

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1. Penelitian Sebelumnya

Penggunaan komposit polimer yang diperkuat serat karbon (CFRP) dapat meningkatkan kekuatan dan keuletan balok kayu secara signifikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan balok kayu meningkat secara signifikan setelah diperkuat dengan CFRP, dengan peningkatan hingga 140%. Daktilitas balok pun meningkat signifikan dengan nilai indeks daktilitas sebesar 6,81 untuk balok Deodar dan 4,33 untuk balok Kail. Selain itu, ditemukan bahwa area CFRP sebesar 0,59% merupakan nilai optimal untuk mencapai indeks daktilitas maksimum. Oleh karena itu, penggunaan CFRP untuk merestorasi atau merancang struktur baru menggunakan kayu Deodar dan Kail dimungkinkan. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa perkuatan serat CFRP dapat meningkatkan kekuatan dan daktilitas balok kayu. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Plevris dan Triantafloou (1992) menunjukkan bahwa perkuatan CFRP dapat meningkatkan kekuatan balok kayu hingga 60% hanya dengan menggunakan sedikit serat CFRP.

Selain itu, penelitian lain yang dilakukan oleh Fiorelli dan Antonio (2002) juga menunjukkan adanya peningkatan kekakuan dan daya dukung beban pada balok yang diperkuat dengan serat CFRP. Pada penelitian ini tidak terjadi kerusakan akibat pengelupasan lem atau pelepasan lem antar panel CFRP dan bahan pengikat atau antara bahan pengikat dan substrat kayu. Hal ini disebabkan oleh panjang ikatan yang sesuai antara lembaran CFRP dengan bahan pengikat serta antara bahan pengikat dan substrat kayu. Oleh karena itu, penggunaan CFRP untuk perkuatan balok kayu dinilai berhasil dalam hal kekuatan rekat. Dalam kesimpulan tersebut juga disebutkan bahwa indeks plastisitas balok kayu yang diperkuat CFRP bervariasi antara 2,53 dan 6,81 untuk balok Deodar dan 1,37 hingga 4,33 untuk balok Kail. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan CFRP juga dapat meningkatkan fleksibilitas balok kayu (Yusof Ahmad, 2013).

Perkuatan destruktif balok konstruksi kayu dengan serat karbon dan serat kaca dapat meningkatkan kapasitas lentur balok. Penelitian ini melibatkan pengujian balok komposit dalam kondisi pratekan dan tanpa tegangan serta membandingkannya dengan balok kendali tanpa perkuatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok konstruksi yang diperkuat dengan

serat dalam keadaan pratekan meningkatkan kapasitas lentur dibandingkan dengan balok kayu tanpa perkuatan. Penelitian ini juga menguji berbagai bahan penguat seperti kawat Kevlar, batang polimer yang diperkuat *fiberglass*, dan panel polimer yang diperkuat serat karbon. Studi ini memberikan informasi berharga tentang penggunaan material komposit untuk memperkuat kayu konstruksi dan menyoroti potensi jenis kayu ini untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahannya (Šedivka et al., 2015).

Dalam ulasan bertajuk “FRP Reinforcement of Wood Structures” penggunaan fiber Reinforced Polymer (FRP) sangat efektif dalam memperkuat struktur kayu. Perkat epoksi dua komponen yang dapat diawetkan secara dingin paling cocok untuk merekatkan di lokasi dan persiapan permukaan yang cermat sangat penting. Tinjauan ini juga membahas metode desain untuk perkuatan lentur dan geser balok kayu serta memberikan panduan praktis untuk sambungan di lokasi. Namun, tinjauan ini juga mengakui adanya beberapa tantangan dalam pemodelan delaminasi, serta kurangnya aturan desain yang membatasi penggunaan teknik penguatan FRP. Bahan yang digunakan untuk perkuatan FRP pada struktur kayu juga dijelaskan, termasuk berbagai bentuk perkuatan FRP dan pilihan perekatnya. Tinjauan ini juga membahas sifat ikatan antara FRP dan kayu, termasuk pengaturan pengujian dan mode kegagalan yang berbeda. Banyak penerapan FRP pada perkuatan ujung balok, perkuatan lentur, perkuatan geser dan FRP prategang telah dijelaskan. Metode desain untuk perkuatan lentur dan geser dijelaskan dan prosedur kendali mutu yang relevan untuk sambungan di lokasi juga disediakan. Tinjauan ini diakhiri dengan gambaran umum dan rekomendasi untuk penelitian masa depan di bidang ini (Schober et al., 2015).

Perkuatan lentur dengan komposit fiberglass terbukti meningkatkan beban dan kekakuan maksimum balok kayu Meranti kuning. Balok yang diperkuat dengan sistem sambungan GFRP menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan balok kontrol tanpa perkuatan. Perkuatan dengan menggunakan GFRP pada zona tarik struktur kayu dapat mengubah modus keruntuhan dari keruntuhan tarik menjadi keruntuhan tekan. Cara ini efektif meningkatkan kapasitas tarik struktur dan memanfaatkan kapasitas tekan kayu. Oleh karena itu, metode ini dapat digunakan dalam proyek konstruksi baru maupun dalam renovasi struktur kayu yang sudah ada. Balok kayu Meranti Kuning merupakan kayu yang umum digunakan di Malaysia, dengan kekuatan dan daya tahan yang rendah. Namun penelitian ini menunjukkan bahwa kayu Meranti kuning dapat diperkuat dengan komposit FRP untuk digunakan pada bangunan. Oleh karena itu, penelitian ini menyimpulkan bahwa perkuatan lentur dengan GFRP

dapat meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur kayu serta dapat menjadi alternatif yang efektif dalam konstruksi atau rehabilitasi struktur kayu (Yusof & Saleh, 2010).

Tinjauan komprehensif metode eksperimental dan numerik untuk struktur kantilever kayu dan komposit. Artikel ini berfokus pada pemahaman dan penentuan creep awal yang dapat menyebabkan kegagalan struktur. Metode analisis yang digunakan meliputi metode eksperimen dan numerik, dengan penekanan khusus pada metodologi creep balok konsol. Metode pengujian mencakup teknik berbasis muatan dan berbasis suhu. Pengujian mulur skala kupon pada kayu dan komposit dianggap sebagai metode utama pengukuran mulur struktural di masa depan (Asyraf dkk., 2020).

Studi ini berfokus pada aspek durabilitas member kayu yang diperkuat CFRP. Untuk memastikan daya tahan, menguji lembaran serat karbon yang dibungkus oleh spesimen anggota kayu, mengalami dua lingkungan yang berbeda, termasuk siklus kering-basah air laut dan siklus beku-cair, pada kekerasan permukaan. Sampel juga dilakukan pengamatan SEM, pengujian kuat tarik, kuat geser tekan, kuat tekan, dan kuat lentur. Setelah kondisi lingkungan dan pengujian yang disebutkan di atas, efek dan daya tahan anggota kayu yang diperkuat CFRP dievaluasi. Hasilnya menunjukkan bahwa member kayu yang dibalut dengan CFRP dapat meningkatkan kekuatannya, terutama saat menerapkan dua lapisan resin. Setelah dua uji daya tahan lingkungan, komponen kayu terikat dengan baik dengan CFRP. Temuan menunjukkan bahwa dengan bertambahnya jumlah lapisan perkuatan, kekuatan tekan, kekuatan lentur, dan kekuatan geser-tekan dari spesimen kayu yang diperkuat CFRP meningkat, tetapi kekuatan tarik tetap tidak berubah (Lee et.al 2023).

Berdasarkan tinjauan literatur di atas dapat disimpulkan bahwa penggunaan CFRP untuk perkuatan kayu mempunyai potensi yang besar. CFRP dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan kayu, menahan korosi dan serangan kimia. Selain itu, jenis CFRP yang optimal dan konfigurasi penguatan juga perlu dipertimbangkan untuk mencapai hasil yang optimal.

2.2. Landasan teori

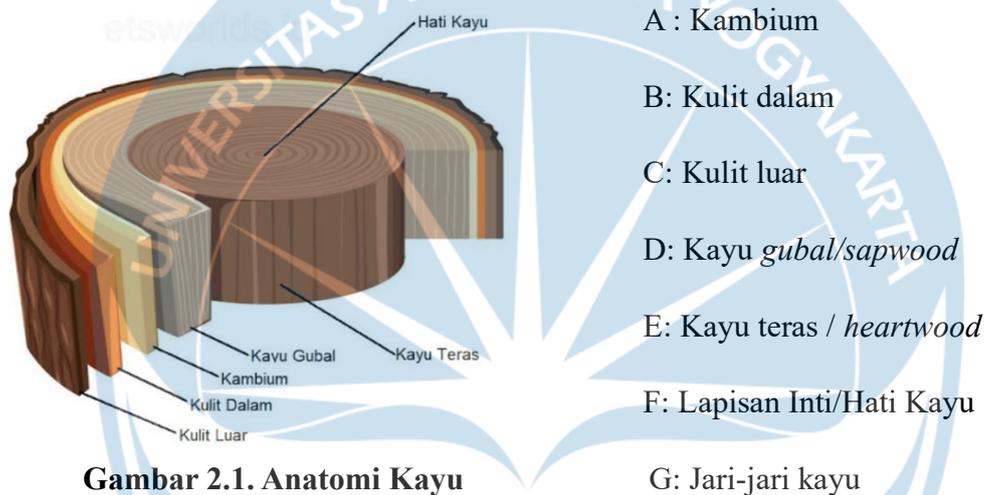
2.2.1. Ringkasan

1. Ciri-ciri kayu sebagai bahan struktur.

Kayu merupakan bahan alami yang memiliki sifat tidak homogen akibat pola pertumbuhan batang pohon dan seringkali kondisi lingkungan yang berbeda. Sebuah pohon terdiri dari bagian luar (kulit pohon dan bagian dalam pohon seperti terlihat pada Gambar 2.1, disebut penampang pohon).

2. Anatomi kayu

Senyawa utama penyusun sel kayu: 50% selulosa, 25% hemilulosa, 25% lignin

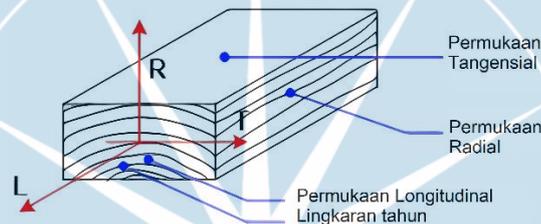


Gambar 2.1. Anatomi Kayu

- Kulit Luar : Bagian luar. Kulit berperan melindungi bagian dalam kayu dari pengaruh iklim, serangan serangga dan jamur atau kerusakan mekanis.
- Kambium : Kambium berbentuk lapisan tipis transparan yang mengelilingi tanaman. Tugas kambium adalah untuk membentuk sel kulit kayu di bagian luar dan sel kayu dibagian dalam kayu.
- Kayu Gubal: Kayu terdiri dari sel-sel yang hidup dan aktif. Oleh karena itu, tugas kayu gubal ini adalah mengangkut zat makanan, mineral dan air dari akar ke daun serta menyalurkan makanan dari daun ke bagian pohon lainnya.
- Kayu Teras: Sebagian terdiri dari sel-sel tua atau mati. Inti kayu ini diambil dari bagian gubalnya, menua dan mati sehingga tidak berfungsi lagi. Inti kayu ini hanya mempunyai efek meningkatkan pertumbuhan pohonnya. Kayu terasnya lebih awet dan warna kayunya umumnya lebih gelap dibandingkan kayu gubal.

- Hati : Ini adalah bagian di tengah pohon. Merupakan lapisan inti kayu yang pertama kali dibentuk oleh kambium dan rapuh berupa jaringan gabus.
- Pori-pori: Merupakan sel-sel pembuluh darah pada kayu yang terpotong sehingga menimbulkan lubang-lubang kecil (pori-pori). Besar kecilnya lubang-lubang ini pada setiap jenis kayu berbeda-beda.

Oleh karena itu sifat fisik dan mekanik pada arah longitudinal, radial dan tangensial tidak sama, sehingga keawetan kayu pada arah memanjang lebih besar dibandingkan pada arah radial atau aksial dan laju muai pada arah longitudinal jauh lebih kecil dibandingkan arah radial atau tarsial (Ali Awaludin 2005)



Gambar 2.2 Orientasi tiga dimensi permukaan kayu

R : Arah Radial

T : Arah Tangensial

L : Arah Longitudinal

3. Kayu sebagai bahan bangunan struktural memiliki beberapa keunggulan, antara lain:

- Mudah didapat khususnya di Indonesia
- Mudah untuk diangkut karena dapat dipotong kecil-kecil bila diperlukan
- Pengerjaan Mudah
- Untuk Konstruksi di dalam air, kayu juga sangat baik karena tidak berkarat asalkan terendam air seluruhnya.
- Dekorasi interior kayu kokoh dan ringan.
- Kayu dipadukan dengan baja atau material lain (misal CFRP) sehingga kayu dapat meningkatkan keawetannya.

3. Kerugian menggunakan kayu sebagai bahan bangunan struktural antara lain:

- a. Tidak Homogen karena cacat alami seperti Mata Kayu, kemiringan serat dll.
- b. Kurang tahan lama pada situasi tertentu.
- c. Dapat mengembang dan menyusut seiring dengan perubahan kelembapan udara disekitarnya.
- d. Di bawah pembebanan jangka panjang, deformasi yang signifikan terjadi meskipun tetap elastis.
- e. Kayu mudah terbakar.

Oleh karena itu, sebelum digunakan, kayu perlu diawetkan agar dapat digunakan dalam jangka waktu lama atau sesuai harapan.

2.2.2. Sifat mekanik kayu

a. Kekuatan Tekan Sejar Serat (*Endwise Compression*):

Kekuatan tekan sejajar serat kayu, seperti yang dijelaskan dalam SNI 03-3958:1995 (a), mengukur kemampuan kayu untuk menahan tekanan sepanjang serat kayu. Dalam standar ini, kuat tekan sejajar serat ($f_{c//}$) dihitung dengan rumus berikut:

$$f_{c//} = P / (b * h)$$

Di mana:

- ' $f_{c//}$ ' adalah kuat tekan sejajar serat kayu dalam Megapascal (MPa).
- ' P ' adalah beban uji tekan maksimum yang diterapkan pada benda uji kayu dalam kilonewton (kN).
- ' b ' adalah lebar benda uji kayu dalam milimeter (mm).
- ' h ' adalah tinggi benda uji kayu dalam milimeter (mm).

ii. Kekuatan Tekan Tegak Lurus Serat (*Sidewise Compression*):

Kekuatan tekan tegak lurus serat, seperti yang dijelaskan dalam SNI 03-3958:1995 (a), mengukur kemampuan kayu untuk menahan tekanan tegak lurus terhadap serat kayu. Dalam standar ini, kuat tekan tegak lurus serat ($f_{c\perp}$) dihitung dengan rumus berikut:

$$f_{c\perp} = P / (b * h)$$

Di mana:

- ' $f_{c\perp}$ ' adalah kuat tekan tegak lurus serat kayu dalam Megapascal (MPa).

- 'P' adalah beban uji tekan maksimum yang diterapkan pada benda uji kayu dalam kilonewton (kN).
- 'b' adalah lebar benda uji kayu dalam milimeter (mm).
- 'h' adalah tinggi benda uji kayu dalam milimeter (mm).

b) Kekuatan Lentur Kayu:

Kuat lentur kayu, seperti yang dijelaskan dalam SNI 03-3959:1995 (b), mengukur kemampuan kayu untuk menahan lentur atau beban yang diterapkan secara lateral. Dalam standar ini, kuat lentur kayu (f_b) dihitung dengan rumus berikut:

$$f_b = (3 * P * L) / (2 * b * h^2)$$

Di mana:

f_b adalah kuat lentur kayu dalam Megapascal (MPa).

P adalah beban uji lentur maksimum yang diterapkan pada benda uji kayu dalam kilonewton (kN).

L adalah jarak tumpuan (titik di mana beban diterapkan pada benda uji) dalam milimeter (mm).

b adalah lebar benda uji kayu dalam milimeter (mm).

h adalah tinggi benda uji kayu dalam milimeter (mm).

Standar ini memberikan pedoman untuk mengukur dan menghitung sifat-sifat mekanis ini untuk mengukur kualitas dan kekuatan kayu yang digunakan dalam aplikasi struktural. Kekuatan tekan sejajar serat, kekuatan tekan tegak lurus serat, dan kekuatan lentur adalah parameter kunci dalam desain dan konstruksi dengan kayu sesuai dengan standar tersebut.

2.2.3 Fiber Reinforced Polymer (FRP)

FRP sendiri memiliki sejumlah keunggulan, antara lain bobotnya yang lebih ringan sehingga tidak menimbulkan peningkatan beban mati yang signifikan. Selain itu, FRP memiliki elastisitas yang memungkinkannya berbentuk apa pun.



Gambar 2.3 Jenis FRP yang umum digunakan

Saat ini penggunaan FRP untuk perkuatan struktur semakin banyak digunakan. Sistem penguat ini ditempatkan pada permukaan luar komponen struktur dan kemudian diikat dengan epoksi. Penguatan dengan menggunakan sistem ini diharapkan dapat meningkatkan kapasitas lentur dan geser member struktur. Sistem perkuatan ada berbagai jenis, seperti perkuatan struktur dengan pelat baja, namun karena banyak kelemahan dan risikonya, peneliti merekomendasikan perkuatan dengan FRP. Berdasarkan penelitian yang telah diuji, kinerja struktur yang diperkuat FRP sesuai dengan yang diharapkan, dengan kapasitas lentur dan geser anggota struktur meningkat seiring dengan penambahan FRP.

FRP dapat digunakan untuk meningkatkan kapasitas lentur dan geser balok, kolom, dan pelat lantai. FRP dalam bentuk lembaran atau strip dapat digunakan untuk balok atau panel yang mengalami tegangan lentur. FRP dapat ditempatkan pada sisi balok untuk perkuatan geser. Penggunaan FRP pada kolom khususnya pada bagian luar, selain dapat meningkatkan kekuatan juga dapat meningkatkan daktilitas kolom.

Secara umum penggunaan FRP lebih populer karena memiliki banyak keunggulan seperti bobot unit yang rendah, kemudahan konstruksi, dan biaya perawatan yang relatif rendah. Kerugian menggunakan FRP sebagai penguat antara lain harganya yang relatif mahal. Namun, apapun kondisinya, penggunaan FRP adalah pilihan perkuatan struktur yang paling ekonomis karena dapat mengurangi biaya tenaga kerja.

Pada penelitian ini, FRP dimodelkan dengan menggunakan bahan dasar serat Carbon (CFRP) yang diolah sebagai perkuatan lentur kayu.

2.2.4. Perekat

Proses rekatkan biasanya digunakan untuk menguatkan kayu FRP. Panel merekat dengan metode laminasi basah, di mana kain terlebih dahulu diresapi dengan perekat sebelum diaplikasikan pada kayu.

Banyak kali digunakan untuk perbaikan di lokasi, ikatan epoksi telah digunakan. Sebagian besar formulasi dibuat untuk bahan lain. Perekat ini seringkali terlalu keras untuk merekatkan kayu, menyebabkan mereka tidak memiliki ikatan kimia atau penahan mekanis yang tepat. Bahkan ketika digunakan di dalam, sesuai dengan persyaratan *Eurocode 5* Kelas Layanan 2, permukaan yang direkatkan rentan terhadap kerusakan karena perubahan dimensi kayu yang disebabkan oleh perubahan kelembapan. Formulasi epoksi baru-baru ini dikembangkan secara khusus untuk digunakan.

Formulasi epoksi baru-baru ini dikembangkan untuk digunakan pada kayu. Tidak mudah untuk mengevaluasi kualitas perekat, dan penerapan perekat secara topikal dapat menimbulkan kesulitan. Proses kendali mutu dan penerapan perekat yang tepat sangat penting karena sifat komponen yang diperkuat sangat bergantung pada kualitas konstruksi. Untuk merekatkan FRP pada kayu, bahan perekat harus dipilih dengan sangat hati-hati. Bahan perekat harus memiliki daya rekat yang baik pada FRP dan kayu serta memiliki kekuatan yang cukup. Resin epoksi, poliuretan, poliester, fenolik, dan amino adalah lima jenis perekat yang berbeda. Banyak perekat ini telah terbukti melakukan ikatan yang baik dalam kondisi yang terkendali, tetapi perekat epoksi dua komponen yang diawetkan secara dingin (cold-cured) adalah yang paling umum.

Perekat epoksi dua komponen yang diawetkan secara dingin, atau cold-cured, biasanya digunakan untuk memberikan hasil ikatan yang memuaskan ketika digunakan dalam lingkungan yang terkendali. Ini paling cocok untuk pengikatan di lokasi karena kemampuan pengisian celahnya yang baik, sifat tiksotropiknya, dan tingkat penyusutan yang rendah ketika curing rendah. Informasi tambahan tentang perekat tempat:

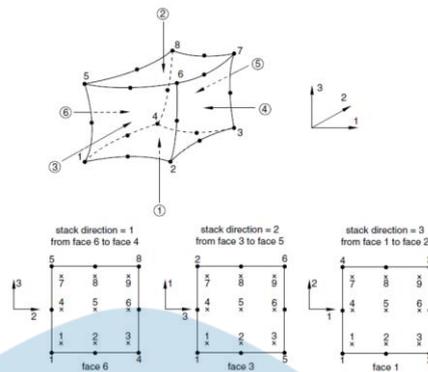
Karakter, tes, dan aplikasi dapat ditemukan. Produsen harus memastikan kompatibilitas perekat karena ada banyak formulasi epoksi. Kelembapan dan kualitas permukaan kayu di lokasi menjadi sulit dan tidak terkendali. tingkat tekanan ikatan yang diharapkan dapat dicapai. Garis dasinya tebal dan berurutan dari 1 hingga 3 mm umum. Untuk mencapai kekuatan dan daya tahan ikatan yang baik, persiapan permukaan yang cermat sangat penting. Permukaan yang

dimaksudkan untuk mencapai kekuatan dan daya tahan ikatan yang baik, persiapan permukaan yang cermat sangat penting. Permukaan yang akan direkatkan harus kering, bebas dari kontaminan seperti perekat dan debu, dan memiliki kekasaran yang cukup. Proses ini dilakukan pada FRP dengan abrasi yang diikuti dengan pembersihan pelarut atau penghilangan kulit yang ada. Persiapan permukaan harus dilakukan segera sebelum pengaplikasian, sedangkan pengaplikasian perekat harus dilakukan sesuai dengan instruksi yang diberikan oleh pabrik. Sangat penting untuk menggunakan operator berpengalaman. Setiap langkah proses harus melibatkan pengendalian kualitas.

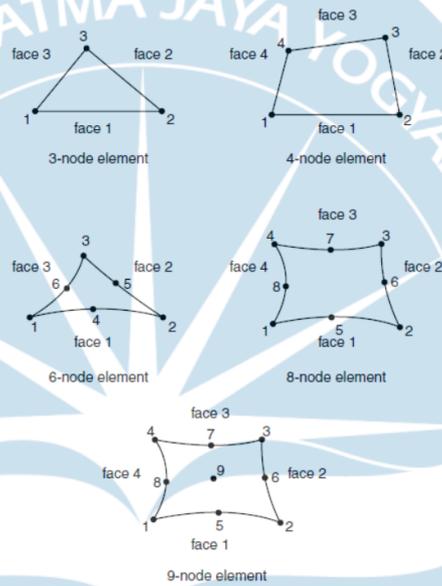
2.2.5. Idealisasi element pada Abaqus

Balok kayu dimodelkan dengan elemen solid 3D berupa elemen C3D8R (continuum 3D, 8– node linear brick, reduced integration) dan dapat dilihat pada Gambar 2.4. Menurut *Abaqus Theory Guide* bahwa solid element adalah elemen volume standar ABAQUS. Elemen tersebut tidak termasuk elemen struktural seperti balok, cangkang, membran, dan rangka; elemen tujuan khusus seperti elemen celah; atau elemen konektor seperti konektor, pegas, dan dasbor. Solid element dapat terdiri dari satu bahan homogen atau, dalam ABAQUS / Standar, dapat mencakup beberapa lapisan bahan yang berbeda untuk analisis padatan komposit laminasi. Elemen ini lebih akurat jika tidak terdistorsi, terutama untuk segiempat dan heksahedra. Elemen segitiga dan tetrahedral kurang sensitif terhadap distorsi.

CFRP dimodelkan dengan three– dimensional conventional shell element berupa elemen S4R (*shell, 4– node, reduced integration with hourglass control, finite membrane strains*) dan dapat dilihat pada Gambar 2.5. Menurut *Abaqus Theory Guide* bahwa elemen conventional shell di ABAQUS adalah elemen shell melengkung: elemen cangkang lengkung memerlukan perhatian khusus untuk perhitungan akurat dari kelengkungan awal permukaan. Shell normals dapat didefinisikan dengan memberikan arah cosinus normal ke permukaan pada semua node yang melekat pada elemen shell. Perilaku bagian shell adalah mungkin atau mungkin tidak memerlukan integrasi numerik pada bagian tersebut, bisa linier atau nonlinier, dan bisa homogen atau terdiri dari lapisan bahan yang berbeda.



Gambar 2.4. Arah dan permukaan elemen terkait serta posisi variabel keluaran titik integrasi elemen di bidang lapisan (*Abaqus Theory Guide*)



Gambar 2.5. Model stress/displacement analysis, shell element (*Abaqus Theory Guide*)