
VERIFIKASI MODEL KONDENSASI PADA RELAP5/SCDAPSIM/MOD 3.4

Surip Widodo

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong, Gedung 80, Tangerang, 15310

Diterima editor 14 September 2009

Disetujui untuk dipublikasi 11 Januari 2010

ABSTRAK

VERIFIKASI MODEL KONDENSASI PADA RELAP5/SCDAPSIM/MOD 3.4. RELAP5/SCDAPSIM /MOD3.4 merupakan salah satu program komputer yang sering digunakan untuk menganalisis sistem keselamatan reaktor nuklir. Untuk mengetahui keakuratan program komputer ini dalam memprediksi koefisien perpindahan kalor kondensasi uap yang tercampur dengan gas tak-dapat terkondensasi, maka perlu dilakukan verifikasi model kondensasi yang ada di dalam program komputer tersebut. Verifikasi dilakukan dengan cara membandingkan prediksi nilai koefisien perpindahan panas kondensasi RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 dengan nilai yang didapat dari hasil eksperimen. Perbandingan dilakukan dengan cara mensimulasikan fasilitas eksperimen PCCS ke dalam model input untuk RELAP5. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa model kondensasi pada RELAP5 memprediksi koefisien perpindahan kalor kondensasi lebih rendah 20% dibandingkan dengan nilai hasil eksperimen walaupun mempunyai kecenderungan yang sama. Oleh karena itu diperlukan korelasi kondensasi yang lebih baik untuk diterapkan pada RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 guna memperbaiki nilai koefisien perpindahan kalor kondensasi uap yang tercampur dengan gas tak-dapat terkondensasi.

Kata kunci: model kondensasi, perpindahan kalor, tak-dapat terkondensasi, RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4, fasilitas eksperimen PCCS.

ABSTRACT

VERIFICATION OF CONDENSATION MODEL IN RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4. RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 is one of computer programs that is often used for performing nuclear reactor safety system analysis. In order to know the accuracy of this computer program in predicting condensation heat transfer coefficient of vapor mixed with non-condensable gas, it is necessary to perform verification of the condensation model in the computer program. The verification is done by comparing prediction of condensation heat transfer coefficient value of RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 with condensation heat transfer coefficient value of experiment result.. The comparison was done by performing simulation PCCS experiment facility into RELAP5 input model. The verification results indicate that RELAP5's condensation model predicts lower condensation heat transfer coefficient by 20 % compared to the experiment result although has the same tendency. Therefore, a new better condensation correlation is needed to be applied in the RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 to improve the heat transfer coefficient value of vapor with noncondensable gases.

Keywords: condensational model, heat transfer, non-condensable, RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4, PCCS experiment facility

PENDAHULUAN

Fenomena kondensasi uap yang bercampur dengan gas tak-dapat terkondensasi memainkan peran yang penting di dalam keselamatan industri nuklir. Fenomena ini dapat ditemukan pada sistem pendingin sungkup pasif (*passive containment cooling system, PCCS*). PCCS merupakan salah satu sistem keselamatan yang beroperasi selama terjadi kecelakaan yang dipostulasikan dan berfungsi untuk mencegah terjadinya pemanasan dan penekanan berlebih dan patahnya sungkup yang disebabkan oleh energi panas. Sistem keselamatan ini bekerja dengan cara memindahkan kalor dari sungkup reaktor dan melepaskannya ke lingkungan.

RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 merupakan salah satu program komputer yang sering digunakan untuk menganalisis sistem keselamatan reaktor nuklir. RELAP/SCDAPSIM menggunakan model-model RELAP/MOD3.3 [1] dan SCDAP/RELAP5/MOD3.2 [2] yang tersedia secara umum dan dikembangkan *US Nuclear Regulatory Commission-USNRC* dengan kombinasi peningkatan berikut (a) metode pemrograman dan numerik yang maju, (b) opsi-opsi pemakai, dan (c) model-model yang dikembangkan oleh *Innovative Systems Software-ISS* dan anggota-anggota lain dari *SCDAP Development and Training Program-SDTP*. Peningkatan ini memungkinkan kode untuk jalan lebih cepat dan lebih dapat dipercaya dibanding dengan kode-kode aslinya. MOD3.4 juga dapat dijalankan untuk variasi transien yang lebih luas termasuk transien kondisi tekanan rendah dengan keberadaan gas-gas tak-dapat terkondensasi.

Model-model kondensasi di dalam RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 dapat dikategorikan menjadi dua kelompok. Pertama adalah perpindahan kalor pada dinding, ini terjadi ketika dinding berhubungan dengan campuran dua-fase melalui kondensasi. Kedua adalah perpindahan kalor antar muka melalui asumsi antarmuka sebagai akibat dari perbedaan temperatur *bulk* dari fase cair dan fase uap. Model yang kedua tidak dibahas dalam tulisan ini. Dua model kondensasi, model default dan alternatif, digunakan di RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 standar. Korelasi Nusselt-Shah-Colburn-Hougen [3,4,5] untuk permukaan tegak digunakan sebagai model *default*, dan korelasi Nusselt-UCB [6] digunakan sebagai model alternatif untuk kondensasi film. Beberapa peneliti telah melakukan studi perbandingan kondensasi uap yang tercampur dengan gas tak-dapat terkondensasi dari RELAP5 dengan hasil eksperimen. Y.A. Hassan dan S. Banerjee [7] melakukan studi perbandingan RELAP5/MOD 3.2 dengan percobaan yang dilakukan oleh A.A. Dehbi dkk [8]. Hasil studi tersebut menunjukkan bahwa RELAP5/MOD 3.2 mempunyai *over prediction* terhadap korelasi hasil eksperimen Dehbi dkk.

Untuk mengetahui keakuratan program komputer RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 dalam memprediksi koefisien perpindahan kalor kondensasi uap yang tercampur dengan gas tak-dapat terkondensasi, maka perlu dilakukan verifikasi model kondensasi yang dipakai di dalam RELAP5. Verifikasi dilakukan dengan cara membandingkan hasil perhitungan RELAP5 dengan hasil eksperimen. Salah satu hasil eksperimen yang tersedia untuk keperluan ini adalah seperti yang dipublikasikan oleh Kawakubo dkk [9,10]. Eksperimen tersebut telah dilakukan untuk mengetahui karakteristik perpindahan kalor PCCS disain baru, menggunakan pipa tegak dengan proses kondensasi di sisi luar dari pipa. Eksperimen ini menyerupai apa yang dilakukan oleh Dehbi dkk. akan tetapi eksperimen Kawakubo dkk. mempunyai variasi dalam hal bilangan Reynolds dari aliran sistem pendingin.

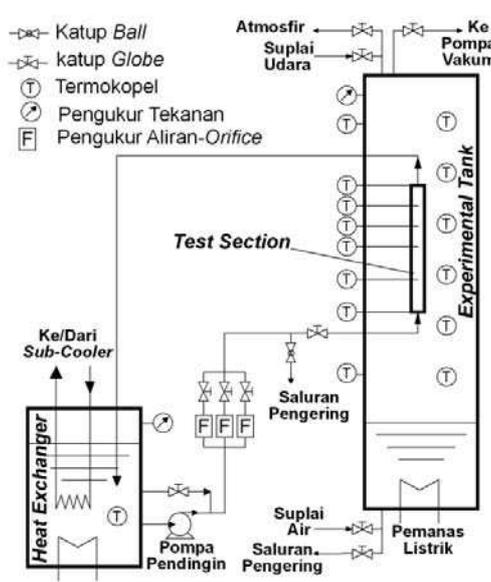
METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan cara membandingkan hasil perhitungan RELAP5 dengan hasil eksperimen PCCS yang dilakukan oleh Kawakubo dkk [9,10].

DISKRIPSI FASILITAS EKSPERIMEN PCCS [9,10]

Gambar 1 memperlihatkan skematis fasilitas eksperimen PCCS. Komponen-komponen utama adalah sebagai berikut: tangki eksperimen (*experimental tank*), sistem pendingin, alat penukar panas (*heat exchanger*), instrumentasi dan sistem akuisisi data. Tangki eksperimen yang mensimulasikan sungkup reaktor dalam kondisi kecelakaan, terbuat dari bahan baja tahan karat dengan diameter dalam 500 mm dan panjang tegak 2700 mm. Tangki eksperimen diisi dengan air sampai pada batas ketinggian yang cukup untuk merendam enam buah pemanas yang mempunyai daya total 10 kW. Pemanas ini memanaskan air yang berada di dalam tangki eksperimen sehingga mendidih guna membangkitkan uap yang akan dikondensasikan. Uap ini juga digunakan untuk mengendalikan tekanan total tangki eksperimen.

Pipa pendingin (bagian uji, *test section*) yang merupakan bagian sistem pendingin terbuat dari baja tahan karat yang berdiameter dalam 10 mm dan berdiameter luar 12 mm dengan tinggi bagian tegak adalah 1200 mm dan panjang bagian mendatar 256 mm. Air pendingin disirkulasi di dalam sistem pendingin dengan menggunakan pompa yang mempunyai kapasitas maksimum 4800 cm³/menit. Alat penukar panas mempunyai diameter dalam 500 mm dan tinggi 755 mm. Alat penukar panas mengendalikan temperatur masuk air pendingin dan tekanan sistem pendingin.



Gambar 1. Skematik fasilitas eksperimen PCCS

PROSEDUR EKSPERIMEN

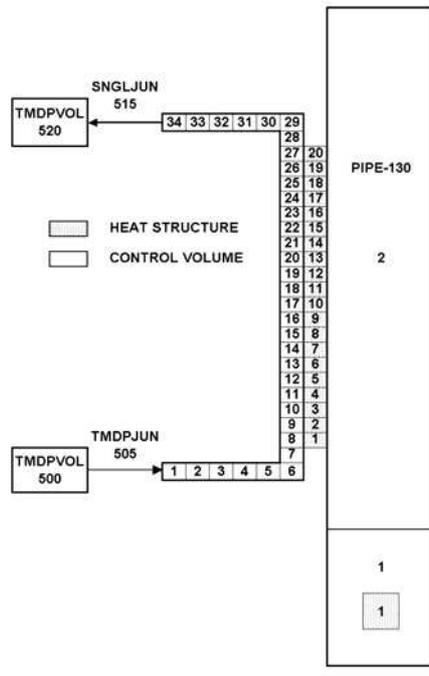
Campuran uap dan udara diasumsikan dalam kondisi saturasi selama percobaan dan karenanya temperatur campuran uap-udara (T_g) ditentukan dengan temperatur jenuh uap. Eksperimen dilakukan dengan melakukan variasi tekanan total (P_t), fraksi massa udara (W_{nc}), dan temperatur sub-dingin dinding. Hal yang terakhir diprediksi dengan melakukan setting laju alir volumetrik pendingin (G) dan variasi temperatur air pendingin masuk (T_{ci}). Kondisi uji ditampilkan di dalam Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi uji [9,10]

Parameter.	Jangkauan
Tekanan total (MPa)	0,2 - 0,5
Fraksi massa udara (%)	5 - 25
Temperatur inlet pendingin ($^{\circ}$ C)	30 - 70
Bilangan Reynolds pendingin	4000 - 13000

PEMODELAN DAN NODALISASI RELAP5

Gambar 2 memperlihatkan skema nodalisasi dari RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 untuk eksperimen PCCS. Nodalisasi RELAP5 yang digunakan untuk simulasi ini terdiri dari PIPE dengan 34 *control volume* yang mewakili pipa bagian uji yaitu 20 buah *control volume* diantaranya berhubungan dengan *heat structure*. Sebanyak 2 (dua) buah *time-dependent volume* (TMDPVOL) bertindak sebagai sumber dan pembuangan yang tidak terbatas, digunakan untuk mewakili kondisi batas air pendingin yang masuk ke pipa bagian uji. Sebuah *time-dependent junction* (TMDPJUN) mewakili pompa untuk mengalirkan air pendingin. Sebuah junction berfungsi untuk menghubungkan pipa bagian uji ke alat penukar panas, yang dimodelkan dengan TMDVOL 520. Satu *heat structure* mewakili pipa bagian uji sebagai penghubung antara air pendingin dengan ruangan campuran uap dan udara dari tangki percobaan. Satu *heat structure* lainnya berfungsi sebagai pemanas untuk menyuplai uap ke ruangan tangki eksperimen dengan cara mendidihkan air yang berada di tangki eksperimen menjadi uap. Satu buah komponen PIPE (PIPE-130) mewakili tangki eksperimen. PIPE-130 hanya mempunyai 2 (dua) *control volume*. Hal ini dilakukan untuk mensimulasikan percampuran yang merata antara uap air dengan udara sebagai gas tak-dapat terkondensasi di ruangan tangki eksperimen. Nilai-nilai parameter simulasi disesuaikan dengan nilai-nilai parameter yang ada dalam eksperimen.

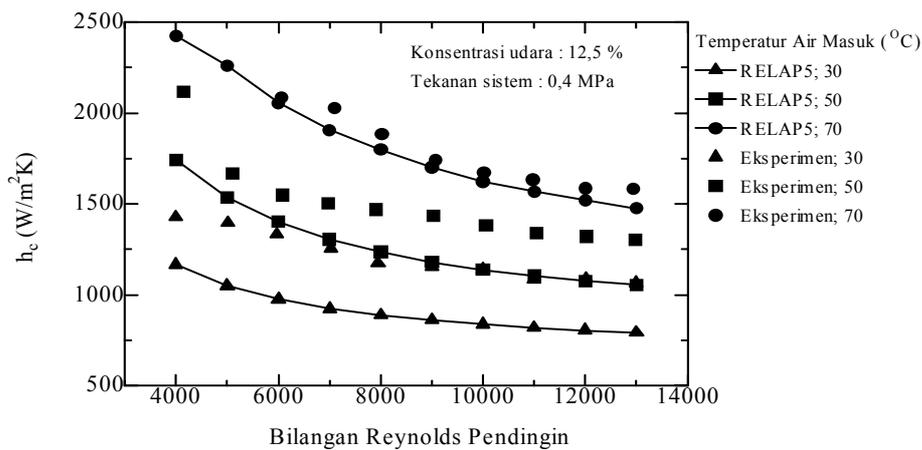


Gambar 2. Nodalisasi RELAP5 untuk simulasi fasilitas eksperimen PCCS

HASIL DAN PEMBAHASAN

Koefisien perpindahan panas kondensasi hasil simulasi RELAP5 dibandingkan dengan eksperimen berdasarkan kondisi sebagai berikut:

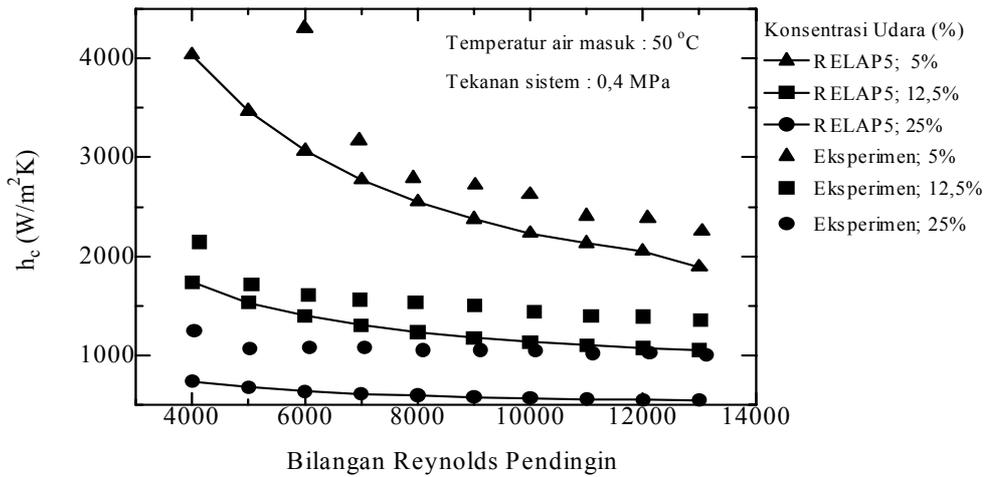
1. Variasi temperatur masukan pendingin dan bilangan Reynolds pendingin untuk kondisi tekanan 0,4 MPa dan fraksi gas tak-dapat terkondensasi 12,5%,
2. Variasi fraksi gas tak-dapat terkondensasi dan variasi bilangan Reynolds pendingin untuk kondisi tekanan 0,4 MPa dan temperatur masukan pendingin 50°C dan,
3. Variasi tekanan sistem tangki eksperimen dan variasi bilangan Reynolds pendingin untuk kondisi fraksi gas tak-dapat terkondensasi 12,5% dan temperatur masukan pendingin 50°C.



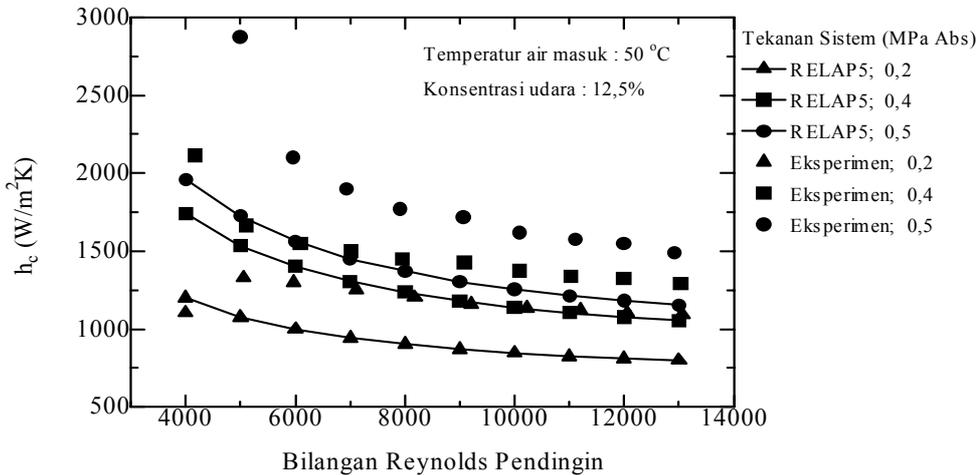
Gambar 3. Perbandingan nilai h_c untuk pengaruh variasi bilangan Reynolds pendingin dan temperatur pendingin masuk

Hasil perbandingan untuk masing-masing kondisi ditunjukkan di dalam Gambar 3, 4 dan 5. Pengaruh bilangan Reynolds dan temperatur air pendingin masuk terhadap koefisien perpindahan kalor dapat dijelaskan sebagai berikut. Nilai koefisien perpindahan kalor kondensasi menurun dengan naiknya temperatur sub-dingin dinding. Temperatur sub-dingin dinding adalah beda temperatur antara temperatur saturasi uap dengan temperatur permukaan dinding. Untuk tangki dengan kondisi temperatur saturasi uap yang sama, begitu juga temperatur air pendingin masuk, maka semakin besar bilangan Reynolds aliran air pendingin akan mengakibatkan semakin kecil perubahan temperatur air pendingin yang melewati pipa bagian uji. Hal ini akan mengakibatkan semakin besarnya beda temperatur sub-dingin pada dinding pipa bagian uji. Untuk kasus bilangan Reynolds yang sama dan temperatur saturasi di tangki eksperimen yang sama, maka semakin rendah temperatur air pendingin masuk akan memperbesar temperatur sub-dingin dinding.

Pengaruh konsentrasi udara, sebagai gas tak-dapat terkondensasi adalah semakin tinggi konsentrasi udara maka semakin besar jumlah permukaan kontak uap dengan dinding kondensasi yang tertutupi. Kondisi ini akan menurunkan nilai koefisien perpindahan kalor kondensasi.



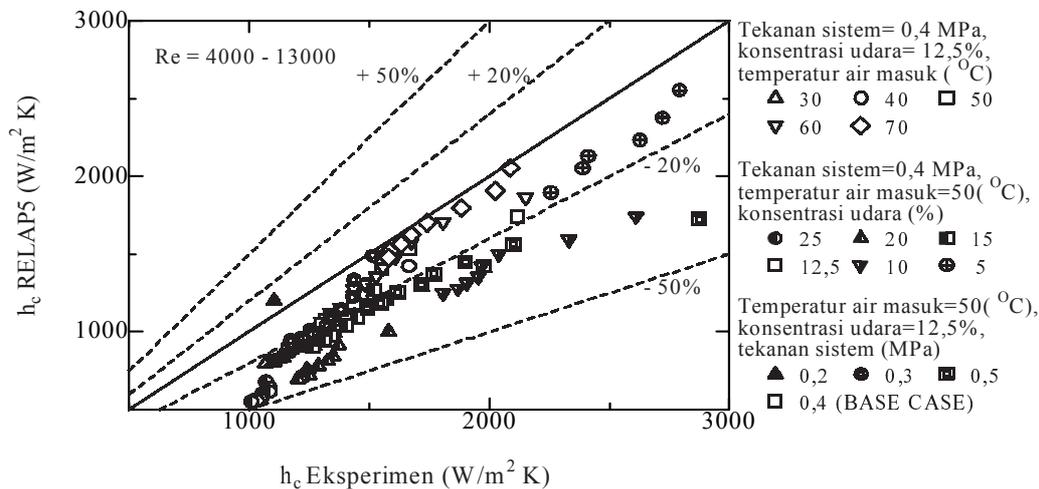
Gambar 4. Perbandingan nilai h_c untuk pengaruh variasi bilangan Reynolds pendingin dan konsentrasi udara



Gambar 5. Perbandingan nilai h_c untuk pengaruh variasi bilangan Reynolds pendingin dan tekanan sistem

Pengaruh tekanan sistem terhadap nilai koefisien perpindahan kalor menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan semakin tinggi kepadatan uap yang mana akan meningkatkan kemungkinan terjadinya kontak antara uap dengan permukaan dinding sehingga akan menaikkan nilai koefisien perpindahan kalor dari tangki eksperimen ke permukaan dinding pipa bagian uji seperti yang terlihat di Gambar 5. Secara detail pengaruh tekanan sistem terhadap koefisien perpindahan kalor kondensasi uap yang tercampur dengan gas tak-dapat terkondensasi dapat dilihat di Widodo [11].

Secara keseluruhan perbandingan prediksi kondensasi uap yang bercampur gas tak-dapat terkondensasi hasil perhitungan RELAP5 dan hasil eksperimen ditunjukkan di Gambar 6. Hasil RELAP5 tersebar di sekitar 20% lebih kecil dibanding hasil eksperimen. Salah satu kemungkinan penyebabnya adalah RELAP5 menggunakan korelasi untuk kondensasi film. Sementara di dalam eksperimen, sebagaimana dipublikasikan oleh Kawakubo dkk.[10], terjadi kondensasi droplet yang mempunyai koefisien perpindahan kalor lebih tinggi dibandingkan dengan kondensasi jenis film.



Gambar 6. Perbandingan koefisien perpindahan panas kondensasi antara hasil perhitungan RELAP5 dan hasil eksperimen

KESIMPULAN.

Model kondensasi pada RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 memprediksi nilai koefisien perpindahan kalor kondensasi uap yang bercampur dengan gas tak-dapat terkondensasi adalah tersebar di antara -40% dan +10% dan nilai rerata adalah lebih rendah 20% dibandingkan dengan nilai hasil eksperimen walaupun mempunyai kecenderungan yang sama. Diperlukan korelasi yang lebih baik untuk diterapkan pada model kondensasi RELAP5/SCDAPSIM/MOD3.4 guna memperbaiki nilai koefisien perpindahan panas kondensasi uap yang bercampur dengan gas tak-dapat terkondensasi.

DAFTAR PUSTAKA

1. RELAP5 Code Development Team. RELAP5/MOD 3.3 Code Manual: NUREG/CR-5535/Rev1; 2001.
2. SCDAP/RELAP5 Development Team. SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual: NUREG/CR-6150, INEL-96/0422; 1998.
3. W. Nusselt. Die Oberflächenkondensation des wasserdampfes. Ver. Deutsch. Ing.; 1916; 60.
4. M. M. Shah. A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes. International Journal of Heat and Mass Transfer 1979;2: 547-556.

5. A. P. Colburn and O. A. Hougen. Design of cooler condensers for mixtures of vapors with non-condensing gases. *Industrial and Engineering Chemistry* ; 1934
6. Vierow, K.M. Condensation in a natural circulation loop with noncondensation gases. *Proc. of the International Conference on Multiphase Flows* 91. Japan; 1991.
7. Y.A. Hassan, S. Banerjee. Implementation of a non-condensable model in RELAP5/MOD3.2. *Nuclear Engineering and Design* 1996; 162: 281-300
8. A.A. Dehbi, M.W. Golay and M.S. Kazimi, Ph.D. Desertation: The effects of noncondensable gases on the steam condensation under turbulent natural convection conditions: Report No. MITANP- TR-004; 1990
9. M. Kawakubo. Fundamental research on the cooling characteristic of passive containment cooling system. *Proc. of 12th International Conference on Nuclear Engineering*; 2004 April 25-29; Arlington, Virginia USA: ASME and JSME; 2004
10. M. Kawakubo, et al. Fundamental research on the cooling characteristic of PCCS with dropwise condensation. *Proc. of 13th International Conference on Nuclear Engineering*; 2005 May 16-20; Beijing, China: ASME and JSME; 2005.
11. S. Widodo. Korelasi baru koefisien perpindahan panas kondensasi uap yang tercampur dengan gas tak-terkondensasi. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir* 2009; Vol 11: No 1,