

Pemodelan Kekuatan Bilah Turbin Angin Horizontal Multimaterial

Manty Aldilani Ikaningsih¹ dan Deny Bayu Saefudin²

¹Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani

manty.aldilani@lecture.unjani.ac.id, deny.bayusaefudin@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Pada penelitian ini, bilah turbin multimaterial yang akan dibuat adalah bilah tipe sumbu horisontal (HAWT). Bilah ini dibuat dengan menggunakan material batang *Carbon Fiber Reinforced Plastic* (CFRP), *Expandable Polystyrene* (EPS) dan lembaran vinil (*vinyl sheet*). Bagian inti bilah dibuat dari EPS yang disisipi dengan 2 batang CFRP berpenampang lingkaran berdiameter 2 mm. Bagian permukaan bilah dilapisi dengan lembaran vinil. Gaya aerodinamika yang digunakan sebagai data masukan FEA diperoleh dari hasil perhitungan pada kecepatan angin maksimum 7 m/s dengan kecepatan putar rotor 650 rpm. Gaya aerodinamika tersebut merupakan hasil analisa dengan menggunakan *Blade Element-Moementum Theory* (BEMT) pada penelitian yang terpisah. Hasil simulasi FEA menunjukkan bahwa tegangan Von Mises maksimum sebesar 473,3 MPa terjadi pada bagian CFRP, tepatnya pada batang CFRP yang terletak pada titik pusat penampang airfoil bilah (CFRP-A). Oleh karena itu, dilakukanlah perbaikan desain dengan cara mengubah dimensi penampang CFRP yang menerima tegangan maksimum (CFRP-A) dari diameter 2 mm menjadi 3 mm. Dengan penambahan ukuran diameter batang CFRP, diharapkan tegangan Von Mises maksimum akan mengalami penurunan. Hal tersebut terbukti, hasil simulasi bilah dengan diameter CFRP-A 3 mm menghasilkan tegangan Von Mises maksimum yang lebih kecil dari bilah dengan CFRP-A 2 mm, yakni 60,45 MPa. Faktor keamanan minimum dari bilah pun berubah dari semula 0,63 menjadi 4,96, diikuti dengan pengurangan harga defleksi total dari 6,42 mm menjadi sekitar 1,6 mm.

Kata kunci: Bilah turbin angin, CFRP, EPS, lembaran vinil, FEA

1. Pendahuluan

Dewasa ini, semakin banyak penelitian mengenai sumber energi alternatif. Hal tersebut dilakukan untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil. Angin merupakan kandidat yang kuat sebagai sumber energi alternatif, dengan pertimbangan angin merupakan sumber daya alam yang tak terbatas dan ramah lingkungan.

Pada tahun 2009, Changduk Kong membuat desain dan analisa prosedur untuk pengembangan sistem turbin angin kelas 500 W yang akan diaplikasikan untuk daerah dengan kecepatan relatif rendah, seperti Korea. Bilah turbin angin dibuat dengan menggunakan struktur *E-glass/epoxy sandwich composite* dalam bentuk lembaran dan *urethane foam* sebagai inti (*core*). Struktur tersebut relatif ringan, stabil, mudah dibuat dan biaya manufaktur rendah. Pada penelitian tersebut, terbukti bahwa struktur *E-glass/epoxy sandwich composite* dan *urethane foam* memiliki kekuatan yang baik dan dapat memenuhi persyaratan regangan maksimum untuk umur kelelahan. Bilah turbin angin tersebut juga dapat bertahan dalam keadaan badai ekstrim. (Kong et al., 2009)

Pada tahun 2011, R.R.Chang membuat bilah turbin angin dengan menumpuk potongan-potongan *fiberglass* dan *Expanded Polystyrene* (EPS) yang selanjutnya dicetak dengan menggunakan metoda *Resin Transfer Molding* (RTM). Bilah turbin angin dibuat dengan struktur sandwich dengan EPS sebagai inti yang dilapisi resin dan *fiberglass* sebagai kulit dan penguatnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ikatan yang terbentuk antara EPS dan *fiberglass* cukup kuat. (R.R.Chang, T.H.Chiang, 2011)

M. Ardi Cahyono dan Hendrix NF mendesain serta membuat bilah turbin angin dengan bahan *E/glass*. Kriteria desain struktur bilahnya adalah kuat dan ringan. Kriteria kuat dan ringan tersebut merupakan salah satu sifat dari material komposit. Tegangan merupakan komponen yang digunakan sebagai parameter pemilihan desain. Nilai tegangan yang terjadi dapat dihasilkan dari analisis model dengan menggunakan perangkat lunak MSC Patran/Nastran. Pada penelitian ini juga dilakukan konvergensi dan validasi model yang berguna untuk keakuratan dan kebenaran hasil tegangan. *Margin of safety* yang terjadi pada ketiga bilah menunjukkan nilai yang positif, yang mana artinya bilah tersebut aman. Nilai *margin of safety* terbesar terjadi pada desain bilah *sandwich (foam core)*. (Cahyono, Nf, Tinggi, & Adisutjipto, 2015).

EPS merupakan suatu polimer yang berasal dari monomer stirena. EPS berbeda dengan XPS (*Extruded Polystyrene*) dari cara pembuatan. Pada proses produksinya EPS menggunakan pentana, sehingga lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan XPS yang menggunakan HFC (*Hydrofluorocarbon*). Sifat umum EPS hampir tidak jauh berbeda dengan XPS, yakni memiliki densitas yang rendah, berbobot ringan, tidak korosif, harga relatif murah dan terdapat ruang antara butiran yang berisi udara yang tidak dapat menghantarkan panas, sehingga dapat menjadi insulator panas yang sangat baik. EPS dan XPS ini (*Polystyrene*

Info Makalah:

Dikirim : 04-10-2018;

Revisi 1 : 05-07-2018;

Revisi 2 : 05-14-2018;

Diterima : 06-01-2018.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-8132-0777-086

e-mail : manty.aldilani@lecture.unjani.ac.id

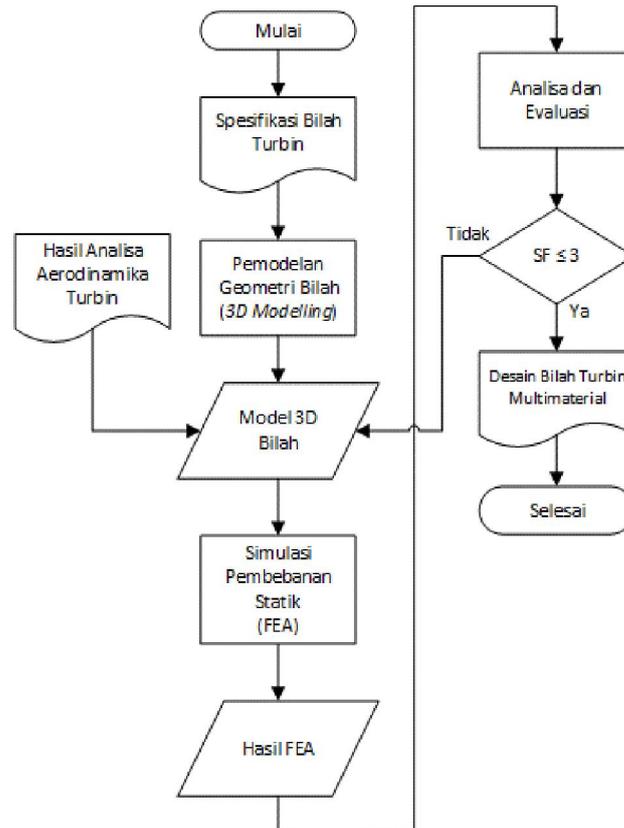
Foam) kurang mampu untuk diurai oleh alam, sehingga harus diusahakan untuk dapat didaur ulang. (ACH Foam Technologies, 2018; PT. Beton Elemenindo Putra, 2012, 2018)

Carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) merupakan salah satu material komposit yang paling kaku dan ringan. CFRP merupakan material komposit dengan matriks polimer yang diperkuat oleh serat karbon. Matriks yang populer digunakan dalam pembuatan CFRP adalah termoset, seperti epoxy, polyester dan termoplastik, seperti nilon (*polyamide*). Sifat-sifat dari CFRP antara lain berat yang ringan, rasio antara kekuatan dan berat yang tinggi, rasio antara modulus elastisitas dan berat yang tinggi, kekuatan leleh (*fatigue*) yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, ekspansi koefisien termal yang sangat rendah, kekuatan dampak rendah, konduktivitas listrik tinggi dan biaya yang tinggi. CFRP biasa digunakan dalam pembuatan bagian otomoti kelautan dan kedirgantaraan, peralatan olahraga dan frame sepeda. (“Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites [SubsTech],” 2012)

Pada penelitian ini, bilah turbin yang akan dibuat adalah bilah turbin tipe sumbu horisontal, atau biasa dikenal dengan HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*). Material utama pembentuk bilah adalah batang *Carbon Fiber Reinforced Plastic* (CFRP), EPS dan lembaran vinil (*vinyl sheet*). Bagian inti bilah turbin terdiri dari EPS yang disisipi 2 buah batang CFRP berpenampang lingkaran, kemudian bagian luar/permukaannya dilapisi dengan lembaran vinil. Penggunaan EPS ini diharapkan dapat meminimalisir berat bilah, memperkecil torsi awal, sehingga bilah dapat berputar pada kecepatan angin yang rendah. Batang CFRP diharapkan dapat menjadi penguat dan penahan utama beban aerodinamika, sehingga deformasi bilah dapat diminimalisir. Fungsi batang tersebut mirip dengan batang baja pada struktur bangunan beton. Bahan CFRP dipilih karena bahan tersebut memiliki harga kekuatan yang sebanding dengan baja dengan massa jenis sekitar 1/5 kalinya. Lembaran vinil digunakan sebagai pelindung permukaan EPS sekaligus sebagai penguat sisi luar EPS ketika bilah menghadapi pembebanan. Beban yang diterima oleh bilah berasal dari gaya-gaya aerodinamika yang tercipta saat turbin bekerja. Gaya-gaya tersebut telah dihitung pada penelitian sebelumnya dengan bantuan perangkat lunak QBlade v0.963. Melalui kajian FEA dengan bantuan perangkat lunak Autodesk Inventor Professional 2017, diharapkan dapat terlihat karakter kekuatan bilah akibat pembebanan pada kecepatan angin maksimum sesuai dengan desainnya. Sebagai data masukan simulasi FEA, dua beban aerodinamika berupa gaya tangensial dan gaya normal diambil dari data perhitungan QBlade pada kondisi kecepatan angin 7 m/s dan kecepatan putar rotor 650 rpm.

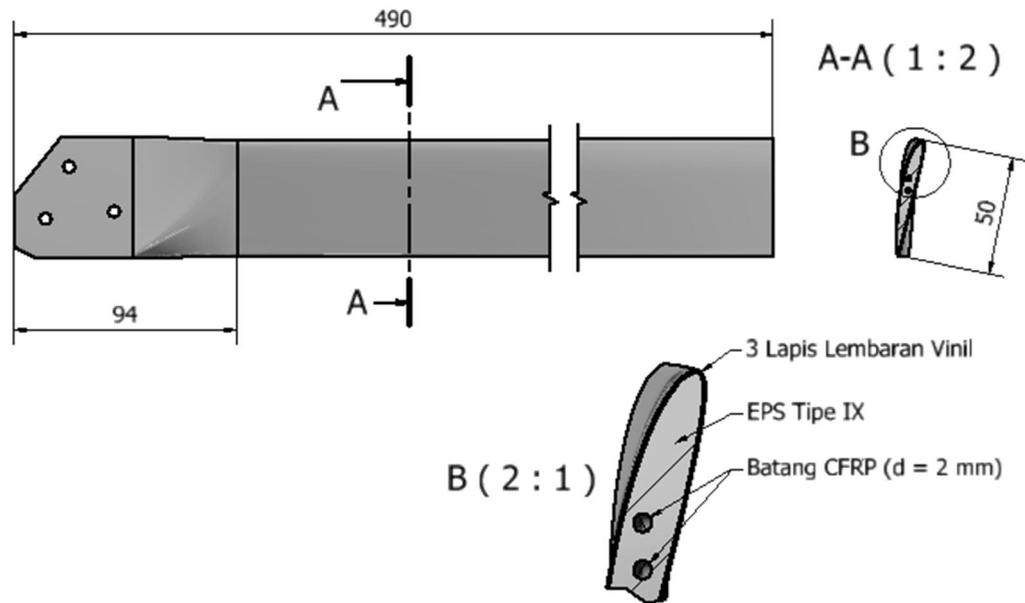
2. Metode dan Tahapan Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode pengumpulan data dan analisa data. Adapun tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 8. Flow Chart Pemodelan Kekuatan Bilah Turbin.

Proses pemodelan kekuatan bilah berbahan EPS dan lembaran vinil ini diawali dengan proses pemodelan geometri bilah. Pemodelan geometri ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak CAD sesuai dengan desain yang telah ada. Bilah turbin memiliki panjang efektif sekitar 39,6 cm dan panjang total 49 cm. Bagian pangkal bilah dengan panjang sekitar 9,4 cm merupakan bagian yang akan terhubung dengan *hub*. Bilah turbin adalah jenis *taperless* atau *rectangular* dengan harga lebar penampang bilah (*chord*) seragam dari pangkal ke ujung, yakni 0,05 m. Seluruh bagian inti bilah direncanakan terbuat dari EPS densitas tinggi tipe IX yang tersedia di pasaran dan sesuai standar ASTM D6817 dan ASTM C578-95. Dua batang CFRP berdiameter 2 mm dengan panjang 480 mm diletakkan di bagian tengah EPS. Batang CFRP pertama diletakkan di sepanjang sumbu puntir bilah dan batang kedua diletakkan 4 mm di sebelahnya. Lembaran vinil yang digunakan merupakan PVC (*Polyvinyl Chloride*) tipe *un-plasticized* dengan perekat di salah satu sisinya berukuran 3,5 mil (3,5/1000 inci atau sekitar 0,089 mm). Kulit EPS tersusun dari 3 lapis lembaran vinil yang direkatkan satu sama lain. Ilustrasi geometri bilah tersebut dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Model Bilah Turbin dan Potongan Penampangnya.

Data gaya aerodinamika dari hasil perhitungan bilah di QBlade tertera pada Tabel 9. Gaya-gaya tersebut dihasilkan pada kondisi kecepatan angin 7 m/s dan kecepatan putar bilah 650 rpm. Kecepatan angin 7 m/s adalah batasan maksimum dari desain generatornya. Pada kecepatan tersebut putaran generator yang menghasilkan efisiensi tertinggi adalah 650 rpm.

Tabel 9 Gaya Normal dan Tangensial Bilah Turbi

No	Posisi Radial [m]	Gaya Normal [N]	Gaya Tangensial [N]
1	0,104	0,08	0,032
2	0,148	0,25	0,1
3	0,192	0,344	0,123
4	0,236	0,454	0,14
5	0,28	0,57	0,143
6	0,324	0,7	0,15
7	0,368	0,83	0,143
8	0,412	0,963	0,13
9	0,456	0,99	0,095
10	0,5	0,37	0,03

Pada *Autodesk Inventor Professional 2017*, data sifat-sifat mekanik dari material EPS Tipe IX tidak tersedia. Namun, pengguna dapat menambahkan data material tersebut. Roy Debasis, seorang peneliti EPS untuk keperluan konstruksi bangunan asal Indian Institute of Technology Kharagpur, memberikan data sifat mekanik EPS berupa lembar kerjanya melalui sebuah forum riset. Data sifat mekanik tersebut sebagian besar merupakan hasil pengujian sesuai standar ASTM. Beberapa parameter dari data tersebut digunakan untuk masukan data material EPS Tipe IX di *Autodesk Inventor* untuk keperluan simulasi (Tabel 2).

Sifat-sifat fisik lembaran vinil dan CFRP mengikuti basis data material yang telah tersedia di *Material Library* - Autodesk Inventor Professional 2017. Data-data tersebut dapat dilihat pada Tabel 11.

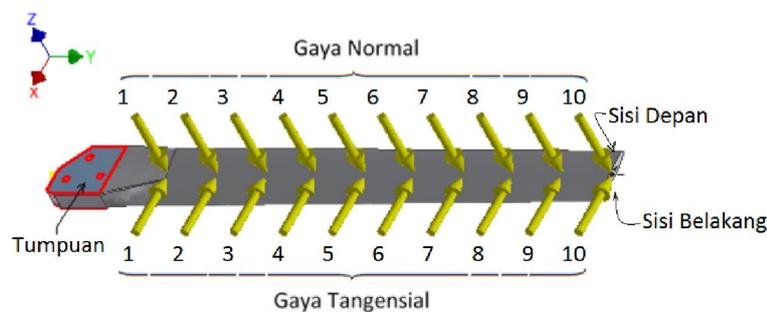
Tabel 10. Sifat-sifat Fisik EPS Tipe IX. (Roy, 2015)

Referensi Spesifikasi ASTM C578-95	Satuan	Tes ASTM	Tipe IX (2#)
Massa Jenis, minimum	kg/m ³	C303 atau D1622	28,8
Kekuatan Tekan	kPa	D1621, 1% <i>deflection</i>	110,316
<i>Flexural Strength</i>	kPa	C203	379,212
Kekuatan Tarik	kPa	D1623	158,579
Kekuatan Geser	kPa	D732	227,527
Modulus Geser	MPa	-	4,137
Modulus Elastisitas	MPa	-	3,172
Rasio Poisson	-	-	0.165

Tabel 11 Sifat-sifat Fisik PVC-*unplasticized* dan CFRP (Autodesk Inc., 2017)

Parameter	Satuan	PVC-u	CFRP
		Nilai	Nilai
Konduktivitas Termal	W/(m.K)	0,19	105
Panas Jenis	J/(g.°C)	1,004	1,13
Koefisien Ekspansi Termal	µm/(m.°C)	41,9	9,93
Modulus Young	GPa	0,709	133
Rasio Poisson	-	0,41	0,39
Modulus Geser	MPa	600	53
Massa Jenis	g/cm ³	1,29	1,43
Kekuatan Luluh	MPa	40	300
Kekuatan Tarik	MPa	40	300

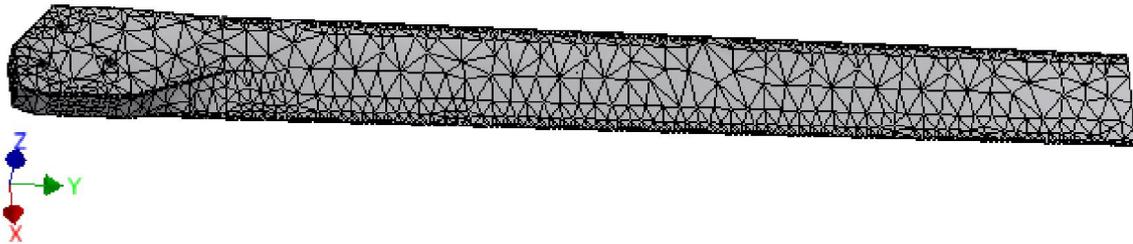
Simulasi yang dilakukan merupakan simulasi tegangan untuk kasus pembebanan statis. Kondisi batas yang dimasukkan dalam simulasi terdiri dari geometri bilah, material bilah, jenis dan letak tumpuan, beban (jenis, letak dan besarnya), jenis sambungan (karena model terdiri dari beberapa komponen), ukuran dan jenis *mesh*. Geometri bilah telah didefinisikan secara lengkap melalui model 3D bilah. Material bilah diatur sesuai dengan kriteria desain yang telah ditentukan, yakni bagian inti berupa EPS yang diperkuat oleh 2 batang CFRP dan bagian luar berupa lembaran vinil. Tumpuan yang digunakan adalah jenis tumpuan jepit (*fixed constraint*) dan terletak di sisi depan serta belakang *hub mounting*. Selain itu, tiga buah tumpuan engsel diletakkan di lubang baut pada bagian *hub mounting*. Tumpuan engsel ini dipilih karena pada kondisi aktualnya EPS tidak akan terjepit/tertahan oleh baut pada arah sumbu putar baut. Meski EPS diberi ulir pada awal pembuatan, alur ulirnya akan mudah hancur/terkikis oleh baut ketika proses pemasangan berlangsung. Sepuluh gaya normal dari arah depan turbin menuju bilah diletakkan sesuai posisinya dalam arah radial, begitu pula halnya dengan gaya tangensial. Arah gaya tangensial searah dengan arah kecepatan tangensial bilah pada saat berputar. Besar kedua gaya tersebut mengikuti data yang tertera pada Tabel 9. Pada pengaturan jenis sambungan, antara lembaran vinil dan EPS didefinisikan sebagai *bonded contacts*, begitu pula halnya antara batang CFRP dengan EPS.



Gambar 10. Letak Gaya dan Tumpuan pada Bilah Turbin.

Mesh atau dikenal sebagai jaring-jaring untuk titik perhitungan, dibuat secara otomatis. Besar elemen rata-rata sebagai fraksi dari ukuran maksimum bilahnya (dalam sumbu x, y, z) adalah 0,1. Ukuran elemen minimum diatur sebesar 0,2 kali dari ukuran elemen rata-rata. Faktor pembesaran/pengecilan mesh yang saling bersebelahan adalah sebesar 1,5. Proses pembuatan *mesh* dengan pengaturan seperti itu menghasilkan *mesh* yang terdiri dari 146754 titik (*nodes*) dan 83114 elemen. Bentuk dan distribusi *mesh* dapat dilihat pada Gambar 11.

Nodes:146754
Elements:83114

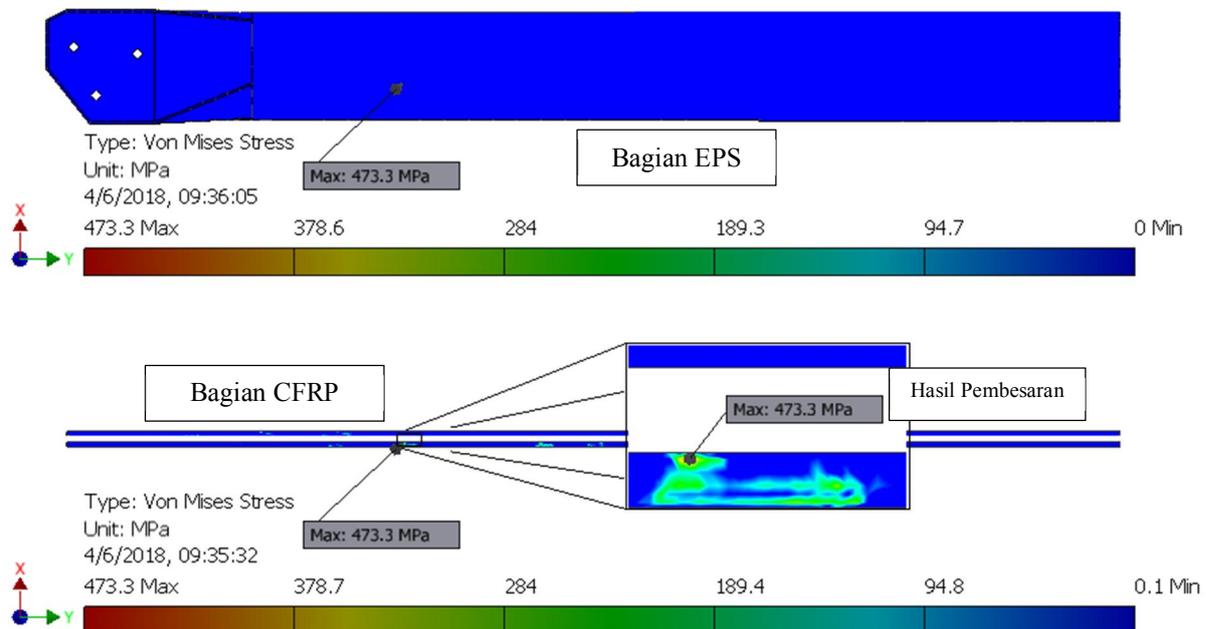


Gambar 11. Hasil *Meshing* Bilah.

Proses simulasi pembebanan statik dimulai dengan pengaturan kriteria konvergensi bawaan perangkat lunak. Hasil simulasi dianggap konvergen jika hasil perhitungan tegangan Von Mises telah konvergen.

3. Hasil dan Pembahasan

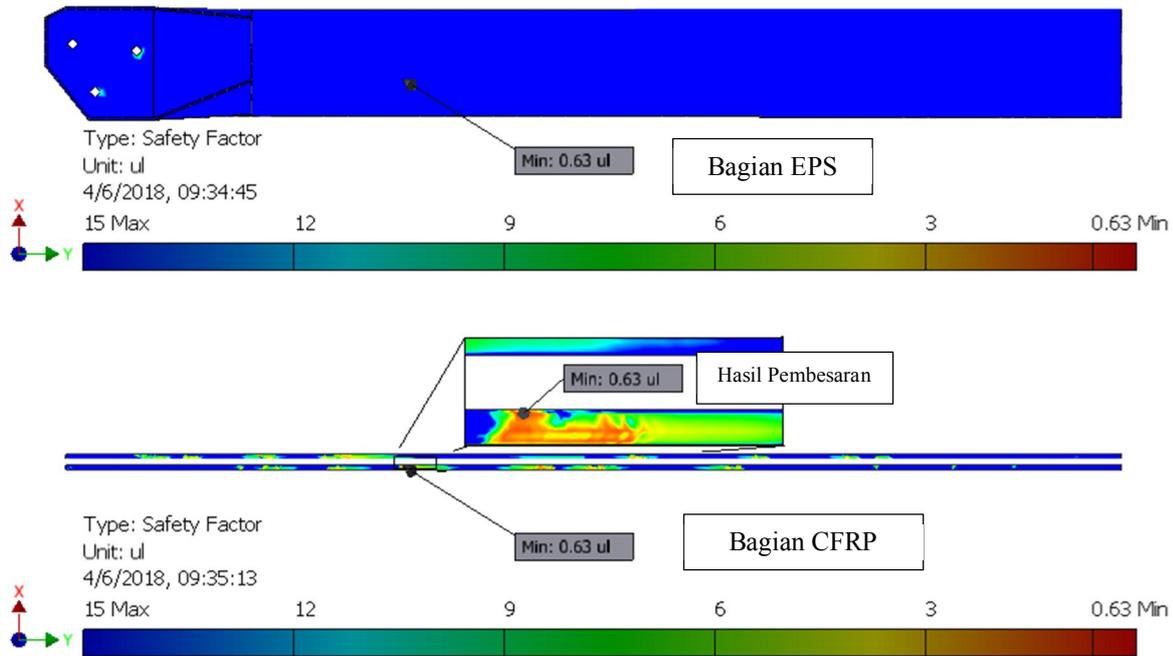
Hasil simulasi pembebanan statik menghasilkan banyak data. Hasil visual berupa Gambar dengan kontur warna yang menggambarkan harga dari tegangan Von Mises, faktor keamanan dan defleksi total akan dipakai untuk kajian hasil. Terlihat pada Gambar 12 bahwa tegangan Von Mises maksimum adalah 473,3 MPa. Pada Gambar tersebut, tegangan yang terjadi pada bagian EPS tergolong kecil. Tegangan maksimum terjadi pada bagian CFRP, tepatnya pada batang CFRP yang terletak pada titik pusat penampang airfoil bilah. Titik pusat penampang tersebut adalah titik pusat gaya aerodinamika yang menjadi beban bagi bilah turbin.



Gambar 12. Tegangan Von Mises Bilah Untuk CFRP 2mm.

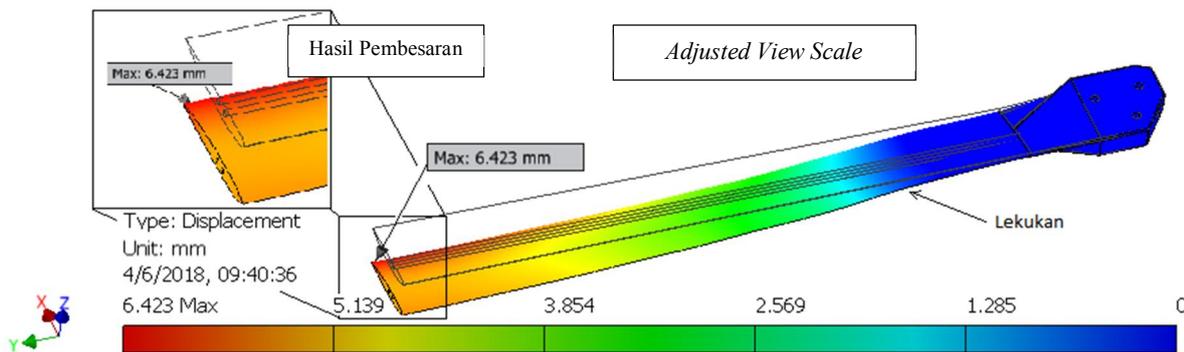
Besar faktor keamanan dari bilah tersebut adalah 0,63, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13. Harga tersebut mengindikasikan bahwa bilah akan mengalami kerusakan pada saat menerima beban sebesar 0,63 dari beban yang diberikan. Hal ini menyatakan bahwa desain bilah tersebut tidak baik. Kegagalan diprediksikan terjadi pada bagian CFRP yang memiliki tegangan maksimum. Posisi kegagalan ini berada di batang CFRP yang terletak di sekitar 180 mm dari pusat putar bilah.

Langkah perbaikan desain dilakukan dengan cara mengubah dimensi penampang CFRP yang menerima tegangan maksimum. Diameter CFRP yang sebelumnya sebesar 2 mm diganti dengan 3 mm. Harapannya, penambahan diameter CFRP sebesar 1 mm dapat mengurangi besar tegangan Von Mises maksimum yang terjadi serta menaikkan harga faktor keamanan minimum bilah. Pemilihan diameter ini disesuaikan dengan komponen CFRP yang tersedia banyak di pasaran. Perlu diketahui juga bahwa batang CFRP berdiameter kecil (kurang dari 8 mm) banyak digunakan untuk pembuatan pesawat aeromodel. Keandalannya telah teruji dan ketersediaannya di pasaran cukup baik.

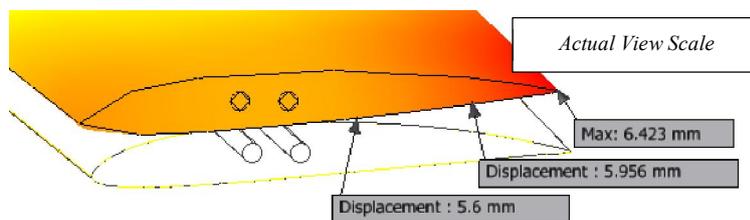


Gambar 13. Faktor Keamanan Bilah untuk CFRP 2mm.

Pada Gambar 14 ditunjukkan bentuk bilah terdefleksi setelah mengalami pembebanan. Skala pergeseran posisi bilah terdefleksi telah dikalikan, agar bentuk defleksi terlihat jelas. Besar pergeserannya ditunjukkan oleh kontur warna, dimana skala pergeserannya dapat dilihat di *color bar*. Pada daerah sekitar lokasi tegangan Von Mises maksimum, bilah terlihat berlekuk setelah mengalami pembebanan. Defleksi maksimum terletak di bagian ujung bilah, tepatnya di daerah ekor penampang bilah yang berbentuk airfoil (*trailing edge*). Hasil pembesaran menunjukkan bahwa penampang bilah tertekuk ke arah belakang. Hal ini terjadi karena bagian depan turbin (*lower side* dari airfoil) menerima tekanan yang lebih besar daripada bagian belakang turbin (*upper side* dari airfoil). Gambar 15 menunjukkan defleksi penampang di bagian ujung bilah. Gambar tersebut merupakan Gambar defleksi dengan skala pergeseran 1:1 (*actual view scale*). Perubahan bentuk penampang tersebut akan mengakibatkan terjadinya perubahan karakter aerodinamika turbin. Kajian mengenai imbas perubahan geometri bilah akibat pembebanan terhadap karakter aerodinamika perlu dibahas lebih lanjut pada penelitian selanjutnya.

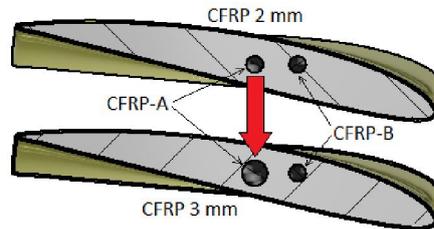


Gambar 14. Defleksi Bilah untuk CFRP 2mm.



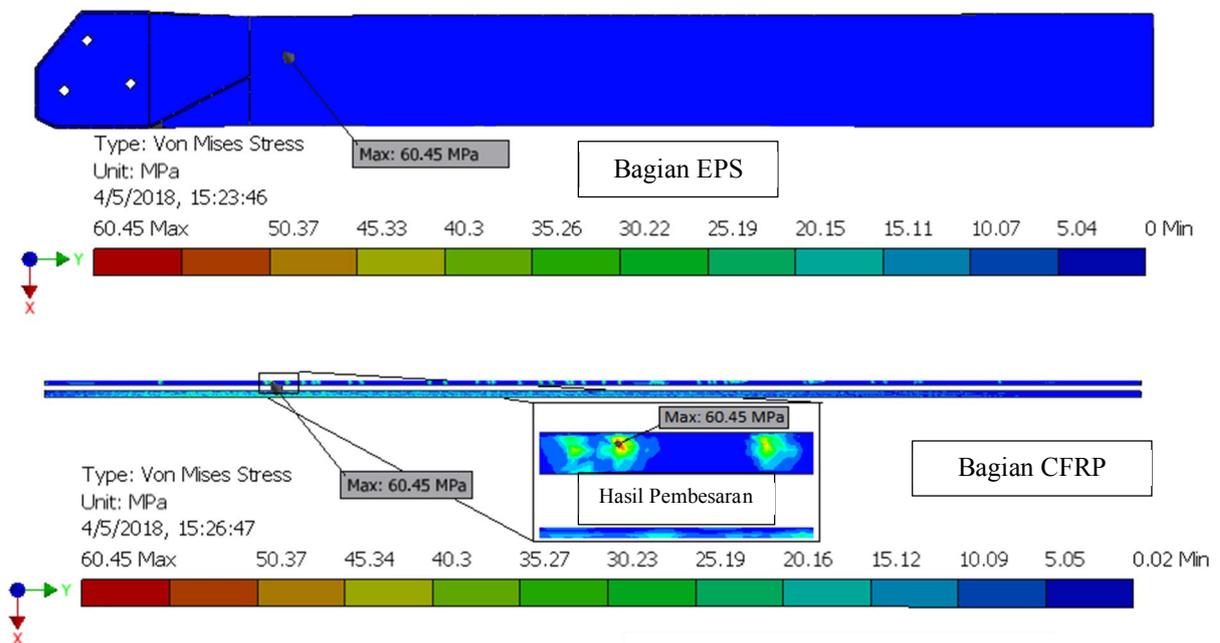
Gambar 15. Defleksi Penampang Bilah Bagian Ujung untuk CFRP 2mm.

Bilah turbin ini menggunakan airfoil Clark V sebagai penampangnya. Airfoil ini adalah salah satu jenis *cambered airfoil* yang memiliki harga cL/cD (*lift to drag ratio*) yang tinggi. Jika dilihat dari bentuknya, pada Gambar 15, penampang bilah setelah pembebanan akan berubah menyerupai bentuk airfoil yang simetris (*symmetrical airfoil*). Secara umum, airfoil simetris dikenal memiliki harga cL/cD yang lebih kecil daripada *cambered airfoil*. Harga cL/cD ini mempengaruhi harga daya yang dapat dihasilkan oleh turbin. Harga daya turbin sebanding dengan harga cL/cD penampang bilah. Sehingga jika bilah terdefleksi seperti itu, maka turbin dapat diprediksi akan mengalami penurunan daya pada saat beroperasi jika dibandingkan dengan kalkulasi desain awal.



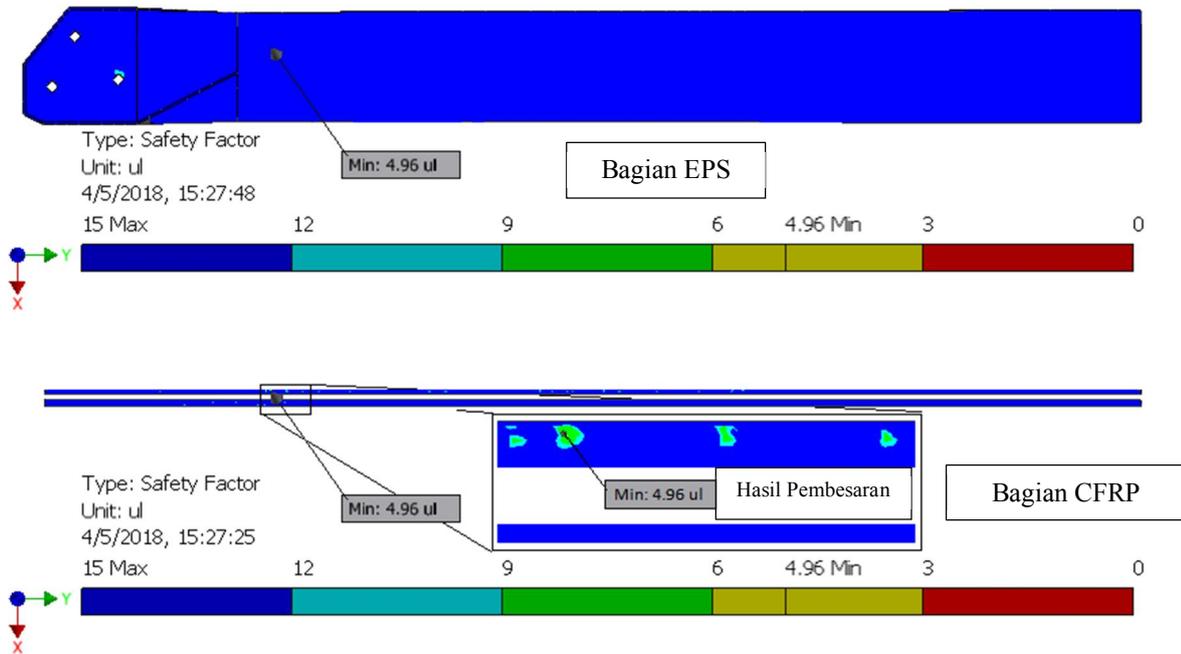
Gambar 16. Nomenklatur Batang CFRP.

Pengubahan dimensi CFRP bilah dari 2 mm ke 3 mm dilakukan untuk satu batang CFRP saja. Terlihat pada Gambar 16, batang CFRP yang diubah ukuran diameternya adalah batang CFRP-A. Batang CFRP-B tidak diubah ukurannya karena tegangan Von Mises maksimumnya masih berada di bawah CFRP-A. Hal ini mengindikasikan bahwa penerima beban utama adalah batang CFRP-A, bukan CFRP-B. Sehingga, perubahan diameter hanya dilakukan untuk batang CFRP-A. Pada Gambar terlihat bahwa pembesaran batang CFRP-A berpengaruh pada ketebalan lapisan EPS. Pengaruh penipisan ini terhadap pembebanan yang sama perlu diperhatikan pula.



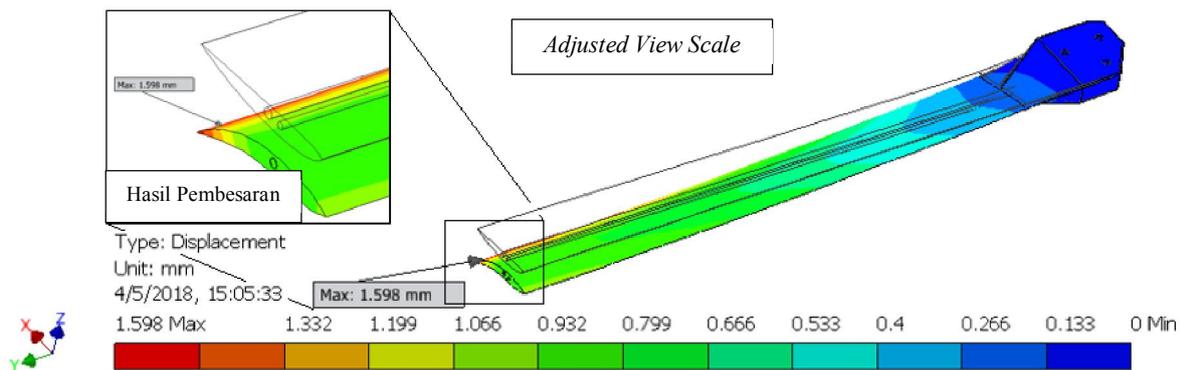
Gambar 17. Tegangan Von Mises Bilah Untuk CFRP-A 3mm.

Hasil simulasi bilah dengan diameter CFRP-A 3 mm menghasilkan tegangan Von Mises maksimum yang lebih kecil dari bilah dengan CFRP-A 2 mm. Penurunan tegangan akibat penambahan diameter CFRP-A sebesar 1 mm tercatat kurang lebih 8 kali lipat. Distribusi tegangan pada batangnya pun berbeda satu sama lain seperti terlihat pada kontur tegangan di Gambar 12 dan Gambar 17. Hasil modifikasi menunjukkan batang CFRP-B memiliki harga tegangan Von Mises sekitar 25 MPa yang mendominasi daerah sekitar 50 mm dari pangkal hingga bagian tengah bilah. Hal ini tidak mengindikasikan bahwa kegagalan akan terjadi di daerah tersebut, karena jika dilihat dari Gambar 18 faktor keamanannya terhitung sebesar 12. Adapun kemungkinan terjadinya patahan pada lokasi tegangan maksimum di batang CFRP-A masih perlu dikaji untuk pembebanan dinamis pada penelitian lanjutan.

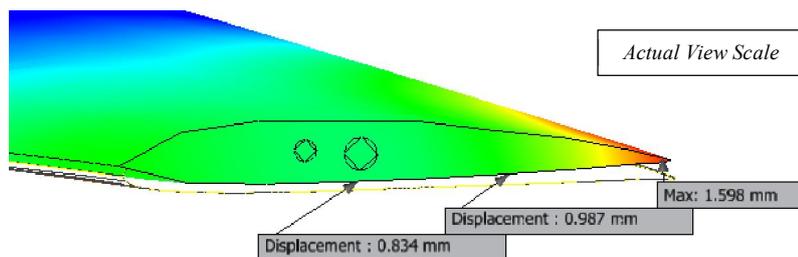


Gambar 18. Faktor Keamanan Bilah Untuk CFRP-A 3mm.

Defleksi total bilah terbesar berkurang dari semula 6,42 mm menjadi sekitar 1,59 mm. Gambar 19 menunjukkan ilustrasi arah defleksi akibat pembebanan. Defleksi aktual yang terjadi pada bagian ujung bilah nampak pada Gambar 20. Jika dibandingkan dengan kondisi sebelum modifikasi, perubahan bentuk airfoil sesudah modifikasi tidak terlalu signifikan. Meski begitu, terlihat bahwa bagian ekor airfoil tertekuk ke arah *upper side*. Hal ini masih mengindikasikan bahwa kinerja turbin diprediksikan turun akibat turunnya harga cL/cD penampang bilah tersebut. Namun, jika dibandingkan dengan kondisi sebelum dimodifikasi, penurunan kinerja desain bilah dengan CFRP-A 3 mm diprediksikan lebih kecil.



Gambar 19. Defleksi Bilah untuk CFRP-A 3mm.



Gambar 20. Defleksi Penampang Bilah Bagian Ujung Untuk CFRP-A 3mm.

Kesimpulan

Pada penelitian ini, bilah turbin angin yang dibuat adalah jenis *taperless*, dengan lebar penampang bilah dari pangkal ke ujung seragam 0,05 m. Seluruh material yang digunakan dalam pembuatan bilah ini disesuaikan dengan ketersediaan di pasaran. Bagian inti bilah direncanakan terbuat dari EPS Tipe IX, dimana bagian permukaannya akan dilapisi lembaran vinil. Bagian tengah EPS disisipi dengan dua batang CFRP berdiameter 2 mm sepanjang 480 mm dengan jarak antara kedua batang adalah 4 mm. Namun ternyata hasil simulasi pembebanan menunjukkan potensi kegagalan akibat pembebanan terjadi pada bagian batang CFRP yang terletak pada titik pusat penampang airfoil bilah. Oleh karena itu, dilakukan modifikasi terhadap batang CFRP tersebut dengan cara mengganti ukuran CFRP dari diameter 2 mm menjadi 3 mm. Terbukti dengan menambah ukuran batang CFRP, tegangan Von Mises maksimum berkurang menjadi 60,45 MPa dan faktor keamanan bilah pun meningkat menjadi 4,96, kurang lebih 8x lipat dari kondisi sebelum dimodifikasi. Hasil modifikasi tersebut akan digunakan sebagai dasar penelitian selanjutnya.

Daftar Pustaka

- ACH Foam Technologies. (2018). EPS vs XPS, Apples to Apples Comparison of Rigid Foam Insulation. Denver: ACH Foam Technologies. Diambil dari <https://www.achfoam.com/ACH/media/ACH/docs/Foam-Control/EPS-vs-XPS.pdf>
- Autodesk Inc. (2017). Material Library - Autodesk Inventor Professional 2017. California: Autodesk Inc.
- Cahyono, M. A., Nf, H., Tinggi, S., & Adisutjipto, T. (2015). Analisis Pemilihan Desain Struktur dan Pembuatan Purwarupa Bilah Turbin Angin Komposit. *Jurnal Angkasa*, VII, 31–44.
- Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites [SubsTech]. (2012). Diambil 6 April 2018, dari http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=carbon_fiber_reinforced_polymer_composites
- Kong, C., Choi, S., Park, H., & Kim, S. (2009). Design of Foam Core Sandwich Composite Blade for A Small Scale Wind Turbine System Considering Fatigue Life. In *International Committee on Composite Material 17* (hal. 1–10). Edinburgh: ICCM.
- PT. Beton Elemenindo Putra. (2012). *White Paper - b-panel ® Building System*. Bandung Barat.
- PT. Beton Elemenindo Putra. (2018). Full Catalogue B-Panel and B-Foam. Bandung Barat: PT. Beton Elemenindo Putra.
- R.R.Chang, T.H.Chiang, Y. C. T. and C. Y. S. (2011). Normalization Process Technique of Composite Foam-filled Sandwich Wind Turbine Blades. *Procedia Engineering*, 14, 1988–1995. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.250>
- Roy, D. (2015). Typical Physical Properties of Expanded Polystyrene. Kharagpur.