

Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Sistem Ceratan pada Gasifikasi Biomassa Briket *Municipal Solid Waste* terhadap Performa *Gasifier* Tipe *Downdraft*

Hendra Bhakti dan Bambang Sudarmanta

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: sudarmanta@me.its.ac.id

Abstrak—Pemanfaatan *syngas* sebagai bahan bakar campuran bahan bakar mesin *Diesel Dual Fuel (DDF)* menimbulkan permasalahan yaitu terbuangnya *syn-gas* karena kelebihan produksi. Penelitian dimaksudkan melakukan penambahan sistem ceratan untuk mengalirkan kembali *syngas* yang terbuang karena sisa pembakaran mesin DDF ke dalam reaktor. *Syngas* yang dipakai berasal dari proses gasifikasi yang dilakukan pada *downdraft gasifier* dengan bahan bakar briket MSW. Mekanisme ceratan gas hasil gasifikasi dilakukan dengan pemasangan katup pada pipa aliran *syn-gas* setelah *induced fan* menuju reaktor gasifikasi kembali. *Syngas* hasil ceratan di campur dengan udara sebagai *gasifying agent* dengan *mixer* sebelum masuk ke blower udara. Laju alir massa *syn-gas* yang dicerat divariasikan mulai 0%, 11%, 23%, dan 54%. Dari penelitian dan analisa yang telah dilakukan, diketahui bahwa nilai rasio udara-bahan bakar menurun seiring penambahan ceratan *syn-gas* yaitu dari 1,04 – 0,44 dan equivalence ratio dari 0,18 – 0,09. Dengan penambahan ceratan diketahui efisiensi terbaik terjadi saat penambahan prosentasi ceratan 11% dengan efisiensi sebesar 66,81%. LHV meningkat seiring penambahan ceratan dengan LHV terbaik terjadi pada ceratan *syn-gas* 55% sebesar 3912,37 kJ/kg. Temperatur kerja gasifikasi cenderung menurun dengan penambahan ceratan *syn-gas*. Temperatur kerja T1 – T5 berada pada kisaran 70, 250, 983, 589, dan 115 °C. Kandungan *combustible* gas meningkat dan *uncombustible* gas menurun seiring dengan penambahan ceratan *syn-gas*. Nilai kalor briket MSW sebesar 4698 kJ/kg.

Kata Kunci—ceratan, MSW, gasifikasi, performa, *syn-gas*, temperatur.

I. PENDAHULUAN

Jumlah penduduk Indonesia meningkat dari 205 juta jiwa pada tahun 2000 mencapai 245 juta jiwa pada tahun 2012 dengan pertumbuhan rata-rata 1,31% per tahun [1]. Di sisi lain, cadangan sumber energi utama Indonesia yaitu bahan bakar fosil kian menipis. Dengan pola konsumsi yang boros dan semakin banyak mengakibatkan cadangan tersebut semakin kritis. Oleh karena itu, perlu adanya solusi guna mengoptimalkan konsumsi energi yang ada serta pengembangan energi alternatif terbarukan.

Sampah merupakan masalah yang harus ditanggulangi secepatnya. *Municipal Solid Waste (MSW)* atau sampah padatan kota adalah jenis sampah umum yang mencakup sampah rumah tangga, sampah badan komersil, sampah di area-area umum dan ada kalanya sampah hasil *treatment plant site* yang dikumpulkan *municipality*

dalam wilayah tertentu. Menurut Status Lingkungan Hidup Daerah Kota Surabaya [2], volume sampah yang masuk ke TPA sebesar 10.000 m³/hari. Sedangkan timbulan sampah kota Surabaya tahun 2012 sebesar 1200 ton/hari. Komposisi sampah tersebut antara lain: sampah organik 64,1%, sampah kertas 7,58%, sampah plastik 7,69 %, logam 1,11%, dan 9,46% lain-lain. Sedangkan untuk kadar air sampah di dataran tinggi pada musim hujan dan kemarau sekitar 43% dan 35% [2].

Gasifikasi adalah proses perubahan bahan bakar padat secara termokimia menjadi gas (*syngas*) yang *flammable*. Perbandingan udara dan bahan bakar pada proses gasifikasi lebih rendah daripada pembakaran normal (stoikiometri). *Syngas* biasanya dimanfaatkan sebagai bahan bakar campuran pada motor pembakaran dalam.

Namun demikian, timbul beberapa masalah dalam pemanfaatan tersebut. Salah satunya adalah konsumsi *syngas* maupun minyak solar sebagai bahan bakar yang tidak tetap. Hal tersebut dipengaruhi oleh putaran dan beban yang diterima oleh mesin. Di sisi lain, operasional sebuah *gasifier* cenderung pada interval tertentu, sehingga terjadi ketidak- sesuaian antara produksi dan konsumsi *syngas*. Dari fakta tersebut, didapatkan gagasan untuk melakukan ceratan atau *bypass* pada *syngas* sisa yang terbuang untuk dimasukkan ke dalam reaktor kembali. Ceratan dimaksudkan sebagai pemanas reaktor tambahan dan campuran *gasifying agent*. Dari mekanisme tersebut juga diharapkan dapat menampung kembali *syngas* sisa hasil produksi yang terbuang.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Briket MSW

Briket adalah sebuah blok bahan padat yang dapat digunakan sebagai bahan bakar dengan ketahanan dalam menjaga kualitas api pembakaran. *Municipal Solid Waste (MSW)* merupakan sampah kota yang dihasilkan dari sisa konsumsi harian rumah tangga dan juga industri. Setiap jenis sampah memiliki fraksi massa dan volume yang berbeda-beda.

TABEL 1. FRAKSI MASSA DAN VOLUME TIAP KOMPONEN MSW [3]

Component	Mass Fraction (%)	Volume Fraction (%)
Organic matter	35.58	44.51
Food waste	22.58	11.75
Paper	13.67	14.24
Recyclable plastic	7.06	15.30
Non recyclable Plastic	5.69	4.91
Glass	3.19	2.58
Metal	3.31	1.61
Textile	1.94	0.92
Rubber	0.68	0.36
Styrofoam	0.25	0.83
Electronic waste	0.56	0.4
Others	5.49	2.59

B. Bahan Bakar

Secara umum bahan bakar dibedakan menjadi 3 yaitu bahan bakar minyak, padat, dan gas. Properties umum dari bahan bakar yaitu *density*, *specific gravity*, *API gravity*, *viskositas*, *flash point*, *pour point*, *shulpur content*, *destilasi*, *cetane number*, *calorific value*, *carbon residue*.

C. Karakteristik Bahan Bakar

Secara umum, karakteristik bahan bakar dapat dianalisa dengan 2 (dua) cara yaitu *ultimate* dan *proximate*. Untuk mengetahui karakter dan komposisi dari biomass digunakan metode pemeriksaan secara analitis (analisa *proximate*) dan pemeriksaan secara kimia (analisa *ultimate*) deskripsi mengenai kedua analisa ini terdapat dalam ASTM. Pada analisa *proximate* yang dianalisa adalah kandungan air (*moisture*), *volatile matter*, karbon tetap, dan abu. Sedangkan analisa *ultimate* menyatakan komposisi dari karbon, hidrogen, nitrogen, belerang, dan oksigen.

D. Parameter Pengoperasian Reaktor Gasifikasi

1) Equivalence ratio (λ)

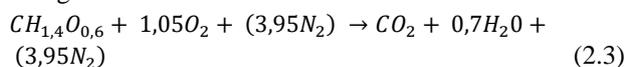
Equivalence ratio (λ) adalah parameter yang sangat penting pada pengoperasian reaktor gasifikasi. ER merupakan perbandingan antara *air-fuel ratio* (AFR) aktual pada pengoperasian reaktor gasifikasi dengan *air-fuel ratio* (AFR) stoikiometri.

$$\lambda = AFR_{aktual} / AFR_{stoikiometri} \tag{2.1}$$

AFR merupakan perbandingan antara jumlah udara dengan jumlah bahan bakar pada proses pembakaran. AFR stoikiometri adalah jumlah perbandingan udara dan bahan bakar yang menghasilkan pembakaran sempurna.

$$AFR = \text{Massa}_{\text{udara}} / \text{Massa}_{\text{bahan bakar}} \tag{2.2}$$

Kondisi stoikiometri teoritis biomassa diperoleh dengan mengetahui terlebih dahulu kandungan unsur kimia dari biomassa, kemudian dilakukan perhitungan persamaan reaksi yaitu reaksi oksidasi. Reed dan Dash[5] memberikan rumus kimia rata-rata dari biomassa yaitu $CH_{1,4}O_{0,6}$, sehingga bila direaksikan dengan udara akan menjadi pembakaran sempurna sebagai berikut :



Nitrogen ditunjukkan dalam tanda kurung karena merupakan bagian yang tidak berubah (*inert*) dari udara dan tidak turut serta dalam reaksi dan tetap muncul pada hasil reaksi. Dari reaksi diatas dapat dilihat perbandingan antara udara dan biomassa untuk

pembakaran sempurna adalah 10 berbanding 1 (AFR = 10).

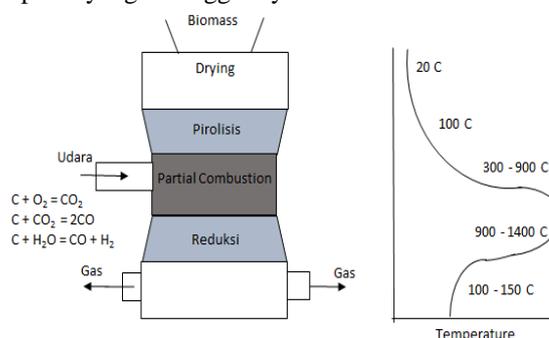
2) Suhu reaktor gasifikasi

Dalam setiap langkah proses gasifikasi yang terjadi dalam reaktor gasifikasi selalu berhubungan erat dengan temperatur untuk masing-masing proses, sehingga dalam satu reaktor gasifikasi terdapat profil sebaran suhu yang dapat merepresentasikan masing-masing zona dari proses gasifikasi.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, bahwa suhu ini juga terkait dengan nilai *equivalence ratio*. Selain itu suhu atau profil suhu pada reaktor gasifikasi juga dipengaruhi oleh faktor parameter yang lain, seperti: properti biomassa, *superficial velocity*, suhu media gasifikasi, insulator, dan yang lainnya. Pada sisi lain suhu reaktor gasifikasi menjadi penentu dari beberapa parameter unjuk kerja dari reaktor gasifikasi, seperti : tingkat keadaan abu, komposisi dan keberadaan tar pada syngas.

3) Superficial velocity/hearth load

Parameter operasional reaktor gasifikasi ini mungkin agak sedikit sulit untuk dibayangkan akan tetapi memegang peranan yang penting. *Superficial velocity* walaupun terdapat kata “kecepatan (*velocity*)” dan memiliki satuan m/s akan tetapi sebenarnya bukan kecepatan yang sesungguhnya.



Gambar 1. Profil suhu dan zona pada reaktor gasifikasi downdraft. [4]

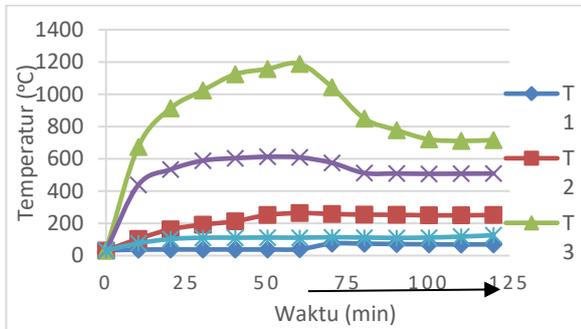
Superficial velocity diukur pada bagian tersempit dari reaktor gasifikasi, dan didapatkan dengan membagi laju volume gas pada bagian tersebut dengan *cross sectional area* bagian tersebut. Walaupun memiliki satuan kecepatan, akan tetapi pengertian sebenarnya dari *superficial velocity* adalah laju spesifik produksi gas [5].

4) Komposisi dan properti fisik biomassa

Pada dasarnya unjuk kerja proses gasifikasi pada reaktor gasifikasi juga sangat dipengaruhi oleh properti spesifik dari biomassa. Properti yang paling penting pada gasifikasi adalah komposisi elemen/unsur biomassa, nilai kalor, kandungan abu, kadar kelembaban, kadar *volatile mater*, unsur yang terkandung lainnya (N, S, Cl, alkali, logam berat, dan lainnya), densitas dan ukuran.

5) Komposisi dan suhu media gasifikasi

Parameter komposisi dan suhu media gasifikasi banyak mempengaruhi keseimbangan massa dan energi dalam proses gasifikasi. Untuk media gasifikasi yang tetap, maka suhu media gasifikasi yang akan masuk dalam reaktor akan mempengaruhi profil temperatur dalam reaktor gasifikasi. Demikian juga akan berhubungan dengan kemungkinan untuk pendaur- ulangan panas yang terdapat pada *syngas*. Komposisi media gasifikasi juga terkait dengan hasil akhir dari proses gasifikasi, yaitu nilai kalor dari *syngas*.



Gambar 4. Distribusi temperature pada $\lambda = 0,09$ dengan laju alir massa ceratan syn-gas 0,00042 kg/s waktu

E. Parameter Unjuk Kerja Reaktor Gasifikasi

1) Komposisi gas

Sama halnya dengan analisa komposisi pada biomassa, maka syngas juga harus dianalisa komposisi gasnya. Unsur yang ada dalam syngas umumnya adalah CO, CO₂, H₂, CH₄, hidrokarbon berat dan N₂. Kandungan gas tersebut ada yang bisa terbakar seperti CO, H₂ dan CH₄ serta gas yang tidak bisa terbakar seperti CO₂ dan N₂. Dari komposisi gas tersebut, nantinya dapat diperhitungkan kandungan energi dalam gas ataupun untuk menganalisa pengoperasian dari reaktor gasifikasi. Analisa rasio antara CO dan CO₂ (CO/CO₂) adalah salah satu cara untuk mengukur kualitas dari gas dan proses gasifikasi.

2) Nilai kalor gas

Jumlah kandungan energi pada syngas dapat dihitung secara teoritis dari analisa komposisinya, yaitu dengan menggunakan persamaan untuk menghitung Nilai Kalor Bawah gas (NKB_{gas}) sebagai berikut :

$$NKB_{GAS} = \sum_{i=1}^n (Y_i \cdot NKB_i) \quad (2.4)$$

Keterangan :

Y_i = konsentrasi gas yang terbakar (CO, CH₄, H₂)
 NKB_i = Nilai kalor bawah gas terbakar (CO, CH₄, H₂)

3) Cold gas efficiency

Cold gas efficiency (η_{CG}) merupakan perbandingan antara energi kimia yang dihasilkan oleh syngas (didapatkan dari perkalian antara laju alir massa dengan Nilai Kalor Bawah gas) dengan energi kimia dari biomassa (didapatkan dari perkalian antara laju alir massa biomassa dengan Nilai Kalor Bawah biomassa).

$$\eta_{CG} = \frac{(\dot{m}_{gas} \cdot NKB_{gas})}{(\dot{m}_{biomassa} \cdot NKB_{biomassa})} \quad (2.5)$$

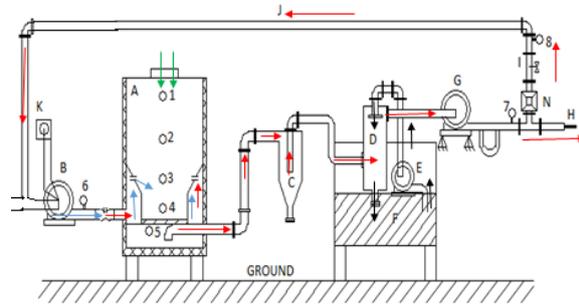
4) Kandungan tar

Kandungan tar merupakan parameter yang krusial. Hal tersebut dikarenakan tar yang merupakan campuran kompleks dari hidrokarbon yang dapat terkondensasi, termasuk di dalamnya senyawa aromatik satu cincin hingga lima cincin dan juga terdapat hidrokarbon yang mengandung oksigen dan hidrokarbon poliaromatik, menyebabkan masalah pada proses juga pada peralatan lain yang menggunakan syngas.

III. METODE PENELITIAN

A. Skema Percobaan

Keterangan pada gambar, angka 1-5 menunjukkan termokopel pada zona gasifikasi sedangkan angka 6-8 merupakan flowmeter. Keterangan A-K adalah reactor, blower udara, cyclone, water scrubber, pump, water tank, induce fan, burner, katup ceratan, pipa ceratan, dan dimmer.



Gambar 2. Skema percobaan dengan tambahan system ceratan

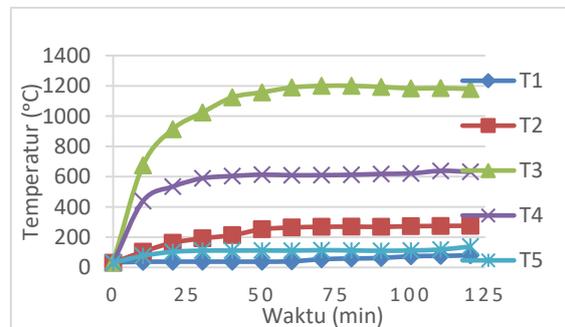
Termokopel digunakan sebagai alat ukur guna mengetahui distribusi temperatur didalam reactor selama proses gasifikasi, sedangkan flowmeter digunakan untuk mengukur laju alir udara dan syn-gas. Pemasukan bahan bakar briket MSW secara semi batch sebanyak 5kg.

IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

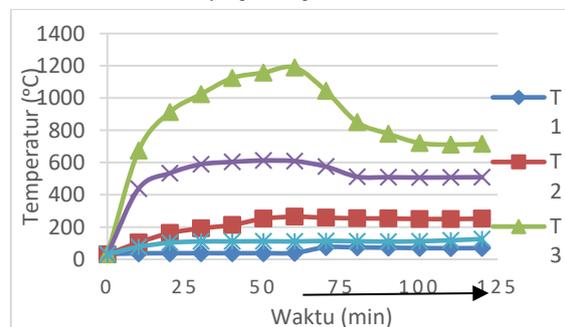
A. Analisa Propertis Briket Municipal Solid Waste

Biomassa yang digunakan telah dilakukan pengujian nilai kalornya yang dilakukan di laboratorium pusat studi energi dan rekayasa ITS, dengan nilai LHV sebesar 4698 kJ/kg. Biomassa briket MSW yang digunakan dalam pengujian memiliki kandungan moisture content sebesar 20% - 25%. Komposisi yang digunakan 60% organik dan 40% anorganik.

B. Distribusi Temperatur Reaktor



Gambar 3. Grafik distribusi Temperatur pada $\lambda = 0,18$ tanpa penambahan ceratan syn-gas fungsi waktu



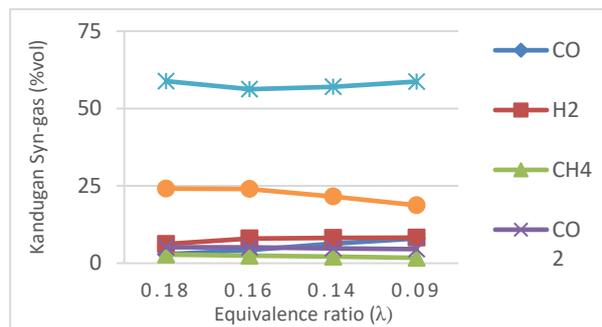
Gambar 4. Distribusi temperature pada $\lambda = 0,09$ dengan laju alir massa ceratan syn-gas 0,00042 kg/s waktu

Ceratan synthetic gas dimasukkan pada menit ke 60 setelah dari percobaan sebelumnya dilihat trend konstan pada termokopel 3 yang merupakan zona krusial gasifikasi.

Pada termokopel 1, 2, 4, 5 (T1, T2, T4, T5) tidak terjadi perubahan yang signifikan. Pada termokopel 3 (T₃), fenomena distribusi temperatur yang terjadi adalah menurun lebih cepat hingga konstan pada kisaran 720 °C daripada distribusi pada variasi awal tanpa penambahan ceratan syn-gas. Hal tersebut dikarenakan ceratan syngas yang masuk menambah jumlah bahan bakar atau

biomassa, sehingga rasio udara pembakaran (AFR) menurun. Dimana hal tersebut sesuai dengan teori bahwa semakin rendah nilai AFR maka semakin lambat pula proses terjadinya pembakaran di dalam reaktor dan temperatur pembakaran semakin menurun.

C. Analisis Kandungan synthetic-gas



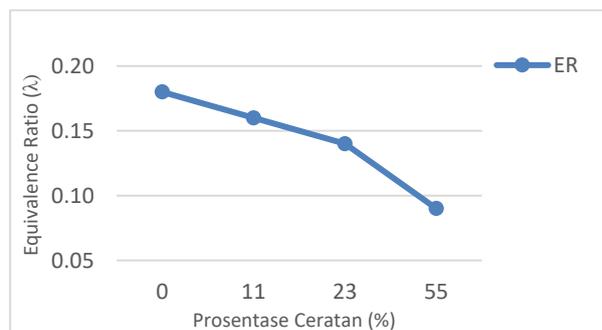
Gambar 5. Grafik kandungan synthetic gas terhadap Equivalence ratio

Konsentrasi kandungan synthetic gas pada combustible gas cenderung mengalami peningkatan dengan meningkatnya prosentase $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ dari 0 % sampai 55 %. Hal tersebut dapat terlihat, pada $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ 0% ke 55%, kandungan gas CO meningkat, dari 2,89 % vol ke 7,99 % vol, untuk kandungan gas H₂ meningkat dari 6,20 % vol ke 8,27 % vol. Sedangkan kandungan gas CH₄ terjadi penurunan dari 2,79 % vol ke 1,74 % vol pada $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ 0% sampai 55%.

Sebaliknya, pada $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ 0% ke 55% untuk kandungan gas CO₂ menurun secara perlahan dari 5,15 % vol ke 4,56 % vol, kandungan gas N₂ menurun secara perlahan dari 58,85 % vol ke 58,70 % vol, serta kandungan gas O₂ menurun dari 24,12 % vol ke 18,74 % vol.

Adanya peningkatan jumlah combustible gas pada komposisi synthetic gas dan penurunan kandungan uncombustible gas dikarenakan suplai udara menuju reaktor berkurang setelah penambahan ceratan synthetic gas melalui inlet blower udara. Ceratan synthetic gas masuk secara perlahan sehingga menggantikan udara yang menyebabkan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual juga ikut menurun. Dengan penurunan nilai AFR aktual mengakibatkan nilai Equivalence Ratio menurun pula. Hal tersebut sesuai teori bahwa semakin tinggi AFR menyebabkan kandungan combustible gas menurun sementara kandungan uncombustible gas meningkat.

D. Analisis Equivalence Ratio (λ)

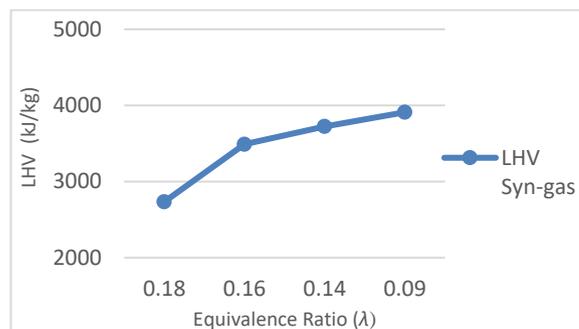


Gambar 6. Grafik Equivalence Ratio (λ) terhadap prosentase ceratan syn-gas

Penurunan nilai λ dikarenakan penurunan pasokan udara bahan bakar setelah disubstitusi oleh ceratan synthetic gas, sehingga nilai rasio udara bahan bakar

aktual juga menurun. Dengan nilai rasio udara bahan bakar stoikiometri yang konstan mempengaruhi nilai λ semakin menurun

E. Analisis nilai kalor ditinjau dari LHV Synthetic Gas

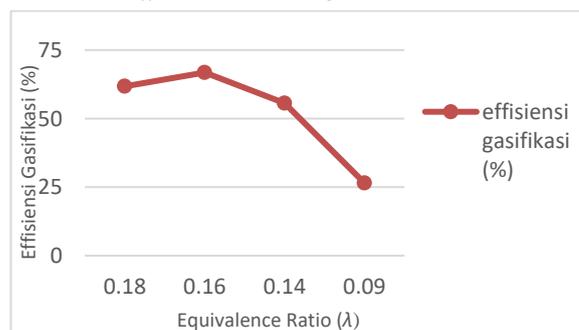


Gambar 7. Nilai LHV synthetic gas terhadap Equivalence Ratio (λ)

Trendline nilai LHV synthetic gas meningkat seiring dengan penurunan nilai equivalence ratio. Terlihat bahwa nilai LHV meningkat dari 2.733,56 kJ/kg pada $\lambda = 0,18$ menjadi 3.912,32 pada $\lambda = 0,09$.

Peningkatan nilai laju alir massa ceratan syn-gas berperan penting pada fenomena tersebut. Hal ini disebabkan oleh penurunan nilai rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual setelah penambahan ceratan syn-gas akan mensubstitusi suplai laju alir massa udara yang masuk ke dalam reaktor gasifikasi, sehingga mempengaruhi proses reaksi kimia pembentukan kandungan gas terbakar (combustible gas). Dimana proses gasifikasi, membutuhkan suplai udara terbatas. Secara teori kandungan gas terbakar (gas CO, H₂, CH₄) akan cenderung menurun, jika suplai laju alir massa udara meningkat. Sebaliknya (gas CO₂, N₂, O₂), meningkat seiring dengan peningkatan suplai laju alir massa udara.

F. Analisa Efisiensi Gas Dingin



Gambar 8. Grafik efisiensi gas dingin terhadap equivalence ratio (λ)

Grafik efisiensi gas dingin terhadap variasi prosentase $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ menunjukkan bahwa terjadi peningkatan dari 61,78% pada kondisi awal tanpa ceratan syn-gas menjadi 66,81% pada penambahan $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ 10%. Lalu menurun secara perlahan tiap penambahan $\dot{m}_{ceratan\ syn-gas}$ hingga 26,52% pada penambahan ceratan syngas sebesar 55%.

Effisiensi gas dingin dipengaruhi oleh laju alir massa syngas, laju alir massa briket MSW serta LHV syngas dan briket MSW. Secara teori, dengan penambahan ceratan syngas menyebabkan nilai AFR menurun, dimana syn-gas dikategorikan sebagai bahan bakar pada persamaan efisiensi. Dengan penurunan AFR mengakibatkan peningkatan nilai LHV dari peningkatan konsentrasi combustible gas. Disisi lain, penambahan prosentase syn-gas yang dicerat mengakibatkan produksi akhir syn-gas menurun. Semakin kecil nilai AFR

menyebabkan equivalence ratio menurun pula. Hal tersebut menyebabkan nilai produksi menurun meskipun laju konsumsi tidak mengalami penurunan secara signifikan.

V. KESIMPULAN

1. Dari studi eksperimental yang telah dilakukan, mekanisme ceratan dilakukan dengan memasukkan syn-gas ke reaktor kembali melalui inlet blower udara dengan memanfaatkan sisi hisap blower untuk memaksimalkan kontinuitas aliran.
2. Dengan penambahan sistem ceratan terjadi fenomena pada temperature zona gasifikasi sebagai berikut :
 - a. Termokopel 1 (T1) rata-rata menunjukkan kisaran temperatur sampai 73°C mengindikasikan memasuki posisi zona pengeringan(*drying*), dimana kandungan moisture, yang dimiliki briket MSW dihilangkan, melalui proses penguapan atau *evaporasi*.
 - b. Termokopel 2 (T2) rata-rata menunjukkan kisaran temperatur sampai 252°C mengindikasikan bahwa akan masuk zona *pirolisis* sesuai dengan dasar teori pada bab 2, zona pirolisis memasuki temperatur 300°C-900°C, dimana biomassa kering yang bebas dari *moisture*, mengalami pemanasan terus-menerus, yang diharapkan mampu menghilangkan kandungan *volatile* biomassa.
 - c. Termokopel 3 (T3) rata-rata menunjukkan kisaran temperatur sampai 983°C mengindikasikan (T3) akan masuk zona *oksidasi parsial* sesuai dengan dasar teori pada bab 2 bahwa, zona *oksidasi parsial* akan memasuki temperatur >900°C, dimana proses ini menghasilkan panas (eksoterm) yang memanaskan lapisan karbon dibawah.
 - d. Termokopel 4 (T4) rata-rata menunjukkan kisaran temperatur sampai 589°C mengindikasikan (T4) masuk zona *reduksi* sesuai dengan dasar teori pada bab 2 bahwa, zona *reduksi* memasuki temperatur 400°C-900°C, dimana proses ini menyerap, atau membutuhkan panas (*reaksi endoterm*).
 - e. Termokopel 5 (T5) rata-rata menunjukkan kisaran temperatur sampai 115°C mengindikasikan (T5) sebagai indikator temperatur gas hasil gasifikasi yaitu *synthetic-gas (syn-gas)*.
3. Semakin besar nilai prosentase ceratan syn-gas dapat menurunkan besar rasio udara-bahan bakar (Air Fuel Ratio), sehingga menyebabkan konsentrasi kandungan *synthetic gas* pada gas yang mudah terbakar (*combustible gas*) cenderung mengalami peningkatan, sebaliknya kandungan gas O₂, N₂, CO₂ mengalami penurunan secara perlahan.
4. Range batas atas dan bawah dari ceratan pada prosentase 11% sampai 55% dengan nilai AFR 0,93 sampai 0,44 dan λ 0,16 sampai 0,09.
5. Prosentase nilai ceratan syn-gas terbaik, ditinjau dari efisiensi reaktor gasifikasi yaitu pada besaran 11% dengan nilai efisiensi 66,81%.
6. Semakin besar prosentase ceratan syn-gas, maka nilai kandungan energi ditinjau dari *Low Heating Value synthetic gas* semakin meningkat.
7. Prosentase nilai ceratan syn-gas terbaik, ditinjau dari nilai kandungan energi (*Low Heating Value*) *synthetic gas* yaitu pada 55% sebesar 3912,32 kJ/kg.
8. Nilai batas bawah dan batas atas pasokan ceratan syn-gas untuk kandungan gas yang *flammable* dari prosentase 11% - 55%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis H.B. mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing serta rekan-rekan yang membantu penyelesaian eksperimen serta Lab. LPPM-ITS yang membantu pengujian sampel hasil dari eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sugiono A., Anindhita, Boedoyo, M. S., Adiarso. 2014. **Pengembangan Energi dalam Mendukung Program Substitusi BBM**. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. Jakarta, Indonesia.
- [2] Nuhartanto, S. 2016. **Volume Sampah Capai 1400 Ton per Hari**. <URL: <http://www.encycity.co/volume-sampah-surabaya-capai-1-400-ton-per-hari/>>.
- [3] Pasek, A.D., Gultom, K.W., Suwono, A. 2013. *Feasibility of Recovering Energy from Municipal Solid Waste to Generate Electricity*. ITB. Bandung.
- [4] Reed T.B., and Dash A. 1988. *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. Solar Energy Research Institut. Colorado, USA.
- [5] Basu, Prabir. 2013. *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction*. Chennai, India.