

VALIDASI PEMODELAN KODE FLUENT 6.3 UNTUK PERHITUNGAN ALIRAN PENDINGIN DARURAT DALAM KANAL SEMPIT PLTN-PWR*

Muhamad Subekti, Mulya Juarsa, M. Hadi Kusuma

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Tangerang Selatan 15310,
Email : subekti@batan.go.id

Diterima: 30-01-2014

Diterima dalam bentuk revisi: 03-04-2014

Disetujui: 25-07-2014

ABSTRAK

VALIDASI PEMODELAN KODE FLUENT 6.3 UNTUK PERHITUNGAN ALIRAN PENDINGIN DARURAT DALAM KANAL SEMPIT PLTN-PWR. Benchmarking simulator PLTN-PWR memerlukan penggunaan kode 3D disamping kode 1D. Dalam kasus investigasi *Emergency Core Cooling System (ECCS)* setelah terjadi *Loss of Coolant Accident (LOCA)*, efektivitas pendinginan menunjukkan ketidakpastian antara hasil eksperimen dan perhitungan termohidrolika 1D. Hal ini terjadi karena struktur interior bejana tekan 3 dimensi sulit dimodelkan oleh kode satu dimensi. Oleh karena itu, penelitian lebih maju terhadap aliran pendingin perlu dilakukan dengan menggunakan metode/teknik yang menerapkan perhitungan 3D. Salah satu metode tersebut adalah metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Penelitian ini bertujuan memvalidasi kode FLUENT 6.3 untuk perhitungan aliran pendingin darurat bertekanan rendah dalam kanal sempit persegi-panjang sebagai simulasi aliran pendingin darurat dari pipa masukan bejana tekan melewati kanal sempit menuju *downcomer*. Hasil validasi kode FLUENT 6.3 menunjukkan bahwa kenaikan laju alir dan temperatur memberikan kecenderungan penurunan akurasi hasil perhitungan distribusi temperatur dekat luaran, hal ini terjadi karena keterbatasan pemodelan CFD memberikan dampak perhitungan temperatur yang sensitif pada laju alir dan temperatur tinggi. Pengaruh keterbatasan pemodelan ini dipastikan dengan hasil perhitungan FLUENT 6.3 pada parameter temperatur yang selalu lebih rendah dari pada hasil eksperimen. Perbedaan maksimal hasil perhitungan FLUENT 6.3 dibandingkan dengan hasil eksperimen adalah sebesar 6,54%.

Kata kunci : Validasi, LOCA, tekanan rendah, PLTN PWR, CFD.

ABSTRACT

THE VALIDATION OF FLUENT 6.3 CODE MODELING FOR EMERGENCY COOLING FLOW CALCULATION ON NARROW CHANNEL OF PWR TYPED NPP. The benchmarking of PWR-NPP simulator requires the utilization of 3D code beside 1D code. In case of Emergency Core Cooling System (ECCS) investigations after Loss of Coolant Accident (LOCA), the cooling effectiveness still shows uncertainty between experiment result and 1D thermalhydraulics calculation. It occurs due to the 3-dimension pressured vessel interior structure is difficult to model in one dimension code. Hence, advanced research on coolant calculation need to be done on the method/technique utilization by applying 3D calculation. One of those methods is Computational Fluid Dynamics (CFD). The purpose of this research is to validate FLUENT 6.3 code for low pressured emergency cooling flow on rectangular narrow channel as a simulation of emergency cooling flow from pressured vessel inlet pipe through narrow channel to downcomer. FLUENT 6.3 validation result shows that the increases of flow-rate and temperature give a trend of the accuracy decrease of the calculation result for temperature distribution near outlet; this happens due to CFD modeling limitation effects the CFD calculation that sensitive to the high flow-rate and temperature. This modeling limitation is confirmed by the calculation results of FLUENT 6.3 on temperature parameter are always lower that experiment

* Dipresentasikan pada Seminar Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia, BATAN – UNPAD 4 Juli 2013.

results. The maximum different between FLUENT 6.3 calculation result and experiment result is 6.54%.

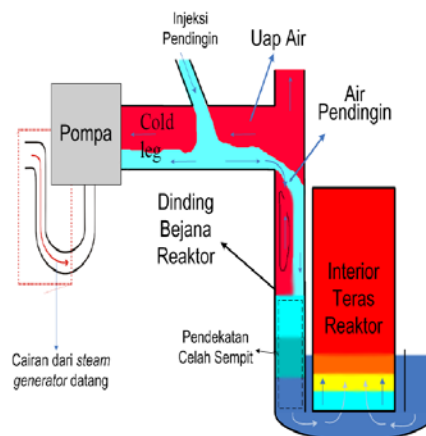
Keywords: Validation, LOCA, low pressure, PWR NPP, CFD.

1. PENDAHULUAN

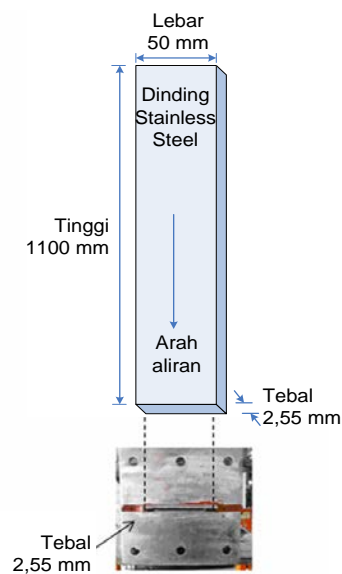
Pengembangan Simulator Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) tipe *Pressured Water Reactor* (PWR) telah menyelesaikan tahap pengembangan metode perhitungan neutronik (1,2). Selanjutnya pada tahap pengembangan metode perhitungan termohidrolika, temperatur pendingin air dalam pipa *coldleg* pada kondisi operasi reaktor normal, diasumsikan memiliki temperatur yang sama setelah pendingin melewati *downcommer*. Tetapi pada saat kondisi kecelakaan kehilangan pendingin dalam jumlah besar (*large loss of coolant accident*, LOCA), pipa sistem pendingin utama (*primary cooling system*) akan kehilangan pendingin reaktor dalam jumlah besar sehingga level air pendingin reaktor menurun drastis dalam waktu 30 detik (3,4). Dengan demikian, *Emergency Core Cooling System* (ECCS) perlu melakukan *High Pressure Injection* (HPI) ke dalam sistem pendingin primer dan berlanjut sampai *Low Pressure Injection* (LPI). Selama proses LPI, temperatur pendingin air sebelum mencapai *downcommer* bervariasi tergantung posisi tiga dimensi. Kondisi aliran 3 dimensi yang tidak seragam ini yang menyebabkan beberapa eksperimen ECCS menunjukkan ketidakpastian akurasi perhitungan satu dimensi terhadap efektifitas air pendingin darurat sejak PLTN generasi pertama (5) sampai PLTN generasi terkini (4). Sehingga lembaga regulasi terbaru (6) masih menggunakan batas temperatur

kelongsong maksimum sebesar 2200 F (1200 °C) dengan laju oksidasi di bawah 17 %, sama dengan regulasi tahun 1971 (7).

Oleh karena itu, *benchmarking* simulator PLTN - PWR sebaiknya menggunakan kode yang menerapkan metode/teknik tiga dimensi seperti kode FLUENT 6.3. Tetapi, sebelum *benchmarking* dengan simulator, kode FLUENT 6.3 perlu divalidasi. Riset ini bertujuan memvalidasi kode FLUENT 6.3 untuk perhitungan aliran pendingin darurat bertekanan rendah dalam kanal sempit persegi - panjang sebagai simulasi aliran pendingin darurat dari pipa masukan bejana tekan melewati kanal sempit menuju *downcommer*. Skema pendekatan kanal sempit pada saat injeksi temperatur dan tekanan rendah diperlihatkan pada Gambar 1. dimana pemodelan kanal sempit persegi-panjang fokus pada aliran dari pipa masukan bejana tekan menuju *downcommer* seperti pemodelan yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Skema pendekatan kanal sempit pada saat injeksi temperatur dan tekanan rendah



Gambar 2. Pemodelan kanal sempit persegi panjang untuk aliran dari pipa masukan bejana menuju *downcomer*.

Dalam proses validasi, investigasi termohidrolika mempertimbangkan kanal sempit pada bidang persegi - panjang dan *hemispherical* untuk mensimulasikan LOCA besar (8,9). Sejauh ini publikasi investigasi menggunakan asumsi kanal sempit *hemispherical* masih sedikit, sedangkan publikasi kanal sempit pada bidang persegi - panjang sudah diaplikasikan pada reaktor riset (10,11,12) dan pemanasan bilateral pada PWR menggunakan alat uji HeaTiNG-02 (13,14). Analisis tiga dimensi berbasis CFD menggunakan kode FLUENT 6.3 PWR sudah dilakukan pada kondisi temperatur tinggi (15,16,17,18). Pada penelitian ini, validasi kode FLUENT 6.3 menggunakan alat uji Beta HeaTiNG-02 pada temperatur dan tekanan rendah dengan variasi laju alir dan temperatur aliran sesuai asumsi LPI dimana injeksi pendingin darurat kedalam teras reaktor memiliki tekanan dan temperature rendah.

2. DASAR TEORI

CFD merupakan metode penghitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas dan volume dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan pada tiap elemen pembagi. Penyelesaian metode CFD dalam FLUENT menerapkan metode volume hingga dimana domain subyek penyelesaian persamaan tersebut dibagi menjadi himpunan volume atur yang disebut dengan *mesh/grid*.

Dalam perhitungan model kanal sempit, perhitungan CFD melibatkan (1) persamaan kontinuitas, (2) persamaan energi, dan (3) persamaan momentum dimana perpindahan panas terjadi dari fluida air ke dinding kanal sempit dan akhirnya didinginkan oleh udara yang mengelilingi dinding kanal sempit. Ketiga persamaan ini diterapkan pada fluida air yang mengalir di kanal sempit. Kemudian kanal sempit ini dikelilingi oleh dinding *stainless steel*. Dengan demikian, kondisi batas antara fluida air dalam kanal sempit dan dinding *stainless steel* perlu diterapkan persamaan kopel persamaan konduksi dan konveksi paksa. Kemudian perpindahan panas dalam secara konduksi terjadi dalam dinding kanal sempit. Pada kondisi batas dinding luar, terjadi perpindahan panas oleh udara. Persamaan kopel digunakan lagi dan udara mendinginkan dinding kanal sempit secara konveksi paksa.

Persamaan kontinuitas pada udara yang mengelilingi dinding solit *stainless steel* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

dimana U_i adalah komponen kecepatan udara ke arah x_i (m/s) dan ρ adalah densitas udara (kg/m^3). Sedangkan persamaan momentum pada persamaan-2 melibatkan μ_e sebagai viskositas efektif (kg/m-s), g_i adalah percepatan gravitasi ke arah i (m/s^2), P_s adalah tekanan statis (Pa), k adalah energi kinetik turbulen (m^2/s^2) dan δ_{ij} adalah konstanta delta Kronecker.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U_j U_i)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ = \rho g_i - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(P_s + \frac{2}{3} k \right) \delta_{ij} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Setelah menghitung energi kinetik turbulen dan bilangan Prandtl, persamaan energi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial(\rho U_j H_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \left(\frac{\partial H_i}{\partial x_j} \right) \right] = q \quad (3)$$

Dimana H adalah entalpi spesifik ke arah i (J/kg) dan untuk udara kering dengan mengabaikan tekanan kerja dan energi kinetik dalam aliran tidak bertekanan, maka $H=C_p T$. C_p adalah panas spesifik udara pada tekanan konstan ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$), T adalah temperatur udara absolut ($^\circ\text{C}$) dan q adalah laju perubahan panas volumetrik (W/m^3). Densitas udara kering dapat mengacu ke hukum gas ideal. Selanjutnya persamaan kontinuitas, momentum dan energi ini juga dijabarkan untuk stainless steel dan fluida air pendingin. Laju alir dijadikan dasar untuk memastikan sifat aliran laminar atau

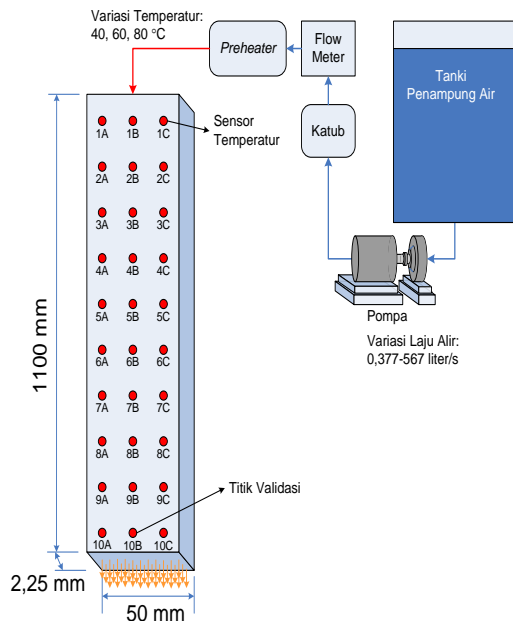
turbulen. Dan perhitungan CFD menggunakan persamaan turbulen $k-\omega$ karena optimal untuk kondisi turbulen yang stabil(19).

3. METODE VALIDASI

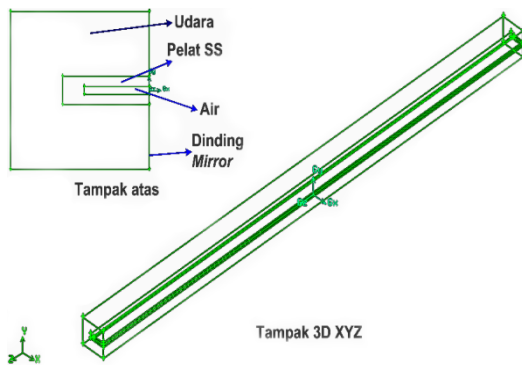
Metode validasi kode FLUENT 6.3 terbagi dalam dua kegiatan, yaitu kegiatan perhitungan menggunakan kode FLUENT 6.3 dan eksperimen menggunakan alat uji HeaTiNG-02. Perhitungan FLUENT 6.3 terdiri dari pemodelan alat uji HeaTiNG-02 yang meliputi pembuatan geometri model alat uji menggunakan perangkat lunak Gambit, *meshing*, dan penentuan kondisi batas. Setelah pemodelan, perhitungan CFD dilakukan menggunakan persamaan energi, momentum, dan turbulensi. Perhitungan CFD diselesaikan sampai angka konvergensi $10\text{e-}7$ tercapai.

Kegiatan eksperimen menggunakan alat uji HeaTiNG-02 dengan skema alat seperti pada Gambar 3 dilakukan untuk menyediakan data pembanding terhadap hasil perhitungan FLUENT 6.3. Air dalam tangki ekspansi dipompa melewati *flow meter* untuk mengukur laju alir. Kemudian air akan melewati *preheater* sebelum masuk ke dalam alat uji HeaTiNG-02. Bagian utama alat uji HeaTiNG-02 adalah kanal sempit berukuran $1100 \times 50 \times 2,25$ mm. Sensor temperatur tipe termokopel tipe K dipasang pada pelat dasar SS316 dengan tebal 8 mm. Sedangkan pelat penutup berbahan *carbon steel* dengan tebal 10 mm. Dinding alat uji pada sebelah kiri dan kanan memiliki bahan dan tebal yang sama dengan pelat dasar. Perbandingan hasil perhitungan CFD dengan hasil eksperimen dititikberatkan pada parameter temperatur

posisi 10B yang terletak di dalam plat SS, karena posisi ditengah dan terjauh dari masukan pendingin akan menghasilkan perbedaan hasil eksperimen maksimal dibandingkan dengan hasil perhitungan.



Gambar 3. Skema alat uji HeaTiNG-02



Gambar 4. Pemodelan alat uji HeaTiNG-02

Tabel 1. Variasi parameter perhitungan CFD

Temperatur air masukan (°C)	Laju Aliran (liter/s)
40	0,377; 0,472; 0,567
60	0,377; 0,472; 0,567
80	0,377; 0,472; 0,567

Simulasi kanal sempit dalam

eksperimen ini terdiri dari beberapa variasi parameter termohidrolika, yaitu variasi temperatur air masukan (°C) dan laju alir (liter/s) sesuai Tabel 1 yang ditetapkan berdasarkan asumsi temperatur dan debit alir pendingin darurat yang melewati kanal sempit. Gambar 4 memperlihatkan pemodelan alat HeaTiNG-02. Model dinding paling luar yang mengelilingi udara ditetapkan sudah stabil pada temperature 30°C sebagai asumsi kondisi udara eksperimen pada siang hari sekitar 30°C. Dengan demikian, pemodelan ini juga mengasumsikan fenomena perpindahan panas konveksi alam dari permukaan luar dinding pelat SS ke udara

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada titik validasi posisi 10B, hasil eksperimen menggunakan alat uji HeaTiNG-02 dan hasil perhitungan FLUENT 6.3 berdasarkan variasi laju alir dan temperatur pendingin air masukan dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil validasi ini menunjukkan bahwa kenaikan laju alir dan temperatur memberikan kecenderungan penurunan akurasi hasil perhitungan distribusi temperatur terutama pada posisi 10B. Hal ini terjadi keterbatasan pemodelan FLUENT memberikan dampak perhitungan temperatur sensitif pada laju alir dan temperatur tinggi. Dalam pemodelan FLUENT, aliran fluida air masuk ke dalam kanal sempit dengan variasi temperatur 40 °C, 60 °C, dan 80 °C. Perpindahan panas terjadi dari fluida air ke dinding kanal sempit yang terbuat dari *stainless steel*. Kemudian panas dari dinding ini dilepaskan ke fluida udara yang mengelilingi dinding kanal sempit. Dan lapisan

fluida udara ini dikelilingi oleh dinding terluar yang mengasumsikan temperatur tetap sebesar 30 °C. Sedangkan selama eksperimen, dinding terluar alat uji HeaTING-02 menjadi lebih panas dari pada dinding terluar CFD yang sudah ditetapkan sebesar 30 °C.

Tabel 2. Perbedaan hasil eksperimen dan perhitungan

Temp (°C)	Debit alir (liter/s)	Eks. (°C)	FLUENT (°C)	Perbedaan	
40	0,377	38,29	38,00	0,29	0,76 %
	0,472	38,54	38,00	0,54	1,40 %
	0,567	37,78	37,00	0,78	2,06 %
60	0,377	55,08	52,00	3,08	5,59 %
	0,472	54,57	51,00	3,57	6,54 %
	0,567	54,03	51,00	3,03	5,61 %
80	0,377	72,94	70,00	2,94	4,03 %
	0,472	71,63	69,00	2,63	3,67 %
	0,567	70,68	67,00	3,68	5,21 %

Penambahan dinding batas dalam pemodelan FLUENT berarti menambahkan selimut udara terluar baru. Pemodelan tersebut akan memperbesar jumlah mesh/grid sehingga perhitungan CFD akan membutuhkan waktu jauh lebih lama dan resiko tidak konvergen menjadi lebih besar. Dengan menggunakan pemodelan seperti ini, selain waktu perhitungan jauh lebih lama, diperlukan peralatan komputer yang lebih baik, yaitu perangkat memori yang lebih besar dan prosesor komputer yang lebih cepat. Oleh karena itu, pemodelan tetap menggunakan model yang sederhana seperti terlihat pada Gambar 4 dan validasi dilakukan dengan keterbatasan pemodelan seperti tersebut di atas.

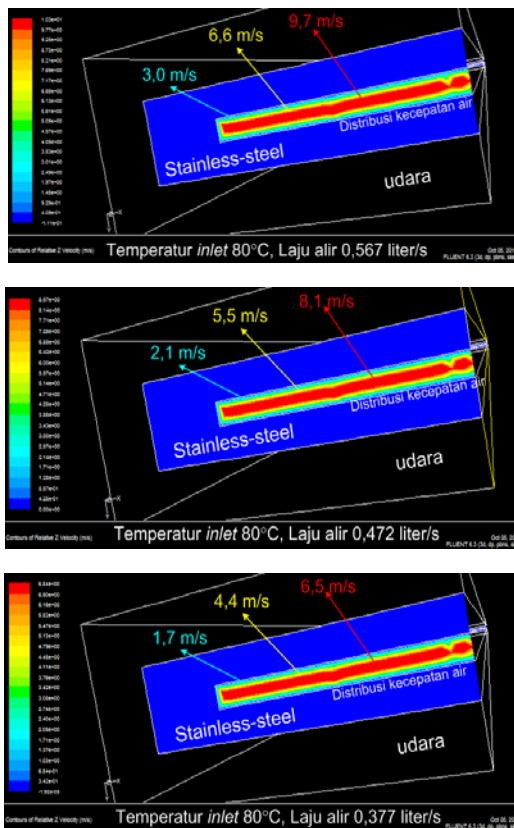
Tabel 2 juga memperlihatkan bahwa perhitungan FLUENT terhadap temperatur posisi 10B selalu menghasilkan nilai yang

lebih rendah dari hasil eksperimen pada semua variasi. Kondisi ini memperlihatkan kepastian bahwa pemodelan dinding terluar dengan temperatur tetap menjadi penyebab utama perbedaan antara hasil perhitungan CFD dengan hasil eksperimen.

Dengan keterbatasan pemodelan ini, hasil perhitungan CFD memberikan perbedaan maksimal terhadap hasil eksperimen sebesar 6,54% yang terjadi ketika temperatur masukan sebesar 60°C dan debit alir 0,472 liter/s. Aplikasi CFD dengan pemodelan struktur dalam bejana tekanan memiliki tantangan berbeda dimana konstruksi interior harus dimodelkan dengan akurat. Dengan demikian penelitian ini perlu dilanjutkan dengan verifikasi hasil perhitungan CFD dengan data desain atau eksperimen skala lebih kecil bejana tekan dan *benchmarking* dengan hasil perhitungan 1D.

Keuntungan perhitungan metode CFD adalah kemampuan perhitungan 3D sehingga analisis keselamatan lebih lanjut bisa dilakukan terhadap struktur interior dalam ruang 3D dimana kondisi interior dapat mempengaruhi karakteristik aliran pendingin darurat saat melewati ruang tertentu sehingga efektivitas injeksi pendingin dapat diinvestigasi secara lebih detail dari pada hanya menggunakan perhitungan 1D. Gambar 5 memperlihatkan distribusi kecepatan air dalam kanal sempit dengan FLUENT 6.3 terhadap variasi laju alir pada temperatur masukan 80 °C. Variasi temperatur sampai 80 °C dilakukan supaya tidak terjadi perubahan fase cair air yang masuk ke kanal sempit dan tersedia cukup margin untuk menghindari perubahan

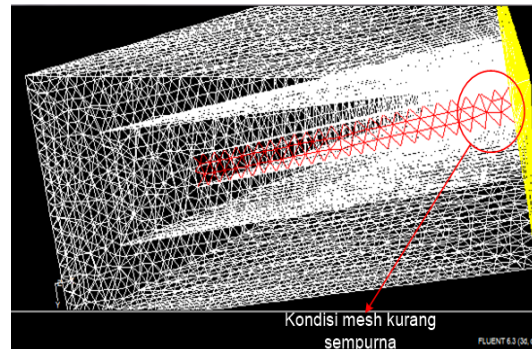
tersebut karena dampak aliran yang cepat.



Gambar 5. Distribusi kecepatan air dalam kanal sempit dengan FLUENT 6.3 pada temperatur masukan 80°C

Bila Gambar 5 dilihat lebih detail, terdapat distribusi kecepatan yang tidak merata pada bagian pendingin paling tengah. Hal ini terjadi karena keterbatasan pemodelan yang sangat tipis sebesar tebal 2,55 mm pada lapisan aliran pendingin dalam celah sempit sehingga proses *meshing* menjadi sulit sekali untuk dihindari seperti terlihat pada Gambar 6.

Meskipun demikian, hasil perhitungan CFD dapat diselesaikan dengan nilai konvergensi yang sangat baik. Ketidaktepatan model ini dapat menjadi penyebab penyimpangan hasil perhitungan dibandingkan dengan hasil eksperimen.



Gambar 6. Kesulitan pemodelan pada proses mesh/grid kanal sempit

Penyebab lain timbulnya perbedaan hasil perhitungan CFD dengan hasil eksperimen adalah dinding *stainless steel* alat eksperimen tidak rata sempurna sedangkan model CFD mengasumsikan dinding rata sempurna. Selain itu, aliran pendingin dalam alat eksperimen memiliki beberapa gelembung air yang timbul dalam jumlah kecil dan segera hilang. Timbulnya gelembung udara ini karena konstruksi penyempitan dan pelebaran aliran pada masukan celah sempit menyebabkan penurunan tekanan lokal sedikit melewati tekanan kritis perubahan fasa air sehingga sebagian kecil pendingin air berubah fasa menjadi fasa gas dalam waktu sesaat. Gelembung udara ini berdampak pada penurunan perpindahan kalor selama eksperimen berlangsung dan berlanjut ke temperatur dinding cenderung lebih tinggi dari pada temperatur hasil perhitungan CFD menggunakan FLUENT 6.3.

5. KESIMPULAN

Hasil perhitungan CFD menggunakan kode FLUENT 6.3 terhadap parameter temperatur cenderung lebih rendah dari pada hasil eksperimen menggunakan alat HeaTiNK-02. Hal ini terjadi karena

keterbatasan pemodelan CFD karena tebal celah sempit yang sangat tipis, dinding *stainless steel* alat eksperimen tidak rata sempurna sedangkan model CFD mengasumsikan dinding rata sempurna, dan timbulnya gelembung udara sesaat selama eksperimen yang dapat menurunkan perpindahan kalor. Perbedaan maksimal hasil perhitungan FLUENT 6.3 dibandingkan dengan hasil eksperimen adalah sebesar 6,54%.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Subekti M. dkk. Pengembangan metode perhitungan neutronik realtime untuk aplikasi simulator PLTN PWR-1000. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir. BATAN. Bandung; 2011.
2. Subekti M. dkk. Implementasi model kinetika titik untuk simulator PLTN PWR 1000. Prosiding Seminar Nasional ke-17 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir. BATAN. Bandung; 2011.
3. Petrangeli G. Nuclear Safety. Elsevier Butterworth-Heinemann. Burlington. UK; 2006.
4. Segkal B. R. Nuclear Reactor safety in light water reactors. Academic Press. San Diego. USA; 2012.
5. USAEC. Report on an Advisory Task Force. USAEC Report TID-24226. US Atomic Energy Commission; 1968.
6. US-NRC. Acceptance criteria for emergency core cooling systems for light-water nuclear power reactors. General Design Criteria for Nuclear Power Plants. 10 CFR 50.46. update March 01 2013. US Nuclear Regulatory Commission; 2013.
7. US-NRC. Acceptance criteria for emergency core cooling systems for light-water nuclear power reactors. General Design Criteria for Nuclear Power Plants. 10 CFR 50. US Atomic Energy Commission; 1971.
8. Seiler J.M. Analytical model for CHF in narrow gaps on plates and in hemispherical geometries. Nuclear Engineering and Design No.236. 2006; 2211-2219.
9. Su G.H. et al. Theoretical calculation of annular upward flow in a narrow annuli with bilateral heating. Journal of Nuclear Engineering. 2003; 225: 219-247.
10. Sudo Y. and Kaminaga M. A CHF characteristics for downward flow in a narrow vertical rectangular channel heated from both side. International Journal of Multiphase Flow. 1989. 15(5):755-766.
11. Lu D.H. et al. Study of CHF in thin rectangular channels and evaluation of its empirical correlation. Journal of China Nuclear Science Engineering. 2004; 24(3):242-248.
12. Huang J. et al. Numerical study on effect of gap width of narrow rectangular channel on critical heat flux enhancement. Journal of Nuclear Engineering. 2009; 239(2):320-326.
13. Centrawedarma I.B. dkk. Analisis pengaruh temperatur awal plat terhadap karakteristik rewetting dalam celah sempit vertikal untuk kasus bilateral heating. Prosiding seminar Penelitian dan Pengelolaan perangkat Nuklir. BATAN. Yogyakarta; 2011.
14. Juarsa M. dkk. Penelitian Eksperimental

- Perpindahan Panas pada Celah Sempit Anulus: Konstruksi dan Pengujian Alat. Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah. 2007; 10(2).
15. Chiang J.S.C. et al. Pressurized Water Reactor (PWR) hot-leg streaming. Part 1: Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations. Journal of Nuclear Engineering. 2010; 241(5):1768-1775.
16. Kao M. et al. CFD Analysis of PWR core top and reactor vessel upper plenum internals subdomain models. Journal of Nuclear Engineering. 2011; 241(10); 4181-4193.
17. Subekti M. dan ISNAINI D. Kajian desain termohidrolika sub-kanal PLTN-PWR untuk mitigasi SBLOCA dengan pemanfaatan teknik CFD. Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir. BAPETEN. Jakarta; 2010.
18. Subekti M. dkk. Verifikasi perhitungan suhu luaran teras menggunakan kode FLUENT 6.3 pada PLTN tipe AP1000. Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir III. BATAN- Universitas Sultan Agung Tirtayasa. ISSN 1979-1208. Jakarta; 2010.
19. Yakhot V. and Orszag S.A. Renormalization group analysis of turbulence: I. Basic Theory. Journal of Science Computing. 1986; 1: 1-51;.

