

Kajian CFD Perbandingan Kinerja Tiga Buah Model Runner Turbin Francis

Gusriwandi

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang

Email: gusriwandi@ft.unand.ac.id

Abstrak

Kajian ini berisi tentang simulasi computational fluid dynamics (CFD) dari tiga model turbin francis dengan bilangan spesifik perancangan, tipe airfoil runner dan komponen lain seperti spiral casing, draft tube dan jumlah sudu yang sama. Perbedaan pada masing-masing turbin adalah bentuk kurva leading dan trailing edge yang divariasikan saat tahap perancangan bidang meridional runner. Bentuk leading dan trailing berpengaruh pada ukuran sudu runner saja, tidak mengubah dimensi utama runner. Ukuran sudu runner mempengaruhi aliran di dalam runner sehingga kinerja runner menjadi berbeda. Tiga pasang bentuk leading dan trailing edge dipilih menggunakan persamaan parabola dengan dimensi utama runner sebagai titik-titik acuan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan software CFD, kondisi steady state, moving reference frame (MRF), model turbulensi k-epsilon, mass flow inlet dan pressure outlet sebagai kondisi batas. Kinerja utama yang diamati pada runner adalah daya keluaran dan efisiensi dengan bervariasi debit aliran. Hasil simulasi menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada daya keluaran, tetapi terjadi pada efisiensi pada debit aliran dibawah debit aliran perancangan. Visualisasi aliran juga menunjukkan perbedaan yang signifikan pada potensi terjadinya kavitasi di ketiga turbin. Simulasi ini memberikan kontribusi pada perancangan dalam memilih bentuk runner yang mempunyai kinerja optimal sesuai batasan perancangan yang ada.

Kata kunci : CFD, francis turbin runner, leading, trailing, meridional, k-epsilon, mass flow inlet, pressure outlet, MRF

Abstract

This study is subjected to computational fluid dynamics (CFD) simulation of three francis turbines with equal in specific velocity design, runner airfoil type, and other components such as spiral casing, draft tube and number of runner blades. Difference on those runners is leading and trailing edge shape, where their shapes were choosen in runner meridional plane design step. The shape of leading and trailing edge affect on runner blade dimension but do not on runner primary dimension. Runner blade dimension affect flows in runner, thus different result present on runner perfomance. Three couples of leading and trailing edge were choosen using parabolic shape where runner primary dimesions were used as reference points. Simulation was conducted by using CFD software with steady state simulation condition, moving reference frame (MRF), k-epsilon turbulence model, and mass flow inlet and pressure outlet as boundary conditions. The important perfomances runner such as power output and eficiency were investigated by varying turbine flow rate. Simulation results showed there was no significant difference on power output but there was on eficiency below design flow rate variatons. Flow visualization also showed significant difference on cavitation potential on those three runners. This simulation contribute to runner designer in choosing runner shape to achieved runner optimal perfomance due to design constraints.

Keywords : CFD, francis turbin runner, leading, trailing, meridional, k-epsilon, mass flow inlet, pressure outlet, MRF.

1. Pendahuluan

Aliran pada turbin francis sangat kompleks. Tidak ada model matematika yang dapat diselesaikan secara analitis untuk menggambarkan kondisi aliran pada turbin tersebut. Salah satu solusinya adalah kajian eksperimental, namun ini membutuhkan usaha dan biaya yang sangat besar. Solusi lain yang lebih layak sebelum dilakukan kajian ekperimental adalah simulasi komputer menggunakan software yang dikenal sebagai computational fluid dynamics (CFD). Keberhasilan simulasi CFD pada turbin air telah banyak dilakukan, dimana hasil yang diperoleh dapat diterima, mengacu pada hasil kajian ekperimental. Sumber daya komputer yang semakin besar saat ini juga telah mendorong pengujian secara virtual dengan CFD menjadi pilihan utama sebelum model akhir diperoleh. Gusriwandi [1] telah berhasil menyusun sebuah prosedur perancangan dasar runner turbin francis menggunakan pendekatan empirik-metode numerik, namun kinerja runner yang dihasilkan perlu diuji. Banyak parameter perancangan yang perlu divariasikan agar diperoleh sebuah runner yang optimal sesuai dengan input dan batasan-batasan perancangan yang ada, termasuk kekuatan sudu dan biaya produksi runner. Dalam tulisan ini dikaji kinerja, yaitu hubungan antara debit aliran dengan daya output dan efisiensi dari tiga buah runner turbin francis yang dirancang pada bilangan spesifik sama, n_s , yaitu 195,3 dengan head sebesar 60 m dan debit $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Perbedaan ketiga runner turbin terletak pada bentuk kurva leading dan trailing edge, yang divariasikan pada tahap perancangan bidang meridional runner. Simulasi dilakukan dengan menggunakan software CFD. Kondisi simulasi adalah steady state, dengan tipe *moving reference frame* (MRF), model turbulensi adalah k-epsilon dengan *mass flow inlet* dan *pressure outlet* sebagai kondisi batas.

2. Studi Literatur

Nechleba [2] menjelaskan pencarian medan meridional runner turbin francis dengan metode grafis-analitis, namun tidak ada acuan baku dalam pemilihan kurva leading dan trailing edge, sehingga perancang leluasa dalam menentukan bentuk kedua kurva tersebut. Sedikit dari sekian banyak batasan yang ada adalah, dimensi/ukuran sudu yang dihasilkan serta kekuatan dan biaya produksi dari sudu tersebut. Perkembangan kajian aliran fluida menggunakan CFD, khususnya masalah aliran pada geometri yang kompleks seperti turbin air yang didukung oleh sumber daya komputasi yang memadai, membuat CFD semakin menjadi pilihan yang bisa diandalkan, dengan hasil yang baik. Jain., et. al [3] telah mensimulasikan sebuah turbin francis dengan kapasitas 3 MW untuk memprediksi efisiensi total turbin menggunakan software CFD (Fluent), dengan model turbulensi k-omega ($k-\omega$), steady state, dua tipe kondisi batas yaitu pressure inlet – pressure outlet dan mass flow inlet- pressure outlet, didapati bahwa kondisi batas kedua memberikan hasil yang lebih baik dan telah memvalidasinya dengan eksperimen, dimana hasil CFD dan eksperimen menunjukkan kecocokan yang bagus. Patel., et. al [4] melakukan perancangan dasar komponen-komponen turbin francis seperti runner, spiral casing dan draft tube, kemudian melakukan proses optimasi dengan CFD. Didapati bahwa penggunaan CFD telah menghemat banyak usaha, waktu, biaya proses tersebut.

Computational Fluid Dynamics (CFD)

CFD adalah suatu teknik menganalisis sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas ataupun reaksi kimia menggunakan simulasi komputer. Ada dua persamaan dasar untuk kajian aliran fluida pada turbin air yaitu :

1. Kekekalan massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

2. Kekekalan momentum :

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right] = F_b - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot \vec{V}) \quad (2)$$

CFD memanipulasi kedua persamaan dasar diatas ke dalam bentuk persamaan aljabar diskrit dan diselesaikan untuk mendapatkan nilai-nilai diskrit pada ruang dan waktu tertentu, menggunakan komputer.

Efisiensi Turbin dan Runner

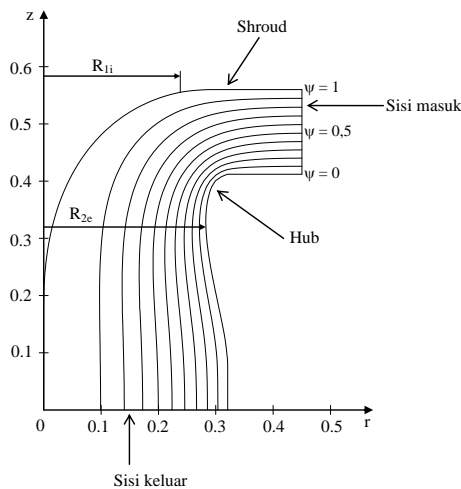
Secara umum, efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara output dengan input. Pada sistem turbin air, terdapat banyak cara untuk menghitung efisiensi, berdasarkan perbandingan daya output dengan input total sistem, berdasarkan presentase pressure drop pada berbagai komponen atau berdasarkan rugi-rugi pada berbagai komponen turbin. Patel., et. al. [4] melakukan analisis CFD turbin francis untuk meningkatkan efisiensi,

mengurangi kavitasi, dan masalah-masalah dinamik yang terjadi, efisiensi dihitung dengan cara menghitung head drop pada setiap komponen. Drtina., et. al. [5] melakukan kajian CFD dan menghitung efisiensi turbin francis berdasarkan rugi tekanan yang terjadi pada setiap komponen. Dalam kajian ini, efisiensi runner dihitung berdasarkan torsi total runner dan drop tekanan yang terjadi pada runner :

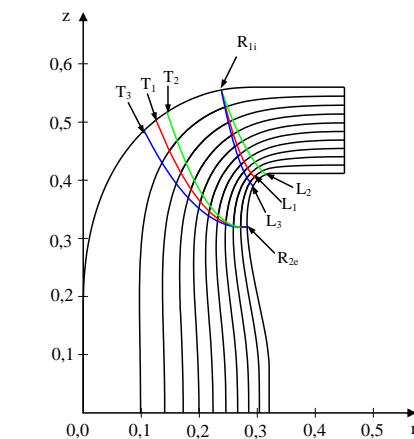
$$Efisiensi = \frac{P_{runner}}{P_{air}} = \frac{T \cdot \omega}{\Delta P \cdot Q} \tag{3}$$

3. Metode

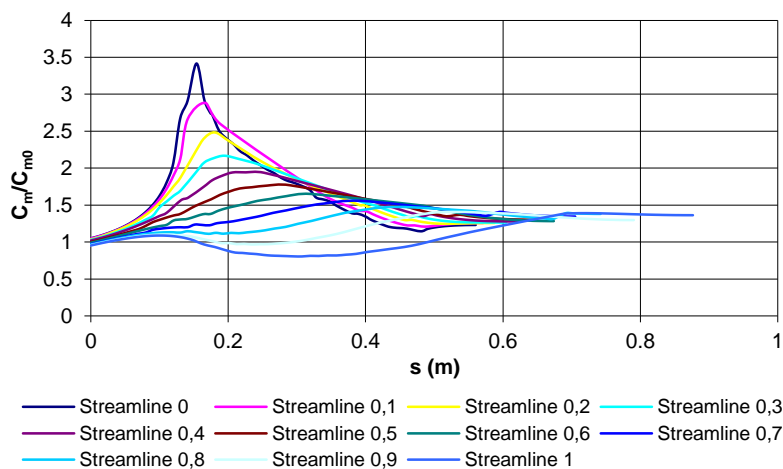
Model turbin yang digunakan adalah model turbin menggunakan prosedur perancangan yang disusun oleh Gusriwandi [1]. Input pada perancangan runner adalah head (H) = 60 m, debit (Q) = 2 m³/s, efisiensi = 90%, dan daya keluaran 1 MW. Variasi diterapkan pada pemilihan kurva leading (L) dan trailing (T) edge saat langkah perancangan bidang meridional runner. Ada tiga pasangan kurva leading dan trailing edge yang dipilih berdasarkan nilai kecepatan di sepanjang streamline-streamline (ψ) bidang meridional runner. Bentuk kurva leading dan trailing edge menggunakan bentuk pendekatan yaitu kurva parabola, jadi dibutuhkan tiga titik untuk membentuk kurva-kurva tersebut. Untuk kurva leading edge, titik pertama adalah jari-jari hub, R_{1i} , titik kedua dan ketiga dipilih titik pada streamline dengan nilai kecepatan yang tinggi. Untuk kurva trailing edge, titik pertama adalah jari-jari shroud, R_{2e} , titik-titik berikutnya dipilih pada titik streamline dengan kecepatan keluar yang hampir sama. Ilustrasi bidang meridional runner dan pemilihan kedua kurva tersebut dapat dilihat pada gambar 1.a dan 1.b. Pada gambar 2 ditunjukkan variasi kecepatan sepanjang streamline yang dapat digunakan sebagai acuan dalam memilih kurva leading dan trailing edge.



Gambar 1.a Bidang meridional runner dengan dimensi utama R_{1i} dan R_{2e} [1].



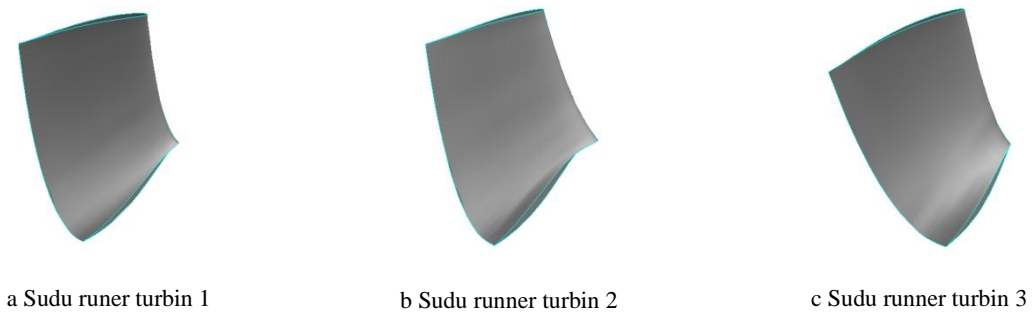
Gambar 1.b Pemilihan titik-titik kurva leading dan trailing edge.



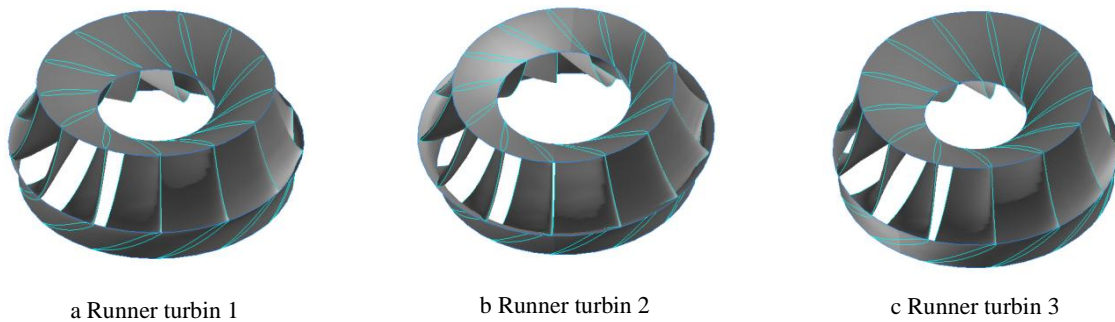
Gambar 2. Variasi kecepatan sepanjang streamline.

Setelah kurva leading dan trailing edge ditentukan, dengan teknik conformal mapping, streamline ditransformasi ke bidang tegak lurus poros runner, hasil transformasi streamline merupakan kurva chamber dari airfoil yang

dipakai , dengan demikian kordinat tiga dimensi dari sudu runner didapatkan dan menggunakan software CAD bentuk sudu dari ketiga runner bisa diperoleh [1].



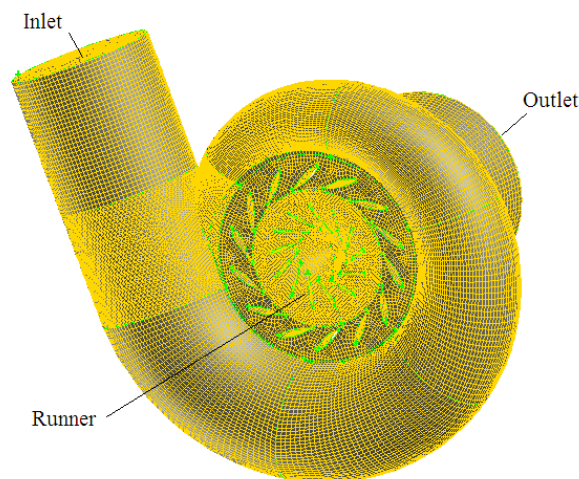
Gambar 3 Sudu runner



Gambar 4. Runner

Simulasi CFD

Untuk proses simulasi CFD, diperlukan komponen lain seperti spiral casing, sudu pengarah dan draft tube, kemudian dilakukan proses diskritisasi/meshing turbin (domain), seperti terlihat pada gambar 5.



Gambar 5. Hasil meshing turbin 1

Kondisi simulasi untuk ketiga turbin adalah sebagai berikut :

- Jumlah elemen meshing : lebih kurang 500.000 elemen, terdiri dari tipe tetrahedral dan hexahedral
- Model turbulensi : k-epsilon
- Kondisi batas inlet : mass flow inlet
- Kondisi batas outlet : pressure outlet

- Kondisi kerja turbin : steady state, MRF
- Input simulasi : debit aliran (dalam bentuk laju aliran massa)
- Output simulasi : torsi runner

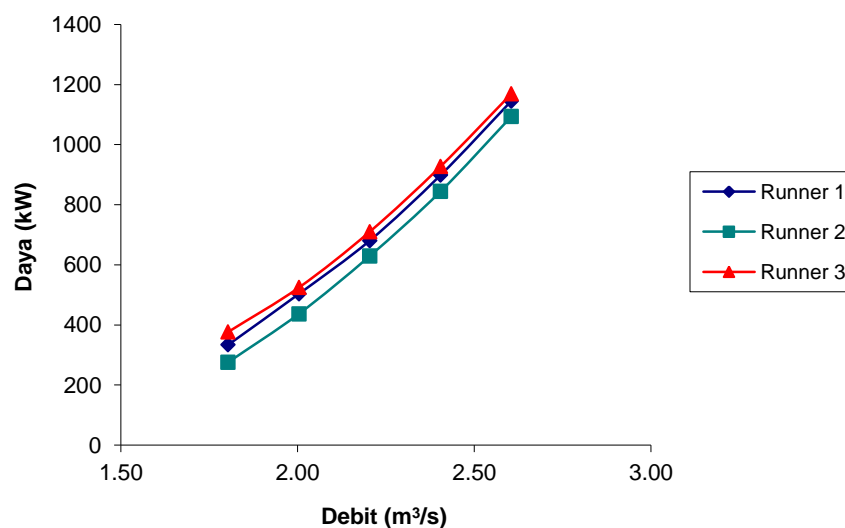
4. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi dari ketiga turbin dapat dilihat pada tabel 1.

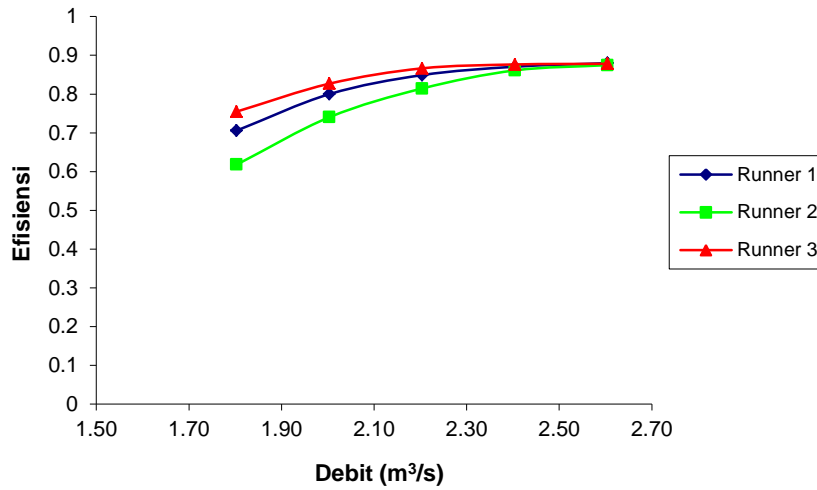
Tabel 1 Hasil simulasi turbin

Turbin	Mass flow (kg/s)	Pressure drop runner (kPa)	Torsi runner (N.m)
1	1.800	189,8	3.268,4
	2.000	206,3	4.843,7
	2.200	243,5	6.595,8
	2.400	272,8	8.689,7
	2.600	308,1	11.058,6
2	1.800	187,9	2.718,9
	2.000	213,9	4.265,1
	2.200	242,4	6.108,5
	2.400	268,9	8.172,5
	2.600	301,2	10.567,9
3	1.800	191,6	3.676,4
	2.000	217,2	5.093,6
	2.200	235,5	6.875,3
	2.400	275,1	8.961,5
	2.600	312,4	11.281,1

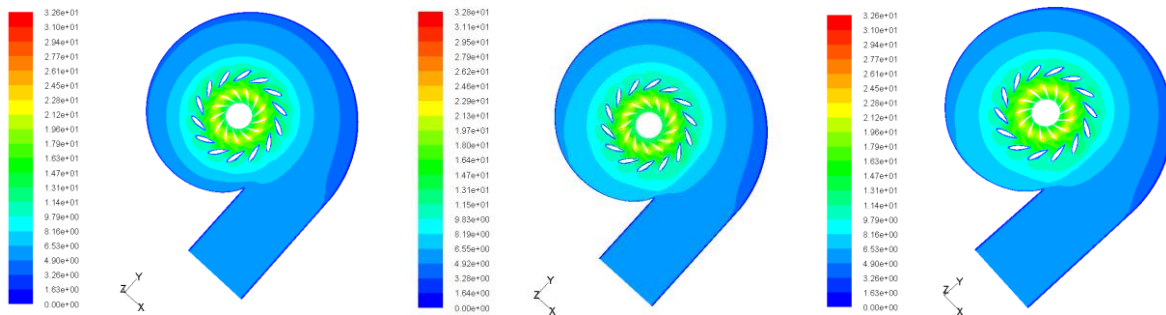
Simulasi dilakukan pada keadaan *steady state* sehingga putaran turbin dibuat tetap, yaitu pada 105 rad/s, sesuai dengan putaran poros pada tahap perancangan. Pada putaran yang tetap tersebut diamati perubahan torsi terhadap perubahan input simulasi yaitu laju aliran massa. Daya simulasi didapat dengan mengalikan torsi dengan putaran. Efisiensi dihitung dengan membandingkan daya output simulasi dengan daya input simulasi pada bagian runner. Hasil simulasi berupa daya dan efisiensi runner dalam bentuk grafik dapat dilihat pada gambar 6 dan 7. Pada gambar 6, dapat diamati bahwa perbedaan daya keluaran ketiga runner tidak berbeda secara signifikan. Sedangkan efisiensi ketiga runner pada gambar 7, terdapat perbedaan yang signifikan untuk variasi debit aliran dibawah debit perancangan. Hal tersebut terjadi karena laju penurunan torsi runner lebih tinggi dari pada pressure drop pada debit yang rendah.



Gambar 6. Daya runner



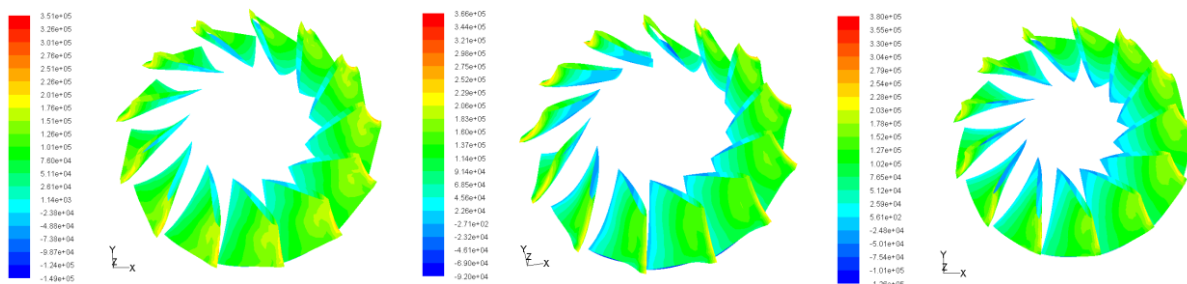
Gambar 7. Efisiensi runner



a Runner turbin 1 di bidang $z = 0.5$ m b Runner turbin 2 di bidang $z = 0.5$ m c Runner turbin 3 di bidang $z = 0.5$ m

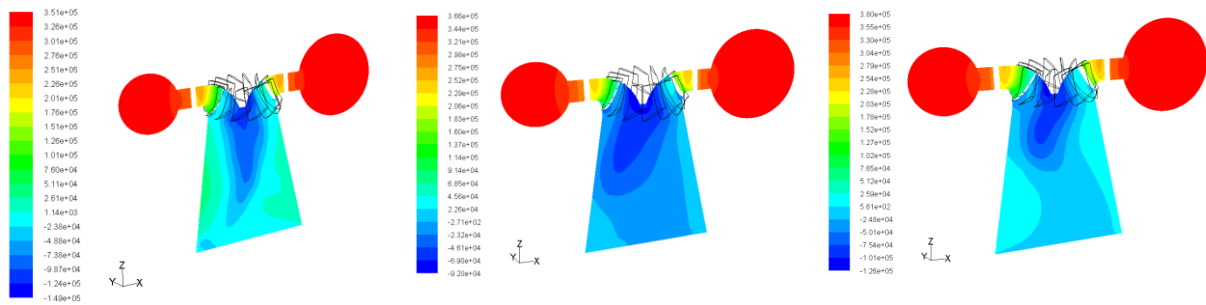
Gambar 8. Kontur kecepatan absolut

Visualisasi aliran pada beberapa komponen dapat membantu memberikan umpan balik pada proses perancangan pemilihan parameter runner, seperti spiral casing dan drafttube. Spiral casing dengan kinerja yang baik, akan meningkatkan kinerja runner. Pada gambar 8, terlihat spiral casing sudah mempunyai kinerja yang bagus pada ketiga turbin, kecepatan meningkat secara teratur dari diameter terluar spiral casing menuju sisi masuk sudu pengarah dan runner. Tekanan pada sisi pressure pada ketiga runner bisa dikatakan tidak memiliki perbedaan yang berarti, seperti terlihat pada gambar 9.



a Kontur tekanan statik runner 1, $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ b Kontur tekanan statik runner 2, $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ c Kontur tekanan statik runner 3, $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$

Gambar 9. Tekanan pada sudu runner



a Kontur tekanan statik runner 1, $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$, bidang $y = 0$ b Kontur tekanan statik runner 2, $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$, bidang $y = 0$ c Kontur tekanan statik runner 3, $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$, bidang $y = 0$

Gambar 10. Tekanan pada drafttube

Informasi mengenai kavitasasi dapat diperoleh pada ketiga turbin dengan melihat distribusi tekanan pada bagian draft tube. Kavitasasi merupakan fenomena menguapnya air pada tekanan yang sangat rendah. Seperti terlihat pada gambar 10, tekanan air yang rendah (warna biru), yaitu pada area dekat sisi keluar runner. Pemilihan bentuk kurva leading dan trailing memberikan potensi kavitasasi yang berbeda cukup signifikan pada ketiga turbin.

5. Kesimpulan

Dari kajian ini dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut :

1. Pemilihan kurva leading dan trailing edge menentukan lebar sudu, tetapi tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada daya keluaran, hanya pada efisiensi runner pada debit aliran yang rendah.
2. Bentuk kurva leading dan trailing edge menentukan potensi kavitasasi pada turbin, dimana masalah kavitasasi adalah salah satu masalah krusial dalam perancangan runner turbin francis.
3. Simulasi CFD telah membantu designer mengamati karakteristik aliran yang kompleks pada runner turbin francis, sehingga memudahkan untuk mencari model runner optimal sesuai batasan perancangan yang ada.

Nomenklatur

ρ	: massa jenis (kg/m^3)
ω	: putaran sudut (rad/s)
ΔP	: beda tekanan (Pa)
p	: tekanan (Pa)
t	: waktu (s)
C_m	: kecepatan meridional runner (m/s)
F	: gaya (N)
V	: kecepatan mutlak fluida (m/s)
P_{runner}	: daya runner (Watt)
P_{air}	: daya air (Watt)
Q	: debit aliran (m^3/s)
R_{li}	: jari-jari shroud (m)
R_{2e}	: jari-jari hub (m)
T	: torsi runner (N.m)

Daftar Pustaka

- [1] Gusriwandi. *Perancangan Dasar Runner Turbin Francis Menggunakan Persamaan Empirik-Analitik, Metode Empirik-Analitik, Metode Numerik, Conformal Mapping dan Simulasi CFD*, Proceeding Seminar National Tahunan Teknik Mesin (SNTTM XIII) Universitas Indonesia, Jakarta (Oktober 2014).
- [2.] Nechleba, M. (1957), *Hydraulic Turbine – Their Design and Equipment*, English Edition, Artia Prague, Czechoslovakia.
- [3] Jain S., Saini, P. R., Kumar, A., 2010, *CFD Approach for Prediction of Efficiency of Francis Turbine*, IGHM-Oct, 2010.

- [4] Patel, K., Desai, J., Chauhan, V., Charnia, S., 2011, *Development of Francis Turbine using Computational Fluid Dynamics*, Asian International Conference on Fluid Machinery, 21-23 November 2011.
- [5] Drtina, P., and Sallaberger, M., *Hydraulic Turbines – Basic Principles and State-of-the-art Computational Fluid Dynamics Applications*, Proceedings of Instn Mech engrs, Vol 213, Part C, 1999