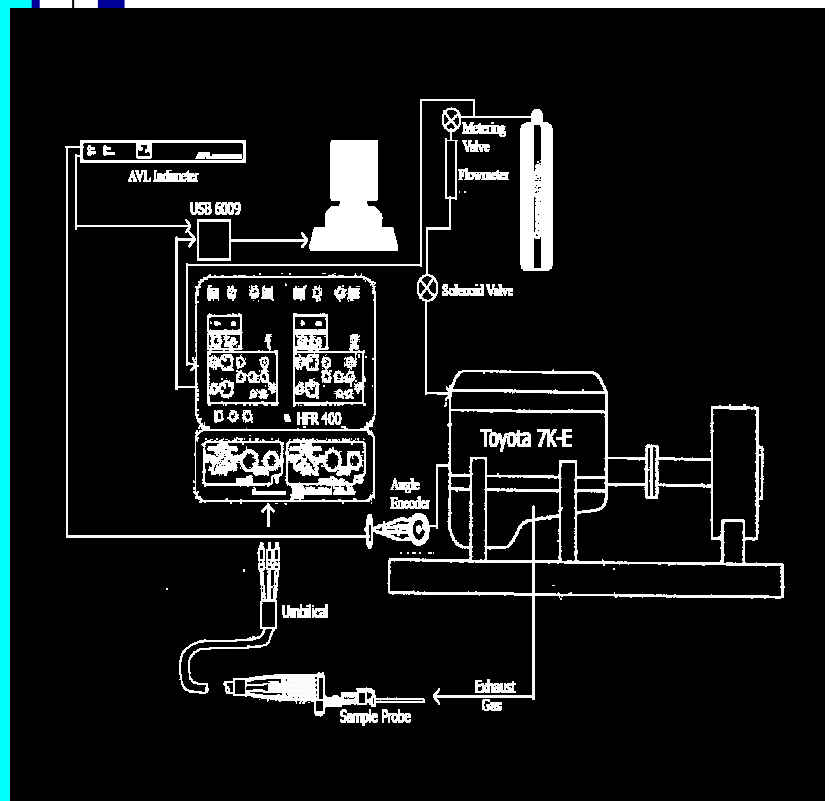


Jurnal Teknik Mesin
Volume 22, No.2, Oktober



EDITOR

B. Sutjiatmo (Ketua)
A. Suwono
D. Suharto
K. Bagiasna
S. D. Jenie
S. S. Brodjonegoro
Abdurrachim
I. Nurhadi
R. Suratman
P. S. Darmanto

MITRA BESTARI

Ign. P. Nurprasetio (ITB)
I. S. Putra (ITB)
A. I. Mahyuddin (ITB)
Y. Yuwana M (ITB)
Z. Abidin (ITB)
P. Sutikno (ITB)
T. Hardianto (ITB)
T. A. F. Soelaiman (ITB)
N. P. Tandian (ITB)
S. Wiryolukito (ITB)
A. Basuki (ITB)

REDAKSI PELAKSANA

A. D. Pasek (Ketua)
I M. Astina
I. G. N. W. Puja
Indrawanto
W. Adriansyah
A. Wibowo
I N. Diasta

ALAMAT REDAKSI

Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung
Jln. Ganesa 10, Bandung 40132
Tel. :(022)-2504243
Fax: (022)-2534099
E-mail: ari@termo.pauir.itb.ac.id
yadi@tu.ms.itb.ac.id

Terbit 2 (dua) kali dalam satu tahun
bulan April dan Oktober.

EDITORIAL

Jurnal Mesin Vol. 22 no. 2 merupakan edisi terakhir tahun 2007. Pada edisi ini enam makalah diterbitkan yang mencakup berbagai disiplin ilmu dalam Teknik Mesin dan Dirgantara.

Makalah pertama ditulis oleh Chan Sarin dan para pembimbingnya dari Program Studi Teknik Mesin ITB dan Fakultas Sain dan Teknologi Universitas Keio, Jepang. Makalah ini membahas mengenai pengembangan persamaan tingkat keadaan untuk memprediksi sifat-sifat termodinamika normal butana. Persamaan yang dikembangkan merupakan turunan dari persamaan Hemholtz dan mempunyai jumlah suku-suku yang lebih sedikit di bandingkan dengan persamaan-persamaan tingkat keadaan yang ada saat ini. Hasil prediksi dari persamaan ini kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian yang dilakukan oleh peneliti lain. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa tingkat kesalahan persamaan tidak lebih dari 1 %.

Makalah kedua ditulis oleh Ari Darmawan Pasek dkk dari Kelompok Keahlian Konversi Energi ITB. Makalah ini membahas sifat mampu nyala dan performansi refrigeran campuran propana (R-290) dan R-22. Dari hasil pengujian sifat mampu nyala diketahui bahwa pencampuran R-20 dengan R-22 dapat menurunkan sifat mampu nyala R-290. Pada komposisi R-290 40% dan R-22 60 % sampai R-290 59% / R-22 41% campuran mempunyai batas penyalaaan bawah yang lebih besar dari 3,5% sehingga refrigeran tersebut dapat di kategorikan sebagai refrigeran kelas A2. Refrigeran campuran tersebut mempunyai massa optimum yang lebih sedikit dari R-22 dan mempunyai COP lebih baik dari R-22 tetapi lebih buruk dibanding R-290 murni. Refrigeran campuran tersebut diketahui bersifat azeotropik.

Makalah yang ditulis oleh Sigit Yoewono dan Adriansyah dari Kelompok Keahlian Teknik Produksi membahas mengenai optimasi proses pemesinan EDM *Wire Cut*. Dalam metode optimasi ini yang diusulkan adalah Algoritma Genetik, dengan menggunakan algoritma tersebut diperoleh kombinasi nilai variabel input mesin yang menghasilkan kondisi pemotongan optimum dengan *feed rate* dan kekasaran permukaan sebagai parameter optimasi. Variabel input yang dimaksud adalah *no load voltage*, *capacitor*, *on time*, *off time*, dan *servo voltage*. Dengan membandingkan hasil optimasi dengan metode lain dapat terlihat bahwa metode algoritma genetik menghasilkan kondisi optimal yang baik.

Makalah keempat ditulis oleh Arief Haryanto dkk dari Kelompok Keahlian Konversi Energi ITB. Makalah ini metode pengurangan gas HC di saat start pada motor bensin. Pengurangan gas HC dilakukan dengan cara menambahkan gas hidrogen ke dalam ruang bakar. Penambahan gas hidrogen ini akan menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna sehingga HC dapat dikurangi. Makalah ini juga membahas hasil pengujian untuk mendapatkan jumlah gas hidrogen yang optimum.

Makalah kelima ditulis oleh Yuli Setyo Indartono dkk dari Kelompok Keahlian Konversi Energi ITB. Makalah ini membahas pengaruh penambahan aditif surfactant terhadap pertumbuhan partikel Trymethylolthane (TME). Suspensi TME ditambahkan dengan maksud untuk menambah kapasitas termal refrigeran sekunder (brine), sedangkan surfactant ditambahkan agar friksi pada saluran dapat dikurangi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya penambahan surfactant akan mempengaruhi pertumbuhan kristal TME, untuk mengatasi hal tersebut harus ditambahkan pula counter ion dengan konsentrasi tertentu.

Makalah terakhir yang ditulis oleh Indra Djodikusumo dkk dari Kelompok Keahlian Teknik Produksi ITB berisi informasi mengenai proses reverse dan forward engineering yang dilakukan kelompoknya dalam pembuatan turbin Francis untuk pembangkit mini hidro. Cerita sukses dan langkah-langkah pengembangan selanjutnya dari proses engineering tersebut dapat dibaca dalam makalah ini.

Akhir kata Redaksi mengucapkan selamat membaca semoga makalah-makalah dalam Jurnal Mesin memberi informasi dan pengetahuan yang bermanfaat.

MESIN

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 22, No. 2, Oktober 2007

ISSN 0852-6095

Diterbitkan oleh : Program Studi Teknik Mesin,
Fakultas Teknologi Industri - ITB

Surat ijin : STT No. 964/DIT-JEN/PPG/STT/1982.

DAFTAR ISI

- Thermodynamic property model of wide-fluid phase n-butane.*
Chan Sarin, I Made Astina, Prihadi Setyo Darmanto dan Haruki Sato 44-54
- Sifat mampu nyala dan massa optimum refrigeran campuran R-290/R-22
Sebagai alternatif pengganti R-22*
**Ari Darmawan Pasek, Aryadi Suwono, Novianti Nugraha dan
Usman Rosyadi** 55-61
- Optimisasi proses pemesinan EDM wire cut untuk modus gerak sirkular
menggunakan algoritma genetik.*
Sigit Yoewono Martowibowo dan Adriansyah 62-68
- Effects of hydrogen addition into intake air on hydrocarbon emission
of gasoline engines at cold start condition.*
Arief Haryanto, Wiranto Arismunandar dan Gerard George Engel 69-72
- Particle size distribution and rheological characteristic of trimethylolethane
treated by cationic surfactant.*
**Yuli Setyo Indartono, Hiromoto Usui, Hiroshi Suzuki, Satoshi Tanaka,
Kousuke Nakayama, Yohiyuki Komada dan Tetsu Itotagawa.** 73-80
- Pemanfaatan system CAD/CAM/CAE dalam reverse dan forward engineering
untuk turbin Francis.*
Indra Djodikusumo, Lukman Santoso dan Rahmat Haris. 81-89

M E S I N

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 22, No. 2, Oktober 2007

ISSN 0856-6095

PEMANFAATAN SISTEM CAD/CAM/CAE DALAM REVERSE DAN FORWARD ENGINEERING UNTUK TURBIN FRANCIS

Indra Djodikusumo⁽¹⁾, Lukman Santoso⁽²⁾, Rahmat Haris⁽³⁾,

⁽¹⁾Kelompok Keahlian Teknik Produksi, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung

^(2,3)PT. Ganesha Reverse Engineering and Toolmaking (GREAT)

Ringkasan

Dengan meningkatnya harga bahan bakar minyak di pasar internasional, dan dalam upaya mengurangi pemanasan global, penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Air termasuk yang berskala mini didorong dan bahkan diberi insentif. Sampai dengan tahun 2020 Indonesia bermaksud membangun 488 MW Pembangkit Listrik Tenaga Air berskala Mikro dan Mini di seluruh wilayah Indonesia. Setengah di antaranya adalah yang berskala mini. Turbin Air berskala mikro telah banyak diproduksi oleh beberapa perusahaan yang berada di Bandung dan sekitarnya. Namun demikian Turbin Air yang berskala mini masih diimpor dari luar negeri. Dalam upaya meningkatkan kemampuan industri lokal, penulis telah melaksanakan pengembangan Turbin Air berjenis Francis yang berskala kecil dan mini, dengan rentang daya antara 300 kW sampai dengan 5 MW. Dalam rangka pengembangan itu telah dimanfaatkan sistem-sistem CAD/CAM/CAE serta metode Reverse dan Forward Engineering. Hasil yang diperoleh selama ini telah memuaskan walaupun perlu dilakukan penyempurnaan secara terus menerus.

Abstract

The oil price has been increasing since the last few years. Since then the utilization of hydro power plant has also been increasing. The hydro power plant is very well known as environmental friendly power plant and therefore its utilization is demanded all around the world. Indonesia has planned to build up until 488 MW micro and mini hydro power plant until the year 2020. Half of this is micro-hydro power plant and the other half is mini-hydro power plant. The turbines for micro-hydro power plant have been produced locally, but the other half which are mini-hydro power plant are still imported from foreign countries. It is the intention of this applied research to develop the capability of local industry to design and manufacture the Francis turbine for mini-hydro power plant from 300 kW until 5 MW. The utilization of CAD/CAM/CAE System is very intensif during the development phases. Reverse and forward engineering has been applied for this purpose. The good result has been achieved. The continuous improvement shall be done in the future in order to have the better result.

Keywords: Runner Turbin Francis, CAD/CAM/CAE, Reverse Engineering, Forward Engineering

1. LATAR BELAKANG PERMASALAHAN

Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mini-Hydro (PLTMH) merupakan salah satu alternatif yang dapat dipilih orang dalam usaha memenuhi kebutuhan tenaga listrik yang cenderung terus meningkat setiap tahunnya, khususnya di Indonesia. Di samping tidak memerlukan banyak biaya dalam pengoperasiannya, PLTMH juga sangat ramah lingkungan. Berdasarkan informasi yang dikumpulkan, tidak kurang dari 488 MW PLTMH akan dibangun di Indonesia sampai dengan tahun 2020 [1]. Setengah di antaranya adalah yang berskala mini. Turbin untuk PLTMH yang berskala mikro

sudah mulai dibuat di Indonesia, yang pada umumnya berjenis Aliran Silang (*Cross Flow*). Namun tidak demikian halnya dengan Turbin untuk PLTMH berskala mini, umumnya berjenis Francis dan Kaplan, yang hingga saat ini masih banyak diimpor dari negara-negara asing misalnya Cina, Jepang, Cheko, Jerman, Perancis, dan Amerika Utara.

Sepuluh dari PLTMH berdaya total 488 MW yang akan dibangun di Indonesia adalah PLTMH berskala mini. Apabila daya rata-rata turbin untuk PLTMH berskala mini yang diperlukan adalah 1 MW, maka sampai dengan tahun 2020 diperlukan sekitar 20

buah turbin berskala mini per tahunnya. Sangat disayangkan bilamana peluang tersebut dibiarkan hilang begitu saja dengan cara mengimpor dari luar negeri, tanpa adanya peningkatan kemampuan Industri Lokal dalam upaya memenuhi kebutuhan PLTMH tersebut. Apabila nilai 1 unit peralatan Mekanikal/ Elektrikal (Turbin, Generator, Panel Kontrol dan Transformator) adalah sekitar Rp. 5 Milyar, maka uang yang diperlukan untuk memenuhi jumlah kebutuhan peralatan Mekanikal/Elektrikal tersebut adalah sekitar Rp. 100 Milyar per tahunnya. Sekitar setengah dari nilai tersebut adalah untuk turbinnya saja. Nilai tersebut belum mencakup komponen pekerjaan sipil yang biasanya bisa mencapai 2 kali dari nilai peralatan Mekanikal/Elektrikal atau bahkan lebih, tergantung pada kondisi lokasi di mana PLTMH akan dibangun.

Salah satu penyebab mengapa rancang bangun Turbin Air khususnya yang berjenis Francis maupun Kaplan untuk PLTMH berskala mini belum dilakukan di Indonesia adalah teknik dalam melakukan rancang bangun dan pembuatan *runner* turbin, yang merupakan jantung dari turbin tersebut.

Penulis bersama-sama dengan Bagian Perekrayasaan (*Engineering Division*) di PT. GREAT telah mengembangkan teknik untuk melakukan rancang bangun dan pembuatan turbin Francis berskala mini, termasuk komponen utamanya yaitu *runner* turbin Francis. Berbagai teknologi dalam bidang CAD (*Computer Aided Design*), CAM (*Computer Aided Manufacturing*) dan CAE (*Computer Aided Engineering*) telah dimanfaatkan guna melakukan rancang bangun turbin Francis berskala mini tersebut, sehingga diperoleh hasil yang memuaskan.

Pengembangan ini dilakukan oleh Penulis bersama dengan tim dengan menggunakan dana Program Insentif dari Menristek yang diperoleh selama 2 tahun yaitu pada tahun 2007 dan tahun 2008 sebesar Rp. 500 Juta. Penguasaan teknologi tersebut diharapkan dapat menumbuh-kembangkan bukan hanya PT. GREAT saja, namun juga dapat menghidupi banyak perusahaan lainnya yang merupakan *stakeholder* dalam pembangunan PLTMH. Dalam makalah ini penulis akan lebih memusatkan pembahasan dalam proses perancangan dan pembuatan *runner* turbin Francis saja, dengan menggunakan metode *reverse* dan *forward engineering*.

2. METODE PEMECAHAN MASALAH

Reverse engineering adalah proses menduplikasi suatu produk (berupa komponen atau suatu bagian rakitan atau bahkan rakitan utuh) tanpa adanya gambar dan dokumentasi mengenai produk tersebut atau model komputer dari produk tersebut. *Forward engineering* merupakan proses pengembangan

produk dimulai dari ide mengenai produk tersebut, kemudian dijabarkan dalam konsep mengenai produk yang diinginkan, selanjutnya diwujudkan dalam produk yang diinginkan melalui berbagai proses analisis keteknikan, perencanaan proses produksi dan produksi itu sendiri dan pada akhirnya diuji untuk mengetahui apakah kinerja produk telah sesuai dengan keinginan semula.

Reverse engineering dan *forward engineering* telah digunakan secara bersamaan dalam riset aplikasi yang telah dilakukan. Dimensi utama *runner* turbin Francis dirancang dengan menggunakan *forward engineering*, sementara profil sudu *runner* turbin Francis dikembangkan dengan menggunakan metode *reverse engineering*.

Tahapan kegiatan yang dilakukan dalam proses perancangan dan pembuatan *runner* turbin Francis dengan metode *reverse* dan *forward engineering* dapat diuraikan sebagai berikut:

- a) Pembangunan pustaka (*library*) mengenai model 3-Dimensi (selanjutnya disingkat dengan model 3-D) *runner* turbin Francis
- b) Perhitungan dimensi utama *runner* dan pemodelan 3-D *runner*
- c) Simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) terhadap model 3-D *runner*
- d) Pembuatan sudu *runner* dengan proses *investment casting*
- e) Pembuatan *cone* dan *ring* dengan proses *sand casting*
- f) Perakitan *cone*, *ring* dan sudu
- g) Penyeimbangan *runner*

3. PEMBANGUNAN PUSTAKA (*LIBRARY*) MODEL 3-D *RUNNER*

Terdapat banyak sekali Pembangkit Listrik Tenaga Air berskala mini di Indonesia, yang menggunakan turbin Francis. Turbin Francis berskala mini tersebut terpasang di berbagai lokasi yang berbeda, dengan kecepatan spesifik turbin yang sangat beragam, mulai dari kecepatan spesifik rendah sampai dengan kecepatan spesifik tinggi. Turbin-turbin tersebut banyak yang dibuat oleh pabrik turbin berkelas dunia, seperti Sulzer, Alstom, Nerpick, Vatech, WKV, Ossberger, dan sebagainya.

Beberapa turbin yang dipasang oleh Belanda di sekitar Bandung seperti, Dago Bengkok, Plengan, Cijedil dan sebagainya masih beroperasi dengan baik, walaupun umurnya sudah hampir 100 Tahunan. Dari sisi perancangan tidak perlu diragukan lagi bahwa turbin-turbin tersebut dan turbin-turbin yang dipasang kemudian terbukti berkinerja baik dan dapat diandalkan.

Turbin-turbin yang saat ini terpasang tersebut merupakan pustaka desain yang tentunya sangat bermanfaat untuk digunakan sebagai acuan dalam upaya melakukan proses perancangan turbin. Oleh karena itu, pada beberapa *runner* yang sudah terpasang dan berfungsi dengan baik, dilakukan proses reverse engineering (khususnya geometri saja), dalam rangka membangun pustaka model 3D *runner* turbin Francis.

Proses reverse engineering geometri *runner* turbin Francis dilakukan dengan beberapa tahapan kegiatan sebagai berikut [2]:

- a) *Scanning*
- b) *Polymeshing*
- c) *Boundary creation*
- d) *Springmeshing*,
- e) *Surfacing*,
- f) *Solid modeling*.

a) Scanning

Persiapan terhadap *runner* yang akan diukur dilakukan Gambar-1.



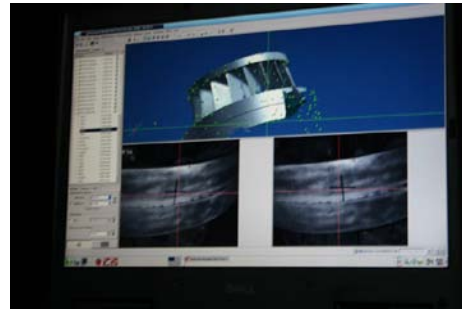
Gambar 1. *Runner* yang akan diukur

Pada tahap ini dilakukan pemindaian geometri *runner* menggunakan piranti pengukuran optik. Piranti tersebut dapat berupa *laser scanner* atau piranti optik lainnya.



Gambar-2: Proses *scanning*

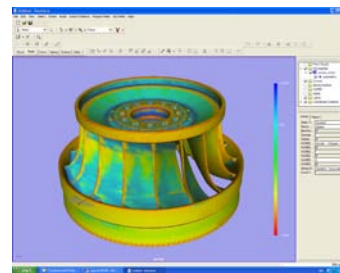
Dari hasil proses pemindaian akan didapatkan awan titik atau *point cloud* sebagai hasil pengukuran Gambar-3.



Gambar 3. *Point Clouds*

b) Polymeshing

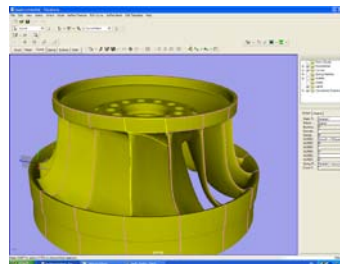
Polymeshing merupakan proses pembuatan *polygon* yang melalui 3 titik hasil pengukuran (*point clouds*). *Polygon-polygon* segitiga ini akan menghubungkan semua *pointcloud* hingga didapat *mesh* yang menyerupai benda ukur. Proses triangulasi dilakukan otomatis oleh *software*, dengan angka toleransi yang langsung dapat diperoleh berdasarkan sebaran data yang dimiliki *pointcloud*.



Gambar-4: Mesh

c) Boundary creation

Kurva-kurva daerah merupakan kurva yang membatasi daerah pada permukaan yang memiliki kecenderungan *curvature* berbeda.

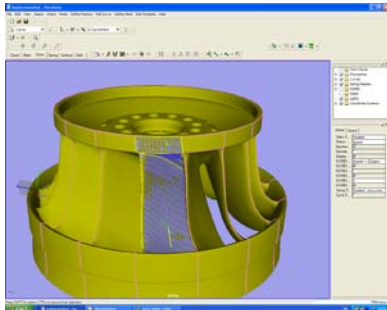


Gambar-5: Boundary Curve

Kurva-kurva pembantu ditambahkan pada *mesh* sedemikian rupa agar *mesh* terbagi atas daerah-daerah dengan 4 sisi. Kurva tersebut akan menjadi pembatas (*boundary*) untuk membentuk permukaan (*surface*).

d) Springmeshing

Spring mesh merupakan permukaan yang dibentuk oleh jaring-jaring kurva pegas yang dapat diatur kerapatan dan kekakuannya sehingga permukaan yang dihasilkan dapat mewakili permukaan benda.



Gambar 6. Spring mesh

e) Surfacing

Surface modeling pada dasarnya telah kita lakukan dengan melakukan proses di atas yaitu mulai dari *polymeshing*, *curve creation*, dan *spring meshing*. Dari ketiga proses di atas akan didapatkan *surface model*. Untuk mendapatkan kualitas permukaan yang bagus, harus dilakukan pemeriksaan kontinuitas antar *patch surface*.

f) Solid Modelling

Solid model dapat dibentuk dari *surface model* yang diperoleh dari proses-proses diatas. Untuk mendapatkan solid model *runner* turbin Francis, harus dipastikan tidak ada celah pada permukaan yang melingkupi volume *runner*.



Gambar 7. Model digital dan model fisik *runner*

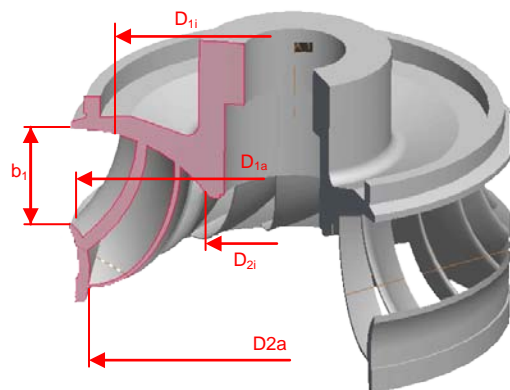
Proses scanning telah dilakukan oleh PT. GREAT untuk beberapa jenis *runner* turbin Francis dengan kecepatan spesifik berbeda. Sekarang ini PT. GREAT memiliki beberapa acuan model 3-D *runner* turbin francis masing-masing untuk wilayah kecepatan spesifik rendah, medium dan tinggi. Acuan tersebut didapat dari hasil scanning *runner* turbin Francis buatan Alstom, WKV dan Sulzer.

4. PENGHITUNGAN DIMENSI UTAMA RUNNER DAN PEMODELAN 3D RUNNER

Dimensi dan geometri *runner* turbin Francis secara mendasar ditentukan oleh beberapa faktor sebagai berikut:

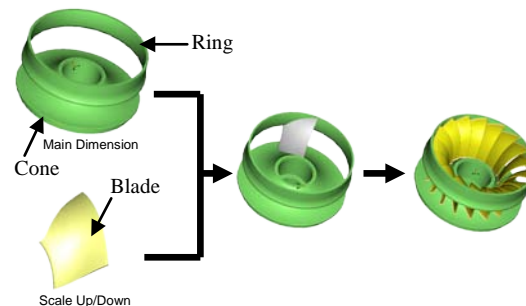
- *Net head*
- *Range of discharges through the turbine*
- Kecepatan putar
- Masalah kavitasi
- Harga turbin

Dimensi utama *runner* ditunjukkan pada Gambar-8 sebagai berikut [3]:



Gambar 8. Dimensi utama *runner*

Berdasarkan data potensi air (*Head* dan *Debit*) suatu potensi lokasi, dapat dihitung dimensi utama *runner* tersebut (3, 4, 5). Setelah dimensi utama *runner* diperoleh, kemudian dilakukan pemodelan 3D *runner*. Pemodelan 3-D terhadap *runner* dilakukan dengan *scale up/scale down* pustaka *runner* yang memiliki kecepatan spesifik setara dengan *runner* yang sedang dirancang. Ilustrasi pemodelan dapat dilihat pada Gambar-9 sebagai berikut.

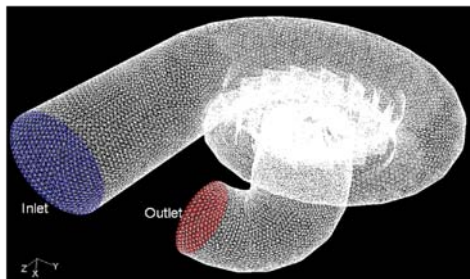


Gambar 9. Ilustrasi pemodelan *runner*

Komponen turbin Francis lainnya seperti *spiral case* dan *draft tube* dihitung dengan menggunakan berbagai formula empirik yang ada di berbagai pustaka (3, 4, 5).

5. SIMULASI CFD (*Computational Fluid Dynamic*) TERHADAP MODEL 3-D TURBIN

Kinerja suatu turbin Francis sangat ditentukan oleh beberapa hal utama, yaitu perancangan bagian turbin di mana air akan mengalir melaluinya. Sekarang ini dengan bantuan perangkat lunak CFD seperti misalnya Fluent, perancangan dinamika aliran fluida melalui komponen utama turbin Francis dapat dilakukan dengan lebih baik. Ada 2 hal utama yang dapat diperoleh dari simulasi dengan menggunakan perangkat lunak seperti Fluent, yaitu besarnya daya yang dihasilkan yang harus dimaksimalkan dan potensi timbulnya kavitasi, yang tentunya harus diminimumkan. Untuk melakukan analisis CFD dengan menggunakan Fluent, diperlukan adanya model CFD Gambar-10 terlebih dahulu.

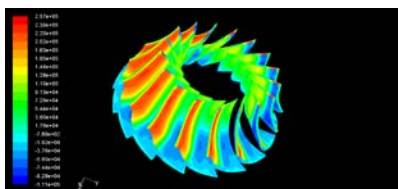


Gambar 10. Model CFD

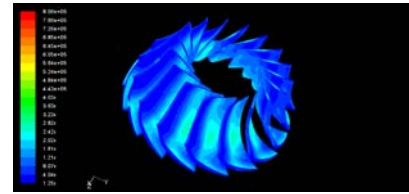
Data input dan parameter harus ditetapkan kemudian dimasukkan, mencakup misalnya:

- *Inlet Condition*
- *Outlet Condition*
- *Angular Velocity*

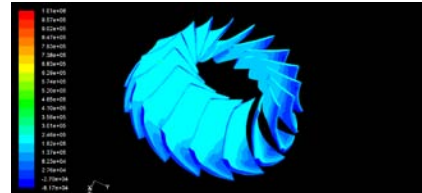
Dari simulasi kemudian akan diperoleh beberapa informasi seperti *static pressure contour*, *dynamic pressure contour* dan *total pressure contour* untuk berbagai view (Gambar-10), dan juga *pathline of static pressure*, *pathline of dynamic pressure* serta *pathline of total pressure*, serta *pathline of velocity*-nya (Gambar-11).



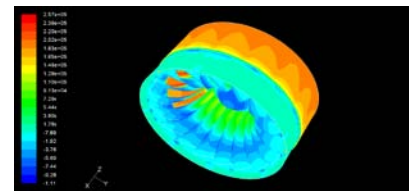
(a) *Static pressure contour (Pa g) of runner surfaces, upper view*



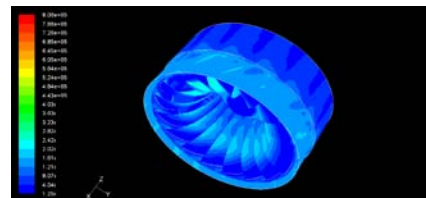
(b) *Dynamic pressure contour (Pa g) of runner surfaces, upper view*



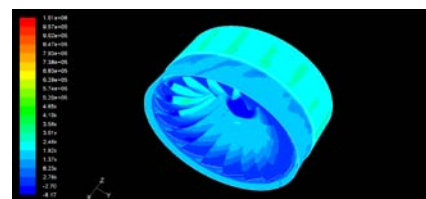
(c) *Total pressure contour (Pa g) of runner surfaces, upper view*



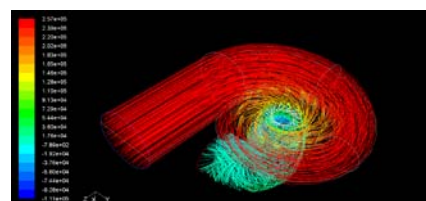
(d) *Static pressure contour (Pa g) of runner & hub surfaces*



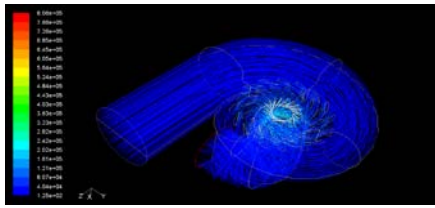
(e) *Dynamic Pressure Contour (Pa g) of runner & hub surfaces*



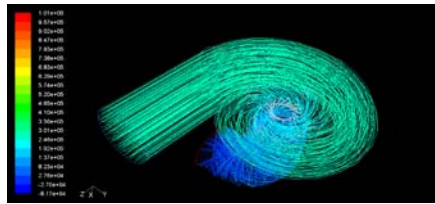
(f) *Total pressure contour (Pa g) of runner & hub surfaces*



(g) Upper view pathlines of static pressure (Pa g)



(h) Upper view pathlines of dynamic pressure (Pa g)



(i) Upper view pathlines of total pressure (Pa g)

Gambar 11. Hasil simulasi CFD

Di akhir simulasi, laporan mengenai hasil simulasinya dapat dicetak, misalnya mengenai *pressure force*, *viscous force* dan *total force* di berbagai zona Tabel-3 dan juga momen torsi serta perhitungan daya yang dihasilkan Tabel-4.

Tabel 3. Force print report from CFD program

Force vector: (1 0 0)			
zone name	pressure force N	viscous force N	total force N
runner	17850.33	346.11015	18196.441
runner_hub	-20683.902	132.58079	-20551.322
net	-2833.5719	478.69094	-2354.8809
Force vector: (0 1 0)			
zone name	pressure force N	viscous force N	total force N
runner	170.09777	0.86517711	170.96295
runner_hub	209.52501	0.3477206	209.87273
net	379.62278	1.2128977	380.83568
Force vector: (0 0 1)			
zone name	pressure force N	viscous force N	total force N
runner	-212.60878	-0.40875371	-213.01753
runner_hub	0.9906166	1.9715444	2.962161
net	-211.61816	1.5627907	-210.05537

Tabel 4. Total moment print report from CFD program

total moment N-m		
(8072.4537	-207.76503	-152.22066)
(21.379099	14.931039	-197.61675)
(8093.8328	-192.834	-349.83741)

Pada kasus ini, berdasarkan hasil tersebut di atas, daya yang dihasilkan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Power} &= \text{torque} \times \text{angular velocity} \\
 &= 8093.8 \text{ Nm} \times 1000 \times \pi / 30 \text{ rad/s} \\
 &= 847 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Setelah kinerja yang diinginkan dapat dicapai, maka dilakukan proses perhitungan kekuatan, dengan menggunakan modul perangkat lunak yang digunakan. Material untuk *runner* dipilih menggunakan ASTM berjenis CA6NM.

6. PEMBUATAN SUDU *RUNNER* DENGAN PROSES *INVESTMENT CASTING*

Sudu *runner* turbin dibuat dengan menggunakan “teknik 3 bagian”, di mana *runner* dipecah menjadi *cone*, *ring* dan sudu Gambar-9. Sudu *runner* turbin dibuat dengan menggunakan teknik *investment casting*. Tahapan kegiatan pembuatan sudu *runner* dengan teknik *investment casting* ditunjukkan pada Gambar-12 a s/d j.



(a) Mold cavity untuk wax pattern



(b) Mold core untuk wax pattern



(c) Mold set untuk wax pattern



(d) Wax pattern hasil pencetakan



(e) Wax pattern assembly untuk sudu runner



(f) Wax pattern assembly yang telah dilapisi campuran bubuk keramik



(g) Sintering terhadap ceramic mold



(h) Melting dan pouring



(i) Solidification



(j) Sudu runner yang dihasilkan

Gambar 12. Proses pembuatan sudu runner dengan teknik investment casting

Pembuatan *cone* dan *ring* untuk runner dilakukan dengan teknik pengecoran cetakan pasir yang biasa dikenal. *Cone* dan *ring* tersebut diproses awal dengan pembubutan, di mana sebagian dari *cone* dan *runner* telah mencapai dimensi akhir, namun sebagian yang lain akan diproses dengan pembubutan setelah *cone*, *ring* dan sudu dirakit menjadi satu.

7. PERAKITAN RUNNER

Perakitan runner dilakukan dengan menyusun *cone* dan *ring* di atas meja rata. Posisi *cone* dan *ring* harus konsentris (memiliki sumbu yang sama). Demikian juga dengan beda ketinggian antara *cone* dan *ring* harus di atur sedemikian rupa sehingga jarak b_1 Gambar-8 dicapai. Diperlukan waktu sekitar 2

minggu untuk melakukan setting *cone* dan *runner* di atas meja rata. Tahapan kegiatan perakitan *runner* ditunjukkan pada Gambar-13 a s/d f.



(a) Setting terhadap *cone* dan ring di atas meja rata



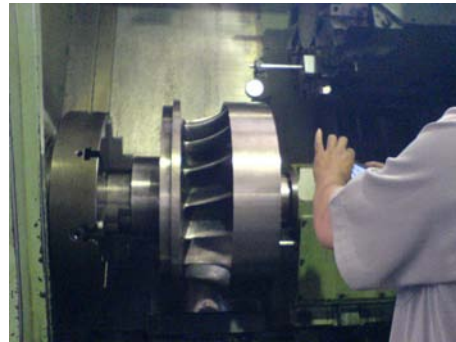
(b) Setting sudu satu per satu, kemudian dilakukan pengecekan



(c) Proses pengelasan



(d) Proses penggerindaan hasil pengelasan



(e) Proses pembubutan untuk mencapai dimensi akhir *runner*



(f) Balancing



(g) Runner siap dikirim/dirakit menjadi turbin

Gambar 13. Proses perakitan *runner*

8. HASIL DAN KESIMPULAN

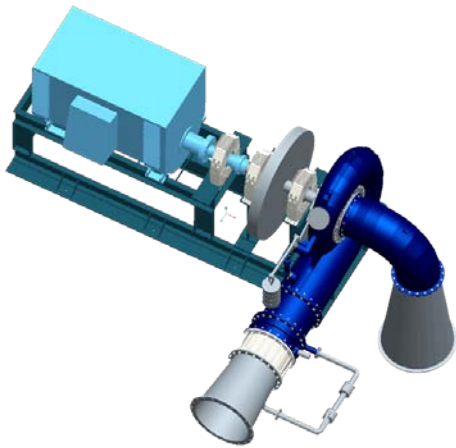
Teknik seperti yang telah diuraikan tersebut berhasil dilakukan untuk pembuatan *runner* baru sebagai pengganti *runner* yang sudah ada di PLTMH Kolondom (Sulawesi Tengah), dan hasilnya memuaskan. Di samping daya yang keluar sesuai dengan harapan *runner* tersebut telah satu tahun digunakan dan tidak bermasalah.

Saat ini tim pengembangan turbin Francis berskala mini ini sedang membuat 2 buah turbin Francis,

untuk lokasi Sawi Dago 2 (Sulawesi Tengah) berdaya 910 kW dan lokasi Sansarino (Sulawesi Tengah) berdaya 800 kW.

Pada posisi saat ini, proses perancangan telah selesai dilakukan Gambar-14 dan sedang dimulai dengan proses berikutnya yaitu pembuatan.

Proses pengembangan masih terus dilakukan khususnya dari sisi getaran mekanik dan juga keandalannya. Untuk itu peneliti bekerjasama dengan beberapa pihak yang memang berkompetensi dalam masalah tersebut.



Gambar 14. Turbin Francis dengan Generator buatan Pindad berdaya 800 kW untuk PLTMH Sansarino

DAFTAR PUSTAKA

1. *Investor Daily Friday*, JAKARTA, 23 February 2007.
2. Metris, Reference Manual for Metris Scan 3.1, *Metris n.v.*, 2003.
3. Hartwig Petermann, *Stroemungsmaschinen*, Springer Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 1972.
4. Bernhard Pelikan, The President of European Small Hydropower Association, *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*, ESHA, 2004.
5. Arne Kjølle, The Development of Hydropower in Norway, *Trondheim*, 2001.
6. Kunwoo Lee, *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1999.
7. Randy Shih, *Parametric Modeling with Pro/Engineer*, Wildfire 2, 2000.
8. Serope Kalpakjian dan Steven R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, Fourth Edition, Pearson Education, 2000.