

KARAKTERISTIK PEMBAKARAN WOOD PELLET STOVE DENGAN VARIASI GEOMETRI DAN BLOCKAGE RATIO FLAME CONNECTOR

Lilis Yulianti

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
lilis_y@ub.ac.id

Nurkholis Hamidi

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
hamidy@ub.ac.id

Mega Nur Sasongko

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
megasasongko@ub.ac.id

**Ibrahim Ahmad
Ibadurrohman**

Mahasiswa S2
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
Ibrahim_ahmad@student.ub.ac.id

This research was intended to investigate the effect of the geometry and blockage ratio of the flame connector on the combustion characteristics of wood pellets on a wood pellet stove. Combustion characteristics observed in this research included flame visualization, flame temperature, specific fuel consumption, and corrected-specific fuel consumption. Two types of geometry were used as a flame connector, i.e. disk and cone; for each geometry, the blockage ratio was varied at 0,6, 0,7, and 0,8. The blockage ratio was varied by change the number of the circular hole on the flame connector. Combustion in wood pellet stove without flame connector was then used as a comparison. The flame visualization test was applied to find out the color and dimensions of the flame, which was then used to determine the temperature on this flame. The water boiling test method version 4.2.3 was used to determine specific fuel consumption and corrected specific fuel consumption. The combustion chamber of the wood pellet stove has a dimension of 15 cm diameter and 20 cm height. Wood pellet supply used intermittent - continuous feeding system with a mass flow rate of 16 gram/minute. Flame visualization shows that stove with cone flame connector has a larger flame dimension and flame dimension decreases with the increasing of blockage ratio. The highest flame temperature occurred near the outlet of the combustion chamber, the same conditions were observed in all variations experiment. The application of flame connector involves greater specific fuel consumption due to longer boiling time. However, a correction factor by considering the amount of evaporated water results from corrected specific fuel consumption of wood pellet stove with cone flame connector which is smaller compared to the other type of wood pellet stove.

Keywords: *Flame Connector Geometry; Blockage Ratio; Combustion Characteristics; Water Boiling Test, Intermittent - Continuous Feeding System.*

1. PENDAHULUAN

Konsumsi energi final di Indonesia terus meningkat sekitar 1,3% per tahun selama kurun waktu 2010 hingga 2015. Disisi lain, cadangan sumber energi fosil di Indonesia semakin menipis. Cadangan minyak bumi di Indonesia pada tahun 2015 adalah 3,7 miliar barel yang akan habis dalam kurun waktu 11 tahun. Sedangkan cadangan gas bumi akan habis dalam kurun waktu 36 tahun dan batu bara akan habis dalam kurun waktu 70 tahun ke depan. Beberapa kebijakan pemerintah terkait hal ini di antaranya adalah konversi minyak tanah dengan LPG di sektor rumah tangga, penggunaan bahan bakar gas untuk sektor transportasi, subsidi listrik dan minyak solar terbatas serta penghapusan subsidi premium. Selain itu pemerintah juga sangat aktif mengembangkan sumber energi baru dan terbarukan [1].

Salah satu sumber energi baru dan terbarukan yang banyak dikembangkan adalah energi alternatif biomassa karena memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan dalam mengatasi krisis energi di Indonesia. Salah satu energi biomassa tersebut ialah pelet kayu (*wood pellet*) yang merupakan hasil densifikasi dari limbah sisa olahan kayu berupa serbuk kayu. Indonesia memiliki potensi yang besar dalam

pengembangan energi biomassa dari limbah kayu. Indonesia menghasilkan sebanyak 123,5 juta ton/tahun atau setara dengan 1.455,97 juta GJ/tahun potensi bio pelet dari limbah biomassa [2]. Beberapa permasalahan yang muncul ketika biomassa dibakar secara langsung adalah nilai kalornya yang rendah, nilai *bulk density* yang rendah, dan level emisi polutan yang tinggi [3].

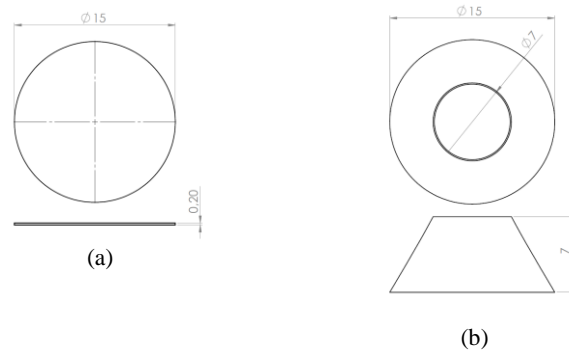
Teknologi yang digunakan pada proses pembakaran *wood pellet* ialah *wood pellet stove*. Penggunaan *wood pellet stove* menggantikan *wood stove* konvensional memberikan dampak yang cukup signifikan dalam menurunkan emisi gas buang, bahkan *wood pellet stove* memiliki efisiensi hingga 83% [4]. Beberapa permasalahan yang paling umum pada *wood pellet stove* adalah pada proses penyalaaan, pembakaran yang tidak sesuai, sistem kontrol, sistem pengisian bahan bakar, dan kebisingan alat [5]. Pengembangan teknologi *wood pellet stove* didesain untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi asap serta emisi yang berbahaya yang sangat terkait dengan proses pembakaran bahan bakar biomassa. Dalam hal ini, proses konveksi alamiah dibuat dalam bentuk inlet udara primer dan udara sekunder untuk meningkatkan efisiensi dan transfer kalor [6]. *Draft* yang cukup dan *air to fuel ratio* yang sesuai akan memastikan pembakaran yang lebih sempurna dan efisien. Pertimbangan terhadap ukuran, geometri dan penempatan inlet bahan bakar dan ruang pembakaran akan meningkatkan kontrol terhadap aliran udara. Nyala Api yang lebih panas juga akan menghasilkan efektivitas yang lebih tinggi terhadap *combustible gas* yang terbentuk. Insulasi yang tepat di sekeliling ruang bakar akan mengurangi *heat loss*, memungkinkan api menyala pada temperatur yang lebih tinggi [7]. Besarnya *flow rate* udara pada pembakaran *wood pellet stove* akan berpengaruh terhadap *burning rate*, *fire power*, *fuel consumption*, *thermal efficiency*, dan *percentage energy utilization* [8].

Pada *wood pellet stove*, terdapat 2 zona pembakaran yaitu *primary* dan *secondary combustion zone*. Pada *primary combustion zone* biomassa padat dikonversikan menjadi *char*, senyawa volatil, dan abu. Pembakaran primer terjadi di atas *grate* atau pada tempat udara primer masuk ke ruang bakar. Selanjutnya pada bagian atas merupakan *secondary combustion zone* di mana terjadi oksidasi volatil menghasilkan nyala api dengan suplai udara sekunder [9]. Selama proses pembakaran, pengapian pada lapisan teratas akan menghasilkan api dari pembakaran fraksi volatil biomassa, sedangkan pada bagian bawah sejumlah *fixed carbon* terbakar [10]. Nyala api pada *secondary combustion zone* ini perlu dikondisikan agar dapat diperoleh pembakaran yang efektif dan efisien sehingga tidak banyak jumlah kalor yang terbuang. Igboanugo dan Ajieh mengungkapkan bahwa penggunaan *flame connector* kerucut dapat digunakan untuk mengurangi *heat loss* pembakaran dan reduksi emisi partikulat [11]. Namun pada penelitian ini belum menjelaskan bentuk dimensi dari *flame connector* secara spesifik. Selanjutnya Abdel-Rehim *et al* menggunakan *bluff body* yang difungsikan sebagai *flame holder* untuk meningkatkan *flame stability* dan mempermudah kontrol pembakaran dengan menggunakan variasi bentuk geometri dan *blockage ratio*. Dengan meningkatnya nilai *blockage ratio*, diperoleh peningkatan stabilitas pembakaran pada *flame holder* [12]. Menurut Cresius penggunaan *blockage ratio* akan berpengaruh pada faktor hidrokinetik di mana akan diperoleh peningkatan nilai *coefficient of performance* yang cukup signifikan untuk peningkatan angka *blockage ratio* di atas 0,4 [13].

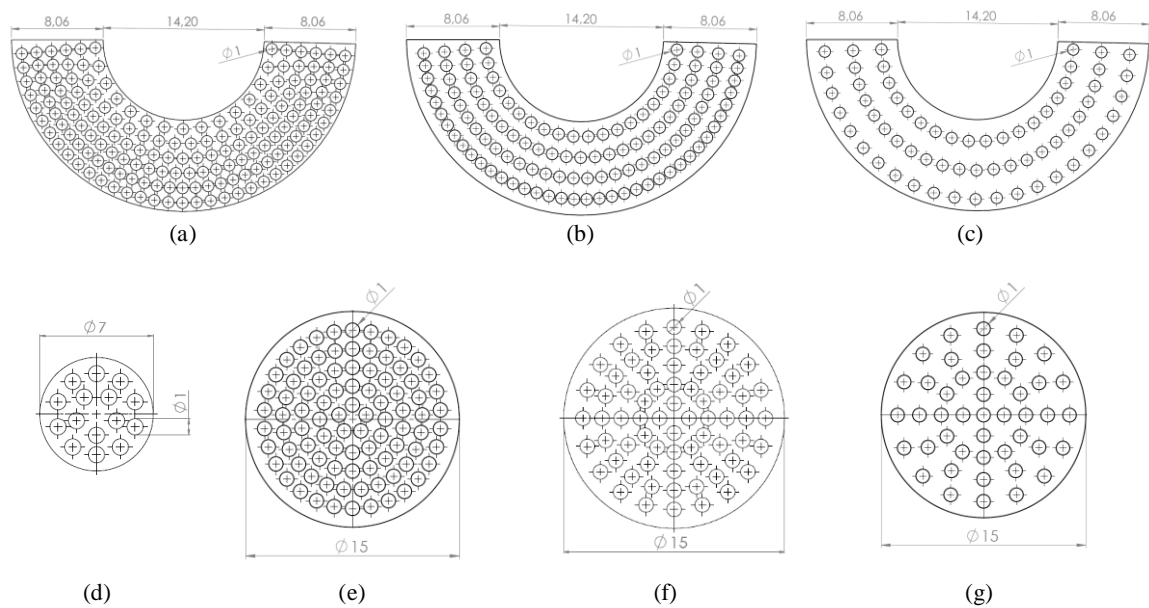
Hingga saat ini belum ada penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh pengaplikasian variasi *flame connector* pada *wood pellet stove* secara spesifik. Berdasarkan pada latar belakang tersebut, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut agar memperoleh desain *wood pellet stove* yang memiliki nyala api stabil dengan pembakaran yang lebih sempurna dan perpindahan panas yang lebih efisien. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh geometri dan *blockage ratio flame connector* pada *wood pellet stove* terhadap dimensi dan temperatur api, serta *specific fuel consumption* yang merupakan representasi dari efisiensi *stove*.

2. METODE DAN BAHAN

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi geometri *flame connector* yang digunakan, berbentuk *disk* dan *cone* (Gambar 1), serta nilai *blockage ratio* pada *flame connector* yaitu sebesar 0,6, 0,7, dan 0,8 seperti ditunjukkan pada Gambar 2. *Blockage ratio* adalah perbandingan antara luas bagian yang tertutup dan luas lubang pada *flame connector*. Variasi *blockage ratio* dilakukan dengan memvariasikan jumlah lubang berdiameter 1 cm pada *flame connector*, sehingga perbandingan luas antara bagian tertutup dan berlubang mencapai nilai yang diinginkan.. Selanjutnya diamati pula variasi pembakaran pada *wood pellet stove* tanpa *flame connector* sebagai data pembanding. Variabel terikat pada penelitian ini adalah visualisasi nyala api, temperatur nyala api, *specific fuel consumption*, dan *evaporated-corrected specific fuel consumption*. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah jumlah air yang digunakan untuk proses pendidihan sebanyak 3,5 kg, kecepatan udara pada sisi keluar *blower* sebesar 12 m/s, dan *feeding rate* bahan bakar sebesar 16 gram/detik dengan sistem *intermittent-continuous feeding* serta jumlah *fuel bed* awal dalam *combustion chamber* sebanyak 150 gram.



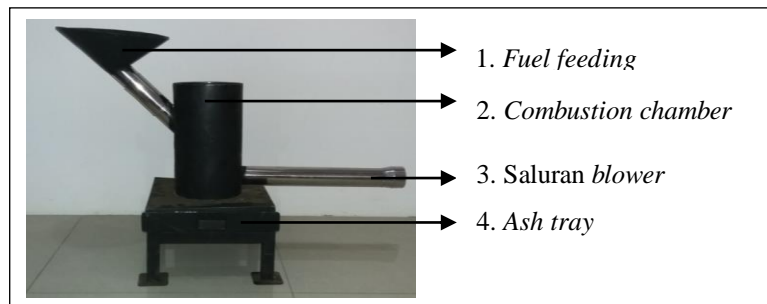
Gambar 1. Variasi geometri *flame connector* (a). *disk flame connector*, (b). *cone flame connector*.



Gambar 2. Variasi jumlah lubang pada *cone flame connector* dengan *blockage ratio* sebesar (a) 0,6 (b) 0,7 (c) 0,8; (d) alas *cone flame connector*; dan variasi jumlah lubang pada *disk flame connector* dengan *blockage ratio* sebesar (e) 0,6 (f) 0,7 (g) 0,8.

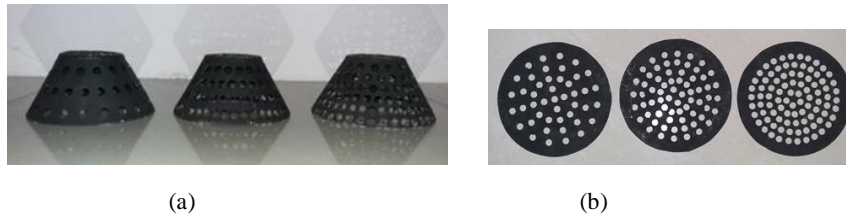
2.1 Bahan Eksperimental

Wood pellet stove (Gambar 3) digunakan sebagai kompor untuk pengujian pembakaran *wood pellet* dengan variasi geometri dan *blockage ratio* pada *flame connector* (Gambar 4). Gambar 3 merupakan bentuk fisik dari *wood pellet stove* dengan material besi plat SM dan *stainless steel*. *Stove* ini memiliki dimensi *combustion chamber* dengan diameter 15 cm dan tinggi 20 cm, dimensi *outer chamber* dengan diameter 20 cm (jarak *annulus* 2,5 cm) dan tinggi 30 cm, dimensi *ash tray* 30x30x5 cm, serta saluran *blower* dan *fuel feeding* dengan diameter 2 inci.



Gambar 3. *Wood pellet stove*.

Variasi *flame connector* (Gambar 4) digunakan sebagai komponen utama pada penelitian untuk mengetahui pengaruhnya terhadap pembakaran *wood pellet* pada pengujian visualisasi nyala api maupun *water boiling test*. Terdapat 6 variasi *flame connector* dengan 3 variasi angka *blockage ratio* (0,6, 0,7, dan 0,8) serta 2 variasi geometri (*disk* dan *cone*). Dimensi *cone flame connector* memiliki ukuran lingkaran bawah dengan diameter 15 cm, diameter lingkaran atas 7 cm, tinggi 5 cm dan dengan lubang-lubang berdiameter 1 cm. Dimensi *disk flame connector* memiliki diameter 15 cm dengan lubang-lubang berdiameter 1 cm.



Gambar 4. *Flame connector* dengan geometri (a) *cone* (b) *disk* dengan variasi *blockage ratio*.

Continuous feeding system (Gambar 5) digunakan sebagai sistem suplai bahan bakar *wood pellet* untuk proses pembakaran yang dilakukan secara *intermittent* - kontinyu. Sistem ini menggunakan *screw conveyor* yang menghubungkan *hopper* sebagai wadah bakar menuju *combustion chamber*. Sistem transport ini menggunakan motor AC 2 fase dengan daya 1 hP. Rentang *feeding rate* bahan bakar pada *continuous feeding* ini dapat diatur dengan kontrol *timer* pada 0-180 detik (baik untuk kondisi motor menyala ataupun motor mati). Pengumpanan *wood pellet* ke ruang bakar terjadi saat motor menyala dan terhenti ketika motor mati, dimana motor menyala dan mati secara periodik tergantung pengaturan pada kontrol *timer*.



Gambar 5. *Continuous feeding system*.

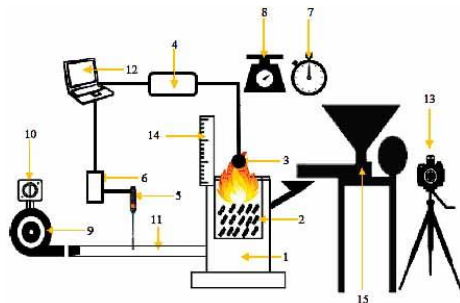
Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah *wood pellet* yang memiliki diameter 8 mm dan panjang antara 3 – 4 cm. *wood pellet* terbuat dari kayu jati yang dipadatkan dengan *pellet mill* dan memiliki *low heating value* sebesar 4210 kcal/kg.

2.2 Metode Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan dua pengujian yaitu pengujian visualisasi nyala api dan *water boiling test* versi 4.2.3. Skema pengujian visualisasi nyala api ditunjukkan pada Gambar 6. Untuk pengujian visualisasi nyala api, pada ruang bakar diletakkan *wood pellet* sebanyak 150 gr dan diberikan suplai udara pembakaran dari *blower* dengan kecepatan 12 m/s yang diatur dengan *dimmer* dan kecepatan diukur menggunakan *hot wire anemometer* untuk memperoleh nilai yang sesuai. Pengukuran kecepatan udara dilakukan pada saluran keluar *blower*. Udara dari *blower* masuk ke ruang bakar melalui lubang udara primer yang terletak pada bagian bawah ruang bakar dan lubang udara sekunder yang terletak di sekeliling ruang bakar. 10 mL etanol disiramkan pada *wood pellet* yang terletak ruang bakar dinyalakan dengan korek api. Nyala api mulai membesar dan setelah ukurannya stabil, pengumpanan *wood pellet* dengan *continuous feeding system* mulai dilakukan. Kontrol *timer* diatur sehingga motor menyala selama 5 detik dan mati selama 55 detik. Kondisi ini menghasilkan massa alir bahan bakar sebesar 16 gr/menit. Untuk pengukuran dimensi api, pada dinding *outer chamber* diletakkan penggaris untuk mengukur ketinggian nyala api. Visualisasi nyala api dilakukan dengan pengambilan video nyala api menggunakan kamera Canon 600d.

Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan *thermocouple* tipe K (Chromel – Alumel) dengan diameter 0,2 mm. Data temperatur pada tiap titik pengukuran dikonversikan oleh *data logger*

(DAQNavi-USB4718) menjadi bentuk digital dan disimpan pada laptop. Pengukuran temperatur dilakukan pada 5 titik yang berjarak 0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm dan 20 cm dari permukaan atas *combustion chamber*. Pengukuran temperatur nyala api dilakukan sepanjang sumbu ruang bakar. Pada pengambilan data ini dilakukan pengujian visualisasi nyala api untuk 6 variasi *flame connector* dan 1 variasi tanpa menggunakan *flame connector*.

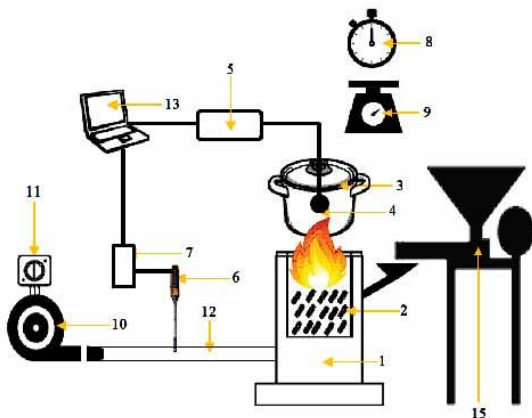


Keterangan:

- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| 1. Wood pellet stove | 9. Blower |
| 2. Wood pellet | 10. Dimmer potentiometer |
| 3. Thermocouple | 11. Saluran blower |
| 4. Data logger | 12. Laptop |
| 5. Hotwire anemometer | 13. Kamera |
| 6. Anemometer panel | 14. Penggaris |
| 7. Stopwatch | 15. Fuel feeder |
| 8. Timbangan | |

Gambar 6. Skema instalasi pengujian visualisasi nyala api.

Skema pengujian *water boiling test* ditunjukkan pada Gambar 7. Panci yang telah diisi air 3,5 kg diletakkan di atas kompor. Sebuah *thermocouple* diletakkan di dalam air pada ketinggian 5 cm dari dasar panci. Hasil pengukuran dari *thermocouple* akan dikonversikan oleh *data logger* dan disimpan pada laptop. Pembakaran *wood pellet* dikondisikan sama dengan penjelasan pada bagian sebelumnya. Pengambilan data ini dilakukan untuk uji fase *cold start* pada 6 variasi *flame connector* dan 1 variasi tanpa menggunakan *flame connector*.



Keterangan:

- | | |
|-----------------------|-------------------------|
| 1. Wood pellet stove | 1. Stopwatch |
| 2. Wood pellet | 2. Timbangan |
| 3. Panci | 3. Blower |
| 4. Thermocouple | 4. Dimmer potentiometer |
| 5. Data logger | 5. Saluran blower |
| 6. Hotwire anemometer | 6. Laptop |
| 7. Anemometer panel | 7. Fuel feeder |

Gambar 7. Skema instalasi pengujian *water boiling test*

Hasil pengujian *water boiling test* mencakup 7 parameter pengukuran yang terdiri dari massa *wood pellet* sebelum dan setelah pengujian, massa panci berisi air sebelum dan setelah pengujian, lama waktu pengujian, serta massa *char* dan abu yang terbentuk selama pengujian. Data ini selanjutnya diolah dan digunakan untuk menganalisa karakteristik pembakaran *wood pellet* yang diperoleh meliputi *specific fuel consumption* dan *evaporated-corrected specific fuel consumption*. Perhitungan untuk menentukan nilai dari variable tak bebas dalam penelitian ini dilakukan dengan persamaan-persamaan berikut.

a. Equivalent dry wood consumed

Equivalent dry wood consumed pada pengujian *water boiling test* merupakan penyesuaian dari jumlah *moist fuel* yang terbakar untuk mempertimbangkan dua faktor yaitu energi yang dibutuhkan untuk melepas *moisture* pada bahan bakar dan jumlah *char* tersisa yang tidak terbakar. Massa dari konsumsi *dry fuel* merupakan konsumsi *moist fuel* dikurangi massa air pada bahan bakar dan massa *char* yang terbentuk (persamaan 1) [14].

$$f_{cd} = \frac{f_{cm}(LHV(1-MC)-f_{cm} \times MC(4,186(T_b-T_a)+2257))-\Delta c_c \times LHV_{char}}{LHV} \quad (1)$$

keterangan:

| | |
|----------------------|---|
| f_{cd} | = <i>equivalent dry wood consumed</i> (gram) |
| f_{cm} | = konsumsi bahan bakar (gram) |
| LHV | = <i>low heating value</i> (Joule/gram) |
| MC | = <i>moisture content</i> (%) |
| C_p | ≈ 4,186 kJ/kgK |
| $\Delta h_{H_2O,fg}$ | ≈ 2257 kJ/kg |
| T_b | = temperatur didih air (°C) |
| T_a | = temperatur awal bahan bakar (°C) |
| ΔC_c | = perubahan massa <i>char</i> selama pengujian (gram) |
| LHV_{char} | = <i>low heating value of char</i> (Joule/gram) |

b. Specific fuel consumption

Specific fuel consumption dapat didefinisikan sebagai jumlah bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan sejumlah output tertentu. Pada WBT fase *cold-start high-power*, nilainya merupakan hasil pengukuran jumlah *wood pellet* untuk mendidihkan air sebanyak 1 kg dari kompor pada kondisi dingin (persamaan 2) [14].

$$SC_c = \frac{f_{cd}}{w_c} \quad (2)$$

SC_c = *specific fuel consumption* (gram *wood pellet*/ kg air)

f_{cd} = *equivalent dry wood consumed* (gram)

w_c = massa total pendidihan air (gram)

c. Evaporated-corrected specific fuel consumption

Evaporated-corrected specific fuel consumption merupakan koreksi perhitungan konsumsi bahan bakar spesifik dengan mengasumsikan bahwa kalor sensibel dan kalor laten yang terbentuk sepenuhnya digunakan hanya untuk proses pendidihan saja. Perhitungan ini digunakan untuk memperoleh korelasi yang sesuai terhadap nilai *thermal efficiency* untuk masing-masing variasi yang digunakan (persamaan 3).

$$SC_c^E = \frac{f_{cd}}{\left(\frac{4,186(T_{1cf}-T_{1ci})(P_{1ci}-P_1) + 2257 \times w_{cv}}{4,186(T_{1cf}-T_{1ci})(P_{1ci}-P_1)} \right) w_c} \quad (3)$$

SC_c^E = *Evaporated-corrected Specific fuel consumption* (gram *wood pellet*/ kg air)

f_{cd} = *equivalent dry wood consumed* (gram *wood pellet*)

C_p ≈ 4,186 kJ/kgK

T_{1cf} = temperatur air di akhir pengujian (°C)

T_{1ci} = temperatur air di awal pengujian (°C)

P_{1ci} = massa dari panci berisi air sebelum pengujian (gram)

P_1 = massa panci (gram)

$\Delta h_{H_2O,fg}$ ≈ 2257 kJ/kg

W_{cv} = massa air menguap (gram)

W_c = massa total pendidihan air (gram)

3. HASIL DAN DISKUSI

Sebelum melakukan pengambilan data pembakaran pada *wood pellet stove*, dilakukan pengukuran nilai kadar air atau *moisture content* bahan bakar dan pengujian kandungan bahan bakar *wood pellet*. Pengukuran *moisture content* dilakukan menggunakan *moisture analyzer* untuk 10 sampel acak *single pellet* (Tabel 1). *Wood pellet* harus mengandung kadar air tertentu yang umumnya sekitar 5-10% [15]. Setiap *single pellet* diuji menggunakan *moisture analyzer* pada suhu 110°C selama 10 menit. Timbang massa awal *single wood pellet*, kemudian panaskan pada 110°C selama 10 menit. Selanjutnya catat massa akhir *single wood pellet*, *moisture content* bahan bakar adalah selisih dari massa awal dan akhir *wood pellet*. Nilai rata-rata dari 10 sampel ini selanjutnya dijadikan nilai *moisture content* untuk keseluruhan *wood pellet*. Berdasarkan pengujian pada 10 sampel *single pellet*, diperoleh nilai rata-rata *moisture content* sebesar 7,04%. Nilai *moisture content* akan digunakan dalam perhitungan *equivalent dry fuel consumed* pada pengujian *water boiling test*.

Tabel 1. *Moisture content pada wood pellet*

| NO. SAMPEL | MASSA AWAL (GRAM) | MASSA AKHIR (GRAM) | MOISTURE CONTENT (%) |
|------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | 2,804 | 2,659 | 7,42 |
| 2 | 3,705 | 3,431 | 7,04 |
| 3 | 3,091 | 2,860 | 7,12 |
| 4 | 2,956 | 2,752 | 6,60 |
| 5 | 2,164 | 2,002 | 7,21 |
| 6 | 3,318 | 3,085 | 6,30 |
| 7 | 2,691 | 2,495 | 6,99 |
| 8 | 2,317 | 2,131 | 7,85 |
| 9 | 2,534 | 2,337 | 7,34 |
| 10 | 2,260 | 2,111 | 6,50 |
| Rata-rata | | | 7,04 |

3.1 Kandungan Bahan Bakar *Wood Pellet*

Berikut merupakan hasil analisis *ultimate* (Tabel 2) dan *proximate* (Tabel 3) untuk *wood pellet* dari serbuk kayu jati yang telah dilakukan di laboratorium Sucofindo. Analisis unsur kimia biomassa menggunakan analisis *ultimate* yang akan memberikan informasi tentang komposisi unsur. Semakin tinggi kadar karbon serta semakin rendah kadar hidrogen dan oksigen maka kualitas bahan bakar tersebut semakin tinggi [16].

Tabel 2. *Wood pellet ultimate analysis*

| PARAMETERS | UNIT | AR (AS RECEIVED) | TEST METHOD |
|------------|------|------------------|----------------|
| Carbon | % wt | 48,27 | ASTM D 5373-16 |
| Hydrogen | % wt | 5,13 | ASTM D 5373-16 |
| Nitrogen | % wt | 0,13 | ASTM D 5373-16 |
| Oxygen | % wt | 37,28 | ASTM D 3176-15 |

Analisis *proximate* digunakan untuk mengetahui properti fisik dari *wood pellet*. Parameter ini berpengaruh terhadap karakteristik pembakaran pada bahan bakar [17]. Kadar air *wood pellet* harus sesuai dengan standar yang diperbolehkan yaitu antara 5-10%. Kadar air pelet yang terlalu rendah (kurang dari 4%) memiliki kecenderungan untuk menyerap air dari udara sekitarnya sehingga pelet akan membengkak secara signifikan dan mudah hancur dalam beberapa hari. Sedangkan kadar air yang terlalu tinggi membuat lignin tidak efektif sebagai pengikat [2]. *Ash content* yang diperbolehkan memiliki rentang nilai 0,2-1,5%, dan standar kandungan sulfur antara 0,02-0,08%. Kadar abu yang terlalu tinggi tidak baik karena merupakan *non-combustible components*. Kadar *volatile matter* umumnya berkisar pada 80% [16]. Kandungan *volatile matter* yang lebih tinggi pada biomassa akan mempermudah dalam penyalaan. *Fixed carbon* memiliki peran untuk menghasilkan panas selama pembakaran di mana biomassa dengan kandungan karbon lebih banyak diharapkan mampu menghasilkan kalor pembakaran yang lebih tinggi [2].

Tabel 3. *Wood pellet proximate analysis*







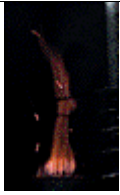











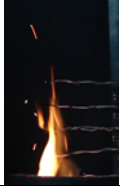


| PARAMETERS | UNIT | AR (AS RECEIVED) | DB (DRY BASIS) | TEST METHOD |
|--------------------|---------|------------------|----------------|------------------|
| Total moisture | % wt | 7,86 | - | ASTM D 3302-17 |
| Ash content | % wt | 1,26 | 1,36 | ASTM D 3174-12 |
| Volatile matter | % wt | 74,89 | 81,28 | ASTM D 3175-17 |
| Fixed carbon | % wt | 15,99 | 17,36 | ASTM D 3172-13 |
| Total sulfur | % wt | 0,07 | 0,07 | ASTM D 4239-17e2 |
| High heating value | kcal/kg | 4523 | 4909 | ASTM D 5865-13 |
| Low heating value | kcal/kg | 4210 | 4210 | ASTM D 5865-13 |

3.2 Visualisasi Nyala Api

Data visualisasi nyala api diperoleh dengan pengambilan gambar pada waktu proses pembakaran berlangsung. Data visualisasi nyala api dianalisa secara kualitatif dengan melihat geometri dan warna api yang dihasilkan pada masing-masing variasi *flame connector* yang digunakan. Tabel 4 menunjukkan hasil visualisasi pada menit ke- 1, 3, dan 5 pada proses pembakaran *wood pellet* untuk 6 variasi *flame connector* dan 1 variasi tanpa *flame connector*. Pada menit ke-1, berdasarkan pengukuran temperatur nyala api (Gambar 8) menunjukkan nilai temperatur pada titik terdekat dari *combustion chamber* ($T = 0$ cm) untuk seluruh variasi berada pada *range* 229,21-401,22°C. Pada menit ke-1 merupakan tahapan awal proses pembakaran *wood pellet* di mana terjadi proses penguapan gugus molekul air. Oleh karena itu, pada uji visualisasi nyala api yang dihasilkan cenderung berwarna oranye [18]. Sebagian dari kalor yang dilepaskan menuju bawah pada *fuel bed* selama pembakaran volatil dan *fixed carbon* digunakan untuk menguapkan *moisture content* pada lapisan di bawahnya [19]. Ketika kadar air seluruhnya telah terlepas, untuk temperatur yang lebih tinggi sekitar 300°C senyawa kayu yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin terdekomposisi menjadi *fixed carbon* dan sebagian mulai dilepas menjadi gas volatil [18].

Pada menit ke-3, berdasarkan pengukuran temperatur nyala api (Gambar 8) menunjukkan nilai temperatur pada titik terdekat dari *combustion chamber* ($T = 0$ cm) untuk seluruh variasi berada pada *range* 563,46-715,01°C. Untuk setiap variasi, nyala api menunjukkan ketinggian optimumnya pada menit ke-3. Hal ini dikarenakan adanya sejumlah massa *wood pellet* dalam *combustion chamber* untuk proses penyalaan di awal. Berdasarkan tahapan pembakaran pada *wood pellet* menit ke-3 ini telah memasuki tahapan kedua, yaitu proses pemisahan substansi volatil dari kayu yang kemudian bercampur dengan oksigen [18].

Tabel 4. Visualisasi nyala api pada *wood pellet stove*

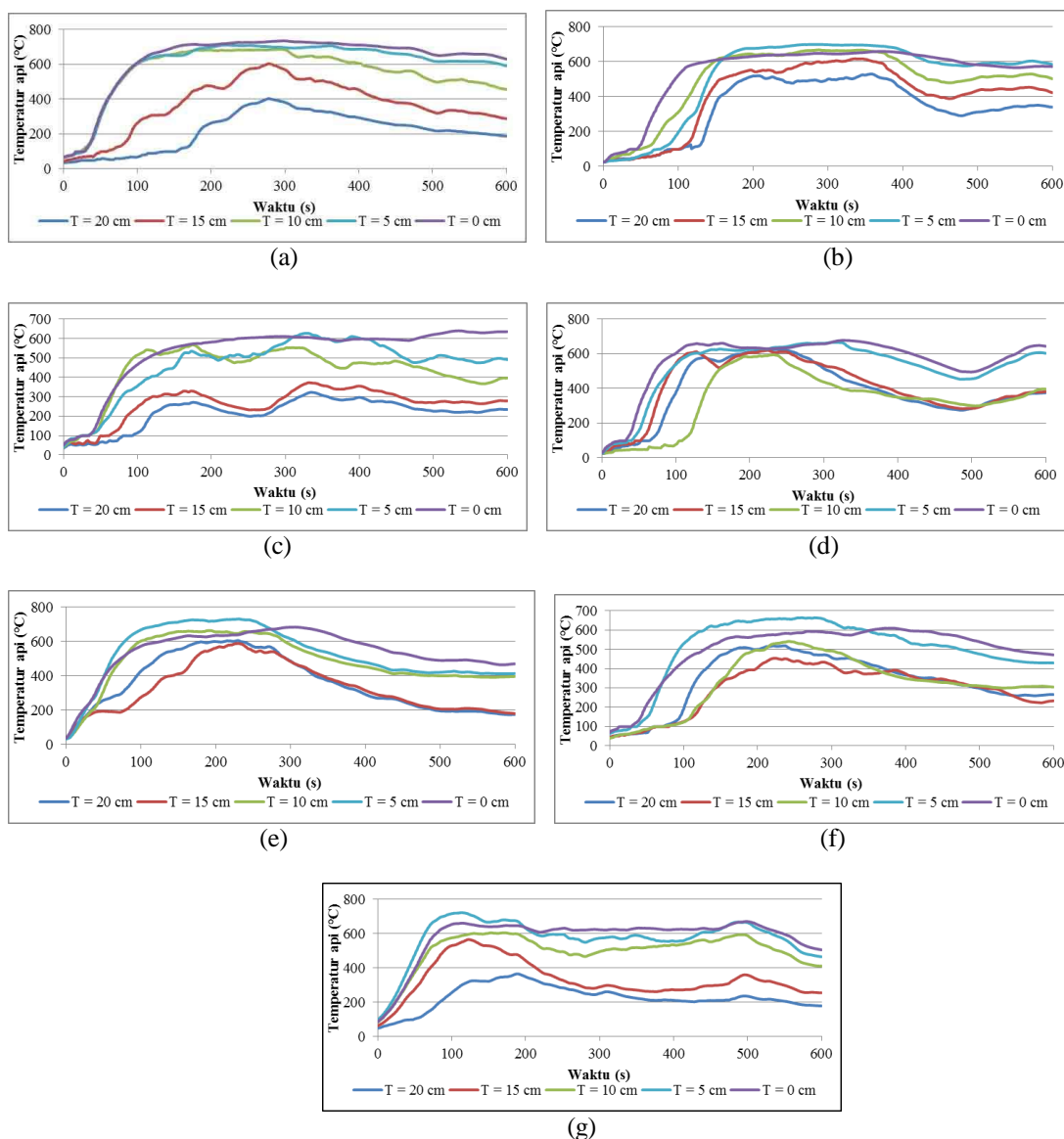
| FLAME CONNECTOR | MENIT KE-1 | MENIT KE-3 | MENIT KE-5 | FLAME CONNECTOR | MENIT KE-1 | MENIT KE-3 | MENIT KE-5 |
|------------------------------|---|---|---|------------------------|--|---|---|
| Disk 0,6 |  |  |  | Cone 0,6 |  |  |  |
| Disk 0,7 |  |  |  | Cone 0,7 |  |  |  |
| Disk 0,8 |  |  |  | Cone 0,8 |  |  |  |
| Tanpa <i>flame connector</i> |  |  |  | - | - | - | - |

Pada bagian *combustion chamber*, *fixed carbon* yang terbentuk di atas *fuel bed* terbakar bersamaan dengan pembakaran gas volatil di bagian atas menghasilkan nyala api yang cukup besar dibandingkan pada menit ke-1. Tahapan ini terjadi ketika temperatur api telah mencapai 550°C dan pada visualisasi nyala api menghasilkan nyala api kuning terang [18]. Pada menit ke-5, ketinggian api mulai menurun karena adanya perubahan laju pelepasan gas volatil dari *wood pellet* [18]. Laju pelepasan gas volatil ini sepenuhnya dipengaruhi oleh besarnya suplai *wood pellet* yang diberikan melalui pengontrolan *feeding rate*, yaitu sebesar 16 gram/menit. Perbandingan dari geometri api antara *disk* dan *cone flame connector* diperoleh bahwa *cone*

flame connector menghasilkan bentuk volume api yang lebih besar. Hal ini dikarenakan *cone flame connector* memiliki total luasan penampang yang jauh lebih besar dibandingkan *disk flame connector* sehingga diperoleh nyala api yang lebih merata.

3.3 Temperatur Nyala Api

Pengambilan data temperatur nyala api dilakukan bersamaan dengan pengujian visualisasi nyala api. Temperatur nyala api diukur di 5 titik ketinggian tepat di tengah pada pusat *combustion chamber*. Pengambilan data ini dilakukan secara vertikal dengan ketinggian 0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, dan 20 cm dari permukaan atas *combustion chamber*. Gambar 8 menunjukkan temperatur nyala api pada berbagai posisi aksial sebagai fungsi dari waktu. Pada pengukuran temperatur nyala api, *trend* temperatur tertinggi selalu diperoleh pada titik terdekat dengan *combustion chamber*, yaitu pada *thermocouple* dengan ketinggian 0 cm dan 5 cm dari *combustion chamber*. *Trend* nilai temperatur akan semakin rendah ketika titik pengukuran semakin jauh dari permukaan *combustion chamber*. Untuk setiap variasi *flame connector*, temperatur tertinggi diperoleh pada rentang menit ke-2 hingga ke-4. Hal ini dipengaruhi karena beberapa faktor di antaranya adalah besar laju pembentukan *volatile matter* yang dihasilkan dan tumpukan bahan bakar pada *combustion chamber* pada jumlah optimum untuk proses pembakaran [18].



Gambar 8: Hubungan waktu terhadap temperatur api pada variasi (a) *cone* 0,6 (b) *cone* 0,7 dan (c) *cone* 0,8 (d) *disk* 0,6 (e) *disk* 0,7 dan (f) *disk* 0,8 (g) tanpa *flame connector*

Pada *cone flame connector* diperoleh nilai maksimum temperatur api pada *blockage ratio* 0,6 terjadi pada titik T = 0 cm dengan temperatur 735,33°C, pada *blockage ratio* 0,7 terjadi pada titik T = 5 cm dengan temperatur 699,52°C, dan pada *blockage ratio* 0,8 terjadi pada titik T = 0 cm dengan temperatur 640,07°C.

Temperatur rata-rata untuk seluruh titik pada *cone flame connector* untuk *blockage ratio* 0,6; 0,7; dan 0,8 secara berturut-turut adalah 476,81°C; 465,385°C; dan 384,35°C. Pada *disk flame connector* diperoleh nilai maksimum temperatur api pada *blockage ratio* 0,6 terjadi pada titik T = 5 cm dengan temperatur 731,48°C, pada *blockage ratio* 0,7 terjadi pada titik T = 0 cm dengan temperatur 678,08°C, dan pada *blockage ratio* 0,8 terjadi pada titik T = 5 cm dengan temperatur 664,62°C. Temperatur rata-rata untuk seluruh titik pada *disk flame connector* untuk *blockage ratio* 0,6; 0,7; dan 0,8 secara berturut-turut adalah 450,75°C; 446,15°C; dan 394,79°C. Untuk variasi tanpa *flame connector* diperoleh nilai maksimum temperatur api pada T = 5 cm dengan temperatur 723,12°C dengan temperatur rata-rata untuk seluruh titik adalah 446,71°C.

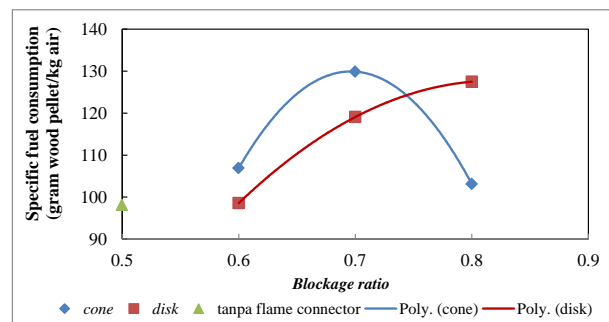
Nilai temperatur maksimum maupun rata-rata untuk tiap geometri akan semakin besar pada angka *blockage ratio* yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa angka *blockage ratio* 0,6 menghasilkan proses pembakaran *wood pellet* yang paling optimum, hal ini berhubungan dengan waktu tinggal reaktan yang lebih besar di dalam daerah reaksi pembakaran. Semakin kecil nilai *blockage ratio*, hambatan yang harus dilewati reaktan untuk keluar dari *combustion chamber* semakin besar, sehingga memerlukan tekanan yang sedikit lebih besar. Kondisi tersebut mengakibatkan akumulasi reaktan yang lebih besar di dalam ruang bakar, sehingga waktu tinggal reaktan di dalam ruan bakar lebih besar. Perbedaan temperatur rata-rata tidak terlalu signifikan antara *blockage ratio* 0,6 terhadap 0,7. Namun selisih nilainya cukup besar jika dibandingkan terhadap *blockage ratio* 0,8. Nilai temperatur maksimum akan semakin menurun untuk setiap kenaikan angka *blockage ratio*, yang artinya sebanding terhadap besarnya nilai efisiensi termal yang dihasilkan, yang ditunjukkan dengan nilai *specific fuel consumption* (Gambar 9). Temperatur maksimum dan efisiensi termal tertinggi untuk seluruh variasi diperoleh pada variasi *cone flame connector* dengan *blockage ratio* 0,6.

3.4 Water Boiling Test

Pengujian *water boiling test* dilakukan untuk memperoleh data karakteristik pembakaran *wood pellet stove* menggunakan variasi *flame connector* secara kuantitatif. Pengambilan data yang dilakukan pada saat pengujian meliputi massa *wood pellet* sebelum dan setelah pengujian, massa panci berisi air sebelum dan setelah pengujian, lama waktu pengujian, serta massa dari abu dan *char* yang terbentuk di akhir pengujian. Dari 7 poin pengambilan data yang telah dilakukan, selanjutnya dilakukan pengolahan data *water boiling test* untuk mengetahui karakteristik pembakaran yang dihasilkan pada tiap variasi *flame connector* yang digunakan. Pengolahan data *water boiling test* yang digunakan ialah untuk menghitung nilai *specific fuel consumption* yang akan dijadikan sebagai parameter karakteristik pembakaran yang dihasilkan. Untuk memperoleh data konsumsi spesifik bahan bakar yang analog dengan nilai efisiensi, selanjutnya digunakan persamaan *evaporated-corrected specific fuel consumption*. Persamaan ini mempertimbangkan adanya energi yang digunakan untuk menguapkan sejumlah air selama proses pendidihan.

3.4.1 Specific Fuel Consumption

Pada biomassa yang mengandung kadar air, sebagian energinya digunakan untuk melepaskan kadar air tersebut. Oleh karena itu jumlah aktual biomassa yang benar-benar digunakan untuk mendidihkan air perlu diperhitungkan [8]. *Specific fuel consumption* merupakan perhitungan jumlah energi bahan bakar spesifik yang diperlukan untuk proses pendidihan. Nilai *specific fuel consumption* diperoleh dengan memperhitungkan *equivalent dry fuel consumed* dibagi dengan massa total pendidihan air. *Equivalent dry fuel consumed* diperoleh dengan mempertimbangkan adanya kadar air pada bahan bakar serta adanya sejumlah massa *char* yang terbentuk setelah proses pendidihan selesai [14].



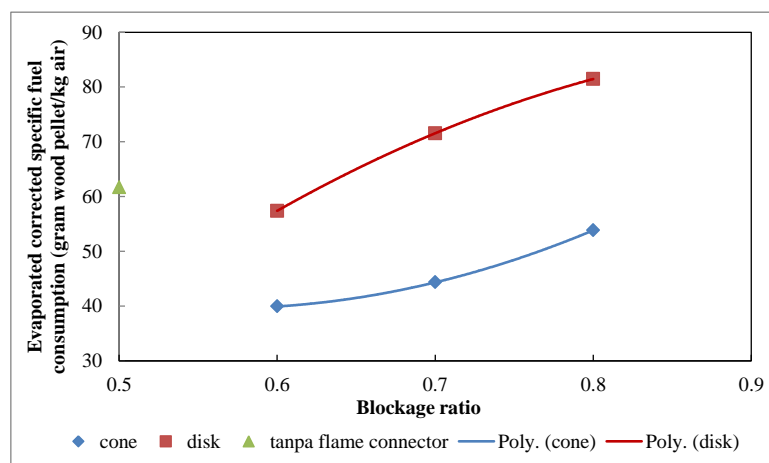
Gambar 9. Pengaruh variasi *flame connector* terhadap *specific fuel consumption*

Dari Gambar 9, *specific fuel consumption* tertinggi diperoleh pada variasi *cone* 0,7 sebesar 129,89 gram *wood pellet*/kg air dan terendah diperoleh pada variasi tanpa *flame connector* sebesar 98,15 gram *wood*

pellet/kg air. Konsumsi bahan bakar dengan menggunakan *flame connector* lebih besar dikarenakan untuk setiap variasi *flame connector* memiliki nilai *fire power* yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa *flame connector*. Hal tersebut menyebabkan waktu yang dibutuhkan untuk proses pendidihan lebih lama sehingga *specific fuel consumption* lebih besar. Perbedaan kecenderungan nilai *specific fuel consumption* pada variasi *disk* dengan *cone* ini dipengaruhi oleh *boiling time* dan *burning rate* masing-masing variasi. Pada kedua variasi geometri yang digunakan, *burning rate* dari tertinggi secara berturut-turut diperoleh pada *blockage ratio* 0,7, 0,8, dan 0,6. Namun pada angka *blockage ratio* 0,8, variasi *cone* memiliki waktu *boiling time* paling singkat sedangkan pada variasi *disk* memiliki waktu *boiling time* paling lama. Faktor inilah yang menyebabkan pada angka *blockage ratio* 0,8 nilai *specific fuel consumption* pada variasi *cone* memiliki nilai paling minimum, sedangkan pada variasi *disk* memiliki nilai paling maksimum.

3.4.2 Evaporated-corrected specific fuel consumption

Evaporated-corrected specific fuel consumption merupakan koreksi perhitungan konsumsi bahan bakar spesifik dengan mengasumsikan bahwa kalor sensibel dan kalor laten yang terbentuk sepenuhnya digunakan hanya untuk proses pendidihan saja. Perhitungan ini digunakan untuk memperoleh korelasi yang sesuai pada nilai *thermal efficiency* terhadap *specific fuel consumption* pada masing-masing variasi yang digunakan.



Gambar 10. Pengaruh variasi *flame connector* terhadap *evaporated-corrected specific fuel consumption*

Dari Gambar 10, *evaporated-corrected specific fuel consumption* tertinggi diperoleh pada variasi *disk* 0,8 yaitu sebesar 81,46 gram *wood pellet/kg* air dan terendah pada variasi *cone* 0,6 yaitu sebesar 39,92 gram *wood pellet/kg* air. Nilai *evaporated-corrected specific fuel consumption* selalu berbanding terbalik dengan nilai *thermal efficiency*. Hal ini terjadi karena semakin besar kalor yang dapat dimanfaatkan untuk proses pendidihan air, maka konsumsi spesifik bahan bakar yang diperlukan akan semakin rendah.

4. KESIMPULAN

Penggunaan *cone flame connector* dapat menghasilkan geometri api yang lebih besar dan bervolume dibandingkan dengan *disk flame connector* karena *cone flame connector* memiliki total luasan penampang yang jauh lebih besar dibandingkan *disk flame connector*. Temperatur nyala api paling tinggi diperoleh pada titik terdekat dengan *combustion chamber*. Semakin jauh titik pengukuran api, maka nilai temperaturnya semakin rendah. Nilai temperatur maksimum maupun rata-rata untuk setiap geometri akan semakin besar pada angka *blockage ratio* yang lebih kecil. Temperatur api tertinggi diperoleh pada variasi *cone* 0,6 dan terendah pada variasi *cone* 0,8. Penggunaan *flame connector* menghasilkan *specific fuel consumption* yang lebih besar dibandingkan tanpa *flame connector*. Hal ini diakibatkan karena nilai *fire power* yang lebih rendah pada penggunaan *flame connector* menyebabkan waktu yang diperlukan untuk pendidihan lebih lama dan konsumsi bahan bakar lebih besar. Dengan adanya faktor koreksi terhadap penguapan sejumlah massa air, maka konsumsi spesifik bahan bakar berbanding terbalik dengan nilai *thermal efficiency* yang dihasilkan. Konsumsi bahan bakar spesifik rendah pada variasi dengan nilai *thermal efficiency* yang tinggi. *Evaporated-corrected specific fuel consumption* tertinggi diperoleh pada variasi *disk* 0,8 dan terendah pada variasi *cone* 0,6.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] BADAN PENGKAJIAN DAN PENERAPAN TEKNOLOGI., *Outlook Energi Indonesia 2017: Inisiatif Pengembangan Teknologi Energi Bersih.*, Jakarta, BPPT, 2017.
- [2] PURWANTO, WIDODO W., SUPRAMONO D., & FISAFARANI H., “Biomass Waste and Biomass Pellets Characteristics and Their Potential in Indonesia”, In *Proceedings of The 1st International Seminar on Fundamental and Application of Chemical Engineering*, Bali, Nov. 2010.
- [3] CHRISTOFER R, OHMAN M. & WASTERLUND, I., “Effect of Raw Material Composition in Woody Biomass Pellets on Combustion Characteristics”, *Biomass & Bioenergy*, v. 31, n. 1, pp. 66-72, 2007.
- [4] IEA., *Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*, Enschede, Twente University Press, 2002.
- [5] SKJEVRAK G, SOPHA BM., “Wood-Pellet Heating in Norway: Early Adopters Satisfaction and Problems that Have Been Experienced”, *Sustainability*, v. 4, pp. 1089-1103, 2012.
- [6] BALDWIN, S. F., *Biomass Stove Engineering Design, Development*. Arlington, Virginia: Volunteers in Technical Assistance - VITA (with Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University).
- [7] BAILIS, R., OGLE, D., MACCARTY, N. & STILL, D., *The Water Boiling Test (WBT) version 4.12*, Household Energy and Health Programme, Shell Foundation, 2009.
- [8] JAIN, T. & SHETH, P.N., “Design of energy utilization test for a biomass cookstove: Formulation of an optimum airflow recipe”, *Energy*, v. 166, pp. 1097-1105, 2019.
- [9] BUCHMAYR, M., GRUBER, J., HARGASSNER, M. & HOCHENAUER, C., “Experimental Investigation of the Primary Combustion Zone During Staged Combustion of Wood-chips in a Commercial Small-scale Boiler”, *Biomass and Bioenergy*, v. 81, pp. 356-363, 2015.
- [10] GOGOI, B. & BARUAH D. C., “Steady-State Heat Transfer Modeling of Solid Fuel Biomass Stove: Part 1”, *Energy*, v. 97, pp. 283-295, 2016.
- [11] IGBOANUGO, A.C. & AJIEH, M.U., “Design and construction of a biomass stove for cooking in rural settlements in Nigeria”, *Nigerian Research Journal of Engineering and Environmental Sciences*, v. 2, n. 2, pp. 351-359, 2017.
- [12] ABDEL-REHIM A. A., EL-NAGAR K. H. & ELSEMARY I. M. M., “Effect of Bluff Body Geometry on Flame Stabilization with the Assist of Langmuir Probe”, Cairo: Benha University, 2013.
- [13] CRESIUS, P. M., *The Effect of Blockage Ratio and Distance from a Free Surface on the Performance of a Hydrokinetic Turbine*, Thesis. Pennsylvania, Lehigh University, 2013.
- [14] INTERNATIONAL WORKSHOP AGREEMENT, *The Water Boiling Test Version 4.2.3: Cookstove Emissions and Efficiency in a Controlled Laboratory Setting*, Pennsylvania, IWA, 2014.
- [15] DENG, T., ALZAHIRANI, A. M. & BRADLEY, M. S., “Influences of Environmental Humidity on Physical Properties and Attrition of Wood Pellets”, *Fuel Processing Technology*, v. 185, pp. 126-138, 2019.
- [16] PELLETS ATLAS, *English Handbook for Wood Pellet Combustion: Development and Promotion of a Transparent European Pellets Market*, Knowlhill, National Energy Foundation, 2009.
- [17] SINGH, Y. D., MAHANTA, P., & BORA, U., “Comprehensive Characterization of Lignocellulosic Biomass Through Proximate, Ultimate and Compositional Analysis for Bioenergy Production”, *Renewable Energy*, v. 103, pp. 490-500, 2017.
- [18] KUMAR, M. KUMAR, S. & TYAGI S. K., “Design, Development and Technological Advancement in the Biomass Cookstoves: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 26, pp. 265-285, 2013.
- [19] GOGOI, B. & BARUAH D. C., “Steady-State Heat Transfer Modeling of Solid Fuel Biomass Stove: Part 1”, *Energy*, v. 97, pp. 283-295, 2016.