

DAFTAR PUSTAKA

- Bejan, A., Kraus, A.D., 2003, "*Heat Transfer Handbook*" John Wiley & Sons Inc, Hoboken, New Jersey, 525-529.
- El-Wakil, M. M., 1971, "*Nuclear Heat Transport*," International Textbook Company, Scranton, 94.
- IAEA, 1994, "*Safety Series 116 - Design of Spent Fuel Storage Facilities*" International Atomic Energy Agency, Vienna, 9, 16
- Incropera, F.P. dan DeWitt, D.P., 1996, "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer 4th ed*", John Wiley & Sons Inc., New York, 506-508.
- Kreith, F. dan Prijono, A., 1997 "Prinsip-Prinsip Perpindahan Panas", Erlangga, Jakarta,
- Lee, J.C., Choi, W.S., Bang, K.S., Seo, K.S., Yoo, S.Y., 2009, "*Thermal-fluid Flow Analysis and Demonstration Test of Spent Fuel Storage System*", Nuclear Engineering and Design, 239, 551-558
- Lienhard IV, J.H., Lienhard V, J.H., 2006, "*A Heat Transfer Textbook 3rd ed.*" Phlogiston Press, Cambridge, Massachussets, USA.
- Pond, R.B., Matos, J.E., 1996, "*Nuclear Mass Inventory, Photon Dose Rate and Thermal Decay Heat of Spent Research Reactor Fuel Assemblies Rev. 1*", Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, 6 – 8.
- Susilowati, E., Saiful, S., dan Dibyo, S., 1995, "Sistem Penyimpanan Bahan Bakar Bekas (SPB3) dengan Pendinginan Konveksi Alam, Tinjauan Aspek Keselamatan". Prosiding Seminar ke-3 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir PPTKR- PRSG, Serpong.
- Tuakia, F., 2008, "Dasar-Dasar CFD Menggunakan FLUENT", Informatika, Bandung, 133-134.
- Weech, M. E., Lee, Y.J., 1981, "*Heat Transfer in Spent Fuel Storage*", Nuclear Engineering and Design 67, North-Holland Publishing Company, 379-389

LAMPIRAN I

Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (IPSB3) – PTLR BATAN



LAMPIRAN II

A. Boundary condition yang digunakan dalam pemodelan

1. *Pressure outlet*

Kondisi batas ini dipakai pada sisi keluar fluida apabila data tekanan pada sisi keluar diketahui atau dapat diperkirakan mendekati nilai sebenarnya. Pada kondisi batas *pressure outlet* harus dimasukkan nilai tekanan statik, temperatur aliran balik (*backflow*), dan besaran turbulen aliran balik. Tekanan gage tersebut diinterpretasikan sebagai tekanan statik lingkungan dimana aliran fluida tersebut keluar. Apabila terjadi aliran balik (ada sebagian aliran fluida yang berbalik karena turbulensi dan masuk melalui sisi keluar) maka nilai tekanan gage tersebut juga berfungsi sebagai nilai tekanan gage pada inlet dan FLUENT menghitung berdasarkan nilai tersebut. Oleh karena itu, nilai tekanan gage tersebut harus benar atau mendekati keadaan yang sebenarnya agar kesulitan konvergensi dapat diminimalkan dan diperoleh hasil yang valid. Selain nilai tekanan gage, besaran turbulensi untuk aliran balik juga harus diperkirakan dengan baik. Aliran balik yang terjadi diasumsikan tegak lurus terhadap sisi keluar.

2. *Dinding (Wall)*

Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan. Pada aliran viskos, kondisi *no-slip* yang terjadi pada dinding adalah sebagai berikut :

- a. Kecepatan tangensial fluida pada dinding sama dengan kecepatan dinding, apabila dinding tidak bergerak maka kecepatan tangensial fluida pada dinding sama dengan nol.
- b. Komponen arah normal kecepatan fluida pada dinding adalah nol
- c. Tegangan geser yang terjadi antara dinding dan fluida dapat ditentukan

Apabila persamaan energi diaktifkan, maka pada dinding terdapat beberapa tipe kondisi termal (*thermal condition*) antara lain *heat flux*, temperatur, konveksi, dan radiasi. Kekasaran permukaan dinding dapat ditentukan apabila menggunakan model viskos turbulen. Dinding juga dapat dibuat bergerak secara translasi atau berputar dengan menentukan kecepatan putar atau translasi dinding. Kondisi dinding yang bergerak dibutuhkan dalam memodelkan aliran pada pompa, turbin atau kasus lain dengan menggunakan metode *moving reference frame*.

3. *Symmetry*

Kondisi batas ini digunakan untuk mengurangi daya komputasi yang dibutuhkan pada suatu kasus. Pada panel kondisi batas untuk *symmetry* tidak ada input data yang diperlukan. Kondisi batas *symmetry* digunakan apabila model geometri kasus yang bersangkutan dan pola aliran pada model tersebut simetris. Kondisi batas ini juga dapat digunakan untuk memodelkan dinding tanpa gesekan pada aliran viskos. FLUENT mengasumsikan fluks sama dengan nol untuk semua parameter yang tegak lurus terhadap *boundary symmetry*. Tidak terdapat fluks konvektif tegak lurus terhadap bidang *symmetry* ini, dengan demikian komponen kecepatan normal pada bidang *symmetry* adalah nol. Tidak terdapat fluks difusi tegak

lurus terhadap bidang *symmetry* sehingga gradien normal dari semua variabel pada bidang *symmetry* adalah nol. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa syarat batas untuk *symmetry* adalah :

- Kecepatan normal/tegak lurus pada bidang *symmetry* adalah nol
- Gradien normal dari semua variabel pada bidang *symmetry* adalah nol

B. *Solution control* yang digunakan dalam pemodelan :

Solution control yang digunakan dalam pemodelan meliputi faktor *under-relaxation*, skema diskretisasi tekanan, momentum, dan energi, serta skema *pressure-velocity coupling*.

1. Faktor *under-relaxation*

Faktor *under-relaxation* merupakan faktor untuk menstabilkan proses iterasi agar tidak terjadi divergensi. Untuk mempercepat konvergensi perhitungan, harus dilakukan pengaturan beberapa metode perhitungan numerik untuk variabel-variabel utama, seperti tekanan, densitas, momentum dan energi. Sehubungan dengan tidak liniernya persamaan-persamaan yang diselesaikan oleh FLUENT maka perubahan ϕ perlu dikendalikan. Hal ini biasanya diatasi dengan *under-relaxation* dalam hal ini mengurangi perubahan ϕ yang dihasilkan pada setiap iterasi. Secara sederhana nilai variabel ϕ yang baru dalam suatu *cell* tergantung pada nilai variabel ϕ mula-mula, besarnya perubahan variabel ϕ yang terhitung $\Delta\phi$ dan faktor *under-relaxation* α .

$$\phi = \phi_{old} + \alpha\Delta\phi$$

Iterasi pada penelitian ini menggunakan faktor *underrelaxation* yang sudah ada (*default*).

2. Skema diskritisasi

FLUENT menggunakan teknik berbasis volume atur untuk mengkonversi persamaan pembangun menjadi persamaan aljabar yang dapat diselesaikan secara numeris. Teknik volume atur ini mengintegrasikan persamaan pembangun pada setiap volume atur, menghasilkan persamaan - persamaan diskrit yang mempertahankan setiap besaran pada basis volume atur. Secara default, FLUENT menyimpan nilai diskrit dari suatu skalar ϕ pada pusat *cell* (*cell center*), namun demikian nilai skalar pada bidang ϕ_f diperlukan untuk suku konveksi dari persamaan pembangun dan harus diinterpolasikan dari nilai pusat *cell*.

Terdapat beberapa skema interpolasi untuk momentum dan energi, yaitu :

- *First-Order Upwind Scheme*

Apabila diharapkan akurasi hanya hingga orde satu, kuantitas pada bidang (*face*) *cell* ditentukan dengan mengasumsikan nilai *cell-center* dari setiap variabel yang menunjukkan nilai rata-rata *cell* dan berlaku pada seluruh *cell*. Kuantitas bidang identik dengan kuantitas *cell*. Dengan demikian apabila dipilih *first order upwind*, nilai ϕ_f ditentukan sama dengan nilai *cell-center* pada *cell upstream*. *Upwind* menunjukkan bahwa nilai ϕ_f diturunkan dari *upstream cell* atau *upwind* relatif terhadap arah kecepatan normal v_n .

Skema interpolasi ini dipilih karena skema ini yang paling ringan dan stabil sehingga cepat mencapai konvergen, tetapi ketelitiannya hanya orde satu.

- *Power Law Scheme*

Lebih akurat dari *First-Order* apabila bilangan Reynolds pada aliran < 5 (untuk aliran yang sangat lambat)

- *Second-Order Upwind Scheme*

Menggunakan persamaan yang lebih teliti sampai orde 2, sangat baik digunakan pada *mesh* tri/tet dimana arah aliran tidak sejajar dengan *mesh*. Metode interpolasi yang digunakan pada skema ini lebih rumit sehingga lebih lambat mencapai konvergen.

- *Quadratic Upwind Interpolation (QUICK)*

Diaplikasikan untuk *mesh quad/hex* dan *hybrid*, tetapi tidak dapat digunakan untuk elemen *mesh* tri, dengan aliran fluida yang berputar/*swirl*. Ketelitiannya mencapai orde 3 pada ukuran *mesh* yang seragam.

Skema interpolasi untuk tekanan adalah :

- *Standard* : Merupakan skema standar, tidak terlalu akurat untuk aliran dengan gradien tekanan yang besar di dekat batas.
- *Linear* : Digunakan apabila skema lainnya menemui kesulitan untuk mencapai konvergen.
- *Second-Order*: Digunakan untuk aliran kompresibel, tetapi tidak dapat digunakan untuk media berpori, *porous jump*, *fan*, radiator dan model multifasa.

- *Body Force Weighted* : Digunakan bila gaya badan tinggi, misalnya pada konveksi bebas dengan bilangan Rayleigh yang besar, aliran dengan pusaran yang tinggi, dan lain-lain.
- *PRESTO!* : Digunakan untuk aliran dengan pusaran yang tinggi, aliran yang melibatkan media berpori, dan aliran dalam saluran tertutup.

3. *Pressure-Velocity Coupling*

Pressure-velocity coupling menunjukkan algoritma numeris yang menggunakan kombinasi persamaan kontinuitas dan momentum untuk menurunkan suatu persamaan tekanan (atau koreksi tekanan) apabila menggunakan *pressure-based solver*. Terdapat tiga metode untuk *Pressure-Velocity Coupling*, yaitu :

- SIMPLE: Skema default, kasar (*robust*)
- SIMPLEC: dapat mempercepat konvergensi untuk kasus yang sederhana, misalnya aliran laminar dengan bentuk geometri yang tidak terlalu kompleks.
- PISO: Berguna untuk aliran transien atau kasus dengan *mesh* yang mengandung *skewness* yang tinggi.

LAMPIRAN III

Titik Pengambilan Data Perhitungan Numerik

Kanal 1					
x	9 titik di antara $0,645 \leq x \leq 3,195$				
y	274,5	399,5	524,5	649,5	774,5
Kanal 2					
x	9 titik di antara $4,495 \leq x \leq 7,045$				
y	274,5	399,5	524,5	649,5	774,5
Kanal 3					
x	9 titik di antara $8,345 \leq x \leq 10,895$				
y	274,5	399,5	524,5	649,5	774,5
Kanal 4					
x	9 titik di antara $12,195 \leq x \leq 14,745$				
y	274,5	399,5	524,5	649,5	774,5
Kanal 5					
x	9 titik di antara $16,045 \leq x \leq 18,595$				
y	274,5	399,5	524,5	649,5	774,5
Kanal 6					
x	9 titik di antara $19,895 \leq x \leq 22,445$				
y	274,5	399,5	524,5	649,5	774,5
Kanal 7					
x	9 titik di antara $23,745 \leq x \leq 26,295$				
y	274,5	399,5	524,5	649,5	774,5
Kanal 8					
x	9 titik di antara $27,595 \leq x \leq 30,145$				
y	274,5	399,5	524,5	649,5	774,5
Kanal 9					
x	9 titik di antara $31,445 \leq x \leq 33,995$				
y	274,5	399,5	524,5	649,5	774,5
Kanal 10					
x	9 titik di antara $35,295 \leq x \leq 37,845$				
y	274,5	399,5	524,5	649,5	774,5

LAMPIRAN IV

Hasil Simulasi dan Perhitungan Numerik

A. Suhu maksimum dan suhu minimum rata-rata dari sepuluh kanal

Posisi pada kanal (mm)	Suhu maksimum (K)	Suhu minimum (K)
62,5	300,986	300.724
187,5	302,168	301.906
312,5	303,349	303.087
437,5	304,531	304.270
562,5	305,713	305.452

B. Bilangan Prandtl, Bilangan Nusselt dan Bilangan Rayleigh

Posisi pada kanal (mm)	Bilangan Prandtl	Bilangan Nusselt lokal (Nu_x)	Bilangan Rayleigh lokal (Ra_x)	$\frac{S}{L} x Ra^*$
62,5	5,740	3,170	183,684	0,875
187,5	5,574	3,161	194,421	0,422
312,5	5,410	3,155	205,871	0,225
437,5	5,271	3,148	216,741	0,033
562,5	5,132	3,134	227,659	-0,041

C. Hasil perhitungan Bilangan Reynold untuk masing-masing kanal

	Kecepatan rata-rata (mm/dtk)	Densitas rata- rata (kg/m^3)	Viskositas rata-rata	Bilangan Reynolds
Kanal 1	3,971	995,514	0,0007978	12,637
Kanal 2	3,962	995,511	0,0007978	12,607
Kanal 3	3,963	995,513	0,0007978	12,610
Kanal 4	3,965	995,513	0,0007978	12,616
Kanal 5	3,967	995,513	0,0007978	12,623
Kanal 6	3,969	995,514	0,0007978	12,629
Kanal 7	3,972	995,516	0,0007978	12,638
Kanal 8	3,975	995,518	0,0007978	12,647
Kanal 9	3,976	995,520	0,0007978	12,652
Kanal 10	3,976	995,522	0,0007978	12,650
Rata-rata	3,970	995,515	0,0007978	12,631