

RANCANGAN DAN ANALISIS STRUKTUR SUDU TURBIN ANGIN LPN 10000 E

Sulistyo Atmadi'), Firman Hartono")
'(Peneliti Pusat Teknologi Dirgantara Terapan, LAPAN
"(Peneliti Teknik Pencerbangan IIB

ABSTRACT

Structure of the LPN 10000 E wind turbine blade has been manufactured and its structural analysis to find out the strength of this structure during its operation has also been conducted. The method of aero bending moment and centrifugal bending moment and load has been used while neglecting frictional and torsional load. The analysis is obtained for composite blade strengthened by high strength carbon unidirectional reinforcement composite. With safety factor of 1.3 minimum, it was concluded that the blade is strong enough to use at its designed operational load.

ABSTRAK

Struktur sudu turbin angin LPN 10000-E telah dibuat, untuk mengetahui ketahanan sudu agar tidak rusak waktu dioperasikan, dilakukan analisa kekuatan strukturnya. Analisis dilakukan dengan Metoda analisa momen bending aerodinamika dan Metoda analisa gaya dan momen bending sentrifugal, sedangkan beban karena gaya geser dan torsi diabaikan. Dengan bahan sudu komposit yang diperkuat dengan *high strength carbon unidirectional reinforcement composite*, diperoleh hasil analisa faktor keamanan minimum 1,3 dengan hasil ini dianggap sudu cukup kuat beroperasi pada daerah operasional yang telah ditentukan.

1 PENDAHULUAN

Rancangan dan analisis struktur sudu turbin angin LPN 10000 E ini menggunakan Metoda analisis momen bending aerodinamika dan Metoda Analisis gaya dan momen bending sentrifugal. Data sudu yang meliputi jumlah sudu, diameter *hub*, diameter tip, distribusi *chord*, distribusi *twist* dan penampang sudu, dan distribusi pembebanan merupakan masukan dari hasil perancangan aerodinamika sudu. Dalam analisis struktur, ditentukan ukuran dan tebal *torsion box* yang dapat menahan beban aerodinamika dan beban sentrifugal yang bekerja pada sudu. Dalam analisis yang dilakukan, beban karena gaya geser dan torsi diabaikan.

1.1 Data Sudu Turbin Angin

Berikut data sudu turbin angin

Massa per sudu	: 20 kg
Jari-jari <i>Hub</i>	: 350 mm
Jari-jari <i>Tip</i>	: 3800 mm
<i>Chord Hub</i>	300 mm
<i>Chord Tip</i>	100 mm
RPM ω	321
R P M furling wind speed	596

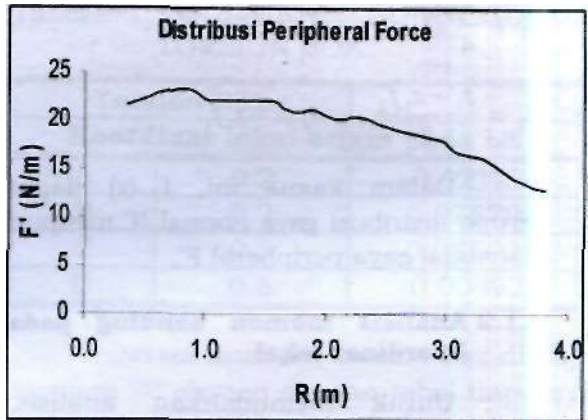
Distribusi *chord*, *twist* dan beban aerodinamika dapat dilihat pada Tabel 1-1. Dalam analisis struktur, diambil beban aerodinamika pada kondisi *off-design*. Kondisi yang dipilih adalah pada kecepatan aksial angin 15.7 m/s [*furling wind speed*].

Tabel 1-1: DATA SUDU DAN PEMBEBANAN AERODINAMIKA

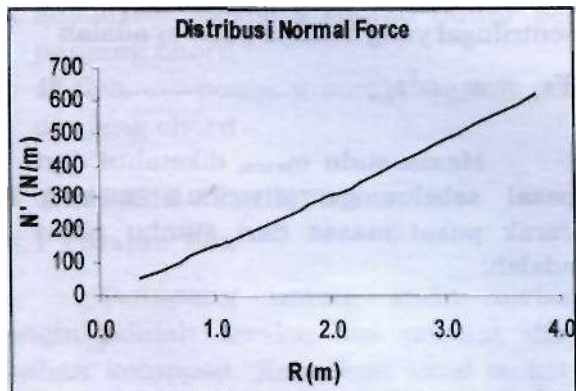
Off design					
Sta	Geometri turbin angin			Beban Aerodinamika	
	R	C	Twist	N'	F'
350	0.3500	0.2998	20.84	52.82	21.63
523	0.5225	0.2812	16.13	76.88	22.33
695	0.6950	0.2636	13.23	104.12	23.07
868	0.8675	0.2468	11.37	131.41	23.31
1040	1.0400	0.2310	10.09	153.42	22.10
1213	1.2125	0.2160	9.14	180.87	22.09
1385	1.3850	0.2020	8.40	209.10	22.06
1558	1.5575	0.1888	7.80	238.34	22.04
1730	1.7300	0.1766	7.31	261.32	20.99
1903	1.9025	0.1653	6.89	292.80	21.08
2075	2.0750	0.1549	6.53	317.79	20.22
2248	2.2475	0.1454	6.22	352.31	20.42
2420	2.4200	0.1368	5.95	380.12	19.72
2593	2.5925	0.1290	5.71	409.43	19.10
2765	2.7650	0.1223	5.50	440.33	18.54
2938	2.9375	0.1164	5.32	472.86	18.03
3110	3.1100	0.1114	5.18	497.10	16.68
3283	3.2825	0.1073	5.06	532.34	16.20
3455	3.4550	0.1041	4.98	557.88	14.86
3628	3.6275	0.1018	4.93	583.01	13.48
3800	3.8000	0.1005	4.91	619.63	12.83

Pada Tabel 1-1, beban aerodinamika N' adalah distribusi gaya arah normal bidang putar atau gaya searah sumbu putar dengan satuan N/m. Beban aerodinamika F' adalah gaya searah putaran atau *peripheral force* dengan satuan N/m.

Kedua distribusi gaya tersebut dapat disajikan dalam bentuk kurva pada Gambar 1-1.



Gambar 1-1: Distribusi pembebanan sepanjang span sudu



2 METODE ANALISIS

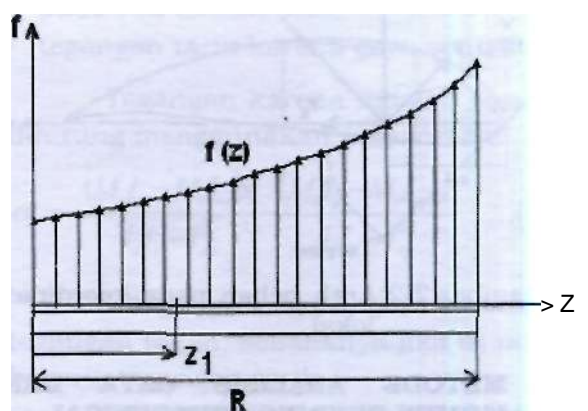
2.1 Momen Bending Aerodinamika

2.1.1 Analisis momen bending karena gaya terdistribusi pada batang

Gambar 2-1 memperlihatkan batang sepanjang R dengan beban berupa gaya terdistribusi f(z). Momen bending di z₁ karena gaya terdistribusi f(z), adalah

$$M_{z_1} = \int_{z_1}^R (z - z_1) f(z) dz \dots\dots\dots (2-1)$$

Dalam kasus yang dianalisis, beban aerodinamika dapat didekati dengan persamaan polinom derajat 2.



Gambar 2-1: Gaya terdistribusi pada batang

Jika polinom tersebut dinyatakan dengan $f(z) = f_1 + f_2z + f_3z^2$, maka momen di z₁, menjadi

$$M_{z_1} = A(R^4 - z_1^4) + A_2(R^3 - z_1^3) + A_3(R^2 - z_1^2) + A_4(R - z_1) \dots (2-2)$$

dengan:

$$A_1 = \frac{f_3}{4}, \quad A_2 = \frac{f_2 - z_1 f_3}{3},$$

$$A_3 = \frac{f_1 - z_1 f_2}{2}, \quad A_4 = -z_1 f_1$$

Dalam kasus ini, $f(z)$ dapat berupa distribusi gaya normal N' maupun distribusi gaya peripheral F' .

2.1.2 Analisis momen bending pada koordinat lokal

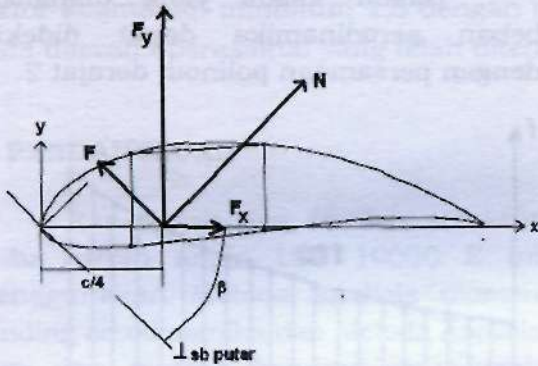
Untuk memudahkan analisis, momen karena gaya N dan F di transformasikan dalam arah sumbu koordinat $x - y$ lokal. Sistem koordinat lokal berpusat pada *leading edge* tiap-tiap elemen sudu.

Mengacu pada Gambar 2-2, persamaan transformasi yang digunakan adalah

$$F_y = N \cos \beta + F \sin \beta \dots\dots\dots (2-3)$$

$$F_x = N \sin \beta - F \cos \beta \dots\dots\dots (2-4)$$

Momen *bending* pada z karena gaya F_y dan F_x adalah M_x dan M_y . Distribusi momen hasil analisis dapat dilihat pada bagian Analisis Struktur.



Gambar 2-2: Arah beban pada koordinat lokal

3 METODE ANALISIS GAYA DAN MOMEN BENDING SENTRIFUGAL

3.1 Distribusi Massa

Oleh karena massa adalah kerapatan kali tinggi kali luas penampang, dalam analisis gaya sentrifugal distribusi massa diasumsikan sebanding dengan

kuadrat *chord*. Massa total tiap sudu ditetapkan sebesar 20 kg.

Pada posisi z , panjang *chord* diketahui sebesar:

$$c_z = c_h - (c_h - c_i) \frac{z}{R} \dots\dots\dots (3-1)$$

Dengan $m_z \propto c_z^2$ maka:

$$m_z = k_m \left[c_h^2 - \frac{2c_h(c_h - c_i)}{R} z + \frac{(c_h - c_i)^2}{R^2} z^2 \right] \dots\dots (3-2)$$

Konstanta kesebandingan k_m pada persamaan di atas dapat dihitung dengan mengintegrasikan persamaan tersebut dari *hub* ke *tip* kemudian menetapkan massa total sebesar 20 kg. Dengan cara ini, didapat $k_m = 121.13 \text{ kg/m}^2$.

Massa sudu dari tip ke posisi z_1 dihitung dengan mengintegrasikan persamaan m_z dengan batas integrasi $z_1 - R$. Berikut hasil integrasinya.

$$m_{z_1R} = A_m(R - z_1) + B_m(R^2 - z_1^2) + C_m(R^3 - z_1^3) \dots\dots (3-3)$$

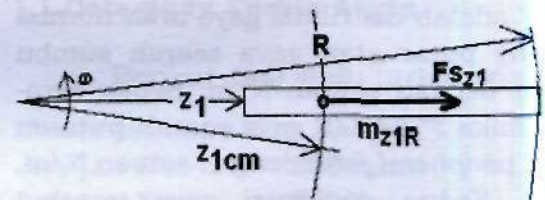
dengan

$$A_m = k_m c_h^2, \quad B_m = -k_m \frac{c_h(c_h - c_i)}{R},$$

$$C_m = k_m \frac{(c_h - c_i)^2}{R^2}$$

3.2 Gaya Sentrifugal pada z_1

Perhatikan gambar berikut.



Gambar 3-1 : Gaya sentrifugal

Mengacu pada Gambar 3-1, gaya sentrifugal yang bekerja pada z_1 adalah

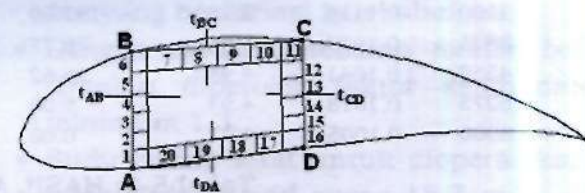
$$F_{s_{z_1}} = m_{z_1R} \omega^2 z_{1cm} \dots\dots\dots (3-4)$$

Massa sudu m_{z_1cm} diketahui dari pasal sebelumnya (distribusi massa). Jarak pusat massa dari sumbu putar adalah:

Tabel 4-1: KOORDINAT SUDUT-SUDUT TORSION BOX

Torsion Box		
Koordinat lokal origin pada LE		
A	0.2	-0.02127
B	0.2	0.07570
C	0.5	0.08503
D	0.5	-0.00497

Dalam analisis, *torsion box* dibagi menjadi 20 elemen dengan tebal tiap-tiap elemen dapat divariasikan tergantung pada pilihan tebal web dan cap, t_{AB} , t_{BC} , t_{CD} dan t_{DA} . *Torsion box* dan elemen-elemennya dapat dilihat pada Gambar 4-1.



Gambar 4-1: Torsion box

4.2 Perhitungan Tegangan

Tegangan yang bekerja pada tiap-tiap elemen terdiri dari:

- tegangan karena momen bending aerodinamika dan momen bending sentrifugal (jika sumbu puntir tidak pada c.m *torsion box*)
- tegangan tarik karena gaya sentrifugal

Tegangan karena momen bending dihitung menggunakan persamaan:

$$\sigma_b = \frac{(M_{y'x} - M_{x'y'})x}{I_x I_y - I_{xy}^2} - \frac{(M_{x'y} - M_{y'x})y}{I_x I_y - I_{xy}^2} \dots\dots(4-1)$$

Harga σ_b negatif berarti bekerja tegangan tekan, sebaliknya jika σ_b positif bekerja tegangan tarik.

Tegangan karena gaya sentrifugal selalu tarik. Besar tegangan karena gaya sentrifugal, adalah

$$\sigma_{fs} = \frac{Fs}{A} \dots\dots\dots(4-2)$$

dengan A adalah luas penampang web dan cap *torsion box*. Tegangan total yang bekerja pada setiap elemen adalah jumlah tegangan bending dengan tegangan sentrifugal.

$$z_{cm} = z_1 + \frac{A_1(R^2 - z_1^2) + A_2(R^2 - z_1^2) + A_3(R^2 - z_1^2) + A_4(R - z_1)}{A_1(R - z_1) + B_m(R^2 - z_1^2) + C_m(R^2 - z_1^2)} \dots\dots(3-5)$$

dengan

$$A_1 = \frac{3}{4} C_m, \quad A_2 = \frac{2B_m - 3z_1 C_m}{3}$$

$$A_3 = \frac{A_m - 2z_1 B_m}{2}, \quad A_4 = -z_1 A_m$$

A_m , B_m dan C_m pada pasal ini sama dengan pada bagian distribusi massa.

3.3 Momen Karena Gaya Sentrifugal

Jika titik pusat massa tiap-tiap elemen sudu tidak sejajar sumbu z (arah radial), gaya sentrifugal pada pusat massa z_{1cm} akan menciptakan momen bending pada penampang z_1 . Besar momen bending karena gaya sentrifugal adalah:

$$M_{x_{Fs}} = Fs(y_{cm_{z_1}} - y_{z_{1cm}}) \dots\dots\dots(3-6)$$

$$M_{y_{Fs}} = Fs(x_{cm_{z_1}} - x_{z_{1cm}}) \dots\dots\dots(3-7)$$

Momen karena gaya sentrifugal nol jika pusat massa tiap elemen sudu sejajar sumbu radial. Dalam tata acuan koordinat global (origin pada LE hub), titik P(x_p, y_p) pada koordinat lokal $x_1 - y_1$ menjadi:

$$x_p = c_2(x_p \cos \alpha_z - y_p \sin \alpha_z) + d_c(-c_2 \cos \alpha_z) + b_c \sin \alpha_z \dots\dots(3-8)$$

$$y_p = c_2(x_p \sin \alpha_z + y_p \cos \alpha_z) + d_c(c_2 \cos \alpha_z) - a_c \sin \alpha_z \dots\dots(3-9)$$

Keterangan:

- $\alpha_z = \beta_z - \beta_h$
- a adalah posisi x sumbu puntir per panjang chord
- b adalah posisi y sumbu puntir per panjang chord

4 ANALISIS STRUKTUR

4.1 Torsion Box

Penopang utama sudu turbin angin adalah *torsion box* terbuat dari bahan komposit. Koordinat lokal sudut-sudut luar *torsion box* dapat dilihat pada Tabel 4-1.

Tabel 5-1: MOMEN BENDING DAN GAYA SENTRIFUGAL

	C	Twist	Mx	My	Mxfs	My fs	PsfNi $\ddot{\gamma}$
0.3500	02998	20.84	2381.17	791.81	0.00	0.00	122016.2
0.5225	0.2812	16.13	2249.22	550.91	0.00	0.00	118691.5
0.6950	0.2636	13.23	2085.86	402.66	0.00	0.00	114348.7
0.8675	0,2468	11.37	1911.51	307.68	0.00	0.00	109145.0
1.0400	0.2310	10.09	1735.01	241.52	0.00	0.00	103228.9
1.2125	0.2160	9.14	1560.19	192.60	0.00	0.00	96740.4
1.3850	0.2020	8.40	1389.18	154.85	0.00	0.00	89811.1
1.5575	*/. 1000	7 an	1223.47	124.81	0.00	0.00	82564.2
1.7300	0,1766	7.31	1064.21	100.39	0.00	0.00	75114.2
1.9025	0.1653	6.89	912.45	80.24	0.00	0.00	67567.1
2.0750	0.1549	6.53	769.14	63.49	0.00	0.00	60020.8
2.2475	C.1454	6.22	635.20	49.51	0.00	0.00	52564.2
2.4200	0.1368	5.95	511.54	37.85	0.00	0.00	45278.0
2.5925	0.1290	5.71	399.06	28.19	0.00	0.00	38234.5
2.7650	0.1223	5.50	298.64	20.25	0.00	0.00	31497.1
2 9375	0 1164	5 32	211.19	13.83	0.00	0.00	25121.2
3.1100	0.1114	5.18	137.60	8.77	0.00	0.00	19153.4
3.2825	0.1073	5.06	78.77	4.92	0.00	0.00	13631.9
3.4550	0.1041	4.98	35.62	2.20	0.00	0.00	8586.5
3.6275	0.1018	4.93	9.06	0.56	0.00	0.00	4038.2
3.8000	0.1005	4.91	0.00	0.00	0.00	0.00	

Tabel 5-2: HASIL ANALISIS STRUKTUR

Sta	350	1040	1903	2765	3628
Ch	0.2998	0.2310	0.1653	0.1223	0.1018
tAB	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10
tBC	3.00	3.00	3.00	2.00	0.20
tCD	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10
tDA	3.00	3.00	3.00	2.00	0.20
No	Teg (MPa)	Teg (MPa)	Teg (MPa)	Teg (MPa)	Teg (MPa)
1	666.97	751.51	766.16	680.46	451.49
2	546.45	582.33	550.06	500.29	409.65
3	387,90	386.95	353.29	321.78	332.49
4	229.34	191.58	156.52	143.27	255.34
5	70.78	-3.79	-40.24	-35.24	178.18
6	-49.74	-172.97	-256.35	-215.41	136.34
7	-69.19	-180.15	-258.49	-215.89	136.22
8	-107.67	-194.75	-263.39	-217.40	135.89
9	-146.15	-209.35	-268.29	-218.90	135.55
10	-184.62	-223.96	-273.19	-220.41	135.22
11	-204.08	-231.13	-275.33	-220.89	135.10
12	-90.74	-71.54	-70.52	-50.41	174.04
13	53.45	104.65	103.63	108.73	245.42
14	197.65	280.83	277.79	267.88	316.80
15	341.84	457.02	451.95	427.02	388.17
16	455.18	616.61	656.75	597.50	427.12
17	481.82	633.38	670.20	607.67	430.13
18	534.66	667.17	697.71	628.54	436.24
19	587.50	700.95	725.21	649.41	442.36
20	640.33	734.74	752.72	670.29	448.48
max	666.97	751.51	766.16	680.46	451.49
min	-204.08	-231.13	-275.33	-220.89	135,10
FSt	1.50	1.33	1.31	1.47	2.21
FSc	4.90	4.33	3.63	4.53	

5 HASIL PERHITUNGAN

Perhitungan dilakukan dengan sumbu puntir tepat pada titik pusat massa tiap-tiap elemen sudu. Tebal spar ditentukan sedemikian rupa sehingga faktor keamanan (*Factor of Safety*, F.S) minimal 1.3 tercapai.

Tabel 5-1 menunjukkan momen dan gaya sentrifugal pada tiap-tiap posisi radial. Momen karena gaya sentrifugal nol karena sumbu puntir tepat pada pusat massa.

Tegangan total yang bekerja pada elemen *torsion box* tergantung pada ketebalan elemen tersebut. *Torsion box* diperkuat menggunakan *high strength carbon unidirectional reinforcement composite* ($\sigma_c = 1000 - 1900$ MPa, $\sigma_o = 1000$ MPa). Jika diambil harga $\sigma_o = 1000$ MPa dan $\sigma_c = 1000$ MPa dan faktor keamanan minimum 1.3, didapat distribusi ketebalan *torsion box* berikut.

6 ANALISIS HASIL PERHITUNGAN

Beban yang bekerja pada sudu turbin angin ini terdiri dari beban aerodinamika dan beban sentrifugal. Beban aerodinamika menyebabkan munculnya momen bending, gaya geser dan torsi. Beban sentrifugal menyebabkan munculnya gaya tarik ke arah radial dan momen bending jika sumbu puntir sudu tidak terletak pada pusat massa tiap-tiap elemen sudu.

Dalam analisis, diambil penyederhanaan:

- gaya geser karena beban melintang diabaikan

- gaya geser karena torsi diabaikan

Dengan demikian, analisis yang dilakukan hanya menampilkan tegangan aksial, tarik maupun tekan, yang bekerja pada spar. Faktor keamanan dihitung hanya berdasarkan kekuatan material dan tegangan aksial yang bekerja.

7 KESIMPULAN

- Sudu turbin angin LPN 10000 E dibuat dari bahan komposit diperkuat dengan *high strength carbon unidirectional reinforcement composite*.
- Sudu terdiri dari elemen *torsion box* yang bervariasi ketebalannya.
- Dengan variasi ketebalan *torsion box* tersebut diperoleh faktor keamanan minimum 1.3.
- Sudu cukup kuat untuk dioperasikan pada *furling wind speed* 15.7 m/s, di mana sistem pengaman sudah mulai bekerja.

DAFTAR RUJUKAN

- Bruhn.E.F., 1965. *Analysis and Design of Flight Vehicle Structure*. Vol II. Tri-State Offset Company, Cincinnati Ohio.
- Mayer, Rayner M, 1996. *Design of composite structures against fatigue : applications to wind turbine blade*. Bury St Edmunds, [Eng] : MEP.
- Pedersen, Troels Friis, 1986. *Measurements of performance of a rotor with KJ-fiber 8 m wind turbine blades*. Roskilde: Ris0 National Laboratory.