

ANALISIS SENSITIVITAS TURBULENSI ALIRAN PADA KANAL BAHAN BAKAR PWR BERBASIS CFD

Endiah Puji Hastuti
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir
Gedung 80 Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang 15310
endiah@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS SENSITIVITAS TURBULENSI ALIRAN PADA KANAL BAHAN BAKAR PWR BERBASIS CFD. Turbulensi aliran pendingin pada proses perpindahan panas berfungsi untuk meningkatkan nilai koefisien perpindahan panas, tidak terkecuali aliran dalam kanal bahan bakar. Program CFD (*CFD=computational fluid dynamics*), FLUENT adalah program komputasi berbasis elemen hingga (*finite element*) yang mampu memprediksi dan menganalisis fenomena dinamika aliran fluida secara teliti. Program perhitungan CFD dipilih dalam penelitian ini karena selain akurat juga dapat memberikan visualisasi dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk memahami karakteristik perpindahan panas, massa dan momentum dari dinding rod bahan bakar ke pendingin secara visual, pada medan temperatur, medan tekanan, dan medan energi kinetika pendingin, sebagai fungsi dinamika aliran di dalam kanal, pada kondisi tunak dan transien. Analisis dinamika aliran pada kanal bahan bakar PWR berbasis CFD dilakukan dengan menggunakan sampel data reaktor PWR dengan daya 1000 MWe dengan susunan bahan bakar 17x17. Untuk menguji sensitivitas persamaan aliran yang sesuai dengan model aliran turbulen pada kanal bahan bakar dilakukan pemodelan dengan menggunakan persamaan k -omega (κ - ω), k -epsilon (κ - ϵ), dan Reynold *stress* model (*RSM*). Pada analisis sensitivitas aliran turbulen di dalam kanal digunakan model mesh *hexahedral* dengan memilih tiga geometri sel yang masing masing berukuran 0,5 mm; 0,2 mm dan 0,15 mm. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada analisis kondisi tunak (*steady state*), terdapat hasil yang mirip pada model turbulen κ - ϵ standard dan κ - ω standard. Pengujian terhadap kriteria *Dittus Boelter* untuk bilangan *Nusselt* menunjukkan bahwa model *Reynold stress model* (*RSM*) direkomendasikan. Analisis sensitivitas terhadap geometri mesh antara sel yang berukuran 0,5 mm, 0,2 mm dan 0,15 mm, menunjukkan bahwa geometri sel sebesar 0,5 mm telah mencukupi. Aliran turbulen berkembang penuh telah tercapai pada model LES dan DES, meskipun hanya dalam waktu singkat (3 s), model LES memerlukan waktu komputasi yang sangat lama dan membutuhkan memori yang besar.

Kata kunci: aliran turbulen, kanal PWR, CFD, tunak, transien

ABSTRACT

SENSITIVITY ANALYSIS OF TURBULENCE FLOW ON PWR FUEL CHANNEL BASED ON CFD. Coolant flow turbulence on heat transfer process serves to enhance the heat transfer coefficient, likewise flow in the fuel sub channel. Computational fluid dynamic program, FLUENT is a computational program based on finite element, that is able to predict and analyze the dynamics of fluid flow phenomena, accurately. CFD calculation program is selected in this study because of its accurately and it also can provide good visualization. Purpose of this research was to understand the characteristics of heat transfer, mass and momentum of the fuel rod to the coolant visually on: the temperature field, pressure field, and the kinetic energy field, as a function of the flow dynamics within fuel channel, on steady state and transient condition. Analysis of flow dynamics in the fuel channel base on CFD was done by using the PWR sample data with reactor power of 1000 MWe on 17x17 array of fuel. To examine the sensitivity of the flow equation in accordance with the model of turbulent flow on fuel channel, the turbulence equation model of k -omega (κ - ω), k -epsilon (κ - ϵ), and Reynolds stress model (*RSM*) for steady state was used, while for transient turbulence model DES and LES are applied. In the sensitivity analysis of turbulent flow, hexahedral mesh model of three cell geometry each are 0.5 mm, 0.2 mm and 0.15 mm, was selected. The analysis shows that there are similar results of turbulent model κ - ϵ and κ - ω standard, on steady state analysis. Comparing with *Dittus Boelter* criteria for *Nusselt* number, the Reynolds stress model (*RSM*) is recommended. Sensitivity analysis of mesh geometry between cell size 0.5

mm, 0.2 mm and 0.15 mm, indicating that the cell size of 0.5 mm was sufficient. Developed flow already reached on DES and LES model, however only for short time (3 seconds) for transient condition. LES model need very long computation time and big memory.

Key words: turbulence flow, PWR fuel channel, CF, steady state, transient

PENDAHULUAN

Turbulensi aliran pendingin pada proses perpindahan panas berfungsi untuk meningkatkan nilai koefisien perpindahan panas, tidak terkecuali aliran dalam kanal bahan bakar. Aliran turbulen dikenali dengan adanya medan kecepatan yang berfluktuasi. Fluktuasi kecepatan tersebut membawa berbagai besaran seperti momentum, energi, konsentrasi partikel, sehingga besaran tersebut juga ikut berfluktuasi. Fluktuasi tersebut dapat terjadi pada skala kecil dan mempunyai frekuensi yang tinggi, sehingga terlalu rumit dan berat untuk dihitung secara langsung pada perhitungan rekayasa praktis. Oleh karena itu persamaan terkait dapat dirata-ratakan atau dimanipulasi untuk menghilangkan fluktuasi skala kecil. Dengan demikian, persamaan persamaan tersebut dapat lebih mudah untuk dipecahkan, dan dibutuhkan model turbulensi untuk menentukan variabel variabel tersebut [1].

Untuk mengetahui karakteristik dinamika fluida di dalam kanal pendingin bahan bakar tipe PWR, di dalam penelitian ini dilakukan analisis turbulensi di dalam kanal bahan bakar tipe PWR menggunakan program CFD (*computational fluid dynamics*), FLUENT. CFD adalah program komputasi berbasis elemen hingga (*finite element*) yang mampu memprediksi dan menganalisis fenomena dinamika aliran fluida secara teliti [2].

Analisis kanal bahan bakar teras reaktor daya tipe air ringan pada umumnya menggunakan program COBRA (*Code of bundle rod array*), dimana program ini pada umumnya disesuaikan dengan model kanal dan bahan bakar yang dibuat oleh masing masing vendor reaktor. Program perhitungan CFD dipilih dalam penelitian ini karena selain akurat juga dapat memberikan visualisasi dengan baik. Meskipun program CFD diklaim cukup teliti, akan tetapi hal tersebut sangat bergantung pada tipe pemodelan dan persamaan yang dipilih pada kasus yang akan dianalisis, untuk itu maka diperlukan pembandingan dengan data yang akurat dari hasil perhitungan lain.

Penelitian mengenai turbulensi aliran pada kanal PWR pada kondisi tunak telah dilakukan oleh Endiah dkk [3], berdasarkan hasil analisis tersebut kemudian dielaborasi untuk analisis turbulensi transien. Mengingat bahwa publikasi tersebut hanya menjelaskan hasil penelitian secara ringkas (*extended abstract*), maka paper ini bertujuan untuk memahami karakteristik perpindahan panas, massa dan momentum dari dinding bahan bakar ke pendingin secara visual, pada medan temperatur, medan tekanan, dan medan energi kinetika pendingin, sebagai fungsi dinamika aliran di dalam kanal secara lengkap dan sekaligus menyampaikan hasil pengembangan penelitian tersebut pada model turbulensi transien.

Analisis dinamika aliran pada kanal bahan bakar PWR berbasis CFD dilakukan dengan menggunakan sampel data reaktor PWR dengan daya 1000 MWe dengan susunan bahan bakar 17x17[4]. Data tersebut kemudian diolah menjadi data input program. Pada analisis sensitivitas turbulensi pendingin menggunakan program CFD FLUENT ini dipilih variabel ukuran mesh, dan variabel pemilihan persamaan turbulen. Perbandingan bilangan Nusselt yang diperoleh dengan kriteria *Dittus Boelter* digunakan sebagai parameter pembandingan hasil analisis, yang selanjutnya digunakan sebagai salah satu dasar pemilihan model analisis pada turbulensi transien.

TEORI DAN PEMODELAN

1. Aliran Turbulen

Terdapat dua moda dinamika aliran fluida yang dikenal yaitu aliran laminar, dan aliran turbulen yang pada umumnya dikenal dari bilangan Reynold yang dimilikinya, nilai batas diantara keduanya disebut aliran transisi. Aliran akan menjadi turbulen jika gaya viskos lokal mampu diatasi oleh gaya inersia, gaya apung, gaya sentrifugal atau gaya lainnya. Gaya viskos inilah yang berperan terhadap kestabilan aliran. Aliran yang stabil kemudian disebut sebagai aliran laminar. Pada saat gaya inersia dan gaya badan (*body force*) cukup besar dibandingkan gaya viskos, maka kedua gaya ini akan memperbesar gangguan-gangguan acak yang ada pada setiap aliran untuk kemudian tumbuh dan menjadi tidak stabil dan tidak linear, berinteraksi satu dengan yang lain dan bergabung menjadi gerakan acak yang tidak beraturan. Pada saat tersebut aliran kemudian berubah menjadi turbulen. Kriteria aliran disebut laminar atau turbulen adalah dengan melihat harga bilangan Reynolds (Re) dan Rayleigh (Ra) atau Grashof (Ge). Bilangan Re merupakan perbandingan dari gaya inersia dan gaya viskos. Harga dari batas bilangan Re dan Ra untuk suatu aliran akan menjadi turbulen dapat ditentukan secara empiris.

2. Variabel Pemilihan Model Persamaan Aliran Turbulen berbasis CFD

2.1. Turbulensi Aliran Kondisi Tunak

Computational Fluid Dynamics (CFD) memiliki kemampuan untuk menghitung aliran pada model 3-dimensi yang kompleks. Untuk memahami karakteristik dinamika fluida di dalam sub kanal PWR digunakan metode CFD untuk mengevaluasi karakteristik aliran 3-dimensi. Program CFD menyediakan beberapa model penyelesaian untuk aliran turbulen. Untuk menguji sensitivitas persamaan aliran yang sesuai dengan model aliran turbulen pada kanal bahan bakar maka dilakukan pemodelan dengan menggunakan persamaan k-omega ($\kappa-\omega$), k-epsilon ($\kappa-\epsilon$), dan Reynold stress model (RSM), .

(a) Model standard $\kappa - \epsilon$

Model standard $\kappa - \epsilon$ merupakan model semi empiris berbasis model persamaan transport untuk energi kinetik turbulen (k) dan laju disipasi (ϵ), yang dikembangkan oleh Launder & Spalding. Dalam model ini diasumsikan bahwa aliran telah berkembang penuh penuh (*fully turbulent*) dan efek viskositas molekular diabaikan. Energi kinetik turbulen κ , dan laju disipasi ϵ , diperoleh dari persamaan transport berikut ini[2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

dan

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2)$$

Dalam persamaan tersebut G_k menyatakan pembentukan energi kinetik turbulen dengan gradien kecepatan rerata. G_b adalah terbentuknya energi kinetik turbulen karena gaya apung (*bouyancy*). Y_M Menyatakan kontribusi fluktuasi dilatasi di dalam aliran turbulen tak mampat terhadap laju disipasi secara keseluruhan. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, dan $C_{3\epsilon}$ adalah konstanta, σ_k dan σ_ϵ masing masing adalah bilangan turbulen Prandtl untuk k dan ϵ , sedangkan S_k dan S_ϵ

didefinisikan sebagai suku sumber. $C1\varepsilon = 1,44$, $C2\varepsilon = 1,92$, $C\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$ dan $\sigma\varepsilon = 1,3$. Model κ - ε standard digunakan untuk bilangan Reynold yang tinggi.

(b) Modal standard κ - ω

Model standar κ - ω berasal dari model Wilcox κ - ω , yang dimodifikasi untuk memperhitungkan adanya efek bilangan Reynolds yang rendah, fluida mampat, dan adanya aliran gesek. Model standard κ - ω merupakan model empiris yang dibuat berdasarkan persamaan transport untuk energi kinetik turbulen (κ) dan laju disipasi spesifik (ω), yang disebut juga sebagai rasio ε terhadap nilai κ . Energi kinetik turbulen, κ , dan laju disipasi spesifik, ω , diperoleh dari persamaan transport berikut ini [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \tag{3}$$

dan

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \tag{4}$$

Dalam persamaan tersebut, G_k menyatakan pembentukan energi kinetik turbulen karena gradien kecepatan merata, G_ω yang dinyatakan dengan generasi ω . Γ_k dan Γ_ω masing masing menyatakan difusivitas efektif κ dan ω . Y_k dan Y_ω menyatakan disipasi κ dan ω karena adanya turbulensi. S_k dan S_ω adalah suku sumber. Model ini dapat diaplikasikan pada aliran dalam saluran maupun aliran bebas geseran (*free shear flow*).

(c) Reynold Stress Model

Model ini mendekati persamaan Navier Stokes dengan menyelesaikan persamaan transport untuk tegangan Reynolds bersama sama dengan persamaan laju disipasi. Model ini dijabarkan dengan teknik statistika, dalam bentuk yang similar dengan model standard κ - ε , tetapi lebih teliti^[1,2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \tag{5}$$

dan

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \tag{6}$$

Dalam persamaan di atas, G_k menyatakan pembentukan energi kinetik turbulen karena adanya gradien kecepatan merata. G_b adalah pembentukan energi kinetik turbulen karena adanya gaya apung (*buoyancy*). Y_M menyatakan kontribusi fluktuasi dilatasi dalam aliran turbulen pada fluida tak mampat terhadap laju disipasi keseluruhan. Kuantitas α_k dan α_ε masing masing adalah bilangan *inverse* efektif Prandtl untuk k dan ε . S_k dan S_ε didefinisikan sebagai suku sumber.

(d) Model Spalart Allmaras, DES dan LES

Model Spalart Allmaras adalah model turbulensi dengan satu persamaan yang menyelesaikan model persamaan transport untuk viskositas kinematis turbulen. Model dasar persamaan ini efektif untuk bilangan Reynolds yang kecil. Model unsteady *Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)* digunakan pada daerah di dekat dinding, sementara versi berbeda dengan model yang sama digunakan untuk daerah yang jauh dari dinding. Model DES sering disebut sebagai model hybrid *large eddy simulation* LES/RANS untuk simulasi aerodinamika eksternal. Di dalam FLUENT, model DES didasarkan pada model Spalart-Allmaras, model realizable κ - ϵ model, dan SST κ - Ω model. Model standard Spalart-Allmaras digunakan untuk jarak terdekat dengan dinding terdekat, yang berperan dalam menentukan terbentuknya turbulensi. Pada daerah tersebut model DES mengembalikan model subgrid. Secara konsep model *large eddy simulation* (LES) berada diantara pendekatan *Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)* dan *Direct Numerical Simulation* (DNS). LES dapat menyelesaikan aliran dengan pusaran yang besar secara langsung, sedangkan untuk pusaran yang kecil harus dimodelkan. DNS tidak memerlukan pemodelan akan tetapi DNS tidak sesuai untuk penyelesaian masalah reaktor praktis yang mempunyai arus pusaran dengan bilangan Reynolds yang tinggi. Biaya yang diperlukan untuk DNS untuk menyelesaikan seluruh rentang skala sebanding dengan Re_t^3 , di mana Re_t adalah bilangan Reynolds turbulen, untuk bilangan Reynolds yang tinggi, biaya perhitungan menjadi mahal.

Alasan di balik LES dapat diringkas sebagai berikut :

- Momentum, massa, energi, dan skalar pasif lain diangkut kebanyakan oleh pusaran besar.
- Pusaran besar lebih masalah tergantung. Mereka ditentukan oleh geometri dan kondisi batas aliran yang terlibat.
- Pusaran kecil kurang bergantung pada geometri, cenderung lebih isotropik, dan akibatnya lebih universal.
- Kesempatan untuk menemukan model turbulensi universal lebih tinggi untuk pusaran kecil.

Menyelesaikan hanya pusaran besar memungkinkan seseorang untuk menggunakan lebih kasar dan mesh lebih besar kali-langkah ukuran dalam LES daripada di DNS. Namun, masih membutuhkan jerat LES substansial lebih halus daripada yang biasanya digunakan untuk perhitungan rans.

3. Sensitivitas Pembentukan Mesh (*Mesh Generation Sensitivity*)

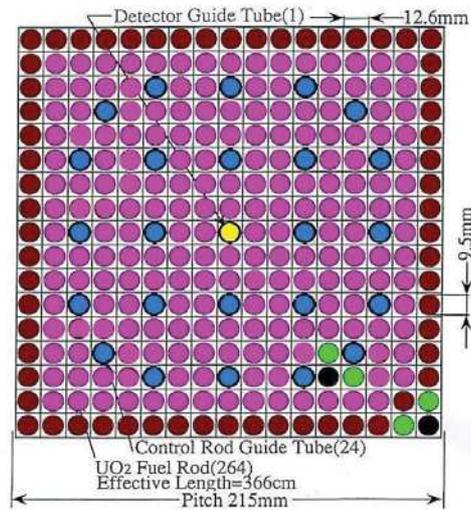
Simulasi FLUENT untuk menganalisis dampak dari aliran fluida dan perpindahan panas pada karakteristik kanal bahan bakar harus didukung dengan pemilihan model persamaan dan pemilihan mesh yang tepat. Akurasi hasil perhitungan pada program elemen hingga, seperti FLUENT terkait dengan pemilihan mesh dimana mesh berfungsi untuk pendekatan kondisi batas simetri yang diterapkan pada batas-batas kanal. Kombinasi kedua parameter ini diperlukan untuk mengurangi waktu yang setara dengan biaya dalam mencapai hasil optimum. Dalam analisis ini segmen kecil kanal dipelajari dengan memilih kondisi batas yang sesuai[5]. Gambit sebagai modul pra-prosesor digunakan untuk menggenerasi geometri *mesh*. Pada analisis sensitivitas aliran turbulen di dalam kanal digunakan model *hexahedral* dengan memilih tiga jenis mesh yang masing masing berukuran 0,5 mm; 0,2 mm and 0,15mm. Ukuran mesh ini diterapkan pada ketiga model perhitungan, dampak ukuran mesh pada waktu komputasi dan akurasi hasil perhitungan kemudian dievaluasi.

4. Input data

Data model perhitungan diambil dari PWR Mitsubishi 1000MWe dengan ukuran kisi 17x17.

Tabel 1. Data model perhitungan[4]

PARAMETER	NILAI	
Daya reaktor	2988	MW
Tekanan referensi	149,1	MPa
Laju alir massa pendingin inlet	14000	kg/s
Kecepatan pendingin inlet	1300	MJ/kg
Fluks panas	8,216E+05	W/m ²
Laju alir massa/perangkat	72,54	kg/s
Laju pendingin per subkanal inlet	0,2510	kg/s
Temperatur inlet	286°C	559K
Temperature outlet	325°C	598K
Ukuran radial perangkat bahan bakar	0,215	m
Panjang vertikal	4.267	m
Susunan bahan bakar	17x17	
Jumlah batang bahan bakar	264	
Jumlah subkanal	25	
Diameter batang bahan bakar	8,001E-03	m
Luas batang bahan bakar per perangkat	5,025E-05	m ²
Daya per perangkat	11,32	MW
Daya per batang bahan bakar	0,0440	MW
Fluks panas per batang bahan bakar	0,8216	MW/m ²

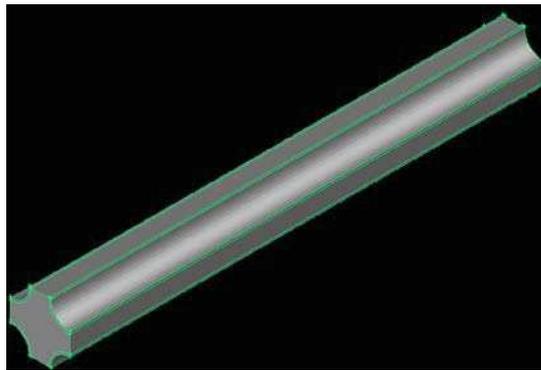


Gambar 1. Konfigurasi batang bahan bakar dalam satu perangkat bahan bakar PWR 17x17

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kanal bahan bakar reaktor PWR yang tersusun dari 4 batang bahan bakar digambarkan secara maya menggunakan program GAMBIT. Bagian sub kanal yang bersentuhan dengan kelongsong bahan bakar didefinisikan sebagai dinding (sumber panas) yang masing masing memberikan kontribusi $\frac{1}{4}$ fluks panas per satuan panjang bahan bakar. Agar visualisasi dinamika fluida di dalam kanal tampak jelas dan proporsional, maka model kanal tidak dibuat sepenuhnya, mengingat perbandingan geometri antara panjang bahan bakar dan diameter sangat besar, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Pemodelan dekat dinding seperti yang dilakukan pada model sub kanal ini merupakan hal yang penting dan perlu dicermati untuk memperhitungkan terjadinya penurunan tekanan, separasi aliran dan lapisan batas yang bergantung pada akurasi prediksi gaya geser pada dinding tersebut.

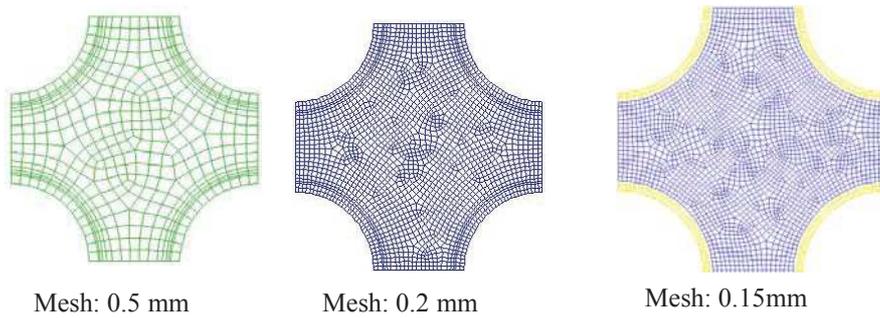


Gambar 2. Model kanal bahan bakar menggunakan GAMBIT

Untuk melakukan penghalusan *mesh* secara sistematis setidaknya diperlukan dua tahap pembandingan, yang bertujuan untuk mengurangi kesalahan diskritisasi[4], dalam analisis sensitivitas ini dilakukan tiga tahap pembentukan mesh yang dimulai dari mesh kasar hingga melipatgandakan sel menjadi lebih halus ke arah x, y dan z. Penyempurnaan geometri mesh menjadi lebih halus diperlukan untuk mengevaluasi konvergensi dari simulasi dengan menggunakan kecenderungan variabel target. Gambar tampang lintang kanal dengan ukuran geometri mesh masing masing 0,5 mm, 0,2 mm dan 0,15 mm ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan jumlah sel yang dihasilkan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Generasi *mesh* yang dihasilkan

No. Model	Ukuran <i>mesh</i> (mm)	$\Sigma Cell$	$\Sigma Nodes$	$\Sigma Faces$
1.	0,5 mm	99.400	122.104	315.856
2.	0,2 mm	1.113.500	1.242.208	3.468.780
3.	0,15 mm	3.160.246	3.392.404	9.710.750



Gambar 3. Dimensi kehalusan *mesh* pada tampang lintang kanal bahan bakar

Untuk mengurangi terjadinya kesalahan pemotongan (*truncation error*) dan memperoleh penyelesaian yang konvergen maka analisis ini memilih menggunakan presisi ganda (*double precision*).

Hasil perhitungan dinamika pendingin pada kanal PWR pada kondisi tunak sebagai fungsi pemilihan persamaan turbulen antara model $\kappa - \epsilon$ model, model $\kappa - \omega$, dan model RSM dengan geometri mesh sebesar 9,5 mm, 0,2 mm dan 0,15 mm ditampilkan pada Tabel 3. Dari Tabel 3, terlihat bahwa model RSM memberikan hasil yang lebih stabil pada variabel geometri mesh, dibandingkan dengan model standard $\kappa - \epsilon$ dan standard $\kappa - \omega$, hal ini disebabkan pemilihan geometri mesh sebesar 0,5 mm telah cukup halus, sehingga pemilihan geometri yang lebih kecil tidak memberikan perubahan yang signifikan. Pada analisis visualisasi dinamika pendingin di dalam kanal dipilih hasil perbandingan ketiga model persamaan di atas dengan geometri mesh 0,5 mm seperti ditampilkan pada Tabel 4. Nilai negatif (minus) pada gradien tekanan dan tekanan menunjukkan arah aliran ke bawah (*downward*).

Tabel 3. Rangkuman hasil perhitungan dinamika pendingin dengan berbagai persamaan dan *mesh*

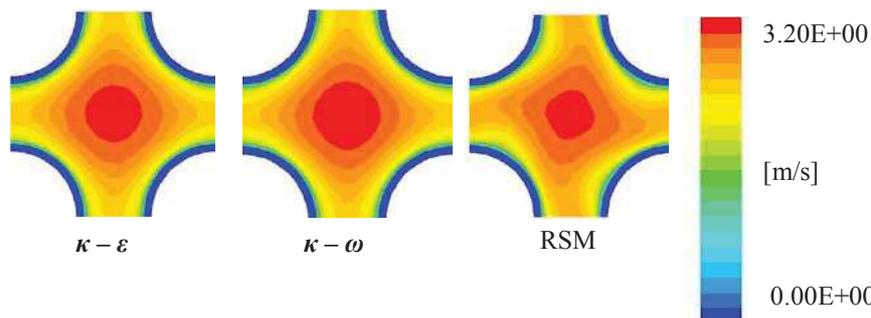
Hasil perhitungan parameter turbulensi pendingin					
Model Persamaan & <i>mesh</i>	Energi kinetik turbulensi (m^2/s^2)	Temperatur (K)	Gradien tekanan (Pa/m)	Tekanan (Pa)	Kecepatan alir (m/s)
<i>standard $\kappa - \epsilon$</i>					
0,5 mm	0,0691	636,82	-5696	-0,0685	3,0688
0,2 mm	0,0893	636,11	-8697	-3,4846	3,1303
0,15 mm	0,0716	643,44	-5696	-0,0685	3,0749
<i>standard $\kappa - \omega$</i>					
0,5 mm	0,0652	629,44	-6186	-0,0684	3,0917
0,2 mm	0,1081	620,92	-10977	-3,3812	3,1790
0,15 mm	0,0936	628,24	-6186	-0,0684	3,1493
<i>RSM</i>					
0,5 mm	0,0573	638,26	-6003	-21,2948	2,9708
0,2 mm	0,0689	643,91	-10977	-17,1766	3,0341
0,15 mm	0,0593	651,39	-6003	-21,2948	2,9923

Model Persamaan & mesh	Jumlah sel	Temperatur (K)	Gradien tekanan (Pa/m)	Tekanan (Pa)	Kecepatan alir (m/s)
<i>DES</i>					
PISO-20.000	99.400	694		-7,06	3,00
PISO-40.000	99.400	638		-6,77	3,00
<i>Spalart Almaras</i>	1.113.500	646	-10977	-25,1	3,53
<i>LES</i>					
PISO-20.000	99.400	720		-20,5	3,03
PISO-40.000	99.400	684		-18,9	3,03
<i>Smagorinsky Lilly</i>	1.113.500	785	-2887	-77,03	3,87

Tabel 4. Hasil perhitungan dinamika fluida dengan geometri mesh optimum 0,5 mm

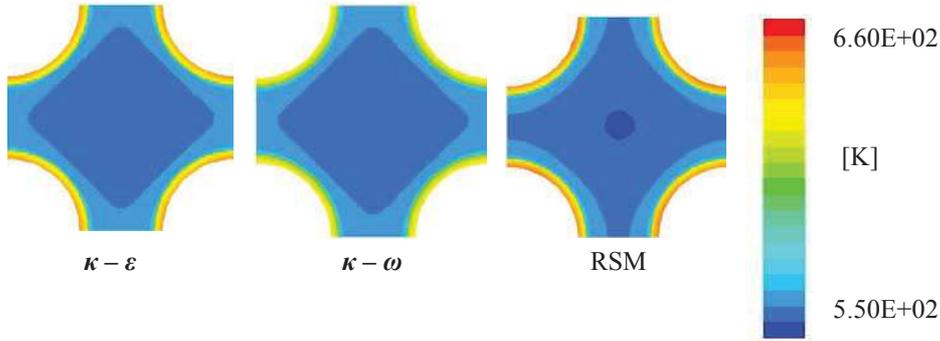
Hasil perhitungan parameter turbulensi pendingin					
Model Persamaan & Mesh	Energi kinetik turbulensi (m^2/s^2)	Temperatur (K)	Gradien tekanan (Pa/m)	Tekanan (Pa)	Kecepatan alir (m/s)
<i>standard $\kappa - \epsilon$</i>	0,0691	636,82	-5696	-0,0685	3,0688
<i>standard $\kappa - \omega$</i>	0,0652	629,44	-6186	-0,0684	3,0917
RSM	0,0573	638,26	-6003	-21,2948	2,9708
DES					
PISO-20.000	0,1538	694	-	-7,06	3,00
DES					
PISO-40.000	0,0019	638	-	-6,77	3,00
LES					
PISO-20.000	0,0865	720	-	-20,5	3,03
LES					
PISO-40.000	0,0814	684	-	-18,9	3,03

Visualisasi untuk masing masing model perhitungan pada parameter turbulensi aliran ditampilkan pada Gambar 4 - 7.



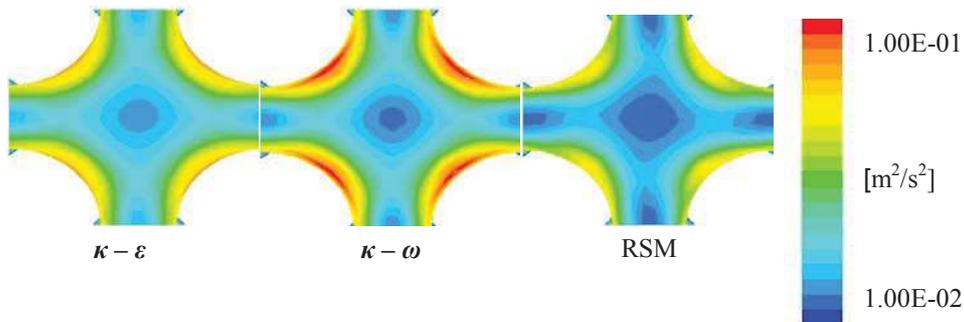
Gambar 4. Perbandingan pola aliran berdasarkan perbedaan model turbulensi.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa pola aliran pada model turbulen standard $\kappa-\epsilon$ dan $\kappa-\omega$ memberikan hasil yang mirip dibandingkan dengan model RSM. Hal ini disebabkan karena persamaan aliran telah mencapai kondisi berkembang penuh (*fully turbulent*), dan efek dari viskositas molekular diabaikan. Sebaliknya pada *reynolds stress model*, terdapat efek putaran (*swirling*) yang divisualisasi dengan lekukan kurva aliran di dalam kanal, fenomena *swirl* sendiri adalah transien akan tetapi perhitungan di dalam model RSM adalah tunak[6,7]. Meskipun demikian ketiga model persamaan turbulen tersebut menunjukkan bahwa kecepatan aliran tertinggi terdapat di tengah kanal karena lebih bebas dari gaya gesek.



Gambar 5. Perbandingan pola temperatur berdasarkan model turbulensi.

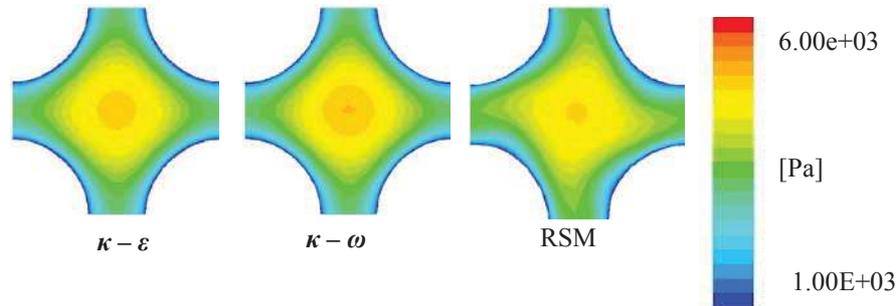
Model dan pola kecepatan aliran pendingin terkait dengan efek temperatur di dalam kanal secara periodik ditunjukkan pada Gambar 5. Pola distribusi temperatur pada model persamaan $\kappa-\epsilon$ standard dan $\kappa-\omega$ standard menunjukkan pola yang mirip, kedua model persamaan tersebut kurang sensitif terhadap aliran junction antar kanal, akibatnya temperatur rendah seolah olah terisolasi di bagian tengah kanal. Pada model RSM distribusi temperatur terlihat homogen mengikuti kontur kelongsong dan mendapat pengaruh aliran fluida dari kanal di sekelilingnya. Ketiga model persamaan di atas memberikan pola distribusi temperatur yang sama dimana area terdingin adalah yang jauh dari dinding kelongsong atau di bagian tengah kanal.



Gambar 6. Perbandingan energi kinetik turbulensi

Energi kinetik turbulen pada model $\kappa-\epsilon$ standard memberikan nilai yang menurun secara beraturan dari sisi luar ke bagian tengah kanal, yang disebabkan adanya efek fluks panas dari permukaan batang bahan bakar dan menurun secara linier melalui lapisan pendingin ke bagian tengah kanal. Kondisi serupa terjadi pada model $\kappa-\omega$ standard, hanya saja gradasi

penurunan energi kinetik ini lebih halus karena menggunakan persamaan pendukung yang lebih kompleks. Energi kinetik turbulen pada model RSM terdistribusi dengan mendapat pengaruh sumbangan energi kinetik aliran pendingin dari kanal penghubung di sebelahnya.

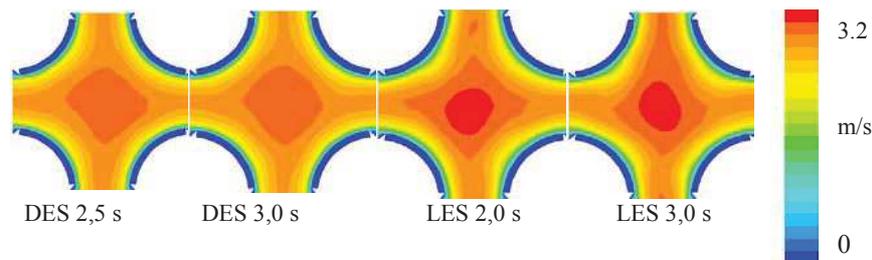


Gambar 7. Perbandingan kontur tekanan dinamis

Tekanan dinamis di dalam kanal akan memberikan pola laju pendingin yang sama di dalam kanal. Laju alir pendingin secara periodik sebesar 0,25 kg/s. Pola tekanan dinamis yang tervisualisasi menunjukkan bahwa adanya friksi aliran pada dinding batang bahan bakar menyebabkan tekanan membesar dari pinggir ke tengah kanal. Fenomena ini terjadi pada ketiga model persamaan turbulen, pada model RSM tekanan dinamis dipengaruhi efek putaran aliran.

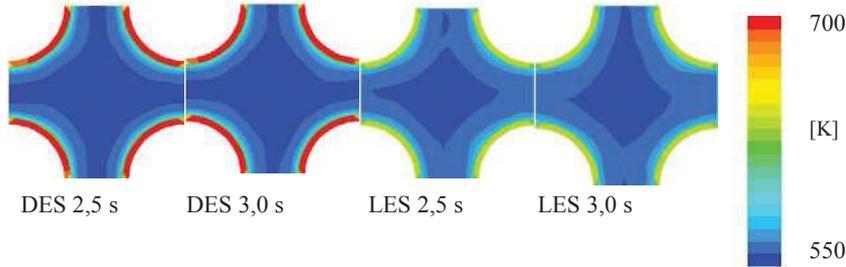
Transien Turbulen Menuju Aliran Berkembang Penuh

Untuk menganalisis perpindahan panas menggunakan model turbulen DES dan LES pada kondisi *unsteady* (transien), diperlukan pengaturan sampling data untuk statistika waktu (*time statistics*) dan mendefinisikan iterasi maksimum per *time step*[8]. Nilai rerata pada aliran berkembang penuh (*fully developed flow*) harus diidentifikasi untuk memperoleh data nilai rerata pada DES dan LES, dari hasil perhitungan diperoleh ukuran *time step* (s) 2,5 E-05 dengan jumlah *time step* sebesar 40.000/ s. Maksimum iterasi yang dapat dilakukan untuk DES dan LES masing masing sebesar 2,5 s dan 3,0 s, sedangkan pada pola tekanan statis rerata *running time* maksimum hanya tercapai selama masing masing 0,5 s dan 1,0 s karena sulitnya mencapai kondisi aliran berkembang penuh.



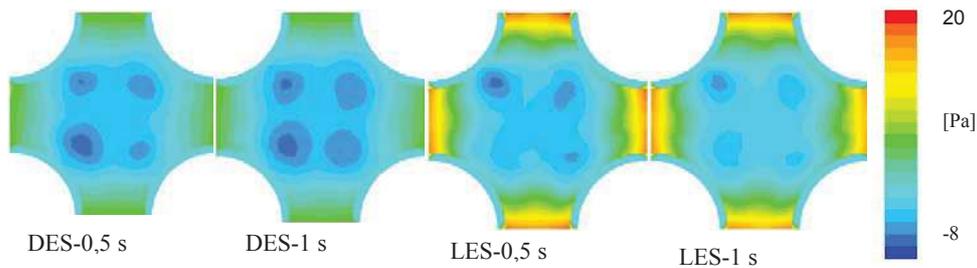
Gambar 8. Perbandingan pola kecepatan menggunakan model persamaan turbulensi LES dan DES

Pada kondisi unsteady DES tampak kecepatan aliran telah mencapai kondisi berkembang penuh, hal ini terutama di dekat dinding, sementara itu pola kecepatan pada LES masih berlangsung secara transien. Meskipun demikian kedua model tersebut menampakkan bahwa kecepatan maksimum terjadi di pusat subkanal.



Gambar 9. Perbandingan pola temperatur menggunakan model turbulen LES dan DES

Pola temperatur di dekat dinding pada DES menunjukkan adanya lapisan tipis temperatur yang terbentuk secara merata di sekeliling batang sub kanal, berdasarkan pola tersebut fluida di pusat sub kanal memiliki temperatur yang sama dengan kondisi *inlet*. Sementara pada LES waktu tersebut tidak cukup untuk mencapai kondisi aliran berkembang penuh.



Gambar 10. Perbandingan pola tekanan statis rerata menggunakan model turbulen LES dan DES

Pada pola tekanan statis (Gambar 10) menggunakan model turbulen LES dan DES tercapai dalam waktu 0,5 s dan 1s. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa nilai tertinggi terjadi pada daerah batas subkanal satu dengan lainnya, pola tersebut terjadi pada kedua model.

Secara teoritis memungkinkan menyelesaikan seluruh skala turbulen menggunakan model persamaan LES, akan tetapi model LES membutuhkan daya komputasi yang jauh lebih besar dan tidak praktis untuk aplikasi teknis secara umum seperti diperlihatkan pada Gambar 8 s/d Gambar 10. Selain itu, LES harus dijalankan dalam waktu yang cukup lama untuk memperoleh statistik aliran stabil yang dimodelkan, akibatnya biaya komputasi dalam pemodelan LES biasanya sangat tinggi dan membutuhkan memori (RAM) dan waktu CPU yang besar. Untuk aplikasi dalam industry mutlak diperlukan kinerja komputasi yang tinggi misalnya menggunakan komputasi paralel.

Perbandingan Hasil dengan Persamaan Dittus Boelter

Sensitivitas pemilihan model turbulen k-epsilon ($\kappa-\epsilon$), k-omega ($\kappa-\omega$), dan RSM, DES dan LES yang memberikan hasil pada program perhitungan FLUENT perlu diuji dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Dittus Boelter[3]. Nilai bilangan Nusselt berbagai ukuran mesh dan model perhitungan ditunjukkan pada Tabel 5 dan Gambar 11, terlihat bahwa model persamaan turbulen RSM memiliki kurva bilangan Nusselt yang paling dekat dengan Dittus Boelter baik dengan menggunakan model mesh geometri 0,5 mm, 0,2 mm maupun 0,15 mm (*mesh* 1,2,3). Fungsi *mesh* tidak berpengaruh pada bilangan Nusselt karena ketiga geometri menggunakan fungsi dinding (*wall*) yang sama. Model k-omega ($\kappa-\omega$) memberikan hasil mendekati RSM apabila menggunakan geometri mesh nomor 3, yang halus, dimana hal ini akan berdampak pada waktu komputasi yang sangat lama dan tidak efisien.

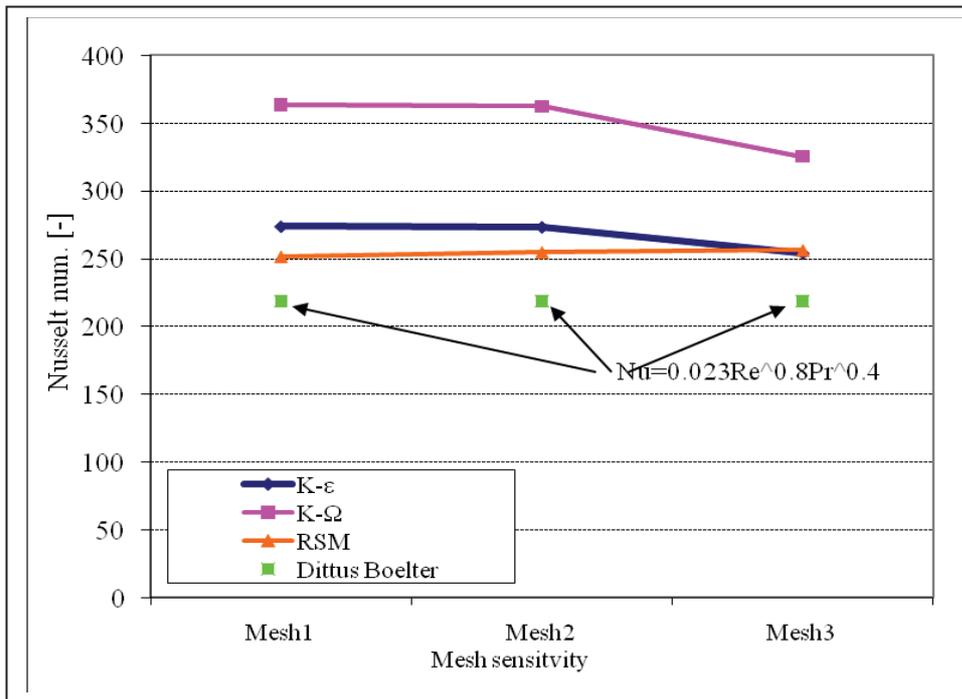
Model persamaan Reynold Stress terbukti dari analisis sensitivitas sebagai model yang paling memenuhi kriteria Dittus Boelter, hal ini sesuai karena:

- Model RSM memiliki suku tambahan di dalam persamaan ϵ yang secara signifikan meningkatkan ketelitian aliran yang terhalang secara tiba tiba.
- Efek putaran pada aliran turbulen telah diperhitungkan pada model RSM, persamaan ini meningkatkan ketelitian pada aliran berputar (*swirling flow*).
- Teori RSM dilengkapi dengan suatu persamaan analitis untuk bilangan *Prandtl* pada aliran turbulen, sedangkan model $\kappa-\epsilon$ standard menggunakan nilai konstan yang spesifik.
- Model $\kappa-\epsilon$ standard digunakan untuk bilangan Reynold yang tinggi, sementara teori RSM dilengkapi dengan persamaan diferensial analitis untuk aliran viskositas efektif yang menghitung efek bilangan Reynolds yang rendah, bergantung pada perlakuan yang dilakukan pada daerah di dekat dinding.

Fitur fitur di atas membuat model RMS lebih akurat dan handal untuk kelas aliran yang lebih luas daripada model $\kappa-\epsilon$ standard. Dengan demikian terbukti bahwa model RSM adalah model persamaan yang paling mendekati kondisi turbulen kondisi tunak, sedangkan model LES memerlukan waktu komputasi yang sangat lama dan membutuhkan memori yang besar (dalam analisis ini digunakan memori 20 GB dan 6 CPU).

Tabel 5. Nilai bilangan Nusselt pada berbagai geometri mesh dan model persamaan

	K- ϵ	K- ω	RSM	DES	LES	Dittus Boelter
Mesh1	273,86	363,54	251,69	128,84	220,86	218,78
Mesh2	273,46	362,54	254,86	-	-	218,78
Mesh3	254,17	325,55	256,28	-	-	218,78



Gambar 11. Model turbulen terhadap kriteria Dittus Boelter

KESIMPULAN

Hasil analisis sensitivitas turbulensi aliran pada kanal bahan bakar PWR memberikan kesimpulan bahwa pada analisis kondisi tunak (*steady state*), terdapat hasil yang mirip pada model turbulen $\kappa - \epsilon$ standard dan $\kappa - \omega$ standard. Pengujian terhadap kriteria Dittus Boelter untuk bilangan Nusselt menunjukkan bahwa persamaan *Reynold stress model* (RSM) direkomendasikan. Analisis sensitivitas terhadap geometri mesh antara sel yang berukuran 0,5 mm, 0,2 mm dan 0,15 mm, menunjukkan bahwa mesh yang halus membutuhkan biaya perhitungan yang lama dan memori komputer yang besar, dalam analisis ini ukuran sel sebesar 0,5 mm telah mencukupi. Aliran turbulen berkembang penuh telah tercapai pada model LES dan DES, meskipun hanya dalam waktu singkat (3 s), model LES memerlukan waktu komputasi yang sangat lama dan membutuhkan memori yang besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis sampaikan kepada Prof. Akira Yamaguchi dan Prof. Takeshi Takata dari universitas OSAKA - Japan, yang telah memberikan kesempatan penggunaan laboratorium dan bimbingan selama melakukan penelitian dalam program MEXT Japan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Firman Tuakia. Dasar Dasar CFD Menggunakan FLUENT. Penerbit Informatika Bandung; 2008.
2. Fluent Incorporated. CFD Modelling of Turbulent Flows. Fluids Review, TRN-98-004; 1998.
3. Endiah Puji Hastuti, Akira Yamaguchy, Takashi Takata. Comparative study of turbulence models on pwr fuel bundle thermal hydraulics using FLUENT code. AESJ (Atomic Energy Society of Japan) Seminar, Kouchi University Japan; 2008.
4. Mitsubishi 17x17 PWR data. Available from: URL http://www.neimagazine.com/journals/Power/NEI/September_2004/. Accessed January, 2011.
5. M. Imaizumi, T. Ichioka, M.Hoshi, H. Teshima, H.Kobayashi, T. Yokoyama. Development of CFD method to evaluate 3-D flow characteristic for PWR fuel assembly. Transactions of the 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT13), Escola de Engenharia-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre Brazil; 1995.
6. Mcclusky, H.L. Holloway, M.V. Conover, T.A. Beasley, D.E. Conner, M.E. and Smith III, L.D. Mapping of the lateral flow field in typical subchannels of a support grid with vanes. Journal of Fluids Engineering. 2003; 125: p. 987-996.
7. T. Mitsuhashi, T. Naitoh, M. Kubota, R. and Kataoka, I. Subchannel analysis of fluid dynamics behavior in PWR fuel assembly. GENES4/ANP2003, Kyoto, JAPAN, Sep. 15-19 (2003), paper 1162.
8. Andreani, M. et al. A benchmark exercise on the use of CFD codes for containment issues using best practice guidelines: A computational challenge, Nuclear Engineering and design. 2008: p.502-513.