

## PENGEMBANGAN REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL SEBAGAI UNIT UTILITAS PABRIK

Dedy Priambodo<sup>1</sup>

Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir-BATAN Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan,  
12710

email: dedypriambodo@batan.go.id

### ABSTRAK

**PENGEMBANGAN REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL SEBAGAI UNIT UTILITAS PABRIK.** Reaktor Daya eksperimental (RDE) adalah program unggulan BATAN sebagai langkah awal desain reaktor masa depan Indonesia. RDE sebagai reaktor eksperimental didesain untuk dapat memproduksi listrik dan panas untuk proses industri. Makalah ini bertujuan sebagai salah satu acuan untuk pengembangan RDE ke arah komersial. Model industri yang diambil pada studi ini adalah unit utilitas di Pabrik Pupuk Kalimantan Timur (PKT) atau yang disebut Pabrik 6. Studi dimulai dengan identifikasi kebutuhan utilitas yang dipasok oleh Pabrik 6 kemudian disimulasikan pada sistem RDE. Dari studi ini diperoleh kebutuhan utilitas yang dipasok Pabrik 6 adalah uap tekanan tinggi 500°C/85bar sebanyak 131 kg/s dan listrik sebesar 60 MWe. Kebutuhan tersebut dapat dipenuhi dengan menaikkan daya reaktor RDE menjadi 550MWt dan tekanan keluar *steam generator* menjadi 85 bar serta membuat *tie in* untuk mencerat sebagai uap tekanan tinggi dari keluaran *steam generator*.

Kata kunci: RDE, utilitas, listrik, panas.

### ABSTRACT

**DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL POWER REACTORS AS A UTILITY UNIT.** The experimental Power Reactor (RDE) is BATAN's flagship program as an initial step in Indonesia's future reactor design. RDE as an experimental reactor is designed to be able to produce electricity and heat for industrial processes. This paper aims to serve as a reference for the commercial development of RDE. The industrial model taken in this study was a utility unit at the East Kalimantan Fertilizer Factory (PKT) or called Factory 6. The study began with the identification of utility needs supplied by Factory 6 and then simulated on the RDE system. From this study, the utility requirements supplied by Factory 6 are high pressure steam 500°C / 85bar, 131 kg / s and electricity of 60 MWe. This need can be fulfilled by increasing the RDE reactor power to 550MWt and the output pressure of the steam generator to 85 bar and also creating a tie in to extract high pressure steam from the steam generator outlet line.

Keyword: RDE, Utility, electricity, heat,

### PENDAHULUAN

Reaktor Daya Eksperimental (RDE) merupakan program unggulan BATAN untuk mempromosikan penggunaan energi nuklir, meningkatkan penerimaan masyarakat terhadap energi nuklir, membuktikan kehandalan system keselamatan dari teknologi reaktor maju, menguasai teknologi reaktor generasi IV dan mendorong kemampuan industri nuklir nasional. RDE menggunakan reaktor gas temperature tinggi (*High Temperature Gas Cooled Reactor-HTGR*) dengan kapasitas panas sebesar 10 MW<sub>th</sub>, menggunakan bahan bakar tipe bola (*pebble*), pendingin gas helium dan unit konversi daya tak langsung dengan siklus *Steam*[1]–[5]. Pemilihan HTGR sebagai teknologi untuk RDE juga dimaksudkan untuk unjuk kemampuan reaktor melakukan kogenerasi sehingga kedepan BATAN atau Indonesia pada umumnya dapat mendesain dan memproduksi sendiri PLTN HTGR yang mampu untuk menyokong kebutuhan listrik nasional maupun listrik dan panas untuk industri.

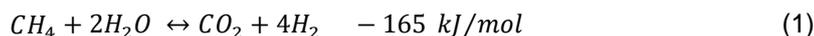
Pemanfaatan PLTN HTGR untuk industri di Indonesia harus diidentifikasi segera, sehingga arah komersialisasi RDE menjadi lebih terarah terkait daya dan kualitas *Steam*nya. Dalam sektor industri itu sendiri, terdapat beberapa industri yang dinilai paling padat menggunakan energi, baik yang digunakan sebagai bahan bakar ataupun yang digunakan sebagai bahan baku. Diantara industry tersebut adalah industri baja, industri semen, industri pupuk, industri keramik, industri pulp dan kertas, industri tekstil dan industri pengolahan kelapa sawit. Jika dibandingkan dengan faktor input yang lain, biaya energi pada tujuh (7)

industri tersebut bahkan lebih besar dari biaya tenaga kerja, serta menempati peringkat kedua setelah biaya bahan baku [6].

Studi terkait kogenerasi nuklir sudah banyak dilakukan baik secara teknis maupun ekonomi [7]–[15]. Namun demikian, pada studi sebelumnya peneliti lebih berkonsentrasi pada kogenerasi nuklir secara parsial. Beberapa peneliti lebih berkonsentrasi pada kogenerasi nuklir dengan fasilitas desalinasi [8], [16]–[20], kogenerasi nuklir-produksi hidrogen [10], [15], [21]–[25]. Sementara studi kogenerasi nuklir yang komprehensif yang mencakup keseluruhan kebutuhan energi untuk menjalankan suatu industri masih belum dilakukan. Melihat kebutuhan studi untuk pengembangan komersialisasi RDE kogenerasi dan fakta terkait adanya industri yang sangat padat menggunakan energi di Indonesia maka studi ini bertujuan untuk identifikasi kebutuhan energi total suatu industri. Hasil studi ini bisa dijadikan acuan dalam pengembangan komersialisasi RDE.

### PEMILIHAN INDUSTRI SEBAGAI MODEL KOGENERASI NUKLIR

Pada studi ini industri yang digunakan sebagai model untuk kogenerasi adalah Industri Pupuk Urea. Industri ini dipilih sebagai model karena termasuk dalam industri yang padat konsumsi energi dan juga industri pupuk menggunakan sumber energi yaitu gas alam, sebagai bahan bakar sekaligus sebagai bahan baku [26]–[28]. Gas alam sebagai bahan baku digunakan sebagai sumber hidrogen pada unit ammonia khususnya pada komponen *Primary reformer* (PR) untuk memproduksi gas sintesis melalui proses endotermis *Steam Methane Reforming-SMR*. Reaksi SMR dapat dilihat pada persamaan (1). Sedangkan gas alam sebagai bahan bakar digunakan sebagai pemasok panas reaksi SMR pada PR.



Gas alam umumnya juga berfungsi sebagai bahan bakar pembangkit listrik dan *Steam* pada unit utilitas pada pabrik pupuk [29], [30].

Salah satu kompleks industri pupuk di Indonesia adalah Pupuk Kalimantan Timur (PKT). PKT baru saja mempunyai pabrik pupuk terbesar (Pabrik Kaltim 5) di Asia pasifik sekaligus menjadikannya kompleks pabrik pupuk terbesar di Asia [31]. Hingga saat ini, PKT mengoperasikan 5 (lima) pabrik pupuk yaitu Pabrik 1, Pabrik 2, Pabrik 3, Pabrik 4 dan Pabrik 5. Masing-masing pabrik terdiri dari unit ammonia, unit urea dan unit utilitas. Unit ammonia adalah unit yang bertugas memproduksi ammonia dari gas sintesis dan udara. Sedangkan Unit Urea adalah unit yang bertugas memproduksi urea dari ammonia dan karbon dioksida. Karbon dioksida merupakan hasil samping dari pemurnian ammonia pada unit ammonia. Sementara Unit Utilitas adalah unit pendukung operasional pabrik yang bertugas memproduksi listrik, *Steam*, air dan udara tekan. Kapasitas produksi ammonia dan urea masing-masing pabrik dapat dilihat pada Tabel 1. Gambaran umum industri pupuk dapat dilihat pada Gambar 1.

Tabel 1. Kapaitas Produksi PKT

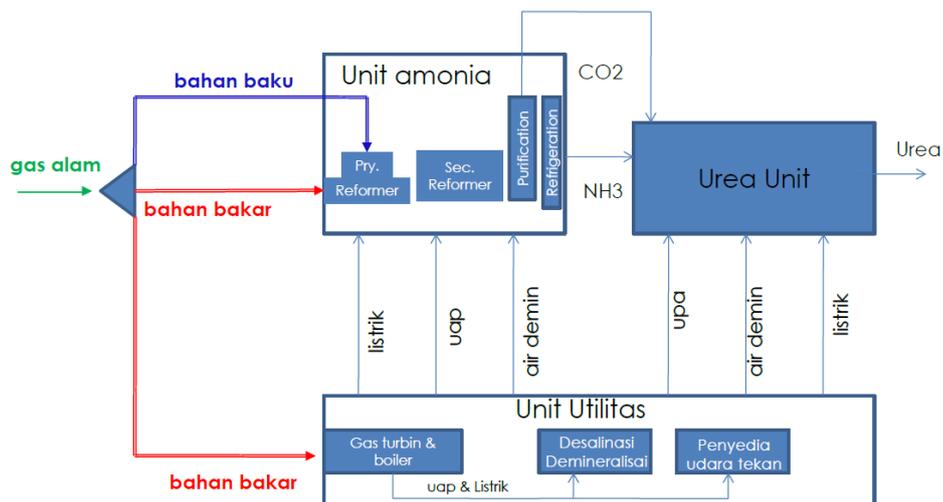
| Pabrik         | Produksi Amonia<br>(ton/thn) | Produksi Urea<br>(ton/thn) |
|----------------|------------------------------|----------------------------|
| Pabrik 1A      | 660.000                      | 570.000                    |
| Pabrik 2       | 595.000                      | 570.000                    |
| Pabrik 3       | 330.000                      | 570.000                    |
| Pabrik 4       | 330.000                      | 570.000                    |
| Pabrik 5       | 825.000                      | 1.150.000                  |
| Total Produksi | 2.740.000                    | 3.430.000                  |

Bersamaan dengan proyek Kaltim 5 telah dioperasikan juga Pabrik 6 yaitu *Boiler* Batubara yang berfungsi untuk menggantikan boiler eksisting berbahan bakar gas, yaitu boiler yang berada di Pabrik 1, Pabrik 2, dan Pabrik 4. Unit boiler batubara di Pabrik 6 PT. Pupuk Kalimantan Timur dibangun sejak 26 Januari 2010, dan pertama beroperasi pada 26 Desember 2012. Kedua unit boiler berjenis *Circulating Fluidized Bed Boiler* yang mana *boiler* batubara didesain untuk mampu menghasilkan *steam* dengan jumlah produk 262 ton/jam pada rate 100%. Sebagian besar *steam* yang dihasilkan oleh *boiler* batubara dialirkan ke Pabrik 5, yaitu sebesar 331 ton/jam, dari total produksi kedua *boiler* mencapai 520 ton/jam jika dioperasikan 100%. Kualitas *steam* yang dihasilkan adalah *superheated steam* pada temperature 500°C

tekanan 85bar. Selain sebagai supply untuk Pabrik 5, *steam* hasil *boiler* batubara juga digunakan sebagai tenaga penggerak *Steam Turbine Generator (STG)* di Pabrik 1 dan Pabrik 5 dengan kapasitas 2x25MW dan penggerak peralatan proses lainnya. Sistem *steam* terintegrasi ke seluruh pabrik eksisting.

Hal yang menarik pada pengembangan PKT ini adalah gencarnya usaha penghematan penggunaan gas alam. Proyek kaltim 5 dan pembangunan pabrik 5 adalah salah satu usaha tersebut. Kaltim 5 dibangun dengan menggunakan lisensi proses *Kellogg Brown & Root (KBR) purifier* yang memungkinkan penghematan pembakaran gas alam pada PR karena temperatur keluar PR yang rendah sekitar 700°C dibandingkan dengan teknologi sebelumnya yang mencapai 950°C. Dengan kapasitas produksi Selain itu penggantian turbin gas dan packed boiler berbahan bakar gas alam dengan *boiler* batubara dan turbin *Steam* juga dimaksudkan untuk mengatasi ketergantungan penggunaan gas alam yang cenderung semakin mahal dan cadangannya semakin berkurang. Dengan adanya *boiler* batubara maka, unit utilitas masing-masing pabrik mendapatkan pasokan *Steam* dari Pabrik 6. Selain itu, usaha penghematan gas alam lainnya dengan mengganti system Desalinasi pada unit utilitas yang semula menggunakan teknologi termal seperti *Multiple Effect Desalination MED* menjadi teknologi *Reverse Osmosis RO* sehingga menekan penggunaan *Steam*.

Untuk itu studi ini akan menjaikaan PKT sebagai model untuk aplikasi panas pengembangan RDE. Hal ini sejalan dengan usaha penghematan gas alam yang dilakukan PKT dan konsep RDE yang selain untuk produksi listrik tapi juga untuk panas.



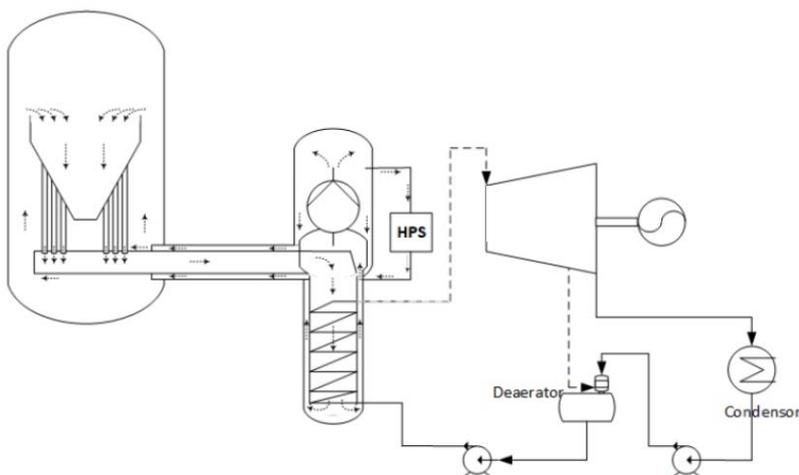
Gambar 1. Diagram blok Produksi Pupuk Urea

### SISTEM REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL

RDE menggunakan reaktor tipe HTGR berdaya 10MW<sub>th</sub> yang dikopel dengan unit konversi daya yang mampu membangkitkan listrik sebesar kurang lebih 3MW<sub>e</sub>. RDE menggunakan helium sebagai pendingin reaktor dan air/*Steam* sebagai fluida kerjanya. Pada prosesnya, helium masuk ke reaktor didorong oleh blower pada temperature 250 °C/30 bar kemudian mengambil panas reaksi fisi sehingga temperature naik menjadi 700 °C saat keluar reaktor. Helium masuk pada sisi *shell* pembangkit *Steam* kemudian bertukar panas dengan air sehingga temperature air naik dari 145 °C menjadi 520 °C dan berubah fasa menjadi *Steam* lewat jenuh pada tekanan 60 bar. *Steam* lewat jenuh ini dimanfaatkan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan listrik sebesar 3MW<sub>e</sub>. *Steam* dari turbin dikondensasikan dalam kondensor kemudian dialirkan kembali ke pembangkit *Steam* dengan menggunakan dua tingkatan tekanan pompa; pompa tekanan rendah dan pompa tekanan tinggi. Sebelum masuk ke pembangkit *Steam*, air mengalami pemanasan awal di dalam *deaerator* sekaligus untuk menghilangkan oksigen terlarut. Kondisi operasi RDE dapat dilihat pada Tabel 2. Sementara diagram alir proses RDE dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 2. Kondisi Operasi RDE [4]

|  |      |
|--|------|
| Kapasitas Panas, MW <sub>th</sub>            | 10   |
| Kondisi Pendingin primer-Helium              |      |
| - Temperatur keluar reactor, °C              | 700  |
| - Temperatur masuk reactor, °C               | 250  |
| - Tekanan operasi, bar                       | 30   |
| - Laju alir, kg/s                            | 4,27 |
| Kondisi Fluida kerja-Air/Steam               |      |
| - Temperatur Air umpan pembangkiti Steam, °C | 145  |
| - Temperatur Steam lewat jenuh, °C           | 520  |
| - Tekanan Steam lewat jenuh, bar             | 60   |
| - Laju alir, kg/s                            | 3,57 |



Gambar 2. Diagram Alir RDE [5]

## HASIL DAN PEMBAHASAN PENGEMBANGAN RDE SEBAGAI UNIT UTILITAS

### a. Identifikasi pengembangan

Pengembangan RDE untuk Unit Utilitas suatu pabrik dimulai dari identifikasi kebutuhan utilitas di pabrik. Dengan diambilnya model PKT pada studi ini, maka kebutuhan listrik dan panas cukup diambil dari data Pabrik 6 Boiler batubara karena Pabrik 6 ini memasok semua kebutuhan listrik maupun Steam panas ke seluruh pabrik. Kebutuhan steam diambil dari kondisi steam keluar boiler (tekanan tinggi) hal ini dapat diterima karena kebutuhan steam tekanan menengah dan rendah diproduksi dari *letdown steam* tekanan tinggi.

Dari penjelasan di atas diketahui perbandingan kebutuhan, spesifikasi steam dan listrik yang harus dipasok oleh Pabrik 6 dengan produksi steam dan listrik dari RDE dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 3. Kapasitas Pabrik 6 dan RDE

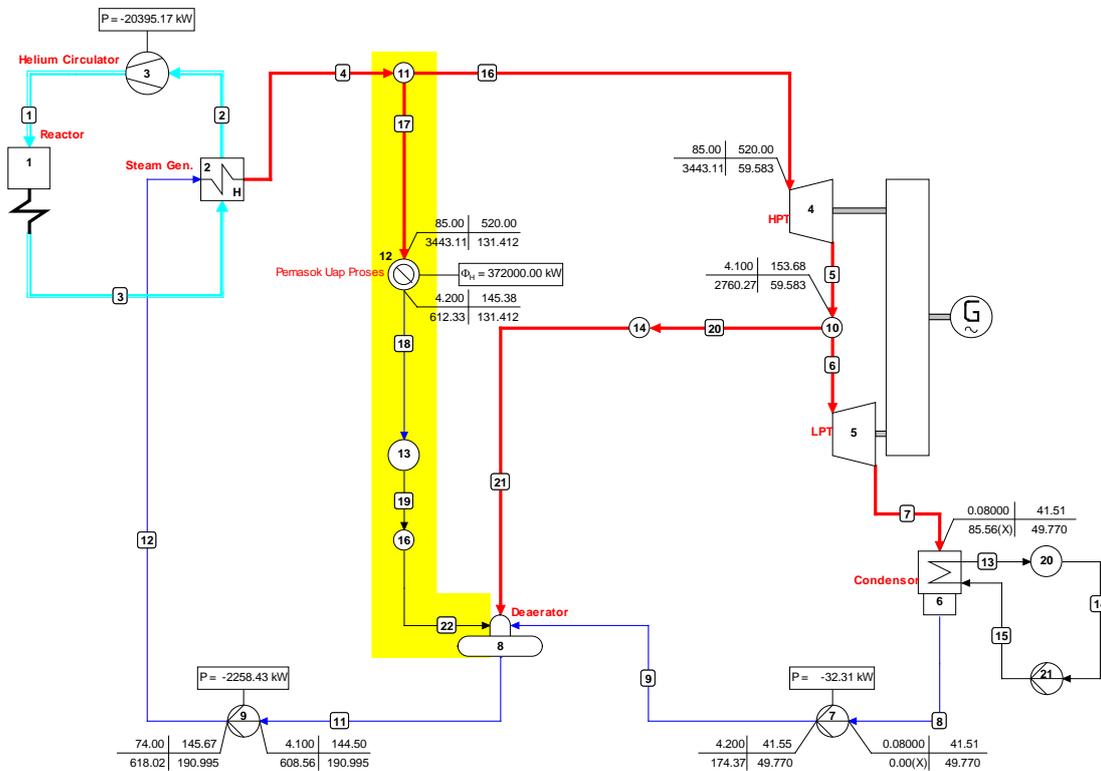
| Spesifikasi              | Fasilitas |          |
|--------------------------|-----------|----------|
|                          | Pabrik 6  | RDE      |
| Laju alir steam, ton/jam | 520       | 12.9     |
| Kondisi steam, °C/bar    | 500 / 85  | 520 / 60 |
| Produksi listrik, MW     | 2 x 30    | 3        |

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan kapasitas Pabrik 6 dengan RDE sehingga dapat dilihat arah pengembangan/komersialisasi RDE sebagai unit utilitas pabrik pupuk. Arah pengembangan tersebut adalah pada laju alir, tekanan uap/steam dan produksi listrik. Kapasitas laju alir steam harus disediakan adalah 500 ton/jam≈131 kg/s kondisi 500°C/85bar dan listrik minimal 60 MWe (2x30).

Pada identifikasi ini hanya difokuskan pada uap proses, sedangkan panas reaksi belum dijadikan prioritas.

b. Sistem RDE untuk memenuhi kebutuhan uap panas dan listrik

Untuk memenuhi kebutuhan uap panas dan listrik seperti yang disediakan oleh Pabrik 6, maka kondisi operasi RDE harus menyesuaikan. Untuk mengetahui kondisi operasi RDE yang sesuai untuk memenuhi pasokan uap dan listrik dilakukan dengan simulasi dengan perangkat lunak *CycleTempo* dari TU Delf [32]. Simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Simulasi dengan CycleTempo

Simulasi dilakukan dengan membangun sebuah diagram dalam perangkat lunak *cycleTempo* urutan peralatan yang sesuai dengan kondisi RDE pada Gambar 2, kemudian melengkapi peralatan tersebut dengan parameter-parameter operasi sehingga memberikan kondisi operasi seperti dalam Tabel 2. Setelah itu dilakukan modifikasi pada diagram tersebut sehingga tersusun diagram RDE sebagai unit utilitas. Modifikasi yang dilakukan yaitu dengan menambahkan *tie in* pada aliran uap keluar *steam generator*, dan mengalirkannya pada sebuah *heat sink* yang dianalogikan sebagai pengguna uap panas, yang mana kondisi keluar pengguna panas ditetapkan sesuai dengan kondisi Deaerator. Kemudian parameter keluar turbin diubah sesuai dengan parameter Pabrik 6 sedangkan daya reaktor divariasikan hingga mendapatkan laju alir uap sebesar  $\pm 131$  kg/s dan daya listrik  $\pm 60$  MWe. Sebagai faktor keamanan, diambil *rule of thumb* daya listrik yang dibangkitkan setelah uap tekanan tinggi diambil pada sisi keluar *steam generator* harus minimal 30% dari daya maksimalnya.

c. Pemilihan daya reaktor

Dari hasil simulasi diketahui dengan kondisi operasi uap masuk pengguna uap panas 520°C/85bar dan kondisi keluarannya adalah 4,2bar, maka daya yang dikonsumsi pada pengguna panas sebesar 372MWt dengan laju alir uap 131,4 kg/s. Dengan demikian variasi daya reaktor dimulai dari 400MWt dan dinaikkan sebesar 50MWt untuk pengamatan produksi listrik yang dihasilkan dengan hasil seperti pada Tabel 4

Tabel 4. Produksi Listrik pada variasi daya reaktor dengan target penggunaan panas unit utilitas sebesar 372MWt

| Daya Reaktor, MWt | Produksi Listrik, MWe | (b/a) % |
|-------------------|-----------------------|---------|
|-------------------|-----------------------|---------|

|     | <i>Single purpose</i><br>(a) | Sebagai Unit Utilitas<br>(b) |    |
|-----|------------------------------|------------------------------|----|
| 400 | 132,2                        | 14,0                         | 10 |
| 450 | 148,7                        | 30,6                         | 21 |
| 500 | 165,2                        | 47,1                         | 28 |
| 550 | 181,8                        | 63,6                         | 35 |

Dari Tabel 4, diketahui bahwa daya reaktor yang diperlukan untuk menghasilkan uap dan listrik yang sesuai dengan Pabrik 6 adalah sebesar 550 MWt. Daya reaktor ini dipilih karena saat difungsikan sebagai Unit Utilitas dengan konsumsi panas 372MW mampu memproduksi listrik sebesar 63,6 MWe sehingga sesuai dengan kemampuan Pabrik 6. Selain itu, pada daya ini produksi listrik pada mode Unit Utilitas sebesar 35% dari mode *single purpose* sehingga memenuhi syarat yang ditentukan pada poin c.

## KESIMPULAN

RDE berpotensi untuk digunakan sebagai unit utilitas pada pabrik pupuk, dalam kasus ini adalah PKT. Hal ini dikarenakan RDE mampu memproduksi uap tekanan tinggi yang sesuai dengan spesifikasi Pabrik 6 PKT. Arah pengembangan RDE sebagai Unit Utilitas/Pabrik 6 dilakukan dengan menambah daya reaktor sebesar 550MWt dan memodifikasi sistem konversi daya dengan cara mencerat sebagaimana uap keluaran *steam generator* untuk memenuhi kebutuhan panas sebesar 372MWt.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Komisi Pembina Tenaga Fungsional Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir yang telah membantu penyempurnaan tulisan ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Priambodo, E. Dewita, and I. D. Irianto, "Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem HTR-10 Siklus Turbin Uap," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 17, no. JUNE, pp. 33–43, 2015.
- [2] Sriyono, R. Kusmastuti, S. Bakhri, and G. R. Sunaryo, "Analysis of helium purification system capability during water ingress accident in RDE," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 962, p. 012034, Feb. 2018.
- [3] M. Subekti, S. Bakhri, and G. R. Sunaryo, "The Simulator Development for RDE Reactor," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 962, p. 012054, Feb. 2018.
- [4] M. Pancoko, A. Nugroho, D. Priambodo, and T. Setiadipura, "Design study of a straight tube bundle steam generator for Reaktor Daya Eksperimental," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 531–540, 2018.
- [5] D. Priambodo, M. Pancoko, Sriyono, and T. Setiadipura, "Design of Helium Purification System for Indonesia Experimental Power Reactor- Reaktor Daya Eksperimental," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 7, pp. 1–7, 2018.
- [6] K. Perindustrian, *Perencanaan Kebutuhan Energi Sektor Industri Dalam Rangka Akselerasi Industrialisasi*. Jakarta, 2012.
- [7] M. D. Birmano and R. F. S. Budi, "Kajian peluang kogenerasi nuklir pada reaktor daya eksperimental (RDE) di indonesia," in *PERTEMUAN DAN PRESENTASI ILMIAH PENELITIAN DASAR ILMU PENGETAHUAN DAN TEKNOLOGI NUKLIR*, 2017, no. November, pp. 418–428.
- [8] G. Locatelli, A. Fiordaliso, S. Boarin, and M. E. Ricotti, "Cogeneration: An option to facilitate load following in Small Modular Reactors," *Progress in Nuclear Energy*. 2017.
- [9] G. Alonso, R. Ramirez, E. Del Valle, and R. Castillo, "Process heat cogeneration using a high temperature reactor," *Nucl. Eng. Des.*, 2015.
- [10] O. A. Jianu, G. F. Naterer, and M. A. Rosen, "Hydrogen cogeneration with generation IV nuclear power plants," in *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*, 2016.
- [11] C. Luo, F. Zhao, and N. Zhang, "A novel nuclear combined power and cooling system integrating high temperature gas-cooled reactor with ammonia-water cycle," *Energy Convers. Manag.*, 2014.
- [12] U. Bossel, B. Eliasson, and G. Taylor, "The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?," *Cogeneration and Competitive Power Journal*. 2003.
- [13] J. Carlsson, D. E. Shropshire, A. van Heek, and M. A. Fütterer, "Economic viability of

- small nuclear reactors in future European cogeneration markets," *Energy Policy*, 2012.
- [14] M. A. Rosen, "Energy, environmental, health and cost benefits of cogeneration from fossil fuels and nuclear energy using the electrical utility facilities of a province," *Energy Sustain. Dev.*, 2009.
- [15] D. Priambodo, E. Dewita, and S. Ariyanto, "Pra-Rancangan Primary Reformer Pada Pabrik Hidrogen yang Dikopel Dengan PLTN HTGR," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. Vol. 14 No. no. Desember 2012 1., pp. 95–106, 2012.
- [16] P. Asiedu-Boateng, E. H. K. Akaho, B. J. B. Nyarko, and S. Yamoah, "Modeling and simulation of cogeneration nuclear power plant for seawater desalination," *Nucl. Eng. Des.*, 2012.
- [17] G. Alonso, S. Vargas, E. Del Valle, and R. Ramirez, "Alternatives of seawater desalination using nuclear power," *Nucl. Eng. Des.*, 2012.
- [18] Y. H. Jung, Y. H. Jeong, J. Choi, A. F. Wibisono, J. I. Lee, and H. C. No, "Feasibility study of a small-sized nuclear heat-only plant dedicated to desalination in the UAE," *Desalination*, 2014.
- [19] D. T. Ingersoll, Z. J. Houghton, R. Bromm, and C. Desportes, "NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water," *Desalination*, 2014.
- [20] B. M. Misra, "Seawater desalination using nuclear heat/electricity - Prospects and challenges," *Desalination*, 2007.
- [21] K. Verfondern, X. Yan, T. Nishihara, and H. J. Allelein, "Safety concept of nuclear cogeneration of hydrogen and electricity," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 11, pp. 7551–7559, 2017.
- [22] R. H. X. Yan, H. Noguchi, H. Sato, Y. Tachibana, K. Kunitomi, "A hybrid HTGR system producing electricity, hydrogen and such other products as water demanded in the Middle East," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 271, pp. 20–29, May 2014.
- [23] H. Sato, H. Ohashi, S. Nakagawa, Y. Tachibana, and K. Kunitomi, "Safety design consideration for HTGR coupling with hydrogen production plant," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 82, pp. 46–52, 2015.
- [24] X. L. Yan, S. Kasahara, Y. Tachibana, and K. Kunitomi, "Study of a nuclear energy supplied steelmaking system for near-term application," *Energy*, 2012.
- [25] A. Bredimas, "Results of a European industrial heat market analysis as a pre-requisite to evaluating the HTR market in Europe and elsewhere," *Nucl. Eng. Des.*, 2014.
- [26] J. C. Molburg and R. D. Doctor, "Hydrogen from Steam-Methane Reforming with CO<sub>2</sub> Capture," in *20th Annual International Pittsburgh Coal Conference*, 2003.
- [27] I. D. G. F. Naterer, O. Jaber, "Environmental Impact Comparison of Steam Methane Reformation and Thermochemical Processes of Hydrogen Production," in *18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010*, 2010, pp. 169–175.
- [28] S. Alimah and D. H. Salimy, "Analisis Pasokan Panas Pada Produksi Hidrogen Proses Steam Reforming Konvensional Dan Nuklir," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 17, no. Juni, pp. 11–20, 2015.
- [29] D. H. Salimy, A. Energi, P. Nuklir, T. Tinggi, P. Pabrik, and P. Urea, "APLIKASI ENERGI PANAS NUKLIR TEMPERATUR TINGGI PADA PABRIK PUPUK UREA," pp. 65–73, 2012.
- [30] P. Baboo, "BRIEF DESCRIPTION OF AMMONIA & UREA PLANT WITH IMPLEMENTATION OF ENERGY SAVING SCHEME." National Fertilizers Ltd. India.
- [31] "Largest Fertilizer Plant in Asia-Pacific to Open in Bontang," 2018. [Online]. Available: <http://en.tempo.co/read/news/2015/06/15/056675056/Largest-Fertilizer-Plant-in-Asia-Pacific-to-Open-in-Bontang>.
- [32] D. U. of Technology, "CycleTempo 5.0 A program for thermodynamic modeling and optimization of energy conversion systems." Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering (3mE), Mekelweg 2, The Netherlands.