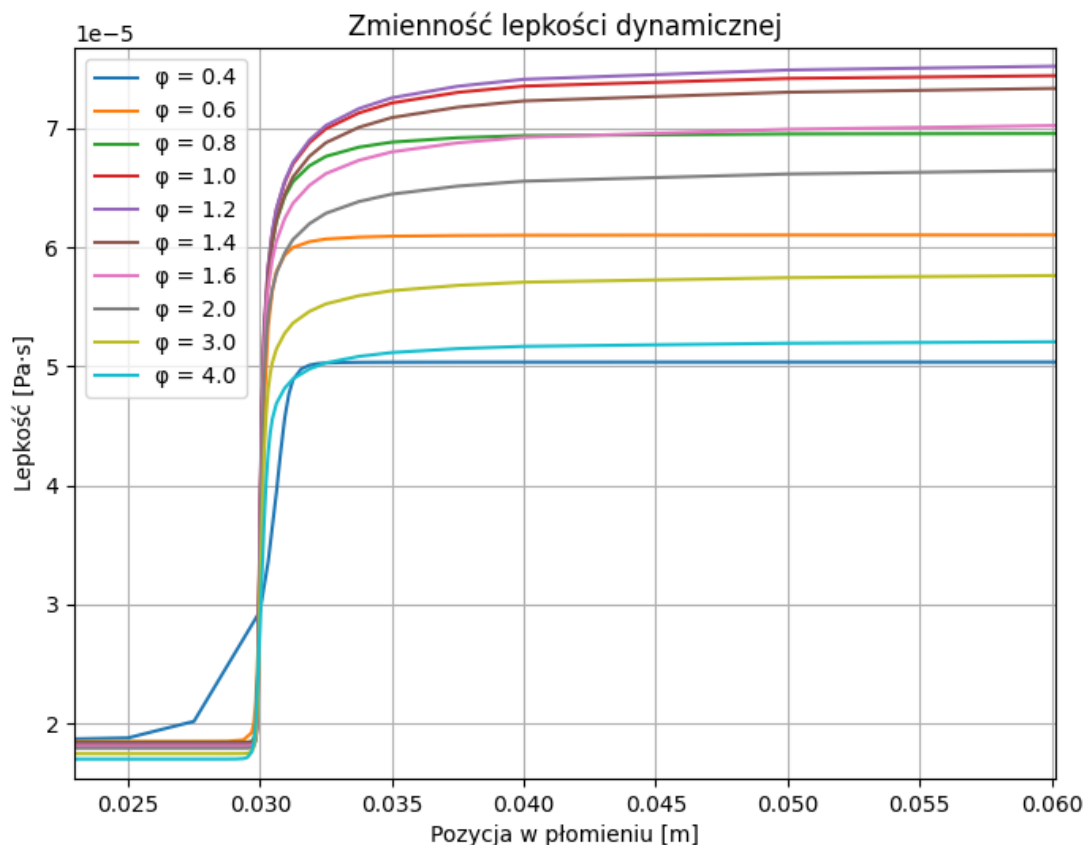


Figure 8: Zmienność lepkości dynamicznej w płomieniu dla różnych współczynników ekwiwalencji. (Metoda Freeflame)

Wykres 8 przedstawia lepkość płomienia, która odgrywa kluczową rolę w transporcie masy i energii. Wraz ze wzrostem  $\phi$  lepkość płomienia również się zwiększa. Wyższa lepkość wpływa na efektywność mieszania składników oraz wpływa na stabilność spalania.

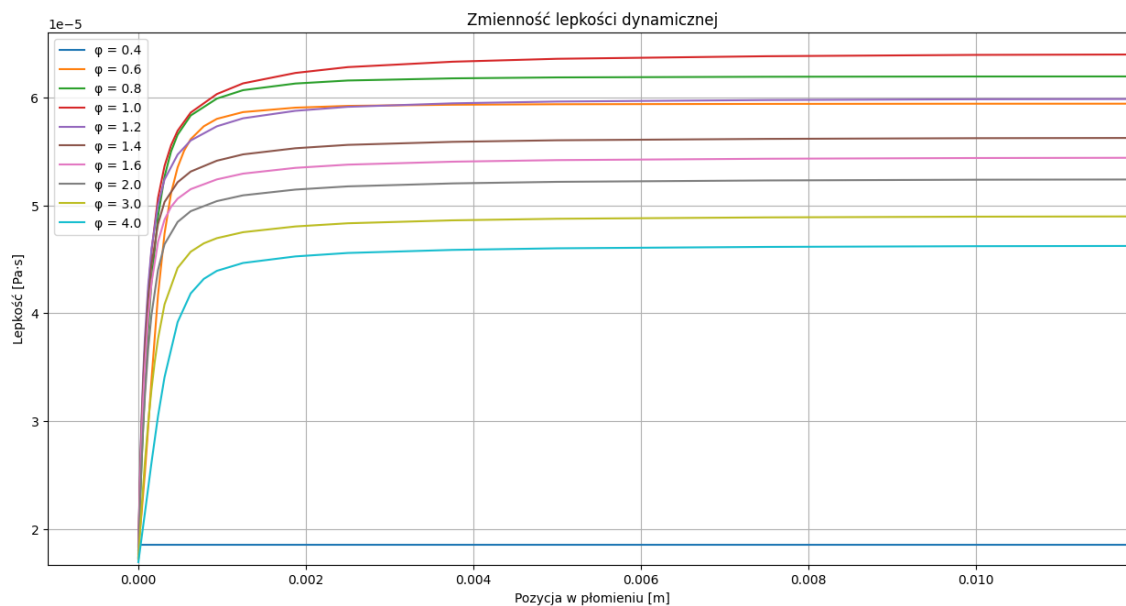


Figure 9: Zmienność lepkości dynamicznej w płomieniu dla różnych współczynników ekwiwalencji. (Metoda Burnerflame)

Zmiana lepkość w tej metodzie zbliżona jest do metody pierwszej. Wartości również nieznacznie różnią się, świadczy to o poprawnym mechanizmie spalania. Dla  $\phi = 0.4$  proces spalania nie został przeprowadzony, może wynikać to z za niskiego stężenia wodoru(12%).

### 3.5 Profil temperatury

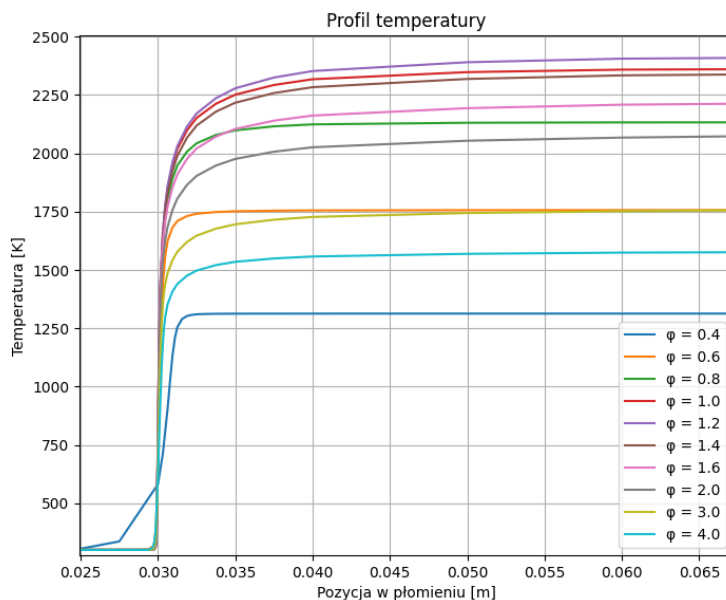


Figure 10: Profil temperatury w płomieniu wodoru w zależności od współczynnika ekwiwalencji. (Metoda Freeflame)

Na wykresie 10 przedstawiono zmianę temperatury wzdłuż płomienia. Maksimum temperatury osiągane jest w pobliżu  $\phi = 1.6$ , co pokrywa się z wynikami dla laminarnej prędkości spalania. W bogatszych mieszkankach płomień jest cieplejszy, co wpływa na szybkość reakcji oraz jego długość.

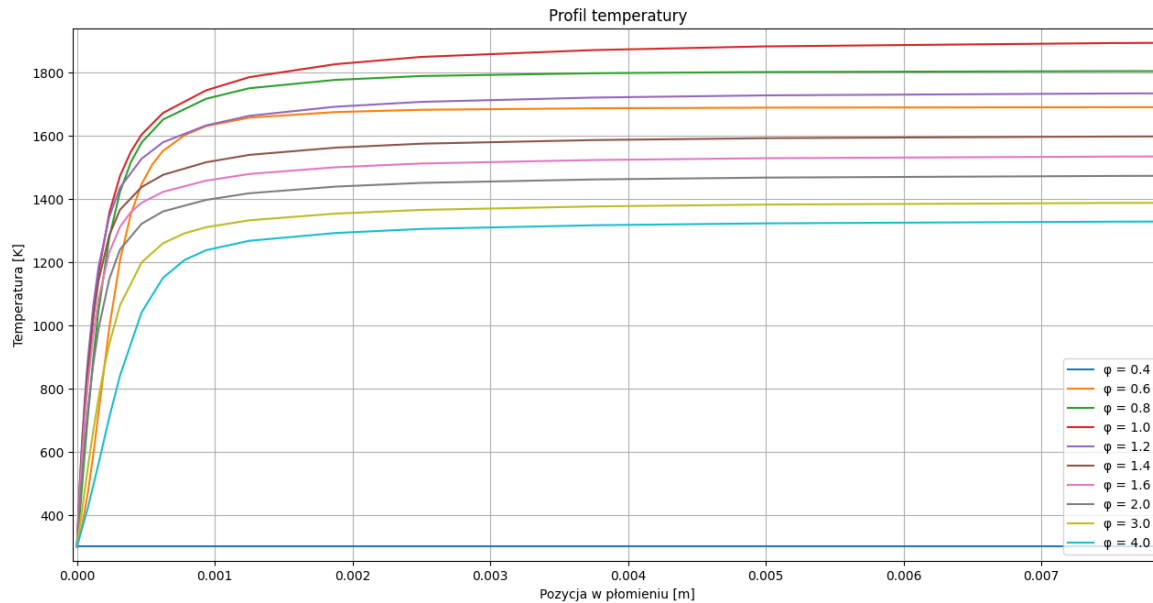


Figure 11: Profil temperatury w płomieniu wodoru w zależności od współczynnika ekwiwalencji. (Metoda Burnerflame)

Profile temperatur są znacznie niższe niż w poprzednim przypadku, lecz rozkład ten jest zbliżony do rozkładu profilu prędkości, ze względu na powiązanie tych parametrów w równaniu spalania. Gdy więc prędkości spalania są niższe to i można było się spodziewać niższych temperatur maksymalnych.

## 4 Porównanie metod symulacji w Cantera

W Cantera istnieją różne podejścia do symulacji procesów spalania:

- **Metoda FreeFlame** – model płomienia swobodnie propagującego się, który jest bardziej realistyczny w warunkach naturalnych spalania. Nie narzuca wymuszonej prędkości dopływu paliwa, co pozwala analizować jego stabilność i propagację.
- **Metoda BurnerFlame** – narzuca warunki przepływu, co jest przydatne w analizie palników, ale mniej odpowiednie do badania naturalnego spalania bez wstępnie wymuszonego przepływu. Nie można w prosty sposób zdefiniować takiej prędkości przepływu, aby rzetelnie móc porównywać te metody.

## 5 Wnioski

Przeprowadzone symulacje pokazują, że laminarną prędkość spalania wodoru różni się w zależności od metody i osiąga maksimum przy  $\phi \approx 1.0$  oraz przy  $\phi \approx 1.6$ , a następnie stopniowo maleje. Po porównaniu wyników z badaniami laboratoryjnymi należy stwierdzić że metoda freeflame bardzo dokładnie

odwzorowała wartości laminarnej prędkości spalania oraz kształt funkcji, zaś metoda burnerflame źle odwzorowała wyniki eksperymentów. Porównanie metod w Cantera wskazuje, że **FreeFlame** jest lepszy do badania propagacji płomienia, podczas gdy **BurnerFlame** nie sprawdza się w analizie danego procesu spalania lub prędkość przepływu nie została dobrze dobrana. Możliwe jest również że metoda ta potrzebowała by innych lub dokładniejszych biblioteki z procesami spalania np.h2o2.yaml

## 6 Bibliografia

- <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2017.00031.com>
- <https://libra.ibuk.pl/reader/energetyka-wodorowa-tadeusz-chmielniak-tomasz-225137>