

OPTIMISASI JARINGAN HIDROGEN MELALUI PEMANFAATAN SISTEM PURIFIKASI DAN RECOVERY DI KOMPLEKS REFINERY DAN PETROKIMIA

Anton Santoso¹⁾

1) PT. Pertamina Rosneft Pengolahan dan Petrokimia, Indonesia

E-mail: anton_santoso@outlook.com

Abstrak

Hidrogen merupakan utilitas strategis dalam industri kilang minyak dan petrokimia, terutama pada proses hidrodesulfurisasi, hidrokraking, dan produksi bahan kimia antara. Keterbatasan pasokan serta tingginya biaya produksi menuntut adanya strategi optimisasi yang efektif. Penelitian ini mengkaji penerapan Pinch Analysis sebagai metode sistematis untuk mengevaluasi distribusi, kebutuhan, dan integrasi jaringan hidrogen pada kompleks refinery-petrokimia. Hasil analisis menunjukkan bahwa total kebutuhan hidrogen mencapai 26.611,86 kmol/jam, sedangkan suplai internal hanya menyediakan 20.061,7 kmol/jam akibat keterbatasan kemurnian. Tanpa integrasi, kebutuhan tambahan hidrogen segar melalui Hydrogen Production Unit (HPU) mencapai 24.291,82 kmol/jam. Penerapan sistem purifikasi berbasis Pressure Swing Adsorption (PSA) dengan recovery 90% dan kemurnian 99,9% terbukti meningkatkan utilisasi aliran internal sehingga kebutuhan HPU dapat ditekan menjadi 7.475,67 kmol/jam, atau kurang sekitar 70%. Integrasi PSA tidak hanya meningkatkan efisiensi teknis dan ekonomi, tetapi juga menyederhanakan desain jaringan karena seluruh suplai memiliki kemurnian seragam. Meski demikian, desain HPU tetap memerlukan margin kapasitas untuk menjamin keandalan operasi, terutama pada kondisi non-kontinu seperti start-up. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa kombinasi Pinch Analysis dan purifikasi PSA mampu menghasilkan jaringan hidrogen yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan. Metode ini menurunkan konsumsi hidrogen segar dan biaya operasi, sekaligus menyediakan dasar perencanaan strategis bagi integrasi unit baru, peningkatan efisiensi energi, dan pengurangan emisi karbon.

Kata kunci: *Hidrogen, Pinch Analysis, Pressure Swing Adsorption (PSA), Hydrogen Production Unit (HPU), Efisiensi Energi.*

Pendahuluan

Hidrogen merupakan salah satu utilitas kunci dalam industri kilang minyak dan petrokimia. Perannya sangat vital, khususnya pada proses hidrodesulfurisasi, hidrokraking, serta berbagai reaksi hidrogenasi dalam produksi bahan kimia antara. Seiring dengan meningkatnya tuntutan kualitas produk dan regulasi lingkungan yang semakin ketat, kebutuhan hidrogen di kompleks refinery-petrokimia terus bertambah. Produksi hidrogen segar umumnya dilakukan melalui *steam methane reforming* (SMR), namun metode ini membutuhkan energi besar, biaya tinggi, dan menghasilkan emisi karbon signifikan. Oleh karena itu, optimisasi penggunaan hidrogen melalui pengelolaan jaringan yang efisien menjadi isu strategis dalam mendukung keberlanjutan operasi industri.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk merancang dan mengoptimalkan jaringan hidrogen adalah *Pinch Analysis*. Metode ini memungkinkan penentuan batas minimum kebutuhan hidrogen segar sekaligus pemetaan potensi pemanfaatan ulang aliran internal. Namun, sebagian besar penerapan masih terbatas pada penentuan target teoritis, tanpa mengintegrasikan teknologi pemurnian dan pemulihan hidrogen yang berperan penting dalam meningkatkan kualitas serta utilisasi aliran. Padahal, teknologi seperti *purification recovery system* berpotensi menjembatani keterbatasan tersebut sehingga rancangan jaringan dapat lebih optimal, baik secara teknis maupun ekonomis.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menunjukkan bagaimana penerapan *Pinch Analysis* dapat digunakan dalam merancang sistem jaringan hidrogen refinery-petrokimia yang terintegrasi dengan *purification recovery system*. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis jaringan hidrogen, mengidentifikasi titik *pinch*, serta merancang konfigurasi sistem yang memungkinkan pemanfaatan maksimum aliran hidrogen melalui integrasi teknologi pemurnian dan pemulihan.

Metode yang digunakan meliputi pemetaan suplai dan permintaan hidrogen menggunakan *Pinch Analysis*, dilanjutkan dengan evaluasi rancangan jaringan yang melibatkan unit *purification*

recovery. Analisis mencakup perhitungan kebutuhan hidrogen segar minimum, simulasi distribusi aliran, serta estimasi dampak ekonomi dan lingkungan dari penerapan sistem terintegrasi.

Dengan desain ini, penelitian diharapkan dapat mengisi celah kajian sebelumnya dengan memberikan kontribusi baru berupa model rancangan jaringan hidrogen yang lebih komprehensif. *Novelty* penelitian ini terletak pada kombinasi *Pinch Analysis* dengan *purification recovery system*, yang tidak hanya menurunkan konsumsi hidrogen segar tetapi juga meningkatkan kualitas aliran yang dapat digunakan kembali. Kontribusi utama yang ditawarkan adalah pendekatan sistematis yang dapat diterapkan industri untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi biaya operasi, serta mendukung agenda dekarbonisasi melalui pemanfaatan hidrogen berkelanjutan.

Studi Pustaka

Perancangan jaringan hidrogen pada kompleks *refinery*-petrokimia membutuhkan pemahaman terintegrasi mengenai pola kebutuhan, metode optimisasi, serta teknologi pemurnian yang dapat meningkatkan utilisasi aliran.

Hidrogen tersedia baik dari produksi segar (misalnya *steam methane reforming*/SMR, *partial oxidation*, dan gasifikasi batubara) maupun sebagai aliran samping dari unit proses seperti *catalytic reforming*, *steam cracking*, dan produksi etilena [8]. Namun, sumber sekunder ini sering kali memiliki perbedaan tekanan dan kemurnian sehingga sulit dimanfaatkan langsung. Tantangan utama adalah bagaimana menyeimbangkan permintaan yang terus meningkat dengan keterbatasan pasokan segar, sekaligus mengatasi variabilitas komposisi dan kondisi operasi [2].

Pinch Analysis, yang awalnya dikembangkan untuk integrasi energi, kemudian diperluas untuk optimisasi hidrogen [10]. Metode ini efektif dalam mengidentifikasi titik *pinch*, yaitu batas yang memisahkan wilayah surplus dan defisit berdasarkan laju alir dan kemurnian. Berbagai studi kasus menunjukkan penghematan konsumsi hidrogen segar hingga puluhan persen melalui redistribusi aliran yang lebih efisien [1],[7]. Perkembangan lebih lanjut melibatkan formulasi aljabar, model superstruktur, serta integrasi dengan simulasi proses untuk mempertimbangkan keterbatasan nyata seperti variasi tekanan dan kebutuhan kompresi [4],[9].

Selain integrasi aliran, teknologi pemurnian berperan penting dalam meningkatkan utilisasi hidrogen. *Pressure Swing Adsorption* (PSA) merupakan teknologi yang paling matang dan banyak digunakan. PSA mampu menghasilkan hidrogen berkualitas tinggi (>99,9%) dengan tingkat *recovery* di atas 90%, sehingga menjadi standar industri di kilang minyak dan pabrik amonia [8]. Namun, terdapat *trade-off* antara kemurnian, *recovery*, biaya modal, dan konsumsi energi. Faktor seperti desain siklus, konfigurasi bed, serta pemilihan adsorben memengaruhi performa [6]. Perkembangan terbaru mencakup konfigurasi *polybed*, integrasi dengan membran, serta optimisasi berbasis pembelajaran mesin [3].

Hingga kini, sebagian besar literatur membahas *Pinch Analysis* dan pemurnian hidrogen secara terpisah. Kajian terkait pinch menitikberatkan pada penetapan target teoritis, sedangkan studi pemurnian cenderung berfokus pada optimisasi siklus teknologi. Hanya sedikit penelitian yang mengintegrasikan keduanya dalam satu kerangka perancangan jaringan hidrogen [2],[5].

Keterbatasan ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian: bagaimana menghubungkan pendekatan analitis (*pinch*) dengan penerapan teknologi praktis (pemurnian/pemulihan) dalam desain jaringan yang komprehensif. Studi ini berkontribusi dengan mengombinasikan *Pinch Analysis* dan sistem pemurnian untuk merancang jaringan hidrogen yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Pinch Analysis* untuk merancang sistem jaringan hidrogen pada kompleks *refinery* dan petrokimia berskala *grass root*. Kondisi ini memberikan fleksibilitas luas karena desain tidak terikat pada konfigurasi awal. Kompleks direncanakan memiliki kapasitas pengolahan 400 *kilobarrel* per hari, dengan konfigurasi produk ditentukan berdasarkan survei pasar dan kebutuhan permintaan. Dalam sistem ini, hidrogen meskipun berasal dari unit proses

diperlakukan sebagai bagian dari utilitas, di mana beberapa unit berperan sebagai penghasil dan lainnya sebagai pengguna. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan neraca hidrogen dan sistem distribusi yang terintegrasi. Integrasi jaringan antara *refinery*, aromatik, dan petrokimia memang menuntut jaringan pipa yang lebih panjang atau lebih besar, namun memberi keuntungan ekonomi skala serta memungkinkan pemanfaatan hidrogen berlebih di berbagai area sehingga menurunkan kebutuhan hidrogen segar.

Penelitian ini bersifat aplikatif dan analitis dengan pendekatan kuantitatif. Tabel 1 menyajikan unit pengguna hidrogen beserta konsumsi dan propertinya, sedangkan Tabel 2 menampilkan unit penghasil hidrogen internal beserta laju dan propertinya. Kapasitas *Hydrogen Production Unit* (HPU) masih diasumsikan fleksibel dan akan ditentukan sesuai kebutuhan. Berdasarkan perhitungan *reliability* dan kajian pemeliharaan, total unit HPU yang didesain adalah $3 \times 33,33\%$. Kebutuhan hidrogen ditunjukkan sebagai laju ideal pada kondisi murni (Kolom 3) dan laju aktual yang disesuaikan dengan konsentrasi sebenarnya (Kolom 4). Dataset mencakup kebutuhan hidrogen tiap unit proses, suplai internal, persyaratan konsentrasi, dan tekanan suplai. Pada unit tertentu, seperti *hydrotreating*, konsentrasi maksimum ditentukan oleh spesifikasi *recycle gas* pada kondisi reaksi. Untuk menjaga konsistensi, produksi hidrogen internal diperlakukan sebagai suplai langsung tanpa pemurnian awal (misalnya membran atau PSA), dengan laju alir disesuaikan terhadap konsentrasi suplai. Berdasarkan literatur, integrasi unit pemurnian dapat meningkatkan kualitas hidrogen daur ulang, meskipun menurunkan total laju alir.

Tabel 1. Daftar Unit Pengguna Hidrogen Beserta Konsumsi dan Properti Lainnya

Tag Number	Unit	Ideal Required kmol/hr	Flowrate kmol/hr	H2 Conc mol H2/mol	Impurity Mol/mol	Press kg/cm2 G
1201	NHT1	125.78	129.69	96.98%	3.02%	31.6
1202	NHT2	125.78	129.69	96.98%	3.02%	31.6
1211	ISOM	290.07	290.36	99.90%	0.10%	47.5
1401	KHT1	64.63	66.43	97.29%	2.71%	17
1402	KHT2	64.63	66.43	97.29%	2.71%	17
1501	DHT1	2427.18	2488.42	97.54%	2.46%	83.8
1502	DHT2	2427.18	2488.42	97.54%	2.46%	83.8
1611	RDS1	7835.14	8087.46	96.88%	3.12%	206.8
1612	RDS2	7835.14	8087.46	96.88%	3.12%	206.8
1641	GHT	424.39	447.15	95%	5.09%	18.6
2101	ARO (1st user)	1013.25	1360.43	74%	25.52%	31.6
2101	ARO (2nd user)	242.92	319.64	76%	24.00%	14.1
3111	PDT	238.10	238.34	99.90%	0.10%	28
3121	MTBE	294.29	294.59	99.90%	0.10%	29
3131	THU	1758.56	1760.32	99.90%	0.10%	30
3211	LLDPE	5.90	5.90	99.90%	0.10%	40.48
3221	HDPE	5.90	5.90	99.90%	0.10%	40.48
3251	PP1	89.86	89.95	99.90%	0.10%	40.48
3252	PP2	89.86	89.95	99.90%	0.10%	40.48
5201	TGT	165.16	165.33	99.90%	0.10%	1

Tahapan analisis dimulai dari identifikasi kebutuhan dan suplai hidrogen melalui pengumpulan data konsumsi serta aliran hasil produksi internal hidrogen. Profil suplai dan permintaan kemudian dipetakan melalui diagram *demand* dan *sources*, termasuk evaluasi kecocokan kemurnian untuk memastikan kesesuaian suplai dengan kebutuhan proses. *Pinch Analysis* diterapkan dengan surplus diagram untuk menentukan titik *pinch*, kebutuhan minimum hidrogen segar, serta potensi pemanfaatan ulang aliran internal. Untuk meningkatkan kualitas suplai dan efisiensi distribusi, dilakukan integrasi sistem pemurnian seperti PSA, membran, atau *cryogenic separation*. Dalam penelitian ini, PSA dipilih sebagai opsi utama dengan asumsi *recovery* 90% dan kemurnian 99,9%, *pressure drop* 0,5 barg, serta *tail gas pressure* 0,3 barg. Meskipun menambah biaya modal, PSA mampu menurunkan kebutuhan hidrogen segar secara signifikan.

Kinerja rancangan jaringan dievaluasi dari tiga aspek utama. Dari sisi teknis, optimisasi ditujukan untuk menurunkan konsumsi hidrogen segar sekaligus meningkatkan pemanfaatan aliran

internal. Dari aspek ekonomi, rancangan ini ditinjau berdasarkan potensi penghematan biaya operasi serta keseimbangan antara investasi dan manfaat jangka panjang. Sementara dari aspek lingkungan, optimisasi jaringan berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon. Hasil penelitian diharapkan menghasilkan peta suplai dan kebutuhan hidrogen pada sistem *refinery*-petrokimia, identifikasi titik *pinch* dan kebutuhan minimum hidrogen segar, rancangan jaringan hidrogen terintegrasi dengan *purification recovery system*, serta evaluasi teknis, ekonomi, dan lingkungan sebagai dasar pengambilan keputusan strategis bagi industri.

Tabel 2. Daftar Unit Penghasil Hidrogen Internal Beserta Laju dan Properti Lainnya

Tag Number	Unit	Flowrate kmol/hr	H2 Conc. mol H2/mol	Impurity Mol/mol	Press kg/cm2 G
1221	CCR	10746.76	84.60%	15.40%	33
3001	GSC1	4533.025	60.50%	39.50%	31.74
3002	GSC2	4533.025	60.50%	39.50%	31.74
3003	GSC3	4533.025	60.50%	39.50%	31.74
3004	GSC4	4533.025	60.50%	39.50%	31.74
4101	HPU1	X*	99.90%	0.10%	34
4102	HPU2	X*	99.90%	0.10%	34
4103	HPU2	X*	99.90%	0.10%	34

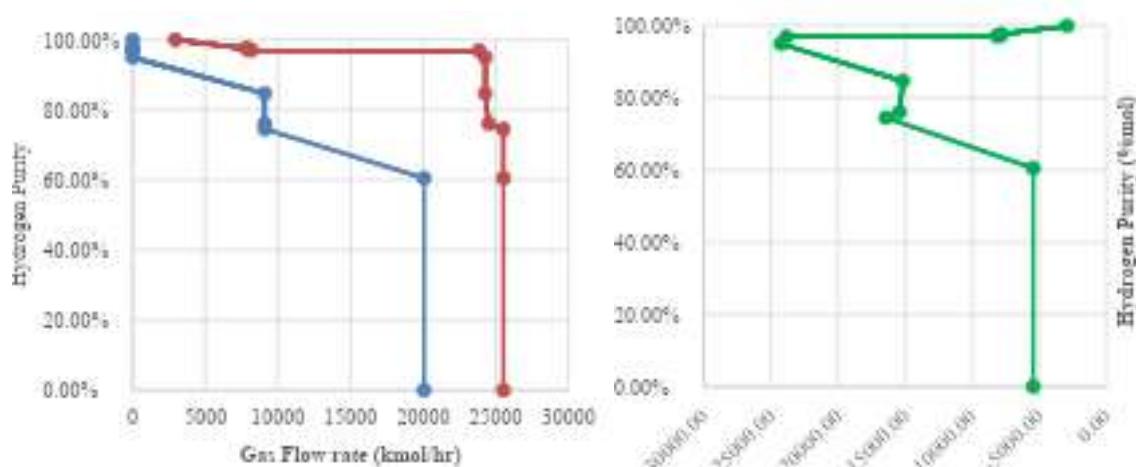
*Note: X merupakan kapasitas unit HPU yang belum ditentukan dan akan ditetapkan berdasarkan hasil optimisasi jaringan hidrogen.

Hasil dan Pembahasan

Neraca Hidrogen Awal

Berdasarkan hasil pengolahan data, total kebutuhan hidrogen pada kompleks *refinery*-petrokimia adalah sebesar 26.611,86 kmol/jam. Sementara itu, potensi hidrogen yang tersedia melalui pemanfaatan ulang (*reuse*) mencapai 28.878,86 kmol/jam. Secara kuantitatif, jumlah suplai terlihat lebih besar daripada kebutuhan. Namun, perhitungan ini belum memperhitungkan aspek kemurnian yang menjadi faktor penentu kelayakan penggunaan hidrogen pada unit proses.

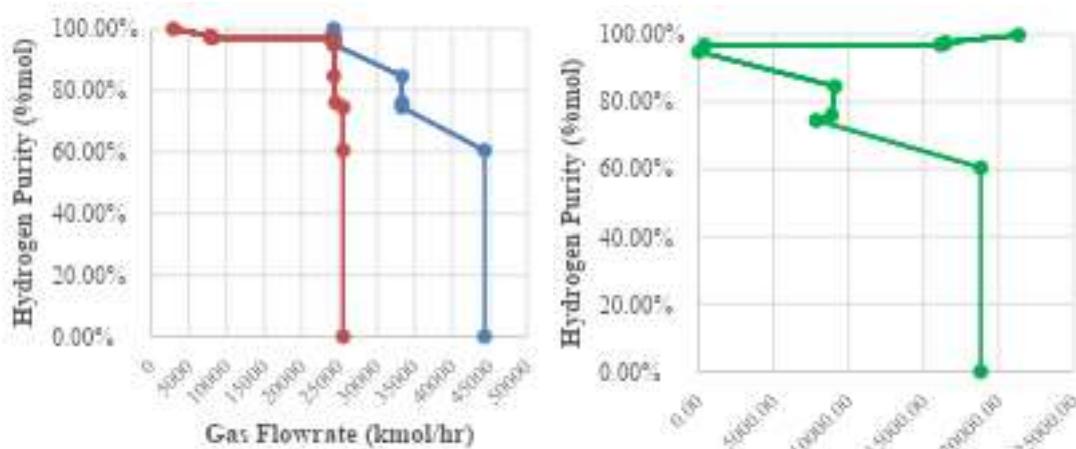
Jika kebutuhan dihitung dalam bentuk hidrogen murni, diperoleh angka 25.523,7 kmol/jam, sedangkan suplai internal hidrogen murni hanya sebesar 20.061,7 kmol/jam. Perbedaan ini muncul karena sebagian besar aliran hidrogen memiliki konsentrasi rendah sehingga tidak dapat langsung dimanfaatkan. Misalnya, aliran dari *steam cracker* dengan kemurnian 60,5% tidak sesuai dengan spesifikasi proses yang membutuhkan hidrogen berkadar tinggi. Dengan demikian, meskipun total suplai terlihat mencukupi, terdapat kesenjangan kualitas yang menyebabkan sebagian besar hidrogen internal tidak dapat digunakan secara langsung.



Gambar 1. Kurva profil konsentrasi dan surplus hidrogen sebelum penambahan melalui unit produksi hidrogen

Analisis Pinch

Untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan ulang, dilakukan *Pinch Analysis* menggunakan *hydrogen surplus curve*. Gambar 1 menunjukkan bahwa kurva kebutuhan (*demand curve*, ditunjukkan dengan kurva merah) berada lebih tinggi dibandingkan dengan kurva suplai (*supply curve*, ditunjukkan dengan kurva biru). Hal ini menunjukkan bahwa sistem masih memerlukan tambahan hidrogen segar. Berdasarkan perhitungan, kebutuhan hidrogen segar tambahan mencapai 24.291,82 kmol/jam. Kebutuhan tersebut dipenuhi melalui *hydrogen production unit* (HPU) dengan asumsi kapasitas 8.097,27 kmol/jam per unit.



Gambar 2. Kurva profil konsentrasi hidrogen dan surplus hidrogen setelah penambahan hidrogen melalui unit produksi hidrogen

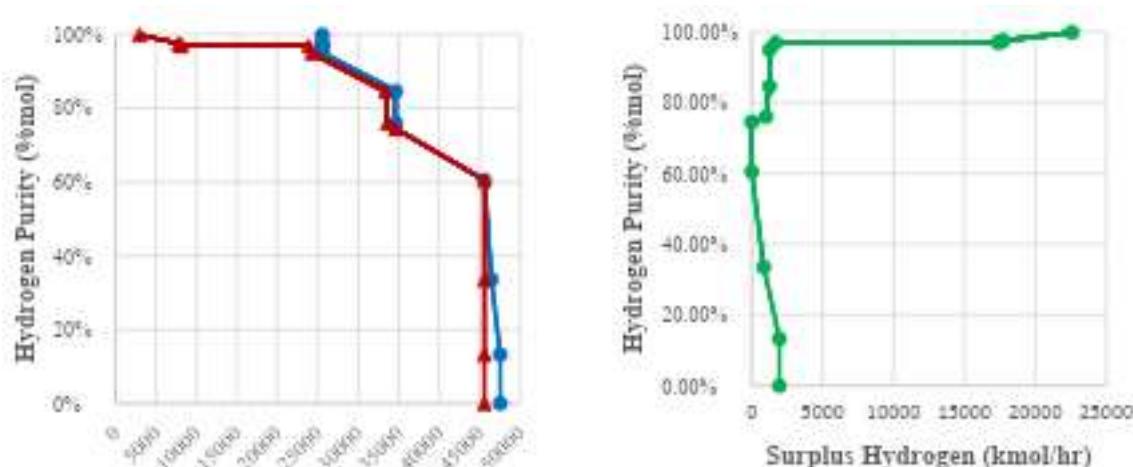
Ketika *surplus curve* (warna biru) dipetakan ulang setelah penambahan hidrogen segar, terlihat pada Gambar 2 bahwa *demand curve* (warna merah) berhimpit dengan *supply curve* (warna biru). Kondisi ini menunjukkan tercapainya *pinch point*, yaitu kebutuhan minimum hidrogen segar untuk memenuhi seluruh permintaan dengan mempertimbangkan keterbatasan kualitas aliran. Namun, di luar titik *pinch*, jarak antara *supply curve* dan *demand curve* pada setiap konsentrasi memperlihatkan bahwa hanya sebagian kecil hidrogen internal yang dapat dimanfaatkan, terutama karena keterbatasan konsentrasi pada sumber-sumber tertentu. Pada *surplus hydrogen* (kurva hijau) terlihat bahwa pada konsentrasi rendah terdapat surplus besar yang tidak termanfaatkan.

Integrasi Sistem Purifikasi

Untuk meningkatkan pemanfaatan hidrogen internal, penelitian ini mengusulkan integrasi dengan sistem purifikasi menggunakan *Pressure Swing Adsorption* (PSA). Dalam skenario yang dianalisis, seluruh aliran dari CCR dan *steam cracker* dimurnikan melalui PSA dengan asumsi *recovery* sebesar 90% dan kemurnian 99,9%. Integrasi ini memberikan beberapa keuntungan penting. Pertama, terdapat *trade-off* kapasitas, di mana pemanfaatan PSA mampu menurunkan kebutuhan kapasitas *Hydrogen Production Unit* (HPU), meskipun memerlukan investasi tambahan untuk pembangunan unit PSA. Namun, dari sisi ekonomi, biaya tambahan tersebut tetap lebih rendah dibandingkan dengan penghematan yang diperoleh dari pengurangan kapasitas HPU. Kedua, proses pemurnian hingga 99,9% menghasilkan suplai hidrogen dengan kemurnian seragam, sehingga desain jaringan distribusi menjadi lebih sederhana tanpa memerlukan pemisahan *header* berdasarkan tingkat konsentrasi. Ketiga, peningkatan kualitas hidrogen memungkinkan utilisasi yang jauh lebih besar, terutama untuk memanfaatkan hidrogen dengan konsentrasi rendah yang dihasilkan secara internal, sehingga efisiensi jaringan secara keseluruhan dapat ditingkatkan secara signifikan.

Hasil Integrasi dengan PSA

Setelah integrasi PSA, kebutuhan HPU turun signifikan dari 24.291,82 kmol/jam menjadi 7.475,67 kmol/jam. Dengan kapasitas per unit sebesar 2.491,89 kmol/jam. Hasil ini ditunjukkan pada Gambar 3, di mana kurva surplus pasca-purifikasi memperlihatkan penurunan tajam kebutuhan hidrogen segar. Walaupun integrasi sistem purifikasi memberikan keuntungan teknis dan ekonomi yang signifikan, terdapat beberapa aspek penting yang perlu diperhatikan dalam perancangan. Pertama, kapasitas desain tidak dapat ditetapkan persis sama dengan hasil perhitungan kebutuhan minimum, misalnya 2.500 kmol/jam per unit. Margin tambahan tetap diperlukan sebagai *contingency*, terutama pada kondisi *start-up* ketika unit produksi internal belum siap menyuplai hidrogen secara penuh. Kedua, fleksibilitas operasi juga harus diprioritaskan. Desain dengan kapasitas yang terlalu rendah berpotensi mengganggu keandalan pasokan hidrogen, khususnya pada kondisi transisi atau ketika terjadi gangguan operasi yang tidak terduga. Ketiga, aspek biaya modal perlu ditimbang secara seimbang dengan biaya operasional, sehingga konfigurasi akhir antara *Hydrogen Production Unit* (HPU) dan *Pressure Swing Adsorption* (PSA) sebaiknya ditentukan melalui proses optimasi yang lebih lanjut. Dengan demikian, rancangan jaringan hidrogen tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga ekonomis dan andal dalam jangka panjang.



Gambar 3. Kurva profil konsentrasi hidrogen dan surplus hidrogen setelah pemanfaatan sistem pemurnian hidrogen dan penambahan hidrogen melalui unit produksi hidrogen

Diskusi Umum

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa secara kuantitatif suplai hidrogen internal sebenarnya lebih besar daripada kebutuhan, namun keterbatasan kemurnian membatasi pemanfaatannya secara langsung. Penerapan *Pinch Analysis* terbukti mampu mengidentifikasi kebutuhan minimum hidrogen segar dengan jelas melalui surplus *curve*, sehingga memberikan dasar perencanaan yang lebih terukur. Integrasi penuh dengan sistem *Pressure Swing Adsorption* (PSA) pada aliran berkonsentrasi rendah terbukti menjadi solusi optimum, baik dari sisi teknis maupun ekonomi, karena mampu menurunkan kebutuhan produksi hidrogen baru melalui *Hydrogen Production Unit* (HPU) hingga sekitar 70%. Meskipun demikian, faktor operabilitas seperti kondisi *start-up*, margin kapasitas, serta reliabilitas sistem tetap harus diperhitungkan dalam tahap desain final agar rancangan jaringan hidrogen tidak hanya efisien, tetapi juga andal untuk jangka panjang.

Kesimpulan

Penelitian ini menegaskan bahwa dalam pengelolaan hidrogen di kompleks *refinery-petrokimia*, ketersediaan dalam jumlah besar tidak serta-merta menjamin terpenuhinya kebutuhan. Keterbatasan kemurnian menjadikan kualitas sebagai faktor penentu yang lebih esensial daripada sekadar kuantitas, sehingga pemanfaatan hidrogen bergantung pada keseimbangan antara jumlah dan

konsentrasi. Melalui penerapan *Pinch Analysis* dengan *surplus curve*, ditunjukkan bahwa keberhasilan pemenuhan kebutuhan hidrogen tidak hanya ditentukan oleh pasokan, tetapi juga oleh kesesuaian kualitasnya. Titik *pinch* menjadi penanda batas minimum hidrogen segar yang harus ditambahkan, sekaligus mencerminkan pentingnya harmoni antara suplai internal dan permintaan sistem.

Integrasi teknologi pemurnian melalui *Pressure Swing Adsorption* (PSA) terbukti mampu meningkatkan utilisasi hidrogen secara signifikan. Dengan recovery 90% dan kemurnian 99,9%, aliran hidrogen berkonsentrasi rendah dari CCR dan *steam cracker* dapat ditingkatkan kualitasnya sehingga sesuai dengan spesifikasi proses. Hasilnya, kebutuhan HPU turun drastis menjadi 7.475,67 kmol/jam atau berkurang sekitar 70% dibandingkan kondisi tanpa purifikasi. Selain itu, keseragaman kemurnian memungkinkan rancangan *header* jaringan lebih sederhana dan efisien.

Secara ekonomi, integrasi PSA lebih menguntungkan dibandingkan peningkatan kapasitas HPU karena investasi lebih rendah dan potensi penghematan operasional jangka panjang. Namun, kapasitas HPU tidak dapat ditentukan hanya dari perhitungan minimum, melainkan perlu mempertimbangkan faktor operabilitas seperti kebutuhan *start-up*, kondisi transisi, dan risiko gangguan pasokan, sehingga margin kapasitas tetap diperlukan. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa integrasi *Pinch Analysis* dengan sistem purifikasi menghasilkan rancangan jaringan hidrogen yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan, serta dapat menjadi landasan strategis bagi industri dalam mendorong efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon melalui optimalisasi sumber daya internal.

Daftar Pustaka

- [1] Elsherif, M., Manan, Z. A., & Kamsah, M. Z. (2015). State-of-the-art of hydrogen management in refinery and industrial process plants. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 24, 346-356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.03.046>
- [2] Hallale, N., & Liu, F. (2001). Refinery hydrogen management for clean fuels production. *Advances in Environmental Research*, 6(1), 81-98. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(01\)00112-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1093-0191(01)00112-5)
- [3] Krótki, A., Bigda, J., Spietz, T., Ignasiak, K., Matusiak, P., & Kowol, D. (2025). Performance Evaluation of Pressure Swing Adsorption for Hydrogen Separation from Syngas and Water-Gas Shift Syngas. *Energies*, 18(8).
- [4] Liao, Z.-W., Rong, G., Wang, J.-D., & Yang, Y.-R. (2011a). Rigorous algorithmic targeting methods for hydrogen networks—Part I: Systems with no hydrogen purification. *Chemical Engineering Science*, 66(5), 813-820. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.10.018>
- [5] Liu, F., & Zhang, N. (2004). Strategy of Purifier Selection and Integration in Hydrogen Networks. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(10), 1315-1330. <https://doi.org/https://doi.org/10.1205/cerd.82.10.1315.46739>
- [6] Luberti, M., & Ahn, H. (2022). Review of Polybed pressure swing adsorption for hydrogen purification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(20), 10911-10933. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.147>
- [7] Rudin, S. N. F. M., Muis, Z. A., Ramli, A. F., Shabri, H. A., Zailan, R., Hashim, H., & Ho, W. S. (2020). Sustainable Supply of Hydrogen for Integrated Power Plant with Methanation via Pinch Analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 884(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/884/1/012013>
- [8] Sircar, S., & Golden, T. C. (2000). Purification of Hydrogen by Pressure Swing Adsorption. *Separation Science and Technology*, 35(5), 667-687. <https://doi.org/10.1081/SS-100100183>

- [9] Yang, M., Feng, X., & Zhao, L. (2021). Coupling pinch analysis and rigorous process simulation for hydrogen networks with light hydrocarbon recovery. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 40, 141-148. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.12.021>
- [10] Zhenmin, L. (2003). Pinch analysis of hydrogen system in refineries. In B. Chen & A. W. Westerberg (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 15, pp. 952-955). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(03\)80430-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1570-7946(03)80430-3)