

STUDI NUMERIK PENGARUH VARIASI CHORD BILAH TERHADAP PERFORMANSI TURBIN ANGIN HORIZONTAL

Nu Rhahida Arini¹⁾, Arizal Fatkhur Rakhman Sidiq¹⁾, Amir Fadhilah¹⁾, Prima Dwi Permatasari¹⁾

¹⁾Sistem Pembangkit Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
E-mail: arini@pens.ac.id

Abstract

Wind energy is one of the most promising renewable resources, harnessed through turbines and generators to produce electricity. The efficiency of this energy conversion strongly depends on the aerodynamic performance of the turbine blades, which generate lift and drag forces. This study presents a numerical investigation on a modified Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) blade using Computational Fluid Dynamics (CFD) to enhance overall performance. The modifications are incorporated on NACA 0015 airfoils with non-uniform chord lengths and twist angles. The simulations are conducted using OpenFOAM to analyze two blade design variations, including the original/unmodified NACA 0015 airfoil. Key performance indicators such as lift coefficient (C_L), drag coefficient (C_D), pressure contours, velocity distribution, and streamline flow patterns are evaluated to assess the effectiveness of modification. The results show that blades with non-uniform chord and twist angle distribution can improve power output by up to 19.8%. Furthermore, the study introduces the concept of blade localization for adaptive manufacturing and tolerance control, paving the way for more precise and efficient turbine production.

Keywords: *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT), Computational Fluid Dynamics (CFD), Blade Element Momentum (BEM) Theory, Blade Design Optimization, Renewable Energy*

PENDAHULUAN

Krisis energi akibat menipisnya cadangan energi fosil di Indonesia menjadi persoalan serius, terutama dalam sektor pembangkitan listrik dan transportasi (Kementerian ESDM, 2023). Di sisi lain, Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang sangat besar, mencapai sekitar 810 GW, namun realisasinya hingga kini masih minim (Kementerian ESDM, 2023). Studi dari IESR menunjukkan bahwa potensi teknis EBT bahkan mencapai 3.686 GW, namun hanya sekitar 333 GW yang dikategorikan layak secara finansial dan sedang dalam pertimbangan untuk dikembangkan lebih lanjut (IESR, 2025). Dukungan dari sisi kebijakan dan investasi sangat dibutuhkan, karena antara 2018–2023, penambahan kapasitas terbarukan nasional hanya sebesar 3,3 GW – sangat jauh dari optimalisasi kapasitas yang tersedia (Ember, 2025). Kondisi ini makin mempertegas bahwa energi angin merupakan salah satu sumber daya alternatif yang paling menjanjikan apabila didukung dengan upaya percepatan pengembangan yang terstruktur dan efektif.

Energi angin dikonversi menjadi energi mekanik berupa torsi dan putaran oleh turbin angin, kemudian diubah menjadi energi listrik melalui generator. Proses konversi energi ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik aerodinamika bilah turbin, yang menghasilkan gaya angkat dan gaya hambat (T. Zirwes et al., 2023, C. Fiorina et al., 2021).. Optimalisasi efisiensi konversi ini dapat dicapai melalui desain bilah yang tepat berdasarkan prinsip aerodinamika. Salah satu jenis turbin yang umum digunakan adalah turbin angin sumbu horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine/HAWT*), yang memerlukan mekanisme yaw aktif untuk menjaga rotor selalu menghadap ke arah angin seiring perubahan arah angin (WES, 2024).

Penelitian ini memfokuskan pada desain bilah turbin HAWT dengan menggunakan profil NACA 0015, yang dimodifikasi dengan variasi panjang chord dan sudut twist yang tidak seragam. Desain ini dianalisis menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan *software* OpenFOAM, untuk mengevaluasi parameter kinerja seperti *coefficient of lift* (CL), *coefficient of drag* (CD), distribusi tekanan, kecepatan, serta pola aliran *streamline*. Simulasi dilakukan pada kecepatan angin konstan sebesar 2 m/s, dengan fluida berupa udara pada densitas $1,225 \text{ kg/m}^3$, dan skala turbin yang disesuaikan berdasarkan rata-rata kecepatan angin secara internasional.

Selain itu, penelitian ini juga menggunakan pendekatan teori *Blade Element Momentum* (BEM) sebagai metode pembanding. Studi oleh Ledoux et al. (2020) menunjukkan bahwa teori BEM dapat digunakan untuk merancang bilah HAWT secara efektif, meskipun terdapat keterbatasan dalam estimasi gaya pada bagian pangkal dan ujung bilah. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya mengadopsi teori BEM, tetapi juga melakukan modifikasi pada geometri bilah, khususnya panjang chord, untuk memperoleh desain yang optimal. Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang dan mengevaluasi performa turbin HAWT melalui pendekatan numerik guna menghasilkan model turbin yang efisien, adaptif, dan sesuai dengan karakteristik angin di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan komputasi numerik berbasis metode CFD untuk menganalisis pengaruh variasi panjang chord dan sudut *twist* pada bilah HAWT terhadap performa aerodinamisnya. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan visualisasi dan prediksi kinerja fluida yang detail, khususnya dalam merancang bilah turbin yang efisien

(Ferziger, J. H., & Perić, M., 2020).

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak OpenFOAM, sebuah *platform open-source* berbasis *Finite Volume Method (FVM)*, yang telah banyak digunakan dalam studi-studi mekanika fluida (Zirwes et al, 2023 dan Fiorina, C. et al. 2021). Tiga desain turbin dimodelkan, masing-masing memiliki karakteristik bilah yang berbeda. Ketiga model tersebut menggunakan profil airfoil NACA 0015 dengan kombinasi chord tidak seragam dan twist bervariasi. Turbin didesain dengan tiga bilah dan jari-jari 0,5 meter. Kecepatan angin ditetapkan sebesar 2 m/s, dengan fluida udara berdensitas 1,225 kg/m³.

Untuk mendukung proses desain, digunakan pendekatan *Blade Element Momentum (BEM) Theory* yang menggabungkan teori momentum dan teori elemen bilah (Jiamin Yin et al., 2025). BEM bekerja dengan memotong bilah menjadi beberapa elemen sepanjang jari-jarinya, dan menghitung gaya angkat serta gaya hambat yang bekerja pada tiap elemen berdasarkan kecepatan relatif fluida dan sudut serang (Muihammad, W et al., 2023). Rumus utama untuk torsi berdasarkan teori BEM adalah sebagai berikut:

$$T = 4\alpha(1 - \alpha)\rho V\Omega r^3\pi dr \quad \text{Pers.1}$$

Di mana α adalah faktor induksi aksial, ρ densitas udara, V kecepatan angin, dan Ω kecepatan sudut poros turbin. Teori ini digunakan sebagai rujukan awal untuk mengestimasi distribusi torsi dan daya sepanjang bilah. Meski bersifat ideal, teori ini tetap relevan karena sederhana dan cepat dihitung, meskipun memiliki keterbatasan dalam memprediksi gaya di area pangkal dan ujung bilah.

Geometri turbin dimodelkan dalam format 3D dengan *software* CAD dan diekspor dalam bentuk file STL. Turbin memiliki 3 bilah dengan jari-jari 0,5 meter, menggunakan profil airfoil NACA 0015, dan simulasi dilakukan pada kecepatan angin konstan 2 m/s. Tiga variasi desain diuji, yakni Turbin A, B, dan C, masing-masing memiliki distribusi panjang chord dan sudut twist yang berbeda pada setiap posisi bilah.

Tabel 1. Spesifikasi Turbin A, B, dan C

	Pos (m)	Chord (m)	Twist (°)	AoA (°)	Foil
Turbin A	0	0,02	0	9,5	Circular Foil
	0,02	0,02			Circular Foil
	0,06	0,045			NACA 0015
	0,15	0,045			NACA 0015
	0,2	0,045			NACA 0015
	0,25	0,045			NACA 0015

	0,3	0,045			NACA 0015
	0,35	0,045			NACA 0015
	0,4	0,045			NACA 0015
	0,45	0,045			NACA 0015
	0,5	0,045			NACA 0015
Turbin B	0	0,02			Circular Foil
	0,02	0,02			Circular Foil
	0,06	0,038			NACA 0015
	0,15	0,063			NACA 0015
	0,2	0,056			NACA 0015
	0,25	0,05			NACA 0015
	0,3	0,045			NACA 0015
	0,35	0,041			NACA 0015
	0,4	0,038			NACA 0015
	0,45	0,036			NACA 0015
	0,5	0,035			NACA 0015
Turbin C	0	0,02	6		Circular Foil
	0,02	0,02	21		Circular Foil
	0,06	0,038	21		NACA 0015
	0,15	0,063	15		NACA 0015
	0,2	0,056	10		NACA 0015
	0,25	0,05	6		NACA 0015
	0,3	0,045	3		NACA 0015
	0,35	0,041	1		NACA 0015
	0,4	0,038	0		NACA 0015
	0,45	0,036	0		NACA 0015
	0,5	0,035	0		NACA 0015



Gambar 1. *Meshing* Turbin

Simulasi dilakukan pada OpenFOAM, menggunakan solver pimpleFoam, yang cocok untuk aliran *unsteady* dalam domain bergerak (Sun, K., et al., 2021 dan Nagarajan, S. G., et al., 2022). Model dibagi menjadi dua bagian utama *shaft* dan ujung bilah (tip), yang didefinisikan di folder *snappyHexMesh* dengan mesh independen untuk masing-masing

bagian dan menggunakan *check mesh* di terminal untuk mendapatkan jumlah sel sebesar 59.869, 61.220, dan 62.109.

Grid independent diperiksa untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak bergantung pada kepadatan *mesh*. Meskipun tidak dilakukan uji grid konvergen formal, variasi hasil antar jumlah mesh diamati untuk mendeteksi sensitivitas (Mihyun Lee et al. 2020). Selain itu, nilai y^+ dievaluasi menggunakan fungsi *yPlus* pada terminal untuk memastikan *boundary conditions* berada dalam rentang valid, Menentukan jenis aliran: $y^+ < 1$ untuk aliran laminar, $1 < y^+ < 30$ untuk aliran transisi, dan $y^+ > 30$ untuk aliran turbulen.

Nilai *Courant Number* (Co) diatur menjadi 0,9 di dalam file *controlDict* untuk memastikan kestabilan numerik. Simulasi dijalankan dengan perintah *./Allrun*, dan konvergensi diverifikasi melalui grafik *residual plot* yang ditampilkan melalui Gnuplot.

Parameter awal seperti tekanan, kecepatan, dan debit dimasukkan ke dalam folder 0. Setelah proses simulasi selesai, output disimpan dalam bentuk U, p, dan residual, dan dilanjutkan ke tahap analisis pasca-pemrosesan.

Untuk memastikan keakuratan hasil simulasi yang dilakukan, data numerik yang diperoleh dari simulasi CFD divalidasi dengan data eksperimental atau data yang telah dipublikasikan dalam jurnal ilmiah. Validasi ini dilakukan dengan membandingkan nilai CL yang diperoleh dari simulasi dua dimensi dengan data referensi. Distribusi tekanan dan kecepatan divisualisasikan dalam bentuk kontur menggunakan fitur *spreadsheet* pada software ParaView (O. Kovalevskiy et al., 2022), sedangkan *streamline* divisualisasikan menggunakan fitur *streamtracer* (Yalan Song et al., 2020). Selama hasil simulasi menunjukkan kesesuaian dengan data referensi, maka data tersebut dianggap valid dan dapat dijadikan dasar untuk menganalisis performa aerodinamika bilah turbin.

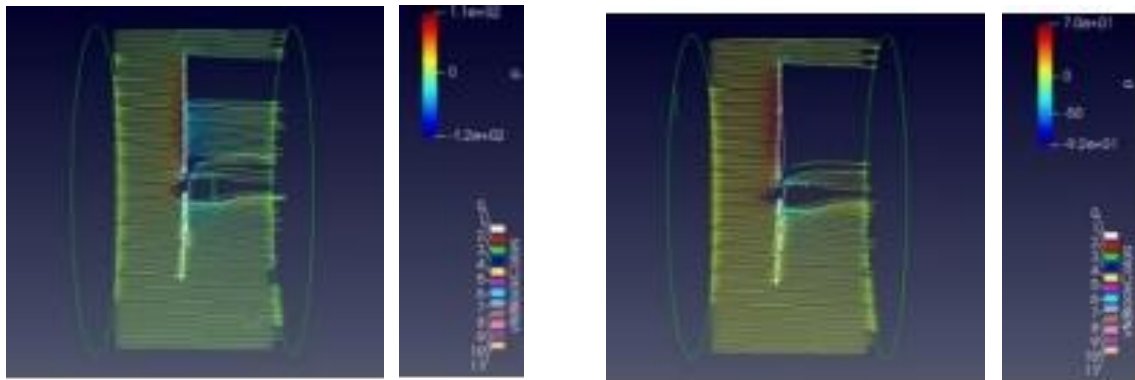
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa jumlah elemen sel mesh yang digunakan dalam masing-masing variasi turbin adalah 59.869, 61.220, dan 62.109 sel. Simulasi dilakukan dengan *time step* atau interval sebesar 0,001 detik, dengan waktu simulasi hingga 0,1 detik. Nilai *Courant Number* (Co/maxCo) ditetapkan sebesar 0,9, sedangkan nilai realisasi akhir dari iterasi mencapai $1,068 \times 10^5$, yang menandakan bahwa simulasi telah mencapai kondisi konvergen dan stabil.

Visualisasi hasil simulasi meliputi distribusi kontur tekanan, kecepatan aliran, dan pola

aliran *streamline*. Masing-masing desain turbin memiliki spesifikasi yang berbeda dalam hal ukuran elemen bilah, jenis airfoil, panjang chord, *angle of attack*, dan sudut *twist*.

Seperti pada gambar 3, untuk mengevaluasi pengaruh variasi desain terhadap gaya yang dihasilkan, dilakukan pemetaan tekanan pada bidang dua dimensi menggunakan fitur *streamtracer* pada sumbu X dan Y. Ketika bilah turbin berputar, pola aliran fluida yang terbentuk di sekitarnya akan berubah mengikuti geometri bilah dan kondisi aliran fluida ini dapat bersifat laminar atau turbulen, dan sifat alirannya dapat berubah setiap iterasi tergantung kondisi lokal bilah dan interaksi fluida.



Gambar 2. (a) *Streamline* Turbin B dan (b) *Streamline* Turbin C

Ketika turbin berputar akan menghasilkan suatu aliran yang berbeda saat fluida melewati turbin, aliran itu dapat berupa laminar maupun turbulen, aliran ini juga akan berubah tiap iterasi. Dari persamaan bernoulli pada streamtube dan hasil simulasi didapatkan hasil seperti berikut.

$$dF_x = (p_2 - p_3)dA \quad \text{Pers. 2}$$

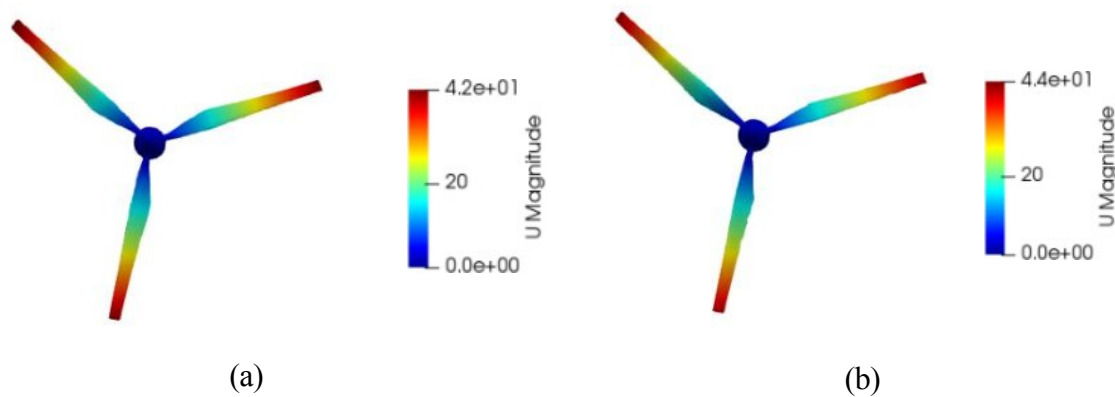
$$dF_x = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_4^2)dA \quad \text{Pers. 3}$$

Tabel 2. Perhitungan Gaya Total

Turbin	P2	P3	ΔP	A	dF (Gaya Total)
A	29,959	-3,831	33,79	0,0305	1,029414546
B	33,57	-4,616	38,186	0,0305	1,163338972
C	26,828	-3,586	30,414	0,0305	0,926564487

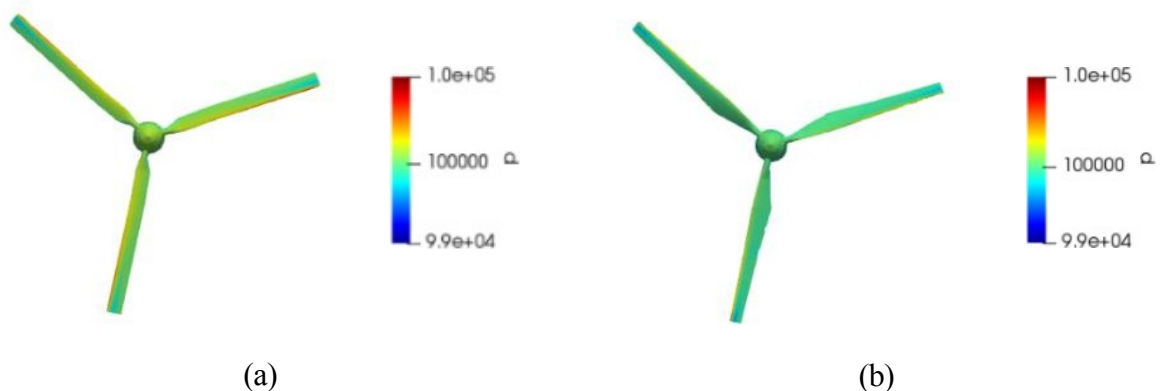
Gambar 3 menunjukkan distribusi kontur kecepatan aliran pada ketiga desain bilah

turbin. Berdasarkan gradasi warna yang ditampilkan, terlihat bahwa kecepatan aliran meningkat secara bertahap dari bagian *shaft* turbin menuju ujung bilah (tip). Peningkatan ini menggambarkan karakteristik aliran yang umum terjadi pada turbin angin, dimana fluida mengalami percepatan seiring bertambahnya jari-jari rotasi bilah



Gambar 3. (a) Kontur Kecepatan Turbin B dan (b) Kontur Kecepatan Turbin C

Distribusi kontur tekanan pada ketiga bilah turbin ditunjukkan pada Gambar 4. Secara umum, tekanan udara di sekitar turbin cenderung konstan dan tidak banyak terpengaruh, sehingga tekanan pada setiap area yang terkena aliran fluida relatif serupa sebelum mengenai bilah. Setelah fluida melewati turbin, tekanan mengalami penurunan karena sebagian energi fluida telah dikonversi menjadi energi mekanik. Selisih tekanan antara sebelum (P2) dan sesudah (P3) turbin menjadi indikator utama dalam menilai efisiensi desain; semakin besar penurunan tekanan yang terjadi, maka semakin besar pula energi yang berhasil dikonversi oleh turbin



Gambar 4. (a) Kontur Tekanan Turbin B dan (b) Kontur Tekanan Turbin C

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja HAWT dapat ditingkatkan secara signifikan

melalui modifikasi desain bilah yang tepat. Dengan menggunakan simulasi CFD pada *software* OpenFOAM, tiga variasi desain bilah dengan kombinasi panjang chord dan sudut *twist* yang tidak seragam, serta menggunakan profil airfoil NACA 0015, telah dievaluasi.

Efisiensi kinerja dianalisis melalui parameter CL, CD, distribusi tekanan, kecepatan aliran, serta pola aliran *streamline*. Meskipun memiliki keterbatasan, teori BEM tetap berperan dalam mendukung proses perancangan dan analisis awal performa bilah.

Dari ketiga desain yang diuji, Turbin B menunjukkan efisiensi konversi energi tertinggi dengan nilai daya sebesar 1,163, dibandingkan dengan Turbin A sebesar 1,029 yang tanpa modifikasi apapun, dan Turbin C sebesar 0,927. Hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa kecepatan aliran meningkat secara bertahap dari poros hingga ke ujung bilah, dengan distribusi tekanan yang relatif konstan dan mendukung konversi energi yang efisien. Penurunan tekanan yang signifikan sebelum dan sesudah turbin semakin memperkuat keunggulan desain Turbin B dalam mengoptimalkan konversi energi kinetik angin menjadi daya mekanik.

Selain itu, penelitian ini juga menyinggung potensi penerapan teori *blade localization* dalam proses manufaktur adaptif dan toleransi rekayasa, yang dapat membuka peluang peningkatan efisiensi produksi bilah di masa depan. Secara keseluruhan, desain bilah yang telah dioptimasi ini mampu meningkatkan output daya hingga 19,8%, menegaskan pentingnya inovasi aerodinamika dalam pengembangan teknologi energi angin.

DAFTAR PUSTAKA

- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2023). *Handbook of energy & economic statistics of Indonesia 2023*. Jakarta: Pusat Data dan Teknologi Informasi ESDM.
- Institute for Essential Services Reform (IESR). (2025, February 27). Indonesia has 333 GW of financially viable renewable energy projects. IESR.
- Ember. (2025). Indonesia's expansion of clean power can spur growth and equality (mengutip data penambahan kapasitas 2018–2023). Embers' data briefing.
- WES – Control-oriented modelling of wind direction variability. (2024). *Wind Energ. Sci.*, 9, 841.
- Sudarti, S. (2023). Analisis potensi energi angin sebagai pembangkit energi listrik tenaga angin di daerah Banyuwangi kota menggunakan database online-BMKG. *Jurnal Surya Energy*, 6(1), 9-16.
- Ledoux, J., Rizzo, S., & Salomon, J. (2020). *Analysis of the Blade Element Momentum Theory*. SIAM Journal on Applied Mathematics.
- Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2020). *Computational methods for fluid dynamics* (4th ed.). Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6>
- Zirwes, T., Sontheimer, M., Zhang, F., Abdelsamie, A., Pérez, F., Stein, O., Im, H., Kronenburg, A., & Bockhorn, H. (2023). Assessment of Numerical Accuracy and Parallel Performance of OpenFOAM and its Reacting Flow Extension EBI dnsFoam. *Flow, Turbulence and Combustion*, 111, 567 - 602. <https://doi.org/10.1007/s10494-023-00449-8>.

- Fiorina, C., Clifford, I., Kelm, S., & Lorenzi, S. (2021). On the development of multi-physics tools for nuclear reactor analysis based on OpenFOAM®: state of the art, lessons learned and perspectives. *Nuclear Engineering and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111604>.
- Yin, J., Shen, W., Sun, Z., Zhu, W., & Cho, H. (2025). A new Blade Element Momentum theory for both compressible and incompressible wind turbine flow computations. *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119619>.
- Muhammad, W., Mohd, S., & Bambang, B. (2023). The Improvement of Blade Element Momentum Theory in Horizontal Axis Wind Turbine Performance Analysis. *Progress in Aerospace and Aviation Technology*. <https://doi.org/10.30880/paat.2023.03.02.003>.
- Sun, K., Ji, R., Zhang, J., Li, Y., & Wang, B. (2021). Investigations on the hydrodynamic interference of the multirotor vertical axis tidal current turbine. *Renewable Energy*, 169, 752–764. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.055>
- Nagarajan, S. G., Panjwani, B., Øvrelid, E. J., Gururajan, M. P., & Viswanathan, N. N. (2022). Numerical simulation of silicon crystal growth: A 2-D OpenFOAM implementation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1221(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1221/1/012034>
- Lee, M., Park, G., Park, C., & Kim, C. (2020). Improvement of Grid Independence Test for Computational Fluid Dynamics Model of Building Based on Grid Resolution. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2020/8827936>.
- Kovalevskiy, O., Charara, M., & Cancelliere, M. (2022). External Control of ParaView Visualization. *Proceedings of the 32nd International Conference on Computer Graphics and Vision*. <https://doi.org/10.20948/graphicon-2022-1137-1146>.

Song, Y., Lai, Y., & Liu, X. (2020). An Improved Immersed Boundary Method for Simulating Flow Hydrodynamics in Streams with Complex Terrains. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12082226>.