

## HTGR KOGENERASI PRODUKSI HIDROGEN UNTUK KONVERSI CO<sub>2</sub> 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](mailto: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 CO<sub>2</sub> MENJADI METANOL.** Telah dilakukan studi HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor) kogenerasi produksi hidrogen untuk konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol. Tujuan studi adalah menganalisis HTGR yang dikogenerasi dengan proses produksi hidrogen untuk konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol sebagai skema teknologi alternatif produksi metanol dengan proses hidrogenasi CO<sub>2</sub>. Metode yang digunakan adalah studi pustaka dengan simulasi menggunakan bahan baku CO<sub>2</sub> yang diperoleh dengan memanfaatkan emisi CO<sub>2</sub> dari PLTU batubara. Dengan skema ini gas alam sebagai bahan baku digantikan dengan air dan CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> sebesar 0,9 juta ton/tahun. Jika ditambah serapan emisi CO<sub>2</sub> dari PLTU sebagai bahan baku sebesar 691428,6 ton per tahun, potensi penghematan laju emisi CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, metanol, emisi CO<sub>2</sub>

### ABSTRACT

**HTGR COGENERATION TO HYDROGEN PRODUCTION FOR CO<sub>2</sub> CONVERSION TO BE METHANOL.** Study have been conducted on the application of HTGR cogeneration to hydrogen production for conversion of CO<sub>2</sub> into methanol. The purpose of the study is to analyze the HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor) cogeneration to hydrogen production for CO<sub>2</sub> conversion to be methanol as an alternative scheme of methanol production by process of CO<sub>2</sub> hydrogenation. The method used is literature studies using simulation CO<sub>2</sub> as a raw material that obtained by CO<sub>2</sub> emission from coal power plant. With the scheme, the raw material of natural gas is replaced with water and CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> emissions by 0.9 million ton/year. In addition with CO<sub>2</sub> emission from coal power plant that used as raw material amount 691428.6 ton/year, potential of total CO<sub>2</sub> 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, CO<sub>2</sub> hydrogenation, methanol, CO<sub>2</sub> emission

## 1. PENDAHULUAN

Metanol (CH<sub>3</sub>OH) adalah senyawa organik yang dalam industri kimia banyak digunakan sebagai pelarut karena kemampuannya untuk larut dalam berbagai senyawa organik dan anorganik<sup>[1]</sup>. 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<sup>[2]</sup>. 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 (H<sub>2</sub>) 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 CO<sub>2</sub>. Proses ini cukup menjanjikan karena di samping dapat mengatasi masalah emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, juga diperoleh nilai tambah dan penggunaan CO<sub>2</sub> sebagai bahan baku. Studi di berbagai negara menunjukkan perubahan paradigma penanganan CO<sub>2</sub> dari 'tangkap dan simpan' ke paradigma 'tangkap dan manfaatkan'<sup>[3]</sup>. Teknologi CCU (*Carbon Capture and Utilisation*) diharapkan dapat menggantikan teknologi CCS (*Carbon Capture and Storage*). Pada teknologi CCU, emisi CO<sub>2</sub> dimanfaatkan sebagai bahan baku industri. Untuk mengkonversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol dibutuhkan hidrogen dalam jumlah besar. Teknologi hidrogenasi CO<sub>2</sub> 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<sup>[4,5]</sup>. 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 kopleng HTTR dengan proses termokimia siklus *iodine-sulfur* dapat terwujud pada akhir dasawarsa 2010<sup>[6,7]</sup>. Sementara Korea Selatan yang juga mengadopsi proses ini pada awal 2000-an, menargetkan operasi skala *demonstration plant* pada tahun 2026<sup>[8]</sup>.

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 H<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> pada pabrik metanol. Dalam studi disimulasikan CO<sub>2</sub> bersumber dari pembangkit listrik tenaga uap berbahan baku batubara. Emisi CO<sub>2</sub> dari PLTU ditangkap dan dimanfaatkan sebagai bahan baku pabrik metanol. Pemanfaatan CO<sub>2</sub> dan kogenerasi nuklir produksi hidrogen dari air, diharapkan dapat menyumbang penanganan emisi CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>, tetapi juga dapat menyerap emisi CO<sub>2</sub> dari industri lain untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan metanol.

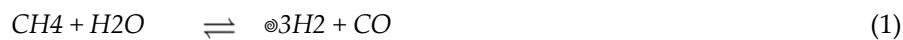
Tujuan studi adalah untuk menganalisis aplikasi kogenerasi HTGR untuk proses dekomposisi air pada pabrik metanol, serta menganalisis kebutuhan dan konversi CO<sub>2</sub> dari PLTU batubara sebagai bahan baku produksi metanol. Metode yang digunakan dalam studi ini adalah studi pustaka dan analisis hasil-hasil 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 H<sub>2</sub>), 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 H<sub>2</sub> dan CO) sebagai berikut<sup>[9]</sup>:



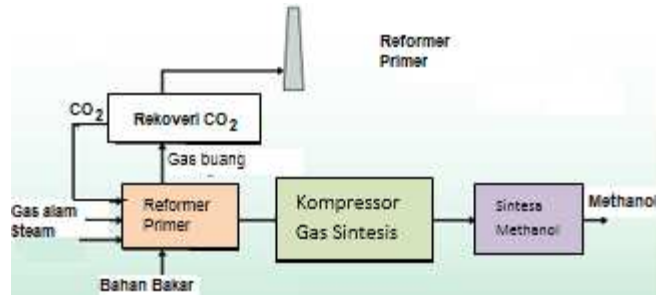
Di samping itu juga akan terjadi reaksi *water gas shift* membentuk CO<sub>2</sub>, mengikuti reaksi:



Reaksi pembentukan metanol merupakan hidrogenasi CO dan CO<sub>2</sub> 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.

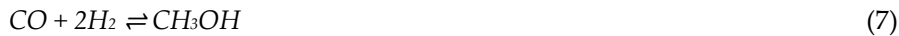


Gambar 1. Diagram Alir Produksi Metanol dari Gas Alam<sup>[9]</sup>.

## 2.2. Proses Hidrogenasi CO<sub>2</sub>

Berbeda dengan proses konvensional berbahan baku bahan bakar fosil yang dikonversi lebih dulu menjadi gas sintesis, pada proses hidrogenasi CO<sub>2</sub>, bahan baku CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub> diperoleh dari sumber luar. Gas CO<sub>2</sub> dapat merupakan hasil emisi industri petrokimia, pembangkit listrik, atau sumber emisi CO<sub>2</sub> lainnya. Sedangkan H<sub>2</sub> 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.

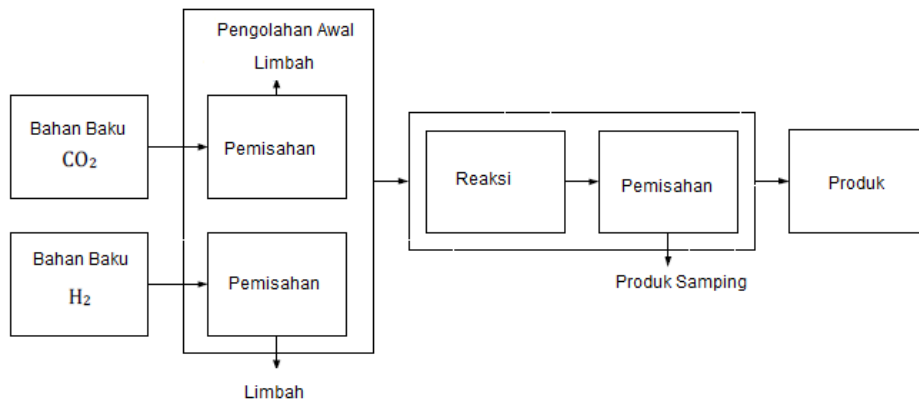
Reaksi hidrogenasi CO<sub>2</sub> yang terjadi pada prinsipnya sama dengan proses konvensional, perbedaannya adalah reaksi *reverse water gas shift* (6) yang merupakan kebalikan dari reaksi *water gas shift* (3). Reaksi hidrogenasi CO<sub>2</sub> mengikuti persamaan reaksi sebagai berikut<sup>[10]</sup>:



Total reaksi hidrogenasi CO<sub>2</sub> ditunjukkan pada reaksi:



Diagram alir proses sintesis metanol dengan bahan baku H<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> dengan proses hidrogenasi CO<sub>2</sub> dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Proses Hidrogenasi CO<sub>2</sub> menjadi Metanol<sup>[10]</sup>.

### 2.3. Pasokan Hidrogen untuk Hidrogenasi CO<sub>2</sub>

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 H<sub>2</sub> pada proses termokimia siklus iodine-sulfur mengikuti persamaan reaksi sebagai berikut<sup>[5]</sup>:

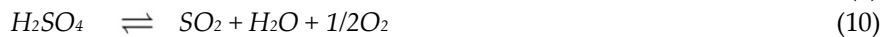
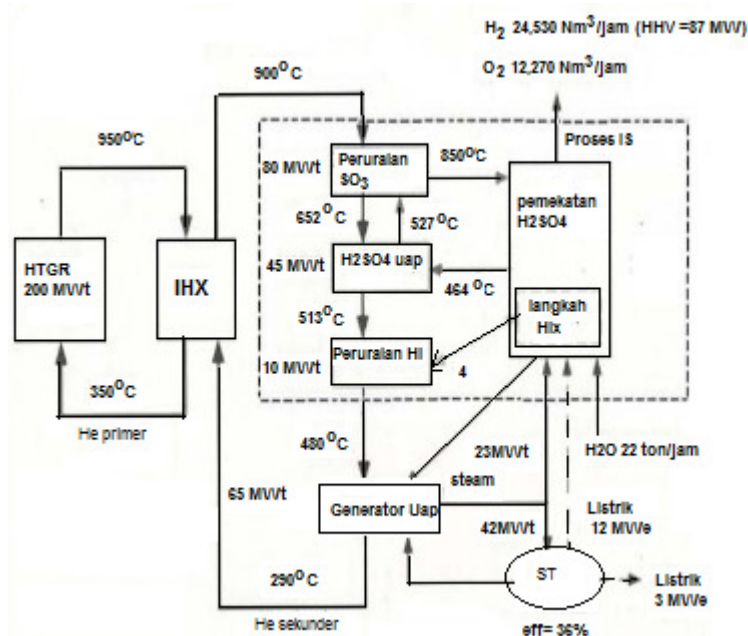


Diagram alir produksi hidrogen proses termokimia siklus *iodine-sulfur* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kopel Nuklir dengan Produksi Hidrogen<sup>[5]</sup>.

Keterangan :

IHX : Intermediate Heat Exchanger

ST : Steam Turbin

IS : Iodine Sulphure

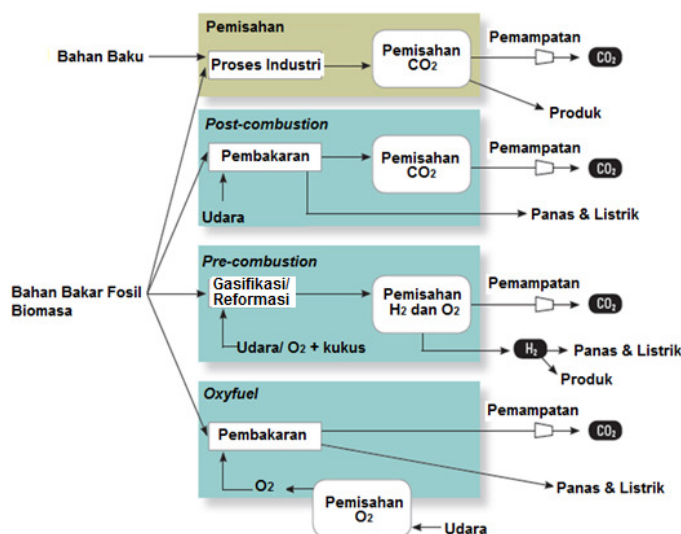
### 2.4. Pasokan CO<sub>2</sub> untuk Proses Hidrogenasi CO<sub>2</sub>

Dalam proses hidrogenasi CO<sub>2</sub>, bahan baku CO<sub>2</sub> dapat diperoleh dari CO<sub>2</sub> industri, namun karena daya tarik proses ini adalah dapat memberikan nilai tambah dari proses mitigasi CO<sub>2</sub>, maka akan lebih baik jika CO<sub>2</sub> diperoleh dari sumber yang mengemisi CO<sub>2</sub> dalam jumlah besar dan kontinyu.

Salah satu teknologi untuk mengatasi emisi CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> dari gas lain, kemudian mengangkut dan menyimpan

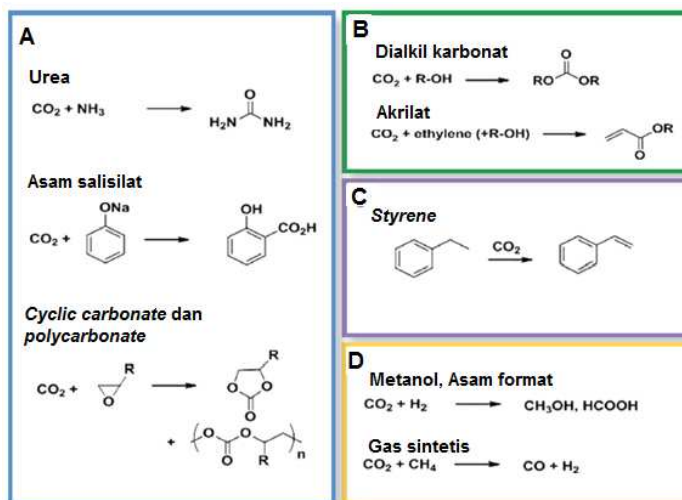
CO<sub>2</sub> tersebut ke penyimpanan lestari<sup>[11]</sup>. Teknologi ini masih relatif mahal, dan tidak memberikan nilai tambah secara langsung.

Sejak beberapa dasawarsa, teknologi CCS dikembangkan menjadi teknologi CCU (*Carbon Capture and Utilisation*)<sup>[11,13]</sup>. Pada teknologi CCU, gas CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> untuk proses industri. Beberapa proses industri berbahan baku CO<sub>2</sub>, menjadi sasaran program ini. Pada Gambar 4 ditunjukkan prinsip penangkapan dan pemisahan CO<sub>2</sub> untuk dimanfaatkan. Sedangkan pada Gambar 5 ditunjukkan beberapa proses industri berbahan baku CO<sub>2</sub> yang potensial dapat memanfaatkan teknologi CCU<sup>[14]</sup>.



Gambar 4. Prinsip Penangkapan dan Pemisahan CO<sub>2</sub><sup>[12]</sup>.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa konversi CO<sub>2</sub> merupakan teknologi yang menjanjikan untuk direalisasikan. Dalam studi ini, diasumsikan sumber CO<sub>2</sub> untuk dikonversi menjadi metanol berasal dari PLTU batubara yang dibangun di dekat lokasi pabrik metanol. Kedekatan lokasi akan menurunkan biaya transportasi CO<sub>2</sub> dari PLTU batubara ke pabrik.



Gambar 5. Beberapa Proses Industri dengan Bahan Baku CO<sub>2</sub><sup>[12,15]</sup>.

### 3. PEMBAHASAN

Perbedaan antara proses konvensional dengan proses hidrogenasi CO<sub>2</sub>, pada prinsipnya hanya terletak pada bahan baku yang digunakan<sup>[16]</sup>. Pada tahap awal, proses hidrogenasi CO<sub>2</sub> 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)<sup>[17-20]</sup>.

Pada Tabel 1 ditunjukkan perkembangan litbang hidrogenasi CO<sub>2</sub> sebagai alternatif produksi metanol dengan memanfaatkan emisi CO<sub>2</sub> sebagai bahan baku. Sejauh ini, proses hidrogenasi CO<sub>2</sub> untuk produksi metanol yang litbangnya paling menjanjikan adalah proses yang beroperasi pada temperatur 225 – 275°C, tekanan 3 – 5 MPa, dengan katalisator Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[10, 21]</sup>.

**Tabel 1. Perkembangan Litbang Hidrogenasi CO<sub>2</sub>**<sup>[10, 21, 22, 23]</sup>

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

Dalam studi ini, CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>-nya paling besar dibanding pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang lain. Jika emisi CO<sub>2</sub> PLTU batubara dapat diserap sepenuhnya sebagai bahan baku produksi metanol, dapat diperoleh keuntungan berupa PLTU batubara tanpa emisi CO<sub>2</sub>, sekaligus ketersediaan bahan baku untuk pabrik metanol dalam jumlah besar.

Studi terdahulu<sup>[24]</sup> menyebutkan bahwa untuk menghasilkan H<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub> sebanyak 200 ton perhari digunakan sebagai basis perhitungan, berdasarkan stoikiometri persamaan 8, dapat dihitung perkiraan kapasitas produksi CH<sub>3</sub>OH dan kebutuhan CO<sub>2</sub>. Produk CH<sub>3</sub>OH yang terbentuk = (1/3)×(200/2)×33 = 1066,7 ton/hari = 352000 ton/tahun, sedangkan kebutuhan CO<sub>2</sub> = (1/3)×(200/2)×44 = 14667,7 ton/hari = 484000 ton/tahun.

Jika diasumsikan kebutuhan CO<sub>2</sub> ini akan dipasok dari PLTU batubara, maka diperlukan sistem *carbon capture and utilization* (CCU) untuk menampung emisi CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> sebesar 484000 ton/tahun dibutuhkan PLTU yang mampu mengemisikan CO<sub>2</sub> sebesar:  $484000/0,7 = 691428,6$  ton/tahun. Dengan faktor emisi CO<sub>2</sub> PLTU batubara sebesar 1,09 kg/kWh dan faktor kapasitas sebesar 70%<sup>[25,26]</sup>, 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 CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh PLTU dengan daya 104 MWe.

Di samping konsumsi energi panas nuklir untuk produksi bahan baku H<sub>2</sub> yang cukup besar (550 MWt), konsumsi energi untuk menjalankan teknologi CCU guna memasok bahan baku CO<sub>2</sub> juga cukup tinggi. Sebuah studi menyebutkan bahwa untuk menyiapkan bahan baku CO<sub>2</sub> sebesar 1,32 juta ton/tahun diperlukan energi termal sebesar 400 MWt<sup>[27]</sup>. 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 CO<sub>2</sub> 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<sup>[24]</sup>. 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 CO<sub>2</sub> menjadi metanol.

**Tabel 2. Perhitungan Neraca Energi Nuklir untuk Proses**

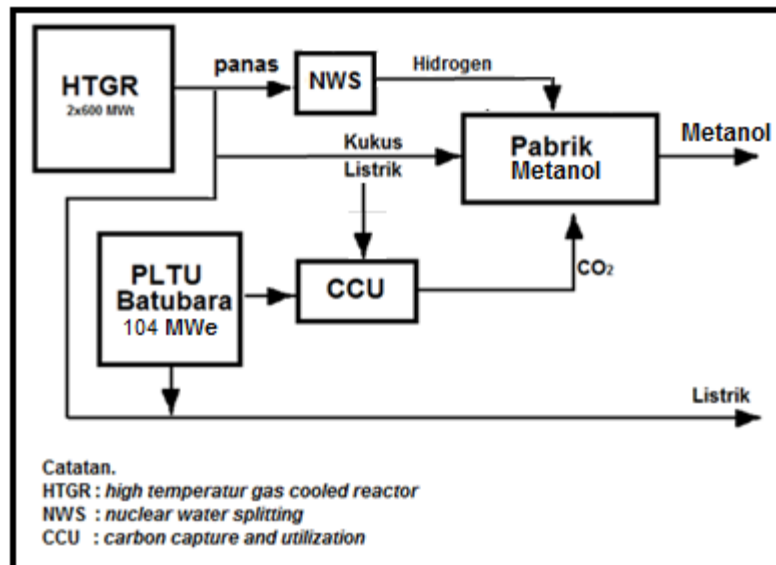
<b>Pasokan Energi</b>	
Daya reaktor nuklir	2×600 MWt
Efisiensi termal IHX ( <i>recuperator</i> )	90%
Daya luaran IHX	1080 MWt
Efisiensi pembangkit uap	90%
<b>Permintaan Energi</b>	
Panas proses unit produksi hidrogen	505,36 MWt
Kukus untuk process steam dan listrik	150 MWt
<i>Process steam</i>	50 MWt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

Sedang pada Gambar 6 ditunjukkan diagram alir proses aplikasi kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air pada proses konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol dengan pasokan CO<sub>2</sub> berasal dari PLTU batubara. Terlihat bahwa disamping diperoleh metanol sebanyak 1066,7 ton/hari juga diperoleh sisa listrik tanpa emisi CO<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> sebagai bahan baku pabrik metanol.



Emisi CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, pemanfaatan energi nuklir dan emisi CO<sub>2</sub> berpotensi menghemat cadangan gas alam sebesar 15,106 juta MMBTU per tahun setara dengan pengurangan laju emisi CO<sub>2</sub> sebesar 0,9 juta ton/tahun. Jika diakumulasikan dengan laju emisi CO<sub>2</sub> yang dimanfaatkan untuk bahan baku sebesar 691.428,6 ton/tahun, maka diperoleh total pengurangan emisi CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> menjadi metanol dengan memanfaatkan proses hidrogenasi CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub>, sementara kebutuhan energi panas, kukus, dan listrik dipasok dari reaktor nuklir HTGR. Dengan basis perhitungan hidrogen sebesar 200 ton/hari, dibutuhkan CO<sub>2</sub> sebagai bahan baku sebanyak 14667,7 ton/hari yang dapat diperoleh dari emisi CO<sub>2</sub> PLTU batubara dengan kapasitas 104 MWe. Skema ini akan menghemat cadangan gas alam sebanyak 15,106 juta MMBTU/tahun yang setara dengan laju emisi CO<sub>2</sub> sebesar 0,9 juta ton/tahun. Jika diakumulasikan dengan laju emisi CO<sub>2</sub> yang dimanfaatkan untuk bahan baku 691428,6 ton/tahun, maka diperoleh total pengurangan emisi CO<sub>2</sub> 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/ZrO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> Utilization", *Journal of CO<sub>2</sub> 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 3<sup>rd</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Greenhouse Gas Mixture over TiO<sub>2</sub>", *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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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., CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> over Gallium Promoted Copper-Based Supported Catalysts, Effect of Hydrocarbon Impurities in the CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub>FC Supergen Hydrogen and Fuel Cell Hub Meeting*, Aberdeen, 21st May 2013.
- [27]. MIGNARD, D., PRITCHARD, C., “Processes for The Synthesis of Liquid Fuels from CO<sub>2</sub> and Marine Energy”, *Chemical Engineering Research and Design* 84, 828–836, 2006.