

PENERAPAN SELF-REFRIGERATED COLUMN SEBAGAI STRATEGI RETROFIT UNTUK PROPYLENE RECOVERY DALAM UPAYA PENGURANGAN ENERGI DAN EMISI DI KILANG PENGOLAHAN

Anton Santoso¹⁾

1) PT. Pertamina Rosneft Pengolahan dan Petrokimia, Indonesia
E-mail: anton_santoso@outlook.com

Abstrak

Pemisahan propana-propilena merupakan proses intensif energi yang umumnya membutuhkan sistem refrigerasi eksternal bersuhu sangat rendah. Studi ini mengevaluasi strategi retrofit dengan menerapkan self-refrigerated column, yaitu memanfaatkan propana atau propilena sebagai media refrigerasi internal. Simulasi proses dilakukan untuk mengoptimalkan konfigurasi dan parameter operasi terutama pada suhu rendah (tekanan operasi rendah). Perbedaan tekanan yang besar antara kondensor dan evaporator pada siklus refrigerasi propana menyebabkan kebutuhan daya kompresor tinggi, sehingga pendekatan dua siklus refrigerasi dipertimbangkan. Hasil menunjukkan bahwa konfigurasi ini mampu menggantikan kebutuhan utilitas eksternal dan menurunkan konsumsi energi. Alternatif penghematan melalui pengurangan jumlah kolom atau tray juga dikaji, namun dinilai kurang ekonomis untuk proyek revamping. Studi ini menunjukkan bahwa integrasi self-refrigerant dapat memperluas rentang operasi, memungkinkan pemisahan pada tekanan lebih rendah dengan suhu kondensasi lebih rendah yang sebelumnya tidak dipertimbangkan. Hal ini meningkatkan fleksibilitas desain dan mendukung efisiensi energi serta pengurangan emisi. Meskipun demikian, manfaat operasional harus dipertimbangkan terhadap peningkatan biaya investasi.

Kata kunci: Self-refrigerated Distillation, Propylene Recovery, Advance Distillation, Refrigerasi, Revamping.

Pendahuluan

Industri petrokimia merupakan salah satu sektor industri dengan konsumsi energi tertinggi, khususnya dalam proses pemisahan fraksi ringan seperti propana dan propilena. Pemisahan kedua komponen ini secara konvensional dilakukan melalui distilasi kriogenik pada tekanan dan suhu rendah, yang umumnya membutuhkan sistem refrigerasi eksternal berkapasitas tinggi. Kebutuhan akan pendinginan ekstrem tidak hanya mendorong peningkatan konsumsi energi dan biaya operasional, tetapi juga berkontribusi signifikan terhadap emisi karbon, yang bertentangan dengan prinsip efisiensi energi dan target dekarbonisasi industri.

Salah satu refrigeran yang umum digunakan dalam sistem pendingin industri adalah R-134a, yang terbatas pada suhu minimum sekitar -5 °C. Untuk mencapai suhu yang lebih rendah, sering digunakan refrigeran seperti R-410a. Meskipun efektif, refrigeran-refrigeran ini memiliki potensi pemanasan global (*Global Warming Potential/GWP*) yang tinggi, sehingga kurang sejalan dengan agenda keberlanjutan lingkungan. Alternatif yang lebih ramah lingkungan adalah memanfaatkan produk internal proses, yaitu propana (R-290) dan propilena (R-1270), sebagai refrigeran. Kedua senyawa ini memiliki sifat termofisika yang mendukung pemanfaatannya sebagai media pendingin dalam konsep *self-refrigerated distillation*.

Konsep *self-refrigerated assisted distillation* menawarkan pendekatan inovatif untuk mengurangi ketergantungan terhadap utilitas pendingin eksternal seperti *chilled water* atau sistem refrigerasi konvensional. Strategi ini memungkinkan integrasi termal dan peningkatan efisiensi energi tanpa memerlukan perubahan besar pada konfigurasi unit eksisting, sehingga sangat potensial untuk diterapkan sebagai solusi *retrofit*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa termal dan keekonomian dari penerapan sistem self-refrigerated pada unit pemisahan propana-propilena, melalui pendekatan simulasi proses. Evaluasi dilakukan terhadap berbagai konfigurasi refrigerasi dan strategi siklus tunggal maupun ganda. Fokus utama adalah untuk mengidentifikasi konfigurasi optimal yang mampu menurunkan konsumsi energi secara signifikan, meningkatkan fleksibilitas operasional (khususnya dalam fase *start-up*), serta mendukung transisi menuju proses industri yang lebih efisien dan rendah emisi.

Studi Pustaka

Pemisahan propana dan propilena merupakan proses yang sangat penting dalam industri petrokimia, terutama sebagai tahap kunci dalam produksi polipropilena. Kedua komponen ini memiliki titik didih yang sangat berdekatan (propana: -42 °C, propilena: -47.6 °C), sehingga pemisahannya melalui distilasi memerlukan kondisi operasi pada tekanan dan suhu rendah. Hal ini secara langsung meningkatkan kebutuhan energi, khususnya dari sistem pendingin atau refrigerasi yang intensif.

Sistem refrigerasi konvensional dalam industri umumnya mengandalkan media pendingin eksternal seperti refrigeran sintetis (misalnya R-134a dan R-410a). Meskipun banyak digunakan, sistem ini memiliki sejumlah kelemahan, antara lain: tingginya konsumsi energi, besarnya biaya investasi dan operasional, dampak lingkungan yang signifikan akibat tingginya nilai *Global Warming Potential* (GWP). Sebagai contoh, R-410a memiliki nilai GWP sekitar 2.088, sedangkan R-134a mencapai 1.430 (Daw, 2019). Hal ini menimbulkan kekhawatiran terhadap keberlanjutan sistem pendingin berbasis HFC dalam jangka panjang, terutama dengan meningkatnya regulasi global terhadap refrigeran dengan GWP tinggi.

Sejumlah studi menunjukkan bahwa hidrokarbon seperti propana (R-290) dan propilena (R-1270), yang juga merupakan produk dari proses distilasi itu sendiri, memiliki karakteristik termofisika yang cocok sebagai refrigeran (Kayes et al., 2024). Beberapa keunggulan utama meliputi: Nilai GWP yang sangat rendah (propana: 3, propilena: 2), kinerja termal yang baik, dengan *coefficient of performance* (COP) yang setara atau bahkan lebih tinggi dibanding refrigeran sintetik (Ibrahim et al., 2024). Potensi pengurangan konsumsi energi hingga 18% dibanding sistem refrigerasi berbasis HFC. Dengan karakteristik tersebut, penggunaan refrigeran internal berbasis hidrokarbon berpotensi menjadi solusi berkelanjutan untuk proses distilasi suhu rendah. Konsep *self-refrigerated distillation* (SRD) merupakan pendekatan inovatif yang memanfaatkan sebagian aliran internal proses (misalnya propilena cair) yang mengalami ekspansi (*flashing*) untuk menyediakan efek pendinginan secara langsung. Pendekatan ini secara teoritis dapat mengurangi atau bahkan menghilangkan kebutuhan refrigeran eksternal, menurunkan konsumsi energi, mengurangi kompleksitas sistem utilitas.

Penelitian awal oleh Matsuda et al. (2011) menunjukkan potensi efisiensi energi yang tinggi dari sistem SRD, namun penerapannya dalam skala industri masih sangat terbatas (Hou et al., 2021). Pendekatan *retrofit* pada unit distilasi eksisting telah terbukti menjadi strategi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi tanpa investasi besar. Melalui teknik simulasi proses dan optimasi parameter operasi, beberapa pengembangan lanjutan telah diusulkan untuk meningkatkan kinerja sistem pendingin internal (Liu et al., 2022). Namun demikian, kajian mendalam mengenai penerapan kolom distilasi berbasis prinsip *self-refrigerant*, khususnya untuk pemisahan propana-propilena, masih sangat terbatas. Cela penelitian ini menjadi dasar dilakukannya studi ini.

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan kelayakan teknis ekonomi dari penerapan sistem *self-refrigerated distillation* sebagai strategi *retrofit* pada unit distilasi propana-propilena. Fokus utama mencakup identifikasi konfigurasi refrigeran internal yang optimal, evaluasi efisiensi energi dan beban kompresor, analisis keekonomian dan kelayakan penerapan dalam konteks transisi energi industri petrokimia.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi strategi intensifikasi proses pada unit pemisahan propilena-propana di dalam suatu kompleks kilang dan petrokimia terintegrasi. Studi difokuskan pada pendekatan *retrofit* untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi beban utilitas sistem pemisahan melalui penerapan teknologi *self-refrigerated distillation* dan optimasi kondisi operasi.

Skenario dasar penelitian mengacu pada konfigurasi aktual dari unit *recovery* propilena yang menerima dua aliran umpan, masing-masing berasal dari: Stream S (*steam cracker*) yang terdiri dari 76,50% propilena, 22,55% propana, 0,80% 1-butena, dan 0,15% butana (% wt) dan Stream R (*residue*

catalytic cracking) yang terdiri dari 89,00% propilena, 9,70% propana, 0,95% 1-butena, dan 0,45% butana (%wt). Proses pemisahan dilakukan menggunakan dua kolom distilasi yang terhubung secara seri (C-001 dan C-002), yang dirancang sebagai solusi terhadap keterbatasan tinggi kolom jika hanya digunakan satu menara distilasi. Sistem ini menggunakan satu kondensor dan satu *reboiler* bersama, serta pompa bantu untuk sirkulasi cairan dari kolom kedua (C-002) ke kolom pertama (C-001). Konfigurasi ini merujuk pada pendekatan yang dikembangkan oleh Choudhari et al. (2012).

Kondisi operasi eksisting menggunakan *chilled water* dengan refrigerant R134a pada *condenser* and *LP steam* untuk *reboiler* seperti yang tampak pada Table 1.

Tabel 1. Konfigurasi dari Base Design dari Propylene Recovery Column

Design Parameter		C-001	C-002
Tekanan Column	(barg)	8.4	7.8
Delp P	(bar)	0.4	0.4
Temperatur Condenser	(°C)	17.24	14.58
Temperatur Reboiler	(°C)	25.65	16.43
Jumlah Tray	(-)	150	100
Ratio Reflux	(-)	-	10.0
Chilled water Flow rate (condenser)	(kg/hr)	-	29,000,000
LP Steam Flow rate (Reboiler)	(kg/hr)	282,850	-
Feed stage (stream R)	(-)	47	-
Feed stage (stream S)	(-)	119	-

Eksplorasi desain dilakukan melalui beberapa tahapan bertingkat sebagai berikut:

Tahap I: Penerapan *Self-Refrigerated Distillation*: Mengganti sistem pendinginan *chilled water* dengan refrigeran internal (*self-refrigeration*). Variasi refrigeran yang dievaluasi: propilena atau propana murni serta campuran propilena-propana pada konsentrasi umpan. Evaluasi dilakukan untuk menilai pengaruh terhadap konsumsi energi dan integrasi utilitas.

Tahap II: Optimasi Tekanan Operasi: Menurunkan tekanan operasi kolom untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap efisiensi pemisahan dan kebutuhan jumlah *tray*. Hipotesis utama: *operasi pada tekanan lebih rendah menghasilkan pemisahan yang lebih efisien dengan kebutuhan energi lebih rendah*. Pembatasan: sistem utilitas eksisting hanya menyediakan *chilled water* hingga suhu minimum 4°C.

Tahap III: Simplifikasi Konfigurasi Kolom: Mengevaluasi kemungkinan penggunaan satu kolom saja (C-001 atau C-002) sebagai alternatif dari sistem dua kolom. Tujuan: menyederhanakan sistem dan meminimalkan kebutuhan utilitas, sambil tetap mempertahankan kinerja pemisahan.

Asumsi sistem utilitas dan biaya operasi yang digunakan dalam evaluasi desain adalah sebagai berikut: Suhu suplai *Cooling Water* = 30°C; suhu kembali = 40°C. Biaya operasi: USD 0,018/m³/jam (termasuk biaya sirkulasi, *cooling tower*, *make-up water*, dan *chemical treatment*). *Chilled Water System*: Suhu suplai = 3°C and suhu kembali = 8°C. Biaya operasi dihitung berdasarkan konsumsi daya listrik sistem refrigerasi. Tarif listrik: USD 0,062/kWh (kelas I-4, tegangan tinggi, tanpa pemisahan *peak* dan *off-peak*). *LP Steam*: Tekanan = 4 barg. Biaya: USD 0,033/kg/jam

Perhitungan energi dan biaya dilakukan untuk masing-masing konfigurasi yang dievaluasi, sehingga memungkinkan perbandingan antara desain dan alternatif dari sisi teknis dan keekonomian operasional.

Hasil dan Pembahasan

Konfigurasi Dasar (kode: N01O1)

Dalam konfigurasi ini, sistem pendinginan menggunakan *chilled water* sebagai media utama, dengan desain operasi kolom distilasi yang disesuaikan terhadap ketersediaan utilitas tersebut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pemisahan antara propilena dan propana menjadi lebih efisien pada tekanan operasi yang lebih rendah, memungkinkan pengurangan jumlah *tray* yang dibutuhkan. Secara prinsip, efisiensi pemisahan antara dua komponen dengan titik didih yang serupa, seperti

propilena dan propana, meningkat pada tekanan rendah karena perbedaan relatif volatilitas keduanya menjadi lebih besar, sehingga memperbaiki performa distilasi.

Dalam konteks *redesign*, penurunan tekanan kolom memungkinkan pengurangan jumlah *tray* untuk mencapai tingkat kemurnian produk yang sama. Sementara itu, pada skenario *rating*, yaitu dengan jumlah *tray* tetap, peningkatan performa dapat dimanfaatkan untuk menurunkan *reflux ratio*, yang secara langsung berdampak pada pengurangan konsumsi energi di *reboiler* dan kondensor.

Sistem *chilled water* ($3^{\circ}\text{C}/8^{\circ}\text{C}$) dioperasikan secara *closed-loop* dengan *refrigerant* R-134a, pada tekanan kondensasi 12,78 barg dan tekanan evaporasi 1,98 barg. *Chilled water* disuplai pada tekanan 7 barg. Untuk memenuhi kebutuhan *duty* yang diperlukan, dibutuhkan sekitar 4.980 ton/hari *refrigerant* R-134a dan sekitar 29.000 ton/hari *chilled water*. Perlu dicatat bahwa *refrigerant* R-134a memiliki keterbatasan suhu pendinginan hingga sekitar -5°C , yang membatasi operasi kolom distilasi pada tekanan lebih tinggi, yaitu minimum sekitar 7,8 barg.

Pemilihan Refrigerant (Kode: R01XY, X=A,B,C,D, Y=1,2)

Dalam konfigurasi ini, sistem pendinginan yang sebelumnya menggunakan refrigeran R-134a melalui medium *chilled water* digantikan dengan pemanfaatan refrigeran internal yang berasal dari produk, yaitu propilena atau propana. Konfigurasi awal (kode: R01A1) menggunakan propilena sebagai refrigeran. Siklus refrigeran dirancang untuk menghasilkan perbedaan suhu yang memadai antara kondensor dan media pendingin. Suhu kondensasi ditetapkan agar memungkinkan penggunaan *cooling water* dengan *temperature approach* sebesar 10°C , yang dapat dicapai pada tekanan sekitar 20 bar. Sebaliknya, untuk memenuhi kebutuhan evaporator pada suhu lebih rendah, yaitu sekitar 10°C di bawah suhu kondensor C-002, dibutuhkan tekanan operasi sekitar 5,64 barg sehingga dapat menggantikan fungsi *chiller* konvensional.

Berdasarkan konfigurasi dasar ini, dilakukan simulasi lanjutan dengan berbagai jenis refrigeran, yakni konfigurasi R01B1, R01C1, dan R01D1, untuk mengevaluasi performa refrigeran alternatif. Baik propilena maupun propana menunjukkan karakteristik termodinamika yang sesuai untuk diaplikasikan sebagai refrigeran internal. Hasil dari simulasi ini disajikan pada Tabel 2. Sistem diberi kode R01XY. Digit terakhir "1" menunjukkan konfigurasi dasar, di mana tekanan evaporator dan kondensor disetarakan. Indeks huruf (karakter kedua terakhir) digunakan untuk membedakan jenis refrigeran: A = propilena, B = propana, C = *feed stream* R, dan D = *feed stream* S. Variasi selanjutnya menggunakan digit "2" (misalnya R01A2), yang menunjukkan adanya perbedaan tekanan antara evaporator dan kondensor, namun tetap menjaga temperatur operasi yang sama seperti R01A1, yaitu suhu evaporator $4,56^{\circ}\text{C}$ dan suhu kondensor $49,53^{\circ}\text{C}$.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa propilena memberikan performa terbaik, diikuti oleh campuran dari aliran umpan. Campuran aliran umpan memiliki karakteristik termodinamika di antara propilena dan propana, sehingga tetap layak digunakan sebagai refrigeran internal.

Analisis terhadap kebutuhan jumlah refrigeran serta *duty* evaporator dan kondensor mengonfirmasi bahwa propilena adalah pilihan paling efisien. Namun demikian, propana dan campuran dari aliran umpan memiliki keunggulan dalam hal tekanan operasi yang lebih rendah, meskipun membutuhkan *duty* dan jumlah refrigeran yang lebih besar. Oleh karenanya jika siklus didesain dengan konfigurasi R01A1 tetap dapat digunakan dengan refrigeran yang berbeda dengan penyesuaian tekanan dan daya yang lebih tinggi, sehingga kinerja keseluruhan dapat setara. Keunggulan pengaturan seperti ini sangat relevan pada tahap *start-up* awal. Sistem dapat dijalankan menggunakan aliran umpan (*stream* S atau R) sebagai refrigeran sementara, tanpa memerlukan pasokan eksternal propilena murni. Setelah kolom distilasi mencapai kondisi operasi yang stabil, refrigeran dari aliran umpan dapat secara bertahap digantikan oleh propilena untuk mengoptimalkan efisiensi energi. Variasi tambahan juga dilakukan dengan menyesuaikan kondisi operasi, terutama tekanan, agar sesuai dengan sifat termodinamika masing-masing refrigeran. Temuan ini memberikan implikasi strategis dalam pengoperasian sistem, terutama pada fase *start-up*, di mana fleksibilitas penggunaan refrigeran internal dari aliran umpan dapat meningkatkan keandalan operasional dan efisiensi energi secara bertahap.

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan mengubah tekanan operasi *column* yang lebih rendah sampai 2 barg (Kode konfigurasinya berubah dari **R01A1** menjadi **P01A1**).

Tabel 2. Perbandingan Hasil Design dari Pemilihan Self-Refrigerant dari Produk dan Feedstock

Case	Unit	R01A1	R01B1	R01B2	R01C1	R01C2	R01D1	R01D2
Refrigerant	-	Propylene	Propane	Propane	Feed R	Feed R	Feed S	Feed S
Condenser Pressure	Barg	20	16.76	20	19.76	20	19.44	20
Condenser Inlet Temp	°C	72.11	64.3	71.34	71.19	71.66	70.17	71.27
Condenser Outlet Temp	°C	49.63	49.63	57.68	49.63	50.17	49.63	50.91
Evaporator Pressure	Barg	5.64	4.483	5.64	5.56	5.64	5.44	5.64
Evaporator Inlet Temp	°C	4.56	4.56	11.17	4.56	4.99	4.56	5.64
Evaporator Outlet Temp	°C	1.91	1.41	8.46	1.91	2.36	1.91	3.00
Ref. Flow rate	Kg/hr	239,613	249,288	271,652	241,493	242,842	243,592	246,777
Condenser Duty	MW	216.6	217.7	220.1	216.7	216.9	216.9	217.3
Compressor Duty	MW	53.3	54.37	56.82	53.42	53.6	53.62	54.01
Evaporator Duty	MW	163.3	163.3	163.3	163.3	163.3	163.3	163.3

Konfigurasi satu siklus dan dua siklus refrigerant (Konfigurasi P01A1 dan P01A2)

Refrigeran R-134a memiliki keterbatasan dalam pendinginan, hanya mampu mencapai suhu sekitar -5°C. Hal ini membatasi tekanan operasi kolom pada tekanan relatif tinggi, yaitu sekitar 7,8 barg. Sebaliknya, penggunaan refrigeran hidrokarbon seperti propana dan propilena memungkinkan operasi pada suhu yang lebih rendah tanpa memerlukan kondisi vakum. Operasi pada tekanan rendah memberikan keuntungan berupa peningkatan *relative volatility* antara kedua komponen, sehingga dapat menurunkan rasio *reflux* dan kebutuhan energi (*duty*) kolom. Oleh karena itu, disarankan untuk menurunkan tekanan operasi kolom guna meningkatkan efisiensi proses. Dalam mendesain siklus refrigerasi, ditetapkan bahwa temperatur evaporasi dijaga kurang dari 10°C *temperature approach* dibandingkan suhu kondensor pada kolom kedua (C-002), sedangkan temperatur kondensasi harus lebih tinggi daripada suhu air pendingin balik (sekitar 40°C). Berdasarkan hasil simulasi sebelumnya, meskipun refrigeran yang digunakan adalah propilena, sistem masih memungkinkan untuk dioperasikan dengan refrigeran lain (seperti propana), dengan konsekuensi penurunan tekanan dan peningkatan daya kompresor.

Sebagai acuan desain berbasis propilena, tekanan evaporator ditetapkan pada 1 barg dan tekanan kondensor (refrigeran) pada 20 barg. Namun, rasio kompresi yang tinggi menghasilkan efisiensi siklus yang rendah. Oleh karena itu, sistem direkayasa menggunakan dua refrigeran *loops* untuk meningkatkan efisiensi: *Loop #2* berfungsi untuk mendukung pendinginan kolom. *Loop #1* digunakan untuk pembuangan panas ke sistem *cooling water*. Optimasi sistem dilakukan untuk menentukan distribusi beban pendinginan (*duty*) antara *Loop #1* dan *Loop #2*, dengan variabel utama berupa tekanan *condenser* pada *Loop #2* seperti tampak pada Gambar 1. Untuk menjaga *temperature driving force* yang memadai antara kedua *loop*, ditetapkan selisih tekanan sekitar 2 bar antara kondensor *Loop #2* dan evaporator *Loop #1*. Hasil analisis sebelumnya menunjukkan bahwa propilena merupakan refrigeran paling efisien dalam skenario ini. Namun, apabila digunakan propana atau campuran umpan lainnya, diperlukan pengaturan tekanan yang lebih rendah untuk mempertahankan performa sistem. Secara umum, tekanan kondensor pada *Loop #2* berperan dalam menentukan distribusi *duty* antara *Loop #1* dan *Loop #2*. Semakin tinggi tekanan ini, *duty* kompresor pada *Loop #1* akan menurun, sementara *duty* pada *Loop #2* akan meningkat. Jumlah total refrigeran juga cenderung meningkat seiring dengan peningkatan tekanan ini. Kondisi optimum diperoleh pada tekanan 10 barg, yang selanjutnya didefinisikan sebagai skenario P01A2.

Pemilihan Strategi Retrofit (kode P01A2, P02A2 dan P03A2)

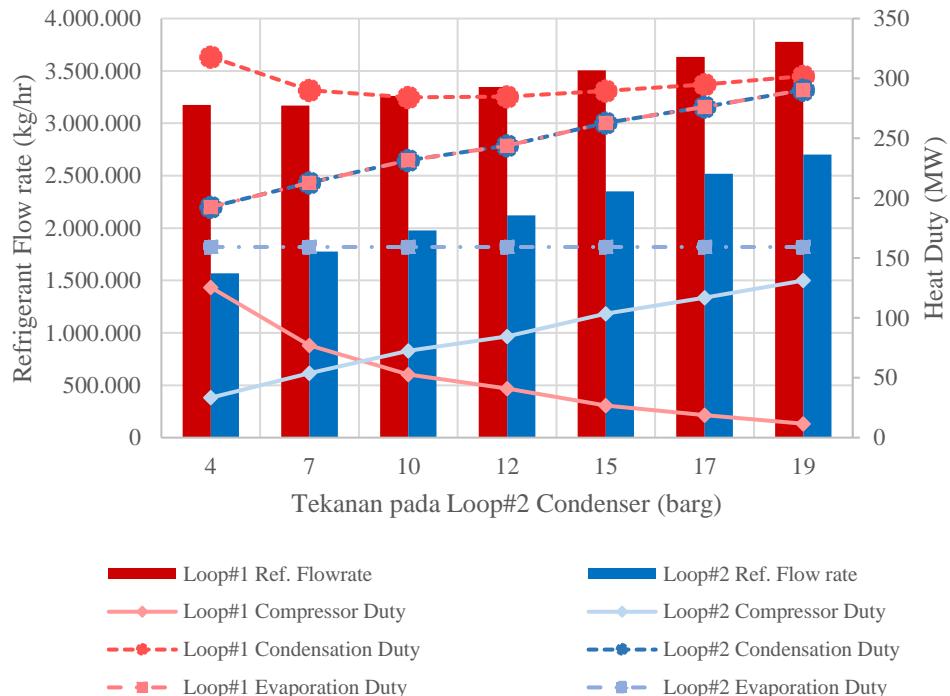
Terdapat tiga alternatif konfigurasi yang dikaji, yaitu: **P01A2**: menggunakan dua kolom (C-001 dan C-002) seperti konfigurasi awal; **P02A2**: hanya menggunakan kolom C-001; **P03A2**: hanya

menggunakan kolom C-002. Variasi dari ketiga konfigurasi ditampilkan pada Gambar 2, 3 and 4 sementara perbandingan aspek keekonomian ditunjukkan dalam Tabel 3.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa konfigurasi **P01A1** memberikan biaya operasional terendah. Konfigurasi ini mempertahankan jumlah tray existing sehingga peningkatan performa separasi karena penurunan tekanan operasi, dikontribusikan dengan melakukan *adjustment* penurunan *operasi column* seperti penurunan *reflux ratio* dan *condenser duty*. Tekanan yang lebih rendah memperbesar relatif volatilitas antar komponen, sehingga kebutuhan *reflux* untuk mencapai kemurnian produk menurun dan konsumsi energi pada *reboiler* serta kondensor dapat ditekan. Pada konfigurasi **P01A2**, kolom C-002 tidak digunakan, sehingga total jumlah *tray* berkurang sekitar 100 *tray* dibandingkan P01A1. Jika dibandingkan dengan P01A1 sebagai *baseline* performa, pengurangan tray ini menyebabkan meningkatnya kebutuhan *reflux* dan *duty reboiler*. Meskipun demikian, keunggulan dari P01A2 terletak pada potensi pembongkaran (*demolish*) kolom C-002 dan pengurangan pemakaian perpipaan.

Namun, dalam konteks proyek *retrofit* atau *revamp*, potensi penghematan material ini memiliki dampak ekonomi yang terbatas karena peralatan eksisting, seperti kolom C-002 dan sistem perpipaan, umumnya tidak memiliki nilai jual yang signifikan setelah dibongkar. Sebaliknya, apabila konfigurasi ini diterapkan pada tahap desain awal sebelum konstruksi, pengurangan jumlah kolom dan infrastruktur pendukung dapat memberikan penghematan biaya yang lebih substansial.

Konfigurasi P01A3 mengusung konsep serupa dengan P01A2, namun menggunakan kolom C-002 yang memiliki jumlah *tray* lebih sedikit. Akibatnya, kebutuhan *reflux ratio* meningkat, yang berdampak pada tingginya *reboiler duty* dan konsumsi energi.

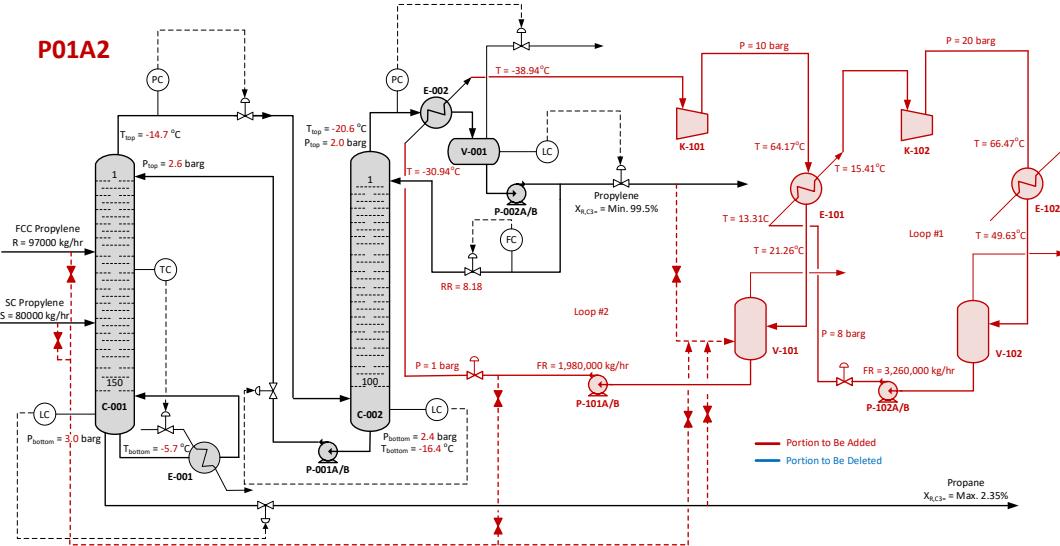


Gambar 1. Perbandingan variasi tekanan evaporator loop#2 pada konfigurasi P01A1

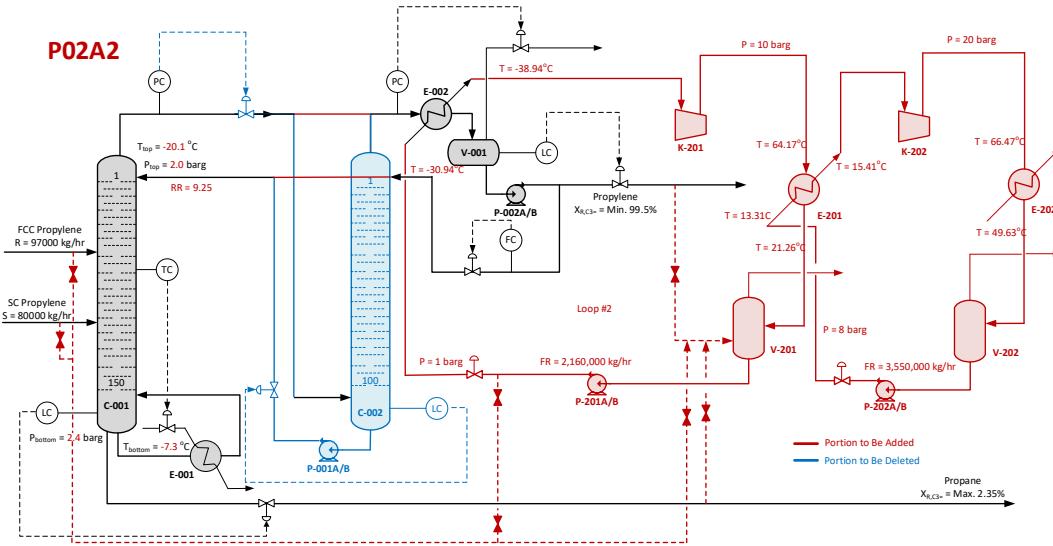
Penerapan teknologi *self-assisted distillation* dalam tiga konfigurasi ini memungkinkan penggantian penuh sistem pendinginan *external refrigerant* dengan *internal refrigerant* melalui pemanfaatan siklus refrigeran propilena. Dalam studi ini, perbedaan tekanan yang cukup signifikan memerlukan dua tahapan siklus refrigeran untuk mencapai efisiensi pendinginan yang diinginkan.

Sebagai perbandingan, sistem pendinginan komersial untuk suhu hingga -20°C umumnya menggunakan refrigeran R-410A. Perbandingan antara konfigurasi *self-assisted distillation* dan

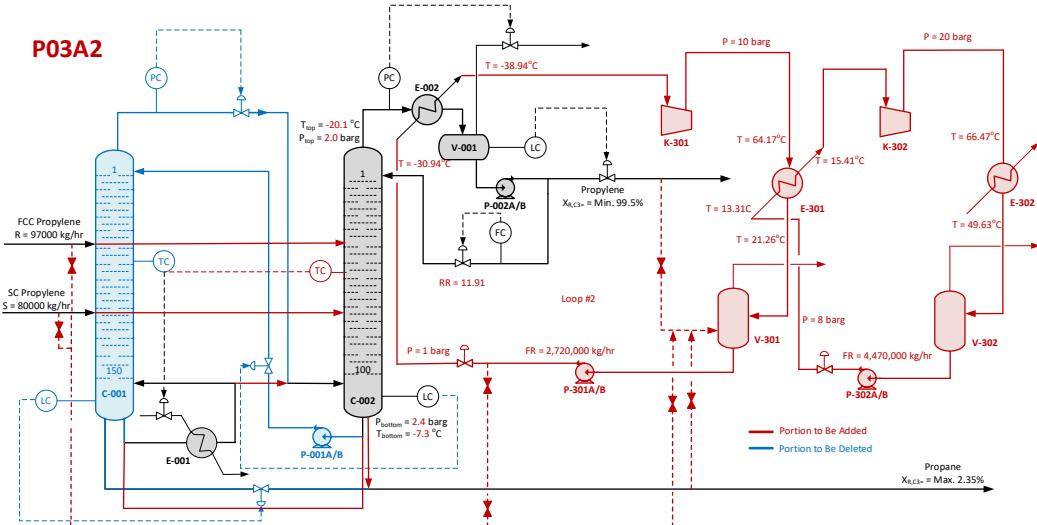
sistem berbasis R-410A dirangkum pada Tabel 3 kolom 6, 7, dan 8 (kode **P01R2**, **P02R2**, **P03R2**). Meskipun konfigurasi R-410A menunjukkan biaya operasional yang lebih rendah, perlu dicermati bahwa sistem ini membutuhkan volume refrigeran yang lebih besar. Perbedaan biaya operasional antara kedua jenis refrigeran relatif kecil. Namun, dengan mempertimbangkan tingginya nilai *Global Warming Potential* (GWP) pada R-410A serta dampak lingkungannya, konfigurasi *self-assisted distillation* dapat direkomendasikan sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan. Pada konfigurasi P01A2 dengan beban pendinginan (*duty*) rendah, kebutuhan *cooling water* pada sistem *self-refrigeration* lebih kecil dibandingkan penggunaan *commercial refrigerant*.



Gambar 2. Konfigurasi P01A2 (*revamped design* dengan mempertahankan 2 columns)



Gambar 3. Konfigurasi P02A2 (*revamps design* dengan mempertahankan *column C-001*)

Gambar 4. Konfigurasi P03A2 (*revamps design* dengan mempertahankan *column* C-002)

Tabel 3. Perbedaan Biaya Operasi untuk Beda Konfigurasi

Equipment	Utilities	Configuration (USD/hr)					
		Self-Refrigerant Assisted			R-401a		
		P01A2	P02A2	P03A2	P01R2	P02R2	P03R2
Reboiler	LP Steam	8,854.95	9,644.06	12,180.48	8,854.95	9,644.06	12,180.48
Condenser	Cooling water	285.28	478.72	603.09	431.33	468.96	590.85
Compressor loop#1	Power	3,261.20	3,547.02	4,467.72	3,354.20	3,648.08	4,596.06
Compressor loop#2	Power	4,487.56	4,881.88	6,148.54	4,038.68	4,392.08	5,532.88
All Pumps	Power	17.73	17.73	17.73	17.73	17.73	17.73
Total		16,906.71	18,569.40	23,417.55	16,696.88	18,170.91	22,918.00

Sebaliknya, pada beban pendinginan tinggi, kebutuhan *cooling water* sistem *self-refrigeration* meningkat secara signifikan. Secara keseluruhan, konsumsi daya kompresor pada sistem *commercial refrigerant* sedikit lebih rendah dibandingkan *self-assisted distillation*. Dari sisi keekonomian, konfigurasi *self-refrigeration* masih kurang kompetitif dibandingkan alternatif komersial lainnya. Namun, dengan nilai GWP yang lebih rendah dan selisih biaya operasi yang relatif kecil dibandingkan *commercial refrigerant*, teknologi ini tetap memiliki potensi sebagai pengganti, terutama jika perhatian terhadap aspek lingkungan semakin meningkat.

Kesimpulan

Teknologi distilasi dengan *self-refrigeration* menawarkan alternatif menarik untuk menggantikan refrigeran eksternal, sebagaimana dibuktikan melalui hasil simulasi berbagai konfigurasi. Dalam skenario *retrofit*, mempertahankan jumlah *tray* eksisting lebih efisien, karena pengurangannya sering memerlukan peningkatan *reflux ratio* yang justru meningkatkan konsumsi energi. Sebaliknya, pada proyek *greenfield*, penurunan tekanan operasi dapat dimanfaatkan untuk mengurangi *tray* dan mengoptimalkan *reflux* demi efisiensi energi dan biaya. Meski konfigurasi *self-refrigerated* umumnya memiliki biaya operasional sedikit lebih tinggi dibandingkan sistem berbasis refrigeran komersial seperti R134a atau R410a, teknologi ini menjadi opsi layak pada suhu rendah, di mana penggunaan R410a tidak direkomendasikan karena dampak GWP-nya. Operasi dapat dimulai dengan refrigeran dari umpan tidak murni, dan seiring waktu, digantikan oleh produk murni, sehingga meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya. Dengan demikian, pendekatan ini mendukung efisiensi energi, pengurangan emisi, dan potensi penerapan teknologi yang lebih berkelanjutan untuk pemisahan hidrokarbon ringan, baik dalam skenario *retrofit* maupun desain baru.

Daftar Pustaka

- [1] Liu, J., Liu, Y., Yan, G., & Yu, J. (2022). Thermodynamic analysis on a modified auto-cascade refrigeration cycle with a self-recuperator. *International Journal of Refrigeration*, 137, 117-128.
- [2] Ibrahim, O. A. A.-M., Kadhim, S. A., Hammoodi, K. A., Rashid, F. L., & Askar, A. H. (2024). Review of hydrocarbon refrigerants as drop-in alternatives to high-GWP refrigerants in VCR systems: The case of R290. *Cleaner Engineering and Technology*, 23, 100825.
- [3] Kayes, I., Ratul, R. E., Abid, A., Majmader, F. B., Khan, Y., & Ehsan, M. M. (2024). Multi-objective optimization and 4E (energy, exergy, economy, environmental impact) analysis of a triple cascade refrigeration system. *Heliyon*, 10(11).
- [4] Hou, W., Zhang, Q., & Zeng, A. (2021). Separation of n-heptane/isobutanol via eco-efficient vapor recompression-assisted distillation: process optimization and control strategy. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 15(5), 1169-1184.
- [5] Matsuda, K., Kawazuishi, K., Kansha, Y., Fushimi, C., Nagao, M., Kunikiyo, H., Masuda, F., & Tsutsumi, A. (2011). Advanced energy saving in distillation process with self-heat recuperation technology. *Energy*, 36(8), 4640-4645
- [6] Daw, A., S.. Global Warming Potential & its Importance. *International Journal For Empirical Education and Research*. 2019; 3(19): 15-20.
- [7] Choudhari, A., Gune, P., & Divey, J. (2012). Distillation Optimization By Vapor Recompression. *Chemical Engineering*, 119(3).