

PREDIKSI PARAMETER TERMOHIDROLIK FLUIDA PENDINGIN DI DALAM KANAL PELAT DENGAN PROGRAM HEAT-HYD

Fatchatul Baiyinah, Sudjatmi K.S dan Putranto Ilham Yazid

Pusat Sains dan Teknik Nuklir Terapan-BATAN, Jalan Tamansari No.71, Bandung, 40132

ABSTRAK

PREDIKSI PARAMETER TERMOHIDROLIK FLUIDA PENDINGIN DI DALAM KANAL PELAT DENGAN PROGRAM HEAT-HYD. Parameter parameter termohidrolik fluida pendingin yang diprediksi adalah batas batas keselamatan operasi suatu reaktor nuklir. Pada proses reaksi fisi didalam teras reaktor akan terbentuk neutron baru, juga akan timbul sejumlah kalor. Air pendingin didalam teras reaktor ini akan didinginkan melalui proses perpindahan kalor dari elemen bakar ke fluida pendingin primer dan dilanjutkan ke pendingin sekunder. Pendinginan sistem tersebut dipengaruhi oleh daya, suhu inlet, jenis fluida kerjanya, laju alir dan arah aliran, bentuk dan ukuran kanal serta tekanannya. Dalam kesempatan ini, untuk menganalisis termohidrolik sistem pendingin, akan digunakan paket program Heat-hyd. Untuk keselamatan operasi reaktor nuklir telah diprediksi untuk suhu inlet yang paling tinggi yang masih mungkin yaitu 37°C, sedang arah aliran pendingin ke bawah dan juga ke atas, dengan variasi laju dari 32m³/jam sampai 48m³/jam untuk daya operasi 2000kW. Daya operasi maksimum untuk mendapatkan batas keselamatan yang masih diizinkan juga telah dicoba untuk daya diatas 2000kW laju alir 40m³/jam dan sudah tidak memenuhi persyaratan keselamatan lagi.

Kata kunci: batas keselamatan, laju alir pendingin, arah aliran pendingin, suhu inlet, Heat-Hyd.

ABSTRACT

THE PREDICTION OF THERMOHYDROLIC PARAMETER ON COOLING WATER IN PLATE CHANNEL USING HEAT HEAD-HYD SOFTWARE. The safety limit of thermohydrolic parameters for nuclear reactor operation had been predicted. Fission reaction in nuclear reactor core will produce neutron, and will produce amount of heat. The coolant fluid will be cooled using heat transfer from fuel element to primary cooling system and next to secondary cooling system. This cooling system was always be influenced by power inlet temperature, type of coolant, flow rate value and direction of flow rate, form and size of channel and the coolant pressure. For this safety analysis, Heat-Hyd software programe has been used. The safety limit of nuclear reactor operation, had been predicted for the highest inlet temperature at 37°C, the flow rate up direction and down direction too, and flow rate from 32m³/h to 48m³/h for the total power 2000kW. The safety limit for the maximum total power more than 2000kW with flow rate 40m³/h had been calculated too, and it does not comply with the safety requirement.

Keywords: safety limit, coolant fluid flow rate, direction flow rate, inlet temperature, Heat-Hyd.

1. PENDAHULUAN

Berhubung sulitnya didapat bahan bakar bentuk batang, maka perlu dikembangkan sistem bahan bakar bentuk pelat. Aspek termohidrolik adalah salah satu faktor yang penting dalam pengoperasian reaktor nuklir. Aspek ini meliputi masalah perpindahan panas dari bahan bakar ke material pendingin dengan cara konveksi. Proses

reaksi fisi didalam teras reaktor akan terbentuk neutron baru, juga akan timbul sejumlah kalor. Dan kalor yang timbul ini agar tidak terakumulasi di dalam teras reaktor, sehingga harus dialirkan melalui proses perpindahan kalor dari elemen bakar ke fluida pendingin primer dan dilanjutkan ke pendingin sekunder. Dalam kesempatan ini, untuk menganalisis termohidrolik sistem pendingin, akan digunakan paket program Heat-

hyd. Paket program Heat-Hyd adalah paket program yang dikembangkan untuk reaktor yang berteras persegi (MTR type) dan proses perpindahan kalornya sebagian besar secara konveksi paksa. Isi paket program Heat-Hyd adalah gabungan perhitungan perpindahan kalor dan aliran fluida.

Dalam model dan korelasi bagian aliran fluida program Heat-Hyd, perhitungannya dilakukan dalam beberapa langkah[1],[4]. Langkah langkah perhitungan tersebut sebagai berikut:

1. Menentukan kecepatan aliran pada tiap titik,
2. Menentukan bilangan Reynold(Re),
3. Menentukan penurunan tekanan (*“pressure drop”*) akibat friksi (gesekan), perubahan kecepatan, perubahan penampang aliran, kanal masukan/keluaran, perubahan ketinggian atau gravitasi,
4. Menentukan temperatur jenuh (saturasi).

Model dan korelasi bagian perpindahan kalor program Heat-Hyd dilakukan beberapa langkah berikut[1]:

1. Menentukan perhitungan fluks kalor menggunakan persamaan untuk satu fasa dinyatakan oleh persamaan Dittus –Boeltar; untuk dua fasa melalui persamaan Jean dan Lottes.
2. Menentukan temperatur: temperatur pelat (kelongsong), temperatur elemen bakar yang hasilnya fluks panas, temperatur pendingin, yang didapat dari persamaan fluks panas; hasilnya fluks panas.

Parameter batas batas keselamatan meliputi :

1. Menentukan permulaan pendidihan yang ditentukan persamaan Bergeles/Rohsenow [1],[2],[3] $QONB$ (Heat flux Onset Nucleat Boiling terjadi) fluks panas ketika awal pendidihan intiyaitu pendidihan inti mulai jika $q \geq QONB$ [1] (1)
2. Menentukan parameter $QDNB$ (Heat flux Departure Nucleat Boiling) yaitu fluks panas saat terjadi kritis (CHF= Critical Heat Flux) yang dinyatakan oleh persamaan Mirshak/Labuntsov [5] sebagai berikut $QDNB$ *Burn out* atau panas kritis terjadi jika, $q \geq QDNB$ (2)
3. Menentukan $QDFI$ (Heat flux Departure Flow Instability)Flux kalor ketidak stabilan aliran dinyatakan oleh persamaan Wittie dan Forgan [5],[6],[7] yaitu sebagai $QDFI$. Aliran akan tidak stabil jika, $q \geq QDFI$ (3).

Untuk selanjutnya batas batas keselamatan meliputi nilai batas [1],[4],[5]. $DNBR$ rasio pelepasan awal pendidihan inti dan suhu maksimum atau didefinisikan sebagai *burnout* di *output program (Departure of Nucleate Boiling Ratio)*,

$$DNBR = QDNB/q \max \leq 1 \quad (4)$$

$ONBR$ rasio kondisi awal pendidihan inti (*Onset Nucleate Bolling-ONB*) dan suhu maksimum ,

$$ONBR = QONB / q \max \leq 1 \quad (5)$$

Sf rasio kondisi awal ketakstabilan aliran (*Flow instability at cooling channel*) dan suhu maksimum terjadi jika

$$Sf = QDFI / q \max \leq 1 \quad (6)$$

Hubungan antara temperatur saturasi dan temperatur ONB adalah pada persamaan berikut:

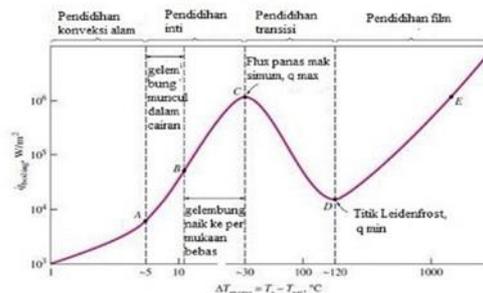
$$T(\text{pelat}, ONB) - Tsat = \Delta T_{ONB} \text{ (K atau } ^\circ\text{C)} [6] \quad (7)$$

$T_{\text{pelat}, ONB}$ disebut temperatur pelat atau *wall superheat* [5]. Selisih temperatur pelat saat tercapai fluks panas ONB dan Temperatur saturasi disebut ΔT_{ONB} . Temperatur pelat saat ONB terjadi diatas temperatur saturasi fluida pendingin. Koefisien perpindahan kalor pada kurva didih dinyatakan sebagai [6],[10]

$$h = q'' / \Delta Ts \quad (8),$$

dengan h adalah koefisien perpindahan kalor [W/m^2K], q'' adalah fluks kalor (W/m^2), dan $\Delta Ts = (T_p - Tsaturasi)$ (K atau oC) dalam hal ini adalah temperatur pelat.

Sedangkan, rejim pendidihan sendiri telah didefinisikan oleh Nukiyama berdasarkan eksperimen pada pendidihan kolam yang diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Kurva pendidihan Nukiyama [6],[9]

Rejim perpindahan kalor dapat dibedakan menjadi beberapa rejim yaitu:

1. Konveksi bebas, dicirikan dengan konveksi bebas satu fasa dari permukaan panas ke cairan saturasi tanpa adanya pembentukan gelembung.
2. Didih inti, rejim ini merupakan konveksi dua fasa dimana gelembung mulai muncul, tumbuh, dan meninggalkan permukaan panas.
3. Didih transisi, rejim ini adalah rejim yang terjadi ditengah-tengah antara didih intidan rejim didih film, juga disebut sebagai didih

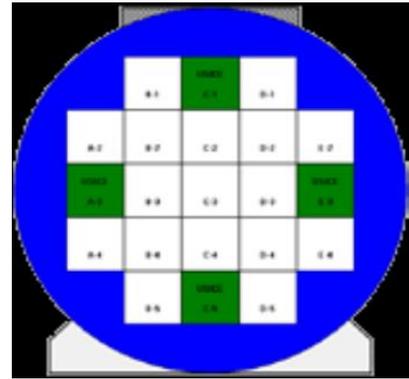
parsial. Penjelasan didih transisi terbagi menjadi dua keadaan dilihat dari ada tidaknya kontak diantara muka air, uap, dan permukaan benda yaitu didih transisi film (tidak ada kontak permukaan benda dengan air) dan didih transisi inti yang merupakan kontak permukaan benda dengan air[7]. Mekanisme tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.

4. Didih film, rejim ini dicirikan oleh adanya suatu lapisan uap stabil yang terbentuk di antara permukaan panas dan cairan. Terdapat tiga titik transisi diantara empat rejim. Titik pertama (A) disebut sebagai incipience of boiling (IB) atau onset of nucleate boiling (ONB), dimana gelembung pertama kali tampak pada permukaan panas. Titik kedua (C) adalah puncak dari kurva dibagian kurva didih inti, disebut sebagai departure from nucleate boiling (DNB), *the critical heat flux* (CHF), *or peak heat flux*. Titik transisi terakhir (D) terletak dibagian paling bawah dari rejim didih film dan disebut sebagai titik minimum film boiling (MFB) atau Leidenfrost point[9].

6. Koefisien perpindahan panas konveksi di output program disebut Alpha ($W/cm^2 \cdot ^\circ C$)
7. Batas mulai terjadinya gelembung pendidihan inti ONBR
8. Batas terjadinya pendidihan inti (*burn out* atau ke kritisan) DNBR
9. Batas ketakstabilan aliran air pendingin, Sf.

2.2 Gambaran sistem bahan bakar

Skema sistem bahan bakar reaktor bentuk pelat yang akan dianalisis adalah sebagai berikut.



Gambar 2. Konfigurasi 1 elemen kendali pada posisi A3, C1,C5, E3.

2. TATA KERJA (BAHAN DAN METODE)

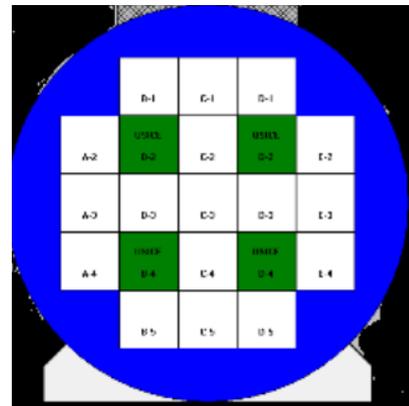
2.1. Metodologi

Didalam paket program ini digunakan persamaan empirik yang telah diperoleh dari hasil percobaan para peneliti sebelumnya. Masukan (input) program adalah [1],[4].

Data aliran pendingin nya sebagai berikut:

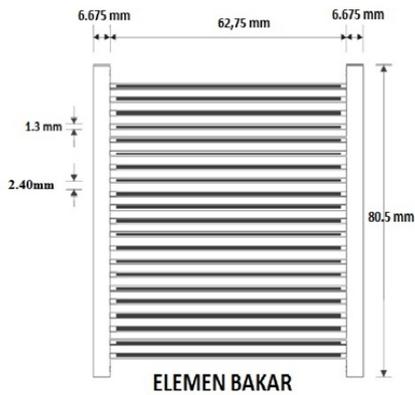
1. Data kanal, jumlah kanal= 20 (21 pelat bahan bakar); tekanan masuk kanal= 1.997 bar dan suhu masuk (0); volume bervariasi 40m³/jam ±10%; arah aliran, 0 artinya air mengalir dari atas ke bawah, arah ke bawah untuk selain 0; jumlah titik analisis= 60 nodes (titik hitung)
2. Daya total (kW) bervariasi dari 500kW sampai 2000kW atau lebih.
3. Data elemen bakar[8], jumlah titik analisis 60 *nodes*; dimensi elemen bakar dan elemen kendali, *casing* panjang=80,50 mm, lebar=76,10 mm; tinggi=868,5 mm; pelat panjang=62,75 mm, lebar=1,30 mm, tinggi=600 mm, lebar celah antar pelat=2,55 mm . Sedangkan keluaran yang diperoleh adalah [1],[4]:

1. Kecepatan aliran pendingin v (cm/s)
2. Tekanan pendingin (P) (Bar)
3. Temperature pendingin (Tf) (°C)
4. Temperature pelat (Tp) (°C)
5. Distribusi fluks panas sebelum pendidihan dan pada saat terjadi pendidihan Q (W/cm^2)

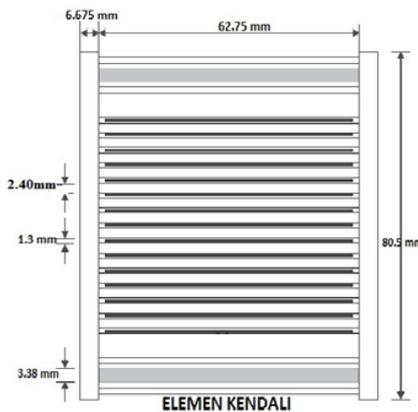


Gambar 3. Konfigurasi 2 elemen kendali pada posisi B2, B4, D2,D4,

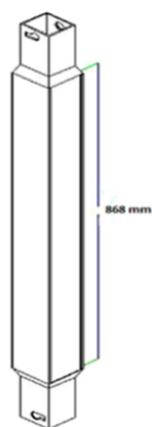
Bila dilihat satu bundel bahan bakar, dan bila kita ambil penampang melintang maka didapat gambaran bentuk fisiknya seperti Gambar 4 dan 5. Namun bila dilihat penampang melintang satu bundel bahan bakar seperti Gambar 6.



Gambar 4. Elemen bakar



Gambar 5. Elemen kendali

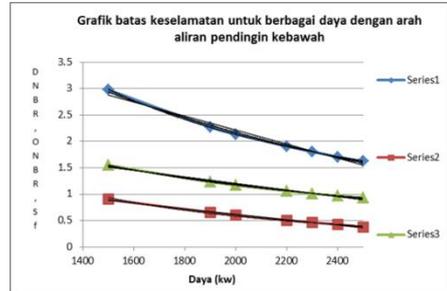


Gambar 6. Bentuk fisik assembly

Dimensi elemen bakar dan elemen kendali:
Casing, panjang=80,50 mm; lebar=76,10 mm; tinggi=868,5 mm; pelat, panjang=62,75 mm; lebar=1,30 mm; tinggi=600 mm; lebar celah antar pelat=2,55 mm; tebal penyerap=3,38 mm.
Spesifikasi material: Casing dan pelat AlMg₂ bahan bakar U₃Si₂-Al pengayaan 19,7% bahan penyerap Ag-In-Cd bahan kelongsong penyerap stainless steel.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan batas batas keselamatan untuk berbagai daya dengan arah aliran ke bawah.



Gambar 7. Grafik batas batas keselamatan untuk berbagai daya dengan arah aliran ke bawah

Batas batas keselamatan suhu inlet 37⁰C arah aliran ke bawah 40m³/jam, untuk berbagai daya operasi

Daya 1500kW:
DNBR=2.978; ONBR=0.901; Sf=1.55

Daya 1900kW:
DNBR=2.27; ONBR=0.653; Sf=1.23

Daya 2000kW:
DNBR=2.137; ONBR=0.6; Sf=1.17

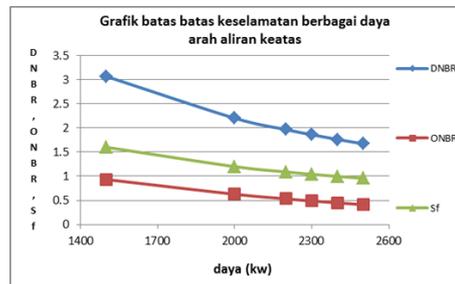
Daya 2200kW:
DNBR=1.907; ONBR=0.505; Sf=1.06

Daya 2300kW:
DNBR=1.803; ONBR=0.463; Sf=1.01

Daya 2400kW:
DNBR=1.708; ONBR=0.428; Sf=0.972

Daya 2500kW:
DNBR=1.621; ONBR=0.372; Sf=0.933

Berikut Grafik batas batas keselamatan untuk berbagai daya dengan arah aliran ke atas,



Gambar 8. Grafik batas batas keselamatan untuk berbagai daya dengan arah aliran ke atas.

Kondisi batas keselamatan bila laju alir arah ke atas adalah sebagai berikut:

Daya 1500kW:
DNBR= 3.067; ONBR= 0.932; Sf= 1.60

Daya 2000kW:

DNBR= 2.202; ONBR= 0.628; Sf= 1.2
 Daya 2200kW:
 DNBR=1.966; ONBR= 0.532; Sf= 1.09
 Daya 2300kW:
 DNBR=1.860; ONBR= 0.489 ;Sf= 1.04
 Daya 2400kW:
 DNBR= 1.762; ONBR= 0.449; Sf= 0.998
 Daya 2500kW:
 DNBR= 1.672; ONBR= 0.412; Sf= 0.958

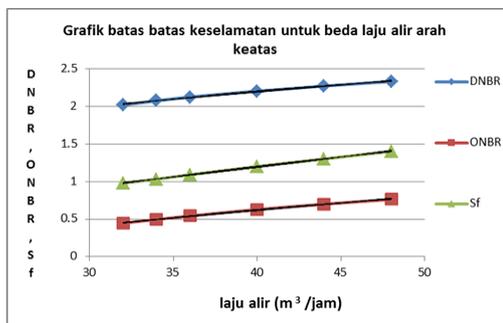
Dari hasil perhitungan harga parameter batas batas keselamatan dari kedua kondisi aliran pendingin arah ke atas dan ke bawah, diambil kesimpulan bahwa:

Untuk arah aliran ke atas maksimum daya yang memenuhi syarat keselamatan adalah daya 2000kW dengan laju alir 40m³/jam arah ke atas dan suhu inlet 37⁰C, karena batas harga ketakstabilan aliran pendingin ke atas pada daya 2000kW sudah mendekati satu, namun sudah sama dengan satu bila daya dinaikkan 200kW, yaitu pada daya 2200kw.

Posisi titik terpanas bahan bakar pelat pada daya 2000kW laju alir 40m³/jam dan suhu inlet 37⁰C adalah: DNBR= 2.202 dinodes 32 kanal 12,13,14; ONBR= 0.628 di nodes 42 kanal 12,13,14 ; Sf= 1.2 dikanal 11,12,13,14,15.

Sedangkan untuk laju alir arah ke bawah disarankan beroperasi pada daya 1900kW, karena batas keselamatan ketakstabilan aliran pendingin sudah mendekati satu, bila dinaikkan menjadi 2000kw, ketakstabilan aliran hampir sama dengan satu. Kondisi bahan bakar pelat yang terpanas dan Daya 1900kW: DNBR=2.27; ONBR= 0.653; Sf= 1.23; Daya 2000kW: DNBR=2.137; ONBR=0.6; Sf=1.17.

Batas batas keselamatan untuk daya operasi 2000kW, suhu inlet 37⁰C pada berbagai laju alir arah ke atas dan ke bawah pada Gambar 9 dan 10.

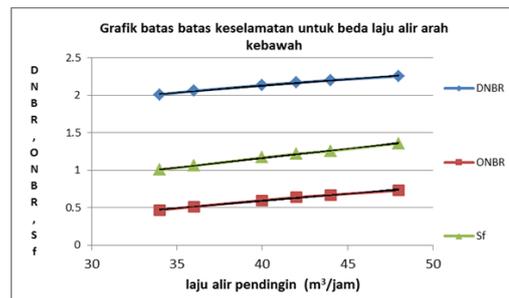


Gambar 9. Grafik batas batas keselamatan dengan beda laju alir arah ke atas.

Batas batas keselamatan suhu inlet 37⁰C arah aliran ke atas untuk berbagai laju alir.
 Laju alir 32m³/jam;

DNBR=2.018; ONBR=0.446; Sf=0.979
 Laju alir 34m³/jam:
 DNBR=2.073; ONBR=0.495; Sf=1.03
 Laju alir 36m³/jam:
 DNBR=2.12; ONBR=0.542; Sf=1.09
 Laju alir 40m³/jam:
 DNBR=2.20; ONBR=0.628; Sf=1.2
 Laju alir 44m³/jam;
 DNBR=2.27; ONBR=0.699; Sf=1.3
 Laju alir 48m³/jam;
 DNBR=2.329; ONBR= 0.762; Sf=1.4

Grafik batas batas keselamatan untuk berbagai laju alir dengan arah aliran ke bawah pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik batas keselamatan untuk beda laju alir arah ke bawah

Laju alir 34m³/jam;
 DNBR=2.01; ONBR=0.47; Sf=1.01
 Laju alir 36 m³/jam:
 DNBR=2.06; ONBR=0.516; Sf=1.06
 Laju alir 40 m³/jam:
 DNBR=2.137; ONBR=0.6; Sf=1.17
 Laju alir 42 m³/jam:
 DNBR=2.171; ONBR=0.64; Sf=1.22
 Laju alir 44 m³/jam:
 DNBR=2.203; ONBR=0.672; Sf=1.26
 Laju alir 48m³/jam:
 DNBR= 2.258; ONBR=0.732; Sf=1.36

Dari hasil perhitungan terlihat bahwa pada daya 2000kW laju alir pendingin 40m³/jam arah ke atas didapat harga parameter ketakstabilan aliran 1,20 dan untuk laju alir pendingin 36m³/jam arah ke atas didapat harga parameter ketakstabilan aliran sebesar 1,09. Laju alir 36m³/jam sebaiknya tidak digunakan karena dikhawatirkan sudah mendekati turbulensi aliran pendingin. Maka disimpulkan bahwa batas akhir operasi reaktor untuk laju alir arah ke atas adalah 40m³/jam. Sebagai syaran yang terbaik laju alir yang digunakan adalah 44m³/jam.

Sedangkan untuk daya 2000kW laju alir 40m³/jam ke bawah, didapat perhitungan batas keselamatan ketakstabilan aliran pendingin sebesar 1,17 dan pada laju alir 42m³/jam harga

ketakstabilan aliran pendingin sebesar 1,22. Maka yang dipilih adalah laju alir $42\text{m}^3/\text{jam}$. Apabila terjadi penurunan laju alir, maka pada batas penurunan $40\text{m}^3/\text{jam}$, operasi reaktor masih aman. Apabila dipilih laju alir $40\text{m}^3/\text{jam}$, dan terjadi penurunan laju alir sampai 10% yaitu $36\text{m}^3/\text{jam}$, maka di khawatirkan aliran pendingin sudah mendekati turbulensi dengan harga parameter ketakstabilan aliran sebesar 1.06.

4. KESIMPULAN.

Dari pembahasan hasil perhitungan diatas didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Untuk perubahan daya operasi, pada daya operasi 2000kW aliran pendingin $40\text{m}^3/\text{jam}$ arah aliran ke atas didapat harga parameter ketakstabilan sebesar 1,2 dan pada daya operasi 2200kW laju aliran pendingin $40\text{m}^3/\text{jam}$ arah aliran ke atas didapat harga parameter ketakstabilan sebesar 1,09. Maka sebaiknya dioperasikan pada daya dibawah 2000kW, untuk menghindari terjadi aliran pendingin yang turbulen. Pada daya operasi 2000kW aliran pendingin $40\text{m}^3/\text{jam}$ arah aliran ke bawah didapat harga parameter ketakstabilan sebesar 1,17. Dan pada daya operasi 1900kW laju aliran pendingin $40\text{m}^3/\text{jam}$ arah aliran ke bawah didapat harga parameter ketakstabilan sebesar 1,23. Maka sebaiknya dioperasikan pada daya dibawah 2000kW, untuk menghindari terjadi aliran pendingin yang turbulen.
2. Bila terjadi perubahan aliran pompa pendingin bisa diterima bila penurunannya sebesar 10% dari $40\text{m}^3/\text{jam}$ untuk arah aliran ke atas.
3. Untuk laju alir arah ke bawah yang terbaik daya 2000kW, suhu inlet 37°C adalah $42\text{m}^3/\text{jam}$ dengan parameter ketakstabilan aliran nya sebesar 1,22 dan pada laju alir $40\text{m}^3/\text{jam}$ didapat parameter ketakstabilan aliran nya sebesar 1,17.
4. Syarat untuk daya operasi 2000kW suhu inlet 37°C , laju aliran pendingin ke atas yang terbaik adalah $44\text{m}^3/\text{jam}$, dan untuk laju alir arah ke bawah adalah $42\text{m}^3/\text{jam}$.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kepada:

1. Ir. Henky Pudjo Rahardjo, MSME yang telah memperkenalkan dan menyarankan kepada saya untuk menganalisis proses termohidrolik menggunakan Program Heat-Hyd.
2. Drs. K.Kamajaya.MT dan bapak Drs. Reynaldi Nazar. MT atas diskusi dan segenap

bantuan nya. Juga kepada rekan rekan lain nya yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu disini.

Semoga Allah SWT membalas budi baik bapak dan ibu semua.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. J.P. HOLMAN, Heat Transfer, Sixth edition, Professor of Mechanical Engineering Southern Methodist university, Perpindahan Kalor, Alih Bahasa oleh Ir. E.Jasjfi, M.Sc, Lemigas, Penerbit Erlangga, 1988
2. FRANK KREITH, Principles of Heat Transfer, third edition, University of Colorado, Prinsip-Prinsip Perpindahan Panas, Alih bahasa oleh Arko Priyono M.Sc, Asisten Direktur Pengembangan Teknis P.T. Klasifikasi Indonesia Jakarta, Penerbit Erlangga 1991
3. HENKY POEDJO RAHARDJO, PUTRANTO ILHAM Y, DUDUNG ABDUL RAZAK, B. SOEKODIJAT; Uji Coba Pemanfaatan Program Heat-Hyd untuk Analisis Termohidrolik Teras Reaktor TRIGA Bandung, Prosiding Seminar Perpindahan panas dan masa Pusat antar Universitas Ilmu Teknik, Universitas Gajahmada, Yogyakarta, 18-19 Oktober 1988.
4. MUH. DARWIS ISNAINI, SUKMANTO DIBYO, SUROSO, GENI RINA S, ENDIAH P. HASTUTI, MUH. SUBEKTI, Evaluasi Parameter Desain Termohidrolika Teras dan Subkanal PLTN AP1000 pada Kondisi Tunak, Jurnal. Tek. Reaktor. Nukl. 14 (1)(2012)15-31
5. INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI, Analysis of convection in internal flows web.iitd.ac.in/~pmvs/.../mel242-32
6. SEMBIRING TM., PINEM S., SETIYANTO. Validation of the Monte Carlo Code MVP on the first Criticality of Indonesian Multipurpose Reactor. [http://wwwpub.iaea.org/MTDC/publications/PDF/P1360_ICRR_2007_CD/papers/T.M.%20Sembiring.Juli 2007 Pdf.cited on august 8th,2015](http://wwwpub.iaea.org/MTDC/publications/PDF/P1360_ICRR_2007_CD/papers/T.M.%20Sembiring.Juli%202007.Pdf.cited%20on%20august%208th,2015)
7. PRASETYO BASUKI, PUTRANTO ILHAM YAZID, ZAKI SUUD., Desain Neutronika Elemen Bakar Tipe Pelat Pada Teras Triga 2000 Bandung., Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia Indonesian Journal of Nuclear Science and Technology 15(2)(2014) 69-80
8. MULYA, J., RALDI, AK.NANDY, SDP., ANHAR, RA., CUKUP, M., RISKA K., Perhitungan Fluks Kalor Untuk Kurva Didih Selama Eksperimen Quenching

Menggunakan Silinder Berongga Dipanaskan.
<https://juarsa.files.wordpress.com/2010/08/jurnaltdma-des2010-mulyarev2a.pdf>, diakses 10
November 2015.

9. ARI DARMAWAN PASEK. Materi kuliah MS 3245 perpindahan panas modul 1. Teknik mesin