

HTGR KOGENERASI PRODUKSI HIDROGEN UNTUK KONVERSI CO₂ MENJADI METANOL

Djati H. Salimy, Siti Alimah

Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN), BATAN
Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan, 12710
Phone/Fax : (021) 5204243, E-mail: djatihs@batan.go.id

Diterima	Diterima dalam bentuk revisi	Disetujui
29 Agustus 2015	16 Nopember 2015	30 Nopember 2015

ABSTRAK

HTGR KOGENERASI PRODUKSI HIDROGEN UNTUK KONVERSI CO₂ MENJADI METANOL. Telah dilakukan studi HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor) kogenerasi produksi hidrogen untuk konversi CO₂ menjadi metanol. Tujuan studi adalah menganalisis HTGR yang dikogenerasi dengan proses produksi hidrogen untuk konversi CO₂ menjadi metanol sebagai skema teknologi alternatif produksi metanol dengan proses hidrogenasi CO₂. Metode yang digunakan adalah studi pustaka dengan simulasi menggunakan bahan baku CO₂ yang diperoleh dengan memanfaatkan emisi CO₂ dari PLTU batubara. Dengan skema ini gas alam sebagai bahan baku digantikan dengan air dan CO₂, sementara kebutuhan energi panas, kukus dan listrik dipasok dari reaktor HTGR. Hasil studi menunjukkan bahwa HTGR yang dikogenerasi dengan produksi hidrogen proses termokimia siklus iodine-sulfur, dimungkinkan untuk diaplikasikan guna mengkonversi CO₂ menjadi metanol. Produksi metanol dengan kapasitas sebesar 14667,7 ton/hari, mampu menghemat gas alam sebesar 15,106 juta MMBTU/tahun yang setara dengan pengurangan laju emisi CO₂ sebesar 0,9 juta ton/tahun. Jika ditambah serapan emisi CO₂ dari PLTU sebagai bahan baku sebesar 691428,6 ton per tahun, potensi penghematan laju emisi CO₂ sebesar 1,6 juta ton/tahun. Pasokan energi panas, kukus dan listrik dari reaktor HTGR dengan daya 2×600 MWt dapat memenuhi kebutuhan proses produksi, dengan kelebihan listrik sebesar 92 MWe. Total kelebihan listrik yang dapat disambungkan ke jaringan sebesar 196 MWe, yang berasal dari PLTU batubara (104 MWe) dan reaktor HTGR (92 MWe).

Kata kunci: HTGR kogenerasi, dekomposisi air, hidrogenasi CO₂, metanol, emisi CO₂

ABSTRACT

HTGR COGENERATION TO HYDROGEN PRODUCTION FOR CO₂ CONVERSION TO BE METHANOL. Study have been conducted on the application of HTGR cogeneration to hydrogen production for conversion of CO₂ into methanol. The purpose of the study is to analyze the HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor) cogeneration to hydrogen production for CO₂ conversion to be methanol as an alternative scheme of methanol production by process of CO₂ hydrogenation. The method used is literature studies using simulation CO₂ as a raw material that obtained by CO₂ emission from coal power plant. With the scheme, the raw material of natural gas is replaced with water and CO₂, while the need energy of heat, steam and electricity supplied from HTGR reactor. With this scheme, the use of natural gas as a raw material, energy source of heat, steam and electricity are not needed anymore. The study shows that the process of nuclear water splitting of iodine-sulfur cycle is possible to convert CO₂ into methanol. Production with a capacity of 14667.7 ton/day of methanol, will save natural gas of about to 15.106 million MMBTU yearly which is equivalent to a reduction CO₂ emissions by 0.9 million ton/year. In addition with CO₂ emission from coal power plant that used as raw material amount 691428.6 ton/year, potential of total CO₂ reduction is about 1.6 million ton/year. Supply of thermal energy, steam and electricity that comes from HTGR reactor with capacity of 2×600 MWt can meet the needs of the production process, with the excess electricity of 92 MWe. Total electricity that can be connected to the grid is about 196 MWe, 104 MWe from coal power plant, and 92 MWe from HTGR.

Keywords: HTGR cogeneration, water splitting, CO₂ hydrogenation, methanol, CO₂ emission

1. PENDAHULUAN

Metanol (CH₃OH) adalah senyawa organik yang dalam industri kimia banyak digunakan sebagai pelarut karena kemampuannya untuk larut dalam berbagai senyawa organik dan anorganik^[1]. Metanol juga banyak digunakan sebagai pereaksi pada pembentukan formaldehida atau metil ester yang banyak digunakan sebagai bahan anti beku (*antifreeze*) pada industri otomotif maupun pesawat terbang^[2]. Sebagai bahan bakar alternatif, sejak krisis minyak tahun 1973, litbang metanol untuk bahan bakar alternatif telah dilakukan dengan sangat intensif sebagai jawaban untuk mencari alternatif energi pengganti minyak. Saat ini litbang hidrogen juga melirik metanol sebagai *energy carrier* untuk hidrogen guna memasok kebutuhan hidrogen pada sistem hidrogen berbasis sel bahan bakar.

Secara konvensional, metanol diproduksi dengan bahan baku dari bahan bakar fosil, baik gas alam, minyak, ataupun batubara. Proses berbahan baku gas alam merupakan proses yang saat ini paling banyak dipakai di dunia. Prosesnya telah sangat maju dan relatif bersih dibanding proses berbahan baku batubara. Proses produksi metanol dengan bahan baku gas alam dilakukan melalui proses *steam reforming* gas alam membentuk hidrogen (H₂) dan carbon monoksida (CO), kemudian dengan katalisator tertentu, kedua produk antara tersebut direaksikan menghasilkan metanol. Proses *steam reforming* gas alam merupakan proses endotermik yang beroperasi pada temperatur tinggi (~800°C) sehingga membutuhkan energi termal dalam jumlah besar. Kebutuhan energi termal untuk menjalankan proses dipasok dari pembakaran langsung bahan bakar fosil gas alam.

Litbang produksi metanol mengindikasikan bahwa metanol juga dapat diproduksi dengan proses hidrogenasi CO₂. Proses ini cukup menjanjikan karena di samping dapat mengatasi masalah emisi CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, juga diperoleh nilai tambah dan penggunaan CO₂ sebagai bahan baku. Studi di berbagai negara menunjukkan perubahan paradigma penanganan CO₂ dari 'tangkap dan simpan' ke paradigma 'tangkap dan manfaatkan'^[3]. Teknologi CCU (*Carbon Capture and Utilisation*) diharapkan dapat menggantikan teknologi CCS (*Carbon Capture and Storage*). Pada teknologi CCU, emisi CO₂ dimanfaatkan sebagai bahan baku industri. Untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol dibutuhkan hidrogen dalam jumlah besar. Teknologi hidrogenasi CO₂ diperkirakan akan cukup kompetitif jika dapat diproduksi hidrogen dengan biaya yang ekonomis.

Salah satu litbang aplikasi reaktor nuklir temperatur tinggi yang saat ini cukup menjanjikan untuk aplikasi industri di masa yang akan datang adalah kogenerasi HTGR produksi hidrogen dengan proses termokimia berbahan baku air. Proses ini merupakan proses termokimia dekomposisi air menghasilkan hidrogen dan oksigen yang terjadi pada temperatur tinggi. Energi nuklir luaran reaktor nuklir temperatur tinggi dapat berfungsi sebagai sumber energi panas untuk menjalankan proses^[4,5]. Di antara proses dekomposisi air dengan nuklir, proses dengan siklus *iodine-sulfur* merupakan proses yang litbangnya paling maju. Proses yang pada awalnya dikembangkan oleh General Atomic di Amerika pada tahun 1970-an, kemudian diadopsi dan dikembangkan oleh beberapa negara seperti: Jepang, Jerman, Cina, Perancis, dan Korea Selatan. Jepang menargetkan kopling HTTR dengan proses termokimia siklus *iodine-sulfur* dapat terwujud pada akhir dasawarsa 2010^[6,7]. Sementara Korea Selatan yang juga mengadopsi proses ini pada awal 2000-an, menargetkan operasi skala *demonstration plant* pada tahun 2026^[8].

Dari sisi bahan baku bahan bakar fosil, keterbatasan cadangan yang tak terbarukan pada masa yang akan datang dapat menjadi ancaman kesinambungan produksi metanol jika hanya mengandalkan proses konvensional berbahan baku bahan bakar fosil. Untuk itu perlu dikaji berbagai proses alternatif produksi metanol dengan bahan baku selain bahan bakar fosil. Pada prinsipnya, kunci teknologi pabrik metanol adalah produksi gas sintesis (campuran H₂ dan CO)

dari proses *steam reforming* gas alam, atau gasifikasi batubara. Karena hidrogen dapat dihasilkan dengan bahan baku air (proses termokimia), maka hal itu berarti gas alam sebagai bahan baku pabrik pupuk juga dapat digantikan dengan bahan lain yang dapat menghasilkan hidrogen.

Dalam studi ini, pembahasan dibatasi pada aplikasi kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air guna produksi hidrogen siklus *iodine-sulfur*. Hidrogen yang dihasilkan, digunakan untuk memasok kebutuhan hidrogen untuk menjalankan proses hidrogenasi CO₂ pada pabrik metanol. Dalam studi disimulasikan CO₂ bersumber dari pembangkit listrik tenaga uap berbahan baku batubara. Emisi CO₂ dari PLTU ditangkap dan dimanfaatkan sebagai bahan baku pabrik metanol. Pemanfaatan CO₂ dan kogenerasi nuklir produksi hidrogen dari air, diharapkan dapat menyumbang penanganan emisi CO₂, pengayaan teknologi dekomposisi air, sekaligus penghematan bahan bakar fosil yang sangat signifikan. Aplikasi energi nuklir tidak saja menghemat cadangan bahan bakar fosil, dan mengurangi laju emisi CO₂, tetapi juga dapat menyerap emisi CO₂ dari industri lain untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan metanol.

Tujuan studi adalah untuk menganalisis aplikasi kogenerasi HTGR untuk proses dekomposisi air pada pabrik metanol, serta menganalisis kebutuhan dan konversi CO₂ dari PLTU batubara sebagai bahan baku produksi metanol. Metode yang digunakan dalam studi ini adalah studi pustaka dan analisis hasil-hasil studi terdahulu. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat menjadi bahan masukan kepada para pemangku kepentingan dalam menyusun kebijakan pengembangan energi nuklir di Indonesia, khususnya pengembangan pemanfaatan reaktor nuklir temperatur tinggi untuk menjalankan proses industri.

2. PRODUKSI METANOL

2.1. Proses Konvensional

Secara umum proses produksi metanol adalah mereaksikan gas sintesis (campuran CO dan H₂), menjadi metanol. Gas sintesis dapat dihasilkan dengan beberapa cara tergantung pada bahan baku yang digunakan. Proses yang saat ini banyak dipakai untuk menghasilkan gas sintesis antara lain: proses *steam reforming* gas alam, gasifikasi batubara, dan pirolisis minyak berat.

Pada proses konvensional dengan bahan baku gas alam, proses *steam reforming* yang beroperasi pada temperatur tinggi (~800°C) akan menghasilkan gas sintesis (campuran H₂ dan CO) sebagai berikut^[9]:



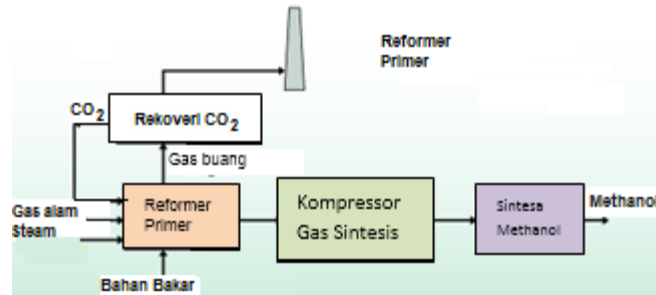
Di samping itu juga akan terjadi reaksi *water gas shift* membentuk CO₂, mengikuti reaksi:



Reaksi pembentukan metanol merupakan hidrogenasi CO dan CO₂ yang berlangsung pada reaktor sintesis metanol pada temperatur 225 – 250 °C, dengan katalisator Cu-ZnO.



Diagram alir proses sintesis metanol dengan bahan baku gas alam melalui proses *steam reforming* gas alam dapat dilihat pada Gambar 1.

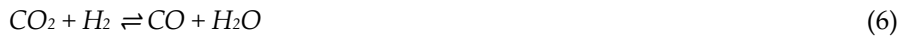


Gambar 1. Diagram Alir Produksi Metanol dari Gas Alam^[9].

2.2. Proses Hidrogenasi CO₂

Berbeda dengan proses konvensional berbahan baku bahan bakar fosil yang dikonversi lebih dulu menjadi gas sintesis, pada proses hidrogenasi CO₂, bahan baku CO₂ dan H₂ diperoleh dari sumber luar. Gas CO₂ dapat merupakan hasil emisi industri petrokimia, pembangkit listrik, atau sumber emisi CO₂ lainnya. Sedangkan H₂ dapat diperoleh dari proses konvensional berbahan baku bahan bakar fosil, proses elektrolisis, atau proses termokimia berbahan baku air yang ada pada saat ini banyak dikembangkan. Dalam studi ini, diambil proses termokimia berbahan baku air dengan siklus *iodine-sulfure* dengan memanfaatkan reaktor nuklir sebagai sumber energi panas reaksi.

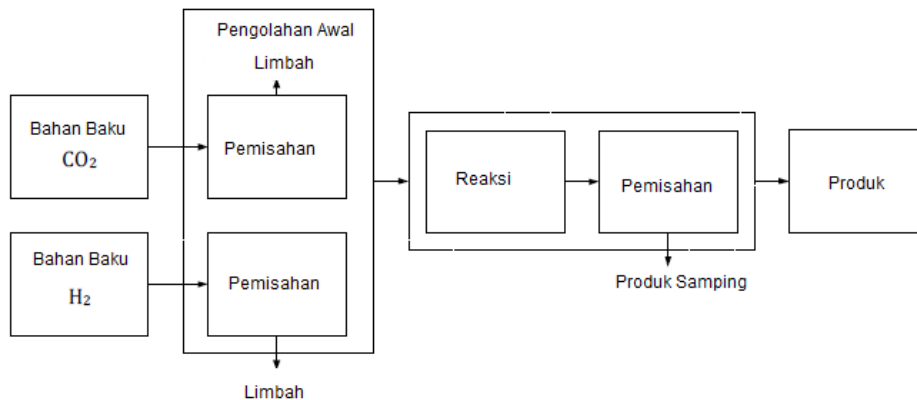
Reaksi hidrogenasi CO₂ yang terjadi pada prinsipnya sama dengan proses konvensional, perbedaannya adalah reaksi *reverse water gas shift* (6) yang merupakan kebalikan dari reaksi *water gas shift* (3). Reaksi hidrogenasi CO₂ mengikuti persamaan reaksi sebagai berikut^[10]:



Total reaksi hidrogenasi CO₂ ditunjukkan pada reaksi:



Diagram alir proses sintesis metanol dengan bahan baku H₂ dan CO₂ dengan proses hidrogenasi CO₂ dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Proses Hidrogenasi CO₂ menjadi Metanol^[10].

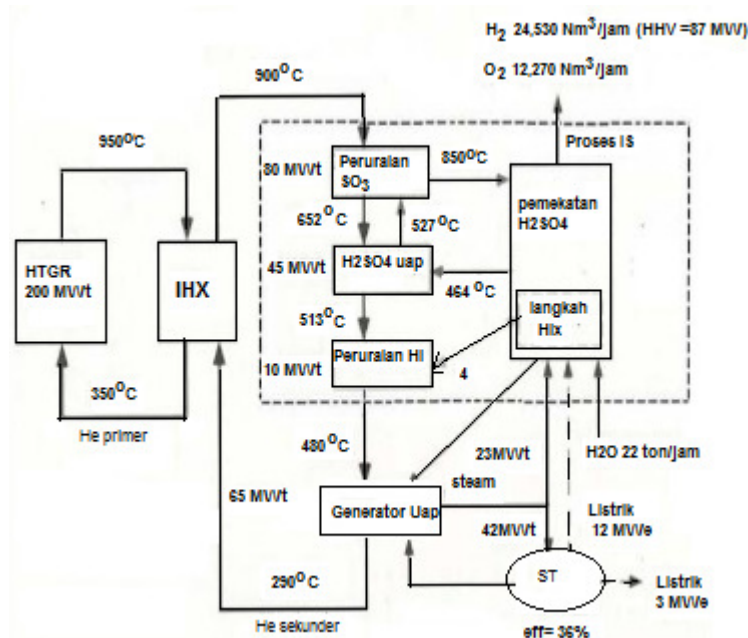
2.3. Pasokan Hidrogen untuk Hidrogenasi CO₂

Kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air adalah proses termokimia penguraian molekul air menjadi hidrogen dan oksigen dengan memanfaatkan energi panas nuklir untuk menjalankan prosesnya. Proses ini merupakan kandidat penting aplikasi reaktor nuklir temperatur tinggi untuk memproduksi hidrogen dari air.

Reaksi pembentukan hidrogen dengan proses termokimia siklus *iodine-sulfur* dengan panas nuklir, digunakan untuk menggantikan proses *steam reforming* gas alam. Pembentukan H₂ pada proses termokimia siklus iodine-sulfur mengikuti persamaan reaksi sebagai berikut^[5]:



Diagram alir produksi hidrogen proses termokimia siklus *iodine-sulfur* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kopel Nuklir dengan Produksi Hidrogen^[5].

Keterangan :

IHX : Intermediate Heat Exchanger

ST : Steam Turbin

IS : Iodine Sulphure

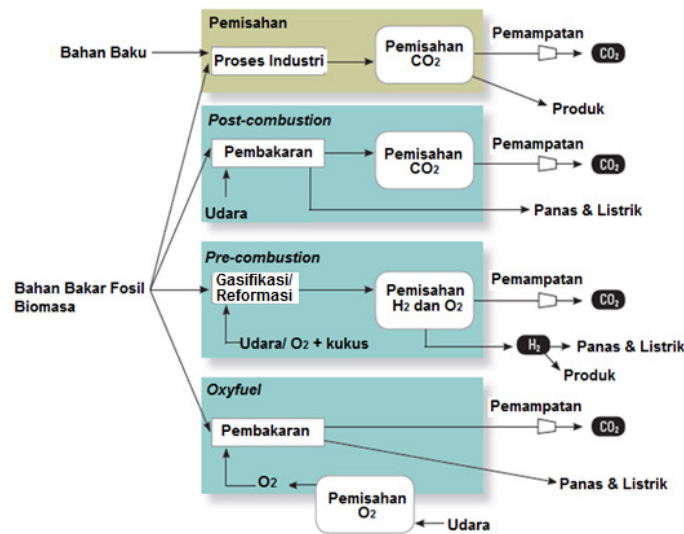
2.4. Pasokan CO₂ untuk Proses Hidrogenasi CO₂

Dalam proses hidrogenasi CO₂, bahan baku CO₂ dapat diperoleh dari CO₂ industri, namun karena daya tarik proses ini adalah dapat memberikan nilai tambah dari proses mitigasi CO₂, maka akan lebih baik jika CO₂ diperoleh dari sumber yang mengemis CO₂ dalam jumlah besar dan kontinyu.

Salah satu teknologi untuk mengatasi emisi CO₂ adalah penangkapan dan penyimpanan karbon yang sering disebut sebagai teknologi CCS (*Carbon Capture and Storage*). Pada prinsipnya, teknologi CCS adalah menangkap emisi yang keluar dari sumber emisi (pabrik atau pembangkit listrik), memisahkan CO₂ dari gas lain, kemudian mengangkut dan menyimpan

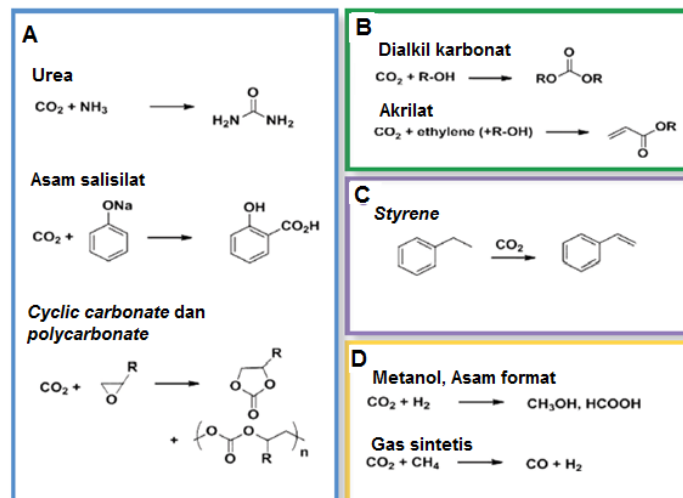
CO₂ tersebut ke penyimpanan lestari^[11]. Teknologi ini masih relatif mahal, dan tidak memberikan nilai tambah secara langsung.

Sejak beberapa dasawarsa, teknologi CCS dikembangkan menjadi teknologi CCU (*Carbon Capture and Utilisation*)^[11,13]. Pada teknologi CCU, gas CO₂ yang ditangkap akan dimanfaatkan sebagai bahan baku industri. Dengan cara ini, di samping diperoleh keuntungan dalam bentuk penurunan laju emisi, juga diperoleh nilai tambah dari pemanfaatan emisi CO₂ untuk proses industri. Beberapa proses industri berbahan baku CO₂, menjadi sasaran program ini. Pada Gambar 4 ditunjukkan prinsip penangkapan dan pemisahan CO₂ untuk dimanfaatkan. Sedangkan pada Gambar 5 ditunjukkan beberapa proses industri berbahan baku CO₂ yang potensial dapat memanfaatkan teknologi CCU^[14].



Gambar 4. Prinsip Penangkapan dan Pemisahan CO₂^[12].

Pada Gambar 4 terlihat bahwa konversi CO₂ merupakan teknologi yang menjanjikan untuk direalisasikan. Dalam studi ini, diasumsikan sumber CO₂ untuk dikonversi menjadi metanol berasal dari PLTU batubara yang dibangun di dekat lokasi pabrik metanol. Kedekatan lokasi akan menurunkan biaya transportasi CO₂ dari PLTU batubara ke pabrik.



Gambar 5. Beberapa Proses Industri dengan Bahan Baku CO₂^[12,15].

3. PEMBAHASAN

Perbedaan antara proses konvensional dengan proses hidrogenasi CO₂, pada prinsipnya hanya terletak pada bahan baku yang digunakan^[6]. Pada tahap awal, proses hidrogenasi CO₂ sepenuhnya mengadopsi reaksi sintesis metanol yang terjadi pada proses konvensional. Hal ini terkait ketersediaan katalisator dan kondisi proses yang telah *established* pada proses konvensional. Untuk itu diperlukan reaksi balik *water gas shift* (Persamaan 6) untuk memperoleh CO, sehingga komposisi bahan baku sepenuhnya sama dengan produk *steam reforming* gas alam. Pada perkembangan berikutnya, banyak dilakukan litbang katalisator yang selektif untuk menjalankan proses sintesis metanol dengan reaksi tunggal (Persamaan 8)^[17-20].

Pada Tabel 1 ditunjukkan perkembangan litbang hidrogenasi CO₂ sebagai alternatif produksi metanol dengan memanfaatkan emisi CO₂ sebagai bahan baku. Sejauh ini, proses hidrogenasi CO₂ untuk produksi metanol yang litbangnya paling menjanjikan adalah proses yang beroperasi pada temperatur 225 – 275°C, tekanan 3 – 5 MPa, dengan katalisator Cu/ZnO/Al₂O₃^[10, 21].

Tabel 1. Perkembangan Litbang Hidrogenasi CO₂^[10, 21, 22, 23]

Peneliti	Rasio Umpan	Produk	Kondisi Proses	Katalisator	Tipe Reaktor
Borodko <i>et.al.</i> , 1999.	CO ₂ , H ₂ (1/3)	Metanol, CO, H ₂ O	T: 498-548°K P: 5 MPa	Cu/ZnO/Al ₂ O ₃	Reaktor tabung <i>packed bed</i> . Skala pilot.
Liu, <i>et.al.</i> , 2007	CO ₂ , H ₂ , Ar (26/72/2)	Metanol, CO, H ₂ O, metil format	T: 443oK P: 3 MPa	Cu/ZnO/Al ₂ O ₃	<i>Autoclave</i> semi-batch. Skala lab.
Toyir, <i>et.al.</i> , 2001	CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ (1/3)	Metanol, CO, metil format, CH ₄ /C ₂ H ₆	T: 523-543°K P: 2 MPa	Cu-Ga/ZnO Cu-Zn- Ga/SiO ₂	Reaktor kontinyu <i>fixed bed</i>

Dalam studi ini, CO₂ diasumsikan berasal dari emisi PLTU batubara. Saat ini, PLTU batubara merupakan PLTU fosil yang relatif paling banyak di Indonesia, padahal secara alami pembangkit berbahan bakar batubara merupakan pembangkit yang tingkat emisi CO₂-nya paling besar dibanding pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang lain. Jika emisi CO₂ PLTU batubara dapat diserap sepenuhnya sebagai bahan baku produksi metanol, dapat diperoleh keuntungan berupa PLTU batubara tanpa emisi CO₂, sekaligus ketersediaan bahan baku untuk pabrik metanol dalam jumlah besar.

Studi terdahulu^[24] menyebutkan bahwa untuk menghasilkan H₂ sebanyak 200 ton per hari pada pabrik pupuk urea, jika menggunakan proses *steam reforming* gas alam, dibutuhkan gas alam sebagai bahan baku sebanyak 8.945.131,08 MMBTU per tahun, dan sebagai bahan bakar untuk energi panas proses sebanyak 6.161.446,75 MMBTU per tahun. Jika proses *steam reforming* diganti dengan proses termokimia siklus *iodine-sulfur* dengan energi nuklir, diperlukan energi nuklir sebesar 505,36 MWt. Jika H₂ sebanyak 200 ton perhari digunakan sebagai basis perhitungan, berdasarkan stoikiometri persamaan 8, dapat dihitung perkiraan kapasitas produksi CH₃OH dan kebutuhan CO₂. Produk CH₃OH yang terbentuk = (1/3)×(200/2)×33 = 1066,7 ton/hari = 352000 ton/tahun, sedangkan kebutuhan CO₂ = (1/3)×(200/2)×44 = 14667,7 ton/hari = 484000 ton/tahun.

Jika diasumsikan kebutuhan CO₂ ini akan dipasok dari PLTU batubara, maka diperlukan sistem *carbon capture and utilization* (CCU) untuk menampung emisi CO₂ dari PLTU tersebut. Studi di Amerika menunjukkan bahwa efisiensi utilisasi CCU yang merupakan gabungan dari

efisiensi penangkapan, penyimpanan, dan pemakaian adalah sebesar 70%, maka untuk memasok kebutuhan CO₂ sebesar 484000 ton/tahun dibutuhkan PLTU yang mampu mengemisikan CO₂ sebesar: $484000/0,7 = 691428,6$ ton/tahun. Dengan faktor emisi CO₂ PLTU batubara sebesar 1,09 kg/kWh dan faktor kapasitas sebesar 70%^[25,26], serta faktor konversi 8760 jam/tahun, maka daya PLTU dapat dihitung sebesar: $[691428,6/(1,09 \times 0,7 \times 8760)] = 103,4 \approx 104$ MWe. Dengan kata lain jika pabrik metanol yang dikopling dengan sistem kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air didirikan di dekat PLTU batubara, maka pabrik metanol akan dapat menyerap emisi CO₂ yang dihasilkan oleh PLTU dengan daya 104 MWe.

Di samping konsumsi energi panas nuklir untuk produksi bahan baku H₂ yang cukup besar (550 MWt), konsumsi energi untuk menjalankan teknologi CCU guna memasok bahan baku CO₂ juga cukup tinggi. Sebuah studi menyebutkan bahwa untuk menyiapkan bahan baku CO₂ sebesar 1,32 juta ton/tahun diperlukan energi termal sebesar 400 MWt^[27]. Dalam studi ini, bahan baku yang dibutuhkan sebesar 484000 ton/tahun, dengan pendekatan *scale-down* dapat dihitung kebutuhan energi thermal sebesar = $(484 \text{ ribu}/1,32 \text{ juta}) \times 400 \text{ MWt} = 146,7 \text{ MWt}$. Proses produksi metanol terjadi pada reaktor metanol mengikuti reaksi hidrogenasi CO₂ yang beroperasi pada kisaran temperatur 225 – 275°C, dan tekanan 3 MPa. Jika diasumsikan kebutuhan uap proses dan listrik untuk pabrik metanol dan proses CCU, sama dengan kebutuhan pabrik pupuk urea yang kondisi operasinya tidak jauh berbeda, maka diperlukan energi sebesar 150 MWt^[24]. Energi nuklir temperatur tinggi sebesar 150 MWt, sekitar 50 MWt dikonversi menjadi uap dan sisanya menjadi listrik sekitar 32 MWe.

Pada Tabel 2 ditunjukkan rekapitulasi konsumsi energi nuklir temperatur tinggi untuk proses kogenerasi nuklir produksi hidrogen guna konversi CO₂ menjadi metanol.

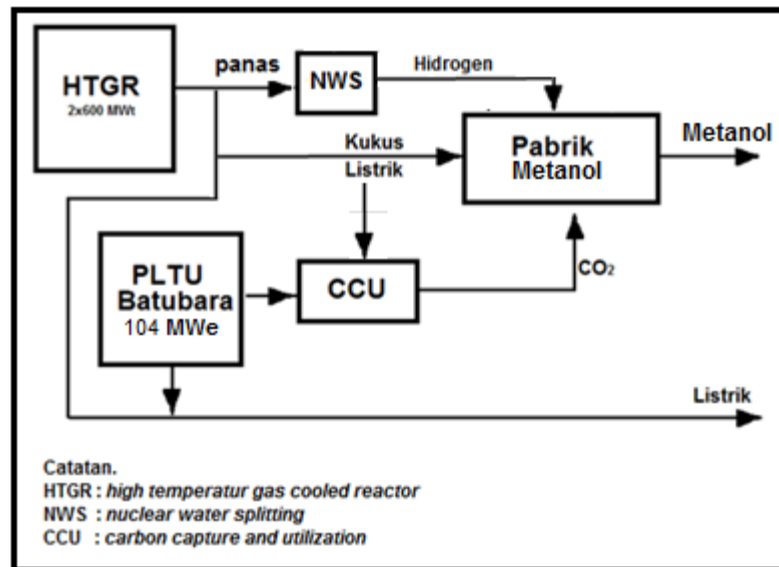
Tabel 2. Perhitungan Neraca Energi Nuklir untuk Proses

Pasokan Energi	
Daya reaktor nuklir	2×600 MWt
Efisiensi termal IHX (<i>recuperator</i>)	90%
Daya luaran IHX	1080 MWt
Efisiensi pembangkit uap	90%
Permintaan Energi	
Panas proses unit produksi hidrogen	505,36 MWt
Kukus untuk process steam dan listrik	150 MWt
<i>Process steam</i>	50 MWt
Kukus untuk listrik	100 MWt ~ 33,3 MWe
Energi termal untuk CCU	146,7 MWt
Total Permintaan	802,06 MWt
Kelebihan Energi Panas Nuklir	277,94 MWt ~ 91,7 MWe

Sedang pada Gambar 6 ditunjukkan diagram alir proses aplikasi kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air pada proses konversi CO₂ menjadi metanol dengan pasokan CO₂ berasal dari PLTU batubara. Terlihat bahwa disamping diperoleh metanol sebanyak 1066,7 ton/hari juga diperoleh sisa listrik tanpa emisi CO₂ dari PLTU batubara sebesar 104 MWe dan dari energi nuklir sebesar 91,7 MWe. HTGR dengan kapasitas 2×600 MWt digunakan untuk memasok antara lain: energi panas untuk proses kogenerasi nuklir guna menjalankan proses dekomposisi air untuk memperoleh bahan baku H₂ sebanyak 200 ton/hari, energi termal untuk menjalankan proses CCU, energi kukus untuk proses panas temperatur rendah dan listrik. Pada proses tersebut masih tersisa listrik sebesar 91,7 MWe untuk disambungkan ke jaringan listrik. Sedangkan PLTU batubara akan memasok kebutuhan CO₂ sebagai bahan baku pabrik metanol.

Emisi CO₂ dari PLTU sepenuhnya digunakan sebagai bahan baku untuk produksi metanol, sehingga dihasilkan listrik tanpa emisi dari PLTU batubara. Dari skema tersebut, dapat dihasilkan metanol sebesar 1066,7 ton per hari, dan listrik sebesar 196 MWe (dari PLTN sebesar 92 MWe dan dari PLTU batubara sebesar 104 MWe).

Dari sisi emisi CO₂, pemanfaatan energi nuklir dan emisi CO₂ berpotensi menghemat cadangan gas alam sebesar 15,106 juta MMBTU per tahun setara dengan pengurangan laju emisi CO₂ sebesar 0,9 juta ton/tahun. Jika diakumulasikan dengan laju emisi CO₂ yang dimanfaatkan untuk bahan baku sebesar 691.428,6 ton/tahun, maka diperoleh total pengurangan emisi CO₂ sebesar 1,6 juta ton/tahun.



Gambar 6. Diagram Alir Kopling PLTN dan PLTU dengan Pabrik Metanol.

4. KESIMPULAN

Proses pemanfaatan HTGR yang dikogenerasi untuk produksi hidrogen dengan proses termokimia dari air, dimungkinkan untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol dengan memanfaatkan proses hidrogenasi CO₂. Dengan metode ini, penggunaan gas alam sebagai bahan baku, sumber energi panas, kukus dan listrik tidak diperlukan lagi. Gas alam sebagai bahan baku digantikan dengan air dan CO₂, sementara kebutuhan energi panas, kukus, dan listrik dipasok dari reaktor nuklir HTGR. Dengan basis perhitungan hidrogen sebesar 200 ton/hari, dibutuhkan CO₂ sebagai bahan baku sebanyak 14667,7 ton/hari yang dapat diperoleh dari emisi CO₂ PLTU batubara dengan kapasitas 104 MWe. Skema ini akan menghemat cadangan gas alam sebanyak 15,106 juta MMBTU/tahun yang setara dengan laju emisi CO₂ sebesar 0,9 juta ton/tahun. Jika diakumulasikan dengan laju emisi CO₂ yang dimanfaatkan untuk bahan baku 691428,6 ton/tahun, maka diperoleh total pengurangan emisi CO₂ sebesar 1,6 juta ton/tahun. Pasokan energi panas, kukus dan listrik yang bersumber dari reaktor HTGR dengan daya 2x600 MWt dapat memenuhi kebutuhan proses produksi, dengan kelebihan listrik sebesar 92 MWe. Total kelebihan listrik yang dapat disambungkan ke jaringan sebesar 196 MWe, yang berasal dari PLTU batubara (104 MWe) dan energi nuklir (92 MWe).

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. MADEJ-LACHOWSKA, M., *et.al.*, "Methanol Synthesis from Carbon Dioxide and Hydrogen over CuO/ZnO/ZrO₂ Promoted Catalysts", *CHEMIK*, 68, 1, Hal. 61–68, 2014.
- [2]. OLAH, G. A., *et.al.*, "Chemical Recycling of Carbon Dioxide to Methanol and Dimethyl Ether: From Greenhouse Gas to Renewable, Environmentally Carbon Neutral Fuels and Synthetic Hydrocarbons", *J. Org. Chem.*, 74, 487–498, Hal. 487, 2009.
- [3]. ARESTA, M., DIBENEDETTO, A., ANGELINI, A., "The Changing Paradigm in CO₂ Utilization", *Journal of CO₂ Utilization*, Volume 3-4, Issue 1, November 2013.
- [4]. SALIMY, D. H., Technical Report: "Study on Process Improvement of Thermochemical Hydrogen Production IS Process", Dept. of Advanced Nuclear Heat Technology, JAERI, 2002.
- [5]. ONUKI, K., *et.al.*, "IS Process for Thermochemical Hydrogen Production", *JAERI-Review* 94-006, 1994.
- [6]. MASAO, H., SHIOZAWA, S., "Research and Development for Nuclear Production of Hydrogen in Japan", *Proceeding of OECD/NEA 3rd Information Exchange Meeting on the Nuclear Production of Hydrogen*, Oarai, 2005.
- [7]. TANAKA, N., *et.al.*, "R&D Status On Thermochemical IS Process for Hydrogen Production at JAEA", 19th World Hydrogen Energy Conference (WHEC2012), paper 618, June 3-7, Toronto, Canada, 2012.
- [8]. CHANG, J., *et.al.*, "A Study of a Nuclear Hydrogen Production Demonstration Plant, *Journal of Nuclear Engineering and Technology*", Vol. 39, No. 2, April 2007.
- [9]. KENT, J. A., Kent and Riegel's, "Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology", Vol. 1, 7th ed., Springer Science & Business Media, New York, 2010.
- [10]. VAN DER HAM, L. G. J., "Hydrogenation of Carbon Dioxide for Methanol Production", *Chemical Engineering Transactions*, 29, 181-186, 2012.
- [11]. SONG, C., "Global Challenges and Strategies for Control, Conversion and Utilization of CO₂ for Sustainable Development Involving Energy, Catalysis, Adsorption And Chemical Processing", *Catalysis Today*, Volume 115, Issues 1–4, June 2006.
- [12]. _____, "Carbon Capture and Storage/Utilisation Technology", National Climate Change Secretariat and National Research Foundation, Singapore, 2011.
- [13]. MERAJIN, M. T., SHARIFNIA, S., MANSOURI, A. M., "Process Modeling And Optimization of Simultaneous Direct Conversion of CO₂ and CH₄ Greenhouse Gas Mixture over TiO₂", *Webnet Photocatalyst, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Volume 45, Issue 3, May 2014.
- [14]. SANKARANARAYANAN, S., SRINIVASAN, K., "Carbon dioxide, a Potential Raw Material for The Production of Fuel, Fuel Additives and Bio-Derived Chemicals", *Indian Journal of Chemistry*, Vol. 51A, , pp.1252-1262, Sept-Oct 2012.
- [15]. LI, L., ZHAO, N., WEI, W., SUN, Y., "A Review of Research Progress on CO₂ Capture, Storage, and Utilization in Chinese Academy of Sciences", *Fuel*, Volume 108, June 2013.
- [16]. MACHADO, F. R., *et.al.*, "A comparative Analysis of Methanol Production Routes: Synthesis Gas Versus CO₂ Hydrogenation", *Proceedings of The 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bali, Indonesia*, January 7 – 9, 2014.
- [17]. WESSELBAUM, S., "Hydrogenation of Carbon Dioxide to Methanol using a Homogeneous Ruthenium–Triphos Catalyst: From Mechanistic Investigations to Multiphase Catalysis", *Chem. Sci.*, 6, 693, 2015.
- [18]. WANG, W., *et.al.*, "Recent Advances in Catalytic Hydrogenation of Carbon Dioxide", *Chem. Soc. Rev.*, 40, 3703–3727, 2011.

- [19]. TIDONA, B., et.al., CO₂ Hydrogenation to Methanol at Pressures up to 950 bar”, *J. of Supercritical Fluids* 78, Hal. 70–77, 2013.
- [20]. BANSODE, A., URAKAWA, A., “Towards Full One-Pass Conversion of Carbon Dioxide to Methanol and Methanol-Derived Products”, *Journal of Catalysis* 309, 66–70, 2014.
- [21]. BORODKO Y., SOMORJAI G.A., “Catalytic Hydrogenation of Carbon Oxides – A 10-Year Perspective”, *Applied Catalysis, A: General*, 186 (1-2), 355-362, 1999.
- [22]. LIU Y., ZHANG Y., WANG T., TSUBAKI N., “Efficient Conversion of Carbon Dioxide to Methanol Using Copper Catalyst by a New Low-Temperature Hydrogenation Process”, *Chemistry Letters* 36 (9), 1182-1183, 2007.
- [23]. TOYIR J., RAMIREZ DE LA PISCINA P., LLORCA J., FIERRO J.-L.G., HOMS N., “Methanol Synthesis from CO₂ and H₂ over Gallium Promoted Copper-Based Supported Catalysts, Effect of Hydrocarbon Impurities in the CO₂/H₂ Source”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 3(21), 4837-4842, 2001.
- [24]. SALIMY, D. H., “Aplikasi Energi Panas Nuklir Temperatur Tinggi pada Pabrik Pupuk Urea”, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Vol. 14, No. 1, Jakarta, Juni 2012.
- [25]. STYRING, P., “Carbon Capture and Utilisation in The Green Economy: Using CO₂ to Manufacture Fuel, Chemicals and Materials”, *The Centre for Low Carbon Futures*, Netherlands, 2011.
- [26]. TAO, S., “Ammonia Production for Renewable Energy Storage”, *Proceeding of H₂FC Supergen Hydrogen and Fuel Cell Hub Meeting*, Aberdeen, 21st May 2013.
- [27]. MIGNARD, D., PRITCHARD, C., “Processes for The Synthesis of Liquid Fuels from CO₂ and Marine Energy”, *Chemical Engineering Research and Design* 84, 828–836, 2006.