

Penyempurnaan Pola Aliran Pada Turbin Francis Melalui Penggunaan Material Komposit Pada Komponennya Untuk Meningkatkan Daya

Ating Sudradjat¹, Carolus Bintoro¹

¹ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Bandung 40162

Telp dan Fax (022) 2013789 dan 2013788

E-mail : atingsudradjat@gmail.com

Abstrak

Paper ini membahas usaha yang dilakukan untuk menyempurnakan pola aliran dalam turbin Francis, untuk meningkatkan daya keluarannya. Turbin Francis pada umumnya, terjadi interaksi antara evolute – fluida dan runnernya yang menyebabkan ketidak sempurnaan aliran, yang pada akhirnya akan mempengaruhi daya yang dihasilkan. Turbin skala kecil dirancang untuk menggunakan material komposit, baik pada runner maupun evolutenya agar dapat mengadopsi profil tertentu. Perangkat lunak CFD-Numeca digunakan untuk memprediksi pola aliran yang terjadi didalamnya. Kaji mekanik berupa pengujian karakteristik material, geometri, dan dinamik dilakukan untuk menjamin kefungsi prototipe. Simulasi CFD-Numeca yang dilakukan memberikan hasil laju aliran fluida didalam evolute sama dengan 5,38 m/s, yang tidak melebihi batas aliran kritis sebesar 10,7 m/s. Kaji geometri pada runner, yang rawan akan penyimpangan memberikan hasil yang masih dalam tolerance, dimana tegangan tariknya sebesar 16,5 Kg/mm² dan apabila dibebani dengan nilai 100 N, deformasi maksimum yang terjadi sebesar $2,34 \times 10^{-4}$ [mm], jauh lebih kecil dari yang dipersyaratkan sehingga aman untuk digunakan. Rancang banun yang dikembangkan ndapat memberikan hasil yang maksimal dengan dukungan perangkat lunak CFD-Numeca.

Kata kunci : CFD-Numeca, Turbin Francis, Komposit, Pola aliran, Runner dan Evolute

Abstract

This paper discusses efforts to improve the flow pattern in a Francis turbine, in order to increase the power output. Francis turbines in general, there is an interaction between the evolute – fluid and its runner that cause the imperfections of flow, which in turn affect the power generated. Small scale turbines are designed to use of composite materials, both on the runner and its evolute in order to adopt a specific profile. CFD-Numeca software used to predict the flow patterns that occur in it. Mechanical experimental to characteristics the material, such as tenstion test, geometry, and dynamical its done in order to ensure the prototype functional. CFD-Numeca simulations which performed give results fluid rate in the evolute with 5.38 m/s, which does not exceed the critical flow of 10.7 m/s. The geometry test of runner, which is prone to distrosion gives results that are still in tolerance, in which a tension strength of 16,5 kg/mm² and when loaded with a value of 100 N, the maximum deformation ocuurs at $2,34 \times 10^{-4}$ [mm], are much more smaller than that required makin it safe to use. Design that developed to provide maximum results with support of CFD-Numeca software.

Key words : CFD-Numeca, Francis turbine, Composite, Flow pattern, Runner and Evolute

1. PENDAHULUAN

Potensi air yang melimpah di Indonesia menawarkan kekayaan energi bersih yang bebas dari segala bentuk polusi menunggu untuk digunakan, namun demikian kenyataannya sumber daya tersebut dibiarkan untuk tidak digunakan. Sementara banyak mesin penting sebagai peningkat produktivitas banyak membutuhkan energi listrik untuk menjalankannya, persoalan ini diakibatkan mahalanya peralatan pembangkit energi tersebut, namun demikian sebenarnya dapat diantisipasi dengan mengembangkan peralatan yang berdimensi kecil. Turbin merupakan bagian penting dan bahkan sebagai komponen kritis dari suatu pembangkit listrik, yang berdampak pada biaya dan kinerja dari pembangkit itu sendiri. Turbin Francis dapat direalisasikan dengan memanfaatkan teknologi komposit dalam proses pembuatannya dengan perlakuan khusus yaitu memberikan lapisan khusus pada permukaannya dengan maksud untuk tahan terhadap goresan. Proses ini telah memberikan produk yang kuat, dan murah.

Turbin Francis adalah salah satu turbin yang bekerja berdasarkan pengubahan momentum fluida kerjanya. Dengan menggunakan tekanan lebih pada saat air jatuh memasuki runner, dimana arahnya disempurnakan dengan menggunakan guide vane. Sisa energi potensial bekerja pada runner, sedangkan pipa hisap memungkinkan energi tersebut bekerja pada runner secara maksimum. Bagian-bagian turbin Francis terdiri dari bagian-bagian seperti a) *Scroll Casing*, b) *guide vane*, c) *runner*, d) Poros utama dan e) Bantalan Utama [4][8][10]

Paper ini dituliskan sebagai hasil penelitian yang dilakukan untuk mengamati pola aliran air yang terjadi akibat interaksi fluida dengan evolute dan runner turbin Francis. Kajian dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak CFD-Numeca dalam proses perancangan dan pembuatan prototipe turbin Francis dengan menggunakan material komposit laminasi basah.

2. METODOLOGI

Permasalahan yang terkait dalam penelitian ini diselesaikan dengan bantuan perangkat lunak CFD-Numeca, dimana kajiannya diawali dengan proses pemilihan turbin berdasarkan pada ketinggian air terjun yang dipilih, adapun langkah penyelesaiannya dilakukan seperti berikut, yaitu 1) kaji lapangang, 2) perencanaan teknis, 3) kaji CFD-Numeca, dan 4) pembuatan prototype rumah turbin serta bagian lainnya. Dalam proses penyelesaiannya, beberapa perhitungan dilakukan terkait,

- a. Perancangan dalam Pembuatan Prototipe
 - o Penentuan tinggi air jatuh (h)
 - o Penentuan panjang pipa (L)
 - o Penentuan kecepatan spesifik (N_s)
 - o Penentuan rasio kecepatan (ϕ)
 - o Penentuan kecepatan satuan (N_u)
 - o Penentuan debit satuan (Q_u)
 - o Penentuan daya (P)
 - o Penentuan daya satuan (P_u)
 - o Penentuan kecepatan aliran fluida (V)
 - o Penentuan aliran massa yang terjadi
- b. Identifikasi arah dan sudut optimal guide vane
- c. Pembuatan prototipe rumah turbin
- d. Pembuatan prototipe runner
- e. Pembuatan poros
- f. Pembuatan guide dan stay vane

Moody [7], menjelaskan dan membagi jenis turbin berdasarkan nilai kisaran tinggi air terjun dan kecepatan spesifik yang sesuai. Berdasarkan pada acuan tersebut, umumnya sebuah turbin dikembangkan dan dinyatakan pada Tabel 1.

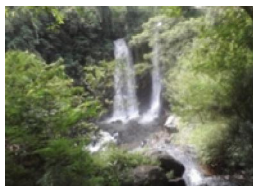
Table 1. Jenis Turbin Air dan Kisaran Kecepatan Spesifik (N_s)

Jenis Turbin		N_s
1. Turbin Impuls	a. Satu jet (turbin Pelton)	4 – 30
	b. Banyak jet (turbin Doble)	30 – 70
2. Turbin Reaksi	a. Francis	
	N_s rendah	50 – 125
	N_s normal	125 – 200
	N_s medium	200 – 350
	N_s tinggi	350 – 500
	b. Propeler	
	Sudu tetap (turbin Nagler)	400 – 800
	Sudu dapat diatur (turbin Kaplan)	500 – 1000

3. HASIL PENGUKURAN DAN DISKUSI

Penelitian yang telah dilakukan memberikan sebuah prototipe dimana karakteristik dasarnya telah disesuaikan dengan perhitungan. Beberapa point tersebut dapat disampaikan sebagai berikut,

1. Survey lapangan telah berhasil menemukan lokasi ideal untuk melakukan uji coba lapangan yaitu Curug Cinulang. Ketinggian air jatuh adalah ± 32 meter, yang kemudian digunakan sebagai inputan dalam melakukan kaji simulasi CFD-Numeca. Photo kondisi air terjun Cinulang diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kondisi air terjun Cinulang

Tinggi jatuh/head (H) sebesar 32 m digunakan sebagai nilai perhitungan sebagai beda ketinggian antara muka air reservoir dengan muka air yang keluar dari turbin. Turbin direncanakan ditempatkan sekitar 10 m dari tebing air terjun ke sebelah selatan, sehingga panjang pipa yang dibutuhkan untuk mengalirkan air sampai turbin akan sebesar

$$L = \sqrt{32^2 + 10^2} = 33,53 \text{ m}$$

Untuk turbin Francis, Moody [7] menjelaskan untuk setiap jenis turbin terdapat suatu nilai kisaran tinggi terjun dan kecepatan spesifik yang sesuai dan korelasi empiris antara tinggi terjun, sehingga kecepatan spesifik (N_s) dapat ditentukan dimana besarnya adalah $N_s = 246,95 \text{ m/s}$.

2. Dalam perencanaan teknis tubin Francis tersebut, beberapa paramater terkait hasil perhitungan adalah sebagai berikut.

- o Rasio kecepatan (ϕ), yaitu $\frac{ND}{84,6\sqrt{H}}$, sehingga diperoleh nilai 0,03176. Nilai tersebut diperoleh dengan menggunakan nilai perancangan awal sebagai berikut, $D = 0,19 \text{ [m]}$ dan N direncanakan sebesar 400 rpm
- o Kecepatan Satuan (N_u), merupakan kecepatan putar turbin yang mempunyai diameter (D) satusatuanpanjang dan bekerja pada tinggi terjun satu satuan panjang, diperoleh dengan korelasi :

$$N_u = \frac{ND}{\sqrt{H}} = 2,6870 \text{ m/s}$$

- o Debit Satuan, debit yang masuk turbin secara teoritis dapat diasumsikan sebagai debit yang melalui suatu curat dengan tinggi terjun sama dengan tinggi terjun yang bekerja pada turbin, yang dinyatakan sebagai debit turbin yang mempunyai diameter (D) satu satuan panjang dan bekerja pada tinggi terjun satu satuan panjang berikut :

$$Q_u = C_d \frac{1}{4} \pi \sqrt{2g} = 2,2128 \text{ m}^3/\text{s}$$

- o Kecepatan Spesifik (N_s), merupakan kecepatan putar turbin yang menghasilkan daya sebesar satu satuan daya pada tinggi terjun satu satuan panjang, dimana $N_s = 246,9462 \text{ m/s}$
- o Daya (P), yang dihasilkan turbin yang dinyatakan dengan efisiensi turbin (η) = 0,80 dan berat jenis air (γ) = 1, sehingga :

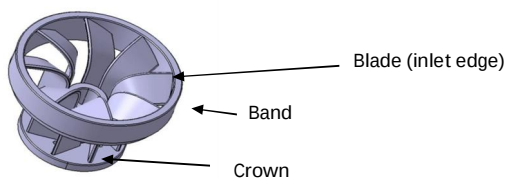
$$P = \eta \gamma Q_u D^2 H^{\frac{3}{2}} = 10,496 \text{ kW}$$

- o Daya Satuan, daya turbin dengan diameter (D) satu satuan panjang dan bekerja pada tinggi terjun satu satuan panjang, berikut :

$$P_u = \frac{P}{D^2 H^{\frac{3}{2}}} = 1,9915 \text{ kW}$$

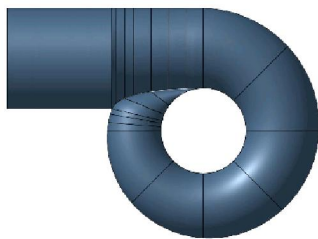
- o Kecepatan alir air = $V = \sqrt{2gH} = 24,927 \text{ m/det.}$ Sehingga kecepatan desain tangensial = $V_s = 0.22 \sqrt{2gH} = 5,484 \text{ m/det}$
- o Aliran massa yang terjadi = 300 kg/s

Dimensi model runner yang dirancang, diameter luar komponen *band* = 190 mm dan diameter *crown* = 125 mm dengan tinggi 110 mm.



Gambar 2. Sketsa model runner turbin Francis

Komponen penting lainnya dari turbin Francis adalah rumah turbin, dan model untuk rumah turbin Francis dirancang seperti pada Gambar 3



Gambar 3. Rancangan rumah turbin Francis

3. Identifikasi arah dan sudut optimal guide vane

Simulasi numeric dengan perangkat lunak CFD-Numeca 64 bit 4 core, diharapkan dapat mengidentifikasi arah alir dan optimalisasi sudut guide vane. Sudu pengarah atau (*guide vane*) adalah bagian dari turbin Francis yang berfungsi sebagai distributor agar debit air mengalir merata dan merupakan pintu masuknya air yang dipasang didalam rumah turbin, mengarah

pada *runner blade*. Untuk menghasilkan kecepatan putar maksimum *runner*, arah alir yang jatuh ke setiap *blade* harus sesuai, sehingga perlu ditentukan sudut optimal *guide vane* turbin Francis tersebut. Berdasarkan data empirik 60 turbin francis yang diuji dari tahun 1925 s/d 1970[1], maka kecepatan desain tangensial keluar dari *casingspiral* yang digunakan pada kondisi *gate* terbuka penuh adalah :

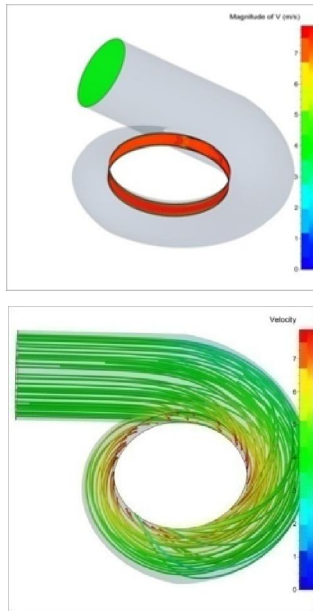
$$V_s = 0.22 \sqrt{2gh_d} \text{, dan tidak boleh melebihi } 10.7 \text{ m/s}$$

Dengan demikian V_e yang terjadi pada kasus desain casing spiral ini, untuk $h_d = 32 \text{ m}$ sama dengan 5.38 m/s , masih tidak melebihi $10,7 \text{ m/s}$.

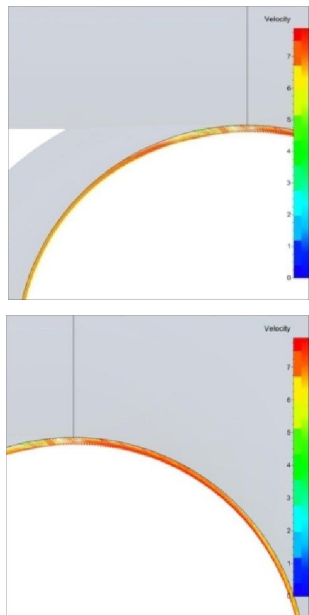
Pada proses perhitungan dengan menggunakan simulasi, diperoleh tiga kondisi aliran dengan debit yang berbeda-beda dengan simulasi Numerik yang digunakan maka pemodelan aliran fluida dengan menggunakan persamaan RANS (Reynolds Average Navier-Stokes), dimana digunakan model fluida adalah air, dengan persamaan model aliran turbulent Navier-Stokes adalah Spallart-Almaras, dan skema yang digunakan adalah central difference dengan akurasi 2nd order, dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa aliran yang memenuhi data yang tersedia padaperancangan casing spiral adalah pada debit $0,0222 \text{ m}^2/\text{det.}$ Seperti pada Gambar 4 dan 5 berikut : [9][10]

4. Pembuatan Prototipe Rumah Turbin (Casing Spiral).

Prototipe rumah turbin dibuat dilaboratorium Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung dengan menggunakan material komposit laminasi basah dengan pemberian penguat pada setiap bagian yang dianggap kritis terhadap tekanan air seperti pada Gambar 6.



Gambar 4 Distribusi kecepatan pada inlet dan outlet casing dan Pola Streamline Pada Casing Spiral hasil simulasi



Gambar 5 Distribusi kecepatan absolute pada outlet casing spiral

5. Pembuatan prototipe runner

Prototype runner dibuat dengan mempertimbangkan ukuran laboratorium dan kesilindrisan serta kesetimbangannya, hal ini penting karena *runner* tersebut harus setimbang (*balance*) agar dapat berputar dengan mudah. Peralatan ukur yang digunakan dalam proses pengukuran

kesilindrisan adalah dial indicator set, pengukuran dilakukan di mesin bubut dimana shaft dibagian *crown* dipegang oleh pemegang benda kerjatiga rahang, sementara dial indikator set dipasang diatas eretan. Hasil dan proses dari dua kali pengukuran pada lingkaran band dan *crown runner* adalah :



Gambar 6. Prototipe komponen rumah turbin



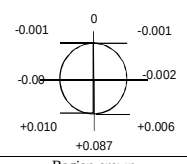
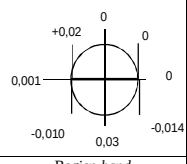
Gambar 7. Proses pengukuran kebulatan / kesilindrisan runner.

Selain dilakukan pengujian kesilindrisan, runner pun diuji kesetimbangannya dan uji ketahanan/kekuatan proteksi. Dalam proses pelaksanaan uji kesetimbangan (*runner balancing*) menggunakan peralatan *grinding balancing* proses pengujian dilakukan dibengkel produksi Jurusan teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung,



Gambar 8 Proses uji *static balance* dan uji kebulatan

Table 1. Hasil pengukuran kebulatan persegmen ukuran untuk runner

		
Prototype runner	Bagian crown	Bagian band

**Gambar 9** Uji kekuatan proteksi runner komposit dengan fluida bertekanan 0,5 – 0,9 Kg/cm²

6. Pembuatan poros

Poros turbin yang dikopling dengan kopling tetap (mur dan baut) berfungsi sebagai penggerak *runner blade* dan *main shaft*, yang dalam proses rakitannya perlu dilakukan uji *Alignment* agar posisi senter-senter rotasi *shaft* tersebut ada dalam satu sumbu ketika *runner* turbin berputar dalam keadaan normal, sehingga diameter poros dihitung dengan menggunakan :

$$d = \sqrt[3]{\frac{5.1 K_t C_b M_p}{\tau_a}} = 0,208 \text{ m} = 20 \text{ mm}$$

dimana :

d = Diameter poros (m)

τ_a = Tegangan izin poros (N/mm²)

M_p = Momen torsi yang diterima poros (N.mm)

K_t = Faktor koreksi untuk momen puntir

C_b = Faktor koreksi untuk beban lentur

Pada beban yang bekerja secara halus harga K_t = 0,1 dan pada beban yang digunakan sedikit mendapat kejutan dan tumbukan harga K_t = 1,0 – 1,5 dan bila beban yang dikenakan dengan kejutan atau tumbukan harga K_t = 1,3 – 3, karena poros pun menerima beban lentur dari

berat *runner* turbin maka diperlukan faktor koreksi untuk beban lentur (C_b) yang harganya berkisar antara 1,2 – 2,3. [8]

Sementara tegangan izin poros dihitung dengan rumus :

$$\tau_a = \frac{\sigma_b}{Sf_1 Sf_2}$$

dimana :

τ_a = Tegangan izin poros (N/mm²)

σ_b = Tegangan tarik poros (N/mm²)

Sf_1 = Faktor kelelahan puntir

Sf_2 = Faktor keamanan karena poros dibuat bertingkat dan diberi pasak.

Nilai Sf_1 diambil 5,6 dan sedangkan harga dari Sf_2 berkisar sekitar 1,3 sampai 3. [8] Dan untuk momen puntir pada turbin dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$M_p = \frac{P}{\omega}$$

Dimana :

M_p = Momen puntir (N.mm)

P = Daya yang ditransmisikan (KW)

ω = Kecepatan sudut (rpm)

$\omega = 2\pi.n$

n = Kecepatan putaran turbin (rpm)

Poros turbin ini ditumpu oleh sebuah bantalan yang berguna menahan guncangan bila turbin sedang beroperasi, bantalan dipilih dan disesuaikan dengan ukuran poros.

Pembuatan guide dan stay vane

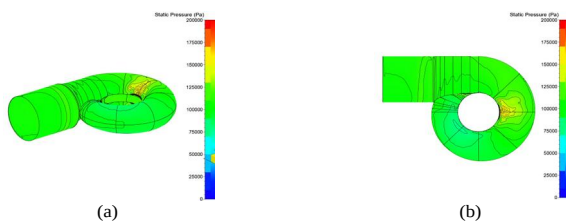
Guide dan stay vane merupakan komponen turbin yang berfungsi untuk mendistribusikan air ke *runner* turbin agar arah dan kecepatan alir optimal, dalam proses pembuatannya diawali dengan pembuatan model cetakan melalui proses pemrosesan CNC agar tingkat ketelitian komponen tersebut dapat dipertanggungjawabkan, kemudian komposit dengan laminasi basah dicetak. Hasilnya seperti Gambar 10.



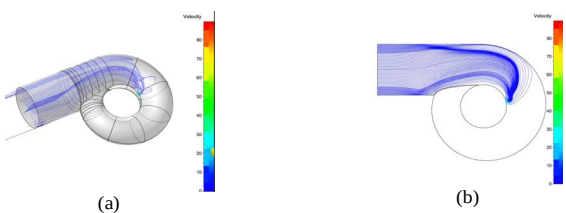
Gambar 10. Hasil komponen *stay vane*

4. PEMBAHASAN

Pada rumah turbin konsentrasi static pressure yang terbesar terjadi sebesar 200000 (Pa) atau = 0,2 (Mpa) pada dua posisi hampir sama di daerah yang sama seperti Gambar 11, artinya ada perbedaan tekanan sebesar 0,1 (Mpa) dengan kecepatan alir air yang masuk. Hal lain yang diketahui adanya peningkatan kecepatan yang sekitar 2 kali disekitar runner dibandingkan dengan kecepatan masuk. Pola kecepatan aliran diperlihatkan pada Gambar 12



Gambar 11. Konsentrasi *static pressure* yang terjadi pada posisi mendatar maupun posisi tegak lurus

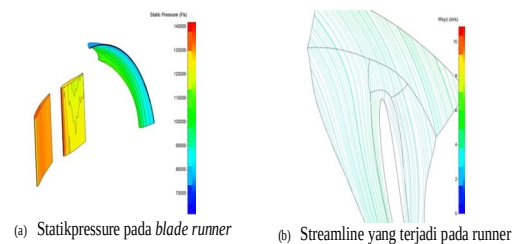


Gambar 12. Kecepatan alir air pada rumah turbin pada posisi mendatar dan posisi tegak lurus

Aspek kekuatan dari dinding evolute turbin Francis yang terbuat dari material komposit diberi kekuatan pada dindingnya dengan menambah profil penguat, secara prinsip akan meningkatkan inersia massa yang pada akhirnya stuktur menjadi lebih kaku, sehingga terhindar dari perubahan bentuk. Struktur pengaku diberikan pada posisi tertentu

berdasarkan pada hasil kaji simulasi komputasional dengan memanfaatkan perangkat lunak Numeca.

Perbedaan tekanan pada runner turbin static pressure terjadi pada inlet sebesar 136951.98 (Pa) = 0,1369 (MPa) dan pada outlet –nya sebesar 80000.00 (Pa) = 0,08 (MPa) Gambar 13 dengan mass flow sebesar 361.00 (kg/s) untuk input dan 360.95 (kg/s) untuk output-nya, pada posisi dua dimensi tidak terjadi hambatan yang berarti.

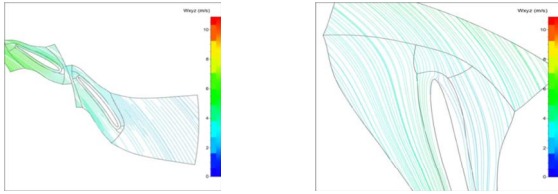


Gambar 13. Hasil kaji CFD-Numeca pola aliran disekitar *runner*

Prototype runner turbin telah dilakukan penyempurnaan dengan coating atau diproteksi dengan anti gores polyurethane. Sementara simulasi CFD-Numeca juga digunakan untuk memberikan gambaran terkait dengan static pressure yang terjadi didalam rumah turbin, yaitu sebesar 0,2 [MPa] pada daerah tertentu dengan kecepatan aliran air sekitar 20 [m/s]. Nilai tersebut masih terlalu kecil apabila dibandingkan dengan struktur yang dibuat dengan memanfaatkan material komposit sehingga dapat dikatakan masih aman.

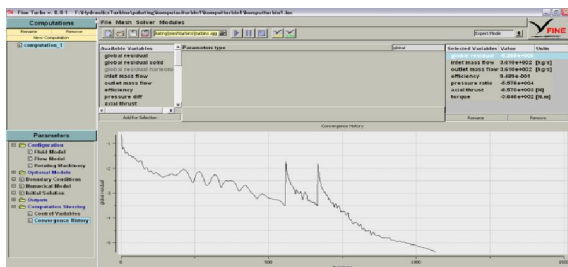
Pengukuran kebulatan runner telah dilakukan dengan hasil yang cukup memuaskan dimana total run out (TIR) terbesar berada pada posisi crown sebesar 0,087 mm, sementara uji ketahanan dilakukan dengan menyemprotkan air bercampur pasir selama 3 jam dengan tekanan 0,5 – 0,9 Kg/cm³ dan pengujian dilakukan melalui dua tahapan.

Simulasi pola aliran air disekitar dan didalam elemen turbin Francis dapat diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak Numeca seperti Gambar 14:



Gambar 14. Aliran fluida disekitar sudu runner turbin Francis. Simulasi dengan menggunakan perangkat lunak Numeca

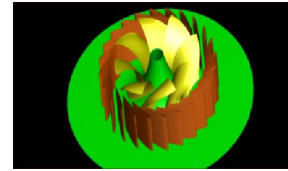
Pada gambar tersebut ditunjukkan distribusi streamline pada posisi 50% dari tinggi runner. Dapat dilihat bahwa pola aliran streamline kecepatan absolut pada guide vane dan pola aliran streamline kecepatan relatif pada runner terlihat smooth dan tidak menunjukkan adanya fenomena separasi aliran, sedangkan histori dari proses komputasi pada global residual atau error yang terjadi pada proses komputasi digunakan teknik multigrid dengan level 3, dan tingkat kriteria konvergensi mencapai $10e-3.5$ pada level 1 dan 2, dan mencapai $10e-5$ pada level 0. Dan dicoba ditingkatkan dengan meshing hingga 8 juta-an, oleh karena telah menggunakan perangkat yang 64 bit dan 4 core.



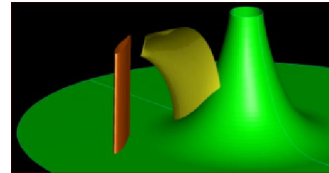
Gambar 11. Proses iterasi pada perangkat lunak Numeca

Parameter simulasi numerik yang digunakan :
 Model Fluida : Air (inkompresibel)
 Model Aliran Fluida : Turbulent Navier-Stokes, Spallart-Allmaras
 Teknik Multigrid : sampai dengan level 3

Hasil simulasi runner dan evolutunya didapat jumlah blade pada stay vane sebanyak 24 buah, melalui proses simulasi ini diharapkan akan mempermudah penentuan arah dan sudut blade dalam mendistribusikan air ke runner, seperti pada gambar 16 dan 17.



Gambar 16. Geometri stay vane dan runner turbin Francis



Gambar 17. Bagian komponen stay vane

5. KESIMPULAN

Pemberian coating pada runner, dipercaya akan meningkatkan kemampuan untuk bertahan pada kondisi gesekan yang cukup tinggi. Mengacu pada hasil pembahasan, maka dapat disampaikan beberapa hal sebagai berikut,

1. Komponen turbin Francis direncanakan dan dibuat prototipenya dengan baik, dan pada runner telah menggunakan coating yang cukup kuat. Jet air untuk pencucian mobil telah digunakan untuk uji eksperimental merusak runner ini, namun demikian kerusakan tidak cukup signifikan, akibat dari proses coating yang diberikan. Namun demikian kaji ulang akan dilakukan dengan cara lebih detail dan rinci.
2. Runner turbin telah dilakukan uji keselindrisan didaerah crown dan band, hasilnya penyimpangan yang terjadi masih dalam batas toleransi, penyimpangan terbesar sebesar $+ 0,087 \text{ mm}$
3. Berdasarkan justifikasi ulang pada perangkat lunak CFD-64bit 4 core, dapat dibuktikan bahwa nilai perpindahan translasi ternyata besarnya sangat kecil sekali sehingga dalam hal ini nilai tersebut tidak berpengaruh banyak terhadap material komposit, ada perbedaan secara signifikan dari komposisi material maupun bentuk anyaman, hasil kajian menunjukkan anyaman melintang yang terbaik. Simulasi

CFD Numeca memberikan gambaran yang menggembirakan dimana static pressure terbesar terjadi sebesar 2.105 (Pa). Namun demikian material komposit layak digunakan pada pembuatan runner dan rumah turbin.

4. Pelaksanaan fabrikasi prototipe dapat direalisasikan walaupun masih banyak yang harus disempurnakan.

6. REKOMENDASI

Uji eksperimental lanjutan masih diperlukan untuk mengetahui pengaruh/efek dari berbagai parameter yang mungkin akan terjadi

7. DAFTAR PUSTAKA

1. Miles Rohan, Bolivian Times, January 6, 2000
2. Hermod Brekke, STATE OF THE ART IN TURBINE DESIGN, Norwegian University of Science and Technology, ermod.brekke@maskin.ntnu.no
3. Magnoli M.V., Numerical simulation of pressure oscillations in Francis turbine runners, JASS 2009-Joint Advanced Student School, St. Petersburg, 29.3-7.4.2009
4. Hari Prasad Neopane, et.al., Alternative Design of a Francis Turbine for Sand Laden Water, International Conference on Small Hydropower - Hydro Sri Lanka, 22-24 October 2007
5. Sebastian MUNTEAN, et.al., Analysis Of The Gamm Francis Turbine Distributor 3d Flow For The Whole Operating Range And Optimization Of The Guide Vane Axis Location, The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisoara, Romania, October 21 - 22, 2004
6. Nennemann, B, Vu, T.C., Farhat, M., CFD prediction of unsteady wicket gate-runner interaction in Francis turbines: A new standard hydraulic design procedure, École Polytechnique de Montréal/GE Energy Hydro 795 George V, Lachine Québec, Canada
7. William P. Creager and Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, John Wiley & Son, Inc., New York, 1950
8. K. Zablonsky, A. Radchik, Machine Elements, Foreign Languages Publishing House, Moscow,
9. Ating Sudradjat, Carolus Bintoro, Substitusi Material Komposit Pada Runner Turbin Francis, Prosiding Industrial Research Workshop & Seminar Nasional Sains Terapan 2010, Politeknik Negeri Bandung.
10. Ating Sudradjat, Carolus Bintoro, Viki Wuwung, Pendekatan Simulasi Numerik Laju Alir Fluida Dalam Rumah Spiral Untuk menentukan Optimasi Jumlah Sudu Pengarah Pada Turbin Francis, Metrik, 2011, Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung.
11. Ating Sudradjat, Carolus Bintoro, Kaji Teoritik dan Eksperimental Penggunaan Material Komposit pada Runner Turbin Francis, Program Hibah Bersaing, 2009-2012