

VALIDASI PROGRAM PERHITUNGAN SHELL DAN TUBE UNTUK DESAIN PENUKAR KALOR REAKTOR RISET

Endiah Puji Hastuti dan Sukmanto Dibyo*

ABSTRAK

VALIDASI PROGRAM PERHITUNGAN SHELL DAN TUBE UNTUK DESAIN PENUKAR KALOR REAKTOR RISET. Batasan keselamatan dalam pengoperasian reaktor nuklir terletak pada kemampuan pengambilan kalor oleh sistem pemindah kalor (*HE=Heat exchanger*), maka diperlukan desain HE yang tepat. Pada saat ini terdapat berbagai program perhitungan (*software*) untuk desain maupun analisis HE, sebelum digunakan maka *software* tersebut harus diuji/divalidasi terlebih dahulu. Makalah ini bertujuan mendapatkan hasil validasi *software SHELL & TUBE Heat Exchanger Design (SHELL & TUBE Hex)* yang akan digunakan untuk desain penukar kalor pada reaktor riset. Program *SHELL & TUBE Hex* adalah *software* yang khusus digunakan untuk menghitung desain termal penukar kalor tipe *shell-tube*. Hasil perhitungan desain berupa spesifikasi data desain teknis penukar kalor. Program *SHELL & TUBE Hex* divalidasi menggunakan data desain penukar kalor tipe shell-tube RSG-GAS. Penukar kalor RSG-GAS ini dipilih karena memiliki tipe yang sama dan memiliki data kinerja yang lengkap. Data input yang digunakan adalah parameter operasi seperti geometri, jumlah *baffle* dan *pass*, jenis dan laju aliran pendingin, temperatur kerja, geometri, yang diharapkan dan terpenuhinya syarat batas rugi tekanan. Hasil validasi menggunakan data yang sama menunjukkan bahwa desain hasil perhitungan parameter operasi dari *SHELL & TUBE Hex* tidak memberikan perbedaan yang signifikan dengan data desain penukar kalor RSG-GAS. Hasil validasi program *SHELL & TUBE Hex* terhadap desain penukar kalor RSG-GAS membuktikan bahwa *software* ini cukup valid untuk digunakan dalam desain alat penukar kalor reaktor riset.

Kata kunci: Validasi, program perhitungan *Shell & Tube*, Desain Penukar Kalor.

ABSTRACT

VALIDATION OF SHELL AND TUBE SOFTWARE EXCHANGER HEAT REACTOR RESEARCH DESIGN. Reactor safety limits are determined by the heat removal capability by means of heat transfer system (HE = Heat exchanger), as a consequently it requires an appropriate of HE design. At present there are various software for the design and analysis of HE, before using the software it needed a validation. Purpose of this paper is validation of SHELL & TUBE Heat Exchanger Design (SHELL & TUBE Hex), that to be used for the design of heat exchanger in a research reactor. The SHELL & TUBE Hex is special software for thermal design of shell-tube type heat exchanger. This software is validated by using the heat exchanger data of RSG-GAS. For the reason that similar type and complete data, therefore the RSG-GAS heat exchanger was chosen for it. Input data used in this validation are the operating parameters such as geometry, number of baffles and pass, coolant type and flow rate, working temperature, geometry, boundary conditions and the accomplishment of expected pressure loss. The results of validation by using the same data showed that there is no significant difference between SHELL & TUBE Hex and RSG-GAS heat exchanger designs. The validation results show that the SHELL & TUBE Hex software is valid for research reactor heat exchanger design.

Keywords: Validation, Shell and Tube Computer program, Heat Exchanger Design

* Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN Serpong, e-mail: endiah@batan.go.id

PENDAHULUAN

Salah satu pembatas utama dalam desain suatu reaktor nuklir adalah terletak pada kemampuan perpindahan kalor dari bahan bakar ke sistem pendingin primer reaktor, yang dilakukan melalui aliran air pendingin melalui celah bahan bakar dan fasilitas iradiasi di dalam teras reaktor. Selanjutnya aliran air tersebut harus dapat dipindahkan ke sistem pendingin sekunder, yang mengalir secara terpisah dengan sistem pendingin primer reaktor, dan selanjutnya aliran pendingin sekunder akan dilepaskan ke lingkungan melalui menara pendingin. Dalam hal ini rancangan/desain penukar kalor yang tepat sangat diperlukan dalam desain reaktor nuklir. Hal ini juga berlaku pada industri -terutama industri proses, manufaktur, kimia dan nuklir. Seperti pada perpindahan kalor yang diperlukan pada reaktor nuklir, peranan penukar kalor pada industri-industri tersebut terutama dalam menentukan keberhasilan suatu proses produksi atau operasi. Dari banyak tipe alat penukar kalor maka tipe *shell and tube* merupakan tipe yang terbanyak digunakan [1,2,]. Tipe ini banyak digunakan untuk sistem pendingin pada berbagai reaktor riset di dunia, karena sifat aliran pendingin yang harus terpisah antara pendingin primer yang bersentuhan langsung dengan bahan bakar nuklir dan sistem pendingin sekunder yang harus tidak terkontaminasi.

Prinsip desain penukar kalor adalah mampu memindahkan energi kalor secara optimal, permukaan transfer kalor minimum dan kondisi operasi yang efektif. Metodologi yang dipakai dalam mendesain merupakan metoda *trial-error* untuk memperoleh parameter koefisien transfer kalor sampai konvergen, hal ini banyak menghabiskan waktu. Kriteria keberhasilan desain penukar kalor adalah diperolehnya koefisien transfer kalor di mana syarat batas rugi tekanan (ΔP) terpenuhi. Selain data-data input yang diperlukan, perhitungan desain ini juga memerlukan langkah opsi berulang untuk memilih data geometri standar yang tersedia.

Program SHELL & TUBE Hex (versi 1.6) adalah program komputer yang dibuat oleh *Webbustertz Engineering Software* untuk desain termal atau evaluasi/*rating* penukar kalor tipe *shell and tube* ^[3]. Program perhitungan ini diharapkan dapat mempercepat perhitungan meskipun tetap menggunakan metode *trial and error*. Secara prinsip langkah perhitungan yang dilakukan adalah sama dengan metode konvensional, akan tetapi adanya ketersediaan *data base* rancangan untuk berbagai opsi perhitungan akan mempercepat hasil perhitungan sehingga hasilnya diharapkan lebih akurat. Sebelum digunakan untuk desain, maka *software* ini perlu diuji/validasi desain terlebih dahulu dengan cara melakukan verifikasi hasil desain terhadap data desain penukar kalor yang sudah ada. Untuk itu, penukar kalor RSG-GAS digunakan sebagai obyek validasi (sebagai acuan), karena memiliki tipe yang sama yaitu *shell - tube* dan kinerja HE yang lengkap.

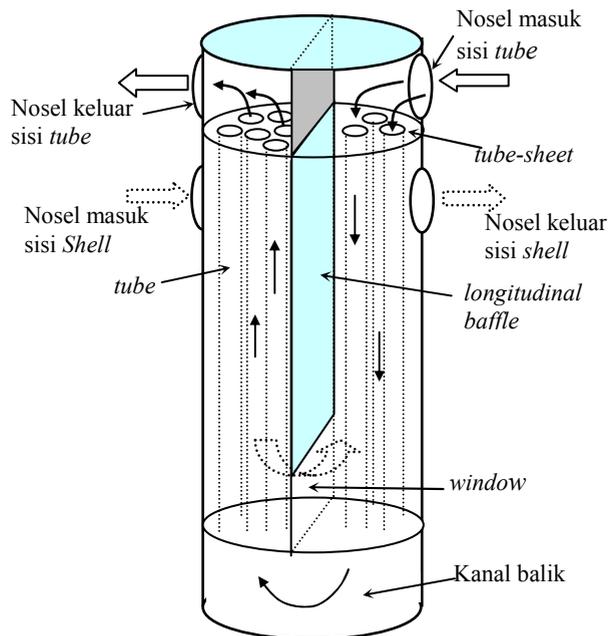
Berdasarkan latar belakang uraian tersebut di atas maka tujuan makalah ini adalah melakukan validasi desain penukar kalor tipe *shell-tube* pada SHELL & TUBE Hex *software* dengan menggunakan data desain penukar kalor RSG-GAS. Keberhasilan validasi *software* akan memberikan tingkat kepercayaan untuk menggunakannya sebagai design tools, komponen sistem yaitu HE reaktor riset

inovatif (RRI). Reaktor ini direncanakan menjadi pengganti reaktor-reaktor riset di Indonesia yang akan mengalami akhir masa operasinya [4].

TEORI

Penukar Kalor Tipe *Shell - Tube*

Berdasarkan konstruksi dan geometri tipe penukar kalor *shell and tube* terdiri dari sekumpulan *tube* (*tube bundles*) yang dimasukkan ke dalam *shell* berbentuk silinder. Secara umum penukar kalor ini menggunakan dua fluida kerja yang berbeda temperaturnya dan tidak melakukan kontak secara langsung dalam proses transfer kalor, masing-masing fluida mengalir terpisah, yang satu masuk ke sisi *tube* yang lain masuk ke sisi *shell*. Di ujung alat ini terdapat *tube sheets*, yang berfungsi sebagai dudukan sekaligus sebagai pemisah fluida kerja yang mengalir di sisi *shell* dan di dalam *tube*. Fluida dapat berupa cairan atau gas di sisi *shell* atau sisi *tube*. Untuk mentransfer kalor secara efisien, maka harus digunakan area transfer kalor yang memenuhi kebutuhan yang memungkinkan penggunaan jumlah tube yang banyak. Berikut pada Gambar 1 adalah contoh skematika konstruksi penukar kalor tipe *shell and tube* RSG-GAS [5,6].



Gambar 1. Skematika Penukar Kalor RSG-GAS

Penyuar Kalor RSG-GAS

Alat penyuar kalor RSG-GAS merupakan *interface* dari sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder. Tipe alat penyuar kalor adalah *shell and tube* dengan arah aliran berlawanan. Fluida kalor mengalir melalui *shell*, sedangkan fluida dingin melalui *tube*. Diameter *shell*-nya 1300mm, diameter *tube* 22mm dan panjang *tube* 7410 mm. Jumlah *tube* sebanyak 816 dengan luas permukaan transfer kalor total 780m². Nilai koefisien perpindahan kalor total untuk kondisi desain tidak diketahui. Kondisi operasional pendingin alat penyuar kalor RSG-GAS baik sisi primer maupun sekunder masih dalam satu fase yaitu fase air. Temperatur masuk dan keluar pendingin primer atau air kalor masing-masing sebesar 49°C dan 40°C, sedangkan pendingin sekunder atau air dingin 32°C dan 40 °C. Laju aliran pendingin primer 430 kg/s dan laju aliran pendingin sekunder 485 kg/s. Nilai penurunan tekanan sisi *shell* 0,5 bar dan sisi *tube* 0,4 bar.

Program Perhitungan SHELL & TUBE Heat Exchanger Design

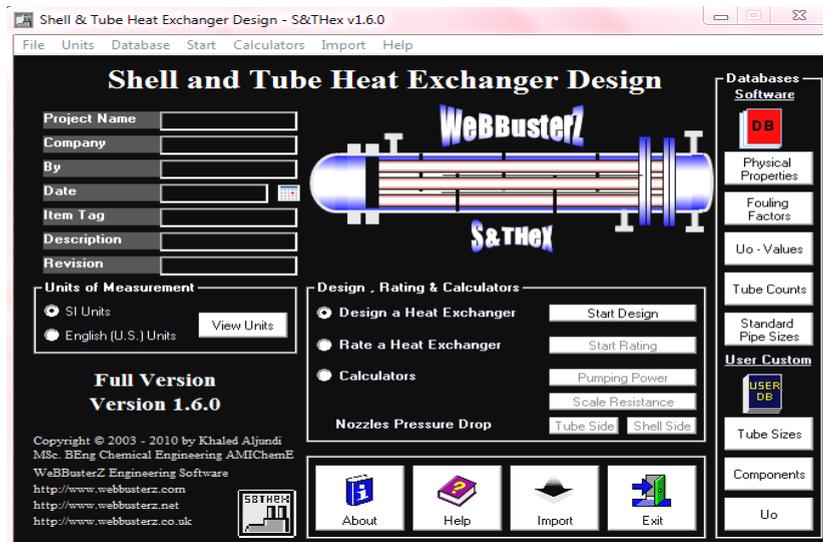
Program *SHELL & TUBE Heat Exchanger Design (SHELL & TUBE Hex)* dibuat oleh *WeBBusterz Engineering Software* untuk perhitungan penyuar kalor tipe *shell-tube*. *Software* ini bersifat interaktif pada saat digunakan. Dengan demikian *SHELL & TUBE Hex* ini dapat dikatakan sebagai *software* yang *user friendly*, meskipun demikian pengguna harus memiliki pemahaman tentang prinsip-prinsip desain penyuar kalor. Untuk membantu memahami proses perhitungan, maka dalam program ini dilakukan dengan tahapan langkah demi langkah. Program terdiri dari, langkah-langkah perhitungan desain, perhitungan *rating* dalam satuan SI atau British dan penyimpanan hasil. Langkah perhitungan dilakukan terhadap:

- a) Daya (*duty*), kecepatan aliran pada sisi *shell* dan sisi *tube*.
- b) Perhitungan *baffle* dan *spacing baffle*
- c) Koefisien transfer kalor total untuk kondisi bersih dan kotor
- d) Pemilihan korelasi yang berbeda untuk menghitung koefisien transfer kalor
- e) Bilangan Reynolds dan Nusselt sisi *tube* dan sisi *shell*
- f) Rugi tekanan (*pressure drop*)
- g) Tebal *shell*, minimum jumlah dan *baffle rod* minimum yang direkomendasikan
- h) Menghitung tebal *tube sheet*, luas kanal, nosel.
- i) Luas permukaan transfer kalor, efektivitas dan rasio kapasitas termal.
- j) Daya pompa dan rugi tekanan aliran.

Program *SHELL & TUBE Hex* menyediakan Data base yang meliputi:

- a) Sifat-sifat fisis dengan lebih dari 1450 komponen untuk memperkirakan nilai konduktifitas termal, kapasitas termal, densitas dan viskositas.
- b) Sifat-sifat kritikal pendidihan dan *melting point*.
- c) Estimasi sifat-sifat fisis fluida campuran dan lain-lain.

Tampilan awal Program *SHELL & TUBE Hex* ditunjukkan pada Gambar 2 berikut,

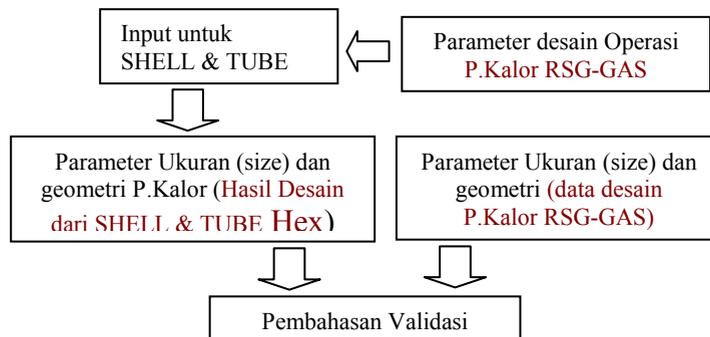


Gambar 2. Program *SHELL & TUBE Heat Exchanger Design*

METODOLOGI

Validasi program perhitungan *SHELL & TUBE* dilakukan dengan mendesain ulang penukar kalor ** menggunakan data input penukar kalor RSG-GAS.

Langkah yang dilakukan dapat dijelaskan dalam skema/diagram alir berikut ini.



Gambar 3. Diagram alir perhitungan

Setelah tahap *Run Sizing Calculations*, maka dapat diperoleh data spesifikasi desain (dimensi, ukuran dan geometri). *Running* yang sukses akan diperoleh bilamana tidak terjadi *error* selama data input dimasukkan. Desain termal penukar kalor dimulai

dari mengidentifikasi data operasi yang digunakan untuk *running*. Data desain Penukar kalor RSG-GAS dan spesifikasinya diberikan pada Tabel 1 [5,6].

Tabel 1. Spesifikasi Teknik penukar kalor RSG-GAS

| No. | Parameter | Satuan | Angka Desain |
|-----|--------------------------------|----------------|-------------------------------|
| 1. | Tekanan direncanakan | bar | 10 |
| 2. | Temperatur Desain | °C | 60 |
| 3. | Tipe | - | <i>shell tube, 2/2 passes</i> |
| 4. | Beban Kalor / alat | MW | 16,20 |
| 5. | Temperatur air kalor masuk | °C | 49 |
| 6. | Temperatur air kalor keluar | °C | 40 |
| 7. | Temperatur Pendingin masuk | °C | 32 |
| 8. | Temperatur Pendingin keluar | °C | 40 |
| 9. | Laju Aliran kalor | kg/s | 430 |
| 10. | Laju Aliran dingin | kg/s | 485 |
| 11. | Luas permukaan transfer kalor | m ² | 780 |
| 12. | Diameter <i>tube</i> OD | mm | 22 |
| 13. | Panjang <i>tube</i> | mm | 7410 |
| 14. | Jumlah <i>tube</i> tiap laluan | - | 816 |
| 15. | Diameter <i>shell</i> | mm | 1300 |

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemilihan tipe dan *lay-out* HE

Langkah awal dalam desain HE adalah penentuan terlebih dahulu adalah jenis dan massa fluida yang akan dipindahkan kalornya, gas-fluida, ataukah fluida-fluida. Pada desain pemindah kalor ini adalah fluida-fluida yang tidak boleh tercampur karena sifatnya, yaitu air pendingin primer bersifat aktif yang hanya tersirkulasi di dalam siklus pendinginan di dalam teras reaktor, dan pendingin sekunder yang bersinggungan dengan lingkungan. Oleh karena itu dipilih HE tipe shell and tube. Shell adalah wadah yang berisi tube, mengingat bahwa harga secara ekonomi Shell adalah mahal, maka biasanya dipilih untuk melewati air pendingin primer yang kualitas airnya lebih baik daripada pendingin sekunder. Tube digunakan untuk melewati air pendingin sekunder, yang dapat dibersihkan apabila diperlukan. Jumlah laluan tube perlu dipertimbangkan agar tidak “memakan tempat” tetapi di sisi lain juga tidak menyebabkan pressure drop yang besar. Pada langkah awal desain HE ini dipilih jumlah laluan *Shell* = 2 dan jumlah laluan *tube* = 2, ini artinya bahwa HE harus menggunakan pemisah secara memanjang di sisi *head* (ujung-ujung) HE.

Penentuan diameter *shell* dan *tube*

Penentuan diameter diambil dari database atau literatur, estimasi penentuan diameter Shell = 1000mm; untuk sisi tube dipilih susunan triangular untuk bentuk seperti ini apabila telah ditentukan diameter tubenya maka geometri lainnya akan diberikan sesuai data base ukuran pipa standar yang ada. Geometri tube adalah sebagai berikut (hasil berdasarkan pemilihan diameter luar yang ditentukan): OD = 22mm; ID=20,22mm; panjang tube=7,410mm; pitch=27,5mm; tebal tube=0,889mm.

Log mean temperature difference

Merupakan beda temperatur yang diharapkan pada sisi inlet dan outlet. Adanya model aliran, jumlah laluan (*pass*) dan penghalang (*baffle*) akan menghasilkan faktor koreksi, sehingga beda temperatur yang dihasilkan telah mencakup faktor koreksi tersebut. Dalam desain ini dipilih aliran counter current (berlawanan arah) agar waktu perpindahan kalor lebih lama, sehingga perpindahan kalor akan lebih efisien. Hasil perhitungan untuk beda temperatur yang diinginkan sebesar 10°C adalah $\Delta T_{LM} = 8,4902^{\circ}\text{C}$; faktor koreksi temperatur = 0,8023°C; sehingga beda temperatur antara inlet dan outlet terkoreksi adalah 6,8117°C. Luas perpindahan panas dengan tube seperti ini adalah 835,7472m².

Koefisien perpindahan panas di sisi *Shell* dan *tube*

Koefisien perpindahan panas di sisi tube memerlukan input dari geometri luasan tube, kecepatan pendingin dan aliran volumetrik. Input tersebut digunakan untuk menghitung bilangan Reynold (Re), Pr dan nilai perbandingan L/Di Koefisien perpindahan panas

Validasi Program *SHELL & TUBE Heat Exchanger Design* telah dilakukan terhadap alat penukar kalor RSG-GAS, Tabel 2 menunjukkan hasil perhitungan desain dari program SHELL & TUBE Hex dan dibandingkan dengan data desain spesifikasi penukar kalor RSG-GAS yang dikutip dari Safety Analysis Report maupun data manual penukar kalor dengan kode (JE-01/02).

Tabel 2. Hasil Validasi Desain SHELL & TUBE Hex Software Untuk Penukar Kalor RSG-GAS

| No | Parameter | Data Desain Penukar Kalor RSG GAS | Hasil Desain SHELL & TUBE Hex Software | Perbedaan |
|-----|--|-----------------------------------|--|-----------|
| 1. | Jumlah <i>Tube</i> (-) | 816 | 819 | 0,4 % |
| 2. | <i>Shell/Tube pass</i> (-) | 2/2 | 2/2 | - |
| 3. | <i>Pitch Tube</i> (mm) / <i>layout</i> | 1.25/ Δ | 1.25 / Δ | - |
| 4. | Diameter <i>Tube</i> OD (mm) | 22 | 22 | - |
| 5. | Diameter <i>Tube</i> ID (mm) | - | 20,22/ BWG20 | - |
| 6. | Diameter <i>Shell</i> (mm) | 1300 | 1256,4 | 7,2% |
| 7. | Jumlah <i>Baffle</i> | 1 | 1 | - |
| 8. | Luas Permukaan (m ²) | 780 | 835,7 | 5,3% |
| 9. | Panjang <i>tube</i> (mm) | 7410 | 7410 | - |
| 10. | LMTD (°C) | - | 8,49 | - |
| 11. | Faktor <i>Fouling</i> (j.cm ² .°K /kal) | - | 0,00005 | Input |
| 12. | ΔP sisi <i>shell</i> (bar) | 0,5 | 0,5 | Input |
| 13. | ΔP sisi <i>tube</i> (bar) | 0,4 | 0,4 | Input |
| 14. | <i>Uoverall</i> (w.m ² .°C) | - | 210 | - |
| 15. | Bilangan Reynolds sisi <i>tube</i> | - | 426000 | - |
| 16. | Bilangan Reynolds sisi <i>shell</i> | - | 36300 | - |
| 17. | Beban Kalor / alat | 16,20 | 19,60 | 20 % |

Parameter-parameter dipilih sebagaimana lazim ditampilkan di dalam lembar spesifikasi penukar kalor standar TEMA. Tabel 2 adalah hasil perhitungan desain data geometri ukuran penukar kalor yang dalam hal ini adalah data ukuran *tube* dan ukuran *shell*. Jumlah *tube* dan luas permukaan transfer kalor menghasilkan angka desain yang lebih besar namun memberikan perbedaan yang tidak signifikan. Luas permukaan transfer kalor yang lebih besar akan memberikan margin perioda operasi penukar kalor yang lebih lama. Dalam desain penukar kalor, maka perhitungan luas permukaan yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan operasi selalu memasukkan koefisien *fouling* dalam kondisi kotor (*dirty*).

Adapun hasil desain diameter *shell* sangat dipengaruhi oleh diameter bundel *tube* dan parameter celah antara bundel dengan dinding silinder *shell* (*bundle tube to shell clearance*). Dalam menggunakan SHELL & TUBE Hex ini, data desain celah ini tidak ada data dalam spesifikasi desain dari penukar kalor RSG-GAS, oleh karena itu harus ditentukan sendiri. Terlihat dari angka tersebut, diameter *shell* lebih kecil sedangkan jumlah *tube* lebih banyak (diameter bundel *tube* lebih besar) sehingga tidak banyak aliran *by-pass* yang melewati celah antara bundel dengan dinding silinder *shell*. Dengan demikian proses transfer kalor lebih efisien.

Selanjutnya, kemampuan beban penukar kalor dalam perhitungan desain ini menjadi lebih besar. Parameter lain yang dapat juga ditampilkan dari desain keluaran SHELL & TUBE Hex diantaranya koefisien *Uoverall*, Bilangan Reynolds, LMTD, faktor *fouling* dan sebagainya.

KESIMPULAN

Hasil perhitungan desain yang diperoleh dari Program *SHELL & TUBE Heat Exchanger Design* terhadap desain penukar kalor RSG-GAS secara umum menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan. Perbedaan yang paling besar diperoleh pada parameter kemampuan beban alat yang lebih besar dari data desainnya.

Hasil validasi program *SHELL & TUBE Heat Exchanger Design* terhadap RSG-GAS sehingga dapat diterima untuk digunakan dalam desain alat penukar kalor reaktor riset.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Alm. Sidiq Suroso dan RISTEK serta semua pihak yang telah membantu penelitian ini. Kegiatan penelitian ini dibiayai melalui Program Insentif Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perakayasa (PI-PKPP) Ristek dengan judul "Desain Termohidrolika Reaktor Riset Inovatif Berbahan Bakar Tingkat Muat tinggi".

DAFTAR PUSTAKA

1. KERN DQ, "*Process Heat Transfer*", Chapter 7, International Student Edition, Mc.Graw Hill Book Co, New York, 1965.
2. PALEN JW, "Diktat Kuliah TK-771", Institut Teknologi Bandung, 1992.
3. KHALED, A., "Shell and Tube Heat Exchanger Design", Webbusterz Enginnering Software, <http://www.webbusterz.com>, 2010.
4. Endiah PH, Proposal Penelitian Desain Termohidrolika Reaktor Riset Inovatif Berbahan Bakar Tingkat Muat Tinggi, PI-PKPP 2012.
5. SUKMANTO, D., "*Penerapan Perhitungan Desain Unjuk Penukar Kalor RSG-GAS*", Prosiding, Seminar ke-8 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Jakarta, 15 Oktober 2002.
6. BATAN, Safety Analysis Report (SAR), Chapter.6 Rev.9 SAR-RSG.

DISKUSI

SAMIN

1. Sebutkan parameter paket validasi
2. Standar / acuan yang digunakan pada validasi
3. Apakah dapat diterapkan di PTAPB

ENDIAH PUJI HASTUTI

1. Parameter paket validasi terdiri dari pemilihan geometri shell, tube, pemilihan jenis aliran, jumlah baffle, jumlah pass, koef PP, ΔT LMTD, kemampuan HE, dll.
2. Validasi menggunakan standard TEMA
3. Saat ini sedang tahap validasi, hasilnya cukup valid. Program dapat digunakan untuk berbagai opsi jenis HE. Silakan berkonsultasi dengan kami.

CUKUP MULYANA

1. Mengapa perumusan Heat Exchangersnya tidak keluar?
2. Apakah mungkin dilakukan kerja sama dalam pemanfaatan software bagi mahasiswa terutama untuk tugas akhir.

ENDIAH PUJI HASTUTI

1. Untuk dapat memvalidasi program S&T Hex harus telah menguasai teori PP. Oleh karena itu tidak ditampilkan, tetapi lebih kepada validasinya.
2. Silakan bagi mahasiswa Unpad untuk melakukan kerja praktek. Surat ditujukan kepada:
Kepala Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir u/p Ka BFTR-PTRKN
Gd. 80 Kawasan Puspitek Serpong
Tangerang – Selatan

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

- | | |
|--------------------------|--|
| 1. Nama | : Ir. Endiah Puji Hastuti,MT |
| 2. Instansi / Unit Kerja | : PTRKN Batan |
| 3. Pekerjaan / Jabatan | : Peneliti Madya |
| 4. Riwayat Pendidikan | : - S1 Teknik Kimia UNDIP, Semarang, 1986 - S2 Fak. Pasca Sarjana Jurusan “Rekayasa Energi Nuklir”, ITB, 1985. |
| 5. Pengalaman Kerja | : - Pusat Reaktor Serba Guna Serpong, 1987-2006 - Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, 2006-sekarang |