

DESAIN ARSITEKTUR STRUKTUR PENAMPANG POTONG SEPANJANG BENTANG SUDU AERODINAMIK TURBIN ANGIN 50 kW

Maryono Ismail

Peneliti Pusat Teknologi Dirgantara Terapan, LAPAN

ABSTRACT

The ability of a WECS blade structure can be characterized by; light in weight, strength of bending and torsional loads, and resist to severe atmospheric condition. The ability can be obtained by designing of; (i). spar as the stiffener function, and (ii). configuration of the laminates schedule along the profiled blade length span.

Based on design analysis has been chosen; the spar shape, the laminate properties and the laminates schedule configuration on the profile blade length span. Spar shape selected is spar with cross sectional U shape with ear lobe because more simple and manufactured easily compared with cross sectional rectangular shape. The foot and the ear lobe of the spar to stick on the bottom shell skin in side and the sun hat to stick on the top shell skin in side.

The laminates schedule along the profiled blade length span is arranged in to 5 segmen r/R airfoil blade (0,1~1,0), in to 1 segmen r/R blade (0,0~0,1) and spar segmen along the profiled cross sectional blade length span, with the choice of varieties laminate $[(0^\circ/90^\circ)/(\pm 45^\circ)/(0^\circ/90^\circ)]_n$. The composite hybrid CFRP (epoxy) and GFRP (epoxy/polyester) is strongly recommended.

Qualitatively this design method can be applied for cross sectional structure architecture design of wind turbine blade for medium scale 50 kW which is developing LAPAN and for turbine blade in the range of 10~100 kW power capacity.

Keywords: *Blade, Airfoil, Chord, Spar, Load characteristic, Composite material, Laminate*

ABSTRAK

Keandalan struktur sudu turbin angin secara umum dapat diukur dari karakteristiknya, a.l; ringan, kuat terhadap beban *bending*, rigid terhadap beban torsi dan tahan terhadap kondisi buruk lingkungan. Keandalan sudu dapat ditingkatkan dengan mendesain;(i). *spar* yang berfungsi sebagai *stiffeners* dan (ii). konfigurasi *laminates schedule* sepanjang bentang sudu.

Dari analisis desain dipilih; bentuk *spar*, karakteristik laminat dan konfigurasi *laminates schedule* sepanjang bentang sudu turbin angin. Bentuk *spar* yang dipilih adalah, *spar* penampang U bercuping karena lebih sederhana dan lebih mudah dibuat dibandingkan dengan *spar* penampang segi empat. Bagian kaki dan cuping *spar* menempel pada permukaan cangkang sudu bawah bagian dalam serta tudungnya menempel pada permukaan cangkang sudu atas bagian dalam.

Laminates schedule di sepanjang bentang sudu turbin angin, disusun dalam 5 segmen r/R *airfoil blade* (0,1~1,0), 1 segmen r/R *root blade* (0,0~0,1) dan segmen *spar* sepanjang bentang sudu, dengan pilihan varian laminat $[(0^\circ/90^\circ)/(\pm 45^\circ)/(0^\circ/90^\circ)]_n$. Direkomendasikan untuk memakai komposit hibrid CFRP (epoksi) dan GFRP (epoksi/poliester).

Secara kualitatif, metode desain ini dapat diterapkan untuk arsitektur struktur penampang potong sudu turbin angin skala menengah 50 kW yang dikembangkan LAPAN dan untuk sudu turbin angin kapasitas 10~100 kW.

Kata kunci: *Sudu, Airfoil, Chord, Spar, Karakteristik pembebanan, Bahan komposit, Laminat*

1 PENDAHULUAN

Sudu turbin angin adalah profil benda aerodinamik (*airfoil*) yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik yang digunakan untuk memutar poros utama generator turbin angin. Karena itu, karakteristik rigiditas sudu terhadap beban torsi dan beban *bending* sepanjang bentang sudu turbin angin menjadi parameter utama (*limiting parameter*) dalam perancangan struktur sudu turbin angin (Schwartz, 1993). Karakteristik rigiditas struktur sudu terhadap beban torsi dan beban *bending* dapat diperbaiki dengan mendesain arsitektur struktur penampang potong sepanjang bentang sudu.

Kerusakan sudu turbin angin dapat disebabkan oleh; beban energi kinetik angin, gaya-gaya lain yang ditimbulkan akibat gerak putar sudu dan kondisi buruk lingkungan sekitarnya. Dari pengamatan lapangan, kasus-kasus kerusakan sudu turbin angin yang sering terjadi sebagai akibat dari; terjadinya beban-beban ekstrem (*over wind speed*, petir), karakteristik perubahan kecepatan dan arah angin (*turbulensi*, *wind shear*, perubahan arah cepat), kondisi buruk lingkungan (hujan, panas, lembab, uap garam dan korosif) dan benturan dengan partikel-partikel padat dalam udara.

Bentuk-bentuk umum kerusakan sudu antara lain; (1) Patah pada segmen *airfoil* sudu bagian tengah (pada 0,40-0,65 bagian panjang sudu) dengan arah memuntir 45°, (2) Kulit permukaan terkelupas, belah/retak dan robek (*delaminasi*) di bagian *leading edge* dan *trailing edge* segmen *airfoil* tengah ke ujung sudu, (3) Kulit permukaan cangkang atas dan cangkang bawah retak dan terkelupas di bagian segmen *airfoil* tengah ke ujung sudu. (4) Abrasi permukaan *leading edge* pada bagian segmen *airfoil* tengah ke ujung sudu dan

(5) Dalam pemakaian yang lama, dapat terjadi deformasi di seluruh bagian sudu.

Beban-beban yang terjadi selama turbin angin berputar sangat kompleks. Hal ini disebabkan karena beban-beban yang diterima sudu selalu berfluktuasi dan adanya beban-beban ikutan lain yang ditimbulkan oleh sistemnya sendiri.

Bentuk beban-beban yang diterima sudu tersebut meliputi (Tony B, et. al, 2001);

- beban aerodinamik (torsi dan *flutter*).
- beban gravitasi (*bending*).
- beban inersia (sentrifugal dan efek giroskopik).
- beban operasional sebagai akibat kerja sistem kontrol (*pengereman*, *yawing*, *pitching*, *generator disconnecting*, dll).

Selain adanya beban-beban luar tersebut, kerusakan sudu dapat juga disebabkan oleh kesalahan desain arsitektur struktur penampang potong sepanjang bentang sudu turbin angin dan ketidaksempurnaan proses pengerjaan bahan komposit, contohnya pada saat *lay-up*, *curing* dan rekat sambung pada bagian *leading edge* dan *trailing edge*.

Tulisan ini berkaitan dengan program pengembangan teknologi sistem konversi energi angin kapasitas 50 kW yang sedang dikembangkan LAPAN. Secara umum, pendekatan metode ini dapat digunakan untuk mendesain keandalan struktur sudu turbin angin skala menengah.

2 STRUKTUR DINAMIK SUDU TURBIN ANGIN

2.1 Data Geometri Aerodinamika Sudu

Untuk membuat sudu turbin angin 50 kW diperlukan desain arsitektur struktur penampang potong

sepanjang bentang sudu turbin angin yang meliputi aspek-aspek geometri, struktur dan material sudu. Data geometri aerodinamika yang diperlukan adalah; panjang sudu, distribusi NACA *airfoil* (*chord*, tebal) dan distribusi sudut puntir sepanjang bentang sudu.

Dalam desain arsitektur struktur sudu ini mengambil contoh data geometri aerodinamika salah satu sudu turbin angin 50 kW (Tabel 2-1). Walaupun geometri aerodinamika contoh sudu turbin angin ini memakai NACA *airfoil* 4415, metode desain ini dapat diterapkan untuk mendesain arsitektur struktur sudu turbin angin 50 kW LAPAN.

Tabel 2-1: CONTOH SPESIFIKASI DASAR AERODINAMIKA SUDU TURBIN ANGIN 50 kW (Andree T Lee et, al. 1998)

<i>Rated power:</i>	50 kW
<i>Number of blade:</i>	3
<i>Rated wind speed:</i>	12 m/s
<i>Rotor diameter:</i>	16 m
<i>Profiled blade length:</i>	7 m
<i>Root chord (maks.):</i>	0,8 m
<i>Tip chord:</i>	0,3 m
<i>Root pitch angle:</i>	$\pm 14^\circ$
<i>Tip pitch angle:</i>	0°
<i>Rotor speed:</i>	62 rpm
<i>Tip speed ratio:</i>	4,33
<i>NACA airfoil:</i>	4415
<i>Average Reynolds no.:</i>	$1,5 \cdot 10^6$

Dari beberapa referensi, turbin angin skala menengah (10-100 kW) dengan jumlah sudu 3 bilah dan kecepatan angin *rated* antara 12-15 m/s, panjang sudu antara 3-10 meter, *chord* maks antara 0,2-1,0 m dan *tip chord* antara 0,1-0,5 m. Tebal sudu *airfoil* (17,5 % dari *chord line*-nya) pada *chord* maks. 14 cm dan tebal sudu pada *tip chord* 5,25 cm.

Desain arsitektur struktur penampang potong sudu dibagi menjadi

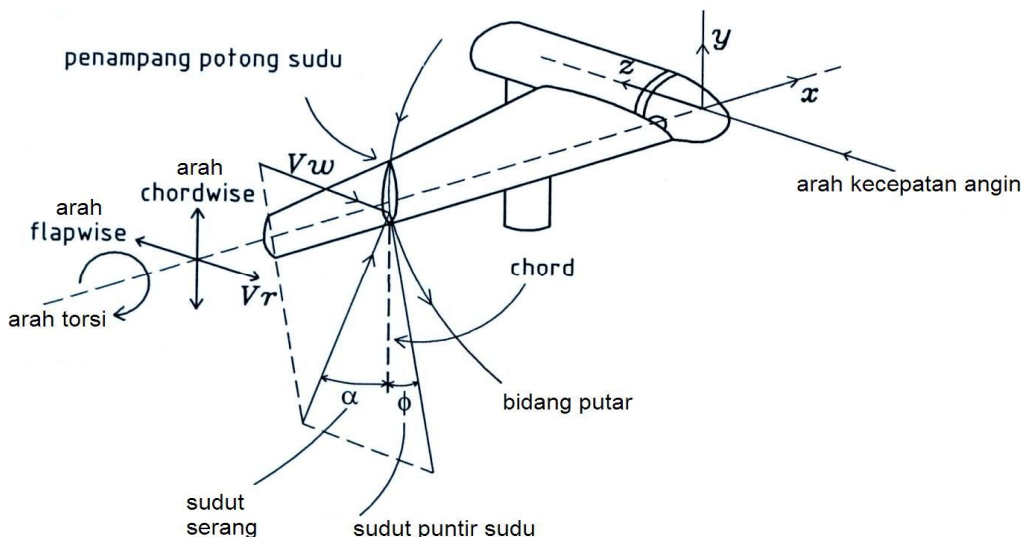
dua bagian yaitu; segmen *root* sudu dan segmen *airfoil* sudu (Gambar 3-2).

2.2 Karakteristik Pembebanan Dinamik Struktur Sudu

Pada saat rotor berputar, seluruh bagian sudu akan mengalami deformasi dinamik (*shear displacement*) sebagai akibat pembebanan dinamik (*blade torsion*, *bending* dan *axial motion*) yang bekerja pada sudu (Gambar 2-1). Akibat pembebanan dinamik ini, pada penampang potong sudu sepanjang bentang sudu turbin angin, akan bekerja beban-beban; *flap-torsion*, *lag/edge-torsion*, *flap-lag*, *axial-torsion*, *flap-axial*, dan *lag-axial*.

Karakteristik rigiditas sudu terhadap beban torsi (*torsional stiffness*) sepanjang bentang sudu dan karakteristik rigiditas (*stiffness properties*) penampang potong sudu turbin angin, dapat diperbaiki dengan mendesain (*lay-up*) komposit laminat anisotropik (G.S. Bir, 2006) dan memilih *spar* yang ditempatkan di rongga *airfoil* sudu (James L.T, 2000).

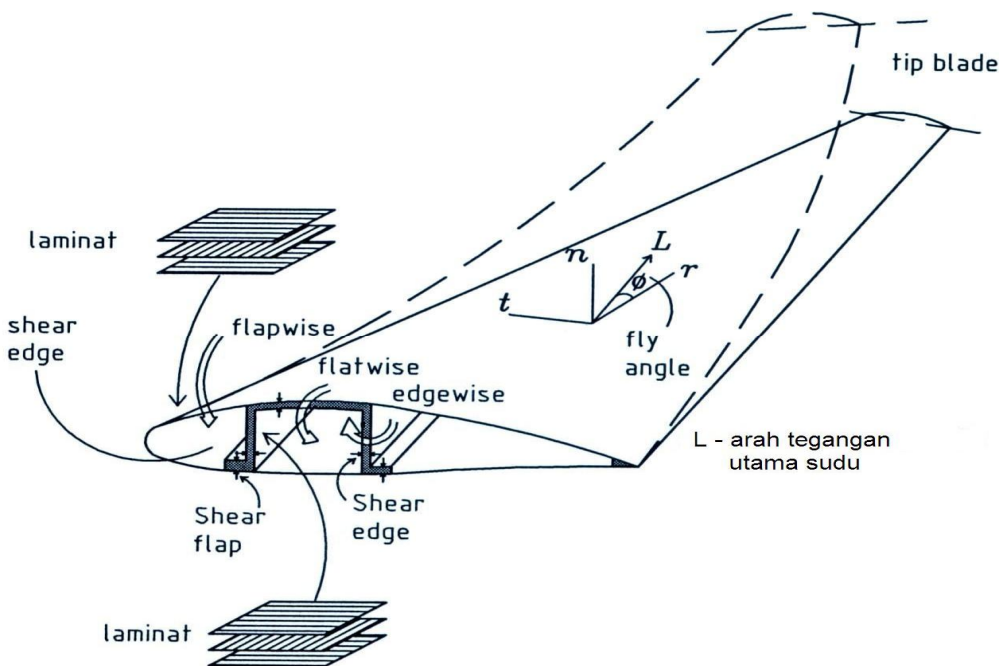
Untuk mendesain arsitektur struktur penampang potong sudu turbin angin, diperlukan informasi beban-beban yang bekerja pada sudu dan karakteristik dinamika gerakannya, serta data bentuk eksternal dan internal sudu. Bentuk eksternal sudu meliputi; variasi *chord*, sudut puntir, dan geometri *airfoil* sepanjang bentang sudu. Sedangkan informasi tentang internal sudu adalah konfigurasi laminat (orientasi serat setiap lamina dan sifat-sifat laminat). Karakteristik pembebanan struktur sudu pada umumnya, dipengaruhi oleh karakteristik *stiffness*, *inertial* dan *principal axes* (Tabel 2-2).



Gambar 2-1: Beban-beban dan tegangan-tegangan yang bekerja pada sudu

Tabel 2-2: KARAKTERISTIK PEMBEBANAN STRUKTUR SUDU

Properties	Section Properties
Direct stiffnesses	Flap, lag (edgewise), axial, and torsion stiffnesses
Cross-coupled stiffnesses	Flap-twist, lag-twist, flap-lag, axial-twist, axial-flap, and axial-lag stiffnesses
Principal axes	Orientation of principal axes for inertia and for stiffness
Inertias	Mass, mass moments of inertia about the principal axes



Gambar 2-2: Karakteristik *bend twist coupling (flap-up)* sepanjang bentang sudu

Konsep karakteristik dinamik gerak struktur sudu turbin angin selama pembebanan, ditunjukkan pada Gambar 2-2. Diilustrasikan pada saat sudu turbin angin mengalami gerakan *twists nose-down* pada saat posisi sudu

flaps up. Pola gerak sudu ini adalah sebagai interaksi dari karakteristik material dan konstruksi *spar* akibat pengaruh paduan gerak *flap* dan *torsional displacements* pada sudu turbin angin.

2.3 Material Struktur Sudu

Pemilihan bahan komposit untuk sudu didasarkan pada pengalaman banyak negara yang telah lama mengembangkan teknologi turbin angin. Dalam dua dekade terakhir ini, para ahli struktur dan material konstruksi mulai mengembangkan desain sudu turbin angin dari berbagai bahan dan memadukannya mejadi bahan komposit. Kecenderungan pemakaian bahan komposit untuk sudu turbin angin skala besar semakin meningkat. Bahkan sudah ada sudu turbin angin skala besar yang hampir seluruhnya menggunakan bahan komposit.

Berbagai kombinasi bahan komposit dapat digunakan, baik yang bermatriks bahan polimer (*Polymer Matrix Composites*, PMC's) maupun yang bermatriks logam (*Metal Matrix Composites*, MMC's). Untuk meningkatkan keandalan struktur sudu, bahan lain dapat disubstitusikan sebagai inti (*core*), untuk membentuk struktur *sandwich*.

Keunggulan bahan komposit adalah: (1) Struktur lebih ringan, kuat dan rigid (*stiff*). Bahan komposit umumnya mempunyai nilai *specific modulus* (*high stiffness/low density*) yang sangat tinggi, (2) Dapat dibuat komponen tunggal bentuk kompleks, (3) Dapat dikombinasikan dengan komponen lain, (4) Tahan terhadap berbagai kondisi lingkungan yang buruk. (5) Perbaikan struktur komposit dapat dilakukan dengan mudah, (6) Sifat-sifat bahan komposit dapat dibuat disesuaikan dengan karakteristik beban dan kondisi lingkungan kerja, (7) Fatik (*fatigue*) dapat dirancang tanpa benda uji atau prototip, dan (8) Kemampuan PMC's menyerap energi impact lebih baik dibandingkan dengan logam.

Jenis serat gelas dan serat *carbon* paling banyak digunakan untuk pemakaian *medium* sampai *high grade*. Serat *carbon* lebih unggul dibandingkan serat gelas, a.l; sifat kuat tarik, tekan, *bending*, impact, massa jenis dan fatik.

Tetapi serat gelas jauh lebih murah, sifat tahan api dan sifat isolasi thermal/elektrikal-nya lebih baik.

Resin poliester dan epoksi adalah jenis resin termoset yang paling banyak digunakan sebagai matriks. Resin epoksi mempunyai banyak keunggulan dibandingkan resin poliester, a.l; sifat mekanikal/termal, tahan terhadap air, waktu *curing* lebih lama, tahan terhadap temperatur sampai 140°C *wet*/220°C *dry*, dan sifat mengkerut rendah. Tetapi, harga resin epoksi lebih mahal, *critical mixing* dan *corrosive handling*.

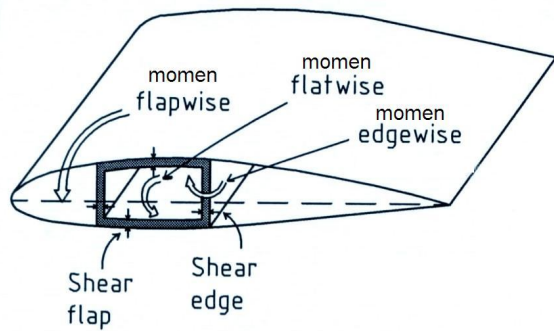
Sifat-sifat individual bahan pembentuk komposit ini akan menentukan pemilihan jenis bahan komposit (PMC's) yang akan digunakan.

3 PEMBAHASAN

Desain arsitektur struktur penampang potong sepanjang bentang sudu turbin angin dapat dilakukan lebih akurat, apabila prediksi awal karakteristik pembebanan dinamik yang bekerja pada sudu atau penampang potong sudu (*torsion stiffness*, *cross-stiffness properties*, dan karakteritik struktural lainnya), serta 'pola' kerusakan yang terjadi pada sudu dapat diketahui.

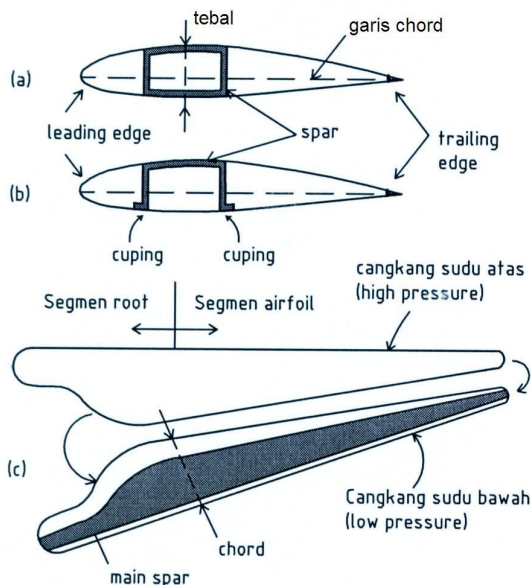
3.1 Pemilihan Bentuk Spar

Spar dirancang sebagai *stiffeners* untuk meredam beban torsi dan *bending* pada sudu turbin angin, yaitu dengan meng-eliminir beban-beban akibat momen-momen *flapwise*, *flatwise* dan *edgewise* (Gambar 3-1). *Spar* umumnya dapat berbentuk batang, plat atau *hollow* yang ditempatkan di dalam rongga *airfoil* di sepanjang bentang sudu. *Spar* juga akan menambah 'daya rekat' antara bagian cangkang sudu atas dengan cangkang sudu bawah, sehingga kekuatan rekat kedua cangkang tidak hanya bertumpu pada kuat rekat pada bagian *leading edge* dan *trailing edge*-nya saja (Gambar 3-2).



Gambar 3-1: Respons pembebanan pada penampang potong sudu turbin angin

Dalam rancangan ini, dibandingkan dua bentuk *box spar* (Gambar 3-2), yaitu; *Spar* bentuk *hollow* penampang potong segi empat (*rectangular spar*) dan *spar* bentuk *hollow* penampang potong U bercuping (*hat spar*). *Hat spar* adalah modifikasi dari bentuk *box spar*. Bentuk *box spar* adalah bentuk *spar* yang paling ideal di antara bentuk *spar* lainnya (James L.T, 2000). Bentuk *spar* ini terbukti lebih kuat menahan defleksi lokal akibat beban tekan dan beban *bending*.



Gambar 3-2: *Spar* penampang potong segi empat, b. *Spar* penampang U bercuping (*hat spar*), c. *Main spar* sepanjang bentang sudu

Spar penampang potong segi empat lebih *rigid* terhadap beban torsi dan lebih kuat terhadap beban *bending* dibandingkan *spar* penampang potong U bercuping. Hal ini disebabkan karena

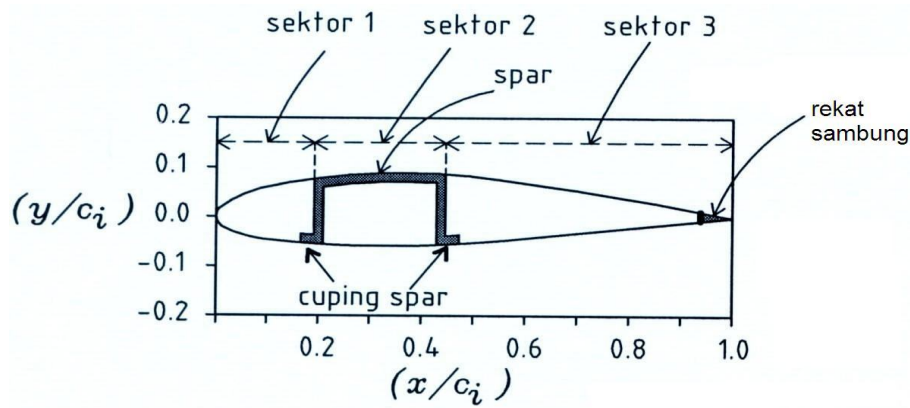
'luas' rekat antarmuka *spar* penampang potong segi empat dengan permukaan cangkang sudu atas dan bawah bagian dalam 'lebih besar' dibandingkan dengan luas rekat antarmuka *spar* penampang potong U bercuping. Semakin besar 'luas' rekat antarmuka, akan meningkatkan kuat geser permukaan (*surface shear flap*). Tetapi *spar* penampang potong U bercuping lebih sederhana dan lebih mudah dibuat dibandingkan *spar* penampang potong segi empat. Dengan alasan praktis tersebut, akan dipilih *spar* bentuk penampang potong U bercuping.

Spar penampang potong U bercuping ditempatkan di dalam rongga *airfoil* sudu dengan kaki dan cupingnya menempel di permukaan cangkang sudu bawah bagian dalam dan tudungnya menempel pada permukaan cangkang sudu atas bagian dalam. Geometri, posisi dan dimensi *spar* sepanjang bentang sudu *airfoil* NACA 4415, seperti pada pola Gambar 3-3.

3.2 Desain Karakteristik Arah Penguatan Laminat

Bahan komposit mempunyai sifat-sifat mekanik yang ditentukan oleh geometri dan arah serat (anisotropik) serta kondisi antarmuka. Karena itu, karakteristik bahan komposit yang akan digunakan dapat dirancang sesuai dengan karakteristik pembebanan dan kondisi lingkungan kerjanya.

Arah pembebanan utama (*principal axes*) tidak selalu searah dengan arah sistem koordinat sudu. Sebagai contoh, permukaan sudu yang menerima beban torsi, modulus kerusakan yang terjadi biasanya ke arah $\pm 45^\circ$ dari arah sistem koordinat. Untuk meng-antisipasi berbagai arah pembebanan, lamina-lamina (*oriented layer*) disusun (*lay-up*) bertumpuk menyalang (*cross-ply*) multiarah (multi-aksial). Karakteristik anisotropik pada laminat akan meningkatkan sifat kuat geser permukaan (*surface shear stress*). Dengan kata lain sifat-sifat tiap lamina, dapat ditransformasikan menjadi struktur laminat multiaksial (Gambar 3-4).

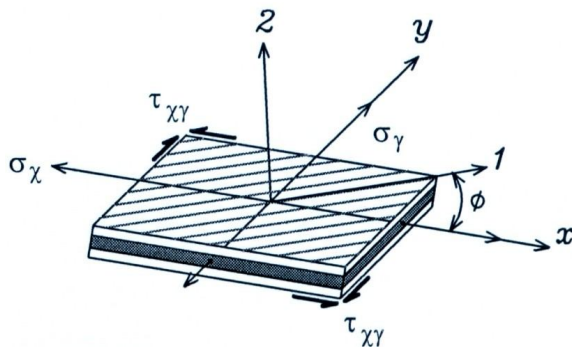


x - jarak dari titik leading edge

y - tinggi/rendah dari chord line

c_i - chord lokal

Gambar 3-3: Posisi *spar* penampang potong U bercuping sepanjang bentang sudu



Gambar 3-4: Skematik deformasi elastik laminat komposit multi-aksial

Bahan struktur sudu (termasuk bahan *spar*) turbin angin 50 kW yang digunakan, biasanya merupakan kombinasi (hibrid) dari bahan komposit jenis *glass fibre reinforced plastic* (GFRP) dan *carbon fibre reinforced plastic* (CFRP) tipe biaksial ($0^\circ/90^\circ$) *fabrics* dan UD 0° *fabrics* (Bent, et. al. 2004).

3.3 Desain Konfigurasi Laminat

Seperti disebutkan pada sub-bab 2-2, desain konfigurasi laminat dimaksudkan untuk memperbaiki karakteristik rigiditas sudu terhadap beban torsi (*torsional stiffness*) sepanjang bentang sudu dan karakteristik rigiditas (*stiffness properties*) penampang potong sudu turbin angin. Konfigurasi komposit laminat sepanjang bentang sudu turbin angin, meliputi; *laminates*

schedule, orientasi serat per lamina, dan sifat-sifat laminat.

Karakteristik bahan komposit CFRP (epoksi) jauh lebih baik dibandingkan dengan komposit GFRP (epoksi/poliester), tetapi harganya 4-5 kali lebih mahal. Walaupun demikian, untuk komponen dengan beban kerja tinggi, CFRP (epoksi) tetap akan menjadi pilihan. Sedangkan untuk komponen dengan beban kerja rendah dapat digantikan dengan jenis GFRP (epoksi/poliester).

Jenis *single layer fabrics* yang direkomendasikan (Bent, et. al. 2004) adalah; biaksial ($0^\circ/90^\circ$) dan jenis UD 0° *fabrics*. Jenis biaksial ($0^\circ/90^\circ$) *single layer fabrics*, mempunyai kombinasi arah penguatan serat 0° dan 90° , karena itu akan dipilih untuk bahan struktur yang menerima lebih dari 1 arah pembebanan. Bentuk jalinan/susunan serat penguatnya dapat dipilih dari berbagai pilihan tipe/jenis serat kain. Selama *curing* kemungkinan udara terperjat dan mengkerut lebih besar.

Jenis *unidirectional* (UD) 0° *single layer fabrics*, hanya mempunyai 1 arah penguatan serat saja. Untuk mendapatkan laminat biaksial arah $0^\circ/90^\circ$, diperlukan 2 *layer* lamina UD 0° *fabrics* yang disusun bertumpuk

menyilang tegak lurus. Selain itu, *single layer* lamina biaksial $0^\circ/90^\circ$ *fabrics*, mempunyai berat hanya 75% dari berat laminat $0^\circ/90^\circ$ (2 *layer* UD). Tetapi, jenis UD 0° *fabrics* mempunyai sifat mengkerut lebih kecil. (tebal 1 *layer* lamina antara 1,5-2,0 mm).

Pada Gambar 3-5, ditunjukkan 3 pilihan konfigurasi laminat (*cross-ply*) triaksial ($0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$) yang paling banyak dipilih, untuk sudu turbin angin, yaitu; [a] 2 *layer* UD 0° dan 1 *layer* biaksial $0^\circ/90^\circ$ *fabrics*, [b] 4 *layer* UD 0° *fabrics*, dan [c] 3 *layer* biaksial $0^\circ/90^\circ$ *fabrics*. Ketiga bentuk pilihan laminat ini dapat diandalkan untuk meredam beban-beban dinamik yang bekerja pada sudu turbin angin (*blade bending*, *torsion* dan *axial motion*).

Secara kualitatif, ketiga bentuk laminat ini dapat saling dibandingkan. Laminat [a] mempunyai arah penguatan triaksial yang merata, laminat [b] mempunyai arah penguatan triaksial sama dengan laminat [a] tetapi lebih berat/tebal, lebih kuat ke arah 45° dan lamina UD 0° *fabrics* yang disusun (0/45/-45/90) lebih lemah ke arah penguatan $\pm 22,5^\circ$ dan $\pm 67,5^\circ$. Sedangkan laminat [c] lebih seragam ke arah multiaksial (*orthotropic*) dibandingkan laminat [a] dan [b], karena adanya pengaruh jalinan anyaman sesama serat yang dapat meningkatkan sifat kuat geser permukaan. Di samping itu, laminat [c] lebih ringan dibanding laminat [b] dan sedikit lebih berat dari laminat [a].

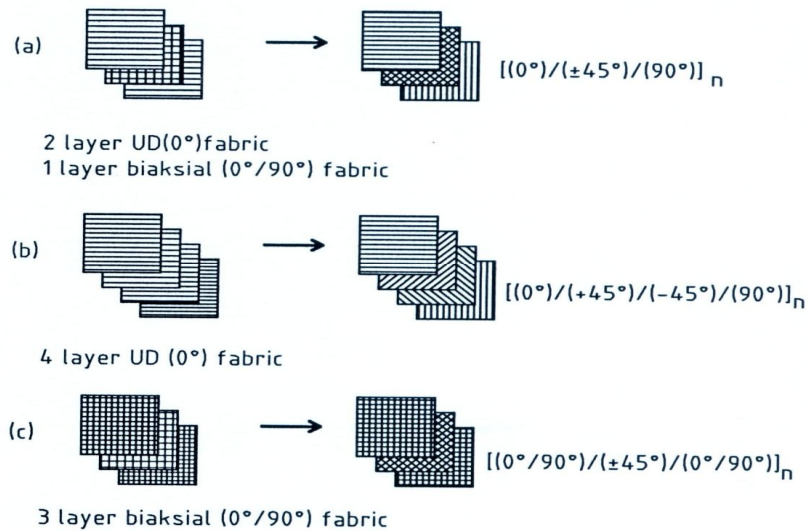
Untuk sudu turbin angin diperlukan bahan komposit yang mempunyai penguatan lebih seragam ke segala arah (multiaksial) dan lebih ringan.

Secara teknis pengerjaan (*hand lay-up fabric layer* jenis *unidirectional* (UD) 0° *fabrics* lebih sulit dikerjakan dibandingkan jenis biaksial ($0^\circ/90^\circ$) *fabrics*. Dengan alasan dan pertimbangan tersebut akan dipilih bentuk laminat konfigurasi [c].

3.4 Laminates Schedule Sepanjang Bentang Sudu Turbin Angin

Bentuk laminat [c] dan bentuk variannya (turunannya), layak dipakai sebagai bahan struktur cangkang sudu (dan *spar*) turbin angin. *Laminates schedule* sepanjang bentang sudu turbin angin 50 kW disusun dalam Tabel 3-1 dan diilustrasikan pada Gambar 3-6. Pemahaman dan pertimbangan tentang Tabel 3-1 dan Gambar 3-6, dapat dijelaskan sebagai berikut:

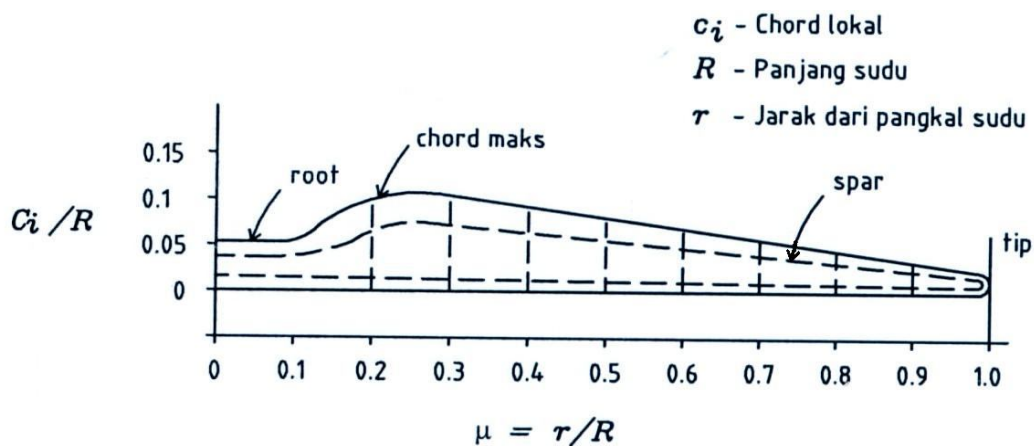
- Untuk menghemat biaya bahan konstruksi cangkang sudu, satu atau dua *layer* (lamina) terluar, yaitu permukaan cangkang sudu bagian luar dipilih bahan komposit CFRP (epoksi). Tetapi lamina-lamina pada *layer* berikutnya dapat menggunakan bahan GFRP (poliester/epoksi). Sedangkan bahan konstruksi *spar* disarankan cukup memakai bahan GRFP (poliester/epoksi).
- Kontinuitas fisik struktur laminat cangkang (dan *spar*) sepanjang bentang sudu turbin angin, akan menjamin kontinuitas sifat mekanik dan tingkat kesamaan (*equality*) setiap produk sudu. Prosedur pembuatan yang perlu diperhatikan; (i) Bahan dasar (serat penguat, matrik, *adhesive* dan *filler*) yang digunakan mempunyai: jenis, kualitas dan asal pabrikan yang sama, (ii) *Single layer* lamina dibuat tanpa sambungan, dan (iii) Perlakuan selama proses *lay-up* dan rekat sambung (*joining adhesive*) menggunakan metode dan kondisi kerja yang sama.
- Posisi kritis terhadap beban *bending* dan beban torsi, umumnya terjadi pada posisi 40-65% dari posisi tumpuan (*root*). Karena itu, semakin ke arah segmen *root*, konfigurasi laminat dibuat lebih tebal agar lebih kuat untuk menahan beban *bending* dan torsi.



Gambar 3-5: Re-orientasi cross-ply 3 layer lamina menjadi laminat triaksial

Tabel 3-1: LAMINATE SCHEDULE SEPANJANG BENTANG SUDU

Segmen	Posisi arah Radial	Konfigurasi Laminat
Segmen r/R (airfoil blade)	0,8 – 1,0	[(0°/90°) ₁ /(±45°) ₁ /(0°/90°) ₁] _n
	0,6 – 0,8	[(0°/90°) ₁ /(±45°) ₂ /(0°/90°) ₁] _n
	0,4 – 0,6	[(0°/90°) ₂ /(±45°) ₂ /(0°/90°) ₁] _n
	0,2 – 0,4	[(0°/90°) ₂ /(±45°) ₂ /(0°/90°) ₂] _n
	0,1 – 0,2	[(0°/90°) ₂ /(±45°) ₃ /(0°/90°) ₂] _n
Segmen r/R (root blade)	0,0 - 0,1	[(0°/90°) ₂ /(±45°) ₃ /(0°/90°) ₂] _n
Segmen spar	Sepanjang bentang sudu	[(0°/90°) ₁ /(±45°) ₁ /(0°/90°) ₁] _n



Gambar 3-6: Distribusi konfigurasi (radial position $\mu = r/R$) laminat pada spar, root dan cangkang sepanjang bentang sudu

4 KESIMPULAN DAN SARAN

- Keandalan struktur sudu turbin angin dapat diperbaiki dengan meningkatkan karakteristik rigiditas penampang potong sepanjang bentang sudu turbin angin, dengan 2 cara yaitu; (i) mendesain spar yang berfungsi sebagai stiffeners

dan (ii). mendesain (lay-up) komposit laminat dan konfigurasi laminates schedule sepanjang bentang sudu turbin angin.

- Dipilih spar bentuk penampang potong U bercuping karena lebih sederhana, lebih mudah dibuat, dan bisa diandalkan.

- Untuk menghemat biaya bahan konstruksi sudu, dipilih komposit hibrid CFRP (epoksi) /GFRP (poliester/epoksi).
- Direkomendasikan untuk menggunakan laminat $[(0^\circ/90^\circ)/(\pm 45^\circ)/(0^\circ/90^\circ)]_n$, dan bentuk variannya (turunannya), karena lebih bersifat orthotropik.
- Pembuatan komposit (*lay-up process*) dengan kantong hampa udara (*vaccum-bag*) akan meningkatkan; volume fraksi serat sampai 70% [*max. strength, perfectly bonded (void-free, initially stress-free)*] dan tahan terhadap inklusi molekul udara.
- Secara kualitatif, metode ini dapat juga diterapkan untuk mendesain arsitektur struktur penampang potong sepanjang bentang sudu turbin angin skala menengah 50 kW (dan untuk sudu turbin angin skala menengah 10-100 kW) yang sedang dikembangkan LAPAN.

DAFTAR RUJUKAN

- AG. Gonzales, et. al; *Estimating Wind Turbines Mechanical Contents*, Dept. of Electronic University of Jaen, Spain.
- Andrew T Lee dan Richard GJ Fly, Oktober 1998. *Compliant Blades for Wind Turbines*, IPENZ Conference, Auckland.
- Bent, et. al., September 2004. *Improved Design of Large Wind Turbine Blade of Fibre Composite Based on Studies of Scale Effects*. RNS. Roskilde. Denmark.
- Dayton A. Griffin, Juli 2002. *Blade System Design Studies Vol. 1: Composites Technologies for Large Wind Turbine Blade*. Kiekland, Washington.
- G.S. Bir, Januari 2006. *User's Guide to Processor for Computing Composite Blade Properties*. Technical Report. NREL, Colorado.
- James L. Tangler, 2000. *The Evolution of Rotor and Blade Design*. NREL. California.
- Schwartz M.M., 1993. *Composite Materials Handbook*. McGraw-Hill Book, Co. New York.
- Stuart M. Lee (Editor), 1990. *International Encyclopedia of Composites*, vol 3 & vol 5, VCH Publisher. New York.
- Tony Burton, et. al., 2001. *Wind Energy HandBook*, Jhon Willey & Sons, LTD, West Sussex, England.