

BAB III DESAIN

III. 1 Perhitungan Desain

Objektifitas dari perancangan ini adalah: 1) merancang dan membuat sistem venturi scrubber skala laboratorium yang sesuai dengan kebutuhan atau karakteristik sistem gasifikasi yang ada, 2) memperbaiki kualitas *flame* dari gas *burner* yang masih mengandung tar dan pengotor lainnya. Perancangan yang termasuk dalam hasil penelitian ini adalah tabung venturi, entrainment separator, dan sistem injeksi air sebagai fluida pencuci gas yang mengalir melalui venturi dan entrainment separator, serta penambahan pipa elbow sebagai jalur gas produser dari dan menuju sistem venturi. Alat-alat tersebut nantinya akan diintegrasikan dengan instalasi *gasifier* laboratorium.

Desain venturi yang digunakan adalah rectangular throat atau venturi persegi, karena venturi persegi mampu mengatasi laju aliran gas yang lebih tinggi dibandingkan venturi round throat atau venturi lingkaran. Seperti telah disebutkan sebelumnya, parameter utama dalam mendesain suatu venturi scrubber adalah karakteristik gas produser yang akan dibersihkan. Berikut ini adalah karakteristik gas produser dari lab gasifikasi yang diperoleh dari skripsi Yudo dan fiki, pengembangan dan studi karakteristik gasifikasi batubara sub-bituminus menggunakan reaktor jenis *fix bed downdraft gasifier*, 2008:

volume flow rate	100 cfm
temperatur inlet	350 °F
kandungan kelembapan	25%
particulate loading	3 grains/scf
specific density of particulate	1.8

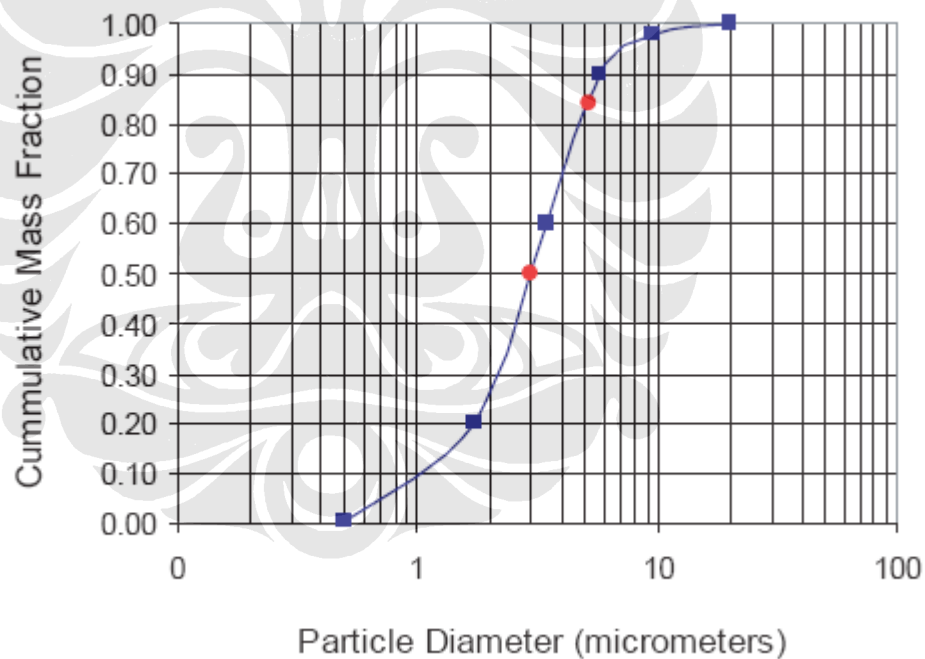
Efficiency yang diperlukan adalah 90% untuk Partikel < 1.0 micron

Daniel Mussatti dari U.S. Environmental Protection Agency, 2002 telah melakukan perhitungan dalam mendesain venturi scrubber untuk aplikasi tertentu. Di bawah ini adalah perhitungan untuk mendesain venturi scrubber yang sesuai dengan karakteristik gasifikasi di atas berdasarkan literatur tersebut. Diketahui

bahwa Particle Size Distribution untuk gas producer hasil pembakaran atau reaksi kimia adalah :

Tabel 3.1 Distribusi ukuran partikel untuk gas hasil pembakaran atau reaksi kimia

Range ukuran partikel (micron)	Diameter median partikel (micron)	Fraksi massa	Fraksi massa kumulatif
0-1	0.50	0.005	0.005
1-2.5	1.75	0.195	0.200
2.5-4.5	3.50	0.400	0.600
4.5-7	5.75	0.300	0.900
7-12	9.50	0.800	0.980
>12	20.00	0.020	1.000



Gambar 3.1 Grafik distribusi ukuran partikel untuk gas hasil pembakaran atau reaksi kimia

(sumber : Daniel Mussatti, Section 6 Particulate matter controls, U.S. Environmental Protection Agency)

Ukuran rata-rata partikel dapat diketahui dari aerodynamic diameter partikel ke-50 (disebut juga diameter partikel massa median). Standar deviasi dari distribusi tersebut adalah rasio dari partikel ke-84 dan partikel ke-50 pada basis massa :

$$\sigma = \frac{d_{84}}{d_{50}} \quad (3.1)$$

σ = deviasi standar

d_{50} = fraksi massa dari ukuran partikel ke-50

d_{84} = fraksi massa ukuran partikel ke-84

Dari gambar dapat diketahui diameter partikel massa median d_{50} dan d_{84} adalah

$$d_{50} = 3$$

$$d_{84} = 5.1$$

maka standar deviasinya adalah :

$$\sigma = \frac{5,1}{3} = 1,7$$

Selanjutnya adalah menghitung properties gas pada outlet Venturi. Menggunakan hukum gas ideal kita akan menghitung volume flow rate dari gas pada kondisi standar dengan menggunakan informasi berikut ini :

Berat molekul dari uap air = 18

Berat molekul udara = 29

Volume lb-mol udara = 385 ft³

Maka flow rate gas producer pada temperatur standar adalah :

$$100acfm \frac{(70^{\circ}F + 460)}{(350^{\circ}F + 460)} = 65.4321scfm$$

Mass flow rate dari udara kering dan massa uap air dapat dihitung dari berat molekul persamaan berikut ini :

$$\begin{aligned}\dot{m}_{wv(in)} &= \left[Q_{m(in)} \times \theta_{H_2O(in)} \right] \frac{MW_{wv}}{V_{mole}} \\ \dot{m}_{a(in)} &= \left[Q_{m(in)} (1 - \theta_{H_2O(in)}) \right] \frac{MW_{wv}}{V_{mole}}\end{aligned}\quad (3.2)$$

maka

$$m_{wv} = 65.4321 \times 25\% \times \frac{18}{385} = 0.7648 \text{ lb / min of watervapor}$$

$$m_a = 65.4321 \times 75\% \times \frac{29}{385} = 3.6964 \text{ lb / min of dryair}$$

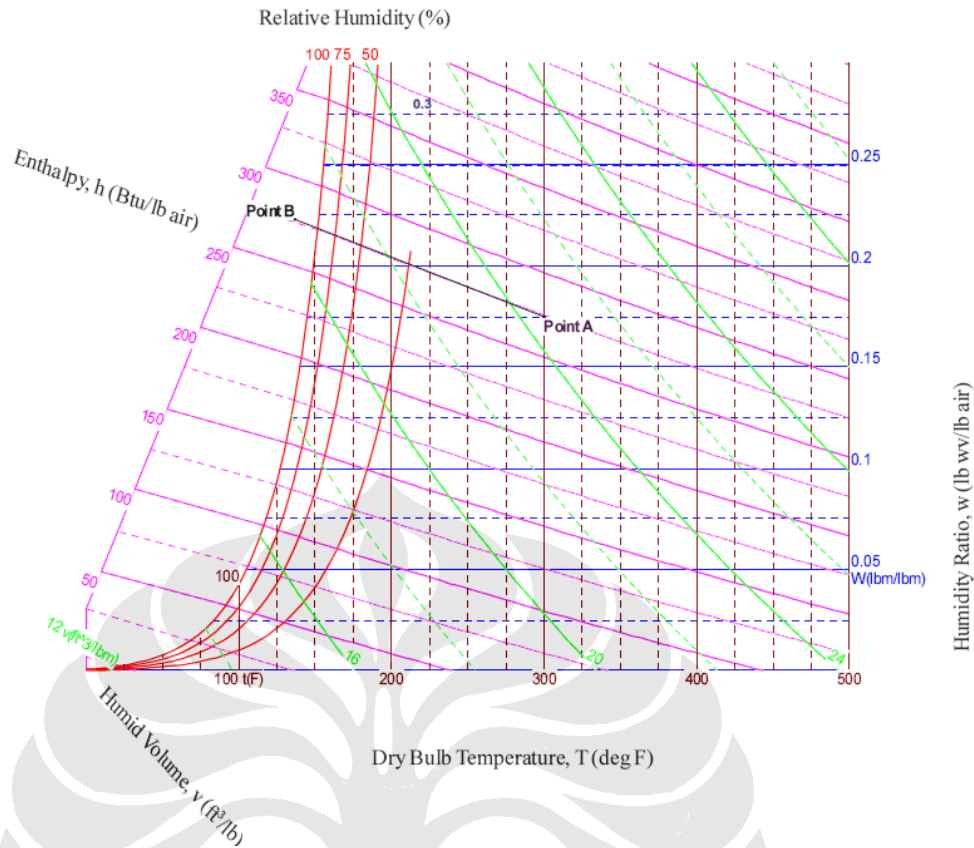
Humidity ratio pada temperatur standar dapat dihitung :

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \dots \quad (3.3)$$

$\omega = \text{rasio humiditas}$

$$\omega = \frac{0.7648}{3.6964} = 0.21$$

Dari diagram psychrometric, cari titik untuk dry bulb temperatur 350 F dan Humidity Ratio 0.21. Ikuti Garis Constant Enthalpy (ungu) sampai 100% garis relative Humidity (red). Titik ini berada pada dry bulb temperature 160 F, Humidity ratio 0.26, dan Humid Volume 22 ft³/lb.



Gambar 3.2 Diagram psychrometric
(sumber : Daniel Mussatti, Section 6 Particulate matter controls, U.S.
Environmental Protection Agency)

Sekarang properties dari gas producer pada outlet Venturi dapat dihitung.

Flowrate gas adalah :

$$Q_{m(out)} = v \dot{m}_a \quad (3.4)$$

V = volume humiditas dari udara jenuh

$$Q_{m(out)} = 22 \times 3.6964 = 81.3208 \text{ scfm}$$

Humidity ratio pada outlet dapat digunakan untuk mengetahui flow rate massa pada outlet dari uap air, yaitu :

$$\dot{m}_{wv(out)} = \omega_{(out)} \dot{m}_a \quad (3.5)$$

dengan

$$W_{(out)} = 0.26$$

$$m_a = 3.6964 \text{ lb/min}$$

$$m_{wv(out)} = 3.6964 \times 0.26 = 0.961 \frac{\text{lb}}{\text{min}}$$

Air atau scrubbing liquid yang menguap akibat kontak dengan gas producer yang panas, dapat dihitung melalui perbedaan antara humiditas arus gas pada inlet dan outlet :

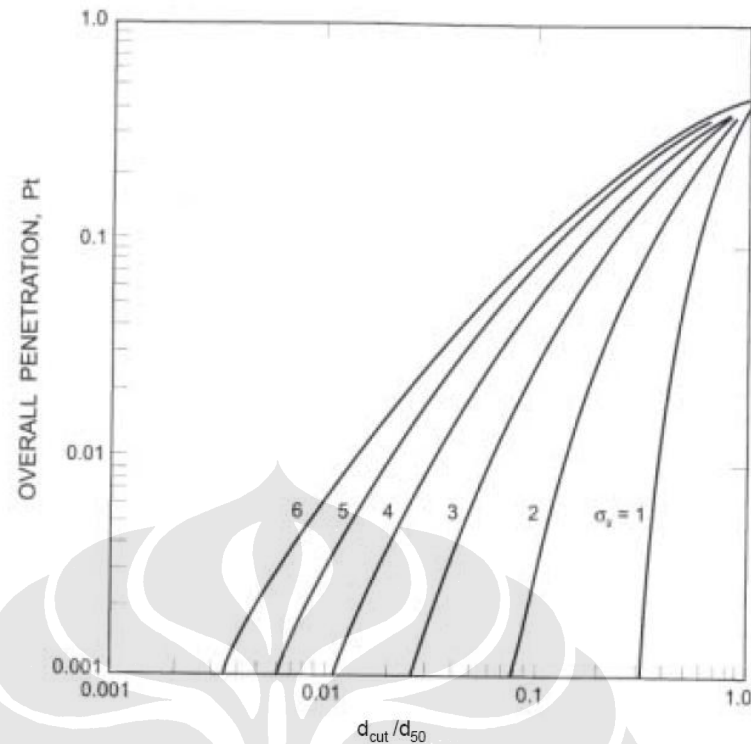
$$\begin{aligned} \dot{m}_{wv(evap)} &= \dot{m}_{wv(out)} - \dot{m}_{wv(in)} \\ &= 0.961 - 0.765 = 0.196 \text{ lb/min} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Air tambahan atau cadangan untuk mengganti air yang menguap dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\begin{aligned} Q_{wv(evap)} &= \frac{\dot{m}_{wv(evap)}}{\rho_{H_2O}} \\ &= \frac{0.196}{62.4} = 0.0031 \text{ cfm} = 0.0232 \text{ gpm} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Jadi jumlah air tambahan atau cadangan untuk mengganti air yang menguap adalah 0,0232 gpm atau **1,5 ml/detik**.

Langkah berikutnya adalah mengetahui ukuran atau dimensi scrubber. Parameter pertama yang harus diketahui adalah pressure drop di sepanjang scrubber. Metode yang digunakan adalah Calvert Cut Diameter. Dengan konstanta $B = 2.0$ untuk Venturi.



Gambar 3.3 Cut diameter sebagai fungsi cut ratio dan deviasi standar distribusi ukuran partikel untuk $B=2.0$

(sumber : Daniel Mussatti, Section 6 Particulate matter controls, U.S. Environmental Protection Agency)

Pertama adalah menentukan collection efficiency keseluruhan. Dengan mengasumsikan kebutuhan efisiensi untuk tiap range partikel di bawah ini, fraksi collection efficiency dihitung dari fraksi massa dikalikan dengan collection efficiency yang dibutuhkan.

$$\eta_d = \sum_0^j \eta_j m_j \quad (3.8)$$

η_d = collection efficiency keseluruhan

η_j = efisiensi fraksi untuk range diameter partikel ke-j

m_j = fraksi massa untuk range diameter partikel ke-j

j = jumlah range diameter partikel

Tabel 3.2 Kebutuhan koleksi efisiensi

Range ukuran partikel	Fraksi massa	Koleksi efisiensi yang dibutuhkan	Koleksi efisiensi fraksional
0-1	0.005	0.900	0.0045
1-2.5	0.195	0.950	0.185
2.5-4.5	0.400	0.980	0.392
4.5-7	0.300	0.990	0.297
7-12	0.080	1.000	0.080
>12	0.020	1.000	0.020
Koleksi efisiensi keseluruhan			0.979

Dapat diperhatikan bahwa partikel lebih dari 5 micron diasumsikan tertangkap 100% untuk efisiensinya.

Dari gambar di atas untuk titik :

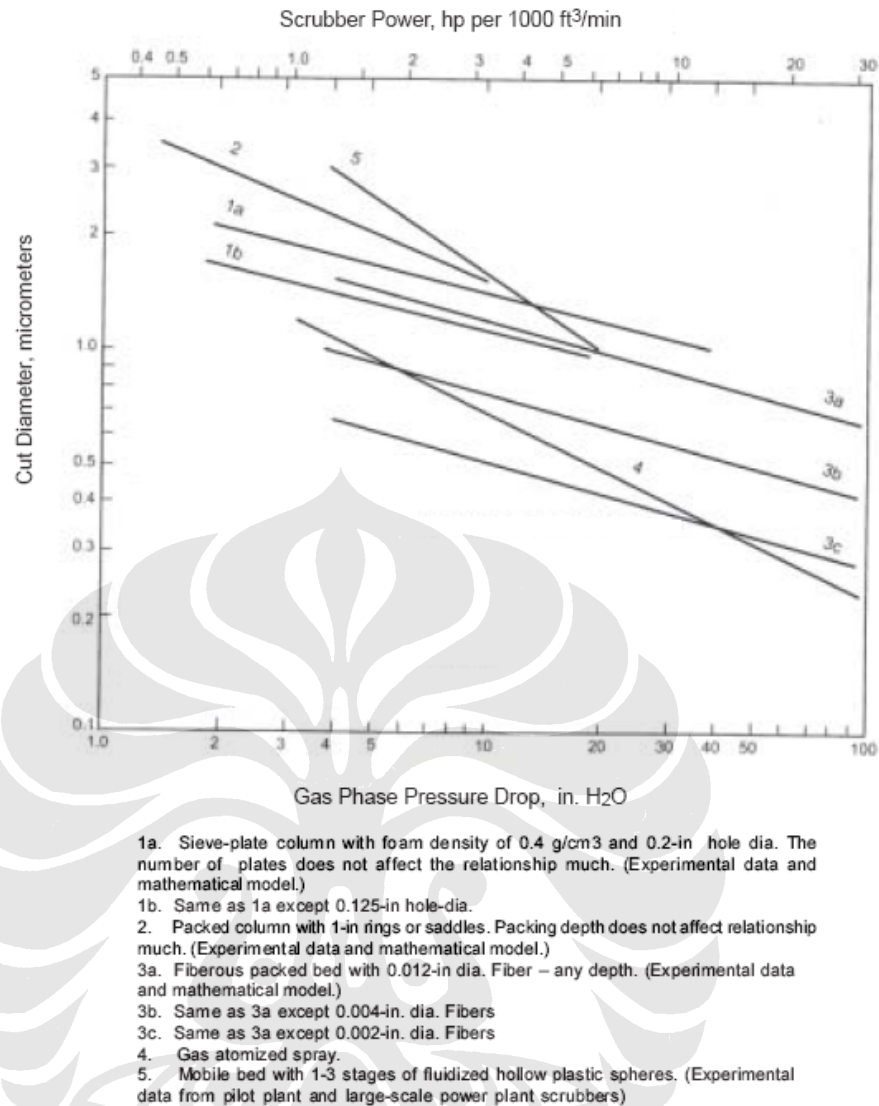
$$\sigma = 1.7$$

$$Pt = 1 - \eta_d = 0.02$$

Diperoleh nilai cut ratio, lalu dihitung nilai cut diameter :

$$\frac{d_{cut}}{d_{50}} \approx 0.2$$

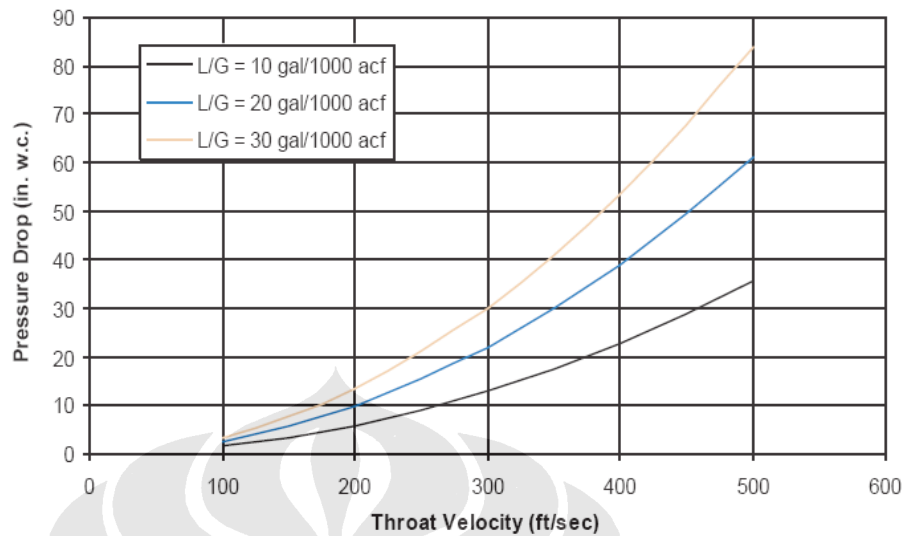
$$d_{cut} = 0.2 \times 3 = 0.6$$



Gambar 3.4 Scrubber power dan pressure drop sebagai fungsi Cut diameter
(sumber : Daniel Mussatti, Section 6 Particulate matter controls, U.S.
Environmental Protection Agency)

Dari gambar di atas, power dan pressure drop yang memenuhi adalah 4.5 hp per 1,000 ft³/min dan 11 in. kolom air.

Dengan menggunakan gambar di bawah ini



Gambar 3.5 Hubungan antara pressure drop, kecepatan throat dan L/G
(sumber : Daniel Mussatti, Section 6 Particulate matter controls, U.S.
Environmental Protection Agency)

dengan asumsi penggunaan air atau L/G ratio adalah 10 gal/1000 acf, maka kecepatan pada throat dapat diperkirakan, yaitu 320 ft/s.

Luas permukaan throat dapat diperoleh dari :

$$\Delta P = 5.4 \times 10^{-4} v^2 \rho_g \left(\frac{L}{G} \right) \quad (3.9)$$

ΔP = Pressure drop di sepanjang venturi (inch kolom air)

v = kecepatan pada throat (ft/s)

ρ_g = densitas gas jenuh (lb/ft³)

L/G = rasio liquid-gas (gal/1000 ft³)

diketahui

$$\rho_g = \frac{1}{w} = \frac{1}{22} \text{ lb/ft}^3 ; L/G = 10 \text{ gal/1000cf}$$

maka

$$\Delta P = 5.4 \times 10^{-4} v^2 \rho_g \left(\frac{L}{G} \right)$$

$$11 = 5.4 \times 10^{-4} v^2 \frac{1}{22} 10$$

$$v^2 = 4.88 \times 10^4 \text{ ft} / \text{s}$$

Sedangkan dari gambar, kecepatan pada throat adalah

$$v = 320 \text{ ft} / \text{s}$$

$$v^2 = 10.24 \times 10^4 \text{ ft} / \text{s}$$

Maka diambil nilai tengah dari kedua nilai v, yaitu

$$v^2_t = \frac{(4.88 + 10.24) \times 10^4}{2} = 7.56 \times 10^4 \text{ ft} / \text{s}$$

Untuk mengetahui luas permukaan throat, digunakan rumus :

$$\Delta P = \frac{v^2 \rho_g A^{0.133} \left(\frac{L}{G} \right)^{0.78}}{1270} \quad (3.10)$$

$$11 = \frac{7.56 \times 10^4 \left(\frac{1}{22} \right) A^{0.133} (10)^{0.78}}{1270}$$

$$A^{0.133} = 0.618$$

$$A = 0.027 \text{ ft}^2$$

Maka diameter throat :

$$d = \sqrt{0.027} = 0.164 \text{ ft}$$

$$= \mathbf{0.051 \text{ m}}$$

Jenis venturi yang akan dibuat adalah jenis rectangular venturi atau venturi persegi. Oleh karena itu, nilai $d = 51$ mm yang diperoleh di atas akan disesuaikan dengan bentuk venturi yang persegi. Berdasarkan ukuran pipa inlet yang menuju venturi, maka panjang (dari luas permukaan) tabung venturi agar pipa yang menginjeksi liquid cukup untuk mengalirkan air ke dalam sistem, adalah 100 mm. Jika diketahui luas permukaan throat adalah : $L_t = 51 \times 51 \text{ mm} = 2601 \text{ mm}^2$. Maka dengan panjang tabung venturi 100 mm akan dihasilkan lebar 26 mm.

Panjang throat dan panjang diverging section dioptimalkan untuk pressure recovery. Untuk mengoptimalkan pressure recovery, panjang throat dibuat **3 kali diameter** throat dan panjang Diverging section **4 kali diameter throat** (Mussatti dan Hemmer, 2002). Maka,

$$\text{Panjang throat, } L_t = 3 \times 51 = 153 \text{ mm}$$

$$\text{Panjang Diverging section, } L_{div} = 4 \times 51 = 204 \text{ mm}$$

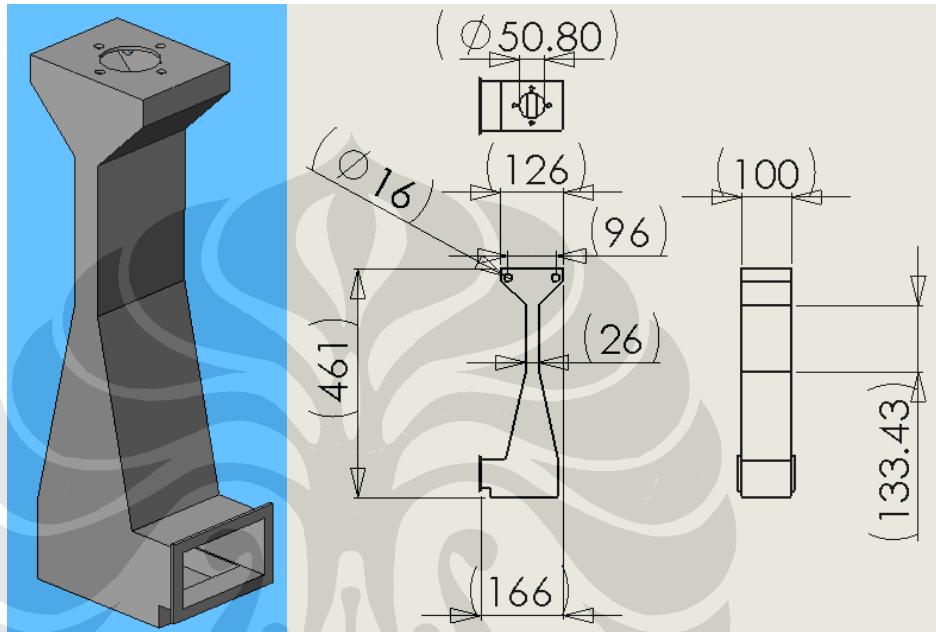
Namun, berdasarkan pertimbangan biaya dan proporsional dimensi terhadap keseluruhan sistem lab gasifikasi, maka panjang throat dibuat menjadi **133 mm** dan panjang diverging section **181 mm**. Sedangkan untuk dimensi lainnya disesuaikan terhadap ukuran-ukuran tersebut.

Sedangkan untuk penentuan dimensi Entrainment separator, dilakukan berdasarkan standar yang sudah ada, yaitu dari The Alstrom Inline Entrainment Separator. Parameter yang menentukan adalah laju alir gas produser yang akan masuk menuju Entrainment separator. Laju alir gas produser yang diambil adalah pada kondisi ekstrim yaitu 200 cfm, maka diameter yang berlaku adalah 8 inch atau 203.2 mm dan tinggi 32 inch atau 812.8 mm, namun karena alasan biaya dan proporsional terhadap lab gasifikasi keseluruhan, tinggi menjadi 723.9 mm dengan posisi vertikal.

III. 2 Konstruksi Rancangan

Berikut ini adalah rancangan gambar desain venturi scrubber yang siap untuk masuk ke tahap fabrikasi :

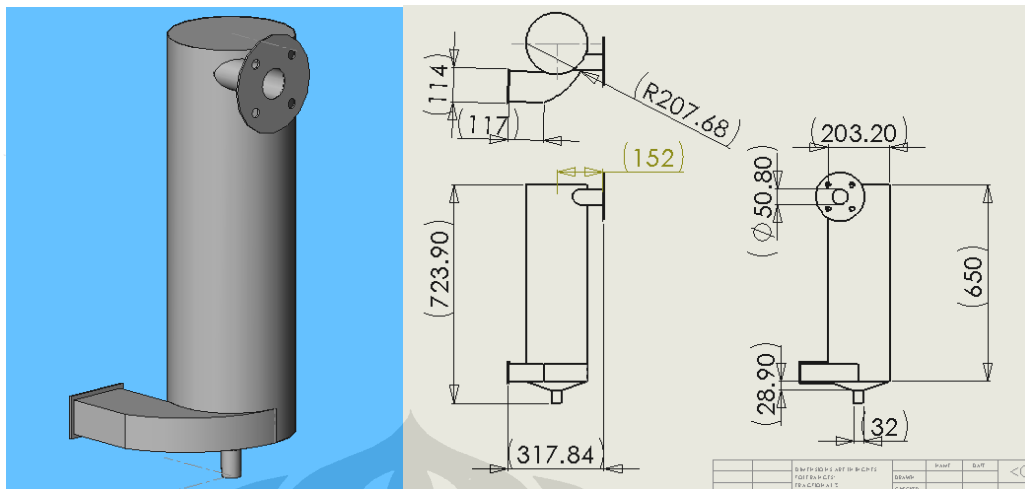
a) Venturi



Gambar 3.6 Desain venturi

Material yang digunakan pada pembuatan venturi adalah stainless steel (SUS 304) dengan tebal plat 2 mm. Hal ini dikarenakan terjadi proses percampuran antara gas yang mengandung pengotor dan air, sehingga dibutuhkan material yang tahan terhadap korosi dan mampu mengatasi suhu yang tinggi.

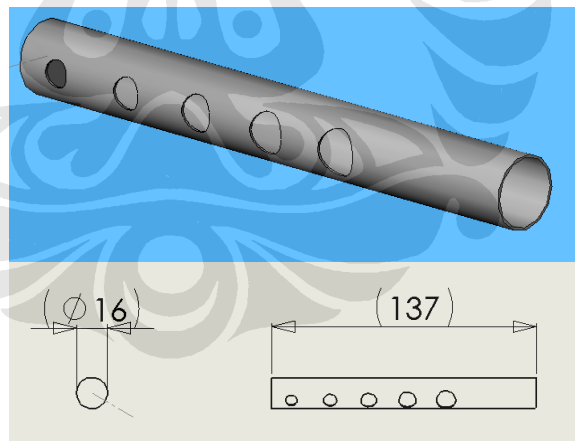
b) *Entrainment separator*



Gambar 3.7 Desain entrainment separator

Entrainment separator berbahan dasar material mild steel dengan ketebalan 1 mm. Tidak seperti venturi, entrainment separator tidak terlalu membutuhkan material yang anti korosif karena ia hanya mengalirkan gas yang keluar dari venturi.

c) *Pipa injeksi*

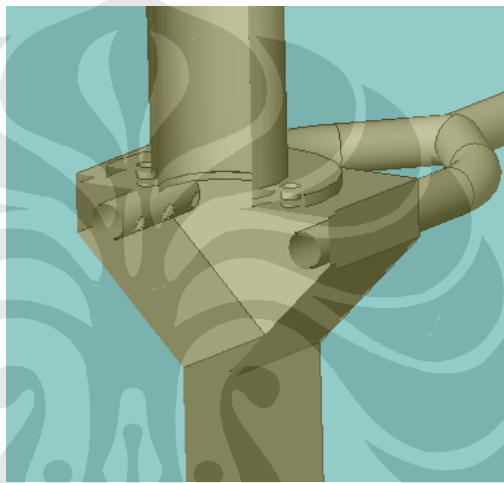


Gambar 3.8 Desain pipa injeksi

Pipa injeksi digunakan untuk memasukkan air ke dalam sistem venturi scrubber. Terdapat dua metode untuk memasukkan air ke dalam venturi, pertama menggunakan sistem spray atau semprot. Spray dapat menciptakan droplet air dengan ukuran sangat kecil sehingga akan memperluas permukaan kontak gas dengan air, dan memaksimalkan koleksi efisiensi. Namun kelemahan sistem ini yaitu dari segi pemeliharaannya, spray akan mudah tersumbat oleh gas yang kotor

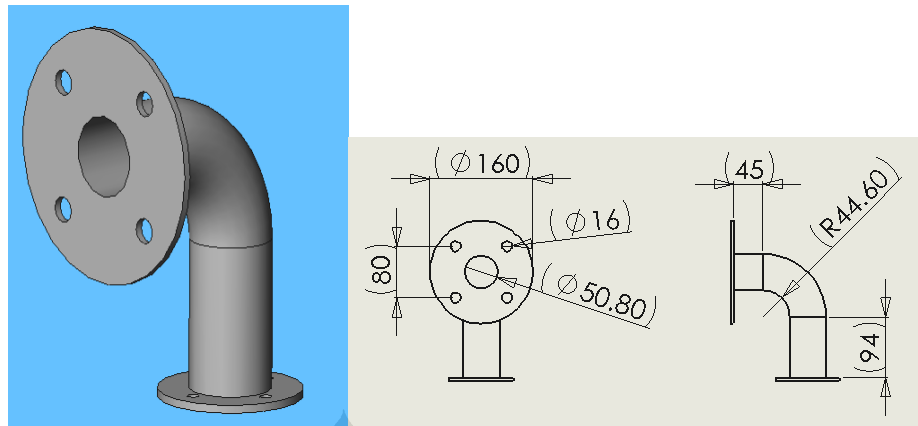
yang menyebabkan kerusakan pada spray. Cara kedua adalah tanpa menggunakan spray atau mengalirkan air ke dalam tabung venturi. Air akan membasahi dinding venturi (wet approach) sehingga akan meminimalkan terjadinya korosi. Dengan alasan tersebut maka penulis memilih menggunakan metode yang kedua.

Ukuran lubang tempat keluarnya air adalah 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, dari yang terdekat dengan masuknya air. Pipa injeksi ini dibuat dua buah dan dibuat fix di dalam venturi dengan sudut kemiringan sejajar dengan kontur venturi. Gambar 3.9 menunjukkan posisi pipa injeksi di dalam venturi.



Gambar 3.9 Posisi pipa injeksi di dalam venturi.

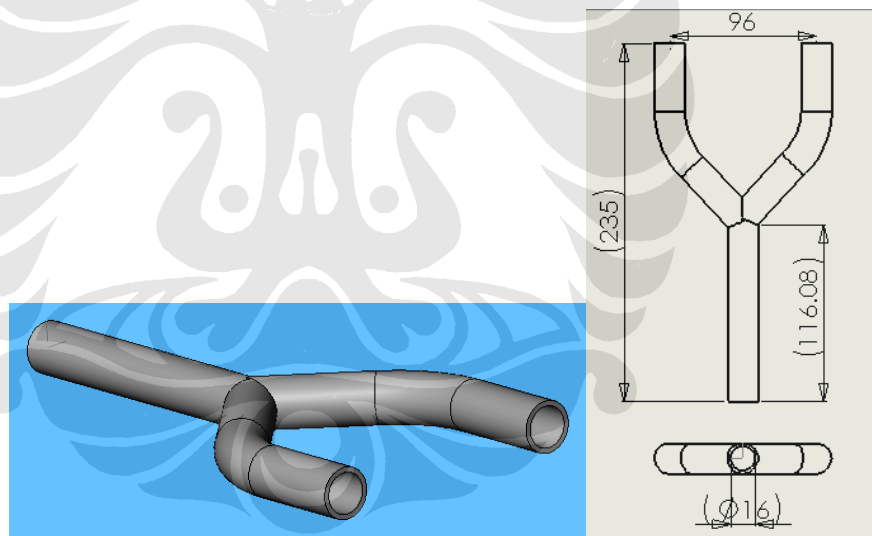
d) *Pipa elbow*



Gambar 3.10 Desain pipa elbow

Pipa elbow digunakan sebagai penyambung antara tempat keluarnya gas dari sistem gasifikasi (cyclone) dan venturi, karena terdapat perbedaan ketinggian.

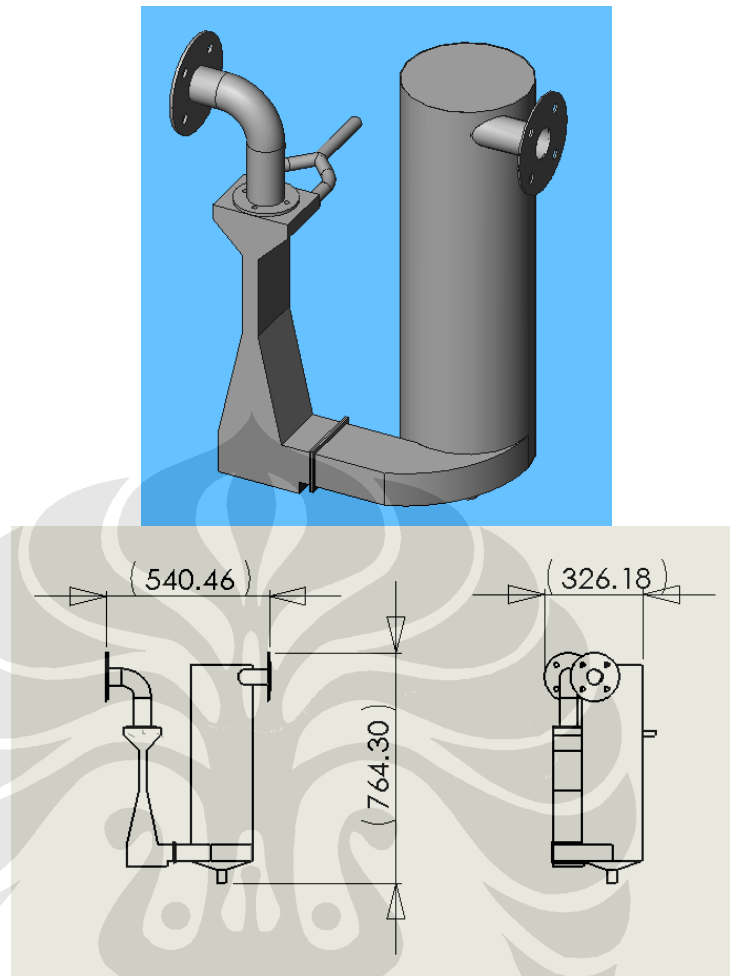
e) *Pipa cabang*



Gambar 3.11 Desain pipa cabang

Pipa cabang digunakan untuk membagi aliran air menuju dua pipa injeksi. Karena pipa cabang ini berada di luar sistem scrubber dan tidak mengalami kontak langsung dengan gas panas, maka dibuat dari material PVC.

f) *Assembly (keseluruhan)*



Gambar 3.12 Desain keseluruhan (assembly)

Secara keseluruhan, sistem venturi scrubber ini tidak memiliki bagian bergerak (*no moving part*), oleh karena itu minim akan kerusakan part dan mudah dalam pemeliharaan.

III.3 Validasi CFD

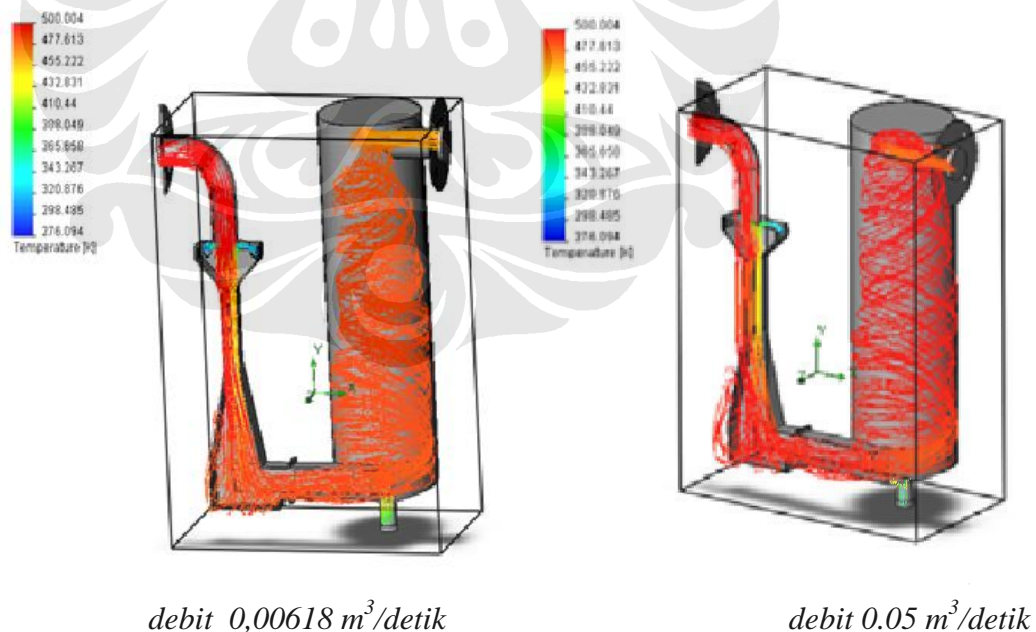
Sebelum masuk ke tahap fabrikasi, desain dilihat performanya dengan menggunakan CFD. Apakah sistem venturi mampu menangani laju alir gas yang masuk terutama di bagian kritis seperti throat, dan apakah aliran gas akan bergerak memutar (turbulen) seperti yang dikehendaki pada bagian entrainment separator. Software yang digunakan adalah Solidwork 2007, karena software ini

memungkinkan penggunaannya untuk melihat pola aliran yang terjadi dalam rancangan 3 dimensi.

Data parameter yang dimasukkan untuk gas produser antara lain :

- Inlet volume flow : 0,00618 m³/s
- Temperatur inlet : 180 °C
- Environment pressure : 101325 Pa

Pada gambar 3.13 terlihat pengujian CFD pada dua debit gas masuk yang berbeda. Debit yang digunakan adalah 0,00618 m³/detik (kondisi rata-rata sebenarnya) dan 0,05 m³/detik. Hal ini bertujuan untuk melihat seberapa besar pengaruhnya terhadap tingkat turbulensi pada bagian entrainment separator. Terlihat pada debit yang lebih rendah, turbulensi yang terjadi melemah seiring naiknya gas ke atas pada entrainment separator, sedangkan pada debit yang lebih tinggi turbulensi pada bagian atas terlihat lebih sempurna. Kecepatan tertinggi tentu terjadi pada bagian throat, dan terendah pada bagian atas entrainment separator.



Gambar 3.13 Hasil CFD venturi scrubber dengan dua debit gas yang berbeda

Pada gambar di atas terlihat bahwa air yang masuk ke venturi awalnya memiliki temperatur yang rendah sekitar 27 °C. Namun saat kontak dengan gas di bagian throat temperatur air meningkat dan sedikit menurun saat keluar dari bagian bawah entrainment separator.

III. 4 Fabrikasi

Fabrikasi dilakukan di bengkel WIRA MANDIRI SENTOSA Bekasi. Waktu pengerjaan sekitar 2 minggu. Proses manufaktur yang terlibat antara lain

- *Cutting* (pemotongan bahan baku),
- *Turning* (pembubutan komponen)
- *Drilling* (pengeboran lubang-lubang baut dan lainnya)
- *Welding* (penyambungan komponen dengan las argon), dan
- *Grinding* (penghalusan permukaan komponen)

