

APLIKASI KOGENERASI NUKLIR UNTUK DEKOMPOSISI AIR PADA KONVERSI CO₂ MENJADI PUPUK UREA

Djati H. Salimy

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

Diterima	Deterima dalam bentuk revisi	Disetujui
15 September 2014	14 Nopember 2014	28 Nopember 2014

ABSTRAK

APLIKASI KOGENERASI NUKLIR UNTUK DEKOMPOSISI AIR PADA KONVERSI CO₂ MENJADI PUPUK UREA. Telah dilakukan studi aplikasi kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air pada konversi CO₂ menjadi pupuk urea. Metode yang digunakan adalah studi pustaka. Tujuan studi adalah menganalisis aplikasi kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air pada konversi CO₂ menjadi pupuk urea sebagai teknologi alternatif produksi pupuk urea. Hasil studi menunjukkan bahwa proses kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air dimungkinkan untuk diaplikasikan guna mengkonversi CO₂ menjadi pupuk urea. Metode ini tidak memerlukan lagi penggunaan gas alam sebagai bahan baku, sumber energi panas, kukus dan listrik. Produksi dengan kapasitas sebesar 1725 ton pupuk urea per hari, mampu menghemat gas alam sebesar 21,25 juta MMBTU per tahun yang setara dengan pengurangan laju emisi CO₂ sebesar 1,24 juta ton per tahun. Selain itu dapat memanfaatkan emisi CO₂ sebesar 596357 ton per tahun yang berasal dari PLTU batubara dengan daya sebesar 90 MWe, sebagai bahan baku untuk proses pembentukan urea. Pasokan energi panas, kukus dan listrik yang bersumber dari reaktor HTGR dengan daya 2×600 MWt dapat memenuhi kebutuhan proses produksi, dengan kelebihan listrik sebesar 140 MWe. Di samping produksi pupuk sebesar 1725 ton per hari, juga dihasilkan energi listrik tanpa emisi CO₂ yang berasal dari PLTU baubara (90 MWe) dan HTGR (140 MWe) dengan total sebesar 230 MWe yang dapat disambungkan ke jaringan.

Kata kunci: kogenerasi nuklir, dekomposisi air, konversi CO₂, pupuk urea, emisi CO₂

ABSTRACT

NUCLEAR COGENERATION APPLICATION FOR WATER SPLITTING AT CO₂ CONVERSION TO BE UREA FERTILIZER. Study have been conducted on the application of nuclear cogeneration for water splitting at conversion of CO₂ into urea. The method used is literature studies. The purpose of the study is to analyze the applications of nuclear cogeneration for water splitting on the conversion of CO₂ into urea as an alternative to urea production technology. The study shows that the process of nuclear water splitting is possible to convert CO₂ into urea. With this method, the use of natural gas as a raw material, energy source of heat, steam and electricity are not needed anymore. Production with a capacity of 1725 tons of urea per day, will save natural gas of about to 21.25 million MMBTU per year which is equivalent to a reduction CO₂ emissions by 1.24 million tons per year. The process can also utilize 596357 tonnes per year CO₂ emissions which comes from coal power plants with a power of 90 MWe, as a raw material for the formation of urea. Supply of thermal energy, steam and electricity that comes from HTGR with capacity of 2×600 MWt can meet the needs of the production process, with the excess electricity of 140 MWe. In addition to the fertilizer production of 1725 tons per day, it is also generated electric energy without CO₂ emissions from the coal power plant (90 MWe) and HTGR (140 MWe) with a total of 230 MWe that can be connected to the grid.

Keywords: nuclear cogeneration, water splitting, CO₂ conversion, urea fertilizer, CO₂ emission

1. PENDAHULUAN

Pupuk urea (NH₂CONH₂) adalah salah satu jenis pupuk yang diperlukan untuk meningkatkan produktivitas pertanian^[1]. Meningkatnya jumlah penduduk dan semakin menyempitnya lahan pertanian akan mendorong meningkatnya laju permintaan pupuk untuk mempertahankan produktivitas pertanian^[2,3]. Pupuk urea merupakan komponen buatan yang mengandung unsur karbon, hidrogen, oksigen dan nitrogen. Pupuk ini diproduksi dengan bahan baku gas alam (atau hidrokarbon ringan lain) dan udara sebagai sumber nitrogen. Secara konvensional, produksi pupuk urea dilakukan melalui proses *steam reforming* gas alam membentuk hidrogen (H₂) dan carbon monoksida (CO), kemudian direaksikan dengan nitrogen (N₂) dari udara membentuk amonia (NH₃), dan akhirnya dengan CO₂ terbentuk urea. Proses *steam reforming* gas alam merupakan kunci utama proses. Proses ini 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.

Kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air adalah proses termokimia produksi hidrogen dengan memanfaatkan energi nuklir 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^[8,9,10].

Keterbatasan gas alam di masa yang akan datang, dapat menjadi ancaman kesinambungan pabrik pupuk urea jika hanya mengandalkan proses konvensional berbahan baku gas alam. Untuk itu perlu dikaji berbagai proses alternatif produksi pupuk urea dengan bahan baku selain gas alam. Studi di Amerika mengindikasikan bahwa pupuk urea dapat dibuat dengan batubara atau air^[11]. Pada prinsipnya, kunci teknologi pabrik pupuk urea adalah produksi hidrogen pada unit pabrik amonia. Karena hidrogen dapat dihasilkan dari batubara (melalui proses gasifikasi batubara), atau 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* pada pabrik pupuk urea, serta analisis pemenuhan CO₂ sebagai bahan baku yang dibutuhkan pada unit pabrik urea. Dalam proses konvensional berbahan baku gas alam, pada unit proses produksi amonia dihasilkan CO₂ yang dibutuhkan untuk proses pembentukan urea. Jika proses *steam reforming* gas alam diganti dengan proses termokimia penguraian air, CO₂ tidak terbentuk pada unit pabrik amonia, sehingga pada proses pembentukan urea, perlu pasokan CO₂ dari luar sistem. Inilah yang menjadi keunggulan dari aplikasi kogenerasi nuklir, yaitu menguntungkan dari aspek lingkungan. 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 pupuk urea.

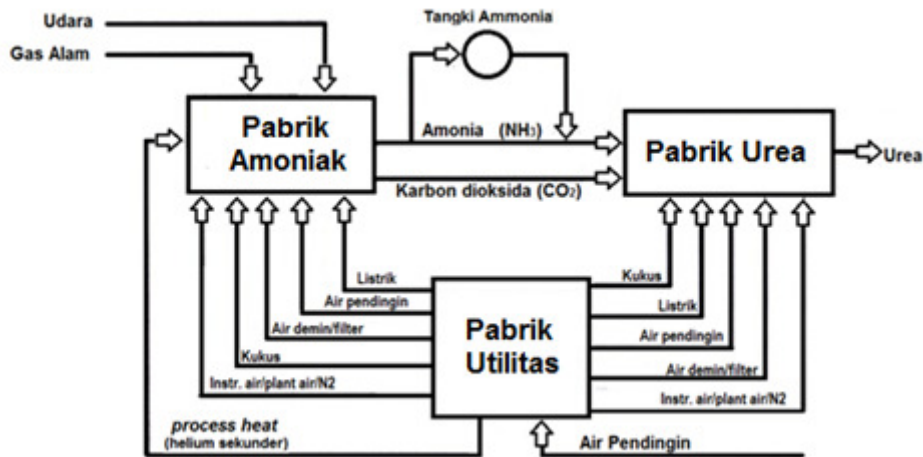
Tujuan studi adalah untuk menganalisis aplikasi kogenerasi nuklir untuk proses dekomposisi air pada pabrik pupuk urea, serta menganalisis kebutuhan dan konversi CO₂ dari industri lain sebagai bahan baku pabrik pupuk urea. Metode yang digunakan dalam studi ini adalah studi pustaka dan analisis hasil-hasil 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 PUPUK UREA

2.1. Proses Konvensional

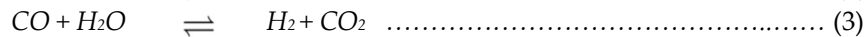
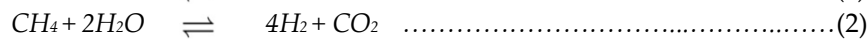
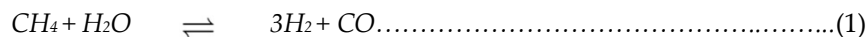
Secara umum proses produksi pupuk urea dapat dilihat pada Gambar 1. Unit utama yang terdapat pada pabrik pupuk urea meliputi: pabrik amonia, pabrik urea, dan pabrik utilitas.



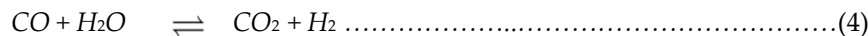
Gambar 1. Diagram alir proses produksi pupuk urea proses konvensional^[12].

2.1.1. Unit Pabrik Amonia

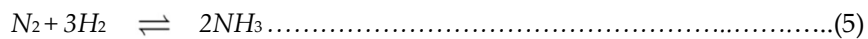
Unit ini berfungsi untuk menghasilkan amonia, dan merupakan tulang punggung proses yang membutuhkan energi paling besar. Pada proses konvensional, digunakan bahan baku gas alam dengan proses *steam reforming* pada temperatur tinggi (~800°C) menghasilkan gas sintesis (campuran H₂ dan CO) sebagai berikut^[13]:



Selanjutnya CO yang terbentuk pada reaksi (1) direaksikan lagi dengan air untuk membentuk CO₂ yang dibutuhkan untuk memproduksi urea.

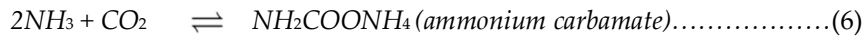


Hidrogen yang dihasilkan pada reaksi (1) dan (2), direaksikan dengan nitrogen dari udara membentuk gas amonia mengikuti persamaan reaksi:



2.1.2. Unit Pabrik Urea

Pada unit pabrik urea, amonia direaksikan dengan CO₂ yang diperoleh pada unit pabrik amonia, yang mana melalui reaksi 2 tahap dihasilkan urea^[13].

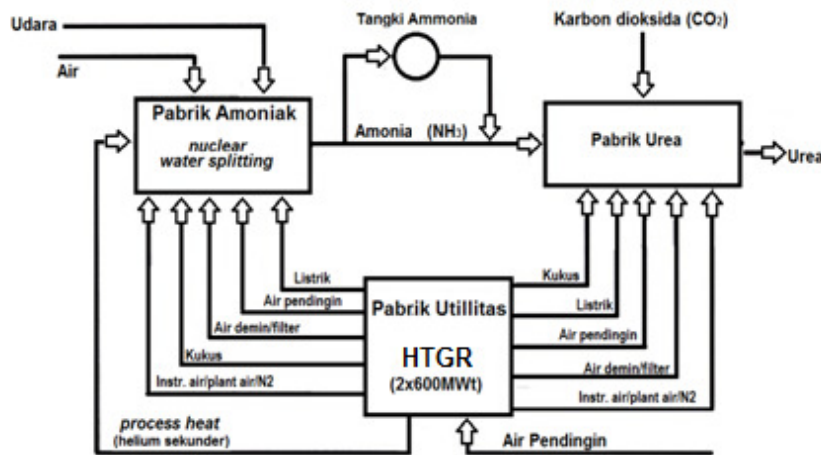


2.1.3. Unit Pabrik Utilitas

Unit ini bertugas memasok kebutuhan energi yang dibutuhkan untuk operasi pabrik. Energi yang diperlukan untuk mengoperasikan pabrik meliputi energi dalam bentuk energi panas, kukus, dan listrik. Energi panas dipenuhi dengan pembakaran langsung gas alam untuk menjalankan proses *steam reforming* gas alam (pabrik amonia) menghasilkan hidrogen. Sedangkan kukus dihasilkan dari sejumlah boiler dengan sumber energi pembakaran gas alam. Sebagian kukus digunakan untuk *process steam*, dan sebagian lagi dikonversi menjadi listrik.

2.2. Proses dengan Kogenerasi Nuklir untuk Dekomposisi Air

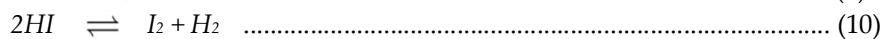
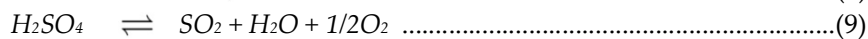
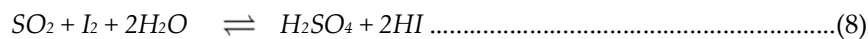
Kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air adalah proses termokimia penguraian molekul air menjadi hidrogen dan oksigen dengan memanfaatkan energi panas nuklir untuk menjalankan proses. Proses ini merupakan kandidat penting aplikasi reaktor nuklir temperatur tinggi untuk memproduksi hidrogen dari air. Proses produksi pupuk urea dengan aplikasi kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air (*water splitting*) dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Proses Produksi Pupuk Urea dengan Nuklir^[12].

2.2.1. Unit Pabrik Amonia

Pada pabrik pupuk urea dengan memanfaatkan teknologi kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air, proses yang diganti adalah proses pembentukan hidrogen pada unit pabrik amonia. Reaksi pembentukan hidrogen dengan proses termokimia siklus *iodine-sulfur* dengan panas nuklir, digunakan untuk menggantikan proses *steam reforming* gas alam. Reaksi 1, 2, 3, dan 4 digantikan dengan reaksi 3 langkah pembentukan hidrogen sebagai berikut^[4,5,7]:



Berbeda dengan reaksi *steam reforming* gas alam yang menghasilkan CO₂, reaksi ini tidak menghasilkan CO₂ yang dibutuhkan pada proses pembentukan urea di unit pabrik urea. Untuk itu, CO₂ harus dipasok dari luar sistem.

2.2.2. Unit Pabrik Urea

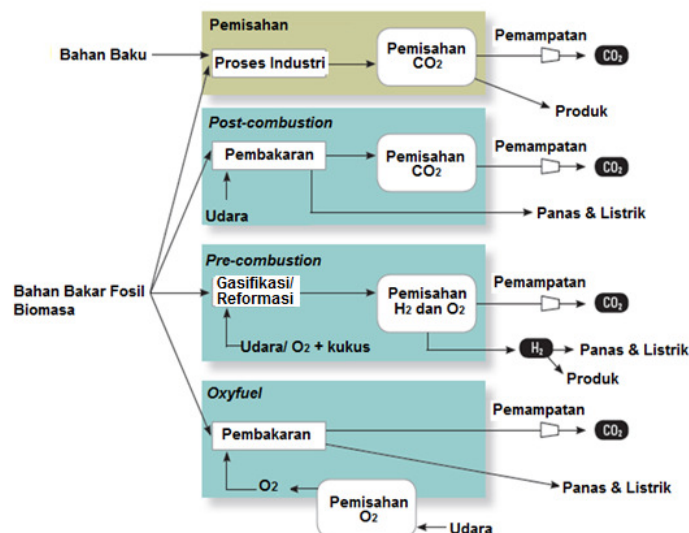
Reaksi yang terjadi pada unit ini sama dengan reaksi pada proses konvensional, dan yang membedakan hanya sumber CO₂ nya. Pada proses konvensional CO₂ diperoleh dari reaksi *steam reforming* gas alam, sedangkan pada aplikasi kogenerasi nuklir, CO₂ diperoleh dari luar sistem.

2.2.3. Unit Pabrik Utilitas

Reaktor nuklir temperatur tinggi menjadi komponen utama pabrik utilitas. Kebutuhan semua jenis energi (panas, kukus dan listrik) sepenuhnya dipasok menggunakan reaktor nuklir temperatur tinggi. Energi panas proses dipenuhi dengan memanfaatkan helium sekunder untuk menjalankan proses kogenerasi nuklir, sedangkan kebutuhan kukus dan listrik diperoleh dengan mengkonversi sebagian energi panas helium sekunder menjadi kukus dan listrik.

2.3. Teknologi Penangkapan dan Pemanfaatan Karbon dioksida

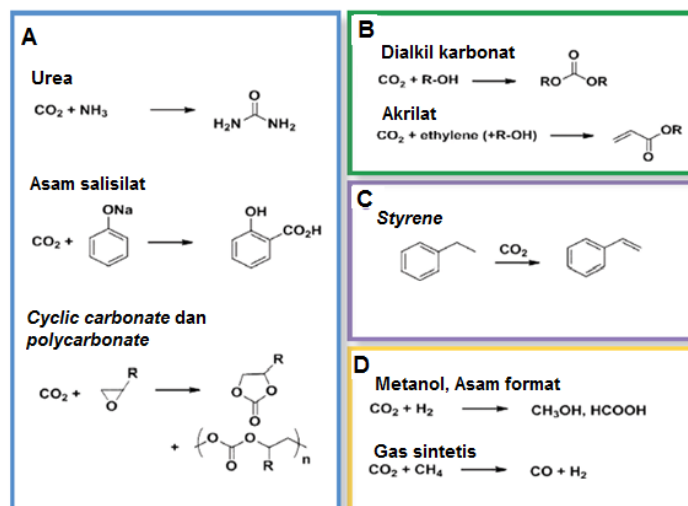
Isu pemanasan global yang dipicu oleh emisi CO₂ telah menjadi isu global yang semakin penting di dunia dan dianggap sebagai penyebab utama perubahan iklim serta berdampak negatif terhadap kehidupan manusia. Salah satu indikator yang digunakan dalam menganalisis isu pemanasan global adalah bertambahnya gas rumah kaca, terutama gas CO₂, secara cepat akibat kegiatan manusia [14,15]. Sejauh ini, berbagai upaya telah dilakukan untuk mengurangi dampak pemanasan global, seperti program penanaman kembali (reboisasi), penghematan energi, penggunaan energi baru dan terbarukan, dan pemanfaatan berbagai rekayasa teknologi. Salah satu teknologi yang digunakan 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 [14,16,17,18]. Teknologi ini masih relatif mahal, dan tidak memberikan nilai tambah secara langsung.



Gambar 3. Prinsip Penangkapan dan Pemisahan CO₂ [14].

Sejak beberapa dasawarsa, teknologi CCS dikembangkan lagi menjadi teknologi CCU (*Carbon Capture and Utilisation*)^[17,19,20]. 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 3 ditunjukkan prinsip penangkapan dan pemisahan CO₂ untuk dimanfaatkan. Sedangkan pada Gambar 4 ditunjukkan beberapa proses industri berbahan baku CO₂ yang potensial dapat memanfaatkan teknologi CCU. Ada 4 klasifikasi industri berbahan baku CO₂. Kelompok A adalah proses yang sudah dimanfaatkan dalam skala industri. Sedangkan Kelompok B, C, dan D prosesnya masih dalam pengembangan.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa produksi urea merupakan salah satu industri yang termasuk dalam Kelompok A, karena prosesnya sudah dipakai sejak lama pada industri pupuk urea. Dalam studi ini, diasumsikan sumber CO₂ untuk dikonversi menjadi pupuk urea berasal dari PLTU batubara yang berada di dekat lokasi pabrik pupuk urea. Kedekatan lokasi akan menurunkan biaya transportasi CO₂ dari PLTU batubara ke unit pabrik urea.



Gambar 4. Beberapa Proses Industri dengan Bahan Baku CO₂^[14, 20].

Di samping itu, sejumlah studi mengindikasikan bahwa CO₂ yang berasal dari pembakaran bahan bakar fosil dapat dikonversi ulang menjadi bahan bakar baru atau bahan baku petrokimia^[21,22]. Studi sangat intensif dilakukan di beberapa negara maju untuk mengkonversi CO₂ menjadi bahan bakar baru yang ramah lingkungan seperti metanol dan DME^[23,24,25].

3. PEMBAHASAN

Perbedaan antara proses konvensional dengan proses aplikasi kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air pada produksi pupuk urea dapat dirangkum pada Tabel 1. Pada Tabel 1 terlihat bahwa kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air dapat mengeliminasi penggunaan gas alam sebagai bahan baku. Hal ini menguntungkan dari sisi penghematan cadangan gas alam, selain itu juga akan berimplikasi pada penurunan laju emisi CO₂. Data *Outlook* BPPT mengindikasikan bahwa Indonesia akan menjadi negara pengimpor neto gas alam pada tahun 2019^[26]. Oleh karena itu, industri pupuk yang selama ini menjadi konsumen gas alam terbesar kedua setelah pembangkit listrik, perlu mencari bahan baku alternatif untuk kelangsungan produksinya.

Studi terdahulu menyebutkan bahwa konsumsi gas alam untuk memproduksi pupuk urea dengan kapasitas produksi sebesar 1725 ton pupuk urea per hari adalah sebesar 21,25 juta MMBTU per tahun, dengan rincian 42% untuk bahan baku, 29% untuk bahan bakar proses, dan 29% untuk bahan bakar utilitas (kukus dan listrik) (Tabel 2)^[12].

Tabel 1. Perbedaan Produksi Pupuk Urea Proses Konvensional dan Proses dengan Nuklir

Tahapan Proses	Proses konvensional	Proses dengan nuklir
1. Bahan Baku	Gas alam, udara, air	CO ₂ , udara, air
2. Unit Pabrik amonia	<ul style="list-style-type: none"> • Proses <i>steam reforming</i> gas alam menghasilkan H₂ dan CO₂. • H₂ direaksikan dengan N₂ dari udara menghasilkan amonia 	<ul style="list-style-type: none"> • Proses kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air siklus <i>iodine-sulfur</i> menghasilkan H₂. • H₂ direaksikan dengan N₂ dari udara menghasilkan amonia
3. Unit Pabrik Urea	<ul style="list-style-type: none"> • Reaksi amonia dan CO₂ menghasilkan urea. • CO₂ berasal dari produk samping proses <i>steam reforming</i> gas alam 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaksi amonia dan CO₂ menghasilkan urea. • CO₂ berasal dari luar sistem, diproduksi atau memanfaatkan emisi dari PLTU atau petrokimia.
4. Unit Utilitas	Memasok kebutuhan panas proses, kukus, dan listrik dengan bahan bakar gas alam	Memasok kebutuhan panas proses, kukus, dan listrik dengan reaktor nuklir temperatur tinggi

Tabel 2. Kebutuhan Gas Alam per tahun^[12]

Sebagai bahan baku	8.945.131,08 MMBTU
Sebagai pemanas di pabrik amonia	6.161.446,75 MMBTU
Sebagai bahan bakar utilitas	6.145.610,99 MMBTU
Total	21.252.188,82 MMBTU

Penghematan gas alam sebesar 21,25 juta MMBTU per tahun ini setara dengan pengurangan laju emisi CO₂ sebesar 1,24 juta ton per tahun^[12]. Penghematan gas alam diperoleh dari penggantian bahan baku dengan CO₂, dan penggantian gas alam sebagai bahan bakar untuk proses panas dan utilitas (listrik dan kukus) dengan energi nuklir.

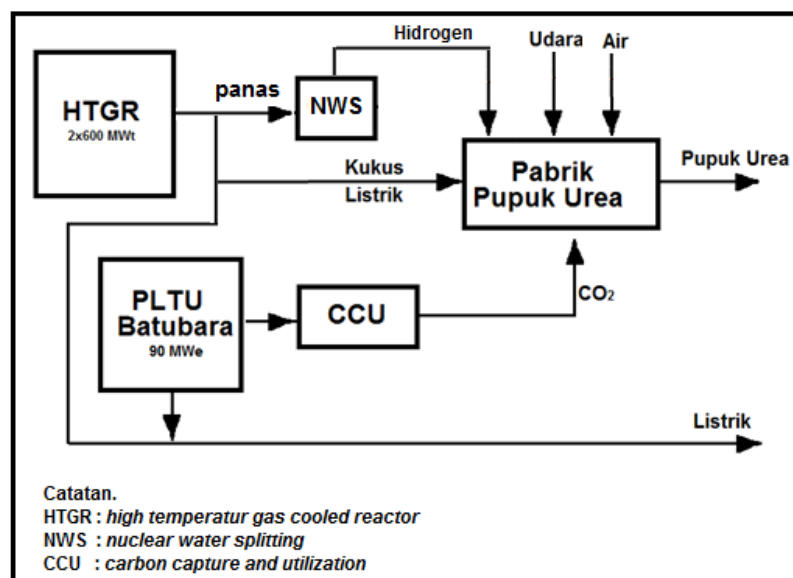
Pada Tabel 3 ditunjukkan neraca energi pada pabrik pupuk urea yang memanfaatkan aplikasi kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air. Terlihat pada tabel tersebut bahwa energi nuklir yang bersumber pada reaktor nuklir temperatur tinggi dengan kapasitas 2×600MWt dapat digunakan untuk memasok kebutuhan energi pada pabrik pupuk urea dengan kapasitas 1725 ton per hari, dengan kelebihan panas yang dikonversi menjadi listrik sebesar 140 MWe untuk disambungkan ke jaringan listrik.

Seperti ditunjukkan pada Tabel 1, bahwa untuk menjalankan reaksi pembentukan urea pada unit pabrik urea, diperlukan pasokan CO₂. Pada sistem konvensional, CO₂ diperoleh dari reaksi *steam reforming* gas alam pada unit pabrik amonia. Sedangkan pada aplikasi kogenerasi nuklir, CO₂ ini harus dipasok dari luar sistem dan merupakan bahan baku untuk dikonversi menjadi urea. Kebutuhan CO₂ untuk proses pembentukan urea dapat dihitung dengan stoikiometri reaksi sesuai persamaan 6 dan 7. Dengan berat molekul urea sebesar 60, dan berat molekul CO₂ sebesar 44, maka untuk memproduksi urea sebesar 1725 ton per hari diperlukan CO₂ sebanyak: $(1725/60) \times 44 = 1265$ ton per hari = 417450 ton/tahun.

Tabel 3. Neraca Energi Pabrik Pupuk Urea dengan Nuklir^[12]

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 pabrik amonia	505,36 MWt
Kukus untuk process steam dan listrik	149 MWt
<i>Process steam</i>	53,92 MWt
Kukus untuk listrik	95,08 MWt ~ 31,38 MWe
Total permintaan	654,36 MWt
Kelebihan energi panas nuklir	425,65 MWt ~ 140,46 MWe

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 417450 ton/tahun dibutuhkan PLTU yang mampu mengemisikan CO₂ sebesar: $417450/0,7 = 596357$ ton per tahun. Dengan faktor emisi CO₂ PLTU batubara sebesar 1,09 kg/kWh dan faktor kapasitas sebesar 70%^[22,27], serta faktor konversi 8760 jam/tahun, maka daya PLTU dapat dihitung sebesar: $[596357/(1,09 \times 0,7 \times 8760)] = 89,223 \approx 90$ MWe. Dengan kata lain jika pabrik pupuk yang dikopling dengan sistem kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air didirikan di dekat PLTU batubara, maka pabrik pupuk akan dapat menyerap emisi CO₂ yang dihasilkan oleh PLTU.



Gambar 5. Skema Kogenerasi Nuklir untuk Dekomposisi Air pada Konversi CO₂.

Skema aplikasi kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air pada proses konversi CO₂ menjadi pupuk urea dengan pasokan CO₂ berasal dari PLTU batubara dapat dilihat pada Gambar 5. HTGR dengan kapasitas 2×600 MWt digunakan untuk memasok antara lain: energi panas untuk proses kogenerasi nuklir guna menjalankan proses dekomposisi air, energi kukus untuk proses panas temperatur rendah, dan listrik. Pada proses tersebut masih

tersisa listrik sebesar 140 MWe untuk disambungkan ke jaringan listrik. Sedangkan PLTU batubara akan memasok kebutuhan CO₂ sebagai bahan baku pada unit pabrik urea. Emisi CO₂ dari PLTU sepenuhnya digunakan sebagai bahan baku untuk pupuk urea, sehingga dihasilkan listrik tanpa emisi dari PLTU batubara. Dari skema tersebut, dapat diketahui pupuk urea yang dihasilkan sebesar 1725 ton per hari, dan listrik sebesar 230 MWe (dari PLTN sebesar 140 MWe dan dari PLTU batubara sebesar 90 MWe).

4. KESIMPULAN

Proses kogenerasi nuklir untuk dekomposisi air dimungkinkan untuk diaplikasikan untuk mengkonversi CO₂ menjadi pupuk urea. Dengan metode ini, penggunaan gas alam sebagai bahan baku, sumber energi panas, kukus dan listrik tidak diperlukan lagi. Produksi pupuk urea dengan kapasitas sebesar 1725 ton per hari, akan mampu menghemat gas alam sebesar 21,25 juta MMBTU per tahun yang setara dengan pengurangan laju emisi CO₂ sebesar 1,24 juta ton per tahun. Proses juga dapat memanfaatkan emisi CO₂ yang berasal dari PLTU batubara dengan daya sebesar 90 MWe. Pasokan energi panas, kukus dan listrik yang bersumber dari reaktor HTGR dengan daya 2×600 MWt dapat memenuhi kebutuhan proses produksi, dengan kelebihan listrik sebesar 140 MWe. Total kelebihan listrik yang dapat disambungkan ke jaringan sebesar 230 MWe, yang berasal dari PLTU batubara (90 MWe) dan energi nuklir (140 MWe).

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. BUCHEL, K. H., MORETTO, H. H., WERNER, D., "Industrial Inorganic Chemistry, Second Completely Revised Ed", John Wiley & Sons, USA, 2008.
- [2]. HERMAWAN, I., "Analisis dampak kebijakan subsidi pupuk urea dan TSP terhadap produksi padi dan capaian swasembada pangan di Indonesia", *Jurnal Ekonomi dan Kebijakan Publik*, Vol. 5, No. 1, Juni 2014.
- [3]. KASIYATI, S., "Analisis dampak subsidi harga pupuk terhadap output sektor produksi dan tingkat pendapatan rumah tangga di Jawa Tengah", *Jurnal Organisasi dan Manajemen*, Vol. 6, No. 1, Maret 2010, 28-45, LPPM UT.
- [4]. ONUKI, K., et.al., "IS process for thermochemical hydrogen production", *JAERI-Review 94-006*, 1994.
- [5]. SALIMY, D. H., Technical Report: "Study on Process Improvement of Thermochemical Hydrogen Production IS Process", Dept. of Advanced Nuclear Heat Tech., JAERI, 2002.
- [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]. ONUKI, K., et.al., "Study on Thermochemical Iodine-Sulfur Cycle at JAERI, *Proceeding of 12th International Conference on Nuclear Engineering*", Volume 2, Arlington, Virginia, USA, April 25-29, 2004.
- [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]. BAE, K., et. al., "Hydrogen Production by Thermochemical Water-splitting IS Process", *Proceeding of 16th World Hydrogen Energy Conference*, Lyon, France, June 13-16, 2006.
- [10]. SONG, K. N., HONG, S. D., PARK, H. Y., "High Temperature Structural Analysis on a Medium-scale Process Heat Exchanger", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A*, Vol. 36, No. 10, 2012.

- [11]. INL, Technical report: "Nuclear-Integrated Ammonia Production Analysis", Idaho National Laboratory – Battelle Energy Alliance, Idaho 2010.
- [12]. SALIMY, D. H., "Aplikasi Energi Panas Nuklir Temperatur Tinggi Pada Pabrik Pupuk Urea", *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Vol. 14, No. 1, Juni 2012, Jakarta.
- [13]. KENT, J. A., "Kent and Riegel's Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology: Vol. 1, 7th ed", Springer Science & Business Media, New York, 2010.
- [14]. "_____", "Carbon Capture and Storage/Utilisation Technology", National Climate Change Secretariat and National Research Foundation, Singapore, 2011.
- [15]. 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.
- [16]. HASHIM, H., DOUGLAS, P., ELKAMEL, A., CROISET, E., "Optimization Model for Energy Planning with CO₂ Emission Considerations", *Journal of Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 44, Issue 4, 2005.
- [17]. 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*, Vol. 45, Issue 3, May 2014.
- [18]. SIRIWARDANE, R. V., SHEN, M. S., FISHER, E. P., POSTON, J. A., "Adsorption of CO₂ on Molecular Sieves and Activated Carbon", *Journal of Energy Fuels*, Vol.15, Issue 2, 2001.
- [19]. ARESTA, M., DIBENEDETTO, A., ANGELINI, A., "The Changing Paradigm in CO₂ Utilization", *Journal of CO₂ Utilization*, Vol. 3-4, Issue 1, November 2013.
- [20]. LI, L., ZHAO, N., WEI, W., SUN, Y., "A Review of Research Progress on CO₂ Capture, Storage, and Utilization in Chinese Academy of Sciences", *Journal of Fuel*, Vol. 108, 2013.
- [21]. HUANG, W., et.al., "Possibility of Direct Conversion of CH₄ and CO₂ to High-value Products", *Journal of Catalysis*, Vol. 201, 2001.
- [22]. 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.
- [23]. KONDRATENKO, E. V., et.al., "Status and Perspectives of CO₂ Conversion Into Fuels and Chemicals by Catalytic, Photocatalytic and Electrocatalytic Processes", *Journal of Energy Environ. Sci.*, Vo. 6, 2013.
- [24]. SANKARNARAYANAN, 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, Sept-Oct 2012.
- [25]. OLAH, G. A., GOEPPERT, A., SURYAPRAKASH, G. K., "Chemical Recycling of Carbon Dioxide to Methanol and Dimethyl Ether: from Greenhouse Gas to Renewable, Environmentally Carbon Neutral Fuels and Synthetic Hydrocarbons", *Journal of Organic Chemistry*, Vol. 74, Issue 2J, 2009.
- [26]. BPPT, "Outlook Energi Indonesia 2013", PTPSE – BPPT, Jakarta 2013.
- [27]. TAO, S., "Ammonia Production for Renewable Energy Storage", *Proceeding of H₂FC Supergen Hydrogen and Fuel Cell Hub Meeting*, Aberdeen, 21st May 2013.