

# STUDI NUMERIK 2D PEMBAKARAN CANGKANG KELAPA SAWIT PADA TUNGKU BOILER

Melvin Emil Simanjuntak

Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Medan  
Jl. Almamater No. 1 Kampus USU Padang Bulan, Medan

Email: mesimanjuntak@yahoo.com

## Abstrak

Cangkangkelapasawitdengan nilai kalor 2770 kkal/kgmempunyaipotensisebagaibahanbakarboiler.Komposisi cangkangkelapasawitm meliputi kadar air 9,7%; gas volatil 67%; karbon tetap 21,2%; abu 2,1%; karbon 47,62 %; hidrogen 6,2%; oksigen 43,38%; nitrogen 0,7% dan sulfur 0,00% dalam kondisi *air dry base*. Penelitian ini adalah simulasi numerik 2 dimensi menggunakan *software* Flic yang digunakan untuk pembakaran partikel yang besar pada *grate* berjalan dan dipadukan dengan *software*Fluent untuk melihat karakteristik pembakaran pada ruang bakar boiler.Penelitian ini menggunakan kelebihan udara 30%, udara primer 70% dan udara sekunder 30%. Diameter cangkang diasumsikan 15 mm. Konsumsi cangkang pada pembakaran sebanyak 6395 kg/jam. Kecepatan *bed* bervariasi sebesar 5 – 8 m/jam. Hasil yang diperoleh menunjukkan temperatur gas panas di daerah superheater sekitar 1093 – 1464 K, diperoleh juga kontur spesies gas hasil pembakaran.

**Kata kunci:** cangkang, tungku, pembakaran, profil temperatur, spesies gas

## Abstract

Palm oil shells with heating value of 2770 kca/lkg have e potential as boiler fuel. Palm oil shell have a composition of 9.7% moisture content; volatile gas 67%; fixed carbon 21.2%; ash 2.1%; carbon 47.62% hydrogen 6.2%; 43.38% oxygen; 0.7% nitrogen and 0.00% sulfur in under air dry base conditions. This study perform in 2-dimensional numerical simulation using Flic software which is used for combustion of large particles in a running *grate* and combined with fluent software to see the combustion characteristics in the boiler furnace. This study uses 30% of excess air, 70% udara primer and 30% udara sekunder. Palm oil shell diameter is assumed 15 mm. Consumption of shells on combustion is 6395 kg/hour. Bed velocity varies from 5-8 m/h. The results show a temperature profiles around the super heater are 1093 - 1464 K and also obtained gas species contours.

**Keywords:** shell, furnace, combustion, temperatur profile, gas species

## 1. PENDAHULUAN

Cangkang kelapa sawit memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan bakar pada boiler di pembangkit listrik biomassa. Cangkang ini meliputi sekitar 6,5 % dari tandan buah segar kelapa sawit yang diolah di pabrik kelapa sawit. Cangkang kelapa sawit memiliki nilai kalor 2770 kkal/kg dengan komposisi kadar air 9,7%, gas volatil 67%, karbon tetap 21,2% dan abu 2,1%, karbon 47,62 % dan hidrogen 6,2%, oksigen 43,38%, nitrogen 0,7% dan sulfur 0,00% [1].

Padaboiler dengan *grate* jenis stoker yang bergerak mengantarkan bahan bakar dari sisi masuk sampai sisi keluar, dibutuhkan informasi mengenai jumlah udara lebih yang sesuai, arah udara masuk ke ruang bakar jugakecepatan *bed* (tumpukan cangkang) di atas *grate*.

Pada penelitian ini digunakan *software*CFD Flic versi 2.3.c yang *freeware* dan *software* komersial CFD Fluent versi 6.3.26. Hasil simulasi pada Flic akan digunakan sebagai ondisibatapada inlet bahan bakar di *software* Fluent. Penelitian tentang pembakaran biomassa menggunakan kedua *software* ini telah dilakukan oleh peneliti [2],[3], [4],[5], [6],[7],[8] dan [9].

Tujuan penelitian ini adalah untuk melihat profil temperatur dan spesies gas - gas yang terjadi pada pembakaran cangkang kelapa sawit di dalam *furnace* dan pengaruh beberapa parameter lain terhadap profil temperatur tersebut.

## 2. METODE

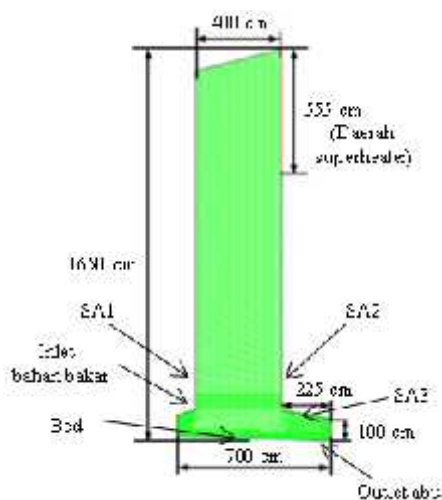
Untuk dapat menggunakan *software* Flic data komposisi cangkang dari [1] yang

merupakan kondisi air dry based diubah ke kondisi as received sehingga diperoleh komposisi seperti pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Komposisi proximate dan ultimate pada kondisi as received (%)

Komposisi	Persentase (%)
Moisture	9,00
Volatile matter	67,23
Karbon tetap	21,27
Abu	2,50
Karbon	43,5
Hidrogen	5,60
Oksigen	39,21
Nitrogen	0,63
Sulfur	0,00

Ukuran tungku sesuai dengan penelitian terdahulu [10] kemudian ditetapkan terlebih dahulu kemudian dibuat meshing-nya dengan software gambit. Elemen meshing adalah quad dengan tipemap dan quad/tri. Jumlah mesh yang sebanyak 9136 sel. Pada model ini masukan udara skunder dibuat pada 3 posisi sehingga proses pencampuran udara dengan bahan bakar diharapkan berlangsung cukup baik. Boundary condition meliputi : inlet bahan bakar, inlet SA<sub>1</sub>, inlet SA<sub>2</sub>, inlet SA<sub>3</sub>, wall dan outlet. Bentuk tungku ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Meshing profil tungku

Software Flic mensimulasikan pembakaran di atas bed. Pada simulasi ini dipilih shape

factor bervariasi sebesar 2; 2,5 dan 3, diameter partikel 15 mm. Udara primer dibagi dalam 5 windbox yang masing-masing laju alirannya adalah 61; 90,75; 104; 82,1 dan 49,75 Nm<sup>3</sup>/mnt. Jumlah bahan bakar yang digunakan adalah 6395 kg/jam, temperatur udara sebesar (keluar airheater) 480 °C. Sedangkan kecepatan bed yang divariasikan adalah 5, 6, 7 dan 8 m/jam. Udara lebih yang digunakan pada simulasi ini adalah 30% yang sesuai untuk biomassa [11] dengan udara primer sebesar 70% dan udara sekunder 30%.

Proses pembakaran akan didahului oleh proses pengeringan yang akan mengurangi kadar air bahan. Proses ini kemudian diikuti oleh devolatilisasi yang akan melepas gas - gas volatil yang terdapat secara alami pada biomassa. Kemudian dilanjutkan dengan pembakaran volatil tadi. Setelah pembakaran gas akan terjadi gasifikasi char dan terakhir adalah proses pembentukan gas - gas hasil pembakaran. Persamaan-persamaan pada rangkaian proses pembakaran tadi digunakan pada software Flic yaitu [8]:

Persamaan pengeringan

Untuk T<sub>s</sub> < 100 °C

$$R_m = A_p \cdot h_s \cdot (C_{w,s} - C_{w,g}) \quad (1)$$

Untuk T<sub>s</sub> = 100 °C

$$R_m = A_p \cdot \frac{h_s (T_g - T_s + \epsilon_s \sigma_b (T_{gas}^4 - T_s^4))}{H_{evp}} \quad (2)$$

dimana R<sub>m</sub> adalah laju penguapan air, A<sub>p</sub> adalah luas permukaan partikel, h<sub>s</sub> adalah koefisien laju perpindahan massa konveksi antara partikel dan gas, C<sub>w,g</sub> adalah konsentrasi kandungan air pada fase gas, C<sub>w,s</sub> adalah konsentrasi kandungan air pada permukaan partikel dan T<sub>s</sub> adalah temperatur partikel.

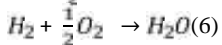
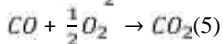
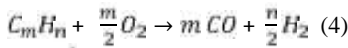
Persamaan devolatilisasi biomassa:

$$R_v = 1 - \phi \cdot \rho_s \cdot R_v \cdot v_{bed} - v \quad (3)$$

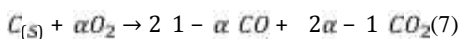
dimana R<sub>v</sub> adalah laju pembentukan gas volatil, φ adalah fraksi void pada bed, ρ<sub>s</sub> adalah

massa jenis gas volatil,  $k_v$  adalah konstanta laju devolatilisasi,  $v_{\infty}$  adalah hasil akhir volatil dan  $v$  adalah volatil yang tersisa pada bagian *solid* (padat).

Persamaan pembakaran gas - gas volatil



Persamaan gasifikasi *char*



Untuk menyelesaikan masalah pada CFD Fluent digunakan persamaan-persamaan kontinuitas, momentum dan energi. Untuk kasus multifasa maka akan ada persamaan untuk masing masing fasa. Seperti pada bagian bawah[8].

Persamaan kontinuitas untuk fase gas

$$\frac{\partial \rho_g \emptyset}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g U_g \emptyset}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g V_g \emptyset}{\partial y} = S_{s,g} \quad (8)$$

dimana  $\emptyset$  adalah fraksi *void* pada *bed*,  $S_{s,g}$  adalah laju konversi dari padat ke gas karena evaporasi

Persamaan momentum untuk fase gas untuk arah x dan y

$$\frac{\partial \rho_g U_g \emptyset}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g U_g U_g \emptyset}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g U_g V_g \emptyset}{\partial y} = \frac{\partial p_g}{\partial x} + F U_g$$

dan

$$\frac{\partial \rho_g V_g \emptyset}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g V_g U_g \emptyset}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g V_g V_g \emptyset}{\partial y} = \frac{\partial p_g}{\partial y} + F V_g \quad (9)$$

Persamaan untuk spesies

$$\frac{\partial \rho_g Y_{i,g} \emptyset}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g U_g Y_{i,g} \emptyset}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g V_g Y_{i,g} \emptyset}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} D_{i,g} \frac{\partial \rho_g Y_{i,g} \emptyset}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_{i,g} \frac{\partial \rho_g Y_{i,g} \emptyset}{\partial y} + S_{Y_{i,g}} \quad (10)$$

dimana  $Y_{i,g}$  adalah koefisien dispersi spesies

Persamaan energi untuk spesies

$$\frac{\partial \rho_g H_{i,g} \emptyset}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g U_g H_{i,g} \emptyset}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g V_g H_{i,g} \emptyset}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y} + Q_h \quad (11)$$

dimana  $H$  adalah entalpi dan  $\lambda_g$  adalah koefisien dispersi thermal.

Sedangkan persamaan untuk bahan bakar yang masih berbentuk padatan adalah :

Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial (1 - \emptyset) \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial (1 - \emptyset) \rho_s U_s}{\partial x} + \frac{\partial (1 - \emptyset) \rho_s V_s}{\partial y} = S_{s,s} \quad (12)$$

Persamaan spesies

$$\frac{\partial (1 - \emptyset) \rho_s Y_{i,s}}{\partial t} + \frac{\partial (1 - \emptyset) \rho_s U_s Y_{i,s}}{\partial x} + \frac{\partial (1 - \emptyset) \rho_s V_s Y_{i,s}}{\partial y} = S_{Y_{i,s}} \quad (13)$$

Persamaan energi untuk spesies

$$\frac{\partial (1 - \emptyset) \rho_s H_{i,s}}{\partial t} + \frac{\partial (1 - \emptyset) \rho_s U_s H_{i,s}}{\partial x} + \frac{\partial (1 - \emptyset) \rho_s V_s H_{i,s}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} + \frac{\partial q_{rx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{ry}}{\partial y} + Q_{sh} \quad (14)$$

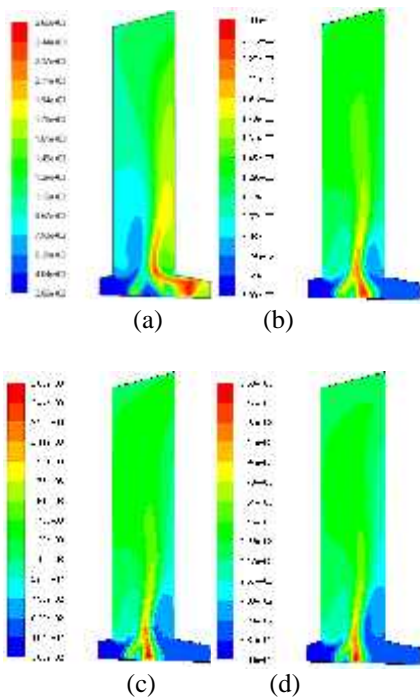
Persamaan perpindahan panas radiasi

$$\frac{dI_{xi}^{\pm}}{dx_i} = -k_a + k_s I_{xi}^{\pm} + \frac{1}{2N} k_a E_b + \frac{1}{2N} k_s \sum_{i=1}^N I_{xi}^{\pm} + I_{xi}^{\pm}, \quad i = 1, N \quad (15)$$

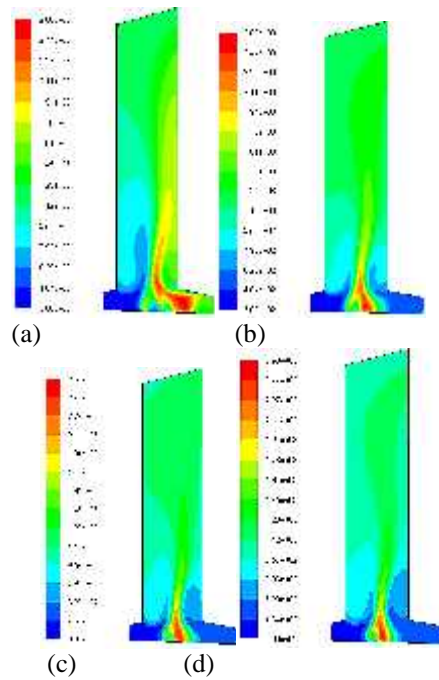
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Profil Temperatur di dalam Tungku

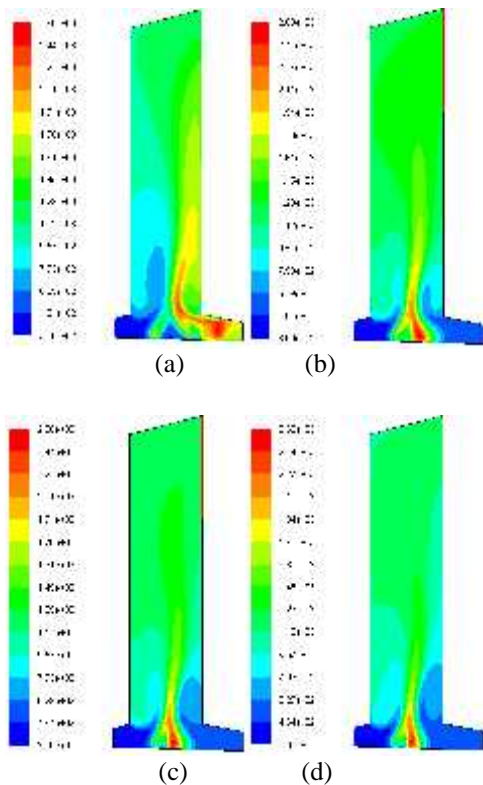
Profil temperatur yang diperoleh dari hasil simulasi untuk kecepatan *bed* 5, 6, 7 dan 8 meter/jam dengan *shape factor* mulaidari 1,5 sampai dengan 3 dapat dilihat pada Gambar 2 sampai Gambar 5.



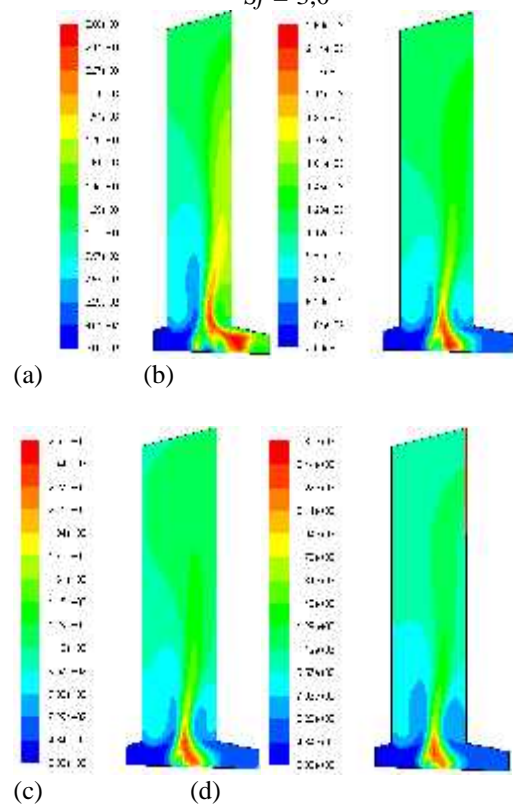
**Gambar 2.** Profil temperatur dengan kecepatan *bed* 5 m/jam dengan (a)  $S_f = 1,5$  (b)  $S_f = 2,0$  (c)  $S_f = 2,5$  (d)  $S_f = 3,0$



**Gambar 4.** Profil temperatur dengan kecepatan *bed* 7 m/jam dengan (a)  $S_f = 1,5$  (b)  $S_f = 2,0$  (c)  $S_f = 2,5$  (d)  $S_f = 3,0$



**Gambar 3.** Profil temperatur dengan kecepatan *bed* 6 m/jam dengan (a)  $S_f = 1,5$  (b)  $S_f = 2,0$  (c)  $S_f = 2,5$  (d)  $S_f = 3,0$



**Gambar 5.** Profil temperatur dengan kecepatan *bed* 8 m/jam dengan (a)  $S_f = 1,5$  (b)  $S_f = 2,0$  (b) (c)  $S_f = 2,5$  (d)  $S_f = 3,0$

Temperatur maksimum dan temperatur rata-rata di daerah *outlet* dalam K dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Temperatur maksimum dan rata rata

Kecepatan <i>bed</i>	5 m/jam			
<i>Shape factor</i>	1,5	2	2,5	3
T <sub>maks</sub> (K)	2488	2483	2502	2504
T <sub>rata-rata</sub> (K) <i>outlet</i>	1464	1336	1245	1190
Kecepatan <i>bed</i>	6 m/jam			
<i>Shape factor</i>	1,5	2	2,5	3
T <sub>maks</sub> (K)	2494	2506	2508	2498
T <sub>rata-rata</sub> (K) <i>outlet</i>	1422	1320	1212	1130
Kecepatan <i>bed</i>	7 m/jam			
<i>Shape factor</i>	1,5	2	2,5	3
T <sub>maks</sub> (K)	2507	2495	2433	2458
T <sub>rata-rata</sub> (K) <i>outlet</i>	1419	1280	1166	1093
Kecepatan <i>bed</i>	8 m/jam			
<i>Shape factor</i>	1,5	2	2,5	3
T <sub>maks</sub> (K)	2541	2484	2347	2314
T <sub>rata-rata</sub> (K) <i>outlet</i>	1449	1258	1204	1102

Dari data-data yang ada dapat dilihat bahwa *shape factor* dapat mempengaruhi T<sub>rata-rata</sub> di daerah *outlet*. *Shape factor* yang membesar akan menurunkan temperatur rata-rata di daerah *outlet*. Daerah *outlet* ini penting untuk diperhatikan karena di daerah inilah ditempatkan *superheater*. Dapat dilihat bahwa semakin kecil kecepatan *bed* akan diperoleh temperatur rata-rata yang semakin tinggi. Pada kecepatan 5 m/jam diperoleh T<sub>rata-rata</sub> di daerah *outlet* sebesar 1336 K sedangkan untuk kecepatan 8 m/jam temperatur turun menjadi 1258 K untuk *shape factor* sebesar 2. Sedangkan untuk *shape factor* yang lebih besar akan diperoleh temperatur yang lebih rendah lagi. Dari kondisi temperatur dan

jumlah gas panas yang diperoleh akan dapat diletakkan *superheater* yang sesuai dengan kebutuhan. Panas yang terjadi di daerah *outlet* ini dapat diletakkan sebuah boiler yang dapat menghasilkan uap 31100 kg/jam dengan temperatur uap 435 °C [10].

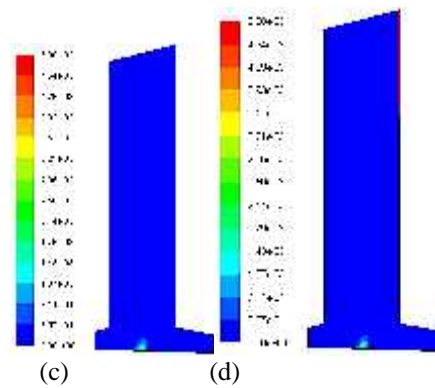
Dari profil temperatur yang terjadi bahan bakar dengan *shape factor* sebesar 2 akan menghasilkan profil temperatur yang nilai maksimum dan minimumnya tidak tinggi. Berbeda halnya dengan profil temperatur dengan *shape factor* 2,5 dan 3 yang akan menghasilkan perbedaan temperatur maksimum dan minimum di daerah *outlet* lebih tinggi. Hal ini akan memberi tegangan termal yang lebih besar bagi pipa *superheater*. Kecepatan *bed* yang lebih besar juga akan mempengaruhi profil temperatur menjadi lebih rendah. Kecepatan *bed* sebesar 5 dan 6 m/jam akan menghasilkan temperatur rata-rata di daerah *outlet* berada di atas 1300 K. Temperatur gas panas sebesar ini tidak terlalu jauh berbeda dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh [12], [13] dan [14].

Kecepatan *bed* yang kecil akan memberi kesempatan udara untuk bercampur dengan bahan bakar sehingga pembakaran akan berlangsung dengan lebih baik walaupun tumpukan bahan bakar akan lebih tinggi.

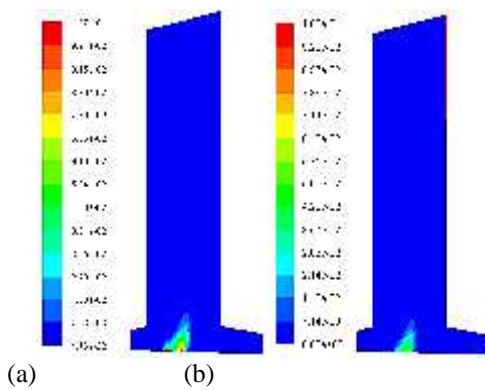
## B. Profil Spesies Gas

Untuk melihat sempurna atau tidaknya reaksi pembakaran, dapat kita ketahui dari spesies gas - gas yang ada. Gas- gas CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO merupakan gas yang belum selesai bereaksi pada saat iterasi Flic. Sedangkan CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> adalah gas - gas yang tidak lagi bereaksi. Konsentrasi gas - gas ini dapat dilihat pada data-data hasil iterasi pada Flic. Pada sisi *outlet* boiler konsentrasi gas ini penting untuk diperhatikan dimana fraksi massanya harus mendekati 0%. Dari semua hasil simulasi menunjukkan konsentrasi gas yang belum selesai bereaksi sudah mendekati 0% dimana nilainya berada pada kisaran fraksi massa 0 – 3,57 x 10<sup>-4</sup>. Konsentrasi CH<sub>4</sub> di daerah *outlet* untuk kecepatan *bed* 6 m/jam dan *shape factor* sebesar 2 diperoleh fraksi

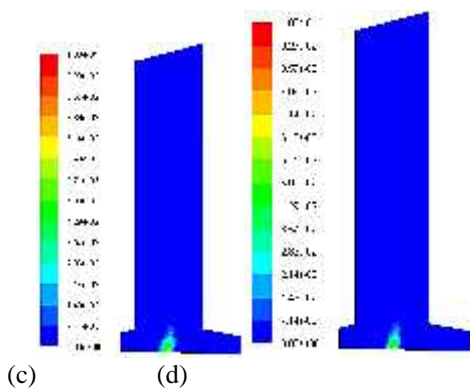
massa  $\text{CH}_4$  sebesar  $5,02 \times 10^{-8}$  atau sebesar  $5,02 \times 10^{-6}\%$ . Nilai ini ditunjukkan pada Gambar 6 – 8. Angka ini sudah menunjukkan angka yang sangat kecil tetapi perlu diperhatikan juga untuk jumlah bahan bakar yang besar angka seperti ini akan dapat memberi pengaruh terhadap hasil pembakaran. Terlihat juga bahwa pada semua *shape factor* dan semua kecepatan *bed* spesies gas - gas ini dengan cepat bereaksi sehingga konsentrasinya habis pada ketinggian yang tidak jauh dari *bed*.



**Gambar 7.** Profil fraksi massa  $\text{H}_2$  dengan  $S_f = 2$  pada kecepatan *bed* (a)  $V = 5$  m/jam (b)  $V = 6$  m/jam (c)  $V = 7$  m/jam (d)  $V = 8$  m/jam

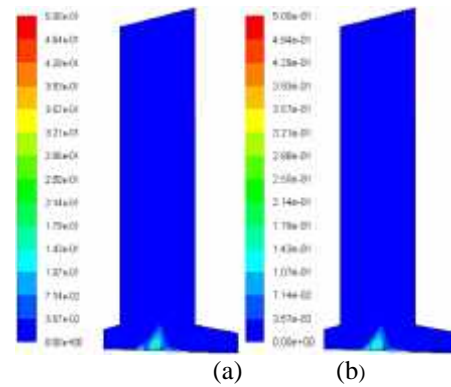


(a) (b)

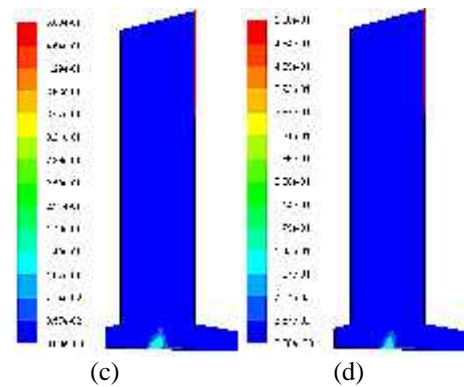


(c) (d)

**Gambar 6.** Profil fraksi massa  $\text{CH}_4$  dengan  $S_f = 2$  pada kecepatan *bed* (a)  $V = 5$  m/jam (b)  $V = 6$  m/jam (c)  $V = 7$  m/jam (d)  $V = 8$  m/jam

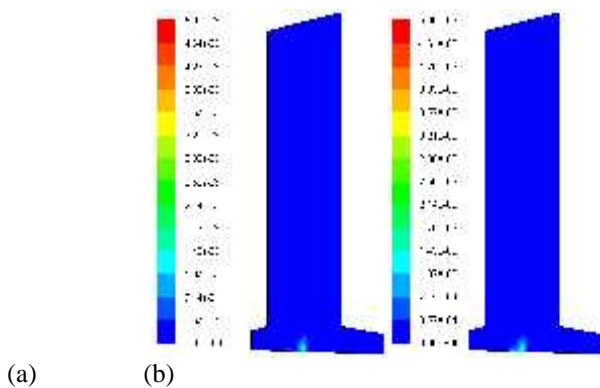


(a) (b)



(c) (d)

**Gambar 8.** Profil fraksi massa  $\text{CO}$  dengan  $S_f = 2$  pada kecepatan *bed* (a)  $V = 5$  m/jam (b)  $V = 6$  m/jam (c)  $V = 7$  m/jam (d)  $V = 8$  m/jam



(a) (b)



#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dapat disimpulkan pembakaran cangkang dengan *software* Flic dan Fluent akan menunjukkan temperatur yang ada di dalam tungku dimana temperatur ini akan dipengaruhi oleh kecepatan *bed* dan *shape factor*. Kecepatan *bed* yang disimulasikan dari kecepatan 5 sampai 8 m/jam dan *shape factor* sebesar 1,5 sampai 3 akan dihasilkan temperatur rata-rata di daerah *outlet* dimana *superheater* ditempatkan sebesar 1093 – 1464 K. Kecepatan *bed* sebesar 5 dan 6 m/jam dengan *shape factor* sebesar 2 akan memberi kisaran temperatur di daerah *outlet* yang lebih kecil dibanding kondisi lain. Spesies gas – gas CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> dan CO di daerah *outlet* memiliki konsentrasi yang sangat kecil sehingga dapat dianggap reaksi yang terjadi di tungku sudah berlangsung sempurna.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Berkat terselesainya penelitian ini maka penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Medan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]Dodd,V.A. dan Grace,P.M., “*Agricultural Engineering*, Vol. 4, International Commission of Agricultural Engineering”, Taylor Francis.1984
- [2]X. Zhang, Q. Chen, R. Bradford, V. Sharifi, dan J. Swithenbank, “*Experimental investigation and mathematical modelling of wood combustion in a moving grate boiler*,” *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no. 11, pp. 1491–1499.2010
- [3]Y. B. Yang, J. Goodfellow, dan V. Nasserzadeh, “*Study on the transient process of waste fuel incineration in a full scale moving bed furnace*,” *Combustion Science and Technology*, vol. 177, pp. 37–41.2005
- [4]Y. B. Yang, C. Ryu, J. Goodfellow, V. N. Sharifi,dan J. Swithenbank, “*Modelling waste combustion in grate furnaces*,” *Process Safety Environmental Protection*, vol. 82, no. 3 B, pp. 208–222. 2004
- [5]Y. B. Yang, R. Newman, V. Sharifi, J. Swithenbank, dan J. Ariss, “*Mathematical modelling of straw combustion in a 38 MWe power plant furnace and effect of operating conditions*,” *Fuel*, vol. 86, no. 1–2, pp. 129–142. 2007
- [6]R. Zakaria, Y. B. Yang, dan R. G. Siddall.“*Mixing, Modelling and Measurements of Incinerator Bed Combustion Moving Grate*,” *Trans IChemE*, vol. 78, pp. 21-32. 2000
- [7]Y. R. Goh, Y. B. Yang, R. Zakaria, R. G. Siddall, V. Nasserzadeh, dan J. Swithenbank. “*Development of an incinerator bed model for municipal solid waste incineration*,” *Combustion Science Technology*, vol. 162, no. 1–6, pp. 37–58. 2001
- [8] Y. Bin Yang, V. N. Sharifi, dan J. Swithenbank. “*Converting moving-grate incineration from combustion to gasification - Numerical simulation of the burning characteristics*,” *Waste Management*, vol. 27, no. 5, pp. 645–655. 2007
- [9] M.E.Simanjuntak.“*Perancangan Awal dan Simulasi Pembakaran Tungku Berbahan Bakar Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk PLTU Berkapasitas 3 MW*”, Tesis, Jurusan Teknik Mesin, ITB, Bandung. 2010
- [10] M. E. Simanjuntak dan M.B. Sitorus, “*Desain Awal PLTU dan Boiler Berbahan Bakar Cangkang Kelapa Sawit dengan Kapasitas 31100 kg uap/jam*”, *Sinergi*, Vol. 1.2012
- [11] J.B. Kitto dan S.C. Schultz, *Steam Its Generation and Use*, 41<sup>st</sup>Edition, The Babcock and Wilcox Company, Ohio, USA. 2005
- [12]M. A. Gómez, J. Porteiro, D. De la Cuesta, D. Patiño, dan J. L. Míguez,“*Dynamic simulation of a biomass domestic boiler under thermally thick considerations*,”

Energy Conversion Management, vol. 140,  
pp. 260–272. 2017

- [13] C. Yin dan S. Li, “*Advancing grate-firing for greater environmental impacts and efficiency for decentralized biomass/wastes combustion,*” Energy Procedia, vol. 120, pp. 373–379. 2017
- [14] Y. Tu, A. Zhou, M. Xu, W. Yang, K. B. Siah, dan P. Subbaiah, “*NO<sub>x</sub> reduction in a 40 t/h biomass fired grate boiler using internal flue gas recirculation technology,*” Applied Energy, vol. 220, pp. 962–973. 2018