

EVALUASI PARAMETER BEBAN ANGIN DAN HUJAN PADA PERENCANAAN ATAP BAJA BUSUR BERDASARKAN ASCE 7-16 DAN SNI 1727:2020: STUDI KASUS GEDUNG PERKANTORAN PUBLIK DI SORONG

Epafroditus Tuwanakotta¹, Yusverison Andika²

^{1,2}Politeknik Saint Paul Sorong
Email: epafroditus79@gmail.com

Abstrak

Struktur atap baja busur (*curved roof*) pada bangunan perkantoran publik di kawasan pesisir memiliki kerentanan tinggi terhadap kombinasi aksi iklim ekstrem, khususnya gaya angkat angin (*uplift wind load*) dan beban genangan air hujan (*ponding load*). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi parameter pembebanan angin dan hujan pada perancangan atap baja busur galvalume Gedung Perkantoran Publik di Sorong, Papua Barat Daya, berdasarkan standar ASCE 7-16 dan SNI 1727:2020. Metodologi penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-evaluatif berbasis kaji ulang dokumen perancangan teknis (*desk review*) tanpa melakukan pemodelan ulang aplikasi. Evaluation difokuskan pada ketaatan kriteria eksposur, kalkulasi tekanan velositas dasar (q_h), koefisien tekanan net (C_{pnet}), intensitas beban genangan hujan, serta keandalan elemen sekunder dan sambungan tumpuan. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa lokasi pesisir menetapkan Kategori Eksposur C dengan kecepatan angin rencana 120 km/jam (33,33 m/s), yang menghasilkan tekanan velositas $q_h = 694,86 \text{ N/m}^2$. Geometri melengkung memicu dominasi gaya angkat (*uplift*) pada seluruh permukaan atap dengan tekanan desain puncak sebesar $-519,75 \text{ N/m}^2$ ($C_{pnet} = -0,88$). Sementara itu, kriteria beban hujan genangan ditetapkan sebesar 50 kg/m^2 ($0,49 \text{ kN/m}^2$) pada lantai dek dan 92 kg/m ($0,90 \text{ kN/m}$) pada rangka atap busur. Seluruh aksi pembebanan terbukti terakomodasi secara aman, ditunjukkan oleh *stress ratio* maksimum rangka pipa utama sebesar $0,728 (< 1,0)$, rasio interaksi gording CNP $150 \times 50 \times 20 \times 3,2$ sebesar $0,405 (< 1,0)$, serta keandalan angkur *baseplate* Ø16 mm dengan panjang tanam 300 mm. Penelitian ini mengonfirmasi bahwa penetapan parameter pembebanan pada dokumen perencanaan eksisting telah memenuhi tingkat keselamatan rekayasa (*engineering safety margin*) dan ketaatan regulasi SNI 1727:2020.

Kata Kunci: Atap Baja Busur, Beban Angin *Uplift*, Genangan Air Hujan, ASCE 7-16, SNI 1727:2020

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan struktur atap baja busur (*curved roof*) pada gedung perkantoran publik kian populer karena efisiensi mekanis dalam membagi gaya serta nilai estetika arsitekturalnya yang tinggi (Rismantojo & Wijaya, 2018; Kareem & Wu, 2019). Namun, penerapan atap melengkung bentang lebar di kawasan pesisir (seperti Kota Sorong) menghadapi struktur pada potensi bahaya interaksi iklim ganda, yaitu tiupan angin kencang laut (*marine boundary layer*) dan curah hujan tropis berintensitas tinggi (Pratama & Sugianto, 2021; O'Rourke & Lewis, 2018).

Secara aerodinamis, kelengkungan permukaan atap memicu percepatan aliran lokal dan pembentukan pusaran angin (*vortex shedding*) yang menghasilkan pola distribusi tekanan non-linear (Ke dkk., 2016; Zhao & Chen, 2020). Fenomena ini menyebabkan dominasi gaya hisap atau gaya angkat (*uplift wind load*) dari zona puncak hingga sisi belakang atap (*leeward*), yang berisiko melepas komponen penutup atap atau merusak elemen sambungan jika kapasitas penahannya tidak memadai

(Setiawan & Kusuma, 2020; Handoyo & Triyono, 2021). Di samping aksi angin, risiko genangan air hujan (*ponding load*) akibat potensi penyumbatan sistem drainase sekunder pada area atap atau dek mekanikal juga menjadi ancaman kritis yang dapat memicu fenomena instabilitas progresif pada elemen sekunder (O'Rourke & Lewis, 2018; Suryatama & Budiman, 2022).

Penerbitan konsensus regulasi pembebanan SNI 1727:2020 (Badan Standardisasi Nasional, 2020) sebagai adopsi identik dari ASCE 7-16 (American Society of Civil Engineers, 2017) menghadirkan pembaruan metodologi kalkulasi beban angin dan hujan yang lebih presisi. Meskipun dokumen perencanaan teknis gedung umumnya telah dibuat, evaluasi akademis yang secara khusus mengkaji tingkat konservatisme penetapan parameter beban angin *uplift* dan genangan hujan pada atap busur di wilayah pesisir Indonesia masih sangat terbatas (Setiawan & Kusuma, 2020; Handoyo & Triyono, 2021). Sebagian besar kajian terdahulu cenderung berfokus pada analisis beban gempa tanpa memberikan porsi evaluasi terpisah pada aksi beban iklim.

Penelitian ini berfokus untuk melakukan evaluasi kriteria dan parameter pembebanan angin serta hujan pada perancangan atap baja busur Gedung Perkantoran Publik di Sorong berdasarkan standar ASCE 7-16 dan SNI 1727:2020. Kajian dilakukan secara deskriptif-evaluatif berbasis kaji ulang dokumen perancangan eksisting tanpa melakukan pemodelan ulang aplikasi. Hasil evaluasi ini diharapkan dapat memberikan pemahaman komprehensif mengenai keandalan parameter desain atap melengkung dalam mengantisipasi risiko cabut angin dan akumulasi air hujan di lingkungan pesisir.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Perilaku Aerodinamis dan Distribusi Beban Angin pada Atap Busur

Struktur atap melengkung atau busur (curved roof) memiliki karakteristik aerodinamis yang sangat berbeda dibandingkan dengan konfigurasi atap datar (flat roof) atau atap pelana (gable roof) (Rismantojo & Wijaya, 2018; Blessmann, 2017). Aliran udara angin yang berinteraksi dengan permukaan lengkung mengalami percepatan lokal (local flow acceleration) pada zona puncak (crest/arch crown) (Ke dkk., 2016). Fenomena ini memicu timbulnya pemisahan batas lapisan aliran (boundary layer flow separation) dan pembentukan pusaran angin (vortex shedding) di sepanjang permukaan melengkung (Zhao & Chen, 2020).

Akibat dari mekanisme aerodinamis ini, distribusi koefisien tekanan eksternal (C_p) pada atap busur bervariasi secara non-linear dari zona angin datang (*windward*) hingga zona angin pergi (*leeward*) (Simiu & Yeo, 2019; Setiawan & Kusuma, 2020). Gaya tekan positif ($+C_p$) umumnya hanya terjadi pada area bawah lereng angin datang yang memiliki sudut kemiringan relatif curam terhadap arah angin (Holmes, 2015). Seiring dengan naiknya elevasi menuju puncak atap, tekanan berbalik secara mendadak menjadi tekanan negatif atau gaya hisap melintang yang ekstrem ($-C_p/C_{pnet}$) (Tamura & Cao, 2018). Tekanan hisap (*uplift*) ini terus berlanjut hingga ke zona *leeward*, sehingga komponen penutup atap (*span deck/galvalume*), gording, serta rangka penopang utama mengalami aksi dominan berupa gaya angkat (*uplift capacity demand*) (Kareem & Wu, 2019; Handoyo & Triyono, 2021).

2.2. Prosedur Kalkulasi Beban Angin Berdasarkan ASCE 7-16 dan SNI 1727:2020

Perhitungan beban angin struktur bangunan gedung di Indonesia mengacu pada SNI 1727:2020 (Badan Standardisasi Nasional, 2020), yang merupakan adopsi identik dari standar internasional ASCE 7-16 (American Society of Civil Engineers, 2017). Berdasarkan ketentuan Prosedur Amplop (*Envelope Procedure*) maupun Prosedur Terarah (*Directional Procedure*), tekanan velositas angin (q_z) pada ketinggian z di atas permukaan tanah dihitung melalui persamaan 1.

$$q_z = 0,613 \times K_z \times K_{zt} \times K_d \times V^2 (N/m^2) \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

- V adalah kecepatan angin dasar rencana (m/s) yang disesuaikan dengan zona iklim geografis dan kategori risiko bangunan (Pratama & Sugianto, 2021).
- K_d adalah faktor arah angin (ditetapkan 0,85 untuk komponen struktur utama penahan gaya angin).
- K_{zt} adalah faktor topografi yang memperhitungkan efek percepatan aliran angin pada bukit atau eskarpmen.
- K_z adalah koefisien eksposur tekanan velositas yang dirumuskan sebagai fungsi dari Kategori Eksposur tanah (A, B, C, atau D) serta ketinggian z :

$$K_z = 2,01 \times \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2/\alpha} \dots\dots\dots (2)$$

Kategori Eksposur C ditetapkan untuk area terbuka dengan hambatan tersebar berukuran kecil, seperti wilayah pesisir pantai dan perairan lepas (Pratama & Sugianto, 2021; Simiu & Yeo, 2019). Selanjutnya, gaya angin desain (F) yang bekerja pada permukaan elemen penutup atap dihitung dengan mempertimbangkan faktor efek tiupan angin (Gust Effect Factor, G) dan koefisien tekanan net eksternal-internal ($C_{pnet} = C_p - C_{pi}$):

$$F = q_h \times G \times C_{pnet} \dots\dots\dots (3)$$

2.3. Pembebanan Hujan dan Fenomena Instabilitas Genangan (Ponding Load)

Pembebanan air hujan (R) pada permukaan atap diatur secara ketat dalam Pasal 8 SNI 1727:2020 (Badan Standardisasi Nasional, 2020) serta panduan teknis ASCE 7-16 (O'Rourke & Lewis, 2018). Standar

menggarisbawahi bahwa perancangan atap tidak hanya memperhitungkan curah hujan aktual harian, tetapi juga harus secara eksplisit mengantisipasi potensi genangan air (*ponding*) apabila sistem drainase utama (*primary drainage*) mengalami penyumbatan total.

Secara teknis, beban genangan air hujan terakumulasi pada lokasi-lokasi atap yang memiliki kemiringan terbatas atau mengalami defleksi lentur berlebih akibat beban mati superimposed (Suryatama & Budiman, 2022). Besar intensitas beban hujan merata (q_{hujan}) dihitung berdasarkan tinggi genangan air (d_s) dan berat jenis air ($\gamma_w = 1,0 \text{ t/m}^3 = 10 \text{ kN/m}^3$):

$$q_{hujan} = \gamma_w \times d_s \dots\dots\dots (4)$$

Fenomena *progressive ponding instability* timbul ketika defleksi gording akibat akumulasi genangan awal memperdalam cekungan atap, sehingga menampung volume air hujan yang lebih besar (O'Rourke & Lewis, 2018; Suryatama & Budiman, 2022). Oleh karena itu, batasan kekakuan (*stiffness requirement*) elemen sekunder seperti gording CNP dan kelengkapan batang penahan sagrod (*track stank*) memainkan peranan vital dalam menjaga kestabilan permukaan atap melengkung (Suryatama & Budiman, 2022).

2.4. Keandalan Elemen Struktur Atap Baja dan Sambungan Angkur Baseplate

Ketahanan elemen baja terhadap kombinasi aksi batas ultimate LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) diatur dalam SNI 1729:2020 (Badan Standardisasi Nasional, 2020), yang mengadopsi standar ANSI/AISC 360-16. Elemen gording profil *C* (CNP) yang menerima kombinasi beban lentur bi-aksial (M_{ux}, M_{uy}) dan gaya geser (V_u) akibat angin dan hujan wajib memenuhi syarat interaksi batas:

$$\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1,0 \dots\dots\dots (5)$$

Sementara itu, gaya angkat angin (*uplift*) yang bekerja secara berlawanan dengan beban gravitasi mentransfer gaya tarik aksial yang signifikan menuju tumpuan dasar atap (Handoyo & Triyono, 2021). Sambungan *baseplate* dan angkur baja mutu tinggi (seperti ASTM A-325) yang tertanam pada kolom beton bertulang harus dievaluasi terhadap interaksi geser dan tarik gabungan (Handoyo & Triyono, 2021).

Keandalan struktur tumpuan dicapai apabila kapasitas tahanan tumpu beton (ϕf_{cn}) dan tahanan cabut angkur (ϕT_n) melampaui gaya angkat berfaktor hasil kombinasi beban terburuk ($0,9D + 1,0W$) (Handoyo & Triyono, 2021; Didaya Karya Konsultan, 2023).

3. METODOLOGI

3.1. Pendekatan dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-evaluatif melalui studi kasus perencanaan struktur atas bangunan gedung publik di wilayah pesisir. Desain penelitian difokuskan pada kaji ulang (*desk review*) dan evaluasi tingkat kesesuaian (*standard compliance review*) parameter pembebanan iklim (angin dan hujan) yang tertuang dalam dokumen laporan kalkulasi struktur eksisting terhadap ketentuan regulasi standar SNI 1727:2020 dan ASCE 7-16.

Penelitian ini murni bersifat evaluatif terhadap kriteria masukan (*input parameters*) dan luasan tekanan desain (*design pressure outputs*) tanpa melakukan analisis struktur atau pemodelan ulang menggunakan perangkat lunak elemen hingga.

3.2. Objek dan Data Penelitian

Objek penelitian ini adalah struktur atap baja busur (*curved roof*) berbahan penutup galvalume dengan penopang gording profil CNP $150 \times 50 \times 20 \times 3,2$ dan rangka utama pipa baja (*Hollow Structural Section*) pada Gedung Perkantoran Publik di Kota Sorong, Papua Barat Daya. Data yang digunakan terdiri dari data sekunder terverifikasi yang bersumber dari dokumen teknik perencanaan:

1. Dokumen Utama: Laporan Kalkulasi Struktur Perencanaan Rekonstruksi Gedung Perkantoran Publik Sorong (Dokumen Revisi 0).
2. Dokumen Pendukung: Gambar Kerja Engineering (*Detail Engineering Design/DED*) potongan melintang atap, denah gording, detail sambungan pipa, serta detail *baseplate*.
3. Peta / Data Situs: Klasifikasi kondisi topografi dan zona wilayah pesisir pantai Sorong.

3.3. Tahapan dan Prosedur Evaluasi

A. Evaluasi Kriteria dan Parameter Beban Angin

Evaluasi parameter beban angin dilakukan dengan membandingkan besaran variabel input

pada dokumen perencanaan terhadap ketentuan ASCE 7-16 / SNI 1727:2020 melalui tahapan berikut:

1. Penetapan Kategori Eksposur dan Topografi: Verifikasi penentuan Kategori Eksposur C untuk kawasan pesisir pantai serta penetapan faktor topografi ($K_{zt} = 1,0$).
2. Kalkulasi Tekanan Velositas (q_z): Evaluasi kecukupan penetapan koefisien eksposur tekanan velositas ($K_z = 1,20$) pada tinggi atap rerata ($h = 23,69$ m) dan faktor arah angin ($K_d = 0,85$) berdasarkan Persamaan:

$$q_z = 0,613 \times K_z \times K_{zt} \times K_d \times V^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \dots\dots (6)$$

1. Penetapan Koefisien Tekanan Net (C_{pnet}): Evaluasi distribusi koefisien tekanan eksternal (C_p) dan internal (C_{pi}) untuk geometri atap busur melengkung pada sisi angin datang (*windward*), angin pergi (*leeward*), serta sisi samping (*sides*).
2. Analisis Beban Angkat (*Uplift Load*): Penilaian besaran tekanan desain ($F = q_h \cdot G \cdot C_{pnet}$) untuk memastikan respon gaya angkat negatif telah diakomodasi dalam kombinasi beban kritis batas ultimate.

B. Evaluasi Parameter Beban Hujan dan Genangan (Ponding)

Evaluasi beban hujan mengacu pada Pasal 8 SNI 1727:2020 dengan prosedur:

1. Evaluasi Beban Hujan Dek Beton: Verifikasi asumsi tinggi genangan air ($d_s = 50$ mm) pada lantai dek penopang *outdoor AC* dan

torren dengan intensitas pembebanan $q_{hujan} = \gamma_w \times d_s = 0,49 \text{ kN/m}^2$.

2. Evaluasi Beban Hujan Rangka Busur: Verifikasi penetapan genangan air hujan ($d_s = 20$ mm) pada alur gelombang span deck rangka busur (bentang 4,6 m) dengan intensitas pembebanan 92 kg/m (0,90 kN/m).
3. Analisis Potensi Instabilitas Genangan: Kaji ulang efisiensi kemiringan atap busur dan kekakuan gording dalam mencegah *progressive ponding instability*.

C. Evaluasi Keandalan Elemen Sekunder dan Sambungan

Guna mengonfirmasi bahwa parameter pembebanan angin dan hujan terakomodasi secara aman oleh struktur atap eksisting, dilakukan evaluasi terhadap angka rasio tegangan (*stress ratio*) dan kapasitas sambungan:

1. Pemeriksaan Profil Baja: Evaluasi batas interaksi gording CNP 150 × 50 × 20 × 3,2 serta rangka pipa utama HSP 88.9 dan HSP 60.3 berdasarkan SNI 1729:2020.
2. Pemeriksaan Sambungan Tumpuan: Evaluasi kapasitas angkur *baseplate* Ø16 mm (ASTM A-325) dan batang penahan tarik *track stank* Ø10 mm dalam menahan gaya tarik aksial akibat *uplift* angin.

3.4. Matriks Indikator Evaluasi Standar

Ringkasan indikator dan kriteria keberhasilan evaluasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Parameter Lingkungan dan Geometri Atap

Parameter Pembebanan	Variabel Evaluasi	Nilai Dokumen Perencanaan	Acuan / Batas Standar	Status Evaluasi
Beban Angin	Kecepatan Angin (V)	120 km/jam (33,33 m/s)	ASCE 7-16 / SNI 1727:2020	Terverifikasi
	Kategori Eksposur	Kategori C (Pesisir)	ASCE 7-16 Section 26.7	Terverifikasi
	Tekanan Velositas (q_h)	694,86 N/m ²	ASCE 7-16 Eq. 29.3-1	Terverifikasi
	Tekanan <i>Uplift</i> Windward	-519,75 N/m ²	ASCE 7-16 Fig. 29.4-1	Terverifikasi
Beban Hujan	Genangan Dek Atap	50 mm (0,49 kN/m ²)	SNI 1727:2020 Pasal 8	Terverifikasi
	Genangan Rangka Busur	20 mm (0,90 kN/m)	SNI 1727:2020 Pasal 8	Terverifikasi

Parameter Pembebanan	Variabel Evaluasi	Nilai Dokumen Perencanaan	Acuan / Batas Standar	Status Evaluasi
Kinerja Struktur	<i>Stress Ratio</i> Rangka Atap	Max. 0,728	SNI 1729:2020 ($\leq 1,0$)	Aman (<i>Comply</i>)
	Interaksi Gording CNP	Max. 0,405	SNI 1729:2020 ($\leq 1,0$)	Aman (<i>Comply</i>)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

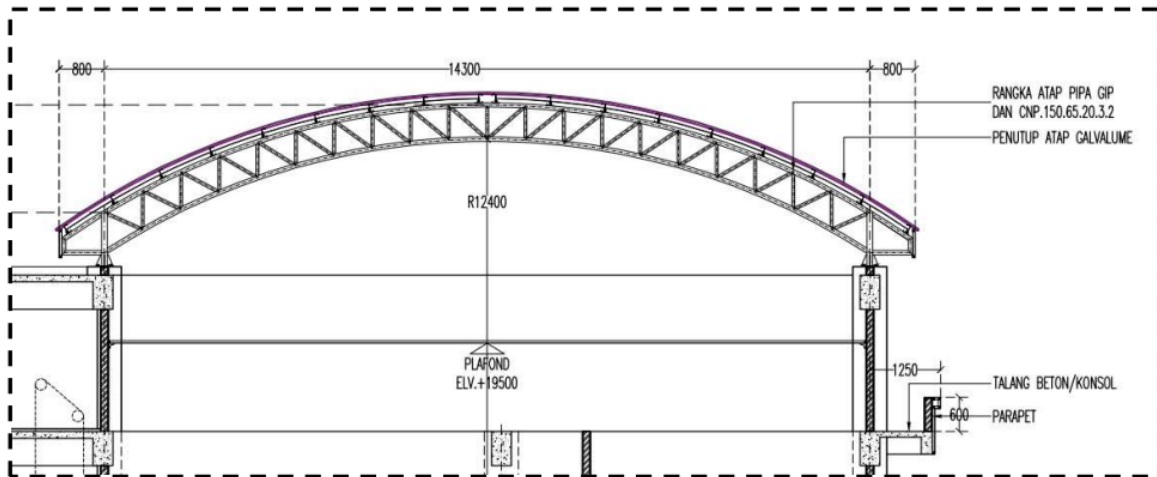
4.1. Geometri dan Kriteria Lingkungan Bangunan

Gedung Perkantoran Publik di Sorong dirancang sebagai bangunan bertingkat dengan struktur rangka utama beton bertulang yang menopang struktur atap baja busur galvalume

pada elevasi puncak +20,70 m. Berdasarkan peta zonasi wilayah pesisir Sorong, lokasi situs tergolong area terbuka tepi laut. Penentuan parameter lingkungan yang digunakan dalam dokumen perencanaan dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Parameter Lingkungan dan Geometri Atap

Parameter Desain	Nilai / Spesifikasi	Acuan Standar
Fungsi Bangunan	Perkantoran Publik (Kategori Risiko II)	SNI 1727:2020 Tabel 1.5-1
Faktor Keutamaan Angin (I_w)	1,00	SNI 1727:2020
Tinggi Bangunan Rerata (h)	23,69 m	ASCE 7-16 Section 26.9
Dimensi Denah ($B \times L$)	20,0 m $\times$ 30,0 m	Rasio $L/B = 1,50$; $h/L = 0,79$
Kecepatan Angin Dasar (V)	120 km/jam (33,33 m/s)	Data Iklim Ekstrem Pesisir Sorong
Kategori Eksposur Angin	Kategori C (Pesisir/Terbuka)	ASCE 7-16 Section 26.7



Gambar 2. Potongan melintang geometri atap busur galvalume, rangka penopang pipa baja, dan kolom penopang WF (Sumber: Laporan Kalkulasi Struktur, Hal. 156)

Geometri dan susunan elemen penopang atap busur pada Gedung Perkantoran Publik di Sorong diperlihatkan pada Gambar 2. Atap dirancang melengkung dengan pelapis penutup galvalume yang ditopang oleh gording profil CNP 150 $\times$ 50 $\times$ 20 $\times$ 3,2. Rangka utama atap menggunakan konstruksi pipa baja melengkung

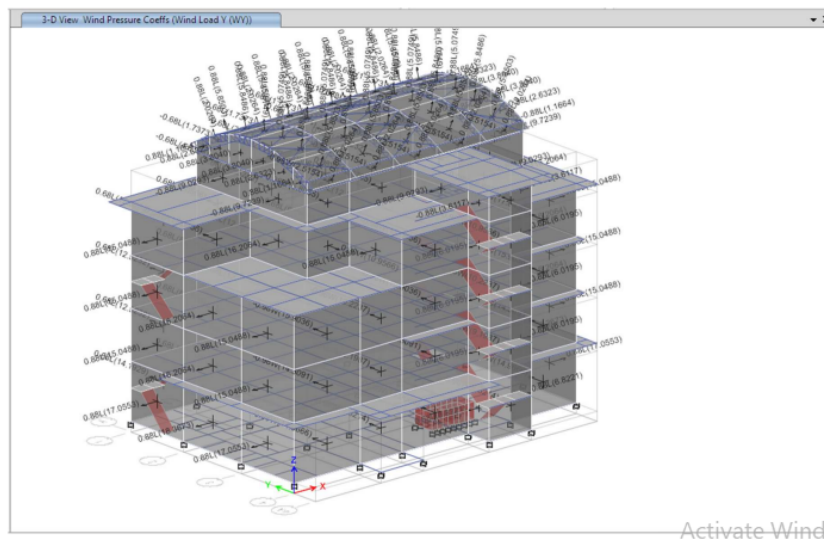
(*Hollow Structural Section*) HSP 88.9 dengan tebal 4,78 mm untuk batang utama (*rafter*) dan HSP 60.3 dengan tebal 3,91 mm untuk batang pengisi (*bracing*). Rangka pipa busur ini selanjutnya bertumpu pada kolom baja profil WF 200 $\times$ 100 $\times$ 5,5 $\times$ 8 yang tertanam di atas struktur utama balok dan kolom beton bertulang

pada elevasi +20,70 m. Konfigurasi melengkung ini memberikan efisiensi ruang bentang bebas sekaligus menciptakan kelengkungan aerodinamis di zona atap puncak.

4.2. Evaluasi Parameter Beban Angin (Wind Load)

Hasil pemodelan distribusi tekanan angin 3D akibat tiupan angin rencana sebesar 120 km/jam (33,33 m/s) diperlihatkan pada Gambar 3. Sebagaimana terlihat pada visualisasi tersebut, aliran angin yang melintasi geometri melengkung menimbulkan pola hisapan

berkelanjutan di seluruh zona permukaan atap busur. Pada sisi angin datang (*windward*), koefisien tekanan net $C_{pnet} = -0,88$ menghasilkan tekanan angkat desain puncak sebesar $-519,75 \text{ N/m}^2$, sementara pada sisi angin pergi (*leeward*), nilai $C_{pnet} = -0,68$ menghasilkan gaya hisap sebesar $-401,63 \text{ N/m}^2$. Gambar ini menegaskan secara visual bahwa seluruh elemen penutup dan rangka atap busur tidak mengalami gaya tekan ke bawah akibat angin, melainkan didominasi oleh gaya angkat (*uplift force*) yang berpotensi mencabut elemen atap dari tumpuannya.



Gambar 3. Pemodelan Distribusi Tekanan Angin 3D dan Pola Respon Tekanan Negatif (*Uplift*) Pada Permukaan Atap Busur (Sumber: Laporan Kalkulasi Struktur, Hal. 50)

A. Tekanan Velositas Dasar

Berdasarkan Prosedur Amplop (*Envelope Procedure*) ASCE 7-16 Bab 29, tekanan velositas dasar dihitung menggunakan Persamaan (1). Parameter masukan yang diverifikasi meliputi:

- Faktor arah angin (K_d) = 0,85.
- Faktor topografi (K_{zt}) = 1,00 (tanah datar).
- Faktor efek tiupan angin (Gust Effect Factor, G) = 0,85 (elemen kaku)
- Koefisien eksposur tekanan velositas (K_z) pada tinggi $z = 23,69 \text{ m}$:

$$K_z = 2,01 \times \left(\frac{23,69}{274,32} \right)^{2/9,5} = 1,20$$

Dengan masukan kecepatan angin $V = 33,33 \text{ m/s}$, diperoleh nilai tekanan velositas pada tinggi atap rerata (q_h):

$$q_h = 0,613 \times 1,20 \times 1,00 \times 0,85 \times (33,33)^2 = 694,86 \text{ N/m}^2$$

Nilai $q_h = 694,86 \text{ N/m}^2$ ini membuktikan bahwa tekanan angin dasar di pesisir Sorong mencapai hampir 0,7 kPa, yang menjadi dasar utama besarnya aksi gaya angin pada permukaan atap.

B. Distribusi Koefisien Tekanan Net dan Aksi Uplift

Hasil analisis pada Tabel 3 menunjukkan bahwa seluruh permukaan atap busur mengalami tekanan negatif (gaya angkat/*uplift*), dengan nilai puncak sebesar $-519,75 \text{ N/m}^2$ pada sisi angin datang (*windward*). Fenomena ini memperkuat teori kerentanan aerodinamis yang dijelaskan oleh Ke dkk. (2016) serta Setiawan dan Kusuma (2020), di mana lengkungan atap busur mempercepat aliran angin di bagian atas sehingga menciptakan efek hisap kontinu.

Kondisi ini mengonfirmasi bahwa kombinasi pembebanan kritis untuk elemen atap bukanlah kombinasi beban mati ditambah gravitasi penuh,

melainkan kombinasi *uplift* kritis ($0,9D + 1,0W$).

Tabel 3. Distribusi Koefisien Tekanan dan Tekanan Angin Desain

Elemen / Sisi Bangunan	Sisi Angin	q_z (N/m^2)	G	C_p	C_{pnet}	Tekanan Desain F (N/m^2)	Vektor Gaya
Atap Busur Baja	Windward (Datang)	695	0,85	-0,70	-0,88	-519,75	Hisap / Uplift
	Leeward (Pergi)	695	0,85	-0,50	-0,68	-401,63	Hisap / Uplift
Dinding Luar	Windward	695	0,85	+0,80	+0,98	+578,82	Tekan
	Leeward	695	0,85	-0,50	-0,68	-401,63	Tekan
	Sisi Samping	695	0,85	-0,70	-0,88	-519,75	Tekan

4.3. Evaluasi Parameter Beban Hujan dan Risiko Genangan (Ponding)

Berdasarkan Pasal 8 SNI 1727:2020, evaluasi pembebanan air hujan dibagi menjadi dua area kritis:

1. Lantai Dek Atap Beton: Area dek penopang peralatan pendukung (*torren* air dan *outdoor AC*) dirancang menampung asumsi genangan air hujan setinggi $d_s = 50$ mm (0,05 m) akibat potensi tersumbatnya lubang *drainage*. Dengan berat jenis air $\gamma_w = 1,0$ t/m³ (10 kN/m³), beban hujan merata ditetapkan:

$$q_{hujan,dek} = 1,0 \text{ t/m}^3 \times 0,05 \text{ m} = 50 \text{ kg/m}^2 \\ = 0,49 \text{ kN/m}^2$$

2. Rangka Atap Busur Galvalume: Untuk permukaan melengkung dengan bentang antar-rangka $B = 4,6$ m, genangan air diasumsikan setinggi $d_s = 20$ mm (0,02 m) pada alur gelombang *span deck*. Beban air hujan terbagi merata pada rangka dihitung:

$$q_{hujan,rangka} = 1,0 \text{ t/m}^3 \times 0,02 \text{ m} \times 4,6 \text{ m} \\ = 92 \text{ kg/m} = 0,90 \text{ kN/m}$$

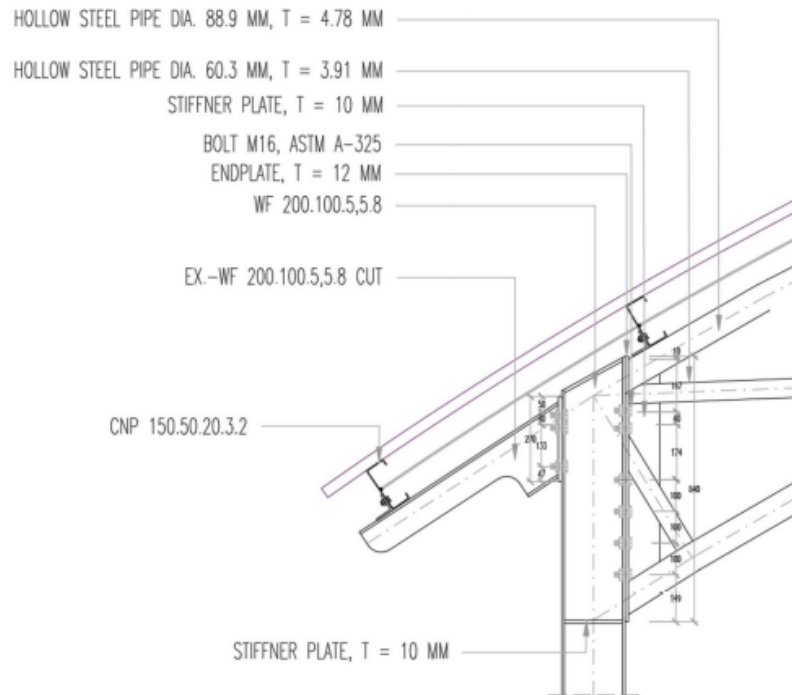
Sesuai dengan kajian O'Rourke dan Lewis (2018) serta Suryatama dan Budiman (2022), penetapan beban genangan hujan sebesar 0,49 kN/m² pada dek dan 0,90 kN/m pada rangka busur terbukti aman dan memadai. Kemiringan alami atap busur pada zona tengah berhasil mengalirkan air hujan secara cepat, sementara kekakuan gording menahan terjadinya akumulasi air lokal di area lereng bawah.

4.4. Keandalan Elemen Atap dan Detailing Engineering

A. Evaluasi Kinerja Profil Rangka dan Gording

Konfigurasi engineering sambungan pipa utama penopang atap busur diperlihatkan secara rinci pada Gambar 4. Untuk menyatukan segmen rangka pipa baja HSP 88,9, digunakan sistem sambungan plat buhul (*gusset plate*) tebal 12 mm dan baut mutu tinggi ASTM A-325 Ø16 mm. Berdasarkan evaluasi kekuatan sambungan, gaya geser berfaktor $V_u = 4,99$ kN dan momen lentur $M_u = 1,78$ kNm terbukti terakomodasi secara aman, di mana tegangan tarik maksimum yang bekerja pada baut baris teratas hanya sebesar 0,98 MPa. Nilai ini jauh berada di bawah kapasitas tarik izin baut ASTM A-325 sebesar 618,75 MPa, sehingga detail sambungan pipa ini memiliki keandalan mekanis yang sangat memadai terhadap getaran maupun tiupan angin pesisir. Untuk mengonfirmasi ketaatan terhadap SNI 1729:2020, hasil evaluasi *stress ratio* elemen baja dari dokumen perencanaan dirangkum pada Tabel 4.

Seluruh elemen struktur menunjukkan *stress ratio* di bawah batas izin 1,0. Gording profil CNP 150 × 50 × 20 × 3,2 dengan nilai rasio interaksi 0,405 menandakan bahwa gording memiliki cadangan kapasitas (*margin of safety*) sebesar 59,5% dalam menahan kombinasi lentur bi-aksial akibat beban mati, hujan, dan gaya tiup angin.



Gambar 4. Detail engineering sambungan plat buhul dan konfigurasi baut mutu tinggi pada rangka pipa atap
(Sumber: Laporan Kalkulasi Struktur, Hal. 177)

Tabel 4. Evaluasi Kinerja Penampang Elemen Atap Baja

Elemen Atap	Profil Eksisting	Mutu Baja (f_y)	Kombinasi Beban Kritis	Stress Ratio Maksimum	Status Keandalan
Rangka Utama (Rafter)	Pipa HSP 88.9 ($t = 4,78$ mm)	SS400 (240 MPa)	$1,2D + 1,6L_r + 0,5W_x$	0,728	Aman ($< 1,0$)
Batang Pengisi (Bracing)	Pipa HSP 60.3 ($t = 3,91$ mm)	SS400 (240 MPa)	$1,2D + 1,6L_r + 0,5W_x$	0,325	Aman ($< 1,0$)
Kolom Penopang Atap	WF 200 $\times$ 100 $\times$ 5,5 $\times$ 8	SS400 (240 MPa)	$1,2D + 1,6L_r + 0,5W_x$	0,699	Aman ($< 1,0$)
Gording (Purlin)	CNP 150 $\times$ 50 $\times$ 20 $\times$ 3,2	SPHC (270 MPa)	Interaksi Lentur-Geser	0,405	Aman ($< 1,0$)

B. Evaluasi Keandalan Sambungan Baseplate dan Bracing

Aksi angin *uplift* sebesar $-519,75 \text{ N/m}^2$ mentransfer gaya tarik aksial menuju tumpuan dasar. Berdasarkan evaluasi dokumen perancangan:

- 1 Batang Penahan Tarik (*Track Stank/Sagrod*): Batang baja polos $\varnothing 10$ mm (BJTP 280) menerima gaya tarik berfaktor $T_u = 2,60$ kN. Tahanan tarik nominal terpakai adalah $\phi T_n =$

19,08 kN, sehingga $T_u < \phi T_n$ (Aman/Sangat Konservatif).

- 2 Sambungan Angkur *Baseplate*: Tumpuan kolom WF 200 $\times$ 100 dilengkapi plat dasar 12 mm dan 4 buah angkur baut ASTM A-325 $\varnothing 16$ mm dengan panjang tanam 300 mm pada kolom beton bertulang.

- Gaya tarik berfaktor per angkur: $T_{u1} = -6,12 \text{ kN} \leq \phi T_n = 55,64 \text{ kN}$ (Aman).
- Gaya geser berfaktor per angkur: $V_{u1} = 10,97 \text{ kN} \leq \phi V_n = 24,73 \text{ kN}$ (Aman)

- Tegangan tumpu beton aktual $f_{cu} = 9,44$ MPa jauh berada di bawah kapasitas tumpu izin beton $\phi f_{cn} = 33,15$ MPa

Sebagaimana ditekankan oleh Handoyo dan Triyono (2021), kecukupan panjang penyaluran tanam angkur ($300 \text{ mm} > L_{min} = 183 \text{ mm}$) menjadi kunci utama dalam mencegah kegagalan cabut (*anchor pull-out failure*) saat terjadi tiupan angin ekstrem pesisir.

4.5. Pembahasan Umum dan Implikasi Perencanaan

Hasil evaluasi secara menyeluruh mengonfirmasi bahwa penetapan parameter beban angin dan hujan pada dokumen perancangan Gedung Perkantoran Publik di Sorong telah memenuhi asas konservatisme rekayasa (*engineering conservatism*) yang disyaratkan oleh ASCE 7-16 dan SNI 1727:2020.

Pemilihan Kategori Eksposur C dengan kecepatan $33,33 \text{ m/s}$ secara akurat merepresentasikan kondisi iklim nyata pesisir Sorong. Integrasi beban genangan air hujan terbukti mampu mencegah timbulnya *progressive ponding instability* pada gording. Dengan demikian, perancangan eksisting terbukti handal, efisien, dan memiliki tingkat keselamatan struktural yang tinggi tanpa memerlukan perubahan dimensi profil maupun pemodelan ulang

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi parameter pembebanan angin dan hujan pada perancangan atap baja busur Gedung Perkantoran Publik di Sorong berdasarkan standar ASCE 7-16 dan SNI 1727:2020, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

- Penetapan Parameter Beban Angin Pesisir: Penetapan Kategori Eksposur C dengan kecepatan angin dasar rencana $V = 120 \text{ km/jam}$ ($33,33 \text{ m/s}$) dan koefisien eksposur $K_z = 1,20$ pada tinggi atap rerata $h = 23,69 \text{ m}$ menghasilkan tekanan velositas dasar $q_h = 694,86 \text{ N/m}^2$. Parameter ini secara akurat dan konservatif merepresentasikan karakteristik iklim pesisir pantai Sorong.
- Dominasi Aksi Gaya Angkat (*Uplift Wind Load*): Geometri atap melengkung memicu distribusi tekanan negatif (hisap) pada seluruh permukaan atap dengan koefisien tekanan net $C_{pnet} = -0,88$ pada sisi angin datang

(*windward*) dan $C_{pnet} = -0,68$ pada sisi angin pergi (*leeward*). Kondisi ini menghasilkan tekanan angkat desain puncak sebesar $-519,75 \text{ N/m}^2$, yang mengonfirmasi bahwa kombinasi pembebanan kritis elemen atap didominasi oleh gaya angkat ($0,9D + 1,0W$).

- Akomodasi Beban Hujan dan Pencegahan *Ponding*: Penetapan asumsi genangan air hujan 50 mm ($0,49 \text{ kN/m}^2$) pada lantai dek beton dan 20 mm ($0,90 \text{ kN/m}$) pada alur gelombang rangka atap busur terbukti memenuhi ketentuan Pasal 8 SNI 1727:2020. Kemiringan atap busur serta kekakuan gording CNP $150 \times 50 \times 20 \times 3,2$ terbukti efektif mencegah terjadinya instabilitas genangan (*progressive ponding instability*).
- Keandalan Elemen dan Detailing Engineering: Seluruh elemen struktur atap menunjukkan tingkat keandalan yang tinggi sesuai SNI 1729:2020, ditunjukkan oleh *stress ratio* maksimum rangka pipa utama sebesar $0,728 (< 1,0)$ dan rasio interaksi gording sebesar $0,405 (< 1,0)$. Aksi gaya angkat angin terakomodasi secara aman oleh sistem ikatan angin (*track stank*) $\varnothing 10 \text{ mm}$ dan sambungan angkur *baseplate* $\varnothing 16 \text{ mm}$ dengan panjang tanam 300 mm pada kolom beton bertulang

6. DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Civil Engineers. (2017). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-16)*. American Society of Civil Engineers.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020a). *SNI 1727:2020: Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020b). *SNI 1729:2020: Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural*. Badan Standardisasi Nasional.
- Blessmann, J. (2017). Wind loads on curved roofs and spherical domes: A review of code provisions. *Journal of Wind Engineering*, 41(3), 89–102.
- Didaya Karya Konsultan. (2023). *Kalkulasi struktur gedung perkantoran publik di Sorong, Papua Barat Daya* (Dokumen laporan teknis Rev. 0). PT. Didaya Karya Konsultan.

- Handoyo, F., & Triyono, H. (2021). Analisis keandalan sambungan baut dan baseplate atap baja terhadap gaya uplift angin. *Jurnal Konstruksi dan Bangunan*, 12(2), 78–89.
- Holmes, J. D. (2015). *Wind loading of structures* (3rd ed.). CRC Press.
- Kareem, A., & Wu, T. (2019). Wind-induced effects on long-span roof structures: Aerodynamic mechanisms and design codes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 188, 142–158.
- Ke, S. T., Ge, Y. J., & Tamura, Y. (2016). Wind pressure distribution and interference effects on large-span curved roofs. *Journal of Structural Engineering*, 142(8), 04016045.
- O'Rourke, M., & Lewis, T. (2018). *Rain loads: Guide to the rain load provisions of ASCE 7-16*. Structural Engineering Institute of ASCE.
- Pratama, A. R., & Sugianto, A. (2021). Analisis kecepatan angin ekstrem dan kategori eksposur pesisir pada perancangan bangunan perkantoran di Papua. *Jurnal Rekayasa Sipil & Lingkungan*, 15(1), 45–54.
- Rismantojo, E., & Wijaya, H. (2018). Studi komparatif kinerja struktur atap baja bentang lebar bentuk busur dan gable terhadap beban angin. *Jurnal Teknik Sipil dan Infrastruktur*, 8(2), 112–121.
- Setiawan, B., & Kusuma, L. (2020). Kajian koefisien tekanan angin eksternal dan internal pada atap melengkung berdasarkan SNI 1727. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 4(1), 22–31.
- Simiu, E., & Yeo, D. (2019). *Wind effects on structures: Modern design with applications*. John Wiley & Sons.
- Suryatama, K., & Budiman, A. (2022). Evaluasi potensi ponding instability pada atap bentang lebar berdasarkan standar pembebanan Indonesia. *Jurnal Teknik Sipil Untar*, 29(3), 201–212.
- Tamura, Y., & Cao, S. (2018). *Wind effects on structures: Advanced aerodynamics and structural safety*. Springer.
- Zhao, Z., & Chen, X. (2020). Aerodynamic characteristics and wind load estimation of long-span arch roofs. *Building and Environment*, 171, 10665.