

ANALISA PERFORMANSI TURBIN VORTEX MENGUNAKAN PERANGKAT LUNAK CFD DENGAN VARIASI DIMENSI SUDU I DAN SUDU III, DEBIT AIR MASUK SERTA LUAS SALURAN BUANG

Irham F. Tanjung¹, Syahril Gultom², Farel H. Napitupulu³, Dian M. Nasution⁴, Taufiq bin Nur⁵

Email:tanjung.irham@yahoo.com

^{1,2,3,4,5} Departemen Teknik Mesin, Universitas Sumatera Utara, Jl. Almamater, Kampus USU Medan
20155 Medan Indonesia

ABSTRAK

Turbin Vortex adalah salah satu jenis turbin mikrohidro yang menggunakan pusaran air sebagai penggerak sudunya. Pusaran air sendiri didapatkan jika adanya outlet darirumah sudu. Turbin Vortex mempunyai head yang relative rendah dan hanya memerlukan debit air terus menerus, yang sangat cocok digunakan di aliran sungai. Tugas Akhir ini sendiri adalah menganalisa dan simulasi secara numeric Turbin Vortex secara CFD dengan menggunakan Ansys Fluent. Analisis dilakukan pada aliran tiga dimensi (3D), steady, turbulen dan incompressible. Analisis sendiri menggunakan tiga jenis outlet 5,5cm, 6cm, dan 7cm yang masing masing divariasikan dengan dua jenis sudu. Sudu I dengan panjang 78,3 cm dan lebar 27,5 cm serta sudu III dengan panjang 78,3 cm dan lebar 13,5 cm. Kedua sudu berjumlah 4 blade dengan satu buah poros. Setelah menganalisa dan simulasi didapat efisiensi maksimal sudu I dan sudu III masing – masing adalah 25,522% dan 43,29 %.

Kata kunci : Efisiensi, CFD, Ansys Fluent, Turbin Vortex, Sudu

1. PENDAHULUAN

Energi pada saat sekarang ini semakin berkurang akibat penggunaan energy fosil secara berlebihan di semua bidang, ilmuwan – ilmuwan diseluruh dunia menyadari hal ini dan mencoba berbagai energy alternatif. Salah satu sumber energi yang saat ini sedang banyak dilakukan penelitian adalah arus air. Penggunaan berbagai macam turbin semakin maju. Indonesia, Negara kita adalah Negara agraris yang menghasilkan air secara terus menerus, sehingga turbin air lebih diutamakan dari turbin angin karena angin di Indonesia relative stabil. Alih fungsi turbin angin menjadi turbin air perlu dilakukan studi lebih lanjut tentangnya. Massa jenis air yang hampir 1000 kali lipat massa jenis udara menyebabkan gaya dan torsi yang mempengaruhi turbin semakin besar.

Pembangkit listrik tenaga air saat ini menjadi salah satu pilihan dalam memanfaatkan sumber energy terbarukan. Namun pemanfaatan yang ada masih menggunakan teknologi yang sederhana. Pembangkit Listrik jenis ini dalam proses pembuatannya sangat ekonomis namun masih dalam skala kecil. Artinya pembangkit-pembangkit ini hanya mampu mencukupi pemakaian energy listrik untuk sejumlah rumah saja. Jenis Pembangkit Listrik Tenaga Air ini sering disebut Microhydro atau sering juga disebut Picohydro tergantung keluaran daya listrik yang dihasilkan. *Microhydro* ataupun *Picohydro* yang dibuat biasanya memanfaatkan air terjun dengan *head* jatuh yang besar. Sedangkan untuk aliran sungai dengan *head* jatuh yang kecil belum termanfaatkan dengan optimal. Hal ini menjadi referensi untuk memanfaatkan aliran sungai dengan mengubahnya menjadi aliran *vortex* [2].

Seorang Peneliti dari Jerman Viktor Schauburger mengembangkan teknologi aliran *vortex* (pusaran) untuk diterapkan pada pemodelan turbin air. Aliran *vortex* yang juga dikenal sebagai aliran pulsating atau pusaran dapat terjadi pada suatu fluida yang mengalir dalam suatu saluran yang mengalami perubahan mendadak. Fenomena aliran *vortex* sering kali dijumpai pada pemodelan sayap pesawat, aliran *vortex* cenderung dianggap sebagai suatu kerugian dalam suatu aliran fluida. Dalam penelitiannya Viktor Schauburger, memanfaatkan aliran irigasi yang kemudian diubah menjadi aliran *vortex* (pusaran), yang kemudian dimanfaatkan untuk menggerakkan sudu turbin. Dari penelitian ini didapatkan efisiensi sebesar 75 % dengan tinggi air jatuh 0,7 m. Namun pada penelitiannya Viktor Schauburger tidak menjelaskan pengaruh luas sudu turbin [2].

Penelitian tentang turbin vortex belumlah sempurna, bukan karena Indonesia kekurangan penemu tetapi pengaplikasiannya belum banyak sehingga dapat dijadikan tolak ukur. Oleh karena itu

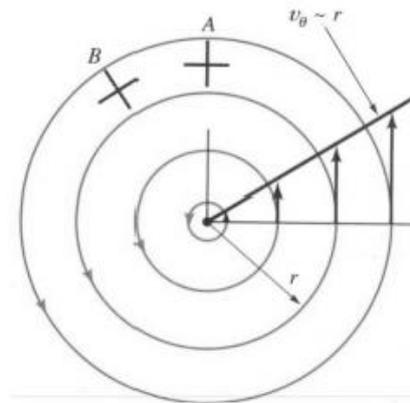
perlu dilakukan analisa turbin vortex dengan perangkat lunak CFD disamping pembuatan turbin vortex itu sendiri, agar nantinya efisiensi dari turbin itu dapat didapat maksimal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pusaran (Vortex) bentuk dalam cairan bergerak, termasuk cairan, gas, dan plasma. Beberapa contoh umum adalah asap cincin, whirlpool yang sering terlihat di bangun perahu, dayung, dan angin angin topan, Tornado dan badai debu. Pusaran membentuk di bangun dari pesawat dan yang menonjol fitur atmosfer Jupiter [3].

Dalam aliran fluida, aliran inibisa berarti menunjukkan putaran ataupun alur yang melingkar. Dalam defenisinya, aliran *rotational* kecepatan vektornya $V \neq 0$, jika *irrotational* kecepatan vektornya $V=0$. Aliran vortex ini sendiri termasuk dalam perpaduan aliran *irrotational* [3].

Untuk membedakan aliran *rotational* dan *irrotational*, kecepatan aliran $\vec{\omega}$ sama disemua tempat, dan makin meningkat secara teratur jika mendekati pusat.

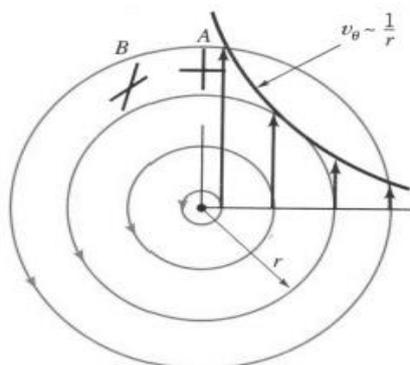


Gambar 2.1 aliran *rotational*

Jika, dijelaskan dalam persamaan:

$$\vec{\omega}_{vorticity} = \frac{v_{\theta}}{r} + \frac{dv_{\theta}}{dr} = 2\vec{\omega}_{ang.velocity}$$

Sedangkan aliran *irrotational*, kecepatan $\vec{\omega}$ total sama dengan nol, karena tiap aliran kecepatannya berbeda-beda. Dalam pusaran *irrotational*, cairan bergerak dengan kecepatan yang berbeda di berdekatan arus, jadi ada gesekan dan karena itu kehilangan energi seluruh vortex, terutama di dekat inti. Untuk alasan itu, irrotational pusaran juga disebut pusaran gratis.



Gambar 2.2 aliran *irrotational*

$$\vec{\omega}_{vorticity} = \frac{v_{\theta}}{r} + \frac{dv_{\theta}}{dr} = 0$$

Aliran vortex ini adalah aliran turbulen. Dikatakan aliran turbulen karena alirannya tidak teratur dan membentuk pusaran. *Vorticity* (kecepatan aliran vortex) sangat tinggi di daerah inti disekitar sumbu dan tekanan menekuk tajam ke bawah menuju lubang buang, sehingga aliran vortex ini termasuk aliran *rotational* [3].



Gambar 2.3 aliran vortex

Aliran vortex bias terjadi secara alami ataupun secara paksa. Aliran *vortex* terjadi walaupun tidak adanya gaya yang dilakukan pada fluida tersebut. Karakteristik dari *vortex* bebas adalah kecepatan tangensial dari partikel fluida yang berputar pada jarak tertentu dari pusat *vortex*.

Dalam vortex bebas, tidak ada perubahan energi melintas pada aliran lurus, jadi persamaan di atas sama dengan nol. Apabila suatu gaya diberikan pada suatu fluida dengan maksud membuat aliran fluida berputar. Hubungan kecepatan partikel fluida v terhadap jaraknya dari pusat putaran x dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$F_c = \frac{WV^2}{g}$$

Dimana :

F_c = gaya sentrifugal pada aliran vortex W = berat partikel vortex

V = kecepatan tangensial

Turbin air itu sendiri adalah turbin yang mengubah energi air menjadi energi puntir, selanjutnya energi puntir ini diubah menjadi energi listrik melalui generator. Menurut Sejarahnya turbin-turbin air yang sekarang berasal dari kincir-kincir air pada zaman abad pertengahan yang dipakai untuk memecah batubara dan pabrik gandum. Salah satu kincir air tersebut dapat dilihat di Aungrabad, India yang telah berumur 400-an tahun[2].

Menurut cara kerjanya, makater dapat dua jenis turbin yaitu :

1. Turbin Impuls (aksi).
2. Turbin Reaksi.

1. Turbin impuls

Yang dimaksud dengan turbin impuls adalah turbin air yang cara kerjanya dengan merubah seluruh energi air (yang terdiri dari energi potensial-tekanan-kecepatan) yang tersedia menjadi energi kinetik untuk memutar turbin, sehingga menghasilkan energi puntir dalam bentuk putaran poros. Atau dengan kata lain, energi potensial air diubah menjadi energi kinetik pada nosel. Contoh turbin impuls adalah turbin Pelton dan turbin crossflow[2].

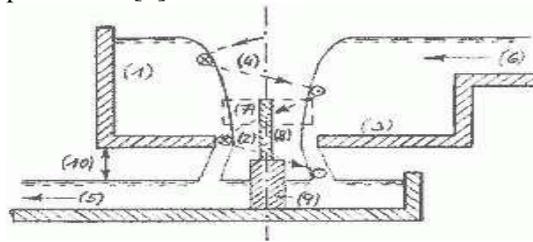
2. Turbin Reaksi

Turbin reaksi adalah turbin air yang cara bekerjanya dengan merubah seluruh energi air yang tersedia menjadi energi puntir dalam bentuk putaran. Sudu pada turbin reaksi mempunyai profil khusus yang menyebabkan terjadinya penurunan tekanan air selama melalui sudu.

Turbin ini terdiri dari sudu pengarah dan sudu jalan dan kedua sudu tersebut semuanya terendam di dalam air. Air dialirkan ke dalam sebuah terusan atau dilewatkan ke dalam sebuah cincin yang berbentuk spiral (rumah keong). Perubahan energi seluruhnya terjadi di dalam sudu gerak. Beberapa jenis turbin reaksi adalah turbin Francis, turbin Kaplan dan turbin vortex[2].

Turbin vortex adalah turbin yang menggunakan aliran vortex (gravitation water vortex) sebagai penggerak utama dari sudu. Aliran vortex ini sendiri adalah aliran melingkar

mengerucut, dengan menggunakan sifat fisika dari air yang mengalir dari tempat yang tinggi ke tempat yang rendah maka akan didapat vortex [4].



Gambar 2.4 skema aliran vortex

Beberapa kelebihan dari turbin ini dibandingkan dengan beberapa turbin lain diantaranya,

1. Biaya pemasangan relatif murah dan menggunakan konsep yang sederhana.
2. Pada penggunaan di alirannya aman bagi ikan, mikroba dan lain – lain, karena menggunakan tekanan yang rendah.
3. Baik dikembangkan di aliran air yang menggunakan debit yang besar tetapi head yang rendah seperti sungai. Indonesia sendiri memiliki sumber daya berupa sungai besar.
4. Efisiensi dari hasil pengujian dari Zotlöterer enterprise lebih baik dibandingkan beberapa jenis turbin yang lain.



Gambar 2.5 Turbin vortex Zotloterer

Gravitation Water Vortex Power Plan (GWVPP) ini sendiri untuk head yang rendah antara 0.7 m sampai dengan 2m. Flow rate atau debitnya antar 0,05 sampai 20 m/s³, dan tenaga digunakan antara 0.5 sampai 160kW[4].

Performansi pada turbin merupakan daya mekanik yang dihasilkan dari sebuah turbin. Untuk mendapatkan nilai tersebut maka data yang diperlukan adalah kecepatan sudut (ω) dan torsi (τ).

Untuk efisiensi turbin dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\eta = \frac{P_{\text{turbin}}}{P_{\text{air}}} \times 100\%$$

Dimana :

P_{turbin} = Daya turbin (Watt)

P_{air} = Daya air (Watt)

Dinamika fluida adalah cabang dari ilmu mekanika fluida yang mempelajari tentang pergerakan fluida. Dinamika fluida dipelajari melalui tiga cara yaitu:

- Dinamika fluida eksperimental
- Dinamika fluida secara teori, dan
- Dinamika fluida secara numerik (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan suatu ilmu untuk memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, perpindahan massa, reaksi kimia, dan fenomena yang berhubungan dengan menyelesaikannya menggunakan persamaan-persamaan matematika secara numerik.[1].

Dinamika fluida terdiri dari tiga dasar yaitu konservasi massa, momentum dan energi.

1. Hukum Konservasi Massa

Konsep dasar dari hukum konservasi massa adalah bahwa jumlah penambahan massa pada volume control adalah sama dengan jumlah aliran massa yang masuk dan keluar elemen.

2. Hukum konservasi momentum

Hukum ini dikenal juga dengan hukum Newton II tentang gerak. Tingkat kenaikan momentum partikel fluida sama dengan jumlah gaya-gaya pada partikel atau resultan gaya yang bekerja pada suatu objek sama dengan percepatan dikalikan dengan massa objek tersebut.

3. Hukum konservasi energi

Hukum konservasi energi mengatakan bahwa laju perubahan energi dalam dan E pada suatu elemen sama dengan jumlah fluks panas yang masuk ke elemen itu dan laju kerja yang bekerja pada elemen oleh gaya yang ada pada bodi dan permukaannya.[1].

Pada kasus tiga dimensi, hukum ini menjadi lima persamaan yang berbeda. Mereka merupakan sistem yang disatukan dari persamaan diferensial parsial nonlinear. Sampai saat ini belum ada solusi analitik dari persamaan-persamaan tersebut. Dalam hal ini, persamaan ini bukan tidak memiliki solusi namun sampai saat ini belum ditemukan. Metode yang lain yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan tersebut adalah dengan metode numerik yang dikenal dengan Computational Fluid Dynamics (CFD). Dengan metode ini, persamaan ini akan diselesaikan dengan iterasi untuk menemukan solusi yang mungkin berdekatan dengan solusi sebenarnya[1].

3. METODOLOGI PENELITIAN

Sebelum melaksanakan pengujian simulasi, dilakukan terlebih dahulu pengujian eksperimental turbin vortex.

Proses pengerjaan simulasi ialah:

1. Proses Pre-Processing

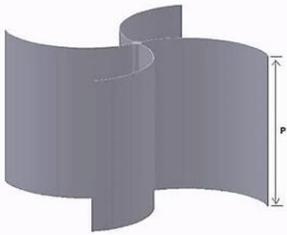
Proses pre-processing merupakan proses yang dilakukan sebelum pengujian (simulasi). Proses ini mencakup pembuatan model, penentuan domain dan pembuatan mesh (meshing).

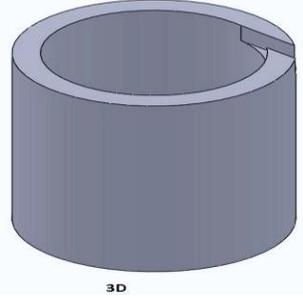
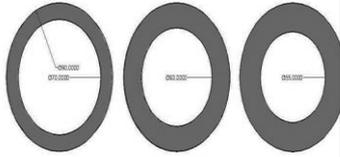
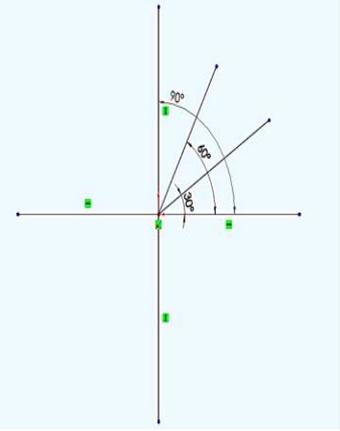
a. Pembuatan Model

Pembuatan model Turbin Vortex ini mengacu pada bentuk yang sebenarnya, baik itu sudu dan rumah turbin atau penampung air. Pembuatan model CAD dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SolidWorks. Bentuk sudu bervariasi, sesuai dengan pengelompokan, yakni sudu besar, sudu sedang, dan sudu kecil. Pengelompokan sudu tersebut kemudian dikelompokkan lagi menurut tinggi permukaan sudu terhadap rumah turbin. Yaitu Sudu Besar dan Sudu Kecil. Perbedaan dari sudu tersebut adalah ukuran sudunya. Pada rumah turbin, selain perbedaan dari ukurannya, perbedaan juga ada pada lubang outlet, dengan perbedaan diameternya. Masing – masing 5,5 mm, 6 mm dan 7 mm.

Sehingga ada perbedaan hasil tiap – tiap model. Model-model dalam pengujian dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel di bawah ini.

Tabel 3.1 Model

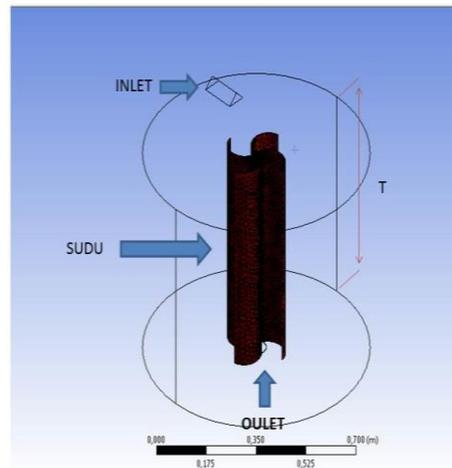
	SUDU BESAR P= 783 mm L = 275 mm
	SUDU KECIL P= 783 mm L = 135 mm

 <p style="text-align: center;">3D</p>	<p>RUMAH TURBIN</p> <p>P= 970 mm R=1000mm</p>
 <p style="text-align: center;">I II III</p>	<p>SALURAN BUANG</p> <p>Diameter : I = 7 cm II = 6 cm III = 5,5 cm</p>
	<p>BUKAAN KATUP KERAN</p> <p>Debit 1, bukaan 30° = 0,0035 m3/s</p> <p>Debit 2, bukaan 60° =0,0044 m3/s</p> <p>Debit 3, bukaan 90° =0,0053 m3/s</p>

b. Menentukan Domain

Secara eksperimental, pengujian turbin vortex menggunakan air yang menggerakkan sudu. Pada pengujian CFD, rumah sudu disesuaikan pada tinggi air pada masing – masing debit.

Pada pengujian, domain pada simulasi CFD turbin vortex dinyatakan dengan tinggi air, dalam hal ini dinyatakan dengan tinggi air di rumah sudu (T). Sudu adalah penggerak domain berupa air yang masuk dari inlet dengan debit yang bervariasi sehingga tinggi T juga bervariasi. Air yang masuk kemudian keluar dari outlet. Outlet sendiri mempunyai beberapa variasi. Begitu seterusnya sehingga membentuk satu kesatuan.

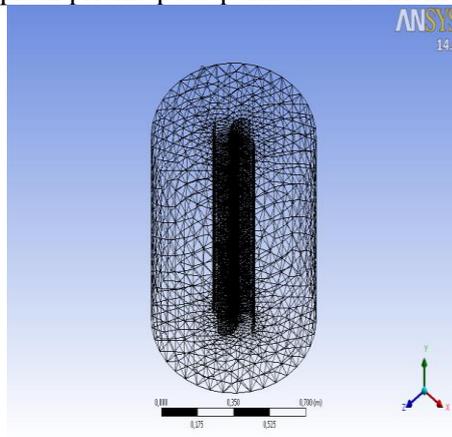


Gambar 3.1 Domain

c. Diskritisasi

Diskritisasi pada simulasi ANSYS diinterpretasikan dengan pembentukan mesh atau grid. Ukuran mesh yang diterapkan pada model akan mempengaruhi ketelitian analisis CFD. Semakin kecil ukuran mesh pada model, maka hasil yang didapatkan akan semakin teliti, tetapi membutuhkan daya komputasi dan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan mesh yang memiliki ukuran lebih besar. Oleh karena itu, besar ukuran mesh harus diatur sedemikian rupa (smooth meshing) sehingga diperoleh hasil yang teliti dan diusahakan daya komputasi yang dibutuhkan tidak terlalu besar.

Dalam penelitian ini mesh yang digunakan adalah mesh yang dibangun dengan grid berbentuk tetrahedral dengan lapisan prisma pada permukaan domain dan sudu.



Gambar 3.2 Diskritisasi Mesh

2. Menentukan Solution Solver

a. Menentukan Jenis Aliran

Fluida yang digunakan dalam simulasi adalah air dengan sifat-sifat sebagai berikut:

Kerapatan (densitas) konstan, $\rho=998.2 \text{ kg/m}^3$

Viskositas, $\mu=0.001003 \text{ Pa.s}$

Aliran yang digunakan dalam penelitian ini adalah aliran turbulen, karena mengacu pada aliran air yang berputar dan tidak dapat diprediksi. Dari asumsi fluida yang digunakan adalah dengan temperature dan densitas tetap sehingga jenis alirannya adalah isothermal dan inkompresible.

b. Menentukan Kondisi Batas

Tabel 3.2 Kondisi Batas

Kondisi Batas	Jenis	Nilai
c. Atas	Pressure Outlet	0 Pa(gauge)
b. Sudu	Moving Wall	Divariasikan sesuai rpm (Sudu I dan Sudu III)
c. Inlet	Velocity Inlet	Divariasikan (0,93m/s ; 1,006 m/s ;1,06 m/s)
d. Outlet	Pressure Outlet	0 Pa (gauge)
e.Dinding	Wall	-
f. Bawah	Wall	-

c. Pengaturan Simulasi

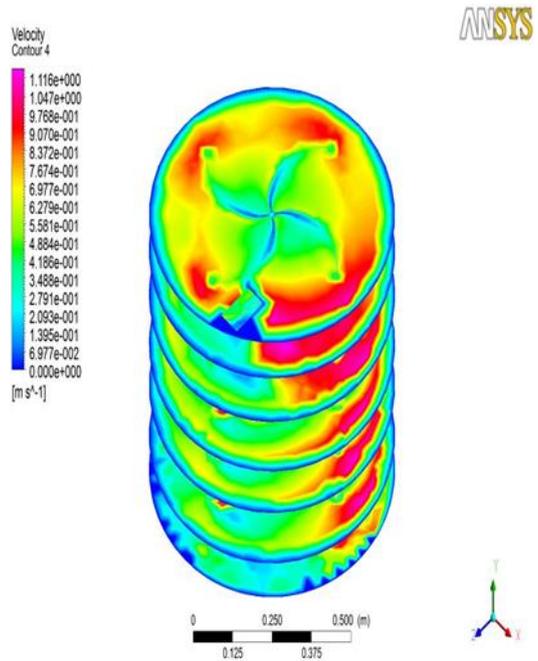
Tabel 3.3 Pengaturan Simulasi

Aspek	Pengaturan
Model Solver (Solver Model)	Pressure based, 3D, Steady
Model Viskos (Viscous Model)	Turbulent k-ε Standard
Material	water-liquid with constant density, $\rho=998.2 \text{ kg/m}^3$
Kondisi Operasi (Operating Condition)	101325 Pa
Inisiasi (Initialize)	Velocity Inlet
Residual Monitor	10-6

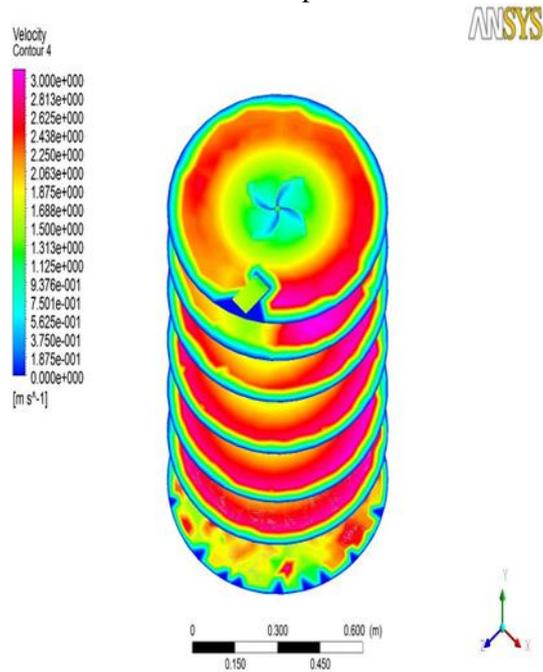
d. Menjalankan Simulasi

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi turbin vortex dengan variasi dimensi sudu I dan III, debit air masuk serta luas saluran buang adalah sebagai berikut:

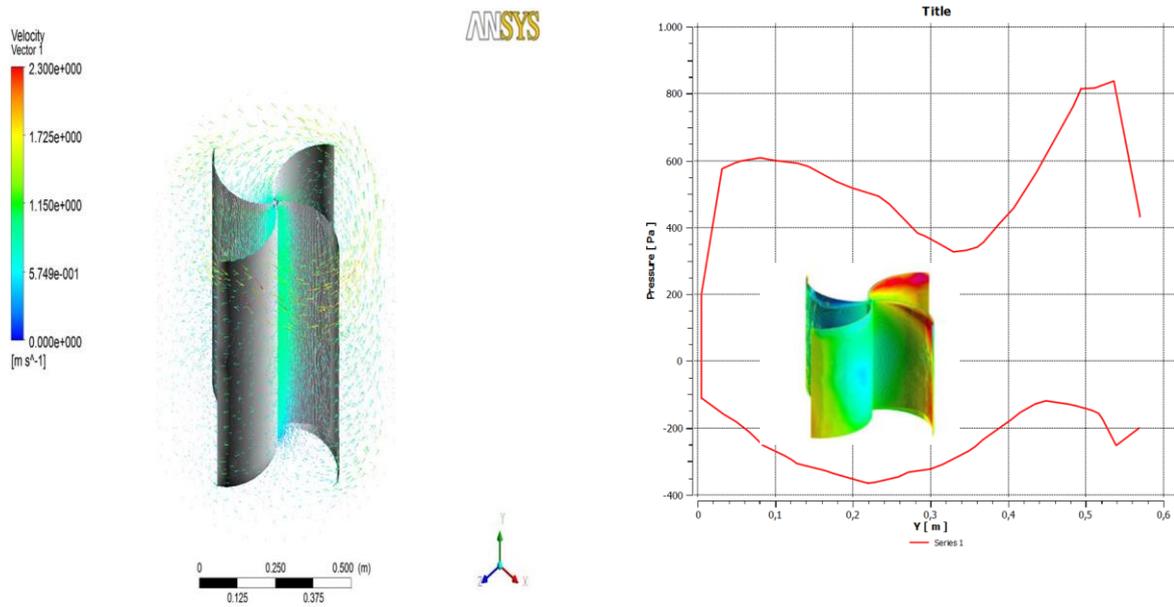


Gambar 4.1 kontuor kecepatan fluida di sudu I

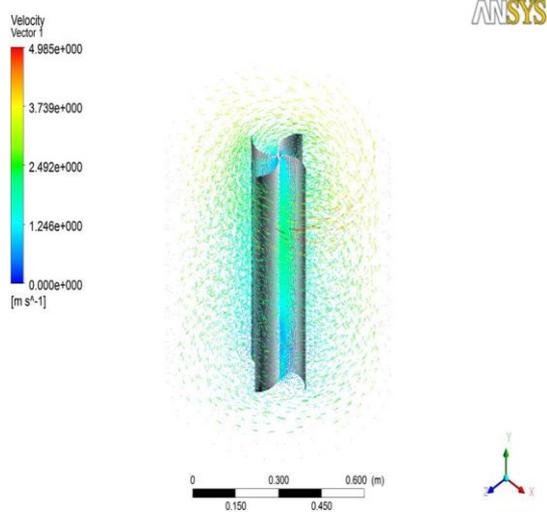


Gambar 4.2 kontuor kecepatan fluida di sudu III

Pada hasil simulasi ditunjukkan kecepatan paling rendah pada warna biru, kemudian warna merah pada inlet yang menunjukkan kecepatan tinggi pada saat debit masuk. Kecepatan tertinggi di sudu I sebesar 1,116 m/s dan terendah 0,06977 m/s. Di Sudu III sendiri 3,00 m/s dan terendah 0,01875 m/s.

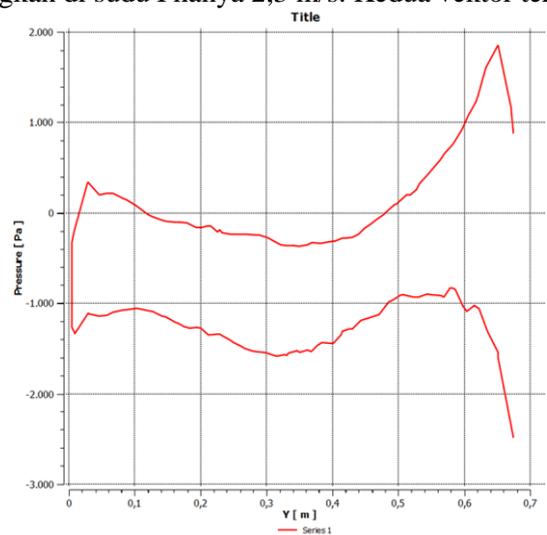


Gambar 4.3 vektor kecepatan fluida di sudu I



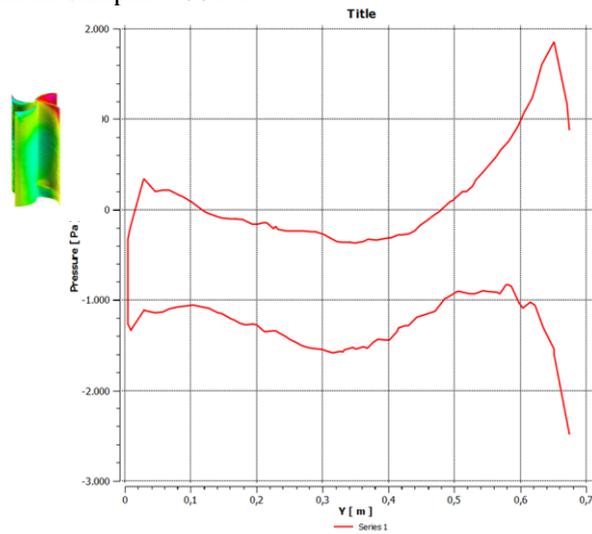
Gambar 4.4 vektor kecepatan fluida di sudu III

Dapat dilihat dari gambar vektor kecepatan diatas, kecepatan vektor fluida lebih cepat di sudu III, mencapai 4,9 m/s sedangkan di sudu I hanya 2,3 m/s. Kedua vektor tersebut terdapat di inlet.



Gambar 4.5 grafik distribusi tekanan pada sudu I

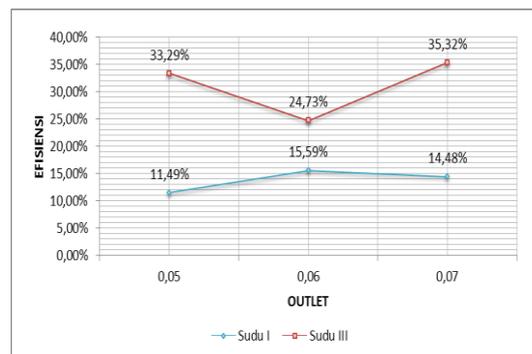
Dari grafik diatas dapat di lihat pada sudu I, tekanan pada salah satu bladnya dapat mencapai 800 Pa dan dapat juga turun sampai -400 Pa.



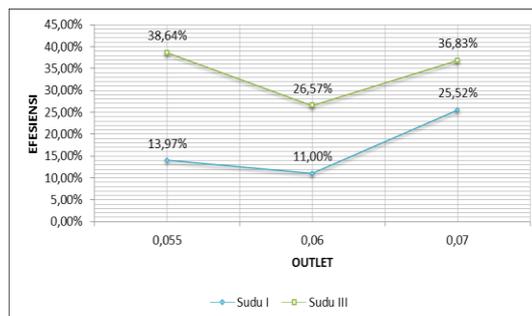
Gambar 4.6 grafik distribusi tekanan pada sudu III

Di sudu III, distribusi tekanan maksimal di salah satu blade, dapat mencapai hampir 2000 Pa dan turun mencapai -3000 Pa. Sehingga dapat disimpulkan aliran vortex berupa aliran turbulen paling banyak di sudu III.

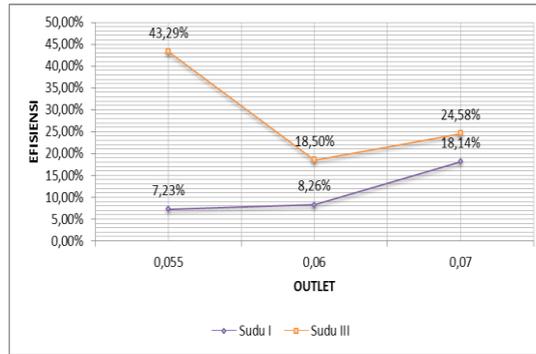
Setelah dilakukan simulasi,maka didapat gaya pada tiap – tiap sudu (F),rpm dari pengujian eksperimental serta debit air masuk. Sehingga dari besaran – besaran tersebut dapat dihitung besaran turunan lainnya seperti Daya Air, Daya Turbin Vortex dan efisiensi Turbin Vortex Maksimal.



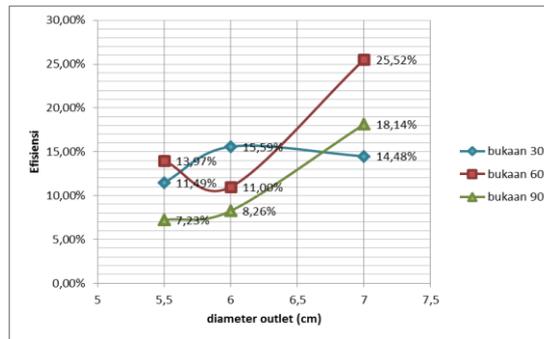
Gambar 4.7 grafik outlet vs efisiensi pada bukaan 30° Efisiensi maksimal mencapai 35,32%, di outlet 7 cm.



Gambar 4.8 grafik outlet vs efisiensi pada bukaan 60° Efisiensi maksimal mencapai 38,64% di outlet 5 cm.

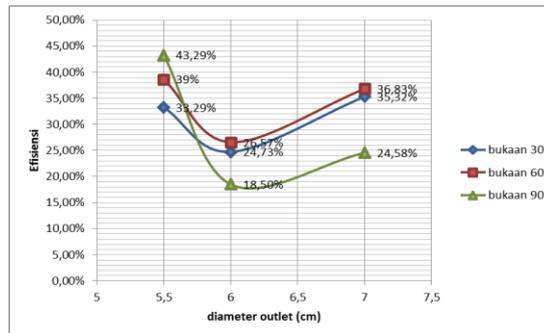


Gambar 4.9 grafik outlet vs efisiensi pada bukaan 90° Efisiensi maksimal mencapai 43,29% di outlet 5 cm.



Gambar 4.10 grafik outlet vs efisiensi pada Sudu I

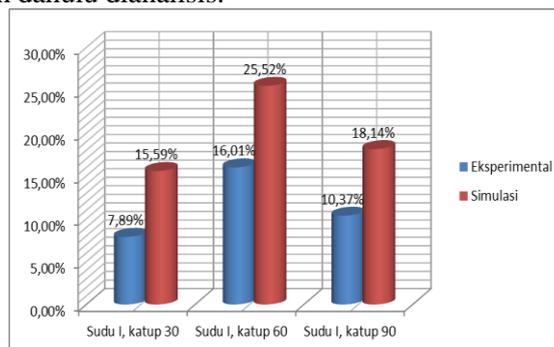
Setelah menganalisa terhadap outlet maka dianalisa terhadap debit air masuk (bukaan katup). Efisiensi maksimal mencapai 25,52% di bukaan 60° pada sudu I.



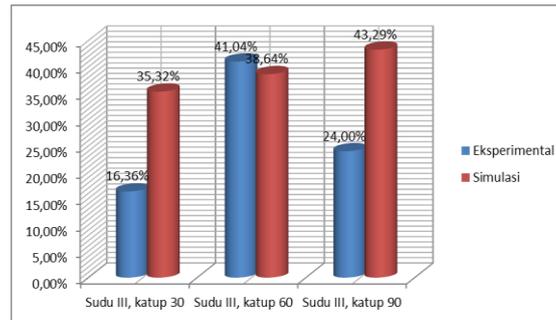
Gambar 4.11 grafik outlet vs efisiensi pada sudu III

Sedangkan dengan cara yang sama, di sudu III efisiensi maksimal dapat mencapai 43,29% di bukaan 90°.

Setelah mendapatkan efisiensi dari simulasi, kemudian memvalidasi dengan hasil eksperimental yang terlebih dahulu dianalisis.



Gambar 4.12 Hasil efisiensi pada sudu I



Gambar 4.13 Hasil Efisiensi pada sudu III

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari uji Simulasi CFD pembangkit listrik mikro hidro menggunakan turbin vortex sudu I (dengan spesifikasi; tinggi 78,3 cm dan lebar 23,2 cm menggunakan 4 sudu) dan sudu III (dengan spesifikasi: tinggi 78,3 cm dan lebar 13,5 cm menggunakan 4 sudu) didapat beberapa kesimpulan :

1. Diperoleh efisiensi maksimum, putaran dan debit air di sudu I, outlet 7 cm :
 - a. Efisiensi maksimum : 25,522%
 - b. Putaran poros turbin : 58,6rpm
 - c. Debit air : 0,0044 m³/s
2. Diperoleh efisiensi maksimum, putaran dan debit air di sudu III, outlet 5,5 cm :
 - a. Efisiensi maksimum : 43,29 %
 - b. Putaran poros turbin : 120 rpm
 - c. Debit air : 0,0055 m³/s
3. Hasil efisiensi maksimal pada simulasi CFD kemudian dibandingkan dengan eksperimental didapat persen galat 34%. Dengan persen galat paling baik sebesar 5% di sudu III dengan bukaan katup 60°.

Tingginya persen ralat yang didapat antara hasil eksperimen terhadap hasil simulasi CFD dipengaruhi beberapa faktor :

Uji Eksperimental	Simulasi CFD
- Bentuk dan material casing - Debit air masuk - Letak sudu yang tidak axis terhadap saluran buang - Pengukuran beban torsi - Berat dari sudu	- Jumlah mesh - Iterasi (tidak mencapai konvergen)

4. Setelah membandingkan antara bentuk sudu I dan sudu III, lebih efisien sudu III baik itu dilihat dari kontur kecepatan fluida, vektor kecepatan fluida, dan tekanan pada sudu lebih baik di sudu III.

Untuk rancang bangun Turbin vortex selanjutnya, diharapkan mendesign dan mensimulasikan terlebih dahulu agar didapatkan efisiensi paling maksimal. Selain itu pada percobaan – percobaan berikutnya diharapkan agar menggunakan rumah sudu berbentuk keong dan menggunakan dimensi proposional dengan aliran vortex serta dengan jumlah blade yang lebih banyak.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Ambarita, Himsar. 2010. *Persamaan Pembentuk Aliran*. Teknik Mesin USU
 [2] Fritz Dietsel, Dakso Sriyono.1990. *Turbin Pompa dan Kompresor*. Erlangga. Jakarta
 [3] McDonough, J.M. 1987. *Lectures In Elementary Fluid Dynamics*. Cetakan Kelima. Departments of Mechanical Engineering and Mathematics: University of Kentucky, Lexington.
 [4] Zotloeterer, <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-p5e95290545187f36f41dc60104091489/zotloeterer-turbine.php>