

EFEK PERUBAHAN SUDUT KEMIRINGAN TERHADAP PERPINDAHAN KALOR DAN LAJU ALIRAN AIR PADA UNTAI SIRKULASI ALAMIAH

Yogi Sirodz Gaos, Mulya Juarsa, Edi Marzuki, Januar Akbar
Engineering and Devices for Energy Conversion (EDfEC) Research Group
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Ibn Khaldun Bogor
yogisirodz@gmail.com

Diterima editor 11 Oktober 2011

Disetujui untuk publikasi 23 November 2011

ABSTRAK

EFEK PERUBAHAN SUDUT KEMIRINGAN TERHADAP PERPINDAHAN KALOR DAN LAJU ALIRAN AIR PADA UNTAI SIRKULASI ALAMIAH. Pelajaran dari kasus kecelakaan PLTN Fukushima menunjukkan gagalnya sistem aktif, sehingga pengoptimalisasian sistem pasif menjadi suatu keharusan. Sistem pasif menerapkan hukum alamiah, dalam hal ini fenomena sirkulasi alamiah. Efisiensi sirkulasi alamiah dilakukan dengan mengidentifikasi nilai rugi kalor menggunakan Untai Simulasi Sirkulasi Alamiah (USSA-FT02). Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh nilai perpindahan kalor oleh air terhadap nilai rugi kalor yang terjadi pada sistem aliran tertutup dengan adanya distribusi kalor pada fluida kerja (air). Komponen USSA FT-02 terdiri atas pipa SS316 berdiameter 1 inci, *pre-heater*, *heater* dan *cooler*. Variasi eksperimen adalah beda ketinggian antara sisi panas dan sisi dingin dengan mengubah sudut kemiringan *loop*, yaitu pada sudut 0°, 45° dan 90°. Temperatur *outlet heater* dan temperatur *inlet cooler* digunakan sebagai parameter yang diukur dan direkam dengan rentang waktu eksperimen selama 45 menit. Hasil eksperimen dan analisis berdasarkan perbedaan sudut kemiringan 0°, 45° dan 90° secara berturut-turut untuk laju aliran massa air meningkat, diperoleh rugi kalor tertinggi sepanjang pipa dari *outlet heater* ke *inlet cooler* menurun dari 12,3 W hingga 3,4 W seiring kenaikan sudut kemiringan. Kemudian persentase perpindahan kalor rata-rata yang diterima air pada bagian *heater* berdasarkan kenaikan sudut kemiringan secara berturut-turut meningkat dari 49,3%, 52,5% dan 55,7%.

Kata kunci: sirkulasi alamiah, sudut, perpindahan kalor, rugi, aliran, pasif.

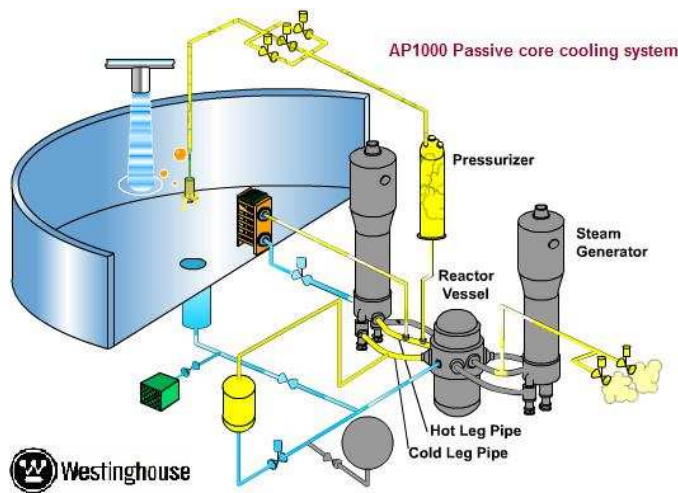
ABSTRACT

THE EFFECT OF ANGLES CHANGES ON HEAT TRANSFER AND WATER FLOW RATE IN NATURAL CIRCULATION LOOP. Lessons learned from Fukushima Daiichi nuclear power plant accident was demonstrated the failure of active systems, thus optimizing the passive system become important parameter for cooling process. Passive system which is applying the law of nature called natural circulation phenomena. Efficiency of natural circulation is done by identifying heat loss values using Natural Circulation Simulation Loop (USSA-FT02). Analysis were conducted to determine the effect of the transfer of heat by water to the heat loss that occurs in a closed flow system in the presence of heat distribution on the working fluid (water). Main components of USSA-FT02 consisting of SS316 pipe with diameter 1-inch, *pre-heater*, *heater*, and *cooler*. Experimental variation is the height difference between the hot side and cold side to change the angle of the loop, i.e. at an angle 0°, 45° and 90°. Outlet temperature of the heater and cooler inlet temperature is used as a parameter to be measured and recorded with the experimental period for 45 minutes. Experimental results and analysis based on differences in the angle of 0°, 45° and 90° respectively for the water mass flow rate increases, the highest heat loss along the outlet pipe from the heater to the cooler inlet decreased from 12.3 W to 3.4 W as the angle increases. Then the percentage of the average heat transfer received water heater based on the tilt angle increases successively increased from 49.3%, 52.5% and 55.7%.

Keywords: natural circulation, angle, heat transfer, loss, flow, passive

PENDAHULUAN

Kecelakaan reaktor nuklir PLTN tipe BWR Fukushima Dai-ichi[1] pada Maret 2011 telah menyebabkan kerusakan pada tiga unit PLTN dan melelehkan teras reaktornya. Pemicu dasar kejadian ini adalah tsunami yang disebabkan oleh gempa raksasa 9,0 skala Richter, sementara PLTN didesain untuk gempa pada 8,2 skala Richter. Air bah akibat tsunami telah masuk ke dalam komplek reaktor dan merusak sistem pembangkit darurat (*emergency genset*), dimana sistem ini masih menggunakan pompa (sistem aktif) yang sumbernya dari genset ketika stasiun *black out* sebagai konsekuensi dari *shutdown*. Peristiwa ini dapat disimpulkan bahwa terjadi kegagalan manajemen termal, dimana panas berlebih sebagai produksi dari panas meluruh pada saat reaktor padam (*decay heat*) ternyata tidak mampu didinginkan sesuai dengan skenario yang ditentukan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peranan sistem pasif (tanpa pompa) menjadi sangat penting, mengingat peristiwa di Fukushima adalah konsekuensi kegagalan sistem aktif. Sehingga pemahaman terhadap sistem pasif, melalui kegiatan riset eksperimental dengan menginvestigasi fenomena sirkulasi alamiah (efek *thermosyphon*) menjadi kegiatan yang penting dilakukan. Konsep sistem pasif telah diterapkan pada jenis reaktor baru, yaitu AP1000 (Advanced PWR 1000) untuk sistem pendinginan teras maupun pada sungkupnya ketika terjadi kecelakaan[2]. Sistem pasif untuk pendingin teras pada reaktor AP1000 ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem pasif pada pendingin teras AP1000[2]

Beberapa penelitian terkait fenomena sirkulasi alamiah seperti yang dilakukan oleh Welander[3] telah mempertimbangkan aspek penggerak (*driven*) dalam aliran yang timbul karena gaya apung (*buoyancy force*), perbedaan tekanan dan hambatan oleh gaya gesek pada pipa. Kasus fluida laminar pada fasa tunggal oleh Dobson[4], menjelaskan skema formulasi yang sederhana yang mampu menangkap perilaku *non-linear* dan transien pada *loop*. Instabilitas aliran yang muncul belum dapat dijelaskan. Penelitian lainnya seperti yang dilakukan oleh K.Chen[5] dan P.K. Vijayan[6-7], menjelaskan instabilitas osilasi aliran dan stabilitas yang muncul pada *loop* yang dilakukan melalui eksperimen dan simulasi komputer, meskipun kondisi batasnya belum didefinisikan secara baik. Kemudian, *review* terhadap aliran *thermosyphon* pada geometri umum dan aplikasinya telah dilakukan oleh Grief [8], P.K. Vijayan et al.[7], and Zvirin[9], dimana untuk kasus untai rektanguler terbuka dan

tertutup telah menekankan pada aliran stedi dan aliran transien seperti halnya analisis stabilitas sistem berdasarkan variasi kondisi pemanasan dan pendinginan. Sedangkan, perbedaan kondisi batas termal, seperti perubahan sudut kemiringan untai telah dipertimbangkan oleh Misale [10] dan konduksi termal pipa juga dipertimbangkan oleh Jiang [11-14]. Pentingnya memahami watak aliran selama terjadinya aliran sirkulasi alamiah perlu dilakukan dengan menentukan kecepatan aliran dan identifikasi rejim aliran berdasarkan perhitungan bilangan Reynoldnya.

Sirkulasi alamiah tertutup dapat mentransfer kalor yang lebih besar tanpa ada bagian yang bergerak seperti pompa dan aktif kontrol. Beberapa peneliti seperti Vijayan dan Nayak telah mempelajari keuntungan dan tantangan dari sirkulasi alamiah menggunakan untai atau loop terbuka[7]. Misale dan kawan-kawan juga telah mempelajari sirkulasi alamiah satu fasa menggunakan untai kecil. Fasilitas Untai Simulasi Sirkulasi Alamiah (USSA-FT02) dibuat untuk mempelajari fenomena laju aliran sirkulasi yang terjadi tanpa kerja pompa, dimana aliran terjadi karena adanya pemanasan oleh *heater* ke air, dan pendinginan oleh *cooler*[15]. Pada sistem perpipaan tertutup kalor dari *heater* berpindah ke pipa dan terdistribusi ke seluruh permukaan pipa, proses distribusi tersebut akan mengakibatkan sejumlah kalor yang terlepas ke sekitar pipa dan juga menunjukkan pemindahan kalor (*heat transport*). Fenomena tersebut disebut dengan rugi kalor (*heat loss*) dimana pada proses distribusi, kalor pada pipa berpindah ke lingkungan sekitar yang bertemperatur lebih rendah dari temperatur pipa. Makalah ini membahas perpindahan kalor dari *heater* ke dalam air, rugi kalor dari titik *outlet heater* ke *cooler* dan pemindahan kalornya. Variasi sudut yang ditentukan adalah sudut kemiringan 0° , 45° , 90° , serta panjang *loop* 4,8 m dengan diameter *loop* 1 inci. Pengaruh perubahan sudut kemiringan, dalam hal ini semakin jauh jarak antara *heater* dan *cooler* akan menyebabkan perubahan pada perpindahan kalor dan laju aliran air di dalam loop.

METODE EKSPERIMEN

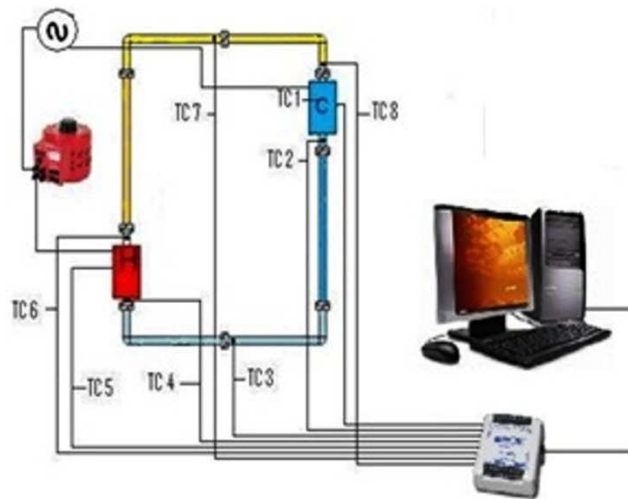
Fasilitas Eksperimen

Fasilitas eksperimen Untai Simulasi Sirkulasi Alamiah (USSA-FT02) yang ada di laboratorium enjiniring dan alat untuk konversi energi (*EDfEC, Engineering and Device for Energy Conversion*) di FT UIKA merupakan pengembangan dari Untai Simulasi Sirkulasi Alamiah (USSA-FT01) yang terdiri atas rangkaian *tube SS-304 1 inch (2,54 cm)*, *slide regulator voltage*, *pressure gauge*, *heater*, *pre-heater*, *cooler*, dan tangki ekspansi. Gambar 2 menunjukkan bagian lengkap fasilitas eksperimen. Perbedaan ketinggian (*H*) diperoleh dengan rumus:

$$H(\alpha) = L \sin \alpha \quad (1)$$

dengan *L* (m) adalah jarak pada pipa antara titik tengah heater dan cooler, α adalah sudut kemiringan untai.

Tegangan masuk untuk *heater* divariasikan dengan menggunakan *slide regulator voltage* dan kemudian mengukur arus masuk menggunakan tang amper. Pengukuran data temperatur menggunakan termokopel tipe K dengan kesalahan maksimal 3%, kemudian data pengukuran direkam melalui sistem akuisisi data (DAS) WinDAQ T1000 dengan *sampling rate* 1 data per detik pada 8 kanal (dalam makalah ini hanya ditampilkan untuk TC6 (*outlet heater*) dan TC8 (*inlet cooler*)). Gambar fasilitas eksperimen USSA-FT02, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Fasilitas eksperimen USSA-FT02

Prosedur Eksperimen

Eksperimen sebelumnya dilakukan pengisian untai dengan air melalui katup *inlet* sampai tekanan hidrostatik 1 bar *gauge* (untuk mengecek kebocoran). Setelah tidak terjadi kebocoran, eksperimen sudah bisa dilakukan. Setelah air terisi pada untai, *setting* terhadap sistem instrumentasi dilakukan. Kemudian posisi untai dirubah berdasarkan sudut kemiringan yang ditentukan, dalam hal ini, 0°, 45° dan 90°. Langkah pertama menghidupkan *cooler* sampai temperatur konstan -10°C. Kemudian *heater* dinaikan secara berkala sebesar 20 volt setiap 5 menit sampai 180 volt atau sampai 1000 W selama 45 menit. Saat *heater* dihidupkan, DAS sudah mulai merekam data. Eksperimen dilakukan untuk setiap perubahan sudut kemiringan untai.

Perhitungan

Hasil pengamatan temperatur pada *outlet heater* dan *inlet cooler* dikonversikan menjadi densitas air untuk memperoleh perbedaan densitas air, sehingga dapat digunakan untuk memperoleh laju aliran masa air pada *outlet heater* sampai *inlet cooler* USSA-FT02, menggunakan korelasi (1)[8-9].

$$\dot{m}^2 = \frac{2gH\rho_a(\rho_c - \rho_h)}{R} \quad (2)$$

Hasil perkalian antara debit air dengan densitas air adalah laju aliran masa air, seperti korelasi,

$$\dot{m} = Q\rho_a = Av\rho_a \quad (3)$$

Kemudian, setelah laju aliran masa air pada untai diketahui kemudian dilanjutkan dengan penentuan nilai pemindahan kalor oleh air berdasarkan persamaan,

$$q = \dot{m}c_p\Delta T = \dot{m}c_p(T_{h-out} - T_{c-in}) \quad (4)$$

Hasil pengukuran temperatur pada *outlet heater* dan *inlet cooler* digunakan untuk memperoleh nilai perpindahan kalor menyeluruh menggunakan persamaan,

$$q = UA\Delta T_m = UA(\bar{T}_{air} - T_{ling}) \quad (5)$$

dengan U merupakan perpindahan kalor pada pipa dan ΔT_m adalah perbedaan temperatur logaritmik.

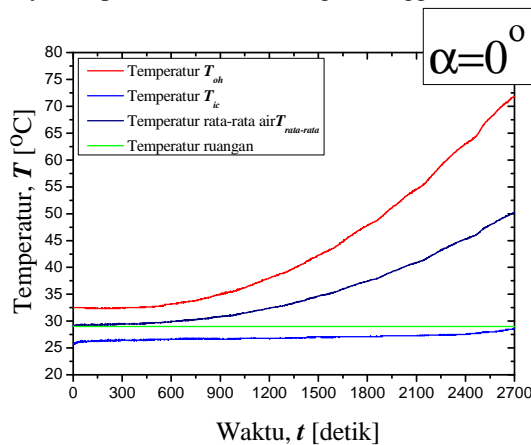
Kemudian untuk memperoleh perpindahan kalor total dari *heater* ke air ditunjukkan oleh persamaan,

$$q_{total} = \frac{(T_{s1} - T_i)}{\frac{\ln(r_1 / r_2)}{2\pi kl} + \frac{1}{h_{air} \cdot A}} \quad (6)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

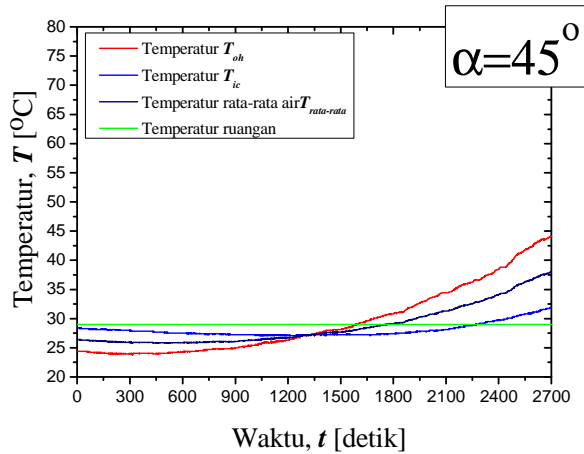
Hasil Pengukuran Temperatur

Pengukuran temperatur pada dasarnya dilakukan pada 8 titik pengukuran, dalam pembahasan ini hanya pada 2 titik pengukuran temperatur yang digunakan untuk perhitungan laju perpindahan kalor. Gambar 3, 4 dan 5 menampilkan hasil pengukuran T_{oh} dan T_{ic} serta selisihnya berdasarkan variasi sudut kemiringan untai secara berturut-turut dari 0° , 45° dan 90° . Gambar 3 menunjukkan kasus kemiringan untai 0° , kestabilan temperatur terjadi hanya sampai sekitar 600 detik awal. Peningkatan drastis pada detik 600 sampai 2700 detik hingga mencapai temperatur akhir 71°C . Sedangkan Gambar 4 menunjukkan pada posisi 45° profil temperatur sama seperti pada kasus 90° , bahkan lebih tajam dari sebelumnya. Kenaikan secara perlahan dari 0 detik sampai 1350 detik dari temperatur 24°C sampai 27°C , berikutnya sampai 2700 detik meningkat hingga 44°C .

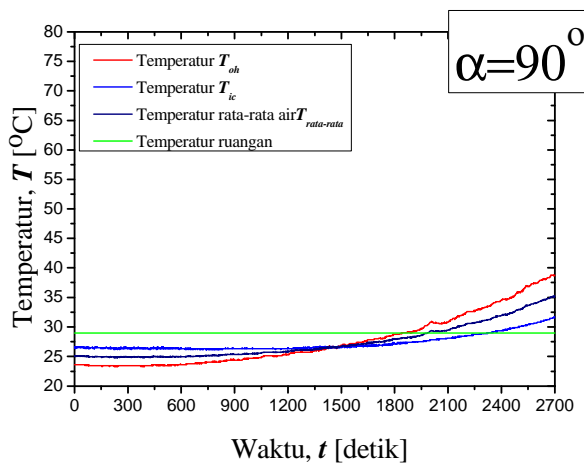


Gambar 3. Temperatur air outlet heater dan inlet cooler untuk sudut kemiringan 0°

Gambar 5 untuk sudut kemiringan 90° kenaikan temperatur air pada outlet heater naik secara perlahan mulai dari 0 detik hingga sekitar 1350 detik temperatur air yang semula 23°C naik sampai 26°C . Kenaikan temperatur air secara perlahan karena pengaruh cooler yang mampu menyerap kalor yang diberikan heater. Kemudian temperatur mulai naik cukup tajam dari 1350 detik hingga 2700 detik, kecenderungan kenaikan temperatur air yang tajam pada outlet heater karena cooler tidak mampu menyerap kalor yang diberikan heater.



Gambar 4. Temperatur air outlet heater dan inlet cooler untuk sudut kemiringan 45°



Gambar 5. Temperatur pada outlet heater dan inlet cooler untuk sudut kemiringan 90°

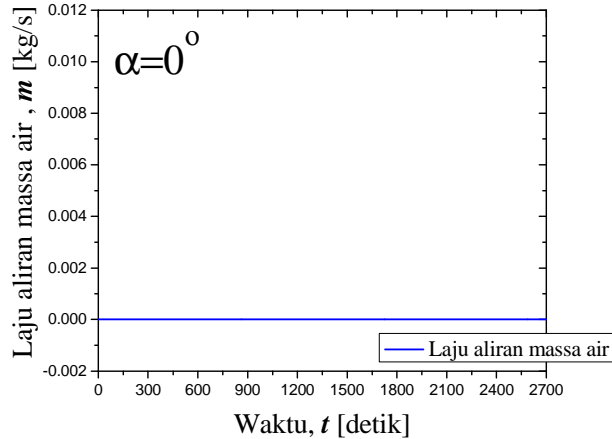
Perbedaan gradien kenaikan temperatur dapat disimpulkan mengalami perubahan berdasarkan perubahan sudut kemiringan untai. Gradien kenaikan temperatur menurun untuk kenaikan sudut kemiringan yang lebih besar.

PEMBAHASAN

Laju Aliran Massa Air

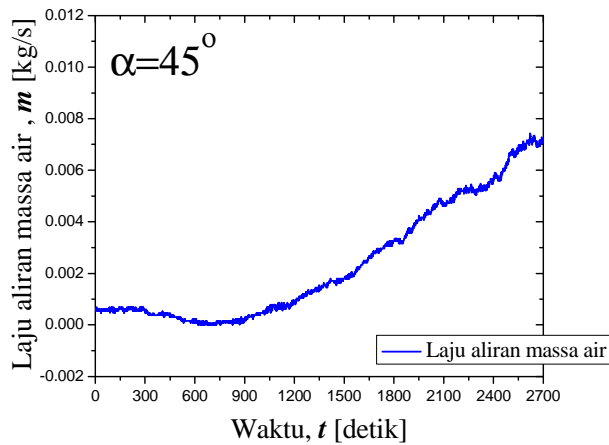
Perhitungan laju aliran massa air menggunakan persamaan (2), dimana variable kerapatan air diperoleh berdasarkan table properties air yang mengikuti data perubahan temperatur seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3, 4 dan 5. Kemudian perubahan ketinggian, H diperoleh berdasarkan persamaan (1) dengan memasukkan perubahan

kemiringan sudut, dari 0° , 45° dan 90° . Setelah menghitung dahulu resistensi hidrodinamika (R), hasil perhitungan disajikan pada Gambar 6, 7 dan 8 untuk setiap sudut kemiringan.

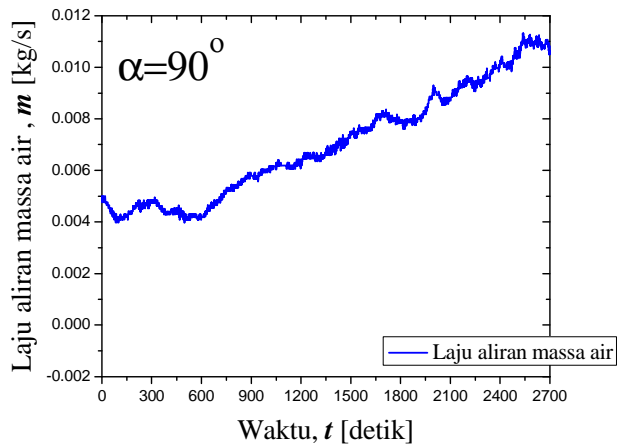


Gambar 6. Laju aliran massa air terhadap waktu untuk sudut kemiringan 0°

Gambar 6 memperlihatkan tidak adanya laju aliran masa pada untai. Mekanisme yang dapat dijelaskan dalam kasus ini adalah, pada sudut kemiringan 0° , efek dari gaya apung pada beda ketinggian $H=0$ meter menyebabkan gerakan molekul air mengisi kembali bagian yang kurang rapat tidak terjadi.



Gambar 7. Laju aliran masa air terhadap waku untuk sudut kemiringan 45°



Gambar 8. Laju aliran massa air terhadap waktu untuk sudut kemiringan 90°

Gambar 7 dan Gambar 8 memiliki profil perubahan laju aliran masa air yang sesuai dengan perubahan temperatur pada *heater*. Stabilitas aliran pada kedua kasus tidak tercapai, hal ini sangat sesuai dengan perubahan temperatur seperti pada Gambar 4 dan Gambar 5. Dalam kondisi ini, pengaruh perubahan temperatur pada untai akan berpengaruh pula pada perubahan laju aliran massa. Keadaan ini telah diungkapkan oleh Misale[6] dan D'Auria[7], bahwa perubahan perbedaan temperatur akan berpengaruh pada perubahan aliran.

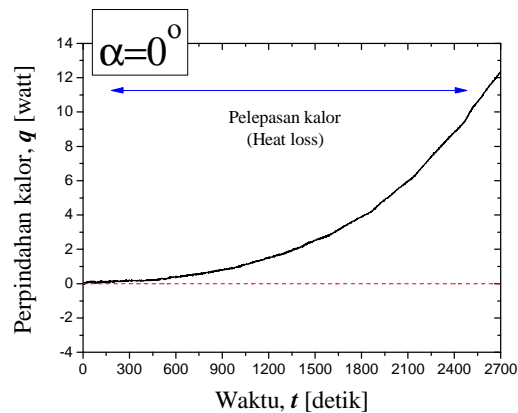
Kemudian jika sudut 0° dibandingkan dengan sudut kemiringan 45° dan 90° , efek gaya apung akan semakin membesar sesuai dengan perubahan perbedaan ketinggian, yaitu 0,389 m dan 0,550 m.

Rugi Kalor

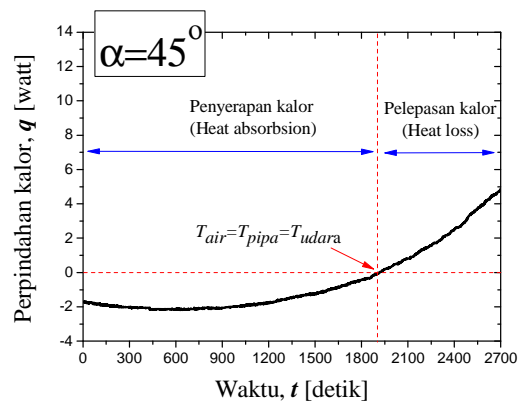
Perhitungan perpindahan kalor menyeluruh dilakukan dengan menggunakan persamaan (5) dan memasukkan nilai perpindahan kalor menyeluruh pada untai.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{air}} + \frac{r_o - r_i}{k_{ss}} + \frac{1}{h_u}} \quad (7)$$

Hasil perhitungan disajikan pada Gambar 9, 10 dan 11 berturut-turut untuk sudut 0° , 45° dan 90° .



Gambar 9. Perpindahan kalor menyeluruh terhadap waktu pada sudut 0°

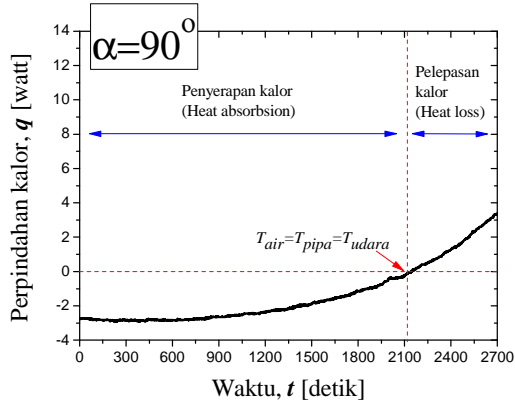


Gambar 10. Perpindahan kalor menyeluruh terhadap waktu pada sudut 45°

Gambar 9 untuk sudut 0° pelepasan kalor langsung terjadi dari awal pengambilan data. Hal ini disebabkan oleh *cooler* tidak berpengaruh pada sistem karena tidak adanya laju aliran massa air, dan kalor yang diterima air tidak terdistribusikan karena laju aliran massa air yang mendekati nol. Sehingga kalor yang diterima oleh air menumpuk dan temperatur pada air meningkat secara signifikan dan menyebabkan pelepasan kalor (*heat loss*) yang lebih besar dari sudut lainnya. Gambar 10 menunjukkan profil perpindahan kalor menyeluruh terhadap waktu, terlihat pada 0 detik hingga sekitar 2110 detik nilai perpindahan kalor menunjukkan angka minus (-). Kondisi tersebut diakibatkan temperatur pada air lebih rendah dari temperatur udara ruangan sekitar untai, karena pengaruh *cooler* pada untai yang dihidupkan terlebih dahulu sampai temperatur konstan (-10°C). Air pada untai menyerap kalor (*heat absorpsion*) dari udara yang bertemperatur lebih tinggi dari air. Kemudian dari sekitar detik 2111 perpindahan kalor berbalik, karena air yang terus menerus diberikan kalor oleh heater mengakibatkan temperatur air menjadi lebih besar dari temperatur sekitar, sehingga kalor pada air dilepas ke udara sekitar (*heat loss*).

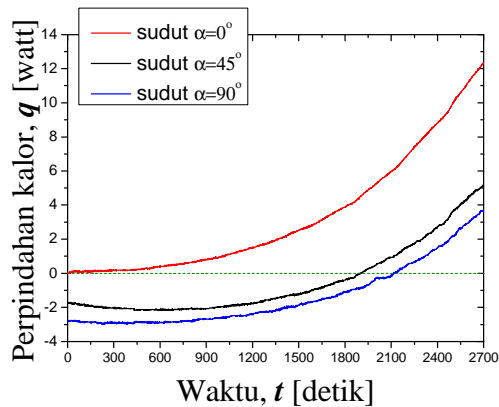
Gambar 11 menunjukkan pelepasan kalor yang terjadi lebih cepat terjadi mulai dari detik 1900. Terlihat pada sudut kemiringan 45° penyerapan kalor pada detik awal lebih kecil dibandingkan sudut 90° . Hal ini disebabkan karena laju aliran massa air yang lebih kecil

untuk penyebaran kalor yang dibawa oleh aliran air berkurang dan terjadi penumpukan kalor pada daerah antara *outlet heater* sampai *inlet cooler*, dan nilai kalor yang dilepas (*heat loss*) yang terjadi menjadi lebih besar.



Gambar 11. Perpindahan kalor menyeluruh terhadap waktu pada sudut 90°

Berdasarkan Gambar 9, 10 dan 11 terlihat bahwa semakin besar sudut kemiringan atau semakin besar nilai pemindahan kalor dari *outlet heater* sampai *inlet cooler* akan berbanding terbalik dengan besarnya nilai rugi kalor yang terjadi dan secara berturut-turut adalah 12,3W, 4,7W dan 3,4W. Gambar 12 menunjukkan perbandingan ketiga perubahan nilai rugi kalor berdasarkan sudut kemiringannya.



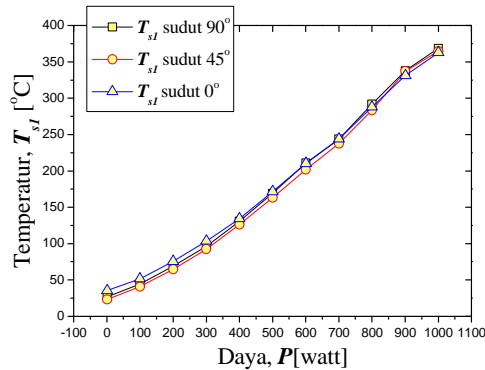
Gambar 12 Perbandingan perpindahan kalor

Gambar 12 menunjukkan bahwa akibat kenaikan sudut kemiringan memperjelas peranan laju aliran massa air pada sudut 45° dan 90° secara signifikan untuk membawa kalor dari *outlet heater* ke *inlet cooler*, sedangkan sebagian kalor lainnya adalah rugi kalor yang berpindah karena proses konveksi ke dinding pipa, konduksi dalam pipa dan konveksi dari permukaan luar pipa ke lingkungan. Keadaan tersebut dapat dianalogikan seperti aliran percabangan yang memiliki 2 katup kontrol, satu katup ke arah rugi kalor via konveksi dan konduksi, dan satunya lagi katup ke arah *cooler* via gerakan air. Pada sudut kemiringan 0° aliran kalor mengalir menjadi rugi kalor dan air tidak membawa kalor (katup ke arah *cooler* dianggap tertutup). Sedangkan untuk kenaikan besarnya sudut kemiringan, menunjukkan

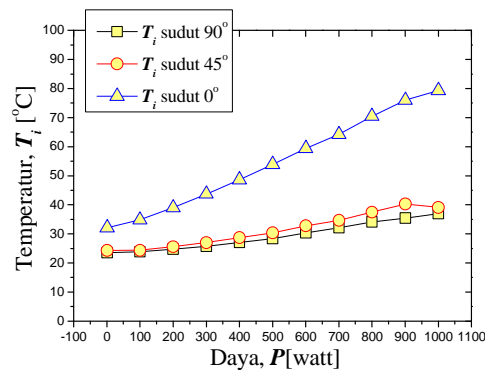
bahwa bukaan katup aliran kalor ke arah *cooler* via gerakan air akan membesar seiring kenaikan sudut. Kasus sudut kemiringan 0° menunjukkan hampir semua kalor dikonveksikan sepanjang pipa dari *outlet heater* hingga *inlet cooler* karena tidak ada kalor yang terbawa oleh air, kemudian kalor terbuang ke lingkungan melalui dinding pipa.

Jumlah Serapan Kalor oleh Air

Hasil pengukuran temperatur permukaan luar pipa di dekat *heater* dan temperatur air pada bagian *heater* ditunjukkan pada Gambar 13 dan 14. Temperatur pada permukaan luar pipa di dekat *heater* cukup tinggi hingga mencapai 375°C . Temperatur maksimal air pada sudut 0° mencapai 80°C , untuk sudut lainnya sekitar 35°C .

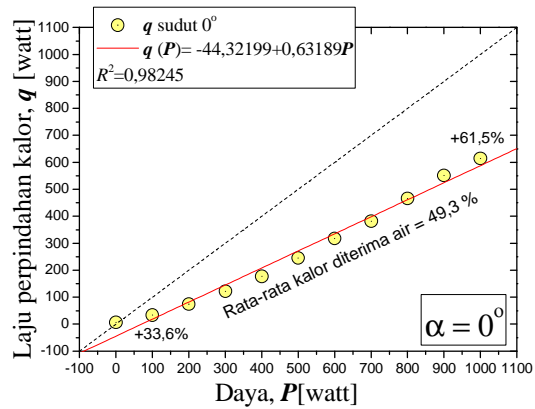


Gambar 13. Kurva hubungan antara kenaikan temperatur dekat *heater* terhadap daya *heater*

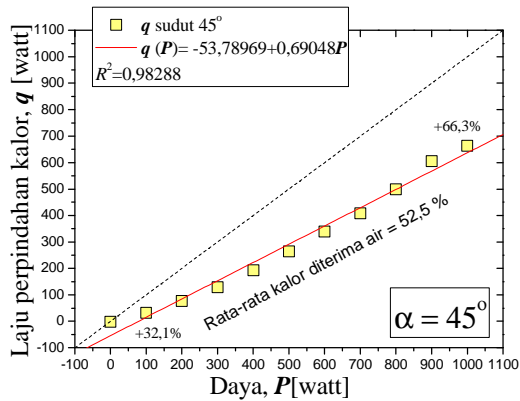


Gambar 14. Kurva hubungan antara kenaikan temperatur air di dalam pipa terhadap daya *heater*

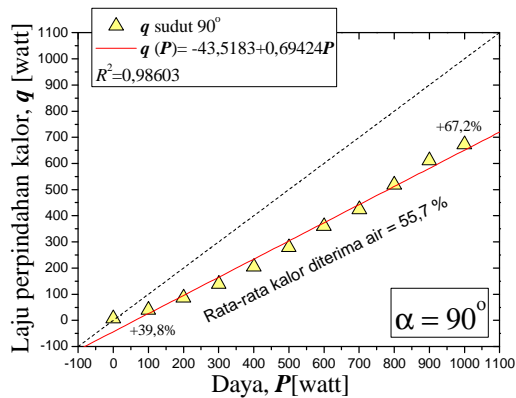
Kemudian nilai konduktivitas termal SUS304 yang didapat dari tabel sifat fisik material dan sifat fisik air dilakukan interpolasi berdasarkan temperatur, kemudian data-data tersebut dimasukkan ke persamaan (6). Hasil perhitungan laju perpindahan kalor dari permukaan pipa luar pada daerah *heater* ke air melalui pipa berdasarkan perubahan daya *heater* berturut-turut ditunjukkan Gambar 15, 16 dan 17 secara berturut-turut untuk setiap sudut kemiringan 0° , 45° dan 90° .



Gambar 15. Kurva laju perpindahan kalor terhadap daya sudut 0°



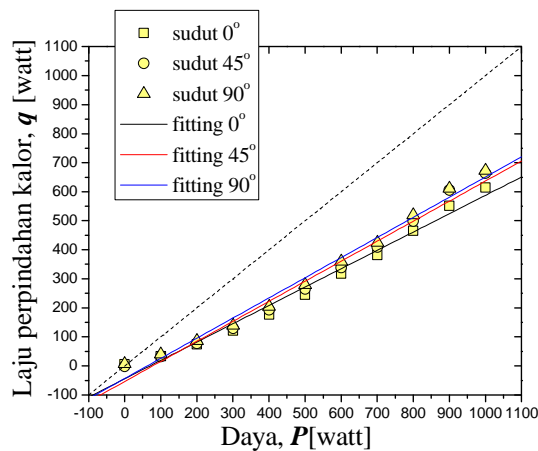
Gambar 16. Kurva laju perpindahan kalor terhadap daya sudut 45°



Gambar 17. Kurva laju perpindahan kalor terhadap daya sudut 90°

Gambar 15 menjelaskan bahwa laju perpindahan kalor pada sudut 0° mempunyai nilai serapan kalor rata-rata oleh air yang terendah sebesar 298,3W (sekitar 49,3% dari daya *heater*). Jelas keadaan ini menunjukkan bahwa pemindahan kalor melalui aliran air tidak efektif, dimana laju aliran massa air pada sudut 0° dianggap tidak terjadi. Sedangkan pada sudut 45° seperti yang ditunjukkan Gambar 16, ketika aliran masa air mulai timbul karena natural sirkulasi, maka serapan kalor rata-rata oleh air meningkat menjadi 321W (sekitar 52,5% dari daya *heater*). Peningkatan serapan kalor rata-rata oleh air dari *heater* semakin meningkat untuk sudut kemiringan 90° menjadi 333,5W (sekitar 55,7% dari daya *heater*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17.

Gambar 18 menunjukkan bahwa bertambah jumlah kalor serapan oleh air ketika terjadi aliran menunjukkan peranan air yang membawa kalor semakin signifikan, sementara sebagian terbuang sepanjang pipa sebagai rugi kalor.



Gambar 18. Kurva laju perpindahan kalor terhadap daya untuk semua sudut kemiringan

Kondisi ini tentunya menyebabkan jumlah kalor yang diserap semakin besar, seiring kenaikan laju aliran masa air terhadap bertambahnya beda ketinggian *heater* dan *cooler*.

KESIMPULAN

Hasil analisis nilai rugi kalor berdasarkan perubahan sudut kemiringan untai, menyimpulkan bahwa nilai rugi kalor dipengaruhi oleh laju aliran massa air yang meningkat seiring membesarnya sudut kemiringan dari 0° , 45° dan 90° yang berkorelasi dengan beda ketinggian antara *heater* dan *cooler*. Nilai rugi kalor sepanjang pipa antara *outlet heater* sampai *inlet heater* secara berturut-turut berdasarkan kenaikan sudut kemiringan adalah 12,3W, 4,7W dan 3,4W. Sedangkan persentase/besaran serapan kalor rata-rata oleh air justru semakin meningkat berdasarkan perubahan sudut kemiringan dari 0° , 45° hingga 90° , secara berturut-turut 49,3% (298,3W), 52,5% (321W), dan 55,7% (333,5W). Optimasi aliran pendinginan terjadi pada sudut kemiringan 90° .

Daftar Notasi

H	: Beda ketinggian <i>heater</i> dan <i>cooler</i>	[m]
α	: Sudut kemiringan	[°]
L	: Jarak antara <i>heater</i> dan <i>cooler</i>	[m]
\square	: Laju aliran massa air	[kg/s]
K_{ss}	: Konduktivitas termal SS304	[W/m.K]
g	: Percepatan gravitasi	[m/s ²]
P_a	: Massa jenis air	[kg/m ³]
Q	: Debit aliran air	[m ³ /s]
R	: Tahanan aliran	[m ⁴]
A	: Luas penampang pipa	[m ²]
v	: Kecepatan aliran air	[m/s]
q	: Perpindahan kalor	[W]
c_p	: Kalor spesifik air	[Kj/kg.K]
T	: temperatur	[°C]
U	: Koefisien perpindahan kalor	[W/m.K]
Δx	: Tebal pipa	[m]
h_{air}	: Koefisien perpindahan kalor konveksi air	[Wm ² K]
h_u	: Koefisien perpindahan kalor konveksi udara	[W/m ² K]

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pimpinan Fakultas Teknik UIKA untuk menyediakan fasilitas dan dukungan moril hingga terlaksananya riset ini. Kepada mahasiswa riset di Lab. EDFEC (Budi G. Juarsa, Rizqi, Farid, Herlambang) atas kerjasamanya kami ucapkan terima kasih. Terimakasih kepada Hibah Bersaing nasional DIKTI TA.2011 atas dukungan dana.

DAFTAR PUSTAKA

1. Fukushima Nuclear Accident Update Log. [cited time 02.30]. Available from: URL : <http://www.iaea.org/newscenter/news/tsunamiupdate01.htm>. Accessed June 13, 2011.
2. Passife Safety-Related Sistem, by Westinghouse. Available from:URL: http://ap1000.westinghouse.com/ap1000_safety_psr.html. Accessed September 13, 2011
3. P. Welander, Journal of Fluid Mech 1967. 29; 1: 17-30.
4. R.T. Dobson, Transient response of a closed loop thermosyphon, R & D J. 1993; 9: 32-38.
5. K. Chen. On the oscillatory instability of closed-loop thermosypons. Journal of Heat Transfer 1985; 105.
6. P.K.Vijayan et al. Effect of loop diameter on the stability of single-phase natural circulation in rectangular loop. Proc. 5th Int.Topical Meeting on reaktor thermal hydraulics (Salt Lake City), September 21-24, 1992; 261-267.

7. P.K.Vijayan et al. Simulation of unstable oscillatory behaviour of single-phase natural circulation with repetitive flow reversals in a rectangular loop using computer code ATHLET. Nuclear Engineering and Design 1995; 155: 623-41.
8. R. Greif, Natural circulation loops, Journal of Heat Transfer 1988; 110; 1243-1257.
9. Y. Zvirin. A review of N. C. loops in PWR and other systems. Nuclear Engineering and Design 1981; 67:203-225.
10. M. Misale et al. Some considerations on the interaction between the fluid and wall tube during experiments in a single-phase natural circulation loops. IASME Transaction Issue 9. 2005; 2: 1717-1722.
11. Y.Y. Jiang, M. Shoji. Flow stability in a natural circulation loop: influence of wall thermal conductivity. Nuclear Engineering Design. 2003; 222: 6-28.
12. M. Misale et al. Experiments in a single-phase natural circulation mini-loop, University of Genoa, Genoa, Italy, 2006.
13. F. D'Auria, et al. Insights into natural circulation stability, Dipartimento Di Ingegneria Meccanica, Nucleare e Della Produzione Universita' di Pisa 56100 Pisa, Italy, IAEA Course on Natural Circulation in Water-Cooled Nuclear Power Plants, ICTP, Trieste, Italy, June 25-29, 2007.
14. P.K. Vijayan et al. Experimental observations on the general trends of the steady state and stability behaviour of single-phase natural circulation loops. Nuclear Engineering and Design 2002; 215; 139 -152.
15. Juarsa, Mulya, dkk. Studi eksperimental laju aliran massa air berdasarkan perubahan sudut kemiringan untai pada kasus sirkulasi alamiah menggunakan untai sirkulasi alamiah (*USSA-FTOI*). Jurnal Material dan Energi Indonesia, Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Padjajaran 2011; 1: 22-30.