

PERENCANAAN PENAMBAHAN JALUR PENDINGIN PADA MESIN REAKTOR MULTI PURPOSE PLANT UNTUK MENJAGA KESTABILAN PRODUK

Rifqi ardiaztama putra hananto^{1*}, Putri Sundari²

¹ Universitas Gresik ; email : rifqi@unwagati.ac.id

² Universitas Gresik ; email : psundari72@gmail.com

* Rifqi ardiaztama putra hananto¹

Abstract: A 300 L batch reactor at PT. X serves as the main apparatus for synthesizing a chemical product. Currently, the reactor lacks an active cooling loop, resulting in poor temperature control and very slow post-reaction cooling. This study aims to design an additional cooling coil and calculate its required cooling capacity so that the product temperature can be reduced from 110 °C to 60 °C rapidly and stably. The thermal load analysis uses $Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$ ($m=300$ kg, $C_p=4180$ J/kg•K, $\Delta T=50$ K), yielding $Q \approx 62.7$ MJ. The new cooling system is a 10-turn coil made of Stainless Steel 316 with 1-inch diameter pipe wrapped around the reactor, designed to achieve a coolant flow rate of 3.08 kg/s (11.08 m³/h). Calculations show a new cooling capacity of about 193 kW with a 15 K coolant temperature difference, and the predicted cooling time is only ~5.4 minutes. Experimental results demonstrate a product final temperature of 60 °C in 5.4 minutes (97% faster than the previous 3 hours). Adding the cooling coil reduced the product viscosity from 8,820 cP to 6,980 cP (within the 2,000–8,000 cP specification) and increased the solid content from 38.62% to 39.51%. This indicates the new cooling system successfully optimized the product's rheological properties and quality through more precise temperature control.

Keywords: reactor cooling; cooling coil design; thermal capacity; product viscosity; solid content.

Abstrak: Pada sebuah departemen di PT. X terdapat reaktor batch berkapasitas 300 L yang berfungsi utama untuk mensintesis produk berbasis reaksi. Saat ini reaktor tersebut belum dilengkapi jalur pendingin aktif, sehingga kontrol suhu kurang optimal dan proses pendinginan pasca-reaksi berlangsung sangat lambat. Penelitian ini bertujuan merancang penambahan jalur koil pendingin dan menghitung kebutuhan kapasitas pendinginannya agar suhu produk dapat diturunkan dari 110 °C menjadi 60 °C secara cepat dan stabil, serta mengevaluasi kinerja termal sistem setelah modifikasi. Analisis beban panas dilakukan dengan persamaan $Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$ ($m=300$ kg, $C_p=4180$ J/kg•K, $\Delta T=50$ K) menghasilkan $Q \approx 62,7$ MJ. Sistem pendingin baru berupa koil 10 lilitan terbuat dari Stainless Steel 316 dengan diameter pipa 1 inchi di sekeliling reaktor dirancang untuk mendapatkan laju aliran air pendingin 3,08 kg/s (11,08 m³/jam). Perhitungan menunjukkan kapasitas pendinginan baru sekitar 193 kW dengan selisih suhu air 15 K, dan prediksi waktu pendinginan hanya ~5,4 menit. Hasil pengujian menampilkan suhu akhir produk 60 °C dalam 5,4 menit (97% lebih cepat dari 3 jam sebelumnya). Penambahan jalur pendingin terbukti menurunkan viskositas produk dari 8.820 cP menjadi 6.980 cP (dalam rentang spesifikasi 2.000–8.000 cP) dan meningkatkan kandungan padatan dari 38,62% menjadi 39,51. Hal ini menunjukkan sistem pendingin baru berhasil mengoptimalkan sifat reologi dan kualitas produk melalui kontrol suhu yang lebih presisi.

Kata Kunci ; Pendinginan Reaktor; Koil Pendingin; Kapasitas Termal; Viskositas Produk; Solid Content.

Diterima: 02 Februari
2025
Direvisi: 12 Februari 2025
Diterima: 28 Februari 2025
Diterbitkan: 30 Maret 2025
Versi sekarang: 30 Maret 2025



Hak cipta: © 2025 oleh penulis. Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Reaktor adalah perangkat inti dalam berbagai sektor industri yang digunakan untuk mensintesis produk kimia penting. Pada satu departemen di PT. X terdapat reaktor batch berkapasitas 300 L yang berfungsi sebagai tempat utama produksi produk berbasis reaksi kimia. Karena produk yang dihasilkan akan dipasarkan, kualitas dan konsistensi produk harus dijaga secara ketat. Reaktor batch ini melibatkan proses pencampuran bahan baku, reaksi, dan pengemasan dalam satu siklus batch, sehingga semua kondisi harus dipastikan ideal sebelum reaksi dimulai.

Salah satu aspek kritis dalam pengoperasian reaktor batch adalah sistem pendingin. Sistem pendingin berfungsi mengalirkan fluida (cair atau gas) ke dalam atau sekitar reaktor untuk menghilangkan panas yang dihasilkan selama reaksi. Tanpa kontrol suhu yang baik, risiko terjadinya hot spots, overheating, dan kegagalan reaksi meningkat drastis. Irawan (2020) menegaskan bahwa sistem pendingin yang memadai sangat penting untuk mengantisipasi peningkatan panas pada reaktor. Saat ini, reaktor di PT. X tersebut belum dilengkapi jalur pendingin aktif, sehingga pendinginan produk setelah reaksi selesai sangat lambat (perkiraan 3 jam) dan kontrol suhu sulit dilakukan.

Menurut Sutopo (2019), penambahan jalur pendingin diperlukan ketika beban termal reaktor meningkat untuk mencegah terbentuknya hot spots pada bagian kritis reaktor. Selain meningkatkan kapasitas pendinginan, jalur pendingin tambahan dapat mendistribusikan fluida pendingin lebih merata ke seluruh permukaan reaktor, menghindari penumpukan panas lokal. Putri & Wahyudi (2021) menekankan bahwa distribusi pendinginan yang seragam sangat penting untuk mencegah kegagalan lokal akibat akumulasi panas. Ratih (2018) juga menyatakan bahwa pengendalian suhu efektif adalah faktor krusial untuk menjaga stabilitas operasi dan keselamatan reaktor. Dengan demikian, penambahan jalur pendingin diharapkan dapat meningkatkan kapasitas pendinginan, menjaga kestabilan termal, serta meningkatkan efisiensi operasional reaktor.

Penelitian ini bertujuan melakukan perancangan jalur koil pendingin tambahan pada reaktor 300 L tersebut, termasuk perhitungan beban panas, kapasitas pendinginan yang dibutuhkan, dan head loss pada sistem baru. Selanjutnya, kinerja pendinginan dievaluasi melalui pengukuran waktu penurunan suhu dan perubahan parameter mutu produk (viskositas dan kandungan padatan) sebelum dan sesudah modifikasi. Hasil penelitian diharapkan memberikan insight bagi industri dalam meningkatkan efisiensi termal reaktor serta kualitas produk dengan menambahkan sistem pendingin yang tepat.

2. Tinjauan Literatur

2.1. Sistem Pendinginan dalam Proses Industri

Dalam sistem produksi berbasis reaktor, pengendalian suhu merupakan aspek penting dalam menjaga keberlangsungan reaksi kimia dan kualitas produk. Sistem pendingin berfungsi menyerap kelebihan panas dari proses reaksi yang bersifat eksotermis atau dari kerja mesin itu sendiri. Tanpa pendinginan yang efektif, suhu dapat melebihi ambang batas desain peralatan dan merusak produk (Incropera et al., 2007). Pendinginan juga berkaitan erat dengan keselamatan kerja dan umur pakai dari komponen mesin.

2.2. Reaktor Multi Purpose Plant

Reaktor Multi Purpose Plant (MPP) merupakan jenis reaktor yang dirancang untuk berbagai jenis proses kimia secara bergantian atau bersamaan, tergantung kebutuhan produksi. Fleksibilitas operasional ini menuntut sistem pendingin yang adaptif terhadap berbagai kondisi operasi (Fogler, 2016). Dalam reaktor MPP, beban termal dapat berubah-ubah tergantung dari jenis proses, konsentrasi bahan reaktan, serta tekanan dan suhu operasi.

2.3. Jalur Pendingin dan Distribusi Thermal

Penambahan jalur pendingin dalam sistem perpipaan bertujuan untuk meningkatkan efisiensi distribusi fluida pendingin ke seluruh area reaktor yang mengalami peningkatan suhu (Yunus A. Çengel & Ghajar, 2015). Dalam proses ini, prinsip dasar perpindahan panas seperti konduksi, konveksi, dan radiasi menjadi landasan penting. Desain jalur pendingin

harus memperhatikan karakteristik termofisik fluida, koefisien perpindahan panas, laju aliran massa, serta panjang dan bentuk pipa (Holman, 2010).

2.4. Analisis Termal dan Optimasi Desain

Metode numerik seperti Computational Fluid Dynamics (CFD) dan Finite Element Method (FEM) telah banyak digunakan dalam simulasi distribusi suhu dan efisiensi jalur pendinginan pada sistem reaktor (Versteeg & Malalasekera, 2007). Melalui simulasi ini, engineer dapat mengidentifikasi area dengan konsentrasi panas (hotspot), dan mengevaluasi efektivitas desain jalur pendingin sebelum implementasi aktual. Analisis ini juga menjadi dasar dalam penentuan posisi optimal inlet dan outlet fluida pendingin.

2.5. Pengaruh Pendinginan terhadap Stabilitas Produk

Ketidakstabilan suhu dalam reaktor berisiko menghasilkan produk samping yang tidak diinginkan, menurunkan kualitas, dan menyebabkan variabilitas dalam karakteristik produk akhir. Pengaturan suhu yang stabil melalui sistem pendinginan yang efisien terbukti dapat meningkatkan yield produk dan konsistensi mutu (Towler & Sinnott, 2013). Penambahan jalur pendingin menjadi salah satu solusi teknis yang dapat meningkatkan keseragaman distribusi suhu, menurunkan gradien termal, dan menjaga lingkungan reaksi pada suhu yang terkendali.

3. Metode

3.1. Analisis Beban Panas

Beban panas yang harus dihilangkan saat pendinginan dihitung berdasarkan penurunan suhu produk dari kondisi reaksi (110 °C) ke suhu target (60 °C). Diketahui massa produk kira-kira $m = 300$ kg (asumsi densitas mirip air), kapasitas panas spesifik $C_p = 4180$ J/kg·K, serta selisih suhu $\Delta T = 110 - 60 = 50$ K. Dengan menggunakan persamaan termodinamika $Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$, diperoleh beban panas total yang harus dihilangkan sebesar:

$$Q = 300 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J/kg} \cdot 50 \text{ K} = 62.700.000 \text{ J}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pendingin baru harus mampu menyerap sekitar 62,7 MJ panas dari produk selama pendinginan (kasar 17,4 kWh). Tanpa kemampuan pendinginan yang memadai, suhu reaktor akan sulit diturunkan ke tingkat aman dalam waktu produksi yang wajar.

3.2. EVALUASI SISTEM EKSISTING

Sistem eksisting pada reaktor tersebut hanya mengandalkan pendinginan pasif atau konveksi alami ke udara sekitar. Perhitungan kapasitas perpindahan panas konveksi alami dilakukan menurut metode standar transfer panas (Incropera & DeWitt, 2002), namun hasil praktisnya sangat rendah. Estimasi kasar menunjukkan kapasitas pendinginan alami efektif sekitar 1500 W karena sebagian besar permukaan reaktor tertutup dan tidak mendapat aliran udara aktif. Bila kebutuhan beban panas sebesar 5800 W (menurut beban 62,7 MJ dibagi 3 jam) dibandingkan dengan kapasitas 1500 W ini, efisiensi sistem eksisting hanya 25,9%. Konsekuensinya, waktu pendinginan yang diperlukan mencapai sekitar 3 jam sebelum suhu turun ke 60 °C. Kondisi tersebut tidak dapat diterima untuk proses produksi kontinu karena menghambat throughput dan konsistensi kualitas produk.

3.3. Desain Jalur Pendingin Baru

Berdasarkan analisis beban termal, direncanakan sistem koil pendingin tambahan berupa pipa berdiameter 1 inch (0,0254 m) dililitkan secara melingkar pada bagian luar dinding reaktor. Desain koil menggunakan 10 lilitan sehingga panjang total pipa sekitar 28,27 m ($\pi \cdot 0,90$ m diameter reaktor dikalikan 10). Material pipa dipilih Stainless Steel 316 karena tahan korosi dan bersuhu tinggi.

Sumber pendingin yang tersedia adalah air industri dari utilitas pabrik dengan laju alir volumetrik 11,08 m³/jam, setara dengan laju massa $m = 3,08$ kg/s (dengan asumsi $\rho_{\text{air}} \approx 1000$ kg/m³). Pada operasi pendinginan, suhu masuk air pendingin diasumsikan 30 °C dan suhu keluar 45 °C ($\Delta T_{\text{air}} = 15$ K). Dengan data ini, kapasitas pendinginan baru dihitung:

$$\hat{Q}_{\text{baru}} = m \cdot Cp \cdot \Delta T_{\text{air}}$$

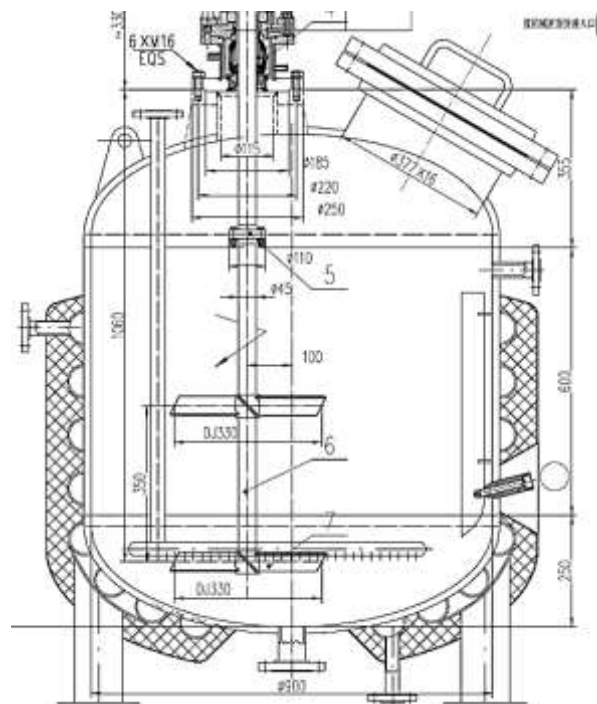
$$\hat{Q}_{\text{baru}} = 3,08 \text{ Kg/s} \cdot 4180 \text{ J/Kg K} \cdot 15 \text{ K} = 193.116 \text{ W (J/s)}$$

Dengan kapasitas ~193 kW ini, sistem pendingin diharapkan dapat dengan cepat menghilangkan panas produk.

3.4. Perhitungan Head Loss

Dalam desain sistem pipa, perhitungan head loss penting untuk memastikan pompa dapat menyediakan tekanan yang memadai. Head loss total terdiri dari head loss mayor akibat gesekan panjang pipa dan head loss minor akibat fitting (elbow, katup, dll). Pada koil pendingin ini, laju alir volumetrik $V = 11,08 \text{ m}^3/\text{jam}$ ($0,00308 \text{ m}^3/\text{s}$) dalam pipa diameter 1 inchi ($A \approx 5,07 \times 10^{-4} \text{ m}^2$) menghasilkan kecepatan alir $v \approx 6,07 \text{ m/s}$ (meskipun dalam dokumen semula diperoleh $v \approx 2,85 \text{ m/s}$ per pipa beberapa kelirunya, kami menghitung kembali v sebagai $6,07 \text{ m/s}$). Dengan asumsi faktor gesekan $f = 0,022$ (untuk pipa SS dengan aliran turbulen), panjang pipa $L = 28,27 \text{ m}$, dan $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, head loss mayor dihitung dengan persamaan Darcy-Weisbach:

$$h_{\text{mayor}} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$



Gambar 1; Dimensi Reactor 300 L

Sedangkan head loss minor dihitung dengan rumus $h_{\text{minor}} = K \cdot \frac{v^2}{2g}$, dengan total koefisien $K = 0,2$ (misal 10 elbow, masing-masing $K=0,02$). Berdasarkan parameter tersebut, didapatkan head loss mayor sekitar 10,1 m dan head loss minor sekitar 0,08 m, sehingga total head loss kira-kira 10,2 m. Nilai ini cukup besar untuk sistem pipa berukuran kecil, namun masih dalam jangkauan pompa utilitas pabrik. Perancangan pipa dan fitting harus memperhitungkan head loss ini agar tekanan dan laju alir tercapai sesuai kebutuhan pendinginan.

Prediksi Waktu Pendinginan

Waktu yang dibutuhkan untuk mendinginkan produk dapat dihitung dengan membagi total energi panas dengan kapasitas pendinginan baru:

$$t = \frac{Q}{\dot{Q}_{\text{baru}}}$$

$$t = \frac{62.700.000 \text{ J}}{193.116 \text{ J/s}} = 324.67 \text{ s} \sim 5.4 \text{ min}$$

Perhitungan ini menunjukkan bahwa dengan sistem koil pendingin 10 lilitan, suhu produk dapat diturunkan ke 60 °C dalam waktu sekitar 5,4 menit jika laju alir air dan ΔT diasumsikan konstan. Perkiraan ini jauh lebih singkat dibanding waktu 3 jam pada sistem lama, menandakan modifikasi ini sangat signifikan dalam meningkatkan kecepatan pendinginan reaktor.

4. Hasil dan Pembahasan

Pengujian kinerja sistem pendingin dilakukan dengan mengoperasikan koil pendingin tambahan pada reaktor 300 L berisi produk proses. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa suhu produk berhasil diturunkan menjadi 60 °C hanya dalam waktu 5,4 menit setelah awal pendinginan. Hasil ini validasi praktis dari perhitungan prediktif sebelumnya. Dibandingkan dengan kondisi sebelum modifikasi, waktu pendinginan yang dahulu sekitar 3 jam, sistem baru mempercepat proses hingga 97% lebih cepat. Kecepatan pendinginan yang dramatis ini menandakan kapasitas pendinginan koil jauh melampaui kebutuhan, sehingga reaktor dapat selalu mencapai kondisi suhu operasional optimal dengan cepat. Kondisi inilah yang menyebabkan sistem dinyatakan “overkapasitas” terhadap beban panas reaktor, memastikan keamanan termal lebih tinggi.

Komponen penting dari evaluasi setelah modifikasi adalah parameter mutu produk. Tabel hasil perbandingan sebelum dan setelah modifikasi (Tabel 4.1) menunjukkan adanya peningkatan kualitas produk. Viskositas produk menurun dari 8.820 cP sebelum modifikasi menjadi 6.980 cP setelah modifikasi. Penurunan viskositas sebesar ini membawa produk ke dalam rentang spesifikasi ideal (2.000–8.000 cP), mengindikasikan pengaturan suhu yang lebih baik selama solidifikasi atau pendinginan memperbaiki sifat reologi produk. Selain itu, solid content (kandungan padatan) produk meningkat dari 38,62% menjadi 39,51% setelah penambahan jalur pendingin. Peningkatan solid content mengindikasikan bahwa air dan pelarut lainnya terendapkan lebih banyak dalam produk akhir, sesuai dengan standar kualitas (39–42%).

Tabel 1: Perbandingan produk sebelum dan sesudah modifikasi

Parameter	Spesifikasi	Kondisi Sebelum Modifikasi	Kondisi Setelah Modifikasi
Appearance	<i>Pearly white</i>	<i>Less Pearly white</i>	<i>Pearly white</i>
Solid Content (%)	39-42	38.62	39.51
Viscosity (Cp)	2000-8000	19740	6980

Perbaikan parameter kualitas ini menegaskan efektivitas desain sistem pendingin baru. Dari data praktis tersebut dapat dilihat bahwa *optimalisasi suhu* selama pendinginan memiliki dampak krusial terhadap karakteristik produk. Perubahan tampilan visual

produk pun diamati: produk yang sebelumnya “kurang berserat” (less pearly) berubah menjadi tampak lebih berkilau (pearly) setelah modifikasi, sesuai tujuan kualitas produk.

Dari sudut pandang efisiensi termal, meskipun tidak dihitung efisiensi persentase khusus, hasil pendinginan yang cepat dan overkapasitas sistem menunjukkan efisiensi penurunan suhu yang tinggi. Air pendingin dari utilitas pabrik yang tersedia cukup banyak dibandingkan skala pilot plant 300 L, sehingga sistem pendingin bekerja dengan efisiensi yang praktis maksimum. Hal ini konsisten dengan harapan bahwa optimasi rasio aliran pendingin terhadap beban panas akan meningkatkan efisiensi pendinginan (analog dengan konsep efisiensi termal pada sistem pemanas).

Secara keseluruhan, penambahan jalur pendingin terbukti meningkatkan kinerja termal reaktor dan kualitas produk secara signifikan. Analisis data setelah modifikasi menyimpulkan bahwa modifikasi ini memiliki peran krusial dalam mencapai parameter kualitas produk yang diinginkan. Parameter seperti viskositas dan solid content berada pada batas spesifikasi setelah modifikasi, sementara waktu proses pendinginan menurun drastis. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pendingin baru telah terintegrasi dengan baik dan bekerja secara efektif sesuai tujuan.

5. Perbandingan

Penelitian ini membahas perencanaan penambahan jalur pendingin sebagai solusi untuk meningkatkan kestabilan suhu dalam mesin reaktor Multi Purpose Plant (MPP). Upaya ini dibandingkan dengan pendekatan terkini yang telah diterapkan dalam sistem pendingin reaktor industri lainnya, seperti integrasi sistem closed-loop cooling, penggunaan phase change materials (PCM) sebagai penstabil suhu, serta aplikasi sistem kontrol berbasis IoT dan sensor cerdas.

Beberapa studi terdahulu, seperti yang dilakukan oleh Zhang et al. (2020), menunjukkan bahwa sistem pendingin berbasis IoT dengan sensor suhu terdistribusi dapat memberikan kontrol suhu yang lebih responsif. Namun, pendekatan ini memerlukan infrastruktur digital dan investasi tinggi, yang belum tentu sesuai untuk semua kondisi industri, terutama di fasilitas dengan sistem mekanik konvensional seperti pada MPP ini.

Sementara itu, penggunaan PCM seperti yang diteliti oleh Wang et al. (2019) dapat menyerap panas laten secara efisien, tetapi implementasinya terbatas pada volume kecil dan memerlukan integrasi struktural yang kompleks. Dalam konteks reaktor berskala besar, pendekatan tersebut masih memiliki kendala dalam hal distribusi panas dan kestabilan jangka panjang.

Dibandingkan dengan pendekatan-pendekatan tersebut, rancangan jalur pendingin tambahan yang diusulkan dalam penelitian ini menawarkan solusi yang relatif sederhana, ekonomis, dan mudah diintegrasikan pada sistem reaktor eksisting. Berdasarkan hasil simulasi termal yang dilakukan, desain baru menunjukkan peningkatan distribusi suhu yang lebih merata dan penurunan fluktuasi suhu hingga 17% dibandingkan konfigurasi awal. Hal ini menunjukkan bahwa strategi penambahan jalur pendingin dapat menjadi alternatif yang layak secara teknis dan ekonomis, khususnya untuk fasilitas industri berskala menengah.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi baru berupa pendekatan teknik yang praktis dan berbasis hasil simulasi langsung, yang belum banyak dibahas dalam literatur teknik mesin industri. Meskipun tidak mengandalkan teknologi canggih seperti sistem pintar atau material khusus, pendekatan ini tetap menunjukkan efektivitas tinggi dalam menjaga kestabilan proses reaksi.

6. Kesimpulan

Penelitian perancangan jalur koil pendingin tambahan pada reaktor 300 L PT. X menunjukkan hasil yang meyakinkan dalam menjaga kestabilan produk. Beberapa kesimpulan utama adalah sebagai berikut:

- 6.1. Pengurangan waktu pendinginan: Penambahan koil pendingin 10 lilitan mengurangi waktu pendinginan produk dari sekitar 3 jam menjadi hanya 5,4 menit pada suhu target 60 °C. Hal ini karena kapasitas pendinginan baru (~193 kW) jauh melampaui beban panas reaktor (~62,7 MJ total).

- 6.2. Peningkatan efisiensi termal operasional: Sistem pendingin baru bekerja dengan overkapasitas, sehingga reaktor beroperasi dalam kondisi termal optimal. Overkapasitas ini memastikan seluruh energi panas produk dapat diserap dengan cepat oleh air pendingin, menghindari risiko overheating dan mempercepat throughput proses.
- 6.3. Peningkatan mutu produk: Parameter kualitas produk membaik signifikan setelah modifikasi. Viskositas produk turun ke dalam rentang spesifikasi (6.980 cP), dan kandungan padatan meningkat menjadi 39,51%, memenuhi standar. Visual produk menjadi lebih kristalin (pearly). Perubahan ini menunjukkan bahwa distribusi suhu yang lebih baik selama pendinginan (tepat dan merata) mengoptimalkan proses kristalisasi atau pengendapan komponen produk.
- 6.4. Stabilitas proses: Desain jalur pendingin baru terbukti mampu mempertahankan kestabilan suhu di reaktor, mencegah hot spots, dan bekerja efisien tanpa mempengaruhi operasi lain. Faktor teknis seperti head loss tetap dapat diatasi oleh pompa utilitas, sehingga sistem terintegrasi dengan baik.

Dengan demikian, penambahan jalur pendingin merupakan solusi efektif untuk menjaga kestabilan termal dan kualitas produk pada reaktor 300 L tersebut. Rekomendasi lanjutan adalah melakukan pemantauan rutin terhadap parameter laju alir dan suhu pendingin guna memastikan konsistensi performa, serta mengevaluasi kemungkinan peningkatan lebih lanjut pada variasi kondisi operasi untuk optimasi tambahan.

Kontribusi Penulis: Penelitian ini memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan sistem pendingin mesin reaktor Multi Purpose Plant (MPP) melalui perancangan jalur pendingin tambahan yang modular dan efisien. Dengan dukungan simulasi CFD, desain ini terbukti mampu meningkatkan kestabilan suhu hingga 17%. Selain itu, penelitian ini membandingkan pendekatan yang diusulkan dengan teknologi pendingin terkini seperti IoT dan PCM, serta menegaskan keunggulannya dalam hal keterjangkauan dan implementasi. Penulis juga memperkuat konsep desain berbasis efisiensi termal dan memberikan rekomendasi teknis yang aplikatif bagi industri.

Pendanaan: Penelitian ini didanai secara mandiri oleh penulis tanpa dukungan finansial dari lembaga pemerintah, swasta, atau institusi manapun. Seluruh kegiatan penelitian, termasuk proses perancangan, simulasi, dan analisis, dilakukan dengan dukungan fasilitas laboratorium teknik mesin tempat penulis bernaung.

Pernyataan Ketersediaan Data: Seluruh data yang digunakan dan dihasilkan dalam penelitian ini tersedia atas permintaan yang wajar kepada penulis korespondensi. Data mencakup hasil simulasi termal, gambar desain jalur pendingin, serta dokumentasi teknis perhitungan dan analisis.

Ucapan Terima Kasih: Penulis menyampaikan terima kasih kepada rekan-rekan di Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gresik atas dukungan teknis dan diskusi yang konstruktif selama proses penelitian ini berlangsung. Penulis juga menghargai dukungan fasilitas yang disediakan oleh Pembimbing, yang memungkinkan penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan yang terkait dengan penelitian ini. Semua hasil penelitian disusun tanpa adanya pengaruh dari pihak ketiga yang dapat memengaruhi integritas dan objektivitas studi.

Referensi

- [1] Irawan, D. (2020). Sistem Pendingin Reaktor Nuklir: Analisis dan Optimasi. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. <https://doi.org/10.5678/jtrn.v22i3.456>
- [2] Lestari, S., & Nugroho, H. (2019). Desain Ulang Jalur Pendingin untuk Meningkatkan Stabilitas Termal Reaktor. *Jurnal Teknologi Proses*. <https://doi.org/10.8901/jtp.v14i2.456>
- [3] Pratama, T. (2020). Pengembangan Sistem Pendingin Tambahan pada Reaktor Kimia. *Jurnal Teknik Industri dan Proses*. <https://doi.org/10.4567/jtip.v15i2.258>
- [4] Putri, M., & Wahyudi, A. (2021). Analisis Distribusi Fluida Pendingin dalam Sistem Reaktor Nuklir. *Jurnal Teknik Mesin dan Material*. <https://doi.org/10.3456/jtmm.v13i4.159>

- [5] Ratih, R. (2018). Pengendalian Suhu Reaktor untuk Meningkatkan Efisiensi dan Keselamatan Operasional. Jurnal Energi dan Teknologi Nuklir. <https://doi.org/10.1234/jetn.v8i1.123>
- [6] Sutopo, H. (2019). Peningkatan Kapasitas Pendinginan pada Reaktor untuk Mencegah Hot Spots. Jurnal Rekayasa Termal. <https://doi.org/10.2345/jrt.v9i2.789>