

KAJIAN UNJUK KERJA *INTERMEDIATE HEAT EXCHANGER* PADA SISTEM KOGENERASI REAKTOR VHTR

Ign. Djoko Irianto

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN
Kompleks Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan

ABSTRAK

KAJIAN UNJUK KERJA *INTERMEDIATE HEAT EXCHANGER* PADA SISTEM KOGENERASI REAKTOR VHTR. *Very High Temperature Reactor (VHTR) atau reaktor bertemperatur sangat tinggi adalah salah satu jenis reaktor Generasi IV yang didesain dengan konsep kogenerasi untuk pembangkit listrik dan produksi hidrogen. VHTR berpendingin helium dengan temperatur outlet kurang lebih 1000°C dan bertekanan 7 MPa. Komponen konversi energi yang utama dalam sistem kogenerasi reaktor VHTR adalah Intermediate Heat Exchanger (IHX). Melalui IHX, energi termal dipindahkan dari sistem reaktor ke sistem kogenerasi untuk pembangkitan listrik dan proses produksi hidrogen. Keberhasilan desain reaktor VHTR ditentukan salah satunya oleh unjuk kerja (kinerja) rancangan IHX. Dalam makalah ini, hasil kajian tentang unjuk kerja IHX dalam satu sistem kogenerasi untuk pembangkitan listrik dan produksi hidrogen diuraikan. Unjuk kerja IHX ditentukan (dipengaruhi) oleh beberapa parameter antara lain: keefektifan (efektivitas) IHX, efisiensi IHX, dan konfigurasi IHX dalam sistem kogenerasi. Ada tiga konfigurasi sistem kogenerasi yang dikaji, yaitu: konfigurasi dengan siklus pembangkitan listrik secara langsung tanpa Secondary Heat Exchanger (SHX), konfigurasi sistem pembangkitan listrik secara langsung dengan SHX, dan konfigurasi sistem pembangkitan listrik secara tak langsung. Kajian dilakukan dengan cara membandingkan parameter kinerja IHX dalam tiga konfigurasi sistem kogenerasi. Hasil kajian menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi terjadi pada konfigurasi dimana pembangkitan listrik secara langsung dengan SHX dan IHX dipasang secara paralel dengan Plant Heat Exchanger (PHX). Walaupun efisiensinya rendah, konfigurasi ketiga memiliki efektivitas yang tinggi. Namun demikian, konfigurasi ini dimana pembangkitan listrik dilakukan secara tak langsung berpeluang untuk desain sistem yang lebih kompak.*

Katakunci : Sistem Kogenerasi VHTR, Intermediate Heat Exchanger (IHX), konfigurasi sistem IHX, efisiensi, keefektifan sistem IHX.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF *INTERMEDIATE HEAT EXCHANGER* ON VHTR REACTOR COGENERATION SYSTEM. *Very High Temperature Reactor (VHTR) is one of Generation IV reactors which is conceptually designed using cogeneration configuration for electric generation and for hydrogen production. VHTR employs a helium-coolant with operating pressure 7 MPa and 1000°C outlet temperature. The main energy conversion component in VHTR cogeneration is intermediate heat exchanger (IHX). Thermal energy passes the IHX from the reactor system to the cogeneration system for electric generation and for hydrogen production. The success of VHTR design is affected by many factors, one of which is the performance of IHX. This paper describes the results of the assessment of IHX performance in VHTR cogeneration system. The performance of IHX is influenced by some parameters such as: effectiveness of IHX, efficiency of IHX, and the configuration of IHX in the cogeneration system. There are three configuration systems assessed: direct cycle with secondary heat exchanger (SHX), direct cycle without SHX, and indirect cycle. The assessment are performed by comparing the parameter of IHX performance in the three configuration systems. The results of the assessment show that the highest efficiency is given by the direct cycle with SHX and the IHX is set in parallel with PHX. Despite its low efficiency, the third configuration obtains the highest effectiveness. This configuration in which electricity is generated indirectly has possibility to be used for a compact system design.*

Key words : VHTR cogeneration system, intermediate heat exchanger (IHX), IHX system configuration, IHX efficiency, IHX effectiveness

1. PENDAHULUAN

Hidrogen sudah banyak digunakan secara luas di industri dan mulai dikembangkan sebagai bahan bakar untuk transportasi. Meskipun ketersediaannya di bumi melimpah, hidrogen bukan sumber energi yang dapat ditambang seperti halnya batubara atau uranium atau bahan bakar minyak dan gas alam. Agar dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi, hidrogen harus diekstrak dari pemecahan molekul air atau gas metan dengan memerlukan pembakaran sejumlah energi. Untuk keperluan produksi gas hidrogen skala besar, maka diperlukan pembakaran energi dalam jumlah yang besar pula. Karena itu, instalasi produksi gas hidrogen harus didesain dengan efisiensi yang tinggi agar tidak mengakibatkan timbulnya devisa energi.

Energi yang diproduksi dari sebuah reaktor nuklir dapat dipakai sebagai sumber energi yang digunakan untuk menghasilkan panas dengan temperatur tinggi yang diperlukan dalam proses produksi gas hidrogen. Pengembangan reaktor generasi IV di dunia difokuskan untuk lebih menghemat cadangan uranium dunia, implementasi sistem pembangkit energi yang ramah lingkungan, yang aman, dan yang ekonomis. Selain itu, sistem reaktor generasi IV dirancang untuk dapat memasok energi listrik dan energi termal untuk proses produksi gas hidrogen, atau untuk proses desalinasi ataupun aplikasi lainnya.

Ada enam buah konsep desain sistem reaktor generasi IV^[1,6] yang selama ini ada dan dikembangkan di berbagai negara. Dari keenam konsep desain sistem reaktor generasi IV ini, ada empat sistem reaktor yang dapat digunakan untuk membentuk sistem kogenerasi untuk keperluan pembangkitan listrik dan untuk keperluan instalasi produksi gas hidrogen. Keempat desain sistem reaktor generasi IV tersebut adalah: *Gas-cooled Fast Reactor* (GFR), *Lead-cooled Fast Reactor* (LFR), *Molten Salt Reactor* (MSR), dan *Very High Temperature Reactor* (VHTR). Dengan mempertimbangkan temperatur outlet dari sistem reaktor, dan efisiensi termal untuk proses produksi gas hidrogen, maka yang paling cocok untuk konsep kogenerasi pembangkitan listrik dan produksi gas hidrogen adalah sistem reaktor VHTR. Karena itu hanya konsep kogenerasi sistem

reaktor VHTR yang dipertimbangkan dalam makalah ini.

Very High Temperature Reactor (VHTR) adalah salah satu jenis sistem reaktor nuklir generasi IV yang secara khusus didesain dengan konsep kogenerasi untuk pembangkit listrik dan untuk proses produksi gas hidrogen. VHTR didesain berpendingin helium dengan temperatur outlet reaktor kurang lebih 1000°C dan bertekanan 7 MPa. Komponen konversi energi yang utama dalam sistem kogenerasi reaktor termasuk sistem reaktor VHTR adalah “penukar panas tengah” (*Intermediate Heat Exchanger = IHX*)^[2,3,5]. Melalui sistem IHX, energi termal dipindahkan dari sistem reaktor ke sistem kogenerasi untuk pembangkitan listrik dan untuk proses produksi gas hidrogen ataupun untuk aplikasi lainnya. Salah satu tolok ukur keberhasilan proyek desain sistem reaktor termasuk sistem kogenerasi reaktor generasi IV secara kritis ditentukan oleh unjuk kerja sistem IHX^[2,3]. Beberapa parameter unjuk kerja rancangan sistem IHX yang dominan antara lain: efektifitas sistem IHX, efisiensi sistem IHX baik secara sendiri maupun dalam konfigurasi sistem kogenerasi. Selain itu, konfigurasi sistem kogenerasi dan penempatan IHX dalam sistem kogenerasi tersebut juga dapat menentukan besarnya efisiensi IHX dalam sistem kogenerasi.

Dalam makalah ini diuraikan hasil kajian tentang unjuk kerja sistem IHX dalam satu sistem kogenerasi reaktor VHTR untuk pembangkitan listrik dan untuk proses produksi gas hidrogen. Kajian dilakukan dengan cara membandingkan parameter unjuk kerja sistem IHX pada tiga konfigurasi sistem kogenerasi VHTR. Parameter yang dibandingkan adalah efektifitas dan efisiensi sistem IHX dalam sistem kogenerasi. Sedangkan proses produksi gas hidrogen yang dipertimbangkan dalam kajian ini adalah proses daur sulfur-iodin.

2. DESKRIPSI PARAMETER

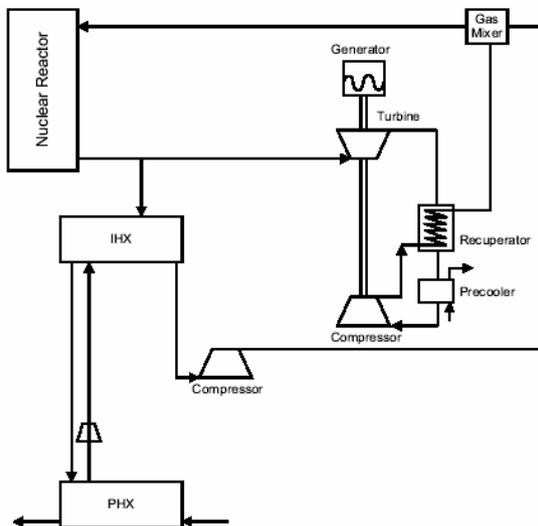
a. KONFIGURASI SISTEM KOGENERASI

Ada tiga konfigurasi desain sistem kogenerasi yang dikaji. Ketiga konfigurasi desain sistem kogenerasi ini dibedakan atas penempatan IHX dalam sistem kogenerasi baik secara paralel atau

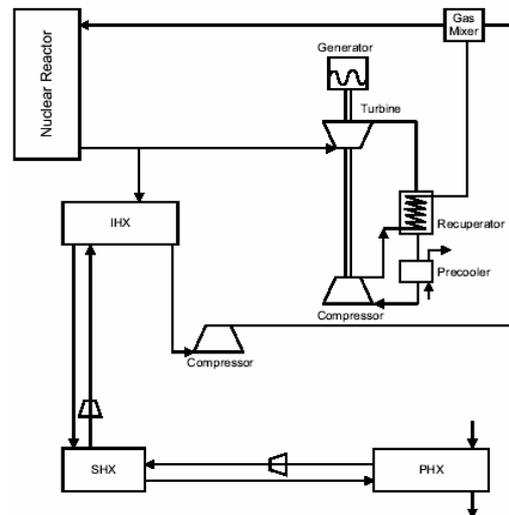
serial dengan sistem pembangkitan listrik, pemasangan *Plant Heat Exchanger* (PHX) maupun pemasangan *Secondary Heat Exchanger* (SHX) dalam sistem kogenerasi.

Dalam konfigurasi desain serial, seluruh aliran fluida pendingin sistem primer mengalir dari outlet reaktor melintas melalui IHX dimana sejumlah energi ditransfer ke *intermediate loop* untuk menggerakkan instalasi produksi gas hidrogen. Dalam konfigurasi ini, panas diekstrak dari fluida pendingin sistem primer pada kondisi temperatur tertinggi untuk dikirim ke instalasi produksi gas hidrogen, sementara itu sistem konversi energi atau sistem pembangkit listrik menerima fluida pendingin dengan temperatur yang lebih rendah.

Dalam konfigurasi desain paralel, aliran fluida pendingin sistem primer dari outlet reaktor dibagi menjadi dua aliran, sebagian kecil aliran (kurang lebih 10%)^[4] mengalir melalui IHX untuk menggerakkan instalasi produksi gas hidrogen, sedangkan sebagian besar aliran fluida dikirim ke sistem konversi energi untuk pembangkitan listrik. Dalam desain ini, baik instalasi produksi gas hidrogen maupun instalasi pembangkitan listrik menerima fluida pendingin dengan temperatur yang tertinggi.

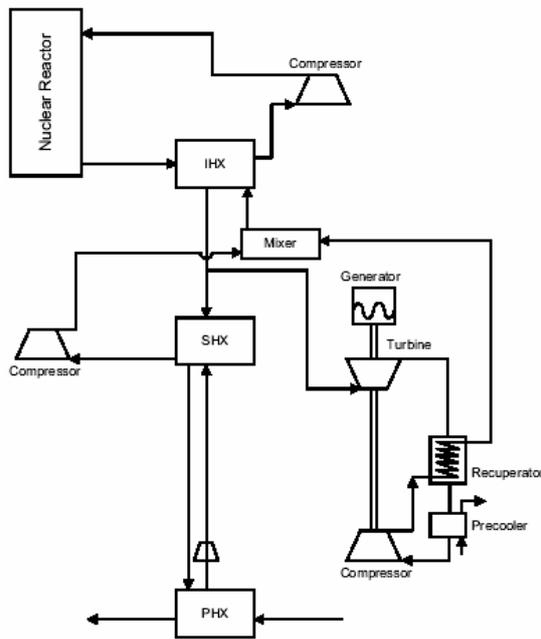


Gambar 1. Konfigurasi pertama sistem kogenerasi dengan siklus pembangkitan listrik secara langsung tanpa SHX.



Gambar 2. Konfigurasi kedua sistem kogenerasi dengan siklus pembangkitan listrik secara langsung dengan SHX

Ketiga konfigurasi desain sistem kogenerasi ini, yaitu: pertama konfigurasi sistem kogenerasi dengan siklus pembangkitan listrik secara langsung dimana *Intermediate Heat Exchanger* (IHX) dipasang secara paralel dengan *Plant Heat Exchanger* (PHX) seperti pada Gambar 1^[4], yang kedua adalah konfigurasi sistem kogenerasi dengan siklus pembangkitan listrik secara langsung namun antara IHX dan PHX diberi perantara yaitu *Secondary Heat Exchanger* (SHX) seperti pada Gambar 2^[4], dan yang ketiga adalah konfigurasi sistem kogenerasi dengan pembangkitan listrik secara tak langsung seperti pada Gambar 3^[4].



Gambar 3. Konfigurasi ketiga sistem kogenerasi dengan siklus pembangkitan listrik secara langsung.

Konfigurasi sistem IHX secara paralel dengan siklus langsung seperti pada Gambar 1 menghasilkan konfigurasi desain sistem IHX yang paling kecil dan yang paling kompak serta memiliki efisiensi pembangkitan listrik yang tertinggi. Untuk konfigurasi dengan siklus langsung pada Gambar 2 sama seperti halnya pada Gambar 1, tetapi mencakup *loop* tersier untuk pemisahan atau pemberian jarak antara sistem reaktor dan instalasi produksi gas hidrogen. Konfigurasi sistem kogenerasi kedua ini juga menghasilkan desain IHX yang kecil meskipun dengan penambahan separasi atau jarak. Pada konfigurasi sistem kogenerasi yang ketiga, seperti pada Gambar 3, sistem pembangkitan listriknya dilakukan secara tak langsung. Meskipun pada siklus konversi energi tak langsung memerlukan desain IHX yang lebih besar, sistem IHX mentransfer seluruh 600 MW daya reaktor ke sistem kogenerasi untuk proses produksi gas hidrogen dan untuk pembangkitan listrik.

Desain sistem IHX sangat dipengaruhi juga oleh sejumlah parameter yang meliputi: (1) jarak pemisah yang diperlukan antara sistem reaktor dengan instalasi produksi gas hidrogen, (2) panas yang hilang dari pipa-pipa *intermediate loop* ke lingkungan sekitar, (3) tekanan operasi dan fluida kerja dalam *intermediate loop*, dan (4) efisiensi

yang diinginkan pada proses produksi gas hidrogen.

Jarak pemisah antara sistem reaktor dan instalasi produksi gas hidrogen akan mempengaruhi ukuran pipa-pipa *intermediate loop* karena *pressure drop* yang ditimbulkan akan menentukan diameter pipa-pipa pada sisi dingin dan sisi panas yang diperlukan. Jarak pemisah juga berpengaruh pada besarnya kehilangan panas dari pipa-pipa ke lingkungan dan persyaratan pemipaan *intermediate loop*.

b. EFEKTIFITAS DAN EFISIENSI SISTEM IHX

Parameter efektifitas sistem IHX adalah salah satu parameter yang menentukan unjuk kerja sistem IHX. Parameter efektifitas sistem IHX menggambarkan besarnya beban panas aktual dibagi dengan beban panas maksimum yang mungkin terjadi pada sistem IHX. Secara keseluruhan, nilai efektifitas sistem IHX sangat dipengaruhi oleh laju alir fluida pendingin, temperatur inlet dan temperatur outlet pada sisi panas dan sisi dingin sistem IHX. Besarnya nilai efektifitas sistem IHX dapat dihitung menggunakan persamaan^[4] berikut:

$$\varepsilon = \frac{(\dot{m} c_p)_h (T_{hin} - T_{hout})}{(\dot{m} c_p)_{min} (T_{hin} - T_{cin})} \dots\dots\dots(1)$$

dimana

- ε : efektifitas sistem IHX,
- \dot{m} : laju alir masa fluida pendingin,
- c_p : kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan,
- T_{hin} : temperatur inlet pada sisi panas IHX,
- T_{hout} : temperatur outlet pada sisi panas IHX, dan
- T_{cin} : temperatur inlet pada sisi dingin IHX.

Seperti halnya efektifitas, efisiensi sistem IHX juga merupakan parameter unjuk kerja sistem IHX. Efisiensi sistem IHX dalam konfigurasi sistem kogenerasi secara keseluruhan merupakan hasil pembagian antara keluaran daya listrik dengan selisih antara daya termal reaktor dan daya untuk proses produksi gas hidrogen. Besarnya efisiensi sistem IHX dapat dihitung dengan menggunakan persamaan^[4] sbb.:

$$\eta = \frac{\text{Keluaran daya listrik}}{\text{Daya termal reaktor} - \text{daya proses produksi } H_2}$$

$$= \frac{\Sigma W_T - \Sigma W_C - W_S - \Sigma W_{CIR}}{Q_{th} - Q_{H2}} \quad (2)$$

dimana

- ΣW_T : beban kerja turbin total,
- ΣW_C : beban kerja kompresor,
- W_S : beban sistem,
- ΣW_{CIR} : beban kerja sirkulator,
- Q_{th} : daya termal reaktor,
- Q_{H2} : daya yang disuplai ke PHX untuk produksi hidrogen.

3. DISKUSI DAN PEMBAHASAN

Kajian unjuk kerja sistem IHX ini dilakukan dengan cara membandingkan parameter efektifitas dan efisiensi sistem IHX untuk masing-masing dari ketiga konfigurasi sistem kogenerasi reaktor VHTR. Dalam kasus ini, daya reaktor VHTR diasumsikan sebesar 600 MWt dengan fluida pendingin adalah helium. Parameter fluida pendingin ditunjukkan pada Tabel 1^[4]. Dengan menggunakan persamaan nomor (1), efektifitas sistem IHX baik pada konfigurasi pertama maupun konfigurasi kedua memberikan nilai yang hampir sama yaitu kurang lebih 0,95, sedangkan pada konfigurasi ketiga memberikan nilai efektifitas > 0,95.

Tabel 1. Parameter fluida pendingin pada konfigurasi 1 dan 2^[4]

Parameter	Konf. 1	Konf. 2
T outlet reaktor (°C)	950	950
P inlet sisi panas IHX (MPa)	7.0	7.0
P outlet sisi panas IHX (MPa)	6.95	6.95
Laju alir massa sisi panas (kg/s)	26.67	26.67
T inlet pada sisi panas (°C)	950	950
T outlet pada sisi panas (°C)	628	593
P inlet pada sisi dingin (MPa)	1.95	7.1
P outlet sisi dingin (MPa)	1.9	7.05
Laju alir massa sisi dingin (kg/s)	26.27	26.27
T inlet pada sisi dingin (°C)	611	575
T outlet pada sisi dingin (°C)	933	931

Tabel 2. Parameter fluida pendingin pada konfigurasi 3^[4]

Parameter	Konf. 3
T outlet reaktor (°C)	950
Beban panas IHX (MWt)	611
P inlet sisi panas IHX (MPa)	7.0
P outlet sisi panas IHX (MPa)	6.95
Laju alir massa sisi panas primer (kg/s)	321
T inlet pada sisi primer (°C)	950
T outlet pada sisi primer (°C)	584
P inlet pada sisi dingin sekunder (MPa)	7.0
P outlet sisi sekunder (MPa)	6.95
Laju alir massa sisi dingin sekunder (kg/s)	1216
T inlet pada sisi sekunder (°C)	546
T outlet pada sisi sekunder (°C)	930

Efisiensi sistem IHX dalam ketiga konfigurasi sistem kogenerasi tersebut di atas dihitung menggunakan persamaan nomor (2) dengan menggunakan parameter fluida pendingin seperti yang tertera pada Tabel 1 dan Tabel 2. Hasil perhitungan efisiensi sistem IHX ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Efisiensi sistem keseluruhan pada berbagai konfigurasi

Konfigurasi	Efisiensi
Sistem kogenerasi dimana siklus pembangkitan listrik secara langsung, IHX dan PHX dipasang secara paralel.	$\pm 50 \%$
Sistem kogenerasi dimana siklus pembangkitan listrik secara langsung, IHX dan PHX dipasang secara paralel dengan SHX dipasang diantara keduanya.	$\pm 49 \%$
Sistem kogenerasi dimana siklus pembangkitan listrik secara tak langsung, IHX dan PHX dipasang secara paralel dengan SHX dipasang diantara keduanya.	$\pm 47 \%$

Dari uraian dalam Tabel 3 jelas bahwa efisiensi tertinggi terjadi pada konfigurasi sistem kogenerasi yang pertama yaitu pada sistem kogenerasi dimana siklus pembangkitan listrik secara langsung tanpa pemasangan SHX, sedangkan IHX dipasang secara paralel terhadap PHX. Pada konfigurasi sistem kogenerasi yang kedua, yaitu pada konfigurasi dimana sistem pembangkitan listrik secara langsung dan IHX dipasang secara paralel terhadap PHX, meskipun kondisi hampir sama dengan konfigurasi yang pertama, pemasangan SHX diantara IHX dan PHX dapat menurunkan nilai efisiensi. Sehingga nilai efisiensi sistem IHX pada konfigurasi sistem kogenerasi yang kedua relatif lebih rendah dibanding dengan konfigurasi sistem kogenerasi yang pertama. Sedangkan efisiensi yang terendah terjadi pada konfigurasi sistem kogenerasi yang ketiga yaitu pada sistem kogenerasi dimana sistem pembangkitan listrik dipasang secara tidak langsung terhadap sistem reaktor.

Jarak antara reaktor dan instalasi produksi gas hidrogen juga akan mempengaruhi unjuk kerja sistem IHX pada sistem kogenerasi. Ukuran pipa-pipa pada *intermediate loop* yang diperlukan juga berbeda karena penurunan tekanan (*pressure drop*) termasuk ukuran diameter pipa-pipa pada sisi panas maupun sisi dingin. Faktor jarak juga mempengaruhi hilangnya panas dari sistem pemipaan ke lingkungan, karena itu faktor jarak pada *intermediate loop* juga akan berpengaruh pada efisiensi.

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. *pressure drop* untuk sistem konfigurasi yang pertama maupun konfigurasi yang kedua kurang lebih 50 kPa. Nilai *pressure drop* ini bergantung pada kondisi fluida pendingin dalam *loop intermediate*. *Pressure drop* atau penurunan tekanan yang diijinkan akan menentukan besarnya diameter pipa-pipa pada sisi panas maupun sisi dingin yang diperlukan. Dengan menggunakan parameter seperti yang tertera pada Tabel 1 dan menggunakan persamaan (1), diperoleh efektivitas IHX sebesar 0,95.

Model konfigurasi sistem kogenerasi yang pertama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, aliran pendingin dari reaktor dibagi dua yaitu kurang lebih 10% mengalir melalui IHX yang memindahkan panas ke *intermediate loop*. Aliran pendingin kemudian ditekan dan dialirkan kembali ke sistem primer melalui inlet reaktor. *Loop intermediate* dikoneksikan ke sistem sekunder melalui IHX. Model pada konfigurasi yang pertama ini, fluida *loop intermediate* dalam kasus ini diasumsikan helium dengan tekanan 2 MPa. Panas yang hilang pada konfigurasi ini apabila jarak antara reaktor dengan sistem produksi hidrogen kurang lebih 0,26 MWt dengan distribusi kurang lebih 54% hilang dari sisi panas dan 46% hilang pada sisi dingin.

4. KESIMPULAN

Hasil kajian unjuk kerja sistem *intermediate heat exchanger* dalam sistem kogenerasi reaktor VHTR menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi terjadi pada konfigurasi pertama yaitu konfigurasi dimana instalasi pembangkitan listrik dirangkai secara langsung dan IHX dipasang secara paralel dengan PHX serta tidak memasang SHX di antara IHX dan PHX. Pada konfigurasi ketiga dimana pembangkitan listrik dilakukan secara tak langsung, meski efisiensi lebih rendah namun keefektifan atau efektifitas sistem IHX relatif lebih tinggi dan berpotensi untuk desain sistem kogenerasi yang lebih kompak.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. DAVID J. DIAMOND, "Generation IV Nuclear Energy Systems", Presented at the University of Tennessee, April 30, 2003.
2. J. K. WRIGHT, "Next Generation Nuclear Plant Intermediate Heat Exchanger Materials Research and Development Plan", Idaho National Laboratory, Idaho Falls, April 2008.

3. KAZUHIKO KUNITOMI, et al., "JAEA'S VHTR For Hydrogen And Electricity Cogeneration : GTHTR300C", Nuclear Engineering and Technology, Vol.39 No.1., February 2007.
4. E. A. HARVEGO, Evaluation Of Next Generation Nuclear Power Plant (NGNP) Intermediate Heat Exchanger (IHX) Operating Conditions, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, April 2006.
5. AKIRA SHIMIZU, et al., "Recent Research and Development of Intermediate Heat Exchanger for VHTR Plant", Nagasaki Shipyard & Engine Works, Mitsubishi Heavy Industries, LTD.
6. DANE WILSON, "Advanced Materials for DOE's Gen IV Reactor Program: Heat Exchangers", High Temperature Heat Exchanger Meeting, The University of Nevada, Las Vegas, October 24, 2003.
7. B. THONON and E. BREUIL, "Compact heat exchangers technologies for the HTRs recuperator application", white paper, FRAMATOME, Lyon, France.

TANYA JAWAB