

Perancangan Tungku *Preheater* Pirolisis Kapasitas 10 kg menggunakan Model Silinder Konsentris

¹Sanudi, ²Khasani, ³Fauzun

^{1,2,3}Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,
Jln. Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia

e-mail: 1sanudi@mail.ugm.ac.id, 2khasani@ugm.ac.id, 3fauzun71@ugm.ac.id

Abstrak

Kandungan kalor uap panas bumi dapat digunakan sebagai fluida pemanas *preheating* pada tahap awal proses pirolisis. Pemanfaatan panas *steam* pada tungku model silinder konsentris menggunakan prinsip penukar kalor pipa ganda dengan kapasitas isi 10 kg. Perancangan tungku dikerjakan dengan *software* CAE Autodesk Inventor. Material tungku menggunakan bahan dasar *stainless-steel grade 310* karena bersifat *non-corrosive*, *heat resistance*, tingkat fleksibilitas desain, tekanan operasi dan suhu yang tinggi. Tujuan perancangan untuk mendapatkan inovasi model tungku yang mampu menangkap kalor *steam* dengan menggunakan *ANSYS Fluent Meshing* bentuk *poly-hexcore* yang mengacu pada nilai *skewness* dan *orthogonal quality* yang baik. Hasil perancangan diperoleh bahwa tungku memiliki model silinder konsentris dengan lebar celah sebesar 5 cm berupa ruang kosong sebagai domain fluida tempat mengalirnya *steam*. Insulator tungku pada dinding luar menggunakan material *fiber* setebal 10 cm. Hasil uji *meshing* menunjukkan bahwa rerata *surface quality* pada *skewness* bernilai *excellent* 0.007 dan rerata *orthogonal quality* bernilai *very good* 0.93.

Kata Kunci: uap panas bumi, *preheating*, tungku, silinder konsentris, perancangan

Abstract

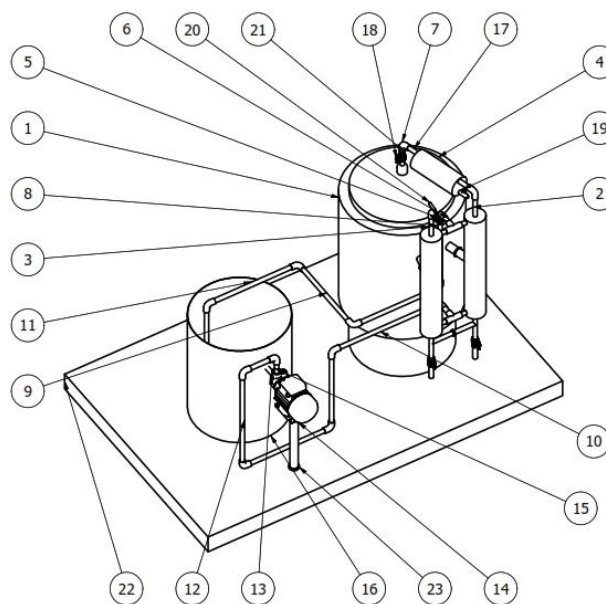
Geothermal heat steam could be used as a preheating fluid in the early stages of the pyrolysis process. The utilization of steam heat in a concentric cylinder furnace used the principle of a double pipe heat exchanger with a capacity of 10 kg. The design was conducted by CAE Autodesk Inventor. The material of furnace came from stainless-steel grade 310, because of its non-corrosive, heat resistance, high flexibility, high operation temperature and pressure. The objective of the design was to innovate a furnace that was capable of capturing steam heat by using ANSYS Fluent Meshing in a poly-hexcore model which referred to good skewness and orthogonal quality values. The results showed that the model of a concentric cylindrical furnace had a slit width of 5 cm in the form of empty space as a fluid domain where steam flowed. The insulation of the furnace had a thickness of 10 cm from fiber material. The result from the meshing test showed that the average surface quality in skewness was excellent at 0.007 and the average orthogonal quality was very good at 0.93.

Keywords: *geothermal steam, preheating, concentric cylinder, furnace, design*

PENDAHULUAN

Plastik mulsa termasuk plastik jenis LDPE yang banyak digunakan oleh para petani kentang di dataran tinggi Dieng untuk menjaga wujud tekstur tanah dan mencegah tumbuhnya tanaman liar serta hama. Sampah plastik mulsa bersifat *nonbiodegradable* atau tidak dapat diuraikan dengan baik di lingkungan (Darni et.al., 2008). Beberapa warga melakukan pembakaran secara langsung di tempat terbuka untuk mengurangi jumlah sampah plastik mulsa (Leckner B., 2015). Sisa-sisa abu hasil pembakaran dan gas buang yang dihasilkan dapat membawa dampak buruk terhadap lingkungan dan kesehatan warga sekitar. Metode alternatif lain yang dapat digunakan untuk menguraikan sampah plastik mulsa yang lebih ramah lingkungan yaitu dengan cara pirolisis (Shah et.al., 2010), (Trisunaryanti, 2018). Proses pirolisis adalah proses penguraian molekul polimer rantai panjang pada kondisi lingkungan tanpa oksigen serta pada tekanan dan suhu tinggi diatas 300 °C (Peng et.al., 2022). Pirolisis plastik memiliki keunggulan dalam memproses limbah plastik dibandingkan dengan pembakaran insinerasi secara langsung (Kalargaris et.al., 2017). Pada Gambar 1 terlampir unit mesin pirolisis yang telah terpasang di Desa Batur, Dieng, Banjarnegara. Komponen unit terlampir di keterangan, seperti: tungku, pipa kondenser, pipa separator, pompa, tangki pendingin, dll. Sumber pemanas yang digunakan pada tungku berasal dari 2 buah *gas burner* LPG, sehingga dalam pengoperasiannya membutuhkan lebih banyak biaya dan konsumsi energi.

Analisis perhitungan energi selama proses pirolisis plastik berlangsung menunjukkan adanya permasalahan pada tingginya konsumsi energi menggunakan *gas burner* LPG (Gao Feng, 2010), (M. Alexander, 2018), (Sanudi, 2017), (Sirait, Maulana., 2020). Salah satu alternatif sumber pemanas lain dapat berasal dari pemanfaatan uap panas bumi (DiPippo, dan Ronald, 2012). Kandungan kalor uap panas bumi dapat digunakan sebagai fluida pemanas *preheating* pada tahap awal proses pirolisis. *Steam brine* yang keluar dari sumur panas bumi Dieng memiliki karakteristik suhu 240 °C hingga 333 °C (Prasetio et.al., 2014) (Pambudi et.al., 2014). Rumusan permasalahan dalam kajian penelitian ini adalah berupa pemanfaatan uap panas bumi sebagai sumber pemanas *preheating* dalam proses awal pirolisis plastik LDPE mulsa untuk dapat menaikkan suhu dalam tungku hingga mencapai kondisi suhu *melting* plastik. Kondisi *melting* plastik berkisar pada suhu 110 °C (Prasad, A. 1998). Nilai kalor yang diperoleh dari perhitungan komposisi kimia untuk bahan bakar minyak hasil pirolisis plastik LDPE yaitu sebesar 44.6 kJ/kg (E. Kurniawan, 2014). Inovasi perancangan tungku menggunakan model silinder konsentris dengan berdasarkan pada prinsip *double pipe heat exchanger*. Tujuan perancangan adalah untuk mendapatkan inovasi model tungku yang mampu menangkap kalor *steam* pada kondisi suhu jenuh 167.75 °C dan tekanan 7.5 barg untuk proses *preheating* plastik pada suhu 110 °C dengan tekanan tetap yaitu 1 atm atau 0.101325 MPa dengan uji kualitas *meshing* yang baik menggunakan *Ansys Fluent Meshing*.



Gambar 1. Unit mesin pirolisis yang telah terpasang di Desa Batur, Dieng, Banjarnegara

Keterangan :

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. Isolasi | 13. Pipa 7 (2) 150 mm |
| 2. Kondenser kanan | 14. Pompa |
| 3. Kondenser kiri | 15. Pipa 8 |
| 4. Tungku | 16. Penampung air |
| 5. Sambungan Tee (2) | 17. Separator |
| 6. Pipa 4 (4) 100 mm | 18. Valve ½ in (3) |
| 7. Elbow (15) | 19. Valve ¼ in |
| 8. Pipa 2 (3) 460 mm | 20. Valve ½ in |
| 9. Pipa 1 (2) 450 mm | 21. Pipa 9 |
| 10. Pipa 3 570 mm | 22. Alas |
| 11. Pipa 5 (2) 475 mm | 23. Penopang pompa |
| 12. Pipa 6 600 mm | |

METODE PENELITIAN

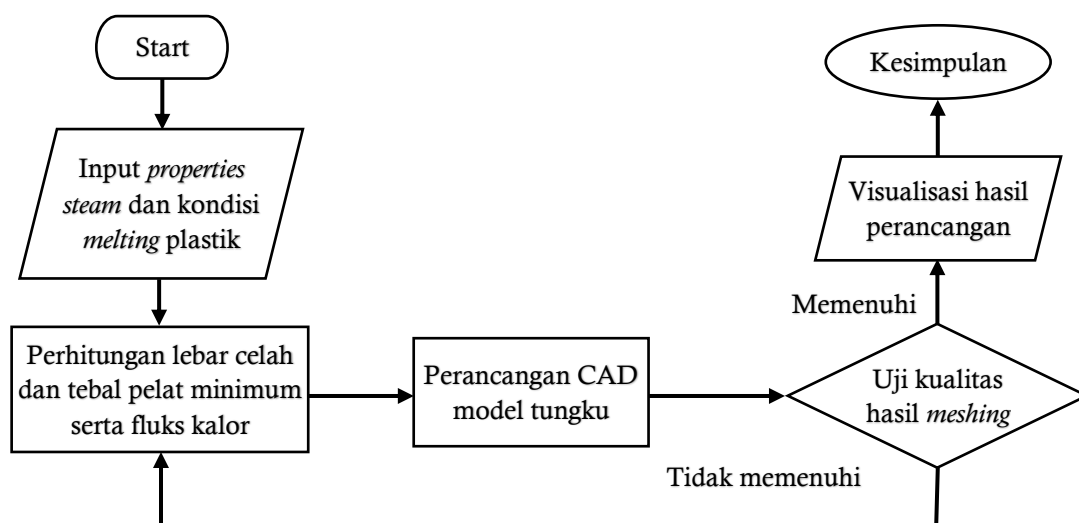
Penelitian non-eksperimen yang dilakukan berupa perancangan model tungku dengan merujuk pada unit mesin pirolisis yang terpasang di Desa Batur, Dieng, Banjarnegara. Parameter yang digunakan terbagi menjadi tiga yaitu variabel kendali berupa *mass flow*, suhu, dan tekanan *steam* saat memasuki *inlet*. Variabel terikat yaitu geometri tungku yang berupa lebar celah ruang kosong, serta variabel bebas yaitu berupa distribusi merata fluks kalor dan suhu disekitar permukaan tungku. Perancangan tungku dikerjakan dengan *software* CAE Autodesk Inventor. Material tungku menggunakan bahan dasar yang memiliki tekanan maksimum izin pada bahan sebesar 97.63 MPa yaitu *stainless-steel grade 310* karena bersifat *non-corrosive*, *heat resistance* yang tinggi pada bahan, tingkat fleksibilitas desain yang baik, dan dapat bekerja pada rentang tekanan operasi yang tinggi serta suhu bekerja yang tinggi pada material (Z. Liang et.al., 2019). Perhitungan kebutuhan panas tungku terdiri dari kalor sensibel dari suhu ruang 27 °C menuju suhu *melting* 110 °C pada tekanan tetap 0.101325 MPa, dan kalor laten untuk mengubah fase plastik dari padat menjadi cair. Data *properties* plastik LDPE terlampir pada Tabel 1. *Steam* yang digunakan sebagai sumber pemanas berasal dari *flasher* dengan data *properties* terlampir pada Tabel 2. Pengujian hasil perancangan dikerjakan menggunakan *Ansys Fluent Meshing* dengan penilaian kualitas berdasarkan pada nilai *skewness* dan *orthogonal quality*. Pengerjaan manufaktur dilakukan dengan pengelasan atau *welding* menggunakan sambungan *butt joint* sehingga nilai efisiensi pengelasan dalam perhitungan yaitu sebesar 70%. Diagram alir penelitian untuk perancangan tungku terlampir pada Gambar 2.

Tabel 1. Data *properties* plastik LDPE

Kondisi	Variabel	Simbol	Nilai
	Massa plastik	m	10 kg
Suhu ruang 27 °C	<i>Specific Heat</i>	$C_{p,LDPE}$	2.1 kJ/kg.°C
Suhu <i>melting</i> 110 °C	<i>Latent Heat of Melting</i>	L_m	121.4172 kJ/kg

Tabel 2. Data *properties steam*

Variabel	Simbol	Nilai
<i>Mass flow</i>	\dot{m}	0.55 kg/s
<i>Specific Heat</i>	$C_{p,steam}$	2.56 kJ/kg.K
Suhu	T	167.75 °C
Tekanan	P	7.5 barg
<i>Enthalpy</i>	h_g	2765.7 kJ/kg



Gambar 2. Diagram alir perancangan tungku

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model tungku yang dirancang mempunyai 2 bagian, yaitu tungku dalam dan tungku luar, dengan spesifikasi ukuran yang terlampir pada Tabel 3. Model tungku dalam berupa reaktor tertutup yang di dalamnya berisi plastik LDPE untuk dikenai proses *preheating*. Model tungku luar diberi ruang celah atau disebut dengan domain fluida tempat aliran *steam* untuk proses *preheating* yang mengalir dari lubang *inlet* yang terletak di saluran bawah menuju *outlet* di atas. Diameter *inlet* memiliki ukuran yang sama dengan diameter *outlet* yaitu sebesar 4 *inch*. Bahan dasar dari material menggunakan *stainless-steel grade 310* dengan ukuran tebal pelat minimum Δx_{min} yang dipengaruhi diameter tungku D saat tekanan $P_{tungku} = 0.101325$ MPa, faktor koreksi $F = 0.6$, dan tekanan izin bahan $P_{max.allow} = 97.63$ MPa, serta koefisien efisiensi pengelasan $\varepsilon = 0.7$. Tebal pelat minimum pada tungku dalam dan luar masing-masing sebesar 0.8 mm dan 0.9 mm. Pada bagian dinding di tungku luar diberi *insulator* dari material *fiber* dengan tebal 10 cm, guna meredam *heat loss* yang terbuang ke lingkungan dari ruang celah. Nilai *heat loss* \dot{Q}_{losses} pada Persamaan (3) memiliki arah tegak lurus permukaan, dengan area berupa selimut tungku. Besarnya *heat loss* juga dipengaruhi oleh nilai konduktivitas termal bahan k , dimana untuk material fiber besarnya $k = 0.043$ W/mK.

Tabel 3. Spesifikasi ukuran model tungku

Bagian	Variabel	Simbol	Ukuran
Tungku Dalam	Diameter	D_{in}	0.55 m
	Tinggi (hanya bagian fluid domain)	l_{in}	0.687 m
Tungku Luar	Diameter	D_{out}	0.65 m
	Tinggi (hanya bagian fluid domain)	l_{out}	0.82 m
	Tebal insulator	$\Delta x_{insulator}$	0.1 m
Lebar Celah	Antar selimut tegak	x_{tegak}	0.05 m
	Antar selimut alas	x_{alas}	0.133 m

$$\Delta x_{min} = \frac{D(P_{tungku})}{\varepsilon(P_{max.allow}) - F(P_{tungku})} \quad (1)$$

$$\Delta x_{min,in} = \frac{0.55 \text{ m} \times 0.101325 \text{ MPa}}{(0.7 \times 97.63 \text{ MPa}) - (0.6 \times 0.101325 \text{ MPa})} = 0.0008 \text{ m} \quad (1.a)$$

$$\Delta x_{min,out} = \frac{0.65 \text{ m} \times 0.101325 \text{ MPa}}{(0.7 \times 97.63 \text{ MPa}) - (0.6 \times 0.101325 \text{ MPa})} = 0.0009 \text{ m} \quad (1.b)$$

$$A = \frac{1}{4}\pi D^2 + \pi D l \quad (2)$$

$$A_{total,in} = \frac{1}{4}(3.14)(0.55)^2 \text{ m}^2 + (3.14)(0.55)(0.687) \text{ m}^2 = 1.42 \text{ m}^2 \quad (2.a)$$

$$A_{selimut,out} = (3.14)(0.65)(0.82) \text{ m}^2 = 1.67 \text{ m}^2 \quad (2.b)$$

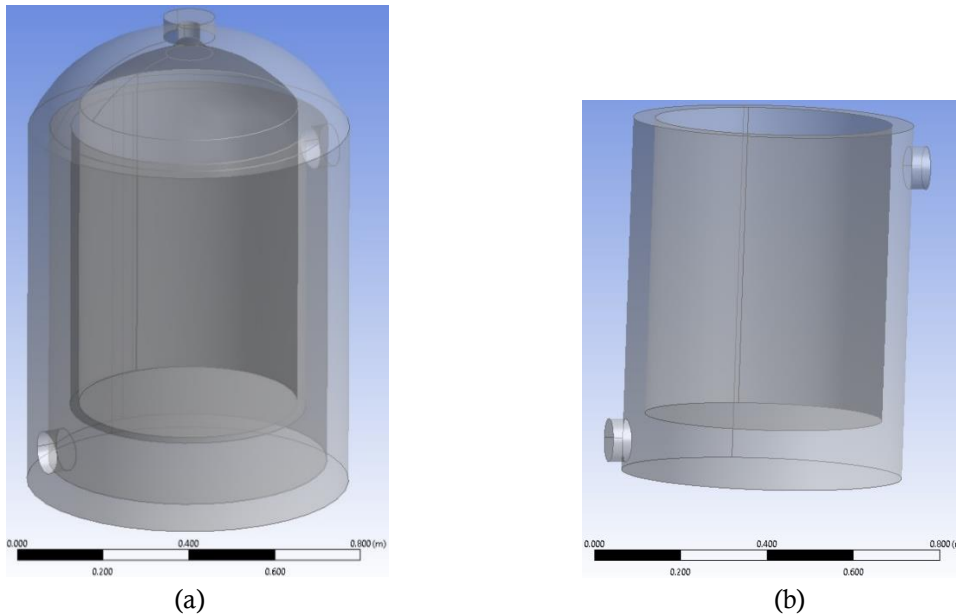
$$\dot{Q}_{losses} = k A_{selimut,out} \left(\frac{T_{steam} - T_{\infty}}{\Delta x_{min,out}} \right) = \left(0.043 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right) (1.67 \text{ m}^2) \left(\frac{413.9 \text{ K}}{0.1 \text{ m}} \right) = 0.297 \text{ kW} \quad (3)$$

Hasil perancangan tungku untuk model penuh dan domain fluida masing-masing terlampir pada Gambar 3 (a) dan Gambar 3 (b). Model tungku pada domain fluida digunakan untuk menganalisis persebaran fluks kalor yang diterima oleh tungku dari aliran kalor *steam* selama menyelubungi tungku. Laju kalor maksimum pada Persamaan (4) yang dipancarkan *steam* terjadi saat awal proses pemanasan ketika tungku masih bersuhu 27°C yaitu sebesar $\dot{Q}_{max} = 582.77$ kW. Potensi laju kalor yang diserap tungku sebesar $\dot{Q}_{received}$, dengan perhitungan pada Persamaan (5) dipengaruhi rugi-rugi laju kalor di dinding tungku luar yang terbuang ke lingkungan secara konduksi sebesar \dot{Q}_{losses} . Rata-rata fluks kalor yang diterima dinding tungku dalam pada Persamaan (6) yaitu sebesar \dot{Q} .

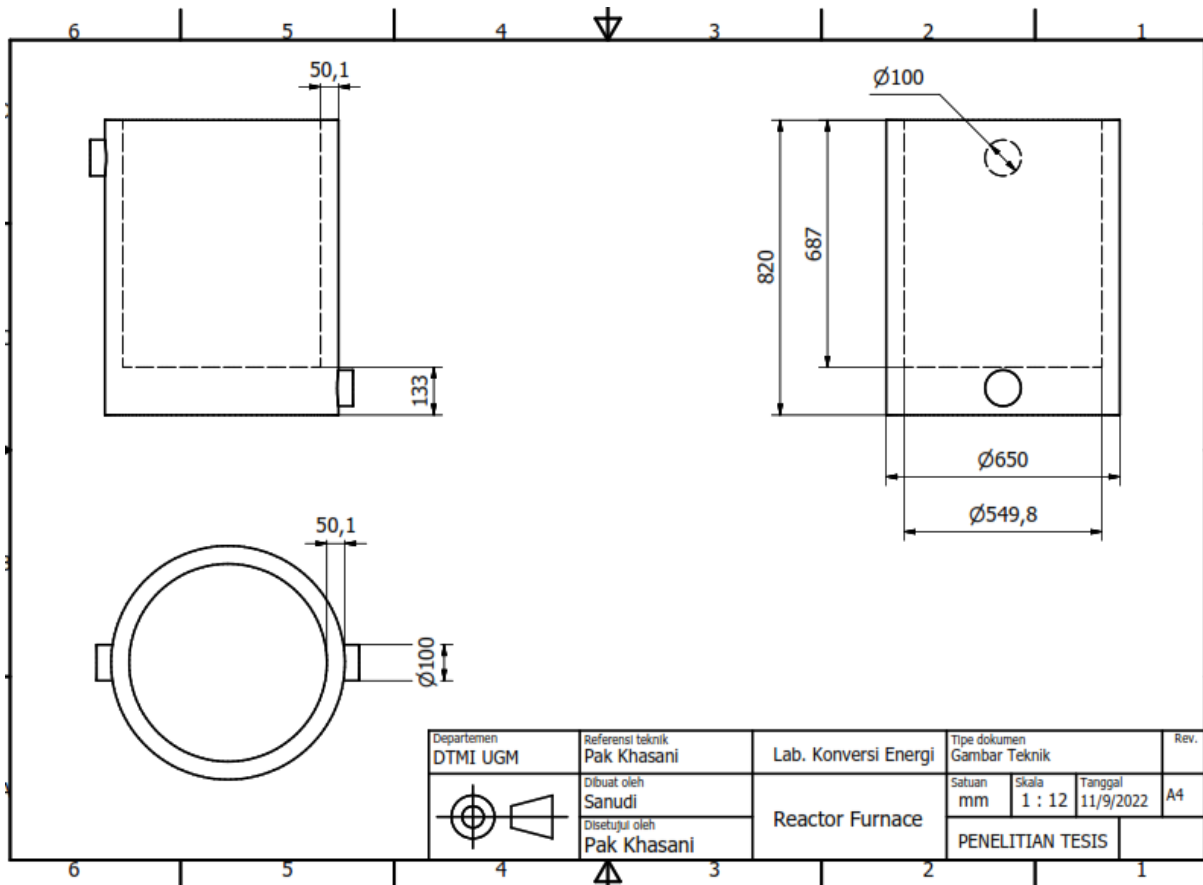
$$\dot{Q}_{max} = \dot{m}C_{p,steam}(T_{steam} - T_{\infty}) = 0.55 \frac{kg}{s} \times \left(2.56 \frac{kJ}{kgK}\right) \times (413.9 K) = 582.77 kW \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{received} = \dot{Q}_{max} - \dot{Q}_{losses} = 582.77 kW - 0.297 kW = 582.473 kW \quad (5)$$

$$\dot{Q}'' = \frac{\dot{Q}_{received}}{A_{total,in}} = \frac{582.473 kW}{1.42 m^2} = 410.2 \frac{kW}{m^2} \quad (6)$$



Gambar 3. (a) Hasil perancangan tungku model penuh, (b) Domain fluida



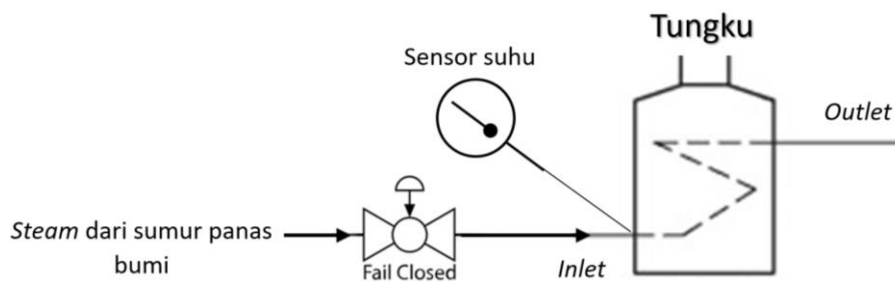
Gambar 4. Gambar CAD tungku untuk domain fluida

Diagram skematik tungku untuk domain fluida pada Gambar 5 menunjukkan bahwa aliran *steam* yang masuk menuju *inlet* berasal dari saluran pipa yang masuk melewati katup atau *valve* berjenis *fail closed*. Katup akan menutup saat suhu pada ruang celah mencapai suhu *melting* atau ≥ 110 °C. Pada saluran pipa yang menuju *inlet* dipasang sensor suhu berupa *thermocouple type K* guna untuk memantau kondisi aliran suhu di dalam pipa. Kalor yang dibutuhkan untuk proses *melting* pada 10 kg plastik LDPE mulsa yaitu sebesar $Q_{melting}$ yang terlampir pada Persamaan (7), (8), dan (9). Kalor yang dibutuhkan tersebut berasal dari kalor sensibel untuk menaikkan suhu plastik dari suhu 27 °C hingga 110 °C, dan kalor laten untuk mengubah fase plastik dari fase padat menjadi fase cair.

$$Q_{sensibel} = (10 \text{ kg}) \left(\frac{2.1 \text{ kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \right) (110 - 27)^\circ\text{C} = 2158 \text{ kJ} \quad (7)$$

$$Q_{laten} = (10 \text{ kg}) \left(\frac{121.4172 \text{ kJ}}{\text{kg}} \right) = 1214.172 \text{ kJ} \quad (8)$$

$$Q_{melting} = Q_{sensibel} + Q_{laten} = 2158 \text{ kJ} + 1214.172 \text{ kJ} = 3372.17 \text{ kJ} \quad (9)$$



Gambar 5. Diagram skematik perancangan tungku

Perhitungan *volume meshing* yang dilakukan dengan *ANSYS Fluent Meshing* menggunakan bentuk *poly-hexcore*. Penggunaan bentuk *poly-hexcore* dalam uji *meshing* bertujuan untuk meningkatkan nilai akurasi perhitungan saat akan menganalisis kalor pada aliran *steam* di domain fluida, terutama dalam menghitung laju *heat loss* \dot{Q}_{losses} yang keluar lingkungan. Hasil uji *meshing* menunjukkan bahwa *surface quality* pada domain fluida memiliki rata-rata nilai *skewness* 0.007, atau bernilai *excellent*. Nilai minimum dan maksimum *skewness* berturut-turut berada pada angka 4.03×10^{-7} dan 0.17. Perolehan *cell quality* dari hasil *meshing* pada model tungku untuk domain fluida diperoleh bahwa rata-rata nilai *orthogonal quality* 0.93, atau bernilai *very good*. Nilai minimum dan maksimum *orthogonal quality* berturut-turut berada pada angka 0.22 dan 1.

Surface Quality [Measure : Skewness]
 Minimum = 4.0347546e-07,
 Maximum = 0.17277971,
 Average = 0.0072313078.

Cell Quality [Measure : Orthogonal]
 Minimum = 0.22575333,
 Maximum = 1,
 Average = 0.93250586.

Skewness mesh metrics spectrum

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Orthogonal Quality mesh metrics spectrum

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00



Gambar 6. Kualitas hasil *meshing* menggunakan *ANSYS Fluent Meshing*

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan. Hasil perancangan memiliki 2 bentuk tungku yaitu model penuh dan domain fluida yang terdiri dari tungku dalam serta tungku luar dengan ruang lebar celah antar selimut tegak dan antar alas berturut-turut sebesar 50 mm dan 133 mm. Material tungku menggunakan bahan *stainless-steel grade 310* dengan minimal tebal pelat tungku dalam sebesar 0.8 mm. Dinding tungku luar dilapisi material *fiber* setebal 10 cm sebagai *insulator* untuk menahan *heat loss* yang keluar lingkungan sebesar 0.297 kW. *Steam* yang mengalir di dalam domain fluida menghasilkan *heat rate* maksimum sebesar 582.77 kW. Rerata fluks kalor yang diterima dinding tungku dalam dari aliran *steam* adalah sebesar $410.2 \frac{kW}{m^2}$. Kebutuhan kalor selama proses melting untuk 10 kg plastik LDPE mulsa adalah sebesar 3372.17 kJ. Perhitungan *volume meshing* menggunakan bentuk *poly-hexcore* bertujuan untuk meningkatkan nilai akurasi perhitungan saat akan menganalisis kalor pada aliran *steam* di domain fluida. Hasil uji *meshing* dengan rata-rata *surface quality* pada *skewness* bernilai *excellent* 0.007 dan rata-rata *orthogonal quality* bernilai *very good* 0.93.

Saran. Simulasi untuk mengetahui persebaran fluks kalor dari *steam* ke tungku dan *heat loss* karena *pressure drop* selama proses *preheating* dapat dilakukan lebih lanjut dengan *software* CFD.

DAFTAR PUSTAKA

Jurnal

- Darni, Y., Chici, A. dan Sri, I., 2008, *Sintesa Bioplastik dari Pati Pisang dan Gelatin dengan Plasticizer Gliserol*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- DiPippo, dan Ronald, 2012, *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies, and Environmental Impact*. 3rd ed. Amsterdam ; Boston: Butterworth- Heinemann.
- E. Kurniawan, N., 2014. Karakterisasi Bahan Bakar dari Sampah Plastik Jenis HDPE dan LDPE. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, vol.3, no.2, pp.41-52
- Gao, dan Feng, 2010, *Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels*.
- Kalargaris, Ioannis, Tian, Guohong, Gu, Sai, 2017., *Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil*. *Fuel Process. Technol.* 157, 108-115.
- Leckner, B., 2015, *Process aspects in combustion and gasification Waste to Energy (WtE) units*. *Waste Manag.* 37, 13-25
- M. Alexander, 2018. Neraca Massa dan Neraca Energi Pengelolaan Sampah Terpadu-Penunjang Kabupaten Tegal. *Technobiz J. Ilmu Program Studi Magister Teknik Mesin, volume 8*
- Pambudi, Nugroho Agung, Ryuichi Itoi, Saeid Jalilinasrabad, dan Khasani Jaelani., 2014, *Exergy Analysis and Optimization of Dieng Single-Flash Geothermal Power Plant*, *Energy Conversion and Management*.
- Peng, Yujie, Yunpu Wang, Linyao Ke, Leilei Dai, Qiuhaowu, Kirk Cobb, Yuan Zeng, Rongge Zou, Yuhuan Liu, dan Roger Ruan, *A Review on Catalytic Pyrolysis of Plastic Wastes to High-Value Products*, *Energy Conversion and Management*.
- Prasad, A. (1998). A quantitative analysis of low density polyethylene and linear low density polyethylene blends by differential scanning calorimetry and fourier transform infrared spectroscopy methods. *Polymer Engineering and Science*, 38(10). <https://doi.org/10.1002/pen.10342>
- Prasetio R, Abidin Z, Yulizar, Y. Isotope and gas geochemistry of Dieng geothermal field, Indonesia, In: *Proceedings, world geothermal congress, Bali, Indonesia. 2010; 25–29 April.*
- Sanudi, 2017, *Modifikasi Mesin Pirolisis Sampah Plastik Rakyat dengan Variasi Ketinggian dan Pipa Penyangga*, *Jurnal UGM*.
- Shah, Sajid Hussain, Zahid Mahmood Khan, Iftikhar Ahmad Raja, Qaisar Mahmood, Zulfiqar Ahmad Bhatti, Jamil Khan, Ather Farooq, Naim Rashid, dan Donglei Wu, 2010, *Low Temperature Conversion of Plastic Waste into Light Hydrocarbons*, *Journal of Hazardous Materials*
- Sirait, Ryanto, Eka Maulana, dan Didik Mahardika, *Analisis Keseimbangan Energi pada Reaktor Pirolisis Kapasitas 75kg/jam*.
- W. Trisunaryanti, *Dari Sampah Plastik menjadi Bensin dan Solar*, Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2018.
- Z. Liang, Y. Gui, Y. Wang, Q. Zhao., 2019. Corrosion performance of heat-resisting steels and alloys in supercritical carbon dioxide at 650 °C and 15 MPa, *Energy* 175. 345-352