

Perancangan *Vessel* Reaktor Hidrotermal Skala Komunal untuk Mengolah Sampah Kota Tidak Daur Ulang

Rizal Fauzuddin Noor Ramdhani¹, Budi Triyono², dan Pandji Prawisudha³

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat 40559

E-mail : rizal.fauzuddin.tpkml6@polban.ac.id

²Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat 40559

E-mail : budi.triyono@polban.ac.id

³Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10, Bandung 40132

E-mail : pandji@termo.pauir.itb.ac.id

ABSTRAK

Indonesia memiliki 250 juta jiwa dengan 175 ribu ton sampah dihasilkan setiap hari. Penanganan sampah di Indonesia berupa pengumpulan dan pengangkutan dari sumber sampah. 68,4% sampah tidak daur ulang berakhir di TPA (Tempat Pembuangan Akhir) tanpa pengolahan lanjutan. Jauhnya lokasi TPA dari sumber sampah membuat proses pengangkutan sampah tersebut membutuhkan energi dan biaya yang besar. Hidrotermal merupakan metode pengolahan sampah tidak daur ulang yang dapat di aplikasikan untuk permasalahan sampah di Indonesia. Proses hidrotermal membutuhkan sebuah reaktor khusus yang dapat menahan korosi, temperatur, dan tekanan tinggi. Komponen utama dari reaktor hidrotermal adalah bejana tekan. Kondisi operasi yang ekstrim dan aturan pembuatan bejana tekan yang ketat membuat harga dari komponen tersebut menjadi mahal. Pada penelitian ini dilakukan perancangan bejana bertekanan untuk aplikasi reaktor pengolah sampah tidak daur ulang dengan mengikuti standar ASME *section VIII division I* dengan mempertimbangkan proses produksi dan tingkat korosi proses yang mempengaruhi usia pakainya. Metodologi perancangan ini melalui tahapan perancangan dan di dapatkan hasil berupa daftar tuntutan yaitu kapasitas 740L, temperatur 200°C, tekanan 14,5 bar, serta dilengkapi *safety valve* dan *exhaust valve*. Selanjutnya adalah desain konsep untuk pemilihan material dan konstruksi bejana tekan dan di dapatkan pipa A53B dengan ukuran 30 inci sebagai *shell*, SA 516 *grade 70* sebagai *head* serta orientasi bejana horizontal. Tahap selanjutnya perancangan detail dan di dapatkan spesifikasi bejana dengan temperatur operasi 200°C, tekanan operasi 15 bar, tebal 0,5 inci, kapasitas produksi 3 x 740 L dalam sehari, dimensi total 2097 x 984 x 1981 mm. Tahap terakhir perancangan ini dilakukan analisa FEA menggunakan software numerik untuk memastikan perancangan aman digunakan.

Kata Kunci

Sampah, Daur Ulang, Hidrotermal, Bejana Tekan

1. PENDAHULUAN

Sampah yang dihasilkan oleh setiap penduduk di Indonesia biasanya diangkut dan dikumpulkan di TPS (Tempat Pembuangan Sementara). Sebanyak 68,4% dari sampah tersebut diangkut ke TPA (Tempat Pembuangan Akhir) [1], sehingga menyebabkan penumpukan di TPA. Selain itu, pengiriman dari sumber sampah menuju TPA membutuhkan biaya transportasi yang besar, dan menimbulkan polusi udara selama pengiriman. Solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut yaitu sampah dapat diolah di sumber sampah, sehingga biaya transportasi dapat dipangkas, mengurangi polusi udara, dan sampah tidak

perlu dikirim ke TPA sehingga penumpukan dapat berkurang.

Proses hidrotermal menjadi solusi paling tepat untuk mengurangi timbunan sampah di TPA, karena sampah dapat diolah ditempat untuk dirubah sepenuhnya menjadi bahan bakar padat. Selain itu, sampah tidak perlu dipilah antara organik dan anorganik sehingga mempermudah proses pengolahan. Proses ini memerlukan sebuah Alat Reaktor Hidrotermal untuk mengolah sampah tidak daur ulang. Alat ini sudah pernah dibuat untuk skala laboratorium di ITB dan skala pilot di Tangerang, keduanya tidak cocok jika dioperasikan di sumber sampah atau lingkungan

masyarakat, karena skala laboratorium terlalu kecil dan skala pilot terlalu besar dan harga pembuatan masih sangat mahal.

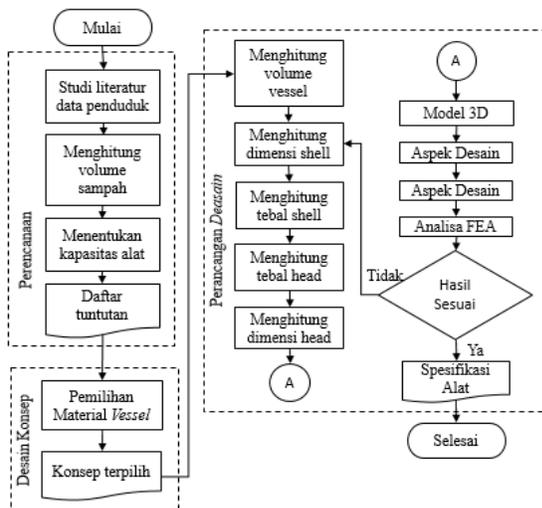
Biaya pembuatan alat yang mahal diakibatkan adanya komponen utama tempat terjadinya proses reaksi hidrotermal yaitu *Vessel* yang harus dibuat sesuai dengan *Code* yang mampu bekerja dengan tekanan hingga 15 bar dan temperatur sebesar 200°C. Sehingga, dibutuhkan material khusus yang dapat memenuhi persyaratan yang terdapat dalam *Code*. Melalui penelitian ini dibuat rancangan *Vessel* yang dapat digunakan untuk sistem hidrotermal skala komunal dengan harga kurang dari Rp. 50.000.000 namun tetap memenuhi *Code* yang berlaku sehingga reaktor dapat dibuat oleh industri kecil dan menengah.

2. METODOLOGI

Tujuan dari penelitian ini adalah membuat rancangan bejana tekanan reaktor hidrotermal skala komunal untuk mengolah sampah kota tidak daur ulang untuk digunakan pada skala RW.

Ruang lingkup dari penelitian ini yaitu Melakukan studi literatur tentang data jumlah penduduk RW dari dua kecamatan, dan merancang bejana tekan berdasarkan ASME *section VIII Div. 1*. Batasan masalah pada penelitian ini yaitu pengambilan data dilakukan pada 10 kelurahan sekitar Bandung. Jumlah penduduk dalam satu RW adalah jumlah rata-rata penduduk asli RW tersebut, perancangan reaktor hidrotermal hanya dilakukan pada *pressure vessel*, Temperatur kerja reaktor dibatasi 200°C.

Tahapan yang dilakukan untuk merancang *Vessel* reaktor hidrotermal skala komunal ini secara garis besar terdiri dari empat tahapan sesuai *flowchart* yang ditampilkan pada Gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Flowchart perancangan

Tahap perancangan dilakukan melalui tiga tahap yaitu Perencanaan untuk mendapatkan daftar tuntutan, pembuatan konsep desain untuk mencari desain konsep, perancangan detail untuk merealisasikan rancangan. Untuk meyakinkan perhitungan yang dibuat, hasil rancangan detail dilakukan analisis FEA software Ansys.

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan untuk mencari ketebalan dari *shell* dan *head*. Perhitungan awal dilakukan dengan mencari ketebalan dari *shell* berdasarkan ASME *section VIII Div. 1 UG-27* yang ditunjukkan oleh rumus 1. Selanjutnya dilakukan perhitungan ketebalan *head* berdasarkan ASME *section VIII Div. 1 UG-32* yang ditunjukkan oleh rumus 2, dan dilakukan pengecekan perhitungan dengan rumus 3.

$$t = \frac{PR}{SE-0,6P} \quad (1)$$

$$t = \frac{PR}{2SE-0,2P} \quad (2)$$

$$MAWP = \frac{SEt}{R+0,6t} \quad (3)$$

t= Tebal (inci)

P= Tekanan desain (PSI)

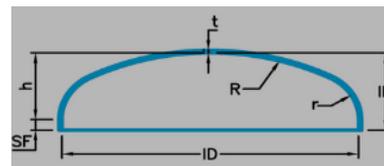
R= Jari-jari dalam (inci)

S= Tegangan yang diijinkan (PSI)

E= Efisiensi sambungan

Jenis *head* yang digunakan untuk reaktor ini adalah *Ellipsoidal Dished Head*. Perhitungan dimensi *head* menggunakan rumus 4 berdasarkan DIN 28011. Keterangan dimensi tersebut dapat dilihat pada gambar 2.

$$\begin{aligned} R &= 0,9045 \times ID \\ r &= 0,1727 \times ID \\ SF &= 3 \times t \\ h &= 0,25 \times ID \end{aligned} \quad (4)$$



Gambar 2. Dimensi head

3. PROSES DAN HASIL

Berikut ini adalah gambaran proses dan hasil dari tahapan perancangan yang telah dilakukan .

3.1 Perencanaan

Pada tahap ini didapatkan data jumlah penduduk RW rata-rata yang didapatkan dari data badan statistik yang ditunjukkan pada Tabel 1. Selanjutnya, dilakukan perhitungan volume sampah yang dihasilkan warga dalam satu RW. Untuk jadi acuan rancangan, maka dilakukan analisa terhadap produk yang pernah dibuat. Kemudian, menentukan kapasitas yang pada alat yang

akan dirancang. Setelah tahap tadi dilakukan maka di dapatkan daftar kebutuhan.

Tabel 1. Data penduduk [7]

Kecamatan	Jumlah		
	Desa/Kel.	RW	Penduduk
Bandung Kulon	8	74	131.736
Cimahi	6	110	174.940
Jumlah	14	184	306.676

Jumlah rata-rata penduduk pada setiap RW adalah jumlah penduduk dibagi jumlah RW.

$$\text{Rata - rata penduduk RW} = \frac{\text{jumlah penduduk}}{\text{jumlah RW}}$$

$$\frac{306.676}{184} = 1.667 \text{ jiwa.}$$

Jumlah sampah yang dihasilkan oleh penduduk dalam satu RW adalah :

$$ns = n_p \cdot K_s$$

$$ns = 1667 \cdot 0,7 \text{ Kg/kapita/hari}$$

$$ns = 1166,9 \text{ Kg/hari}$$

Sampah yang berakhir di TPA sekitar 68,4% [3], maka laju sampah per hari dikali 68,4% adalah 792 Kg/hari, sedangkan untuk mencari volume adalah berat sampah dibagi massa jenis sampah. Dengan massa jenis sampah 359,17 Kg/m³ [2] maka, volume sampah adalah 2,2 m³ atau sekitar 2.200 L/hari. Proses hidrotermal dilakukan sebanyak tiga kali dalam sehari, maka reaktor harus memiliki kapasitas operasi sebesar 740 L.

3.2 Pemilihan Material Dan Proses Fabrikasi Vessel

Perancangan konsep dilakukan untuk memilih jenis material yang digunakan untuk *Pressure Vessel*. Perhitungan biaya dilakukan untuk pembuatan produk secara masal. Bejana tekan dirancang untuk digunakan selama 20 tahun [4]. Reaktor digunakan dalam kondisi korosi, dan reaktor beroperasi pada 200°C dengan keamanan *overshoot* hingga 220°C. Berdasarkan tabel uap, pada suhu tersebut dapat menghasilkan tekanan hingga 22,18 bar. Berdasarkan ASME *section VIII* faktor koreksi yang digunakan untuk tekanan desain adalah 1,4. Maka, dipilih tekanan desain sebesar 31,05 bar atau 450,34 PSIG. Adapun beberapa alternatif material yang dapat digunakan sebagai material *vessel* dengan mempertimbangkan kondisi operasi, harga pembuatan, dan kemudahan pembuatan yaitu:

1. SA 516 Grade 70

Material ini sering digunakan untuk pembuatan *pressure vessel* dan *boiler*. Perhitungan ketebalan *shell* berdasarkan *Code ASME UG-27* dengan data awal: tekanan desain (P) 450,34 PSIG, jari-jari dalam *Vessel* (R) 15,3 *inch*, *allowable stress* (S) 17.500 PSI [4], *joint Efficiency* (E) 1 (ASME *sec VIII div I*). Berdasarkan rumus 1, didapatkan ketebalan minimal 10,2 mm. *Vessel* ini akan digunakan selama 20 tahun

dengan kondisi operasi yang sangat korosi. Laju korosi *carbon steel* pada *boiler* adalah 0.075 mm/yr [5]. Maka tebal minimal yang dibutuhkan adalah 11.7 mm. Ukuran tebal plat di pasaran adalah 12 mm. Harga total material dan proses pembuatan dengan bahan SA516 Gr.70 ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Biaya Pembuatan dengan SA516

Part	Proses Fabrikasi	Ket.	Jml.	Harga (Rp.)	Total (Rp.)
Head	Material	SA516	351,87 kg	26800	9430116
	Cutting	laser	4,8 m	300000	1440000
	Forging	bodem	2 part	1000000	2000000
Shell	Material	SA516	375,9 kg	26800	10073584
	Cutting	laser	1,5 m	300000	450000
	Rolling	mesin roll	351,9 kg	15000	5278050
	Welding	SMAW	450 cm	1500	675000
	Inspeksi			30% harga las	202500
flange	material	ST60	395 kg	25000	9875000
	cutting	flame	395 kg	5000	1975000
	machining		2 part	2000000	4000000
gasket	material	graphite sheet	2 lembar	1075000	2150000
	cutting	laser	11 m	62500	687500
Assembly	Welding	SMAW	732 cm	1500	1098000
	Inspeksi			30% harga las	329400
Finishing	Sandblasting		6 m ²	100000	600000
	Painting		6 m ²	240000	1440000
Harga total				51.704.150	
Harga overhead (10%)				5.687.456	

2. SS 304

Material *stainless steel* merupakan material tahan terhadap korosi. Berdasarkan ASME UG-27 untuk mencari ketebalan dibutuhkan data awal: tekanan desain (P) 450,34 PSIG, jari-jari dalam *Vessel* (R) 15,3 *inch*, *allowable stress* (S) 17500 PSI [4], *joint Efficiency* (E) 1 (ASME *sec VIII div I*). Berdasarkan rumus 1, didapatkan ketebalan minimal 10,2 mm. *Vessel* ini akan dirancang selama 20 tahun. Laju korosi material SS 304 pada kondisi asam adalah 0,00254 mm/yr [6] maka, tebal minimal untuk *vessel* adalah 10.7. Tebal plat SS 304 yang tersedia di pasaran adalah 12 mm dengan harga Rp. 13.241.600/lembar (2400 x 1200 x 12 mm). Harga total material dan proses pembuatan dengan bahan SS 304 ditampilkan dalam Tabel 3 dibawah

Tabel 3. Pembuatan dengan SS304

Part	Proses Fabrikasi	Ket.	Jml.	Harga (Rp.)	Total (Rp.)
Head	Material	SS304	1	13.241.696/lembr	13.241.696
	Cutting	laser cutting	2,9	275.000	797.500
	Forging	bodem	2	1.000.000 /part	2.000.000
Shell	Material	SS304	1	13.241.696 /lembr	13.241.696
	Cutting	laser cutting	4,2	275.000 /m	1.155.000
	Rolling	mesin roll	349,24	35.000 /kg	12.223.400
	Welding	SMAW	4 125 x	3000 /cm	1.500.000
	Inspeksi			30% harga las	450.000
Flange	Material	SS304	382	47.000 /kg	17.954.000
	cutting	plasma	1108	13.000 /cm	14.404.000
	machining		2	2.000.000 /part	4.000.000
Gasket	material	graphite sheet	2	1.075.000 /lembr	2.150.000
Assembly	Welding	SMAW	1738,8	3000 /cm	5.216.400
	Inspeksi			30% harga las	1.564.920
Harga total				Rp. 89.898.612	
Harga overhead (10%)				Rp. 9.888.473	

3. Pipa *schedule*

Perhitungan ketebalan material untuk pipa *schedule* mengikuti perhitungan material SA516 *grade 70* karena memiliki bahan yang sama yaitu *carbon steel*. Standar pipa yang digunakan adalah A53B *size 30"*. Penggunaan pipa sebagai *shell* akan mengurangi proses fabrikasi. Penggunaan pipa akan lebih murah bila pembuatan produk secara masal akan tetapi akan jauh lebih mahal bila hanya dibuat untuk satu reaktor. Harga dan proses pembuatan *vessel* ditampilkan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Pembuatan dengan pipa

Part	Proses Fabrikasi	Ket.	Jml.	Harga (Rp.)	Total (Rp.)
Head	Material	SA515	149,2 kg	26800	3998560
	Cutting	laser cutting	2,9 kg	425000	1232500
	Forging	bodem	2 kg	1000000	2000000
Shell	Material	pipa sch 40	375,9 kg	25000	9397000
	Cutting	flame cutting	375,9 kg	5000	1879400
	Beveling	2 x dia 36 in		250000	500000
flange	Material	ST60	395 kg	25000	9875000
	cutting	Flame	395 kg	5000	1975000
	machining		2 part	2000000	4000000
gasket	material	graphite	2 lmr	1075000	2150000
	cutting	laser	11 m	62500	687500
Assembly	Welding	SMAW	1723,6cm	1500	2585430
	Inspeksi			30% harga las	775629
Finishing	Sandblasting		6 m ²	100000	600000
	Painting		6 m ²	240000	1440000
Harga Total				Rp. 43.096.019	
Over head (10%)				Rp 47.405.621	

Berdasarkan analisis diatas, *vessel* akan dibuat dari material pipa *schedule* karena lebih unggul dari segi harga dan proses fabrikasi dibandingkan ketiga material lain yang disebutkan diatas.

3.3 PERANCANGAN DETAIL

Perancangan detail dilakukan meliputi perhitungan terkait *vessel*, model 3D, Aspek desain dan analisis FEA.

a. Perhitungan dan Pemodelan

- Dimensi *Shell*

Volume reaktor yang dibutuhkan adalah 740 L. Dengan diameter *shell 30"* maka, panjang *shell* adalah 1600 mm

- Tebal *Shell*

Perhitungan dilakukan untuk mengecek apakah ketebalan yang digunakan sudah mencukupi atau tidak. Material pipa A53 B dengan data *Stress Allowable* 17.100 Psi, Jari-jari dalam pipa 14,5", dan tebal 0,5". Berdasarkan rumus 3, didapatkan MAWP sebesar 541,1 PSI. Pipa *schedule* yang sudah ada di pasaran dapat digunakan untuk pembuatan *shell* karena dapat menahan tekanan desain (541,1 Psi > 450,34 Psi)

- Tebal *Head*

Ketebalan *head* dihitung berdasarkan rumus 2 ditambah faktor korosi selama 20 tahun sehingga menjadi 7,7 mm. Agar memudahkan pada saat *assembly* reaktor, digunakan tebal 12 mm dengan material SA516 *grade 70*.

- Dimensi *Head*

Jenis *head* yang digunakan adalah *Ellipsoidal Dished Heads* seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Perhitungan dimensi *head* sesuai DIN 28011. Berikut adalah perhitungan dimensi *head*.. Berdasarkan rumus 4, didapatkan dimensi sebagai berikut:

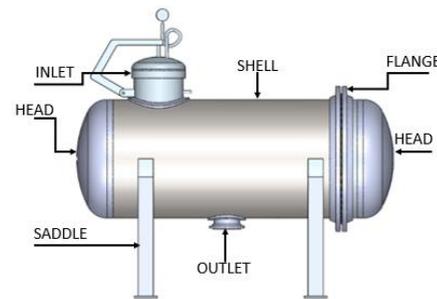
$$R = 703 \text{ mm}$$

$$r = 134,2 \text{ mm}$$

$$SF = 39 \text{ mm}$$

$$h = 194,3 \text{ mm}$$

setelah dilakukan perhitungan, gambar 4 berikut merupakan model 3D dari reaktor yang telah dibuat

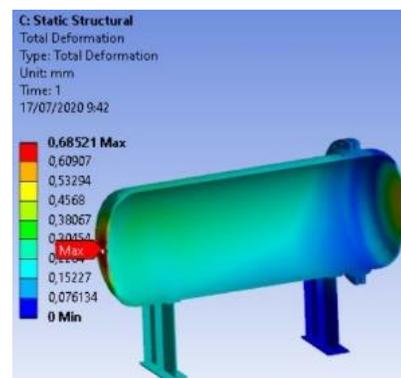


Gambar 4. model 3D

b. Pengelasan

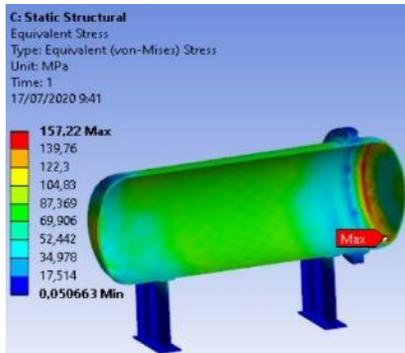
Desain pengelasan yang digunakan untuk pembuatan reaktor berdasarkan ASME UW-2 dan UW-3. Tipe pengelasan untuk sambungan *shell* dan *head* berdasarkan ASME UW-12 *single butt Welding*. Pengelasan untuk sambungan *shell* menggunakan *single butt Welding* serta memakai *backing strip*

c. Analisis FEA



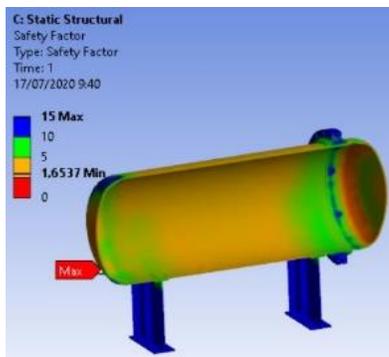
Gambar 5. Deformasi yang terjadi pada shell

Berdasarkan hasil analisa menggunakan FEA (*Finite Element Analysis*) pada Gambar 5, dengan mengasumsikan bahwa terjadi tekanan kerja sebesar 31 bar pada suhu 200°C, deformasi yang terjadi sebesar 0,7 mm.



Gambar 6. Tegangan pada vessel

Berdasarkan analisa menggunakan FEA pada Gambar 6, didapatkan tegangan maksimum yang terjadi sebesar 157,2 MPa.



Gambar 7. flange

Berdasarkan Gambar 7, *safety factor* yang terjadi adalah 1,7. Nilai *safety factor* ini sudah memenuhi standar ASME yaitu 1,4.

Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan, material pipa A53B size 30" dan SA516 gr 70 cocok untuk digunakan sebagai material *vessel*, selain karena pada umumnya memang digunakan sebagai material *vessel*, hasil analisa menunjukkan deformasi yang kecil sehingga dianggap aman sebagai material *vessel*.

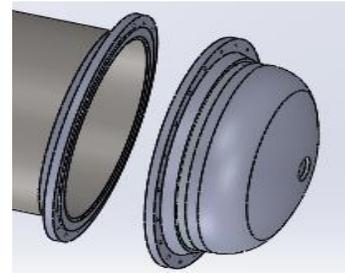
d. Aspek Desain

Pada sebuah desain harus mempertimbangkan beberapa aspek yaitu Perawatan, Kemudahan Operasi, dan keterbuatan.

- Aspek Perawatan

Pada perancangan ini dibuat *flange* antara *head* dan *shell*, hal tersebut akan mempermudah operator pada saat melakukan perawatan dan perbaikan pada bagian dalam reaktor. Gambar 8 merupakan bentuk *flange*

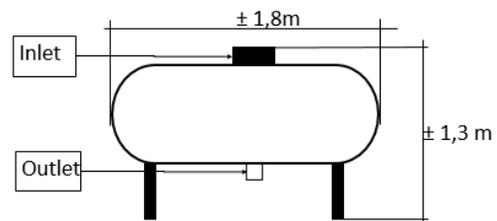
yang digunakan untuk mempermudah perawatan dan perbaikan bagian dalam *vessel*.



Gambar 8. flange

- Aspek Kemudahan Operasi

Posisi orientasi reaktor dibuat horizontal dengan tujuan memudahkan proses pemasukan biomassa ke dalam reaktor. Gambar 9 merupakan orientasi reaktor horizontal



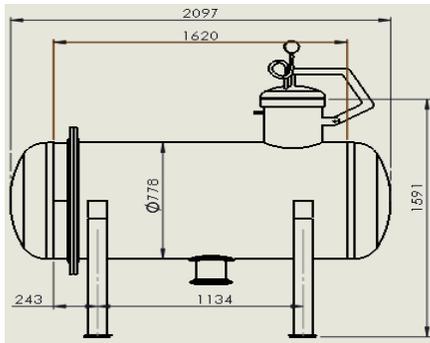
Gambar 9. dimensi total

- Aspek Keterbuatan

Material yang digunakan untuk *shell* adalah pipa, sehingga dapat mengurangi proses fabrikasi dibandingkan dengan menggunakan *roll plate*. Proses permesinan menggunakan mesin konvensional, proses pengelasan menggunakan SMAW *Single butt welding*, pembuatan *head* menggunakan mesin *bodem*, dan proses pemotongan menggunakan *flame cutting*.

4. PEMBAHASAN

Perancangan *vessel* untuk reaktor hidrotermal mengacu pada standar ASME *section VIII division I*. *Vessel* dirancang untuk memenuhi kapasitas sampah satu RW sebesar 1166,9 Kg/hari. Pengolahan dilakukan sebanyak tiga kali sehari dengan kapasitas 740 L dalam satu kali proses. *Vessel* memiliki volume total sebesar 800 L, temperatur operasi 200°C, dan *vessel* didesain mampu bertahan hingga temperatur 220°C dengan tekanan 31 Bar. Material yang digunakan adalah SA516 *grade 70* dan A53B *size 30"* karena proses fabrikasi lebih sedikit dan harga pembuatan lebih murah bila dibuat secara massal, dan orientasi *vessel* yang digunakan adalah horizontal. Berdasarkan proses dan pertimbangan yang dilakukan maka di dapatkan dimensi *vessel* seperti pada Gambar 10.



Gambar 10. Dimensi reaktor

Spesifikasi *vessel* yang dihasilkan yaitu:

Temperatur operasi	= 200°C
Tekanan operasi	= 15 Bar
Material	= SA516 gr. 70 dan A53B
Tebal	= 0,5 in
Harga pembuatan	= Rp. 47.405.600
Umur pakai	= 20 tahun
Dimensi total	= 2097 x 984 x 1981
Volume	= 800 L
Kapasitas produksi	= 740 L x 3 dalam sehari

5. KESIMPULAN

Rancangan alat ini memiliki spesifikasi yaitu dengan material jenis baja karbon dengan kode SA 516 *Grade* 70 dan A53B *size* 30", mampu menahan tekanan Temperatur kerja 220°C dan tekanan kerja 14,5 bar. Umur pakai reaktor di desain selama 20 tahun dengan mempertimbangkan korosinya. Dimensi umum alat ini adalah 2097 x 984 x 1981 mm. Alat ini juga mampu menampung sampah 740 L, sehingga sampah yang dihasilkan oleh satu RW dapat diolah dalam 3x operasi dalam sehari.

Harga yang dibutuhkan yaitu sebesar Rp. 47.405.600, harga memang cukup mahal namun alat ini sangat efektif untuk mengurangi jumlah sampah yang dihasilkan setiap RW. Selain itu alat ini belum pernah dibuat dan belum ada di pasaran untuk reaktor skala RW.

Jika reaktor tidak dibuat secara massal, maka penggunaan *roll* plat dari SA516 *grade* 70 lebih murah dibandingkan dengan pipa. Sebagai bentuk pengembangan, reaktor hidrotermal ini masih memerlukan beberapa komponen tambahan, yaitu pengadukan, sistem pemanas, dan *sealing* agar alat dapat bekerja dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik Indonesia, 2013. [Online]. Available: <http://doi.org/2101018>.
- [2] KNLH Republik Indonesia, Statistik persampahan domestik Indonesia., 2008.
- [3] B. Triyono, Study on Mechanism of Wet Torrefaction to Convret the Non-Recycled Municipal Solid Waste Into Solid Fuel, Bandung: Institute Teknologi Bandung, 2019.
- [4] E. F. Megyes, Pressure Vessel Handbook, Amerika Serikat: Pressure Vessel Publishing, inc, 2001.
- [5] E. Edori, "Mathematical Model for Predicting Corrosion Rates in Furnace Internal Wall Tubes of The Refinery Boiler," *American Journal of Engineering Research*, vol. 03, no. 05, p. 332, 2014.
- [6] N. D. Mukti, "Rekayasa Ulang Bejana Tekan Reaktor Hidrotermal," POLBAN, Bandung, 2016.
- [7] Badan Pusat Statistik Indonesia, 2014. [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/statictable/2014/05/02/13601>.