

## ANALISIS KEKUATAN ATAP KUBAH DENGAN STRUKTUR RANGKA KAYU KELAPA

P. Adi Yasa<sup>1,\*</sup>, Decky Cipta Indrashwara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pendidikan Nasional, Denpasar, Bali, Indonesia

\*Corresponding authors: [adiyasa@undiknas.ac.id](mailto:adiyasa@undiknas.ac.id)

Submitted: 1 December 2022, Revised: 30 January 2023, Accepted: 24 February 2023

**ABSTRACT:** The dome roof truss structure with coconut wood is an innovation initiated by CV. Bali Mandala on one of their projects located in Hawaii. Where the main material uses coconut wood which has been treated first to increase termite and fire resistance. This dome roof has a unique floral patterned truss structure, because of this unusual shape of the structure, so to ensure that the structure is safe and can be marketed widely, it is necessary to complete a feasibility test. The limited facilities for direct wind load testing are the reasons why analysis with three-dimensional (3D) computer modeling is needed. To be able to obtain the appropriate structural behavior between reality and the 3D model, validation was carried out by trial and error on the elasticity of the wood to obtain the appropriate deformation between the structure in the field and the 3D model. The validated 3D model is provided with roof loads, wind and snow loads following ASCE 7-22 provisions for the Hawaii area. From the combination of service load (D+Lr) the maximum deformation is 20.7 mm while the maximum allowable deflection is 30 mm. The tensile, compressive, shear, and flexural capacity of wooden elements, is checked based on the Allowable Stress Design Method (ASD) SNI 7973: 2013, where the compressive, tensile, shear, and flexural stresses due to the load are smaller than the allowable stress. So, from the results of stress control and deflection which are still below the limit value, it can be said that the dome roof with the coconut wood frame structure is safe and can be applied.

**KEYWORDS:** ASCE; allowable stress design; coconut wood; dome roof; validation.

**ABSTRAK:** Struktur atap kubah dengan kayu kelapa merupakan inovasi baru yang dicetuskan oleh CV. Bali Mandala pada salah satu proyek mereka yang berlokasi di Hawaii. Dimana material utama menggunakan kayu kelapa yang telah di treatment terlebih dahulu untuk meningkatkan ketahanan rayap dan api. Atap kubah ini memiliki struktur yang unik yaitu berupa rangka bermotif bunga, karena bentuk struktur yang tidak umum, maka untuk memastikan bahwa struktur aman dan dapat dipasarkan secara luas perlu dilakukan uji kelayakan. Keterbatasan fasilitas untuk uji beban angin secara langsung menjadi alasan diperlukan analisis dengan pemodelan tiga dimensi (3D) pada komputer. Untuk bisa memperoleh perilaku struktur yang sesuai antara kenyataan dan model 3D, maka dilakukan validasi dengan trial and error pada elastisitas kayu hingga memperoleh deformasi yang sesuai antara struktur di lapangan dan model 3D. Model 3D yang sudah tervalidasi diberikan beban atap, beban angin dan salju yang sesuai dengan ketentuan ASCE 7-22 untuk daerah Hawaii. Dari kombinasi beban layan (D+Lr) didapat deformasi maksimum sebesar 20.7 mm sedangkan lendutan maksimum yang diizinkan adalah 30 mm. Untuk kapasitas tarik, tekan, geser dan lentur elemen kayu dicek berdasarkan Metode Desain Tegangan Izin (DTI) SNI 7973:2013, dimana tegangan tekan, tarik, geser dan lentur akibat beban lebih kecil dari tegangan ijinnya. Sehingga dari hasil kontrol tegangan dan lendutan yang masih dibawah nilai batasnya, maka dapat dikatakan atap kubah dengan struktur rangka kayu kelapa aman dan dapat diaplikasikan.

**KATA KUNCI:** ASCE; desain tegangan izin; kayu kelapa; atap kubah; validasi.

© The Author(s) 2020. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

### 1 PENDAHULUAN

Atap kubah adalah salah satu jenis atap yang cukup populer dan banyak digunakan pada bangunan ikonik karena bentuknya yang estetik seperti masjid, gereja, sekolah, kuil dan lain sebagainya. Umumnya penggunaan atap kubah juga dipilih karena dapat memberikan kondisi suhu ruangan yang lebih nyaman, seperti membuat udara lebih sejuk saat musim panas (Faghih & Bahadori, 2011), hal ini terjadi karena kondisi atap yang melengkung dapat menjaga suhu udara tetap rendah sepanjang musim panas dan memantulkan radiasi lebih baik jika dibanding jenis

atap lainnya (Runsheng et al., 2003). Umumnya rangka batang struktur kubah menggunakan material baja dengan pola segiempat atau segitiga, namun untuk meningkatkan estetika bangunan, CV. Bali Mandala berinovasi membangun kubah dengan struktur rangka ekpose bermotif bunga dari material kayu kelapa.

Kayu kelapa dipilih karena memiliki corak yang estetik serta mudah untuk didapat khususnya di daerah tropis seperti Indonesia. Selain sisi estetika, penggunaan kayu kelapa sebagai alternatif dari kayu konvensional dikatakan *environmental friendly* karena jenis ini diambil dari perkebunan rakyat tanpa perlu

merusak hutan (Rangkang et al., 2016). Kayu kelapa masuk dalam kelas awet III serta memiliki berat jenis rata-rata 0.74 (Indrosaptono et al., 2014), agar dapat digunakan secara optimal, jenis kayu yang masuk dalam kelas awet III, IV dan V perlu diawetkan terlebih dahulu (Bachtiar, 2007). Dimana pengawetan kayu kelapa menggunakan boraks dan asam borat dengan metode vakum tekan untuk meningkatkan ketahanan terhadap serangan rayap (Darmono et al., 2013).

Selain tahan terhadap serangan rayap, syarat utama lain penggunaan kayu pada bangunan adalah ketahanan api yang memadai untuk memberikan rasa aman pada pengguna (Ostman et al., 2001). Sifat kayu yang mudah terbakar ini disebabkan karena kandungan 50% karbon, 6% hydrogen, dan 44% oksigen. Dalam kondisi adanya api dan udara yang cukup, unsur kimia ini terurai menjadi komponen yang mudah terbakar seperti karbon monoksida, karbon dioksida, hydrogen serta metana (ASTM E69, 2002). Sehingga pengawetan yang sekaligus meningkatkan ketahanan api dengan menambahkan bahan penghambat perlu dilakukan (Effendi, 2007). Selain meningkatkan ketahanan rayap, peran boraks dan asam borat pada kayu kelapa juga berguna sebagai bahan penghambat api, dimana senyawa boron menghambat pembakaran dengan cara memutus ikatan oksigen pada bahan yang terbakar (Dayadi, 2021). Kandungan boraks pentahidrat serta boraks dekahidrat pada senyawa boron berperan menghambat api pada bahan yang mengandung selulosa (kayu). Saat terpapar api, unsur boron membentuk lapisan kaca yang mengurangi penyebaran pembakaran (Can et al., 2018). Selain meningkatkan ketahanan terhadap rayap dan api, penggunaan boraks dan asam borat dipilih karena memiliki toksisitas yang rendah (Yamauchi et al., 2007).

Karena atap kubah dibangun menggunakan system struktur yang unik, maka perlu dilakukan uji kelayakan untuk memastikan bahwa struktur aman serta mampu dipasarkan secara luas. Karena target pemasarannya juga mencakup ekspor ke United States of America (USA) maka peraturan beban-beban yang digunakan perlu mengacu ASCE 7 khususnya untuk beban angin dan salju.

Uji kelayakan struktur dilakukan dengan analisis pada model komputer, hal ini dilakukan karena beberapa alasan diantaranya adalah: keterbatasan fasilitas untuk menguji beban angin secara langsung pada struktur, dan struktur tidak diizinkan diuji sampai melampaui batas elastisitasnya. Oleh sebab itu, opsi analisis dengan model elemen hingga pada komputer dirasa menjadi pilihan terbaik. Untuk memperoleh struktur yang memiliki karakteristik yang dekat dengan kondisi lapangan, maka dilakukan serangkaian uji validasi.

Uji validasi dilakukan dengan dua variasi pembebanan, tahap pertama adalah dengan memberikan baban vertical terpusat pada joint untuk

memperoleh deformasinya. Dimana deformasi ini digunakan sebagai parameter yang dibandingkan antara lapangan dan model 3D. Dalam penyesuaian model 3D, variable yang disesuaikan adalah elastisitas dari material kayu dan pipa besi yang digunakan sebagai bagian dari struktur kubah. Uji beban tahap kedua adalah dengan memberikan beban secara merata pada permukaan kubah. Beban yang diberikan tentunya sesuai dengan batas beban layan, sehingga struktur masih dalam zona elastisitasnya. Hasil uji tahap kedua masih serupa dengan tahap pertama, yaitu melihat deformasi yang terjadi serta membandingkannya dengan model komputer. Pengujian tahap kedua bertujuan untuk memastikan kembali bahwa model sudah mendekati kondisi struktur dilapangan.

Model yang sudah tervalidasi selanjutnya dianalisis dengan metode desain tegangan izin (DTI) untuk melihat besarnya tegangan maksimum baik pada kondisi tarik, tekan, geser dan lentur. Tegangan akibat beban tidak boleh melampaui batasan izinnya, dimana tegangan izin diperoleh berdasarkan kelas kuat kayu serta berat jenis kayu (PKKI, 1961). Sedangkan tegangan akibat beban diambil dari kombinasi maksimum yang diatur pada SNI 1727-2020 (BSN, 2020). Selain itu, deformasi maksimum akibat beban layan juga tidak boleh melampaui lendutan izinnya. Jika semua persyaratan terpenuhi, maka struktur kubah dapat dikatakan layak untuk diaplikasikan.

## 2 METODOLOGI

Uji kelayakan atap kubah dilakukan dengan analisis model elemen hingga secara 3D. Hal ini diterapkan mengingat terdapat beberapa keterbatasan pada pengujian struktur, diantaranya: fasilitas pengujian beban angin secara langsung yang tidak memadai, serta struktur kubah yang tidak diperkenankan diuji hingga melampaui batas elastisitasnya. Oleh sebab itu, opsi analisis model 3D dirasa menjadi pilihan yang paling layak. Namun sebelum dilakukan analisis perlu dilakukan validasi agar model dapat mewakili karakteristik dari struktur aslinya.

Dalam proses validasi antara model dan lapangan terdapat parameter yang dibandingkan serta variable yang disesuaikan. Parameter yang dimaksud adalah deformasi antara struktur di lapangan dengan model 3D, sedangkan variable yang perlu disesuaikan adalah elastisitas material utama beserta pendukungnya.

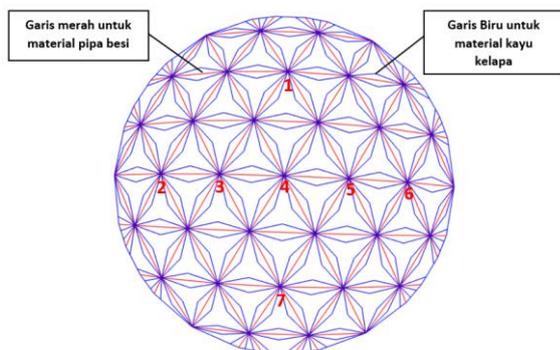
Deformasi struktur yang digunakan sebagai acuan dalam proses validasi diperoleh melalui uji beban yang dibahas pada bagian 2.1 dan 2.2. Sedangkan dalam analisis model 3D, besarnya beban angin dan salju dihitung berdasarkan ASCE 7-22 untuk lokasi Hawaii seperti yang diuraikan pada bagian 2.4 serta 2.5.

Model 3D yang telah tervalidasi selanjutnya dianalisis berdasarkan metode Desain Tegangan Izin (DTI), dimana tegangan akibat beban kombinasi

maksimum tidak boleh melampaui tegangan yang diizinkan. Selain itu kontrol lendutan pada kondisi beban layan juga tidak diizinkan melampaui lendutan maksimumnya. Jika lendutan dan tegangan tidak melampaui batas yang diizinkan, maka struktur dapat dikatakan aman.

**2.1 Uji Beban Tahap Pertama**

Uji beban pada struktur kubah dilakukan dengan dua tahapan, dimana tahap pertama beban diberikan secara terpusat pada tujuh titik joint sebesar 60 kg dan 120 kg. Besarnya beban terpusat dipilih berdasarkan beban layan atap pada SNI 1727-2020 dan tributary area. Untuk posisi beban terpusat ditampilkan sesuai dengan Gambar 1, dimana deformasi dari uji beban tahap pertama digunakan untuk memvalidasi model 3D. Hal ini bertujuan menyesuaikan perilaku antara kondisi lapangan dengan model komputer.

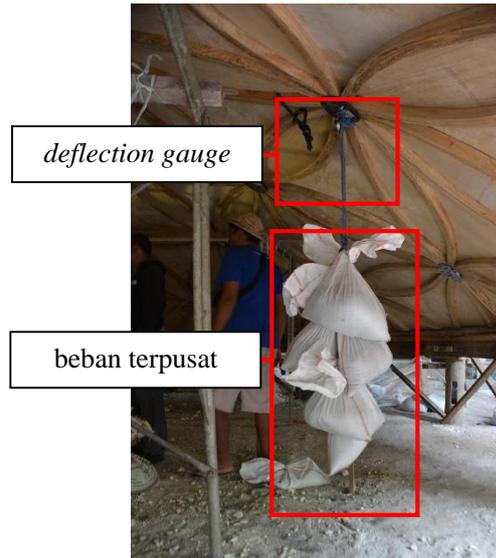


**Gambar 1.** Tujuh Joint Penempatan Beban Terpusat dan Pencatatan Lendutan

Struktur utama atap kubah menggunakan material Kayu Kelapa yang digambarkan dengan garis biru pada Gambar 1, sedangkan garis merah menampilkan material pipa besi yang berperan sebagai pen dukungnya. Maka dalam proses validasi, variabel yang disesuaikan adalah elastisitas material kayu dan pipa besi, dimana penyesuaian elastisitas antara material kayu dan besi ini dilakukan secara bersamaan dengan *trial and error* sampai diperoleh deformasi yang cukup dekat.

**2.2 Uji Beban Tahap Kedua**

Pada tahap kedua, beban yang diterapkan adalah berupa beban merata di seluruh permukaan atap. Besarnya beban merata diambil sebesar 80 kg/m<sup>2</sup>, dimana nilai ini sedikit lebih besar dari beban hidup layan (Lr) sebesar 50 kg/m<sup>2</sup> (beban layan = D+Lr). Deformasi dari uji tahap kedua dicatat dan hasilnya dibandingkan dengan model 3D yang sudah tervalidasi pada uji tahap pertama. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa deformasi struktur secara pasti dapat diwakilkan dengan model 3D pada komputer.



**Gambar 2.** Uji Beban Tahap Pertama dengan Beban Terpusat pada Salah Satu Joint



**Gambar 3.** Uji Beban Tahap Kedua dengan Memberikan Beban Merata pada Permukaan Kubah

Pada saat beban uji dilepaskan, perpindahan yang terjadi pada masing-masing joint perlu dicek kembali dan perlu dipastikan bahwa deformasi kembali pada posisi awalnya. Hal ini dimaksudkan untuk memastikan bahwa struktur masih dalam kondisi elastis, sedangkan pengujian dengan kondisi beban maksimum akan dilakukan pada model 3D.

**2.3 Material Kayu Kelapa**

Rangka utama atap kubah menggunakan kayu kelapa atau dikenal dengan nama ilmiah *cocos nucifera L*, jenis ini dipilih karena memiliki corak yang estetik dan unik. Selain dari sisi keindahan kayu, ketersediaan yang berlimpah pada daerah tropis khususnya Indonesia juga menjadi salah satu faktor tambahan mengapa kayu kelapa banyak digunakan.

Kayu kelapa (*cocos nucifera L*) masuk dalam kelas awet III (Indrosaptono et al., 2014), dimana kayu memiliki umur yang relatif panjang jika dalam kondisi terlindungi. Berdasarkan Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia (PKKI, 1961), kelas awet III memberikan gambaran keawetan sebagai berikut: jika kondisi

struktur selalu terhubung dengan tanah lembab maka ketahanan kayu hingga 3 tahun, terbuka terhadap angin dan iklim tetapi dilindungi terhadap kemasukan air maka umur kayu 10 tahun. Untuk kondisi di bawah atap tidak berhubungan dengan tanah lembab maka umurnya bisa sangat lama, sedangkan jika terlindungi dan selalu dipelihara umurnya bisa tak terbatas.

Serangan rayap untuk kayu kelas awet III masih memungkinkan untuk terjadi, sehingga untuk meningkatkan ketahanan kayu terhadap rayap serta ketahanan terhadap api, dilakukan pengawetan menggunakan boraks dan asam borat dengan metode vakum tekan. Setelah dilakukan perawatan, kayu kemudian dikeringkan dengan metode oven (*kiln dryer*) agar terhindar dari jamur serta memiliki stabilitas dimensi yang baik, sehingga mudah untuk diaplikasikan (Susilaning & Suheryanto, 2011). Dalam proses oven, kelembaban udara adalah hal terpenting, karena panas yang tinggi dan kelembaban rendah menyebabkan kayu mudah rusak (Yudodibroto, 1983). Berikut adalah beberapa manfaat lain pengeringan kayu (Dumanauw, 1993): menambah kekuatan kayu, membuat kayu lebih ringan, mencegah serangan jamur dan bubuk kayu, serta memudahkan pengerjaan selanjutnya seperti *finishing*.

Tegangan izin tekan dan tarik pada struktur kayu sangat bergantung pada berat jenis dan kelas kuat kayu yang digunakan. Berat jenis kayu berbanding lurus dengan kekuatan kayu, jika semakin besar berat jenis kayu maka kekuatannya juga akan meningkat. Sedangkan kelas kuat kayu berdasarkan peraturan PPKI dibagi menjadi lima kelas, semakin kecil kelas semakin tinggi kekuatannya. Untuk kayu kelapa masuk dalam kelas kuat II dengan berat jenis berkisar antara 0.6 sampai dengan 0.9 dan dengan rata-rata di angka 0.74 (Indrosaptono et al., 2014).

**2.4 Beban Angin**

Beban angin adalah salah satu faktor kritis pada struktur kubah, dikatakan demikian karena dominan kegagalan struktur kubah terjadi akibat prediksi beban angin yang kurang tepat (Kim YC et al., 2019). Untuk dapat memprediksi beban angin dengan baik, berikut adalah tahapan prosedurnya: parameter pertama dimulai dari mengetahui tekanan kecepatan angin, dimana tekanan kecepatan angin yang diterapkan pada model 3D dihitung berdasarkan ASCE 7-22 chapter 26 dan 27. Dimana besarnya tekanan kecepatan angin dihitung dengan persamaan berikut:

$$q_z = 0.00256 K_z K_{zt} K_d K_e V^2 \left( \frac{lb}{ft^2} \right); V, \frac{mi}{h} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

- $q_z$  = tekanan kecepatan angin (lb/ft<sup>2</sup>)
- $K_z$  = koefisien tekanan kecepatan angin
- $K_{zt}$  = factor topografi
- $K_d$  = factor arah angin

$K_e$  = factor elevasi tanah

$V$  = kecepatan angin dasar (mi/h)

Besarnya kecepatan angin dasar ditentukan oleh factor lokasi dan kategori resiko dari bangunan sesuai table 1.5-1 ASCE 7. Untuk kategori bangunan kubah adalah kategori I dan besarnya kecepatan angin dasar diambil 150 miles/hour. Sedangkan parameter beban angin lainnya diambil sebagai berikut:

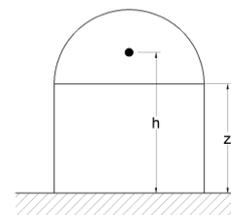
$$\begin{matrix} K_z & = & 0.7 & & K_d & = & 1.0 \\ K_{zt} & = & 1.0 & & K_e & = & 1 \end{matrix}$$

Koefisien tekanan angin ( $K_z$ ) ditentukan berdasarkan kondisi exposure (B) dan ketinggian dari permukaan tanah hingga dasar dome ( $z$ ), dimana faktor ini merupakan salah satu faktor yang memberikan pengaruh besar pada distribusi tekanan angin (Uematsu Y et al., 1997). Untuk nilai  $z$  diambil minimum 30 ft, sedangkan besarnya  $K_z$  dihitung dengan persamaan berikut:

$$K_z = 2.01 (z/z_g)^{2/\alpha} = 0.7 \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

$$z = 30 \text{ ft} \qquad \alpha = 7.0 \qquad z_g = 1200 \text{ ft}$$



**Gambar 4.** Nilai  $z$  Minimum Diambil 30 ft (ASCE 7-22)

Faktor topografi ( $K_{zt}$ )izinkan diambil sebesar 1, jika situasi di lapangan tidak bisa diketahui secara persis. Begitu juga dengan factor elevasi permukaan,  $K_e = 1$  untuk semua elevasi. Sedangkan factor arah angin ( $K_d$ ) diambil 1.0 untuk struktur kubah. Besarnya kecepatan angin dasar ( $V$ ) diambil sebesar 150 miles/jam, nilai ini ditentukan dari kategori resiko (I) dan lokasi bangunan (Hawaii). Berdasarkan variabel tersebut, besarnya tekanan kecepatan angin diambil sebesar:

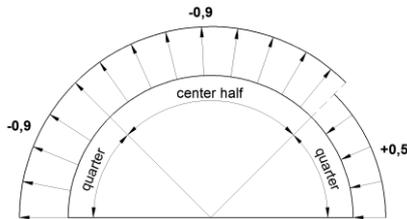
$$q_z = 0.00256 \cdot 0.7 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 150^2 = 39.38 \text{ lb/ft}^2$$

Besarnya tekanan angin dipengaruhi factor hembusan ( $G$ ) dan koefisien tekanan eksternal ( $C_p$ ), dimana faktor hembusan ini merupakan fenomena peningkatan kecepatann angin secara mendadak. Untuk struktur bangunan yang rendah factor hembusan diizinkan diambil sebesar 0.85. Sedangkan koefisien tekanan eksternal ( $C_p$ ) pada dome ditentukan berdasarkan rasio tinggi ( $f$ ) dan diameter dome ( $D$ ). Saat rasio  $f/D$  rendah, atap kubah akan cenderung

mengalami tekanan negatif, begitupula sebaliknya jika f/D semakin tinggi maka kubah akan cenderung mengamai tekanan positif (Noguchi M & Uematsu Y, 2003).

$$r = \frac{\text{tinggi}}{\text{diameter dome}} = \frac{184 \text{ cm}}{914.4 \text{ cm}} = 0.201$$

Berdasarkan table 27.3-3 ASCE 7, maka diperoleh besarnya koefisien 1/4 lengkung -0.9, setengah lengkung -0.9, serta 1/4 lengkung akhir 0.5. Atau untuk lebih jelasnya ditampilkan oleh Gambar 5:



Gambar 5. Koefisien Tekan Eksternal (Cp)

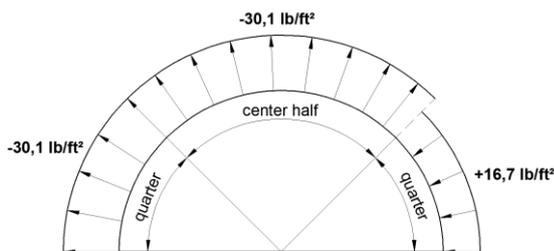
Maka dengan mempertimbangkan factor hambusan serta koefisien tekan eksternal, besarnya tekanan angin menjadi:

$$p = q_z \cdot G \cdot C_p \dots\dots\dots (3)$$

$$p_1 = 39.38 \cdot 0.85 - 0.9 = -30.1 \text{ lb/ft}^2$$

$$p_2 = 39.38 \cdot 0.85 - 0.9 = -30.1 \text{ lb/ft}^2$$

$$p_3 = 39.38 \cdot 0.85 + 0.5 = +16.7 \text{ lb/ft}^2$$



Gambar 6. Beban Tekanan Angin

**2.5 Beban Salju**

Beban salju yang digunakan merujuk pada ASCE 7-22 chapter 7, dimana untuk beban merata dihitung berdasarkan rumus berikut:

$$p_f = 0,7 C_e C_t p_g \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

$p_f$  = beban salju untuk atap datar

$C_e$  = faktor paparan

$C_t$  = faktor termal

$p_g$  = beban salju permukaan (lb/ft)

Besarnya beban salju permukaan ( $p_g$ ) diambil minimum diangka 25 lb/ft. Salju permukaan minimum dipilih mengingat untuk daerah Hawaii beban salju dapat diabaikan. Kendati beban ini dapat diabaikan karena daerah Hawaii sangat jarang mengalami salju,

namun pada analisis ini pengaruh beban salju tetap diperhitungkan mengingat struktur ini nantinya juga akan dibangun di sekitar USA. Tetapi tentunya struktur serupa tidak serta merta dapat langsung diaplikasikan mengingat beban angin dan salju untuk setiap daerah memiliki intensitas yang berbeda-beda. Sedangkan untuk faktor paparan serta factor termal pada kasus ini besarnya diambil berturut 0.9 dan 1.2. Faktor paparan diambil dengan asumsi permukaan tipe B (pasal 26.7.2 ASCE 7) dan kondisi terpapar penuh, pemilihan tipe permukaan ini dilakukan untuk memperoleh hasil yang lebih konservatif, maka didapat factor  $C_e = 0.9$ . Sedangkan untuk factor termal dipilih kondisi struktur tidak dihangatkan dengan  $C_t = 1.2$ .

Besarnya beban salju ( $p_f$ ) perlu dilakukan penyesuaian karena atap kubah memiliki kemiringan, faktor penyesuaian dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$p_s = C_s p_f \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:

$p_s$  = beban salju untuk atap miring

$C_s$  = faktor kemiringan

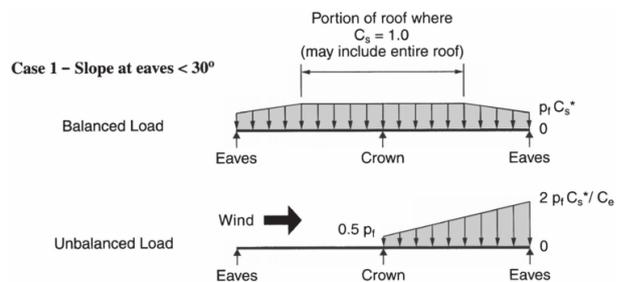
$p_f$  = beban salju untuk atap datar

Faktor kemiringan kubah diambil sebesar satu agar lebih konservatif. Sehingga beban merata salju adalah:

$$p_f = 0,7 C_e C_t p_g = 18.9 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2} \dots\dots\dots (6)$$

$$P_s = C_s p_f = 18.9 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2} \dots\dots\dots (7)$$

Dalam menerapkan beban salju terdapat dua kondisi yang perlu diperhatikan yaitu beban seimbang dan beban tidak seimbang. Yang dimaksud tidak seimbang adalah beban salju lebih dominan di salah satu bagian atap, sedangkan kondisi seimbang merupakan situasi beban salju menyebar secara merata pada seluruh atap. Berdasarkan ASCE-7 kondisi beban seimbang dan tidak ditentukan berdasarkan kemiringan slope atap, dan untuk dome diambil kondisi seperti Gambar 7.



Gambar 7. Posisi Beban Salju pada Atap Kubah (ASCE 7-22)

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Validasi dengan Uji Beban Pertama

Uji beban dibagi menjadi dua tahapan, dimana pengujian pertama dilakukan dengan memberikan beban titik pada tujuh joint untuk memperoleh deformasi yang terjadi pada struktur. Deformasi ini digunakan sebagai acuan untuk memvalidasi model kubah 3D pada komputer. Variabel yang disesuaikan adalah elastisitas material kayu dan pipa besi, dimana dilakukan *trial-error* untuk memperoleh deformasi yang sesuai antara model dan lapangan. Tabel 1 dan 2 merupakan perbandingan deformasi antara model 3D yang sudah dilakukan penyesuaian dengan kondisi lapangan:

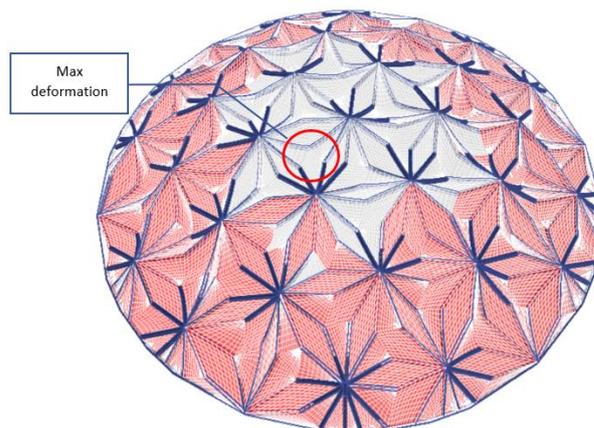
**Tabel 1.** Perbandingan Deformasi Model 3D dan Lapangan untuk Beban Titik 60 kg

Joint	Deformasi Model 3D (mm)	Deformasi Lapangan (mm)
1	-1.529	-1.400
2	-1.170	-1.040
3	-1.858	-1.530
4	-2.264	-2.160
5	-1.992	-1.890
6	-1.187	-0.920
7	-1.529	-1.520
Mean	-1.647	-1.494

**Tabel 2.** Perbandingan Deformasi Model 3D dan Lapangan untuk Beban Titik 120 kg

Joint	Deformasi Model 3D (mm)	Deformasi Lapangan (mm)
1	-2.797	-2.200
2	-2.150	-2.190
3	-3.325	-2.910
4	-3.930	-4.050
5	-3.475	-3.530
6	-2.169	-2.240
7	-2.796	-2.530
Mean	-2.950	-2.810

Elastisitas yang digunakan pada kayu dan pipa besi adalah:  $E_{\text{kayu}} = 980\text{MPa}$ ;  $E_{\text{pipa besi}} = 10000\text{MPa}$ . Berdasarkan deformasi Tabel 1 dan 2 dapat dinyatakan bahwa model 3D sudah memiliki elastisitas yang sesuai dengan kondisi di lapangan, dimana ini ditandai dengan lendutan yang diperoleh sudah cukup dekat dengan kondisi yang terjadi di lapangan.



**Gambar 8.** Posisi Lendutan Maksimum Atap Kubah

#### 3.2 Validasi dengan uji beban kedua

Pada uji beban tahap dua, beban diberikan secara merata pada seluruh permukaan kubah untuk merepresentasikan beban hidup yang bekerja pada permukaan atap. Serupa dengan pengujian pertama, lendutan yang terjadi pada ketujuh titik dicatat dan dibandingkan dengan model 3D yang sudah tervalidasi. Tabel 3 merupakan hasil perbandingan defleksi model dan lapangan untuk uji beban tahap kedua.

**Tabel 3.** Perbandingan Deformasi Model 3D dan Lapangan untuk Beban Merata 80 kg/m<sup>2</sup>

Joint	Deformasi Model 3D (mm)	Deformasi Lapangan (mm)
1	-1.495	-0.910
2	-0.888	-0.730
3	-2.459	-2.160
4	-2.904	-2.740
5	-2.202	-1.820
6	-0.683	-0.540
7	-1.533	-1.320
Mean	-1.737	-1.460

Tabel 3 memperlihatkan deformasi antara model dan lapangan yang sudah sesuai. Dimana rata-rata deformasi ketujuh joint model 3D adalah 1.737 mm, sedangkan kondisi lapangan diangka 1.46 mm. Selanjutnya, model yang sudah tervalidasi diberikan beban layan yang merupakan kombinasi antara berat sendiri serta beban hidup atap berdasarkan ASCE. Dari kombinasi ini diperoleh deformasi maksimum sebesar 20.7 mm, sedangkan deformasi izinnya adalah 30 mm. Nilai deformasi akibat beban layan lebih kecil dari deformasi izinnya memberikan gambaran struktur sudah memiliki kekakuan yang cukup, dan untuk posisi lendutan maksimum atap dapat dilihat sesuai dengan Gambar 8.

### 3.3 Kontrol Tegangan dengan Metode DTI

Berdasarkan metode desain tegangan izin (DTI) tegangan pada elemen kayu perlu dikontrol terhadap tegangan izinnnya (SNI 7973, 2013) (BSN, 2013). Besarnya tegangan izin dipengaruhi oleh beberapa factor diantaranya: jenis kayu (kelas kayu II dan berat jenisnya), factor temperature, serta factor durasi pembebanan. Factor temperatur diambil 0.9 untuk kondisi tarik, sedangkan 0.7 untuk tekan, geser dan lentur, sedangkan faktor durasi diambil berdasarkan lampiran B SNI kayu, untuk kombinasi D+L+W digunakan factor sebesar 1.6. Berdasarkan kedua faktor ini dapat diambil tegangan izin sebagai berikut:

**Tabel 4.** Tegangan Izin Kayu Kelapa

Simbol	Tegangan Izin (kg/cm <sup>2</sup> )
$\bar{\sigma}_{ds \parallel}$	95.2
$\bar{\sigma}_{tr \parallel}$	122.4
$\bar{\sigma}_{lt \parallel}$	112
$\bar{\tau}_{\parallel}$	13.44

Keterangan:

- $\bar{\sigma}_{ds \parallel}$  = tegangan izin tekan sejajar serat
- $\bar{\sigma}_{tr \parallel}$  = tegangan izin tarik sejajar serat
- $\bar{\sigma}_{lt \parallel}$  = tegangan izin lentur sejajar serat
- $\bar{\tau}_{\parallel}$  = tegangan izin geser sejajar serat

Pemilihan tegangan izin sejajar atau tegak lurus serat bergantung dari arah serat kayu elemen yang ditinjau. Dimana kondisi kayu pada struktur kubah menunjukkan arah serat yang dominan sejajar dengan sumbu longitudinal dari elemen kayu, sehingga tegangan yang terjadi adalah tegangan yang memiliki arah sejajar dengan serat. Hal ini sengaja dikondisikan untuk memaksimalkan kekuatan dari kayu kelapa.

Tegangan terbesar akibat kombinasi beban tidak diperkenankan melampaui tegangan izin maksimumnya, dan untuk melakukan kontrol tegangan, maka diperlukan gaya dalam tekan, tarik, geser dan lentur maksimum dari kombinasi beban SNI 1727. Berikut adalah gaya dalam maksimum yang diperoleh dari hasil analisis:

**Tabel 5.** Gaya Dalam Maksimum

Jenis Gaya Dalam	Besarnya Gaya Dalam
Aksial tekan ( $P_{c,max}$ )	-431.024 kg
Aksial tarik ( $P_{t,max}$ )	362.857 kg
Lentur ( $M_{max}$ )	1200 kg.cm
Geser ( $V_{max}$ )	100 kg

Perhitungan tegangan tekan, tarik, geser dan lentur maksimum pada struktur kayu kelapa didapat dengan perhitungan sebagai berikut:

#### 3.3.1 Tegangan tekan maksimum

Salah satu faktor yang mempengaruhi tegangan tekan adalah besarnya angka kelangsingan, dimana nilainya diambil dari rasio antara panjang tekuk berbanding dengan jari-jari girasi minimum sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{l_k}{i_{min}} = \frac{170 \text{ cm}}{1.44 \text{ cm}} = 118.05$$

Keterangan:

- $l_k$  = panjang tekuk
- $i_{min}$  = jari-jari girasi minimum
- $\lambda$  = angka kelangsingan

$$\sigma_{ds \parallel} = \frac{P_{c,max} \cdot \omega}{F_{br}} = \frac{-431.024 \text{ kg} \cdot 4.46}{25 \text{ cm}^2} = -76.89 \text{ kg/cm}^2$$

Keterangan:

- $\sigma_{ds \parallel}$  = -76.89 kg/cm<sup>2</sup> (tegangan tekan)
- $\omega$  = 4.46 (faktor tekuk)
- $F_{br}$  = 25 cm<sup>2</sup> (luas penampang batang tekan)

Besarnya faktor tekuk berbanding lurus dengan angka kelangsingan, jika angka kelangsingan semakin besar maka faktor tekuk juga akan meningkat. Penampang dikatakan kuat jika Tegangan tekan maksimum lebih kecil atau sama dengan teganan izin tekan kayu.

#### 3.3.2 Tegangan tarik maksimum

Berbeda halnya dengan kondisi tekan, tegangan tarik tidak dipengaruhi oleh fenomena tekuk sehingga proses kalkulasi tidak melibatkan angka kelangsingan. Sehingga besarnya tegangan tarik diperoleh dari rasio gaya tarik maksimum dibagi luas penampang kayu kelapa.

$$\sigma_{tr \parallel} = \frac{P_{t,max}}{F_{br}} = \frac{362.86 \text{ kg}}{25 \text{ cm}^2} = 14.51 \text{ kg/cm}^2$$

Keterangan:

- $\sigma_{tr \parallel}$  = 14,51 kg/cm<sup>2</sup> (tegangan tarik)
- $F_{br}$  = 25 cm<sup>2</sup> (luas penampang batang tarik)

Penampang dikatakan kuat terhadap tarik jika tegangan tarik maksimum lebih kecil atau sama dengan teganan izin tarik kayu.

#### 3.3.3 Tegangan lentur maksimum

Berdasarkan mekanika bahan diketahui bahwa tegangan maksimum lentur terjadi pada tepi atau pinggir penampang, oleh sebab itu untuk memperoleh besarnya tegangan terbesar dapat dihitung dengan formulasi berikut:

$$\sigma_{lt \parallel} = \frac{M_{max} \cdot y}{I} = \frac{3000 \text{ kg.cm}^2}{52.083 \text{ cm}^4} = 57.6 \text{ kg/cm}^2$$

Keterangan:

- $\sigma_{lt \parallel}$  = 57.6 kg/cm<sup>2</sup> (tegangan lentur)
- $y$  = 0.5\*5 cm (jarak dari sumbu netral ke tepi)
- $I$  = inersia penampang dimana  $I_x = I_y$

Kontrol lentur dilakukan dengan membandingkan tegangan akibat kombinasi maksimum dan tegangan izin dari kayu kelapa. Bila tegangan akibat beban lebih

kecil dari tegangan izin maka struktur dikatakan kuat terhadap lentur.

### 3.3.4 Tegangan geser maksimum

Jika tegangan maksimum pada lentur terjadi pada tepi penampang, berbeda halnya dengan tegangan geser, dimana tegangan terbesar berada pada sumbu netral dan memiliki arah sejajar dengan serat kayu. Maka berikut adalah perhitungan tegangan geser maksimum pada penampang kayu:

$$\tau_{||} = \frac{3 V_{max}}{2 A} = \frac{3 \cdot 100 kg}{2 \cdot 25 cm^2} = 6 kg/cm^2$$

Keterangan:

$\tau_{||} = 6 kg/cm^2$  (tegangan geser)

$A = 25 cm^2$  (luas penampang)

### 3.3.5 Kontrol tegangan

Besarnya tegangan maksimum tekan, tarik, lentur dan geser pada bagian 3.3.1 sampai 3.3.4 dikontrol dengan tegangan izin kayu, perbandingan kedua jenis tegangan disajikan pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Kontrol Tegangan

Gaya	Tegangan Mak. (kg/cm <sup>2</sup> )	Tegangan Izin (kg/cm <sup>2</sup> )	Ket
Tekan	76.89	< 95.2	OK
Tarik	14.51	< 122.4	OK
Lentur	57.6	< 112	OK
Geser	6	< 13.44	OK

Berdasarkan Tabel 6 dapat dilihat bahwa tegangan tekan, tarik, lentur, dan geser maksimum lebih kecil dari tegangan izin kayu kelapa, sehingga dari kontrol tegangan dapat dikatakan struktur kayu kuat dalam menahan beban kombinasi maksimum SNI 1727.

## 4 KESIMPULAN

Uji kelayakan pada atap kubah dilakukan dengan model 3D yang telah tervalidasi dengan perilaku model di lapangan. Dilakukan *trial and error* elastisitas material untuk memperoleh deformasi yang sesuai antara model dan struktur di lapangan. Besarnya elastisitas material kayu pada model 980 MPa, sedangkan untuk pipa besi diambil sebesar 10,000 MPa.

Model yang telah tervalidasi diterapkan beban kombinasi berdasarkan SNI 1727-2013, dimana untuk beban angin serta salju diterapkan menyesuaikan ASCE 7-22. Dengan metode desain tegangan izin (DTI) diperoleh tegangan tekan akibat beban yang lebih kecil dari tegangan izinnnya ( $76.89 kg/cm^2 < 95.2 kg/cm^2$ ), dan tegangan tarik akibat beban juga lebih kecil dari tegangan batasnya ( $14.5 kg/cm^2 < 122.4 kg/cm^2$ ). Sedangkan kontrol lentur ( $57.6 kg/cm^2 < 112 kg/cm^2$ ) dan geser ( $6 kg/cm^2 < 13.44$

$kg/cm^2$ ) juga menunjukkan hasil yang serupa, dimana tegangan akibat beban maksimum lebih kecil dari tegangan yang diizinkan. Untuk deformasi maksimum yang terjadi pada kubah diperoleh sebesar 20.7 mm, dimana nilai ini masih lebih kecil dari deformasi maksimal yang diperbolehkan sebesar 30 mm.

Berdasarkan kontrol tegangan dan deformasi yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa atap kubah layak dan dapat diaplikasikan pada bangunan daerah Hawaii dan sekitarnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- ASCE 7. (2022). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers.
- ASTM E69. (2002). *Standard Method for Combustible Properties of Treated Wood by the Fire Tube Apparatus*. ASTM International.
- Bachtiar, G. (2007). Pengawetan Beberapa Jenis Kayu dengan Proses Rendaman Dingin. *Jurnal Menara Jurusan Teknik Sipil FT. UNJ, II*.
- BSN. (2012). *SNI 7973-2013 tentang spesifikasi desain untuk konstruksi kayu*. Badan Standardisasi Nasional.
- BSN. (2020). *SNI 1727-2020 tentang beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*. Badan Standardisasi Nasional.
- Can, A., Grzeskowiak, W., & Ozlusoylu, I. (2018). Improving the Fire Resistance of Heat Treated Wood by Using Environment Friendly Substance. *Journal of Bartın Faculty of Forestry, 20*, 519-524.
- Darmono, Atun, S., & Prasetyo, S. (2013). Pemanfaatan Campuran Boraks dan Asam Borat sebagai Bahan Pengawet Kayu terhadap Serangan Rayap. *Jurnal Inotek, 17*, 82-99.
- Dayadi, I. (2021). Ketahanan Api Kayu Sengon (*Paraserianthes falcata* (L.) Nielsen) yang Diawetkan dengan Bahan Pengawet Boraks. *Perennial, 17*, 19-25. <https://doi.org/10.24259/perennial.v17i1.13650>
- Dumanauw, J. F. (1993). *Mengenal Kayu*. Kanisius.
- Effendi, A. (2007). Natrium Silikat Sebagai Bahan Penghambat Api Aman Lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan, 8*(3), 245-252.
- Faghih, A. K., & Bahadori, M. N. (2011). Thermal performance evaluation of domed roofs. *Energy and Buildings, 43*(6), 1254-1263. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.01.002>
- Indrosaptono, D., Sukawi, & Indraswara, M. S. (2014). Kayu Kelapa sebagai Alternatif Bahan Konstruksi Bangunan. *Jurnal Modul, 14*, 53-58.
- Kim YC, Yoon SW, Cheon DJ, & Song JY. (2019). Characteristics of wind pressures on retractable dome roofs and external peak pressure coefficients for cladding design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 188*, 294-307. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.02.016>
- Noguchi M, & Uematsu Y. (2003). Design wind pressure coefficients for spherical domes. *Journal Wind Eng, 177-178*.
- Ostman, B., Voss, A., Hughes, A., Hovde, P. J., & Grexa, O. (2001). Durability of Fire Retardant Treated Wood Products at Humid and Exterior Conditions. *Review of Literature, 95-104*.
- PKKI. (1961). *Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia*. Departemen Pekerjaan Umum.
- Rangkang, J., Sondakh, F., & Saerang, E. J. (2016). Karakteristik Kayu Kelapa di Berbagai Zona di Indonesia

- Timur Berdasarkan Sifat Fisis dan Mekanisnya. *Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 23.
- Runsheng, T., Meir, I. A., & Etzion, Y. (2003). An analysis of absorbed radiation by domed and vaulted roofs as compared with flat roofs. *Energy and Buildings*, 35, 539-548.
- Susilaning, L. S., & Suheryanto, D. (2011). Optimasi Moisture Content Proses Dry Kiln Menggunakan Design Of Experiment (DOE) Taguchi. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia*.
- Uematsu Y, Yamada M, Inoue A, & Hongo T. (1997). Wind loads and wind-induced dynamic behavior of a single-layer latticed dome. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 66(3), 227-248.
- Yamauchi, S., Sakai, Y., Watanabe, Y., & Kubo, M. (2007). Distribution Boron in Wood Treated with Aqueous and methanolic boric acid solutions. *J. Wood Sci*, 53, 324-331.
- Yudodibroto, H. (1983). *Pengeringan Kayu*. Universitas Gajah Mada.