

Studi Komparasi Standar Desain Pembebanan Angin Untuk Bangunan Tinggi

Vincentius Adrian Laurens Nestyapradhana

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
E-mail: vincent.nestyia@gmail.com

Prasanti Widayash Sarli

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
E-mail: pw.sarli@itb.ac.id

Abstrak

Indonesia dan beberapa negara tetangganya mengadopsi standar pembebanan angin internasional seperti ASCE, Eurocode, AIJ, AS/NZS, dan NBCC, yang dikembangkan pada kondisi geografis yang berbeda dibandingkan dengan daerah Asia Tenggara, sehingga diperlukan studi komparasi untuk mengetahui perbedaan fundamental dalam pembebanan angin dan hasil respons struktur yang didapatkan dari masing-masing standar pembebanan dengan kondisi angin di Indonesia. Hasil studi komparasi menunjukkan bahwa secara garis besar, masing-masing standar pembebanan menggunakan pendekatan yang sama dalam menentukan beban angin. Perbedaan utama terdapat pada periode ulang kecepatan angin yang digunakan dan nilai averaging time yang digunakan untuk menghitung faktor hembusan. Kemudian, terdapat juga perbedaan pada faktor-faktor lingkungan yang diperhitungkan untuk mendapatkan tekanan velositas, penggunaan persamaan dan nilai gust effect factor serta koefisien tekanan, dan perhitungan beban angin di masing-masing arah pada tiap standar. Studi komparasi ini juga menunjukkan bahwa untuk sebuah kasus struktur tinjauan berupa bangunan super tinggi yang berlokasi di Jakarta, standar pembebanan ASCE memberikan beban angin dan respons struktur terbesar.

Kata-kata Kunci: Beban angin, komparasi pembebanan angin, respons struktur, standar pembebanan angin, struktur super tinggi

Abstract

Indonesia and its neighboring countries adopt international wind loading standards, such as ASCE, Eurocode, AIJ, AS/NZS and NBCC, which are developed in different geographical conditions compared to South-East Asia region. Thus, a comparative study is needed to see the fundamental differences in wind loading and structure response obtained from each loading standards with Indonesia's wind condition. Comparative study shows that in general, each loading standards use the same approach in calculating wind load. The main differences of each loading standards come from the return period of the wind speed used in calculating wind load and averaging time used in calculating gust factor. Each standard also has differences in the factors used to calculate velocity pressure, the expression and method of gust effect factor and pressure coefficient, and methods for calculating all three directions of wind load in each standard. This study also shows that for the observed structure located in Jakarta used in this study, ASCE standard gives the highest value of design wind load and structure response.

Keywords: Wind load, wind loading comparison, structural response, wind loading standards, supertall structure

1. Pendahuluan

Pembangunan gedung yang semakin tinggi menciptakan tantangan baru secara struktural. Bangunan dengan frekuensi rendah, atau bangunan fleksibel, mengalami efek pembebanan angin yang lebih besar dibandingkan dengan bangunan kaku, karena adanya efek amplifikasi resonansi dari gaya inersia angin (Simiu & Yeo, 2019). Hal ini menyebabkan bangunan tinggi menjadi lebih sensitif terhadap beban angin dibandingkan oleh beban

gempa. Standar pembebanan angin Indonesia, SNI 1727:2020, mengadopsi standar pembebanan dari standar desain Amerika Serikat, ASCE 7-16, dimana kondisi angin pada Amerika Serikat relatif lebih tinggi dibandingkan Indonesia karena angin anti pasat yang dominan pada negara tersebut. Di beberapa negara Asia Tenggara lain yang memiliki kondisi angin yang lebih serupa dengan Indonesia, diadopsi juga berbagai standar desain pembebanan angin, seperti Eurocode yang diadopsi di Singapura, AS/NZS yang diadopsi di Malaysia, dan standar

* Penulis Korespondensi: vincent.nestyia@gmail.com

NBCC yang diadopsi di Thailand. Pada beberapa negara ini, termasuk Indonesia, terdapat perbedaan kondisi angin dan kondisi geografis yang cukup besar dibandingkan dengan kode yang diadopsi. Sebelumnya, Das (1985) telah melakukan komparasi pembebanan angin untuk standar, yaitu standar Amerika Serikat, Kanada, Australia, dan Inggris, namun menggunakan kondisi angin yang berbeda dengan Indonesia dan sudah terdapat perbedaan yang besar pada tiap standar pembebanan yang sekarang berlaku. Karena itu, diperlukan penelitian dalam mengkomparasi berbagai standar ini dengan kondisi yang sesuai di negara-negara Asia Tenggara, khususnya Indonesia, untuk mengidentifikasi perbedaan fundamental dalam pembebanan angin di berbagai standar desain yang berbeda, serta mengevaluasi perbandingan respons bangunan akibat pembebanan angin yang dihitung menggunakan masing-masing standar desain, yang menjadi fokus utama dalam penelitian ini.

2. Pendekatan Umum Pembebanan Angin

Pembebanan angin untuk struktur dalam berbagai standar pembebanan internasional menggunakan pendekatan code-prescriptive yang menganggap beban angin sebagai beban statik ekivalen. Pendekatan ini didasarkan pada teori vibrasi acak (Davenport, 1961, 1963, 1964), yang menggunakan konsep stationary random process untuk mendapatkan kecepatan, tekanan, dan beban angin dengan mengasumsikan bahwa beban angin yang tidak terjadi tidak dapat diketahui secara deterministik karena kompleksitas dari fenomena angin yang sangat tinggi. Pendekatan code-prescriptive mengasumsikan beban angin sebagai beban statik ekivalen (equivalent static wind load/ESWL), yang penurunannya dapat dibagi beberapa tahap seperti pada Error! Reference source not found..



Gambar 1. Rantai pembebanan angin

Kecepatan angin dasar didapatkan menggunakan peta angin yang buat berdasarkan data historis, berdasarkan periode ulang yang ditentukan di tiap standar pembebanan. Kecepatan angin dasar tersebut kemudian akan dihitung menjadi tekanan velositas, yaitu tekanan udara yang disebabkan oleh fluida yang bergerak, yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$q_z = \left(\frac{1}{2} \rho V_z^2 \right) K \quad (1)$$

dimana q_z adalah tekanan velositas pada ketinggian z , ρ adalah densitas udara, V_z adalah kecepatan angin pada ketinggian z , K adalah faktor pengali untuk pengaruh arah angin, eksposur, topografi, dan lain-lainnya. Tekanan velositas yang didapatkan merupakan komponen mean dari tekanan angin.

Untuk mendapatkan tekanan angin puncak, diperlukan faktor pengali berupa faktor pengaruh hembusan (*gust factor*), G , yang dihitung dari fluktuasi respons struktur seperti yang diturunkan oleh Davenport (1967). Faktor pengaruh hembusan ini terdiri dari dua komponen, yaitu faktor pengaruh hembusan untuk beban angin/*gust loading factor*, GLF , dan untuk tekanan velositas, G_q . GLF dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$G = \frac{GLF}{G_q} \quad (2)$$

$$GLF = 1 + 2gI_u\sqrt{B + R} \quad (3)$$

dimana g adalah faktor puncak, I_u adalah intensitas turbulensi, B adalah faktor respons *background*, dan R adalah faktor respons resonansi. Faktor pengaruh hembusan untuk tekanan velositas, G_q , bertujuan untuk memperhitungkan perbedaan *averaging time* yang digunakan dalam penentuan kecepatan angin dasar dan perhitungan respons akibat angin, yang dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$G_q = 2G_v - 1 = 1 + 2g_v I_u \quad (4)$$

Tekanan angin desain kemudian dapat diekspresikan dengan persamaan berikut.

$$p_z = (G C_p) q_z \quad (5)$$

Dimana p_z adalah tekanan angin desain pada ketinggian z , z adalah ketinggian tinjauan, dan C_p adalah koefisien tekanan angin. Kemudian, beban angin dapat dihitung untuk setiap arah bekerjanya: beban *drag*, *lift*, dan torsional. Beban *drag* adalah beban yang bekerja pada arah datangnya angin (*along-wind*), beban *lift* adalah beban yang bekerja tegak lurus dari arah datangnya angin (*across-wind*), dan beban torsional adalah beban yang bekerja sebagai puntir pada struktur.

3. Metodologi Penelitian

Penelitian ini akan dibagi menjadi dua bagian besar. Bagian pertama adalah analisis komparasi parameter dalam pembebanan angin. Pada bagian ini, akan dilakukan komparasi berbagai standar internasional, yaitu ASCE 7-22 (American Society of Civil Engineers, 2022), EN 1991-1-4:2009 (European Committee for Standardization, 2010), AIJ 2015 (Architectural Institute of Japan, 2015), AZ/NZS 1170.2:2021 (Standards Australia & Standards New Zealand, 2021), dan NBCC 2020 (National Research Council of Canada, 2020), yang dibagi menjadi komparasi parameter kecepatan angin dasar & tekanan

velositas serta komparasi tekanan & beban angin desain. Meskipun seluruh standar menggunakan mependekatan teori vibrasi acak untuk memperhitungkan beban angin dinamik, terdapat berbagai parameter yang digunakan dalam tiap standar. Bagian kedua dari penelitian adalah komparasi standar menggunakan struktur beton bertulang yang didesain berdasarkan SNI 2847:2019. Akan dilakukan komparasi respons struktur berupa *story drift*, *story shear*, dan *base shear* dari sumber pembebangan angin yang didapatkan dari perhitungan masing-masing standar pembebangan yang ditinjau.

4. Komparasi Parameter Pembebangan Angin

4.1. Komparasi kecepatan angin dan tekanan velositas

Dalam pembebangan angin, kecepatan angin dasar didefinisikan sebagai kecepatan angin rata-rata yang diukur pada ketinggian 10 meter di atas permukaan tanah pada medan terbuka dan datar, yang didapatkan dari data historis dan dihitung tiap periode tertentu yang disebut sebagai *averaging time*. Dalam penggunaannya, tiap standar menggunakan *averaging time* dan periode ulang kecepatan angin yang berbeda. Perbedaan nilai *averaging time* didasari oleh metodologi dan instrumen meteorologi yang berbeda pada tiap standar, serta karakteristik peristiwa angin yang menjadi perhatian utama pada tiap standar. ASCE dan AS/NZS menggunakan 3 detik (*3-seconds gust wind speed*), AIJ dan Eurocode menggunakan 10 menit (*10-minutes mean wind speed*), dan NBCC menggunakan 1 jam (*1-hour mean wind speed*). Perbedaan periode ulang atau *mean recurrence interval* (MRI) dari kecepatan angin yang digunakan dalam menentukan kecepatan angin dasar didasari oleh perbedaan target reliabilitas terhadap peristiwa angin untuk tiap jenis struktur di tiap standar. ASCE dan AS/NZS menggunakan MRI sesuai dengan kategori risiko dari struktur, seperti yang terlihat pada **Tabel 1**, sedangkan Eurocode, AIJ, dan NBCC memberikan nilai konstan untuk semua kategori

risiko struktur. Dalam perhitungan tekanan velositas, tiap standar memiliki perbedaan dari faktor-faktor apa saja yang diperhitungkan, serta nilai yang digunakan untuk tiap kondisi, seperti yang terlihat pada **Tabel 4**.

1. Faktor pengaruh musim

Faktor ini memperhitungkan perbedaan besarnya kecepatan angin yang dapat terjadi pada musim tertentu, yang digunakan untuk perencanaan struktur sementara yang hanya terkena eksposur angin pada waktu tertentu dalam suatu tahun. ASCE, AS/NZS, dan NBCC tidak memperhitungkan faktor musim ini. Eurocode mendefinisikan faktor musim ini sebagai nilai pengali dari kecepatan angin dasar yang didapatkan, dimana faktor pengali ini diberikan oleh masing-masing negara yang menggunakan Eurocode dalam bentuk *National Annex* untuk memperhitungkan kondisi angin dari masing-masing negara. AIJ mendefinisikan faktor musim sebagai rasio dari kecepatan angin musiman periode 100 tahun terhadap kecepatan angin dasar periode ulang 100 tahun, V_{100} .

2. Faktor arah angin

Faktor ini memperhitungkan besarnya kecepatan angin maksimum yang dapat terjadi pada setiap arah. ASCE memberikan faktor arah angin yang nilainya bervariatif sesuai dari jenis struktur, namun konstan untuk tiap arah struktur. Eurocode memberikan faktor arah angin yang dapat disesuaikan dengan kondisi masing-masing negara melalui *National Annex*, dengan nilai rekomendasi yaitu 1. Pada *National Annex* ini, pada umumnya nilai faktor arah angin dibagi untuk setiap perubahan 30° atau 45° dengan nilai yang berbeda-beda pada masing-masing arah. AIJ dan AS/NZS memberikan faktor arah angin yang nilainya berbeda sesuai dengan kecepatan angin maksimum pada masing-masing arah pada lokasi struktur. NBCC tidak memperhitungkan faktor arah angin, dimana kecepatan angin maksimum di masing-masing arah merupakan satu nilai maksimum dari setiap arah.

Tabel 1. Komparasi *averaging time* & MRI

Parameter	ASCE	Eurocode	AIJ	AS/NZS	NBCC
Averaging Time	3-second gust	10-minutes mean	10- minutes mean	3-second gust	1-hour mean
MRI	Kategori Risiko: I: 300 Tahun II: 700 Tahun III: 1700 Tahun IV: 3000 Tahun	50 Tahun	100 Tahun	Kategori Risiko: 1: 100 Tahun (Non-Siklon) & 200 Tahun (Siklon) 2: 500 Tahun 3: 1000 Tahun 4: 2500 Tahun	50 Tahun

3. Faktor eksposur

Faktor ini memperhitungkan pengaruh dari kekasaran permukaan tinjauan dan elevasi yang ditinjau dari permukaan tanah terhadap kecepatan angin. Profil kecepatan angin didapatkan dengan mengalikan kecepatan angin dasar dengan nilai dari faktor eksposur untuk masing-masing ketinggian. Profil kecepatan angin dipengaruhi oleh kekasaran permukaan dan kategori eksposur, dan tiap standar memiliki pengkategorian eksposur yang berbeda. Karena itu, akan dilakukan pengkategorian umum kategori eksposur menjadi enam kategori, yang berkisar dari pusat kota hingga lautan. **Tabel 2** menunjukkan pengkategorian umum dari masing-masing standar. Terlihat bahwa tidak terdapat pengkategorian khusus untuk kekasaran permukaan yang ekstrem pada beberapa standar, seperti untuk area pusat kota yang dengan kekasaran permukaan yang sangat tinggi maupun daerah pesisir pantai yang dengan kekasaran permukaan yang sangat rendah. Profil kecepatan angin dapat diekspresikan dengan persamaan pangkat maupun persamaan logaritmik. ASCE, AII, dan NBCC menggunakan persamaan pangkat, sedangkan Eurocode dan AS/NZS menggunakan persamaan logaritmik. Persamaan pangkat dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$V_z = b \left(\frac{z}{10} \right)^a V \quad (6)$$

Dimana V_z adalah kecepatan angin pada elevasi z , a dan b adalah koefisien dari medan permukaan, z adalah elevasi tinjauan, dan V

adalah kecepatan angin dasar. Sedangkan itu, persamaan logaritmik dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$V_z = \frac{u^*}{0.4} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) V \quad (7)$$

Dimana V_z adalah kecepatan angin pada elevasi z , u^* adalah kecepatan friksi (*friction velocity*), z_0 adalah panjang kekasaran (*roughness length*), z adalah elevasi tinjauan, dan V adalah kecepatan angin dasar. **Tabel 3** menunjukkan parameter persamaan profil kecepatan pada tiap standar untuk setiap kategori permukaan. Karena pada beberapa standar terdapat beberapa kondisi umum yang tidak didefinisikan dalam kekasaran permukaannya, akan digunakan nilai koefisien dari kategori permukaan terdekat.

Gambar 2 menunjukkan hasil plot profil kecepatan angin menggunakan koefisien yang telah diturunkan sebelumnya untuk kategori eksposur C2 & C4, yang dipilih untuk mewakilkan dua kondisi umum: C2 untuk permukaan kasar (daerah perkotaan/pemukiman) dan C4 untuk permukaan halus (lahan terbuka). Didapatkan profil kecepatan yang serupa antar standar untuk kedua kategori eksposur. Pada kondisi permukaan yang kasar, terlihat bahwa AS/NZS memberikan kecepatan angin terbesar untuk elevasi rendah dan ASCE memberikan kecepatan angin terbesar untuk elevasi tinggi. Pada kondisi permukaan yang halus, AS/NZS memberikan kecepatan angin terbesar untuk elevasi rendah dan AII memberikan kecepatan angin terbesar untuk elevasi tinggi.

Tabel 2. Kategori Eksposur Umum

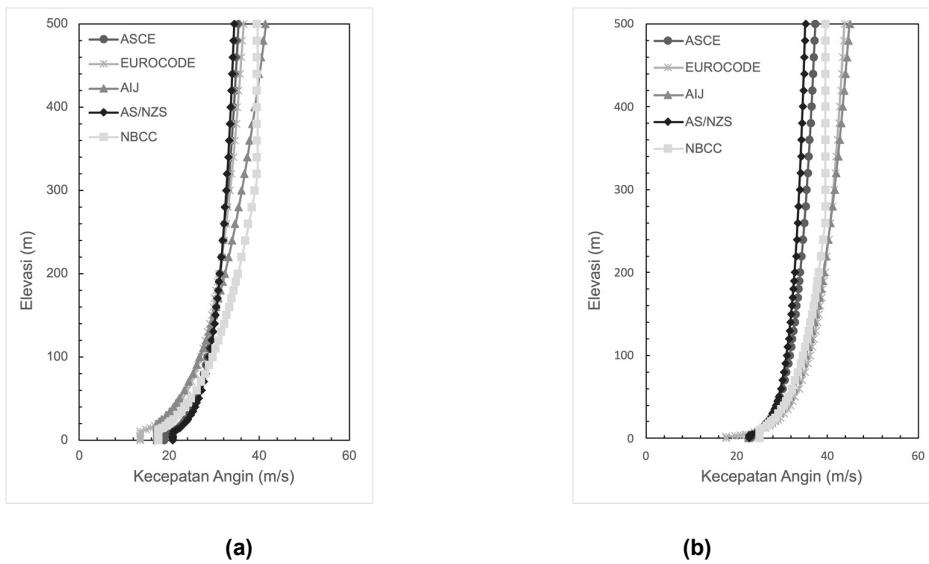
Kategori Umum	Kondisi Permukaan	ASCE	Eurocode	AII	AS/NZS	NBCC
C1	Area pusat kota	A	-	V	4	<i>Rough</i>
C2	Area perkotaan	A	IV	IV	3	<i>Rough</i>
C3	Area pinggiran kota	B	III	III	2.5	<i>Rough</i>
C4	Medan terbuka – darat (padang rumput)	C	II	II	2	<i>Open</i>
C5	Lahan terbuka – air (danau)	D	I	I	1	<i>Open</i>
C6	Laut & pesisir pantai	-	0	I	-	<i>Open</i>

Tabel 3. Komparasi koefisien profil kecepatan angin

Kategori Umum	AISC		Eurocode		AIJ		AS/NZS		NBCC	
	a	b	u^*	z_0	a	b	u^*	z_0	a	b
C1	0.133	0.840	0.094	1.000	0.350	0.394	0.094	2.000	0.500	0.444
C2	0.133			1.000	0.270	0.576	0.094	2.000	0.500	0.444

Tabel 3. Komparasi koefisien profil kecepatan angin (Lanjutan)

Kategori Umum	AISC			Eurocode		AIJ		AS/NZS		NBCC	
	a	b	u^*	z_0	a	b	u^*	z_0	a	b	
C3	0.133	0.840	0.086	0.300	0.200	0.794	0.080	0.200	0.500	0.444	
C4	0.102	0.999	0.076	0.050	0.150	0.997	0.067	0.020	0.280	1.000	
C5	0.087	1.089	0.068	0.010	0.100	1.232	0.058	0.002	0.280	1.000	
C6	0.087	1.089	0.062	0.003	0.100	1.232	0.058	0.002	0.280	1.000	



Gambar 2. Komparasi profil kecepatan angin: kategori eksposur C2 (a) dan C4 (b)

4. Faktor topografi

Faktor ini memperhitungkan pengaruh dari fitur topografi terhadap kecepatan angin, seperti efek dari perubahan bentuk permukaan seperti bukit, lereng, tebing, dan fitur geografis lain yang dapat mengamplifikasi maupun mereduksi nilai dari kecepatan angin. Tiap standar memperhitungkan faktor ini, dengan parameter yang dipengaruhi oleh perbedaan ketinggian pada atas dan bawah bukit, panjang dari kemiringan lereng, dan juga kemiringan dari lereng.

5. Faktor densitas udara

Faktor ini memperhitungkan pengaruh dari elevasi suatu permukaan laut terhadap densitas udara pada elevasi tersebut. Faktor ini diperhitungkan pada standar ASCE dan AS/NZS, sehingga densitas udara yang digunakan dalam menghitung tekanan velositas adalah densitas udara pada permukaan laut, yaitu sekitar $1,225 \text{ kg/m}^3$. Pada standar lainnya, faktor densitas udara ini tidak diperhitungkan

sehingga densitas udara yang digunakan adalah densitas udara pada elevasi tinjauan.

6. Faktor Kepentingan Bangunan

Faktor ini memperhitungkan risiko dan konsekuensi dari kegagalan untuk struktur. Faktor ini memberikan amplifikasi kecepatan angin sebagai *safety factor*, khususnya untuk struktur penting yang memberikan risiko dan konsekuensi yang tinggi, seperti rumah sakit dan fasilitas penting lain. ASCE dan AS/NZS memperhitungkan faktor ini dengan menggunakan kecepatan angin dengan MRI yang lebih tinggi untuk kategori bangunan yang lebih tinggi untuk memenuhi target reliabilitas tiap kategori risiko. Eurocode dan AIJ memperhitungkan faktor ini dengan memberikan faktor pengali yang akan memberikan amplifikasi nilai kecepatan angin dasar untuk MRI yang lebih besar. NBCC memperhitungkan faktor ini dengan faktor yang mengamplifikasi/mereduksi nilai kecepatan angin dasar sesuai dari kategori risikonya.

Tabel 4. Komparasi Parameter Tekanan Velositas

Parameter	ASCE	Eurocode	AIJ	AS/NZS	NBCC
Faktor Musim	—	C_{season}	K_S	—	—
Faktor Arah Angin	K_d	C_{dir}	K_D	M_d	—
Faktor Eksposur	K_z	C_r	E_r	$M_{z,cat}$	C_e
Faktor Topografi	K_{zt}	C_o	E_g	M_h	C_t
Faktor Densitas Udara	K_e	—	—	M_e	—
Faktor Kepentingan	—	—	—	—	I_W
Elevasi Tinjauan	Tiap lantai	Tiap lantai	ketinggian referensi, \bar{z}	Tiap lantai	Tiap lantai

4.2. Komparasi tekanan angin desain

Dalam perhitungan tekanan angin desain, tiap standar menggunakan pendekatan yang sama untuk mendapatkan nilai tekanan angin puncak, yaitu dengan menggunakan faktor pengaruh hembusan, G , yang terdiri dari faktor pengaruh hembusan untuk beban angin/gust loading factor, GLF , dan untuk tekanan velositas, G_q . Faktor pengaruh hembusan dapat dihitung berdasarkan dua parameter: perpindahan (*displacement-based*) dan momen lantai dasar (*moment-based*) (Kareem & Zhou, 2003). Dalam perhitungan GLF , beberapa standar membagi faktor puncak menjadi faktor puncak untuk komponen *background* dan resonansi, g_B dan g_R , serta untuk kecepatan angin, g_v . Faktor puncak g dapat diekspresikan menggunakan persamaan dari Davenport (1964) berikut:

$$g = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (8)$$

Tabel 5. Komparasi nilai faktor puncak

Standar	g_B	g_v	g_R	T	v
ASCE	3,4	3.4	$\sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(vT)}}$	3600	f_1
Eurocode	g_R	3.5	$\sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \ln(vT)}}$	600	f_1C
AIJ	g_R	-	$\sqrt{2 \ln(vT)} + 1.2$	600	f_1C
AS/NZS	3,7	3.7	$\sqrt{2 \ln(vT)}$	600	f_1
NBCC	g_R	-	$\sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(vT)}}$	3600	f_1C

Faktor respons *background* memperhitungkan pengaruh respons kuasi-statik struktur akibat hembusan angin dengan frekuensi rendah (di bawah frekuensi natural struktur). Karena pada struktur yang relatif besar hembusan angin bekerja tidak simultan sepanjang permukaan, maka nilai ini akan

dimana v adalah *upcrossing rate*, yang umumnya dapat diambil sebagai frekuensi natural struktur, f_1 , dan T adalah *averaging time* yang digunakan untuk menghitung respons struktur akibat angin.

Tabel 5 menunjukkan komparasi penggunaan nilai puncak pada tiap standar. ASCE dan AS/NZS menggunakan nilai konstan untuk g_B dan g_v , sedangkan untuk parameter g_R menggunakan bentuk persamaan umum faktor puncak maupun dengan sedikit modifikasi. Eurocode menggunakan sebuah nilai tetap untuk g_v , sedangkan untuk g_B dan g_R menggunakan bentuk persamaan umum. AIJ dan NBCC menggunakan persamaan umum untuk mendapatkan g_B dan g_R , dan tidak menggunakan parameter g_v karena menggunakan nilai *averaging time* yang sama dalam perhitungan kecepatan angin dasar dan respons struktur akibat angin.

dipengaruhi oleh dimensi dari struktur. Ukuran dari eddy yang terbentuk akibat turbulensi angin juga dapat mempengaruhi besarnya respons dari struktur, dimana untuk struktur dengan ukuran yang lebih besar dari ukuran eddy yang terbentuk akan menyebabkan turbulensi angin yang tidak seragam

dan menyebabkan respons yang lebih rendah dibandingkan dengan struktur kecil. Hal ini diperhitungkan dengan panjang skala turbulensi (*turbulence length scale*) pada ketinggian referensi \bar{z} , $L_{\bar{z}}$, yang secara umum dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$L_{\bar{z}} = \ell \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\varepsilon}} \quad (9)$$

dimana ℓ dan $\bar{\varepsilon}$ adalah parameter dari panjang skala turbulensi (*turbulence length scale*) untuk tiap kekasaran permukaan. **Tabel 6** menunjukkan perbedaan dari persamaan nilai faktor respons *background* B pada tiap standar. Tiap standar menggunakan pendekatan umum yang sama untuk menghitung faktor respons *background*, yaitu dengan memperhitungkan dua parameter di atas. Akan tetapi, terdapat perbedaan yang cukup besar pada tiap standar dalam mendefinisikan persamaan untuk menghitung faktor respons *background*, khususnya cara memperhitungkan pengaruh dimensi struktur. Hal ini disebabkan oleh penggunaan persamaan empiris yang berbeda pada tiap standar akibat pengembangan riset yang berbeda. ASCE dan Eurocode, menggunakan bentuk persamaan yang serupa, dengan perbedaan pada bagian penyebut. Standar NBCC memberikan persamaan yang cukup berbeda, dimana nilainya diberikan secara grafis yang ditentukan berdasarkan dimensi struktur.

Kemudian, faktor respons resonansi, R , memperhitungkan pengaruh respons struktur dari hembusan angin yang memiliki frekuensi sama dengan frekuensi natural struktur, yang menjadi signifikan pada struktur tinggi dengan frekuensi natural rendah yang mendekati frekuensi natural dari fenomena angin. Nilai faktor respons resonansi R , dapat diekspresikan sebagai fungsi dari faktor

reduksi ukuran (*size reduction factor*) S , faktor energi E , dan rasio redaman dari struktur ζ dengan persamaan sebagai berikut:

$$R = \frac{SE}{\zeta} \quad (10)$$

respons resonansi R yang digunakan pada tiap standar. Tiap standar menggunakan pendekatan umum yang sama dengan mengikuti persamaan di atas, dengan perbedaan pada faktor reduksi ukuran dan faktor energi yang digunakan. Faktor reduksi ukuran, S , memperhitungkan pengaruh pada struktur berukuran besar, dimana terjadi fluktuasi angin yang tidak merata di sepanjang permukaan struktur yang akan mengurangi respons yang terjadi. ASCE memecah faktor reduksi ukuran terhadap ketiga dimensi dari struktur. Eurocode hanya memperhitungkan faktor reduksi ukuran dari panjang (B) dan lebar (D) struktur. AIJ memperhitungkan pengaruh dari dimensi bangunan pada arah datang angin, frekuensi natural, kecepatan angin, dan dengan koefisien untuk profil kecepatan angin yang dipengaruhi oleh kekasaran permukaan. AS/NZS dan NBCC memperhitungkan pengaruh dari dimensi bangunan pada muka arah datang angin (B & H). Perbedaan pada dimensi yang digunakan dalam perhitungan ini didasari dari perbedaan pengembangan riset yang dilakukan dalam menentukan persamaan empiris yang digunakan di tiap standar. Faktor energi, E , memperhitungkan besarnya energi yang terdapat pada turbulensi angin di frekuensi yang dekat dengan frekuensi natural struktur. Pada daerah frekuensi ini, respons struktur menjadi dominan karena adanya resonansi antara angin dengan struktur. Besarnya energi yang terdapat pada frekuensi ini dapat diukur dengan fungsi *power spectral density* (PSD).

Tabel 6. Komparasi faktor respons *background*

Standar	B	$L_{\bar{z}}$
ASCE	$\frac{1}{1 + 0.63 \left(\frac{B + h}{L_{\bar{z}}} \right)^{0.63}}$	$\ell \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\varepsilon}}$
Eurocode	$\frac{1}{1 + 0.9 \left(\frac{B + h}{L_{\bar{z}}} \right)^{0.63}}$ $\frac{4(0.49 - 0.14\alpha)^2}{\left(1 + \frac{0.63 \left(\frac{\sqrt{BH}}{L_{\bar{z}}} \right)^{0.56}}{\left(\frac{H}{B} \right)^k} \right)^2}$	$300 \left(\frac{\bar{z}}{200} \right)^{\bar{\varepsilon}}$
AIJ	$\frac{1}{1 + \frac{0.63 \left(\frac{\sqrt{BH}}{L_{\bar{z}}} \right)^{0.56}}{\left(\frac{H}{B} \right)^k}}$	$100 \left(\frac{\bar{z}}{30} \right)^{0.5}$
AS/NZS	$\frac{1 + \sqrt{0.26(H - z)^2 + 0.46B_{sh}^2}}{L_{\bar{z}}}$	$85 \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{0.25}$
NBCC	$\frac{4}{3} \int_0^{914/H} \frac{1}{1 + \frac{xH}{457}} \frac{1}{1 + \frac{xB}{122}} \frac{x}{(1 + x^2)^{4/3}} dx$	-

Tabel 7. Komparasi faktor respons resonansi

Standar	Faktor Reduksi Ukuran (S)	Faktor Energi (E)	Reduced Frequency (N)
ASCE	$R_h R_b (0.53 + 0.47 R_L)$	$\frac{7.47N}{(1 + 10.3N)^{\frac{5}{3}}}$ (Kaimal et al.)	$N = \frac{f_1 L_z}{V_z}$
Eurocode	$R_h R_b$	$\frac{29.61N}{(1 + 10.2N)^{\frac{5}{3}}}$ (Kaimal et al.)	$N = \frac{f_1 L_z}{V_z}$
AIJ	$S_D (0.57 - 0.35\alpha + 2R\sqrt{0.053 - 0.042\alpha})$	$\frac{3.14N}{(1 + 71N^2)^{\frac{5}{6}}}$ (de Karman & Howarth)	$N = \frac{f_1 L_z}{V_z}$
AS/NZS	$\frac{1}{(1 + 3.5\eta h)(1 + 4\eta b)}$	$\frac{3.14N}{(1 + 70.8N^2)^{\frac{5}{6}}}$ (de Karman & Howarth)	$N = \frac{f_1 L_z (1 + g_v I_z)}{V_z}$
NBCC	$\frac{\pi}{3} \left(\frac{1}{1 + \frac{8}{3}\eta h} \right) \left(\frac{1}{1 + 10\eta b} \right)$	$\frac{1.49N^2}{(1 + 1.49N^2)^{\frac{4}{3}}}$ (Davenport)	$N = \frac{f_1}{V_z}$

Tiap standar menggunakan persamaan spektrum yang berbeda, yang dilatarbelakangi perbedaan penelitian yang menjadi sumber tinjauan pada masing-masing standar. Perbedaan dari kedua parameter ini menyebabkan adanya perbedaan nilai yang dihasilkan pada tiap standar, yang kemudian akan menghasilkan nilai faktor pengaruh hembusan dan nilai beban angin puncak yang berbeda di tiap standar.

Intensitas turbulensi, I_u , adalah rasio antara standar deviasi dengan komponen mean dari kecepatan angin yang berfluktuasi. Nilai ini dapat diekspresikan dengan persamaan logaritmik dan persamaan pangkat. Dalam persamaan logaritmik, nilai intensitas turbulensi dapat secara umum diekspresikan dalam persamaan berikut:

$$I_z = \frac{k_l}{c_0 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (11)$$

dimana c adalah faktor topografi, k_l adalah faktor turbulensi, z adalah ketinggian tinjauan, dan z_0 adalah jarak kekasaran. Sementara itu, dalam persamaan eksponensial nilai intensitas turbulensi

dapat secara umum diekspresikan dalam persamaan berikut:

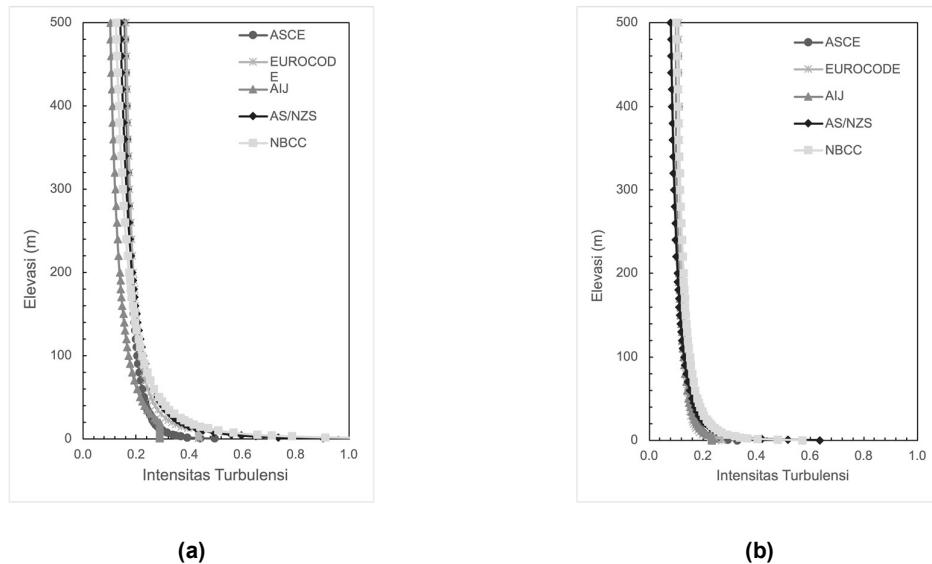
$$I_z = c \left(\frac{10}{z} \right)^d \quad (12)$$

dimana c dan d adalah parameter terkait kategori eksposur dan z adalah ketinggian tinjauan. **Tabel 8** menunjukkan koefisien yang digunakan pada tiap standar untuk setiap kategori umum yang telah didefinisikan pada **Tabel 2**.

Gambar 3 menunjukkan hasil plot intensitas turbulensi dengan koefisien pada **Tabel 8** untuk kategori eksposur C2 & C4. Terlihat bahwa kategori C2 yang menggambarkan permukaan kasar memiliki profil intensitas turbulensi yang lebih besar dibandingkan kategori C4 yang menggambarkan permukaan halus, yang disebabkan friksi yang besar pada daerah perkotaan dengan banyak gangguan aliran udara. Intensitas turbulensi memberikan nilai yang semakin kecil dengan naiknya ketinggian, yang disebabkan pengaruh permukaan yang semakin kecil.

Tabel 8. Komparasi koefisien intensitas turbulensi

Kategori Umum	AISC		Eurocode		AIJ		AS/NZS		NBCC	
	c	d	z_0	z_{min}	c	d	c	d	c	d
C1	0.450	0.167	1.000	10.000	0.453	0.300	0.510	0.360	0.453	0.300
C2	0.300	0.167	1.000	10.000	0.453	0.300	0.510	0.360	0.453	0.300
C3	0.300	0.167	0.300	5.000	0.323	0.300	0.510	0.360	0.323	0.300
C4	0.200	0.167	0.050	2.000	0.259	0.300	0.270	0.250	0.259	0.300
C5	0.150	0.167	0.010	1.000	0.194	0.300	0.160	0.140	0.194	0.300



Gambar 3. Komparasi profil intensitas turbulensi: kategori eksposur C2 (a) dan C4 (b)

Koefisien tekanan angin adalah nilai non-dimensi yang digunakan untuk mendeskripsikan besarnya tekanan angin yang bekerja pada permukaan struktur, yang terdiri dari tekanan eksternal dan tekanan internal. Tekanan eksternal adalah tekanan yang bekerja pada permukaan eksterior struktur karena distribusi aliran angin setelah mengenai struktur. Tekanan internal adalah tekanan yang

4.3. Komparasi beban angin desain

Tabel 9. menunjukkan perbedaan dari bagaimana tiap standar menentukan beban angin desain di tiap arah. Untuk beban *drag*, tiap standar menggunakan pendekatan yang sama. ASCE, Eurocode, dan NBCC menggunakan pendekatan dimana beban *lift* diambil sebagai fraksi dari beban *drag* dan beban torsional diambil sebagai beban angin *drag* yang bekerja dengan eksentrinitas dari pusat massa di tiap lantainya. AIJ menggunakan pendekatan beban *lift* dan torsional sebagai fungsi dari koefisien momen dan faktor dinamik masing-masing untuk arah *across-wind* dan torsional. AS/NZS menggunakan pendekatan yang serupa dengan perhitungan beban *drag*, namun menggunakan koefisien spektrum gaya untuk arah *across-wind*, dan tidak memberikan prosedur untuk memperhitungkan beban torsional. Karena adanya perbedaan yang signifikan dari metode perhitungan beban angin *across-wind* dan

bekerja pada permukaan internal struktur, yang disebabkan oleh aliran angin yang keluar masuk melalui bukaan pada permukaan struktur. Dalam perhitungan beban angin di tiap standar, koefisien tekanan angin ditentukan dari hasil pengujian *wind tunnel* untuk segala bentuk dan jenis struktur. Akan tetapi, terdapat sedikit perbedaan besarnya nilai koefisien tekanan untuk setiap kondisi.

torsional ini, maka beban angin yang didapatkan juga berbeda cukup signifikan antar standar, dibandingkan dengan beban angin *along-wind* yang menggunakan pendekatan yang serupa.

Masing-masing standar pembebanan memiliki kombinasi pembebanan angin yang beragam dalam memperhitungkan seluruh jenis beban angin untuk mendapatkan respons struktur maksimal. Pada Eurocode dan NBCC, hanya terdapat satu kombinasi pembebanan angin, dimana standar tersebut hanya memperhitungkan beban angin di arah *along-wind* (*drag*). ASCE menggunakan beberapa kombinasi pembebanan angin untuk memperhitungkan ketiga arah pembebanan angin, yang ditunjukkan pada **Tabel 10**. AIJ menggunakan tiga kombinasi pembebanan angin untuk memperhitungkan ketiga arah dari pembebanan angin yang masing-masing fokus pada arah beban angin yang berbeda, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 11**.

Tabel 9. Komparasi kombinasi pembebatan ASCE

Parameter	ASCE	Eurocode	AIJ	AS/NZS	NBCC
Beban Drag	$F = p_q A$	$F = p_q A$	$F = p_q A$	$F = p_q A$	$F = p_q A$
Beban Lift	Fraksi beban drag	-	$F_L = 3 \left(C'_L \frac{z}{Z} g_L \sqrt{1 + \phi^2 R} \right) A q_z$	$F_L = (C_{fig} G) A q_z$	-
Beban Torsional	Fraksi beban drag eksentrik	-	$F_T = 1,8 \left(C'_T \frac{z}{Z} g_T \sqrt{1 + \phi^2 R} \right) A b q_{\bar{z}}$	-	-

Tabel 10. Komparasi kombinasi pembebatan ASCE

Parameter	ASCE	Eurocode	AIJ	AS/NZS	NBCC
Beban Drag	$F = p_q A$	$F = p_q A$	$F = p_q A$	$F = p_q A$	$F = p_q A$
Beban Lift	Fraksi beban drag	-	$F_L = 3 \left(C'_L \frac{z}{Z} g_L \sqrt{1 + \phi^2 R} \right) A q_{\bar{z}}$	$F_L = (C_{fig} G) A q_z$	-
Beban Torsional	Fraksi beban drag eksentrik	-	$F_T = 1,8 \left(C'_T \frac{z}{Z} g_T \sqrt{1 + \phi^2 R} \right) A b q_{\bar{z}}$	-	-

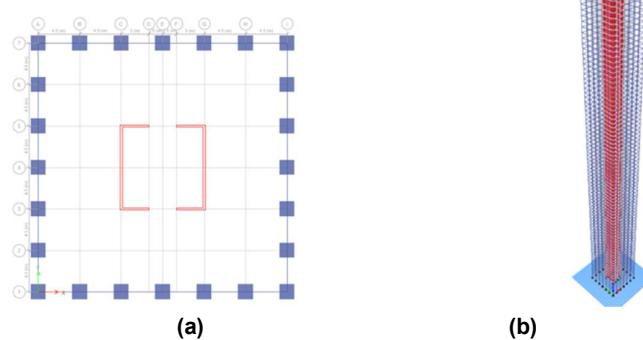
Tabel 11. Komparasi kombinasi pembebatan AIJ

Kombinasi	F_D	F_L	F_T
1	1	0.4	0.4
2	$0.4 + \frac{0,6}{G}$	1	$\sqrt{2 + 2\rho_{LT} - 1}$
3	$0.4 + \frac{0,6}{G}$	$\sqrt{2 + 2\rho_{LT} - 1}$	1

5. Kasus Studi Komparasi Pembebatan Angin

Untuk memberikan gambaran perbedaan perhitungan beban di tiap standar, berikutnya dilakukan komparasi pembebatan angin dan respons dari suatu struktur tinjauan. struktur tinjauan berupa struktur super tinggi 88 lantai dengan dimensi

27 m × 27 m dan tinggi total 309,5 meter yang dapat dilihat pada **Gambar 4**. Komparasi beban angin terdiri dari komparasi tekanan angin desain dan beban angin desain dari tiap standar. Setelah itu, beban angin desain akan dikenakan kepada struktur dan dihitung *story shear* dan *interstory drift* yang dihasilkan dari pembebatan angin.



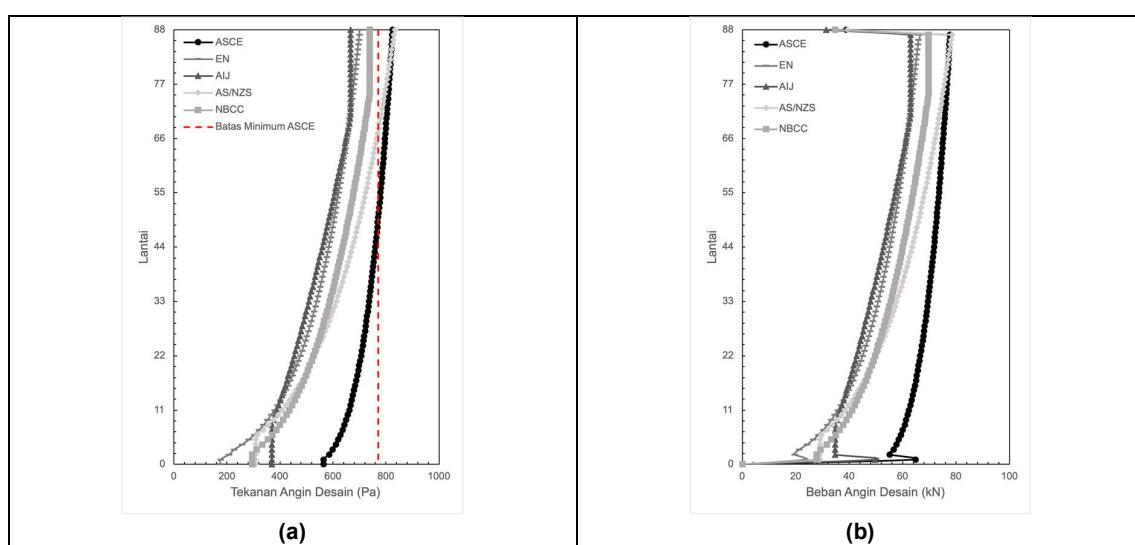
Gambar 4. Ilustrasi Struktur Tinjauan: Denah Struktur (a) dan Tampak Tiga Dimensi (b)

5.1. Komparasi tekanan dan beban angin desain

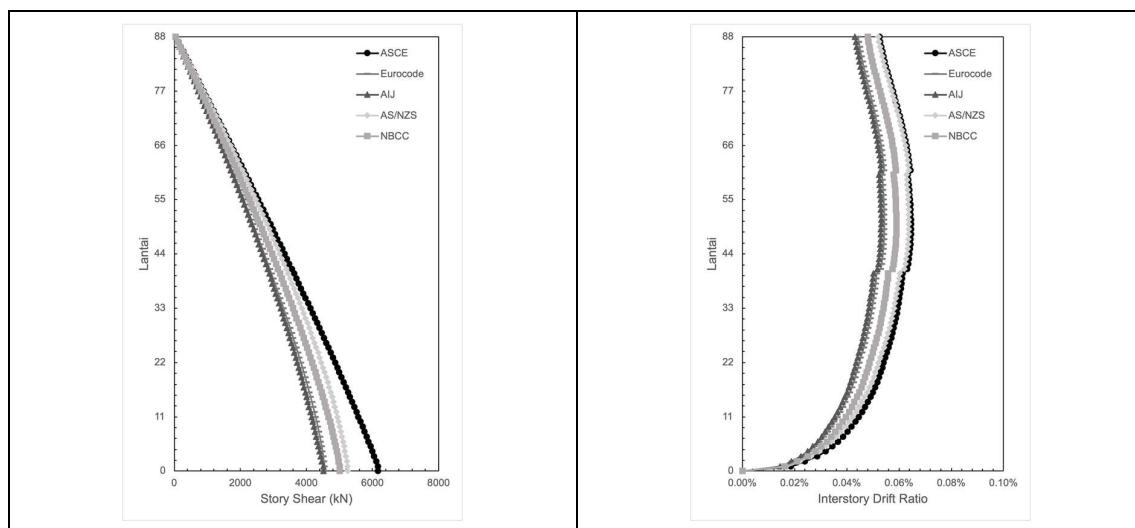
Gambar 5 menunjukkan plot tekanan dan beban angin desain dari hasil perhitungan tiap standar untuk struktur tinjauan. Standar ASCE memberikan tekanan angin desain yang lebih besar secara signifikan dibandingkan dengan standar lain dan standar AIJ memberikan nilai yang paling kecil. Pada lantai atas, terdapat sedikit konvergensi nilai tekanan angin desain. Perbedaan nilai yang cukup signifikan dari tiap standar ini dapat disebabkan karena adanya perbedaan yang cukup signifikan dalam prosedur perhitungan beban, khususnya pada faktor efek hembusan. Selain itu, adanya perbedaan parameter yang digunakan dalam menghitung profil kecepatan angin, khususnya pada pendefinisian

kategori kekasaran untuk daerah pusat kota.

ASCE 7 yang diadopsi oleh SNI 1727:2019 memiliki tekanan angin desain minimum yang diatur pada Pasal 27.1.5, yaitu sebesar 770 Pa , yang nilainya ditentukan dari tekanan angin minimum yang mungkin terjadi menggunakan kecepatan angin terkecil dari peta angin Amerika Serikat. Pada kasus di Indonesia dengan kecepatan angin minimum yang jauh lebih kecil daripada Amerika, penggunaan batas nilai minimum ini memberikan hasil yang sangat *overestimate* dan menjadi tidak praktis untuk diterapkan, dimana seharusnya dilakukan penyesuaian batas tekanan desain minimum dari besarnya kecepatan angin minimum pada peta angin Indonesia.



Gambar 5. Komparasi beban struktur: tekanan angin desain (a) dan beban angin desain (b)



(a)	(b)
-----	-----

Gambar 6. Komparasi respons struktur: *story shear* (a) dan *interstory drift* (b)

5.2. Komparasi *Story Shear & Rasio Interstory Drift*

Gambar 6 menunjukkan plot respons *story shear* dan rasio *interstory drift* dari struktur tinjauan ketika dikenakan beban angin dari tiap standar. Standar ASCE menghasilkan *story shear* paling besar, yang sesuai dengan hasil pembebatan angin dimana ASCE juga menghasilkan beban terbesar. Dari plot rasio *interstory drift* dari struktur tinjauan, didapatkan juga bahwa beban angin ASCE memberikan rasio *interstory drift* yang paling besar secara keseluruhan dan AIJ memberikan nilai terkecil.

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi komparasi dan analisis pembebatan angin yang dilakukan pada penelitian ini, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Dalam pendefinisan kecepatan angin dasar, setiap standar menggunakan *averaging time* yang berbeda serta periode ulang (*mean recurrence interval/MRI*) yang berbeda, sebagai akibat dari perbedaan metodologi dan instrumen meteorologi yang digunakan untuk menangkap data angin oleh tiap standar serta perbedaan target risiko yang ditetapkan pada standar pembebatan tiap negara. ASCE memberikan kecepatan angin dasar paling konservatif karena menggunakan *averaging time* yang terkecil (3-s *gust*) dan lebih merepresentasikan nilai puncak dari fluktuasi angin, serta menggunakan periode ulang kecepatan angin yang jauh lebih besar dibandingkan dengan standar lain.
2. Dalam perhitungan tekanan velositas, terdapat perbedaan faktor-faktor yang diperhitungkan pada masing-masing standar. Perbedaan ini dapat disebabkan karena adanya penyesuaian dengan kondisi geografis dan angin pada negara asal tiap standar. Faktor terbesar yang dapat mempengaruhi nilai tekanan velositas adalah faktor eksposur, yang dapat memberikan profil kecepatan angin yang cukup berbeda antar standar.
3. Dalam perhitungan tekanan angin desain, tiap standar menggunakan pendekatan yang sama untuk mendapatkan komponen puncak yang dipakai untuk desain, yaitu menggunakan faktor pengaruh hembusan yang didasarkan dari teori vibrasi acak. Terdapat beberapa perbedaan dalam perhitungan faktor respons *background* dan resonansi. Dalam perhitungan faktor respons

background, tiap standar menggunakan persamaan empiris yang berbeda dalam memperhitungkan pengaruh dari dimensi struktur terhadap respons struktur. Dalam perhitungan faktor respons resonansi, tiap standar menggunakan persamaan empiris yang berbeda dalam memperhitungkan ukuran struktur dan persamaan spektrum angin yang berbeda dalam memperhitungkan besarnya energi angin yang terdapat pada frekuensi resonansi. Perbedaan ini menyebabkan perbedaan yang cukup signifikan antar standar, khususnya untuk nilai faktor respons *background* dan resonansi, *B* dan *R*.

4. Dalam perhitungan beban angin desain, setiap standar menggunakan metode yang sama dalam menghitung beban angin *along-wind*. Akan tetapi, terdapat perbedaan dari metode yang digunakan dalam menghitung beban angin *across-wind* dan torsional, yang menyebabkan nilai perbedaan beban angin *across-wind* dan torsional yang relatif lebih besar dibandingkan beban angin *along-wind* yang menggunakan pendekatan yang serupa. Terdapat juga perbedaan pada kombinasi arah pembebatan angin pada tiap standar, yang menunjukkan perbedaan tiap standar mengimplementasikan ketiga arah beban angin secara bersamaan.
5. Tekanan angin desain yang didapatkan dari tiap standar pada sebagian besar lantai struktur tinjauan masih lebih kecil dibandingkan tekanan desain minimum pada ASCE 7 yang diadopsi oleh SNI 1727-2020. Hal ini menunjukkan nilai minimum yang sangat konservatif dan tidak menggambarkan kebutuhan untuk digunakan dengan kondisi angin di Indonesia.
6. Pada struktur tinjauan yang digunakan dalam penelitian ini, beban angin desain dari standar pembebatan ASCE 7-22 memberikan nilai terbesar. Beban desain angin berdasarkan standar pembebatan ASCE 7-22 juga nilai respons struktur berupa *story shear* dan rasio *interstory drift* yang terbesar, yang dapat disebabkan penggunaan *averaging time* berupa 3-s *gust*, yang memberikan komponen beban angin komponen *mean* yang besar dibandingkan dengan standar yang lain.

Daftar Pustaka

American Society of Civil Engineers (ASCE). (2016). ASCE 7-16 Minimum Design Loads

- and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. In *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers (ASCE). <https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2022). *ASCE 7-22 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. <https://doi.org/10.1061/9780784415788>
- Architectural Institute of Japan (AIJ). (2015). *AIJ Recommendations for Loads on Buildings (2015)* Architectural Institute of Japan. <https://www.aij.or.jp/>
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2019). *SNI 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan*. www.bsn.go.id
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2020). *SNI 1727:2020 Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*.
- Das, N. K. (1985). *A Comparative Study of Wind Load Standards*. Texas Tech University.
- Davenport, A. G. (1960). *The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds*.
- Davenport, A. G. (1961). The application of statistical concepts to the wind loading of structures. *Institution of Civil Engineers*, 449–471.
- Davenport, A. G. (1963). The buffeting of structures by gusts. *International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, 358–391.
- Davenport, A. G. (1964). Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading. *Institution of Civil Engineers*, 187–196.
- Davenport, A. G. (1967). Gust loading factors. *ASCE Journal of the Structural Division*, 93, 11–34.
- de Karman, T., & Howarth, L. (1938). On the Statistical Theory of Isotropic Turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences*, 164(917), 192–215. <https://doi.org/10.1098/rspa.1938.0013>
- European Committee for Standardization. (2010). *EN 1991-1-4:2005+A 1: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions*.
- Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Izumi, Y., & Cot, R. (1972). *Spectral characteristics of surface-layer turbulence* (Vol. 98).
- Kareem, A., & Zhou, Y. (2003). Gust loading factor - past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1301–1328. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2003.09.003>
- National Research Council of Canada. (2020). *National building code of Canada 2020*. National Research Council of Canada.
- Simiu, E., & Yeo, D. (2019). *Wind Effects on Structures* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Standards Australia, & Standards New Zealand. (2021). *AS NZS 1170.2-2021 Structural Design Actions Part 2 - Wind Actions*.

