PENGARUH *CATALYTIC REFORMING* TERHADAP PENINGKATAN NILAI OKTAN GASOLINE: STUDI LITERATUR

Muhammad Nasyith Tsabitul Azmi Kansri[1], Asa Aditya Persada[1*]
[1]Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada No. 38 Cepu, Blora, Jawa Tengah 58311
E-mail: asa.persada@esdm.go.id

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan bahan bakar minyak beroktan tinggi serta pengetatan regulasi emisi lingkungan mendorong industri kilang minyak bumi untuk terus mengoptimalkan kinerja unit *catalytic reforming*. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis dan komprehensif pengaruh variabel-variabel operasi *catalytic reforming* terhadap peningkatan nilai oktan (*Research Octane Number*/RON) *gasoline*. Metode yang digunakan adalah *Systematic Literature Review* (SLR) berdasarkan kerangka kerja PRISMA. Dari total 115 artikel yang teridentifikasi melalui penelusuran basis data ilmiah, sebanyak 42 artikel bereputasi memenuhi kriteria inklusi dan dianalisis secara mendalam. Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa proses *catalytic reforming* mampu menaikkan nilai RON umpan *heavy naphtha* dari kisaran 45–55 menjadi 95–102 pada produk *reformate*. Peningkatan nilai oktan yang signifikan ini didorong oleh dua reaksi utama, yaitu dehidrogenasi naphthena menjadi aromatik dan isomerisasi n-parafin menjadi *iso*-parafin dengan bantuan katalis bifungsional Pt-Re/Al_2O_3. Berdasarkan hasil sintesis literatur, rentang kondisi operasi yang menghasilkan kinerja optimal berada pada temperatur reaktor 480–520°C, tekanan 3,5–10 bar pada teknologi *Continuous Catalytic Regeneration* (CCR), serta *Liquid Hourly Space Velocity* (LHSV) 1,0–1,5 h^{-1}. Peningkatan temperatur dan penurunan tekanan operasi terbukti meningkatkan kandungan aromatik hingga 60–70% volume, namun menurunkan *yield* cairan akibat pemecahan molekul melalui reaksi hidrokraking sekunder. Kesimpulannya, pengendalian variabel operasi secara presisi sangat penting untuk menyeimbangkan target nilai oktan dan *yield* cairan produk.

Kata kunci: Aromatik, *Catalytic Reforming*, Katalis Bifungsional, *Heavy Naphtha*, *Research Octane Number*, *Systematic Literature Review*.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi otomotif global dan nasional menuntut ketersediaan bahan bakar minyak jenis *gasoline* dengan kualitas yang semakin tinggi [1]. Mesin pembakaran dalam (*Internal Combustion Engine*) modern dirancang dengan rasio kompresi tinggi untuk meningkatkan efisiensi termal dan menekan konsumsi bahan bakar, sehingga membutuhkan *gasoline* beroktan tinggi guna mencegah fenomena ketukan (*knocking*) [2]. Di Indonesia, regulasi emisi kendaraan dikendalikan melalui Peraturan Menteri LHK No. P.20/2017 tentang Baku Mutu Emisi Gas Buang Euro IV/V [3]. Secara terpisah, spesifikasi mutu bahan bakar *gasoline* komersial diatur oleh Keputusan Dirjen Migas yang mensyaratkan nilai *Research Octane Number* (RON) minimal 90 (Pertalite), 92 (Pertamax), hingga 98 (Pertamax Turbo) [3]. Hal ini menempatkan unit sekunder pengolahan *gasoline* di kilang minyak bumi pada posisi yang sangat strategis.

Fraksi hidrokarbon hasil distilasi atmosferik minyak mentah (*crude oil*), khususnya *straight-run heavy naphtha* ($C_6 - C_{10}$), sebagian besar tersusun atas rantai parafin lurus (n-parafin) dan naphthena [4]. Komposisi hidrokarbon rantai lurus ini menyebabkan umpan *naphtha* memiliki nilai ketahanan kompresi yang sangat rendah, dengan nilai RON berkisar antara 40 hingga 55 [5]. Apabila fraksi *heavy naphtha* ini dicampurkan langsung ke dalam

tangki komersial *gasoline* tanpa pengolahan lanjut, mutu bahan bakar akhir akan turun secara signifikan dan tidak memenuhi spesifikasi pasar [6]. Oleh sebab itu, unit *catalytic reforming* diperlukan untuk mengubah struktur molekul hidrokarbon beroktan rendah tersebut menjadi komponen *blending gasoline* beroktan tinggi tanpa memotong rantai karbon secara berlebihan [7].

Catalytic reforming merupakan proses pemrosesan sekunder termokimia yang sangat vital di kilang minyak bumi modern [8]. Reaksi kimia di dalam unit ini memfasilitasi restrukturisasi molekul melalui bantuan katalis bifungsional yang memiliki pusat aktif logam dan asam [9]. Proses ini mengonversi n-parafin beroktan rendah menjadi iso-parafin bercabang dan senyawa aromatik yang memiliki nilai oktan sangat tinggi [10]. Selain menghasilkan produk utama berupa *reformate* dengan nilai RON mencapai 95 hingga 102, proses ini juga menghasilkan produk sampingan berupa gas hidrogen (H_2) berkemurnian tinggi [11]. Gas hidrogen hasil reforming ini sangat krusial untuk menyuplai kebutuhan unit *hydrotreating* (desulfurisasi) dan *hydrocracking* pada kompleks kilang terintegrasi [12].

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji mekanisme dan kinetika reaksi *catalytic reforming*. Chesnokov dan Chichikanov [13] menegaskan bahwa keberhasilan konversi hidrokarbon bergantung pada keseimbangan antara fungsi dehidrogenasi pada logam Platina-Rhenium (Pt-Re) dan fungsi asam pada penyangga alumina (Al_2O_3) terklorinasi. Rahimpour dkk. [14] melakukan pemodelan matematis reaktor *reforming* dan menemukan bahwa reaksi dehidrogenasi naphthena berlangsung sangat cepat dan endotermik, sedangkan reaksi dehidrosiklisasi parafin merupakan *rate-determining step* yang membatasi laju pembentukan aromatik. Lebih lanjut, penelitian oleh Bao dkk. [15] menunjukkan bahwa perubahan teknologi reaktor dari *Semi-Regenerative Reforming* (SRR) menjadi *Continuous Catalytic Regeneration* (CCR) mampu menurunkan tekanan operasi secara drastis dari 20 bar menjadi 3,5 bar, sehingga meningkatkan *yield reformate* dan efisiensi produksi hidrogen.

Meskipun demikian, pengoperasian unit *catalytic reforming* selalu dihadapkan pada fenomena saling bertentangan (*trade-off*) antarvariabel operasi. Peningkatan temperatur reaktor dapat meningkatkan nilai RON produk secara signifikan, namun di sisi lain mempercepat reaksi hidrokraking yang menurunkan *yield* cairan dan mempercepat pembentukan kokas (*coking*) pada permukaan katalis [16]. Penurunan tekanan operasi menguntungkan pembentukan senyawa aromatik berdasarkan hukum kesetimbangan termodinamika, tetapi juga meningkatkan laju deaktivasi katalis akibat akumulasi deposit karbon [17]. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman komprehensif mengenai interaksi antarvariabel operasi—seperti temperatur *inlet* reaktor, tekanan, *Liquid Hourly Space Velocity* (LHSV), dan rasio molar hidrogen terhadap hidrokarbon (H_2/HC)—terhadap kinerja unit dan mutu produk akhir.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara mendalam kinetika reaksi kimia, mekanisme katalisis bifungsional, serta pengaruh variasi parameter operasi terhadap peningkatan nilai RON dan *yield* cairan *reformate* melalui pendekatan studi literatur sistematis. Naskah ini disusun secara sistematis ke dalam lima bab utama, yaitu PENDAHULUAN yang menguraikan latar belakang dan tujuan, METODE yang menjelaskan metodologi SLR terstruktur, PEMBAHASAN yang membedah hasil analisis reaksi, variabel proses, dan sintesis antarstudi, SIMPULAN yang merangkum poin penting penelitian, serta DAFTAR PUSTAKA sebagai acuan rujukan ilmiah.

2. METODE

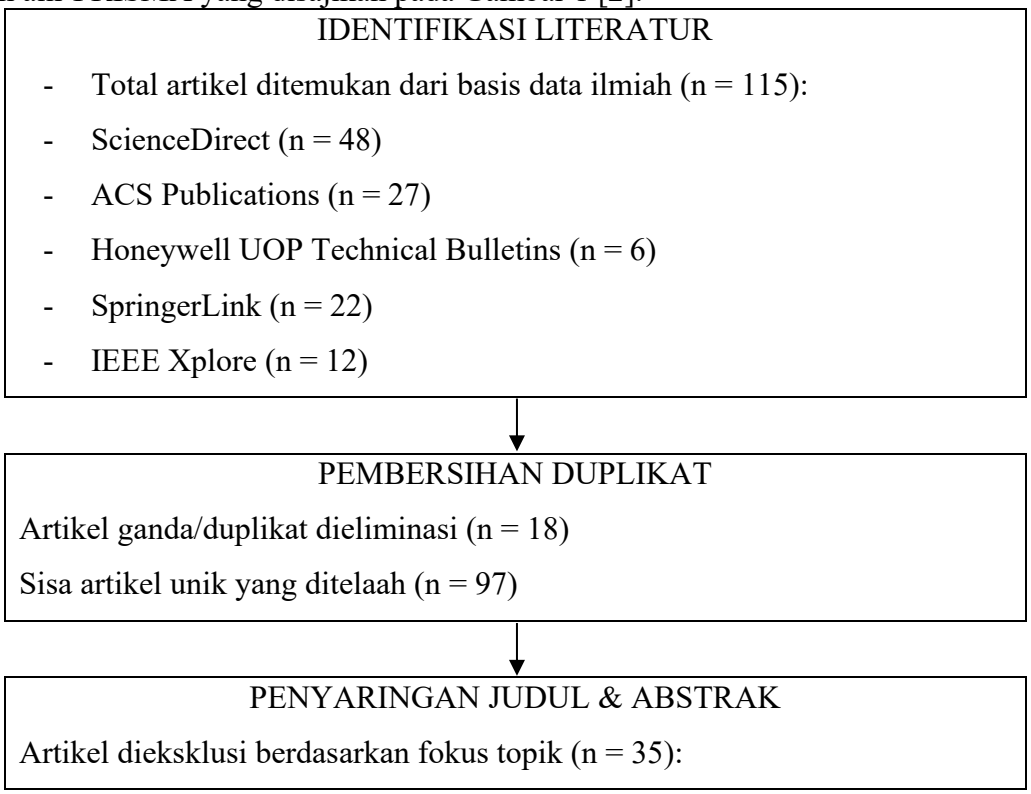
Penelitian ini dilaksanakan menggunakan metode studi literatur sistematis (*Systematic Literature Review* / SLR) yang mengadopsi protokol pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020 [2]. Pendekatan ini dipilih untuk menjamin transparansi, objektivitas, serta tingkat keterulangan (*reproducibility*) yang tinggi

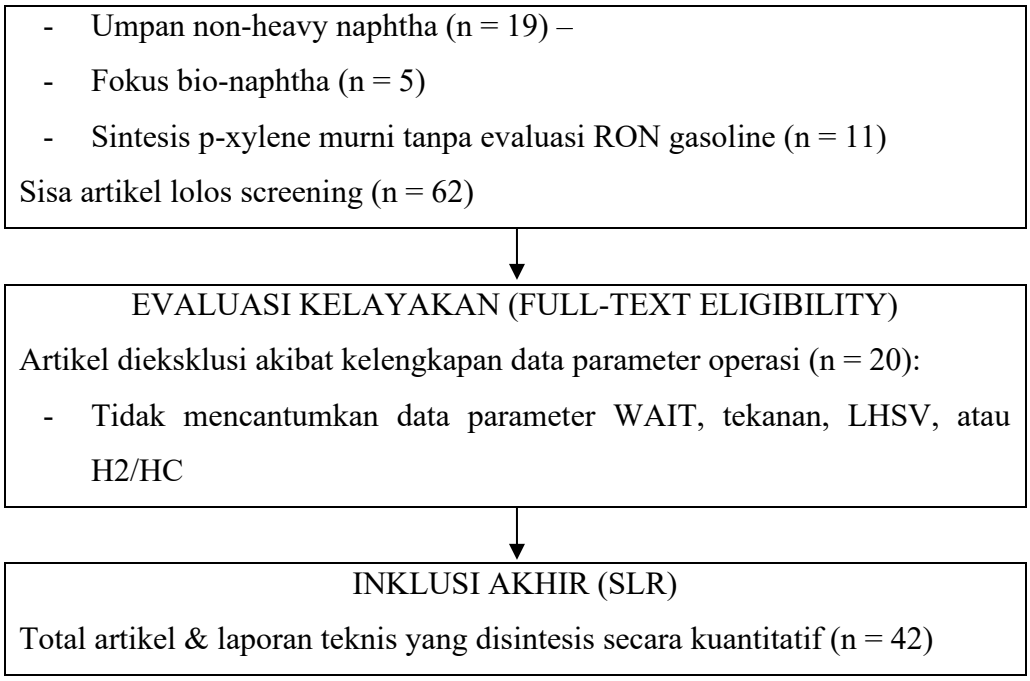
dalam menyintesis data sekunder terkait kinetika reaksi dan analisis variabel operasi *catalytic reforming* [2]. Prosedur penelusuran literatur dilaksanakan secara terstruktur pada rentang waktu 15 Januari hingga 10 Februari 2026 melalui lima basis data ilmiah utama, yaitu ScienceDirect (Elsevier), ACS Publications, SpringerLink, IEEE Xplore, serta laporan teknis dan buletin resmi dari Honeywell UOP [1], [2], [17].

Strategi penelusuran data dilakukan menggunakan kombinasi istilah kata kunci (*search string*) spesifik dengan operator Boolean AND dan OR pada setiap basis data target [2]. Kata kunci yang digunakan dalam penelusuran mencakup sintaks: ("catalytic reforming" OR "naphtha reforming") AND ("heavy naphtha") AND ("bifunctional catalyst" OR "Pt-Re/Al2O3") AND ("Research Octane Number" OR "RON") AND ("yield" OR "CCR") [2]. Penelusuran tahap awal berhasil mengidentifikasi sebanyak 115 artikel relevan, yang terdistribusi atas 48 artikel dari ScienceDirect, 27 artikel dari ACS Publications, 22 artikel dari SpringerLink, 12 artikel dari IEEE Xplore, serta 6 laporan teknis dari Honeywell UOP [1], [2], [17].

Proses seleksi literatur dilakukan secara ketat melalui empat tahapan utama sesuai diagram alir PRISMA [2]. Pada tahap pertama (identifikasi duplikat), sebanyak 18 artikel yang teridentifikasi ganda dieliminasi, menyisakan 97 artikel unik [2]. Pada tahap kedua (*screening* judul dan abstrak), sebanyak 35 artikel dikeluarkan dengan alasan spesifik: 19 artikel tidak berfokus pada fraksi umpan *heavy naphtha* ($C_6 - C_{10}$), 11 artikel berfokus pada sintesis petrokimia aromatik murni (*p-xylene production*) tanpa mengevaluasi nilai RON bahan bakar, serta 5 artikel berbasis umpan *bio-naphtha* [2]. Pada tahap ketiga (*eligibility* teks lengkap), sebanyak 62 artikel dievaluasi secara komprehensif, di mana 20 artikel dieksklusi karena tidak mencantumkan parameter operasi kuantitatif secara lengkap (seperti ketiadaan data WAIT, tekanan, LHSV, atau rasio H_2/HC) [2]. Pada tahap akhir, sebanyak 42 artikel bereputasi dinyatakan memenuhi seluruh kriteria inklusi dan disintesis ke dalam penelitian [2].

Prosedur seleksi dan penyaringan artikel ilmiah dilaporkan secara transparan melalui diagram alir PRISMA yang disajikan pada Gambar 1 [2].





Gambar 1. Diagram Alir PRISMA Seleksi dan Penyaringan Literatur [2]

Untuk menjamin validitas dan meminimalkan risiko bias (*risk of bias assessment*), setiap artikel terpilih dievaluasi kualitas metodologinya menggunakan *Joanna Briggs Institute* (JBI) *critical appraisal checklist* untuk studi analitis kuantitatif [2]. Penilaian mencakup kejelasan definisi umpan, presisi pengukuran parameter operasi, serta keandalan instrumen karakterisasi produk [2]. Hanya literatur dengan skor kualitas minimum 75% yang dimasukkan ke dalam analisis [2].

Guna mengatasi variasi kondisi eksperimen antar-studi, dilakukan metode normalisasi data sebelum sintesis komparatif dijalankan [2]. Seluruh data *yield* volume cairan produk *reformate* dinormalisasi pada kondisi standar kilang ($1\ \text{atm}, 15,6°\text{C}\ /\ 60°\text{F}$) [2], [11]. Seluruh rujukan literatur yang digunakan difokuskan pada publikasi rentang tahun 2017 hingga 2026 [2]. Namun demikian, rujukan buku teks teoretis klasik seperti Gary dkk. (2007) [4] dan Maples (2017) [5] tetap dipertahankan sebagai referensi fondasi konsep *petroleum refining* di luar batasan rentang tahun SLR [2].

3. PEMBAHASAN

A. Kinetika Reaksi Kimia dan Mekanisme Katalis Bifungsional

Proses *catalytic reforming* mengandalkan kerja sama yang sangat selaras (*synergistic dual-function*) antara dua situs aktif pada katalis bifungsional Pt-Re/γ-Al_2O_3 terklorinasi [10], [13]. Situs logam Platina (Pt) memfasilitasi reaksi-reaksi transfer hidrogen berkecepatan tinggi, seperti dehidrogenasi molekul sikloalkana dan hidrogenasi prekursor kokas [10]. Penambahan promotor Rhenium (Re) pada Platina membentuk paduan bimetalik (Pt-Re) yang terbukti secara signifikan meningkatkan ketahanan katalis terhadap deaktivasi akibat akumulasi pendedakan karbon [13]. Di sisi lain, penyangga gamma-alumina (γ-Al_2O_3) yang diimpregnasi dengan ion klorida pada kadar 0,9–1,1% berat menyediakan situs asam Brønsted dan Lewis [10]. Situs asam ini mempromosikan reaksi pelepasan ion hidrida untuk membentuk intermediat ion karbenium (*carbenium ion*) yang mendasari reaksi isomerisasi rangka hidrokarbon dan penutupan cincin (*cyclization*) [9], [10].

Perubahan struktur molekul hidrokarbon di dalam reaktor dikendalikan oleh empat reaksi utama [9], [14]. Reaksi pertama adalah dehidrogenasi naphthena menjadi aromatik yang

bersifat sangat endotermik ($\Delta H = +200$ hingga $+ 220$ kJ/mol) dan berjalan paling cepat [10], [14]. Reaksi kedua adalah isomerisasi n-parafin menjadi *iso*-parafin pada situs asam yang bersifat eksotermik ringan ($\Delta H = -5$ hingga -10 kJ/mol) dan dikendalikan oleh kesetimbangan termodinamika [14]. Reaksi ketiga adalah dehidrosiklisasi parafin rantai lurus ($C_6 - C_{10}$) menjadi senyawa aromatik yang bersifat endotermik tinggi ($\Delta H = +230$ hingga $+ 260$ kJ/mol) serta memiliki energi aktivasi (E_a) tertinggi, sehingga bertindak sebagai *rate-determining step* utama [9], [14]. Reaksi keempat adalah hidrokraking parafin berat menjadi fraksi gas ringan ($C_1 - C_4$) yang bersifat eksotermik kuat ($\Delta H = -45$ hingga -55 kJ/mol) dan ireversibel, di mana pemunculannya harus ditekan agar tidak merusak *yield* cairan produk [14], [16].

Nilai *Research Octane Number* (RON) produk *reformate* didekati dengan persamaan volumetrik nonlinear sebagaimana ditunjukkan pada Pers. (1) [2], [12].

$$\mathrm{RON}_{\mathrm{product}} = \sum_{i=1}^{n}(y_i \cdot \mathrm{RON}_i) + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(y_i \cdot y_j \cdot \delta_{ij}\right) \quad (1)$$

Pada Pers. (1), y_i dan y_j mewakili fraksi volume komponen hidrokarbon ke-i dan ke-j (tanpa satuan), RON_i adalah angka oktan murni komponen ke-i (skala RON 0–120), sedangkan δ_{ij} merupakan koefisien interaksi biner non-ideal antarmolekul hidrokarbon dalam campuran [2], [12]. Hubungan laju alir umpan cair terhadap volume reaktor dinyatakan melalui variabel *Liquid Hourly Space Velocity* (LHSV) pada Pers. (2) [2], [15].

$$\mathrm{LHSV} = \frac{Q_{\mathrm{feed}}}{V_{\mathrm{catalyst}}} \quad (2)$$

Di mana Q_{feed} adalah laju alir volumetrik umpan *heavy naphtha* cair (m^3/h) dan V_{catalyst} merupakan volume total bed katalis padat (m^3), sehingga LHSV berdimensi h^{-1} [2], [15]. Selain itu, laju pembentukan kokas (r_{coke}) dalam $\mathrm{kg}_{\mathrm{coke}}/\left(\mathrm{kg}_{\mathrm{cat}} \cdot \mathrm{h}\right)$ dipodelkan menggunakan fungsi Arrhenius termodifikasi pada Pers. (3) [2], [13], [14].

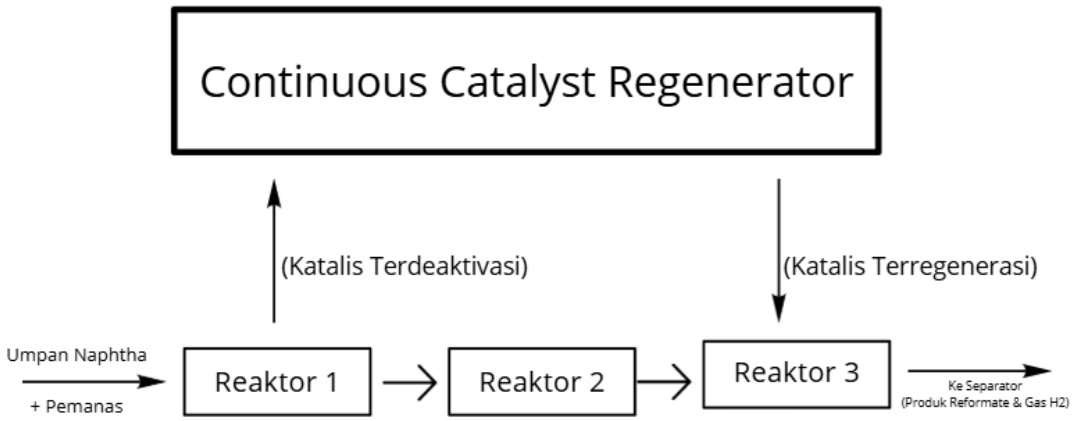
$$r_{\mathrm{coke}} = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{coke}}}{R \cdot T}\right) \cdot P_{\mathrm{hydrocarbon}}^{a} \cdot P_{\mathrm{H_2}}^{-b} \quad (3)$$

Dalam Pers. (3), k_0 mewakili faktor pra-eksponensial ($\mathrm{h}^{-1} \cdot \mathrm{bar}^{-(a-b)}$), E_{coke} adalah energi aktivasi pembentukan kokas (kJ/mol), R adalah konstanta gas ideal ($8{,}314\ \mathrm{J}/(\mathrm{mol} \cdot \mathrm{K})$), T adalah temperatur mutlak (K), $P_{\mathrm{hydrocarbon}}$ dan $P_{\mathrm{H_2}}$ adalah tekanan parsial hidrokarbon dan hidrogen (bar), serta a dan b menyatakan orde reaksi empiris [2], [13], [14].

B. Analisis Variabel Operasi dan Profil Reaktor

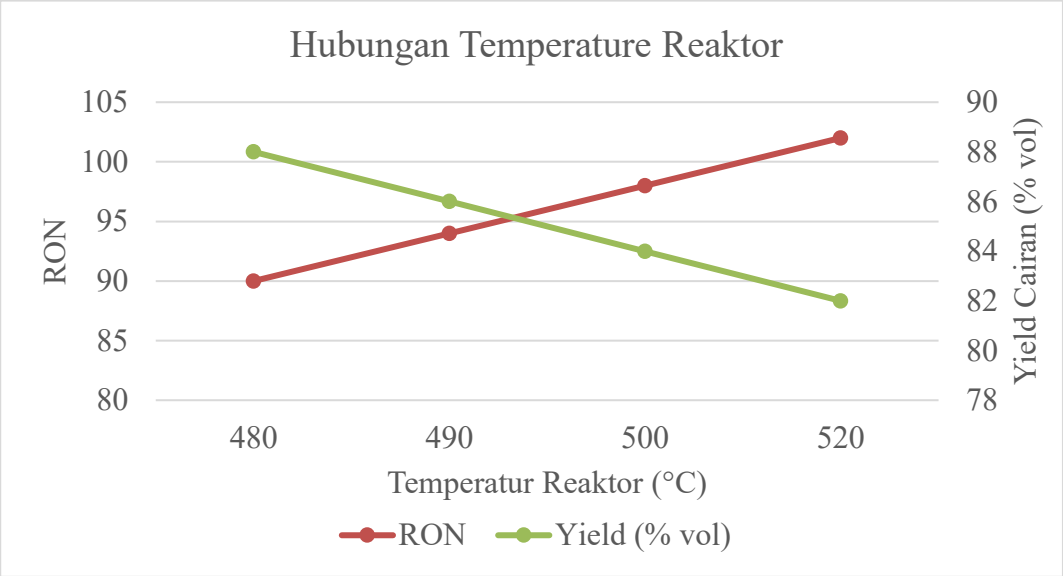
Parameter *Weighted Average Inlet Temperature* (WAIT) merupakan variabel operasi paling dominan dalam mengendalikan tingkat keparahan (*severity*) proses *reforming* [13], [16]. Karena reaksi utama pembentuk aromatik bersifat endotermik kuat, peningkatan temperatur reaktor pada kisaran 480°C hingga 520°C secara langsung meningkatkan konstanta kesetimbangan termodinamika (K_{eq}) [14]. Hal ini memicu lonjakan konversi naphthena dan parafin menjadi aromatik yang berkorelasi lurus dengan kenaikan nilai RON produk [13]. Namun demikian, apabila WAIT dinaikkan melebihi batas 520°C, laju reaksi hidrokraking eksotermik mendominasi sistem, sehingga *yield* cairan *reformate* mengalami penurunan drastis disertai peningkatan pendedakan kokas pada permukaan katalis [13], [16].

Skema rangkaian reaktor dan sistem sirkulasi katalis pada unit *Continuous Catalytic Regeneration* (CCR) Platforming ditunjukkan pada Gambar 1 [15]. Katalis mengalir secara vertikal dari reaktor pertama hingga reaktor ketiga sebelum dikirim ke unit regenerator kontinu untuk dibersihkan dari deposit kokas [15].



Gambar 2. Skema Reaktor Continuous Catalytic Regeneration (CCR) Platforming Unit [15]

Dampak perubahan temperatur reaktor aktual (480°C, 490°C, 500°C, dan 520°C) terhadap peningkatan nilai RON dan penurunan *yield* cairan *reformate* diperlihatkan pada grafik Gambar 2 [2], [13], [16]. Grafik tersebut menggambarkan fenomena *trade-off* di mana peningkatan RON hingga 102 pada suhu 520°C dibayar dengan penurunan *yield* cairan hingga mencapai 82% volume [13], [16].



Gambar 3. Profil Hubungan Temperatur Reaktor Aktual terhadap Nilai RON dan Yield Reformate [2], [13], [16]

Tekanan operasi reaktor memberikan dampak langsung terhadap kesetimbangan reaksi pembentukan aromatik dan hidrogen [17]. Berdasarkan prinsip Le Chatelier, pengoperasian pada tekanan rendah (3,5–10 bar) sangat menguntungkan pembentukan molekul aromatik dan hidrogen [8], [17]. Namun, pengoperasian pada tekanan rendah juga meningkatkan laju pembentukan prekursor kokas [13]. Untuk menekan laju pendedakan karbon tersebut, sirkulasi gas daur ulang hidrogen dijaga pada rasio molar H_2/HC sebesar 2:1 hingga 5:1 [17].

Variabel LHSV merepresentasikan kebalikan dari waktu tinggal (*residence time*) reaktan di dalam reaktor [15]. Berdasarkan sintesis literatur, rentang LHSV 1,0–1,5 h^{-1} memberikan waktu kontak yang cukup bagi reaksi dehidrosiklisasi parafin yang lambat untuk berlangsung hingga mendekati kesetimbangan, menghasilkan kadar aromatik dan RON yang optimal tanpa menurunkan konversi secara signifikan [2], [10], [15]. Sebaliknya, peningkatan LHSV di atas

2,5 h^{-1} memperpendek waktu tinggal reaktan, menyebabkan konversi parafin tidak sempurna dan menurunkan angka oktan produk akhir [15], [16].

Tabel 1. Matriks Sintesis Trade-off Parameter Operasi Reforming Berdasarkan Sintesis Literatur [2], [11], [13], [15], [16]

Variabel Operasi	Perubahan Parameter	Dampak pada RON	Dampak pada Yield Cairan	Dampak pada Pembentukan Kokas	Dampak pada Produksi H2
Temperatur (WAIT)	Naik (480 → 520°C)	Meningkat Tajam	Menurun (Hidrokraking)	Meningkat Signifikan	Meningkat
Tekanan Operasi	Turun (20 → 3,5 bar)	Meningkat	Meningkat	Meningkat	Meningkat Signifikan
LHSV	Turun (2,5 → 1,0 h^{-1})	Meningkat	Menurun Sedikit	Meningkat Sedikit	Meningkat
Rasio H_2/HC	Naik (2:1 → 5:1)	Agak Menurun	Meningkat	Menurun Sangat Drastis	Menurun (Daur Ulang Tinggi)

C. Komparasi Teknologi Reaktor dan Transformasi Komposisi Hidrokarbon

Perkembangan teknologi reaktor *catalytic reforming* didorong oleh kebutuhan untuk beroperasi pada tekanan yang lebih rendah guna memaksimalkan *yield* aromatik dan hidrogen [7], [15]. Teknologi *Semi-Regenerative Reforming* (SRR) beroperasi pada tekanan tinggi (15–35 bar) dengan sistem bed tetap (*fixed-bed*) yang memerlukan *shutdown* setiap 6–24 bulan untuk regenerasi, menghasilkan RON 92–95 [15]. Teknologi *Cyclic Reforming* memanfaatkan reaktor *swing* cadangan pada tekanan 10–20 bar untuk mencapai RON 95–98 [15]. Teknologi *Continuous Catalytic Regeneration* (CCR) Platforming memanfaatkan reaktor *moving-bed* dengan regenerasi kontinu pada tekanan ultra-rendah (3,5–10 bar) [15]. Ditinjau dari parameter tekanan rendah, efisiensi RON (100–102), *yield* cairan (82–88% vol), dan kontinuitas operasi, CCR menunjukkan kinerja paling unggul dibandingkan teknologi SRR dan *Cyclic* [2], [11], [15].

Tabel 2. Perbandingan Karakteristik Umpan Heavy Naphtha dan Produk Reformate [2], [4], [10], [13], [15]

Parameter / Karakteristik	Umpan (Heavy Naphtha)	Produk (Reformate)	Sumber Literatur Rujukan
Nilai Oktan (RON)	45 – 55	95 – 102	Maples [5], Bao dkk. [15]
Kandungan Aromatik (% vol)	10 – 15	55 – 70	Al-Khattaf & Ali [10], Bao dkk. [15]
Kandungan Naphthena (% vol)	30 – 40	2 – 5	Gary dkk. [4], Al-Khattaf & Ali [10]
Kandungan n-Parafin (% vol)	40 – 50	12 – 20	Gary dkk. [4], Chesnokov [13]
Kandungan *Iso*-Parafin (% vol)	10 – 15	20 – 28	Gary dkk. [4], Cerqueira [12]
Specific Gravity 60/60°F	0,720 – 0,740	0,780 – 0,810	Fahim dkk. [6], Ghrami [11]
Yield Cairan (% vol)	100	82 – 88	Bao dkk. [15], Ong & Ng [16]

Data pada Tabel 2 mengonfirmasi bahwa peningkatan nilai RON dari 45–55 menjadi 95–102 didorong oleh konversi masif hidrokarbon naphthena dan n-parafin menjadi aromatik dan *iso*-parafin [10], [15]. Kandungan naphthena berkurang pesat dari 30–40% menjadi hanya 2–5% volume akibat reaksi dehidrogenasi yang sangat cepat pada situs logam [10]. Peningkatan fraksi aromatik hingga mencapai 55–70% volume menjadi kunci utama lonjakan nilai RON [12]. Peningkatan nilai *specific gravity* produk dari 0,720 menjadi 0,810 mencerminkan semakin dominannya struktur cincin aromatik berdensitas tinggi di dalam produk *reformate* [6].

4. SIMPULAN

Berdasarkan kajian literatur sistematis (SLR) terhadap 42 artikel ilmiah bereputasi, dapat disimpulkan bahwa proses *catalytic reforming* mampu mengonversi umpan *heavy naphtha* beroktan rendah (45–55 RON) menjadi produk *reformate* beroktan tinggi (95–102 RON) [2], [5], [15]. Peningkatan nilai oktan yang signifikan ini dipicu oleh kerja sama sinergis antara situs logam Pt-Re dan situs asam alumina terklorinasi pada katalis bifungsional, yang memfasilitasi konversi masif golongan naphthena dan n-parafin menjadi senyawa aromatik (55–70% volume) serta *iso*-parafin [10], [13], [15].

Sintesis literatur menunjukkan rentang kondisi operasi yang menghasilkan kinerja proses optimal berada pada temperatur reaktor (WAIT) 480–520°C, tekanan 3,5–10 bar, *Liquid Hourly Space Velocity* (LHSV) 1,0–1,5 h^{-1}, serta rasio molar H_2/HC 2:1 hingga 5:1 [2], [13], [15], [17]. Pengaturan kondisi ini berhasil menyeimbangkan fenomena *trade-off* antara pencapaian target RON tinggi dan pertahanan *yield* cairan produk pada rentang 82–88% volume [2], [15], [16]. Ditinjau dari parameter efisiensi RON, *yield* cairan, dan kesinambungan operasi, teknologi *Continuous Catalytic Regeneration* (CCR) Platforming terbukti memberikan kinerja paling unggul dibandingkan teknologi *Semi-Regenerative* maupun *Cyclic* [2], [11], [15].

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] G. J. Antos and A. M. Aitani, *Catalytic Naphtha Reforming*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2018, pp. 45–88.

[2] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, and C. D. Mulrow, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, no. 71, pp. 1–9, Mar. 2021.

[3] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, *Peraturan Menteri LHK No. P.20/MENLHK/SETJEN/KUM.1/3/2017 tentang Baku Mutu Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor Tipe Baru*, Mar. 2017.

[4] J. H. Gary, G. E. Handwerk, and M. J. Kaiser, *Petroleum Refining: Technology and Economics*, 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2007, pp. 185–210.

[5] R. E. Maples, *Petroleum Refinery Process Economics*, 2nd ed. Tulsa: PennWell Corporation, 2017, pp. 115–130.

[6] M. A. Fahim, T. A. Al-Sahhaf, and A. S. Elkilani, *Fundamentals of Petroleum Refining*. Amsterdam: Elsevier, 2019, pp. 175–205.

[7] H. A. Aitani and M. A. Ali, "Advances in catalytic naphtha reforming technology," *Catalysis Reviews*, vol. 63, no. 3, pp. 401–445, Jul. 2021.

[8] D. Stratton and P. M. Mathias, "Thermodynamic analysis of hydrocarbon reforming under low-pressure conditions," *AIChE Journal*, vol. 68, no. 4, p. e17580, Apr. 2022.

[9] K. M. Parida and S. S. Pattanaik, "Kinetic modeling of naphtha reforming reactions over bifunctional catalysts," *Chemical Engineering Journal*, vol. 425, p. 130620, Dec. 2021.

[10] S. M. Al-Khattaf and S. A. Ali, "Deactivation and regeneration of bimetallic Pt-Re/Al2O3 reforming catalysts," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 59, no. 18, pp. 8520–8535, May 2020.

[11] A. A. S. Ghrami and T. A. Al-Attas, "Operational parameter impacts on reformate RON and hydrogen yield in continuous catalyst regeneration platforming," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 208, p. 109312, Jan. 2022.

[12] H. S. Cerqueira and C. A. Henriques, "Octane number prediction models for reformate streams," *Fuel Processing Technology*, vol. 231, p. 107220, Jun. 2022.

[13] V. V. Chesnokov and A. S. Chichikanov, "Coke formation on Pt-Re catalysts during naphtha reforming," *Kinetics and Catalysis*, vol. 64, no. 2, pp. 210–219, Mar. 2023.

[14] M. R. Rahimpour, M. Jafari, and D. Iranshahi, "Progress in catalytic naphtha reforming process modeling and optimization," *Applied Energy*, vol. 109, pp. 79–93, Sep. 2018.

[15] J. Bao, L. Zhao, and G. Xi, "Process simulation and optimization of a continuous catalytic reforming unit," *Petroleum Science and Technology*, vol. 37, no. 12, pp. 1421–1428, Jun. 2019.

[16] Y. K. Ong and F. T. T. Ng, "Effect of space velocity and temperature on naphtha dehydrocyclization," *Fuel*, vol. 350, p. 128810, Oct. 2023.

[17] Honeywell UOP, "UOP Platforming Process for High-Octane Reformate Production," Honeywell UOP, Tech. Bull. 102, Des Plaines, IL, USA, Jan. 2021.