

Perancangan Dan Analisis Struktur Komposit Bilah Turbin Angin Kecepatan Rendah Menggunakan Pendekatan Analitik Dan Numerik

Hendrix Noviyanto F, Hendri Syamsudin, Djarot Widagdo

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No 10, Bandung, 40132
firmansyah.hendrix@gmail.com, hendri.syamsudin@ae.itb.ac.id, dwidagdo@ae.itb.ac.id

Abstrak

Perancangan bilah turbin harus memperhatikan aspek material, proses produksi, dan konfigurasi struktur bilah turbin angin. Aspek material memberikan gambaran mengenai jenis material yang digunakan. Pemilihan tersebut juga harus di perhatikan masalah biaya dan ketersediaan barang. Pemilihan proses produksi yang tepat akan membuat bilah turbin angin sesuai dengan desain yang diinginkan. Konfigurasi struktur berkaitan dengan kekuatan bilah turbin dalam pengoperasiannya. Perancangan bilah turbin pada penelitian ini menggunakan bahan komposit laminat (quasi-isotropik) *E-Glass* dan epoxy resin dengan ketebalan laminat pada bilah turbin sebesar 2 mm. Keunggulan material komposit untuk kriteria *Strength to weight ratio* merupakan salah satu alasan pemilihan material komposit. Penelitian ini juga mengkaji tiga konfigurasi struktur bilah, i.e. bilah berongga (*shell*), *skin-spar*, dan *foam-skin sandwich*.

Pemodelan dan analisis tegangan dilakukan melalui pendekatan analitik, menggunakan teori flexural batang dan pendekatan numerik menggunakan perangkat lunak *FEM MSC Patran/Nastran*. Jenis pembebanan yang dianalisa adalah beban aerodinamika dan inersia. Hasil analisis yang diperoleh untuk ketiga konfigurasi struktur antara pendekatan analitik dan numerik menunjukkan hasil yang cukup baik, dengan perbedaan kurang dari 10%, pada daerah yang cukup jauh dari daerah sambungan. Konfigurasi-2 menggunakan single spar memberikan distribusi tegangan paling rendah dibandingkan dua konfigurasi lainnya. Selanjutnya dapat disimpulkan bahwa pendekatan analitik dapat digunakan pada tahap awal perancangan struktur untuk keperluan optimasi struktur komposit.

Kata kunci : *turbin angin, bilah, komposit, pendekatan analitik dan numerik*

1. Pendahuluan

Krisis energi mendorong pengembangan inovasi pembuatan sumberdaya energi terbarukan yang memiliki kriteria murah, efisien, dan ramah lingkungan. Turbin angin merupakan suatu alat berputar yang dapat dimanfaatkan untuk keperluan tertentu dengan mengekstrak energi dari angin.

Turbin angin merupakan salah satu cara pemanfaatan angin untuk menghasilkan listrik. Turbin angin dibuat dengan menggunakan material komposit. penelitian ini bertujuan untuk memahami parameter penting didalam desain struktur bilah angin dan mengetahui pengaruh konfigurasi struktur bilah terhadap gaya dalam

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan kajian teoritik untuk memahami parameter-parameter penting didalam desain bilah turbin angin. Pendekatan analitik digunakan untuk memvalidasi hasil simulasi yang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *MSC Patran/Nastran*. *MSC Patran/Nastran* merupakan perangkat lunak simulasi numerik yang

berbasis metode elemen hingga (MEH). MEH digunakan untuk mendapatkan analisis yang lebih detail pada model yang kompleks

3. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang pertama dilakukan adalah dengan melakukan studi literatur teknik perancangan bilah angin. Pada tahapan ini dilakukan kajian teoritik mengenai proses pemilihan material, pemilihan proses produksi dan kajian konfigurasi struktur dalam. Material yang digunakan adalah *E-Glass* dengan karakteristik propertinya dapat dilihat pada tabel 1.1

Tabel 1. Data Material Lamina^[11]

Karakteristik	Nilai	Satuan
E11	43,500,000	KPa
E22	11,500,000	KPa
E12	3,450,000	KPa
σ_f (tensile)	400,000	KPa
σ_f (kompresi)	390,000	KPa
ν_{12}	0.27	
ρ	2E-06	Kg/mm ³

Konfigurasi struktur bilah yang digunakan ada 3 (tiga), yaitu konfigurasi bilah berongga (*Shell*), konfigurasi menggunakan sebuah spar, dan konfigurasi menggunakan foam pada bagian inti (*sandwich structure*). Karakteristik mekanik foam yang digunakan dapat dilihat pada tabel 2.

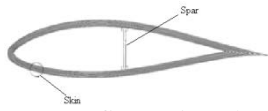
Tabel 2. Data Material *Foam (expanded polystyrene)*^[12]

Karakteristik	Nilai	Satuan
E1	2500.	KPa
v	0.15	
ρ	1,44E-08	Kg/mm ³

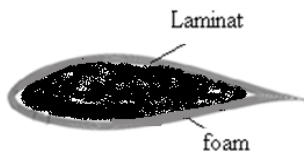
Berikut adalah 3 jenis konfigurasi struktur bilah yang akan dievaluasi:



Gambar 1. Konfigurasi-1 *shell*

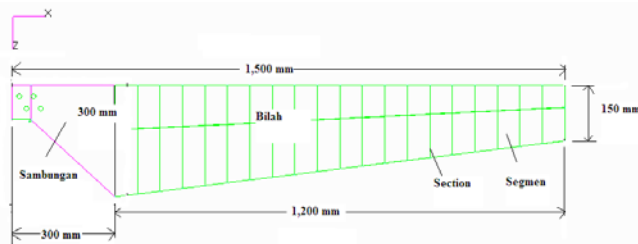


Gambar 2. Konfigurasi-2 *skin-spar*



Gambar 3. Konfigurasi-3 *foam-skin sandwich* model yang divalidasi adalah bagian bilah pada model 1^[11] (bilah berongga). Bagian sambungan tidak dilakukan validasi.

4. Data Model dan Beban



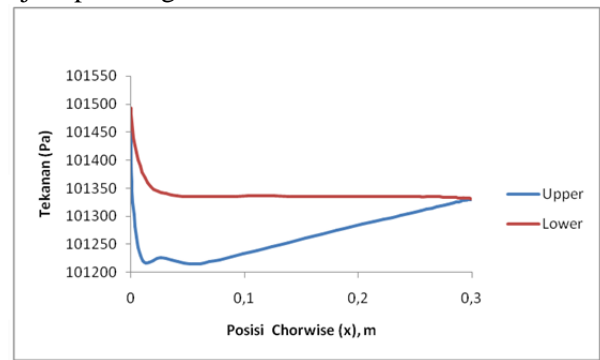
Gambar 4. Dimensi bilah

Bilah pada model dibagi menjadi 20 segmen yang jarak antar segmennya 60 mm dan bilah tidak memiliki sudut puntir. Susunan komposit yang digunakan pada kesemua model adalah [0/45/-45/90]_s dengan ketebalan tiap lamina 0,25 mm. ketebalan yang digunakan pada pemodelan adalah 2 mm.

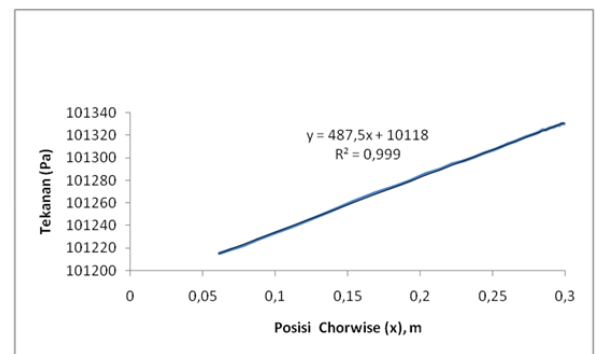
Beban yang digunakan dalam analisis ini adalah beban aerodinamika^[11] dan inersia^[11]. Beban aerodinamika pada bilah turbin, diperoleh dari penelitian sebelumnya^[13] menggunakan perangkat lunak *Fluent*. Beban inersia adalah beban sentrifugal saat bilah berputar pada 350 rpm.

Distribusi tekanan yang diaplikasikan pada permukaan atas dan bawah kulit bilah turbin didekati

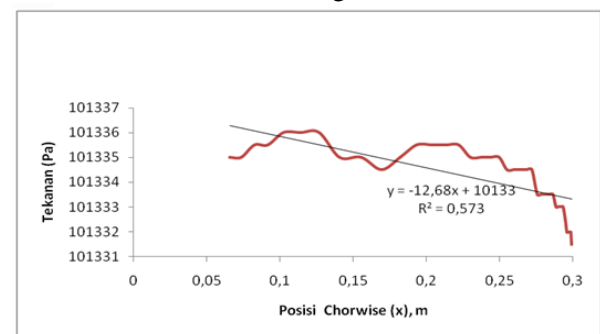
dengan persamaan linier distribusi tekanan. Berikut adalah contoh penyederhanaan distribusi tekanan yang terjadi pada segmen 1



Gambar 5. Distribusi tekanan pada Segmen 1 hasil *Fluent*.



Gambar 6. Penyederhanaan distribusi tekanan pada kulit atas segmen 1



Gambar 7. Penyederhanaan distribusi tekanan pada kulit bawah segmen 1

Pendekatan analitik dilakukan untuk memberikan nilai referensi yang akan dijadikan nilai pembandingan untuk validasi model. Pada perhitungan analitik ini dilakukan dengan 3 tahapan, yaitu Perhitungan tegangan akibat beban aerodinamika, Perhitungan tegangan akibat inersia, dan Perhitungan tegangan kombinasi (tegangan referensi untuk konvergensi). Pendekatan analitik untuk menghitung tegangan akibat momen lentur adalah sebagai berikut

$$\sigma_{bm} = -\frac{M_{xx} y}{I_{xx}} \tag{1}$$

Sedangkan untuk beban inersia menggunakan persamaan tegangan pada bilah akibat gaya sentrifugal.

$$\sigma_i = \frac{F}{A} \tag{2}$$

Dimana gaya sentrifugal dihitung

menggunakan persamaan berikut:

$$F = m \times \omega^2 \times R \tag{3}$$

Setelah diketahui tegangan akibat beban aerodinamika dan inersia, langkah selanjutnya adalah mengkombinasikan beban kedua beban tersebut yang kemudian dijadikan beban untuk model. Tegangan kombinasi menggunakan persamaan sebagai berikut

$$\sigma_t = \sigma_{bm} + \sigma_i \tag{4}$$

Pemodelan yang dilakukan menggunakan perangkat lunak MSC Patran/Nastran dengan kondisi batas yang digunakan pada model adalah fixed (tidak diperbolehkan translasi dan momen arah x, y, dan z). Setelah dilakukan validasi dengan pendekatan analitik, langkah selanjutnya adalah melakukan uji konvergensi dengan memvariasikan jumlah elemen pada model untuk diambil jumlah elemen yang akan diaplikasikan pada ke 3 model konfigurasi struktur.

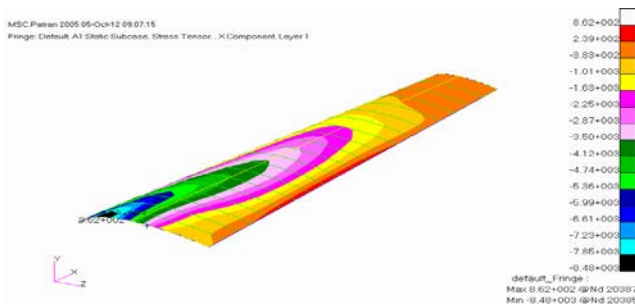
Variasi jumlah elemen yang digunakan adalah 410 elemen, 1.640 elemen, 6.560 elemen, 26.240 elemen, dan 104.960 elemen. Rasio perbandingan panjang sisi elemen adalah 40%. Letak nodal yang dilakukan validasi berjarak 32% dari panjang chord pada tiap section. Letak tersebut adalah titik maksimum profil airfoil bilah turbin angin.

5. Validasi Model

Validasi model dilakukan dengan membandingkan perhitungan analitik dengan hasil analisis tegangan menggunakan *MSC Patran/Nastran*. Validasi yang dilakukan pada kulit bilah atas pada section 8, 9, 10, dan 11. Pada section tersebut diharapkan tidak terpengaruh terhadap kondisi batas. Berikut adalah tabel perbandingan untuk tiap pembebanan

Tabel 3. Perbandingan perhitungan tegangan kulit bilah atas beban aerodinamika

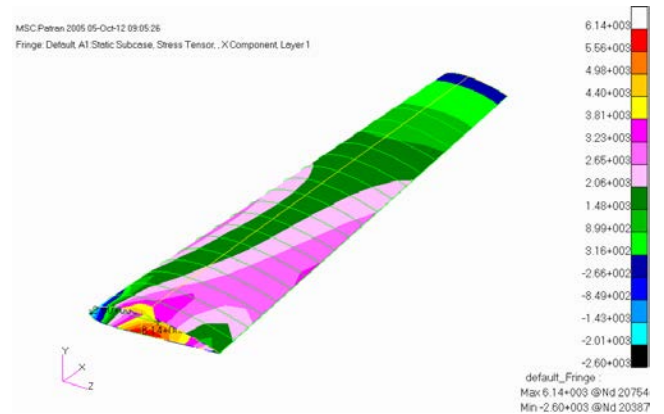
Section	Hasil Analitik	Hasil MSC Patran/Nastran		%
	KPa	Node	Kpa	
8	-3831.39	20425.00	-3889.11	1.48
9	-3473.68	20431.00	-3536.12	1.77
10	-3095.14	20437.00	-3189.10	2.95
11	-2703.39	20443.00	-2840.05	4.81



Gambar 8. Plot tegangan kulit bilah atas akibat beban aerodinamika

Tabel 4. Validasi beban inersia

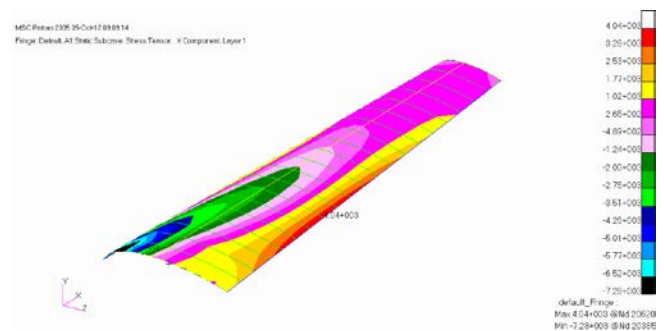
Section	Node	Hasil MSC Patran/Nastran	Hasil Analitik	%
		KPa	KPa	
8	20425	1.88E+03	1.96E+03	-4.20
9	20431	1.97E+03	1.95E+03	0.71
10	20437	2.01E+03	1.93E+03	4.16
11	20443	2.01E+03	1.89E+03	6.04



Gambar 9. Plot tegangan kulit bilah atas akibat beban inersia

Tabel 5. Validasi beban kombinasi (aerodinamika dan inersia)

Section	Tegangan Akibat Aerodinamika	Tegangan akibat inersia	Tegangan Kombinasi	Nodal	SC Patran	%
	KPa	KPa	KPa			
8	-3,831.39	1,962.07	-1.87E+03	20425	-2.02E+03	7.4
9	-3,473.68	1,951.00	-1.52E+03	20431	-1.57E+03	3.2
10	-3,095.14	1,925.96	-1.17E+03	20437	-1.18E+03	0.5
11	-2,703.39	1,886.66	-8.17E+02	20443	-8.21E+02	0.5



Gambar 10. Plot tegangan kulit bilah atas akibat beban kombinasi (aerodinamika dan inersia)

Telihat pada tabel 3 dan 4, pendekatan analitik cukup akurat dibandingkan dengan model numerik yang lebih kompleks. Distribusi tegangan pada permukaan kulit secara keseluruhan akibat aerodinamika dan inersia ditunjukkan oleh gambar 8 dan 9.

Tabel 6. Konvergensi Kulit Bilah Atas

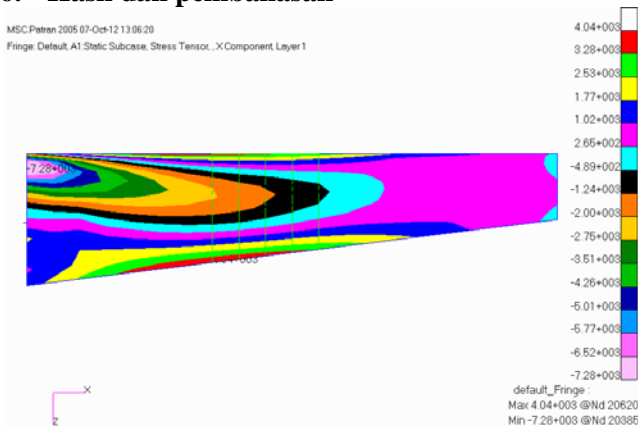
Section	Analitik KPa	Nodal	Hasil MSC Patran/Nastran Kulit Bilah Atas				
			410 elemen	1.640 elemen	6.560 elemen	26.240 elemen	104.960 elemen
			%	%	%	%	%
8	-1.87E+03	20425	7.40	30.48	10.85	11.58	11.63
9	-1.52E+03	20431	3.25	29.98	7.43	8.25	8.36
10	-1.17E+03	20437	0.51	31.04	5.79	6.75	6.93
11	-8.17E+02	20443	0.52	34.69	7.36	8.51	8.81

Tabel 7. Konvergensi Kulit Bilah Bawah

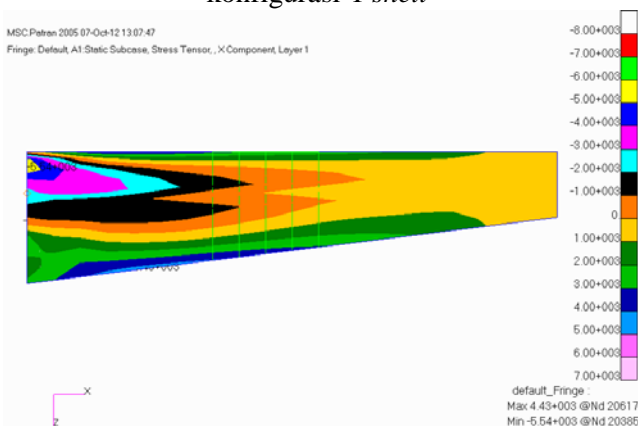
Section	Analitik KPa	Nodal	Hasil MSC Patran/Nastran Kulit Bilah Bawah				
			410 elemen	1.640 elemen	6.560 elemen	26.240 elemen	104.960 elemen
			%	%	%	%	%
8	5.17E+03	20425	3.73	12.08	4.39	4.40	4.40
9	4.96E+03	20431	1.10	9.45	1.81	1.83	1.84
10	4.63E+03	20437	0.99	8.96	1.67	1.69	1.70
11	4.27E+03	20443	1.66	8.85	2.19	2.21	2.22

Nilai tegangan yang digunakan untuk perbandingan tegangan adalah hasil model FEM dengan 26.240 elemen.

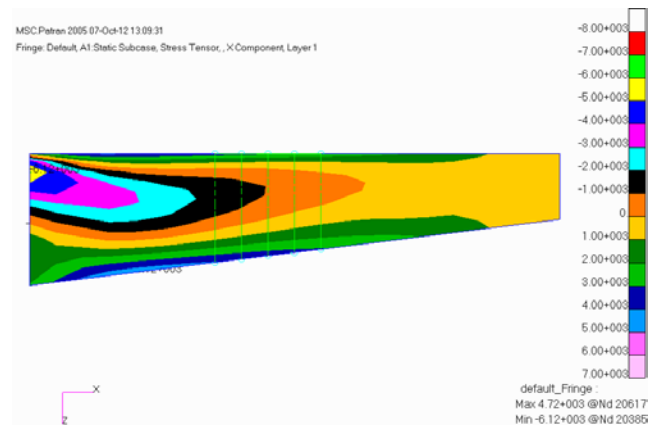
6. Hasil dan pembahasan



Gambar 11. Plot tegangan kulit bilah atas konfigurasi-1 shell



Gambar 12. Plot tegangan kulit bilah atas konfigurasi-2 skin-spar



Gambar 13. Plot tegangan kulit bilah atas konfigurasi-3 foam-skin sandwich

Plot tegangan konfigurasi model 1, konfigurasi model 2, dan konfigurasi model 3 dapat dilihat pada gambar 11 sampai gambar 13. Perbandingan tegangan yang dilakukan adalah membandingkan tegangan yang dilakukan model 2 dan model 3 dengan model 1. Tabel tegangan perbandingan kulit bilah atas dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 8. Tegangan pada Kulit Atas Bilah

Section	Nodal	Model 1 Kpa	Model 2		Model 3	
			Kpa	%	Kpa	%
1	20383	-7.56E+02	-1.12E+03	32.54	-1.24E+03	39.16
2	20389	-2.33E+03	-2.52E+03	7.50	-3.02E+03	22.70
3	20395	-3.44E+03	-3.68E+03	6.53	-3.85E+03	10.84
4	20401	-3.46E+03	-3.39E+03	-2.15	-3.55E+03	2.42
5	20407	-3.29E+03	-2.90E+03	-13.40	-2.98E+03	-10.39
6	20413	-2.90E+03	-2.37E+03	-22.56	-2.41E+03	-20.38
7	20419	-2.45E+03	-1.88E+03	-30.34	-1.98E+03	-24.06
8	20425	-1.99E+03	-1.49E+03	-33.94	-1.60E+03	-24.15
9	20431	-1.56E+03	-1.15E+03	-34.88	-1.28E+03	-22.08
10	20437	-1.17E+03	-8.75E+02	-33.37	-9.68E+02	-20.58
11	20443	-8.19E+02	-6.22E+02	-31.78	-6.80E+02	-20.55
12	20449	-4.94E+02	-3.83E+02	-28.87	-4.08E+02	-20.95
13	20455	-1.72E+02	-1.61E+02	-6.88	-1.57E+02	-9.17
14	20461	1.54E+02	3.89E+01	-296.23	7.57E+01	-103.47
15	20467	4.48E+02	2.20E+02	-103.17	2.94E+02	-52.19
16	20473	6.33E+02	3.95E+02	-60.22	4.89E+02	-29.35
17	20479	6.89E+02	5.40E+02	-27.57	6.33E+02	-8.80
18	20485	6.73E+02	6.13E+02	-9.88	6.98E+02	3.48
19	20491	5.82E+02	5.29E+02	-10.02	6.31E+02	7.79

Ketebalan sparweb yang digunakan pada model 2 adalah 2 mm atau memiliki ketebalan yang sama dengan kulit bilah. Pengurangan tegangan pada model 2 dimulai dari section 4 sampai section 19, dan pada model 3 mulai dari section 4 sampai model 17. Section 1 sampai section 3 terjadi penambahan tegangan untuk model 2 dan model 3.

Seperti halnya pada kulit bilah atas, perbandingan tegangan juga dilakukan pada kulit bilah bawah, dapat dilihat pada tabel 7. Penambahan struktur spar dan foam pada model 2 dan model 3 menunjukkan pengurangan tegangan yang terjadi hanya pada model 2. Pada model 3 terjadi kenaikan tegangan dilihat dari notasi positif dari persentase tegangan yang terjadi.

Tabel 9. Tegangan Bawah Kulit

Section	Nodal	Model 1		Model 2		Model 3	
		Kpa	Kpa	%	Kpa	%	
1	20822	7.01E+03	6.84E+03	-2.41	6.37E+03	-9.93	
2	20821	8.91E+03	8.88E+03	-0.35	9.12E+03	2.35	
3	20820	7.35E+03	7.04E+03	-4.40	7.08E+03	-3.91	
4	20819	6.91E+03	6.75E+03	-2.27	6.72E+03	-2.76	
5	20818	6.47E+03	6.33E+03	-2.15	6.44E+03	-0.47	
6	20817	6.10E+03	6.01E+03	-1.46	6.19E+03	1.45	
7	20816	5.77E+03	5.75E+03	-0.32	5.96E+03	3.19	
8	20815	5.47E+03	5.47E+03	-0.02	5.71E+03	4.18	
9	20814	5.19E+03	5.18E+03	-0.14	5.42E+03	4.38	
10	20813	4.91E+03	4.85E+03	-1.13	5.10E+03	3.73	
11	20812	4.60E+03	4.50E+03	-2.34	4.72E+03	2.55	
12	20811	4.27E+03	4.11E+03	-4.03	4.31E+03	0.88	
13	20810	3.86E+03	3.70E+03	-4.48	3.88E+03	0.47	
14	20809	3.35E+03	3.27E+03	-2.33	3.43E+03	2.21	
15	20808	2.85E+03	2.80E+03	-1.89	2.89E+03	1.48	
16	20807	2.38E+03	2.30E+03	-3.51	2.37E+03	-0.10	
17	20806	1.84E+03	1.79E+03	-3.01	1.89E+03	2.17	
18	20805	1.31E+03	1.27E+03	-3.36	1.37E+03	3.94	
19	20804	8.28E+02	8.03E+02	-3.11	8.83E+02	6.21	

Selain perbandingan tegangan pada kulit bilah, variabel yang dibandingkan adalah massa.

Tabel 10. Perbandingan Massa

model	model 1	model 2	model 3
Massa (Kg)	2.67	2.82	2.76

Dari perbandingan massa model 1 memiliki nilai massa yang paling kecil bila dibandingkan dengan model yang lain, biarpun persentasenya kecil sebesar 5 % dari model 2.

Untuk perbandingan deformasi model 3 memiliki keunggulan dibanding model yang lainnya.

Tabel 11. Perbandingan Deformasi Maksimum

Model	1	2	3
Defleksi (mm)	8.8	8.28	8.23

Dari tinjauan proses produksi, model 1 merupakan model yang paling mudah dibuat dibandingkan dengan dua model yang lainnya.

Model 2 dan 3 memiliki kemampuan menurunkan tegangan tekan pada kulit bilah dan meningkatkan kekakuan untuk tidak mengalami kegagalan tekuk (buckling) pada kulit. Banyak kasus kerusakan yang terjadi pada bilah karena akibat beban tekan. Untuk beban tarik, ketiga model tidak dipengaruhi oleh konfigurasi yang digunakan.

7. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Hasil analisis ke-3 model menunjukkan perubahan tegangan yang terjadi pada kulit bilah turbin dengan adanya penambahan

struktur. Konfigurasi model 2 merupakan konfigurasi dengan nilai tegangan paling kecil dibandingkan dengan ke-2 konfigurasi struktur yang lainnya. Pertimbangan massa total model menunjukkan model 1 merupakan konfigurasi model struktur yang memiliki massa yang paling sedikit yaitu sebesar 2,67 Kg.

2. Pilihan model konfigurasi struktur yang direkomendasikan adalah konfigurasi struktur model 2 dan 3 dengan pertimbangan kekakuan lentur yang lebih baik.
3. Pada tahap awal perancangan struktur bilah turbin, pendekatan analitik cukup akurat untuk memprediksi beban yang terjadi pada bagian yang cukup jauh dari daerah konsentrasi tegangan.

Daftar Notasi

- σ_{bm} adalah tegangan dalam akibad aerodinamika (N/m^2)
- M_x adalah momen lentur sumbu x (Nm)
- y adalah jarak arah sumbu y (m)
- I_{xx} adalah momen of inersia pada sumbu x-x (m^4)
- F adalah gaya sentrifugal (N)
- A adalah luas area penampang (m^2)
- σ_i adalah tegangan akibad beban inersia (N/m^2)
- m adalah massa (Kg)
- ω adalah kecepatan sudut (rad/s)
- R adalah radius (m)
- σ_t adalah tegangan total (tegangan akibad aerodinamika + tegangan inersia) (N/m^2)
- KPa adalah Kilo Pascal
- MPa adalah Mega Pascal

Daftar Pustaka

1. *Applied stress analysis, section XI, composite Material Analysis*, General Dynamics, Convair Division
2. Hansen, Martin O. L., *Aerodynamics of wind turbines*, 2nd edition., Earthscan, 2008
3. Burton. Tony., *Handbook of wind energy*, John Wiley & Sons, Ltd, 2001
4. www.google.com/wind-turbine
5. www.wikipedia.org/wind-turbine
6. Jensen, F Mølholt, *Ultimate Strength Of A Large Wind Turbine Blade*, Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Roskilde & Kgs. Lyngby, Denmark, 2008
7. Burton, Tony., Sharpe, David., Jenkins, Nick., Bossanyi, Ervin, *Wind Energy Handbook*, JOHN WILEY & SONS, 2001
8. Callister, William D. *Materials science and Engineering*. Jhon Willey & Son Inc.
9. <http://www.goodfellow.com/catalogue>

10. Niu, Michael Chun-Yung. *Composite Airframe Structures*. Conmilit Press LTD. Hongkong
11. Sbastian, Benito, *Pemodelan Dan Analisis Sambungan Mekanik Pada Struktur Komposit Bilah Turbin Angin Menggunakan Metode Elemen Hingga*, Tugas Akhir, Fakultas Teknik Mesin Dan Dirgantara, ITB, 2011
12. EPS Geofoam Data Sheet
13. Wahyu K.D., Ridlo N, Laporan Perancangan Struktur Turbin Angin dengan Bahan Komposit, Fakultas Teknik Mesin Dan Dirgantara, ITB, Indonesia. 2011