PENGARUH RASIO *STEAM-TO-CARBON* TERHADAP KONVERSI METANA PADA *STEAM METHANE REFORMING* BERBASIS *LIQUEFIED NATURAL GAS* (LNG)

Kaori Hermin Alifia[1], Rizka Anggara Al-Fariz Zein Lubis[1], Ahmad Zahro Ilmi[1], Ratnaduhita Renata Susanto[1], Dzakiy Al Hafiz[1], Asa Aditya Persada[1*]

[1] Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Eenergi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora, 58315

**E-mail*: asa.aditya.persada@gmail.com

ABSTRAK

Steam Methane Reforming (SMR) merupakan salah satu proses yang dapat digunakan untuk mengonversi metana menjadi gas sintesis melalui reaksi dengan steam. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi rasio steam-to-carbon (S/C) pada kondisi desain proses SMR berbasis *Liquefied Natural Gas* (LNG) serta kaitannya dengan konversi metana. Metode penelitian dilakukan melalui simulasi perancangan proses menggunakan data umpan LNG dan *steam* pada kondisi desain yang ditetapkan. Berdasarkan perhitungan neraca mol, rasio S/C pada kondisi desain diperoleh sebesar 3,15 mol/mol. Pada keluaran reaktor Primary SMR, laju metana menurun dari 1.365,8428 ton/hari menjadi 415,2815 ton/hari, yang menunjukkan konversi metana sebesar 69,60%. Hasil tersebut menggambarkan kinerja proses pada satu kondisi desain dan belum menunjukkan rasio S/C optimum karena belum dilakukan perbandingan terhadap beberapa variasi rasio S/C. Oleh karena itu, evaluasi lebih lanjut melalui simulasi pada berbagai rasio S/C diperlukan untuk menentukan pengaruhnya terhadap konversi metana.

Kata kunci: LNG, *Steam Methane Reforming*, *Steam-to-Carbon*, konversi metana, metanol

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan metanol di Indonesia terus mengalami peningkatan sejalan dengan berkembangnya berbagai sektor industri, terutama industri kimia, petrokimia, manufaktur, dan energi. Pada tahun 2025, kebutuhan metanol dalam negeri diperkirakan mencapai sekitar 2,65 juta ton per tahun dan jumlah tersebut diproyeksikan meningkat menjadi 4,68 juta ton per tahun pada tahun 2030. Peningkatan kebutuhan ini belum diimbangi dengan kemampuan produksi dalam negeri. Saat ini, kapasitas produksi metanol nasional hanya sekitar 660.000 ton per tahun dan masih bergantung pada satu produsen lokal. Kondisi tersebut menyebabkan adanya kesenjangan antara kebutuhan dan ketersediaan metanol (*supply gap*) yang diperkirakan mencapai 2,70 juta ton per tahun. Kekurangan tersebut pada akhirnya harus ditutupi melalui impor untuk memenuhi kebutuhan industri di dalam negeri[1].

Di sisi lain, Indonesia memiliki sumber daya gas alam yang cukup besar dan dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku alternatif untuk meningkatkan produksi metanol nasional. Salah satu bentuk pemanfaatan gas alam tersebut adalah melalui *Liquefied Natural Gas* (LNG), dengan kapasitas produksi nasional yang mencapai sekitar 29,31 juta ton per tahun. Ketersediaan sumber daya tersebut memberikan peluang untuk mengembangkan industri metanol berbasis gas alam sekaligus mendukung program hilirisasi. Dengan mengolah gas alam menjadi produk bernilai tambah seperti metanol, ketergantungan terhadap impor dapat dikurangi dan pemanfaatan sumber daya gas alam di dalam negeri menjadi lebih optimal[1], [2].

Dalam proses produksi metanol, gas alam terlebih dahulu dapat diolah menjadi gas sintesis (*syngas*) yang terdiri dari hidrogen (H_2), karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida (CO_2). Salah satu teknologi yang banyak digunakan secara komersial untuk menghasilkan syngas tersebut adalah *Steam Methane Reforming* (SMR)[3]. Pada proses ini, metana (CH_4) direaksikan dengan uap air (*steam*) pada temperatur tinggi dengan bantuan katalis, umumnya berbasis nikel[4]. Kinerja proses reforming sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi yang digunakan, salah satunya adalah rasio molekuler *Steam-to-Carbon* (S/C)[4], [5].

Rasio S/C menunjukkan perbandingan jumlah mol uap terhadap jumlah mol karbon dalam umpan hidrokarbon. Nilai rasio ini perlu diperhatikan karena tidak hanya memengaruhi konversi metana, tetapi juga berkaitan dengan kondisi kesetimbangan reaksi, konsumsi energi, dan kondisi katalis selama proses berlangsung[4], [6]. Penggunaan rasio S/C yang terlalu rendah dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya coking, yaitu terbentuknya deposit karbon pada permukaan katalis berbasis nikel seperti Ni/Al_2O_3. Penumpukan karbon tersebut dapat menurunkan aktivitas katalis dan menghambat perpindahan panas di dalam tube reformer. Jika kondisi ini berlangsung terus-menerus, temperatur lokal dapat meningkat dan berpotensi menyebabkan kerusakan atau kegagalan pada pipa reaktor (*tube failure*)[7], [8].

Sebaliknya, penggunaan rasio S/C yang terlalu tinggi juga tidak selalu memberikan hasil yang lebih baik. Jumlah steam yang berlebihan menyebabkan kebutuhan energi untuk menghasilkan dan memanaskan uap menjadi lebih besar. Selain itu, beban panas pada reformer meningkat dan aliran yang lebih besar dapat memengaruhi ukuran maupun kapasitas peralatan pada unit downstream. Oleh karena itu, diperlukan penentuan rasio S/C yang tepat agar proses reforming dapat berlangsung secara efektif tanpa meningkatkan konsumsi energi dan beban peralatan secara berlebihan[5], [9], [10].

Penelitian mengenai Steam Methane Reforming (SMR) telah banyak dilakukan dengan mengevaluasi pengaruh temperatur, tekanan, dan rasio steam-to-carbon (S/C) terhadap konversi metana serta pembentukan hidrogen. Analisis kesetimbangan termodinamika oleh peneliti terdahulu menunjukkan bahwa rasio S/C dapat memengaruhi komposisi kesetimbangan, konversi metana, dan kecenderungan pembentukan karbon pada proses[11]. Kajian tersebut menjadi dasar untuk memahami pentingnya rasio S/C dalam evaluasi proses SMR. Namun, evaluasi yang menggunakan data komposisi umpan LNG dan kondisi desain perancangan pabrik perlu mempertimbangkan karakteristik umpan serta kondisi operasi yang digunakan. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada [evaluasi kondisi desain SMR berbasis LNG / analisis pengaruh variasi rasio S/C terhadap konversi metana], sesuai dengan ruang lingkup simulasi yang dilakukan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi rasio *Steam-to-Carbon* (S/C) pada proses *Steam Methane Reforming* terhadap kinerja produksi syngas sebagai bahan baku sintesis metanol. Analisis difokuskan pada pengaruh rasio S/C terhadap konversi metana pada *Primary Reformer*, pembentukan *Stoichiometric Number* (SN) *syngas*, serta kaitannya dengan yield dan kemurnian metanol Grade AA yang dihasilkan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai rasio S/C yang sesuai untuk memperoleh *syngas* dengan karakteristik yang mendukung proses sintesis metanol, dengan tetap mempertimbangkan efisiensi energi dan keandalan proses[2], [4], [5].

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode perancangan rekayasa proses (*process design*) yang dilakukan melalui simulasi dan perhitungan proses. Tahap awal penelitian dimulai dengan studi literatur dan pengumpulan data sekunder sebagai dasar dalam menentukan kondisi operasi dan merancang proses produksi metanol. Data yang digunakan meliputi kapasitas dan komposisi

umpan LNG, kondisi operasi, jenis katalis, serta data pendukung lainnya yang berkaitan dengan proses produksi metanol menggunakan teknologi *Steam Methane Reforming* (SMR).

Pemodelan proses dilakukan menggunakan perangkat lunak Aspen HYSYS V14 untuk mengevaluasi neraca massa dan kinerja proses SMR berbasis LNG. Data komposisi dan laju alir umpan LNG serta *steam* dimasukkan berdasarkan basis data perancangan yang telah ditetapkan. Reaktor SMR menggunakan konfigurasi *multi-bed*, yaitu beberapa tahap reaksi yang dilengkapi dengan pendinginan antar tahap (*intercooling*) untuk mengatur temperatur aliran sebelum memasuki tahap reaksi berikutnya. Reaksi utama yang menjadi dasar proses SMR adalah reaksi reforming metana yang bersifat endotermik, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2 \quad (1)$$

Simulasi digunakan untuk memperoleh kondisi aliran proses dan komposisi keluaran reaktor yang selanjutnya menjadi dasar dalam perhitungan konversi metana.

LNG yang digunakan dalam perancangan memiliki kapasitas 1.877,66 ton/hari. Dalam simulasi, LNG terlebih dahulu diregasifikasi dan dipanaskan, kemudian dicampurkan dengan *steam* sebelum memasuki proses reforming. Rasio *Steam-to-Carbon* (S/C) ditentukan berdasarkan perbandingan jumlah mol *steam* terhadap jumlah mol atom karbon dalam umpan hidrokarbon. Berdasarkan basis data perancangan, rasio S/C yang digunakan sebesar 3,15 mol/mol. Nilai tersebut merupakan rasio pada kondisi desain yang dievaluasi dan tidak dinyatakan sebagai rasio optimum karena belum dilakukan perbandingan terhadap beberapa variasi rasio S/C.

Kinerja *Primary Reformer* dievaluasi berdasarkan konversi metana (CH_4) yang dihitung melalui perbandingan laju mol metana pada umpan dan keluaran reaktor. Perhitungan konversi metana ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$X_{CH_4} = \left[\frac{F_{in} - F_{out}}{F_{in}}\right] x100\% \quad (2)$$

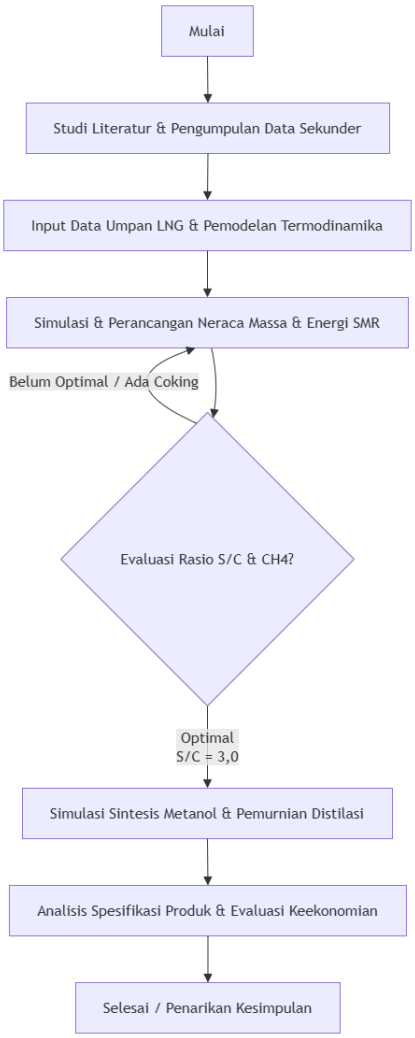
Keterangan:

X_{CH_4} = konversi metana (%);

F_{in} = laju mol metana pada umpan reaktor;

F_{out} = laju mol metana pada keluaran reaktor.

Selanjutnya, *syngas* yang dihasilkan dari *Primary Reformer* dialirkan menuju *Water Gas Shift Reactor* (WGS) untuk menyesuaikan komposisi gas sebelum digunakan pada proses berikutnya. Alur proses penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Proses Penelitian

Tahap akhir penelitian difokuskan pada analisis hasil simulasi dan evaluasi kinerja proses berdasarkan kondisi desain yang digunakan. Parameter utama yang dianalisis adalah konversi metana pada *Primary Reformer*. Hasil simulasi berupa laju alir dan komposisi metana pada umpan serta keluaran reaktor digunakan untuk menentukan tingkat konversi metana. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi kinerja proses SMR berbasis LNG berdasarkan kondisi operasi dan rasio S/C pada basis perancangan yang telah ditetapkan.

3. PEMBAHASAN

A. Pengaruh Rasio *Steam-to-Carbon* (S/C) terhadap Proses Steam Methane Reforming

Proses *Steam Methane Reforming* (SMR) merupakan proses konversi hidrokarbon, terutama metana (CH_4), dengan menggunakan uap air (H_2O) untuk menghasilkan gas sintesis yang terdiri atas hidrogen (H_2) dan karbon monoksida (CO). Pada penelitian ini, proses reformasi berlangsung di dalam Primary Reformer R-101 pada temperatur 850 °C dan tekanan 65 bar. Bahan baku yang digunakan berasal dari LNG dengan komponen utama berupa metana, etana (C_2H_6), dan propana (C_3H_8).

Reaksi utama yang terjadi pada proses SMR dapat dituliskan sebagai berikut:

$$CH_4(g) + H_2O(g) \rightleftharpoons CO(g) + 3H_2(g) \quad (3)$$

Selain reaksi utama tersebut, sebagian karbon monoksida yang terbentuk dapat bereaksi dengan uap air melalui reaksi *Water-Gas Shift* (WGS), sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$CO(g) + H_2O(g) \rightleftharpoons CO_2(g) + H_2(g) \quad (4)$$

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan Aspen HYSYS V14, laju alir uap air yang masuk ke Primary Reformer sebesar 4.826,75 ton/hari, sedangkan komponen hidrokarbon yang masuk terdiri atas 1.365,84 ton/hari CH_4, 330,77 ton/hari C_2H_6, dan 181,06 ton/hari C_3H_8. Pada kondisi desain yang digunakan, rasio *Steam-to-Carbon* (S/C) tercatat sebesar 3,0 mol/mol. Hasil simulasi menunjukkan bahwa laju alir CH_4 pada keluaran Primary Reformer mengalami penurunan menjadi 415,28 ton/hari. Berdasarkan perubahan laju alir tersebut, konversi metana yang diperoleh sebesar 69,60%.

Penurunan jumlah metana pada keluaran reformer menunjukkan bahwa sebagian metana telah bereaksi selama proses reformasi. Penambahan uap air berperan dalam menyediakan reaktan untuk berlangsungnya reaksi SMR. Selain itu, karena reaksi utama SMR bersifat endotermis dan menghasilkan lebih banyak mol gas pada sisi produk, peningkatan temperatur serta perubahan komposisi reaktan dapat memengaruhi kesetimbangan reaksi. Berdasarkan prinsip Le Chatelier, keberadaan uap air dalam jumlah yang memadai dapat mendorong reaksi reformasi ke arah pembentukan produk, bergantung pada kondisi operasi yang diterapkan.
Rasio S/C juga berkaitan dengan pembentukan karbon (*coking*) pada permukaan katalis. Pembentukan karbon dapat terjadi melalui beberapa reaksi, antara lain dekomposisi metana dan reaksi Boudouard. Reaksi tersebut ditunjukkan pada Persamaan (3) dan (4).

$$CH_4(g) \rightleftharpoons C(s) + 2H_2(g) \quad (5)$$

$$2CO(g) \rightleftharpoons C(s) + CO_2(g) \quad (6)$$

Karbon yang terbentuk pada permukaan katalis dapat menghambat aktivitas katalitik dan menurunkan kinerja reformer. Keberadaan uap air dapat membantu mengurangi akumulasi karbon melalui reaksi gasifikasi karbon (*carbon gasification*), sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (5).

$$C(s) + H_2O(g) \rightleftharpoons CO(g) + H_2(g) \quad (7)$$

Dengan demikian, pengaturan rasio S/C menjadi salah satu faktor penting dalam proses SMR karena berkaitan dengan ketersediaan reaktan, pembentukan hidrogen, serta potensi pembentukan karbon pada katalis. Meskipun demikian, hasil penelitian ini hanya menunjukkan kondisi operasi pada satu nilai S/C, yaitu 3,0 mol/mol. Oleh karena itu, nilai tersebut belum dapat dinyatakan sebagai rasio S/C optimum dan belum dapat digunakan untuk menggambarkan hubungan perubahan rasio S/C terhadap konversi metana secara menyeluruh.
Gas hasil reformasi selanjutnya mengalami proses *Water-Gas Shift* pada reaktor R-102. Pada tahap ini, CO bereaksi dengan H_2O untuk menghasilkan CO_2 dan tambahan H_2. Komposisi gas sintesis yang dihasilkan dapat dievaluasi menggunakan parameter *Stoichiometric Number* (SN), yang dihitung menggunakan Persamaan (6).

$$SN = (nH_2 - nCO_2)/(nCO + nCO_2) \quad (8)$$

3.2 Proses Sintesis dan Pemurnian Metanol

Gas sintesis yang dihasilkan dari proses reformasi dan *Water-Gas Shift* selanjutnya digunakan sebagai umpan pada reaktor sintesis metanol R-103. Reaktor yang digunakan merupakan jenis *Boiling Water Reactor* (BWR) dengan katalis $Cu/ZnO/Al_2O_3$. Proses sintesis metanol berlangsung pada temperatur 225 °C dan tekanan 68 bar. Pembentukan metanol berlangsung melalui reaksi hidrogenasi karbon monoksida dan karbon dioksida. Reaksi pembentukan metanol dari karbon monoksida ditunjukkan pada Persamaan (7), sedangkan reaksi pembentukan metanol dari karbon dioksida ditunjukkan pada Persamaan (8).

$$CO(g) + 2H_2(g) \rightleftharpoons CH_3OH(g) \quad (9)$$

$$CO_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons CH_3OH(g) + H_2O(g) \quad (10)$$

Kedua reaksi tersebut menunjukkan bahwa hidrogen berperan sebagai reaktan utama dalam pembentukan metanol. Komposisi gas sintesis, terutama perbandingan antara H_2, CO, dan CO_2, menjadi faktor yang memengaruhi proses sintesis. Pada kondisi operasi yang digunakan, hasil simulasi menunjukkan bahwa proses sintesis menghasilkan metanol yang selanjutnya dialirkan menuju tahapan pemurnian.

Pemurnian metanol dilakukan melalui dua tahapan distilasi, yaitu *Light Ends Column* C-101 dan *Refining Column* C-102. Kolom C-101 berfungsi memisahkan komponen-komponen ringan yang masih terkandung dalam aliran produk, sedangkan kolom C-102 digunakan untuk meningkatkan kemurnian metanol dengan memisahkannya dari komponen yang memiliki volatilitas lebih rendah, terutama air.

Berdasarkan hasil simulasi, laju produksi metanol yang diperoleh sebesar 2.121,21 ton/hari atau setara dengan 700.000 ton/tahun berdasarkan kapasitas produksi yang direncanakan. Produk metanol memiliki kemurnian sebesar 99,85% berat, dengan kandungan air sebesar 0,0001% berat dan nilai warna APHA ≤ 5. Hasil tersebut menunjukkan bahwa produk yang dihasilkan telah memenuhi spesifikasi kemurnian yang ditetapkan dalam rancangan proses.

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa rasio S/C memiliki pengaruh terhadap kinerja proses sejak tahap reforming. Rasio S/C sebesar 3,0 memberikan kondisi yang cukup baik untuk mencapai konversi CH_4 sebesar 69,6% secara per-pass sekaligus membantu mengurangi pembentukan karbon pada katalis. Selain itu, kondisi *reforming* yang diperoleh menghasilkan *syngas* dengan SN sebesar 2,05 setelah melalui tahap WGS. Komposisi tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk proses sintesis metanol pada unit berikutnya.

B. Performa Sintesis dan Pemurnian Metanol

Syngas yang telah melalui tahap reforming dan penyesuaian komposisi kemudian dialirkan menuju *Methanol Synthesis Reactor* (R-103). Reaktor ini menggunakan tipe *Boiling Water Reactor* (BWR) dengan katalis $Cu/ZnO/Al_2O_3$. Kondisi operasi yang digunakan adalah temperatur 225 °C dan tekanan 68 bar. Pada tahap ini, komponen utama dalam *syngas*, terutama CO, CO_2, dan H_2, mengalami reaksi untuk membentuk metanol.

Pembentukan metanol dari karbon monoksida dapat dituliskan sebagai berikut:

$$CO(g) + 2H_2(g) \rightleftharpoons CH_3OH(l) \qquad \Delta H° < 0 \quad (11)$$

Selain melalui reaksi dengan CO, metanol juga dapat terbentuk melalui reaksi hidrogenasi CO_2:

$$CO_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons CH_3OH(l) + H_2O(g) \qquad \Delta H° < 0 \quad (12)$$

Kedua reaksi tersebut bersifat eksotermis, sehingga panas akan dilepaskan selama pembentukan metanol. Kondisi temperatur dan tekanan pada reaktor perlu dijaga agar reaksi dapat berlangsung secara efektif dengan tetap mempertimbangkan kinerja katalis. Penggunaan katalis $Cu/ZnO/Al_2O_3$ membantu mempercepat reaksi pembentukan metanol sehingga proses dapat berlangsung pada kondisi operasi yang sesuai. Produk yang keluar dari Methanol *Synthesis Reactor* belum berupa metanol murni. Aliran tersebut masih mengandung metanol, air, gas yang belum bereaksi, serta komponen ringan dan komponen lainnya. Oleh karena itu, diperlukan tahap pemurnian untuk memisahkan metanol dari komponen-komponen tersebut.

Tahap pemurnian dilakukan menggunakan dua kolom distilasi, yaitu *Light Ends Column* (C-101) dan *Refining Column* (C-102). Pada *Light Ends Column*, komponen-komponen ringan dan gas yang masih terlarut dalam crude methanol dipisahkan terlebih dahulu. Tahap ini bertujuan untuk mengurangi kandungan komponen ringan sebelum aliran masuk ke kolom pemurnian berikutnya. Selanjutnya, aliran dari C-101 diteruskan menuju *Refining Column* (C-

102). Pada kolom ini dilakukan pemisahan lebih lanjut antara metanol dengan air dan komponen yang memiliki titik didih lebih tinggi. Proses pemisahan tersebut menghasilkan produk metanol dengan kemurnian yang lebih tinggi sesuai dengan spesifikasi Grade AA.

Berdasarkan hasil neraca massa, jumlah metanol yang diperoleh dari proses pemurnian mencapai 2.121,21 ton/hari. Jika operasi berlangsung selama satu tahun, kapasitas tersebut setara dengan sekitar 700.000 ton/tahun. Nilai ini menunjukkan bahwa rangkaian proses yang dirancang mampu menghasilkan metanol dalam jumlah yang cukup besar dari bahan baku LNG dan steam. Secara keseluruhan, neraca massa proses produksi metanol menunjukkan distribusi aliran bahan dari umpan hingga produk akhir. Umpan utama berupa LNG dan steam memiliki total laju alir sebesar 6.704,41 ton/hari. Dari jumlah tersebut, aliran keluar terbagi menjadi flue gas atau off-gas sebesar 3.472,35 ton/hari, produk metanol sebesar 2.121,21 ton/hari, dan wastewater sebesar 29,11 ton/hari.

Tabel 1. Ringkasan Neraca Massa Total Pabrik Metanol (Ton/Hari)

Komponen	Feed LNG + Steam	Flue Gas (Off-Gas)	Produk Metanol	Wastewater
H_2O	4.826,75	3.471,09	0,003	29,06
CH_4	1.365,84	0,14	0,00	0,00
C_2H_6	330,77	0,00	0,00	0,00
C_3H_8	181,06	0,00	0,00	0,00
CO	0,00	0,00	0,00	0,00
CO_2	0,00	1,12	0,00	0,00
H_2	0,00	0,00	0,00	0,00
CH_3OH	0,00	0,00	2.121,21	0,05
Total	**6.704,41**	**3.472,35**	**2.121,21**	**29,11**

Hasil pemurnian pada *Refining Column* (C-102) menunjukkan bahwa produk metanol yang diperoleh memiliki laju produksi sebesar 2.121,21 ton/hari atau sekitar 700.000 ton/tahun. Selain jumlah produk, kualitas metanol juga menjadi salah satu parameter penting dalam menilai keberhasilan proses perancangan. Produk akhir yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan spesifikasi metanol Grade AA.

Berdasarkan hasil perancangan, metanol yang dihasilkan memiliki kemurnian sebesar 99,85% berat. Nilai tersebut telah memenuhi batas kemurnian yang ditetapkan untuk Grade AA, yaitu minimal 99,85% berat. Kandungan air yang diperoleh juga sangat rendah, yaitu sebesar 0,0001% berat, sehingga masih berada jauh di bawah batas maksimum 0,10% berat. Dari segi penampakan, produk metanol yang dihasilkan berupa cairan tidak berwarna dan memiliki nilai warna yang memenuhi persyaratan, yaitu APHA $\leq$ 5. Dengan demikian, berdasarkan parameter yang dianalisis, produk hasil perancangan telah memenuhi spesifikasi mutu yang ditargetkan sebagai metanol Grade AA.

Tabel 2. Spesifikasi Mutu Produk Metanol Hasil Perancangan

Parameter Kualitas	Spesifikasi Target (Grade AA)	Hasil Perancangan
Kemurnian CH_3OH	$\geq$ 99,85% berat	99,85% berat
Kadar Air H_2O	$\leq$ 0,10% berat	0,0001% berat
Warna	Jernih, APHA $\leq$ 5	Jernih ($\leq$ 5)
Wujud Fisik	Cairan tidak berwarna	Cairan tidak berwarna

Berdasarkan keseluruhan hasil tersebut, penggunaan rasio S/C sebesar 3,0 pada *Primary Reformer* memberikan kondisi yang cukup baik untuk proses produksi syngas. Rasio tersebut membantu mempertahankan konversi metana sekaligus mengurangi potensi pembentukan

karbon pada katalis. *Syngas* yang dihasilkan kemudian dapat dikondisikan melalui WGS *Reactor* hingga mencapai nilai SN sekitar 2,05, yang sesuai untuk kebutuhan sintesis metanol. Selanjutnya, proses sintesis dan pemurnian menghasilkan metanol sebesar 2.121,21 ton/hari dengan kemurnian 99,85% berat. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rangkaian proses yang dirancang mampu menghasilkan produk metanol dengan kapasitas dan kualitas yang sesuai dengan target perancangan.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan analisis yang telah dilakukan, penggunaan rasio *Steam-to-Carbon* (S/C) sebesar 3,0 pada unit *Steam Methane Reforming* (SMR) dengan kondisi operasi 850 °C dan tekanan 65 bar memberikan hasil yang baik terhadap proses reforming. Pada kondisi tersebut, konversi metana dalam *Primary Reformer* mencapai sekitar 69,6% dalam satu kali lintasan, sekaligus membantu mengurangi potensi terbentuknya deposit karbon (*coking*) pada katalis berbasis nikel. Kondisi reforming tersebut menghasilkan *syngas* dengan nilai *Stoichiometric Number* (SN) sekitar 2,05, yang sesuai untuk digunakan sebagai umpan pada proses sintesis metanol.

Rangkaian proses yang dirancang mampu menghasilkan metanol Grade AA dengan kapasitas sebesar 700.000 ton/tahun dan kemurnian sebesar 99,85% berat. Dari sisi ekonomi, hasil analisis menunjukkan bahwa rancangan pabrik memiliki nilai *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar 13,75% dan *Net Present Value* (NPV) sebesar US$ 318,56 juta. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi operasi yang dipilih tidak hanya memberikan kinerja proses yang baik, tetapi juga mendukung kelayakan ekonomi dari rancangan pabrik metanol berbasis LNG.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] B. P. Ren, Y. P. Xu, Y. W. Huang, C. She, and B. Sun, “Methanol production from natural gas reforming and CO2 capturing process, simulation, design, and technical-economic analysis,” *Energy*, vol. 263, p. 125879, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.125879.

[2] H. Liu, J. Sun, J. He, and Y. Wang, “Performance and techno-economic analysis of the nuclear-driven methanol steam reforming hydrogen production system using NSGA-II multi-objective optimization,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 249, Jul. 2026, doi: 10.1016/j.ijhydene.2026.155912.

[3] K. Bayramoğlu, S. Yılmaz, and M. T. Çoban, “Numerical analysis of hydrogen production by methanol and methane steam reforming using compact reactors,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 58, p. 103238, Feb. 2025, doi: 10.1016/J.TSEP.2025.103238.

[4] K. Chen, Y. Zhao, W. Zhang, D. Feng, and S. Sun, “The intrinsic kinetics of methane steam reforming over a nickel-based catalyst in a micro fluidized bed reaction system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 3, pp. 1615–1628, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2019.11.080.

[5] W. H. Chen, Y. Z. Chen, J. S. Chang, T. B. Nguyen, C. Di Dong, and A. T. Hoang, “Surrogate-driven multi-objective optimization of sorption-enhanced steam methane reforming for cost-effective, low-carbon production of high-purity hydrogen,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 269, p. 157128, Sep. 2026, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2026.157128.

[6] J. Guo, H. Cui, H. Zhang, and J. Du, “Integrated system utilizing methanol steam reforming process for hydrogen production combined with methane-hydrogen gas turbine multi-cascade generation,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 271, p. 126324, Jul. 2025, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2025.126324.

[7] E. Meloni, M. Martino, and V. Palma, "A short review on ni based catalysts and related engineering issues for methane steam reforming," *Catalysts*, vol. 10, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/CATAL10030352.

[8] J. O. Ighalo and P. B. Amama, "Recent advances in the catalysis of steam reforming of methane (SRM)," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 51, pp. 688–700, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.177.

[9] S. Saeidi *et al.*, "Evolution paths from gray to turquoise hydrogen via catalytic steam methane reforming: Current challenges and future developments," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 183, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113392.

[10] H. A. Kibret, J. Shabanian, and J. Chaouki, "Kinetics of steam methane reforming over Ni/Mo2C/Al2O3 catalyst in a direct Joule-heated fluidized bed," *Chemical Engineering Journal*, vol. 547, p. 181551, Nov. 2026, doi: 10.1016/J.CEJ.2026.181551.

[11] B. Varandas, M. Oliveira, and A. Borges, "Analytical and Numerical Thermodynamic Equilibrium Simulations of Steam Methane Reforming: A Comparison Study," *Reactions*, vol. 5, no. 1, pp. 246–259, Mar. 2024, doi: 10.3390/reactions5010011.