

## KARAKTERISTIK PEMANEN DAYA LISTRIK BERBASIS GETARAN STRUKTUR

**La Ode Ahmad Barata**

Dosen  
Universitas Halu Oleo  
Jurusan Teknik Mesin  
ahmad.barata@uho.ac.id

**Samhuddin**

Dosen  
Universitas Halu Oleo  
Jurusan Teknik Mesin  
samhuddinkbn@gmail.com

*Mechanical vibration is a potential source of micro-electrical energy harvesting mechanisms for micro electrical power supply for IoT system networks, wireless and sensors where the power requirements are relatively lower and available independently. In this study, the characteristics of the cylinder vibration response as a trigger for energy harvesting from flow-induced vibrations at various air velocities were investigated experimentally in a wind tunnel test section. Harvesting of micro power from cylinder's motion by using galfenol (Fe-Ga) material was also investigated simultaneously. The maximum cylinder's vibration response was obtained by using the plain cylinder model. Cylinder taper variation reduce the maximum vibration response. The position of the major (D) and minor (d) (or inverse position) diameters also affects the vibration response. However, tapering the cylinder reduces the onset vibration with respect to the flow velocity. The frequency of the vortex (Strouhal, St) ranges from 0.25 to 0.12. The minor diameter of the tapered cylinder has the effect on decreasing the vibration response and tends to be stationary. Minor diameter reduction reduces the potential for vibration to the structure. The maximum power generated by the test model is about 8.5 mW with the power RMS value of 2.3 mW and power coefficient about 4%.*

**Keywords:** Cylinder, Taper Cylinder, Steped Cylinder, Vibration, Energy Harvester, Power Coefficient

### 1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi otomasi saat ini telah mendorong perlunya suplai daya listrik yang handal terhadap gangguan suplai daya (*uninterruptable*). Sumber-sumber energi terbarukan seperti angin, air, sinar matahari dan lain-lain melimpah ketersediaannya di lingkungan sekitar kita. Energi terbarukan dapat menjadi sumber daya listrik independen dalam perkembangan teknologi otomasi seperti system *internet of things (IoT)*, sensor nirkabel, dan sistem mikroelektromekanis. Sistem ini, secara umum, menggunakan sumber listrik daya listrik rendah yang dapat diperoleh dari lingkungan sekitarnya. Sumber daya listrik independen diharapkan dapat mengatasi kendala konektifitas daya listrik berbasis baterai, seperti masalah kebocoran dan daur ulang, hambatan listrik, masa pakai, dan jaringan konektivitas kabel di ruang terbatas. Faktor-faktor ini menjadi alasan utama perlunya sumber listrik independen dari sumber jaringan listrik utama atau konvensional.

Beberapa contoh penelitian teknologi yang memanfaatkan sumber energi listrik daya mikro berbasis getaran atau gerak oksilasi yang sedang berkembang antara lain adalah sistem daya untuk perangkat alat pacu jantung yang ditanamkan di dalam tubuh manusia, sistem pemantauan kondisi ban kendaraan *real time*, deformasi struktur pada jembatan layang, dan lain-lain [1 - 4]. Sumber getaran mekanis yang ditimbulkan oleh operasi peralatan-peralatan industri seperti pada referensi [5], gerakan manusia atau denyut organ tubuh manusia, dan aliran fluida merupakan sumber potensial untuk pembangkitan daya listrik berbasis getaran yang terbuat dari *smart material* seperti piezoelektrik atau logam paduan magnetostruktif sebagai inti dari generator [2-4]. Pembangkitan listrik daya mikro berbasis getaran dengan menggunakan bahan logam magnetostruktif telah berkembang pesat saat ini karena sifat mekanik dan elektromotifnya yang baik [6].

Karakteristik bahan magnetostruktif sebagai sistem energi berbasis getaran telah diteliti oleh banyak peneliti antara lain pada referensi [6-9]. Perpindahan harmonik struktur prismatik dan penggunaan bahan logam magnetostruktif seperti *galfenol alloy* sebagai pemanen energi listrik mikro dengan model generator *vortex*

*bladeless* dapat menghasilkan tegangan listrik yang memadai. Metode ini dapat menilai prestasi pemanen energi dengan inti generator logam *galfenol* (paduan besi-gallium) dan *terfanol*. Sifat mekaniknya yang baik, kesesuaian untuk getaran frekuensi tinggi, dan koefisien daya magnetostriktif menjadi alasan pemilihan material ini sebagai pemanen daya listrik [6, 10, 11].

Karakteristik aerodinamis objek pemicu getaran (*bluff body*) merupakan parameter penting untuk pembangkit listrik berbasis getaran seperti pengembangan pemanen listrik model *vortex bladeless*. Pola aliran fluida di sekitar benda tergantung pada bentuk fisik dari silinder pengganggu aliran. Pola aliran memiliki kaitan erat dengan karakteristik komponen tak berdimensi dari gaya-gaya fluida seperti drag (*CD*), lift (*CL*), tekanan (*CP*), dan bilangan Strouhal (*St*). Komponen-komponen gaya fluida tersebut menentukan karakteristik respon getaran dari silinder pengganggu aliran (*bluffbody*) [12 – 15].

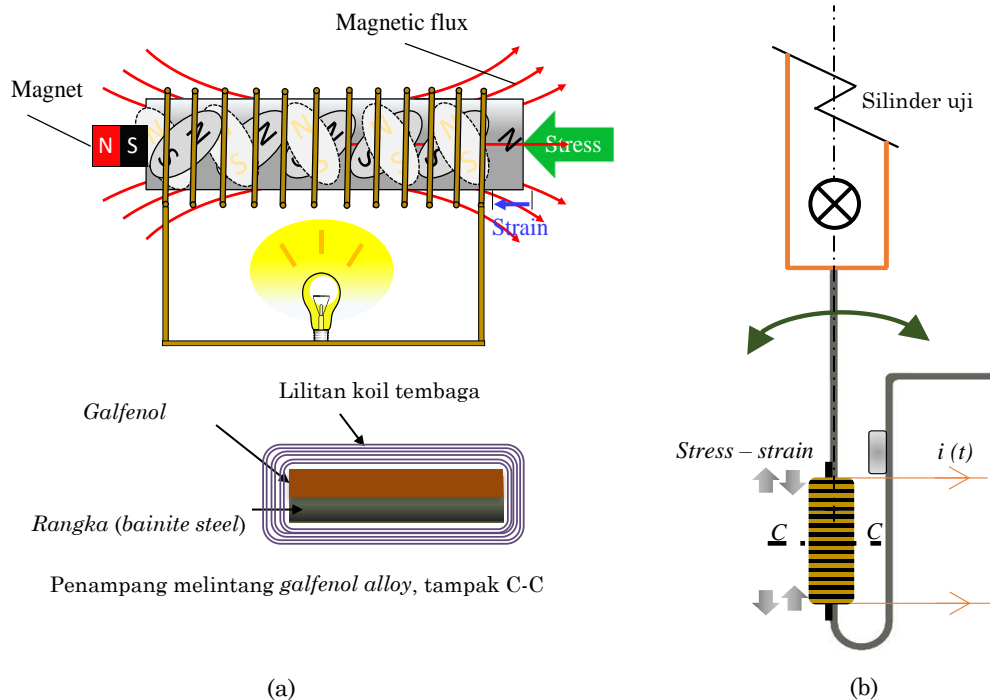
Respon dinamis silinder pengganggu aliran merupakan parameter utama dalam memilih silinder sesuai dengan karakteristik getaran seperti respon awal getaran terhadap variasi kecepatan, kestabilan getaran, dan perilaku getaran silinder pada kecepatan aliran fluida yang tinggi. Oleh karena itu, kinerja pemanen daya listrik berbasis getaran yang diinduksi pusaran aliran diteliti dengan menggunakan variasi model atau bentuk silinder pengganggu aliran fluida. Karakteristik getaran mempengaruhi tegangan listrik yang dibangkitkan oleh generator sehingga meningkatkan respon dinamis dari pengganggu aliran diharapkan dapat meningkatkan output tegangan perolehan daya pada kecepatan aliran udara yang rendah [16-17]. Penelitian kami sebelumnya tentang respon getaran persegi panjang serta variasinya, penambahan plat pemisah aliran di belakang silinder, persegi panjang dengan plat pada ujung prisma, penambahan struktur dan variasi ketebalan prisma telah menunjukkan respon dan frekuensi getaran yang berbeda-beda [18 - 20].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji pengaruh ketirusan silinder pemicu getaran terhadap karakteristik respon getaran silinder, dan frekuensi pusaran aliran tak berdimensi (*St*) pada kecepatan aliran udara yang bervariasi. Selain itu, energi listrik yang dihasilkan oleh pemanen energi berbasis getaran dengan material magnetostriktif sebagai inti generator juga diteliti secara simultan pada berbagai kecepatan udara.

## 2. METODE DAN BAHAN

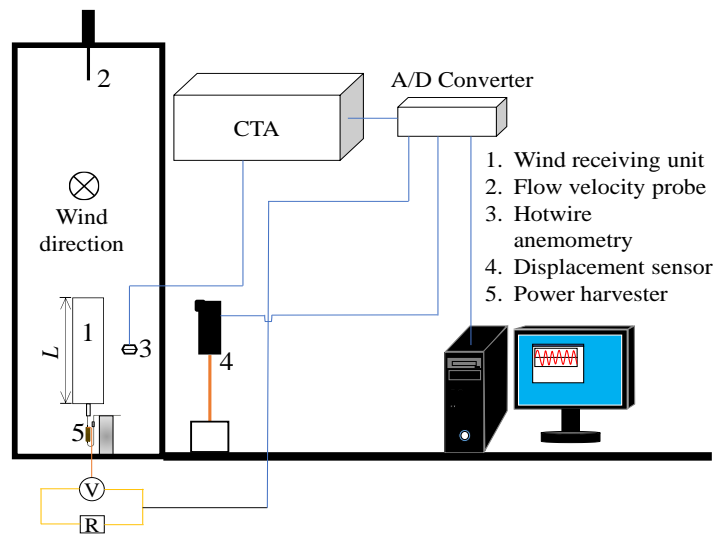
### 2.1 Model unit pemanen energi listrik

Pemanen energi listrik (*energy harvester*) diharapkan dapat mengekstrak energi dalam berbagai rejim aliran dan dapat memicu getaran pemanen energi pada kecepatan aliran udara yang rendah. Selain itu, kinerja pemanen energi dapat menyesuaikan pola kecepatan angin yang relatif tinggi. Prinsip kerja inti pemanen energi logam paduan *galfenol* berkerja berdasarkan *Villary effect* seperti ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah. Penjelasan rinci tentang parameter ini dapat dilihat pada artikel Barata et al, 2022 [20].

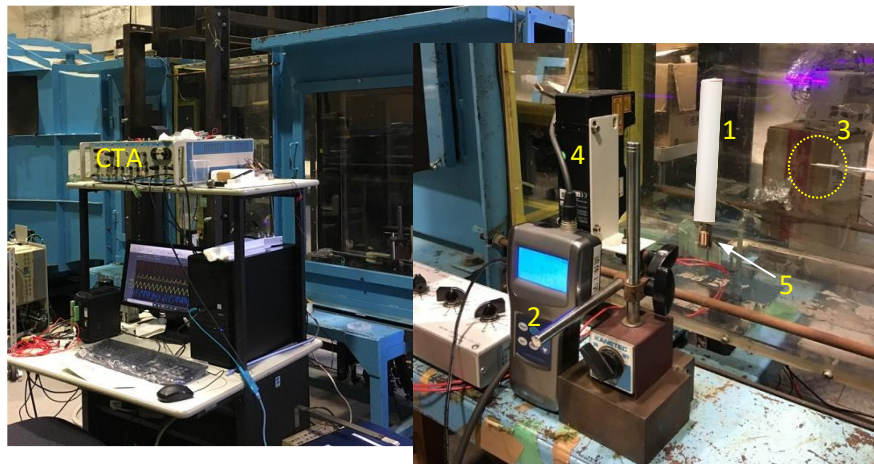


**Gambar 1.** (a) Prinsip *inverse magnetostrictive* pada pemanen energi, (b) Skema generator daya mikro dengan pemanen energi berbasis material *galfenol* (*Fe – Ga alloy*)

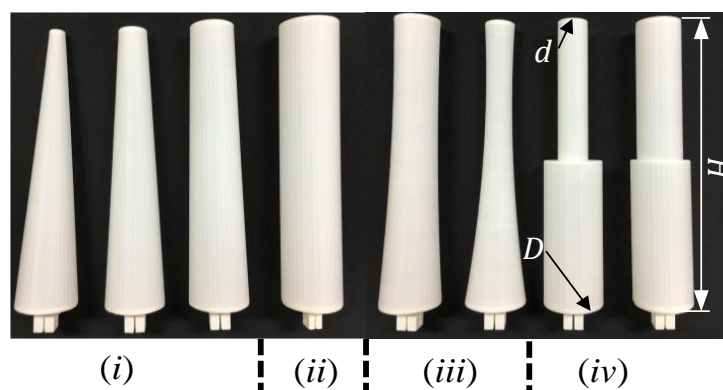
## 2.2 Metode Eksperimen



**Gambar 2.** Diagram pengaturan instrumen dan spesimen uji dalam kegiatan eksperimen



**Gambar 3.** Sesi Uji terowongan angin dan alat ukur yang digunakan ; (1) Silinder uji, (2) Anemometer, (3) *Hotwire anemometry*, (4) Sensor getaran 3D, (5) Pemanen daya listrik.



**Gambar 4.** Model silinder uji: (i) Tirus linear, (ii) Normal, (iii) Tirus non-linear, (iv) Silinder bertingkat

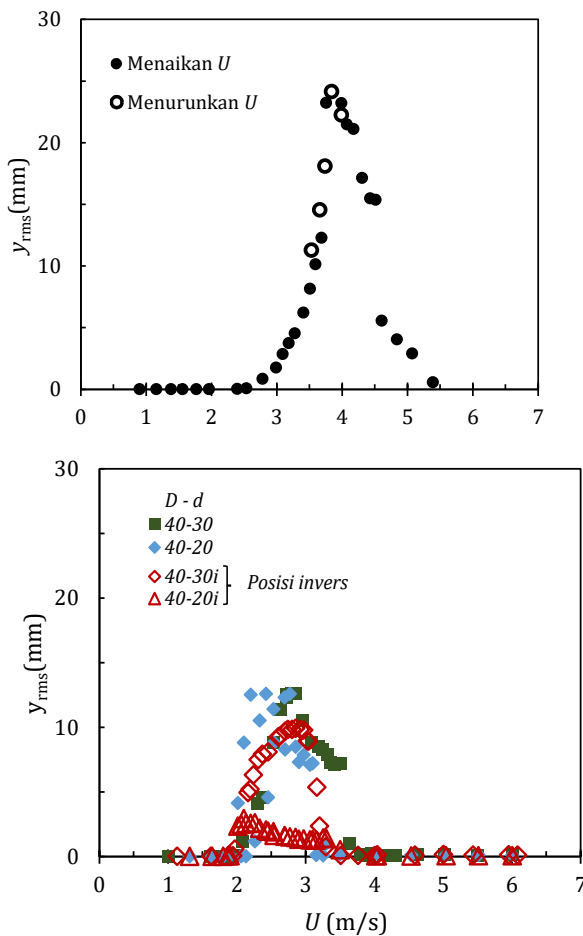
Benda pemicu getaran berupa silinder dengan berbagai model variasi ditunjukkan pada Gambar 4. Model uji ini dibuat menggunakan *3D printer RAISED3D Inc. and N2S Plus 3D* dimana filamen resin pengisi adalah *PLA Premium RAISED3D*. Konsep umum model uji adalah memiliki diameter mayor  $D = 40$  mm yang konstan, panjang bentang  $H = 200$  mm dengan menggunakan berbagai model ketirusan seperti pada Gambar

4. Rasio ketirusan silinder (*taper ratio*) ditentukan dengan  $H/(D-d)$  dimana  $H$ ,  $D$ , dan  $d$  masing-masing adalah panjang silinder, diameter mayor, dan diameter minor. Diameter rata-rata silinder bertingkat didefinisikan sebagai  $0,5(D+d)$ . Model diuji menggunakan terowongan angin (*wind tunnel*) dengan sesi uji berukuran  $2000 \times 1200 \times 30$  mm (Gambar 3). Pembangkitan energi dan uji getaran dilakukan secara bersamaan. Sebuah potongan logam paduan *galfenol* ( $Fe_{81.6}Ga_{18.4}$ ) berukuran  $26 \times 8 \times 1$  mm digunakan sebagai pemanen energi listrik dengan cara dililitkan kawat induksi berdiameter 0,1 mm dengan 5627 lilitan untuk membuat generator berbasis getaran yang dapat menghasilkan listrik. Sistem pemanen energi dilengkapi dengan magnet permanen *neodymium* berukuran  $12 \times 6 \times 1,5$  mm. Magnet ini diletakan pada rangka generator berbahan baja *bainit* dengan tebal  $t = 1,0$  mm. Pemanen energi dan vibrator dihubungkan secara mekanis oleh baut pengikat dan hanya beroksilasi dalam arah tegak lurus arah aliran fluida. Getaran silinder diukur dengan sensor getaran 3D. Gambar 2, 3, dan 4 masing-masing menunjukkan skema eksperimen, pengaturan uji eksperimen pada sesi uji terowongan angin dan spesimen silinder yang digunakan dalam penelitian ini.

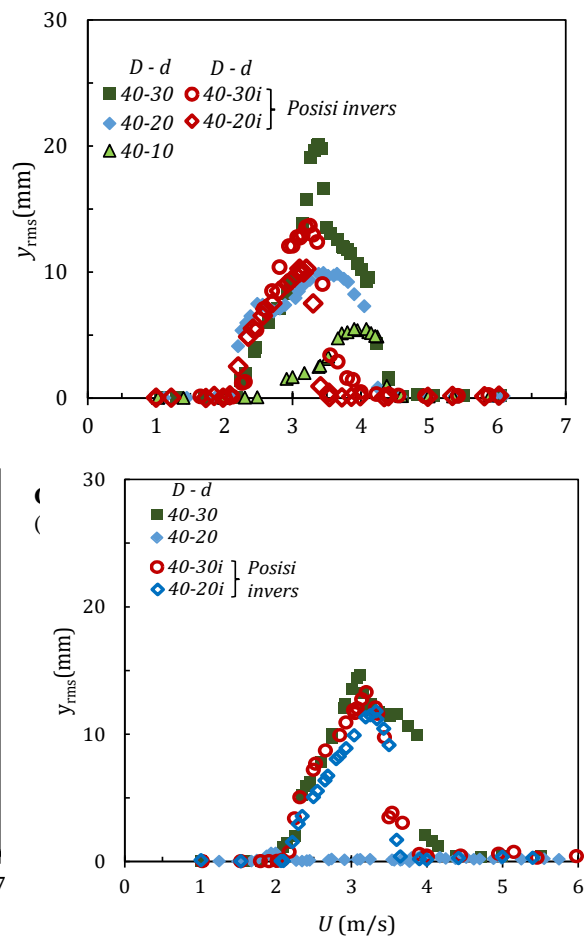
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Karakteristik Getaran

Karakteristik repons getaran silinder normal ditunjukkan pada Gambar 5. Kecepatan kritis fluda ( $U_{cr}$ ) dimana respon dinamis dari silinder dapat diamati pada kecepatan aliran sekitar 3,0 m/s. Pada proses ekseprimen juga diamati fenomena *histerisys* yakni ketergantungan respon terhadap perubahan rejim aliran. Gambar 1 terlihat bahwa fenomena *hysteresis* yang diidentifikasi dengan membandingkan respon dinamis silinder saat kecepatan aliran diturunkan dan dinaikan secara teratur atau tiba-tiba. Gambar 5 menunjukkan bahwa karakteristik respon dinamis silinder tidak mengalami perubahan. Respon dinamis silinder juga memiliki batas terhadap rejim aliran dimana pada kecepatan aliran  $U \geq \sim 4.0$  m/s respon mulai menurun. Sifat ini merupakan ciri khas dari pada respon dinamis silinder yang berbeda dari penampang persegi pada diameter atau diameter hidrolik yang sama. Sifat ini karena pola aliran di sekitar penampang silinder berbeda dengan penampang persegi [20].



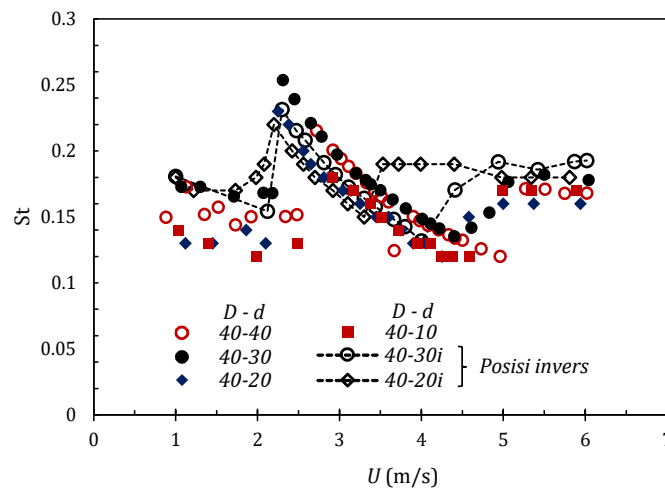
**Gambar 7.** Karakteristik respon getaran silinder tirus non linear (*nonlinear taper*) terhadap kecepatan aliran udara



**Gambar 8.** Karakteristik respon getaran silinder bertingkat (*stepped*) terhadap kecepatan aliran udara.

Penelitian ini juga memvariasikan model silinder dengan dua model ketirusan yakni tirus linear dan nonlinear, serta silinder bertingkat. Respon dinamis variasi ketirusan silinder ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7, sedangkan respon dinamis silinder bertingkat ditunjukkan pada Gambar 8. Perubahan ketirusan silinder menurunkan besarnya respon getaran silinder dengan penurunan repons getaran terendah ditemukan pada silinder dengan diameter minor  $d = 20$  mm pada pengujian posisi silinder terbalik (*inverse*). Namun, variasi ketirusan baik tirus linear maupun tirus non-linear dapat menurunkan nilai kecepatan udara untuk terjadinya getaran awal dimana respon awal silinder terlihat pada kecepatan udara  $U = \sim 2,2$  m/s. Rentang nilai ekstrasi energi aliran fluida juga lebih besar jika dibandingkan dengan silinder normal. Jika silinder uji diposisikan pada keadaan terbalik (posisi invers), maka respon getaran menjadi lebih rendah dari pada posisi normal. Perubahan pola aliran akibat variasi model ketirusan menjadi lebih menarik untuk diteliti dengan pendekatan numerik atau *computational fluid dynamics (CFD)*.

Respon getaran silinder bertingkat (*stepped*) terhadap perubahan kecepatan aliran udara ditunjukkan pada Gambar 8. Respon awal getaran terhadap perubahan kecepatan aliran udara identik dengan silinder tirus. Besarnya respon getaran terhadap perubahan diameter minor masih lebih baik dibandingkan dengan silinder tirus. Namun, pada posisi invers silinder dengan diameter minor minimum menghasilkan respon getaran yang kecil. Haniu dan Miyakoshi [21] menggambarkan pola aliran untuk silinder bertingkat menunjukkan adanya dua mode frekuensi aliran dominan di rejim aliran.



**Gambar 9.** Karakteristik bilangan Strouhal terhadap variasi kecepatan udara pada berbagai spesimen uji

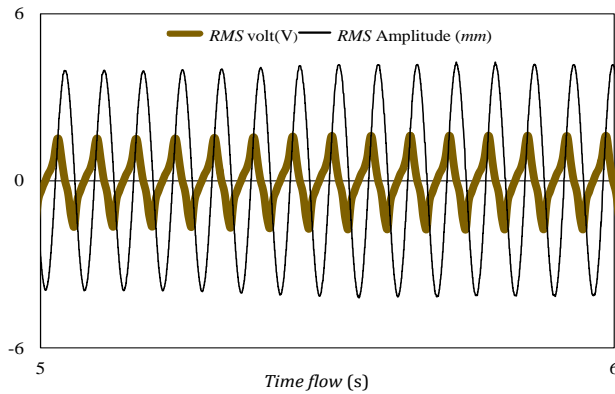
Intensitas pusaran aliran (vorteks) yang melewati silinder dengan berbagai variasi ketirusan dan posisi invers ditunjukkan pada Gambar 9, dimana frekuensi Strouhal ( $St$ ) maksimum dicapai 0,25 dan minimum 0,12. Resonansi frekuensi antara frekuensi vorteks aliran dan getaran menyebabkan frekuensi Strouhal menjadi maksimum. Fenomena ini dapat disebut sebagai sinkronisasi frekuensi aliran dan getaran silinder dimana hal ini merupakan karakteristik dasar dari silinder untuk memulai terjadinya getaran. Frekuensi Strouhal akan menurun dengan naiknya respon getaran dan kembali ke karakteristik dasar frekuensi Strouhal ketika getaran silinder sudah berkurang atau pada posisi stasioner. Frekuensi dasar Strouhal untuk silinder adalah  $St = 0,2$  [22, 23].

### 3.2 Pembangkitan daya Listrik

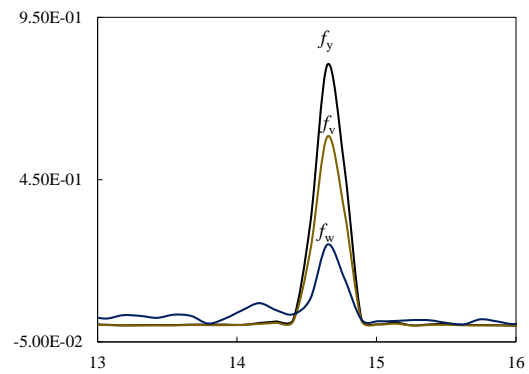
Pembangkitan daya listrik yang memanfaatkan getaran bekerja berdasarkan konsep efek *Villary* atau *inverse magnetostrictive* dari logam paduan tertentu seperti *galfenol*. Mekanisme magnetisasi yang diakibatkan adanya tegangan-regangan pada material *galfenol* memunculkan gerakan elektromotif elektron dimana jika logam tersebut dililitkan kumparan maka menghasilkan gaya gerak listrik (lihat Gambar 2a). Besarnya voltase listrik yang dibangkitkan dipengaruhi oleh jumlah kumparan, frekuensi gerakan mekanis, dan amplitudo getaran silinder [6,8,10,20].

Nilai fluktuasi respon getaran dan tegangan listrik yang dibangkitkan pemanen daya listrik ditunjukkan oleh Gambar 10. Selain itu frekuensi getaran ( $f_y$ ), tegangan listrik ( $f_v$ ) dan vorteks ( $f_w$ ) aliran ditunjukkan pada Gambar 11. Gambar 10 menunjukkan bahwa relasi ekstrasi energi listrik yang diakibatkan oleh adanya gerakan mekanis (getaran silinder) tidak linear. Faktor efisiensi model pemanen energi dan *Betz limit factor* dianggap menjadi alasan perbedaan karakteristik tersebut. Fenomena sinkronisasi tiga frekuensi yang ditunjukkan pada Gambar 11 harus terjadi untuk mencapai keadaan resonansi getaran sedangkan frekuensi tegangan listrik ( $f_v$ )

yang sinkron pada kedua frekuensi lainnya diakibatkan karena proses gerak bolak-balik silinder dan material pemanen energi berlangsung secara simultan.

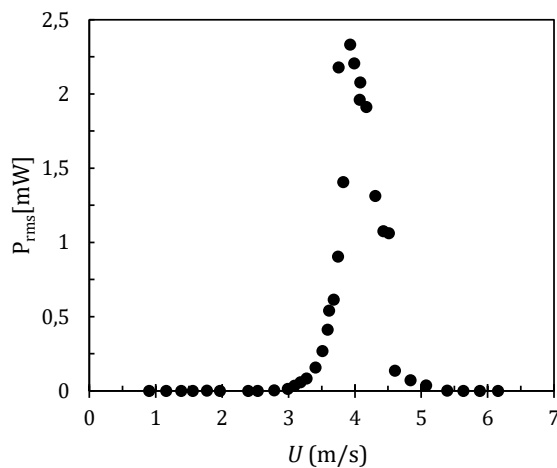


**Gambar 10.** RMS respon getaran silinder dan tegangan listrik yang dibangkitkan (*voltage output*) silinder normal

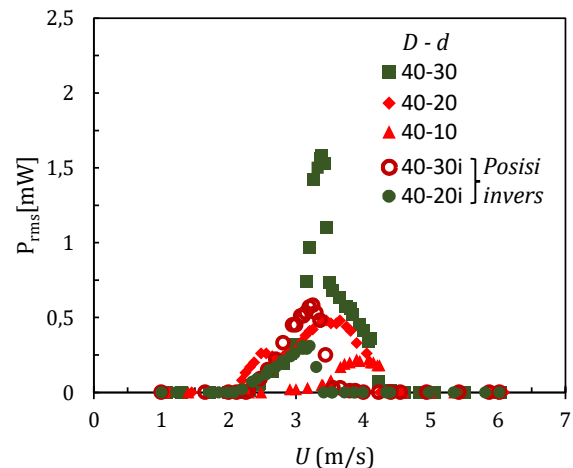


**Gambar 11.** Karakteristik frekuensi respon getaran ( $f_w$ ), tegangan listrik ( $f_v$ ) dan vorteks aliran ( $f_w$ ) silinder normal

Gambar 12 dan 13 masing-masing menunjukkan besarnya daya pemanenan energi listrik pada model silinder uji dan variasi model ketirusan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa besarnya respon getaran silinder dan frekuensi menjadi faktor dominan untuk mendapatkan energi listrik. Namun, karakteristik getaran silinder seperti awal timbulnya getaran dan respon getaran silinder pada aliran udara yang tinggi menjadi pertimbangan utama dalam memilih model silinder pemicu getaran. Gambar 12 menunjukkan bahwa silinder normal membangkitkan pemanenan energi listrik yang lebih tinggi dari pada model silinder tirus sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 13. Silinder tirus dapat mempercepat pemanenan daya listrik pada kecepatan yang lebih rendah dari pada menggunakan model uji silinder normal yakni pada kecepatan udara sekitar 2,2 m/s. Penurunan ukuran diameter minor ( $d$ ) silinder pada model uji silinder tirus tidak direkomendasikan karena



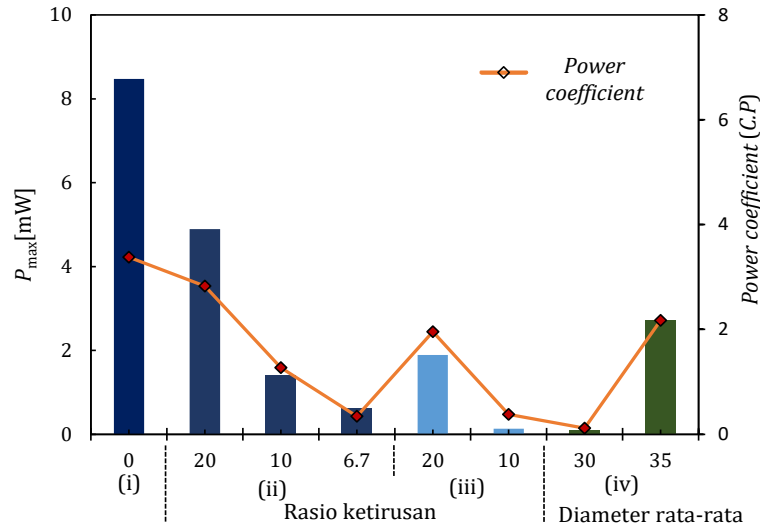
**Gambar 12.** RMS daya yang dibangkitkan generator menggunakan silinder normal sebagai pemicu getaran terhadap variasi kecepatan aliran udara.



**Gambar 13.** RMS daya yang dibangkitkan generator menggunakan pengganggu aliran model uji tirus terhadap variasi kecepatan aliran udara.

menurunkan kapasitas pembangkitan daya pada kecepatan udara yang sama. Demikian pula pemasangan posisi silinder tirus dimana diameter minor ( $d$ ) pada keadaan terbalik (*inverse*). Jika dibandingkan dengan struktur prismatik seperti bujur sangkar dan persegi panjang sebagai pengganggu aliran (*bluff body*), maka model uji silinder pengganggu aliran menghasilkan daya listrik yang lebih rendah [17]. Hal ini karena karakteristik respons getaran dari kedua model pengganggu aliran tersebut berbeda.

Gambar 14 menunjukkan pembangkitan daya listrik maksimum dan koefisien prestasi generator ( $C.P$ ). Daya listrik maksimum yang dibangkitkan generator menggunakan pengganggu aliran silinder dan silinder



**Gambar 14.** Daya listrik maksimum dan koefisien daya generator dengan variasi model silinder pemicu getaran. (i) Silinder normal, (ii) Silinder tirus linear, (iii) Silinder tirus *nonlinear*, (iv) Silinder bertingkat. Grafik batang menunjukkan daya listrik maksimum yang dibangkitkan.

variasi ketirusan juga masih lebih rendah dari pada menggunakan model uji aliran pengganggu bentuk prismatic seperti yang ditunjukkan dalam Barata et al, 2022 [20]. Koefisien daya listrik ( $C.P$ ) dari sistem pemanen energi menggunakan silinder dengan variasi ketirusan seperti pada Gambar 14 lebih rendah dari pada sistem pemanen daya listrik menggunakan model pengganggu aliran bentuk prismatic (lihat referensi [20]). Namun demikian, keandalan sistem pemanen energi berbasis getaran telah mampu mengelektifikasi sistem sensor dan instrumen lainnya dalam skala eksperimen [24-26].

#### 4. KESIMPULAN

Studi eksperimen pemanenan energi listrik berbasis getaran dengan variasi silinder pemicu getaran mekanis menggunakan *wind tunnel* dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Respon getaran mekanis maksimum diperoleh pada model silinder normal. Perubahan ketirusan silinder menurunkan respon getaran maksimum. Posisi diameter mayor dan minor (*inverse*) juga mempengaruhi respon getaran. Namun, ketirusan silinder mempercepat awal terjadinya getaran dari sekitar ~3,0 m/s menjadi ~2,2 m/s.
2. Menurunkan diameter minor pada silinder tirus linear dengan penurunan respon getaran bahkan cenderung ke arah statis. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan diameter minor dapat menekan potensi terjadinya getaran pada struktur.
3. Sinkronisasi frekuensi vorteks aliran ke frekuensi getaran silinder menandai terjadinya getaran mekanik dimana frekuensi Strohual berkisar 0.25 – 0.12 sedangkan frekuensi Strouhal untuk silinder normal berkisar di angka 0.2 yang dicapai ketika respon getaran tidak lagi signifikan atau mendekati keadaan statis.
4. Nilai *RMS* pembangkitan dan daya maksimum masing-masing 2,3 mW dan 8.5 mW dengan koefisien daya maksimum sekitar 4%

#### 5. PERNYATAAN TERIMAKASIH

Artikel ini merupakan bagian dari studi karakteristik aliran dan getaran silinder untuk pemanenan energi listrik berbasis getaran. Penulis mengucapkan terimakasih atas dukungan fasilitas eksperimen di Laboratorium Dinamika Fluida, *Kanazawa University* melalui kegiatan riset kolaboratif penulis dengan Dr. Eng. Takahiro Kiwata, Professor di laboratorium tersebut.

#### 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] POLONI, T. & LU, J., “An Indirect Tire Health Monitoring System Using On-board Motion Sensors,” *SAE Technical Paper.*, 2017-01-1626, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-01-1626>
- [2] ALRASHDAN, M.H.S., HAMZAH, A.A., MAJLIS, B.Y., “Design and optimization of cantilever based piezoelectric micro power generator for cardiac pacemaker,” *Microsystem Technology*, vol. 21, no. 8, pp. 1607–1617, 2015, <https://doi.org/10.1007/s00542-014-2334-1>.

- [3] ANSARI, M.H., & KARAMI, M.A., “Piezoelectric energy harvesting from heartbeat vibrations for leadless pacemakers,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 660, p. 012121, December 2015, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/660/1/012121>.
- [4] UENO, T., & YAMADA, S. “Performance of energy harvester using iron-gallium alloy in free vibration,” *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 47, no. 10, pp. 2407–2409, 2011, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2158303>.
- [5] SANGIAN, H., RUDIWANTO, SUBEKTI, *et al*, “Analisa Getaran pada Screw compressor Akibat Pengaruh Putaran Poros”, *Rekayasa Mesin*, vol.11 no.2, pp. 267 – 275, 2020.
- [6] LIU, H., CONG, C., CAO, C. , “Analysis of the Key Factors Affecting the Capability and Optimization for Magnetostrictive Iron-Gallium Alloy Ambient Vibration Harvesters,” *Sensors*, vol. 20, no. 2, p. 401, January 2020, <https://doi.org/10.3390/s20020401>.
- [7] APICELLA, V., CLEMENTE, C.S., DAVINO, D., “Magneto-mechanical optimization and analysis of a magnetostrictive cantilever beam for energy harvesting,” *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, vol. 475, pp. 401–407, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.11.076>.
- [8] NARITA, F., & FOX, M., “A Review on Piezoelectric, Magnetostrictive, and Magnetoelectric Materials and Device Technologies for Energy Harvesting Applications,” *Advanced Engineering Materials.*, vol. 20, no. 5, pp. 1–22, 2018, <https://doi.org/10.1002/adem.201700743>.
- [9] LIU, F. R., ZHANG, W.M., PENG, Z.K., “Fork-shaped bluff body for enhancing the performance of galloping-based wind energy harvester,” *Energy*, vol. 183, pp. 92–105, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.044>.
- [10] MOHANTY, A., PARIDA, S., BEHERA, R.K., “Vibration energy harvesting: A review,” *Journal of Advance. Dielectrics*, vol. 09, no. 04, August 2019, <https://doi.org/10.1142/S2010135X19300019>.
- [11] AHMED, R., MIR, F., & BANERJEE, S., “A review on energy harvesting approaches for renewable energies from ambient vibrations and acoustic waves using piezoelectricity”, *Smart Material and Structure*, vol. 26, no. 8, pp.1-27, 2017, <https://doi.org/10.1088/1361-665x/aa7bfb>.
- [12] LIU, Y.Z., M.A., C.M., DAI, K.S., “Improved Understanding of Transverse Galloping of Rectangular Cylinders”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.221, February 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104884>.
- [13] HE, J., ZHAO, W., WAN, D., & WANG, Y., “Numerical Study of Free End Effect of Cylinder with Low Aspect Ratios on Vortex Induced Motion,” *Journal of Hydrodynamics*, vol. 34, no. 1, pp.106–15, 2022, <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0011-x>.
- [14] KONSTANTINIDIS, E., ZHAO, J., LEONTINI, J., JACONO, D.L., & SHERIDAN, J., “Excitation and Damping Fluid Forces on a Cylinder Undergoing Vortex-Induced Vibration,” *Frontiers in Physics*, vol. 7, pp. 1–10, November 2019, <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00185>.
- [15] LECLERCQ, T., & LANGRE, E., “Vortex-Induced Vibrations of Cylinders Bent by the Flow”, *Journal of Fluids and Structures*, vol. 80, pp.77–93, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2018.03.008>.
- [16] ABDELKEFI, A., “Aeroelastic energy harvesting: A review,” *Intenational Journal of Engineering Science.*, vol. 100, pp. 112–135, March 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2015.10.006>.
- [17] WANG, J., GENG, L., DING, L., “The state-of-the-art review on energy harvesting from fl ow-induced vibrations,” *Applied Energy*, vol. 267, p. 114902, January 2020, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114902>.
- [18] BARATA, L.O.A., KIWATA, T., KONO, T., “Effects of Span Length and Additional Structure on Flow-Induced Transverse Vibration Characteristic of a Cantilevered Rectangular Prism,” *Journal of Flow Control Measurement and Visualization*, vol.8, no.3, pp.102–120, 2020, <https://doi.org/10.4236/jfcmv.2020.83006>.
- [19] BARATA, L.O.A., NGII, E., KIWATA, T., “Enhancing Dynamic Response of Cantilevered Rectangular Prism Using a Splitter Plate as a Passive Turbulence Control in Water Tunnel,” *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Science*, vol. 2, no. 2, pp. 1–14, 2022, <https://doi.org/10.37934/arfmts.91.2.114>.
- [20] BARATA, L.O.A., KIWATA, T., UENO, T., “Experimental Investigation of Bladeless Power Generator from Wind-induced Vibration,” *International Journal of Renewable Energy Development.*, vol. 11, no. 3, pp. 661–675, August 2022, <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.43888>.
- [21] WU, P., HANIU, H., & MIYAKOSHI, K., “Generation Different of New Frequencies by Nonlinear Interaction between Vortex Shedding Frequencies in Span Wise Direction of a Stepped Circular Cylinder,” *Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers*, No.06-0621, pp. 103–111, 2007.
- [22] WILLIAMSON, C.H.K., & GOVARDAN, R., “Vortex-induced Vibration,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 36, no. 1, pp. 413–455, January 2004, <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122128>.
- [23] BEARMAN, P.W., “Circular cylinder wakes and vortex-induced vibrations,” *Journal of Fluid and Structure*, vol. 27, no. 5–6, pp. 648–658, July 2011, <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.03.021>.
- [24] WANG, L., & YUAN, F.G., “Vibration energy harvesting by magnetostrictive material”, *Smart Material and Structure*, vol. 17, no. 4, p. 045009, August 2008, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/4/045009>.
- [25] ORREGO, S., SHOELE, K., RUAS, A., “Harvesting ambient wind energy with an inverted piezoelectric flag,” *Applied Energy*, vol. 194, pp. 212–222, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.016>.



- [26] ORDON, R., & DUKE, A.R., “Wind Resource Assessment: Analysis of the Vortex Bladeless Characteristics in Puerto Cortés, Honduras”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*” vol. 801, no. 012019, pp. 1–8, 2021, [https://doi.org/ 10.1088/1755-1315/801/1/012019](https://doi.org/10.1088/1755-1315/801/1/012019).