

## Design Arrangement of Ply Angle Combination in Carbon Fiber of Composite Material for Bicycle Fork

Alief Wikarta<sup>1,\*</sup> dan Filipi Cahya Adi Nugraha<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember - Surabaya

\*Korespondensi: wikarta@me.its.ac.id

**Abstract.** Nowadays, carbon fiber is one of the material for fabrication of a frame and fork bicycle. Carbon fiber composite material was chosen because it's a material with several properties: lightweight, stiffness, strength, and higher life cycle. Carbon fiber has composed from a few layer material with combination of ply angle in order to achieve higher strength. In this research work, simulation and analysis has been done for a fork road bike with several combination of ply angle using carbon fiber material T300. The commercial finite element software has been used, and the analysis was performed based on the comparison of deflection value and interlaminar of shear stress occurring based on to the test standard CEN 14781. The safety factor used in this research based on Tsai-Wu theory because this theory is in accordance with the mechanical properties of T300 material, which has different values between tensile and compress strength. The simulation result shows that there are 4 assemblies combination with better result compared to other combination, that is [0/90/-45/0]<sub>s</sub>, [0/90/45/0]<sub>s</sub>, [0/0/90/0]<sub>s</sub> and [0/-45/45/0]<sub>s</sub>. Further analysis of static bending load and static torque shows that the combination [0/90/-45/0]<sub>s</sub> has the lowest deflection value and interlaminar shear stresses compare with others. This is due to the combined compress stress and shear stress was happen on the center of the layers, therefore ply angle with 90 and -45 degree at second and third layer generate the stress occurring was spread to all parts of the structure.

**Abstrak.** Dewasa ini, carbon fiber merupakan salah satu material komposit yang digunakan dalam pembuatan frame maupun fork sepeda. Material komposit carbon fiber dipilih karena termasuk material bukan logam dengan sifat yang ringan, kaku, kuat, dan memiliki umur pakai yang panjang. Carbon fiber disusun beberapa lapisan dengan kombinasi sudut ply tertentu untuk mendapatkan kekuatan yang sesuai dengan desain sepeda yang dibuat. Dalam artikel ini, dilakukan simulasi dan analisa terhadap susunan kombinasi sudut ply dari material carbon fiber T300 sebagai bahan penyusun fork sepeda. Simulasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak komersial berbasis metode elemen hingga. Sementara analisa dilakukan berdasarkan perbandingan nilai defleksi dan interlaminar shear stress yang terjadi oleh pembebanan yang mengacu pada standar pengujian CEN 14781. Faktor keamanan yang digunakan dalam menganalisa kegagalan struktur berdasarkan teori Tsai-Wu karena teori ini sesuai dengan sifat mekanis pada material T300, yaitu memiliki nilai yang berbeda antara kekuatan tarik dan tekannya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ada 4 susunan kombinasi sudut ply dengan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan susunan lainnya, yakni [0/90/-45/0]<sub>s</sub>, [0/90/45/0]<sub>s</sub>, [0/0/90/0]<sub>s</sub> dan [0/-45/45/0]<sub>s</sub>. Analisa lebih lanjut terhadap pembebanan static bending dan static torque didapatkan bahwa susunan kombinasi [0/90/-45/0]<sub>s</sub> memiliki nilai hasil defleksi dan interlaminar shear stress yang paling rendah dibandingkan susunan lainnya. Hal ini disebabkan pada tegangan gabungan tarik dan geser atau tekan dan geser terjadi pada bagian tengah lapisan-lapisan, sehingga pemilihan sudut 90 dan sudut -45 pada ply kedua dan ketiga menyebabkan tegangan yang terjadi pada struktur menyebar merata pada ke seluruh bagian dari struktur.

**Kata kunci:** kombinasi sudut ply, carbon fiber, fork sepeda, teori Tsai-Wu

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

### Pendahuluan

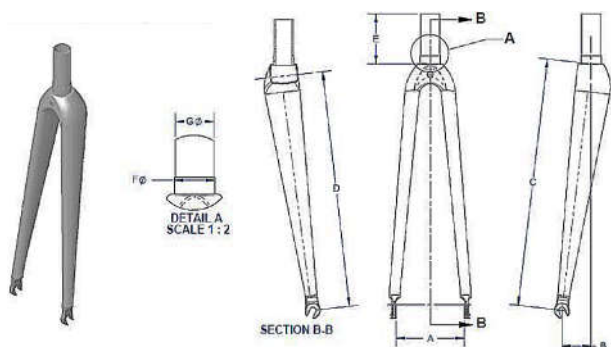
Penggunaan sepeda di Indonesia belakangan ini menunjukkan pertumbuhan yang pesat. Mulai dari kalangan atas hingga kalangan bawah mulai memilih sepeda sebagai alat transportasi untuk bekerja, bersekolah ataupun hanya sekedar jalan-jalan. Sejak dibuat pertama kali pada abad ke 18 hingga saat ini sepeda terus berkembang, baik dari segi rancangan maupun material. Saat ini, beberapa material telah

menjadi pilihan utama bagi pembuatan fork sepeda. Material yang sering digunakan dalam pembuatan fork adalah baja, aluminium, titanium dan carbon fiber. Di dalam dunia sepeda, carbon fiber merupakan material baru dalam pembuatan frame maupun fork sepeda. Carbon fiber merupakan material bukan logam dengan sifat yang ringan, kaku, kuat, dan memiliki umur pakai yang panjang.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa metode elemen hingga dapat digunakan untuk menganalisa struktur material komposit carbon fiber dari frame sepeda [1]. Beberapa kombinasi sudut tiap ply dianalisa hingga ditemukan kombinasi yang terbaik. Penggunaan metode elemen hingga juga telah dilakukan untuk menganalisa interlaminar shear stress yang terjadi pada struktur dengan material komposit [2]. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini adalah melakukan simulasi dan analisa terhadap kombinasi sudut tiap ply dari material carbon fiber sebagai bahan penyusun fork sepeda. Pengaruh tersebut dianalisa berdasarkan defleksi dan interlaminar shear stress yang terjadi oleh pembebanan yang mengacu pada standar pengujian CEN 14781 [3]. Variasi dari kombinasi sudut ply adalah sebanyak 16 variasi dan simulasi dilakukan dengan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga [4].

### Metodologi

Dimensi dan geometri fork road bike ditunjukkan pada gambar 1 dan tabel 1. Lapisan komposit pada keseluruhan fork sepeda ditentukan sejumlah 8 ply yang disusun secara simetris, dengan kombinasi sudut ply yang berbeda hingga didapatkan sejumlah 16 variasi. Tabel 2 menunjukkan sejumlah 16 variasi kemiringan sudut yang dimaksud. Kombinasi sudut ply yang diterapkan disini mengacu pada teori yang menjelaskan bahwa ketika material komposit dikenai beban maka bagian luar struktur akan mengalami tegangan tarik atau tegangan tekan, dan bagian dalam struktur akan mengalami tegangan geser [5]. Data material yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah data material carbon fiber T300 [6], ditunjukkan pada tabel 3. Material T300 merupakan material carbon fiber kelas standard modulus. Data tersebut merupakan sifat mekanis pada tiap arah dari material tersebut dan dibutuhkan untuk melakukan analisa.



Gambar 1. Spesifikasi fork road bike

Perangkat lunak berbasis metode elemen hingga digunakan untuk permodelan fork sebagai bentuk solid. Selanjutnya, bentuk surface dari fork solid

tersebut diambil dari tiap face luar geometri. Surface fork tersebut didefinisikan sebagai komposit dengan menerapkan shell definition seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Hal selanjutnya yang dilakukan adalah menerapkan boundary condition pada struktur fork seperti ditunjukkan pada gambar 3. Fixed constraint diterapkan pada bagian *steerer tube*, dan pemberian beban atau loading diterapkan pada bagian drop out.

Tabel 1. Dimensi umum *fork road bike*

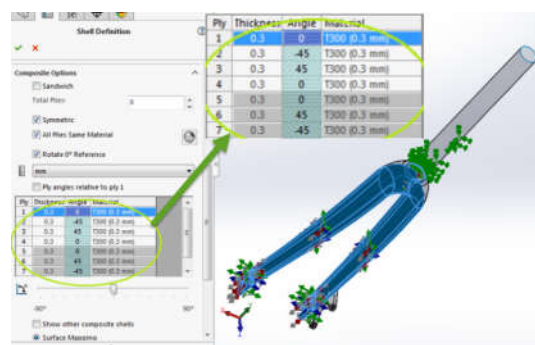
Huruf	Keterangan	Ukuran (mm)
A	Drop Out Spacing	100.5 ± 0.5
B	Rake Distance	44 ± 1.0
C	Axle To Crown	374 ± 1.0
D	Brake Hole Distance	356 ± 1
E	Steer Tube Length	300 ± 3
F	Crown Race Diameter	30.05 ± 0.13
G	Steer Tube Diameter	28.6 ± 0.05

Tabel 2. Variasi kemiringan sudut tiap ply

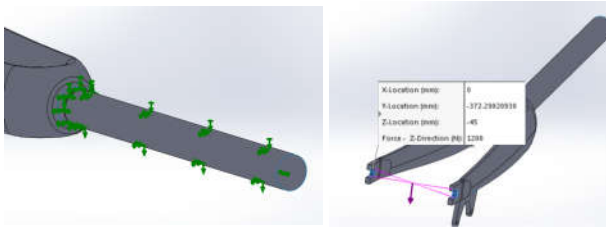
Varian	Kombinasi	Varian	Kombinasi
1	[0/0/0/0]s	9	[0/45/0/0]s
2	[0/0/-45/0]s	10	[0/45/-45/0]s
3	[0/0/45/0]s	11	[0/45/45/0]s
4	[0/0/90/0]s	12	[0/45/90/0]s
5	[0/-45/0/0]s	13	[0/90/0/0]s
6	[0/-45/-45/0]s	14	[0/90/-45/0]s
7	[0/-45/45/0]s	15	[0/90/45/0]s
8	[0/-45/90/0]s	16	[0/90/90/0]s

Tabel 3. Sifat-sifat material T300

Parameter	Value	Parameter	Value
Young Modulus E <sub>11</sub> (GPa)	162	Tensile Strength S <sub>1t</sub> (MPa)	1760
Young Modulus E <sub>22</sub> =E <sub>33</sub> (GPa)	14.9	Tensile Strength S <sub>1c</sub> (MPa)	1570
Poisson Ratio ν <sub>12</sub> =ν <sub>13</sub>	0.283	Strength S <sub>2t</sub> =S <sub>2c</sub> =S <sub>3t</sub> =S <sub>3c</sub> (MPa)	80
Poisson Ratio ν <sub>23</sub>	0.386	Strength S <sub>12</sub> =S <sub>23</sub> =S <sub>13</sub> (MPa)	98
Shear Modulus G <sub>12</sub> =G <sub>13</sub> (GPa)	5.7	Ply Thickness (mm)	0.3
Shear Modulus G <sub>23</sub> (GPa)	5.4		



Gambar 2. Jendela pengaturan *shell definition*.



**Gambar 3.** Penerapan *boundary condition* pada model

Kegagalan yang terjadi pada struktur *fork* dianalisa berdasarkan hasil defleksi dan *inter-laminar shear stress* dari simulasi. *Interlaminar shear stress (ILSS)* adalah tegangan geser yang terjadi antar tiap *ply*. Nilai *interlaminar shear stress* yang terjadi dibandingkan dengan *interlaminar shear strength* dari material T300. Jika nilai ILSS yang terjadi melebihi dari kekuatan material, maka struktur dinyatakan tidak aman. Faktor keamanan yang digunakan dalam menganalisa kegagalan struktur pada artikel ini adalah faktor keamanan berdasarkan teori *Tsai-Wu* [7]. Teori *Tsai-Wu* dipilih dikarenakan teori ini sesuai dengan sifat mekanis pada material T300, yaitu memiliki nilai yang berbeda

antara kekuatan tarik dan tekannya.

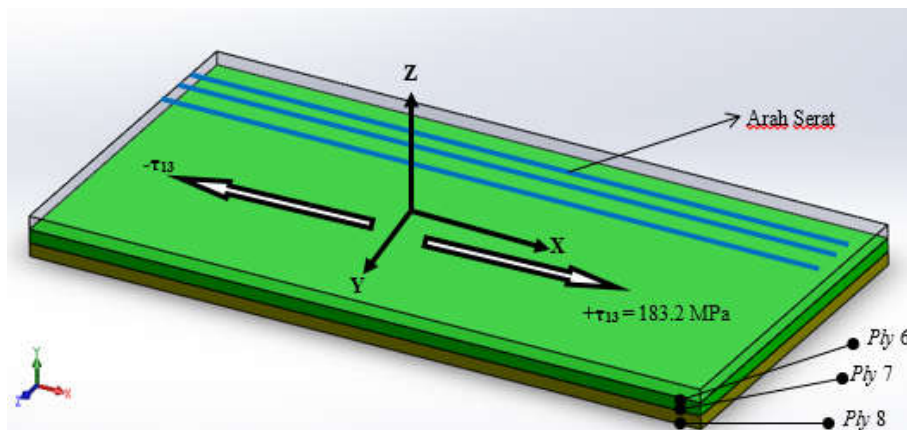
### Hasil dan Diskusi

Perlakuan yang diberikan pada simulasi pengujian *static bending* adalah dengan memberikan gaya tegak lurus ke bawah terhadap sumbu *fork* di *drop-out fork* dengan gaya sebesar 1200 N, sedangkan perlakuan yang diberikan pada simulasi pengujian *static torque* adalah dengan memberikan gaya pada ujung *adaptor* secara horizontal ke arah *fixture* sebesar 1000 N. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan berbagai sudut kemiringan tiap *ply*. Hasil dari simulasi tiap varian kombinasi sudut *ply* pada *fork road bike* ditunjukkan pada tabel 4.

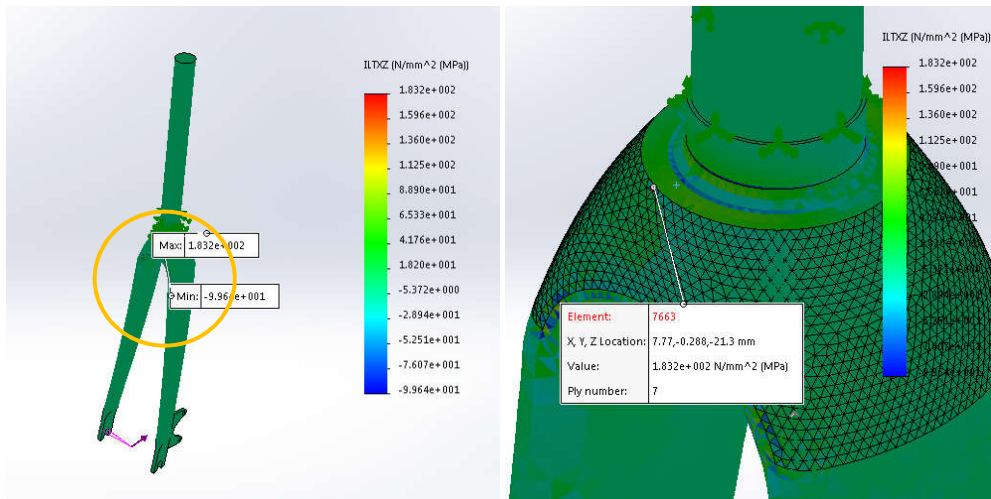
Berdasarkan pengujian *static bending*, maka diperoleh 2 varian yang memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan varian yang lainnya, yaitu varian 14 ([0/90/-45/0]s) dan varian 15 ([0/90/45/0]s). Hal ini ditunjukkan dengan hasil defleksi dan *interlaminar shear stress* kedua varian yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan varian lain.

**Tabel 4.** Hasil Simulasi Fork Road Bike

Varian	Defleksi (mm)		ILSS XZ (MPa)		ILSS YZ (MPa)	
	Static Bending	Static Torque	Static Bending	Static Torque	Static Bending	Static Torque
1	9.609	8.082	341.1	266.5	62.67	76.16
2	8.208	7.406	254	253.9	163.6	190.4
3	8.188	7.368	264.3	248	166	178
4	9.443	8.221	250.1	234.1	237.2	234.1
5	8.057	7.3	222.1	275	103.1	152
6	8.813	8.39	184.8	281.4	138.8	188.7
7	7.744	7.534	156.3	234	156.3	232.4
8	8.489	8.069	238.9	248.9	157	241.7
9	8.041	7.263	238.4	252.6	105.6	145.3
10	7.747	7.529	150.6	248	150.6	248
11	8.789	8.329	207.3	227.6	118.1	161.9
12	8.487	8.08	162.8	242.1	160.9	234.6
13	9.139	8.004	202.6	299.7	143.6	299.7
14	8.32	7.95	183.2	294.8	118.5	268.1
15	8.309	7.961	149.6	263.6	122.6	266.2
16	10.237	9.337	157.6	358.4	156.6	358.4



**Gambar 4.** Ilustrasi *Interlaminar Shear Stress XZ* Varian 14



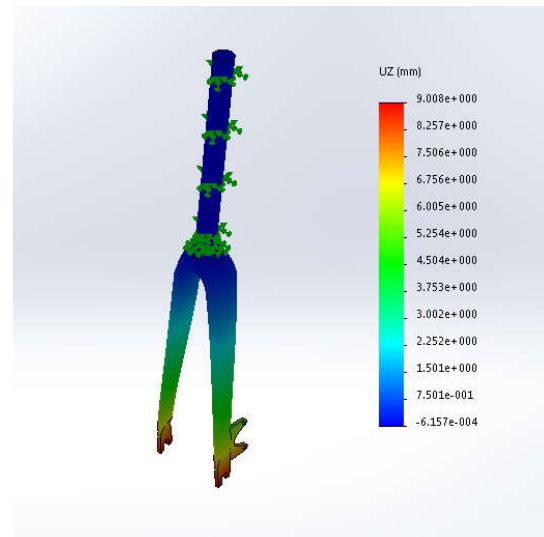
Gambar 5. Interlaminar Shear Stress XZ Varian 14

Ilustrasi lokasi interlaminar shear stress pada sumbu XZ ditunjukkan pada gambar 4. Pada gambar 5 terlihat bahwa *interlaminar shear stress* maksimum pada sumbu XZ sebesar 183.2 MPa yang terletak pada bagian ujung atas *fork blade*. Sedangkan defleksi yang terjadi sebesar 8.32 mm, dan interlaminar shear stress pada sumbu YZ sebesar 118.5 MPa yang terletak pada sambungan antara *crown race* dengan *fork blade*. Sementara pada varian 15 diperoleh defleksi yang terjadi sebesar 8,309 mm, *interlaminar shear stress* maksimum pada sumbu XZ sebesar 149,6 MPa dan pada sumbu YZ sebesar 122,6 MPa.

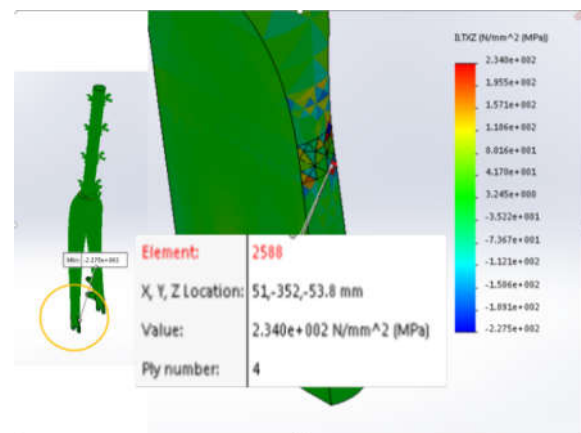
Berdasarkan pengujian *static torque*, diperoleh 2 varian yang memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan varian yang lainnya, yaitu varian 4 ([0/0/90/0]s) dan varian 7 ([0/-45/45/0]s). Pada varian 4 diperoleh defleksi yang terjadi sebesar 8.221 mm seperti ditunjukkan pada gambar 6, dan *interlaminar shear stress* maksimum pada sumbu XZ sebesar 234.1 MPa yang terletak pada bagian atas *drop out* serta pada sumbu YZ sebesar 234.1 MPa pada bagian atas *drop out*. Sementara pada varian 7, seperti terlihat pada gambar 7 diperoleh *interlaminar shear stress* maksimum pada sumbu XZ sebesar 234 MPa dan pada sumbu YZ sebesar 232,4 MPa, serta defleksi yang terjadi sebesar 7,534 mm.

Pada penelitian sebelumnya diketahui bahwa pengujian *static bending* pada CEN 14781 serupa dengan pengujian *frontal* pada penelitian tersebut [1]. Pada pengujian *static bending*, struktur *fork* terkena beban *bending* yang mengakibatkan struktur tertekuk ke bawah. Pada bagian atas lapisan-lapisan terkena tegangan tarik paling besar, sedangkan pada bagian bawah lapisan-lapisan terkena tegangan tekan paling besar, dan pada bagian tengah lapisan-lapisan terkena tegangan geser paling besar. Di antara bagian atas dan tengah

maupun bagian bawah dan tengah terkena tegangan gabungan tarik dan geser atau tekan dan geser.



Gambar 6. Defleksi pada Varian 4



Gambar 7. ILSS XZ pada Varian 7

Hasil simulasi pengujian *bending* menunjukkan bahwa sudut 90, sudut 45 dan sudut -45 pada *ply* kedua, ketiga dan keempat memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan dengan sudut-sudut lain-

nya, dan hal ini ditunjukkan dengan nilai hasil defleksi dan *interlaminar shear stress* yang lebih rendah, dan angka keamanan yang lebih besar jika dibandingkan dengan nilai yang lainnya. Hal ini sesuai dengan penjelasan bahwa tegangan gabungan tarik dan geser atau tekan dan geser terjadi pada bagian tengah lapisan-lapisan, sehingga pemilihan sudut 90, sudut 45 dan sudut -45 pada *ply* kedua, ketiga dan keempat menyebabkan tegangan yang terjadi pada struktur menyebar merata pada keseluruhan bagian dari struktur.

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, maka terdapat tiga kesimpulan di antaranya:

1. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ada 4 susunan kombinasi sudut dengan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan susunan lainnya, yakni [0/90/-45/0]s, [0/90/45/0]s, [0/0/90/0]s dan [0/-45/45/0]s.
2. Analisa lebih lanjut terhadap pembebanan static bending dan static torque didapatkan bahwa susunan kombinasi [0/90/-45/0]s memiliki nilai hasil defleksi dan interlaminar shear stress yang paling rendah dibandingkan susunan lainnya.
3. Hal ini disebabkan pada tegangan gabungan tarik dan geser atau tekan dan geser terjadi pada bagian tengah lapisan-lapisan, sehingga pemilihan sudut 90 dan sudut -45 pada *ply* kedua dan ketiga menyebabkan tegangan yang terjadi pada struktur menyebar merata pada keseluruhan bagian dari struktur.

### Referensi

- [1] Liu C, Jin T, and Wu HC, 2009. Fiber Direction and Stacking Sequence Design for Bicycle Frame Made of Carbon/Epoxy Composite Laminate, *Materials & Design* 31, 4:1971-1980.
- [2] Most J., Stegmair D. and Petry D., 2015. Error Estimation between Simple, Closed-Form Analytical Formulae and Full-Scale FEM for Interlaminar Stress Prediction in Curved Laminates, *Composite Structure* 131, 72-81.
- [3] CEN European Committee for Standardization. 2005. Racing Bicycles – Safety Requirements and Test Methods EN 14781:2005. CEN European Committee for Standardization.
- [4] SolidWorks Corporation, SolidWorks 2016. USA.
- [5] Gurit. Guide to Composite, Available: <http://www.gurit.com/files/documents/guide-to-compositesv5webpdf.pdf>.
- [6] Toray Industries Inc. Torayca T300 Technical data sheets N, Available: <http://www.toraycfa.com/pdfs/T300DataSheet.pdf>.
- [7] NPTEL. Composite Material Failure Theories and Problems, Available: [http://nptel.ac.in/courses/10110\\_6038/mod04lec04.pdf](http://nptel.ac.in/courses/10110_6038/mod04lec04.pdf).