

Perancangan Reaktor Gasifikasi Downdraft dan Cyclone Separator Pilot Plant Pembangkit Listrik Gasifikasi Biomassa Kapasitas 100 kW

Muhammad Ridwan¹, Indradjaja², Faqih Azizuddin³ dan Stefan Arichta⁴

^{1,3,4}Institut Teknologi Nasional Bandung, Jl. P.H.H. Mustofa No.23, Bandung, Indonesia

²PT. Medina Engineering, Jl. Raya Narogong Km 15, Pangkalan 7, Bekasi, Indonesia

¹muhrid@gmail.com

Abstrak

Ketergantungan manusia terhadap bahan bakar fosil masih sangat besar, sementara ketersediaannya semakin terbatas. Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan memanfaatkan energi terbarukan, salah satunya biomassa. Gasifikasi merupakan contoh pemanfaatan energi biomassa yang lebih efisien dibandingkan pembakaran langsung. Pada penelitian ini dirancang sebuah reaktor gasifikasi tipe *downdraft* berbahan bakar biomassa kotoran ternak sapi, serta komponen pembersihan gas yaitu *cyclone separator*. *Syngas* (*syntethic gas*) yang dihasilkan reaktor gasifikasi dibersihkan menggunakan *cyclone separator* sebelum diteruskan ke turbin gas. Reaktor digunakan pada *pilot plant* Pembangkit Listrik Gasifikasi Biomassa kapasitas 100 kW. Hasil perancangan memiliki dimensi dan parameter yang tidak berbeda jauh dengan reaktor perbandingan yang sudah ada.

Kata kunci : gasifikasi, biomassa, kotoran sapi, reaktor, *downdraft*, *cyclone*, *syngas*.

Pendahuluan

Gasifikasi adalah suatu proses konversi senyawa yang mengandung karbon untuk mengubah material baik cair maupun padat menjadi bahan bakar gas mampu bakar (CO , H_2 , CO_2 , CH_4 dan H_2O) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas yaitu antara 20% hingga 40% udara stoikiometri. Reaktor tempat terjadinya proses gasifikasi disebut *gasifier*. Selama proses gasifikasi akan terbentuk daerah proses menurut distribusi temperatur dalam reaktor. Daerah-daerah tersebut adalah pengeringan, pirolisis, pembakaran, dan gasifikasi. Masing-masing daerah terjadi pada rentang suhu antara 25°C hingga 150°C , 150°C hingga 600°C , 600°C hingga 900°C , dan 800°C hingga 1400°C . Gas hasil dari proses gasifikasi disebut *syngas*.

Komposisi *syngas* bervariasi tergantung dengan bahan baku biomassa, namun rata-rata dapat menghasilkan *syngas* dengan kadar H_2 sebesar 18-20%, CO sebesar 18-20%, CH_4 sebesar 2-3%, CO_2 sebesar 12%, H_2O sebesar 2.5% dan sisanya N_2 , dengan nilai kalor gas sekitar $4.7 - 5 \text{ MJ/m}^3$

Gasifikasi yang selama ini sering dikenal adalah gasifikasi dengan umpan batubara dan limbah pertanian, akan tetapi gasifikasi dengan umpan limbah peternakan khususnya biomassa kotoran sapi masih jarang dilakukan, padahal kotoran sapi memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan sebagai bahan bakar gasifikasi. Pada penelitian ini dikembangkan penggunaan kotoran sapi sebagai bahan bakar proses gasifikasi.

Metodologi

Metode penelitian yang digunakan untuk mencapai tujuan penelitian yaitu: Tahap pertama adalah mengasumsikan komposisi biomassa kotoran sapi, komposisi *syngas* serta temperatur *syngas* yang dihasilkan. Tahap kedua adalah mengasumsikan efisiensi dari tiap komponen dan melakukan perhitungan kesetimbangan massa dan energi pada reaktor. Tahap ketiga melakukan perhitungan viskositas gas, densitas gas, diameter *cyclone*, dan efisiensi *cyclone*. Tahap keempat adalah perancangan dimensi reaktor gasifikasi dan *cyclone*. Tahap kelima adalah analisis hasil

perancangan dengan membandingkan dengan reaktor gasifikasi yang sudah ada.

a. Variabel Penelitian

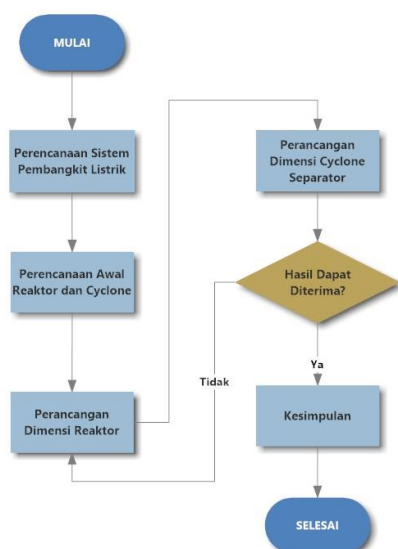
Pada penelitian ini, variabel – variabel yang dipilih antara lain :

Variabel tetap :

- Reaktor gasifikasi jenis *downdraft double throat*
- Komposisi bahan bakar kotoran sapi
- Komposisi *syngas* yang terdiri dari campuran gas – gas CO, CO₂, CH₄
- Temperatur *syngas*
- Debit *syngas*
- Udara sebagai agen gasifikasi

b. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian secara umum dapat digambarkan pada Gambar 1 berikut ini :



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Tahap I. Komposisi kotoran sapi, komposisi *syngas*, dan temperatur *syngas*.

Komposisi kotoran sapi dan LHV melalui *ultimate analysis* yang telah melalui proses pengeringan ke *mass moisture content* (wt%) sebesar 10%, dapat dilihat pada Tabel 1. berikut.

Tabel 1. Komposisi Kotoran Sapi^[1]

No.	Komponen	Nilai
<i>Ultimate Analysis</i> (wt%)		
1	Karbon	40.85
2	Hidrogen	4.81
3	Nitrogen	0.86
4	Sulfur	0.26
5	Oksigen	27.88
Total (w/ halides)		100
<i>Calorific Values</i> (MJ/kg)		
1	LHV	14.33
2	HHV	15.62

Sementara komposisi *syngas* yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Komposisi *Syngas*

No.	Komponen	Persentase Volume (%)
1	CO	14-17
2	H ₂	17-19
3	CH ₄	0.86
4	CO ₂	11-14
5	N ₂	27.88
<i>Calorific Values</i> (MJ/kg)		4.5

Temperatur *syngas* secara empiris diasumsikan sebesar 500°C.

Tahap II. Perhitungan kesetimbangan massa dan energi.

Pembangkit listrik biomassa ini dirancang untuk kapasitas 100 kW, sehingga diperlukan turbin gas dengan output keluaran minimal 100 kW. Dengan mengetahui efisiensi thermal dari turbin gas, kemudian dengan mengasumsikan efisiensi thermal dari *cleaning system* dan reaktor, maka dapat dihitung daya masukan untuk reaktor gasifikasi. Dengan mengetahui LHV kotoran sapi, dapat dihitung juga massa bahan bakar yang diperlukan untuk reaktor gasifikasi.

Turbin gas yang digunakan adalah sistem mikroturbin gas Turbec T100, dengan daya input turbin gas sebesar 333kW. Asumsi efisiensi *cleaning system* sebesar 90% dan efisiensi reaktor 70%, maka dapat diketahui daya input reaktor gasifikasi sebesar 528.57

kW. Laju aliran bahan bakar masuk reaktor dicari dengan persamaan:

$$\dot{m}_f = \frac{P_{input}}{LHV_{fuel}} \quad (1)$$

Dengan LHV_{fuel} didapat dari Tabel 1, maka laju aliran massa bahan bakar yang dibutuhkan sebesar:

$$\dot{m}_f = 3.19 \text{ ton/day}$$

Laju aliran massa ini merupakan kotoran sapi yang telah melalui proses pengeringan. Apabila kotoran sapi masuk ke *hopper* (tempat bahan bakar) dalam keadaan basah, dengan asumsi *moisture content* rata-rata sebesar 78.4%, maka dapat dihitung massa kotoran sapi basah ($\dot{m}_{fm}$) sebesar:

$$\dot{m}_{fm} = 3.19 \text{ ton/day} \left(\frac{100\% - 10\%}{100\% - 78.4\%} \right)$$

$$\dot{m}_{fm} = 13.291 \text{ ton/day}$$

Tahap III. Perhitungan densitas gas, viskositas gas, diameter *cyclone*, dan efisiensi *cyclone*

Densitas gas dan viskositas gas yang dihitung merupakan densitas dan viskositas dari gas CO, CO₂, dan H₂ yang didapat pada tabel *Thermophysical Properties of Water* dengan temperatur 500°C. Hasil penjumlahan viskositas dari ke 3 komposisi diatas sebesar:

$$\mu = 268.11 \times 10^{-7} \frac{Ns}{m^2}$$

Sementara densitasnya sebesar :

$$\rho_f = 0.68 \frac{Kg}{m^3}$$

Dari perhitungan kesetimbangan massa dan energi, debit gas didapat sebesar 0.08 m³ dan asumsi awal panjang dan lebar inlet sebesar 8 cm dan 6 cm. Ini merupakan asumsi untuk mendapatkan kecepatan inlet gas. Kecepatan inlet gas didapat dari grafik empiris sebesar 16.6 m/s. Diameter *cyclone* didapat dengan persamaan:

$$D_c = \sqrt{\frac{8 \times Q}{v}} \quad (2)^{[2]}$$

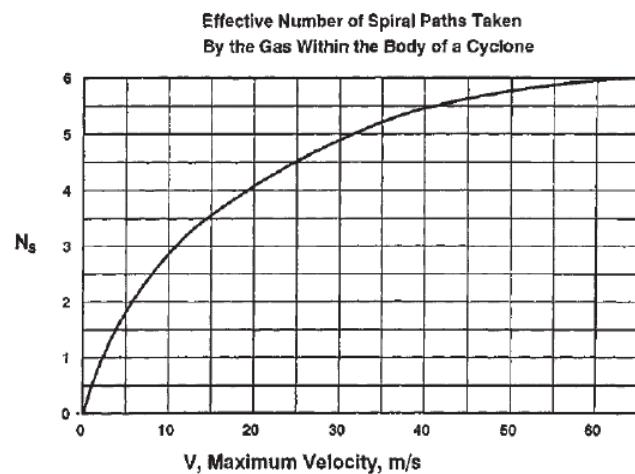
Sehingga diameter *cyclone* yang didapat sebesar 20 cm.

Efisiensi *cyclone* didapat dengan mencari diameter partikulat secara teoritis yang terendapkan. Syngas kotoran sapi diasumsikan sama dengan syngas yang dihasilkan oleh biomassa *wheat straw pellets*, dengan densitas padatan seperti pada Tabel 3 berikut :

Tabel 3. Densitas Biomassa

No.	Biomassa	Nilai
Densitas (kg/m ³)		
1	Walnut Shell	337
2	Sugarcane	52
3	Wheat Straw	395

Untuk mencari N_s didapat dari Grafik 1 berikut :

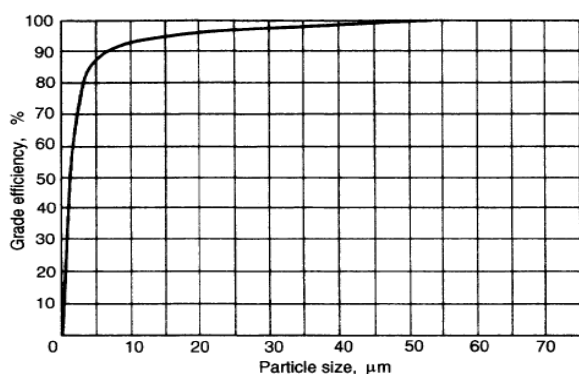


Grafik 1. Grafik N_s vs V^[3]

Sedangkan densitas dan viskositas gas telah didapat sebelumnya yaitu $268.11 \times 10^{-7} \frac{Ns}{m^2}$ dan $0.68 \frac{Kg}{m^3}$. Sedangkan V didapat sebesar 16.6 m/s. Nilai Bc didapat dari $\frac{D_c}{4}$ sebesar 5 cm. Diameter partikulat teoritis yang terendapkan didapat dengan persamaan :

$$D_{p,th} = \sqrt{\frac{9 \times \mu \times Bc}{\pi \times N_s \times V_{in} (\rho_p - \rho_f)}} \quad (3)^{[4]}$$

Sehingga diameter partikulat teoritis yang terendapkan sebesar 12.76 μm. Efisiensi *cyclone* didapat dari Grafik 2 berikut ini :



Grafik 2. Grafik Efficiency vs Particle Size^[3]

Dari Grafik 2 didapat efisiensi cyclone sebesar 92% untuk ukuran partikulat yang terendapkan sebesar 12.76 μm.

Tahap IV. Perancangan dimensi reaktor gasifikasi dan cyclone separator.

Desain reaktor gasifikasi downdraft mengacu pada laju gasifikasi spesifik (*specific gasification rate*), disebut juga *hearth load* (G_H), dengan satuan $m^3/h \text{ cm}^2$. *Hearth load* didefinisikan sebagai jumlah gas yang dihasilkan per unit area penampang melintang dari *throat*, dimana *throat* merupakan area penampang melintang terkecil pada reaktor.

Berdasarkan berbagai percobaan, ditemukan bahwa reaktor gasifikasi dapat beroperasi pada rentang G_H dari 0.1 – 0.9 $m^3/h \text{ cm}^2$. Untuk reaktor gasifikasi *double throat*, nilai optimum *hearth load* sebesar 0.9 $m^3/h \text{ cm}^2$ ⁽⁵⁾. Dari nilai G_H ini dapat ditentukan luas permukaan *throat* (A_t), dengan persamaan :

$$A_t = \frac{Q_{\text{output reaktor}}}{G_H} \quad (4)^{(6)}$$

Setelah itu dimensi lainnya dapat ditentukan dengan analisis dimensional melalui grafik empiris reaktor gasifikasi downdraft.

Desain cyclone separator dirancang berdasarkan *Perry's method*. Jenis cyclone yang digunakan ialah tipe *high-efficiency cyclone* karena digunakan untuk mendapatkan efisiensi pembersihan yang tinggi. Untuk mendapatkan dimensi cyclone, pertama dihitung kecepatan inlet cyclone dengan mengasumsikan panjang dan lebar inlet cyclone. Kemudian dapat dihitung diameter cyclone.

Setelah diameter cyclone didapat, dimensi cyclone lainnya ditentukan dengan analisis dimensional dengan menggunakan *Perry's method*. Selanjutnya dihitung diameter partikel minimum teoritis yang terendapkan. Setelah didapat ukuran diameter partikel minimum teoritis, efisiensi dapat diketahui melalui grafik.

Hasil dari perancangan cyclone didapat lebar cyclone 20 cm dengan tinggi 85 cm. Diameter partikel minimum teoritis yang terendapkan didapat sebesar 12.76 mikrometer dengan efisiensi 92%.

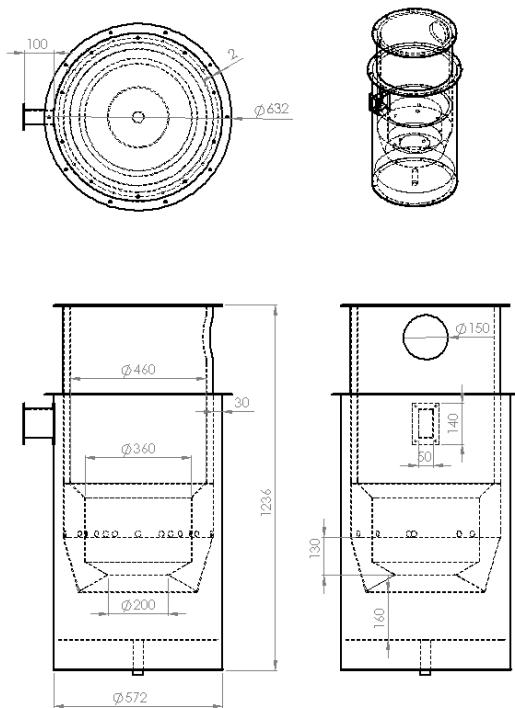
Hasil Rancangan

Dimensi reaktor gasifikasi yang didapat melalui grafik dan tabel empiris dapat dirangkum pada Tabel 4 berikut ini :

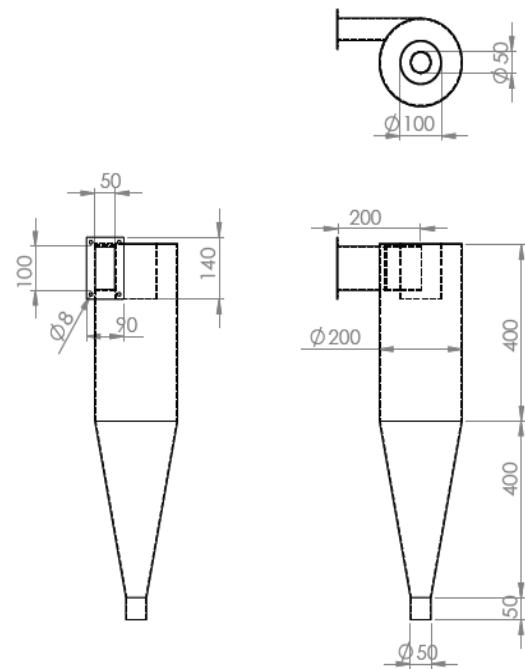
Tabel 4. Dimensi Reaktor

No.	Parameter (satuan)	Simbol	Nilai
1	Diameter throat (cm)	d_t	20
2	Tinggi nozel di atas throat (cm)	h	14
3	Diameter nozel udara (cm)	d_m	1.6
4	Kecepatan udara (m/s)	U_m	30.61
5	Diameter reaktor (cm)	d_f	46
6	Diameter reaktor pada nozel (cm)	d_n	36
7	Tinggi reaktor (cm)	H	37
8	Tinggi zona reduksi (cm)	R	16

Pemodelan hasil rancangan reaktor dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. 3-view Drawing Reaktor



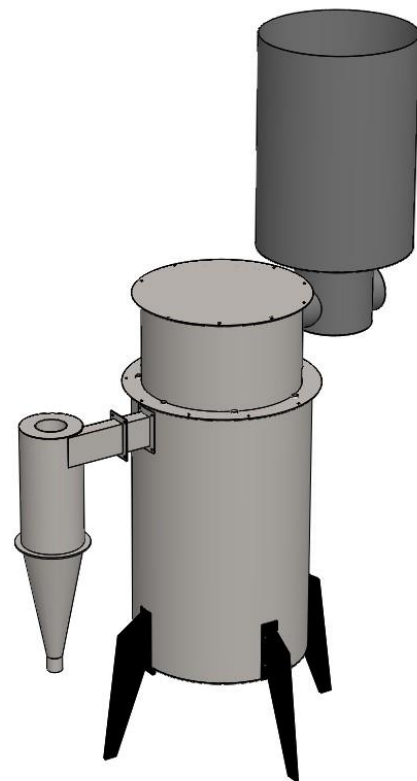
Gambar 3. 3-view Drawing Cyclone Separator

Cyclone separator yang dirancang hanya dapat digunakan untuk membersihkan partikulat dengan ukuran ≥ 10 mikrometer. Dimensi *cyclone separator* secara utuh didapat dari nilai diameter *cyclone* dan dapat dilihat pada Tabel 5 berikut ini :

Tabel 5. Dimensi *Cyclone*

No.	Parameter (satuan)	Simbol	Nilai
1	Diameter <i>cyclone</i> (cm)	D_c	20
2	Lebar inlet (cm)	B_c	5
3	Diameter gas outlet (cm)	D_e	10
4	Tinggi lubang inlet (cm)	H_c	10
5	Panjang silinder (cm)	L_c	40
6	Panjang outlet (cm)	S_c	2.5
7	Panjang konis (cm)	Z_c	40
8	Diameter lubang <i>dust out</i> (cm)	J_c	5

Pemodelan hasil rancangan *cyclone* dapat dilihat pada Gambar 3 di bawah:



Gambar 4. Reaktor Gasifikasi & *Cyclone Separator*

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah:

- 1) Hasil rancangan reaktor gasifikasi *downdraft* secara teori dapat digunakan untuk pembangkit listrik gasifikasi biomassa kapasitas 100 kW.
- 2) Hasil rancangan *cyclone separator* secara teori dapat digunakan untuk pembangkit listrik gasifikasi biomassa kapasitas 100 kW
- 3) Biomassa kotoran sapi setelah melalui proses pengeringan, secara teori dapat digunakan sebagai bahan bakar proses gasifikasi untuk menghasilkan *syngas*.
- 4) Nilai debit mempengaruhi dimensi dari *cyclone separator*.

Referensi

- [1] Information on <https://www.ecn.nl/phyllis2/Biomass/View/1882> (diakses tanggal 9 Maret 2016)
- [2] Wang, Lingjuan, Theoretical Study of Cyclone Design. China. 2004
- [3] Coulson dan Richardson, Chemical Engineering Handbook Vol 6, Fourth Edition. London, 2005
- [4] Perry, Robert H. dan Green, Don W, Perry's Chemical Engineering Handbook. USA, 1999
- [5] Das, A. dan Reed, T. B, Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System. Colorado, 1988.
- [6] Information on www.miniwoodgas.com/guidelinesfor designingdowndraftgasifiers.pdf, (diakses tanggal 24 Maret 2016)
- [7] Venselaar, Jan. Design Rules for Downdraft Wood Gasifiers, a Short Review. Bandung, 1982.
- [8] Incropera, Frank P., Dewitt, Bergman., dan Lavine, Fundamental of Heat and Mass Transfer, 7th Edition. New York, 2011