

Studi relokasi gempam mikro menggunakan teknik *double-difference*

Wrego Seno Giamboro¹, Wahyu Hidayat^{1*}, Firdaus Maskuri^{1,2},
Ardian Novianto¹, Hafiz Hamdalah¹

¹Teknik Geofisika, FTM UPN "Veteran" Yogyakarta

²Teknik Geologi FTM UPN "Veteran" Yogyakarta

Jalan Pajajaran Condongcatur Depok Sleman DI Yogyakarta

*email: wahyu.hidayat@upnyk.ac.id

Abstrak – Penentuan lokasi merupakan kegiatan pertama dan utama dalam bidang seismologi. Penentuan lokasi hiposenter yang akurat dan presisi dibutuhkan untuk meminimalisasi potensi seismic hazard. Pada tambang bawah tanah event – event gempa umumnya terjadi di bukaan tambang, hal ini diakibatkan oleh kompensasi massa yang diambil yang mengakibatkan munculnya stress. Akumulasi stress yang tinggi mengakibatkan terjadinya event gempa mikro. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan relokasi hiposenter yang akurat pada tambang bawah tanah. Data yang digunakan adalah katalog gempa selama 2 bulan dari area tambang bawah tanah di daerah Jawa Timur. Jumlah event gempa sebanyak 1783 dengan magnitudo gempam mikro dari -1.3 sampai dengan 1.5 Mw. Untuk mendapatkan tingkat akurasi dan presisi yang tinggi terutama dalam penentuan lokasi serta kedalaman dalam penentuan hiposenter digunakan teknik Double - Difference (DD). Hasil relokasi gempam mikro menunjukkan dari 1783 event terelokasi 1765 dengan total phase mencapai 2994. Fase gelombang P terseleksi pasangan sebanyak 49910 dari 57991 (86%), sedangkan untuk fase gelombang S terseleksi pasangan sebanyak 24943 dari 28752 (86%). Pergeseran gempam mikro sebelum dan setelah direlokasi menyebar ke segala arah dengan arah dominan berarah NE – SW. Nilai pergeseran gempam mikro sebelum dan setelah direlokasi berkisar dari 0.01 meter sampai dengan 13 meter.

Kata kunci: Gempam mikro, Relokasi, Hiposenter, Double-Difference

Abstract – Determining the location is the first and foremost activity in the field of seismology. Accurate and precise determination of the hypocenter location is required to minimize potential seismic hazard. In underground mines – events generally occur in mine openings, this is due to mass compensation taken which results in stress generation. The accumulation of high stress results in the occurrence of microseismic. This study aims to obtain accurate hypocenter relocation in underground mines. The data used is an earthquake catalog for 2 months from underground areas in East Java. The number of earthquake events was 1783 with a magnitude of micro-earthquake from -1.3 to 1.5 Mw. To obtain a high level of accuracy and precision, especially in the location and in determining the hypocenter, the Double-Difference (DD) technique is used. The results of the relocation of microseismic showed that 1783 events were relocated in 1765 with a total phase reaching 2994. The P-wave phase was selected by 49910 pairs out of 57991 (86%), while for the S-wave phase, 24943 pairs were selected from 28752 (86%). The shift of the microearthquake before and after being relocated spread in all directions with the dominant direction in the NE – SW direction. The value of the microearthquake shift before and after being relocated ranged from 0.01 meters to 13 meters.

Key words: Microseismic, Relocation, Hypocenter, Double – Difference

PENDAHULUAN

Penentuan hiposenter merupakan tahapan yang sangat penting dalam seismologi. Relokasi hiposenter gempa bumi merupakan suatu metode menghitung ulang atau mengkoreksi posisi hiposenter gempa bumi menjadi lebih baik dan akurat. Tingkat akurasi lokasi hiposenter ditentukan oleh tipe, jumlah event gempa, ray path, stasiun pemantauan, dan geometri stasiun, *picking gelombang P dan S*[1]. Faktor geometri stasiun

pengamat dapat ditingkatkan dengan cara menambah stasiun yang ada. Untuk kesalahan pembuatan model kecepatan serta tingkat akurasi pembacaan waktu tiba gelombang diperlukan analisis mendalam. Initial model kecepatan yang digunakan akan juga berpengaruh terhadap kualitas data yang didapatkan. Pada penelitian ini penggunaan kecepatan awal memanfaatkan hasil *coring* laboratorium, sehingga faktor kesalahan akibat model awal dapat dihindari [2].

Tujuan utama penerapan jaringan seismik dalam bidang pertambangan adalah untuk memonitoring seismisitas di area pertambangan secara terus menerus [3], [4], [6]. Pemantauan seismik umumnya terdiri dari penentuan lokasi hiposenter, energi dan estimasi momen seismik [7], [8]. Untuk meningkatkan akurasi dan keandalan analisis data serta kebutuhan untuk menganalisis kejadian seismik yang sangat kecil dalam skala lokal diperlukan banyak perbaikan dalam prosedur analisis data seismic [2], [5], [8]. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan lokasi hiposenter yang akurat dan presisi pada tambang bawah tanah. Penentuan lokasi hiposenter pada tambang bawah tanah mutlak diperlukan untuk meminimalisir potensi *seismic hazard* pada tambang bawah tanah [9].

Monitoring gempamikro merupakan metode investigasi seismik bawah permukaan berdasarkan deteksi lokasi gempa dengan magnitudo kecil yang terjadi pada batuan berkenaan dengan proses alami ataupun buatan [5], [8]. Evolusi *tunnel development* dan evolusi bukaan tambang dapat direkonstruksi dengan baik melalui analisa sebaran *event* gempamikro yang tentunya membutuhkan penentuan hiposenter yang akurat [10], [11]. Kegiatan monitoring seismik pada tambang bawah tanah dapat menjadi *early warning system* bagi asset tambang terutama keselamatan pekerja [12].

Penelitian ini akan mengkaji permasalahan pertama dan utama dalam kajian seismologi yaitu relokasi hiposenter. Untuk daerah dengan intensitas seismisitas tinggi seperti pada tambang bawah tanah diperlukan suatu algoritma penentuan hiposenter yang akurat, hal ini dilakukan karena keselamatan pekerja dan asset tambang bawah tanah [13]. Permasalahan metode – metode relokasi hiposenter yang digunakan saat ini belum banyak yang membahas tentang suatu gempa yang ter *cluster*. *Event* gempa yang terjadi umumnya tersebar, oleh karena itu pada penelitian ini akan dibahas suatu algoritma penentuan hiposenter yang dapat memberikan solusi yang tepat dalam bidang *clustering* gempa sehingga dapat memitigasi bencana seismik pada tambang bawah tanah sedini mungkin.

LANDASAN TEORI

Penjalaran gelombang seismik banyak digunakan di berbagai bidang penelitian seperti seismologi, geofisika dan mekanika batuan. Cepat rambat gelombang seismik merupakan

indikator komprehensif dari sifat fisis batuan [14]. Akumulasi *stress* pada tambang bawah tanah dapat mengakibatkan potensi *seismic hazard* yang dapat membahayakan keselamatan pekerja di area tambang bawah tanah. Pembangunan terowongan, runtuh batuan akibat bukaan tambang akan menimbulkan *induced seismic* baru yang harus dimonitoring distribusi *stress*nya dengan cepat dan akurat. Untuk mendapatkan informasi sumber gempa berasal diperlukan metode yang memiliki tingkat akurasi yang tinggi, salah satunya adalah menggunakan metode *Double - Difference* (DD) [15].

Metode DD merupakan pengembangan dari metode Geiger. Metode DD mengasumsikan jarak antara dua *event* gempamikro jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan jarak *event* tersebut ke stasiun pengamat. *Ray path* dari kedua *event* tersebut dianggap sama [16]. Gambar 1 merupakan ilustrasi dua buah *event* gempamikro *i* dan *j* dengan jarak berdekatan dibandingkan dengan stasiun pengamatan *k* dan *l*. Waktu tiba gelombang *T* dari *event* gempamikro *i* ke stasiun pengamatan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k u ds \tag{1}$$

Di mana τ^i merupakan waktu *event* gempamikro *i*, *u* adalah *vector slowness*, dan *ds* merupakan partisi dari lintasan *ray path*. Waktu tiba dan lokasi sumber sangat tidak linier, oleh karena itu data pengamatan dan perkiraan waktu tiba gelombang r_k^i dilinierisasi (linearized) untuk mempermudah perhitungan.

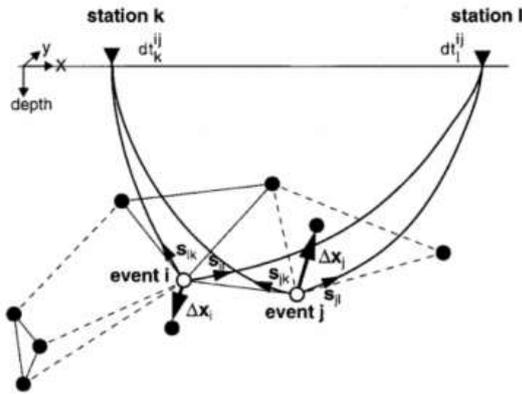
$$r_k^i = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \int_i^k \delta u ds \tag{2}$$

Persamaan 2 disubstitusikan dengan kejadian dari sumber *j* yang diterima stasiun *k*, maka didapatkan:

$$r_k^i - r_k^j = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \int_i^k \delta u ds - \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^j}{\partial x_l^j} \Delta x_l^j - \Delta \tau^j - \int_i^j \delta u ds. \tag{3}$$

Dengan mengasumsikan kedua sumber tersebut sangat dekat sehingga garis *ray path* tersebut hampir sama dan saling menghilangkan, persamaan 3 dapat disederhanakan menjadi:

$$r_k^i - r_k^j = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial r_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i - \sum_{l=1}^3 \frac{\partial r_k^j}{\partial x_l^j} \Delta x_l^j - \Delta \tau^j \quad (4)$$



Gambar 1. Skema Teknik DD [16]

Di mana $r_k^i - r_k^j$ merupakan DD [16]. Perbedaan waktu antara data pengamatan dengan perhitungan diantara dua event gempamikro yang berdekatan ditulis menjadi:

$$r_k^i - r_k^j = (T_k^i - T_k^j)^{obs} - (T_k^i - T_k^j)^{kalkulasi} \quad (5)$$

Perbedaan waktu tiba $(T_k^i - T_k^j)^{obs}$ diperoleh berdasarkan *cross correlation waverform* atau dari perbedaan waktu absolut berdasarkan katalog gempamikro. “Persamaan 3” langsung diterapkan pada iterasi dan jika ditulis dalam bentuk matriks menjadi:

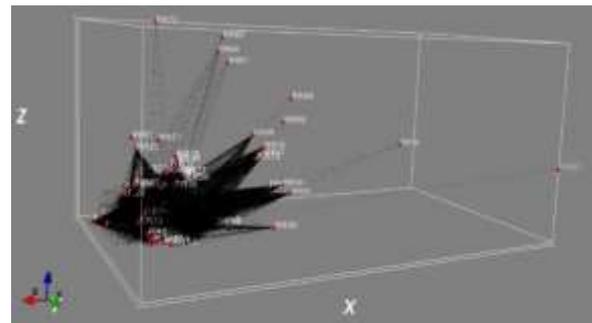
$$Q_{dd}A\Delta x + Q_{dd}C\Delta M = Q_{dd}\Delta T. \quad (6)$$

A adalah differential matriks parsial dari hiposenter dan origin *time* gempa berukuran $N_T \times 4M_T$. Δx adalah matriks vektor pertubasi posisi dan waktu origin gempa yang berukuran $4 M_T \times 1$. C adalah differential matriks dari pertubasi model *slowness* yang berukuran $N_T \times L$. ΔM merupakan vektor pertubasi *slowness* yang berukuran $L \times 1$. ΔT merupakan vektor residual waktu tiba yang berukuran $N_T \times 1$. N_T merupakan total data observasi waktu tiba, M_T merupakan total hiposenter, dan L merupakan total *grid nodei* dari model kecepatan. Q_{dd} adalah matriks operator *double-difference* yang berukuran $\sum_{k=1}^{K^T} \frac{W_k(W_k-1)}{2} \times N_T$, dimana W_k merupakan jumlah gempa yang direkam pada stasiun *k*. Untuk mengetahui arah rambat *ray path* dan menghitung waktu tempuh kalkulasi menggunakan algoritma *pseudo-bending ray*

tracing [15]. Diferensial parsial dari hiposenter dihitung menggunakan arah ray dan kecepatan lokal di sekitar sumber gempa [17]. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan [15], metode DD ini efisien untuk merelokasi kejadian gempa secara akurat dan menggambarkan struktur kecepatan lokal dengan cukup baik.

METODE PENELITIAN

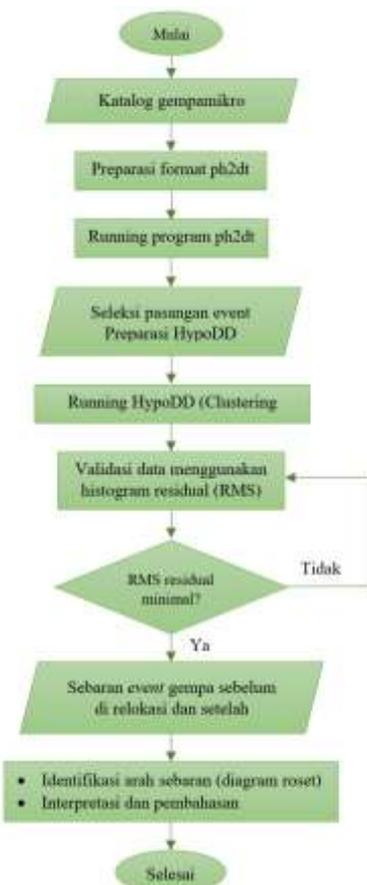
Relokasi gempamikro pada penelitian ini menggunakan *HypoDD*. Data yang digunakan adalah data katalog gempamikro selama 2 bulan (Januari – Februari 2021) hasil rekaman 30 stasiun dari area tambang bawah tanah di daerah Jawa Timur (gambar 2). Katalog gempa terdiri dari tanggal, waktu kejadian *event*, stasiun, besaran skala, kedalaman dan *uncertainty* dari masing – masing parameter tersebut. Total *event* gempa untuk katalog gempa bulan januari dan february sebanyak 1783 *event* gempamikro dengan magnitudo gempa dari -1.3 sampai dengan 1.5 Mw. Katalog gempa tersebut kemudian di dihitung waktu tempuh dan menentukan pasangan *eventnya* menggunakan bahasa pemrograman fortran yang dikemas dalam *ph2dt*.



Gambar 2. Sebaran stasiun seismometer (bulatan warna merah) dan *raypath event* gempamikro (garis hitam)

Berdasarkan hasil *runing ph2dt* diperoleh informasi *event* terseleksi sebanyak 1765 *event* dengan total phase mencapai 2994. Fase gelombang P terseleksi pasangan sebanyak 49910 dari 57991 atau sebanyak 86%, sedangkan untuk fase gelombang S terseleksi pasangan sebanyak 24943 dari 28752 (86%). Terdapat 1 kluster gempa, *event* gempamikro berada disekitar bukaan tambang. Model kecepatan awal yang digunakan merupakan model kecepatan 3-Dimensi. Model kecepatan 3-Dimensi diperoleh dari informasi geologi dari

coring batuan secara vertikal maupun horisontal. data tersebut kemudian diparametirasi sesuai luasan dan grid inputan program *HypoDD*. Pengolahan data secara detail pada penelitian ini disajikan pada gambar 3.

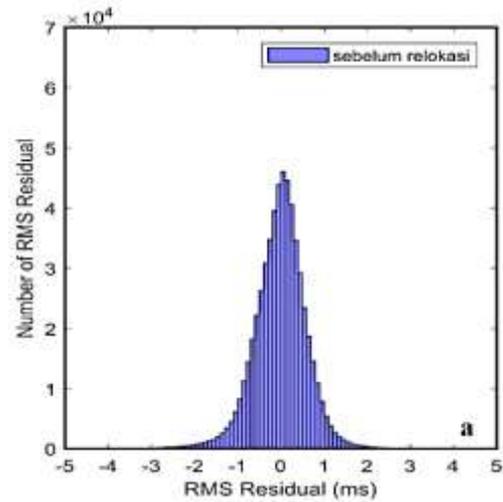


Gambar 3. Diagram alir pengolahan data

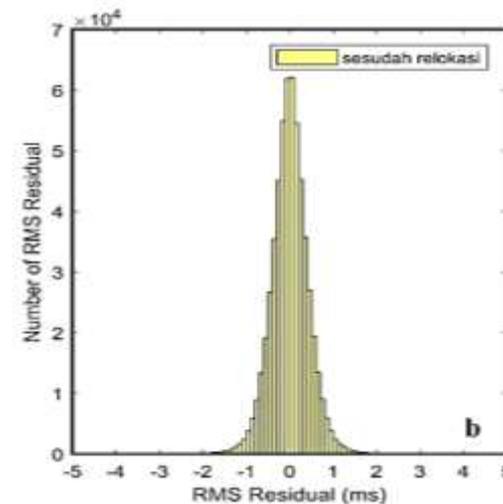
HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode DD menggunakan waktu tiba relatif (*cross-correlation* data atau *differential catalog* data) serta *absolute* data yang secara simultan merelokasi gempa sekaligus menghitung model kecepatan 3-Dimensi. Gambar 4 merupakan histogram residual waktu tempuh sebelum direlokasi, sedangkan gambar 5 merupakan histogram yang telah direlokasi. Distribusi RMS residual sebelum direlokasi berada pada rentang -3 ms sampai dengan 2 ms. Histogram setelah direlokasi menunjukkan nilai distribusi frekuensi tinggi dan mendekati 0 dengan rentang nilai -2 ms sampai dengan 2 ms, yang menunjukkan relokasi gempa mikro secara statistik lebih baik dibandingkan sebelum dilakukan relokasi. Untuk mengetahui jarak pergeseran

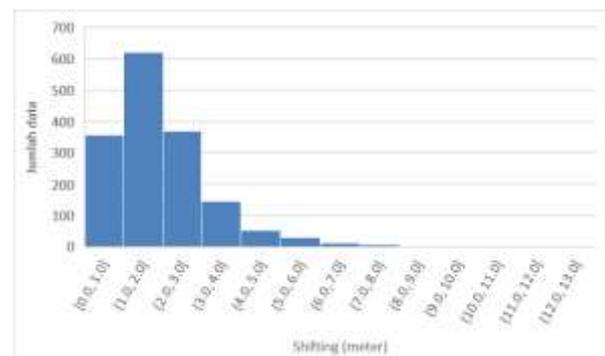
gempamikro sebelum dan sesudah direlokasi, dilakukan pembuatan histogram pergeseran vs jumlah data dan diagram roset untuk mengetahui arah dominan persebarannya (Gambar 6 dan 7).



Gambar 4. Histogram RMS Residual gempamikro sebelum direlokasi

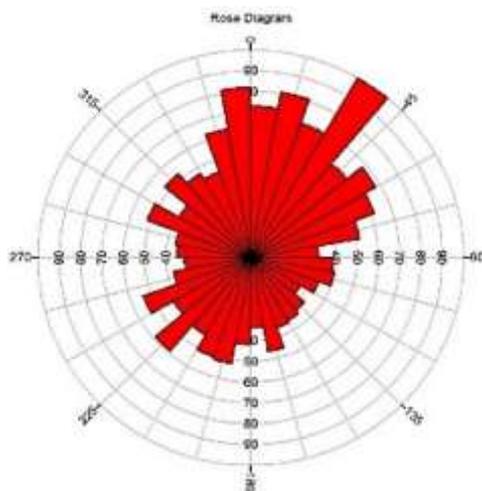


Gambar 5. Histogram RMS Residual gempamikro setelah di relokasi



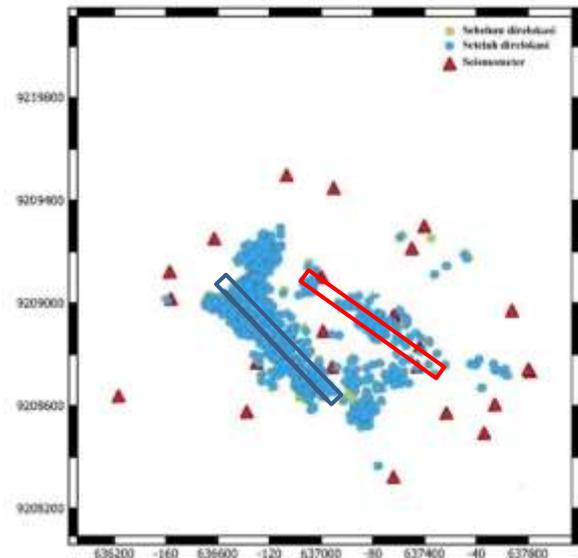
Gambar 6. Histogram pergeseran (*shifting*) sebelum dan setelah direlokasi.

Area tambang bawah tanah yang memiliki level aktivitas seperti level produksi, terowongan, level *undercut*, level ekstraksi, *hauling* memiliki area relatif sempit (≤ 20 meter antar levelnya). Berdasarkan hasil relokasi gempamikro diperoleh pergeseran hiposenter bergeser dari dari 0,01 meter sampai dengan 13 meter (Gambar 6) dari posisi sebelumnya. Hasil histogram pergeseran gempamikro kemudian dibuat diagram rosetnya untuk melihat kecenderungan penyebarannya. Sebaran gempamikro yang ditunjukkan oleh diagram roset menyebar kesegala arah, namun dominan berarah NE- SW (Gambar 7). Arah dominan pergeseran *event* gempamikro ini hanya menunjukkan kearah mana *event* bergeser dari posisi semulanya.



Gambar 7. Diagram roset sebaran gempamikro

Distribusi *event* sebelum dan sesudah relokasi dapat dilihat pada gambar 8. Titik warna hijau adalah sebaran *event* gempa sebelum direlokasi sedangkan warna biru adalah *event* yang telah direlokasi. Segitiga warna merah merupakan sebaran stasiun pengamatan. Sebaran *event* gempamikro pada gambar 8 menunjukan adanya pola kelurusan (*linement*) berarah NW – SE yang merupakan jalur bukaan tambang berupa *tunnel* (garis berwarna hitam) yang diakibatkan oleh adanya kegiatan *Development Blasting* (DB). Kegiatan DB mempengaruhi area sekitar tambang bawah tanah yang mereaktivasi keberadaan sesar sejajar dengan *tunnel development* (garis warna merah). Untuk memastikan potensi *seismic hazard* terutama reaktivasi sesar maka perlu dilakukan monitoring gempamikro dan pemetaan *stress* serta pengaturan *property blasting*.



Gambar 8. Sebaran *event* gempa sebelum (titik warna hijau) dan setelah direlokasi (titik warna biru), Segitiga warna merah merupakan stasiun pengamat gempamikro. Garis warna hitam merupakan *tunnel development* sedangkan garis warna merah merupakan sesar yang teraktivasi akibat adanya kegiatan *development blasting* (DB)

KESIMPULAN

Metode Double – Difference (DD) mampu merelokasi gempamikro dengan akurat terutama daerah disekitar sumber gempa. Hasil relokasi DD memiliki tingkat akurasi yang tinggi yang ditunjukkan oleh histogram RMS residual. Diperlukan monitoring gempamikro untuk mencegah potensi *seismic hazard* berupa reaktivasi sesar disekitar area penelitian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada LPPM UPN Veteran Yogyakarta atas pendanaan penelitian internal skim penelitian dasar.

DAFTAR PUSTAKA

Artikel Jurnal:

[1] Gomberg, Beeler N.M., Blanpied, M.L., and Bodin, “P. Earthquake triggering by transient and static deformations”, *Journal of geophysical research* 103(B10) (1998) 411-424.

[2] Wang Z, Xibing Lia, Dapeng Zhao, Xueyi Shang, Longjun Dong, “Time-lapse seismic tomography of an

- underground mining zone”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 107 (2018) 136-149,
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.038>
- [3] Gibowicz and Lasocki, “Seismicity Induced By Mining Ten Years Later”, *Advances in geophysics* 44 (2001).
- [4] Mendecki and Sciocatti, *Seismic Monitoring on Mines*, Chapman and Hall. London, 1997.
- [5] Nugraha, DA., *Mikroseismik*, Penerbit ITB Press 2018, ISBN 978-602-5417-59-7, 1997.
- [6] Luxbacher K, Westman E, Swanson P, Karfakis M, “Three-dimensional time-lapse velocity tomography of an underground longwall panel”, *Int J Rock Mech Min* 45 (2008) 478–485.
- [7] Zhao DP, Mishra OP, Sanda R, “Influence of fluids and magma on earthquakes: seismological evidence”, *Phys Earth Planet Inter.* 132(2002) 249–267.
- [8] Zhao DP, Wang Z, Umino N, Hasegawa A. Tomographic imaging outside a seismic network: application to the northeast Japan arc. *Bull Seismol Soc Am.* 2007;97:1121–1132
- [9] Ma, Xu & Westman, Erik & Counter, Dave & Malek, Farid & Slaker, Brent. “Passive Seismic Imaging of Stress Evolution with Mining-Induced Seismicity at Hard-Rock Deep Mines”, *Rock Mechanics and Rock Engineering* (2020) 10.1007/s00603-020-02076-5
- [10] Hosseini N, Oraee K, Shahriar K, Goshtasbi K., “Studying the stress redistribution around the longwall mining panel using passive seismic velocity tomography and geostatistical estimation”, *Arab J Geosci.* 6 (2013) 1407–1416.
- [11] Cai W, Dou LM, Cao AY, Gong SY, Li ZL., “Application of seismic velocity tomography in underground coal mines: a case study of Yima mining area, Henan, China”, *J Appl Geophysics.* 109(2014) 140–149.
- [12] Cai W, Dou LM, Gong SY, Li ZL, Yuan SS., “Quantitative analysis of seismic velocity tomography in rock burst hazard assessment”, *Nat Hazards.* 75 (2015) 2453–2465.
- [13] Lurka A., “Location of high seismic activity zones and seismic hazard assessment in Zabrze Bielszowice coal mine using passive tomography”, *J China Univ Min Technol.* 18 (2008) 177–181.
- [14] Wang Z, Xibing Lia, Dapeng Zhao, Xueyi Shang, Longjun Dong, “Time-lapse seismic tomography of an underground mining zone”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 107(2018) 136-149.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.038>
- [15] Zhang, H.J., and Thurber, C., “Adaptive mesh seismic tomography based on tetrahedral and Voronoi diagrams: Application to Parkfield, California”, *J. Geophys. Res.* 110 (B4) (2005) 225–243.
- [16] Waldhauser, F., and Ellsworth, W.L., “A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California”, *Bulletin of the Seismological Society of America* 90 (2000) 1353–1368.
<https://doi.org/10.1785/0120000006>
- [17] Lee WH, and Stewart SW, *Principles and Applications of Micro-Earthquake Network: Advances in Geophysics, Supplement 2*, Academic Press, Cambridge, 1981.

Analisis tekanan dan laju aliran fluida di sekitar baling-baling Savonius dengan Computational Fluid Dynamics

Farzand Abdullatif*, Hartono, dan Sugito

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman

Jln. Dr. Soeparno 61, Grendeng, Purwokerto, Indonesia, 53122

*email: farzand@unsoed.ac.id

Abstrak – Bagian terdepan dari sistem konversi energi angin terletak pada baling-baling atau kincir angin. Pada dasarnya terdapat dua jenis baling-baling yaitu Horizontal Axis Wind Turbin (HAWT) dan Vertikal Axis Wind Turbin (VAWT). Setiap jenis mempunyai kelebihan dan kekurangannya. Jenis baling-baling vertikal yang cukup banyak digunakan adalah jenis VAWT Savonius. Salah satu kekurangan jenis Savonius adalah efisiensinya yang rendah. Rendahnya efisiensi dimungkinkan karena desain yang kurang sesuai dengan potensi angin yang ada. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan analisis aerodinamika aliran udara melalui baling-baling Savonius. Analisis akan menggunakan metode CFD (computational fluid dynamics) untuk memperoleh kinerja berupa koefisien daya yang dihasilkan baling-baling Savonius. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ada resultan tekanan pada satu sisi bilah sehingga menimbulkan momen yang memutar baling-baling. Garis alir menunjukkan bahwa kecepatan udara sebelum mengenai baling-baling lebih besar daripada setelah melewati baling-baling. Hasil simulasi menunjukkan bahwa angin masuk dengan kecepatan 1,2 m/s dan keluar dari baling-baling dengan kecepatan 0,6 m/s. Berdasarkan hal itu diperoleh koefisien daya baling-baling sebesar 25%.

Kata kunci: Kincir Savonius, dimensi optimum, computational fluid dynamics

Abstract – The foremost part of a wind energy conversion system is a turbine. There are typically two kinds of turbine, the horizontal axis wind turbines (HAWT) and the vertical axis wind turbines (VAWT). Each type of the turbines has its own advantages and disadvantages. A widely used type of VAWT is the Savonius turbine. The weakness of this type of turbine is its low efficiency, which may be attributed to inappropriateness of its design to its ambient wind average velocity. For that reason, this work was conducted to analyze the aerodynamics of airflow passing a Savonius blade. The analysis was carried out using computational fluid dynamics (CFD) method to find the power coefficient generated by a Savonius turbine. The result shows a difference of pressure between two sides of the blade, resulting a moment of force that cause the turbine to rotate. Streamlines indicates inflow velocity is higher than the outflow velocity from the turbine. Simulation shows that the inflow velocity is 1.2 m/s while the outflow velocity is 0,6 m/s, which accordingly yield a power coefficient of 25%.

Key words: Savonius turbine, optimal dimension, computational fluid dynamics

PENDAHULUAN

Pengembangan berbagai sistem konversi energi telah banyak dilakukan guna memenuhi kebutuhan energi alternative[1]. Energi angin merupakan salah satu energi terbarukan yang dapat dikembangkan sebagai salah satu energi alternatif. Pengembangan energi angin dapat diawali dengan membuat simulasi dan pemodelan[2]. Salah satu bagian yang perlu dikembangkan adalah bagian kincir angin. Kincir merupakan bagian yang berfungsi mengkonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Berdasarkan jenisnya kincir dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu sumbu horisontal dan sumbu vertikal[3].

Energi angin merupakan energi terbarukan yang dapat dikonversi menjadi berbagai bentuk

energi yang lain. Kunci utama konversi energi angin terletak pada sistem baling-baling. Optimasi terhadap desain baling-baling sangat berpengaruh terhadap efisiensinya. Diharapkan dengan optimasi yang akan dilakukan akan diperoleh sebuah formulasi yang dapat digunakan untuk merancang bangun baling-baling jenis Savonius yang optimal. Dimensi baling-baling juga dapat disesuaikan dengan potensi angin setiap wilayah. Permasalahan yang berhubungan dengan hal tersebut adalah bagaimana upaya peningkatan efisiensi konversi energi angin dengan baling-baling Savonius dapat dilakukan

Baling-baling savonius dikenal sebagai baling-baling dengan rancangan yang sederhana[4]. Konversi energi angin menggunakan sistem baling-baling mempunyai

efisiensi yang masih rendah, yaitu berkisar 30 - 40 %. Optimasi baling-baling sumbu horisontal dengan Maximum Power Point Tracker dapat meningkatkan hingga 49,51% [5]. Baling-baling sumbu vertikal jenis Darrieus merupakan jenis lain dari media konversi energi angin. Optimasi Vertical Axis Wind Turbin (VAWT) jenis Darrieus dapat menghasilkan daya mencapai 1908 Wh yang dapat digunakan untuk penerangan jalan tol [6]. Pengembangan konversi energi angin telah dilakukan untuk sarana pompa air yang menggunakan kincir angin tipe savonius dua buah baling-baling [7,8].

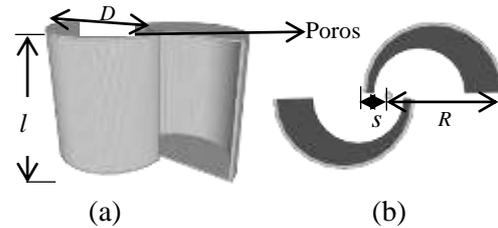
Beberapa riset yang sudah dilakukan menyatakan bahwa masih diperlukan pengembangan terkait dengan konversi energi angin. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah melakukan optimasi baling-baling. Savonius merupakan jenis VAWT yang mempunyai kelebihan dapat menangkap angin dari segala arah. Dalam perancangan baling-baling Savonius, pembuatan baling-baling dengan dimensi yang tepat akan menghasilkan efisiensi yang lebih optimal. Upaya berikutnya yang dapat dilakukan adalah dengan menganalisis lebih lanjut dengan memperhitungkan bagaimana aliran udara (aerodinamika) melalui baling-baling. Kajian ini dapat dilakukan dengan computational fluid dynamics (CFD) [10]. Dalam pengembangan terakhir dilakukan pengkajian baling-baling savonius dengan bilah yang bisa mengalami deformasi [4]. Mereka menemukan bahwa bilah terdeformasi dapat menaikkan kinerja hingga 90%, yakni menghasilkan koefisien daya sebesar 39%. Pada penelitian ini kajian akan dilakukan terhadap baling-baling Savonius dengan bilah tetap yang dialiri angin dengan kecepatan rendah, 1,5 m/s [8].

METODE PENELITIAN

Rancangan geometri baling-baling

Formulasi dan simulasi komputasi merupakan tahapan inti dalam kegiatan penelitian ini. Hal pertama yang akan dilakukan pada tahapan ini adalah membuat rancangan baling-baling Savonius dengan berbagai jumlah bilah, berbagai ukuran dan berbagai macam bahan. Rancangan ini digunakan sebagai dasar dalam membuat formulasi. Pembuatan rancangan baling-baling dilakukan menggunakan bantuan drawing pad, sehingga

hasil rancangan dapat langsung diakses di dalam personal komputer atau laptop. Salah satu desain baling-baling yang akan dikaji seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Rancangan bilah kincir savonius, yang terdiri atas dua setengah silinder berongga. (a) Tampak samping, (b) tampak atas.

Geometri dilakukan dengan merancang baling-baling dengan ukuran diameter dan tinggi yang perbandingannya 1:1. Komputasi dilakukan dengan software CFD Ansys. Komputasi dimulai dengan membuat jala-jala komputasi di sekitar geometri baling-baling. Hal itu dilakukan secara otomatis oleh software. Berdasarkan jala-jala komputasi tersebut komputasi dilakukan untuk memperoleh parameter-parameter penting aliran angina yaitu, kecepatan dan tekanan. Dari hasil tersebut, dilakukan penghitungan koefisien daya. Koefisien daya dihitung berdasarkan rumusan sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P_{keluar}}{P_{masuk}} \quad (1)$$

P_{keluar} dan P_{masuk} masing-masing adalah daya angin saat mengenai baling-baling dan daya angin setelah melalui baling-baling. Karena daya berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan angin, maka persamaan koefisien daya dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$C_p = \frac{v_{keluar}^2}{v_{masuk}^2} \quad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Akuisisi data resistivitas dilakukan pada bulan Rancangan Geometri

Untuk melakukan simulasi aliran udara melalui kincir, tahap pertama adalah menggambar geometri kincir di dalam program simulasi.

Hasil perancangan geometri pada program simulasi ANSYS diperlihatkan pada gambar 2.



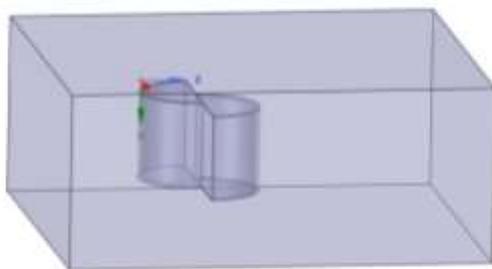
Gambar 2 Rancangan geometri kincir savonius dalam program simulasi ANSYS

Geometri kincir tersebut menjadi input dalam tahapan berikutnya pra komputasi yaitu pembuatan jala komputasi.

Pembuatan Jala Komputasi

Tahapan penting dalam komputasi dalam persamaan diferensial adalah pembuatan jala komputasi. Jala komputasi (*computational mesh*) merupakan landasan pendiskretan persamaan sehingga dapat dihitung dengan komputer. Dalam penjalaaan, domain kontinu fluida di sekitar benda yang diamati diubah menjadi bagian-bagian diskret berupa jala.

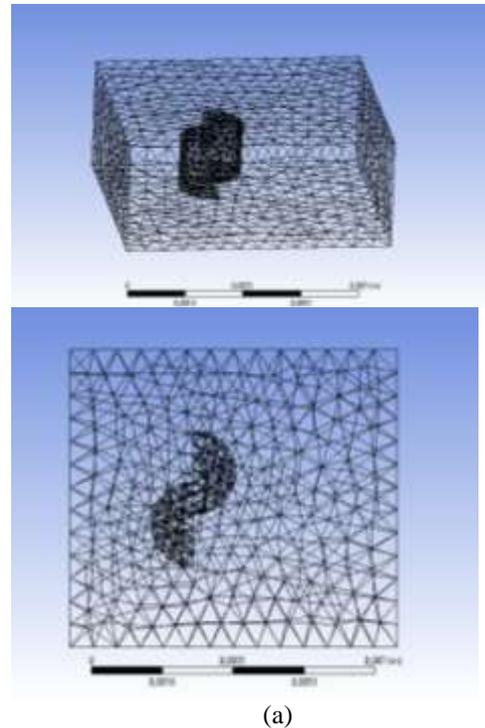
Sebelum penjalaaan dilakukan model domain udara di sekitar kincir perlu didefinisikan terlebih dahulu. Pembatasan dilakukan sedemikian rupa sehingga tidak terlalu kecil sehingga tidak menggambarkan secara baik aliran udara di sekitar kincir namun tidak terlalu besar agar tidak membebani proses perhitungan. Pada gambar 4.3 diperlihatkan model udara di sekitar kincir Savonius.



Gambar 3 Model domain udara di sekitar kincir

Pada model tersebut udara di sekitar kincir dibatasi dalam geometri balok. Bagian kanan domain udara dibuat lebih panjang daripada bagian kiri untuk melihat kemungkinan adanya *wake* setelah angin melewati kincir.

Jala komputasi kemudian dihasilkan dengan mengeset agar tepat di sekitar bilah lebih rapat. Hal ini dimaksudkan agar jumlah elemen perhitungan di daerah itu lebih banyak sehingga detail di sekitar itu lebih terungkap. Jala komputasi hasil pendefinisian yang dibangkitkan oleh program diperlihatkan pada gambar 4.



Gambar 4 Jala komputasi sebagai landasan pendiskretan persamaan untuk melakukan komputasi. (a) dalam 3 dimensi, (b) tampak atas.

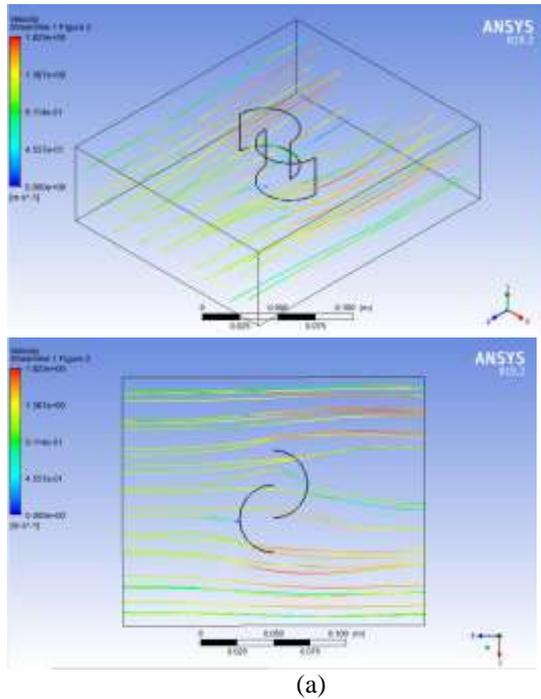
Meskipun pada gambar terlihat jarang, ukuran elemen-elemen jala sebenarnya sangat kecil, sampai orde 0,001 mm sehingga hasil perhitungan di setiap elemen jala praktis akan kontinu.

Hasil Komputasi

Berdasarkan pendiskretan dengan jala yang telah dibangkitkan, Persamaan Navier-Stokes dipecahkan di setiap elemen jala. Berikut ini akan dibahas hasil pemodelan aliran angin dan tekanan angin di sekitar kincir. Sebelum penghitungan variabel-variabel fisis yang dikehendaki terkait kincir yang berputar ketika dihembus angin, model komputasi diuji terlebih dahulu. Pengujian dilakukan dengan melihat hasil saat angin melewati kincir tanpa perputaran kincir dan saat kincir berputar tanpa dihembus angin.

Garis alir angin

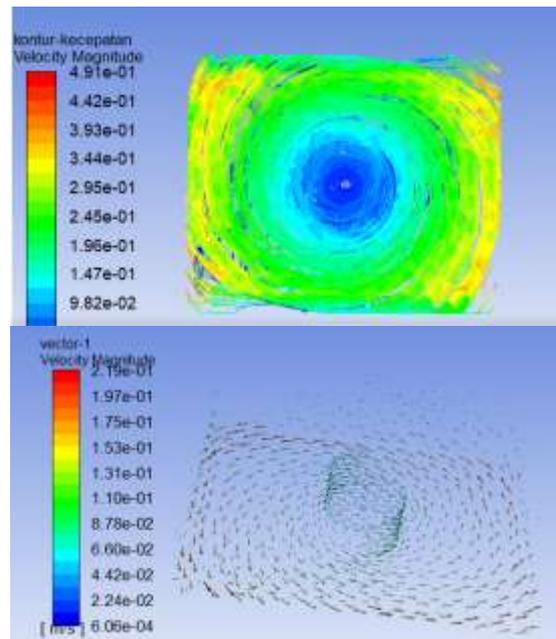
Model diuji coba dengan mengalirkan angin dengan laju 1,2 m/s (sekitar 4 km/jam). Garis alir angin itu diperlihatkan pada gambar 5.



Gambar 5 Garis alir angin melewati kincir saat bilah tidak berputar (a) tiga dimensi, (b) tampak atas

Terlihat bahwa di sebelah kiri kincir garis alir lurus dan berbelok saat melewati kincir. Garis-garis alir sebelum melewati kincir lebih rapat daripada setelah melewati kincir. Hal ini menunjukkan bahwa laju aliran angin melambat setelah melewati kincir. Hal ini wajar karena sebagian energi angin diberikan kepada kincir. Hal ini ekuivalen dengan tekanan yang mengakibatkan kincir berputar. Kontur tekanan akan dibahas pada sub-subbab berikutnya.

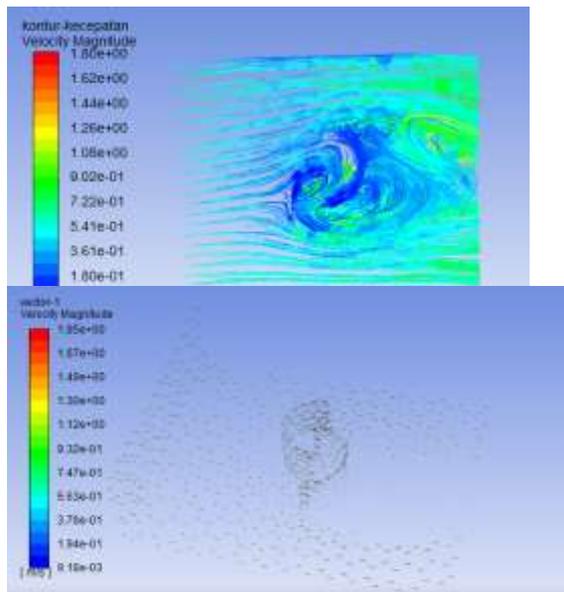
Untuk menguji apakah model secara benar menunjukkan kondisi udara saat kincir berputar, dalam model komputasi domain udara dibuat berotasi dengan kecepatan sudut sembarang. Dalam model ini diset perputaran dengan kecepatan sudut $\omega = 4 \text{ rad/s}$.



Gambar 6 Dekripsi aliran udara di sekitar bilah yang berputar dengan kecepatan sudut 4 rad/s. (a) dalam bentuk kontur kecepatan, (b) dalam bentuk vector kecepatan

Pada gambar 6 diperlihatkan bagaimana aliran udara di sekitar kincir. Gambar (a) menunjukkan kontur kecepatan udara dengan gradasi warna dari biru hingga merah. Hasil menunjukkan kewajaran dengan terlihatnya pusaran angin dengan kecepatan semakin besar semakin menjauh dari kincir. Arah perputaran angin diperlihatkan lebih jelas dengan medan vektor kecepatan pada gambar (b).

Kincir akan berputar apabila dikenai angin. Perputaran kincir tersebut juga akan berpengaruh balik terhadap aliran angin di sekitar kincir. Aliran angin melewati kincir yang berputar diperlihatkan pada gambar 6.



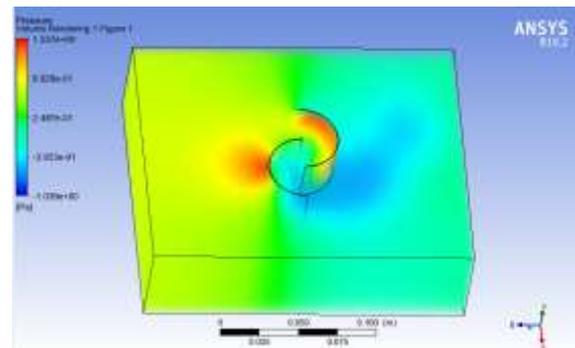
(a)

Gambar 7 (a) Tampak katas kontur kecepatan angin di sekitar bilah yang berputar. (b) Vektor kecepatan angin di sekitar bilah berputar

Saat angin melewati bilah yang berputar, aliran angin terpengaruh sehingga relatif terhadap kincir, lajunya membesar. Bila lajunya melebihi bilangan Reynolds tertentu, aliran akan mengalami turbulensi. Gambar 7(a) memperlihatkan adanya pusaran aliran di belakang kincir yang menandakan adanya turbulensi. Adanya turbulensi ini dapat mengakibatkan *drag* yang mengambat perputaran kincir.

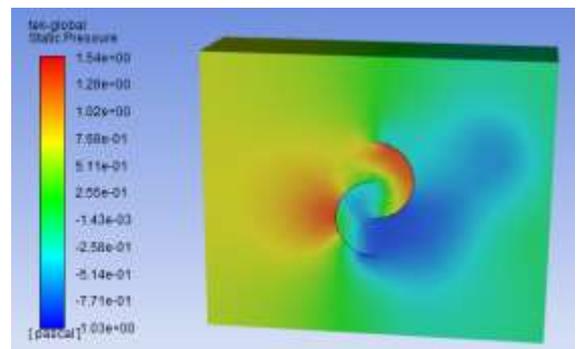
Tekanan terhadap bilah

Telah disinggung pada sub-subbab berikutnya bahwa turunnya laju aliran di belakang kincir menandakan adanya penurunan tekanan udara. Kontur tekanan udara di sekitar bilah kincir saat udara mengalir melewatinya diperlihatkan pada gambar 8. Gradasi warna dari biru ke merah menandakan tekanan kecil hingga tekanan besar.



Gambar 8 Kontur tekanan angin di sekitar bilah tanpa putaran kincir

Pada kedua kedua sisi bilah tampak ada perbedaan tekanan, sebelah kiri bertekanan lebih besar daripada sebelah kanan. Hal ini ditandai dengan warna merah di sebelah kiri. Wilayah merah di bilah belahan atas yang lebih luas daripada (b) bagian bawah menandakan bahwa gaya pada bilah bagian atas lebih besar daripada bagian bawah. Oleh karena itu, secara netto akan ada torsi yang memutar, dengan arah searah jarum jam. Akibat torsi ini, kincir pun akan berputar.



Gambar 9 Kontur tekanan bilah saat bilah berputar ketika dialiri angin

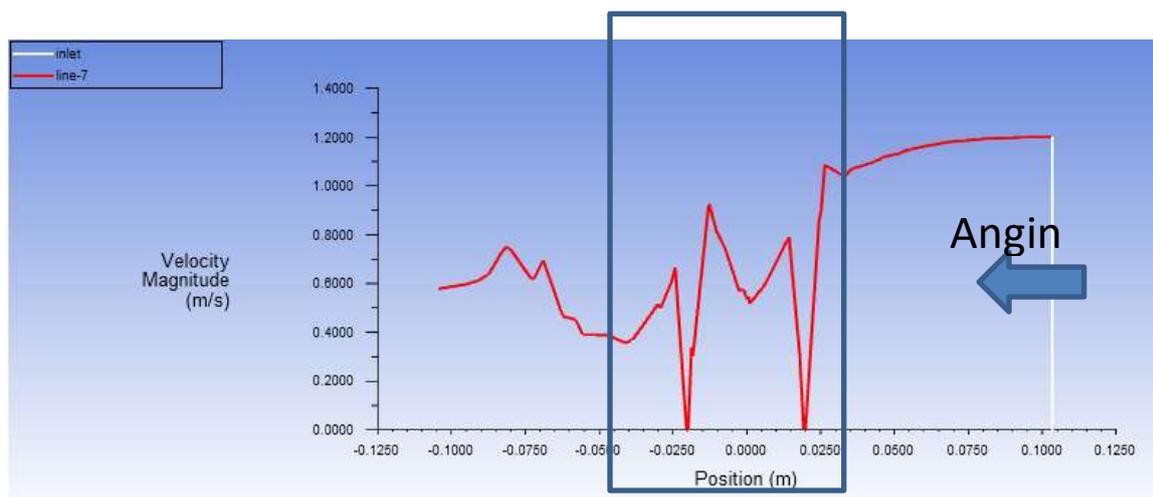
Setelah bilah berputar, sebaran tekanan terhadap bagian-bagian bilah termodifikasi. Bagian bilah bagian bawah yang dikenai tekanan tinggi meluas. Sebagai akibatnya gaya terhadap bilah belahan bawah membesar. Sementara itu, seperti yang diperlihatkan pada gambar 9, belahan atas mengalami peluasan wilayah tekanan tinggi pula. Dengan demikian, torsi netto terhadap bilah tetap bernilai positif meskipun nilai torsinya mengecil.

Koefisien daya

Untuk menghitung koefisien daya, diperlukan kecepatan aliran sebelum dan setelah melewati baling-baling. Gambar 10 memperlihatkan laju aliran angin sebelum dan sesudah melewati

baling-baling. Dalam gambar tersebut angin digambarkan masuk dari kiri ke kanan. Laju angin sebelum masuk diperlihatkan sebesar 1,2 m/s dan keluar dengan laju sebesar, 0,6 m/s. Pengurangan tersebut menunjukkan bahwa ada energi yang diserap oleh baling-baling untuk berputar. Dengan menggunakan persamaan (2) diperoleh bahwa koefisien daya C_p adalah 25%. Nilai ini tidak berbeda jauh dengan simulasi yang dilakukan oleh Sobczak yang memperoleh koefisien daya sebesar 30%. Akan tetapi, nilai hasil simulasi pada penelitian ini maupun oleh Sobczak berbeda dengan hasil eksperimen yang

memperoleh nilai 16,5 % [11]. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa simulasi masih belum cukup memperhitungkan faktor-faktor real dalam eksperimen. Faktor tersebut adalah dalam hal mekanika perputaran baling-baling yang juga akan dipengaruhi oleh gesekan poros dengan tiang penyangga. Simulasi dalam CFD tidak memodelkan hal tersebut. Oleh karena itu, hasil simulasi CFD ini harus dipadukan dengan model mekanika. Hal ini akan dilakukan pada penelitian lanjutan.



Gambar 10 Laju aliran angin sebelum dan sesudah melewati kincir. Kincir berada dalam posisi yang dinyatakan dalam kotak. Angin bergerak dari arah kanan.

KESIMPULAN

Telah dilakukan simulasi aliran angin yang mengenai baling-baling Savonius. Angin melalui baling-baling dengan laju 1,2 m/s dan keluar dengan laju 0,6 m/s. Berdasarkan hal tersebut diperoleh koefisien daya sebesar 25%. Nilai tersebut hampir dua kali lipat lebih besar daripada nilai hasil eksperimen. Hal tersebut menunjukkan bahwa simulasi CFD saja belum cukup untuk memodelkan mekanisme baling-baling CFD secara lengkap. Untuk hal itu masih perlu dilakukan komputasi yang berkaitan dengan mekanika putaran baling-baling.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada pihak-pihak yang sudah membantu terlaksananya penelitian ini. Kepada Unsoed yang telah mendanai penelitian melalui dana Riset Dasar Unsoed dengan nomor kontrak T/715/UN23.18/PT.01..03/2021. Penulis juga

mengucapkan terimakasih kepada Laboratorium Komputasi dan Medik Jurusan Fisika FMIPA Unsoed yang sudah menyediakan fasilitas untuk penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Najib Habibie, Achmad Sasmito, Roni Kurniawan, 2011, "Kajian Potensi Energi Angin di Wilayah Sulawesi dan Maluku", *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* . 12(2) 181-187.
- [2] Mohanty, B. B., "Doubly-Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Energy Conversion System -Modeling Simulation", *International Journal of Computer and Electrical Engineering* 2(1) (2010) 1793-8163.
- [3] Mittal, R. S., "An Overview of Some Important Issues Related to Wind Energy Conversion System (WECS)", *International Journal of Environmental*

- Science and Development* 1(4) (2010) 344-355.
- [4] Sobczak, K., Obidowski, D., Reorowics P., Marchewka, E., “Numerical Investigations of the Savonius Turbine with Deformable Blades”, *Energies* 13(2020) 3717.
- [5] Nur Asyik Hidayatullah, Hanifah Nur Kumala Ningrum, “Optimalisasi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin Turbin Sumbu Horizontal dengan Menggunakan Metode Maximum Power Point Tracker”, *Journal of Electrical Electronic Control and Automotive Engineering (JEECAE)* 1(1) (2016) 7 - 12.
- [6] Ismail, Irlanda Pane, Triyanti, “Optimasi Perancangan Turbin Angin Vertikal Tipe Darries untuk Penerangan di Jalan Tol”, *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2017* (2017)
jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek
- [7] Kevin, P. “Analisis Potensi Kincir Angin Savonius sebagai Penggerak Pompa Submersibe”. Padang: Universitas Andalas, 2011.
- [8] Gediana, A., Yusup, A., & Septria, W., “Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut Menggunakan Sistem Turbin Savonius Termodifikasi”, *Berkala Fisika* 18(2) (2015) 75-82.
- [9] Permana I.T., R. B., “Pengembangan Model Kincir Angin Jenis Savonius Dua Tingkat sebagai Alternatif Penggerak Pompa” (2011).
- [10] Mohamed, H.M., Janiga, G., Thevenin, D. “Optimal Design of A Savonius Turbine”, Conference on Modelling Fluid Flow: The 15th International Conference on Fluid Flow Technology, 2012
- [11] M.A. Kamoji , S.B. Kedare , S.V. Prabhu, in: Performance tests on helical Savonius rotors, 34, *Renewable Energy*, 2009, pp. 521–529.