

**LAPORAN AKHIR PENELITIAN
DIPA FT UNIVERSITAS LAMPUNG**



JUDUL PENELITIAN

**SIMULASI CFD ALIRAN DUA FASE CAMPURAN AIR-UAP PANAS BUMI PADA
KONDISI PIPA MENURUN DAN MENDAKI PADA BERBAGAI SUDUT
KEMIRINGAN**

TIM PENELITI/PELAKSANA

Dr. Harmen, S.T., M.T.

SINTA ID: 5978779

Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.

SINTA ID: 5985671

Ahmad Yonanda, S.T., M.T.

SINTA ID: 6679212

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2022

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN AKHIR PENELITIAN
DIPA FT UNIVERSITAS LAMPUNG 2022

Judul Proposal : Simulasi CFD Aliran Dua Fase Campuran Air-Uap Panas Bumi pada Kondisi Pipa Menurun dan Mendaki pada Berbagai Sudut Kemiringan

Jenis Kegiatan : DIPA Penelitian

Tim Peneliti

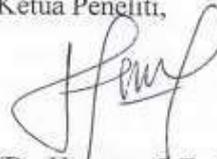
No	Nama Lengkap	NIDN	Jabatan Fungsional	Jurusan	No. HP
1.	Dr. Harmen, S.T., M.T.	0020066903	Lektor	Teknik Mesin	081225108174
2.	Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.	0002027004	Lektor Kepala	Teknik Mesin	081379183699
3.	Ahmad Yonanda, S.T., M.T.	0010019303	Asisten Ahli	Teknik Mesin	082373650086

Mahasiswa yang terlibat : 1 orang
Nama dan NPM mahasiswa : Fadhlan 'Azhim / NPM 1915021029

Lokasi kegiatan : Lab. Termodinamika Jurusan Teknik Mesin
Lama kegiatan : 6 bulan
Biaya penelitian : Rp 10.000.000,-
Sumber dana : DIPA Fakultas Teknik Unila

Bandar Lampung, 3 Oktober 2022

Ketua Peneliti,



(Dr. Harmen, S.T., M.T.)
NIP. 19690620 200003 1001

Sekretaris LPPM UNILA

Menyetujui
PPTK Fakultas Teknik UNILA



(Rudy, S.H., LL.M., LL.D.)
NIP. 198101042003121001

(Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.) ✕
NIP. 19750928 200112 1002

RINGKASAN

Banyak lapangan panas bumi di dunia termasuk juga di Indonesia merupakan lapangan panas bumi yang menghasilkan fluida hasil pengeboran berupa fluida 2-fase yang terdiri dari air, uap air, dan berbagai gas lainnya. Aliran 2-fase ini juga sering disebut dengan fluida multi-fase. Pada lapangan panas bumi fluida multi-fase dialirkan dari sumur produksi menuju separator untuk memisahkan antara air dan uap/gas sebelum digunakan untuk memutar turbin pada sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi. Jarak antara sumur-sumur produksi dengan separator cukup berjauhan dan dengan topografi yang mendaki dan menurun. Kondisi ini sangat mempengaruhi performansi dalam pengoperasiannya. Beberapa permasalahan aliran timbul selama pengoperasi dan setelah jangka waktu pengoperasian.

Kendala yang sering ditemukan selama operasi antara lain, *water hammer*, pembentukan *scalling*, pengikisan/erosi pipa, peningkatan/penurunan tekanan, dan penurunan laju aliran akibat adanya penyempitan dalam pipa. Hal ini akan dapat mengakibatkan kegagalan dalam sistem perpipaan fluida panas bumi di atas tanah (SAGS/steam Above Groud System) dan perubahan kualitas uap yang dihasilkan serta sekaligus akan mempengaruhi produksi listrik dari PLTP. Kajian simulasi ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui performansi SAGS dan karakteristik aliran multi-fase dari fluida panas bumi yang sangat sulit dilakukan secara eksperimen atau pengukuran langsung di lapangan. Hasil dari simulasi ini akan dapat digunakan untuk memprediksi kondisi SAGS dan perencanaan pemeliharannya.

Data-data yang digunakan dalam simulasi berasal dari data primer dan sekunder dari lapangan panas bumi Ulubelu kabupaten Tanggamus provinsi Lampung yang dioperasikan oleh PT. Pertamina Geothermal Energy (PGE). Data berupa dimensi dan spesifikasi pipa yang digunakan, data kondisi aliran (temperatur, tekanan, laju aliran, dan lain-lain), dan data kondisi sistem perpipaan. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak komersil berbasis CFD. Simulasi aliran multi-fase diterapkan untuk aliran fluida dalam pipa pada kondisi menerun dan mendaki untuk berbagai sudut kemiringan yang disesuaikan dengan kondisi lapangan yang ada. Parameter aliran yang diamati meliputi kecepatan aliran, temperatur fluida, tekanan fluida, tipe aliran multi-fase yang terjadi. Parameter ini akan mempengaruhi produksi steam dan brine yang dihasilkan oleh lapangan panas bumi.

Dari tiga cluster yang diamati didapatkan total produksi fluida 2 fase adalah sebesar 859,4 kg/s dan produksi steam dan brine masing-masing adalah sebesar 155,9 kg/s dan 717,1 kg/s. Dalam penelitian ini juga dilakukan pemanfaatan 80% brine sebagai sumber panas dari sistem pembangkit ORC yang mampu menghasilkan 15,12 MW energi listrik sebagai tambahan daya PLTP unit 1 & 2 atau tambahan daya sebesar 16,19% dari daya listrik yang dihasilkan PLTP.

Kata kunci: Panas bumi, aliran 2-fase, CFD, Simulasi, *piping*.

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN AKHIR PENELITIAN.....	Error!
Bookmark not defined.	
DIPA FT UNIVERSITAS LAMPUNG 2022.....	Error! Bookmark not defined.
RINGKASAN	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	4
1.3. Manfaat dan Urgensi Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Aliran Satu Fase	6
2.2. Aliran Dua Fase.....	7
2.3. Peta Jalan Penelitian.....	13
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	15
3.1 Data dan Spesifikasi Jaringan Pipa.....	16
3.2 Pembuatan geometri.....	17
3.3 Pembuatan mesh.....	18
3.4 Setup.....	19
3.5 Solution	20
3.6 Result.....	21
3.7 Metode Perhitungan Potensi Sistem Pembangkit ORC	22
BAB 4 DATA, HASIL DAN ANALISA SERTA LUARAN	23
4.1 Data Penelitian	23
4.1.1. Pengumpulan data primer/sekunder sistem perpipaan panas bumi. 23	
4.1.2. Data fluida 2-fase, uap, dan <i>brine</i>	24
4.2 Hasil dan Analisa.....	25
4.2.1. Pemodelan Geometri.....	25
4.2.2. Hasil simulasi Ansys Fluent aliran 2-fase.....	26

4.2.3. Potensi pembangkit ORC dari brine PLTP Ulubelu	29
4.3 Status Luaran	32
BAB 5 KESIMPULAN.....	33
DAFTAR PUSTAKA	34
LAMPIRAN 1.....	36
LAMPIRAN 2.....	38
LAMPIRAN 2.....	39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Lokasi lapangan panas bumi Ulubelu (PGE, 2017).....	1
Gambar 2. Tata letak cluster Unit-1 dan Unit-2, lapangan panas bumi Ulubelu....	3
Gambar 3. Jenis aliran dua fase dalam pipa horizontal (Baker, 1954)	8
Gambar 4. Peta Baker untuk memprediksi rezim aliran dua fase (Baker, 1954)....	9
Gambar 5. Peta Baker yang dimodifikasi untuk aliran horizontal	10
Gambar 6. Peta pola aliran dua fase oleh Mandhane et al. (1974).....	11
Gambar 7. <i>Road Map</i> Penelitian	14
Gambar 8. Bagan alir dari tahapan penelitian.....	15
Gambar 9. Tahapan analisa numerik pada Ansys Fluent.....	15
Gambar 10. Diagram skematik dari SAGS Unit-1 dan Unit-2 Ulubelu	16
Gambar 11. Geometri pipa.....	18
Gambar 12. Langkah-langkah untuk menghitung nilai Y^+	19
Gambar 13. Menu meshing.....	19
Gambar 14. Langkah-langkah setup	20
Gambar 15. Metode penyelesaian simulasi.....	20
Gambar 16. Menu hasil.....	21
Gambar 17. Diagram alir proses SAGS Unit-1 dan Unit-2, sistem panas bumi Ulubelu (PGE, 2012).....	24
Gambar 18. Model geometri pipa dengan sudut naik/turun 90°	25
Gambar 19. Model geometri pipa dengan sudut naik/turun 60°	25
Gambar 20. Model geometri pipa dengan sudut naik/turun 45°	26
Gambar 21. Model geometri pipa dengan sudut naik/turun 30°	26
Gambar 22. Model geometri pipa	27
Gambar 23. Diskritisasi (<i>meshing</i>) model geometri pipa.....	27
Gambar 24. Countur kecepatan aliran fluida 2-fase untuk belokan 30°	28
Gambar 25. Balans energi pada lapangan panas bumi Ulubelu.....	29
Gambar 26. Dagram T - s siklus Rankine organik untuk pentana.	30
Gambar 27. Diagram termodinamika dari sistem ORC.....	31

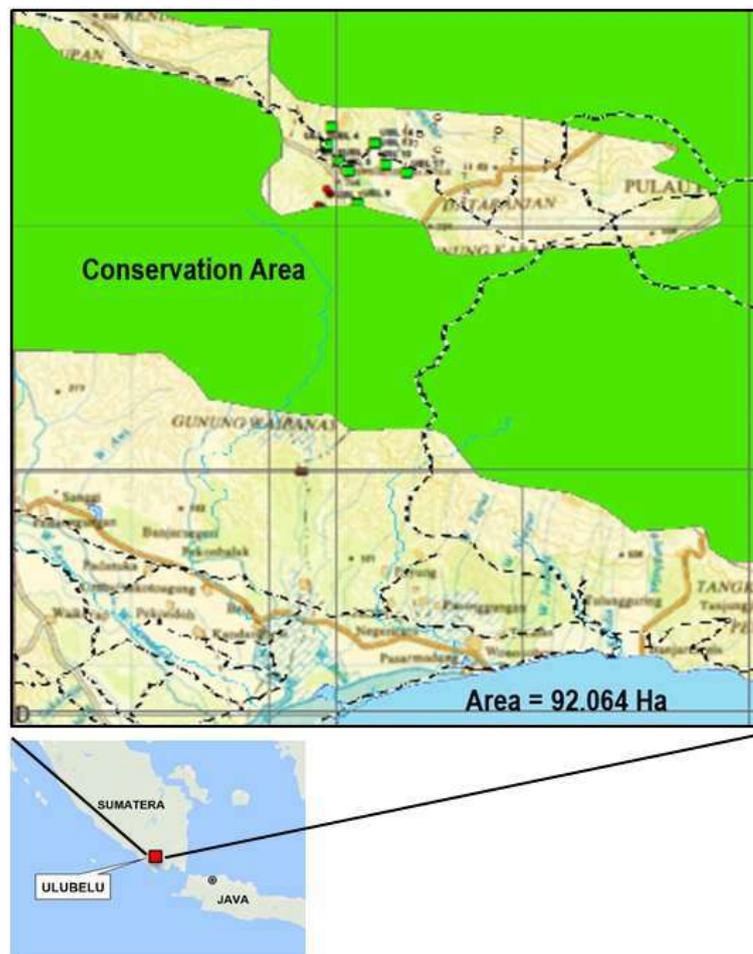
DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi pipa utama (PGE, 2012)	16
Tabel 2. Data dan Spesifikasi Jaringan Pipa SAGS Unit-1 dan Unit-2 Ulubelu. .	17
Tabel 3. Neraca massa panas SAGS Unit-1 dan Unit-2 Ulubelu pada kondisi desain.	23
Tabel 4. Laju aliran massa dari fluida 2-fase, uap dan brine	24
Tabel 5. Jumlah energi fluida 2-fase, uap, dan <i>brine</i>	30
Tabel 6. Parameter input perhitungan sistem ORC.....	31

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Lapangan panas bumi Ulubelu terletak di wilayah administrasi Kabupaten Tanggamus. Berjarak sekitar 100 km sebelah barat kota Bandar Lampung, ibu kota Provinsi Lampung di Sumatera, Indonesia. Secara geografis, lapangan panas bumi Ulubelu dibatasi oleh $104^{\circ}27'25''$ dan $104^{\circ}43'31''$ BT dan $5^{\circ}15'16''$ dan $5^{\circ}31'29''$ LS. Total luas permukaan lapangan panas bumi Ulubelu adalah 90 ha (Gambar 1).



Gambar 1. Lokasi lapangan panas bumi Ulubelu (PGE, 2017)

Pengembangan lapangan panas bumi Ulubelu dimulai dengan tahap eksplorasi yang dilakukan pada tahun 1991 hingga 2007. Kegiatan yang dilakukan pada tahap ini meliputi survei geologi, geofisika, geokimia, studi dan penilaian reservoir, pemboran eksplorasi dan penyiapan lahan. Tahap selanjutnya adalah tahap

pengembangan yang dilaksanakan dari tahun 2007 sampai dengan tahun 2012. Kegiatan yang dilakukan adalah pembangunan infrastruktur, pemboran delineasi sumur produksi dan sumur reinjeksi serta pembangunan steam above ground system (SAGS) Unit-1 dan Unit-2. Tahap produksi dimulai pada tahun 2012 dan berlangsung hingga saat ini. Pada tahap ini, Unit-1 dan Unit-2 mulai memproduksi listrik dengan kapasitas terpasang masing-masing 55 MW. Sejalan dengan kegiatan operasional Unit-1 dan Unit-2, dikembangkan dua unit lagi yaitu Unit-3 dan Unit-4 yang masing-masing berkapasitas terpasang 55 MW. Kegiatan produksi dan monitoring Unit-1 dan Unit-2 dilakukan secara paralel dengan kegiatan pengeboran delineasi, serta engineering, procurement, construction dan commissioning SAGS serta Unit-3 dan Unit-4 yang selesai pada pertengahan tahun. 2017.

Ada dua skema bisnis pemanfaatan panas bumi di lapangan panas bumi Ulubelu. Pertama, Perjanjian Jual Beli Uap (PJBU) untuk Unit-1 dan Unit-2 dan kedua, Perjanjian Jual Beli Listrik (PJBL) untuk Unit-3 dan Unit-4. Dalam skema PJBU, PT PERTAMINA Geothermal Energy (PT PGE) memiliki tanggung jawab untuk membangun SAGS dan menyalurkan uap ke pembangkit listrik milik PT PLN (Perusahaan Listrik Negara). Dalam skema PJBL, PT PGE memiliki tanggung jawab untuk membangun SAGS dan pembangkit listrik. Listrik dari pembangkit tersebut akan dijual ke PT PLN sebagai pembeli tunggal listrik di Indonesia.

Lapangan panas bumi Ulubelu merupakan salah satu lapangan panas bumi di Indonesia yang bercirikan fluida dua fasa. Fraksi uap dalam total cairan dua fase rata-rata sekitar 20%. Pembangkit listrik tenaga panas bumi Unit-1 dan Unit-2 yang telah beroperasi sejak tahun 2012 dipasok dari tiga cluster sumur produksi dan dua cluster sumur reinjeksi (Gambar 2). Distribusi sumur produksi dan sumur reinjeksi untuk Unit-1 dan Unit-2 adalah sebagai berikut:

Cluster sumur produksi

1. Cluster-B, terdiri dari 4 sumur:

- UBL-02 (B1)
- UBL-03 (B2)
- UBL-15 (B4)
- UBL-16 (B5)

2. Cluster-C, terdiri dari 4 sumur:

- UBL-05 (C1)
- UBL-06 (C2)
- UBL-07 (C3)
- UBL-08 (C4)

3. Cluster-D, terdiri dari 3 sumur:

- UBL-11 (D1)
- UBL-12 (D2)
- UBL-14 (D4)

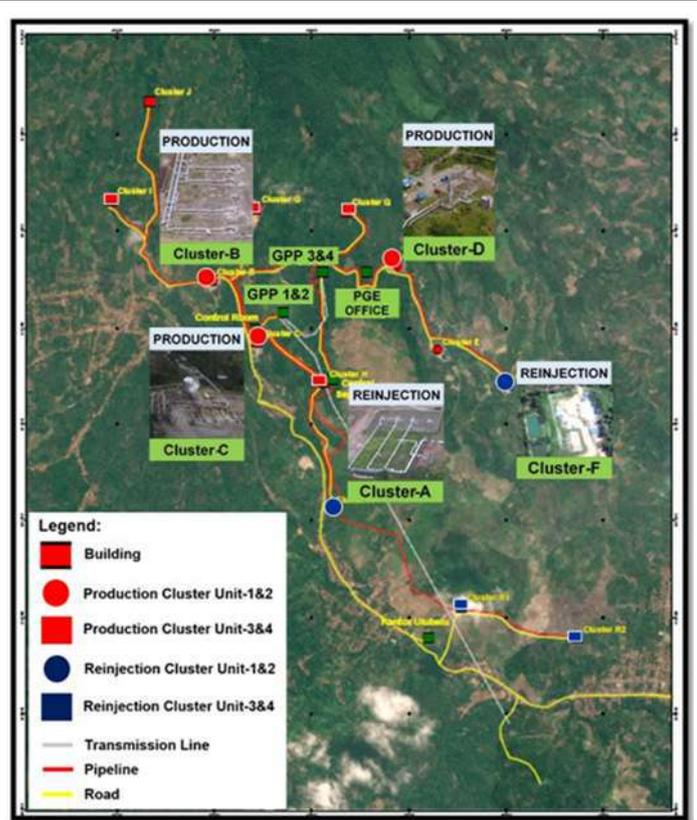
Cluster sumur reinjection

1. Cluster A, terdiri dari 3 sumur:

- UBL-01 (A1)
- UBL-18 (A3)
- UBL-23 (A4)

2. Cluster F, terdiri dari 3 sumur:

- UBL-17 (F1)
- UBL-19 (F2)
- UBL-23 (F3)



Gambar 2. Tata letak cluster Unit-1 dan Unit-2, lapangan panas bumi Ulubelu (PGE, 2017a).

Selama kurang lebih dua puluh tahun beroperasi dari 2012 hingga 2022, di mana parameter operasi di SAGS dipantau secara rutin, secara lokal atau di ruang kontrol, beberapa perubahan telah diamati. Perubahan yang dialami antara lain penurunan tekanan, temperatur dan kapasitas produksi akibat penurunan kinerja sumur, serta berkurangnya umur operasi fasilitas produksi seperti pipa dan separator (Cahyono, 2017). Kondisi saat ini jauh berbeda dengan kondisi SAGS saat ini pada kondisi desain yaitu awal pengoperasian. Isu penting lainnya adalah potensi scaling pada jaringan pipa.

Penelitian ini akan mensimulasikan aliran fluida panas bumi multi-fase dalam pipa SAGS yang telah beroperasi selama 20 tahun. Kondisi parameter operasi dan kondisi fasilitas produksi masih kurang lebih sama dengan kondisi desain dan tidak ada perubahan signifikan dalam periode operasi singkat. Ada dua kondisi yang

disimulasikan, yaitu aliran turun (*downdraft flow*) dan aliran naik (*updraft flow*) dengan sudut tegak lurus (90°), kemiringan 60° , 45° , dan 30° .

Selain itu dalam penelitian ini juga dilakukan perhitungan jumlah uap yang disepari dari fluida 2-fase yang akan dialirkan ke unit pembangkit listrik dan jumlah fluida cair (*brine*) yang akan diinjeksikan kembali ke perut bumi. Kemudian juga dilakukan analisa potensi pemanfaatan brine yang rendah kalori untuk membangkitkan listrik menggunakan sistem pembangkit yang beroperasi berdasarkan siklus Rankine organik.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mensimulasikan aliran fluida panas bumi multi-fase dalam sistem pipa SAGS lapangan panas bumi Ulubelu, masalah yang disebutkan dalam latar belakang adalah tujuan khusus yang ingin diketahui dan dievaluasi dan dirinci sebagai berikut:

- 1) Mengidentifikasi dan menentukan parameter-parameter aliran multi-fase.
- 2) Menganalisis pengaruh parameter aliran terhadap parameter operasi SAGS, dan
- 3) Menghitung potensi yang diakibat perubahan parameter operasi terhadap produksi kualitas steam yang dihasilkan.
- 4) Menghitung dan menganalisa potensi brine untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tambahan menggunakan sistem pembangkit siklus Rankine organik (SRO) atau *organic Rankine cycle* (ORC).

1.3. Manfaat dan Urgensi Penelitian

Berhubung telah 20 tahun lapangan panas bumi Ulubelu beroperasi, maka assessment terhadap SAGS mutlak diperlukan untuk menghindari akibat fatal yang tak diinginkan, seperti pecahnya atau tersumbatnya aliran pada pipa. Hasil simulasi ini akan mampu untuk memprediksi kemungkinan-kemungkinan mal-function dari sistem SAGS ini yang belum tentu dapat dilakukan melalui pengamatan kondisi lapangan maupun secara eksperimental serta membutuhkan biaya yang besar.

Selain itu parameter aliran fluida panas bumi multi fase juga sangat diperlukan dalam penelitian-penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan kehandalan sistem

pembangkit tenaga panas bumi dan juga tentunya akan berkontribusi dalam ilmu pengetahuan.

Uap yang terkandung dalam fluida panas bumi di lapangan panas bumi Ulubelu adalah sebesar 20%. Sampai saat ini fluida cairnya (brine) hanya diinjeksikan kembali ke dalam perut bumi. Dengan tekanan dan temperatur brine masing-masing sebesar 8 bar dan 170°C ini merupakan sumber energi potensial untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tambahan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Aliran Satu Fase

Pada aliran satu fasa, penurunan tekanan yang terjadi pada pipa disebabkan oleh gesekan sepanjang pipa dan perbedaan elevasi (Purwono, 2010). Penurunan tekanan akibat gesekan dapat diprediksi dengan menghitung kecepatan fluida satu fasa di dalam pipa dengan menggunakan:

$$u = \left(\frac{4\dot{V}}{\pi D^2} \right) \quad (1)$$

IPS (1996) menjelaskan bahwa kecepatan aliran satu fasa dalam pipa untuk air maksimum 3 m/s, dan untuk steam maksimum 40 m/s (uap jenuh) dan 60 m/s (uap superheated). Batas kecepatan ini diterapkan untuk mencegah terjadinya erosi pada pipa.

Setelah kecepatan fluida diketahui, maka dapat dihitung bilangan Reynold (Re):

$$Re = \left(\frac{\rho u D}{\mu} \right) \quad (2)$$

Berdasarkan nilai bilangan Reynolds, ada dua jenis aliran; laminar dan turbulen. Pada aliran laminar, gaya viskos lebih dominan karena dicirikan oleh gerakan fluida yang halus, konstan, sedangkan aliran turbulen terjadi pada bilangan Reynolds yang tinggi dan didominasi oleh gaya inersia.

Selanjutnya, faktor gesekan dapat dihitung berdasarkan jenis aliran, apakah itu laminar atau turbulen. Nilai Re untuk menentukan faktor gesekan (f) adalah sebagai berikut:

$$Re \leq 2500 \quad f = \left(\frac{64}{Re} \right) \quad (3)$$

$$Re > 5000 \quad f = \frac{0,25}{\left(\log_{10} \left[\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right] \right)^2} \quad (4)$$

Persamaan 4 adalah persamaan Swamee-Jain yang digunakan untuk menyelesaikan langsung faktor gesekan Darcy-Weisbach f untuk pipa bundar yang penuh. Ini adalah perkiraan dari persamaan implisit Colebrook-White.

Kemudian tinggi gesekan (H_f) dihitung dengan:

$$H_f = \frac{fv^2L_e}{2gD} \quad (5)$$

di mana L_e adalah panjang ekivalen:

$$L_e = L_p + n_b H_{eq} D + n_v H_{eq} D + n_r H_{eq} D \quad (6)$$

Penurunan tekanan akibat gesekan sepanjang pipa dapat dinyatakan dengan:

$$\Delta P_f = \rho g H_f \quad (7)$$

Untuk menghitung penurunan tekanan akibat perbedaan elevasi dapat dilakukan dengan menggunakan :

$$\Delta P_H = \rho g (z_e - z_s) \quad (8)$$

Oleh karena itu, penurunan tekanan total dalam aliran fase tunggal adalah:

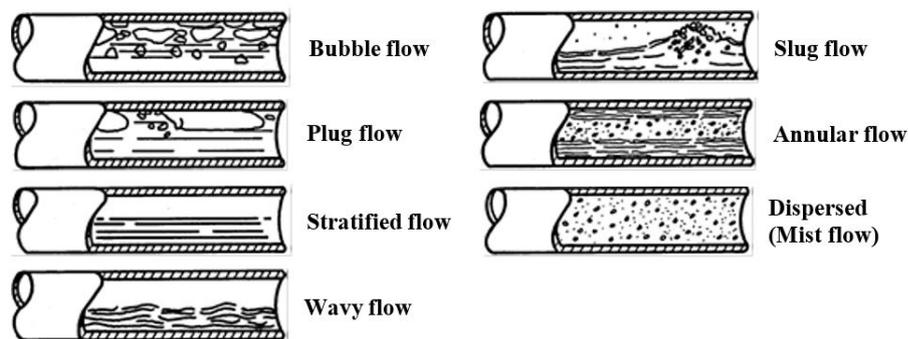
$$\Delta P_t = \Delta P_f + \Delta P_H \quad (9)$$

2.2. Aliran Dua Fase

Lapangan panas bumi Ulubelu adalah sistem yang didominasi air. Untuk sistem seperti itu, aliran fluida dari sumur adalah aliran dua fase, yang terdiri dari uap dan air. Fraksi steam rata-rata 20% berarti persentase steam hanya 20% dari total aliran dua fase. Pola aliran dua fase dalam pipa akan bervariasi tergantung pada banyak faktor, seperti orientasi pipa (horizontal atau vertikal), diameter pipa, laju aliran fluida, fase cair atau gas, tekanan, suhu, dll. Klasifikasi keduanya Pola aliran -fase akan dibagi menjadi dua. Pertama, aliran dua fase dalam pipa vertikal yang dapat ditemukan pada aliran dari reservoir tempat fluida mengalir di lubang sumur hingga kedua fase dikeluarkan dari sumur. Kedua, aliran dua fase dalam pipa horizontal, mengalir dari kepala sumur ke separator. Karena kajian ini tentang SAGS, maka akan dijelaskan teori dasar pola aliran dua fase pada pipa horizontal. Dalam pipa horizontal, penentuan pola aliran didasarkan pada rasio kecepatan superfisial gas

dan cairan. Beberapa jenis aliran dialami dalam pipa horizontal, seperti dapat dilihat pada Gambar 3 (Baker, 1954).

1. Aliran gelembung (*bubble flow*): gelembung uap terbentuk dan mengalir di bagian atas pipa dengan kecepatan yang kira-kira sama dengan kecepatan fase cair.
2. Aliran *plug*: *plug* fluida dan gelembung uap bergerak bergantian di bagian atas pipa.
3. Aliran bertingkat (*Stratified flow*): fase cair mengalir di bagian bawah pipa sementara fase uap mengalir di atasnya. Batas antara fase cair dan uap disebut interface uap-cair.
4. Aliran bergelombang (*Wavy flow*): mirip dengan aliran bertingkat, fase cair mengalir di bagian bawah sedangkan fase uap mengalir di atasnya, tetapi karena fase uap bergerak lebih cepat, maka *interface* fase uap-cair menjadi bergelombang.
5. Aliran *slug*: fase uap yang mengalir dengan kecepatan lebih tinggi daripada cairan mengubah aliran menjadi aliran *slug*.
6. Aliran *annular*: fase cair berupa lapisan-lapisan mengalir di sepanjang dinding pipa dan uap di tengah pipa dengan kecepatan tinggi.
7. *Dispersed* (aliran kabut/*mist*): Terjadi ketika fase uap kontinu dengan butiran cair tersebar di seluruh uap. Ini biasanya disebut sebagai aliran kabut.



Gambar 3. Jenis aliran dua fase dalam pipa horizontal (Baker, 1954)

Hubungan antara kecepatan superfisial gas dan cair dengan pola aliran digambarkan dalam peta pola aliran. Peta pola aliran dapat digunakan untuk

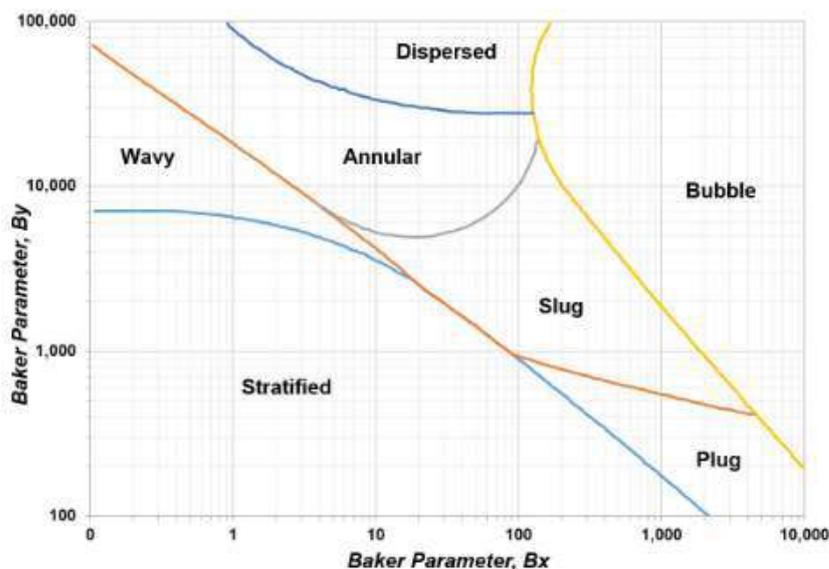
memprediksi pola aliran dua fasa di dalam pipa. Beberapa peta pola aliran telah diterbitkan, termasuk peta Baker (Baker, 1954), (Gambar 4), peta Hoogendorn (Hoogendorn, 1959), peta Mandhane (Mandhane et. al., 1974), peta Mukherjee dan Brill (Spedding dan Watterson, 1998), peta Spedding dan Nguyen (Spedding dan Watterson, 1998), peta Lin dan Hanratty (Spedding dan Spence, 1993), dan peta rezim aliran Universal (Spedding et. al., 2003). Pada prinsipnya semua peta pola aliran merupakan prediksi sehingga tidak dapat ditentukan secara pasti mana yang paling akurat. Pada penelitian ini, peta Baker dan Mandhane akan digunakan untuk menentukan pola aliran pada pipa dua fasa. Peta Baker menentukan pola fluida dua fase seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Peta Baker, yang diterbitkan pada tahun 1954, menentukan pola aliran dua fase dengan memplot parameter Baker, B_x pada sumbu x dan B_y pada sumbu y . Peta Baker untuk pipa horizontal adalah grafik logaritmik, dan dengan itu parameter Baker dapat didefinisikan sebagai:

$$B_x = 531 \left(\frac{1-x}{x} \right) \left(\frac{\rho_v^{0,5}}{\rho_L^{0,167}} \right) \left(\frac{\mu_L^{0,333}}{\sigma_L} \right) \quad (10)$$

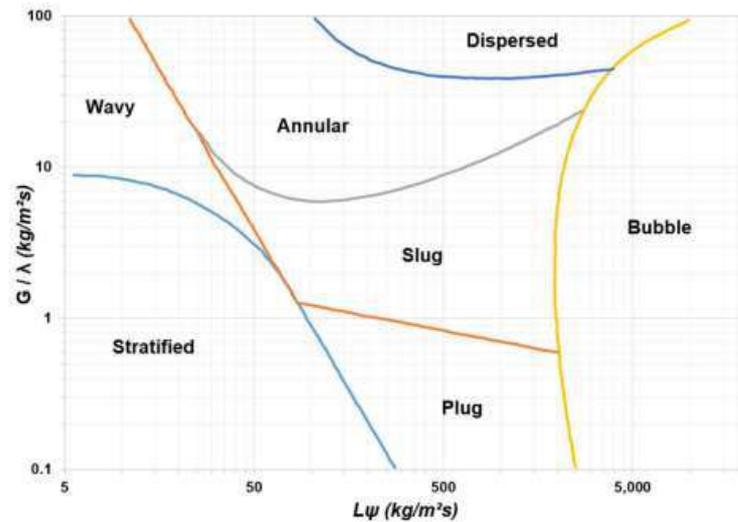
dan

$$B_y = 2,16 \frac{Q \cdot x}{A(\rho_L \rho_v)^{0,5}} \quad (11)$$



Gambar 4. Peta Baker untuk memprediksi rezim aliran dua fase (Baker, 1954)

Whalley, 1987 memodifikasi dan meningkatkan peta Baker dan menerbitkan peta pola aliran dua fase yang baru dimodifikasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Dia mengubah unit tak berdimensi peta Baker menjadi unit SI.



Gambar 5. Peta Baker yang dimodifikasi untuk aliran horizontal (Whalley, 1987)

Dari Gambar 4 dan Gambar 5, G dan L masing-masing adalah fluks massa fase gas dan cair. Persamaan untuk menghitung parameter dan adalah:

$$\psi = \left(\frac{0,0724}{\sigma_L} \right) \left(\frac{\mu_L}{0,0009} \left(\frac{1000}{\rho_L} \right)^2 \right)^{1/3} \quad (12)$$

dan

$$\lambda = \left(\frac{\rho_G}{1,2} \cdot \frac{\rho_L}{1000} \right)^{1/2} \quad (13)$$

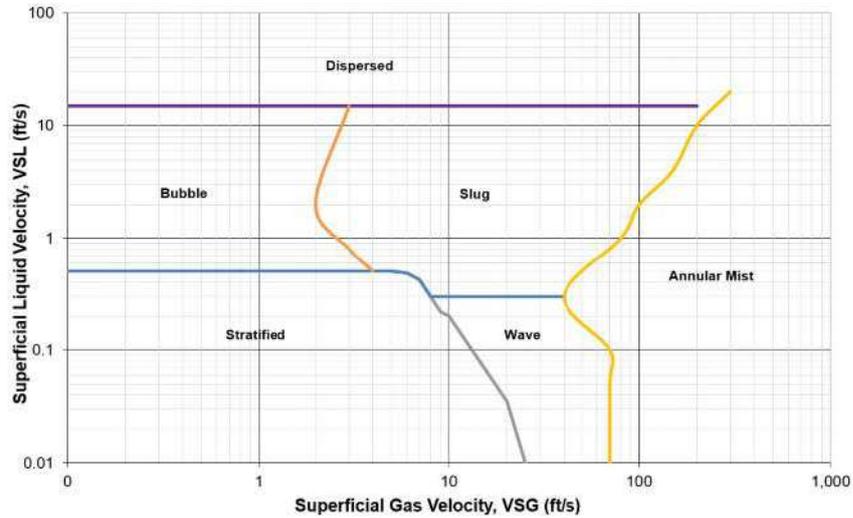
Untuk menilai penentuan pola aliran dua fasa, Mandhane et al. (1974) dapat digunakan. Ini memberikan pendekatan yang baik karena dalam percobaan mereka mereka menggunakan sejumlah besar data percobaan (bank data aliran dua fase AGA-API) dari penelitian antara tahun 1962 dan 1973. Mereka mengambil semua hasil aliran horizontal dan berdasarkan peta mereka sendiri (Gambar 6).

Kecepatan fluida superfisial, masing-masing G dan L untuk gas dan cairan, ditentukan berdasarkan aliran volumetrik gas Q_{VS} dan aliran volumetrik cairan Q_L sebagai berikut:

$$V_{SG} = \frac{Q_{VS}}{A} \quad (14)$$

dan

$$V_{SL} = \frac{Q_L}{A} \quad (15)$$



Gambar 6. Peta pola aliran dua fase oleh Mandhane et al. (1974)

Perhitungan untuk aliran dua fase lebih kompleks daripada untuk aliran satu fase. Juga sangat sulit untuk menurunkan persamaan untuk mendapatkan sifat fluida dua fasa. Oleh karena itu, sifat fluida dua fasa sering diperoleh secara empiris.

Pada penelitian ini, perhitungan penurunan tekanan pada fluida dua fasa menggunakan model aliran terpisah, dimana fraksi rongga (α) merupakan parameter penting. Fraksi hampa adalah rasio penampang aliran uap (A_g) terhadap total penampang (A):

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad (16)$$

Zhao et al., 2000 memodifikasi dan meningkatkan persamaan penurunan tekanan dalam pipa fluida dua fase Harrison (Bergthórsson, 2006) dengan menjelaskan korelasi fraksi kekosongan baru yang diturunkan dari analisis distribusi kecepatan dua fase menggunakan Hukum Daya Ketujuh. Persamaan ini kemudian digunakan dalam perhitungan penurunan tekanan karena panjang:

$$\frac{1-\alpha}{\alpha^{7/8}} = \left[\left(\frac{1}{x} - 1 \right) \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right) \right]^{7/8} \quad (17)$$

Untuk memprediksi penurunan tekanan dalam aliran dua fase, diasumsikan bahwa aliran fase tunggal semu yang setara memiliki distribusi kecepatan lapisan batas yang sama. Kecepatan rata-rata itu digunakan untuk menentukan faktor gesekan dinding. Kecepatan juga memiliki korelasi parameter yang baik untuk memprediksi penurunan tekanan pada aliran dua fasa pada pipa horizontal.

Fraksi ruang kosong menentukan parameter aliran dua fase lainnya, seperti kecepatan fase cair rata-rata (\bar{V}_f) dan kepadatan rata-rata (ρ). Zhao dkk. (2000) Jelaskan bahwa kecepatan rata-rata fase cair dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\bar{V}_f = 1,1(1 - x) \frac{\dot{m}(1-x)}{\rho_l(1-\alpha)A} \quad (18)$$

Dalam Persamaan 18, $1.1(1 - x)$ digunakan sebagai faktor koreksi terutama untuk entrainment. Faktor koreksi ini dipilih untuk memberikan hasil yang baik daripada memiliki justifikasi teoretis yang ketat. Kecepatan rata-rata aliran satu fasa ekuivalen (\bar{V}) dihitung sebagai:

$$\frac{\bar{V}_f}{\bar{V}} = \frac{(1-\sqrt{\alpha})^{8/7} \cdot (1+\frac{8}{7}\sqrt{\alpha})}{(1-\alpha)} \quad (19)$$

Dengan menggunakan bilangan Reynolds dan faktor gesekan dalam Persamaan 2 dan 4, penurunan tekanan karena panjang dihitung sebagai (Zhao et. al., 2000):

$$\Delta P_L = \frac{f \rho_L \bar{V}^2}{2D_{pipe}(1-AC)} \cdot L \quad (20)$$

dengan

$$AC = \frac{m_g}{\rho_G \cdot P \cdot A^2 \cdot \alpha} \quad (21)$$

Jika fluida dua fasa mengalir melalui suatu instalasi seperti belokan, unit ekspansi (peredam), katup dll, maka pola aliran akan terganggu. Namun, lebih sulit untuk membuat model aliran dua fase melintasi tikungan daripada aliran satu fase karena aliran dua fase sangat kompleks dan dipengaruhi oleh gaya sentrifugal. Kehilangan tekanan di tikungan dipengaruhi oleh berbagai parameter dan tidak ada metode perhitungan analitik yang dapat menghitungnya secara akurat. Oleh karena itu, metode yang umum digunakan mengalikan kehilangan tekanan satu fase dengan

pengali dua fase empiris seperti yang umum untuk analisis pipa lurus. Chisholm (1983) mengusulkan pengali untuk cairan yang mengalir sendiri:

$$\varphi_{BLO}^2 = 1 + \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) (B x (1 - x) + x^2) \quad (22)$$

dan

$$B = 1 + \frac{2,2}{K_{BLO} \left(2 + \left(\frac{L}{D} \right) \right)} \quad (23)$$

Kemudian, penurunan tekanan melalui instalasi dapat dihitung dengan:

$$\Delta P_{fi} = \frac{f \rho_m \bar{V}^2}{2D} (\varphi_{BLO,b}^2 n_b h_b D + \varphi_{BLO,r}^2 n_r h_r D + \varphi_{BLO,v}^2 n_v h_v D) \quad (24)$$

Oleh karena itu, penurunan tekanan total dalam aliran dua fase dalam pipa menjadi:

$$\Delta P_t = \Delta P_L + \Delta P_{fi} + \Delta P_H \quad (25)$$

2.3. Peta Jalan Penelitian

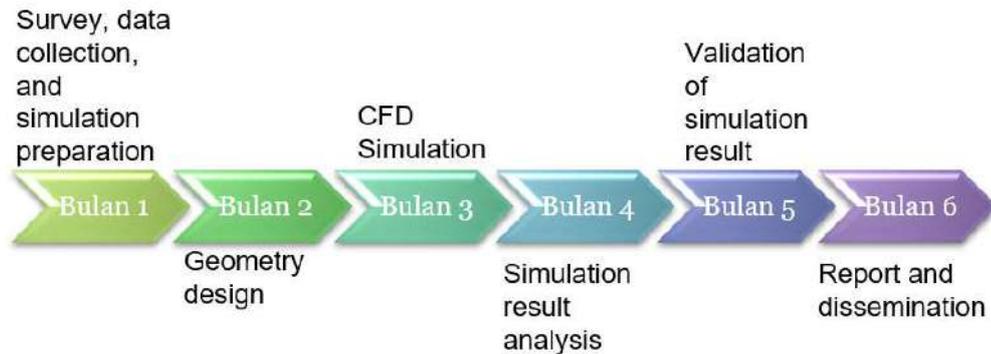
Keseluruhan penelitian dikelompokkan menjadi 3 bagian yaitu penelitian simulasi, tahap validasi dan tahap aplikasi/pembuatan engineering tools untuk proses *assessment*, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7. Pada Gambar 7 juga diberikan tahun pelaksanaan dan penelitian yang dilakukan pada tahun tersebut. Pada tahap simulasi dilakukan simulasi dari aliran multi-fase (penelitian yang diusulkan saat ini), simulasi aliran steam, dan simulasi aliran brine yang dilakukan pada tahun 2022 – 2023. Pada tahap validasi hasil simulasi dan tahap aplikasi dilakukan pada tahun 2024. Diakhir tahap penelitian akan dapat dilakukan *assessment* terhadap SAGS di lapangan panas bumi yang saat ini sangat pesat dikembangkan karena potensinya yang sangat besar di Indonesia dan untuk meng-explore penggunaan energi terbarukan baik untuk mengurangi dampak lingkungan dan kelangkaan dari bahan bakar fosil.



Gambar 7. Road Map Penelitian

BAB 3. METODE PENELITIAN

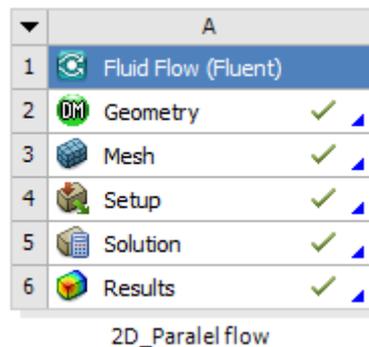
Metode penelitian untuk penelitian yang diusulkan saat ini dapat dilihat pada bagan alir penelitian berikut (Gambar 8)



Gambar 8. Bagan alir dari tahapan penelitian

Simulasi CFD dilakukan untuk mengetahui distribusi temperatur, kecepatan, dan tekanan dari fluida. Sifat-sifat fluida lain seperti densitas, viskositas, konduktifitas termal juga bisa diketahui melalui simulasi ini. Hasil simulasi ini akan digunakan untuk menentukan parameter-parameter operasi dari aliran 2-fase fluida panas bumi dalam pipa.

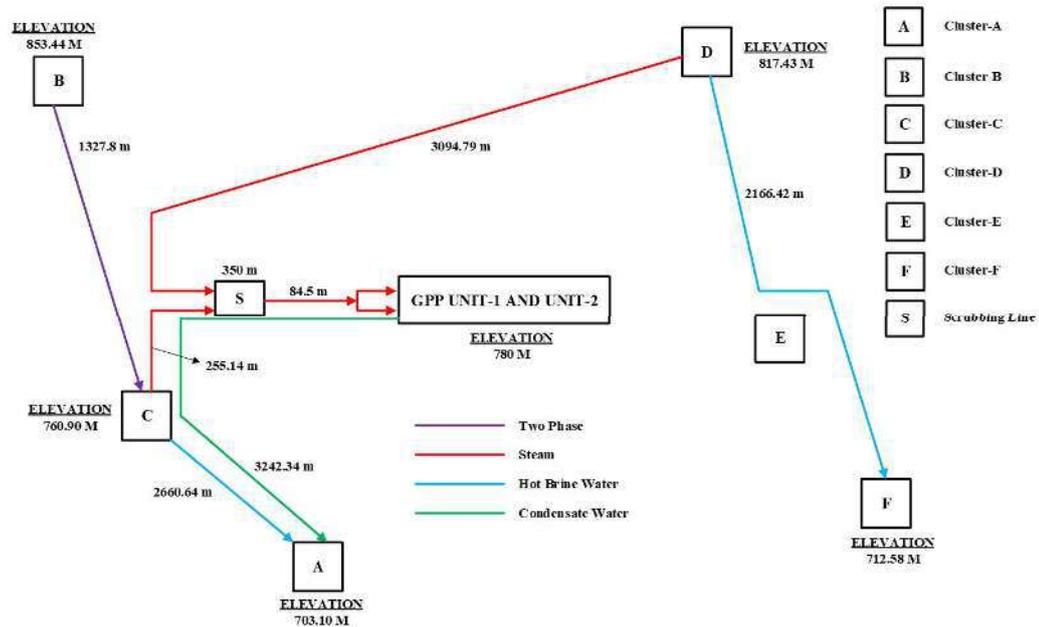
Simulasi akan menggunakan perangkat lunak Ansys fluent dan menggunakan 5 tahapan dalam analisa pemodelannya seperti yang diperlihatkan pada Gambar 9. Data dan spesifikasi jaringan pipa serta tahapan pemodelan diuraikan pada sub bab berikut.



Gambar 9. Tahapan analisa numerik pada Ansys Fluent

3.1 Data dan Spesifikasi Jaringan Pipa

Sebagian besar fasilitas produksi yang digunakan pada SAGS Unit-1 dan 2 adalah pipa. Pipa-pipa ini digunakan mulai dari kepala sumur hingga titik interface. Spesifikasi pipa tergantung pada jenis aplikasi di setiap bagian, misalnya pipa untuk dua fase akan memiliki spesifikasi yang berbeda dengan pipa untuk steam dan brine. Banyak faktor yang mempengaruhinya, seperti tekanan dan suhu operasi, laju aliran fluida, komposisi kimia fluida, dan lain-lain. Gambar 10 menunjukkan diagram skema SAGS Unit-1 dan Unit-2 (PGE, 2012).



Gambar 10. Diagram skematik dari SAGS Unit-1 dan Unit-2 Ulubelu

Tabel 1. Klasifikasi pipa utama (PGE, 2012)

No	Jalur	Daerah	P _o (barg)	P _d (barg)	T _d (°C)	Klas Pipa
1	Well branchline (high pressure)	All cluster	-	60	296	T3
2	Two-phase line (medium pressure)	Test line	-	25	215	T2
3	Two-phase line (low pressure)	Cluster D	12,58	14,1	215	T2
		Cluster B	11,4	12,8	210	T1
4	Steam line	Cluster C	9,98	11,5	205	T1
		D – GPP	11,96	13,5	210	S1
5	Hot brine	C – GPP	9,31	10,8	200	S1
		D – F	18,62	20,4	210	B2
6	Condensate	D – A	10,86	13,4	197	B2
		GPP – A	14,3	16	70	C1

Tabel 1 menunjukkan klasifikasi pipa tergantung pada kegunaannya. Tekanan desain ditentukan berdasarkan batas maksimum tekanan operasi untuk klasifikasi masing-masing kelas, berdasarkan kondisi operasional di setiap pipa.

Data dan spesifikasi pipa ditentukan berdasarkan proses dan pemodelan pipa selama fase desain. Hasil ini akan sama dengan data aktual untuk pipa. Ketika pipa dipilih, banyak parameter, seperti diameter, material, ketebalan, dll. harus dipertimbangkan. Toleransi diterapkan untuk memastikan keamanan pipa selama fase operasi. Data dan spesifikasi pipa ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data dan Spesifikasi Jaringan Pipa SAGS Unit-1 dan Unit-2 Ulubelu.

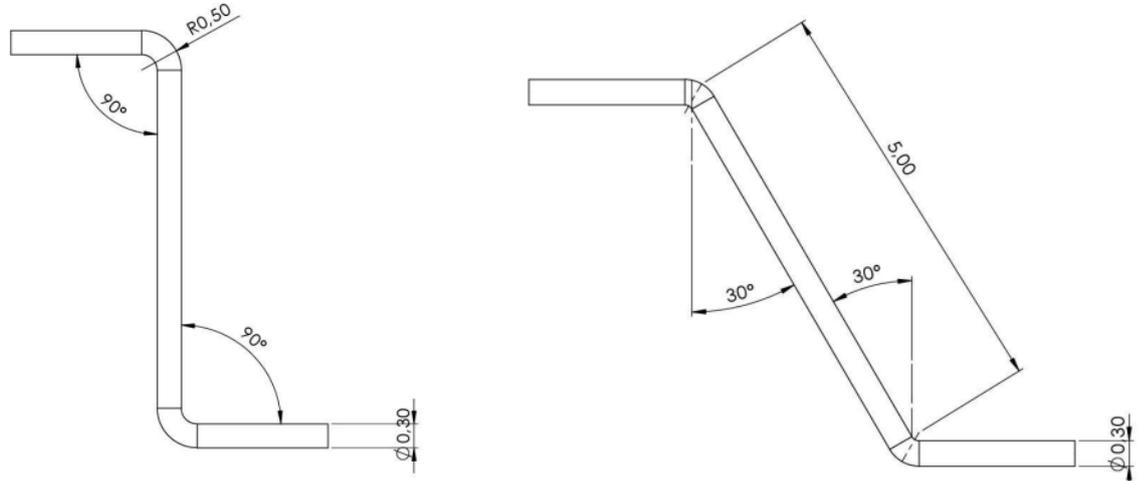
From	To	Stream no.	Piupe length (m)	Pipe specification	Pipe OD (")	Pipe ID (")	Pipe thickness (mm)	Insulation thickness (mm)
2 Phase UBL-02	2 Phase Header Cluster-B	1	18.39	ANSI B31.1 - 600#	12.75	11.37	17.48	50.8
2 Phase UBL-03	2 Phase Header Cluster-B	2	19.07	ANSI B31.1 - 600#	12.75	11.37	17.48	50.8
2 Phase UBL-15	2 Phase Header Cluster-B	3	22.36	ANSI B31.1 - 600#	12.75	11.37	17.48	50.8
2 Phase UBL-16	2 Phase Header Cluster-B	4	21.92	ANSI B31.1 - 600#	12.75	11.37	17.48	50.8
2 Phase Header Cluster-B	TP#1 Cluster-C	12	1327.8	ANSI B31.1 - 150#	36	35.17	10.31	50.8
2 Phase UBL-08	2 Phase Header Cluster-C	5	24.65	ANSI B31.1 - 600#	12.75	11.37	17.48	50.8
2 Phase UBL-05	2 Phase Header Cluster-C	6	23.2	ANSI B31.1 - 600#	12.75	11.37	17.48	50.8
2 Phase UBL-06	2 Phase Header Cluster-C	7	22.68	ANSI B31.1 - 600#	12.75	11.37	17.48	50.8
2 Phase UBL-07	2 Phase Header Cluster-C	8	27.92	ANSI B31.1 - 600#	12.75	11.37	17.48	50.8
2 Phase Header Cluster-C	TP#1 Cluster-C	13	3.7	ANSI B31.1 - 150#	36	35.17	10.31	50.8
TP#1 Cluster-C	SEP-01A Cluster-C	15	20	ANSI B31.1 - 150#	36	35.17	10.31	50.8
TP#1 Cluster-C	SEP-01B Cluster-C	16	27	ANSI B31.1 - 150#	36	35.17	10.31	50.8
1 Phase Sep-01A	Steam Header Sep-01A	17	30.3	ANSI B31.1 - 150#	30	29.25	9.53	50.8
Hot brine Sep-01A	Tie in Sep-01A	25	36	ANSI B31.1 - 300#	16	15.31	8.74	25
1 Phase Sep-01B	Steam Header Sep-01B	18	30.3	ANSI B31.1 - 150#	30	29.25	9.53	50.8
Hot brine Sep-01B	Tie in Sep-01B	26	40.72	ANSI B31.1 - 300#	18	17.31	8.74	25
Tie in hot brine Sep-01A/B	Cluster-A1	28	2660.64	ANSI B31.1 - 300#	28	27.3	8.74	25
Steam Header Sep-01A/B	Scrubbing Line#1	20	207.3	ANSI B31.1 - 150#	42	41.2	10.31	50.8
Scrubbing Line#1	Gathering station	22	397.84	ANSI B31.1 - 150#	48	47.12	11.13	50.8
2 Phase UBL-12	2 Phase Header Cluster-D	9	46.8	ANSI B31.1 - 600#	12.75	11.37	17.48	50.8
2 Phase UBL-11	2 Phase Header Cluster-D	10	34.3	ANSI B31.1 - 600#	12.75	11.37	17.48	50.8
2 Phase UBL-14	2 Phase Header Cluster-D	11	30.5	ANSI B31.1 - 600#	12.75	11.37	17.48	50.8
2 Phase Header Cluster-D	SEP-02 Cluster-D	14	77.26	ANSI B31.1 - 300#	30	29.25	9.53	50.8
Hot brine Sep-02	Cluster-F	27	2166.42	ANSI B31.1 - 300#	20	19.25	9.53	25
1 Phase TP#2 Cluster-D	Balancing Line	19	3094.79	ANSI B31.1 - 150#	30	29.25	9.53	50.8
Balance Line	Scrubbing Line#2	21	153	ANSI B31.1 - 150#	28	27.25	9.53	50.8
Scrubbing Line#2	Gathering station	23	350	ANSI B31.1 - 150#	48	47.12	11.13	50.8
Gathering station	Interface point	24	56.11	ANSI B31.1 - 150#	52	51.13	11.13	50.8
Condensate water	Cluster-A2	30	3242.34	ANSI B31.1 - 150#	12.75	12.09	8.30	25

Note :
- Insulation material is calcium silicate, $k = 0.075$ W/m-K and aluminium sheet, $k = 240.84$ W/m-K
- Pipe roughness is 0.045 mm, k -pipe = 48.64 W/m-K

3.2 Pembutan geometri

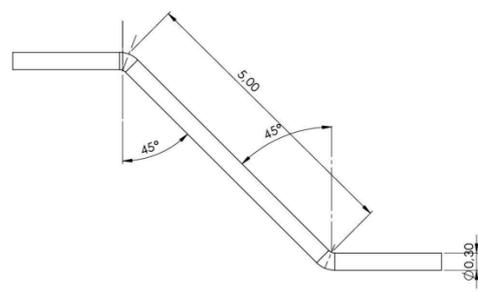
Geometri pipa yang digunakan dalam simulasi didasarkan pada geometri pipa dari data disain dan lapangan. Ada dua arah aliran yang akan disimulasikan, yaitu

arah aliran naik (*updraft*) dan arah aliran turun (*downdraft*). Kemiringan arah naik/turun divariasi atas 90°, 60°, 45°, dan 30°. Gambar dari geometri pipa dibuat menggunakan perangkat lunak desain gambar dan ditampilkan seperti Gambar 11 berikut.

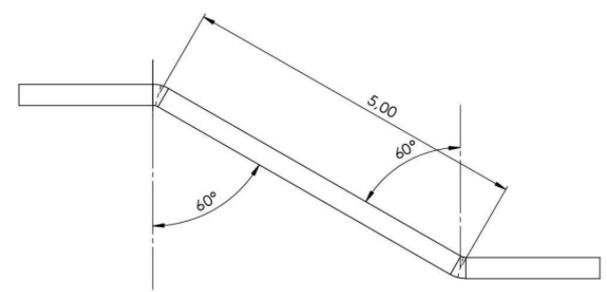


a. Kemiringan 90°C terhadap horisontal

b. Kemiringan 60°C terhadap horisontal



c. Kemiringan 45°C terhadap horisontal



d. Kemiringan 30°C terhadap horisontal

Gambar 11. Geometri pipa

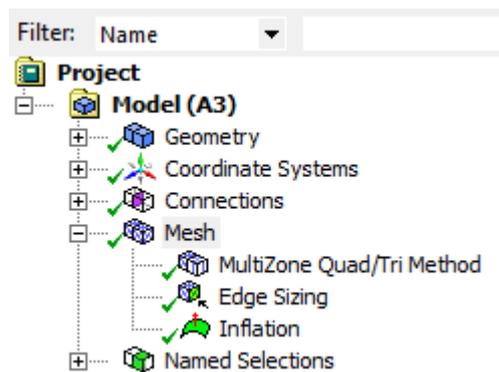
3.3 Pembuatan mesh

Pembuatan mesh sangat menentukan keberhasilan dalam proses simulasi. Mesh yang kurang baik dan tidak sesuai dengan kondisi akan menyebabkan kesalahan dalam perhitungan numerik simulasi. Salah satu kriteria dalam pembuatan mesh adalah kriteria Y^+ yaitu kriteria penentuan ukuran dari ukuran mesh terkecil lokasi kontak fluida dengan dinding. Penentuan Y^+ ini sangat ditentukan dari tebal lapisan batas fluida. Gambar 12 berikut adalah tahapan dalam penentuan nilai Y^+ dan Gambar 13 adalah menu-menu untuk membangun meshing pada Ansys Fluent

Fluid	R134a
Temperature, T (°C)	80
Pressure, p (MPa)	4,5
Tube inner diameter, m	0,008
Mass flux, G (kg/(m ² .s))	800
Y+	5
Kinematik viscosity, ν (cm ² /s)	0,001039145
Density, ρ (kg/m ³)	978,1511508
Velocity, u (m/s)	0,817869508
Reynolds number, Re (-)	62.965
Empirical constant of friction factor, C_f (-)	0,0049872
shear stress rate at wall, τ_w (Pa)	1,6315361
Frictional velocity, u_f (m/s)	0,040840905
First mesh cell size near wall, Δs (m)	1,27219E-05
First mesh cell size near wall, Δs (mm)	0,012721871
Volume rate, V (L/min)	2,466636323
Mass flow, m (kg/s)	0,040212386

Gambar 12. Langkah-langkah untuk menghitung nilai Y+

Langkah pertama dalam proses pembuatan mesh adalah penentuan jenis mesh yang akan digunakan (Quadrilateral, Triangle atau Multizones). Kriteria Y+ dapat dipenuhi melalui penentuan ukuran mesh untuk setiap tepi (edge sizing dan kriteria kerapatan (inflation). Pada langkah pembuatan mesh juga diikuti dengan penentuan nama untuk setiap batas sistem dan jenis batas sistem (seperti dinding adiabatic dan sumbu simentris)

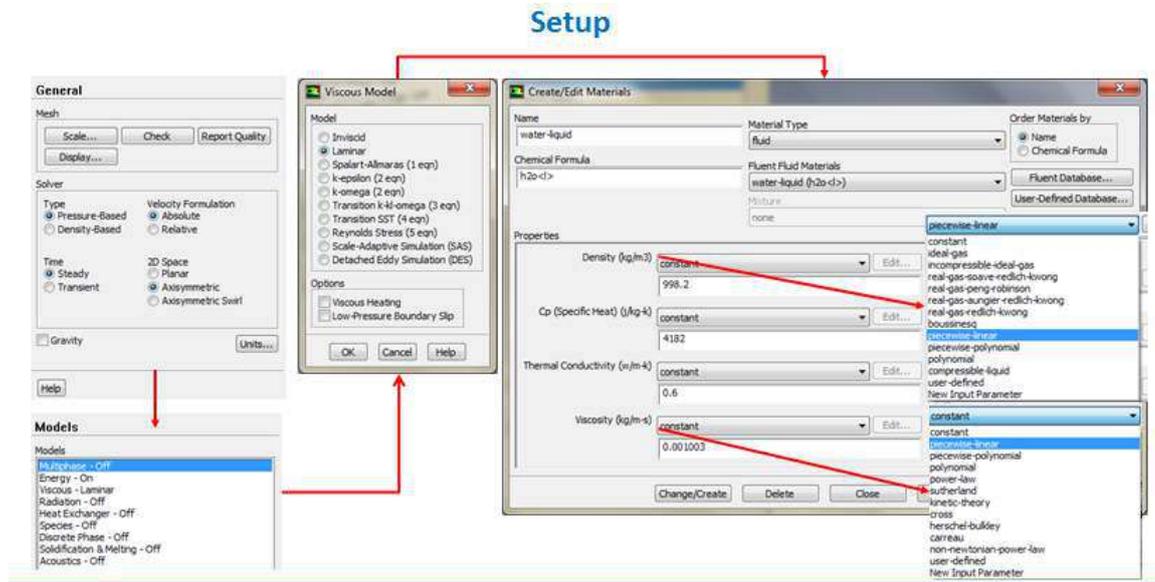


Gambar 13. Menu meshing

3.4 Setup

Proses setup pada Ansys Fluent mengikuti kriteria seperti Gambar 14 berikut. Pertama secara umum adalah penentuan tipe solver (Pressure based/density based) dan kondisi aliran (steady/transient). Kemudian penentuan model aliran phase (single phase/multi phase), adanya perpindahan panas atau tidak, jenis alairan

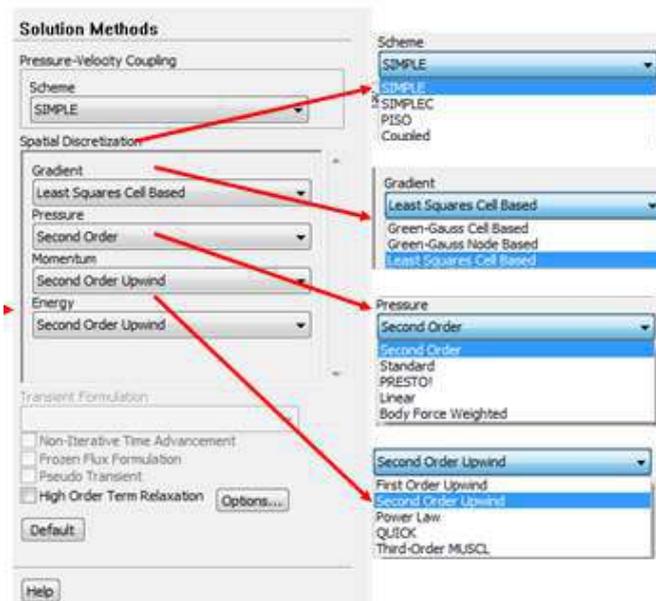
(laminar/turbulen), model turbulen yang akan digunakan (spalart-allmaras, k-epsilon, k-omega, dll), jenis dan sifat dari material (solid/fluid dan sifat-sifat fluida), kemudian kondisi batas dari masing-masing batas sistem dan cell. Fluida yang digunakan disini adalah fluida 2-phase.



Gambar 14. Langkah-langkah setup

3.5 Solution

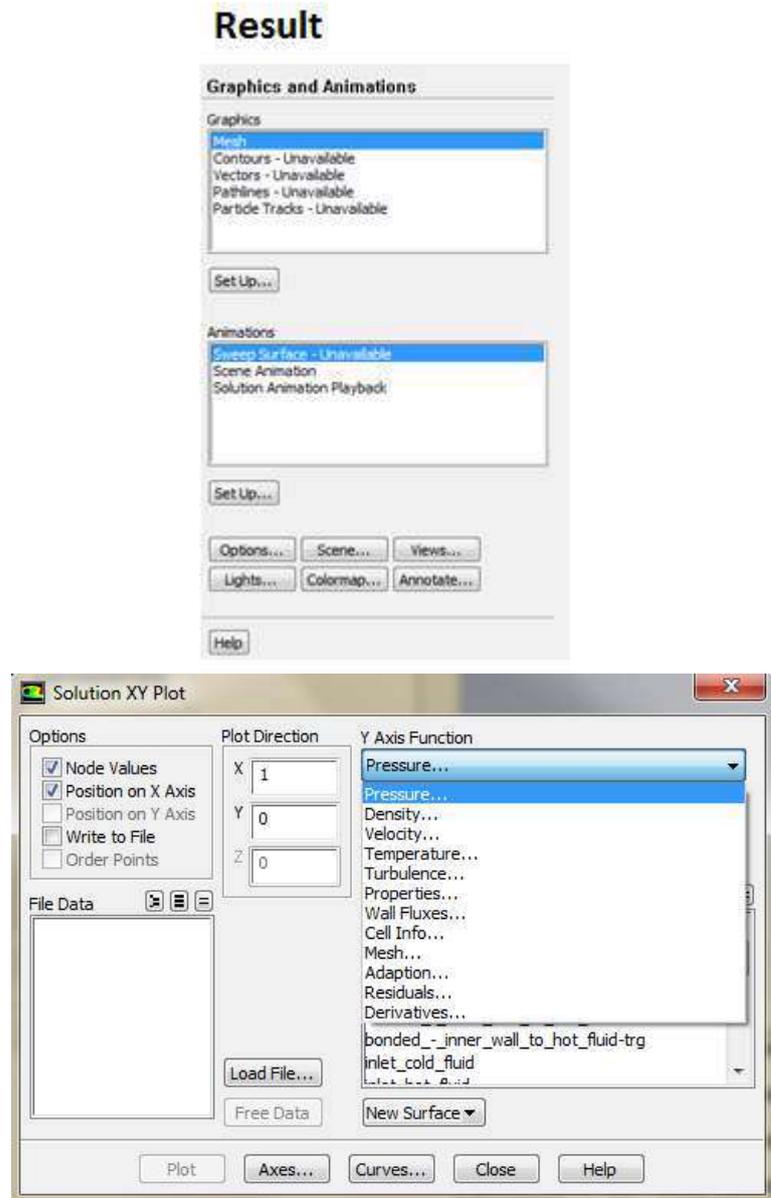
Metoda solusi yang tersedia pada fluent adalah seperti yang disajikan pada Gambar 15 berikut



Gambar 15. Metode penyelesaian simulasi

3.6 Result

Terakhir adalah bentuk-bentuk hasil yang ada pada fluent seperti yang digambarkan pada Gambar 16 berikut dimana hasil dapat ditampilkan dalam bentuk grafik, animasi, countur, vector, dll. Jenis grafik yang tersedia dan bisa diperoleh juga banyak seperti tekanan, temperatur dan sifat-sifat termodinamika dan fisik fluida lainnya baik dalam arah sumbu koordinat kartesius x, y, z atau dalam arah koordinat polar.



Gambar 16. Menu hasil

Hasil yang diperoleh dari simulasi software fluent selanjut akan difalidasi dengan data desain dan data lapangan. Pada penelitian ini anggota peneliti dan mahasiswa berperan membantu dalam proses pelaksanaan simulasi untuk berbagai variasi jenis model (2D/3D), variasi parameter aliran seperti Re, laju aliran massa, dan tekanan. Sehingga waktu simulasi bisa secepat mungkin.

3.7 Metode Perhitungan Potensi Sistem Pembangkit ORC

Potensi sistem pembangkit ORC dihitung berdasarkan data brine yang diperoleh dari hasil separasi fluida 2-fase antara uap dan cairan di Separator. Fluida kerja untuk sistem ORC dipilih pentana (C_5H_{12}) yang merupakan salah satu senyawa hidokarbon (HC) dan sesuai dengan temperatur brine serta tergolong sebagai fluida kering (*dry fluid*/ $\zeta > 0$) yang memiliki kemiringan garis saturasi uap positif (Song, dkk., 2019). Sifat-sifat termodinamika seperti volume jenis, entalpi, entropi, dan kualitas uap ditentukan menggunakan pangkalan data NIST Standard Reference Database 23, REFPROP version 9.1 (Span dan Wagner, 2003).

Persamaan 26 sampai 31 digunakan untuk menghitung kerja bersih dan efisiensi termal dari sistem pembangkit ORC.

$$w_p = h_2 - h_1 \quad (26)$$

$$q_{in} = h_3 - h_2 \quad (27)$$

$$w_t = h_3 - h_4 \quad (28)$$

$$q_{out} = h_4 - h_1 \quad (29)$$

$$w_{net} = w_t - w_p \quad (30)$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} \quad (31)$$

BAB 4 DATA, HASIL DAN ANALISA SERTA LUARAN

4.1 Data Penelitian

4.1.1. Pengumpulan data primer/sekunder sistem perpipaan panas bumi

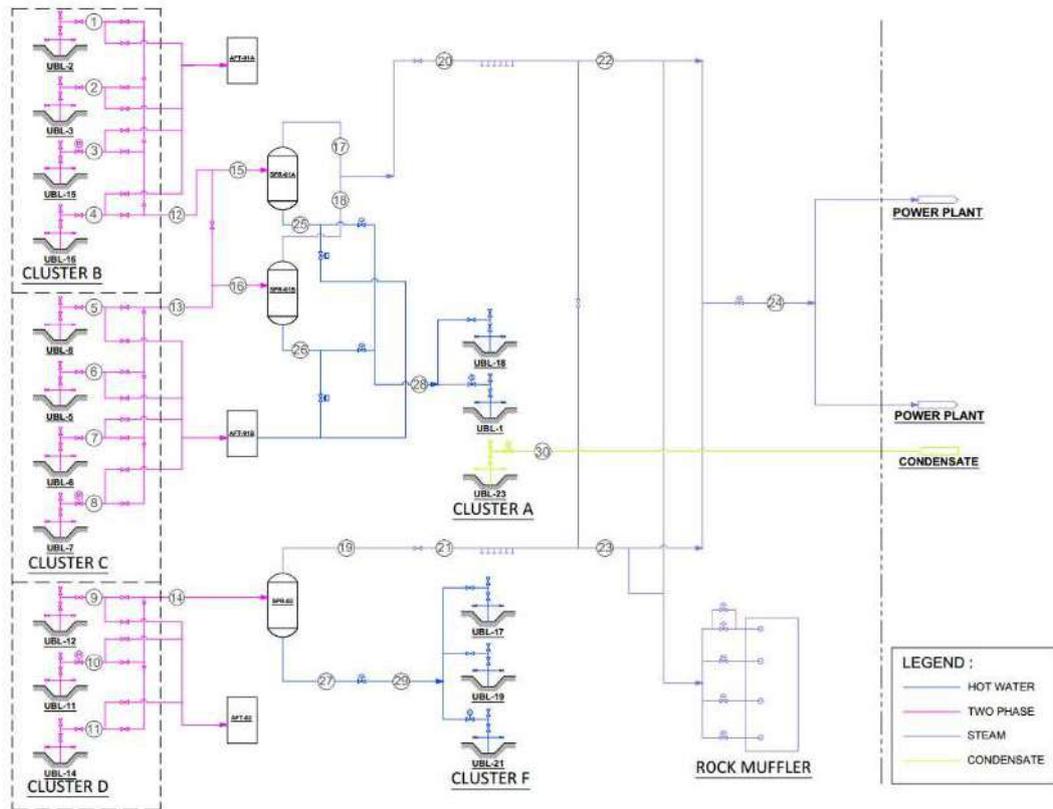
Data sistem *cluster* jaringan pipa 2-fase, pipa uap, dan pipa *brine* di lapangan panas bumi Ulubelu di sajikan seperti Gambar 10 dan data dimensi pipa dan jenis pipa, serta tekanan dan temperatur fluida diberikan dalam Tabel 1 dan Tabel 2.

Data dan spesifikasi pipa ditentukan berdasarkan proses dan pemodelan pipa selama fase desain. Hasil ini akan sama dengan data aktual untuk pipa. Ketika pipa dipilih, banyak parameter, seperti diameter, material, ketebalan, dll. harus dipertimbangkan. Toleransi diterapkan untuk memastikan keamanan pipa selama fase operasi. Data dan spesifikasi pipa ditunjukkan pada Tabel 2.

Diagram alir proses pada Gambar 17 menggambarkan urutan aliran fluida dari kepala sumur (*wellhead*) ke sistem pembangkit (*steam interface point*). Neraca massa panas (*heat balance*) pada Tabel 3 menunjukkan nilai parameter operasi pada setiap titik mulai dari jalur dua fasa setelah kepala sumur hingga ke *steam interface point*. *Steam interface point* adalah batas wilayah antara SAGS yang dioperasikan oleh PT PGE dan pembangkit listrik yang dioperasikan oleh PT PLN.

Tabel 3. Neraca massa panas SAGS Unit-1 dan Unit-2 Ulubelu pada kondisi desain.

Stream number		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		CLUSTER-B				CLUSTER-C				CLUSTER-D	
Fluid properties	Units	2 ϕ from UBL-02	2 ϕ from UBL-03	2 ϕ from UBL-15	2 ϕ from UBL-16	2 ϕ from UBL-08	2 ϕ from UBL-05	2 ϕ from UBL-06	2 ϕ from UBL-07	2 ϕ from UBL-12	2 ϕ from UBL-11
Pressure	bar-a	11.75	11.75	11.79	11.79	10.30	10.31	10.33	10.33	12.90	12.90
Temperature	$^{\circ}$ C	186.90	187.01	187.27	187.03	181.27	181.31	181.41	181.41	191.27	191.41
Mass flow	Ton/h	287.50	303.60	438.20	300.00	330.00	330	350.00	451.00	232.40	652.10
	kg/s	79.86	84.33	121.72	83.33	91.67	91.67	97.22	125.28	64.56	181.14
Enthalpy	kJ/kg	1253.60	1283.90	1280.10	1253.50	1099.20	1045.70	1102.50	1102.50	1233.60	1271.80
Steam fraction	%	23.12	24.62	24.38	23.08	16.44	13.77	16.58	16.58	21.32	23.23
Stream number		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		CLUSTER-D									
Fluid properties	Units	2 ϕ from UBL-14	2 ϕ from Cluster-B	2 ϕ from Cluster-C	2 ϕ from Cluster-D	2 ϕ Cluster-B	2 ϕ Cluster-C	Steam at Cluster-B	Steam at Cluster-C	Steam at Cluster-D	Steam
Pressure	bar-a	12.90	10.43	10.30	12.61	10.20	9.98	9.77	9.73	12.31	9.16
Temperature	$^{\circ}$ C	191.41	181.68	181.26	190.31	180.69	179.89	178.81	178.79	189.20	177.46
Mass flow	Ton/h	354.80	1329.30	1461.00	1239.30	1329.30	1461.00	337.71	240.10	294.24	577.81
	kg/s	98.56	369.25	405.83	344.25	369.25	405.83	93.81	66.69	81.73	160.50
Enthalpy	kJ/kg	1302.60	1260.90	1088.90	1273.70	1270.10	1089.20	2776.70	2776.70	2784.80	2775.60
Steam fraction	%	24.79	24.86	15.93	23.52	25.05	16.21	100.00	100.00	100.00	100.00
Stream number		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Fluid properties	Units	Steam	Steam	Steam	Steam to GPP	Hot brine to Clust. A	Hot brine to Cluster-A	Hot brine to Cluster-F	Hot brine at Cluster-A	Hot brine at Cluster-E	Condensate to Clust.-A
Pressure	bar-a	9.19	9.09	9.09	8.00	9.77	9.73	12.31	10.47	18.98	14.30
Temperature	$^{\circ}$ C	176.51	176.33	175.78	174.20	178.81	178.79	189.20	178.36	188.48	50.00
Mass flow	Ton/h	294.14	447.00	424.87	871.90	991.59	1220.90	945.06	2212.49	945.06	290.40
	kg/s	81.71	124.17	118.02	242.19	275.44	339.14	262.52	614.58	262.52	80.67
Enthalpy	kJ/kg	2774.70	2774.50	2773.80	2771.90	757.80	757.70	803.90	755.80	800.70	209.30
Steam fraction	%	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Gambar 17. Diagram alir proses SAGS Unit-1 dan Unit-2, sistem panas bumi Ulubelu (PGE, 2012)

4.1.2. Data fluida 2-fase, uap, dan brine

Fluida panas bumi 2-fase diproduksi dari 3 cluster dengan 11 sumur produksi. Setelah uap dipisahkan dari fluida 2-fase menggunakan separator, selanjutnya uap dialirkan ke sistem pipa uap menuju pembangkit dan cairan sisa (brine) dialirkan melalui pipa-pipa brine menuju 6 sumur injeksi (cluster A dan cluster F). Data laju aliran massa dari fluida 2-fase, uap dan brine ini ditabulasikan dalam Tabel 4.

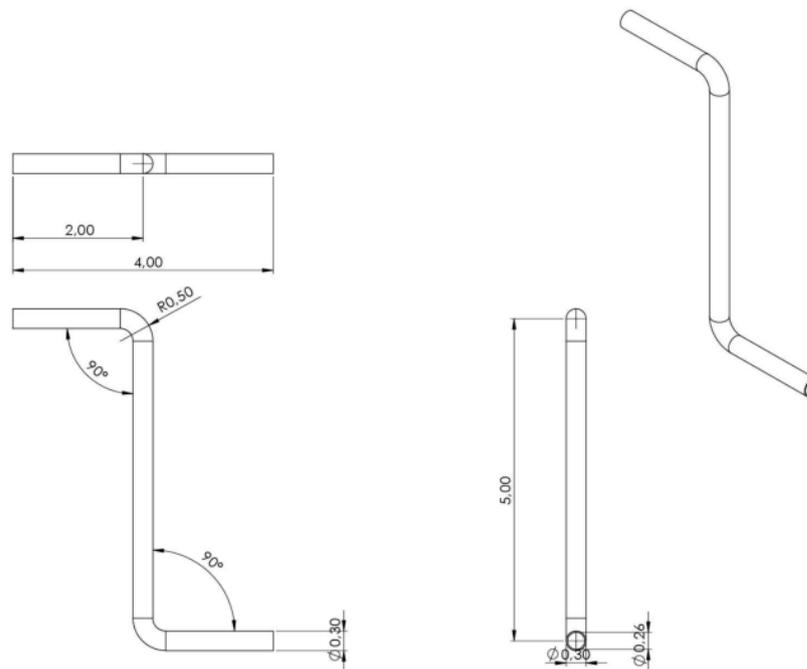
Tabel 4. Laju aliran massa dari fluida 2-fase, uap dan brine

Discriptions	Total Mass flow, kg/s
Two-phase geothermal fluid production	859,4
Cluster B	325,8
Cluster C	308,5
Cluster D	225,1
Steam to power plant	155,9
Reinjected brine	717,1
Cluster A	516,5
Cluster F	200,6

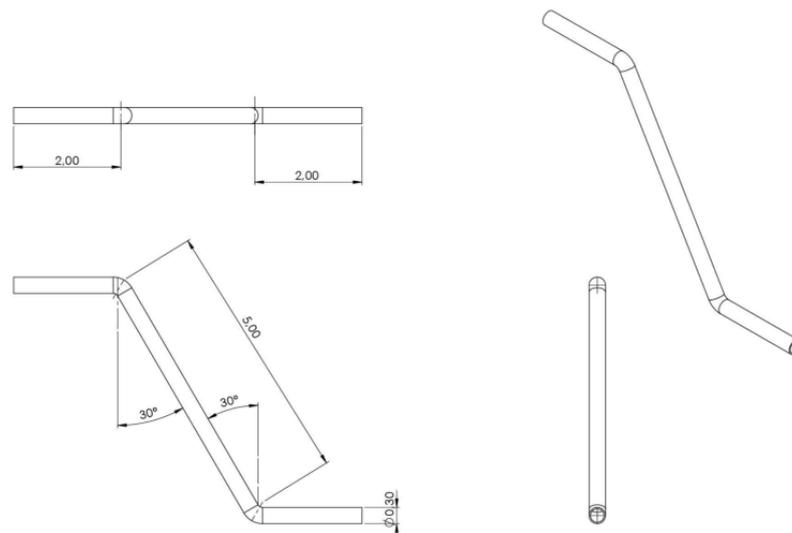
4.2 Hasil dan Analisa

4.2.1. Pemodelan Geometri

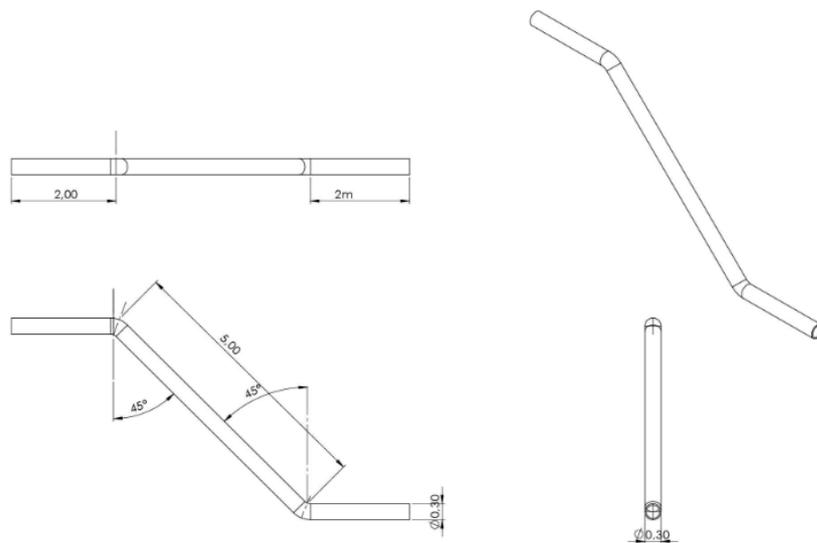
Berikut ini adalah hasil dari pemodelan geometri pipa SAGS yang telah dilakukan (Gambar 18 – Gambar 21). Geometri pipa yang digunakan dalam simulasi didasarkan pada geometri pipa dari data disain dan lapangan. Ada dua arah aliran yang akan disimulasikan, yaitu arah aliran naik (*updraft*) dan arah aliran turun (*downdraft*). Kemiringan arah naik/turun divariasikan atas 90°, 60°, 45°, dan 30°.



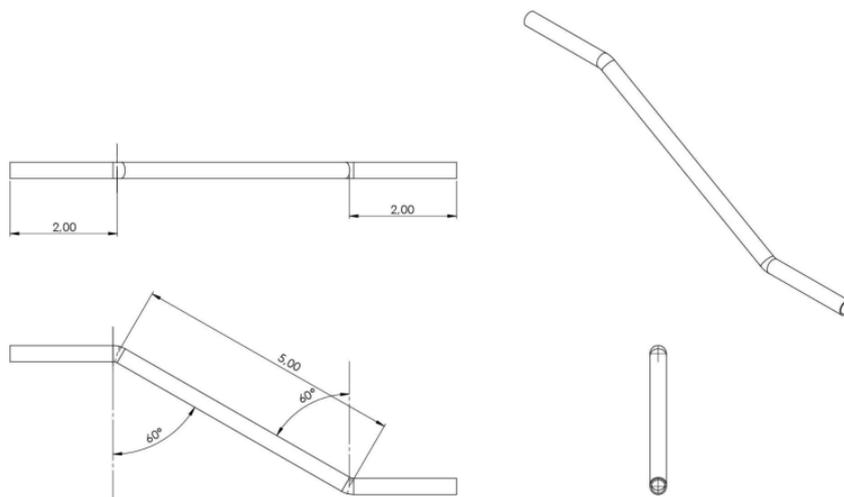
Gambar 18. Model geometri pipa dengan sudut naik/turun 90°.



Gambar 19. Model geometri pipa dengan sudut naik/turun 60°.



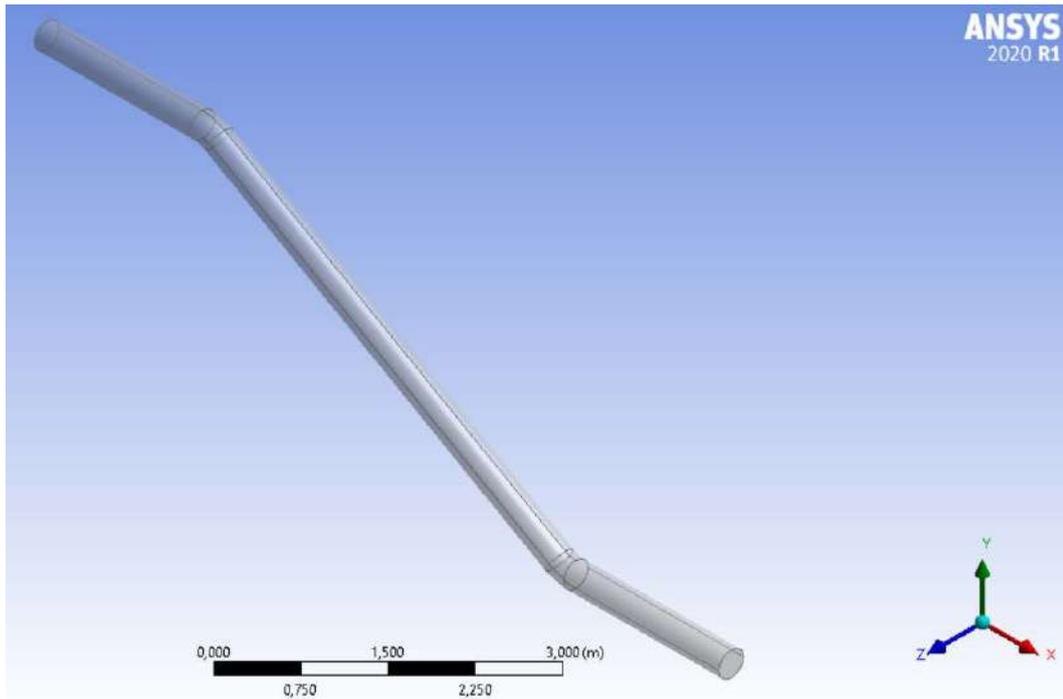
Gambar 20. Model geometri pipa dengan sudut naik/turun 45°.



Gambar 21. Model geometri pipa dengan sudut naik/turun 30°.

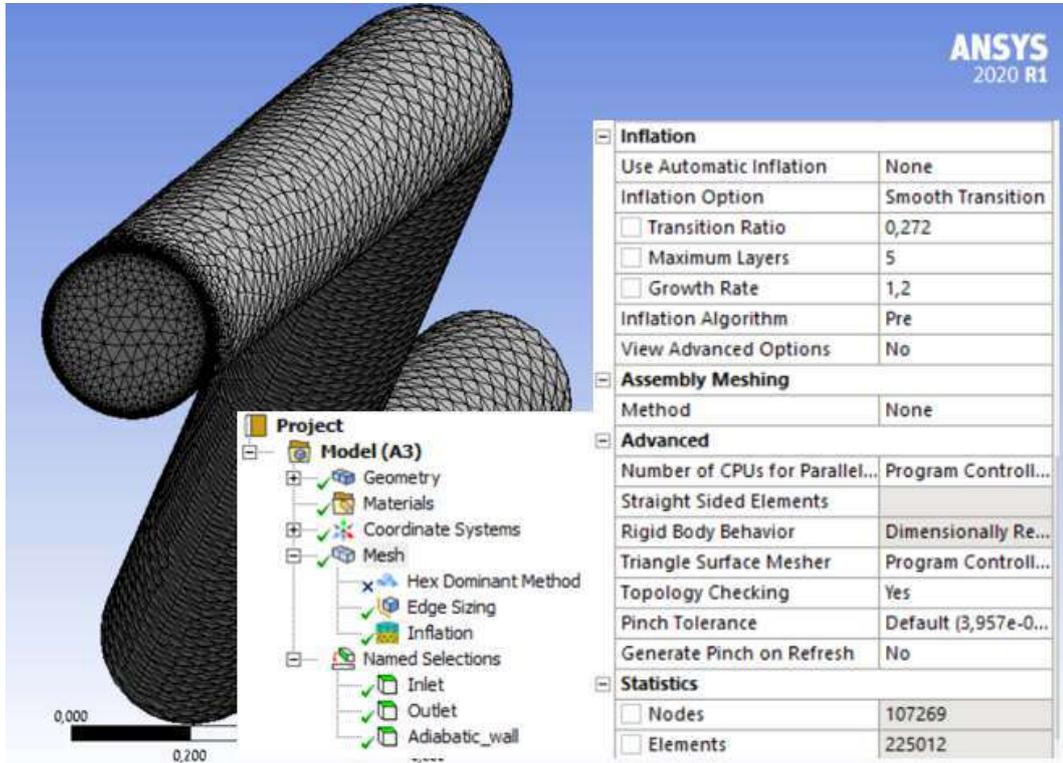
4.2.2. Hasil simulasi Ansys Fluent aliran 2-fase

Model geometri yang dibuat menggunakan perangkat lunak Solidworks 2020 diimport ke Ansys fluent 2020 R1 seperti Gambar 22. Selanjutnya geometri ini didiskritisasi menggunakan *finite volume method*. Diskritisasi dimaksudkan membagi geometri atas elemen-elemen kecil (*meshing*) sehingga asumsi sifat termodinamika konstan dapat diberlakukan pada elemen tersebut karena pada elemen yang kecil perubahan yang terjadi sangatlah kecil.



Gambar 22. Model geometri pipa

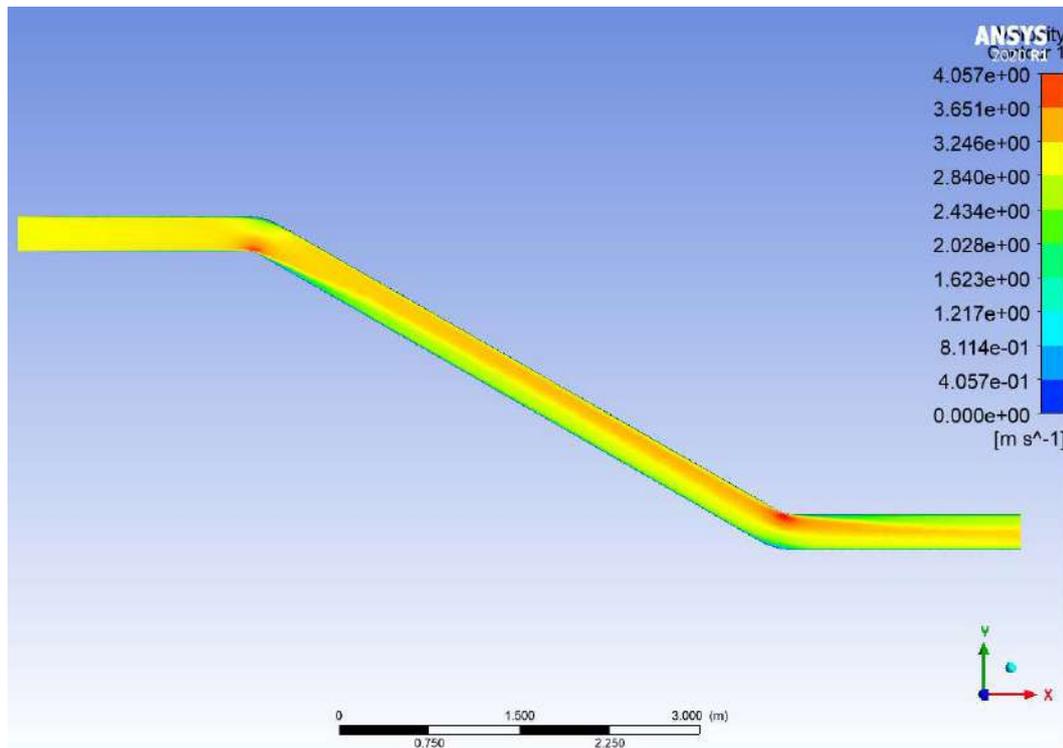
Hasil diskritisasi diperlihatkan dalam Gambar 23.



Gambar 23. Diskritisasi (*meshing*) model geometri pipa

Dalam Gambar 23 juga dapat dilihat bahwa jenis meshing yang digunakan adalah Hex Dominant Method dengan edge sizing sebanyak 50 pada cross section pipa dan inflasi sebanyak 5 dengan laju pertumbuhan inflasi 1,2 pada elemen dekat dinding pipa. Jumlah total elemen yang terbentuk 225.012 elemen dengan nodes/titik sebanyak 107.269 nodes.

Setelah proses diskritisasi selesai dilanjutkan dengan pengaturan (*setup*) parameter-parameter simulasi (Gambar 14). Metode penyelesaian (Gambar 15) dipilih sebelum simulasi dijalankan. Proses simulasi kemudian dijalankan (*running*) dengan terlebih dahulu mengatur parameter-parameter yang ingin ditampilkan dalam menu Hasil (*result*). Countur kecepatan hasil kecepatan diperlihatkan dalam Gambar 24.



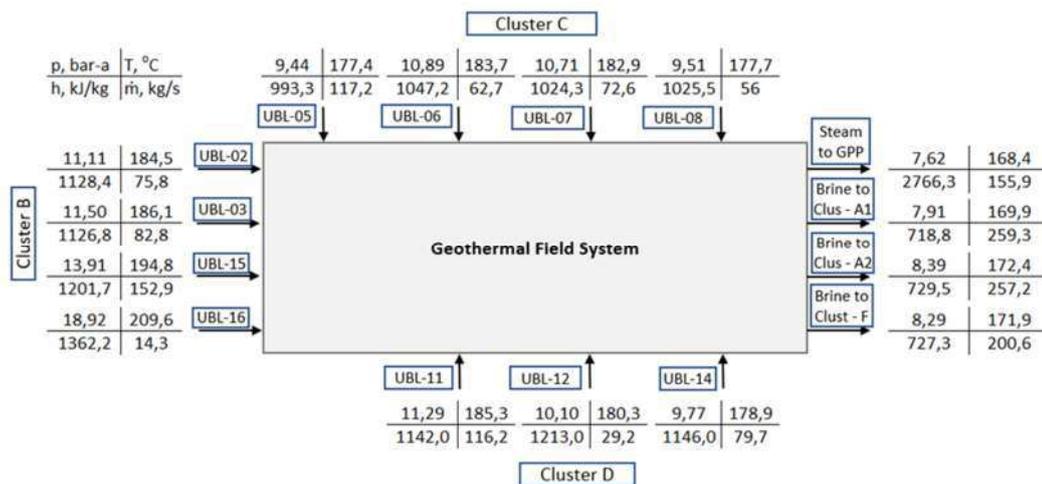
Gambar 24. Countur kecepatan aliran fluida 2-fase untuk belokan 30°

Kecepatan masuk fluida ke inlet pipa di set sebesar 3 m/s (warna kuning kiri atas). Nilai bilangan Reynold pada kecepatan aliran ini pada tekanan dan temperatur 8,29 bar dan 170°C adalah 5e+06 atau aliran adalah turbulen. Kecepatan fluida akan mengalami peningkatan atau peningkatan turbulensi terjadi pada belokan lekukan

bagian bawah dengan kecepatan maksimum 4,057 m/s. Sedangkan pada belokan lekukan bagian bawah kecepatan fluida menurun sampai 1,623 m/s. Peningkatan kecepatan aliran fluida yang besar akan dapat meningkatkan terjadinya erosi pada pipa dan penurunan kecepatan aliran fluida akan dapat meningkatkan terjadi scaling pada pipa.

4.2.3. Potensi pembangkit ORC dari brine PLTP Ulubelu

Berdasarkan Tabel 4 diketahui bahwa total brine yang diinjeksikan kembali ke perut bumi dari cluster A dan F adalah 717,1 kg/s dengan tekanan dan temperatur rata-rata masing-masing sebesar 8,29 bar dan 170°C. Kemudian dari Tabel 3 dan data sifat-sifat termodinamika (Refprop 9.1) di buat balans energi pada sistem aliran fluida panas bumi dari sumur produksi hingga jalur pipa ke sistem pembangkit (GPP) seperti Gambar 25.



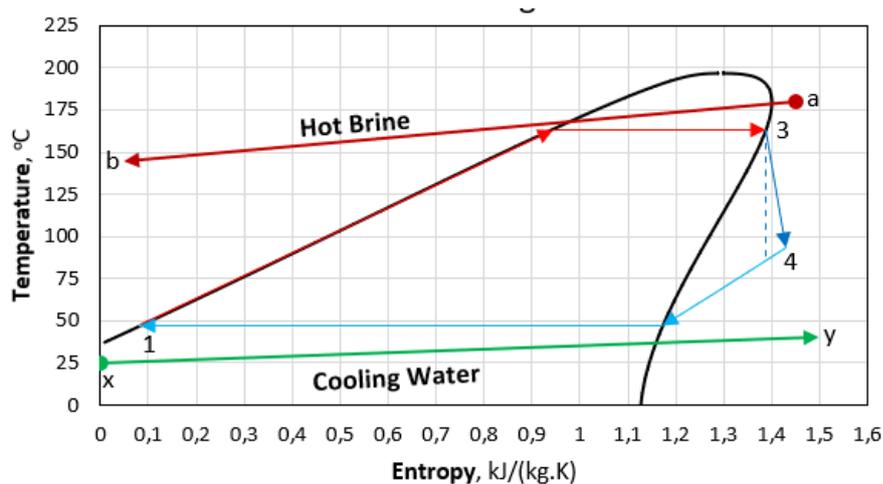
Gambar 25. Balans energi pada lapangan panas bumi Ulubelu

Jumlah energi dari fluida 2-fase (*from production well*), energi uap yang di alirkan ke GPP, dan energi yang terkandung dalam brine yang akan diinjeksikan kembali didaftarkan dalam Tabel 5. Dalam Tabel 5 tersebut diketahui bahwa sekitar 45% energi fluida panas bumi yang termanfaatkan untuk membangkitkan listrik. Sedangkan 65% energi berupa brine dikembalikan ke perut bumi.

Tabel 5. Jumlah energi fluida 2-fase, uap, dan *brine*.

Jenis Energi	Kuantitas	Satuan
Energy input Cluster B	381925,29	kW
Energy input Cluster C	313746,58	kW
Energy input Cluster D	259315,95	kW
Usefull energy (steam to GPP)	431266,44	kW
Rejected energy Cluster A	187374,73	kW
Rejected energy Cluster F	145907,96	kW
Losses energy	190438,68	kW
Steam to GPP energy efficiency	45,16%	

Energi dari *brine* yang rendah kalori ini dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik tambahan melalui penggunaan sistem pembangkit siklus Rankine organik/*organic Rankine cycle* (SRO/ORC). Gambar 26 memperlihatkan diagram Temperatur - entropi siklus Rankine organik dengan menggunakan pentana sebagai fluida kerja dan sketsa sistem pembangkit ORC dengan rekuperator diperlihatkan pada Gambar 27. Pentana digunakan karena tergolong senyawa hidrokarbon (HC) yang memiliki nilai ODP dan GWP sangat rendah, tergolong fluida kering sehingga tidak memerlukan pemanas lanjut (*superheater*) untuk menghasilkan uap kering, dan memiliki entalpi penguapan yang rendah sehingga cocok digunakan sebagai fluida kerja sistem ORC untuk sumber-sumber energi rendah kalori.



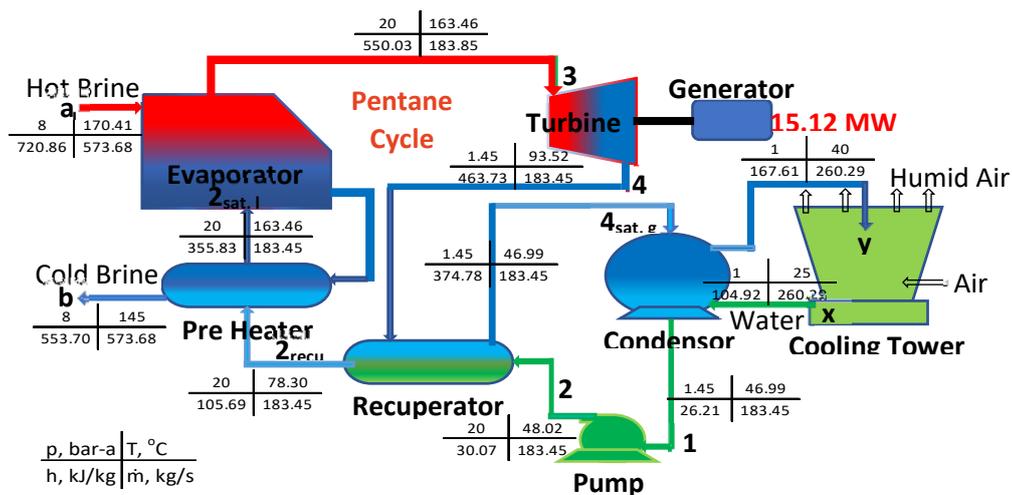
Gambar 26. Dagram T - s siklus Rankine organik untuk pentana.

Parameter-parameter input yang ditetapkan dalam perhitungan daya listrik yang dapat dihasilkan sistem ORC ditabelkan dalam Tabel 6 berikut. Pada perhitungan juga diasumsikan bahwa tidak ada rugi-rugi tekanan (pressure drop) pada kondensor, rukuperator, pre-heater, dan evaporator.

Tabel 6. Parameter input perhitungan sistem ORC

No	Parameter Input	Kuantitas	Satuan
1	Laju aliran massa (brine), \dot{m}_b	717,1	kg/s
2	Tekanan brine panas, $p_{b, hot}$	1,45	bar
3	Kualitas uap brine panas, $x_{b, hot}$	0	
4	Temperatur brine dingin, $T_{b,c}$	145	°C
5	Tekanan kondensor, p_{cond}	1,45	bar
6	Kualitas uap masuk pompa, x_p	0	
7	Tekanan evaporator, p_{eva}	1,45	bar
8	Kualitas uap masuk turbin, x_T	1	
9	Pump efficiency, η_p	80%	
10	Turbine efficiency, η_T	85%	
11	Rekuperator effectivity, ϵ_r	85%	
12	Evaporator effectivity, ϵ_e	85%	

Sketsa diagram termodinamika dari sistem ORC ini beserta parameter-parameter input dan hasil perhitungan di sajikan dalam Gambar 27 berikut.



Gambar 27. Diagram termodinamika dari sistem ORC

Dari perhitungan didapatkan daya potensial yang didapatkan dari implementasi sistem pembangkit siklus Rankine organik (ORC) di lapangan panas bumi Ulubelu adalah sebesar 15,12 MW. Sistem ORC ini menggunakan rekuperator sebagai pemanas fluida kerja sebelum dipanaskan oleh brine. Uap pentana yang keluar dari turbin digunakan sebagai fluida pemanas pada rekuperator ini karena energinya masih besar dan juga sekaligus mengurangi beban kondensor dalam melepaskan panas ke air pendingin. Penggunaan ORC dengan rekuperator dapat meningkatkan daya yang dihasilkan turbin dan juga dapat meningkatkan efisiensi dari sistem pembangkit ORC.

4.3 Status Luaran

Sesuai dengan panduan penelitian DIPA FT, luaran yang dihasilkan dari penelitian ini adalah berupa laporan penelitian ini dan publikasi yang akan diseminarkan (tanggal 13 Oktober 2022, bukti mengikuti seminar dan artikelnya diberikan dalam Lampiran 2 dan 3) pada Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin ke 20 (SNTTM XX) di Makasar. Rekapitulasi penggunaan anggaran penelitian diberikan pada Lampiran 1 dan rincian penggunaan anggaran diberikan dalam bentuk laporan yang terpisah dari laporan akhir penelitian ini.

Pada penelitian ini dilakukan simulasi untuk berbagai variasi jenis model (2D/3D), variasi parameter aliran seperti Re , laju aliran massa, dan tekanan. Temuan hasil karakteristik aliran fluida 2-fase ini merupakan temuan baru untuk jenis fluida pada kondisi yang diberikan. Selanjutnya juga akan dibuat artikel untuk mempublikasikan temuan ini pada jurnal nasional terakreditasi SINTA 2 atau prosiding seminar internasional. Hasil analisa sistem pembangkit ORC yang memanfaatkan potensi brine lapangan panas bumi Ulubelu juga direncanakan untuk dipublikasikan pada prosiding internasional atau jurnal internasional terindeks.

BAB 5 KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang didapat dan analisa yang dilakukan diperoleh kesimpulan sebagai berikut ini:

1. Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kecepatan aliran fluida pada belokan sisi dalam lekukan dan penurunan kecepatan fluida pada sisi luar lekukan. Peningkatan kecepatan aliran fluida yang besar akan dapat meningkatkan terjadinya erosi pada pipa dan penurunan kecepatan aliran fluida akan dapat meningkatkan terjadi scaling pada pipa.
2. Hanya sekitar 45% energi fluida panas bumi yang dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik. Sedangkan 65% energi berupa brine dikembalikan ke perut bumi.
3. Sistem pembangkit siklus Rankine organik dengan rekuperator dengan fluida kerja pentana (C_5H_{12}) sangat cocok untuk digunakan sebagai pembangkit listrik tambahan untuk memanfaatkan energi dari *brine*.
4. Daya potensial yang didapatkan dari implementasi sistem pembangkit siklus Rankine organik (ORC) di lapangan panas bumi Ulubelu adalah sebesar 15,12 MW.
5. Penggunaan ORC dengan rekuperator dapat meningkatkan daya yang dihasilkan turbin dan juga dapat meningkatkan efisiensi dari sistem pembangkit ORC.

DAFTAR PUSTAKA

- Baker, O., (1954): Design of pipelines for simultaneous flow of oil and gas. *Oil and Gas J.*, 53, 185-195.
- Bergthórsson, E.S., (2006): Two-phase flow regimes and pressure drop in geothermal transmission pipes. University of Iceland, Reykjavík, MSc thesis, 94 pp.
- Cahyono YD., (2017): The Assessment of Steam Above Ground System of Unit-1 an Unit-2 Ulubelu Geothermal Field, Indonesia, after 5 Years of Operation. Report. United Nations University – Geothermal Training Programe.
- Chisholm, D., (1983): Two-phase flow in pipelines and heat exchangers. The Institution of Chemical Engineers, NY, 154-166.
- Hoogendorn, C.J., (1959): Gas-liquid flow in horizontal pipes. *Chem. Engineering Science*, 9-4, 205-217.
- IPS, (1996): Engineering standard for process design of piping system. Iranian Ministry of Petroleum, Tehran, Iran, 46 pp.
- Mandhane, J.M., Gregory, G.A., and Aziz, K., (1974): A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. *International J. Multiphase Flow*, 1, 537-553.
- PGE, (2012): Engineering, procurement, construction and commissioning (EPCC) document of steam above ground system (SAGS) of Unit-1 and Unit-2 Ulubelu geothermal field. PT Pertamina Geothermal Energy Ulubelu, Indonesia, unpublished report.
- PGE, (2017): Overview of Ulubelu geothermal field. PT Pertamina Geothermal Energy Ulubelu, Indonesia, unpublished report.
- Purwono, A.N., (2010): Comparison and selection of a steam gathering system in Ulubelu geothermal project, Sumatera, Indonesia. Report 26 in: Geothermal training in Iceland 2010. UNU-GTP, Iceland, 525-562.
- Shepperd, C.B., and Lapple, C.E., (1939): Flow pattern and pressure drop in cyclone collectors. *Ind. Eng. Chem.*, 31, 972-984.
- Span, R. and Wagner, W., (2003): Equations of State for Technical Applications. II. Results for Nonpolar Fluids, *Int. J. Thermophys.*, 24(1):41-109.
- Spedding, P.L., and Spence, D.R., (1993): Flow regime in two-phase gas-liquid flow. *International J. Multiphase Flow*, 19-2, 245-280.
- Spedding, P., and Watterson, J., (1998): Two-phase co-current flow in inclined pipe. *International J. Of Heat and Mass Transfer*, 41, 4205-4228.
- Spedding, P.L., Cooper, R.K., and McBride, W.J., (2003): A universal flow regime map for horizontal two-phase flow in pipes. *Dev. Chem. Eng. Mineral Process*, 11, 95-106.
- C. Song, M. Gu, Z. Miao, C. Liu, and J. Xu, (2019): Effect of fluid dryness and critical temperature on trans-critical organic Rankine cycle, *Energy*, vol. 174, pp. 97–109, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.171.

- Whalley, P.B., (1987): Boiling, condensation, and gas-liquid flow. Clarendon Press, Oxford University Press, NY, 291 pp.
- Zhao, H.D., Lee, K.C., and Freeston, D.H., (2000): Geothermal two-phase flow in horizontal pipes. Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, 3349-3352.
- Cahyono YD., 2017: The Assessment of Steam Above Ground System of Unit-1 an Unit-2 Ulubelu Geothermal Field, Indonesia, after 5 Years of Operation. Report. United Nations University – Geothermal Training Programme.

LAMPIRAN 1

Justifikasi Anggaran Penelitian DIPA FT 2022						
A. Pengadaan alat dan Bahan						
NO	Tanggal	Nama Barang	Jumlah	Satuan	Harga satuan	Jumlah (Rp)
1	18 Juli 2022	Upgrade RAM 8Gb DDR 4	1	Buah	Rp 995.000	Rp 995.000
					Jumlah	Rp 995.000
					Pajak PPN 11%	-
					Pajak Pph22 1,5%	-
					Total Pembayaran	Rp 995.000
NO	Tanggal	Nama Barang	Jumlah	Satuan	Harga satuan	Jumlah (Rp)
2	29 Juli 2022	Upgrade VGA CARRD GTX 1030 GDDR5	1	Buah	Rp 995.000	Rp 995.000
					Jumlah	Rp 995.000
					Pajak PPN 11%	-
					Pajak Pph22 1,5%	-
					Total Pembayaran	Rp 995.000
NO	Tanggal	Nama Barang	Jumlah	Satuan	Harga satuan	Jumlah (Rp)
3	29 juli 2022	SSD NVME M.2 256 Gb Kingstone	1	Buah	Rp 970.000	Rp 970.000
					Jumlah	Rp 970.000
					Pajak PPN 11%	-
					Pajak Pph22 1,5%	-
					Total Pembayaran	Rp 970.000
NO	Tanggal	Nama Barang	Jumlah	Satuan	Harga satuan	Jumlah (Rp)
4	30 Juli 2022	CMT PST Mastergel maker new	1	Unit	Rp 170.000	Rp 170.000
					Jumlah	Rp 170.000
					Pajak PPN 11%	-
					Pajak Pph22 1,5%	-
					Total Pembayaran	Rp 170.000
B. Biaya Perjalanan						
NO	Tanggal	Nama Barang	Jumlah	Orang	Harga satuan	Jumlah (Rp)
1	20-Sep-22	Tiket perjalan (pergi) Seminar Nasional Tahunan Teknik mesin (SNTTM) 2022, LAMPUNG-MAKASSAR	1	Orang	Rp 2.850.000	Rp 2.850.000
					Jumlah	Rp 2.850.000
					Pajak PPN 11%	Rp -
					Pajak Pph22 1,5%	Rp -
					Total Pembayaran	Rp 2.850.000
NO	Tanggal	Nama Barang	Jumlah	Orang	Harga satuan	Jumlah (Rp)
2	20-Sep-22	Tiket perjalan (pulang) Seminar Nasional Tahunan Teknik mesin (SNTTM) 2022, MAKASSAR-LAMPUNG	1	Orang	Rp 2.850.000	Rp 2.850.000
					Jumlah	Rp 2.850.000
					Pajak PPN 11%	Rp -
					Pajak Pph22 1,5%	Rp -
					Total Pembayaran	Rp 2.850.000

C. ATK							
NO	Tanggal	Nama Barang	Jumlah	Satuan	Harga satuan	Jumlah (Rp)	
1	8 Agustus 2022	Materai 10000	10	Buah	Rp 12.000	Rp 120.000	
		Buku Catatan	2	Buah	Rp 30.000	Rp 60.000	
		Pena	1	Pack	Rp 50.000	Rp 50.000	
					Jumlah		Rp 230.000
					Pajak PPN 11%		-
					Pajak Pph22 1,5%		-
				Total Pembayaran		Rp 230.000	
NO	Tanggal	Nama Barang	Jumlah	Satuan	Harga satuan	Jumlah (Rp)	
2	10 Agustus 2022	Tinta Printer Epson Black	1	Buah	Rp 150.000	Rp 150.000	
		Tinta Printer Epson Warna	1	Buah	Rp 125.000	Rp 125.000	
		Pointer	1	Buah	Rp 115.000	Rp 115.000	
		Kertas A4 80gr	1	Rim	Rp 50.000	Rp 50.000	
					Jumlah		Rp 440.000
					Pajak PPN 11%		-
					Pajak Pph22 1,5%		-
				Total Pembayaran		Rp 440.000	
D. Laporan/Publikasi							
NO	Tanggal	Nama Barang	Jumlah	Satuan	Harga satuan	Jumlah (Rp)	
1	23-Sep-22	Seminar nasional SNTTM XX 2022	1		Rp 500.000	Rp 500.000	
					Jumlah	Rp 500.000	
					Pajak PPN 11%		-
					Pajak Pph22 1,5%		-
					Total Pembayaran		Rp 500.000
				Total Keseluruhan		Rp 10.000.000	

LAMPIRAN 2

PAYMENT RECEIPT

Date : 23 September 2022
NO : 031/SNTTM/IX/2022



RECEIVED FROM	Harmen
AMOUNT	FIVE HUNDRED THOUSAND RUPIAH
PAYMENT FOR	SNTTM XX 2022
RP.	500.000,00

Gowa, 19 September 2022



Eng. Nuzriy Amalyah, ST., MT.
Organizing Committee
ISAIME 2022

"STRENGTHENING MECHANICAL ENGINEERS ROLE IN NATIONAL INDUSTRIAL DEVELOPMENT"

SEMINAR NASIONAL TAHUNAN TEKNIK MESIN (SNTTM) XX 2022

LAMPIRAN 3

Kesetimbangan Energi di Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tabung Tubular dengan Sistem Pemanas Selimut Oli

(Energy Balance in Continue Tubular Tube Type Torrefaction Reactor with Oil Jacket Heating System)

HARMEN, ZULKRI KURNIAWANSAH, AMRUL, HADI PRAYITNO

ABSTRACT

Torrefaction is a method of processing solid biomass through a thermal process into solid fuel with higher calorific value. The torrefaction process is carried out in a reactor with a temperature of 250 – 300 oC. Continuous reactor with a tubular tube type that was developed in this reasearch. From several studies that have been carried out it was found that there is still a lot of energy wasted in this torrefaction process. Therefore, it is necessary to calculate the energy balance in the reactor to get this amount of energy loss. The energy source used is liquefied petroleum gas (LPG). The biomassa used in the research is a wood chip. In this study, the torrefaction process was carried out for 65 minutes at a temperature of 275°C. During the process, energy input, energy output and energy/heat loss was calculated using temperature data. The temperatures measured include reactor temperature, oil temperature, outer wall temperature, and ambient temperature at the inlet, middle, and outlet of the reactor, respectively. Calculation results obtained, the total energy input is 125.257 kJ (LPG and raw biomass energy), the output energy is 30.113 kJ (torrefied biomass/charcol from torrefaction process) or 4.61% from total energy input, and the heat loss is 89.367 kJ or 71.34% from total energy input. The wasted heat from the reactor is still very large. To increase the thermal efficiency of the reactor, this heat can be used to dry the biomass before it is put into the reactor.

Keywords: heat balance, torrefaction, biomass, oil jacket, heat loss.

PENDAHULUAN

Torefaksi merupakan salah satu teknologi konversi termal biomassa menjadi bahan bakar padat pada kondisi ketiadaan oksigen (Basu, 2013). Tujuan utama torrefaksi adalah untuk meningkatkan densitas energi biomassa dengan meningkatkan kandungan karbonnya sambil menurunkan kandungan oksigen dan hidrogennya.

Proses torefaksi untuk berbagai jenis biomassa telah banyak dilakukan untuk menentukan karakteristik bahan bakar padat produk torefaksi. Amrul, dkk., (2013) melakukan torefaksi sampah kota dan mendapatkan produk torefaksi yang nilai kalornya setara dengan batubara sub-bituminus. Penelitian torefaksi sampah kota juga dilakukan oleh Triyono, dkk., (2019) dengan

metode torefaksi basah dan sebelumnya Becidan, (2007) dalam disertasi doktoralnya.

Selain sampah kota penelitian torefaksi juga pernah dilakukan untuk tandan kosong kelapa sawit (Soh, dkk., 2021; Wahyudi, dkk., 2020; dan Maryenti, dkk., 2017), ampas tebu (Daniyanto, dkk., 2015), pellet kayu jabon (Sulistio, dkk., 2020), sekam dan jerami padi (Chen, dkk., 2021), kayu pinus (Nguyen, dkk., 2021) dan batang singkong (Nakason, dkk., 2021).

Penelitian torefaksi juga telah dilakukan dengan menggunakan berbagai jenis reaktor diantaranya, Haryanto, dkk., (2020) melakukan torefaksi pellet tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menggunakan reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB), reaktor kontinu tipe tubular (Apriyanto, dkk., 2018), dan reaktor *fixed bed* horizontal (Susilowati, dkk., 2017).

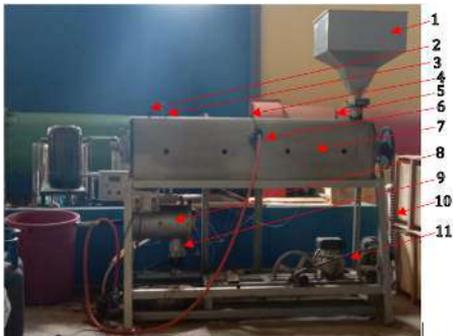
Pemanasan adalah bagian penting dari proses torefaksi. Tanoue, dkk., (2020) meneliti proses perpindahan panas dan massa dalam proses torefaksi dan menemukan jumlah panas yang signifikan yang dibutuhkan dalam proses torefaksi. Mengingat kebutuhan panas yang tinggi dalam proses torefaksi, oleh karena itu perlu dikaji hubungan kebutuhan panas ini terhadap peningkatan densitas energi produk torefaksi yang didapatkan.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui neraca energi pada reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas selimut oli. Neraca energi diperlukan untuk menentukan potensi pemanfaatan ulang energi terbuang pada proses torefaksi dan upaya mengurangi penggunaan bahan bakar pada proses torefaksi.

METODE PENELITIAN

Reaktor Torefaksi, Alat dan Bahan

Reaktor torefaksi yang digunakan pada penelitian ini adalah reaktor kontinu tipe tubular berselimut oli termal dengan pemanas berasal dari pembakaran gas LPG seperti yang diperlihatkan pada Gbr. 1.



GAMBAR 1. Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular berselimut oli termal dengan pemanas gas LPG

Keterangan gambar

1. Saluran biomassa masuk
2. Pipa gas buang
3. Termokopel A
4. Termokopel B
5. Termokopel C
6. Saluran gas LPG
7. Reaktor torefaksi
8. Tabung pendingin
9. Saluran biomassa keluar
10. Rantai penggerak ulir reaktor
11. Sistem penggerak ulir reaktor

Biomassa yang digunakan adalah jenis kayu keras dengan HHV 17.100 kJ/kg (hasil pengujian laboratorium. Oli termal komersial digunakan sebagai sumber panas reaktor yang dipanaskan melalui pembakaran gas LPG dengan nilai kapasitas panas 1.6794 kJ/kg.K.

Alat pendukung yang digunakan adalah pemantik api, tabung LPG 12 kg, regulator LPG, termokopel tipe K, *Temperature Recorder Datalogger* 12 titik merek Lutron BTM-4208SD, dan timbangan digital. Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan system pemanas oil jacket memiliki spesifikasi lengkap seperti pada Tabel 1.

TABEL 1. Spesifikasi reaktor torefaksi kontinu tipe tubular

<ul style="list-style-type: none"> • Reaktor 	
○ Diameter Screw	: 195 mm
○ Diameter tabung dalam	: 203,2 mm
○ Diameter tabung luar	: 254,0 mm
○ Panjang reaktor	: 1600 mm
○ Tinggi reaktor	: 1700 mm
○ Jarak Pitch	: 100 mm
○ Diameter poros	: 50 mm
○ Kecepatan Putar	: 0,5 rpm
○ Kapasitas maksimum	: 5 kg/jam
<ul style="list-style-type: none"> • Sistem Penggerak 	
○ Electromotor	: 2 unit @ 2 dan
○ Ratio gear Reducer	0,5 Hp
	: 2 unit @ 1 : 60
<ul style="list-style-type: none"> • Medium Pemanas 	
○ Jenis medium pemanas	: <i>Heat Trasfer Oil Caflo™AF</i>
○ Merk medium pemanas	: <i>Petro Canada</i>
○ Temperatur Maksimum	: 375 °C
○ Tekanan kerja	: 1 atm
<ul style="list-style-type: none"> • Sistem Pembakaran 	
○ Ruang Bakar	: <i>Horizontal Burner</i>
○ Bahan Bakar	: <i>Liquid Petroleum Gas (LPG)</i>

Prosedur Pengujian dan Perhitungan

Penelitian dilakukan secara eksperimental. Energi masuk (Q_{in}) meliputi energi yang terkandung dalam biomassa mentah (biomassa masuk reaktor) yang dihitung menggunakan Pers. (1) dan energi dari LPG (Pers. 2).

$$Q_{B,in} = m_{B,in} \cdot HHV_B \quad (1)$$

dengan

$Q_{B,in}$ = energi biomassa masuk (kJ)
 $m_{B,in}$ = massa biomassa masuk (kg)
 HHV_B = nilai kalor biomassa mentah (kJ/kg)

Biomassa masuk reaktor ditentukan melalui penimbangan dengan penimbang digital. Nilai kalor biomassa diperoleh melalui uji laboratorium nilai kalor yang dilakukan di Tekmira, BRIN, Bandung.

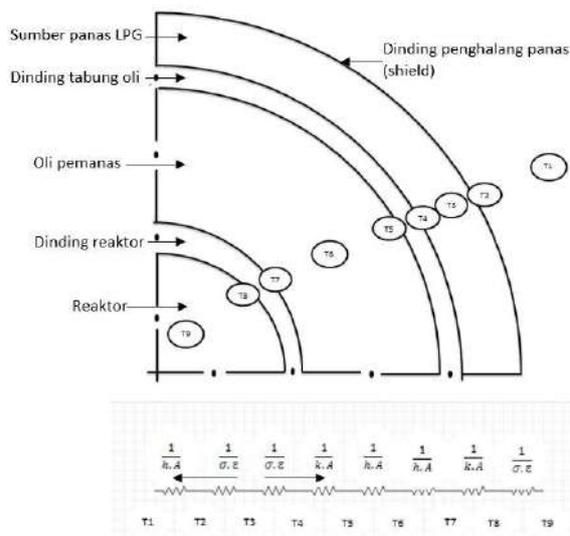
$$Q_{LPG} = m_{LPG} \cdot HHV_{LPG} \quad (2)$$

Massa LPG ditentukan berdasarkan massa LPG yang terpakai saat pengujian, yaitu selisih massa LPG sebelum dan sesudah proses pengujian dilakukan. Sedangkan nilai kalor LPG didapat data spesifikasi LPG yang tersedia di situs Pertamina dengan nilai sebesar 50.456 kJ/kg.

Energi keluar (Q_{out}) adalah energi dari biomassa produk torefaksi. Nilai kalornya ditentukan berdasarkan hasil pengujian laboratorium Tekmira, BRIN, Bandung dan nilai energinya dihitung berdasarkan Pers. 3.

$$Q_{tor} = m_{B,tor} \cdot HHV_{B,tor} \quad (3)$$

Energi terbuang (heat loss) yang dihitung dalam penelitian ini adalah panas yang dikonveksikan oleh dinding penghalang panas (*shield*) ke udara lingkungan. Panas ini berasal dari panas hasil pembakaran gas LPG yang diradiasikan ke shield dan dinding oli. Gambar sketsa proses perpindahan panas pada reaktor torefaksi dan analogi listrik dari proses perpindahan panasnya ditampilkan seperti yang terlihat pada Gbr. 2.



GAMBAR 2. Sketsa proses perpindahan panas pada reaktor torefaksi dan analogi listriknya

dengan

T_1 = Temperatur lingkungan, °C
 T_2 = Temperatur *shield*, °C

T_3 = Temperatur ruang pembakaran, °C
 T_4 = Temperatur dinding luar tabung oli, °C
 T_5 = Temperatur dinding dalam tabung oli, °C
 T_6 = Temperatur oli, °C
 T_7 = Temperatur dinding luar reaktor, °C
 T_8 = Temperatur dinding dalam reaktor, °C
 T_9 = Temperatur reaktor, °C

T_1 , T_2 , T_6 , dan T_9 , didapat dari pengukuran menggunakan termokopel. T_1 , dan T_2 diukur di satu lokasi pengukuran sedangkan T_6 , dan T_9 diukur di tiga lokasi berbeda (lokasi input, tengah, dan output) selanjutnya digunakan nilai rata-ratanya. Kemudian temperatur yang lain ditentukan menggunakan perpindahan panas konduksi/konvensi/radiasi seperti yang diilustrasikan oleh analogi listrik dalam Gbr. 2 dan panas yang dihasilkan oleh pembakaran LPG dihitung sesuai dengan Pers. 2.

Perhitungan neraca energi dilakukan saat pemanasan oli sampai temperatur oli mencapai temperatur torefaksi yang diinginkan dan saat proses torefaksi berlangsung.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini pertama dilakukan pemanasan oli termal sampai temperatur 275 °C. Nilai dari parameter-parameter yang digunakan di tabulasi dalam Tabel 2 berikut:

TABEL 2. Nilai dari parameter pada saat proses pemanasan oli

Nama	Nilai
Massa gas (m_{LPG})	2,4 kg
HHV Gas LPG 12 kg	50.456 kJ/kg
c_p oli termal	1.6794 kJ/kg . K
Temperatur (ΔT)	246 °C
Waktu (t)	85 menit atau 5.100 detik

Kemudian dilanjutkan dengan proses torefaksi yang berlangsung selama 65 menit. Pada proses torefaksi nilai dari parameter-parameter yang digunakan ditabulasikan dalam Tabel 3.

Pada saat proses pengujian torefaksi menggunakan biomassa jenis kayu keras pada temperatur 275°C didapatkan besar energi input dan energi ouput. Adapun energi input yang terjadi pada proses torefaksi ini meliputi energi yang terkandung dalam gas LPG 12 kg, HHV pada kayu mentah dan laju massa air untuk pendingin sampel kayu tertorefaksi. Proses

torefaksi ini menggunakan sumber energi yang berasal dari tabung LPG 12 kg sebagai energi utamanya, pada proses ini LPG akan ditimbang massa awal sebelum digunakan dan massa akhir setelah pemakaian. Hal ini bertujuan untuk mengetahui berapa besar massa gas LPG yang digunakan dan energi yang diperlukan pada saat proses pengujian torefaksi berlangsung.

TABEL 3. Nilai dari parameter pada saat proses torefaksi

Parameter	Nilai
Massa gas (m_{LPG})	1,8 kg
HHV Gas LPG 12 kg	50.456 kJ/kg
HHV sampel kayu	4.087 Cal/g = 17.100 kJ/kg
Debit air (Q)	2.100 liter/jam = 2,1 (m ³ /s)
Waktu (t) torefaksi	65 Menit (3.900 s)
Massa jenis air (ρ)	997 kg/m ³
Massa sampel kayu (m_B)	2 kg
Massa sampel kayu tertorefaksi ($m_{B,tor}$)	1,4 kg
HHV sampel kayu tertorefaksi	5.076 cal/g = 21.236 kJ/kg
Entalpi air ($H_{40^\circ C}$)	167,6 kJ/kg
A_1 (Luas permukaan <i>shield</i>)	0,888 m ²
h_c udara	5 W/m ² K

Sebelum dilakukan proses pengujian sampel perlu dilakukan pemanasan awal terlebih dahulu untuk mencapai temperatur oli yang seragam sekitar 275°C, proses ini dilakukan selama 85 menit sampai temperatur dalam kondisi stabil. Pada proses pemanasan ini didapatlah dua komponen energi yang diberikan kedalam reaktor yaitu energi gas LPG (Q_{LPG}) dan energi oli (Q_{oli}), nilai energi gas LPG adalah sebesar 121.093 kJ dan nilai energi gas oli adalah sebesar 5.009 kJ. Sesuai dengan data tersebut diatas, energi yang diberikan oleh gas tidak sama dengan energi yang dibutuhkan oli untuk mencapai temperatur 275°C sehingga terjadilah peristiwa energi yang hilang atau panas terbuang (Q_{loss}). Energi hilang yang terjadi pada proses pemanasan sebesar 116.085 kJ.

Terdapat 3 komponen energi yang terjadi pada saat proses pengujian yaitu, energi input (Q_{in}), energi output (Q_{out}), dan panas terbuang (Q_{loss}). Energi yang diberikan kedalam reaktor ada 3 macam yaitu, energi dari pembakaran gas LPG 12 kg, sampel kayu mentah, dan air pendingin kayu tertorefaksi. Nilai energi input dari gas LPG saat proses pengujian adalah sebesar 90.820 kJ. Hasil uji laboratorium sampel kayu mentah didapat nilai *Higher Heating Value* (HHV) nya sebesar 17.100 kJ/s dan dengan menggunakan Pers. 1 didapat energi dari kayu sebesar 34.200 kJ. Pada saat pengujian juga digunakan air yang berfungsi sebagai pendingin kayu yang telah di torefaksi dengan nilai sebesar 237,3 kJ.

Sampel yang mengalami proses torefaksi akan menyerap energi yang masuk ke dalam reaktor, sehingga pada saat sampel keluar ada dua komponen yang menyerap energi atau disebut Q_{out} yaitu energi kayu torefaksi dan air keluar setelah mendinginkan kayu tertorefaksi. Untuk mencari energi pada sampel kayu tertorefaksi, digunakan nilai HHV massa sampel kayu tertorefaksi hasil pengujian laboratorium yang nilainya sebesar 21.238 kJ. Energi kayu tertorefaksi dihitung dengan mengalikan HHV kayu tertorefaksi dengan massa kayu tertorefaksi (Pers. 3). Massa kayu setelah pengujian torefaksi adalah sebesar 1,4 kg sehingga didapat energi pada sampel tertorefaksi sebesar 29.733,1776 kJ, sedangkan untuk energi air keluar atau Q_{air} dengan nilai sebesar 379,16 kJ.

Nilai-nilai dari energi ini ditabelkan dalam Tabel 4 berikut.

TABEL 4. Hasil perhitungan neraca energi reaktor torefaksi kontinu tipe turbular.

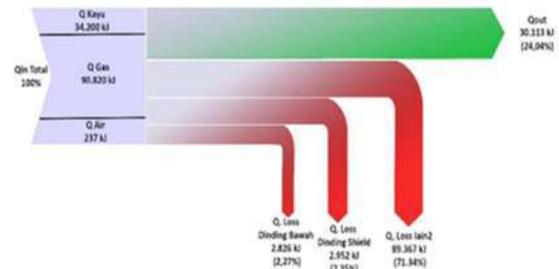
No.	Energi input (Q_{in})		Energi output (Q_{out})		Energi losses (Q_{los})	
	Nama	Nilai	Nama	Nilai	Nama	Nilai
1.	Gas	90.820 kJ	Air	379,1 kJ	Dinding shield	2.952 kJ
2.	Kayu	34.200 kJ	Kayu	29.734 kJ	Dinding bawah	2.826 kJ
3.	Air	237,3 kJ				
Total	125.257 kJ		30.113 kJ		5.778 kJ	

Pada saat proses pengujian berlangsung terjadi peristiwa *heat loss*, hal ini dikarenakan proses pengujian dilakukan pada suhu lingkungan sehingga terjadi proses perpindahan panas antara *shield* yang bertemperatur tinggi ke lingkungan yang bertemperatur lebih rendah. Melalui hasil perhitungan, bahwasanya terdapat beberapa komponen Q_{loss} antara lain terjadi pada dinding atas reaktor (yang diberi *shield*) dan dinding bagian bawah reaktor yang tanpa *shield*. Q_{loss} yang terjadi pada dinding cover dianalisis menggunakan cara menghitung koefisien perpindahan panas udara, luas permukaan cover dengan asumsi temperatur dinding dan temperatur lingkungan yang berubah setiap 5 menit berdasarkan data pengujian. Sehingga didapatkan nilai dari Q_{loss} pada dinding ber *shield* sebesar 2.952 kJ.

Selanjutnya dihitung Q_{loss} yang terjadi pada dinding bagian bawah reaktor. Dengan luas permukaan dinding bagian bawah reaktor sebesar 0,585 m² dan nilai h udara adalah 5 w/m².K serta asumsi temperatur oli dan lingkungan berubah setiap 5 menit, sehingga didapatkan nilai Q_{loss} dinding bagian bawah sebesar 2.826 kJ.

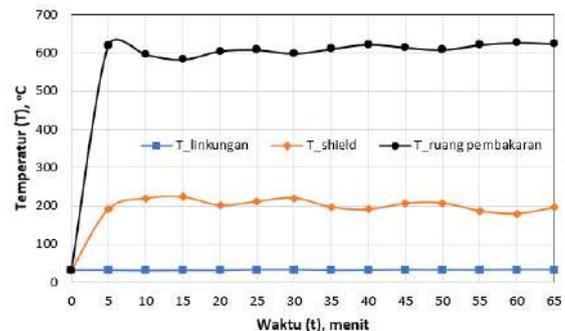
Berdasarkan hasil perhitungan yang telah diuraikan diatas dibuat diagram sankey seperti Gbr. 3 dengan nilai energi yang input (Q_{in}) sebesar 125.257 kJ (100%) dan energi output (Q_{out}) sebesar 30.113 kJ (24,04%). Sehingga berdasarkan hasil analisis berdasarkan data diatas didapatkan 3 tempat terjadinya *heat loss* yaitu, Q_{loss} dinding bawah sebesar 2.826

kJ (2,27%), dinding shield 2.952 kJ (2,35%) dan Q_{loss} lain-lain sebesar 89.367 kJ (71.34%).



GAMBAR 3. Diagram Sankey reaktor torefaksi kontinu tipe turbular

Data temperatur yang diukur dalam penelitian adalah temperatur lingkungan (T_1), temperatur dinding shield (T_2), temperatur oli (T_6), dan temperatur reaktor (T_9). Sedangkan temperatur T_3 , T_4 , T_5 , T_7 , dan T_8 dihitung menggunakan persamaan perpindahan panas yang sesuai (Gbr. 2) yaitu persamaan perpindahan panas konduksi/konveksi/radiasi. Distribusi temperatur T_1 , T_2 , dan T_3 dalam 65 menit proses torefaksi diperlihatkan dalam Gbr. 4.

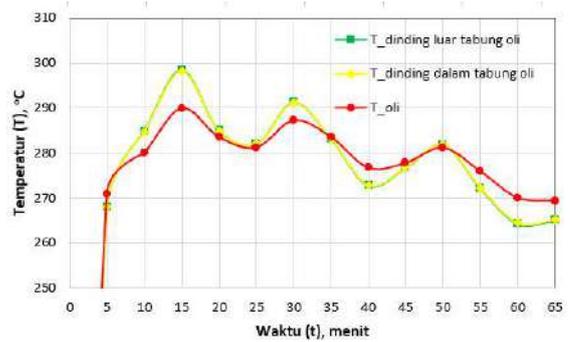


GAMBAR 4. Distribusi temperatur lingkungan, shield, dan ruang pembakaran selama proses torefaksi.

Pada Gbr. 4 terlihat bahwa temperatur lingkungan cenderung konstan. Dari data pengukuran variasi temperatur lingkungan adalah sebesar 30,4 – 31,8°C atau rata-rata temperatur lingkungan sekitar 31,25°C. Begitu juga dengan temperatur dinding shield dan temperatur ruang pembakaran LPG tidak terlalu banyak bervariasi. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk temperatur lingkungan yang konstan, proses pembakaran yang stabil energi pembakaran dipancarkan dengan stabil ke dinding shield. Rata-rata temperatur shield dari data pengukuran adalah sebesar 201,8°C dengan temperatur maksimum dan minimumnya adalah 223,1°C dan 179°C.

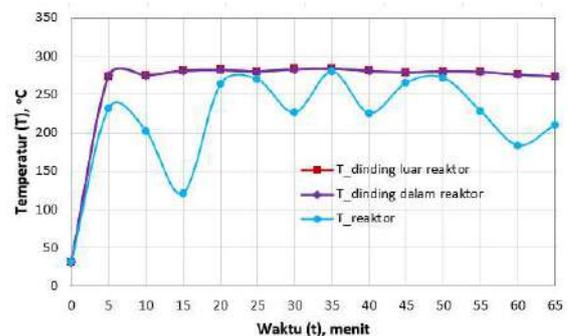
Besarnya energi yang dilepas ke lingkungan (Q_{loss}) dihitung menggunakan persamaan konveksi dengan mengasumsikan nilai koefisien perpindahan panas konveksi sebesar 5 W/(m².°C). dari perhitungan diperoleh $Q_{\text{loss}} = 2.952$ kJ. Temperatur ruang pembakaran ditentukan menggunakan persamaan perpindahan panas radiasi. Asumsi yang digunakan adalah $Q_{\text{loss}} = Q_{\text{rad}} = 2.952$ kJ dan energi yang dipindahkan secara konveksi dan konduksi dari proses pembakaran LPG ke dinding shield diabaikan. Dari perhitungan didapat rata-rata temperatur ruang pembakaran adalah 611°C (maks. 627,6°C dan min. 583°C).

Jumlah massa LPG yang digunakan adalah sebesar 1,8 kg. dari Pers. 2 didapat besar energi yang dibangkitkan oleh LPG sebesar 90.820 kJ. Distribusi temperatur dinding oli sisi luar dan dalam serta temperatur oli di sajikan pada Gbr. 5. Karena dinding tabung oli cukup tipis maka terlihat pada Gbr. 5 tidak ada perbedaan temperatur kedua bagian tersebut. Dari hasil perhitungan rata-rata temperatur dinding oli dalam dan luar adalah sama yaitu 278,89°C. Gambar 5 memperlihatkan fluktuasi temperatur dinding oli cukup besar sekitar 34°C.



GAMBAR 5. Distribusi temperatur dinding luar dan dalam tabung oli serta temperatur oli.

Temperatur oli juga terlihat bervariasi besar sekitar 20,6°C dengan rata-rata sebesar 279°C. hal ini menandakan adanya loses energi selain loses dari dinding shield ke lingkungan dengan nilai yang cukup besar. Bentuk ruang bakar yang terbuka memungkinkan kehilangan energi berupa energi dari exhaust produk pembakaran yang belum terukur dalam penelitian ini.



GAMBAR 6. Distribusi temperatur dinding luar dan dalam reaktor serta temperatur reaktor.

Dari oli selanjutnya energi ditransfer ke dinding reaktor. Sama seperti dinding tabung oli, temperatur dinding luar dan dalam tabung reaktor juga hampir sama (dapat dilihat pada Gbr. 6) dengan nilai rata-rata sebesar 279,13°C dan variasi yang kecil 273°C - 283°C. Seperti temperatur oli, temperatur reaktor juga berfluktuasi sangat besar sekitar 159°C dengan temperatur rata-rata 228,7°C serta $T_{\text{min}} = 120,6^\circ\text{C}$ dan $T_{\text{max}} = 279,5^\circ\text{C}$. penurunan temperatur yang tajam pada reaktor diprediksi disebabkan oleh kehilangan energi yang besar saat memasukkan kayu mentah ke reaktor dengan membuka katup. Terbukanya

katup inlet menyebabkan panas dalam reaktor lepas keluar sehingga temperatur reaktor menjadi drop secara signifikan.

KESIMPULAN

Berdasarkan data eksperimen yang diperoleh dan hasil perhitungan yang dilakukan dalam penelitian ini didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Neraca energi dari reaktor torefaksi kontinu turbular adalah energi masuk/input (Q_{in}) sebesar 125.257 kJ berupa energi bahan bakar LPG, energi biomassa mentah, dan energi air pendingin, energi output (Q_{out}) berupa energi biomassa tertorefaksi dan energi air pendingin keluar reaktor sebesar 30.113 kJ atau 24,04% dari total energi input, dan energi terbuang (Q_{loss}) sebesar 95.145 kJ 75,96% dari total energi input.
2. Energi terbuang dapat dikurangi melalui penempatan isolasi panas disekeliling reaktor dan atau memanfaatkan energi tersebut untuk mengeringkan biomassa sebelum diumpankan ke reaktor torefaksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pino Amrullah, Ahmad Zikautsar, dan Nurazizah Patmawati yang telah membantu dalam penelitian yang dipublikasikan dalam seminar ini.

DAFTAR PUSTAKA

Amrul, Hardianto, T., Suwono, A., Pasek, A.D., & Irhamna, A.R. (2013). Konversi Bahan Bakar Padat dari Sampah Kota melalui Torefaksi: Optimasi Temperatur Torefaksi Simultan Berdasarkan Hasil Uji Temperatur Torefaksi Masing-Masing Komponennya. *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XII)*, Bandar

Lampung, (pp.76-82). ISBN 978 979 8510 61 8.

Apriyanto, A., Amrul, & Amrizal, (2018). Rancang Bangun dan Analisis Unjuk Kerja Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas Oil Jacket. *Jurnal Mechanical*, vol. 6 (2), pp. 54 – 66.

Basu, Prabir. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory. 2nd Ed.*, San Diego, USA: Elsevier Inc.

Becidan, M., (2007). *Experimental Studies on Municipal Solid Waste and Biomass Pyrolysis*. Dissertation. Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology Department of Energy and Process Technology.

Chen, C., Qu, B., Wang, W., Wang, W., Ji, G., & Li, A., (2021). Rice husk and rice straw torrefaction: Properties and pyrolysis kinetics of raw and torrefied biomass. *Environmental Technology & Innovation*, 24 (101872).

Daniyanto, Sutidjan, Deendarlianto, & Budiman, A., (2015). Torrefaction of Indonesian sugar-cane bagasse to improve bio-syngas quality for gasification process. *Energy Procedia*. Vol. 68, pp. 157 – 166.

Haryanto, A., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., & Hidayat, W., (2020). Biomass fuel from oil palm empty fruit bunch pellet: potential and challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* 7 (2). Diakses dari <http://www.procedia-esem.eu>.

Maryenti, R., Komalasari, & Helwani, Z. (2017). Pembuatan Bahan Bakar Padat dari Pelepah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi Pada Variasi Suhu Waktu

- Torefaksi. *Jom FTEKNIK*, volume 4 no. 1. Jurnal Teknik Universitas Riau.
- Nakason, K., Khemthong, P., Kraithong, W., Chukaew, P., Panyapinyopol, B., Kitkaew, D., & Pavasant, P., (2021). Upgrading properties of biochar fuel derived from cassava rhizome via torrefaction: Effect of sweeping gas atmospheres and its economic feasibility. *Case Studies in Thermal Engineering*, 23 (100823).
- Nguyen, Q., Nguyen, D.D., He, C., & Bach, Q.V., (2021). Pretreatment of Korean pine (*Pinus koraiensis*) via wet torrefaction in inert and oxidative atmospheres. *Fuel*, 291 (119616).
- Soh, M., Khaerudini, D.S., Chew, J.J., & Sunarso, J. (2021). Wet torrefaction of empty fruit bunches (EFB) and oil palm trunks (OPT): Effects of process parameters on their physicochemical and structural properties. *South African Journal of Chemical Engineering*, Volume 35, pp. 126-136.
- Sulistio, Y., Febryano, I.G., Hasanudin, U., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., & Hidayat, W. (2020). Pengaruh Torefaksi dengan Reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB) dan Electric Furnace terhadap Pelet Kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba*). *Jurnal Sylva Lestari*, Vol. 8 No. 1, pp. 65-76.
- Susilowati, Komalasari, & Helwani, Z. (2017). Bahan Bakar Padat dari Pelempah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi; Variasi Suhu dan Ukuran Bahan Baku. *Jom FTEKNIK*, volume 4 no. 1. Jurnal Teknik Universitas Riau.
- Tanoue, K., Hikasa, K., Hamaoka, Y., Yoshinaga, A., Nishimura, T., Uemura, Y., & Hiden, A. (2020). Heat and Mass Transfer during Lignocellulosic Biomass Torrefaction: Contributions from the Major Components—Cellulose, Hemi-cellulose, and Lignin. *Process*, 8, 959. Diakses dari www.mdpi.com/journal/process.
- Triyono, B., Prawisudha, P., Aziz, M., Mardiyati, Pasek, A.D., & Yoshikawa, K. (2019). Utilization of mixed organic-plastic municipal solid waste as renewable solid fuel employing wet torrefaction. *Waste Management* 95, 1–9.
- Wahyudi, R., Amrul, Irsyad, M., (2020). Karakteristik Bahan Bakar Padat Produk Torefaksi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular. *Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*. Volume 20 (2). DOI : 10.24036/invotek.v20i2.706

PENULIS:

Harmen

Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung.

Email: harmen.1969@eng.unila.ac.id

Zulkri Kurniawansah, Amrul, Hadi Prayitno

Konversi Energi, Laboratorium Termodinamika, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung, Bandar Lampung.