

Analisis Perilaku Transien Hembusan Udara AC di Ruang yang Luas

Luthfi^{*1}, Azhar², Zuhaimi³, Syamsuar⁴, Sumardi⁵

^{1,3,4,5}Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe

²Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe

Jln. B. Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA

e-mail: ^{*1}luthfi@pnl.ac.id

Abstrak

Jangkauan hembusan udara suatu Air Conditioner (AC) merupakan hal penting yang harus diperhitungkan dengan benar agar ruangan dapat dingin atau hangat secara cepat sehingga konsumsi energi AC dapat dioptimalkan. Untuk memperluas jangkauan hembusan AC, pabrik pembuat AC menggunakan efek Coanda yaitu dengan menghembuskan udara AC dingin pada plafon ruangan atau ke arah lantai ruangan untuk udara hangat. Namun peningkatan jangkauan hembusan udara AC akibat efek Coanda tidaklah sebesar yang disebutkan dan dipromosikan oleh pabrikan AC didalam brosur marketing mereka terutama pada saat start-up peralatan AC. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perilaku transien hembusan udara AC seperti jarak tempuh udara AC pada plafon atau lantai dengan target untuk mempersingkat waktu start-up peralatan AC sehingga dapat mengoptimalkan konsumsi energi. Pola hembusan udara AC pada plafon atau lantai dimodelkan sebagai aliran jet negatif yang menubruk suatu permukaan kaku atau sering disebut impinging jet negatif. Model aliran ini kemudian diselesaikan secara numerik dengan menggunakan metode komputasi fluida dinamik (CFD) yaitu dengan menyelesaikan persamaan Navier-Stokes dan persamaan energi pada domain komputasi yang telah ditetapkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan bilangan Re tidak berpengaruh secara signifikan terhadap peningkatan sebaran udara AC pada pada plafon namun mengubah rezim aliran dari steady menjadi unsteady dengan munculnya osilasi dalam aliran. Perilaku osilasi aliran sulit untuk ditebak polanya namun pencocokan kurva regresi linear $Str \sim Re^3$ dapat memberikan akurasi yang memadai.

Kata kunci—efek Coanda, aliran jet negatif, simulasi CFD, Bilangan Re , Bilangan Str

Abstract

The maximum spread of an Air Conditioner (AC) airflow is an important issue that must be estimated properly to ensure that a space can be cooled or heated quickly so that the AC energy consumption can be optimized. To extend the spread of airflow, the AC manufacturers apply Coanda effect by blowing the cooled air to the ceiling or heated air to the floor. However, the increase of the spread of the AC airflow is not as large as what the AC manufacturers advertise in their marketing brochures, especially during the start-up period of the AC equipment. This study is aimed to learn the transient behaviour of AC airflow and the distance traveled by the airflow before detaching from the ceiling or from the floor with the target of reducing the start-up time of the AC equipment, thus the energy consumption can be optimized. The AC airflow on the ceiling was modeled as negative buoyant jet flows that impinged on a rigid surface or often called as negative impinged jets. The flow model was then solved numerically by using computational fluid dynamics (CFD) method by solving a set of Navier-Stokes and energy equations on a specified domain. The simulation results shows that the increase of Re number

does not affect the spread of the AC airflow but it rather changes the regime of the AC airflow from steady to unsteady with many flow oscillations observed. The oscillation behaviour of the airflow was random and hard to predict, although the curve fitting by using linear regression relationship $Str \sim Re^3$ can give reasonable and acceptable accuracy.

Keywords— Coanda effect, negative jet flow, CFD simulation, Re number, Str number

1. PENDAHULUAN

Penyejuk udara ruangan atau Air Conditioner (AC) merupakan peralatan yang umum digunakan di Indonesia saat ini. Dengan meningkatnya taraf hidup masyarakat, meningkatnya efisiensi AC dan turunnya harga peralatan AC komersial dan residensial, AC yang dahulu hanya terbatas digunakan pada hotel, perkantoran, rumah sakit, pabrik dan perumahan elit saja sekarang sudah mulai merambah masyarakat ekonomi menengah ke bawah dan tempat-tempat umum seperti ruang rapat desa atau masjid [1]–[5]. Untuk ruangan kecil, jangkauan udara AC tidak menjadi masalah karena ruangan cepat dingin. Namun untuk ruangan yang luas seperti masjid, pemasangan, arah dan kondisi hembusan udara AC harus diperhitungkan dengan hati-hati supaya seluruh ruangan dapat terjangkau oleh AC sehingga menjadi dingin dengan cepat namun hemat energi.

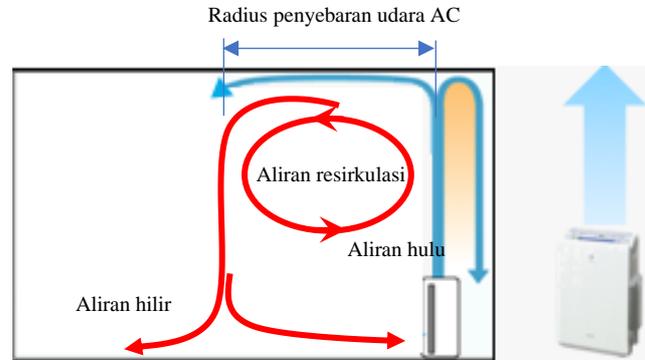
Untuk memperluas jangkauan udara AC dan mempercepat tercapainya kondisi yang diinginkan, arah hembusan dimanipulasi sedemikian rupa dengan menggunakan “Efek Coanda”. Efek Coanda adalah kecenderungan suatu fluida untuk tertarik dan melekat pada suatu permukaan di dekatnya. Karena dapat dimanfaatkan untuk memperluas jangkauan hembusan udara AC, Igarashi et al. [6] menyebutkan efek Coanda dapat digunakan untuk menyederhanakan sistem perpipaan dan saluran (ducting). Sakakibara et al. [7] menyebutkan pada sistem AC yang berkerja dengan efek Coanda udara ditembakkan ke plafon dan mereka juga berargumen dengan menggunakan efek ini, akan menghemat tempat pada plafon dan menghemat tenaga listrik untuk menghembus udara pada ducting.

Skotnicka-Siepsiak [8] yang mempelajari pola aliran pada ruangan yang menggunakan AC dengan efek Coanda juga menemukan bahwa ventilasi ruangan juga menjadi lebih baik. Pabrik pembuat AC juga sering menyebutkan efek Coanda dalam marketing produk mereka. Permasalahannya adalah efek Coanda udara AC tidaklah mengakibatkan pergerakan udara sebesar yang dipromosikan oleh marketing pabrik pembuat. Malah untuk beberapa kasus, peralatan AC dimodifikasi dengan menggunakan pelat disekitar saluran hembus udara untuk meningkatkan jarak jangkauan udara AC, walaupun peningkatan yang diperoleh tidak besar.

Walaupun pada akhirnya setelah seluruh ruangan terisi oleh udara AC, efek Coanda mulai dirasakan, ada masa start-up peralatan AC dimana efek udara AC belum dapat dirasakan. Masa start-up ini tentu harus dipersingkat tanpa harus meningkatkan konsumsi daya dari peralatan AC yang digunakan. Untuk dapat mencapai waktu start-up optimum dari AC, karakteristik aliran udara AC ketika menubruk plafon atau lantai harus dipelajari (Gambar 1) dan dibuat model matematisnya. Berdasarkan model matematis inilah optimalisasi dapat dilakukan.

Pola aliran udara AC dingin yang ditembakkan ke plafon atau udara AC hangat yang dijatuhkan ke lantai pada dasarnya adalah pola aliran jet dengan gaya apung negatif yang menubruk suatu permukaan sebelum momentumnya mencapai nilai nol. Udara AC yang lebih dingin dari udara ruangan secara alami akan lebih berat dan akan cenderung jatuh ke lantai. Namun karena momentum dari hembusan AC belum habis ketika menubruk plafon, maka udara AC akan melekat dan berjalan di sepanjang plafon hingga suatu jarak tertentu sebelum jatuh ke lantai ruangan. Inilah fenomena yang dikenal dalam literatur sebagai impinging jet negatif.

Fenomena impinging jet negatif juga telah sukses diterapkan pada simulasi gas asap pengelasan GMAW [9].



Gambar 1. Ilustrasi pola aliran udara AC dingin yang dihembuskan ke plafon.

Cara kerja impinging negatif jet diilustrasikan pada Gambar 1. Aliran jet dengan momentum dan kecepatan tertentu dan dengan densitas lebih berat masuk ke lingkungan densitas lebih ringan dalam arah vertikal berlawanan arah gravitasi. Kecepatan dan momentum aliran jet ini yang disebut juga dengan upflow atau aliran hulu secara perlahan akan berkurang karena gaya apung negatif dari fluida yang lebih berat dari lingkungan. Sebelum aliran hulu jet mencapai ketinggian maksimum, aliran jet terlebih dahulu menubruk suatu permukaan lalu kemudian aliran ini bergerak menyebar di permukaan tersebut hingga suatu jarak X_d kemudian aliran jet jatuh dari permukaan tersebut membentuk aliran hilir.

Persamaan impinging jet negatif masih sangat bervariasi pada literatur [10]–[17]. Lemckert dan koleganya [10]–[13] telah melakukan investigasi impinging jet negatif turbulen secara intensif melalui serangkaian uji coba eksperimental dan mereka menemukan total jarak tempuh impinging jet sebelum terlepas dari permukaan, $H+X_d$ dan bergerak turun adalah fungsi dari Fr seperti pada persamaan berikut,

$$\frac{H + X_d}{X_0} = C Fr^n \quad (1)$$

Dimana C dan n adalah konstanta yang ditentukan secara empiris melalui data eksperimental. Bilangan Froude (Fr) yang digunakan pada jet negatif seperti yang tertulis pada persamaan (1) didefinisikan sebagai berikut,

$$Fr = \frac{V_0}{\sqrt{X_0 g'_0}} \quad (2)$$

Dimana V_0 adalah kecepatan hulu jet pada sumbernya yaitu pada inlet dan X_0 adalah radius inlet dan g'_0 adalah gravitasi yang berkurang karena perbedaan densitas antara aliran jet dan fluida sekitar. Rezim aliran dari aliran jet dapat diperkirakan dari bilangan Reynolds (Re) yang didefinisikan sebagai berikut,

$$Re = \frac{V_0 X_0}{\nu} \quad (3)$$

Dimana ν adalah viskositas kinematik dari fluida jet.

Kuruppu dan Lemckert meneliti impinging jet negatif secara eksperimental dengan memompakan air keran ke udara hingga menubruk permukaan kaca akrilik [10]. Mereka menemukan persamaan untuk menghitung jarak lepas sebagai fungsi dari bilangan Fr dan menyarankan koefisien yang sesuai untuk impinging jet negatif yang mereka teliti. Holstein dan Lemckert [11] menyelidiki impinging negatif jet secara eksperimental dengan menginjeksikan air ke dalam kontainer berisi larutan garam dari arah atas hingga aliran jet bertubrukan dengan dasar container. Mereka mengusulkan bentuk persamaan yang berbeda dimana selain bilangan Fr, ketinggian domain H juga termasuk dalam menghitung jarak lepas jet dari dasar domain. Lemckert [12], [13] kemudian melanjutkan penelitiannya lebih mendalam dengan menggunakan larutan garam yang diinjeksikan ke dalam kontainer berisi air tawar dari arah lantai kontainer. Berdasarkan rentang bilangan Re yang digunakan, dia tetap berpendapat kalau jarak lepas hanya dipengaruhi oleh bilangan Fr saja.

Studi yang paling mendalam dari impinging jet negatif turbulen dilakukan oleh Cooper dan Hunt [15]. Mereka melakukan penelitian pada impinging jet negatif turbulen dengan bilangan Re cukup tinggi. Mereka menggunakan air tawar yang diinjeksikan ke dalam kontainer berisi air garam melalui nozzle yang diletakkan di atas pelat akrilik. Mereka menggunakan teknik visualisasi shadowgraph untuk mendapatkan besarnya radius penyebaran jet setelah menubruk permukaan dan untuk mendapatkan struktur detail dari aliran jet mereka menggunakan light induced fluorescein (LIF). Persamaan yang diusulkan oleh Cooper dan Hunt tetap hanya sebagai fungsi dari bilangan Fr saja seperti yang diusulkan oleh Lemckert dan koleganya pada persamaan (1), namun persamaan yang mereka usulkan lebih sederhana bentuknya.

Penelitian impinging jet yang agak sedikit berbeda dengan yang lain telah dilakukan oleh Nsrinarayana dan koleganya [14], [16], [17]. Mereka menggunakan pendekatan numerik menggunakan metode komputasi fluida dinamik (CFD) yaitu dengan menyelesaikan persamaan Navier-Stokes secara langsung untuk meneliti impinging jet negatif lemah planar dua-dimensi. Perbedaan densitas antara fluida jet dan fluida lingkungan dicapai dengan menggunakan perbedaan temperatur dan menggabungkan persamaan energi ke dalam model numerik mereka. Mereka menggunakan analisis dimensional dan analisis penskalaan dalam menurunkan rumus untuk menghitung besarnya radius penyebaran jet pada permukaan. Hal yang menarik adalah persamaan yang mereka usulkan tidak hanya memasukkan bilangan Fr tetapi juga parameter-parameter lain seperti bilangan Re, bilangan Pr dan juga ketinggian H,

$$\frac{H + X_d}{X_0} = \left(\frac{H}{X_0}\right)^a Fr^b Re^c Pr^d \quad (4)$$

Dimana Pr adalah bilangan Prandtl yang didefinisikan sebagai berikut,

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (5)$$

Dimana μ adalah viskositas dinamik, c_p adalah kalor spesifik tekanan konstan dan k adalah konduktivitas termal dari fluida.

Perilaku transien dari hembusan udara AC yang ditinjau dalam artikel ini diobservasi berdasarkan frekuensi osilasinya. Metode yang digunakan dalam analisis frekuensi adalah bilangan frekuensi tak berdimensi Strouhal (Str) dengan menghitung seperti yang telah dilakukan oleh Luthfi [18] yaitu,

$$Str = \frac{f V_0}{X_0} \quad (6)$$

Dimana f adalah frekuensi osilasi dari aliran.

Terkait dengan teknologi konversi energi, bangunan hemat energi dan konsep energy management system, maka tujuan dari penelitian ini adalah mempelajari karakteristik transien dari hembusan AC dengan membuat model matematika dan menyelesaikannya secara numerik. Target yang ingin dicapai setelah model matematika diperoleh dan diselesaikan adalah untuk dapat mengoptimalkan jangkauan hembusan udara dan mempersingkat masa start-up AC dimana efek pengkondisian udara belum terasa maksimal.

2. METODE PENELITIAN

Pemodelan numerik sistem jet dilakukan dalam koordinat dua dimensi (2D) aksis-simetri. Domain komputasi untuk model numerik dari sistem berbentuk silinder dengan diameter L dan tinggi H sedangkan inlet terletak pada bagian dasar dengan radius X_0 . Seluruh domain pada mulanya memiliki temperatur T_a dan aliran jet disemburkan dari inlet pada temperature T_0 . Pengaruh gravitasi bekerja berlawanan arah dengan aliran jet dengan bagian plafon dan dasar domain diset sebagai dinding, sisi kiri sebagai simetri dan sisi kanan sebagai outlet dari aliran.

Simulasi numerik dilakukan dengan metode komputasi fluida dinamik (CFD) yaitu dengan menyelesaikan persamaan Navier-Stokes secara langsung sehingga kecepatan, tekanan dan temperatur untuk setiap lokasi dalam ruangan dapat diperoleh. Persamaan ini dimodifikasi menjadi non-dimensi dan digabung dengan persamaan energi untuk menangani perbedaan densitas. Persamaan yang digunakan dalam simulasi adalah sebagai berikut,

$$\frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} (xu) + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} (xuu) + \frac{\partial}{\partial y} (uv) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} (xu) \right] + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{u}{x^2} \right\} \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} (xuv) + \frac{\partial}{\partial y} (vv) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left[\frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \frac{1}{Fr^2 \theta} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} (xu\theta) + \frac{\partial}{\partial y} (v\theta) = \frac{1}{RePr} \left[\frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right] \quad (10)$$

Metode penyelesaian Direct Numerical Simulation (DNS) digunakan untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes dan persamaan energi dari sistem. Karena settingan AC diatur berdasarkan temperatur, bilangan Fr yang telah didefinisikan pada persamaan (2) dimodifikasi sehingga menjadi fungsi dari temperatur, T dengan menggunakan pendekatan asumsi Oberbeck-Boussinesq dimana densitas yang telah berkurang, g_0' pada persamaan (2) dapat diuraikan menjadi,

$$g_0' = \frac{1}{\rho} g(\rho_a - \rho) \approx g\beta(T - T_a) \quad (11)$$

dimana β adalah koefisien ekspansi termal. Pada temperatur 20 °C, koefisien ekspansi termal untuk udara adalah $\beta = 3.4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Dengan menggabungkan persamaan (2) dan (11), maka bilangan Fr yang akan dipakai untuk simulasi adalah,

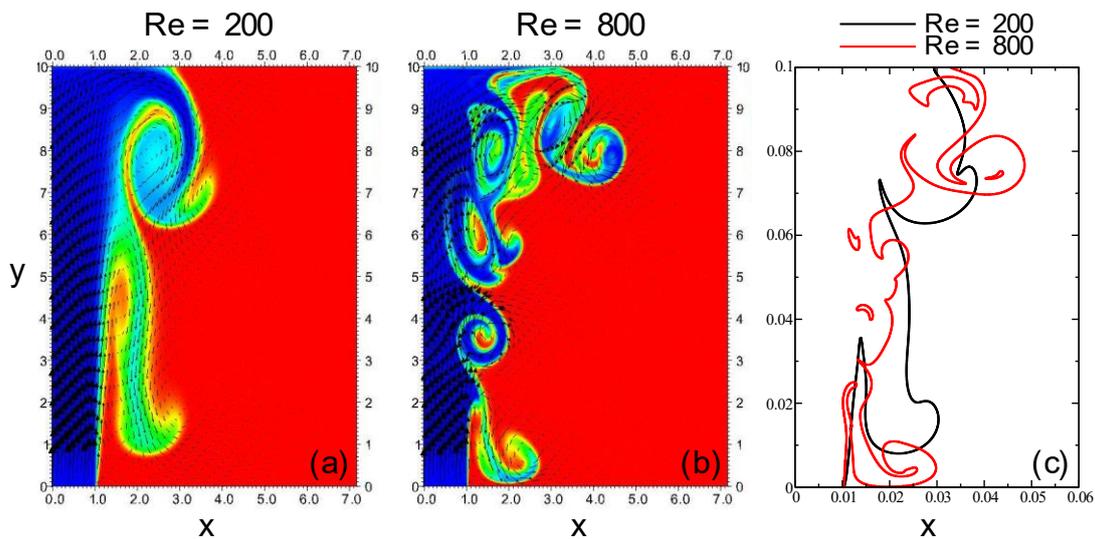
$$Fr = \frac{V_0}{\sqrt{gX_0\beta_0(T_a - T_0)}} \quad (12)$$

Bilangan Fr dijaga tetap dalam simulasi pada $Fr = 5.0$. Untuk bilangan Re, simulasi yang dilakukan pada penelitian ini tetap menggunakan persamaan (3) tanpa perubahan dimana rentang bilangan Re yang akan diuji berkisar $100 \leq Re \leq 800$. Ketinggian plafon dari outlet udara AC

yang akan diuji dalam simulasi adalah sekitar $8.8 \leq H/X_0 \leq 10.1$, sementara bilangan Pr juga tetap menggunakan persamaan (5) dan dijaga tetap pada $Pr = 7.0$.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

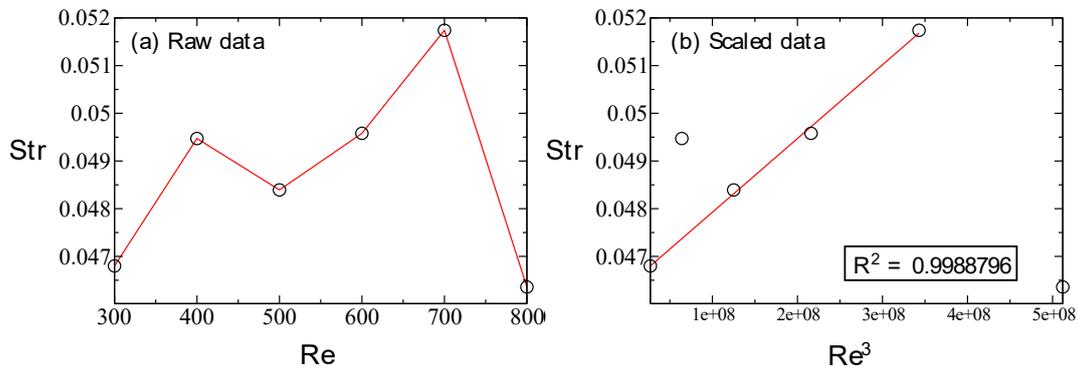
Hasil simulasi perbandingan pola aliran dan ukuran dari pada sebaran hembusan jet dapat dilihat pada Gambar 2. Hembusan jet pada $Re = 200$ (Gambar 2(a)) terlihat lebih steady teratur tanpa adanya pusaran jika dibandingkan dengan jet pada $Re = 800$ (Gambar 2(b)) yang sangat fluktuatif dengan banyak pusaran baik di dekat plafon ataupun di sepanjang aliran hulu dari jet. Ukuran dari sebaran hembusan dari kedua jet seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2(c) sebenarnya tidak jauh berbeda walaupun memang sebaran jet pada $Re = 800$ agak sedikit lebih lebar. Namun jika dilihat dari nominal peningkatan dari 200 ke 800 yang adalah empat kali lipat, besarnya peningkatan sebaran hembusan sebenarnya dapat diabaikan. Jadi sebenarnya efek dari peningkatan bilangan Re sebenarnya lebih condong ke arah perubahan rezim aliran dari steady menjadi tidak steady bukan peningkatan lebar sebaran hembusan jet.



Gambar 2. Perbandingan hasil simulasi pada (a) $Re = 200$ dengan (b) $Re = 800$ dan (c) perbandingan ukuran dan sebaran hembusan

Frekuensi osilasi tak berdimensi bilangan Strouhal Str ketika diplot terhadap Re seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(a) menunjukkan pola acak yang sulit diprediksi trendnya. Walaupun nilai dari bilangan Str menunjukkan frekuensi yang rendah pada $Re = 800$, secara umum trendnya menunjukkan adanya peningkatan bilangan Str terhadap Re . Dengan mengecualikan beberapa nilai yang cukup jauh berbeda dengan nilai-nilai frekuensi yang lain, pencocokan kurva dari nilai Str terbaik dapat diperoleh dengan menggunakan Re^3 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(b). Dengan menerapkan pencocokan kurva regresi linear, maka diperoleh persamaan berikut:

$$Str = 0.046382 + (1.5451 \times 10^{-11})Re^3 \quad (13)$$



Gambar 3. Plot frekuensi Str terhadap bilangan Re (a) raw data (b) scaled data

4. KESIMPULAN

Simulasi hembusan udara AC telah berhasil dilakukan dan pola aliran hembusan untuk berbagai nilai bilangan Re telah berhasil diperoleh. Peningkatan bilangan Re dari hembusan udara AC walaupun tidak meningkatkan jarak dan luas penyebaran AC secara signifikan namun dapat menyebabkan timbulnya osilasi aliran dan amplitudo osilasi akan semakin besar dengan meningkatnya Re. Walaupun perilaku osilasi terhadap bilangan Re sulit diprediksi polanya, regresi linear $Str \sim Re^3$ dapat diperoleh dengan akurasi yang cukup baik.

5. SARAN

Walaupun perilaku transien hembusan udara AC sangat didominasi oleh bilangan Re, pengaruh parameter lain seperti bilangan Fr, Pr atau ketinggian dari plafon sangat menarik untuk diteliti lebih lanjut. Penelitian secara eksperimental juga sangat disarankan karena bagaimanapun juga hasil eksperimental yang akan memberikan akurasi terbaik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan rasa terima kasih dan apresiasi yang sebesar-besarnya terhadap dana Penelitian Dasar DIPA Politeknik Negeri Lhokseumawe tahun 2023 yang telah memberi dukungan finansial sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. K. B. Aceh, "Wali Kota Bantu AC untuk Masjid Besar Pahlawan Peuniti," *Website Pemerintah Kota Banda Aceh*, 2021, [Online]. Available: <https://bandaacehkota.go.id/berita/30354/wali-kota-bantu-ac-untuk-masjid-besar-pahlawan-peuniti.html>
- [2] R. Kanalinspirasi, "Iskandar Ali dan Tim Saweue Wareh Serahkan Bantuan AC untuk Mesjid Babul Maghfirah," *kanalinspirasi.com*, 2023, [Online]. Available: <https://www.kanalinspirasi.com/news/iskandar-ali-dan-tim-saweue-wareh-serahkan-bantuan-ac-untuk-masjid-babul-maghfirah/index.html>
- [3] D. Osmon, "Siswa SD Muhada Langsa Sedekah AC Masjid At Taqwa PCM Bendahara Aceh," *matahati.com*, 2021, [Online]. Available: <https://tabloidmatahati.com/siswa-sd-muhada-langsa-sedekah-ac-masjid-at-taqwa-pcm-bendahara-aceh/#.ZAgQOnZBxPY>
- [4] T. D. Iskandar, "BPJS Kesehatan salurkan empat unit AC untuk masjid di Nagan Raya," *Antara Aceh*, 2019, [Online]. Available: <https://aceh.antaranews.com/berita/73049/bpjs->

-
- kesehatan-salurkan-empat-unit-ac-untuk-masjid-di-nagan-roya
- [5] Bakri, "Mursil Ingin Seluruh Masjid Aceh Tamiang Dilengkapi AC," *Serambinews.com*, 2022, [Online]. Available: <https://aceh.tribunnews.com/2022/04/05/mursil-ingin-seluruh-masjid-aceh-tamiang-dilengkapi-ac?page=2>
- [6] H. Igarashi, T. Akimoto, D. Hatori, S. Kato, H. Sakakibara, and M. Kimura, "The effects of an air conditioning system using the coanda effect on an indoor office environment," *E3S Web Conf.*, vol. 111, no. 201 9, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201911101088.
- [7] H. Sakakibara, T. Akimoto, H. Igarashi, S. Nakamura, and M. Kimura, "The Evaluation of Air Blowing Method of Variable-Air-Conditioning-System using Coanda Effect by Computational Fluid Dynamics," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 294, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/294/1/012058.
- [8] A. Skotnicka-Siepsiak, "The applicability of Coanda effect hysteresis for designing unsteady ventilation systems," *Energies*, vol. 14, no. 1, 2021, doi: 10.3390/en14010034.
- [9] Luthfi, "Studi Karakteristik Pola Aliran Gas Asap Pengelasan Listrik GMAW," Lhokseumawe, 2021.
- [10] K. Kuruppu and C. J. Lemckert, "Plunging radius of water fountains following impact on a rigid surface," in *7th Australasian Heat and Mass Transfer Conference, Townsville, Queensland, Australia*, 2000, pp. 195–200.
- [11] D. M. Holstein and C. J. Lemckert, "Spreading of energetic submerged fountains impinging on a rigid surface," in *14th Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide University, Adelaide, Australia*, 2001, pp. 10–14. [Online]. Available: [file:///F:/pnl/Penelitian/Genap 2023/DIPA2023/Proposal DIPA 2023/Literatur 11 - Holstein2001.PDF](file:///F:/pnl/Penelitian/Genap%202023/DIPA2023/Proposal%20DIPA%202023/Literatur%2011%20-%20Holstein2001.PDF)
- [12] C. J. Lemckert, "Spreading radius of fountains after impinging a free surface," in *Proceedings of the 15th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 2004, vol. 400, pp. 217–220. [Online]. Available: [file:///F:/pnl/Penelitian/Genap 2023/DIPA2023/Proposal DIPA 2023/Literatur 12 - AFMC00217.pdf](file:///F:/pnl/Penelitian/Genap%202023/DIPA2023/Proposal%20DIPA%202023/Literatur%2012%20-%20AFMC00217.pdf)
- [13] C. J. Lemckert, "Submerged fountains impinging on a smooth horizontal surface," 2005.
- [14] N. Srinarayana, "Transient behavior of free and impinging fountains," The University of Sydney, 2008.
- [15] P. Cooper and G. R. Hunt, "Impinging axisymmetric turbulent fountains," *Phys. Fluids*, vol. 19, no. 11, p. 117101, 2007, [Online]. Available: [file:///F:/pnl/Penelitian/Genap 2023/DIPA2023/Proposal DIPA 2023/Literatur 11 - Cooper2007.pdf](file:///F:/pnl/Penelitian/Genap%202023/DIPA2023/Proposal%20DIPA%202023/Literatur%2011%20-%20Cooper2007.pdf)
- [16] N. Srinarayana, S. W. Armfield, and W. X. Lin, "Impinging plane fountains in a homogeneous fluid," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 11–12, pp. 2614–2623, 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.01.009.
- [17] N. Srinarayana, S. W. Armfield, and W. Lin, "Laminar plane fountains impinging on a ceiling with an opposing heat flux," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 19–20, pp. 4545–4552, 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.03.015.
- [18] Luthfi, "Numerical Investigation of Fountains Impinging on a Solid Surface and a Density Interface," The University of Sydney, 2012.
-