SINERGI *Polmed* : JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

SIMULASI PEMISAHAN TETESAN AIR DAN PENURUNAN TEKANAN PADA DEMISTER TIGA TAHAP DI PEMBANGKIT PANAS BUMI PATUHA

Juna Gumilar[a], Indriyani[a]*, Purwinda Iriani[a]

[a]*Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Bandung 40012, Indonesia*

**Penulis korespondensi: indriyani@polban.ac.id; indriyanisumitra@gmail.com (I.) Tel.: +62813-2234-8083*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 05 Agustus 2026
Direvisi pada 29 September 2026
Disetujui pada 17 Oktober 2026
Tersedia daring: 17 November 2026

Kata kunci:
Demister tiga tahap, pemisahan *droplet*, simulasi Dinamika Fluida Komputasi, penurunan tekanan, uap panas bumi.

Keywords:
Three-stage demister, droplet separation, CFD simulation, pressure drop, geothermal steam.

ABSTRAK

Kualitas uap panas bumi yang masih mengandung *moisture* dan kontaminan pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) PT Geo Dipa Energi Unit Patuha berpotensi menyebabkan *scaling* dan erosi pada komponen turbin sehingga menurunkan kinerja pembangkitan. Penelitian ini bertujuan merancang *multistage demister* berbasis kombinasi *Schoepentoeter, Vane Z-profile,* dan *Knit Mesh SS316L* untuk meningkatkan kualitas uap sebelum memasuki turbin. Metode penelitian meliputi perancangan dimensi *vessel* dan konfigurasi internal berdasarkan parameter operasi PLTP, serta validasi kinerja menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Evaluasi dilakukan melalui analisis karakteristik aliran, distribusi tekanan, kecepatan, efisiensi pemisahan droplet, dan peningkatan *dryness fraction* uap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rancangan *multistage demister* berdiameter 5,4 m dan tinggi 11 m mampu meningkatkan *dryness fraction* uap dari 99,53% menjadi 99,62%, menghasilkan efisiensi pemisahan droplet berukuran 5 µm sebesar 99,35%, menurunkan *moisture carryover* sebesar 371,86 kg/jam, serta mempertahankan penurunan tekanan total sebesar 5,081 kPa sehingga berpotensi meningkatkan kualitas uap, keandalan, dan kinerja operasional PLTP.

ABSTRACT

The quality of geothermal steam containing moisture and contaminants at PT Geo Dipa Energi Patuha Geothermal Power Plant (GPP) has the potential to cause scaling and erosion in turbine components, thereby reducing power generation performance. This study aimed to design a multistage demister based on a combination of a Schoepentoeter, Z-profile vane separator, and SS316L knit mesh to improve steam quality before entering the turbine. The research methodology included the design of the vessel dimensions and internal configuration based on the operating parameters of the geothermal power plant, followed by performance validation using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. The proposed design was evaluated through analyses of flow characteristics, pressure and velocity distributions, droplet separation efficiency, and steam dryness fraction. The results showed that the proposed multistage demister, with a vessel diameter of 5.4 m and a height of 11 m, increased the steam dryness fraction from 99.53% to 99.62%, achieved a 99.35% separation efficiency for 5 µm droplets, reduced moisture carryover by 371.86 kg/h, and maintained a low total pressure drop of 5.081 kPa. These improvements indicate that the proposed multistage demister enhances steam quality while maintaining favorable flow characteristics, thereby potentially improving the reliability and operational performance of the geothermal power plant..

1. PENGANTAR

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berperan penting dalam mendukung bauran energi nasional karena mampu menyediakan pasokan listrik secara berkelanjutan (*baseload*). Menurut data Kementrian Sumber Daya dan Mineral pada tahun 2024 kapasitas terpasang PLTP di Indonesia telah mencapai 2.638,76 MW. Pada PLTP PT Geo Dipa Energi Unit Patuha, energi panas bumi dimanfaatkan dalam bentuk uap untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan energi listrik. Kinerja turbin sangat dipengaruhi oleh kualitas uap yang masuk, terutama nilai *dryness fraction* serta kandungan *moisture* dan kontaminan. Uap panas bumi umumnya masih membawa droplet cair dan partikel padat yang mengandung mineral seperti silika (SiO_2), sulfat (SO_4), klorida (Cl), besi (Fe), kalsium (Ca), magnesium (Mg), boron (B), dan *total dissolved solids* (TDS). Keberadaan kontaminan tersebut dapat menyebabkan erosi, abrasi, korosi, dan pembentukan deposit pada sudu turbin sehingga menurunkan efisiensi serta keandalan operasi

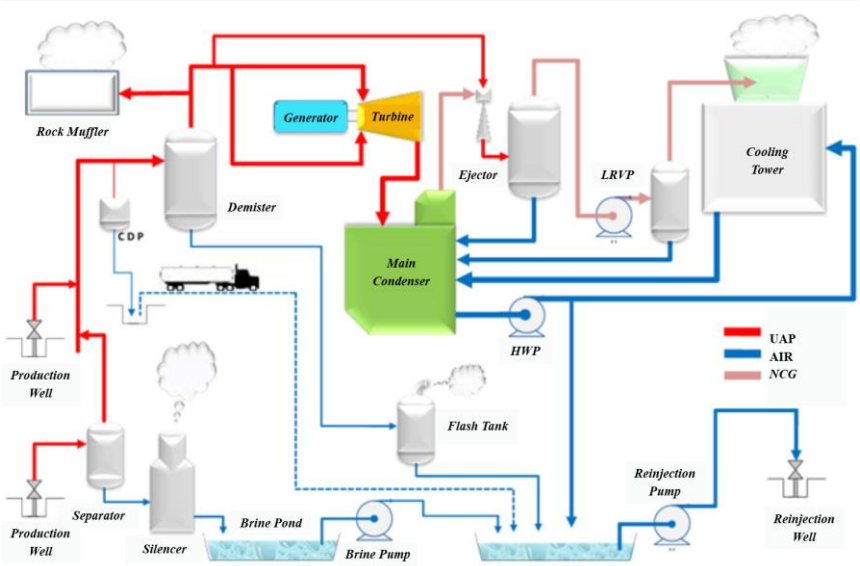
pembangkit (Taherkhani dkk., 2025). Hasil analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) pada deposit turbin PLTP Patuha menunjukkan kandungan sulfat sebesar 36,8% dan silika sebesar 30,8%, yang berkontribusi terhadap penurunan efisiensi isentropik turbin dan efisiensi sistem turbin-generator (Yuliyani dkk., 2024).

Untuk menjaga keandalan operasi turbin, kualitas uap harus memenuhi persyaratan tertentu. *International Association for the Properties of Water and Steam* merekomendasikan kandungan padatan total dalam uap tidak melebihi 1–2 mg/kg (IAPWS, 2013), sedangkan *dryness fraction* yang direkomendasikan untuk turbin uap adalah minimal 99,5% dengan kandungan *moisture* maksimum 0,5% (Addison dkk., 2020). PLTP Patuha menggunakan *four-box with wire mesh pre-conditioner* sebagai sistem pemisahan sekunder untuk mengurangi droplet sebelum uap memasuki turbin. Namun, peningkatan kecepatan aliran dapat menyebabkan kenaikan penurunan tekanan, *liquid holdup*, dan fenomena *re-entrainment*, yaitu terbawanya kembali droplet yang telah terpisah sehingga menurunkan efektivitas pemisahan (El-dessouky dkk., 2000). Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa droplet berukuran mikro masih berpotensi lolos menuju turbin dan menyebabkan pembentukan deposit selama operasi.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa efektivitas pemisahan sangat dipengaruhi oleh ukuran droplet dan jenis media pemisah yang digunakan. *Vane separator* mampu mencapai efisiensi sekitar 90% untuk droplet berukuran 40 µm, namun efisiensinya menurun pada droplet yang lebih kecil, sedangkan *wire mesh demister* lebih efektif untuk memisahkan droplet berukuran sekitar 5 µm (Yang dkk., 2023). Selain itu, separator konvensional mengalami penurunan efisiensi yang signifikan pada droplet berukuran di bawah 10 µm (Szul dkk., 2020). Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang cenderung berfokus pada satu jenis separator atau kombinasi dua tahap, penelitian ini menyusun sistem tiga tahap yang memadukan *Schoepentoeter (pre-separator), Vane Z-profile (intermediate separator)*, dan SS316L *Knit Mesh (fine separator)*. Kinerja sistem ini diuji secara numerik menggunakan metode CFD dan DPM untuk menemukan keseimbangan optimal antara efisiensi pemisahan droplet dan penurunan tekanan pada kondisi operasi aktual PLTP PT Geo Dipa Energi Unit Patuha.

1.1. Pembangkit listrik tenaga panas bumi

Pembangkit listrik tenaga panas bumi memanfaatkan energi fluida dari reservoir untuk menghasilkan listrik melalui sistem konversi yang sesuai dengan karakteristik sumber panas. Sistem tersebut dapat berupa uap kering, uap kilat, atau siklus biner (IRENA, 2023). Pada pembangkit yang menggunakan turbin uap, kandungan cairan yang terbawa dan kondisi termodinamika aliran perlu dikendalikan sebelum memasuki turbin. Sebelum dialirkan menuju turbin, fluida panas bumi melewati pemisahan fase dan sistem pengondisian uap. Separator utama menangani pemisahan fase dalam jumlah besar, sedangkan demister digunakan untuk menangkap *droplet* yang masih terbawa. Keberhasilan pengondisian ini tidak hanya berkaitan dengan fraksi kekeringan, tetapi juga dengan kehilangan tekanan yang dapat memengaruhi kondisi uap di sisi masuk turbin. Selain kualitas uap, tekanan, temperatur, dan laju alir massa memengaruhi kinerja sistem PLTP. Karena itu, rancangan demister perlu mempertimbangkan efisiensi pemisahan bersama hambatan aliran. Kedua aspek tersebut menjadi dasar analisis numerik pada penelitian ini (Adhikari dkk., 2024).

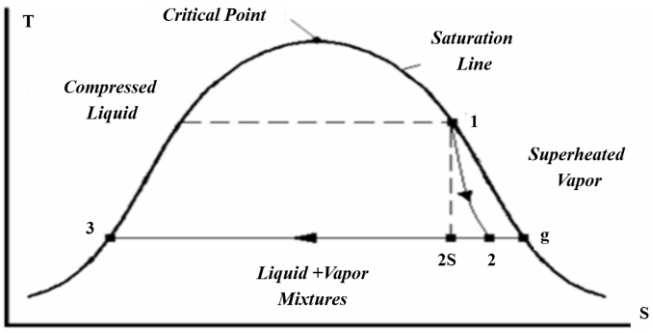


Gambar 1: Skema umum proses PLTP (Dencio dkk., 2021)

1.2. Kualitas uap

Uap panas bumi dapat membawa *droplet* air yang mengandung mineral terlarut serta partikel padat. Pengotor tersebut berpotensi menimbulkan deposit pada peralatan proses, khususnya ketika terjadi perubahan kondisi termal dan kimia aliran. Namun, pemisahan *droplet* tidak dapat secara langsung disamakan dengan penghilangan seluruh komponen terlarut atau partikel padat; mekanisme pengangkutannya perlu ditentukan secara khusus (Longval dkk., 2024).

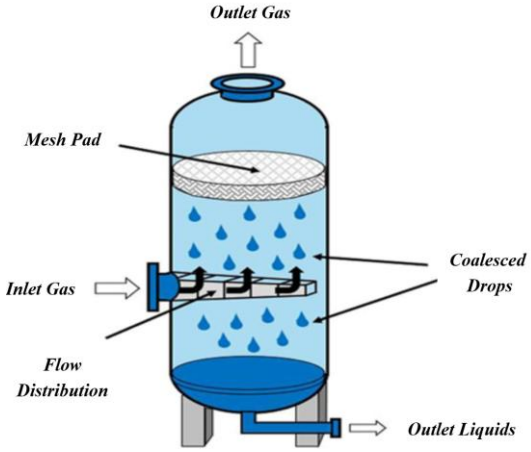
Fraksi kekeringan (*dryness fraction*) menyatakan perbandingan massa uap dengan massa total campuran uap dan cairan pada kondisi dua fase. Nilai yang lebih tinggi menunjukkan proporsi fase cair yang lebih kecil. Dalam penelitian ini, perubahan fraksi kekeringan dinyatakan sebagai hasil estimasi berbasis data operasi dan perhitungan, bukan sebagai pengukuran langsung setelah pemasangan demister. Diagram T–s pada Gambar 2 digunakan sebagai ilustrasi konsep dua fase tersebut.



Gambar 2: Ilustrasi diagram temperatur–entropi uap dua fase

1.3. Demister tiga tahap

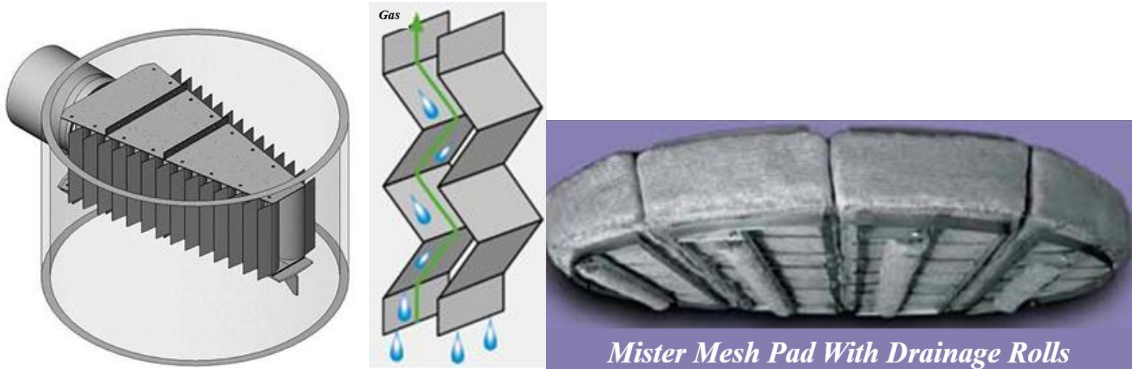
Demister memisahkan *droplet* yang terbawa aliran uap melalui beberapa mekanisme, antara lain tumbukan akibat inersia, intersepsi, dan koalesensi. Tetesan yang tertangkap dapat bergabung menjadi lebih besar dan dialirkan menuju saluran pembuangan cairan. Efektivitas proses dipengaruhi oleh ukuran *droplet*, kecepatan aliran, geometri media, dan kemampuan drainase. Mekanisme umum ini diilustrasikan pada Gambar 3 (Sulzer, 2025).



Gambar 3: Prinsip penangkapan dan drainase *droplet* pada *demister* (Wines, 2022)

Berdasarkan Gambar 3, aliran uap memasuki *vessel* melalui saluran masuk (*inlet gas*) dan terlebih dahulu melewati *flow distributor* yang berfungsi meratakan distribusi aliran di dalam bejana. Selanjutnya, uap mengalir menuju *mesh pad* sebagai media pemisah, tempat droplet mengalami tumbukan dan bergabung membentuk droplet yang lebih besar. Droplet hasil koalesensi akan jatuh ke dasar *vessel* sebagai *outlet liquid*, sedangkan uap yang telah mengalami pemisahan keluar melalui bagian atas sebagai *outlet gas*. Mekanisme tersebut memungkinkan kandungan *moisture* pada uap berkurang sehingga kualitas uap yang dialirkan ke peralatan proses menjadi lebih baik (Sulzer, 2025).

Komponen penyusun *multistage demister* terdiri atas *Schoepentoeter, Vane Z-profile*, dan *Knit Mesh*, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Ketiga komponen tersebut disusun secara bertahap agar mampu meningkatkan efisiensi pemisahan droplet pada berbagai rentang ukuran.



(a) (b) (c)

Gambar 4: Komponen pemisahan tiga tahap: (a) *schoepentoeter*, (b) *vane Z-profile*, dan (c) *knit mesh*.

Schoepentoeter dipasang pada bagian masuk bejana untuk menyebarkan aliran dan mengurangi konsentrasi momentum lokal. Perubahan arah aliran dapat membantu pemisahan awal *droplet* berinersia tinggi. Besaran penangkapan yang sebenarnya bergantung pada kondisi operasi dan konfigurasi geometri, sehingga tidak diasumsikan sama untuk setiap aplikasi (Sulzer, 2025).

Vane Z-profile memaksa aliran mengalami perubahan arah berulang. *Droplet* yang memiliki inersia cukup besar cenderung menyentuh permukaan bilah, kemudian membentuk cairan yang dapat dialirkan menuju drainase. Kinerjanya dipengaruhi oleh dimensi bilah, jarak antarbilah, ukuran *droplet*, dan kecepatan uap (Yang dkk., 2023).

Knit mesh merupakan media kawat rajut yang menyediakan permukaan kontak luas bagi *droplet* halus. Melalui intersepsi, tumbukan, dan koalesensi, *droplet* yang tertangkap dapat bergabung serta dialirkan keluar dari media. Pada penelitian ini, performa media

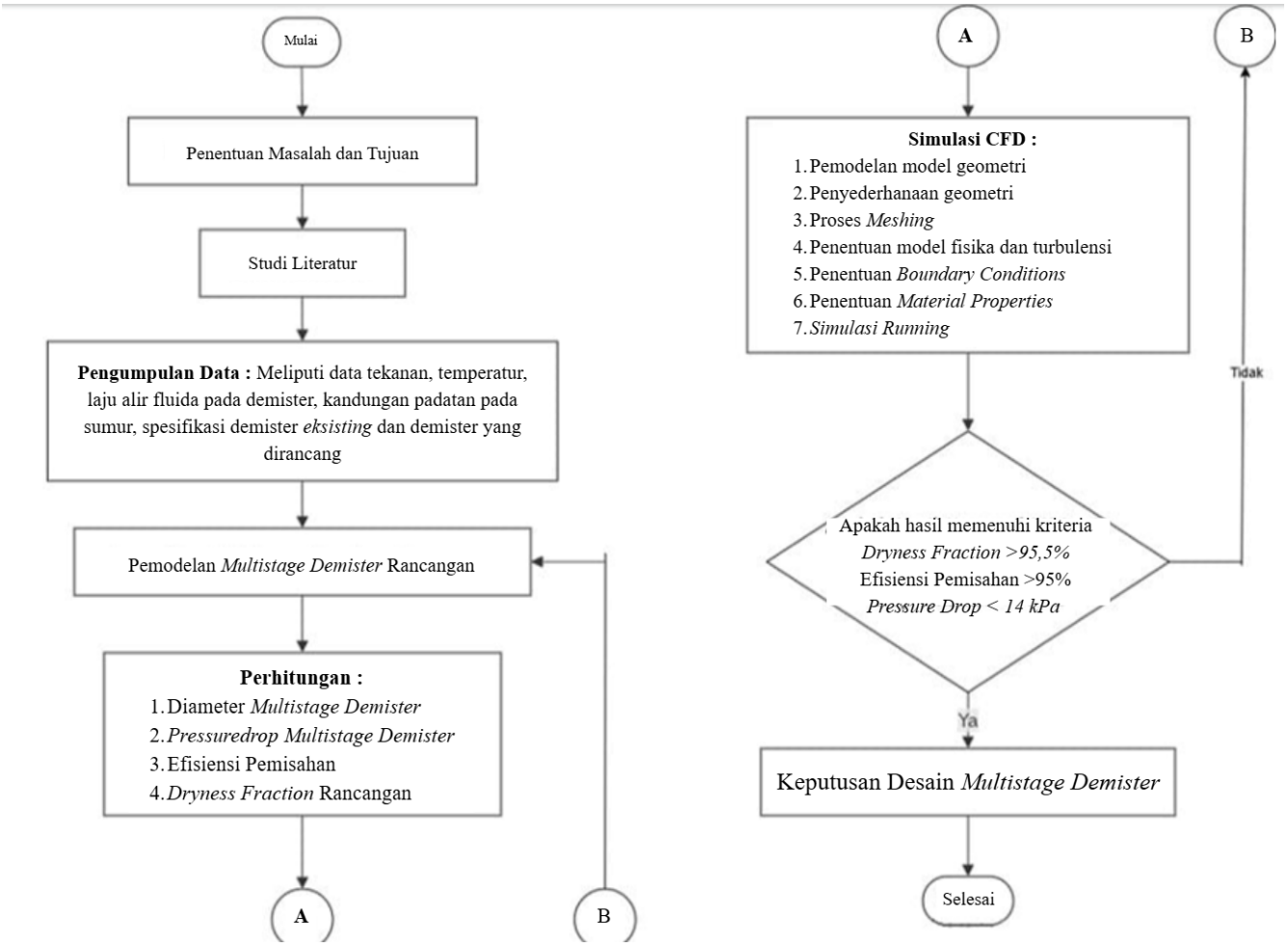
tersebut dievaluasi melalui simulasi DPM untuk *droplet* berdiameter 5 µm pada domain *knit mesh*, bukan melalui pengujian langsung di PLTP (Sulzer, 2025).

2. METODE

Penelitian menggunakan pendekatan perancangan numerik dengan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Tahapan utama meliputi penentuan kondisi operasi, penyusunan geometri, penetapan model aliran dan kondisi batas, pembentukan *mesh*, simulasi komponen, serta analisis penurunan tekanan dan lintasan *droplet*. Tidak dilakukan pengujian prototipe fisik atau validasi lapangan.

2.1. Rancangan penelitian

Penelitian ini menggunakan metode perancangan (*design method*) dengan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk merancang dan mengevaluasi kinerja *multistage demister* pada sistem uap panas bumi. Tahapan penelitian diawali dengan penentuan masalah dan tujuan penelitian, dilanjutkan dengan studi literatur untuk memperoleh dasar teori dan referensi yang berkaitan dengan pemisahan droplet. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data yang meliputi tekanan, temperatur, laju alir fluida pada demister, kandungan padatan pada sumur, serta spesifikasi demister *existing* dan rancangan sebagai dasar dalam proses pemodelan *multistage demister*. Berdasarkan model yang telah dibuat, dilakukan perhitungan parameter desain yang meliputi diameter *vessel*, penurunan tekanan, efisiensi pemisahan droplet, dan *dryness fraction* rancangan. Tahap berikutnya adalah simulasi CFD yang mencakup pembuatan dan penyederhanaan geometri, proses *meshing*, penentuan model fisika dan turbulensi, penentuan *boundary conditions*, penentuan sifat material, serta proses *running simulation*. Hasil simulasi kemudian dievaluasi berdasarkan kriteria desain, yaitu *dryness fraction* > 95,5%, efisiensi pemisahan > 95%, dan penurunan tekanan < 14 kPa. Apabila hasil simulasi belum memenuhi kriteria tersebut, maka dilakukan perbaikan rancangan dan simulasi diulang hingga diperoleh desain yang memenuhi seluruh parameter, sehingga dapat ditetapkan sebagai rancangan akhir *multistage demister*. Diagram alir tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5: Alur perancangan dan evaluasi numerik

2.2. Data penelitian

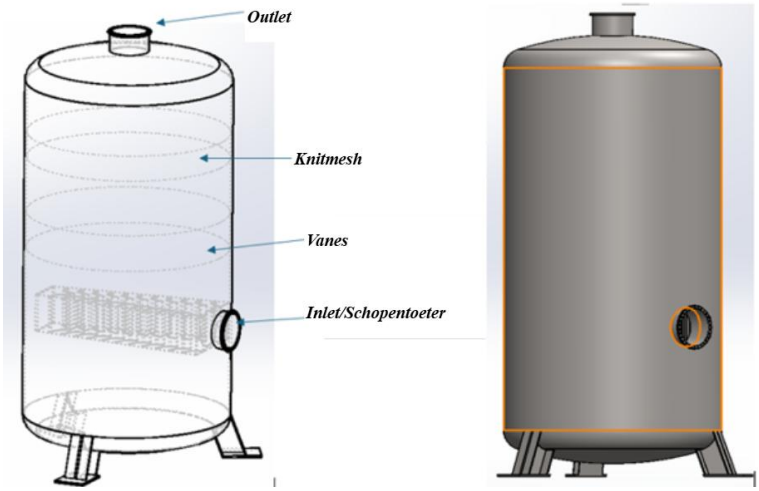
Penelitian ini menggunakan data operasi sistem uap PLTP PT Geo Dipa Energi Unit Patuha sebagai dasar dalam proses perancangan *multistage demister*. Data yang digunakan meliputi tekanan, temperatur, dan laju alir massa uap pada kondisi operasi. Parameter tersebut digunakan sebagai masukan dalam perhitungan dimensi *vessel*, pemodelan geometri, dan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Data operasi yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1: Data Operasi Sistem Uap

Parameter	Satuan	Nilai
Tekanan *inlet*	barg	8,112
Tekanan *outlet*	barg	8,021
Temperatur *inlet*	°C	173,089
Temperatur *outlet*	°C	172,661
Laju alir massa	kg/s	116,353

2.3. Desain demister tiga tahap

Demister yang dirancang menempatkan *Schoepentoeter*, *vane Z-profile*, dan *knit mesh* dalam satu bejana vertikal. Tahap awal bertujuan memperbaiki distribusi aliran dan menangkap *droplet* yang lebih besar. Tahap menengah menggunakan perubahan arah aliran untuk menangkap *droplet* berinersia lebih tinggi, sedangkan tahap akhir dirancang untuk *droplet* halus. Konfigurasi fisik keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 6; evaluasi numerik dalam studi ini tetap dilakukan pada beberapa domain komponen secara terpisah.



Gambar 6: Geometri rancangan bejana dan komponen demister tiga tahap

2.4. Persamaan perancangan

Perancangan *multistage demister* dilakukan berdasarkan beberapa persamaan dasar yang digunakan untuk menentukan kualitas uap, dimensi separator, karakteristik aliran, penurunan tekanan, dan efisiensi pemisahan droplet. *Dryness fraction* dihitung menggunakan hubungan termodinamika uap jenuh seperti pada Persamaan 1.

$$x = \frac{h - h_f}{h_{fg}} \tag{1}$$

dengan x adalah dryness fraction (-), h adalah entalpi campuran uap (kJ/kg), h_f adalah entalpi cair jenuh (kJ/kg), dan h_{fg} adalah entalpi penguapan (kJ/kg).

Kecepatan maksimum uap yang diizinkan melewati separator dihitung menggunakan persamaan Souders–Brown (Persamaan 2).

$$V_{max} = K\sqrt{\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}} \tag{2}$$

dengan V_{max} adalah kecepatan maksimum uap (m/s), K adalah konstanta Souders–Brown (m/s), ρ_L adalah densitas cairan (kg/m³), dan ρ_G adalah densitas uap (kg/m³).

Luas penampang minimum separator dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$A = \frac{Q}{V_{max}} \tag{3}$$

dengan A adalah luas penampang separator (m²), Q adalah laju alir volumetrik uap (m³/s), dan V_{max} adalah kecepatan maksimum uap (m/s).

Laju alir volumetrik uap dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho_G} \tag{4}$$

dengan Q adalah laju alir volumetrik uap (m³/s), $\dot{m}$ adalah laju alir massa uap (kg/s), dan ρ_G adalah densitas uap (kg/m³).

Diameter vessel dihitung berdasarkan luas penampang minimum separator yang ditunjukkan pada Persamaan 5.

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{5}$$

dengan D adalah diameter vessel (m) dan A adalah luas penampang separator (m²).

Kecepatan aliran pada sisi inlet dan outlet dihitung menggunakan hubungan antara laju alir volumetrik dan luas penampang yang dapat diperoleh menggunakan Persamaan 6 dan 7.

$$V_{inlet} = \frac{Q}{A_{inlet}} \tag{6}$$

$$V_{outlet} = \frac{Q}{A_{outlet}} \tag{7}$$

dengan V_{inlet} dan V_{outlet} adalah kecepatan aliran pada inlet dan outlet (m/s), Q adalah laju alir volumetrik uap (m³/s), sedangkan A_{inlet} dan A_{outlet} adalah luas penampang inlet dan outlet (m²).

Penurunan tekanan total pada sistem multistage demister dihitung sebagai penjumlahan kehilangan tekanan pada setiap komponen, yang ditunjukkan pada Persamaan 8.

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{inlet} + \Delta P_{vane} + \Delta P_{knitmesh} + \Delta P_{outlet} \quad (8)$$

dengan ΔP_{total} adalah penurunan tekanan total (Pa), sedangkan ΔP_{inlet}, ΔP_{vane}, $\Delta P_{knitmesh}$, dan ΔP_{outlet} berturut-turut merupakan penurunan tekanan pada inlet, vane separator, knit mesh demister, dan outlet (Pa).

Penurunan tekanan pada masing-masing komponen dihitung menggunakan Persamaan 9-12.

$$\Delta P_{inlet} = \frac{1}{2}\rho_G (V_{inlet} - V_{max})^2 \quad (9)$$

$$\Delta P_{vane} = K_v \frac{1}{2}\rho_G V_{max}^2 \quad (10)$$

$$\Delta P_{knitmesh} = K_k \frac{1}{2}\rho_G V_{max}^2 \quad (11)$$

$$\Delta P_{outlet} = \left(1 - \frac{D_{outlet}}{D_{vessel}}\right)^2 \frac{\rho_G V_{outlet}^2}{2} \quad (12)$$

dengan K_v adalah koefisien kehilangan tekanan pada *vane separator* (-), K_k adalah koefisien kehilangan tekanan pada *knit mesh demister* (-), D_{outlet} adalah diameter *outlet* (m), dan D_{vessel} adalah diameter *vessel* (m).

Efisiensi pemisahan droplet diperoleh dari hasil simulasi *Discrete Phase Model* (DPM) pada *ANSYS Fluent* menggunakan rasio jumlah partikel yang tertangkap (*trapped*) terhadap jumlah total partikel yang dilacak (*tracked*) seperti pada Persamaan 13.

$$\eta = \frac{N_{trapped}}{N_{tracked}} \times 100\ \% \quad (13)$$

dengan η adalah efisiensi pemisahan (%), $N_{trapped}$ adalah jumlah partikel yang tertangkap (*trapped*), dan $N_{tracked}$ adalah jumlah total partikel yang berhasil dilacak (*tracked*) selama simulasi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Desain demister tiga tahap

Perancangan multistage demister dilakukan berdasarkan data operasi sistem uap PLTP yang meliputi tekanan, temperatur, laju alir massa, serta karakteristik uap pada kondisi operasi. Tujuan perancangan adalah menghasilkan sistem pemisahan yang mampu meningkatkan kualitas uap dengan menurunkan kandungan *moisture* dan kontaminan sebelum uap memasuki turbin. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh dimensi *vessel* dengan diameter 5,4 m dan tinggi 11 m (Tabel 2).

Tabel 2: Hasil Perancangan *Multistage Demister*

Parameter	Nilai
Diameter *vessel*	5,4 m
Tinggi *vessel*	11 m
Material *vessel*	SS316L
Tahap 1	*Schoepentoeter*
Tahap 2	*Vane Z-profile*
Tahap 3	*Knit Mesh* SS316L
Diameter *inlet*	1 m
Fluida kerja	Uap panas bumi

Dimensi tersebut ditentukan agar kecepatan aliran di dalam *vessel* memenuhi kriteria desain sehingga proses pemisahan droplet dapat berlangsung secara efektif dengan penurunan tekanan yang tetap rendah. Peningkatan diameter *vessel* menyebabkan penurunan kecepatan uap sehingga risiko *re-entrainment* menurun dan distribusi aliran menjadi lebih seragam. Tinggi vessel ditentukan berdasarkan kebutuhan ruang pemasangan *Schoepentoeter, vane separator, knit mesh, clearance* antar komponen, dan *disengagement space* sesuai rekomendasi *Shell DEP (Design and Engineering Practice*) sehingga distribusi aliran tetap seragam dan *re-entrainment* dapat diminimalkan.

Rancangan *multistage demister* terdiri atas tiga tahapan pemisahan, yaitu *Schoepentoeter, Vane Z-profile*, dan *Knit Mesh SS316L.* Schoepentoeter ditempatkan pada bagian *inlet vessel* sebagai tahap awal untuk mendistribusikan aliran uap secara merata sekaligus memisahkan droplet berukuran besar melalui mekanisme gaya sentrifugal. Selanjutnya, uap dialirkan menuju *Vane Z-profile* untuk memisahkan droplet berukuran menengah melalui perubahan arah aliran yang menyebabkan droplet bertumbukan dengan permukaan *vane*. Tahap terakhir menggunakan *Knit Mesh SS316L* yang berfungsi menangkap droplet berukuran mikro melalui mekanisme intersepsi, tumbukan, dan koalesensi sehingga kandungan *moisture* pada uap dapat dikurangi sebelum keluar menuju turbin. *Stainless Steel 316L* (SS316L) dipilih sebagai material penyusun *vessel, Schoepentoeter separator, vane separator*, dan *knit mesh demister* karena memiliki ketahanan korosi dan sifat mekanik yang sesuai untuk lingkungan operasi panas bumi. Kandungan kromium, nikel, dan molibdenum pada SS316L membentuk lapisan pasif yang meningkatkan ketahanan terhadap korosi umum, korosi sumuran, dan korosi celah, sedangkan kadar karbon yang rendah membantu mempertahankan integritas material pada kondisi operasi bertemperatur dan bertekanan tinggi. Dengan karakteristik tersebut, SS316L dinilai mampu memberikan keandalan dan umur pakai yang baik pada aplikasi *multistage demister* di PLTP.

Konfigurasi ketiga media pemisah tersebut dirancang secara bertingkat agar setiap komponen bekerja pada rentang ukuran droplet yang berbeda. Penyusunan secara berurutan memungkinkan beban pemisahan pada setiap tahap menjadi lebih kecil sehingga efisiensi pemisahan meningkat dibandingkan penggunaan satu jenis media pemisah saja. Model tiga dimensi hasil perancangan *multistage demister* ditunjukkan pada Gambar 6, sedangkan spesifikasi utama rancangan disajikan pada Tabel 2.

3.2. Simulasi CFD

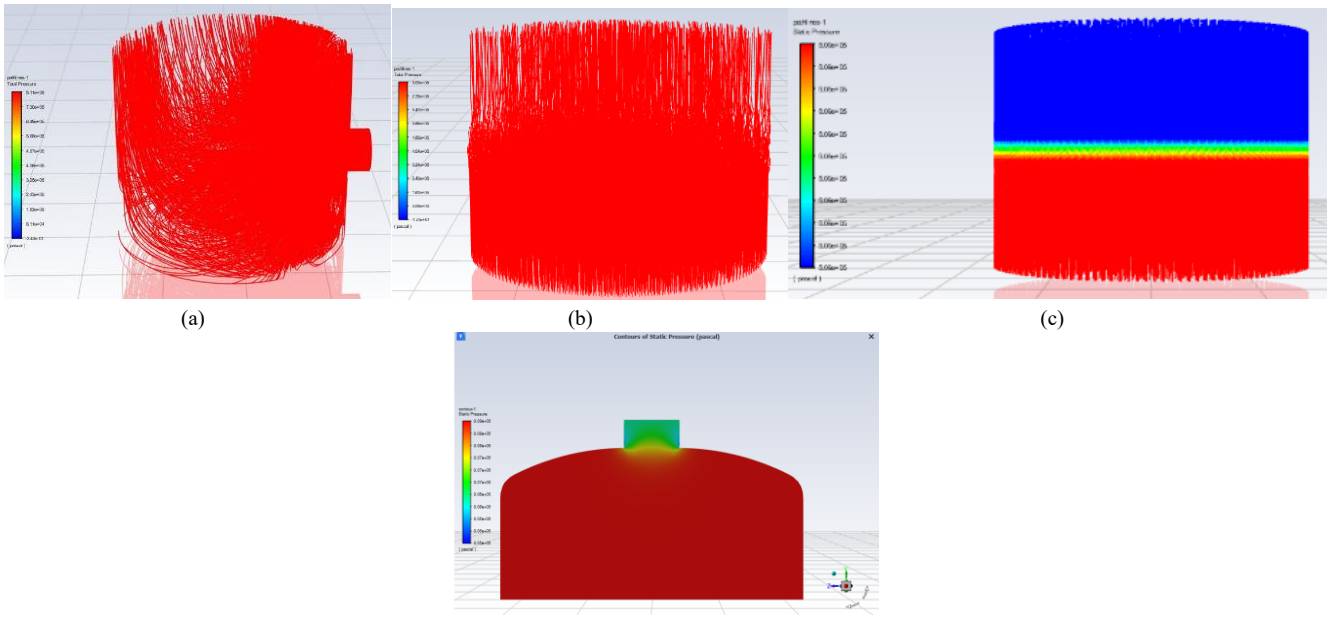
Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan secara terpisah pada setiap komponen *multistage demister*, yaitu *Schoepentoeter, Vane Z-profile, Knit Mesh*, dan *nosel outlet*. Pendekatan ini dipilih karena setiap komponen memiliki fungsi, karakteristik geometri, serta mekanisme aliran yang berbeda sehingga memerlukan evaluasi secara individual. Dengan memisahkan domain simulasi, distribusi kecepatan, penurunan tekanan (*pressure drop*), dan mekanisme interaksi aliran pada masing-masing komponen dapat dianalisis secara lebih rinci tanpa dipengaruhi oleh kompleksitas geometri komponen lainnya.

Pemisahan domain simulasi bertujuan untuk mengurangi kompleksitas komputasi akibat ukuran geometri yang besar dan perbedaan skala antar komponen. Pemodelan seluruh komponen dalam satu domain simulasi memerlukan jumlah elemen *mesh* yang sangat besar sehingga meningkatkan waktu komputasi dan kebutuhan memori secara signifikan. Oleh karena itu, simulasi dilakukan secara bertahap dengan menerapkan kondisi batas (*boundary condition*) yang merepresentasikan kondisi operasi pada setiap komponen. Hasil simulasi masing-masing komponen kemudian digunakan untuk mengevaluasi kinerja keseluruhan *multistage demister*, termasuk distribusi aliran, efisiensi pemisahan droplet, dan penurunan tekanan total.

Simulasi CFD dilakukan menggunakan model turbulensi *Renormalization Group (RNG) k-ε*. Model ini dipilih karena mampu memprediksi karakteristik aliran turbulen dengan tingkat akurasi yang baik pada aliran yang mengalami perubahan arah, percepatan, perlambatan, dan pembentukan pusaran (*recirculation*), sebagaimana terjadi pada aliran uap di dalam *multistage demister*. Selain itu, model RNG *k-ε* memiliki koreksi terhadap efek regangan (*strain rate*) dan mampu memberikan prediksi yang lebih baik dibandingkan model *Standard k-ε* pada aliran dengan geometri yang kompleks, sehingga sesuai untuk menganalisis distribusi aliran dan penurunan tekanan pada komponen *Schoepentoeter, Vane Z-profile, Knit Mesh*, dan *nosel outlet*.

Geometri pada setiap domain didiskritisasi menggunakan *unstructured tetrahedral mesh* untuk menyesuaikan bentuk geometri yang kompleks pada masing-masing komponen *multistage demister*. Jumlah elemen mesh yang digunakan pada domain *Schoepentoeter* sebanyak 4.791.576 *cells*, *Vane Z-profile* sebanyak 866.523 *cells*, *Knit Mesh* sebanyak 160.031 *cells*, dan nosel *outlet* sebanyak 94.486 *cells*. Perbedaan jumlah elemen *mesh* pada setiap domain disebabkan oleh perbedaan kompleksitas geometri, ukuran domain, serta tingkat detail yang diperlukan untuk merepresentasikan karakteristik aliran pada masing-masing komponen. Domain *Schoepentoeter* menggunakan jumlah elemen terbesar karena memiliki geometri paling kompleks dengan perubahan arah aliran yang signifikan, sedangkan domain *outlet* menggunakan jumlah elemen paling sedikit karena memiliki geometri yang lebih sederhana.

Distribusi tekanan hasil simulasi CFD ditunjukkan pada Gambar 7. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tekanan mengalami penurunan secara bertahap mulai dari *Schoepentoeter, Vane Z-profile, Knit Mesh*, hingga *outlet*. Penurunan tekanan tersebut terjadi akibat perubahan arah aliran, interaksi uap dengan media pemisah, serta kehilangan energi (*pressure loss*) selama proses pemisahan droplet. Kontur tekanan juga menunjukkan bahwa distribusi tekanan di dalam *vessel* berlangsung secara kontinu tanpa adanya penurunan tekanan yang ekstrem, sehingga aliran uap tetap stabil selama melewati setiap tahap pemisahan.



(a) (b) (c)

(d)

Gambar 7: Kontur tekanan pada domain terpisah: (a) *Schoepentoeter*, (b) *vane* Z-*profile*, (c) *knit mesh*, dan (d) nosel keluar.

Distribusi penurunan tekanan pada setiap komponen *multistage demister* diperoleh dari hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan disajikan pada Tabel 3. Nilai penurunan tekanan dihitung untuk mengevaluasi kehilangan tekanan yang terjadi pada setiap tahap pemisahan serta memastikan bahwa rancangan memenuhi batas penurunan tekanan yang telah ditetapkan.

Tabel 3: Penurunan Tekanan yang Dilaporkan Pada Masing-Masing Domain CFD

Komponen	Penurunan tekanan (Pa)
Schoepentoeter	2263
Vane separator	57
Knit mesh demister	356
Outlet	2406
Total	5082

Berdasarkan hasil per komponen, nosel keluar menunjukkan penurunan tekanan terbesar, diikuti Schoepentoeter, knit mesh, dan vane Z-profile. Perbedaan ini kemungkinan terkait dengan perubahan luas penampang dan hambatan bentuk. Nilai total yang diperoleh

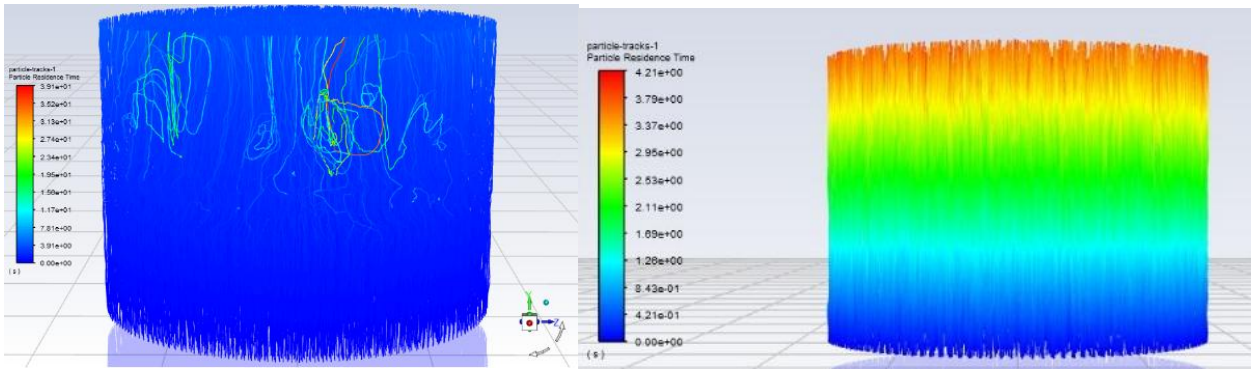
melalui penjumlahan komponen masih merupakan estimasi berbasis domain terpisah dan memerlukan verifikasi konsistensi tekanan antardomain. Pada nosel keluar, aliran bergerak dari bejana berpenampang besar menuju pipa yang lebih kecil. Percepatan aliran dan kerugian lokal pada daerah kontraksi dapat berkontribusi terhadap penurunan tekanan statis. Interpretasi rinci memerlukan pelaporan lokasi pengukuran tekanan dan pemisahan antara perubahan tekanan statis akibat percepatan dan kehilangan tekanan total.

Schoepentoeter menghasilkan penurunan tekanan yang relatif besar karena aliran dari nosel masuk diarahkan dan disebarkan ke dalam bejana. Perubahan momentum serta pembentukan pusaran di sekitar permukaan pengarah dapat meningkatkan kehilangan tekanan. Prediksi tersebut perlu dikaitkan dengan hasil kontur kecepatan dan definisi batas tekanan yang digunakan pada simulasi. Pada domain knit mesh, hambatan aliran terjadi akibat interaksi fluida dengan struktur media kawat rajut sehingga menghasilkan kehilangan tekanan. Hasil simulasi menunjukkan penurunan tekanan sebesar 356 Pa. Döß dkk. (2024) melakukan penelitian eksperimental mengenai pengaruh karakteristik geometris wire mesh dan kecepatan gas terhadap penurunan tekanan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa porositas, luas permukaan spesifik, dan karakteristik kawat merupakan parameter yang memengaruhi pressure drop pada media wire mesh. Peneliti tersebut juga mengembangkan korelasi empiris untuk memperkirakan penurunan tekanan dengan deviasi rata-rata sekitar ±20% terhadap data eksperimen dan literatur. Sejalan dengan penelitian tersebut, nilai penurunan tekanan pada knit mesh dalam penelitian ini menunjukkan pentingnya mempertimbangkan karakteristik media berpori dalam evaluasi kehilangan tekanan.

Domain vane Z-profile menghasilkan penurunan tekanan sebesar 57 Pa, paling rendah dibandingkan komponen lainnya pada kondisi pemodelan yang digunakan. Meskipun demikian, rendahnya penurunan tekanan tidak secara langsung menunjukkan tingginya efisiensi pemisahan droplet. Wang dkk. (2025) melalui penelitian terhadap zigzag vane plate droplet separator menunjukkan bahwa jarak antarbilah dan konfigurasi geometris berpengaruh terhadap efisiensi pemisahan serta karakteristik re-entrainment. Penelitian Yang dkk. (2024) juga menunjukkan bahwa pembentukan vortex melintang pada wave plate demister dapat meningkatkan efisiensi pemisahan droplet berukuran 10–20 μm sebesar 25,7–66,51%.

3.3. Simulasi DPM

Simulasi *Discrete Phase Model* (DPM) digunakan untuk memperkirakan lintasan dan penangkapan *droplet* berdiameter 5 μm. Evaluasi dilakukan pada domain *vane Z-profile* dan *knit mesh* dengan injeksi partikel masing-masing secara terpisah. Karena tidak ada transfer keluaran partikel antardomain, hasil yang diperoleh hanya menggambarkan efisiensi komponen pada kondisi simulasi terkait.



(a) (b)

Gambar 8: Lintasan *droplet* 5 μm pada domain (a) *vane* Z-*profile* dan (b) *knit mesh*

Tabel 4 merangkum jumlah *droplet* yang dilacak dan ditangkap dalam simulasi DPM. Pada domain vane, 599 dari 4.686 partikel tertangkap, sedangkan pada *knit mesh* 1.849 dari 1.861 partikel tertangkap. Hasil tersebut setara dengan efisiensi masing-masing sekitar 12,78 % dan 99,35 % untuk *droplet* 5 μm. Nilai 99,35 % tidak boleh ditafsirkan sebagai efisiensi pemisahan seluruh demister.

Tabel 4: Efisiensi Penangkapan Droplet 5 μm Pada Simulasi DPM Setiap Komponen

Komponen	*Tracked*	*Trapped*	Efisiensi (%)
Vane	4686	599	12,78
Knit Mesh	1861	1849	99,35

Simulasi Discrete Phase Model (DPM) pada Vane Z-profile dan Knit Mesh dilakukan secara terpisah karena masing-masing komponen dimodelkan sebagai domain CFD yang berbeda. Pada penelitian ini, partikel yang keluar (escaped) dari simulasi Vane Z-profile tidak digunakan secara langsung sebagai kondisi masuk (inlet) pada simulasi Knit Mesh. Setiap domain memiliki geometri, kondisi batas (boundary condition), serta proses injeksi partikel (particle injection) yang didefinisikan secara independen di simulasi CFD, sehingga proses pelacakan partikel pada setiap domain dilakukan secara terpisah. Oleh karena itu, jumlah partikel tracked pada simulasi Knit Mesh tidak merupakan kelanjutan dari jumlah partikel yang lolos dari Vane Z-profile. Pada simulasi Vane Z-profile, sebanyak 4.686 partikel dilacak dan 599 partikel berhasil ditangkap sehingga diperoleh efisiensi pemisahan sebesar 12,78%. Selanjutnya, pada simulasi Knit Mesh dilakukan proses pelacakan ulang terhadap partikel yang diinjeksi pada domain tersebut, sehingga jumlah partikel tracked menjadi 1.861 partikel dengan 1.849 partikel berhasil ditangkap dan menghasilkan efisiensi pemisahan sebesar 99,35%. Dengan demikian, efisiensi pemisahan pada masing-masing komponen dihitung berdasarkan perbandingan antara jumlah partikel trapped dan tracked pada domain simulasi yang sama. Meskipun jumlah partikel tracked pada kedua komponen berbeda, hasil simulasi menunjukkan bahwa Vane Z-profile berperan sebagai tahap pemisahan awal, sedangkan Knit Mesh memiliki kemampuan pemisahan yang lebih tinggi dalam menangkap droplet halus, sehingga kombinasi kedua komponen tersebut mampu meningkatkan kualitas uap sebelum memasuki turbin.

Nilai efisiensi sebesar 99,35% merupakan efisiensi pemisahan pada komponen Knit Mesh dan bukan merupakan efisiensi pemisahan keseluruhan sistem multistage demister. Nilai tersebut menunjukkan kemampuan Knit Mesh sebagai media pemisahan tahap akhir dalam menangkap droplet halus berukuran 5 μm yang masih terbawa aliran uap. Sementara itu, kinerja keseluruhan multistage demister dievaluasi berdasarkan peningkatan dryness fraction, penurunan moisture carryover, serta penurunan tekanan total (pressure drop). Hasil evaluasi tersebut menunjukkan bahwa kombinasi Schoepentoeter, Vane Z-profile, dan Knit Mesh mampu meningkatkan kualitas uap sebelum memasuki turbin dengan tetap mempertahankan penurunan tekanan dalam batas desain yang diizinkan

Efisiensi pemisahan droplet yang diperoleh dari simulasi DPM selanjutnya digunakan untuk mengestimasi penurunan kandungan impuritas yang masih terbawa bersama aliran uap. Estimasi dilakukan terhadap kandungan SiO_2 dan SO_4^{2-} karena kedua senyawa tersebut merupakan komponen dominan penyusun deposit pada turbin. Hasil estimasi kandungan impuritas setelah melewati setiap tahap pemisahan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5: Estimasi Ilustratif Kadar Pengotor Berdasarkan Efisiensi Tiap Komponen

Komponen	Efisiensi (%)	SiO_2 *Inlet* (ppm)	SiO_2 *Outlet* (ppm)	SO_4^{2-} *Inlet* (ppm)	SO_4^{2-} *Outlet* (ppm)
Vane separator	12,78	1,22	1,064	2,04	1,779
Knit mesh demister	99,35	1,22	0,0079	2,04	0,0132

Kandungan SiO_2 menurun dari 1,22 ppm menjadi 0,0079 ppm, sedangkan kandungan SO_4^{2-} menurun dari 2,04 ppm menjadi 0,0132 ppm setelah melewati seluruh tahapan multistage demister. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa tingginya efisiensi pemisahan droplet berkontribusi langsung terhadap berkurangnya kontaminan yang terbawa bersama uap. Dengan berkurangnya kandungan impuritas, potensi terjadinya pembentukan deposit (*scaling*), erosi, dan korosi pada komponen turbin dapat diminimalkan sehingga kualitas uap yang memasuki turbin menjadi lebih baik.

3.4. Evaluasi kinerja rancangan

Data kinerja pada kondisi *existing* diperoleh dari data operasi PLTP yang meliputi tekanan, temperatur, laju alir massa, dan nilai *dryness fraction* uap sebelum dilakukan modifikasi sistem pemisahan. Nilai *moisture fraction* dan *moisture carryover* pada kondisi *existing* tidak diperoleh melalui simulasi, melainkan dihitung berdasarkan nilai *dryness fraction* dan laju alir massa menggunakan persamaan termodinamika uap serta neraca massa. Sementara itu, data kinerja pada kondisi rancangan diperoleh dari hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dipadukan dengan perhitungan teoritis untuk mengevaluasi pengaruh penerapan *multistage demister* terhadap peningkatan kualitas uap. Oleh karena itu, perbandingan pada Tabel 6 dilakukan antara kondisi operasi aktual PLTP (*existing*) dan kondisi rancangan *multistage demister* yang disimulasikan pada parameter operasi yang sama sehingga perubahan kinerja yang diperoleh hanya dipengaruhi oleh penerapan rancangan demister.

Tabel 6: Perbandingan Data Eksisting Dan Estimasi Rancangan

Parameter	Awal	Rancangan
Dryness Fraction (%)	99,53	99,62
Moisture Fraction (-)	0,00471	0,00381
Moisture Carryover (kg/s)	0,54578	0,44250
Moisture Carryover (kg/jam)	1964,81	1592,95
Efisiensi Pemisahan Droplet (%)	-	99,35
Penurunan tekanan *Total (kPa)*	-	5,08

Peningkatan *dryness fraction* dari 99,53% menjadi 99,62% menunjukkan bahwa *multistage demister* mampu meningkatkan kualitas uap dengan menurunkan kandungan *moisture* yang terbawa menuju turbin. Hal tersebut ditunjukkan oleh penurunan *moisture carryover* sebesar 0,1033 kg/s atau sekitar 371,86 kg/jam dibandingkan kondisi *eksisting*. Berkurangnya *moisture carryover* mengindikasikan bahwa jumlah droplet air yang memasuki turbin menjadi lebih sedikit sehingga potensi terbawanya mineral terlarut, seperti silika dan sulfat, juga menurun. Kondisi ini berpotensi mengurangi pembentukan *scaling*, erosi, dan korosi pada sudu turbin sehingga keandalan operasi pembangkit dapat meningkat.

Rancangan *multistage demister* menghasilkan efisiensi pemisahan droplet sebesar 99,35% dengan penurunan tekanan total sebesar 5,08 kPa, yang masih berada di bawah batas desain sebesar 14 kPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi *schoepentoeter, vane separator, dan knit mesh demister* mampu memisahkan droplet secara efektif tanpa memberikan hambatan aliran yang berlebihan. Dengan demikian, konfigurasi *multistage* yang diusulkan mampu meningkatkan kualitas uap sekaligus mempertahankan karakteristik aliran yang sesuai untuk operasi turbin.

Peningkatan kualitas uap akibat berkurangnya *moisture carryover* juga diperkirakan memberikan dampak positif terhadap performa termodinamika turbin. Semakin tinggi nilai *dryness fraction*, semakin kecil kandungan fase cair yang ikut mengalami ekspansi sehingga energi uap dapat dimanfaatkan secara lebih efektif untuk menghasilkan kerja turbin

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang *multistage demister* untuk PLTP PT Geo Dipa Energi Unit Patuha menggunakan konfigurasi *schoepentoeter separator, Z-profile vane separator*, dan *knit mesh demister* dengan dimensi *vessel* berdiameter 5,4 m dan tinggi 11 m berdasarkan persamaan Souders–Brown. Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa rancangan menghasilkan penurunan tekanan total sebesar 5,08 kPa, masih berada di bawah batas desain sebesar 14 kPa, serta mampu mencapai efisiensi pemisahan droplet sebesar 99,35%. Penerapan *multistage demister* meningkatkan *dryness fraction* uap dari 99,53% menjadi 99,62% dan menurunkan *moisture carryover* sebesar 371,86 kg/jam, sehingga kandungan droplet dan impuritas yang terbawa menuju turbin berkurang. Peningkatan kualitas uap tersebut menunjukkan bahwa rancangan multistage demister berpotensi mengurangi risiko *scaling*, erosi, dan korosi pada sudu turbin, serta mendukung peningkatan keandalan operasi PLTP PT Geo Dipa Energi Unit Patuha.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas dukungan akademik serta kepada PT Geo Dipa Energi Unit Patuha atas penyediaan data operasi yang digunakan sebagai dasar perancangan dan simulasi.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat memengaruhi pelaksanaan, analisis, atau pelaporan penelitian ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

KONTRIBUSI PENULIS

Juna Gumilar : Konseptualisasi, Penyediaan Sumber Daya, Investigasi, Kurasi Data, Analisis Formal, Visualisasi, Penulisan -Draf Awal.

Indriyani : Metodologi, Validasi, Supervisi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan.

Purwinda Iriani : Supervisi, Administrasi Proyek, Validasi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan.

Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan.

DAFTAR PUSTAKA

Adhikari, K., Mudunuru, M. K., & Nakshatrala, K. B. (2024). A review of geothermal energy systems and numerical modeling approaches. *Energy and Buildings, 344,* 1-21.

Dencio, M. S., S.W., L. M., Febrianto, H. A., Purdanto, A., Wardhana, F. D., Wicaksono, W. P. A., Hidayatullah, M. T., Khasmadin, M. F., Firdausi, M., Sarwono, E., & Yurisman, E. (2021). Evaluasi Pemanfaatan Energi Di PT. Geo Dipa Energi (Persero) Unit Patuha Tahun 2021.

Döß, A., Schubert, M., Bieberle, A., Johnson, J., Kryk, H., Flegiel, F., & Hampel, U. (2024). A Unified Approach for the Prediction of Dry Pressure Drop in Knitted-Wire Mesh Demisters. Chemie Ingenieur Technik, 96(10), 1335–1345.

El-dessouky, H. T., Alatiqi, I. M., & Ettouney, H. M. (2000). Performance of wire mesh mist eliminator. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 39(2), 129–139.

Fadaei, M., Ameri, M. J., Rafiei, Y., Hosnani, M., & Ghasemi, M. (2025). A Novel Approach to Designing Wire Mesh Demisters for Surface Separators: Experimental, CFD, and Artificial Intelligence Perspectives. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, 37(1), 52–80.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Renewable Capacity Statistics 2023. International Renewable Energy Agency. Diakses September, 2026, dari https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023

Longval, R., Meirbekova, R., Fisher, J., & Maignot, A. (2024). An Overview of Silica Scaling Reduction Technologies in the Geothermal Market. *Energies, 17*(19), 1-29.

Noh, J. H., Cho, M. C., & Lee, S. J. (2024). Performance Improvement of Wave Plate Mist Eliminator through Geometry Modification. Aerosol and Air Quality Research, 24, 230067.

Sulzer. (2025). Gas / Liquid Separation Technology Sulzer Chemtech – Separation Technology.

Taherkhani, B., Pourkamali Anaraki, A., & Kangarani Farahani, N. (2025). Surface Roughness Effect on Turbine Blade Erosion Due to Micro-Sized Particle Impact. *Journal of Failure Analysis and Prevention, 25*(1), 370–377.

Wang, P., Wan, L., Tu, J., Zhang, X., Luo, X., Tang, Z., & Zhao, W. (2025). Separation Performance Investigation on the Influence of Typical Structural Parameters of Zigzag Vane Plate Droplet Separator. Chemical Engineering Science, 310, 121565.

Wines, T. H. (2022). Contamination Control in the Natural Gas Industry Saeid Mokhatab. Elsevier Science & Technology.

Yang, L., Cui, Y., Wang, Z., Sun, P., Cui, W., & Wang, C. (2024). Effect of Transverse Vortex on Performance of Wave Plate Demister. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 19(1), e2978.

Yang, X., Zhu, C., Zhou, Q., Chen, J., & Mou, J. (2023). Study on Performance and Operation Mechanism of a Separation Equipment for a PWR Steam Generator, *Atmosphere, 14*(3), 1-15.

Yuliyani, I., Salsabila, S. F., & Maridjo. (2024). Pengaruh Deposisi dan Erosi Pada Sudu-Sudu Terhadap Kinerja Turbin PLT Panas Bumi Patuha. *Jurnal Teknik Energi, 13*(1), 16-23.