

Studi Numerik Defleksi dan Distribusi Tegangan pada *Spar* dengan Struktur *I-Beam* yang Terbuat dari Material Komposit—Aplikasi pada Sudu Turbin Angin Avatar

Bilqis Nabilah Madsurah¹, Putu Suwarta¹, dan Galih Bangga²

¹Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

²Institute of Aerodynamics and Gas Dynamics, University of Stuttgart

e-mail: putu_suwarta@me.its.ac.id

Abstrak—Dalam pembuatan sudu turbin angin harus diperhatikan material yang digunakan. Sudu turbin angin harus memiliki kekuatan spesifik yang tinggi (*strength to weight ratio*) dengan berat yang ringan. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dipelajari kinerja *spar* dari sudu turbin angin yang terbuat dari material komposit *carbon reinforced polymer* dan *glass fiber reinforced polymer*. Struktur *spar* pada sudu turbin angin memiliki geometri *cantilever I beam*. Dimensi *spar* disesuaikan dengan dimensi pada turbin angin riset AVATAR (*Advanced in Aerodynamic Tools of large Rotors*) dan referensi INNWIND.EU dengan lebar pada *flange* dan *web* dibuat menjadi konstan. Penelitian dilakukan dengan pendekatan numerik *finite element analysis* menggunakan aplikasi ABAQUS CAE 2017. Sebelumnya akan dilakukan validasi model simulasi dengan membandingkan hasil defleksi studi terdahulu dengan penelitian ini. Hasil dari validasi menghasilkan perbedaan defleksi sebesar 0.1%. Hal ini menandakan pemodelan yang digunakan sudah sesuai. Selanjutnya, dipelajari kinerja defleksi dan tegangan pada *spar* yang terbuat dari 3 material berbeda yaitu S-glass 913/epoxy, TC35/epoxy, dan M55/epoxy dengan distribusi serat merata dan *unidirectional*. Hasil penelitian menunjukkan nilai defleksi dipengaruhi oleh modulus elastisitas E_1 yang dapat menahan deformasi elastis. Selain itu, didapatkan daerah yang memiliki tegangan paling tinggi pada *spar caps* terletak di bagian *root* yang menjadi penopang gaya pembebanan. Sedangkan pada *shear web*, tegangan maksimum terletak pada bagian atas dan bawah yang mengalami kontak langsung dengan *spar caps*. Ketiga daerah ini harus diperhatikan lebih lanjut dikarenakan daerah dengan tegangan maksimum memiliki kemungkinan terjadinya *failure* pada sudu turbin angin.

Kata Kunci—Turbin Angin, Defleksi, Tegangan, Sudu, Komposit.

I. PENDAHULUAN

KEBUTUHAN energi listrik semakin hari semakin meningkat dengan permintaan listrik pada tahun 2050 diperkirakan akan naik 9 kali lipat dari tahun 2018 [1]. Namun, pembangkit listrik di Indonesia sendiri masih didominasi oleh bahan bakar fosil, terutama batu bara. Penggunaan bahan bakar ini akan menghasilkan emisi CO_2 ke atmosfer dalam jumlah tertentu dan akan berdampak buruk terhadap alam.

Penggantian bahan baku pembangkit listrik dari energi tidak terbarukan menjadi energi terbarukan merupakan salah satu cara untuk mengurangi pencemaran lingkungan akibat gas emisi CO_2 . Salah satu energi terbarukan yang dapat digunakan adalah energi angin untuk menggerakkan

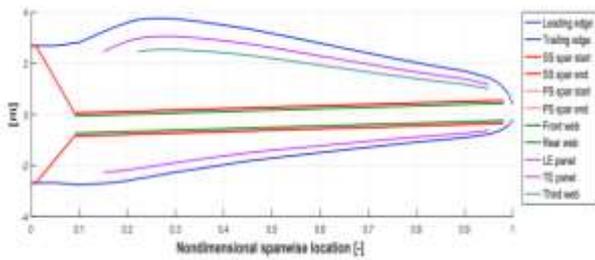
pembangkit listrik turbin angin.

Turbin angin merupakan mesin yang mengonversi energi kinetik dari angin menjadi energi listrik. Angin yang mengalir melalui turbin akan menggerakkan putaran sudu rotor. Putaran dari sudu membuat *gearbox* bekerja untuk menaikkan kecepatan putaran pada *shaft* [2]. Sehingga, *generator* yang terhubung dengan *gearbox* dapat menghasilkan arus listrik [3].

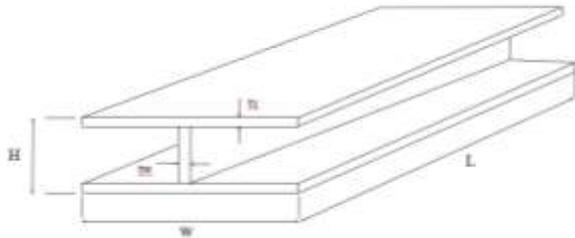
Bagian luar sudu turbin angin terdiri dari dua permukaan *airfoil* (sisi *suction* dan sisi *pressure*). Tujuan utama *airfoil* adalah memberi sudu bentuk aerodinamis, sehingga tercipta gaya aerodinamis yang dapat membuat sudu turbin bergerak rotasi. Gaya aerodinamis ditransmisikan ke turbin angin melalui *load-carrying beam* yang berada di dalam sudu [4]. *Load-carrying beam* yang bisa disebut sebagai *main spar* terdiri dari *spar caps* dan *shear web*, dimana *spar caps* berguna untuk menahan *bending moment* dan *shear web* berguna untuk menahan *shear force* [5].

Pada tahun 1941, turbin angin dibuat menggunakan sudu berbahan baja oleh perusahaan Morgan-Smith. Namun, terjadi *failure* pada salah satu sudu setelah beberapa ratus jam beroperasi [6]. Secara keseluruhan, sudu turbin memiliki proporsi terbesar dalam *fatigue failure*, yaitu sebesar 50% dibandingkan komponen lainnya [7]. Hal ini menunjukkan pentingnya dilakukan studi lanjut mengenai sudu turbin angin. Sampai saat ini sudah banyak dilakukan studi mengenai sudu turbin angin, salah satunya adalah studi oleh Prombut dkk, yang meneliti defleksi pada material komposit dengan jenis orientasi serat yang berbeda [8]. Studi lain juga dilakukan Meng Kao yang menganalisis tegangan pada sudu turbin angin menggunakan metode *finite element* [9].

Pada penelitian ini akan digunakan sudu dari model AVATAR dan referensi dimensi INNWIND.EU untuk mencari pengaruh tiga jenis material komposit terhadap kinerja sudu turbin angin bagian *spar caps* dan *shear web* dengan menganalisa defleksi dan distribusi tegangannya. Sudu turbin angin menggunakan jenis material karbon baru yang memiliki ketebalan lebih kecil dibanding material karbon lainnya, yaitu *S-glass 913/epoxy*, *TC35/epoxy*, dan *M55/epoxy*. Dari ketiga material ini, hasil defleksi yang dapat digunakan sebagai parameter kekuatan pada sudu turbin angin. Tegangan yang dihasilkan juga dapat digunakan untuk menganalisis kemungkinan terjadinya *failure* pada sudu. Dengan memprediksi *failure* pada sudu, maka dapat dianalisis lebih lanjut daya tahan dan umur hidup dari sudu.



Gambar 1. Bentuk Sudu Turbin Angin AVATAR PoliMI.



Gambar 2. Pemodelan Dimensi Cantilever I beam.

Tabel 1.
Dimensi Cantilever I beam

Parameter	Spar Caps	Shear Web
Panjang (w,L)	0.8 m	102.8 m
Tebal (ts,tw)	0.06 m	0.04 m
Tinggi (H)	0.696 m	0.696 m

Tabel 2.
Poisson Ratio untuk Material S-Glass/Epoxy, TC35/Epoxy, M55 Epoxy

Material	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
S-Glass/Epoxy	0.30	0.30	0.32
TC35/Epoxy	0.30	0.30	0.31
M55/Epoxy	0.31	0.31	0.32

II. PEMODELAN SUDU TURBIN ANGIN

A. Pemodelan Cantilever I-beam

Pemodelan sudu dibuat menggunakan dimensi dari data riset model AVATAR. Pada Gambar 1 ditunjukkan bentuk dari sudu turbin angin AVATAR dengan lebarnya yang konstan disepanjang sudu turbin angin. Sudu turbin angin AVATAR terdiri dari *airfoil* dan *spar*, dimana *spar* ini memiliki dua *spar caps* pada bagian atas dan bawah (berwarna merah) dan tiga *shear web* pada bagian kanan dan kiri (berwarna hijau dan biru muda). Pada bagian *spar caps* yang mendekati ujung (*root*) terdapat perubahan lebar yang semakin mengecil. Pada penelitian ini akan dibuat beberapa perubahan dimensi, yaitu lebar *spar caps* dibuat konstan sepanjang sudu turbin angin dari *root* hingga ujung dan *shear web* dibuat memiliki panjang yang sama dengan *spar caps* agar dapat dibuat struktur *I beam spar* dengan panjang 102.88 m. Selain itu, *shear web* ketiga dan *airfoil* tidak akan digunakan pada pemodelan. Perubahan ini dilakukan untuk mempermudah proses simulasi dan juga melihat dari penelitian Roth-Johnson yang menyatakan kinerja struktural pada *spar* sudah mewakili kinerja struktural dari seluruh sudu [10].

Pada laporan AVATAR tidak dicantumkan tebal dari *unidirectional laminate* pada *spar caps* dan *shear webs*, sehingga digunakan referensi AVATAR yaitu model INNWIND [11]. Dengan menggunakan model referensi

Tabel 3.
Shear Modulus Elastisitas Constant untuk Material S-Glass/Epoxy,TC35/Epoxy, M55 Epoxy

Material	G_{12} (Gpa)	G_{13} (Gpa)	G_{23} (Gpa)
S- Glass/Epoxy	3.1	3.1	3.90
TC35/Epoxy	4.4	4.4	4.19
M55/Epoxy	3.1	3.1	2.38

Tabel 4.
Shear Modulus Constant untuk Material S-Glass/Epoxy,TC35/Epoxy, M55 Epoxy

Material	E1(Gpa)	E2(Gpa)	E3(Gpa)
S-Glass/Epoxy	45.7	10.3	10.3
TC35/Epoxy	114.3	11	11
M55/Epoxy	280	6.3	6.3

Tabel 5.
Jumlah Ply pada Laminate Shear Web dan Spar Caps

Material	Tebal Ply (m)	Ketebalan		Jumlah Ply	
		Spar Caps	Spar Web	Spar Caps	Spar Web
SGlass/Epoksi	0.000155			388	259
TC35/Epoksi	0.000027	0.06	0.04	2223	1482
M55/Epoksi	0.00003			2000	1334

INNWIND, maka didapatkan lebar dari *spar caps* dan *shear web* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Pada ABAQUS, *cantilever i beam* dibuat menggunakan model 3D *deformable* dengan *base feature solid extrusion*. Bagian *cross section* diberi partisi pada bagian atas dan bawah pada *shear web* yang bertujuan agar *spar caps* dan *shear web* dapat diberi lapisan dengan arah yang berbeda, lihat Gambar 2. Beban diberikan pada permukaan atas *spar caps*, dimana beban yang diberi akan dibuat merata sepanjang *beam*. Pada pemodelan awal, *I beam* akan dimodelkan sebagai solid namun akan diatur menjadi *continuum shell element* pada *numerical setup* agar dapat menginput *composite layup*.

B. Material Properties

Pada ABAQUS, digunakan material bersifat elastis dengan jenis *engineering constant* yang membutuhkan *input berupa material properties* E1, E2, E3, ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , G12, G13, dan G23. *Material properties* pada penelitian ini menggunakan referensi dari penelitian Suwarta dimana terdapat beberapa konstanta *engineering constant* yang belum diketahui [12]. Sehingga, untuk mencari konstanta tersebut dapat menggunakan persamaan di bawah ini:

$$E3 = E2, G13 = G12, \nu13 = \nu12 \quad (1)$$

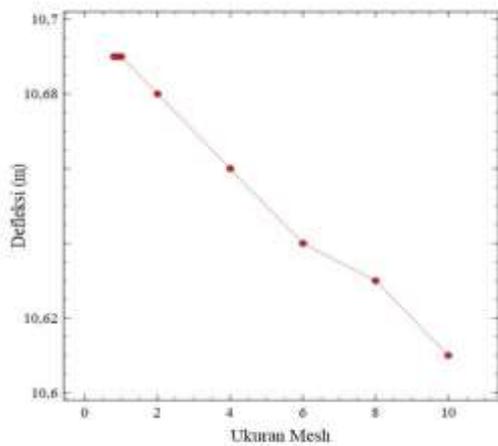
$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})} \quad (2)$$

Maka dengan menggunakan persamaan tersebut didapatkan konstanta seperti pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

Pada studi ini akan digunakan susunan *unidirectional laminate* yang terdiri dari *unidirectional ply* dengan jumlah *ply* tertentu. Jumlah ini dapat dicari dengan menghitung tebal masing-masing *spar cap* dan *shear web* yang hasilnya ditunjukkan oleh Tabel 5 dengan hasil yang dibulatkan.

C. Boundary Condition

Pada pemodelan I beam diberi *boundary condition* yang terdiri dari *load*, *encastre*, dan *displacement*. Agar bagian ujung *cantilever beam* dapat dibuat menjadi *fixed support*, diperlukan menggunakan *encastre* pada *boundary condition*



Gambar 3. Studi Konvergensi Mesh.

Tabel 6. Gaya Pembebanan spar sepanjang Radius Sudu Turbin Angin AVATAR

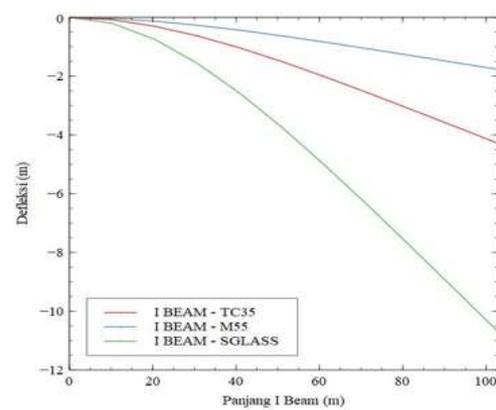
Radius (m)	F_{spar} (N/m)
10.29	97.778
15.44	125.534
20.58	132.354
25.73	173.552
30.04	273.045
36.02	485.287
45.36	785.253
50.93	986.436
61.74	1403.225
69.54	1762.941
82.32	2377.229
90.30	2801.068
97.76	3091.579
101.42	3183.660
102.88	2909.641

dimana *encastre* menahan seluruh struktural *degree of freedom* pada bagian yang dipilih ($U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$). Lalu *displacement* akan membuat gaya yang diberikan pada bagian atas sudu akan menyeluruh ke setiap bagian model sehingga respon akan diberikan sebagai satu kesatuan.

D. Gaya Pembebanan

Variasi beban yang akan diberikan pada bagian atas sudu akan menggunakan gaya angin pada studi AVATAR yang disimulasikan menggunakan CFD. Pada AVATAR, gaya pembebanan diaplikasikan pada seluruh permukaan sudu turbin angin. Sementara pada penelitian yang dilakukan gaya pembebanan diaplikasikan hanya pada *spar* (*shear web* dan *spar caps*). Sehingga jika digunakan variasi beban dari AVATAR, kekakuan yang menahan gaya pembebanan hanyalah kekakuan dari *spar*, dimana seharusnya kekakuan oleh keseluruhan struktur sudu juga ikut menahan gaya pembebanan. Hal ini akan menyebabkan defleksi pada penelitian memiliki hasil yang tidak akurat. Untuk mengatasi masalah tersebut, dapat dicari gaya pembebanan spesifik yang terjadi pada permukaan *spar*. Dengan mengasumsikan tekanan dari gaya angin sama di sepanjang *chord* serta kekakuan pada *spar* dan *airfoil* juga sama, dapat dihitung gaya pembebanan spesifik pada *spar* menggunakan persamaan 3 berikut:

$$P_{spar} = P_{airfoil}$$



Gambar 4. Perbandingan Simulasi Defleksi Material S-glass/Epoxy, M55/Epoxy, dan TC35/Epoxy.

Tabel 7. Hasil Simulasi Validasi Model

Hasil Simulasi	Model	
	Prombut	Numerical modelling
Tip Deflection	91.4 mm	91.3 mm
Perbedaan	0.1%	

$$\frac{F_{spar}}{W_{spar}} = \frac{F_{blade}}{W_{chord}}$$

$$F_{spar} = \frac{F_{blade}}{w_{chord}} \times W_{spar} \tag{3}$$

Maka didapatkan gaya pembebanan spesifik pada bagian *spar* yang ditunjukkan pada Tabel 6.

E. Studi Konvergensi Mesh

Studi konvergensi *mesh* bertujuan dalam menentukan berapa banyak elemen yang diperlukan dalam model untuk memastikan bahwa hasil analisis tidak terpengaruh oleh perubahan ukuran *mesh*, lihat Gambar 3. Hal ini dilakukan dengan cara melakukan percobaan variasi ukuran *mesh* dari ukuran yang paling kasar hingga paling halus hingga hasil dari kurva terlihat stabil. Dari studi ini didapatkan hasil seperti Gambar 3, dimana diuji variasi ukuran *mesh* dari ukuran 10 hingga 0.8 dan didapatkan hasil defleksi yang sama pada ukuran *mesh* 0.8 hingga 1 sebesar 10.69 m. Maka dapat diketahui pada ukuran 1 *mesh* sudah konvergen.

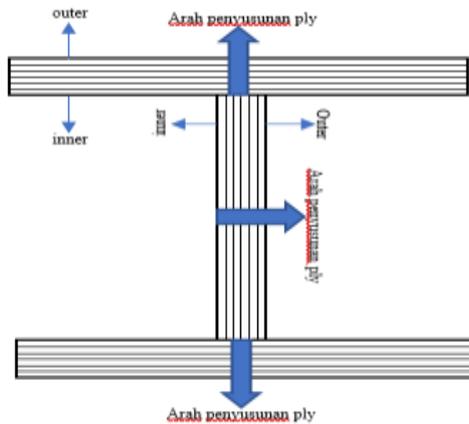
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Validasi model

Validasi model dilakukan untuk memastikan apakah model penelitian yang dibuat sudah merepresentasikan model pada dunia nyata dan memastikan model memiliki kredibilitas yang baik. Proses ini dilakukan dengan membandingkan hasil studi terdahulu oleh Prombut dengan model penelitian. Proses simulasi model dilakukan menggunakan *layup* komposit F4W2 pada model oleh Prombut, dimana orientasi serat bagian *flange* memiliki susunan $[90/45/-45/0/0]_{2s}$ dan bagian *web* memiliki susunan $[0/90]_{5s}$. Pemodelan dibuat pada ABAQUS sesuai dengan variabel penelitian Prombut dan menghasilkan *tip deflection* sebesar 91.3 mm. Hasil simulasi dibandingkan antara kedua model seperti pada Tabel 7 dimana hasil *tip deflection* prombut dan penelitian

Tabel 8.
Perbandingan Nilai Modulus Elastisitas material S-glass/Epoxy, M55/Epoxy, dan TC35/Epoxy

Material	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	E3 (Gpa)	Defleksi Maksimum (m)
S-Glass/Epoxy	45.7	10.3	10.3	10.69
TC35/Epoxy	114.3	11	11	4.28
M55/Epoxy	280	6.3	6.3	1.77



Gambar 5. Arah Penyusunan Ply pada Shear Web dan Spar Caps.



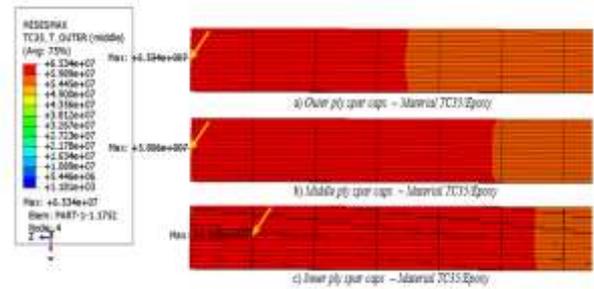
Gambar 6. Kontur Tegangan Von Mises Maksimum Material S-glass/Epoxy pada Spar Caps.

memiliki perbedaan sebesar 0.1%. Hasil dari simulasi menghasilkan perbedaan tip deflection dengan error kurang dari 3% sehingga validasi model sudah berhasil dan pemodelan penelitian yang dilakukan ABAQUS sudah sesuai.

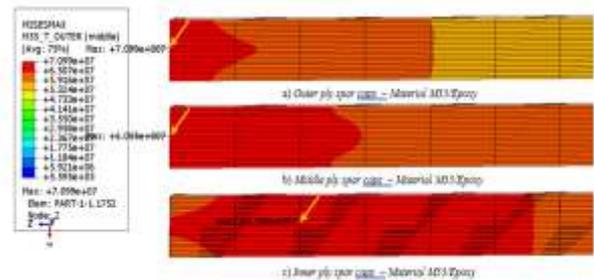
B. Hasil Defleksi

Setelah model melalui proses validasi, dilakukan simulasi cantilever I beam menggunakan material S-Glass/Epoxy, TC35/Epoxy, dan M55/Epoxy pada software ABAQUS CAE 2017. Hasil defleksi yang didapatkan dibandingkan melalui grafik pada Gambar 4, dimana ketiga material memiliki tren kurva yang sama. Ketiga material mengalami kenaikan nilai defleksi seiring dengan bertambahnya panjang I beam, dimana nilai defleksi terbesar secara berurut adalah material S-glass/Epoxy, TC35/Epoxy, dan M55/epoxy.

Dapat dilihat pada Tabel 8, terdapat perbedaan nilai pada ketiga modulus, dimana E1 memiliki perbedaan nilai yang paling besar dan jika dibandingkan dengan nilai material S-glass/Epoxy dan TC35/Epoxy terdapat perbedaan nilai sebanyak 2-3 kali lipat. Hal ini yang mempengaruhi hasil defleksi pada ketiga material, dimana M55/Epoxy yang memiliki nilai E1 paling besar memiliki defleksi paling kecil. Sedangkan TC35/Epoxy dengan nilai E1 lebih kecil dari M55/Epoxy memiliki defleksi yang lebih kecil dari M55/Epoxy. Begitu juga sama dengan S-Glass/Epoxy yang memiliki nilai E1 yang lebih kecil dan defleksi yang lebih



Gambar 7. Kontur Tegangan Von Mises Maksimum Material TC35/Epoxy pada Spar Caps.



Gambar 8. Kontur Tegangan Von Mises Maksimum Material M55/Epoxy pada Spar Caps.

besar dari M55/Epoxy dan TC35/Epoxy. Dari hasil yang ada dapat dilihat nilai young modulus E1 yang memiliki pengaruh besar pada defleksi ketiga material, dimana E1 memiliki peran besar dalam menahan gaya yang diberikan pada I beam sehingga deformasi yang terjadi menjadi lebih kecil.

C. Analisis Distribusi Tegangan

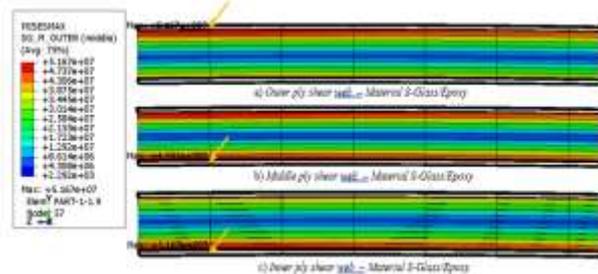
Pemodelan i beam spar terdiri dari dua bagian spar caps pada bagian atas dan bawah dan satu shear webs pada bagian tengah. Spar caps dan shear web sendiri tersusun oleh ply atau lapisan dengan arah penyusunannya masing-masing seperti yang ditunjukkan Gambar 5. Spar caps disusun dari arah bawah ke atas dan shear web disusun dari arah kiri ke kanan atau bisa disebut dari ply inner (terdalam) ke ply outer (terluar). Letak tegangan maksimum pada setiap layer juga akan dianalisa. Perubahan letak tegangan maksimum dari ketiga layer dapat dianalisa dengan melihat apakah ada perubahan posisi node pada layer. Node sendiri merupakan bagian dari finite element yang berbentuk poin atau titik dan saling terhubung membentuk elemen.

Analisis tegangan akan dilakukan pada dua bagian spar caps dan satu bagian shear web. Namun, dari simulasi didapatkan nilai tegangan spar caps pada bagian bawah dan atas memiliki nilai dan posisi tegangan maksimum yang sama, sehingga tegangan pada spar caps dirasa cukup hanya dianalisa pada satu bagian saja.

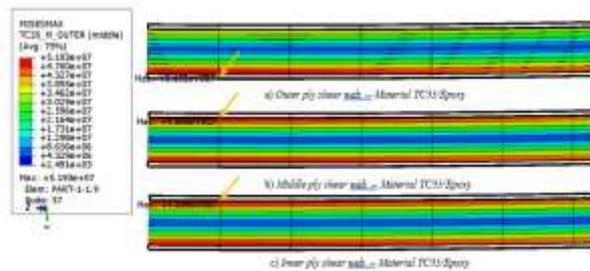
D. Kontur Tegangan Von Mises Equivalent pada Shear Caps

Pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8, ditunjukkan kontur distribusi tegangan maksimum pada shear cap yang diambil dari tampak atas sudu turbin angin. Terdapat tiga ply yang ditunjukkan pada poin a,b,c berupa ply terluar (outer), tengah (middle), dan terdalam (inner) beserta tanda panah warna kuning untuk menunjukkan posisi tegangan maksimum pada ply.

Dari ketiga ply material S-glass/epoxy, tegangan maksimum berada pada ply outer dengan nilai sebesar 63.2



Gambar 9. Kontur Tegangan Von Mises Maksimum Material S-glass/Epoxy pada Shear Web.



Gambar 10. Kontur Tegangan Von Mises Maksimum Material TC35/Epoxy pada Shear Web.

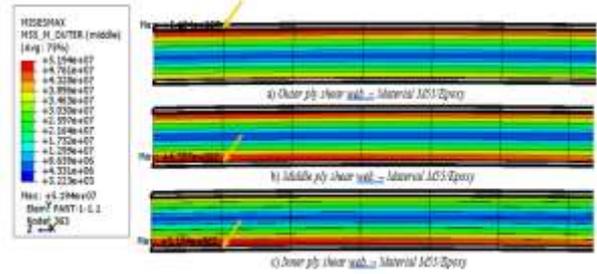
MPa. Hal ini sudah sesuai dengan teori, dimana *ply* terluar mengalami tegangan maksimum karena mengalami kontak langsung dengan gaya pembebanan. Posisi tegangan maksimum juga sudah sesuai teori, dimana tegangan di bagian *root* sudu memiliki nilai yang paling besar karena melihat strukturnya sebagai *cantilever* yang harus menahan gaya aerodinamis, gaya berat, dan momen lentur maksimum lebih besar dari bagian lain sudu.

Pada Material TC35 kontur tegangan ditunjukkan pada Gambar 7, dimana *ply* dengan tegangan tertinggi ke terkecil secara berurutan adalah *ply outer*, *middle*, dan *inner*. Posisi tegangan maksimum pada *ply outer* dan *middle* terletak pada bagian *root* dari sudu yang bekerja sebagai penopang. Sedangkan pada *ply inner* tegangan maksimum terletak pada posisi tengah sejauh 1 m dari bagian *root*, dimana pada posisi ini terdapat kontak langsung dengan *shear web* yang menyebabkan tegangan menjadi tinggi. Terjadi sekali perpindahan posisi *node* tegangan maksimum dari *ply middle* dengan *node 4* menuju *ply inner* dengan *node 57*.

Sama seperti dengan material Sglass/Epoxy dan TC35/Epoxy, material M55/Epoxy yang ditunjukkan Gambar 8 memiliki tegangan maksimum pada *layer outer* dengan nilai sebesar 70.9 MPa. Posisi tegangan maksimum juga terletak pada *root* sudu yang memiliki struktur *cantilever* untuk menahan gaya pembebanan. Sedangkan pada *layer inner*, tegangan maksimum terletak pada posisi tengah dengan jarak sejauh 2 m dari bagian *root*. Perpindahan posisi *node* tegangan maksimum terjadi sekali dari *layer middle* dengan *node 2* menuju *layer inner* dengan *node 3764*. Berbeda dengan material lainnya, pada M55/Epoxy terjadi perubahan kontur tegangan yang cukup besar.

E. Kontur Tegangan Von Mises Equivalent pada Shear Web

Sama seperti analisis yang dilakukan pada *spar caps*, analisis tegangan pada *shear web* akan dilakukan pada *ply* terluar (*outer*), tengah (*middle*), dan terdalam (*inner*). Letak tegangan maksimum pada setiap *layer* juga akan dianalisa. Pada Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11, ditunjukkan



Gambar 11. Kontur Tegangan Von Mises Maksimum Material M55/Epoxy pada Shear Web.

Tabel 9. Perbandingan Tegangan Maksimum Material S-glass/Epoksi, TC35/Epoksi, dan M55/Epoksi

Material	Tegangan Maksimum (MPa)	E1 (Gpa)
S-Glass/Epoksi	63.2	45.7
TC35/Epoksi	65.3	114.3
M55/Epoksi	70.9	280

kontur distribusi tegangan maksimum pada *shear web* yang diambil dari tampak atas sudu turbin angin

Dari ketiga *ply* material S-glass/epoxy, tegangan maksimum terletak pada *ply outer* dan *inner* dengan nilai sebesar 51.6 MPa. Pada *ply outer*, tegangan maksimum terletak pada bagian atas dengan jarak sejauh 1 m dari *root*. Sedangkan pada *ply middle* dan *inner* memiliki posisi tegangan maksimum yang sama, yaitu pada bagian bawah sejauh 1 m dari *root* dengan *node 57*. Pada posisi *shear web* bagian atas dan bawah ini terjadi kontak langsung dengan *spar caps* menyebabkan tingginya nilai tegangan.

Kontur tegangan material TC35/Epoxy ditunjukkan pada Gambar 10 dengan tegangan maksimum sebesar 5.1 MPa terletak pada *ply outer* bagian bawah sejauh 1 m dari *root*. Sedangkan tegangan maksimum pada *ply middle* dan *inner* memiliki posisi dan nilai yang sama, yaitu pada bagian atas sejauh 1 m dari *root* dengan nilai tegangan sebesar 4.6 MPa. Pada bagian atas dan bawah ini terjadi kontak langsung dengan *spar caps* yang menyebabkan tingginya nilai tegangan. Terjadi sekali perpindahan posisi *node* tegangan maksimum dari *ply outer* dengan *node 57* berpindah ke *ply middle* dengan *node 260*.

Tren *shear web* pada material M55/epoxy memiliki kesamaan dengan material s-glass/epoxy, dimana tegangan maksimum terletak pada *ply outer* dan *inner* dengan nilai yang sama sebesar 51.9 MPa. Namun, pada kedua *ply* ini memiliki posisi tegangan maksimum yang berbeda. Tegangan maksimum pada *ply outer* terletak di bagian atas yang mengalami kontak langsung dengan *top spar caps*. Sedangkan *ply inner* terletak pada bagian bawah yang mengalami kontak langsung dengan *bottom spar caps*. *Ply middle* juga memiliki posisi tegangan maksimum yang sama dengan *ply inner*. Terjadi sekali perpindahan posisi *node* tegangan maksimum dari *ply outer* menuju *ply middle*.

F. Perbandingan Distribusi Tegangan

Secara keseluruhan, tegangan maksimum sudu pada ketiga material komposit terletak pada bagian *spar caps*. Hal ini dikarenakan gaya pembebanan yang diberikan kepada *spar caps*, sehingga terdapat kontak langsung. Selain itu, tebal dan lebar *spar caps* yang lebih besar dari *shear web* juga mempengaruhi nilai tegangan. Tegangan maksimum *spar caps* pada ketiga material terletak pada *ply outer* dengan

posisi di bagian *root* yang berperan sebagai penopang gaya pembebanan.

Pada Tabel 9 ditunjukkan nilai tegangan maksimum pada masing-masing material. Secara berurutan material dengan tegangan maksimum tertinggi adalah M55/epoxy, TC35/Epoxy, dan S-glass/Epoxy. Hal ini sudah sesuai dengan teori jika melihat dari rumus modulus elastisitas yang berupa $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$, dimana modulus elastisitas (E) berbanding lurus dengan tegangan (σ). Sehingga, jika semakin besar nilai modulus elastisitas maka semakin besar juga nilai tegangannya.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Dilakukan simulasi sudu turbin angin dengan dimensi AVATAR yang dimodelkan menjadi *cantilever I beam*. Sebelumnya dilakukan validasi terlebih dahulu dengan studi Prombut dengan hasil perbedaan *tip deflection* sebesar 0.1% mendekati. Hasil dari simulasi menghasilkan perbedaan *tip deflection* dengan *error* kurang dari 3% sehingga validasi model sudah berhasil dan pemodelan penelitian yang dilakukan ABAQUS sudah sesuai.

Simulasi dilakukan menggunakan tiga material komposit M55/Epoxy, TC35/Epoxy, dan S-glass/Epoxy yang secara berurutan memiliki nilai defleksi sebesar 2.73 m, 7.11 m, dan 16.5m. Nilai dari defleksi ini dipengaruhi oleh modulus elastisitas E1 yang dapat menahan gaya pembebanan pada *I beam* sehingga deformasi yang terjadi menjadi lebih kecil.

Material dengan nilai tegangan tertinggi secara berurutan yaitu M55/Epoxy, TC35/Epoxy, dan S-glass/Epoxy. Pada *spar caps*, tegangan maksimum terletak pada bagian *root* yang menjadi penopang gaya pembebanan. Sedangkan pada *shear web*, tegangan maksimum terletak pada bagian atas dan bawah yang mengalami kontak langsung dengan *spar caps*.

Secara keseluruhan dari ketiga *ply*, secara berurutan

tegangan tertinggi ke terendah adalah *ply outer, middle*, dan *inner*. Tegangan Maksimum pada ketiga material terletak pada jarak 0 – 2 meter dari *root*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, "Indonesia energy outlook 2019," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019, doi: ISSN: 2527-3000.
- [2] S. Malhotra and P. Brinckerhoff, "Selection, design and construction of offshore wind turbine foundations," *Wind Turbines*, pp. 231–264, 2010, doi: 10.5772/15461.
- [3] S. Mathew, *Wind Energy*. Berlin: Springer, 2006, doi: <https://doi.org/10.1007/3-540-30906>.
- [4] W. Tong, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. Canada: WIT Press, 1979, ISBN: 9781845642051.
- [5] R. P. L. Nijssen and D. R. V. Van Delft, "Alternative fatigue formulations for variable amplitude loading of fibre composites for wind turbine rotor blades," *Eur. Struct. Integr. Soc.*, vol. C, pp. 563–574, 2003, doi: 10.1016/S1566-1369(03)80125-5.
- [6] L. Mishnaevsky, K. Branner, H. N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan, and B. F. Sørensen, "Materials for wind turbine blades: An overview," *Mater.*, vol. 10, no. 11, pp. 1–24, 2017, doi: 10.3390/ma10111285.
- [7] B. Eker, A. Akgodan, and A. Vardar, "Using of composite material in wind turbine blades," *J. Appl. Sci. Environ. Manag.*, vol. 4, no. 14, pp. 2917–2921, 2006, doi: 10.3923/jas.2006.2917.2921.
- [8] P. Prombut and C. Anakpotchanakul, "Deflection Of Composite Cantilever Beams With A Constant I-Cross Section," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, p. 012025, doi: 10.1088/1757-899X/501/1/012025.
- [9] M. K. Yeh and C. H. Wang, "Stress Analysis Of Composite Wind Turbine Blade By Finite Element Method," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, p. 012015, doi: 10.1088/1757-899X/241/1/012015.
- [10] P. Roth-Johnson, R. E. Wirz, and E. Lin, "Structural design of spars for 100-m biplane wind turbine blades," *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 133–155, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.05.030.
- [11] L. Cormier, S. Joncas, and R. P. L. Nijssen, "New lightweight structural blade designs and blade designs with build-in structural couplings," *Wind Energy*, vol. 19, no. 6, pp. 1023–1041, 2016, doi: <http://doi.wiley.com/10.1002/we.1880>.
- [12] P. Suwarta and M. Wisnom, "Pseudo-Ductility of Unidirectional Thin-Ply Hybrid Composites," University of Bristol, 2020.