

Pemodelan Numerik Aliran Angin di Sekitar Gedung Tinggi Menggunakan Metode RANS Standard K- ϵ dengan Program OpenFOAM

*Yongky Sanjaya¹, Doni Priambodo¹, Prasanti Widyasih Sarli¹,
Herlien D. Setio¹, Syarifefatunnisa²

¹Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

²BPPT-BBTA3, Tangerang Selatan

*)yongky.sanjaya94@gmail.com

Received: 21 Maret 2021 Revised: 27 Juli 2022 Accepted: 29 Juli 2022

Abstract

Amplified wind loads around buildings could induce structural failure, thus making it important to understand the behavior of fluid flow between buildings. In this study, the analysis is performed using RANS, a computational fluid dynamics (CFD) simulation with faster computation time compared to other methods. OpenFOAM, an open-source software, is used to run the simulations. This study used a structured mesh with standard RANS $k - \epsilon$ turbulence model. Four symmetrical buildings with a scale of 1: 420 are used as the model of this study. Numerical modelling of different computational domain size and different degrees of fineness of the meshing is simulated to determine margin of errors. The result indicates that changes in computational domain has a significant effect on CFD analysis in lowering the error value in area with high flow speed ratio ($U/U_0 > 1$) to reach the acceptable error limit. Contrastingly, changes in the degree of fineness of the meshing do not give a significant change in error value. A relatively coarse meshing with fast computation time could give a similar result as A fine meshing model with longer computation time.

Keywords: CFD, OpenFOAM, RANS, computation domain, meshing

Abstrak

Beban angin di sekitar bangunan dapat mengalami amplifikasi yang mungkin menyebabkan kegagalan struktur, sehingga penting untuk memahami perilaku aliran fluida di antara bangunan. Dalam studi ini dilakukan pemodelan fluida dengan menggunakan RANS, sebuah metode computational fluid dynamics (CFD) yang memiliki waktu komputasi lebih cepat dari metode lain. Dalam studi ini digunakan program OpenFOAM yang merupakan program open source. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan structured mesh dan untuk pemodelan turbulensi yang terjadi menggunakan metode RANS standard k- ϵ . Model dari kasus yang dipelajari merupakan 4 bangunan simetris dengan skala 1:420. Pemodelan numerik dilakukan dengan mengubah ukuran domain komputasi dan tingkat kehalusan meshing yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan domain komputasi memiliki pengaruh yang signifikan dalam melakukan CFD dimana nilai eror pada daerah aliran yang memiliki ratio kecepatan aliran yang tinggi ($U/U_0 > 1$) sehingga masuk dalam batasan eror yang dapat diterima. Sedangkan untuk perubahan tingkat meshing tidak memberikan perubahan eror yang signifikan, di mana dengan meshing relatif kasar dan memiliki waktu komputasi yang lebih cepat dapat menghasilkan hasil yang mirip dengan pemodelan yang menggunakan meshing lebih halus dan membutuhkan waktu komputasi yang besar.

Kata kunci: CFD, OpenFOAM, RANS, domain komputasi, meshing

Pendahuluan

Pertumbuhan bangunan tinggi di Indonesia semakin meningkat khususnya pada kota besar seperti

Jakarta. Pertambahan jumlah bangunan tinggi dapat mengubah aliran angin secara lokal. Sebagai fluida, angin sangat mudah bertransformasi bila terdapat cukup gangguan, dan angin juga bisa mengalami

peningkatan kecepatan atau bertransformasi dari aliran laminar menjadi aliran turbulen. Pada beberapa tahun terakhir terjadi insiden runtuhnya infrastruktur penunjang seperti jembatan penyebrangan orang, maupun papan reklame yang disebabkan oleh angin kencang.

Dari insiden tersebut dapat dilihat bahwa angin memiliki pengaruh beban yang cukup besar pada saat tertentu hingga menjadi penting untuk mempelajari pola aliran angin di sekitar bangunan, terutama pada daerah yang memiliki tingkat mobilitas yang tinggi. Salah satu metode untuk mempelajari pola aliran angin adalah dengan melakukan CFD (*Computational Fluid Dynamics*). CFD merupakan metode yang masih dalam tahap pengembangan untuk mempelajari pola aliran angin, sehingga dibutuhkan hasil dari eksperimen untuk memvalidasi hasil dari CFD.

Metode RANS standard $k-\epsilon$ memiliki efisiensi yang sangat tinggi baik dalam segi komputasi maupun secara ekonomi. Pada area pengukuran kecepatan aliran angin yang memiliki rasio kecepatan yang tinggi ($U/U_0 > 1$), di mana U_0 adalah kecepatan aliran angin sebelum adanya objek pada titik yang ditinjau sedangkan U adalah kecepatan aliran yang diukur setelah adanya objek, metode RANS standard $k-\epsilon$ memiliki eror yang cukup baik, sekitar 10%. Namun metode ini akan berlebihan dalam memprediksi nilai energi kinetik turbulensi pada aliran terpisah di sekitar sudut gedung pada arah datangnya angin. (Mittal *et al.*, 2018). Jika hanya dibatasi pada daerah yang memiliki rasio kecepatan aliran angin yang tinggi ($U/U_0 > 1$), Yosie *et al.* (2007) menyatakan bahwa dengan menggunakan RANS standard $k-\epsilon$ maka perbedaan yang terjadi antara eksperimen dengan CFD paling besar adalah sekitar 15%.

Dalam penelitian Tominaga *et al.* (2008) dalam melakukan pemodelan CFD domain komputasi harus memiliki *blockage ratio* lebih kecil dari 3% dengan domain lateral sebesar $5H$ dari bangunan, vertikal $5H$, dan domain komputasi di belakang gedung sebesar $10H$, dimana H adalah tinggi gedung. Domain komputasi maksimal pada bagian belakang gedung maksimal sebesar $15H$. (Franke *et al.*, 2007). Sedangkan untuk kebutuhan praktis Yosie *et al.* menyatakan untuk mendapatkan hasil CFD yang baik domain komputasi secara lateral harus memiliki ruang yang cukup antara objek dengan domain, sedangkan secara vertikal disarankan minimal $3H$, sedangkan untuk resolusi grid minimal terdapat minimal 10 grid di antara gedung. (Yosie *et al.*, 2005)

CFD menggunakan program OpenFOAM v19.12, dimana OpenFOAM adalah suatu program *open-*

source yang menggunakan bahasa C++. OpenFOAM tidak memiliki tampilan untuk penggunanya, sehingga untuk mengoperasikan OpenFOAM terdapat tiga buah *directories* yang perlu disesuaikan dengan kasus yang diinginkan yaitu:

Pertama, *constant directory* yang berisikan deskripsi dari mesh yang sudah dibuat dan properti fisik dari fluida yang digunakan. Kedua, *system directory* yang digunakan untuk menentukan parameter dari prosedur penyelesaian kasus yang akan dikerjakan yang terdiri dari paling tidak tiga *files* yaitu *controlDict* yang berisikan parameter kontrol dari kasus yang dikerjakan, *fvSchemes* digunakan untuk menentukan skema diskretisasi yang akan digunakan untuk menyelesaikan kasus, dan *fvSolution* yang berisikan *solver*, nilai toleransi, dan algoritma yang digunakan untuk menyelesaikan kasus CFD yang direncanakan. Ketiga, *time directory* yang berisikan data hasil pemrograman dan juga nilai awal dari parameter yang digunakan. (OpenFOAM Ltd (ESI Group), 2019).

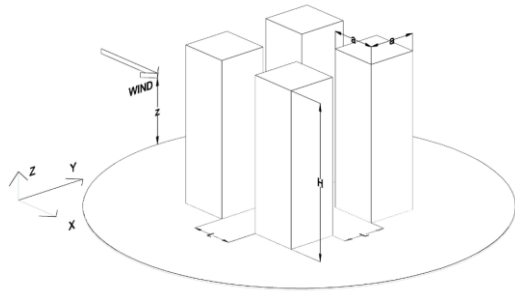
Algoritma yang digunakan untuk menyelesaikan kasus yang menggunakan *steady* RANS standard $k-\epsilon$ adalah algoritma SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation). Algoritma SIMPLE bekerja dengan menyelesaikan persamaan momentum dengan menggunakan nilai dugaan awal pada parameter tekanan, dari nilai dugaan ini akan didapatkan nilai kecepatan yang selanjutnya akan digunakan untuk mengoreksi kembali nilai tekanan dan kecepatan yang terjadi. Nilai kecepatan dan tekanan yang terkoreksi selanjutnya akan digunakan untuk menyelesaikan persamaan transportasi hingga mencapai nilai yang konvergen. (Tu *et al.*, 2008). Untuk menambah stabilitas dari algoritma SIMPLE, D.A. Jones *et al.* (2016) dalam penelitiannya menyatakan dibutuhkan faktor relaksasi, faktor relaksasi yang disarankan adalah 0,3 untuk persamaan tekanan dan 0,7 untuk persamaan lainnya.

Dalam studi ini akan dibahas mengenai pengaruh perubahan dimensi domain komputasi dan pengaruh jumlah grid terhadap pemodelan numerik aliran angin pada bangunan tinggi menggunakan metode RANS standard $k-\epsilon$. Dalam studi ini pembahasan dilakukan terhadap nilai kecepatan angin rata-rata saja di garis tengah sepanjang jalan diantara gedung.

Metode

Model eksperimen yang digunakan terdiri dari empat buah gedung simetris dengan skala 1:420. Penampakan tiga dimensi dari model dapat dilihat pada Gambar 1. Pengambilan data dilakukan di sepanjang sumbu x pada ketinggian (z)=10cm

seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 tersebut. Pengambilan data dengan menggunakan PIV dan terowongan angin kecepatan rendah yang dilakukan di laboratorium BPPT-BBTA3.



Gambar 1. Tampak tiga dimensi model eksperimen

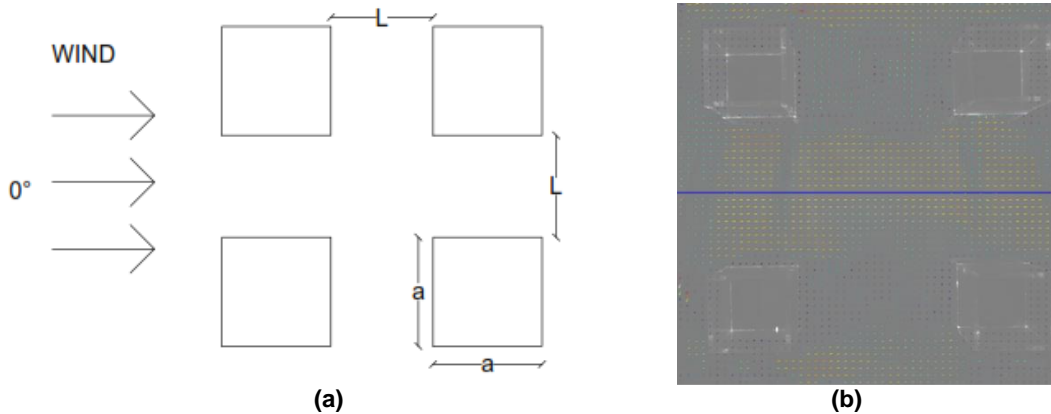
Ilustrasi dari tampak atas model dapat dilihat pada Gambar 2(a), titik pengambilan data menggunakan PIV dapat dilihat pada Gambar 2(b). Parameter dari model eksperimen yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1. Pemodelan numerik dilakukan menggunakan program OpenFOAM v1912 dengan

batasan domain dan kondisi batas pada domain komputasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

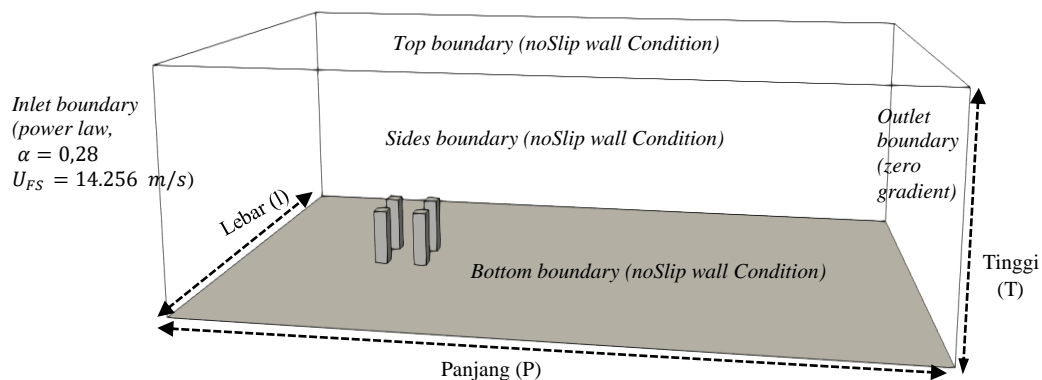
Tabel 1. Parameter model eksperimen

Parameter	
Jarak antar gedung (L)	167 mm
Tinggi gedung (H)	238 mm
Lebar gedung (a)	77 mm
Arah datangnya angin	0°
Kecepatan angin pada ketinggian aliran bebas	14.256 m/s
Ketinggian dari titik pengukuran (z)	10cm

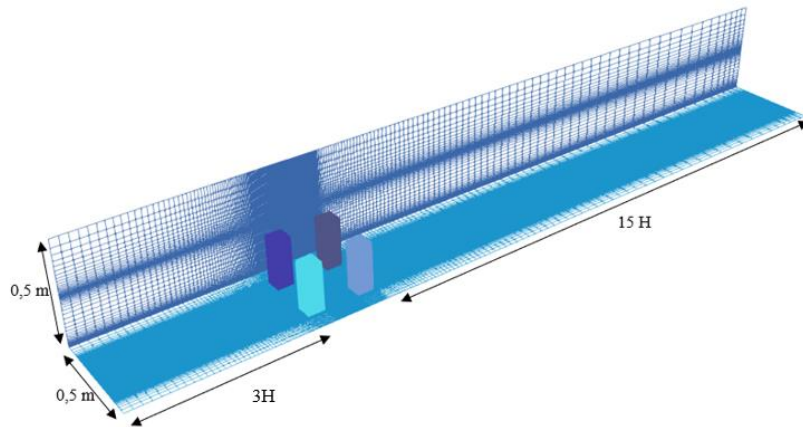
Pemodelan dilakukan dengan menggunakan dua ukuran domain komputasi yang memiliki nilai *blockage ratio* yang berbeda. Model-1 memiliki domain komputasi dengan mengikuti dimensi dari seksi uji yang dimiliki oleh terowongan angin berkecepatan rendah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, dan untuk model-2 domain komputasi mengikuti anjuran Tominaga *et al.*, Yosie *et al.*, dan Franke *et al.*, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.



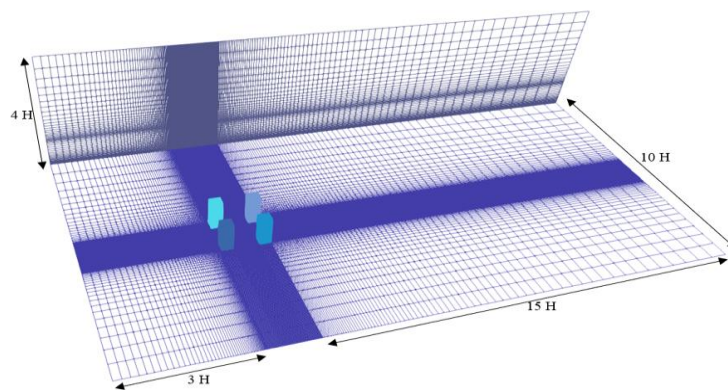
Gambar 2. Tampak atas model eksperimen (a), titik pengukuran eksperimen (b)



Gambar 3. Batas domain dan kondisi batasnya



Gambar 4. Domain komputasi sesuai ukuran *wind tunnel*



Gambar 5. Domain komputasi sesuai anjuran *blockage ratio* < 3% (Tominaga, *et al.*, 2008).

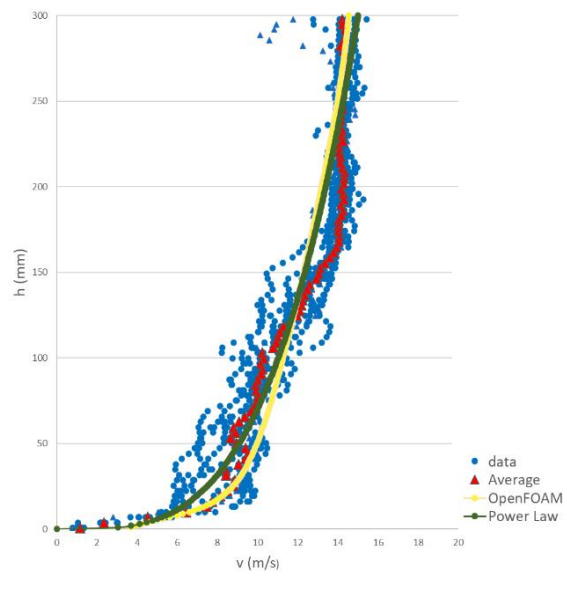
Profil aliran angin pada inlet domain komputasi direncanakan sesuai dengan hasil pengukuran eksperimen yang dilakukan ketika seksi uji berada dalam keadaan kosong, profil angin tersebut mengikuti persamaan Power Law dengan nilai $\alpha = 0,28$, sebagai berikut.

$$U_z = U_{ref} \times \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1)$$

Di mana U_z adalah kecepatan aliran angin pada ketinggian (z), U_{ref} adalah kecepatan aliran angin pada ketinggian referensi atau kecepatan *free stream* dalam studi ini $U_{ref} = 14,256$ m/s, z_{ref} adalah ketinggian referensi yang diambil ketika aliran *free stream* mulai terjadi, dalam studi ini $z_{ref} = 300$ mm, z merupakan ketinggian yang ditinjau, α merupakan suatu variable yang menggambarkan kekeasaran dari lingkungan di sekitar objek. Profil aliran yang digunakan pada inlet pemodelan numerik dapat dilihat pada Gambar 6.

Dalam studi ini algoritma SIMPLE digunakan untuk menyelesaikan model turbulensi *steady* RANS standard $k-\epsilon$ dengan menggunakan skema diferensiasi *Linear Upwind* di mana skema ini merupakan orde ke 2 dari skema *upwind*. Skema

diferensiasi *Linear Upwind* dapat mendekati nilai permukaan sel elemen dengan menekstrapolasi secara linear dari 2 titik hulu. (Ferziger & Peric, 2002) Pengaturan kasus pemodelan dalam studi ini disajikan dalam Tabel 2.



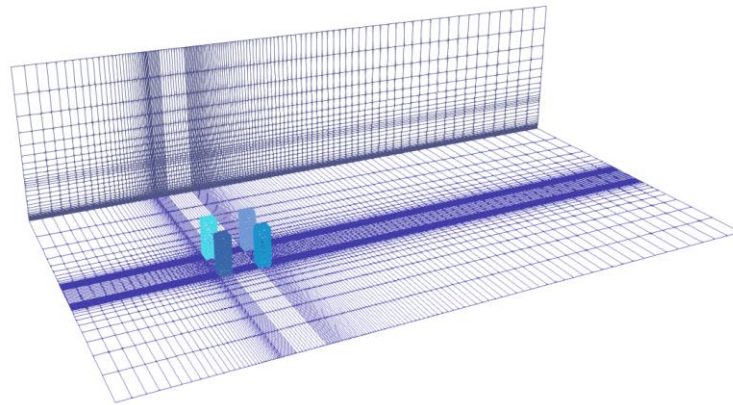
Gambar 6. Profil aliran angin

Tabel 2. Pengaturan Kasus Pemodelan

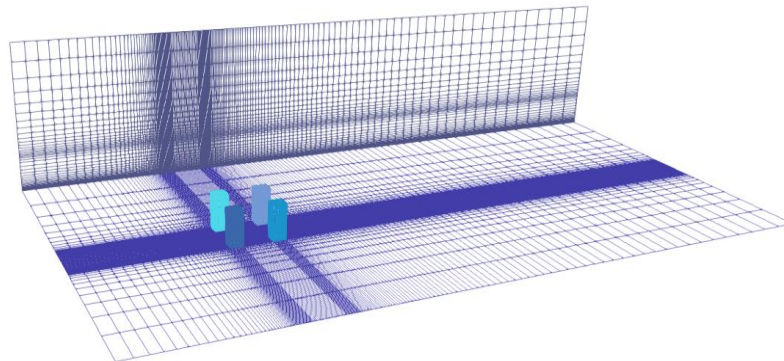
Aplikasi	<i>Simple foam (steady state)</i>
Skema diferensiasi	Linear upwind schemes for U, k, ϵ
Model Turbulensi	RANS standard k- ϵ
Jumlah iterasi	3000

Selain melakukan perubahan domain komputasi perubahan yang diberikan kepada kasus pemodelan ini, pembagian grid pada daerah yang ditinjau yaitu pada daerah di antara ke empat gedung tersebut.

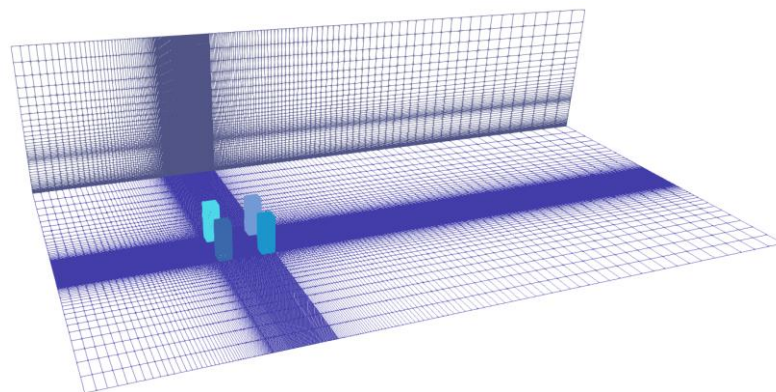
Untuk kebutuhan praktis grid di antara gedung minimal dibutuhkan 10 grid. (Yosie *et al.*, 2005). Dalam model ini grid diantara gedung dibagi menjadi 10, 20, dan 46 grid. Hal ini dimaksudkan untuk mempelajari bagaimana pengaruh yang disebabkan oleh kehalusan mesh yang diperlukan dalam kasus ini. Hasil dari *meshing* berdasarkan pembagian grid yang direncanakan dapat dilihat pada Gambar 7, 8, dan 9, dan pengerjaan kasus ini dilakukan menggunakan komputer dengan *processor* Intel® Core™ I7-7700HQ dengan *memory* RAM sebesar 16GB



Gambar 7. Meshing dengan 10 grid di antara gedung



Gambar 8. Meshing dengan 20 grid di antara gedung



Gambar 9. Meshing dengan 46 grid di antara gedung

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh perubahan domain komputasi

Pada studi ini digunakan dua domain komputasi yang berbeda dimana domain satu merupakan domain dengan menggunakan ukuran seksi uji pada terowongan angin, sedangkan domain dua menggunakan ukuran yang disarankan oleh Tominaga *et al.* (2008). Dimensi dan besarnya *blockage ratio* dari kedua domain tersebut dapat dilihat pada Tabel 3. Pengaruh ukuran domain komputasi memberikan hasil yang sangat signifikan di mana pada domain 1 ditunjukkan pada Gambar 10 (a) di mana kecepatan aliran angin teramplifikasi cukup besar jika dibandingkan dengan hasil simulasi pada model dengan domain 2 yang ditunjukkan pada Gambar 10 (b).

Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa domain komputasi yang memiliki *blockage ratio* <3% memberikan hasil yang lebih baik, di mana hasilnya

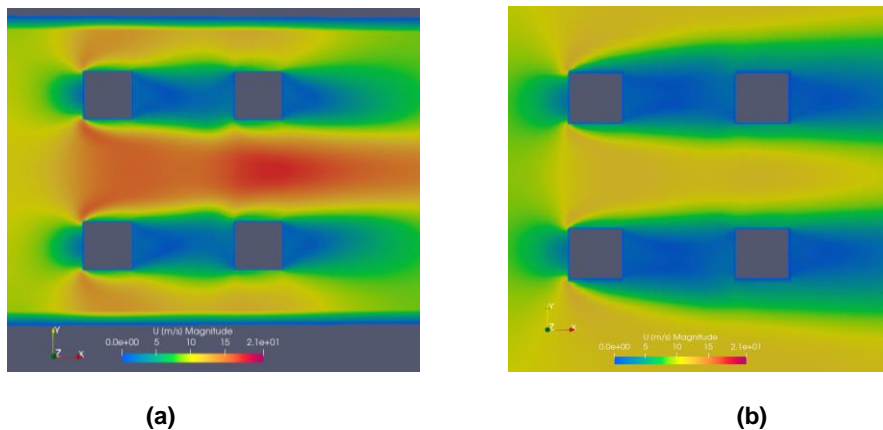
mendekati hasil eksperimen. Perhitungan eror dilakukan pada kecepatan aliran angin yang memiliki kecepatan lebih tinggi dari kecepatan pada ketinggian 10 cm ($U_0 = 10.295 \text{ m/s}$) pada saat kondisi seksi uji dalam keadaan kosong saja ($U/U_0 > 1$), dan didapatkan hasil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12. Hasil simulasi dengan domain komputasi sebesar seksi uji terowongan angin memiliki nilai eror yang melebihi nilai batas eror yaitu 15%.

Pengaruh tingkat kehalusan meshing

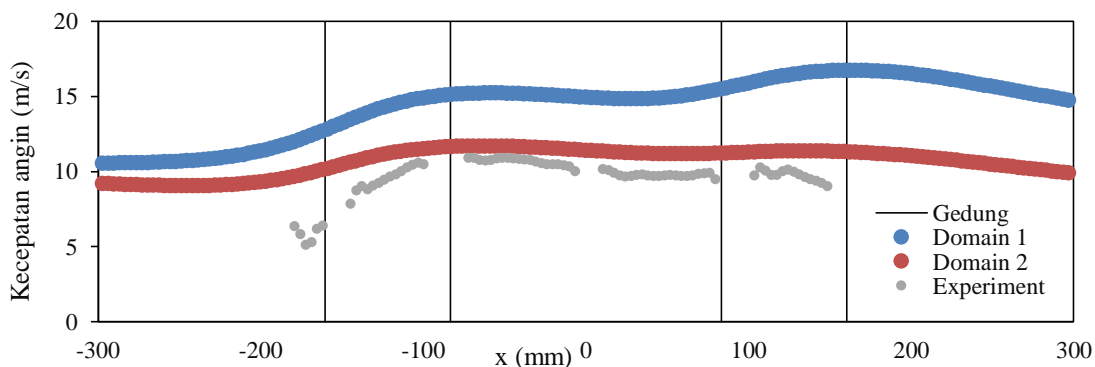
Dalam studi ini tiga model dengan tingkat kehalusan yang berbeda dimodelkan, dimana tingkat kehalusan *mesh* ditentukan dari jumlah pembagian *grid* diantara keempat gedung. Pembagian 10 *grid* diantara gedung dianggap sebagai tipe *meshing* kasar, pembagian 20 *grid* diantara gedung dianggap sebagai tipe *meshing* halus, dan pembagian 46 *grid* diantara gedung dianggap sebagai tipe *meshing* sangat halus.

Tabel 3. Dimensi dan *blockage ratio* dari domain

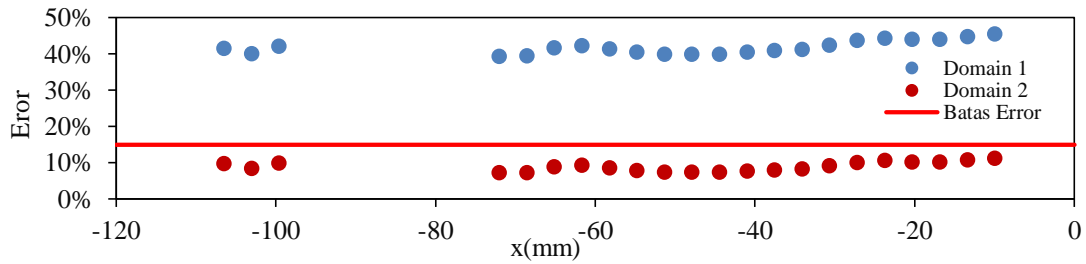
Tipe	Lebar (L) (m)	Tinggi (T) (m)	Panjang (P) (m)	Blockage ratio
Domain 1	0.5	0.5	4.05	14.7%
Domain 2	2.2	1	4.05	1.67%



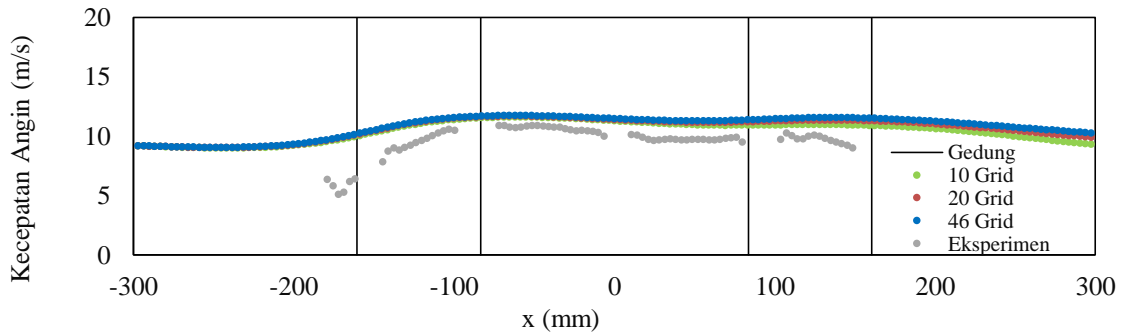
Gambar 10. Kontur kecepatan angin hasil simulasi dari domain 1 (a), dan domain 2 (b)



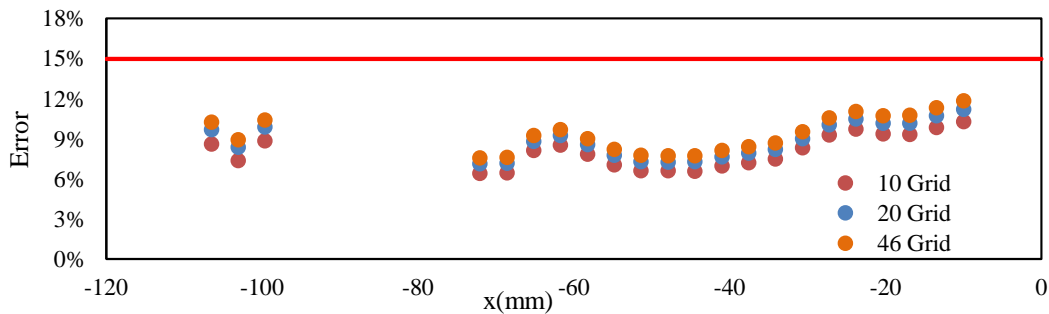
Gambar 11. Perbandingan pengaruh domain komputasi dengan hasil eksperimen



Gambar 12. Perbandingan nilai error akibat pengaruh domain komputasi



Gambar 13. Perbandingan pengaruh tingkat kehalusan *meshing* dengan hasil eksperimen



Gambar 14. Perbandingan nilai error akibat pengaruh tingkat kehalusan *meshing*

Tabel 4. Jumlah elemen, nilai error, dan waktu komputasi

Tingkat kehalusan	Jumlah elemen	Rata-rata nilai error	Waktu komputasi (detik)
Kasar	229800	8.15%	2274
Halus	446940	8.87%	5305
Sangat halus	1308264	10.70%	21809

Berdasarkan hasil simulasi sebelumnya, maka pemeriksaan terhadap tingkat kehalusan *meshing* hanya dilakukan terhadap model dengan domain komputasi yang menghasilkan nilai *blockage ratio* kurang dari 3% saja. Dari ketiga simulasi yang dilakukan didapatkan bahwa ketiga model tersebut menghasilkan hasil yang cukup mendekati hasil eksperimen, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13. Dari hasil simulasi pemodelan selanjutnya dihitung nilai error pada daerah angin yang memiliki kecepatan lebih dari U_0 , dan didapatkan hasil seperti yang disajikan pada Gambar 13. Pada Gambar 14, dapat dilihat bahwa nilai error yang didapatkan masih di bawah nilai error yang diizinkan yaitu 15%. Dengan semakin

halusnya tingkat kehalusan *meshing* tentunya akan membutuhkan waktu komputasi yang jauh lebih banyak.

Pada Tabel 4 tampak bahwa dengan penambahan tingkat kehalusan tidak memberikan nilai error yang jauh berbeda, namun memiliki waktu komputasi yang jauh lebih besar. Dengan jumlah elemen yang besar, rata-rata nilai errornya 10,70% dan waktu komputasi 21,809 detik. Hal ini mungkin saja disebabkan oleh akumulasi dari error numerik yang terjadi selama proses komputasi akibat jumlah elemen yang lebih banyak, sehingga perlu adanya studi lebih lanjut mengenai error komputasi yang terjadi.

Kesimpulan

Dalam melakukan CFD, domain memiliki pengaruh yang sangat besar untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan eksperimen. Domain komputasi harus memiliki *blockage ratio* kurang dari 3% agar tidak terjadi peningkatan kecepatan yang signifikan terutama dalam menggunakan model turbulensi RANS standard $k-\epsilon$, karena model ini akan memberikan nilai prediksi berlebih pada daerah tinjauan yang memiliki kecepatan angin lebih tinggi dari kecepatan referensinya dalam kasus ini ($U/U_0 > 1$). Peningkatan kehalusan pada meshing tidak memberikan hasil yang lebih baik, namun masih tetap dalam batas yang diizinkan. Peningkatan error pada tingkat kehalusan yang lebih tinggi disebabkan oleh besarnya akumulasi error numerik yang disebabkan oleh peningkatan jumlah elemen yang ada, sehingga diperlukan investigasi lebih lanjut untuk menentukan tingkat kehalusan mesh yang optimal. Untuk kebutuhan praktis dengan menggunakan minimal 10 grid di antara gedung sangatlah efisien karena dapat menghasilkan nilai error yang baik dan juga waktu komputasi yang relatif cepat.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dapat diselesaikan dengan bantuan dari Program Penelitian, Pengabdian Masyarakat dan Inovasi ITB (P3MI-ITB) periode 2017-2019. Eksperimen dilakukan pada laboratorium terowongan angin kecepatan rendah milik BPPT-BBTA3.

Daftar Pustaka

Chang, C. H., & Meroney, R. N. (2001). Numerical and physical modelling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1325-1334.

Choi, C. k., & Kwon, D. K. (1998). Wind tunnel blockage effects on aerodynamic behavior of bluff body. *Wind and Structures*, 351-364.

Ferziger, J. H., & M.Peric. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer.

Franke, J., Hellsten, A., Schlunzen, H., & Carissimo, B. (2007). *cost best practice guideline for cfs simulation of flows in the urban environment*. Hamburg: University of Hamburg.

Gusto, A. M. (2018). *Laporan Kajian Aerodinamika Model Gedung Menggunakan PIV*. Tangerang Selatan: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.

Jones, D. A., Chapuis, M., Liefvendahl, M., Norrison, D., & Widjaja, a. R. (2016). *"RANS Simulations using OpenFOAM Software"*. Australia: Maritime Platform Division DST Group Science and technology Group.

Kuo, C. Y., Tzeng, C. T., Ho, M. C., & Lai, a. C. (2015). Wind tunnel Studies of a Pedestrian-Level Wind Environment in a Street Canyon between a High-Rise Building with a Podium and Low-Level Attached Houses. *Energies*, 8, 10942-10957.

Mittal, H., Shamara, A., & Gairola, A. (2018). "A review on the study of urban wind at pedestrian level around buildings". *Journal of Building Engineering*, 154-163.

OpenFOAM Ltd (ESI Group). (2018). *OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox User Guide*. Bracknell: OpenFOAM Ltd (ESI Group).

Robertson, E., Choudhury, V., Bhusan, S., & Walters, D. (2015). Validation of OpeFOAM numerical methods and turbulence models for incompressible bluff body. *Computers and Fluids* , 122-145.

Setio, H. D., Sarli, P. W., Sanjaya, Y., & Priambodo, D. (2020). Experimental Study of Wind Flow in a Street Canyon between High-Rise Buildings by Using PIV. *Journal of Engineering and Technology Science, Institute of Technology Bandung*.

Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). "AIJ guidelines for practical application of CFD to pedestrian wind environment around buildings". *Journal of Wind Engineering*, 1749-1761.

Tu, J., Yeoh, G. H., & Liu, C. (2008). *"Computational Fluid Dynamics A Practical Approach"*. Elsevier.

Yosie, R., Mochida, A., Tominaga, Y., Kataoka, H., & Yoshikawa, M. (2005). "Cross Comparisons of CFD Prediction for Wind Environment at Pedestrian Level around Buildings Part 1". *The Sixth Asia-Pasific Conference on Wind Engineering (APCWE-VI)*. Seoul.

Yosie, R., Mochida, A., Tominaga, Y., kataoka, H., Harimoto, K., Nozu, T., & Shirasawa, T. (2007). "Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan". *Journal of Wind Engineering*, 1551-1578.