

APLIKASI ENERGI PANAS NUKLIR TEMPERATUR TINGGI PADA PABRIK PUPUK UREA

Djati H. Salimy

Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN) – BATAN
Jalan Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan 12710
Telp/Fax: (021) 5204243 Email: djatihs@batan.go.id

Masuk: 14 Maret 2012

Direvisi: 5 April 2012

Diterima: 7 Mei 2012

ABSTRAK

APLIKASI ENERGI PANAS NUKLIR TEMPERATUR TINGGI PADA PABRIK PUPUK UREA.

Telah dilakukan studi aplikasi energi panas nuklir temperatur tinggi pada pabrik pupuk urea. Tujuan studi ini adalah untuk memahami karakteristik dan kemungkinan pemanfaatan energi panas reaktor nuklir temperatur tinggi pada produksi pupuk urea. Dalam studi ini, pabrik pupuk urea dengan kapasitas produksi sebesar 1725 ton per hari digunakan sebagai acuan perhitungan. Dalam studi diskenariokan bahwa semua kebutuhan energi panas dalam bentuk process heat, process steam, dan listrik dipenuhi dengan energi nuklir. Dari neraca energi diperoleh bahwa dari energi termal reaktor nuklir temperatur tinggi dengan daya sebesar 600 MWt, dapat dimanfaatkan untuk process heat pada proses steam reforming gas alam sebesar 274,3 MWt, sedang untuk process steam dan listrik diperoleh dengan mengkonversi panas nuklir sebesar 101,44 MWt. Total energi panas sebesar 375,74 MWt telah mencukupi untuk operasi pabrik. Energi panas yang tersisa sebesar 164,25 MWt dikonversi menjadi listrik sebesar 54,2 MWe untuk disambungkan ke jaringan PLN. Aplikasi energi panas reaktor nuklir temperatur tinggi juga memberi keuntungan penghematan gas alam. Jika pada proses konvensional kebutuhan gas alam antara lain untuk bahan baku, sumber energi panas reaksi, dan utilitas (termasuk listrik), pada proses dengan nuklir kebutuhan gas alam hanya untuk bahan baku proses. Pada proses konvensional, dari total kebutuhan gas alam sebesar 21,25 juta MMBTU per tahun, hanya sekitar 8,95 juta MMBTU sebagai bahan baku. Penghematan yang diperoleh dengan pemanfaatan panas nuklir sebesar 12,3 juta MMBTU (~60%) yang setara dengan pengurangan laju emisi gas CO₂ sebesar 718.192,42 ton/tahun.

Kata kunci: pupuk urea, steam reforming, process heat, process steam

ABSTRACT

THE APPLICATION OF HIGH TEMPERATUR NUCLEAR HEAT FOR UREA FERTILIZER PLANT.

The study of high temperature nuclear heat application for urea fertilizer plant has been carried out. The goal of the study is to understand the characteristic and possibility of high temperature nuclear heat application for urea fertilizer plant. In this study, the urea fertilizer plant with the capacity production of 1725 ton per day is used as a reference. Energy balance calculatin indicate that thermal energi from high temperatur nuclear reactor with thermal power of 600 MWt, can be distributed as follow: 274,3 MWt can be utilized as process heat for natural gas steam reforming, while about 101,44 MWt for process steam and electricity production to support the process. Total energy required for operating the plant is 375,74 MWt. The rest, about 101,44 MWt is converted to electricity about 54,2 MWe, send to the public grid. In conventional process of urea fertilizer plant, the demand of natural gas is used for raw material, heat energy source for chemical reaction, and utility (process steam and electricity), while for nuclear application the need of natural gas only for raw material. At conventional process, from total demand of natural gas about 21.25 million MMBTU per year, only about 8.95 million MMBTU used as raw material. n About 12,3 million MMBTU (~60%) natural gas can be saved that mean reduce CO₂ emmision about 718,192.42 ton/year.

Keywords: urea fertilizer, steam reforming, process heat, process steam.

1. PENDAHULUAN

Kebijakan pemanfaatan energi nuklir guna pembangkitan listrik dan kogenerasi di Indonesia adalah terwujudnya peran energi nuklir secara simbiotik dan sinergistik dengan sumberdaya energi tak terbarukan maupun terbarukan untuk memenuhi kebutuhan energi nasional guna mendukung pembangunan berkelanjutan^[1]. Untuk itu, disamping mendorong terwujudnya PLTN pertama di Indonesia, BATAN juga harus terus melakukan berbagai kajian reaktor nuklir masa depan seperti: konsep reaktor kogenerasi produksi air bersih (desalinasi), penggunaan panas proses untuk operasi industri temperatur tinggi dan medium seperti produksi hidrogen, gasifikasi batubara, dan lain-lain. Dalam forum internasional, terbentuknya *Nuclear Hydrogen Society* pada tahun 2001 di Jepang^[2], mendorong kerjasama yang semakin intensif diantara negara-negara maju untuk mewujudkan terealisasinya sistem energi nuklir hidrogen, yaitu suatu sistem produksi hidrogen berbasis energi panas dari reaktor nuklir. Sistem produksi hidrogen dengan energi panas nuklir dapat dimanfaatkan pada berbagai industri temperatur tinggi, seperti petrokimia atau pabrik pupuk urea.

Pupuk urea (NH_2CONH_2) adalah salah satu jenis pupuk organik yang diperlukan untuk meningkatkan produktivitas pertanian^[3,4]. Meningkatnya jumlah penduduk dan semakin menyempitnya lahan pertanian, mendorong meningkatnya laju permintaan pupuk untuk mempertahankan produktivitas pertanian.

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. Produksi pupuk urea dilakukan melalui proses *steam reforming* gas alam membentuk hidrogen (H_2) dan carbon monoksida (CO), kemudian direaksikan dengan nitrogen (N_2) dari udara membentuk amoniak (NH_3), dan akhirnya dengan CO_2 terbentuk urea. Proses *steam reforming* gas alam merupakan kunci utama proses. Proses ini merupakan proses endotermik yang beroperasi pada temperatur tinggi ($\sim 800^\circ\text{C}$) sehingga membutuhkan energi termal dalam jumlah besar. Kebutuhan energi termal untuk menjalankan proses dipasok dari pembakaran langsung bahan bakar fosil gas alam. Berdasarkan pengalaman operasi, dari total kebutuhan gas alam, hanya sekitar 40% yang diproses sebagai bahan baku. Sisanya dibakar untuk memasok kebutuhan energi termal pada proses *steam reforming*, dan untuk memenuhi kebutuhan *process steam* dan listrik yang dibutuhkan untuk menjalankan pabrik.

Konsep aplikasi energi nuklir sebagai sumber energi (panas dan listrik) untuk industri telah dikaji lebih dari 50 tahun. Reaktor temperatur tinggi berpendingin gas (HTGR, *High Temperature Gas cooled Reactor*) yang beroperasi pada temperatur tinggi ($\sim 1000^\circ\text{C}$) dan reaktor pembiak cepat (FBR, *Fast Breeder Reactor*) yang beroperasi pada temperatur 500-700°C diperkirakan merupakan jenis reaktor yang sangat potensial menyumbangkan produksi energinya untuk kebutuhan industri. Salah satu aplikasi teknologi reaktor nuklir temperatur tinggi adalah proses *steam reforming* gas alam untuk memproduksi hidrogen. Beberapa negara seperti Jepang, Jerman, Cina, dan Afrika Selatan melakukan studi sangat intensif proses *steam reforming* gas alam dengan reaktor nuklir temperatur tinggi^[5,6]. Negara dengan litbang paling maju saat ini adalah Jepang. Sejak dasawarsa 1990-an, Jepang mengoperasikan reaktor HTGR yang disebut HTTR (*High Temperature Engineering Testing Reactor*) untuk dikopel dengan proses produksi hidrogen dan metanol. Sejak dekade 2000 an Jepang membangun *demonstration plant* kopel nuklir dengan proses *steam reforming* gas alam menghasilkan hidrogen dan methanol^[7].

Jika proses *nuclear steam reforming* gas alam dapat diterapkan pada industri pupuk, diharapkan dapat diperoleh keuntungan dari sisi penghematan bahan bakar fosil yang

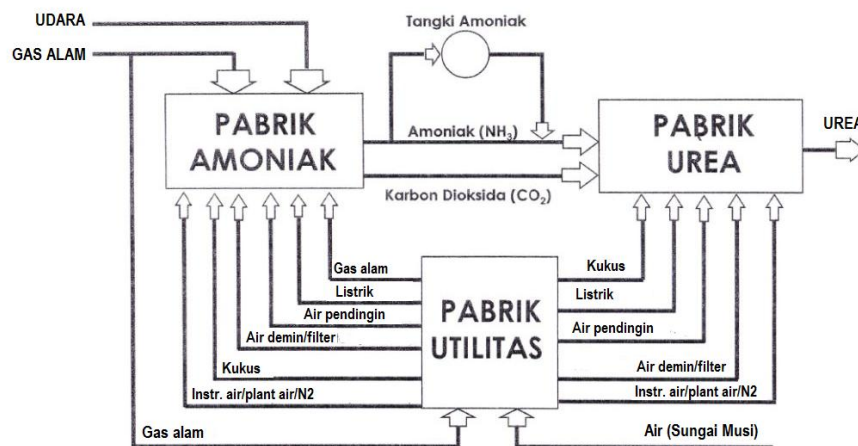
berimplikasi pada penurunan laju emisi gas rumah kaca, serta merupakan diversifikasi pemanfaatan reaktor nuklir.

Makalah ini membahas analisis kemungkinan aplikasi proses *nuclear steam reforming* gas alam pada pabrik pupuk urea. Dalam analisis dilakukan perhitungan distribusi energi termal nuklir untuk menjalankan proses pada pabrik pupuk, besarnya penghematan bahan bakar fosil, serta potensi penurunan laju emisi gas CO₂. Tujuan studi adalah untuk memahami kemungkinan kopling reaktor nuklir temperatur tinggi dengan industri pupuk. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat menjadi bahan masukan pada pemangku kepentingan dalam menyusun kebijakan pengembangan energi nuklir di Indonesia.

2. PABRIK PUPUK UREA DENGAN ENERGI NUKLIR

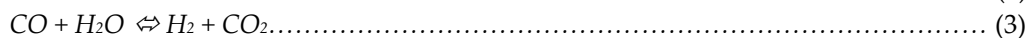
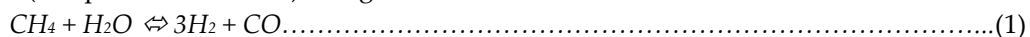
2.1 Proses Produksi Pupuk Urea

Proses produksi pupuk urea secara umum dapat dilihat pada Gambar 1. Terlihat pada gambar tersebut bahwa unit utama yang ada pada pabrik pupuk urea meliputi: pabrik amoniak, pabrik utilitas, dan pabrik urea.

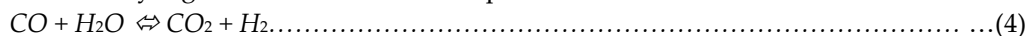


Gambar 1. Blok Diagram Pembuatan Pupuk Urea^[8]

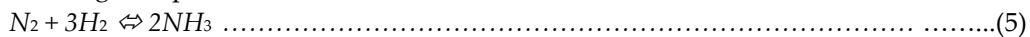
Pada unit pabrik amoniak, terjadi proses *steam reforming* gas alam menghasilkan gas sintesis (campuran H₂ dan CO) sebagai berikut^[9]:



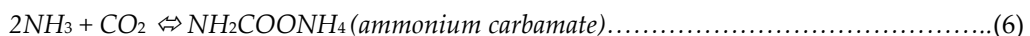
Selanjutnya CO yang terbentuk pada reaksi (1) direaksikan lagi dengan air untuk membentuk CO₂ yang dibutuhkan untuk memproduksi urea.



Hidrogen yang dihasilkan pada reaksi (1) dan (2), direaksikan dengan nitrogen membentuk amoniak mengikuti persamaan reaksi:



Pada unit pabrik urea, amoniak direaksikan dengan CO₂ dalam reaksi 2 tahap menghasilkan urea.



Energi yang diperlukan untuk mengoperasikan pabrik meliputi energi dalam bentuk energi panas, kukus, dan listrik. Pada proses konvensional, kebutuhan ke tiga jenis energi tersebut dicukupi dengan pembakaran bahan bakar fosil gas alam. Energi panas dipenuhi

dengan pembakaran langsung gas alam untuk menjalankan proses *steam reforming* gas alam (pabrik amoniak) menghasilkan amoniak. Sedangkan kukus dihasilkan dari sejumlah boiler dengan sumber energi pembakaran gas alam. Sebagian kukus digunakan untuk *process steam*, dan sebagian lagi dikonversi menjadi listrik.

Dalam studi ini, kebutuhan 3 jenis energi panas tersebut akan diganti menggunakan energi nuklir yang berasal dari reaktor nuklir temperatur tinggi. Reaktor nuklir temperatur tinggi menjadi komponen utama pabrik utilitas. Dari reaktor nuklir ini, akan dipasok kebutuhan energi panas, kukus, dan listrik. Energi panas dipenuhi dengan memanfaatkan helium sekunder untuk menjalankan proses *steam reforming* gas alam. Sedangkan kebutuhan kukus dan listrik diperoleh dengan mengkonversi sebagian energi panas helium sekunder menjadi kukus dan listrik.

2.2 Data Referensi dan Asumsi Perhitungan

Pada studi ini, data yang diperoleh dari pabrik pupuk urea PT. Pupuk Sriwijaya Unit IB digunakan sebagai acuan. Kapasitas pabrik Unit IB sebesar 1725 ton pupuk urea per hari. Untuk menghasilkan pupuk urea dengan kapasitas tersebut dibutuhkan bahan baku utama sbb^[8]: gas alam 629, 59 ton per hari, kukus 2261, 88 ton per hari, dan udara 119733,79 ton per hari.

Dalam proses produksi, unit pabrik amoniak merupakan unit utama pada setiap pabrik pupuk urea. Unit ini juga merupakan unit yang paling banyak mengkonsumsi energi panas. Untuk mengoperasikan pabrik pupuk urea dengan kapasitas 1725 ton per hari, unit pabrik amoniak harus mampu menghasilkan hidrogen dengan kapasitas sebesar 198,1 ton per hari. Hidrogen ini dihasilkan melalui proses *steam reforming* gas alam, dengan bahan baku gas alam sebanyak 629,59 ton per hari. Pada proses konvensional, gas alam juga digunakan sebagai sumber energi panas.

Kebutuhan gas alam per tahun dan peruntukannya untuk menghasilkan pupuk urea dengan kapasitas 1725 ton per hari dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kebutuhan Gas Alam per tahun^[8]

Sebagai bahan baku	8.945.131,08 MMBTU
Sebagai pemanas di pabrik amoniak	6.161.446,75 MMBTU
Sebagai bahan bakar utilitas	6.145.610,99 MMBTU
Total	21.252.188,83 MMBTU

Terlihat pada Tabel 1 bahwa kebutuhan gas alam sebagai bahan baku hanya sekitar 40% kebutuhan total. Dengan memanfaatkan reaktor nuklir temperatur tinggi sebagai sumber panas proses, kukus, dan listrik, sekitar 60% gas alam dapat dihemat.

Kukus yang digunakan pada pabrik pupuk mempunyai parameter tekanan 42,2 kg/cm² dan temperatur 399°C. Kukus yang dihasilkan dari *waste heat boiler* dengan laju alir 90 ton per jam dikonversi menjadi listrik, sedangkan kukus yang dihasilkan dari *package boiler* dengan laju 120 ton per jam digunakan untuk mendukung *process steam* pada pabrik amoniak dan pabrik urea.

Perhitungan kebutuhan energi panas nuklir dalam bentuk *process heat* yang dibawa media pemanas helium sekunder, dilakukan dengan asumsi berdasarkan hasil penelitian dari berbagai negara. Perhitungan peneliti di Amerika dan Korea menunjukkan bahwa reaktor nuklir temperatur tinggi dengan daya termal 600 MWt dapat dimanfaatkan untuk memproduksi hidrogen sebanyak 200 ton per hari dengan efisiensi proses termokimia sebesar 48%^[10,11]. Jika diasumsikan 25% energi termal nuklir digunakan untuk *process steam*,

maka sisanya yang dimanfaatkan sebagai *process heat* untuk menghasilkan hidrogen. Dari sini dapat dihitung kebutuhan energi termal dari panas nuklir sebagai berikut: 200 ton $H_2/450MWt = 0,444$ ton H_2 per 1 MWt panas nuklir.

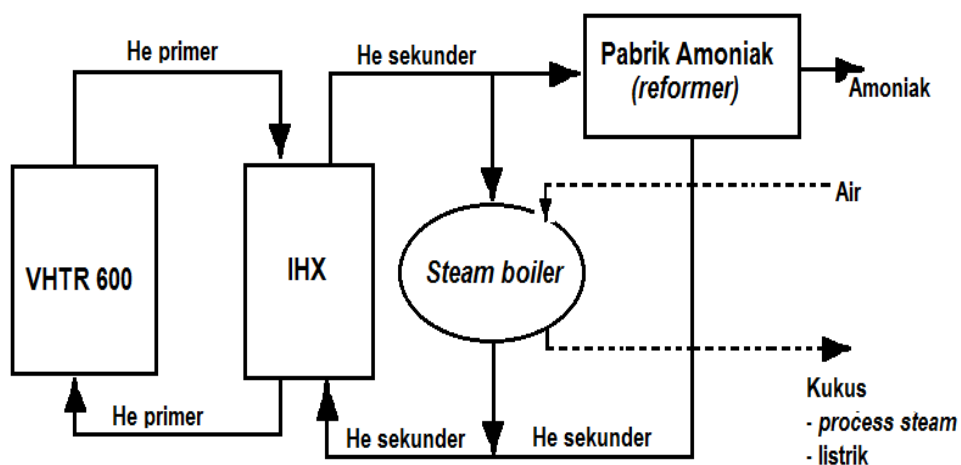
Dalam studi ini, reaktor nuklir yang dipakai sebagai acuan dalam perhitungan adalah reaktor nuklir temperatur tinggi Generasi IV VHTR (*Very High Temperature Reactor*)^[12]. Reaktor temperatur tinggi berpendingin gas helium jenis GT MHR digunakan sebagai acuan perhitungan dengan pertimbangan reaktor ini mewakili reaktor VHTR yang lain. Parameter desain reaktor GT MHR (*Gas Turbine-Modular Helium Reactor*) yang digunakan dalam perhitungan dapat dilihat pada Tabel 2^[13].

Tabel 2. Parameter desain GT MHR^[13]

Nama reaktor	GT-MHR
Perancang	General Atomic, USA Minitom, Rusia
Pendingin	Gas
Daya	600 MWt
Bejana reaktor	
Tinggi	24 m
Diameter	8,5 m
Bahan bakar	
Tipe	UO ₂ /MOX
Pengayaan	20%
Tekanan	
Inlet	7,07 MPa
Outlet	7,02 MPa
Tekanan	
Inlet	500°C
Outlet	900°C
Penggantian bahan bakar	>2 tahun

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan yang dilakukan dalam studi ini adalah untuk memprediksi distribusi energi panas nuklir untuk menjalankan pabrik pupuk urea. Aliran distribusi energi panas nuklir dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar2. Skema distribusi aliran energi panas

Luaran panas reaktor nuklir temperatur tinggi yang dibawa oleh pendingin gas helium pada temperatur sekitar 900°C, dipindahkan panasnya melalui *intermediate heat exchanger* (IHX) menggunakan helium sekunder. Helium sekunder yang temperaturnya sekitar 850°C dan relatif tidak terpapar radiasi inilah yang dimanfaatkan energi panasnya. Pada industri pupuk urea, energi panas helium sekunder ini dibagi menjadi 2 bagian yaitu untuk *process heat* dan *process steam*. Untuk *process heat*, panas helium sekunder dialirkan ke reaktor *steam reforming* gas alam. Sedang *process steam* yaitu mengubah sebagian panas yang dibawa helium sekunder menjadi kukus menggunakan *steam boiler* sesuai kebutuhan *process steam*. Sebagian *process steam* kemudian dikonversi menjadi listrik.

3.1 Neraca Energi Panas Nuklir

Process Heat

Pada asumsi perhitungan telah disebutkan bahwa produksi hidrogen proses termokimia yang efisiensi termalnya 48%, untuk setiap MWt energi panas nuklir dapat menghasilkan hidrogen sebesar 0,444 ton per hari. Karena pada pabrik pupuk urea, proses produksi hidrogen yang digunakan adalah proses *steam reforming* gas alam yang efisiensi termalnya jauh lebih tinggi (78%) daripada proses termokimia, maka 1 MWt energi panas nuklir diperkirakan dapat menghasilkan hidrogen sebanyak $= (78/48) \times 0,444 = 0,722$ ton.

Untuk memenuhi kebutuhan hidrogen sebesar 198,1 ton per hari pada proses *steam reforming* pada unit pabrik amoniak, dibutuhkan energi *process heat* sebesar $= (198,1/0,722) = 274,3$ MWt.

Process Steam dan Listrik

Kukus yang digunakan pada pabrik pupuk urea diproduksi dengan panas nuklir yang dibawa oleh helium sekunder. Parameter kukus yang dibutuhkan adalah tekanan sebesar 42,2 kg/cm² dan temperatur 399°C. Kukus yang diproduksi dengan *waste heat boiler* (WHB) dengan laju alir 90 ton per jam dikonversi menjadi listrik. Sedangkan kukus yang diproduksi menggunakan *package boiler* memiliki laju produksi sebesar 120 ton per jam dimanfaatkan untuk mendukung *process steam* pada unit pabrik urea dan pabrik amoniak. Pada WHB, produksi kukus dilakukan dengan memanfaatkan energi panas sisa dari proses *steam reforming*, kekurangannya baru mengambil energi panas dari helium sekunder. Berdasarkan pengalaman pada industri temperatur tinggi^[8,14], diasumsikan kekurangan panas yang harus dipasok dengan helium sekunder pada WHB adalah 50% dari total produksi. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan kebutuhan kukus

Jenis pembangkit uap	<i>Waste heat boiler</i> (WHB) <i>Package boiler</i> (PB)
Kapasitas produksi WHB	90 ton/jam
Kapasitas produksi PB	120 ton/jam
Parameter kukus	
Tekanan	4,22 MPa
Temperatur	399°C
Total energi nuklir yang dibutuhkan	149 MWt
Untuk listrik	95,08 MWt
Listrik yang dihasilkan	31,38 MWe
<i>Process steam</i>	53,92 MWt

Rekapitulasi Perhitungan Neraca Energi

Hasil perhitungan distribusi pemanfaatan energi panas nuklir dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi hasil perhitungan neraca energi

Pasokan Energi	
Daya reaktor nuklir VHTR	600 MWt
Efisiensi termal IHX (recuperator)	90%
Daya luaran IHX	540 MWt
Efisiensi pembangkit uap	90%
Permintaan Energi	
<i>Process heat</i> unit pabrik amoniak	274,3 MWt
Kukus untuk <i>process steam</i> dan listrik	101,44 MWt
<i>Process steam</i>	53,92 MWt
<i>Make up</i> untuk listrik (WHB) 50%	47,52 MWt
Listrik untuk utilitas	31,38 MWe
Total permintaan	375,74 MWt
Kelebihan energi panas nuklir	164,25 MWt ~ 54,2 MWe

Terlihat pada Tabel 4 bahwa kebutuhan terbesar dari proses adalah proses *steam reforming* gas alam pada unit pabrik amoniak. Hal ini dapat dipahami mengingat proses yang terjadi adalah proses kimia endotermis yang beroperasi pada temperatur tinggi sehingga berimplikasi membutuhkan energi termal temperatur tinggi dalam jumlah banyak. Kebutuhan energi termal temperatur tinggi ini mengakibatkan diperlukannya sistem reaktor *steam reforming* gas alam dengan panas nuklir helium sekunder. Hasil studi di Jepang diasumsikan dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan tersebut^[15].

Kapasitas WHB yang sebesar 95,05 MWt diasumsikan 50% kebutuhan energi panas dapat dicukupi dengan memanfaatkan panas sisa (*waste heat*) dari proses *steam reforming*. Kekurangan panas yang 50% (47,52 MWt) baru diambil dari panas yang dibawa helium sekunder dari IHX.

Pada Tabel juga terlihat bahwa total kebutuhan panas untuk menjalankan pabrik pupuk adalah sebesar 375,74 MWt, sementara pasokan energi panas nuklir yang dapat dimanfaatkan sebesar 540MWt, sehingga diperoleh kelebihan energi panas sebesar 164,25 MWt yang dapat dikonversi menjadi listrik sebesar 54,2 MWe untuk dijual ke PLN.

3.2 Potensi Penurunan Emisi CO₂

Potensi penurunan laju emisi CO₂ diperoleh dari penghematan pemakaian gas alam sebagai bahan bakar. Pemanfaatan reaktor nuklir temperatur tinggi mampu mencukupi kebutuhan semua energi termal yang dibutuhkan pabrik, sehingga gas alam hanya dibutuhkan sebagai bahan baku.

Dari Tabel 1 terlihat bahwa dari total kebutuhan gas alam per tahun sebesar 21.252.188,83 MMBTU, hanya sebesar 8.945.131,08 MMBTU yang digunakan sebagai bahan baku. Sisanya sebesar 12.307.057,75 MMBTU per tahun digunakan sebagai bahan bakar. Gas alam sebesar 12.307.057,75 MMBTU per tahun inilah yang dapat dihemat jika reaktor nuklir temperatur tinggi dimanfaatkan untuk menjalankan proses. Perhitungan potensi penghematan emisi CO₂ dilakukan dengan cara sebagai berikut:

Reaksi: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Berat molekul $\text{CH}_4 = 16$ dan berat molekul $\text{CO}_2 = 44$.

Gas alam sebesar 12.307.057,75 MMBTU per tahun setara dengan 261162331,65 kg/tahun. Sehingga potensi pengurangan emisi CO_2 adalah sebesar $= 44/16 \times 261162331,65 = 718.196,42$ ton/tahun.

Terlihat dari hasil perhitungan bahwa aplikasi energi panas reaktor nuklir temperatur tinggi dapat menghemat pengurasan sumber daya energi fosil gas alam, yang secara langsung berdampak pula pada potensi penurunan laju emisi gas rumah kaca.

4. KESIMPULAN

Dari studi dan analisis yang dilakukan dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

- a. Energi termal yang dipasok dari reaktor nuklir temperatur tinggi dengan daya 600 MWt lebih dari cukup untuk mengoperasikan pabrik pupuk urea dengan kapasitas 1725 ton pupuk urea per hari.
- b. Kebutuhan energi termal pada pabrik pupuk urea adalah sebesar 375,74 MWt, dengan distribusi dalam bentuk *process heat* sebesar 274,3 MWt untuk menjalankan proses *steam reforming* gas alam, dalam bentuk *process steam* dan listrik sebesar 101,44 MWt. Energi yang tersisa sebesar 164,25 MWt kemudian dikonversi menjadi listrik sebesar 54,2 MWe untuk disambungkan ke jaringan PLN.
- c. Penggantian sumber panas konvensional dengan nuklir mampu menghemat gas alam sebanyak 12,3 juta MMBTU per tahun yang setara dengan potensi pengurangan laju emisi CO_2 sebesar 718.192,42 ton/tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. SOENTONO, S., "Peran BATAN dalam Alih Teknologi Energi Nuklir di Indonesia", Seminar Nasional ke-12 Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Yogyakarta, 2006.
- [2]. _____, "Nuclear Hydrogen Society established in Japan", International Journal of Hydrogen Energy 26, 2001.
- [3]. _____, <http://id.wikipedia.org/wiki/Urea>, Urea, diakses 5 Januari 2012.
- [4]. _____, <http://id.wikipedia.org/wiki/Pupuk>, Pupuk, diakses 5 Januari 2012.
- [5]. BOLTHRUNIS, C. O., et.al., "Using a PBMR to Heat a Steam Methane Reformer: Technology and Economics", Proceedings HTR2006: 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology October 1-4, 2006, Johannesburg, 2006.
- [6]. FUJIMOTO, N., et.al., "Present Status of HTTR Project, Achievement of 950C of Reactor Outlet Coolant Temperature, GTHTTR300C for Hydrogen Cogeneration", OECD/NEA 3rd Information Exchange Meeting on the Nuclear Production of Hydrogen, Oarai, 2005.
- [7]. MASAO, H., SHIOZAWA, S., "Research and Development for nuclear production of hydrogen in Japan", OECD/NEA 3rd Information Exchange Meeting on the Nuclear Production of Hydrogen, Oarai, 2005.
- [8]. PT. Pupuk Sriwijaya, Komunikasi Pribadi, 2011.
- [9]. _____, <http://nzi.org.nz/ChemProcesses/production1A.pdf>, "Ammonia and Urea Production", diakses 22 Desember 2011.
- [10]. _____, "Hydrogen Production from Nuclear Power", <http://www.eoearth.org/article>, diakses pada 24 Juni 2011.
- [11]. PURWADI, D., "Desain Konseptual Sistem Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT", Prosiding Seminar Nasional ke -16 tentang Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir, Surabaya, 2010.
- [12]. _____, "Very High Temperatur Reactor", <http://en.wikipedia.org/wiki>, diakses pada 20

Agustus 2011.

- [13]. LABAR, M. P., et.al., *"Status of the GT-MHR for Electricity Production"*, World Nuclear Association Annual Symposium 3-5 September 2003.
- [14]. PT. Chandra Asri Petrochemical Tbk., Komunikasi Pribadi, 2011.
- [15]. HADA, K., FUJIMOTO, N., SUDO, Y., *"Design of Steam Reforming Hydrogen and Methanol Co-production System to be Connected to the HTTR"*, Technical Committee Meeting on High Temperature Application of Nuclear Energy, Oarai, Japan, 1992.