

ANALISIS TERMOHIDROLIKA SISTEM PENDINGIN BATEREI NUKLIR

Ign. Djoko Irianto, Budi S., Sarwo D. Danupoyo, Ahmad Syaukat, Budi Santoso
Pusat Pengkajian Teknologi Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

ANALISIS TERMOHIDROLIKA SISTEM PENDINGIN BATEREI NUKLIR. Telah dilakukan analisis termohidrolika sistem pendingin baterai nuklir yang menggunakan pipa kalor sebagai sistem pendingin primer untuk memindahkan kalor dari teras ke sistem pendingin sekunder. Makalah ini menganalisis aspek termohidrolika sistem pendingin baterai nuklir dengan membentuk model rancangan pipa kalor sebagai sistem pendingin primer dan analisis keseimbangan energi pada sistem pendingin sekunder dari baterai nuklir yang beroperasi pada daya 2400 kW(t) dengan suhu teras grafit nominal 550 °C. Pipa kalor tipe *wrapped screen wick* dengan fluida kerja potasium pada tabung baja tahan karat dengan panjang 3 m dan diameter 5 cm mempunyai kapasitas aliran kalor aksial maksimum sebesar 102957 W pada suhu operasi 482 °C. Sistem sekunder dengan suhu fluida kerja toluene 370 °C dengan regenerator panas yang mempunyai efisiensi termal 26%. Baterai nuklir dengan kapasitas 2400 kW(t) memerlukan pipa kalor sebanyak 24 buah.

ABSTRACT

THERMAL HYDRAULIC ANALYSIS OF THE NUCLEAR BATTERY COOLANT SYSTEM. Thermal hydraulic analysis has been done for the coolant system of the nuclear battery, which utilizes heat-pipes as the primary coolant system for heat removal from the reactor core to the secondary coolant system. This paper analyzes the thermal hydraulic aspect of the nuclear battery coolant system by constructing the design model for heat-pipe, as the primary coolant system, and analyzing the energy balance on the secondary coolant system. The model refers to the nuclear battery operated at a power of 2400 kW(t) and nominal core graphite temperature of 550 °C. The wrapped screen wick type heat-pipe 3 m length and 5 cm diameter with potassium as working fluid has a maximum axial heat flow of 102957 W at operating temperature 482 °C. Using toluene as working fluid at maximum temperature of 370 °C the secondary coolant system equipped with a regenerator has a thermal efficiency of 26 %. The nuclear battery with capacity of 2400 kW (t) requires 24 heat-pipes.

PENDAHULUAN

Yang dimaksud dengan baterai nuklir adalah suatu reaktor nuklir berdaya kecil yang digunakan baik untuk produksi listrik maupun uap panas. Bahan bakar untuk reaktor ini adalah UO₂ diperkaya dalam bentuk elemen bakar tipe HTGR silindris padat. Moderator untuk fluks neutron dan reflektor reaktor dibentuk dari grafit.

Untuk baterai nuklir dengan kapasitas sekitar 2400 kW termal, pemindahan kalor dari teras reaktor digunakan sistem pendingin primer yang dibentuk dari banyak pipa kalor. Pipa kalor mempunyai dinding yang tipis dan dikonstruksi dari alloy niobium untuk memperkecil kerugian serapan neutron parasit.

Struktur *wick* membujur sepanjang dinding pipa kalor bagian dalam dan akan mendistribusikan fluida kerja cair secara merata di sekeliling permukaan dalam pipa dan memberikan sekat pelindung yang dapat ditembus untuk berinteraksi

dengan inti uap yang bergerak cepat di bagian pusat pipa.

Setiap pipa kalor berisi beberapa ratus gram potasium sebagai fluida kerja. Sebagian besar potasium mengisi *wick* yang membujur sepanjang dinding bagian dalam pipa. Pada suhu operasi rancangan, tekanan uap potasium dalam pipa adalah di bawah satu atmosfer.

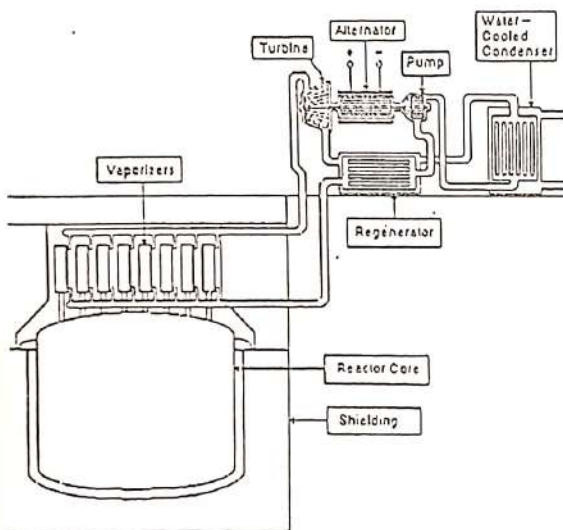
Masing-masing pipa kalor bekerja secara tak bergayut (independen), dan diletakkan dalam sel sebagai pemindah kalor yang pasif dengan proses natural. Energi termal diekstraksi sebagai panas laten dalam teras atau pada bagian evaporator dengan penguapan potasium. Uap panas menembus masuk ke bagian pusat pipa yang disebabkan oleh adanya gradien tekanan, kemudian bergerak menuju kondensator dengan kecepatan tinggi.

Uap potasium melepaskan panasnya melalui proses pengembunan pada bagian atas pipa

(bagian kondensator). Cairan potasium kembali secara gravitasi atau melalui *wick* ke bagian evaporator dan selanjutnya siklus berulang kembali. Bagian evaporator dan kondensator pipa kalor dipisahkan oleh daerah adiabatik.

Pipa kalor memindahkan sejumlah besar energi termal secara isothermal, untuk sejumlah kecil fluida kerja karena mencakup energi perubahan fase antara cairan ke uap. Lagi pula, ketidakadaan pompa aktif akan menaikkan efisiensi secara keseluruhan dengan menghilangkan kerugian daya pompa sistem primer.

Baterai nuklir adalah sumber energi yang efektif untuk pembangkit listrik berskala kecil karena suhu tingginya memberikan efisiensi Carnot yang tinggi sebesar 54%. Untuk menghasilkan listrik dengan cara yang andal dalam jangka waktu yang panjang, baterai disambung dengan sistem pendingin sekunder dan sebagai mesin digunakan siklus Rankine organik toluene, seperti ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Sistem pembangkit listrik baterai nuklir

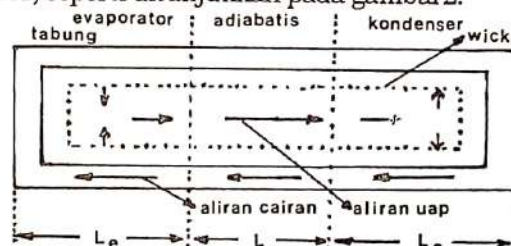
Toluene dipanaskan sampai kira-kira 370 °C dalam koil helikal penguap yang melingkari ujung kondensator dari pipa kalor. Uap toluene super kritis dikumpulkan dari beberapa penguap dan kemudian dilewatkan pada turbin. Ekspansi uap melalui turbin satu tingkat berkecepatan tinggi merubah sejumlah energi termal menjadi gerakan mekanik putar untuk menghidupkan generator listrik AC dan pompa sistem sekunder.

Uap buangan dari turbin dilewatkan melalui regenerator kalor untuk memperbaiki efisiensi konversi siklus. Uap toluene kemudian diembunkan dalam kondensator dan pompa menyedot toluene dari kondensator serta melewatkannya melalui regenerator di mana dilakukan pemanasan awal sampai kira-kira 190 °C. Keluaran dari regenerator kemudian didistribusikan ke penguap pada masing-masing pipa kalor. Efisiensi konversi netto diestimasi sebesar 26% untuk baterai nuklir 2400 kW termal dengan kondensator berpendingin air.

TEORI PENUNJANG

Pipa Kalor

Sistem pipa kalor terdiri dari tabung tertutup yang permukaan bagian dalamnya dilapisi oleh bahan berpori (*wick*), dan di dalam rongga bagian dalam diisi dengan *fluida* kerja. Prinsip kerja pipa kalor ini adalah penyerapan kalor oleh proses penguapan dan pelepasan kalor pada proses pengembunan. Oleh karena itu pipa kalor dapat dibagi menjadi tiga bagian: evaporator, adiabatik dan kondensator, seperti ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram pipa kalor

Cairan menembus material *wick* dengan gaya kapiler, dan ketika kalor ditambahkan pada bagian evaporator, cairan menguap dan bergerak melalui rongga uap menuju ke bagian kondensator, lalu mengembun kembali menyusuri *wick* menuju bagian evaporator sehingga siklus dapat terulang kembali.

Agar pipa kalor dapat beroperasi, gaya hisap kapiler maksimum (the maximum capillary pumping head), harus lebih besar atau sama dengan *pressure drop* total dalam pipa kalor.

Pressure drop dalam pipa kalor terdiri dari tiga bagian:

1. *Pressure drop* yang diperlukan untuk mengembalikan cairan dari kondensator ke evaporator, ΔP_l
2. *Pressure drop* yang diperlukan untuk memindahkan uap dari evaporator ke kondensator, ΔP_v .
3. Beda tekanan yang disebabkan oleh perbedaan elevasi antara evaporator dan kondensator, ΔP_g .

Kondisi untuk kesetimbangan tekanan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$(\Delta P_c)_{\max} \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g \quad (1)$$

Jika kondisi ini tidak terpenuhi maka akan terjadi pengeringan *wick* pada bagian evaporator dan pipa kalor akan berhenti beroperasi.

Besarnya *pressure drop* pada persamaan (1) dapat dihitung dengan menggunakan rumus- rumus empiris berikut:

$$\Delta P_l = \frac{\mu_l L_{eff} m}{\rho_l K_w A_w} \quad (2)$$

dengan:

μ_l = viskositas cairan

m = laju alir masa

ρ_l = rapat masa cairan

A_w = luas tampang lintang *wick*

K_w = faktor *wick* atau permeabilitas *wick*

L_{eff} = panjang efektif antara evaporator dan kondensor

$$L_{eff} = L + \frac{L_e + L_c}{2}$$

dengan:

L_e = panjang daerah evaporator

L_c = panjang daerah kondensor

$$\Delta P_v = f \frac{L_{eff}}{D} \rho (U)^2 = \frac{64 \mu_v m L_{eff}}{\rho_v \pi D^4} \quad (3)$$

D_v adalah diameter *wick* bagian dalam yang mempunyai kontak dengan uap, dan indeks v menunjukkan karakteristik uap. Biasanya *pressure drop* uap lebih kecil dibandingkan *pressure drop* cairan.

Beda tekanan yang disebabkan oleh efek hidrostatik bisa berharga positif, negatif, maupun nol bergantung pada posisi relatif antara evaporator dengan kondensor. Beda tekanan hidrostatik dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$\Delta P_g = \rho_l g L \sin \theta \quad (4)$$

dengan θ adalah sudut antara sumbu pipa kalor dengan horizontal. Sudut ini akan berharga positif apabila evaporator berada di atas kondensor.

Tenaga dorong dalam *wick* ditentukan oleh tegangan permukaan cairan dalam *wick*. Tenaga dorong ini dinyatakan dalam *pressure drop* berikut:

$$\Delta P_c = \frac{2 \sigma_l}{r_c} \cos \Phi \quad (5)$$

Φ = sudut kontak

r_c = jari-jari kapiler *wick*

σ_l = tegangan permukaan cairan

Substitusi persamaan (1) s/d (5) diperoleh persamaan kesetimbangan berikut:

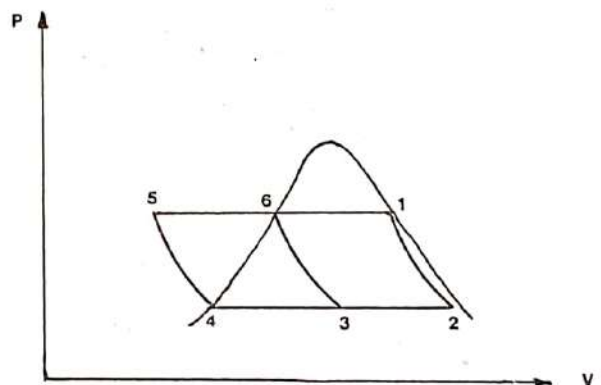
$$\frac{2 \sigma_l \cos \theta}{r_c} = \frac{\mu_l L_{eff} m}{\rho_l K_w A_w} + \frac{64 \mu_v m L_{eff}}{\rho_v \pi D^4} + \rho_l g L_{eff} \sin \theta \quad (6)$$

Karena $(\frac{64 \mu_v}{\rho_v \pi D^4}) \ll (\frac{\mu_l}{\rho_l K_w A_w})$,

maka *pressure drop* uap dapat diabaikan dan laju alir massa dapat dihitung.

Sistem Sekunder

Loop sistem sekunder baterei nuklir yang merupakan mesin siklus Rankine terdiri dari: turbin, regenerator, kondensor, pompa dan vaporizer yang merupakan *interface* antara pipa kalor dan sistem sekunder. Diagram P-V sistem sekunder baterei nuklir ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Diagram P-V siklus Rankine

Keterangan proses

1 → 2 Uap toluene diekspansi secara adiabatik di dalam turbin

2 → 3 Campuran uap toluene dan cairan toluene didinginkan oleh regenerator.

3 → 4 Campuran uap toluene dan cairan toluene yang sudah didinginkan oleh regenerator didinginkan lagi oleh kondensor menjadi cair jenuh.

4 → 5 Cairan toluene dikompresi secara adiabatik di dalam pompa.

5 → 6 Cairan toluene dipanasi oleh regenerator yang memanfaatkan panas uap buangan dari turbin.

6 → 1 Cairan toluene dipanasi oleh pipa kalor sampai menjadi uap jenuh.

Sebagai fluida kerja pada sistem sekunder digunakan zat organik toluene. Toluene dipanaskan dalam vaporizer sampai mencapai uap jenuh. Uap toluene dikumpulkan dari aliran vaporizer paralel dan diumpungkan ke masukan turbin. Ekspansi uap toluene melalui turbin merubah sejumlah energi termal menjadi gerakan mekanik putar untuk menghidupkan generator listrik AC dan pompa sekunder.

Uap buangan dari turbin dilewatkan melalui regenerator untuk memperbaiki efisiensi konversi siklus. Uap toluene kemudian diembunkan di dalam kondensator dan dilewatkan melalui regenerator, untuk melakukan pemanasan awal. Keluaran dari regenerator kemudian didistribusikan kembali ke sistem vaporizer pada pipa kalor.

METODE ANALISIS

Kemampuan pemindahan kalor oleh pipa kalor dianalisis dengan membandingkan kapasitas aliran kalor aksial dari model pipa kalor dengan tiga batasan bagi aliran fluida dalam pipa kalor. Aliran kalor aksial pipa kalor dihitung dengan persamaan:

$$q_{max} = \left(\frac{\rho_l \sigma_l h_{fg}}{\mu_l} \right) \left(\frac{A_w K_w}{L_{eff}} \right) \left(\frac{2}{r_c} - \frac{\rho_l g L_{eff} \sin \theta}{\sigma_l} \right) \quad (7)$$

yang diturunkan dari persamaan (6) dengan substitusi $q = m \cdot h_{fg}$. Batasan operasi tersebut adalah: batasan sonik, batasan entrainment, batasan pendidihan.

Batasan Sonik

Batasan ini disebabkan oleh aliran uap yang terhambat setelah laju aliran uap mendekati kecepatan sonik pada media tersebut. Batasan sonik sering terjadi pada pipa kalor yang menggunakan fluida logam-cair yang beroperasi pada tekanan uap rendah, (pada awal operasi), yaitu pada keadaan dimana rapat uap rendah dan kecepatan keluar uap sangat tinggi.

Besarnya aliran kalor maksimum yang dicapai akibat batasan sonik ini dapat dinyatakan dengan rumusan sebagai berikut :

$$q_s = A_v \rho_v \lambda \left(\frac{\gamma_v R_v T_v}{2(\gamma_v + 1)} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Batasan Entrainment

Batasan entrainment diakibatkan oleh adanya interaksi antara aliran uap dan cair yang mempunyai arah berlawanan. Bila kecepatan relatif antara uap dan cair cukup besar, interaksi antara keduanya menjadi tidak stabil sehingga bintik-bintik cairan akan terbawa oleh uap. Pada kasus ini sebagian cairan dalam *wick* tidak dapat mencapai evaporator sehingga menurunkan laju aliran kalor aksial maksimum. Dengan batasan ini kalor maksimum yang dapat dicapai sebagai berikut :

$$q_c = A_v \lambda \left(\frac{\sigma \rho_v}{2 r_{h,s}} \right)^{1/2} \quad (9)$$

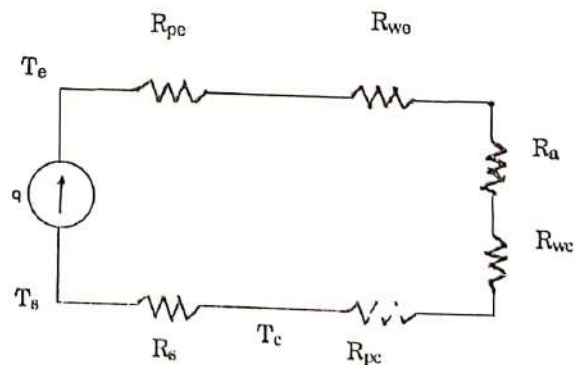
Batasan Pendidihan

Batasan pendidihan adalah batasan yang disebabkan oleh adanya pemanasan lebih pada dinding evaporator, pada keadaan ini *wick* menjadi kering dan terjadi kondisi *burnout*. Dengan batasan ini besarnya aliran kalor maksimum yang dapat dicapai sebagai berikut :

$$q_b = \frac{2 \pi L_c k_c T_v}{\lambda \rho_v \ln(r_i/r_v)} \left(\frac{2\sigma}{r_{ii}} - P_{cm} \right) \quad (10)$$

Iterasi perhitungan dilaksanakan dengan cara melakukan optimasi struktur *wick* dari pipa kalor sehingga didapat aliran kalor aksial maksimum yang lebih kecil dibanding ketiga batasan tersebut.

Setelah kapasitas alir panas dari pipa kalor ditentukan, dilakukan penentuan harga suhu pada bagian-bagian pipa kalor yaitu suhu pada permukaan evaporator dan suhu pada permukaan bagian kondensator. Perhitungan untuk ini didasarkan pada analogi elektrotermal seperti ditunjukkan oleh gambar berikut:



R_{pe} adalah resistansi dinding pipa pada evaporator,

$$R_{pe} = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi L_c k_m} \quad (^\circ C/W) \quad (11)$$

R_{we} adalah resistansi *wick* pipa pada evaporator

$$R_{we} = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi L_e k_e} \text{ (}^\circ\text{C/W)} \quad (12)$$

R_a adalah resistansi bagian adiabatik pada pipa

$$R_a = \frac{T_v(P_{ve} - P_{vc})}{\rho_v \lambda J q} \text{ (}^\circ\text{C/W)} \quad (13)$$

R_{wc} adalah resistansi *wick* pipa pada evaporator

$$R_{wc} = \frac{\ln(d_i/d_v)}{2\pi L_c k_e} \text{ (}^\circ\text{C/W)} \quad (14)$$

R_{pc} adalah resistansi dinding pipa pada evaporator

$$R_{pc} = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi L_e k_m} \text{ (}^\circ\text{C/W)} \quad (15)$$

R_s adalah resistansi bagian kondensor dan lingkungan

$$R_s = \frac{1}{h_i S_i} \text{ (}^\circ\text{C/W)} \quad (16)$$

Perbedaan temperatur antara bagian evaporator dan bagian kondensor sebagai berikut :

$$\Delta T = q R_{total}$$

$$\Delta T = q (R_{pe} + R_{we} + R_{wc} + R_{pc} + R_s) \quad (17)$$

Daya keluaran baterai nuklir dihitung dengan menggunakan azas keseimbangan energi untuk sistem pendingin sekunder dari baterai nuklir. Model siklus termodinamika Rankine dibentuk dengan memasukkan harga suhu maksimum yang dapat diberikan oleh perpindahan panas dari sistem pendingin primer/ pipa kalor ke sistem pendingin sekunder. Untuk meningkatkan efisiensi siklus proses pemanasan kembali dibentuk dengan pemakaian alat regenerator. Efisiensi siklus Rankine untuk baterai nuklir dihitung dari formula sebagai :

$$\eta = \left\{ 1 - \frac{h_2 - h_4}{h_1 - h_6} \right\} + \left\{ \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_6} \right\} \quad (18)$$

Suku terakhir menunjukkan adanya faktor penambahan efisiensi dengan pemakaian regenerator panas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pedoman dasar perancangan suatu pipa kalor adalah pemilihan fluida kerja, penentuan struktur *wick* dan jenis pipa. Secara umum fluida kerja harus mempunyai sifat-sifat sebagai berikut: panas laten penguapan tinggi, konduktivitas panas cairan tinggi, viskositas cairan dan uap rendah, mempunyai harga tegangan permukaan yang

tinggi dan temperatur operasinya sesuai dengan temperatur operasi rancangan.

Pemilihan struktur *wick* terutama bergantung pada kemampuan *wick* memberikan tekanan pemompaan kapiler untuk menggerakkan fluida kerja dari kondensor ke evaporator. Pemilihan material pipa pada umumnya bergantung pada kriteria sebagai berikut : perbandingan strengt terhadap berat tinggi, konduktivitas panas tinggi, tidak permeable (impermeability), *good wettability*, dan yang terpenting dari keseluruhan kriteria adalah kecocokannya (compatibility) terhadap fluida kerja, struktur *wick* dan material sekelilingnya.

Dengan pertimbangan tersebut di atas maka dapat dipilih fluida kerja dari jenis logam cair, yaitu potasium.

Optimasi struktur *wick* dilakukan dengan mengambil varian jumlah mesh dalam *wick* dan jumlah lapisan *wick* untuk ketebalan *screen* dan tabung tertentu. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa jumlah optimum adalah 50 mesh/ inch. Dengan varian jumlah lapisan *screen* dan semua besaran tetap diperoleh harga Q sebesar 102957 W untuk setiap pipa kalor. Hasil perhitungan dengan varian jumlah lapisan *screen* ditunjukkan dalam tabel 1.

Tabel 1. Aliran kalor aksial pada batasan- batasan sonik, *entrainment*, kapiler, pendidihan. Sebagai fungsi lapisan *screen*.

Jumlah lapisan	Q_s max (W)	Q_e max (W)	Q_c max (W)	Q_b max (W)
375	135958	109385	91983,2	162060
400	132272	106419	97508	150924
425	128636	103494	102957	141094
450	125051	100610	108330	132351
475	121517	97766,6	113627	124525
500	118034	94963,9	118848	117477

Dari hasil perhitungan/ optimasi struktur *wick* diperoleh harga Q_{max} terbesar untuk jumlah mesh 50/ inch dan jumlah lapisan sebanyak 425. Untuk struktur *wick* yang sama diperoleh harga kalor aksial untuk batasan sonik, *entrainment*, *boiling* masing-masing sebesar 128636 W, 103494 W, 141094 W.

Perbedaan suhu antara dinding evaporator dan kondensor dihitung dengan analogi elektrotermal sebesar 180 °C.

Efisiensi siklus Rankine dihitung dengan metode penyusutan entalpi diperoleh harga sebesar 8 % tanpa regenerator dan 26% dengan regenerator.

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan/ analisis dapat disimpulkan bahwa pipa kalor dapat digunakan untuk sistem pendingin primer baterei nuklir. Pipa kalor tipe *wrapped screen wick* dengan diameter 5 cm dan panjang 3 m dengan fluida kerja potasium dapat memindahkan kalor maksimum sebesar

102957 W. Untuk sistem baterei nuklir dengan kapasitas 2400 kW (t) diperlukan pipa kalor sebanyak 24 buah. Sistem pendingin sekunder dengan menerapkan regenerasi panas dapat memperbaiki efisiensi menjadi 26%.

PUSTAKA

1. K.S. KOZIER and H.E. ROSINGER (1988), *The battery: A Solid-State, Passively Cooled Reactor For The Generation of Electricity and/or High-Grade Steam Heat*, Atomic Energy of Canada Limited, Whiteshell Nuclear Research Establishment, Pinawa, Manitoba ROE1LO.
2. JOEL WEISMAN, *Elements of Nuclear Reactor Design*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1977. halaman 5.
3. SJOERD VAN STRALEN, ROBERT COLE, *Boiling Phenomena*, Mc Graw. Hill, 1979, vol. 2. chapter 28.
4. W.M. ROHSENOW, J.P. HARTNETT, E.N. GANIC, *Handbook of Heat Transfer Applications*, Mc Graw Hill, 1985, 2nd edition.
5. ALLAN D. KRAUS and AVRAM BAR-COHEN, *Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment*, Mc. Graw Hill Book Company, 1983.
6. FRANK KREITH and MARK S. BOHN, *Principles of Heat Transfer*, Harper & Row, Publishers, New York, 1986, 4th edition.
7. O.E. DWYER, *Boiling Liquid-Metal Heat Transfer*, American Nuclear Society, Illinois, 1976.
8. ROBERT C. WEAST, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press. Inc., Florida, 1984.