



POLA ALIRAN UDARA PADA TURBIN ANGIN SAVONIUS HELIKS DENGAN VARIASI JUMLAH SUDU MENGGUNAKAN METODE CFD

AIRFLOW PATTERNS IN A HELICAL SAVONIUS WIND TURBINE WITH VARIATIONS BLADE NUMBERS USING CFD METHOD

Muhammad H. Mishbahuddin¹⁾, Taufik W. Saputra²⁾, Danar S. Wijayanto³⁾

^{1,2,3}Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia
email: mishbahuddin_71@student.uns.ac.id¹⁾, taufikwisnusaputra@staff.uns.ac.id²⁾, danarsw@staff.uns.ac.id³⁾

Received:
22 Mei 2024

Accepted:
24 Juli 2024

Published:
14 September
2024



Abstrak

Ketersediaan sumber daya fosil semakin menurun, mendorong pemerintah dan swasta berlomba mengembangkan energi terbarukan. Salah satu solusinya adalah menciptakan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) untuk memenuhi permintaan energi. Turbin Savonius, juga dikenal sebagai VAWT yang berpotensi besar memenuhi kebutuhan energi skala kecil. Turbin angin Savonius memiliki performa lebih rendah dibandingkan jenis lainnya. Performa ini perlu ditingkatkan melalui modifikasi desain, seperti variasi jumlah sudu pada turbin. Tujuan penelitian ini untuk menganalisis pengaruh jumlah sudu pada kinerja turbin angin Savonius tipe heliks. Fokus penelitian ini pada pola aliran udara dengan variasi jumlah sudu pada turbin angin Savonius heliks. Turbin ini dikaji secara numerik dengan pendekatan dinamika fluida komputasional (CFD) menggunakan aplikasi ANSYS Fluent. Masing-masing variasi jumlah sudu akan disimulasikan pada kecepatan angin 1 s.d 5 m/s. Hasil pengujian secara numerik akan menunjukkan visualisasi dalam bentuk kontur dan vektor dalam fokus tekanan atau kecepatan pada masing-masing variasi. Berdasarkan visualisasi hasil pengujian numerik didapatkan jumlah sudu mempengaruhi pola aliran yang terjadi. Bertambahnya jumlah sudu meningkatkan aliran turbulensi yang terjadi. Tekanan pada permukaan cembung juga semakin meningkat dengan bertambahnya sudu. Dua fenomena aliran udara tersebut yang menurunkan kinerja turbin, sehingga dua buah sudu menghasilkan performa paling optimal karena minimnya hambatan yang dialaminya.

Kata Kunci: turbin savonius heliks, dinamika fluida komputasional, jumlah sudu, pola aliran udara

Abstract

The availability of fossil resources is decreasing, cause government and private sectors to race in developing renewable energy. One solution is to create Wind Power Plants to meet energy demands. The Savonius turbine, also known VAWT, this great potential to meet small-scale energy needs. Savonius turbines have lower performance compared to other types. This performance needs to be enhanced through design modifications, such as varying the number of blades. This research purpose is to analyze effect number of blades on performance of helical Savonius turbines. This research focuses on airflow patterns with varying blade numbers in helical Savonius turbines. These turbines numerically

studied using Computational Fluid Dynamics (CFD) approach with ANSYS Fluent. Each variation of blade numbers will simulate at wind speeds between 1 to 5 m/s. Numerical testing results will provide visualizations in form contour and vector within pressure or velocity scope for each variation. Based on visualization of numerical testing results, found that number of blades affects flow patterns. Increasing the number of blades increases turbulence flow. Pressure on convex surface also increases with the addition of blades. These two airflow phenomena reduce turbine performance, so two blades produce most optimal performance due to minimal resistance they experience.

Keywords: *helical savonius wind turbine, computational fluid dynamics, number of blades, airflow patterns*

DOI:10.20527/sjmekinematika.v9i2.313

How to cite: Mishbahuddin, M H., Saputra, T W., & Wijayanto, D S., "Pola Aliran Udara Pada Turbin Angin Savonius Heliks Dengan Variasi Jumlah Sudu Menggunakan Metode CFD". *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 9(2), 141-153, 2024.

PENDAHULUAN

Penggunaan bahan bakar fosil secara berlebihan sebagai sumber energi pokok menimbulkan masalah besar terkait ketersediaan energi yang berkelanjutan dan pelestarian alam[1]. Data di atas menunjukkan bahwa kebutuhan energi semakin meningkat sedangkan ketersediaannya semakin menurun, terutama sumber daya fosil, sehingga untuk menjaga ketersediaan energi pihak pemerintah maupun swasta saling berlomba dalam melakukan penelitian untuk mengembangkan penggunaan energi terbaharukan. Cara mengatasi masalah tersebut dapat dilakukan dengan menciptakan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) untuk menghasilkan energi berdasarkan permintaan[2].

Turbin angin adalah salah satu alat konversi energi angin. *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) adalah 2 jenis turbin angin yang dibedakan berdasarkan posisi sumbunya. Turbin Savonius disebut juga sebagai VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*)[3]. Turbin angin Savonius memiliki potensi besar dalam memenuhi kebutuhan energi skala kecil. Turbin tersebut biasanya diaplikasikan untuk kebutuhan listrik rumah. Selain itu, turbin angin Savonius cocok digunakan dalam lingkungan perkotaan karena biaya produksinya yang relatif rendah. Turbin angin Savonius sangat sesuai digunakan di Indonesia karena kecepatan anginnya yang rendah. Selain itu, keuntungan lain turbin angin Savonius adalah desain dan konstruksinya yang sederhana sehingga mudah dipasang dan mampu menerima arah angin dari berbagai sudut[4].

Saat digunakan, turbin angin Savonius memiliki performa yang lebih rendah dibandingkan dengan jenis turbin angin lainnya[5]. Performa turbin angin Savonius selalu ditingkatkan melalui berbagai modifikasi desain. Modifikasi desain Savonius tipe heliks pada penelitian sebelumnya yang dilakukan[6] menggunakan *end plate* meningkatkan performa turbin Savonius, kemudian modifikasi selanjutnya seperti variasi jumlah sudu akan mempengaruhi pola aliran udara yang terjadi di sekitar sudu yang akan berdampak pada hasil kecepatan putaran, daya, dan *coefficient power* (C_p) ketika turbin beroperasi. Variasi jumlah sudu memengaruhi fluktuasi momen dinamis dan statis pada rotor Savonius[7]. Terdapat enam pola aliran udara yang berpengaruh ketika turbin angin berkerja[8]. Dari ke enam pola memiliki pengaruh untuk meningkatkan dan mengurangi performa turbin[9]. Dengan demikian, performa turbin angin Savonius berhasil ditingkatkan melalui beberapa percobaan modifikasi desain yang pada akhirnya dapat meningkatkan kinerja turbin angin secara keseluruhan[10].

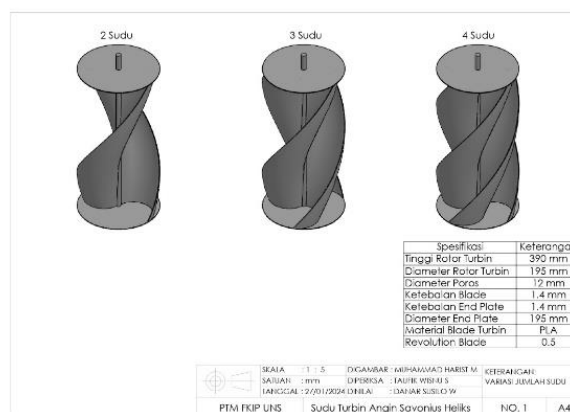
Untuk menguji kinerja turbin angin Savonius saat ini masih banyak dilakukan melalui metode eksperimen dengan menggunakan terowongan angin. Namun, untuk melihat pola aliran udara yang terjadi menggunakan metode pengujian tersebut kurang efektif, karena

sulit dilakukan. Oleh karena itu, salah satu solusi yang lebih efektif adalah menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Dalam metode ini, analisis dilakukan secara virtual dengan bantuan perangkat lunak untuk menghasilkan model numerik yang akurat dan dapat digunakan untuk menguji kinerja turbin angin Savonius dengan lebih efisien[11]. Penggunaan CFD memberi banyak keuntungan dalam perancangan iteratif karena memungkinkan perbaikan berulang pada geometri dan konfigurasi struktur. CFD juga memprediksi pola aliran udara berdasarkan distribusi kecepatan dan tekanan pada objek[12]. CFD memodelkan ukuran, diskritisasi, dan kondisi batas. Simulasi tak terbatas dengan hasil sesuai kondisi batas yang diterapkan dan kesempatan menganalisis setiap saat menjadikan CFD unggul.

Berdasarkan informasi yang disampaikan di atas, riset terakhir yaitu turbin Savonius tipe heliks variasi penambahan *endplate* dan belum menemukan pengujian yang berfokus pada pengaruh variasi jumlah sudu yang ditinjau dari faktor pola aliran udara yang terjadi pada turbin Savonius tipe heliks, karena ketika ingin mengetahui bentuk pola aliran udara yang terjadi melalui eksperimen langsung sulit dilakukan dan kurang efisien, sehingga dilakukan simulasi yang di mana dapat memberikan visualisasi yang detail terkait pola aliran udara yang terjadi. Hasil simulasi ini sangat penting untuk dijadikan landasan dalam perancangan produk untuk memodifikasi desain[13] sehingga tercapainya performa turbin Savonius tipe heliks yang optimal. Maka penelitian ini akan dilakukan untuk menguji pengaruh jumlah sudu pada kinerja turbin angin Savonius tipe heliks. Fokus penelitian ini pada pola aliran udara dengan variasi jumlah sudu pada turbin angin Savonius heliks.

METODE PENELITIAN

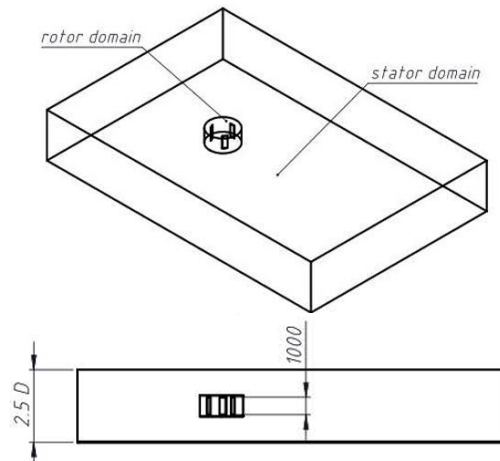
Penelitian ini menggunakan metode CFD yang merupakan metode perhitungan numerik dengan mengubah persamaan diferensial parsial (PDE) menjadi persamaan aljabar yang dapat dihitung menggunakan *computer*[14]. Turbin angin Savonius tipe heliks dianalisis secara virtual dengan bantuan perangkat lunak *ANSYS Fluent* untuk menerapkan pendekatan CFD. Perangkat lunak ini mensimulasikan pergerakan fluida berdasarkan suatu kondisi dengan menggunakan dasar perhitungan aliran fluida[15]. Aliran fluida diatur oleh persamaan atur berupa hukum kekekalan massa, momentum, dan energi dalam bentuk PDE sehingga hasil simulasi CFD dapat menghasilkan visualisasi seperti grafik yang menunjukkan nilai kinerja dari parameter yang dimasukkan. Performa turbin Savonius tipe heliks dieksplorasi dengan variasi jumlah sudu 2, 3, dan 4 buah melalui pemodelan simulasi *transient*.



Gambar 1. Desain sudu turbin Savonius tipe heliks

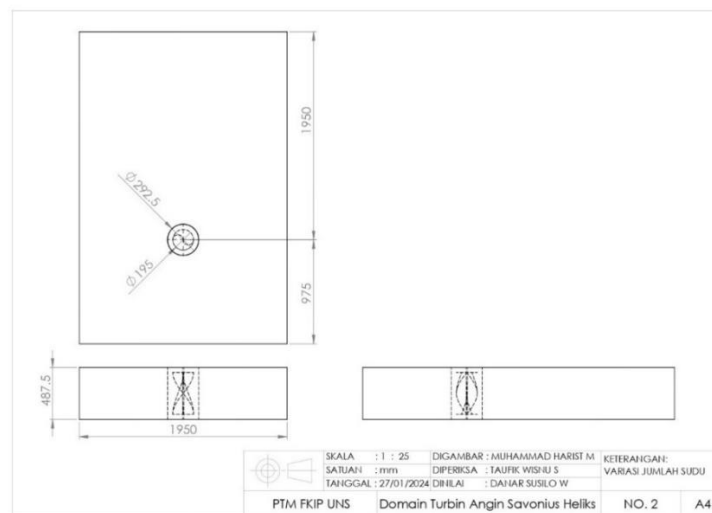
Hasil analisis *transient* memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang bagaimana perilaku sistem dari satu kondisi ke kondisi lain sepanjang waktu. Simulasi ini dilakukan

pada variasi kecepatan angin dari 1 m/s hingga 5 m/s dengan peningkatan 0,5 m/s. Studi ini menghasilkan visualisasi pola aliran udara, kecepatan putaran, momen, daya turbin, dan C_p . Dalam pengujian numerik, penting untuk membuat simulasi yang sesuai dengan kondisi lingkungan nyata, proses ini dikenal sebagai *boundary condition*. Proses ini menentukan *inlet*, *outlet*, *wall*, *interface*, *stationary domain*, dan *rotational domain*. Geometri yang bersifat diam untuk mewakili *wind tunnel* disebut *stationary domain*, sedangkan geometri yang mewakili *blade* turbin yang berputar disebut *rotational domain*. Untuk permukaan yang saling bersinggungan antara *stationary* dan *rotational domain* disebut *interface*. Gambar 2 merupakan permodelan domain yang dibuat Song[16] dalam studi numerik turbin angin Darrieus.



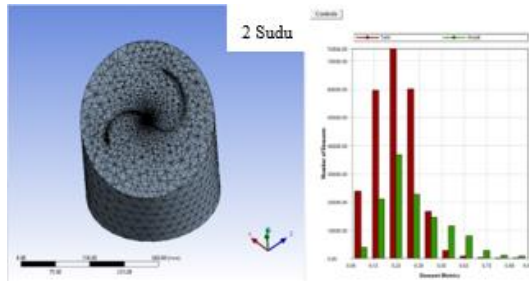
Gambar 2. Bentuk domain[16]

Berdasarkan ketentuan ukuran domain untuk hasil simulasi optimal, seperti yang dilakukan Song[16] pada Gambar 2, diperoleh ukuran domain sebagai berikut.

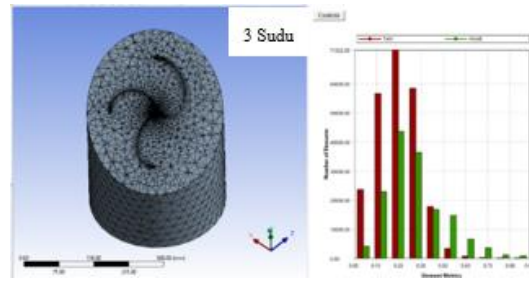


Gambar 3. Domain turbin Savonius heliks

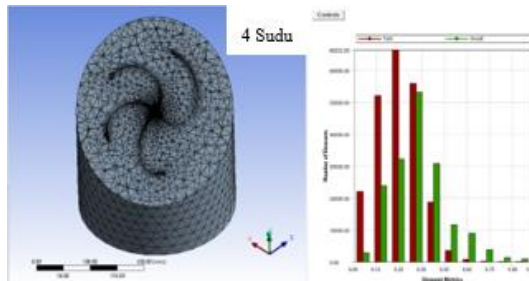
Domain yang sudah dibuat kemudian dilakukan proses *meshing*. Akurasi hasil simulasi sangat tergantung pada proses *meshing*, di mana *solution domain* dibagi menjadi unit kecil yang disebut *element*. Meskipun hasil simulasi akan lebih akurat dengan peningkatan jumlah *element*, hal ini juga akan memperpanjang waktu pemrosesan. Oleh karena itu, perlu mempertimbangkan secara cermat penentuan jumlah *element* yang optimal.



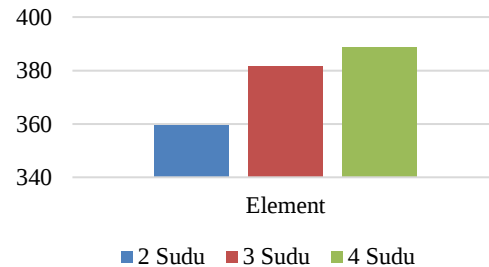
Gambar 4. Meshing dua buah sudu pada rotational domain



Gambar 5. Meshing tiga buah sudu pada rotational domain



Gambar 6. Meshing empat sudu pada rotational domain



Gambar 7. Jumlah element pada masing-masing domain

Semakin kompleks bentuk domain Gambar 4-6 maka semakin banyak jumlah *element* yang dibutuhkan. Gambar 7 menunjukkan variasi 2 sudu menghasilkan 359,557 *element*, 3 sudu menghasilkan 381,552 *element*, dan 4 sudu menghasilkan 388,773 *element*. Untuk meningkatkan akurasi pengujian, *meshing* di sekitar geometri dapat dilakukan berlapis (*inflation*) dengan jarak antar lapisan 1,5 dan jumlah 5 lapisan, yang akan menambah jumlah *element*. Selanjutnya masuk tahap *setup*, tujuan tahap ini adalah memasukkan parameter-parameter yang diperlukan ke dalam simulasi, termasuk pengaturan waktu *iteration*, *boundary condition*, model turbulensi, dan pengaturan *properties* fluida yang diperlukan untuk kemudian simulasi dilakukan.

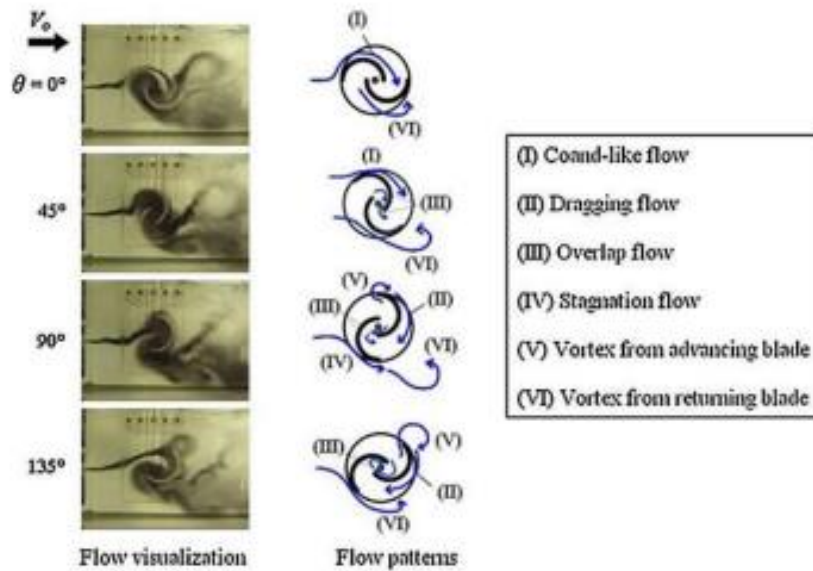
Hasil simulasi dianalisis dan dibandingkan dengan temuan simulasi lainnya dari artikel yang dirujuk. Adapun hasil yang ingin diketahui dari proses simulasi ini adalah pola aliran udara dalam visualiasi *contour* dan *vector* dalam *scope pressure* atau *velocity*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

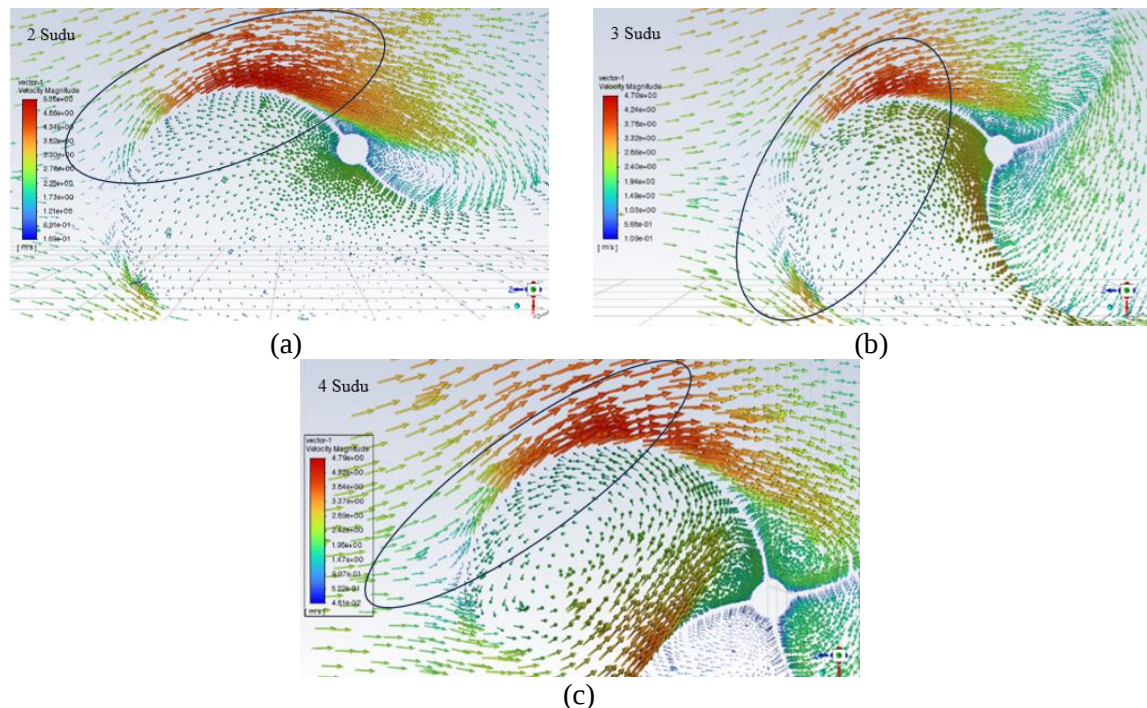
Simulasi turbin Savonius tipe heliks menggunakan *software ANSYS Fluent* dapat menampilkan pola aliran udara yang divisualisasikan dalam berbagai *contour*. Umumnya dalam melihat pola aliran udara yang terjadi divisualisasikan dalam *vector of velocity* dan *contour of static pressure*. Terdapat enam pola aliran udara yang berpengaruh ketika turbin angin bekerja[8]. Dari ke enam pola memiliki pengaruh untuk meningkatkan dan mengurangi performa turbin[9], seperti ditunjukkan pada Gambar 8.

Vector of Velocity

Pertama *coad like flow* pola aliran udara yang bisa dilihat dari *contour of velocity* pada masing-masing variasi. *Coad like flow* adalah aliran udara dari *inlet* menempel pada permukaan sudu untuk mengisi ruang pada sudu seperti pada efek *Coanda*. Efek *Coanda* adalah kecenderungan aliran fluida menempel dan mengikuti kontur permukaan lengkung. Pola aliran udara yang pertama ini akan menghasilkan gaya angkat[9]. Seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 8. Pola aliran udara yang melewati sudu turbin savonius[8]

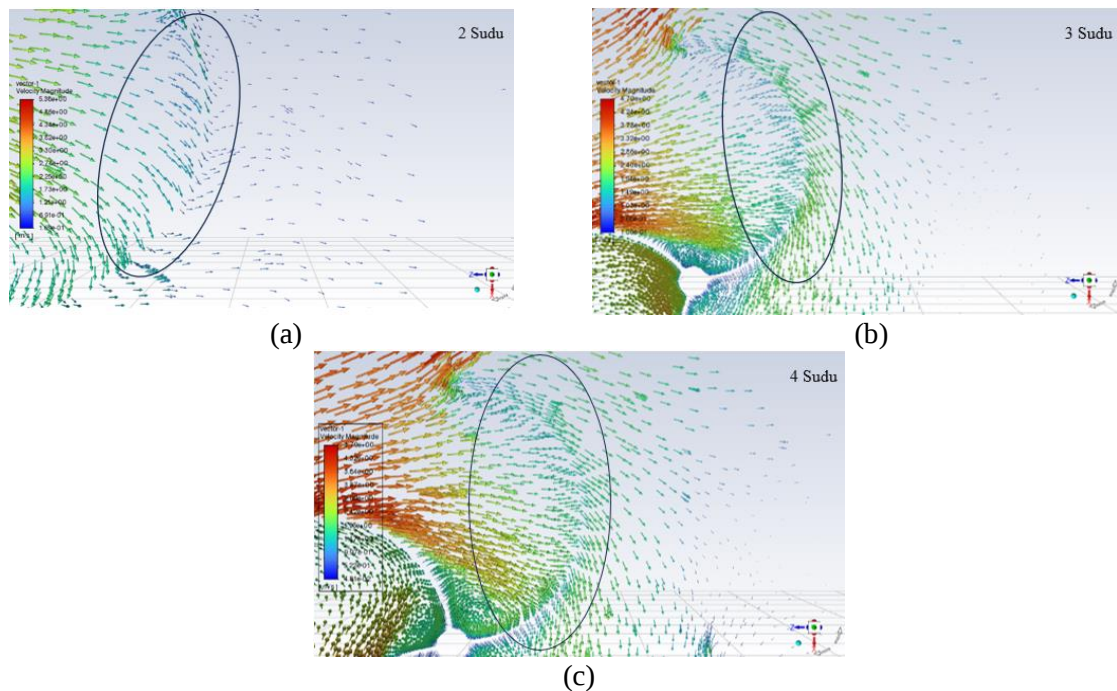


Gambar 9. Aliran mirip coad (coad like flow): (a) 2 Sudu, (b) 3 Sudu, (c) 4 Sudu

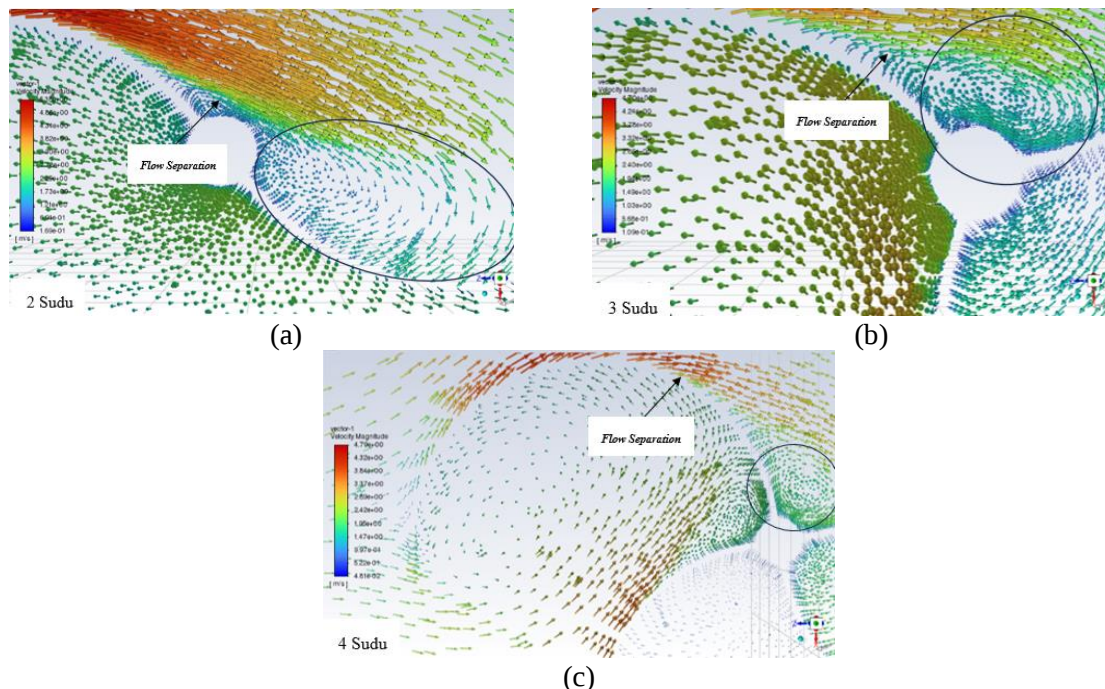
Pola aliran udara kedua disebut *dragging flow*, yaitu aliran udara mengalir di sisi luar sudu. Aliran udara ini mirip dengan *coad like flow* yang membedakan adalah penamaan *dragging flow* berfokus untuk menjelaskan fenomena mengalirnya fluida pada sisi luar sudu. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.

Selanjutnya, Udara yang memiliki momentum tinggi tidak mampu mengikuti lengkungan pada sudu turbin, akibatnya, udara terpisah dari permukaan sudu dan mengalir kembali ke arah yang berlawanan, fenomena ini dikenal sebagai *flow separation*. Udara yang kembali mengalir berlawanan arah ini kemudian bertemu dengan sudu yang bergerak kembali yang akibatnya membentuk pusaran (*vortex*) dan fenomena ini adalah pola aliran udara ke tiga yang disebut *overlap flow*. Aliran udara *dragging flow* dan *overlap flow*

merupakan aliran yang meningkatkan kinerja turbin[9]. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.

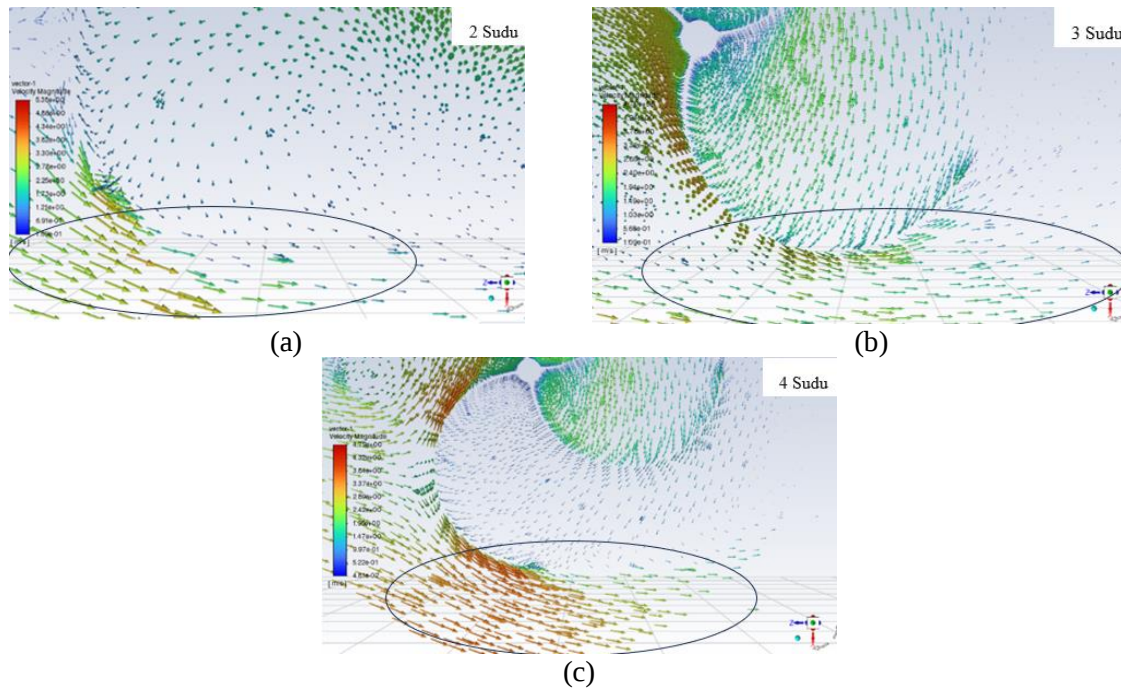


Gambar 10. Aliran geser (*dragging flow*): (a) 2 Sudu, (b) 3 Sudu, (c) 4 Sudu



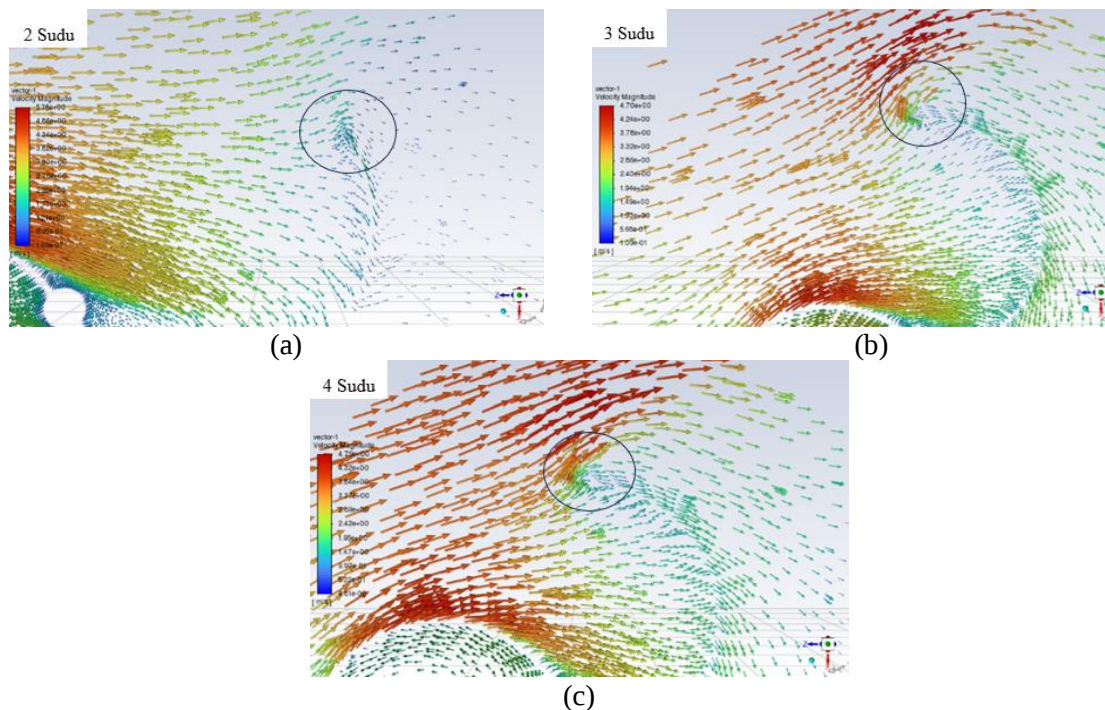
Gambar 11. Aliran tumpang tindih (*overlap flow*): (a) 2 Sudu, (b) 3 Sudu, (c) 4 Sudu

Stagnation Flow pola aliran udara yang ke empat adalah aliran udara melambat di area-area tertentu, seperti pada gambar *vector velocity* berwarna merah memudar perlahan menjadi hijau hingga biru. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12.



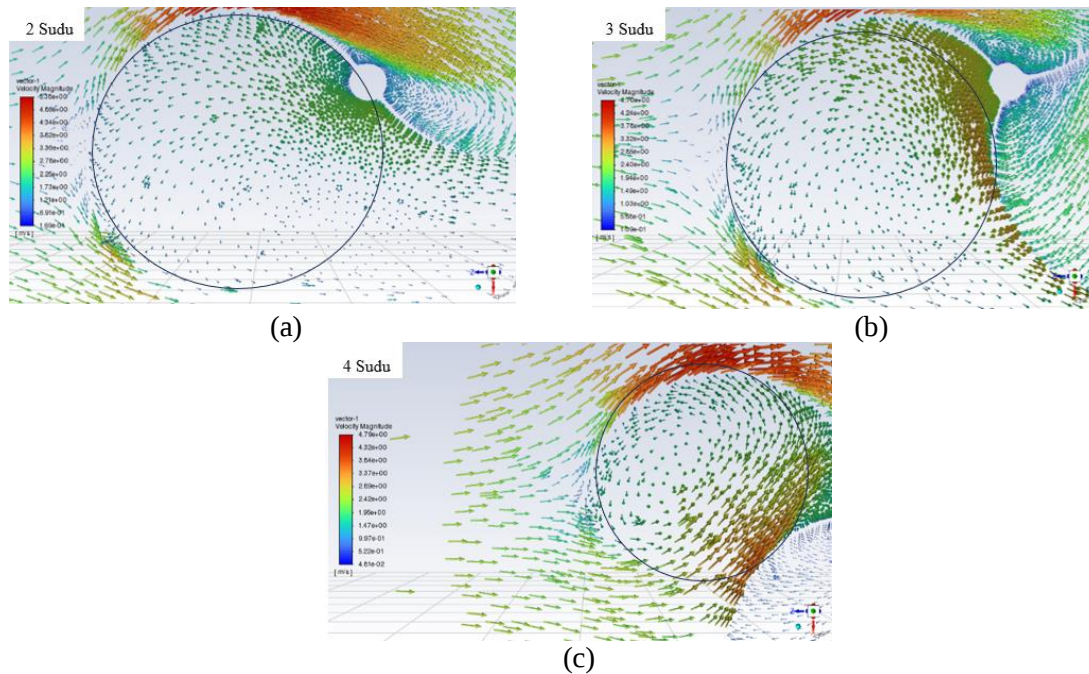
Gambar 12. Aliran stagnasi (*stagnation flow*): (a) 2 Sudu, (b) 3 Sudu, (c) 4 Sudu

Pusaran (*vortex*) terjadi kembali pada pola aliran udara kelima yaitu *vortex from advancing blade*, dimana pusaran terbentuk dari sudu yang sedang bergerak maju. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Pusaran dari bilah yang sedang maju (*vortex from advancing blade*): (a) 2 Sudu, (b) 3 Sudu, (c) 4 Sudu

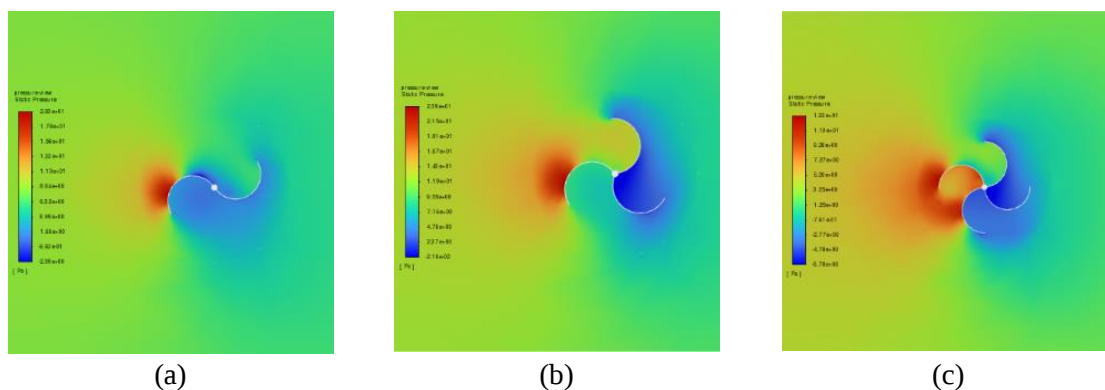
Pusaran (*vortex*) yang ke tiga terjadi dari sudu yang kembali setelah melewati titik Tengah atau bagian belakang turbin yang disebut *vortex from returning blade*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14



Gambar 14. Pusaran dari bilah yang sedang kembali (vortex from returning blade): (a) 2 Sudu, (b) 3 Sudu, (c) 4 Sudu

Contour of Static Pressure

Contour of static pressure adalah distribusi visualisasi tekanan yang terjadi pada objek simulasi. Warna merah pada Gambar 15 menandakan nilai tekanan tinggi dan memudar hingga warna biru yang menandakan nilai tekanan kecil. Perubahan tekanan yang terjadi ini akibat adanya angin yang menabrak sudu seperti yang divisualisasikan secara *colorful* pada Gambar 15. Bagian cekung sudu turbin berwarna hijau yang menandakan bertekanan 3 s.d 10 Pa, kemudian sisi cekung yang lain berwarna biru dengan tekanan sekitar -2 sampai -6 Pa. Perbedaan tekanan itulah yang mengakibatkan sudu turbin berputar. Hal ini sependapat dengan Kang dkk.[17] bahwa *static pressure* yang terkumpul pada sisi cekung bilah mengakibatkan peningkatan gaya *aerodinamis*. Untuk turbin savonius gaya penggerak rotasi sangat bertumpu pada besarnya aliran yang berada di sekitar bilah. Penelitian secara *numerical* yang dilakukan Sanusi dkk.[9] mendukung pernyataan di atas di mana tekanan meningkat pada sisi cekung (*advancing blade*) dan *returning blade* menambah nilai torsi. Peningkatan tekanan pada sisi cembung sudu akan menghambat kinerja turbin. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 15 di mana warna merah pada sisi cembung sudu yang menandakan nilai tekanan tinggi.



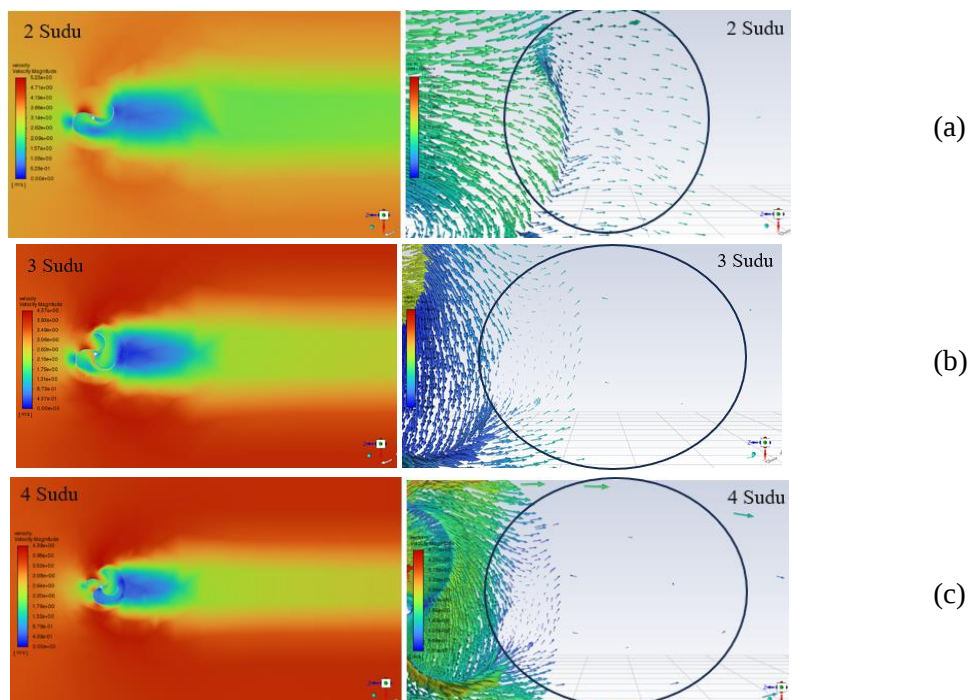
Gambar 15. Kontur tekanan statis (*contour of static pressure*): (a) 2 Sudu, (b) 3 Sudu, (c) 4 Sudu

Hubungan Velocity dan Pressure

Johann Bernoulli menyatakan hubungan nilai kecepatan dan tekanan pada fluida yang bergerak adalah berbanding terbalik, di mana kecepatan naik maka tekanan menurun dan tekanan naik maka kecepatan menurun[18]. Berdasarkan Gambar 14 berwarna merah yang menandakan nilai tekanan tinggi dan Gambar 13 yang diposisi yang sama berwarna biru. Hal tersebut terjadi karena aliran fluida berhenti sepenuhnya atau kecepatan angin menjadi 0 serta tekanan fluida mencapai tekanan tertinggi dan titik tersebut dinamakan *stagnation poin*. Gambar 9-14 yang tersedia pada *vector of velocity* jika diperhatikan dengan seksama menunjukkan bahwa ketika *vector velocity* pas menabrak *surface* sudu warnanya akan memudar hingga berwarna biru. Hal tersebut menandakan bahwa nilai kecepatannya menurun.

Turbulence

Gambar 16 adalah *contour of velocity* dalam bentuk *contour* dan *vector* untuk menjelaskan fenomena pada lingkaran hitam. Aliran fluida yang membentuk pusaran-pusaran (*vortex*) yang terjadi akibat fenomena *flow separation* inilah yang disebut *turbulence* seperti yang terlihat pada Gambar 16. Aliran turbulensi yang kompleks inilah yang menyebabkan tekanan di belakang sudu turbin kecil dan kecepatannya pun juga kecil. Sudah terkonversinya energi kinetik fluida setelah menabrak sudu turbin menjadi salah satu faktor kenapa fenomena ini berbeda dengan Hukum *Bernoullie*. Seperti yang terlihat pada Gambar 16 warna biru pada area turbulensi menandakan kecepatannya kecil dan kemudian pola aliran yang fluida yang terjadi berantakan serta berbentuk *vortex*. Dua buah sudu menghasilkan turbulensi yang lebih kecil dibandingkan variasi tiga dan empat sudu seperti yang terlihat warna biru lebih pudar dan area biru lebih kecil serta arah *vector* di belakang sudu langsung menuju *outlet*. Turbulensi yang terjadi pada turbin menyebabkan performanya semakin berkurang. Pernyataan ini didukung oleh Sanusi[9] di mana pusaran yang terbentuk mempengaruhi distribusi kecepatan fluida, bertambahnya jumlah pusaran mengakibatkan menurunnya kecepatan fluida.



Gambar 16. Kontur kecepatan (*contour of velocity*) dan vektor kecepatan (*vector of velocity*): (a) 2 Sudu, (b) 3 Sudu, (c) 4 Sudu

KESIMPULAN

Hasil pengujian dan pembahasan pola aliran turbin Savonius tipe heliks yang sudah dilakukan menunjukkan variasi jumlah sudu mempengaruhi pola liran udara yang terjadi. Jumlah sudu meningkatkan tekanan pada sisi cembung *blade returning*. Peningkatan tekanan pada sisi cembung sudu akan menghambat kinerja turbin. Dua buah sudu menghasilkan turbulensi yang lebih kecil dibandingkan variasi tiga dan empat sudu. Penurunan jumlah sudu berpengaruh terhadap penurunan turbulensi yang terjadi. Turbulensi yang terjadi pada turbin menyebabkan performanya menurun karena berkurangnya distribusi kecepatan fluida, bertambahnya jumlah pusaran mengakibatkan menurunnya kecepatan fluida. Oleh karena itu, turbin Savonius tipe heliks dengan dua sudu menjadi rekomendasi utama karena variasi dua sudu menghasilkan performa paling optimal dibandingkan variasi yang lain dengan minimnya terjadi tekanan pada sisi cembung sudu dan terjadinya turbulensi.

REFERENSI

- [1] S. Ulina, S. Hasan, E. Warman, and Y. T. Nugraha, "Analisis Potensi Energi Baru dan Terbarukan Di Sumatera Utara Sampai Tahun 2028 Menggunakan Software LEAP," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 1, pp. 4–8, 2022, doi: 10.30596/rele.v5i1.10786.
- [2] D. Rudianto, "Rancang Bangun Turbin Angin Savonius 200 Watt," *Conf. Senat. STT Adisutjipto Yogyakarta*, vol. 2, p. 71, 2016, doi: 10.28989/senatik.v2i0.35.
- [3] M. Irfan, "Simulasi Dan Perancangan Bilah Turbin Angin Savonius Heliks Dengan Memanfaatkan Fenomena Angin Pada Gedung Tinggi," *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 7, no. 1, pp. 9–26, 2022, doi: 10.20527/sjmekinematika.v7i1.211.
- [4] I. Arif, "Analisis dan Pengujian Kinerja Turbin Angin Savonius 4 Sudu," *J. Tek. Mesin ITI*, vol. 3, no. 2, p. 46, 2019, doi: 10.31543/jtm.v3i2.307.
- [5] I. Herlamba S, M. Effendy, and A. Hafizh R A, "Pengaruh Penambahan Free dan Fix Drag Reducing Pada Bilah terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius Effects of Addition of Free and Fix Drag Reducing On Blades to the Performance of Savonius Wind Turbine," *journal.unesa.ac.id*, vol. 13, pp. 63–66, 2018, doi: <https://doi.org/10.26740/otopro.v13n2.p63-66>.
- [6] Z. Lillahulhaq, I. Masfufiah, and I. Amirullah, "Experimental Study of Circular Cut Off Endplate Effect on the Savonius Turbine," *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 7, no. 1, pp. 63–72, 2022, doi: 10.20527/sjmekinematika.v7i1.202.
- [7] A. Kumar and R. P. Saini, "Performance parameters of Savonius type hydrokinetic turbine - A Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 289–310, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.005.
- [8] D. Suanggana, "Analisis Jumlah dan Sudut Blade terhadap Kecepatan dan Tekanan Turbin Air Savonius dengan Metode CFD," *JTM-ITI (Jurnal Tek. Mesin ITI)*, vol. 5, no. 3, p. 119, 2021, doi: 10.31543/jtm.v5i3.624.
- [9] A. Sanusi, "Simulasi Aliran Fluida pada Blade Rotor Turbin Angin Savonius dengan Computation Fluid Dynamics (CFD)," *Lontar J. Tek. Mesin Undana*, vol. 4, no. 1, pp. 11–15, 2017.
- [10] Siregar I H, "Uji Eksperimental Pengaruh Jumlah Fin Posisi Vertikal Pada Turbin Angin Savonius Bentuk U Terhadap Daya Dan Efisiensi," *ejournal.unesa.ac.id*, vol. 8, pp. 49–54, 2020.
- [11] J. N. Simanjuntak, S. Tangkuman, and I. Rondonuwu, "Simulasi Pengaruh Jumlah Dan Panjang Sudu Terhadap Daya Turbin Angin Tipe Poros Horisontal," *J. Online Poros Tek. Mesin*, vol. 10, 2020.
- [12] Y. F. Kusuma and A. S. Kasman, "Kajian Efek Angin Pada Bangunan Tinggi

- Menggunakan Computational Fluid Dynamics,” *J. Aero Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 10–18, 2018
- [13] M. Zaenudin, “Analysis Of Injection Plastic Molding Tensile Test Specimen,” vol. 9, no. 1, pp. 46–54, 2024, doi: 10.20527/sjmekinematika.v9i1.278.
- [14] N. Nurhaliza, Y. S. Putra, and A. A. Kushadiwijayanto, “Studi Numerik Pola Aliran di Sekitar Pintu Air Menggunakan Pendekatan Komputasi Dinamika Fluida,” *Prism. Fis.*, vol. 10, no. 3, p. 241, 2023, doi: 10.26418/pf.v10i3.57851.
- [15] S. Maulana, “Pemanfaatan Computational Fluid Dynamics (CFD) Dalama Strategi Penelitian Simulasi Model Pada Teknologi Penghawaan Ruang,” *Educ. Build.*, vol. 2, no. 2, pp. 10–13, 2016, doi: 10.24114/eb.v2i2.4393.
- [16] C. Song, G. Wu, W. Zhu, X. Zhang, and J. Zhao, “Numerical investigation on the effects of airfoil leading edge radius on the aerodynamic performance of H-rotor Darrieus vertical axis wind turbine,” *Energies*, vol. 12, no. 19, 2019, doi: 10.3390/en12193794.
- [17] C. Kang, H. Liu, and X. Yang, “Review of fluid dynamics aspects of Savonius-rotor-based vertical-axis wind rotors,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 499–508, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.02.011.
- [18] Q. Fitriyah, “Aplikasi Hukum Bernoulli pada Alat Peraga Flow Meter untuk Praktikum Mekanika Fluida,” *Pros. Semin. Nas. NCIET*, vol. 1, no. 1, pp. 277–285, 2020, doi: 10.32497/nciet.v1i1.97.