

PERHITUNGAN TEMPERATUR KELUARAN DAN MASUKAN PENDINGIN PRIMER DAN SEKUNDER Pb-Bi DI *INTERMEDIATE* *HEAT EXCHANGER*

Epung Saepul Bahrum

PTBIN Batan
Kawasan Puspiptek Cisauk Tangerang
E-mail: epung@batan.go.id

ABSTRACT

Analyze of intermediate heat exchanger in Pb-Bi cooled nuclear reactor for hydrogen production design have been done. Based on one dimensional convective and conduction heat transfer model, temperature distribution of primary and secondary Pb-Bi at IHX have been modeled. Heat transfer coefficients of primary and secondary Pb-Bi coolant are calculated by sub channel analysis method. Primary and secondary Pb-Bi coolant temperature distribution obtained by solving numerically first orders differential equation using Runge-Kutta-Gill method. In case primary coolant flow rate 7000 kg/s and IHX inlet temperature 552°C, outlet temperature and flow rate of Pb-Bi secondary coolant are 542°C and 2700 kg/s. The temperature secondary coolant 542°C corresponds to chemical reaction temperature of steam membrane reforming.

Keywords: *Intermediate heat exchanger, Pb-Bi, Hydrogen production, Sub channel analysis, Runge-Kutta-Gill*

PENDAHULUAN

Berkurangnya cadangan minyak bumi, dan perubahan iklim global, salah satunya disebabkan oleh gas-gas hasil pembakaran bahan bakar fosil, menjadi pendorong untuk mencari sumber energi baru. Gas hidrogen (H_2) menjadi salah satu sumber energi alternatif baru untuk masa depan. Salah satu pertimbangannya adalah dari berbagai hasil penelitian terutama perkembangan teknologi *fuel cell* tampak bahwa gas hidrogen memiliki prospek sangat baik sebagai sumber energi masa depan yang ramah lingkungan dan terbarukan¹.

Salah satu kendala penggunaan gas hidrogen sebagai sumber energi masa depan adalah terbatasnya cadangan gas hidrogen di alam dalam bentuk gas hidrogen (H_2)². Apabila menggunakan cadangan alam yang ada maka diperkirakan gas hidrogen tidak dapat memenuhi kebutuhan sumber energi dunia di masa depan. Berbagai penelitian terus dilakukan terutama penelitian proses produksi gas hidrogen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gas hidrogen dapat diproduksi dalam skala besar dan ekonomis.

Selain proses produksi gas hidrogen, penelitian yang terus dikembangkan adalah penggunaan reaktor nuklir sebagai sumber energi termal pada proses produksi gas hidrogen. Pertimbangan yang mendasari penggunaan reaktor nuklir sebagai sumber energi termal selain faktor ekonomis juga diharapkan agar secara keseluruhan sistem produksi gas hidrogen tidak menghasilkan emisi CO_2 ³. Dua jenis reaktor nuklir yang dapat digunakan sebagai sumber energi termal adalah reaktor termal (*thermal reactors*) dan reaktor cepat (*fast reactors*).

Reaktor termal adalah reaktor nuklir yang menggunakan bahan bakar utama U-235. Persentase U-235 di alam sangat kecil, yang terbesar adalah persentase U-238⁴. Untuk mendapatkan U-235 harus melalui proses pengayaan uranium (*uranium enrichment*). Proses pengayaan uranium menjadi masalah yang sangat rumit dan mengundang kecurigaan internasional terhadap negara berkembang seperti Indonesia apabila memiliki instalasi pengayaan uranium.

Sedangkan reaktor cepat adalah reaktor nuklir yang menggunakan U-238 sebagai bahan bakar utama. Reaktor cepat memiliki prospek digunakan di Indonesia karena tidak memerlukan instalasi proses pengayaan uranium. Penelitian netronik dan termohidrolik untuk kasus reaktor cepat berpendingin Pb-Bi daya 200 MW(t) dengan waktu operasi 20 tahun telah dilakukan⁵. Hasil analisis netronik, termohidrolik, dan keselamatan menunjukkan bahwa reaktor berpendingin Pb-Bi dengan daya 200 MW(t) dengan waktu operasi 20 tahun memiliki karakteristik *inherent safety* (keselamatan melekat)⁵. Artinya jika terjadi kecelakaan tertariknya batang kendali reaktor secara tiba-tiba atau tidak berfungsinya pompa utama pendingin primer reaktor, secara otomatis tanpa bantuan operator akan terjadi penurunan daya hingga reaktor tidak beroperasi (*shutdown*).

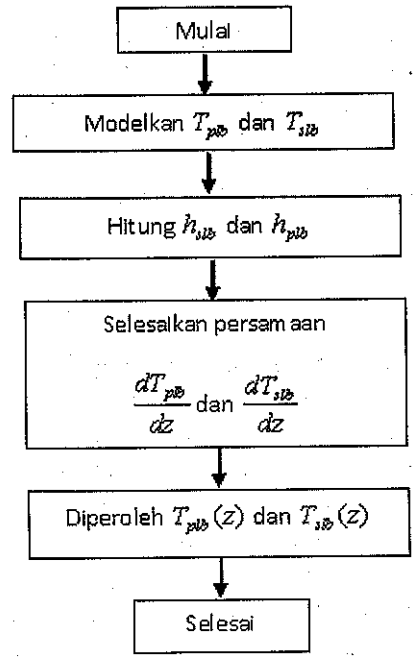
Analisis termohidrolik menunjukkan untuk laju alir pendingin primer Pb-Bi 7000 kg/s, temperatur keluaran pendingin primer 550°C⁵. Temperatur keluaran pendingin primer 550°C bersesuaian dengan temperatur operasi proses produksi gas hidrogen menggunakan proses *steam membrane reforming*. Dengan kondisi tersebut maka reaktor nuklir berpendingin Pb-Bi dengan daya 200 MW(t) dapat berfungsi sebagai sumber energi termal produksi gas hidrogen menggunakan proses *steam membrane reforming*.

Setelah diperoleh rancangan reaktor nuklir masalah berikutnya adalah menggabungkan reaktor nuklir dengan unit produksi gas hidrogen agar keselamatan reaktor nuklir terjaga. Untuk melindungi reaktor nuklir jika terjadi kecelakaan di unit produksi gas hidrogen sehingga keselamatan reaktor nuklir terjaga maka antara reaktor nuklir dan unit produksi gas hidrogen dipisahkan oleh *intermediate heat exchanger* (IHX)⁵.

Media untuk mentransfer panas dari reaktor nuklir ke IHX adalah pendingin primer Pb-Bi (PPB) sedangkan media untuk mentransfer panas dari IHX ke unit produksi gas hidrogen adalah pendingin sekunder Pb-Bi (PSB). Tujuan penelitian ini adalah merancang IHX, membuat model matematik distribusi temperatur PPB dan PSB, menghitung distribusi temperatur PPB dan PSB di IHX. Tujuan akhir penelitian adalah menghitung temperatur PPB yang keluar dari IHX dan temperatur PSB yang masuk ke IHX.

METODOLOGI

Penghitungan temperatur keluaran PPB dari IHX dan temperatur masukan PSB ke IHX dilakukan menurut tahapan berikut. Pertama, membuat model matematik distribusi temperatur PPB dan PSB di IHX. Untuk menyelesaikan distribusi temperatur PPB dan PSB memerlukan data koefisien perpindahan panas pendingin primer Pb-Bi (h_{pib}) dan koefisien perpindahan pendingin sekunder Pb-Bi (h_{sib}). Pada penelitian ini h_{pib} dan h_{sib} dihitung menggunakan metode *sub channell analysis*. Setelah diperoleh h_{pib} dan h_{sib} maka tahap selanjutnya menyelesaikan secara numerik persamaan matematik distribusi temperatur PPB dan PSB. Temperatur keluaran PPB dari IHX dan temperatur masukan PSB ke IHX diperoleh dari solusi tersebut. Secara garis besar metodologi perhitungan diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir perhitungan distribusi PPB dan PSB

TEORI

Konfigurasi rancangan produksi gas hidrogen menggunakan reaktor nuklir

Secara garis besar konfigurasi rancangan reaktor nuklir untuk produksi gas hidrogen diperlihatkan pada Gambar 2. Konfigurasi terdiri atas reaktor nuklir, IHX, *Secondary Heat Exchanger* (SHX), *Third Heat Exchanger*

(THX) dan unit produksi gas hidrogen. Proses produksi gas hidrogen di unit produksi gas hidrogen dipilih proses SMR. Pada rancangan ini antara reaktor nuklir dan unit produksi gas hidrogen dipisahkan oleh IHX. Dua fungsi utama IHX adalah pertama, sebagai sarana terjadinya perpindahan panas antara PPB dan PSB. Kedua, sebagai pelindung reaktor nuklir jika terjadi kecelakan di unit produksi gas hidrogen.

Reaktor nuklir berfungsi sebagai sumber energi untuk produksi gas hidrogen. Energi dari reaktor nuklir dialirkan dari reaktor nuklir ke IHX menggunakan medium PPB. PPB masuk dari atas IHX kemudian keluar dari bagian bawah IHX. Karena temperatur PPB lebih tinggi dari PSB, sehingga di IHX akan terjadi perpindahan panas dari PPB ke PSB. Keluar dari IHX temperatur PPB masih lebih tinggi daripada temperatur masukan PPB ke reaktor nuklir⁵. Oleh karena itu, perlu menurunkan temperatur PPB dengan jalan melewati PPB ke SHX. Di SHX terjadi perpindahan panas antara PPB dengan air (H_2O)⁵.

Sementara itu PSB masuk dari bawah dan keluar dari bagian atas IHX. Setelah terjadi perpindahan panas dari PPB ke PSB di IHX, temperatur PSB akan naik sehingga temperatur keluaran lebih tinggi daripada temperatur masukan. Keluar dari IHX PSB akan menuju ke unit produksi gas hidrogen. Energi yang dibawa oleh PSB digunakan untuk melangsungkan reaksi kimia di unit produksi gas hidrogen. Setelah melewati unit produksi gas hidrogen PSB akan

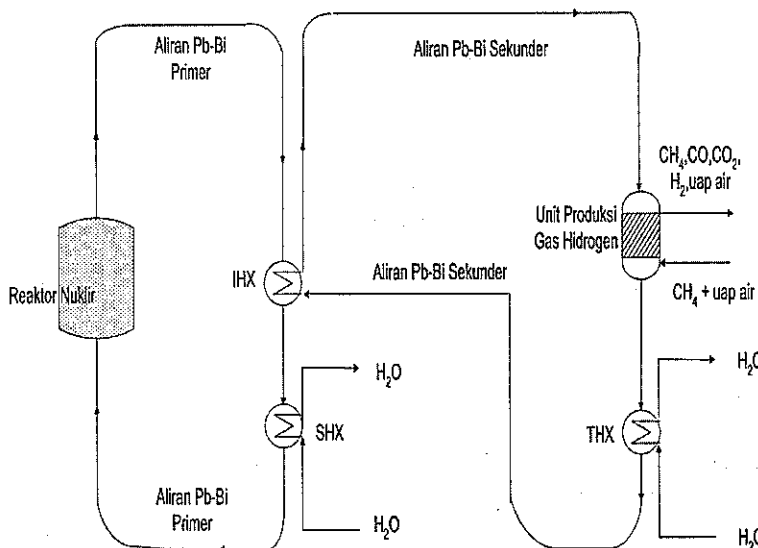
melalui THX. Hal ini dilakukan mengingat temperatur keluaran pendingin sekunder dari unit produksi gas hidrogen masih tinggi jika dibandingkan dengan temperatur masukan pendingin PSB ke IHX. Oleh karena itu perlu menurunkan temperatur PSB dengan jalan mengalirkan PSB melalui THX⁵. Di THX terjadi perpindahan panas antara PPB dengan air (H_2O)⁵.

Konfigurasi IHX

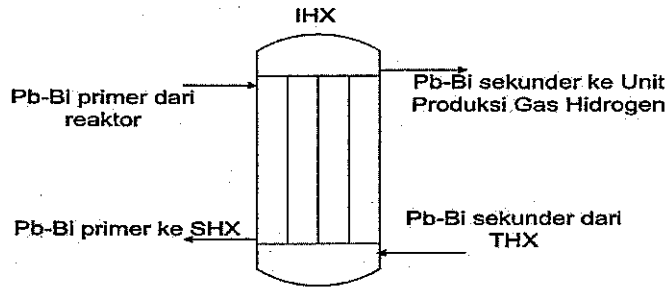
Tampak samping IHX secara garis besar diperlihatkan pada Gambar 3. Di dalam IHX terpasang secara vertikal beberapa pipa sebagai tempat untuk mengalirkan PSB. Jenis IHX yang dipilih adalah *tube counter flow*, di mana PSB mengalir di dalam tabung IHX dari atas ke bawah. Sedangkan di luar tabung IHX mengalir PPB dari atas ke bawah. Gambar dua dimensi satu tabung IHX dan arah alir PPB dan PSB diperlihatkan pada Gambar 4. Tampak atas IHX diperlihatkan pada Gambar 5, pemilihan konfigurasi susunan tabung-tabung IHX seperti pada Gambar 6 akan berguna saat menghitung h_{plb} dan h_{sib} .

Model matematis distribusi temperatur PPB dan PSB di tabung IHX

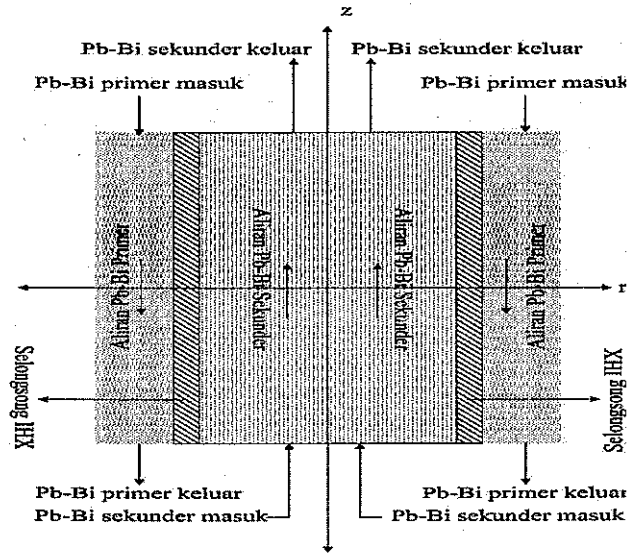
Untuk menghitung distribusi temperatur pendingin primer dan sekunder Pb-Bi menggunakan model Gambar 6. Sumbu Z sejajar tabung IHX dengan titik acuan diletakkan di atas IHX. Pada Gambar 6 diperlihatkan setengah



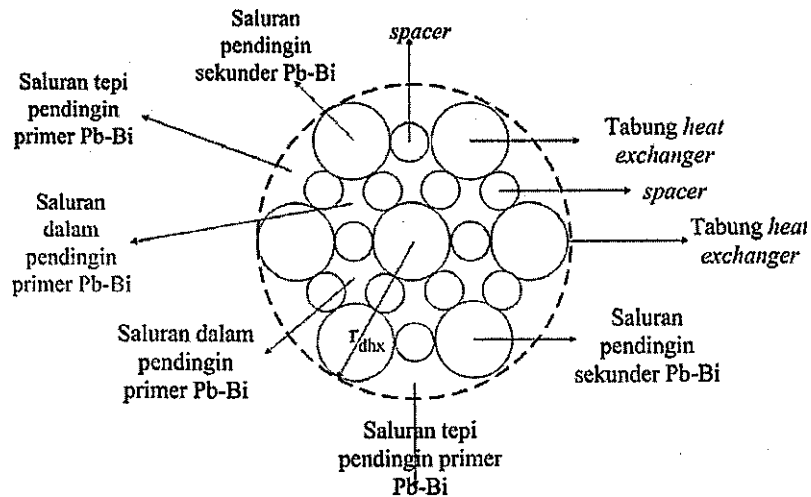
Gambar 2. Konfigurasi rancangan reaktor nuklir untuk produksi gas hidrogen



Gambar 3. Tampak samping dan arah aliran pendingin primer dan sekunder Pb-Bi di IHX



Gambar 4. Model dua dimensi tabung IHX



Gambar 5. Tampak atas dari model sederhana IHX

tabung IHX, PPB dan PSB dipisahkan oleh selongsong tabung IHX. Temperatur PPB lebih tinggi dari PSB sehingga panas mengalir dari PPB ke PSB. Panas mengalir secara konveksi pada PPB dan PSB sedangkan di selongsong tabung panas mengalir secara konduksi dari kanan ke kiri. Model matematis distribusi temperatur PPB

di IHX dinyatakan oleh persamaan (1) sedangkan distribusi temperatur PSB di IHX dinyatakan oleh persamaan (3)⁵ sebagai berikut.

$$-(T_{plb}(z) - T_{sib}(z))t_{plb} = \frac{dT_{plb}}{dz} \quad (1)$$

$$t_{plb} = \left[\frac{1}{2\pi k_{thx}} \ln\left(\frac{r_{othx}}{r_{ithx}}\right) + \frac{1}{2\pi r_{othx} h_{plb}} + \frac{1}{2\pi r_{ithx} h_{sib}} \right]^{-1} \left[\dot{m}_{plb} \cdot c_{plb} \right]^{-1} \quad (2)$$

Di mana :

- T_{plb} = temperatur rata-rata PPB di titik z(K)
- h_{plb} = koefisien perpindahan panas PBB
- h_{sib} = koefisien perpindahan panas PSB
- k_{thx} = konduktifitas panas selongsong tabung IHX
- \dot{m}_{plb} = laju alir masa PPB per satuan waktu
- c_{plb} = panas jenis PPB
- r_{othx} = jari-jari luar selongsong tabung IHX (m)
- r_{ithx} = jari-jari dalam selongsong tabung IHX (m)

$$-(T_{plb}(z) - T_{sib}(z))t_{sib} = \frac{dT_{sib}}{dz} \quad (3)$$

$$t_{sib} = \left[\frac{1}{2\pi k_{thx}} \ln\left(\frac{r_{othx}}{r_{ithx}}\right) + \frac{1}{2\pi r_{othx} h_{plb}} + \frac{1}{2\pi r_{ithx} h_{sib}} \right]^{-1} \left[\dot{m}_{sib} \cdot c_{sib} \right]^{-1} \quad (4)$$

Di mana :

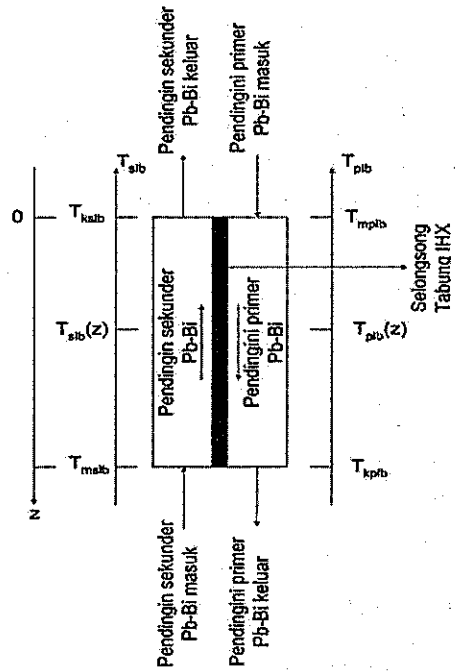
- c_{sib} = panas jenis PSB
- \dot{m}_{sib} = laju alir masa PSB per satuan waktu

Dari persamaan (2) dan (4) nampak bahwa temperatur PPB dan PSB sangat dipengaruhi oleh koefisien perpindahan panas (h_{plb} dan h_{sib}), konduktifitas panas selongsong tabung IHX (k_{thx}), laju alir masa per satuan waktu (\dot{m}_{plb} dan \dot{m}_{sib}), jari-jari luar (r_{othx}) dan jari-jari dalam (r_{ithx}) selongsong tabung IHX.

Pada penelitian ini dipilih jenis tabung *stainless steel*, pendingin primer dan sekunder Pb-Bi sehingga k_{thx} dan c_{plb} dapat menggunakan data literatur. Parameter \dot{m}_{plb} , \dot{m}_{sib} , r_{othx} dan r_{ithx} pada penelitian ini dipilih sesuai dengan rancangan yang diinginkan. Parameter yang belum diketahui adalah h_{plb} dan h_{sib} .

Penentuan h_{plb} dan h_{sib}

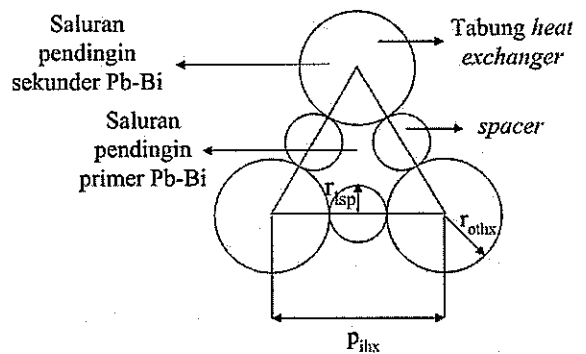
Pada persamaan (2) dan (4) terdapat parameter h_{plb} dan h_{sib} . Parameter h_{plb} dan h_{sib} dapat



Gambar 6. Model sederhana aliran PPB dan PSB pada tabung IHX

dihitung menggunakan metode *sub channel analysis*, yaitu Metode *sub channel analysis* adalah suatu metode yang digunakan pada analisis perpindahan panas dari suatu sistem yang terdiri atas ribuan saluran. Untuk analisis seperti itu maka analisis sistem diwakili oleh satu buah *channel*⁶.

Terdapat dua *sub channel* dari sistem seperti pada Gambar 5 yaitu *sub channel* untuk PPB dan *sub channel* untuk PSB. Bentuk dua dimensi *sub channel* PPB dari sistem tabung-tabung dengan konfigurasi heksagonal seperti pada Gambar 5 adalah bentuk segitiga seperti ditunjukkan pada Gambar 7^{3,7,8}.



Gambar 7. Konfigurasi *sub channel* pendingin primer

Segitiga *sub channel* PPB terbentuk oleh tiga tabung IHX dan tiga *spacer*. PPB mengalir

di dalam segitiga sedangkan PSB di dalam tabung IHX. Bentuk dua dimensi *sub channel* PSB adalah lingkaran dari tabung IHX di mana PSB mengalir di dalamnya. Dengan menggunakan metode *sub channel* maka dan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$h_{plb} = \frac{Nu_p k_{lb}}{D_{ep}} \dots\dots\dots(5)$$

$$h_{pls} = \frac{Nu_s k_{lb}}{D_{es}} \dots\dots\dots(6)$$

Di mana :

- D_{ep} = Diameter efektif *sub channel* PPB (m)
- D_{es} = Diameter efektif *sub channel* PSB (m)
- k_{lb} = Konduktivitas termal Pb-Bi (W/(m.K))
- Nu_p = Bilangan Nuselt PPB
- Nu_s = Bilangan Nuselt PSB

Diameter efektif *sub channel* PPB dinyatakan dengan persamaan^{7,8,9} berikut.

$$D_{ep} = \frac{4.0x\alpha_{1p}}{P_{wp}} \dots\dots\dots(7)$$

Di mana :

- α_{1p} = Luas total permukaan di IHX yang dialiri PPB (m²)
- P_{wp} = *Wetted perimeter* PPB (m)

Diameter efektif *sub channel* pendingin sekunder adalah^{7,8,9} :

$$D_{es} = \frac{4.0x\alpha_{1s}}{P_{ws}} \dots\dots\dots(8)$$

Di mana :

- α_{1s} = Luas total permukaan di IHX yang dialiri pendingin sekunder Pb-Bi (m²)
- P_{ws} = *Wetted perimeter* pendingin sekunder Pb-Bi (m)

Terlihat dari persamaan 7 dan 8 bahwa diameter efektif *sub channel* (D_{ep} dan D_{es}) sangat

dipengaruhi luas permukaan yang dialiri PPB maupun PSB (α_{1s} dan α_{1p}). Hal ini berarti bahwa koefisien perpindahan panas (h_{plb} dan h_{slb}) sangat bergantung pada konfigurasi penyusunan tabung-tabung IHX.

Dengan diperolehnya h_{plb} dan h_{slb} maka seluruh parameter-parameter pada persamaan (1) dan (3) diketahui. Distribusi temperatur pendingin sekunder dan primer dapat dihitung dengan menyelesaikan persamaan (1) dan (3) secara numerik menggunakan metode Runge-Kuta-Gill¹⁰.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menghitung distribusi temperatur pendingin primer dan sekunder Pb-Bi di IHX maka parameter laju alir pendingin primer di IHX harus sama dengan laju alir pendingin primer Pb-Bi di reaktor nuklir sebesar 7000 kg/s. Selain itu, temperatur masukan pendingin primer Pb-Bi ke IHX harus sama dengan temperatur keluaran pendingin primer reaktor sebesar 552°C. Parameter lain yang harus dipilih adalah temperatur keluaran pendingin sekunder Pb-Bi di IHX. Pada penelitian ini dipilih temperatur keluaran pendingin sekunder Pb-Bi sebesar 542°C. Pertimbangan pemilihan tersebut agar temperatur keluaran pendingin sekunder Pb-Bi bersesuaian dengan temperatur reaksi kimia proses SMR di unit produksi gas hidrogen. Parameter lain yang dipilih adalah jari-jari luar dan dalam selongsong tabung dan celah di antara dua tabung IHX masing-masing 0,025 m, 0,022m, dan 0,015 m. Parameter *Nusselt number* dihitung menggunakan data-data yang terdapat di dalam literatur^{7,8,9}.

Tabel 1. Parameter-parameter IHX Hasil Perhitungan

Temperatur keluaran pendingin primer Pb-Bi	521,72°C
Temperatur masukan pendingin sekunder Pb-Bi	458,49°C
Laju alir pendingin sekunder Pb-Bi	2700 kg/s
Jumlah tabung	721
Tinggi IHX	2 m
Diameter IHX	1,225 m

Dengan menggunakan parameter-parameter diperoleh parameter-parameter hasil perhitungan seperti tercantum pada Tabel 1. Hasil perhitungan diperoleh temperatur masukan

pendingin sekunder Pb-Bi 458,49°C, temperatur keluaran pendingin primer Pb-Bi 521,72°C dengan tinggi IHX dua meter dan diameter IHX 1,225 m. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa temperatur keluaran pendingin primer Pb-Bi dari IHX 521,72°C masih tinggi dibandingkan dengan temperatur masukan pendingin primer Pb-Bi ke reaktor nuklir 350°C. Agar temperatur pendingin primer Pb-Bi turun maka sebelum masuk ke reaktor nuklir pendingin primer Pb-Bi dilewatkan ke SHX.

Data-data temperatur keluaran dan masukan pendingin sekunder Pb-Bi di IHX sangat diperlukan untuk merancang dan menganalisis unit produksi gas hidrogen.

KESIMPULAN

Dengan menggunakan model aliran panas secara konduksi dan konveksi satu dimensi telah diperoleh model distribusi temperatur pendingin sekunder dan primer Pb-Bi. Koefisien perpindahan panas pendingin primer dan sekunder Pb-Bi di IHX dapat dihitung menggunakan metode *sub channel analysis*. Distribusi temperatur pendingin primer dan sekunder Pb-Bi diperoleh dengan menyelesaikan model matematis distribusi temperatur primer dan sekunder secara numerik menggunakan metode Runge-Kutta-Gill. Untuk kasus laju alir pendingin primer 7000 kg/s dan temperatur masukan 552°C diperoleh temperatur keluaran pendingin sekunder 542°C dengan laju alir 2700 kg/s.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹Wikipedia. 2007. "Fuel Cell". (http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell, diakses 2 Juli 2007).
- ²Crosbie, L.M. dan Chapin, D. 2003. "Hydrogen Production by Nuclear Heat". International Conferences on Global Environment and Advanced Nuclear Power Plants, Kyoto, makalah no.1143.
- ³Miller, A.I. dan Duffey, R.B. 2003. "Sustainable And Economic Hydrogen Co-generation From Nuclear Energy In Competitive Power Markets". *International Conferences on Global Environment and Advanced Nuclear Power Plants*, Kyoto, Jepang, makalah no. 1202.
- ⁴Walter, A.E. dan Reynolds, A.B. 1981. *Fast Breeder Reactors*. Oxford: Pergamon Press.
- ⁵Bahrum, E.S. 2007. "Studi Rancangan Dan Analisis Reaktor Nuklir Berpendingin Pb-Bi Untuk Produksi gas Hidrogen". Disertasi. Sekolah Pascasarjana. Bandung: ITB.
- ⁶Yu, Y.H, dan Suh, K. Y. 2004. "System Analysis of Pb-Bi Cooled Fast Reactor PEACER". International Symposium on Innovative Nuclear Energy Systemas for Sustainable Development of the World. Tokyo, Jepang, 31 Oktober-4 November 2004.
- ⁷Todreas, N.E. dan Kazimi. 1990. *Nuclear System I: Thermal Hydraulic Fundamentalas*. Newyork: Hemisphere Publising Corporation.
- ⁸Todreas, N.E. dan Kazimi, M.S. 1990. *Nuclear System II: Thermal Hydraulic Fundamentalas*. Newyork: Hemisphere Publising Corporation.
- ⁹Kakaç, S. dan Yener, Y. 1995. *Convective Heat Transfer Second Edition*. CRC Press.
- ¹⁰Coker, A.K. 1995. *Fortran Programs For Chemical Process Design, Analysis And Simulation*. Texas: Gulf Publishing Company.