



Permodelan Numerik Aliran Angin Pada Jalan Antara Bangunan Tinggi Dengan Modifikasi Sudut Datang

*Doni Priambodo¹, Yongky Sanjaya¹, Prasanti Widiasih Sarli¹, Herlien D. Setio¹, Basir²

¹Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

²BPPT-BBTA3, Tangerang Selatan

^{*}r.m.doni.p@gmail.com

Received: 11 Maret 2021 Revised: 6 Januari 2023 Accepted: 11 Januari 2023

Abstract

In fluid dynamics analysis, one of the things to do is to perform numerical modeling validated on the results of experimentation. In numerical modeling of wind flow there are several forms of modeling used including RANS, LES, DNS, etc. where the modeling has its own advantages and disadvantages. Among these models, RANS is a model that has the cheapest computer expense compared to other models so that it has the highest workability. Therefore, rans method testing (Reynolds Averaged Navier Stokes) was conducted to determine the capability of turbulence models in checking wind speed contours on the road between 4 simple symmetrical tall buildings with 0o, 30o, and 45o attack angles validated with the results of experimentation. This research was conducted using RANS modeling (Reynolds Averaged Navier Stokes) and standard turbulence model k-ε and validated using Low Speed Wind Tunnel and PIV (Particle Image Velocimetry). According to the results of the test, U/Uo wind speed conditions obtained in wind modeling with RANS and k-ε standards have errors that are still acceptable.

Keywords: RANS, angle of attack, wind speed contour, low speed wind tunnel

Abstrak

Dalam analisis fluid dynamics, salah satu hal yang harus dilakukan adalah melakukan permodelan numerik yang divalidasi pada hasil eksperimentasi. Pada permodelan numerik dari aliran angin terdapat beberapa bentuk permodelan yang digunakan diantaranya adalah RANS, LES, DNS, dll. dimana permodelan tersebut memiliki keuntungan dan kerugian masing-masing. Diantara permodelan tersebut, RANS merupakan model yang memiliki computer expense yang paling murah dibandingkan model yang lainnya sehingga memiliki workability yang paling tinggi. Oleh karena itu dilakukan pengujian metode RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) untuk mengetahui kapabilitas model turbulensi dalam pengecekan kontur kecepatan angin pada jalan antara 4 bangunan tinggi simetris sederhana dengan sudut serang 0°, 30°, dan 45° yang divalidasi dengan hasil eksperimentasi. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan permodelan RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) dan model turbulensi standard k-ε dan di validasi menggunakan Low Speed Wind Tunnel dan PIV (Particle Image Velocimetry). Menurut hasil dari pengujian, didapatkan kondisi kecepatan angin U/Uo pada permodelan angin dengan RANS dan standard k-ε memiliki error yang masih dapat diterima.

Kata Kunci: RANS, sudut datang, kontur kecepatan angin, low speed wind tunnel

Pendahuluan

Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai penelitian mengenai aliran angin diantara bangunan tinggi baik secara numerik maupun eksperimental telah dilakukan, salah satu bidang penelitian yang menjadi perhatian adalah penelitian mengenai pengaruh modifikasi konfigurasi bangunan dan sudut datang angin. Modifikasi yang dimaksud

adalah modifikasi jarak, tinggi, atau lebar bangunan dan sudut datang angin terhadap bangunan. Untuk penelitian ini, akan dilakukan pengamatan terkait modifikasi sudut datang angin terhadap suatu kluster bangunan.

Blocken (2008) melakukan penelitian dengan modifikasi model bangunan dengan mengubah konfigurasi bangunan terhadap arah datang angin

menjadi berbentuk konvergen dan divergen. Dalam penelitian ini, konfigurasi divergen memiliki amplifikasi kecepatan angin yang lebih tinggi daripada konfigurasi konvergen. Hal ini juga menunjukkan bahwa penurunan lebar dari celah antara bangunan berbanding lurus dengan amplifikasi dari kecepatan angin maksimum. Namun, perlu dicatat bahwa penelitian ini diuji pada ketinggian pejalan kaki.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Blocken (2007), mengamati pengaruh dari *wall function* dengan melakukan modifikasi lebar dari celah antara bangunan dengan CFD. Penelitian ini menunjukkan bahwa *horizontal inhomogeneity* dari profil angin memengaruhi hasil simulasi. Selain itu, efek *wind blocking* yang disebabkan oleh arah angin *windward* terhadap bangunan dengan *bluff body* tercatat memiliki kontribusi lebih besar dari *venturi effect* (penambahan kecepatan angin pada celah yang lebih sempit) terhadap kecepatan angin dalam konfigurasi gedung yang konvergen sehingga penurunan kecepatan angin yang dihasilkan lebih besar dari penambahan kecepatan yang diharapkan.

Kuo (2015) melakukan modifikasi perilaku angin pada ketinggian pejalan kaki yaitu pada celah antara banguns dengan melakukan modifikasi dari lebar jalan, tinggi podium, dan arah angin. Penelitian ini menunjukkan bahwa perilaku angin pada ketinggian pejalan kaki dapat dikategorikan ke dalam tiga pola aliran lintasan yang berbeda, yang terdiri dari aliran resistansi (*resistance flow*) dimana terdapat pengurangan kecepatan angin saat melewati celah bangunan, aliran interaksi (*interaction flow*) dimana terdapat penambahan kecepatan angin saat melewati celah bangunan, dan aliran isolasi (*isolated flow*) dimana kecepatan angin tidak berubah saat melewati celah bangunan. Perlu dicatat bahwa penelitian ini hanya mengamati perilaku angin pada ketinggian pejalan kaki, sehingga dibutuhkan penelitian lebih lanjut pada elevasi yang lebih tinggi.

Penelitian oleh Allegrini & Lopez (2016) menunjukan bahwa modifikasi konfigurasi celah antara bangunan dan modifikasi sudut kedatangan angin memiliki kontribusi berbeda terhadap pola aliran dan amplifikasi angin pada celah antara bangunan. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi bangunan yang konvergen terhadap arah datang angin cenderung memiliki kecepatan arah horizontal yang lebih rendah dan kecepatan arah vertikal (*upward*) yang lebih tinggi. Sementara itu konfigurasi bangunan berbentuk divergen berperilaku sebaliknya. Dibutuhkan penelitian lebih lanjut terkait fenomena tersebut. Iqbal & Chan (2016) mengusulkan bahwa konfigurasi dengan ruang tengah kuadrat dengan arah angin yang

berlaku menuju sisi terbuka menghadap angin arah *windward* akan memberikan angin untuk elevasi pejalan kaki yang lebih baik karena konfigurasi ini mengandung pergerakan aliran udara yang lebih efektif.

Pengamatan pengaruh aliran angin tidak beraturan terhadap kondisi angin pada lintasan diantara bangunan tinggi sudah dilakukan. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa lebar lintasan memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap kondisi angin pada lintasan aliran angin yang berliku. Hal ini menunjukkan bahwa aliran angin tidak beraturan menciptakan nilai variable k yang jauh lebih kecil di lorong lebar di dalam gedung pendek daripada di lorong sempit susunan gedung tinggi (Tse, 2017). Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh To & Lam (1995), dengan modifikasi pada konfigurasi oleh bangunan yang terisolasi, sepasang bangunan bersusunan tegak lurus arah datang angin, dan sepasang bangunan yang sejajar arah datang, menunjukkan bahwa dalam setiap konfigurasi, kecepatan angin tertinggi terjadi pada sudut *upstream*.

Perilaku dispersi dari bangunan saat mengalami aliran fluida angin menunjukkan pada area wake yaitu di belakang bangunan apabila ditinjau dari arah *windward*, terdapat kecepatan angin yang sangat rendah dengan intensitas turbulensi yang tinggi (Santos *et al.*, 2009). Penelitian oleh Li *et al.* (2015), melakukan modifikasi model dengan memutar sudut bangunan terhadap arah datang angin agar membentuk celah yang konvergen dan divergen. Penelitian ini menunjukkan bahwa aliran pada celah bangunan dipengaruhi oleh kombinasi *corner streams*. Hal ini juga menunjukkan bahwa celah bangunan yang konvergen tidak menjamin peningkatan kecepatan, tetapi juga dapat memiliki *blocking effect* terhadap angin yang lebih tinggi dibandingkan dengan celah bangunan yang divergen. Hal tersebut dapat dilihat oleh kecepatan angin yang lebih rendah dan koefisien drag yang lebih tinggi pada celah bangunan yang konvergen.

Dalam melakukan simulasi perilaku angin pada formasi bangunan tinggi secara numerik, dilakukan permodelan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada permodelan bangunan yang diamati. Namun, CFD itu sendiri memiliki beberapa limitasi dan harus divalidasi dengan hasil eksperimentasi. Sebagai permodelan yang sederhana secara *computer expense*, maka permodelan Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) dengan model turbulensi *standard k-ε* ditentukan sebagai model yang digunakan pada penelitian ini. Penelitian oleh Yoshie (2007) menunjukan bahwa RANS dengan model turbulensi *standard k-ε* memiliki keuntungan yaitu tingkat *overestimate* rendah terhadap kondisi

aktual yaitu sekitar 10% pada angin kuat dengan ($U/U_{ref} > 1$) dan memiliki *computer expense* yang rendah, namun memiliki kerugian berupa tingkat *underestimate* yang tinggi yaitu mencapai lima kali lipat terhadap kondisi aktual pada angin lemah ($U/U_{ref} < 1$) (Yoshie, 2007). Selain itu, penelitian oleh Tominaga (2008) menunjukkan bahwa model ini memiliki kerugian, yaitu tidak dapat membaca *reverse flow* pada atap (Tominaga, 2008). Penelitian lainnya menunjukkan bahwa model ini melakukan *overpredict* nilai *turbulence kinetic energy* (k) pada aliran terpisah (*separated flow*) pada ujung arah *windward* dari model bangunan (Hang, 2013).

Permodelan numerik tersebut divalidasi dengan hasil yang didapatkan melalui eksperimentasi. Metode eksperimentasi yang digunakan pada penelitian ini adalah *Particle Image Velocimetry* (PIV). Metode ini ditentukan karena memiliki sifat *non-intrusive* atau tidak mengganggu aliran angin. Metode ini memiliki *directional sensitivity* dan *spatial resolution* yang tinggi. Namun, metode ini tidak cocok untuk mengukur daerah di sekitar *boundary layer* karena mengandalkan *tracing particle* sebagai alat bantu pengamatan, sementara *tracing particle* tersebut sulit dilihat pada daerah di sekitar *boundary layer* atau didekat model bangunan. Tujuan dari penelitian ini adalah pemahaman lebih lanjut terhadap perilaku angin diantara bangunan tinggi, khususnya dengan arah datang angin yang berbeda. Pada penelitian ini, diamati empat model bangunan simetris dengan jarak sama sebagai objek pengamatan, dan diamati secara eksperimentasi dengan PIV dan secara numerik dengan RANS *standard k-ε*.

Metode

Pengaturan numerik

Permodelan turbulensi yang dilakukan pada penelitian ini adalah persamaan RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) yaitu dengan permodelan turbulensi *standard k-ε*. Input *standard k-ε* pada persamaan umum Navier Stokes dapat dilihat pada persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_i\varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} P_k \frac{\varepsilon}{k} + C_{2\varepsilon} P_k \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (1)$$

Persamaan *turbulence kinetic energy* (k) dan energi disipasi (ε) dapat dilihat pada Persamaan 2 dan 3

$$k = \frac{3}{2} (u_{avg} I)^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (3)$$

Melalui perhitungan profil angin yang didapatkan melalui eksperimentasi pada kondisi terowongan angin yang kosong, didapatkan nilai *turbulence kinetic energy* (k) yang digunakan pada model sebesar 1,45 sementara itu energi disipasi (ε) yang digunakan sebesar 15,11.

Input kecepatan angin dari bagian *intake* menggunakan generator turbulensi untuk mensimulasikan *Atmospheric Boundary Layer* (ABL) yang didekati oleh persamaan *Power law* dapat dilihat pada persamaan sebagai berikut:

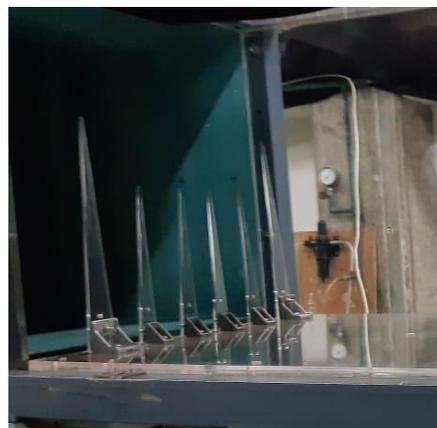
$$U_{(z)} = U_{ref} \times \left(\frac{z}{Z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1)$$

Variabel-variabel dari Persamaan 4 didefinisikan sebagai kecepatan dari ketinggian yang diamati ($U_{(z)}$), kecepatan referensi (U_{ref}) dari tinggi referensi (Z_{ref}), tinggi yang diamati (z), dan eksponen daya yang digunakan dalam persamaan tersebut (α).

Pengaturan eksperimentasi

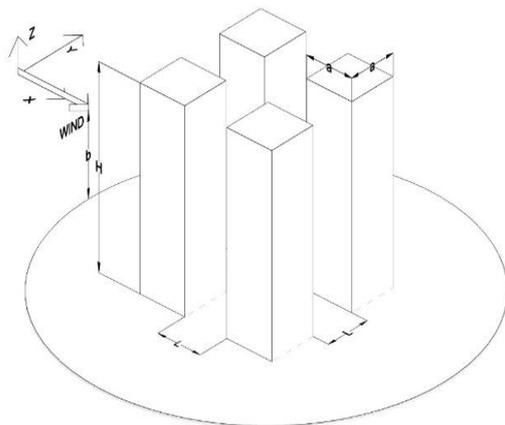
Eksperimentasi ini dilakukan di *low speed wind tunnel* (LSWT) dengan kecepatan angin maksimum 45 m/s. Terowongan angin memiliki panjang total 8,9 m dengan rasio kontraksi 9. Panjang seksi uji dari terowongan ini adalah 1,25 m, dengan penampang persegi panjang 0,5 m x 0,5 m pada saluran masuk yang menjadi 0,51 m x 0,51 m pada saat pengambilan.

Modifikasi aliran dilakukan dengan menggunakan pembuat turbulensi (*turbulence generator*) pada intake untuk mendapatkan aliran angin intensitas turbulensi 10% (gambaran pinggir kota) dan untuk membentuk profil aliran angin agar menyerupai *power law equation*. Pembuat turbulensi yang digunakan pada eksperimentasi dapat dilihat pada Gambar 1.

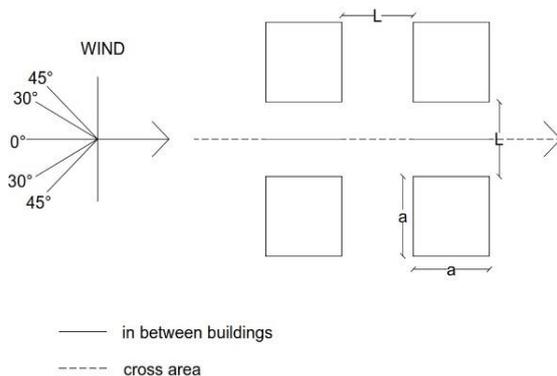


Gambar 1. Pembuat turbulensi pada intake terowongan angin

Model yang digunakan pada penelitian ini adalah empat bangunan tinggi yang identik dengan lebar 32 m, tinggi 100 m, dan jarak sebesar 70 m. Satu model dibuat dengan jarak antara bangunan L sebesar 70 m yang diamati pada sudut 0° , 30° dan 45° . Model tersebut diamati dari tiga sudut berbeda yang terdiri dari 0° , 30° , dan 45° . Konfigurasi bangunan yang digunakan dalam percobaan dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3.



Gambar 2. Penampakan 3-D dari konfigurasi empat bangunan tinggi



Gambar 3. Tampak atas dari konfigurasi empat bangunan tinggi

Daftar semua parameter yang diamati dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1. Pada penelitian ini, skala bangunan yang digunakan adalah 1/420 untuk menyesuaikan dengan dimensi dari *test section* pada terowongan angin.

Data pengukuran kecepatan yang didapatkan pada eksperimentasi diukur pada ketinggian 100 mm. Ketinggian tersebut ditentukan karena keterbatasan dari metode PIV yang digunakan. Namun, parameter seperti kecepatan tetap menggunakan angka yang sebenarnya.

Daftar parameter yang telah diskalakan dapat dilihat pada Tabel 2, dan model bangunan yang

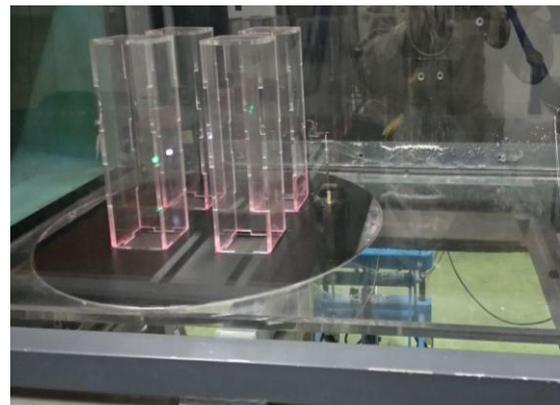
digunakan dalam eksperimentasi terowongan angin pada penelitian ini disajikan pada Gambar 4.

Tabel 1. Parameter yang digunakan pada penelitian

Parameter	Simbol	Nilai
Jarak antara bangunan	L	70 m
Tinggi bangunan	H	100 m
Lebar bangunan	A	32 m
Sudut datang angin		$0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$
Kecepatan angin <i>freestream</i>	U_{ref}	15 m/s
Tinggi <i>freestream</i>	Z_{ref}	126 m
α	α	0,28

Tabel 2. Parameter yang telah diskalakan

Parameter	Simbol	Nilai (mm)
Jarak antara bangunan	L	166,68
Tinggi bangunan	H	238
Lebar bangunan	a	76,2
Tinggi <i>freestream</i>	Z_{ref}	300
Tinggi pengukuran		100



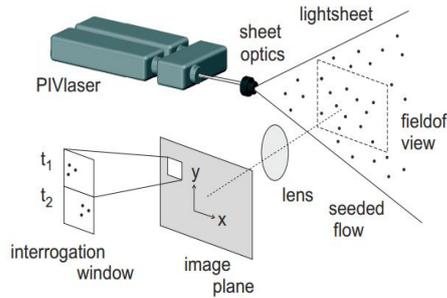
Gambar 4. Model eksperimentasi dalam terowongan angin

Particle Image Velocimeter (PIV)

Pengukuran kecepatan pada eksperimentasi ini dilakukan dengan metode *Particle Image Velocimeter* (PIV), yaitu teknik pengukuran aliran *non-intrusive* melalui pencitraan optik. Prinsip kerja dasar sistem PIV adalah menurunkan kecepatan aliran dari gerakan partikel dalam *interrogation window* dengan menentukan perpindahan Δx dalam setiap *instantaneous velocity* sebesar Δt . Hal tersebut dilakukan dengan melakukan *rapid photo* pada partikel mikroskopis (*tracer particle*) yang bergerak di sepanjang aliran fluida.

Partikel yang bergerak diterangi menggunakan sinar laser dan kemudian direkam menggunakan kamera resolusi tinggi (kamera *Device-Coupled Device*). Data gambar yang direkam dibagi menjadi

beberapa sub-area kecil (*interrogation window*). Dengan menggunakan metode *cross correlation*, partikel perpindahan vektor lokal pada setiap *interrogation window* dapat dihitung sehingga kecepatan dalam bidang pengukuran setiap frame. Selama jumlah partikel dalam aliran yang diamati cukup banyak, kecepatan aliran dalam lembaran laser dapat diketahui. Alur kerja PIV dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Alur kerja dari PIV (BBTA3.TR.20.0002.R, 2020)

Parameter PIV yang digunakan dapat dilihat di Tabel 3. Dalam melakukan pengambilan data dengan PIV, ditentukan *reference height* sebagai acuan *laser sheet* arah horizontal dimana pengambilan data dilakukan.

Tabel 3. Parameter dari PIV

Parameter	Nilai
Frekuensi <i>High Speed Camera</i>	100 Hz
<i>Field of view</i>	400 mm x 300 mm
<i>Interrogation window</i>	64 x 64 pixels
Tebal <i>laser light sheet</i>	2,2 mm
Ukuran <i>tracer particle</i>	0.5 – 1.5 μm

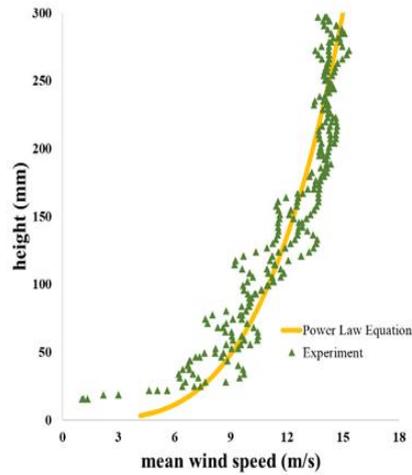
Pada eksperimentasi ini, *reference height* yang ditentukan setinggi 100 mm dari lantai terowongan angin, ketinggian tersebut ditentukan karena PIV memiliki keterbatasan apabila data yang diambil terlalu dekat dengan *boundary layer* yaitu permukaan terowongan angin.

Hasil dan Pembahasan

Profil *Atmospheric Boundary Layer* (ABL)

Dengan menggunakan *turbulence generator* pada *intake* dari terowongan angin didapatkan profil *Atmospheric Boundary Layer* (ABL) dengan intensitas turbulensi 10%. Kecepatan referensi (U_{ref}) yang digunakan dalam simulasi ini adalah kecepatan angin *freestream* 15 m/s, ketinggian referensi (Z_{ref}) 300 mm, dan (α) sebesar 0,28. Profil *Atmospheric Boundary Layer* yang

digunakan dapat dilihat di Gambar 6. Melalui Gambar 6 ini, maka profil kecepatan angin berdasarkan persamaan hukum daya di bagian uji dapat dihitung.



Gambar 6. Hasil profil ABL pada eksperimentasi

Ketinggian yang diamati dalam percobaan ini adalah 100 mm, sehingga kecepatan angin rata-rata pada ketinggian yang sama (U_{ref}) didefinisikan sebagai 11 m/s dengan intensitas turbulensi 10% dapat dihitung dari aliran. Pada permodelan numerik dengan menggunakan persamaan RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) standard k- ϵ , input profil yang digunakan pada *inlet* disesuaikan dengan profil yang didapatkan pada Gambar 6.

Analisis hasil numerik

Dalam melakukan permodelan RANS standard k- ϵ terdapat tahap *meshing* yaitu proses pemisahan *domain* menjadi fragmen yang lebih kecil. Metode *meshing* yang digunakan yaitu *Finite Volume Method* (FVM). Penelitian yang dilakukan oleh Revuz et al. (2012) menyebutkan bahwa dalam menentukan permodelan mesh salah satu variabel yang harus diperhatikan adalah y^+ yang merupakan variabel non dimensional yang menentukan tinggi *first layer thickness* dari *mesh* di sekitar *boundary layer* berdasarkan celah terkecil dari model geometri.

Nilai y^+ yang digunakan dalam perhitungan ini adalah 30 yaitu sesuai dengan ketentuan dari permodelan turbulensi standard k- ϵ . Hasil perhitungan *first layer thickness* dari masing-masing sudut datang angin dapat dilihat pada Tabel 4. Selain ukuran *mesh*, dalam melakukan *meshing* terdapat beberapa parameter yang harus diperhatikan untuk mendapatkan kualitas mesh yang baik. Parameter tersebut adalah *orthogonal angle*, dan *aspect ratio*. Detil ukuran *mesh* dan nilai

maximum dari parameter pada masing-masing model dengan sudut datang angin yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 4 Parameter ukuran mesh

Parameter	Satuan	Sudut- 0°	Sudut 30°	Sudut 45°
Lebar celah terkecil	mm	90,46	32,064	24,376
First layer thickness	m	$6,32 \times 10^{-4}$	$5,86 \times 10^{-4}$	$5,74 \times 10^{-4}$

Tabel 5. Parameter kualitas mesh

Parameter	Sudut 0°	Sudut 30°	Sudut 45°
Jumlah nodes	659.045	1.155.352	1.057.942
Jumlah elements	697.969	1.040.761	939.912
Max orthogonal angle	41,1 (ok)	21,9 (ok)	37,1 (ok)
Max aspect ratio	43 (ok)	58 (ok)	68 (ok)

Tabel 6. Parameter kondisi domain

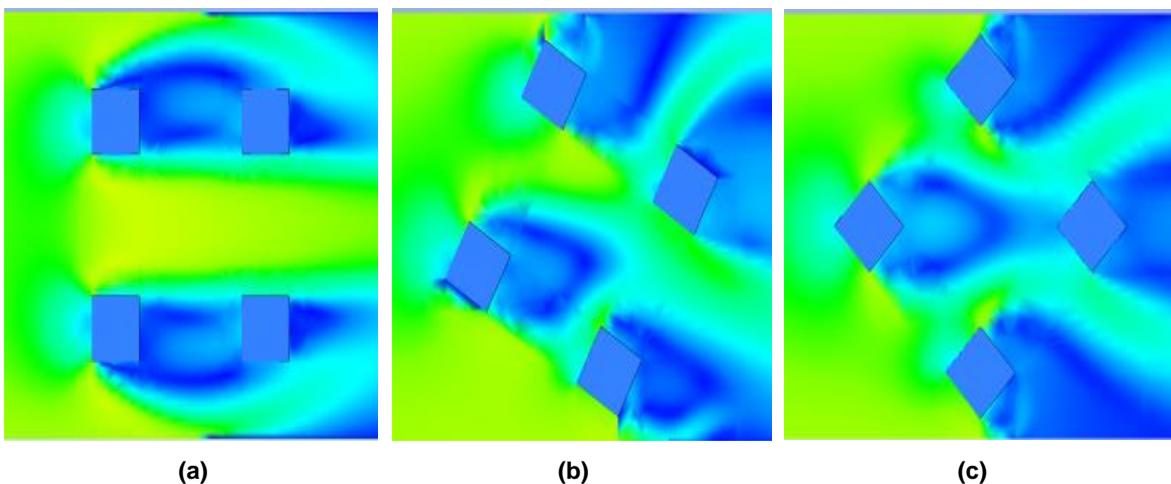
Parameter	Kondisi
Tipe analisis	Steady State
Reference temperature	30° C
Reference pressure	1 atm
Densitas fluida	1,1644 kg/m ³
Viskositas dinamik	0,0000186 kg/ms

Pada Tabel 5 dapat dilihat pada seluruh sudut datang angin didapatkan nilai maksimum dari *orthogonal angle* dan *aspect ratio* berada pada batas baik, sehingga produk yang didapatkan melalui model *mesh* tersebut dapat dianggap *valid*. Tahap

selanjutnya dari permodelan RANS standard k-ε yaitu menentukan parameter dari model fluida yang mengalir di dalam *domain*. Permodelan aliran fluida angin yang dilakukan dibuat dengan kondisi semirip mungkin terhadap keadaan pada eksperimentasi. Parameter aliran angin yang digunakan pada *domain* dapat dilihat pada Tabel 6. Melalui hasil permodelan RANS standard k-ε didapatkan hasil dari perhitungan kecepatan pada model bangunan tinggi pada masing-masing sudut datang yang berbeda.

Gambar kontur kecepatan angin dapat dilihat pada Gambar 7, dan dapat dilihat perbedaan kontur kecepatan pada sudut datang angin yang berbeda. Dari penelitian Kuo (2015), dapat disimpulkan bahwa aliran di semua sudut dapat didefinisikan sebagai aliran interaksi (*interaction flow*) yang diidentifikasi oleh warna hijau muda pada sudut dari bangunan yang menandakan *jet passage* pada titik tersebut. Kedua aliran pada sudut pintu masuk celah bangunan bagian depan mengalami “interaksi” dan menyatu menjadi sebuah jalur tunggal dengan kecepatan angin yang lebih tinggi (terlihat jelas pada sudut datang angin 0°).

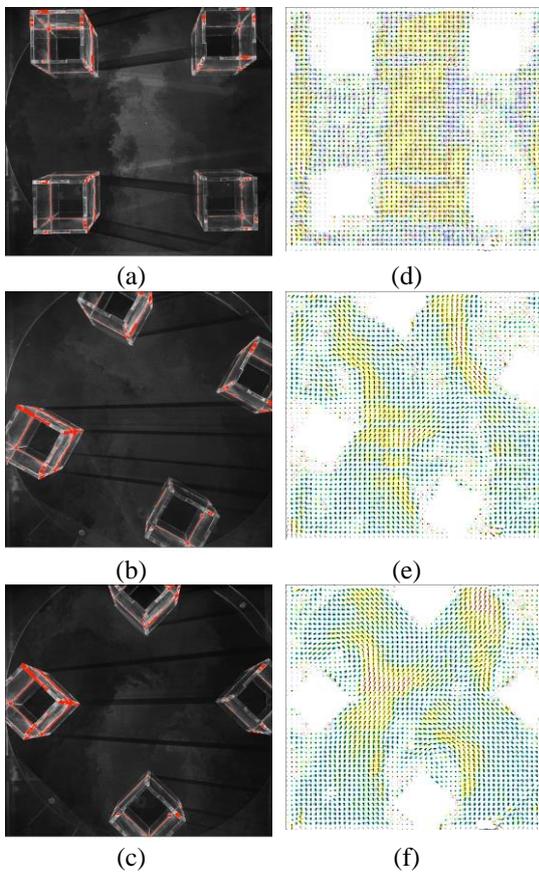
Sedangkan dari penelitian oleh Allegrini dan Lopez (2016), dapat disimpulkan bahwa cluster bangunan dengan konfigurasi sudut 30° dan 45° memiliki titik pertemuan antara dua aliran (celah bangunan kiri dan kanan) di suatu wilayah pada *cross area* meskipun tidak terlihat jelas akibat terdistraksi dengan area hambatan (*blockage*) dari bangunan depan. Pada daerah "*clashing point*" antara dua arah aliran angin tersebut, angin dari kedua saluran bertumbukan dan mengalami perubahan arah menjadi *downward* dan *upward flow*. Sementara itu fenomena ini tidak terjadi dalam aliran sederhana tanpa halangan pada sudut 0°. Dibutuhkan studi lebih lanjut terkait fenomena ini.



Gambar 7. Kontur kecepatan angin pada (a) angle of attack = 0°, (b) angle of attack = 30°, (c) angle of attack = 45°

Validasi hasil numerik dan eksperimentasi

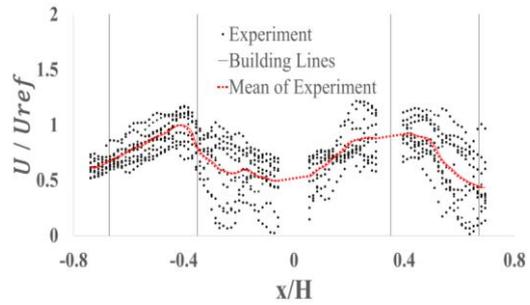
Dalam penelitian ini digunakan istilah-istilah yaitu kecepatan angin rata-rata di lokasi tertentu apabila terdapat bangunan (U), kecepatan angin rata-rata di lokasi yang sama tanpa bangunan (U_{ref}), dan rasio kecepatan angin apabila terdapat bangunan dan tanpa bangunan (U/U_{ref}). Setelah didapatkan hasil pengukuran eksperimentasi dan perhitungan numerik, maka hasil kedua metode tersebut dapat dikomparasi. Kedua nilai tersebut dibandingkan menjadi suatu rasio, untuk mengkategorikan suatu wilayah. Wilayah yang ($U/U_{ref} > 1$) ditentukan sebagai angin kuat, sedangkan wilayah yang ($U/U_{ref} < 1$) ditentukan sebagai angin lemah.



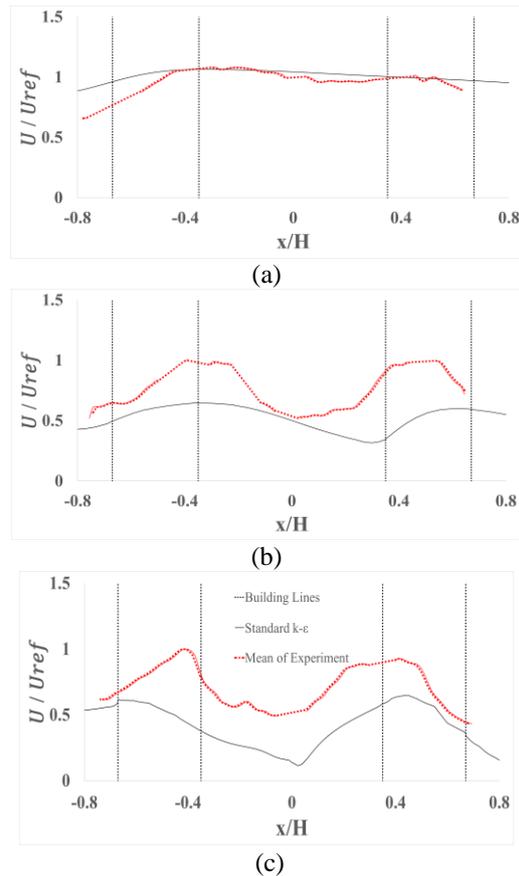
Gambar 8. Perbandingan sudut datang angin yang ditangkap oleh kamera pada (a) sudut 0°, (b) sudut 30°, (c) sudut 45°, dengan vector field yang ditangkap oleh PIV pada (d) sudut 0°, (e) sudut 30°, (f) sudut 45°

Selain itu, didefinisikan tiga wilayah aliran angin yang berbeda, antara bangunan depan, *cross area*, dan antara bangunan belakang. Hasil yang didapatkan oleh PIV adalah data rata-rata kecepatan angin dalam bentuk *vector field* yang didapatkan melalui kamera yang mengambil gambar dari atas terowongan angin. Gambar tampak atas dari eksperimentasi serta *vector field* yang didapatkan

dari PIV dapat dilihat pada Gambar 8. Pada Gambar 8 tersebut dapat dilihat hasil gambar tampak atas dari model bangunan dan data sebaran kecepatan angin yang digambarkan dalam bentuk *vector field*. Data yang digunakan pada analisis adalah data kecepatan angin yang diambil pada tengah bangunan dari intake sampai outlet. Data hasil eksperimentasi dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Hasil eksperimentasi pada sudut datang angin 45°



Gambar 10. Perbandingan kecepatan rata-rata hasil eksperimentasi dan numerik di ketinggian Z (a) sudut datang angin = 0°, (b) sudut datang angin = 30°, (c) sudut datang angin = 45°

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa kekurangan dari hasil eksperimentasi dengan menggunakan metode

PIV yaitu terdapat data yang rusak apabila terdistraksi oleh bayangan pada kamera (dapat terlihat pada $x/H = 0$) (Andika, 2018). Oleh karena itu, dalam melakukan plot rata-rata kecepatan angin, digunakan ekstrapolasi linier pada daerah yang tidak tercatat pada PIV sehingga didapatkan pola aliran angin kontinyu.

Perbandingan grafik kecepatan rata-rata eksperimentasi dan numerik dapat dilihat pada Gambar 10, dimana dapat dilihat perbedaan perilaku kecepatan angin pada sudut datang yang berbeda. Didapatkan amplifikasi kecepatan terbesar terdapat pada sudut datang angin 0° yaitu sebesar 5%, sementara itu pada sudut datang angin 30° dan 45° tidak terjadi amplifikasi sama sekali, bahkan terjadi penurunan kecepatan. Namun perlu diingat bahwa fenomena ini terjadi pada ketinggian eksperimentasi 100 mm. Dibutuhkan studi lebih lanjut pada elevasi lainnya.

Pada Gambar 10 dapat dilihat juga perbedaan hasil eksperimentasi dan numerik yang merupakan keterbatasan (*error*) dari numerik. Pada hasil eksperimentasi terdapat wilayah dimana terjadi kerusakan data dimana dibutuhkan ekstrapolasi rata-rata kecepatan agar terdapat pola aliran yang kontinyu. Namun, daerah ekstrapolasi tersebut tetap memiliki ketidakpastian yang tinggi. Oleh karena itu, pengukuran rata-rata *error* dari numerik dan eksperimen dilakukan pada wilayah sepanjang jalur dimana tidak terjadi kerusakan data. *Error* yang didapatkan pada berbagai sudut pengukuran dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Error dari masing-masing sudut datang angin

Sudut datang angin	Error maksimal angin kuat	Error maks angin lemah
0°	8%	-
30°	-	54%
45°	-	56%

Dari penelitian yang dilakukan oleh Yoshie (2007), diketahui bahwa kelebihan dari standard k- ϵ memiliki keuntungan yaitu memiliki akurasi sampai dengan 10% pada angin kuat ($U/U_0 > 1$) dapat dilihat dari sudut datang angin 0° dimana maksimum *error* yang didapat hanya mencapai 8%. Sementara itu, kerugiannya yaitu data yang dihasilkan memiliki perbedaan atau *error* yang mencapai 80% pada daerah dengan angin lemah ($U/U_0 < 1$) dapat dilihat dari sudut datang angin 30° dan 45° dimana pada sudut 30° *error* maksimum adalah 54% dan pada sudut 45° *error* maksimum adalah 56%. Dari Tabel 4. dapat dilihat *error* yang didapatkan pada sudut datang angin 0°

lebih kecil dari sudut datang angin 30° dan 45° karena sebagian besar aliran angin pada sudut datang 0° terletak pada angin kuat.

Kesimpulan

Pada hasil numerik dan eksperimentasi, amplifikasi kecepatan terbesar terdapat pada sudut datang angin 0° sementara itu, pada sudut datang angin 30° dan 45° terjadi penurunan kecepatan angin. Jenis aliran di ketiga sudut angin dapat didefinisikan sebagai *interaction flow* yang diidentifikasi oleh dua aliran sudut di sudut pintu masuk celah bangunan mengalami interaksi dan menyatu menjadi *single jet passage* dengan kecepatan yang lebih tinggi. (terlihat paling jelas pada sudut datang angin 0°).

Namun, pada sudut datang angin 30° dan 45° terlihat penurunan kecepatan pada daerah *leeward* dari bangunan paling depan memiliki pengaruh terbesar terhadap hasil kecepatan yang dihasilkan. Pada *cross area* pada sudut datang angin 30° dan 45° terjadi titik "*clashing point*" antara dua saluran yang mengakibatkan perubahan arah angin menjadi *upward* dan *downward* pada area ini.

Permodelan turbulensi standard k- ϵ memiliki kelebihan pada daerah yang berada atau mendekati angin kuat dimana pada penelitian ini hasil yang didapatkan pada sudut datang angin 0° memiliki *error* maksimum 8%. Namun, keterbatasan permodelan turbulensi standard k- ϵ dapat dilihat pada sudut datang angin 30° dan 45° yang sebagian besar berada pada angin lemah, nilai *error* yang didapatkan lebih tinggi yaitu *error* maksimum 54% pada sudut datang angin 30° dan *error* maksimum 56% pada sudut datang angin 45° .

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

- Allegrini, J., & Lopez, B. (2016). The Influence of angular configuration of two buildings on the local wind climate. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 156, 50-61.
- Andika, M. G. (2018). *Laporan Kajian Aerodinamika Model Gedung Menggunakan PIV*. Tangerang Selatan: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.

- BBTA3.TR.20.0002.R. (2020). Laporan Kajian Aerodinamika Model Gedung Menggunakan PIV di ESWT.
- Blocken, B. (2007). CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings-effect of wall function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, 941-962.
- Blocken, B. (2008). Wind Environmental Conditions in Passages between Two Long Narrow Perpendicular Buildings. *Journal of Aerospace Engineering*, 21, 280-287.
- Hang, J. (2013). Natural ventilation assessment in typical open and semi-open urban environment under various wind directions. *Building and Environment*, 70, 318-333.
- Iqbal, Q. M., & Chan, A. (2016). Pedestrian level wind environment assessment around group of high-rise cross shaped buildings: Effect of building shape, separation, and orientation. *Building and Environment*, 45-63.
- Kuo, C. Y. (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.
- Li, B., Luo, Z., Sandberg, M., & Jing, L. (2015). Revisiting the "Venturi Effect" in passage ventilation between two non-parallel buildings. *Building and Environment*, 714-722.
- Revuz, J., Hargreaves, D., & Owen, J. (2012). On the domain size for the steady-state CFD modelling of a tall building. *Wind and Structures*, 313-329.
- Santos, J. M., Jr, N. R., Goulart, V., & Mavroidis, I. (2009). Numerical simulation of flow and dispersion around an isolated cubical building: The effect of atmospheric stratification. *Atmospheric Environment*, 5484-5492.
- Stathopoulos, T., & Storms, R. (1986). Wind environmental conditions in passages between buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 19-31.
- To, A., & Lam, K. (1995). Evaluation of pedestrian-level wind environment around a row of tall buildings using a quartile-level wind speed descriptor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 527-541.
- Tominaga, Y. (2008). Comparison of various revised k- ϵ models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape place within the surface boundary layer. *Journal Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, 96, 389-411.
- Yoshie, R. (2007). Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, 95, 1551-1578.