

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Sub bab tinjauan pustaka ini akan menjelaskan perbedaan antara penelitian yang telah dilakukan peneliti terdahulu dengan penelitian yang akan dilakukan sekarang.

2.1.1. Penelitian Terdahulu

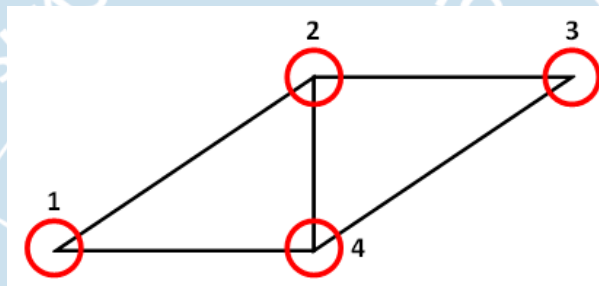
Berdasarkan penelitian Pardeshi dkk (2007), kerangka sepeda memiliki bagian menonjol yang selalu mengalami beban statis dan dinamis. Penerapan desain *monocoque* (desain yang mendistribusikan beban pada kulit luar objek, sehingga setiap bagian memiliki ketahanan beban yang sama) pada proses simulasi FEA dapat memberikan solusi untuk optimasi bobot dan struktur kerangka sepeda berdasarkan material dan utilitasnya. Seleksi material yang digunakan adalah Al-6061, Al-7005, dan *Bamboo Fibre*. Penelitian ini terdapat beberapa tahapan dalam pengujian FEA dengan pemilihan material kerangka sepeda berdasarkan karakteristik material, yaitu:

- a. Kekakuan (*stiffness*): *stiffness* bertujuan untuk mengetahui ukuran tegangan yang dibutuhkan material hingga dapat mengubah bentuk material. *Stiffness* material dipengaruhi oleh modulus elastisitasnya (beban dan lendutan).
- b. Kekuatan luluh (*yield strength*): *yield strength* bertujuan agar mengetahui titik perubahan deformasi elastisitas ke deformasi plastis. *Yield strength* material dipengaruhi oleh kemampuan kuat luluh material dengan pengujian tarik luluh.
- c. Massa jenis (*density*): *density* bertujuan agar material dan konsep desain yang digunakan dapat sesuai. Massa jenis material dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran benda yang digunakan.
- d. Keuletan (*elongation*): *elongation* untuk mengetahui seberapa jauh benda mampu mengalami deformasi tanpa patah. Keuletan dalam material dipengaruhi oleh tegangan tarik, tegangan tekan, dan plastisitas bahan yang digunakan.

Penelitian ini turut menerapkan pencarian desain kerangka sepeda optimum dengan memperhatikan kemampuan kerangka sepeda dalam menerima beban. Ilustrasi garis rangka sepeda yang diuji dapat dilihat pada Gambar 2.1. dan Gambar 2.2.



Gambar 2.1. Garis Kerangka Sepeda Gunung
(Sumber: Polygon, 2019)



Gambar 2.2. Empat Titik Uji Pembebanan pada Kerangka Sepeda Gunung
(Sumber: Pardeshi dkk, 2007)

Berdasarkan Gambar 2.2. terdapat lima pengujian beban yang harus mampu ditahan oleh empat titik uji FEA yaitu:

- Horizontal Impact*: Kemampuan kerangka sepeda seperti menghantam dinding dengan kecepatan rendah.
- Veritcal Impact*: Kemampuan kerangka dalam menerima beban vertikal dari dua kali bobot pengendara yang disebabkan oleh faktor "G". Faktor G adalah simulasi penyederhanaan dari efek penggunaan sepeda pada jalan yang tidak rata, bergelombang, dan berlubang.
- Static Start Up*: Kemampuan kerangka menahan gaya dari pengguna dalam memulai akselerasi secara kuat dari posisi diam.
- Steady State Pedalling*: Kemampuan desain posisi pedal mampu menahan dinamika kaki pengguna.
- Rear Wheel Braking*: Posisi penyadaran pada kerangka ban harus mampu menopang pengendara ketika pengereman.

Konsep desain yang telah teruji, harus mampu memberikan kenyamanan kepada penggunanya berupa:

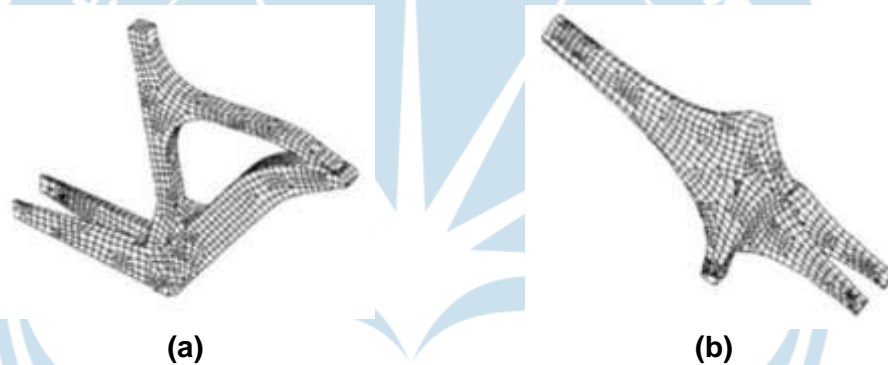
- a. *Bicycle Fit*: Kesesuaian kerangka sepeda gunung berguna sebagai acuan dalam mendesain ukuran kerangka sepeda agar dapat digunakan oleh mayoritas orang dewasa maupun anak-anak.
- b. *Tire Choice*: Kesesuaian kerangka sepeda terhadap letak pemasangan ban sepeda sebagai konsistensi dalam memilih ban dengan ukuran yang sesuai dengan besar sepeda namun dengan merk yang berbeda-beda.
- c. *Frame Geometry*: Kesesuaian bentuk dari kerangka sepeda gunung terhadap standar yang digunakan oleh sepeda sejenisnya.
- d. *Saddle Choice*: Kesesuaian kerangka sepeda terhadap letak pemasangan *saddle* / dudukan sepeda agar posisi dan jarak antara *saddle* dengan pengguna dapat sejajar serta tidak terlalu jauh.

Penelitian Covill dkk (2014) mengatakan bahwa dalam perancangan kerangka sepeda harus mampu meningkatkan kinerja dari kerangka tersebut. FEA sudah sering digunakan peneliti – peneliti terdahulu untuk menganalisis kerangka sepeda bermaterial campuran (*composite*), aluminium, dan besi, namun studi komprehensif pengaruh *stiffness* pada kerangka sepeda belum dilakukan. Penelitian ini kemudian berfokus pada minimalisasi massa/bobot dan maksimasi kekakuan (*stiffness*) kerangka sepeda untuk menghasilkan solusi berupa distribusi beban yang merata. Peneliti menggunakan data 82 geometri kerangka sepeda yang sudah ada untuk dilakukan pengujian solusi optimal berupa pengujian yang terletak pada titik yang serupa, yaitu *vertical seat tube load* dan *out of saddle handlebar (BB loads)*. Pengujian serupa dilakukan untuk memahami penyesuaian vertikal dan karakteristik kekakuan lateral. Optimasi diperoleh dalam bentuk persentase dengan kenaikan sebesar 13% pada *vertical displacement* (dari 0,342 menjadi 0,387) dan penurunan sebesar 15% pada *lateral displacement* (dari 1,708 menjadi 1,453).

Penelitian selanjutnya berasal dari Covill dkk (2016) berupa penggambaran desain kerangka sepeda menggunakan ukuran asumsi yang diterapkan pada *top tube*, *head tube*, *seat stays*, *chain stays*, *seat tube*, dan *down tube* dengan batasan berat badan pengguna adalah 75 kg. Pengujian FEA pada penelitian ini dilakukan dengan pemberian beban seperti *road bump at the front*, *road bump at the rear wheel*, *climbing whilst seated in the saddle*, dan *climbing whilst not seated in the*

saddle yang menghasilkan data numerik berupa *von mises stress* dan *relative stress level*.

Lessard dkk (1995) turut menerapkan metode *monocoque* sama seperti metode yang diterapkan oleh Pardeshi dkk (2007) dengan perbedaan mendasar terletak pada luaran penerapan material FEA peneliti ini menghasilkan dua material, yaitu *steel* dan aluminium. Penerapan simulasi FEA diperoleh untuk meminimasi biaya dan waktu yang dibutuhkan dalam melakukan uji eksperimen pada kerangka sepeda tanpa harus membuatnya. Implementasi material diterapkan pada *Modified Beam Frame (MBF)*, *Single Bridge Frame (SBF)*, *Steel Cylinder*, *Steel-Beam*, dan *Aluminium-Beam*. Perbedaan MBD dan SBF dapat dilihat pada Gambar 2.3. dengan perolehan pengujian FEA seluruh material seperti pada Tabel 2.1.



**Gambar 2.3. Frame: (a)Modified Beam, (b)Single Bridge
(Sumber: Lessard dkk, 1995)**

Tabel 2.1. Hasil Tiga Simulasi *Finite Element* pada Lima Kerangka Sepeda

Parameter	Perbandingan Bobot (Steel = 1,00)	Jumlah Element (Shell/Beam)	Test 1 (mm)	Test 2 (mm)	Test 3 (mm)
MBF (shell)	0,85	2213	2,70	4,00	0,36
SBF (shell)	0,68	1558	2,69	17,40	0,20
Steel-cylinder (shell)	1,00	1800	0,32	25,60	0,08
Steel-beam (beam)	0,96	10	0,27	22,90	0,05
Aluminium-beam (beam)	0,84	10	1,00	32,00	0,08

(Sumber : Lessard dkk, 1995)

Xiang dkk (2013) melakukan penelitian berupa eksperimen kelelahan pada postur tubuh dalam penggunaan sepeda pos dan sepeda domsetik Jepang. Sepeda pos diharapkan mampu bekerja secara konstan dan aman dengan berat beban dibawah kondisi jalan yang kompleks. Keamanan dan kenyamanan dalam berkendara menjadi acuan dalam penelitian karena penggunaan sepeda oleh

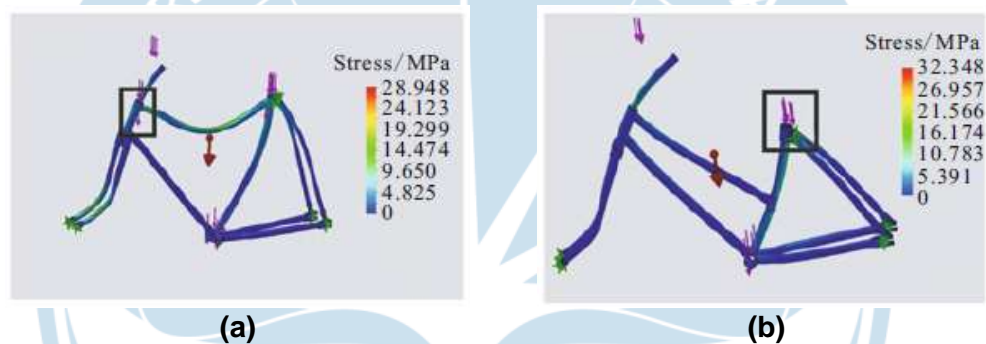
tukang pos yang cukup lama. Data pemberian beban pada kerangka sepeda dengan posisi penggunaan sepeda yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.2. Beban pada Kerangka Sepeda Domestik dan Jepang

Posisi Pengendara	Middle Shat Force (N)	Saddle Force (N)	Front Fork Force (N)
High Seat Sitting Posture	408,08	170,84	251,26
High Seat Lying Posture	301,14	237,95	487,62
Substantial Posture	263,78	444,32	655,54

(Sumber : Xiang dkk, 2013)

Masing – masing hasil simulasi FEA kerangka sepeda dipaparkan secara jelas beserta lokasi/titik maksimum tegangannya. Pemaparan kerangka sepeda hasil pengujian FEA terdapat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Pemaparan Hasil FEA: (a)Sepeda Domestik, (b)Sepeda Jepang
(Sumber : Xiang dkk, 2013)

Penelitian Gupta dan Rao (2016) menyatakan sepeda merupakan moda transportasi ramah lingkungan yang menjadi transportasi utama bagi keluarga berpenghasilan rendah hingga menengah. Mengingat biaya bahan bakar dan polusi yang terus meningkat, sepeda menjadi moda transportasi paling ideal. Material yang umum digunakan pada kerangka sepeda adalah aluminium, besi, titanium, dan karbon setelah perkembangan dari material lama, yaitu kayu. Peneliti ingin membantu menganalisis pertimbangan berat dan kekakuan pada kerangka sepeda dan berpendapat bahwa minimalisasi massa/bobot total dan defleksi kerangka sepeda sangat penting untuk kelanjutan dan pengembangan kinerja sepeda. Penelitian ini hanya menggunakan material aluminium dan diperoleh material aluminium memang memberikan nilai maksimum tegangan dibawah tegangan luluh dengan berat yang ringan, namun memiliki deformasi yang tinggi. Metode yang dilakukan peneliti merupakan simulasi FEA dengan titik yang sama

seperti penelitian Pardeshi dkk (2007), berupa *horizontal* dan *vertical impact*, *steady state pedalling*, *static start up*, dan *rear wheel braking* dengan parameter yang dianalisis, yaitu *maximum von mises stress*, *maximum deformation*, *factor of safety*, *natural frequency*, dan *frame weight*.

Penelitian Lin dkk (2017) menjelaskan bahwa dalam analisis struktural terdapat dua poin penting, yaitu intensitas dan evaluasi dari kehidupan struktur serta pengoptimalan struktur. Pengoptimalan desain kerangka sepeda dapat dicapai dengan cara mengurangi bobot kerangka sepeda serta menghasilkan *von mises stress* yang berada dibawah tegangan luluh, selain itu struktur yang mengalami peningkatan pada kekakuannya akan menghasilkan nilai deformasi yang lebih rendah.

Penelitian Collotta dkk (2018) membuktikan bahwa pencampuran aluminium dengan *biomid-reinforced composite* pada *top tube*, *down tube*, dan *chainstays* mampu memberikan efek penurunan *maximum level of stress* dan bobot kerangka sepeda sebesar 25% dengan koefisien kerangka yang sama dengan standar kerangka sepeda aluminium.

Penelitian Cicero dkk (2011) menyampaikan material yang umum digunakan pada kerangka sepeda, yaitu besi, aluminium, titanium, dan karbon. Fabrikasi material kerangka sepeda terutama pada material Al-6061 (Mg dan Si sebagai elemen paduan utama) dan Al-7005 (Zn sebagai elemen paduan utama) dilakukan proses pemanasan untuk memperoleh pengerasan presipitasi (biasa disebut T6), yang menghasilkan peningkatan *yield stress* dan *ultimate tensile strength*. Menurut peneliti, penyebab utama keretakan pada kerangka sepeda disebabkan beberapa faktor, yaitu ketahanan pada korosi yang rendah, tegangan sisa dari proses pengelasan, dan usia material kerangka sepeda yang sudah terlalu tua.

Penelitian Cahyono dkk (2017) menyatakan bahwa dalam pembuatan kerangka sepeda dapat menggunakan berbagai variasi bentuk material seperti tabung lingkaran, tabung oval, dan tabung kotak. Penggunaan material kerangka sepeda berbentuk tabung lingkaran dan oval tidak memberikan penambahan bobot kerangka sepeda secara signifikan, sedangkan pada tabung berbentuk kotak memberikan penambahan bobot secara signifikan sebesar tiga kali lipat dari bobot sebelumnya. Penggunaan tabung oval dipercaya mampu memiliki *factor of safety* yang lebih tinggi dibandingkan tabung lingkaran dan memberikan performansi yang lebih baik terhadap beban vertikal.

Penelitian Syehan dkk (2019) menggunakan empat parameter analisis, yaitu *von mises stress*, *displacement*, *strain*, dan *factor of safety* yang menghasilkan bahwa kerangka sepeda pada material aluminium dan besi memiliki perbedaan yang mendasar. *Displacement* dan *strain* material besi lebih rendah dibandingkan aluminium, dengan aspek *factor of safety* material besi (2,28) lebih unggul 10,68% dari aluminium (1,84) namun, bobot material aluminium (4,46 kg) lebih ringan 49.17% dibandingkan material besi (13,09 kg). Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa material besi lebih kuat dalam menahan beban meskipun hanya selisih sedikit dengan material aluminium, sedangkan perbandingan bobot besi memiliki perbedaan yang lebih signifikan dibandingkan aluminium.

Penelitian Mendke dan Sharma (2017) melakukan simulasi FEA pada kerangka sepeda yang juga pembebanan *static start up*, *steady state pedalling*, *horizontal impact*, *vertical impact*, dan juga *rear wheel braking*. Penelitian ini menggunakan material lima material umum kerangka sepeda, yaitu Al-6061 T6, Al-7005 T6, ST-4130, Ti3Al2,5V, dan Ti6Al4V. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini didapatkan urutan deformasi terbesar ke terkecil, yaitu Al-7005 T6, *Titanium-6Al-4V*, Al-6061 T6, ST-4130, dan *Titanium-3Al-2,5V* dengan nilai yang bervariasi pada tiap jenis pembebanannya.

Penelitian Rontescu dkk (2015) melakukan pengujian kerangka sepeda dengan material Al-6061, Ti6Al4V, dan *Carbon Fiber*, melalui ketiga material tersebut dilakukan pengujian untuk memperoleh data *stress* dan *displacement*. Hasil pengujian dengan tiga jenis beban yang berbeda diperoleh data material Al-6061 memiliki *von stress* terkecil dibandingkan material lainnya, namun memiliki *displacement* terbesar.

Patil dan Aitavade (2019) menjelaskan bahwa material kerangka sepeda terdahulu dibuat dengan kayu yang kemudian seiring berjalannya waktu mengalami perubahan. Penelitian ini turut menggunakan material yang umum digunakan untuk kerangka sepeda, yaitu aluminium (Al-6061 T6 dan Al-7005 T6), ST-4130, *titanium grade 9*, dan *carbon fiber*. Pengujian dilakukan dengan tiga jenis pembebanan, yaitu *horizontal loading test*, *vertical loading test*, dan *impact loading test* yang kemudian diperoleh nilai dan letak tegangan maksimum dan deformasi. Melalui data lokasi tersebut, pengoptimasian desain dilakukan pada lokasi kerangka sepeda yang memiliki *maximum stress*.

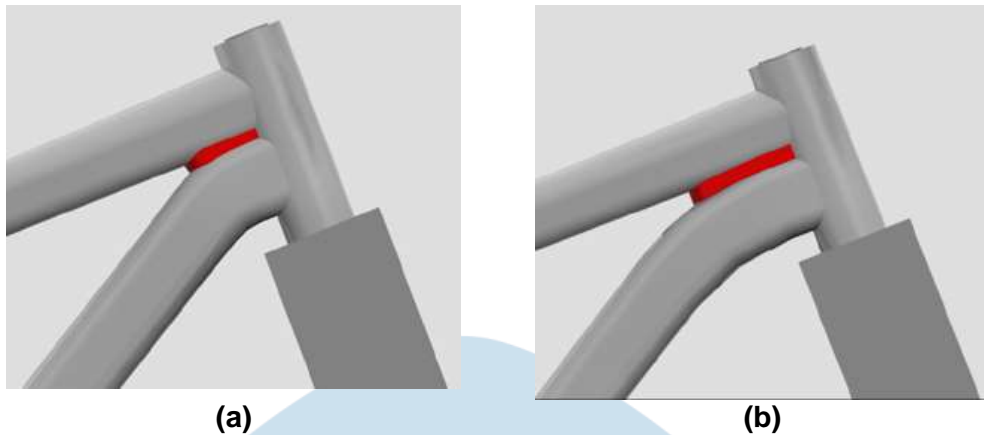
Dwyer dkk (2012) menyatakan bahwa *fatigue* merupakan mekanisme kegagalan yang menonjol dalam kerangka sepeda gunung, karena dapat menyebabkan kecelakaan serius yang berakibat pada penarikan kembali produk oleh produsen dan citra produk dapat menjadi buruk. Beberapa perusahaan seperti *Niner Bikes*, *Redline Bikes*, *Norco Bicycles*, *Novara*, dan *Cannondale* pernah mengalami penarikan produk yang disebabkan oleh kegagalan *fatigue*. Ketahanan suatu kerangka sepeda juga bergantung pada proses pengelasannya yang harus benar dan baik, maka peneliti ingin membantu dalam mengenali perilaku *fatigue* kerangka dan mengoptimalkan perlakuan panas bahan pada desain kerangka sepeda menggunakan acuan standar ASTM (*American Standard Testing and Material*). Pembuatan model FEA memungkinkan untuk mendapatkan prediksi letak atau lokasi kegagalan siklus. Material kerangka sepeda yang umum digunakan meliputi *Al-6061 T6*, *Al-7005 T6*, *ST-4130*, *titanium G9*, dan *carbon fiber*. Masing-masing material kerangka sepeda memiliki karakteristik masing-masing yang dijabarkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Karakteristik Material yang Umum pada Kerangka Sepeda

Parameter \ Material	Al-6061 T6	Al-7005 T6	ST-4130	Titanium Grade 9	Carbon Fiber
<i>Modulus of Elasticity (GPa)</i>	72	72	205	91 – 95	275 – 415
<i>Yield Strength (MPa)</i>	193 – 290	290	800 – 1.000	483 – 620	<i>Varies</i>
<i>Tensile Strength (MPa)</i>	241 – 320	350	650	621 – 750	<i>Varies</i>
<i>Fatigue Strength (MPa)</i>	75	~75	250	250	<i>Varies</i>
<i>Density (kg/m³)</i>	2.700	2.780	7800	4.480	1.800
<i>Weldability and Machinability</i>	<i>Excellent</i>	<i>Excellent</i>	<i>Excellent</i>	<i>Fair</i>	<i>Fair</i>
<i>Cost (USD per kg)</i>	\$2,42	\$2,87	\$0,95	\$57,40	<i>Varies</i>

(Sumber: Dwyer dkk, 2012)

Berdasarkan Tabel 2.3. material kerangka sepeda yang digunakan penelitian ini adalah aluminium, karena memiliki kekuatan terhadap rasio bobot yang menguntungkan dan memiliki biaya yang relatif lebih rendah dibandingkan material lainnya. Solusi ditemukan dengan menambahkan panjang pengelasan pada daerah pertemuan *top tube*, *down tube*, dan *head tube* yang menghasilkan peningkatan *fatigue life*, sehingga membuktikan bahwa penggunaan FEA dapat akurat dalam memprediksi lokasi kegagalan. Gambar penambahan las dapat dilihat pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5. Desain: (a)Pengelasan Awal, (b)Pengelasan Modifikasi
(Sumber: Dwyer dkk, 2012)**

Penelitian Akhyar dkk (2019) melakukan simulasi FEA pada kerangka sepeda dengan menerapkan lima jenis pembebanan, yaitu *static start up* dengan beban sebesar 700N (setara dengan 71.3 kg) pada *seat tube*, *steady state pedalling* sebesar 700N pada *seat tube* dan 200N pada pedal, *vertical loading/impact* dengan mengalikakan beban pengendara menjadi dua kali yang disebabkan oleh *G factor*, *horizontal loading/impact* dengan besar beban 980N, dan *rear wheel braking* yang terkonsentrasi pada *dropouts* kerangka sepeda sebesar 200N sebagai simulasi dari proses pengereman sepeda dengan masing – masing jenis pembebanan diikuti dengan gaya gravitasi sebesar 9.8 m/s^2 . Devaiah dkk (2018) turut melakukan pengujian beban kerangka sepeda dengan besar beban yang sama, yaitu *static start up* (700N pada *seat tube*), *steady state pedalling* (700N sama seperti pada *static start up* dengan tambahan 200N pada pedal), dan *vertical impact* yang mengimplementasikan faktor G dengan besar beban 1400N.

2.1.2. Penelitian Sekarang

Berdasarkan penelitian terdahulu, celah yang akan digunakan sebagai dasar acuan untuk dapat mengembangkan Tugas Akhir mengenai Aplikasi Metode Elemen Hingga pada Desain Kerangka Sepeda Gunung meliputi survei dilakukan di beberapa toko sepeda yang ada di kota Yogyakarta sebagai sumber data dalam pengambilan data kerangka sepeda terutama tren pasar, ukuran, dan diameter kerangka sepeda.

Pengujian kerangka sepeda gunung dilakukan dengan simulasi FEA yang terdapat pada *software* CAD yaitu *SolidWorks* 2018. Material yang akan digunakan dalam pengujian ini merupakan material yang umum digunakan pada kerangka sepeda,

yaitu AI-6061 dan ST-4130 (Dwyer dkk, 2012; Mendke dan Sharma, 2017; Patil dan Aitavade, 2019). Pembuatan model 3D kerangka sepeda menggunakan ukuran kerangka yang didasarkan pada data riil (pengukuran yang dilakukan secara langsung di toko sepeda), data dari penelitian Covill dkk (2014), dan ukuran geometri yang berasal dari situs web resmi *Polygon*. Simulasi FEA yang dilakukan menggunakan lima jenis beban (*static start up, steady state pedalling, horizontal impact, vertical impact, dan rear wheel braking*) seperti pada penelitian Akhyar dkk (2019), Devaiah dkk (2018), Gupta dan Rao (2016), Mendke dan Sharma (2017), serta Pardeshi dkk (2007) dengan besaran beban yang digunakan sebagai acuan dari penelitian terbaru, yaitu Akhyar dkk (2019).

Hasil simulasi FEA yang akan diperoleh terdapat empat parameter, yaitu *von mises stress, displacement, strain, dan factor of safety* seperti pada penelitian Gupta dan Rao (2016) serta Syehan dkk (2019), empat parameter FEA tersebut akan digunakan sebagai acuan dalam upaya pemberian usulan perbaikan kerangka sepeda gunung baru menjadi lebih baik lagi. Menurut Covill dkk (2014), Gupta dan Rao (2016), Lin dkk (2017), Patil dan Aitavade (2019), serta Syehan dkk (2019) perbaikan maupun pengoptimalan kerangka sepeda dapat dicapai dengan cara melakukan minimasi bobot, minimasi *von mises stress*, minimasi defleksi, maksimasi kekakuan, dan maksimasi FOS. Maka, kesimpulan dari penelitian yang akan dilakukan sekarang adalah melakukan pengujian elemen hingga pada kerangka sepeda gunung untuk memperoleh data ketahanan kerangka sepeda, serta upaya untuk menghasilkan usulan perbaikan dengan ketahanan kerangka sepeda yang lebih baik dibandingkan desain awal.

2.2. Dasar Teori

Penulisan Tugas Akhir yang dilakukan menggunakan berbagai acuan/pedoman perancangan yang terdapat dalam buku dan artikel ilmiah, sehingga diharapkan mampu melakukan simulasi FEA pada kerangka sepeda dengan benar dan tepat.

2.2.1. Stress (Tegangan)

Stress (tegangan) menurut Budynas dan Nisbett (2015) adalah kuantitas distribusi gaya yang terjadi pada sebuah titik bidang permukaan yang bersifat unik dan memiliki komponen searah maupun tangensial. *Stress* terbagi menjadi dua jenis, yaitu *normal stress* (gaya yang tegak lurus dengan bidang) dengan simbol sigma

(σ) dan *shear stress* (gaya yang paralel dengan bidang) dengan simbol tau (τ). Persamaan tegangan dapat dilihat pada Persamaan 2.1.

$$\sigma \text{ atau } \tau_{avg} = \frac{F}{A} \quad (2.1.)$$

Keterangan:

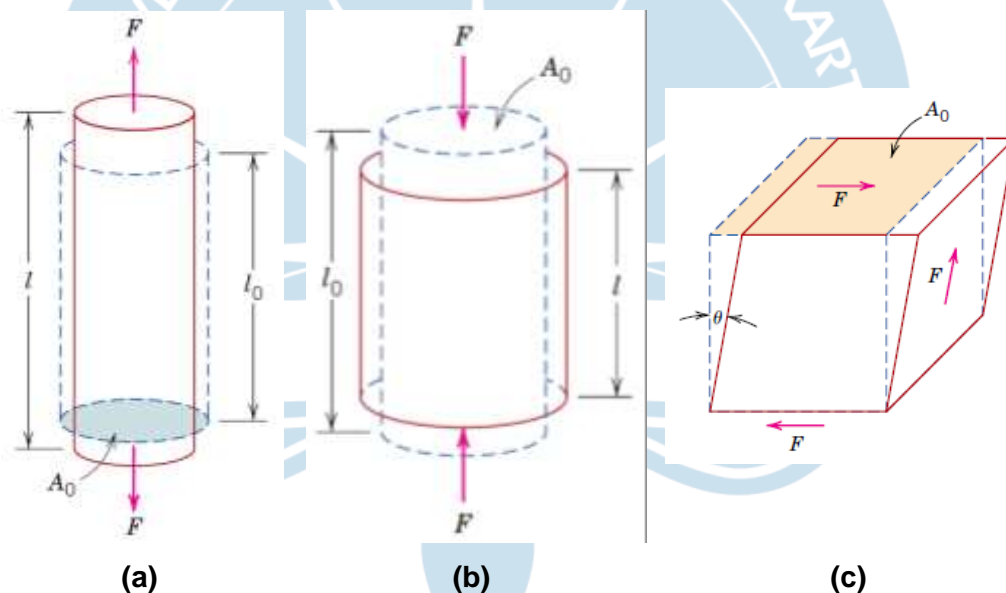
σ = *Normal stress* (Pascal/Pa).

τ_{avg} = *Average shear stress* (Pascal/Pa).

F = Gaya yang bekerja (Newton/N).

A = Luas penampang (meter persegi/m²).

Normal stress terbagi kembali menjadi dua jenis, yaitu positif (*tensile stress*) dan negatif (*compressive stress*). Ilustrasi *tensile stress*, *compressive stress*, dan *shear stress* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Ilustrasi: (a) Tensile Stress, (b) Compressive Stress, (c) Shear Stress

(Sumber: Callister Jr. dan Rethwisch, 2009)

2.2.2. Displacement and Deformation

Menurut Beer dkk (2001) *displacement* adalah pergerakan pada titik – titik individu bidang sistem struktural yang disebabkan oleh beban atau gaya eksternal yang *deformation* pada bidang tersebut. Deformasi adalah perubahan bentuk dan ukuran pada benda atau bidang yang disebabkan oleh gaya yang diberikan, deformasi yang terjadi tidak akan seragam dengan seluruh volumenya sehingga

menghasilkan perubahan pada tiap garis segmen geometri yang selalu bervariasi secara substansial sepanjang panjangnya (Hibbeler, 2014).

2.2.3. Strain (Regangan)

Strain (regangan) menurut Hibbeler (2014) turut terbagi dua, yaitu *normal strain* dan *shear strain*. *Normal strain* merupakan kuantitas pertambahan panjang pada suatu bidang yang disebabkan oleh deformasi yang dimana kita tidak perlu menentukan panjang sebenarnya.



**Gambar 2.7. Normal Strain: (a)Undeformed, (b)Deformed
(Sumber: Hibbeler, 2014)**

Strain biasa menggunakan simbol epsilon (ϵ) dan tidak memiliki besaran dimensi (*dimensionless quantity*), karena definisinya yang berupa rasio dari dua panjang. Apabila diterapkan dengan satuan SI maka satuan yang diperoleh adalah meter (m), sedangkan dalam pengaplikasian teknik dapat menghasilkan besaran yang sangat kecil yaitu mikrometer / meter ($\mu\text{m}/\text{m}$, dimana $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$). Persamaan regangan dapat dilihat Persamaan 2.2.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s} \quad (2.2.)$$

Keterangan:

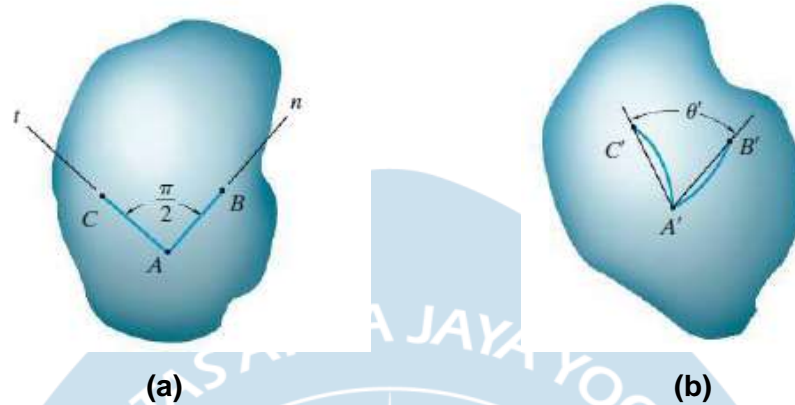
ϵ = *Strain*.

ΔL = Perubahan panjang (meter/m).

L = Panjang awal (meter/m).

Deformasi tidak hanya mempengaruhi panjang garis bidang saja, namun dapat merubah arah maupun sudut garis bidang. Apabila dalam dua segmen garis yang tegak lurus sama lain mengalami perubahan sudut, maka hal ini disebut regangan

geser (*shear strain*). Sudut yang berubah dilambangkan dengan gamma (γ) yang diukur dengan *radian* (rad) dan tidak berdimensi.



Gambar 2.8. Shear Strain: (a)Undeformed, (b)Deformed
(Sumber: Hibbeler, 2014)

Berdasarkan Gambar 2.8. rumus perhitungan *shear strain* diperoleh seperti pada Persamaan 2.3.

$$\gamma_{nt} = \frac{\pi}{2} - \lim \theta' \quad (2.3.)$$

Keterangan:

γ = *Shear strain*.

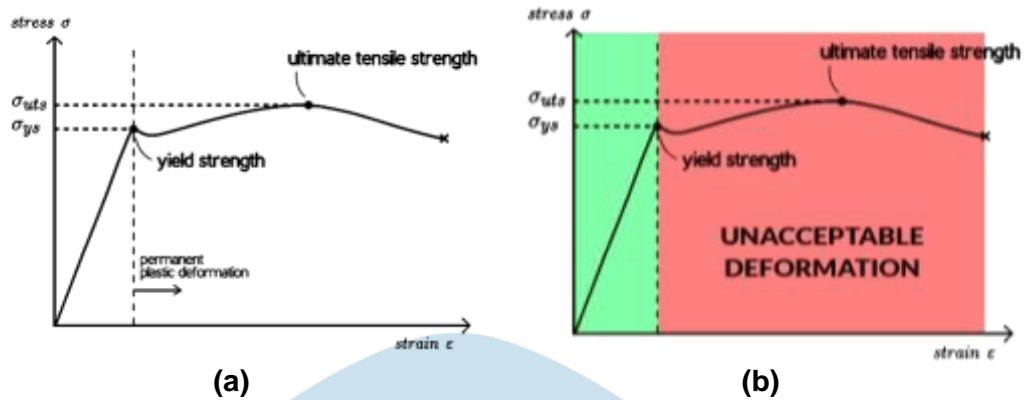
π = Nilai phi (3,14 atau 22/7).

θ' = Sudut *theta* aksen (derajat atau °).

Berdasarkan Persamaan 2.3. apabila nilai *shear stress* dapat menghasilkan nilai positif maupun negatif bergantung pada besarnya sudut *theta*. Apabila nilai *theta* lebih besar maka menghasilkan nilai negatif, sedangkan bila nilai *theta* lebih kecil maka menghasilkan nilai positif.

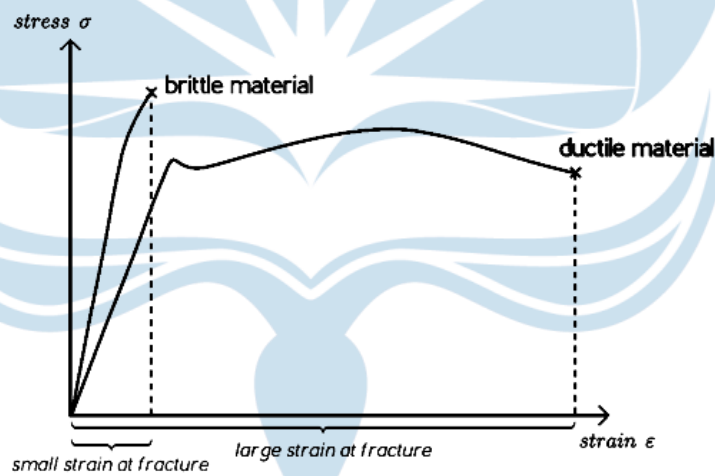
2.2.4. Material Propertise

Menurut *The Efficient Engineer* (2019a), terdapat tiga aspek penting dalam *material propertise*, yaitu *material strength*, *material ductility*, dan *material toughness*. *Material strength* adalah ukuran tekanan yang dapat diterima atau ditahan oleh sebuah material yang dapat didefinisikan menjadi dua hal, yaitu *yield strength* dan *ultimate strength*. Gambar perbedaan *yield strength* dan *ultimate strength* beserta daerah yang dapat diterima dan tidak dapat dilihat pada Gambar grafik 2.9.



(a) (b)
Gambar 2.9. Material Strength Graph
 (Sumber: *The Efficient Engineer*, 2019a)

Material ductility adalah ukuran kemampuan dari material untuk dapat terdeformasi secara plastis sebelum akhirnya *fracture*/patah, sehingga kemudian menghasilkan dua jenis material, yaitu *ductile material* dan *brittle material* dimana masing – masing material memiliki keunikannya sendiri yang dapat dilihat pada Gambar grafik 2.10.



Gambar 2.10. Material Ductility Graph
 (Sumber: *The Efficient Engineer*, 2019a)

Material toughness adalah ukuran kemampuan dari material dalam menerima/menyerap energi hingga mengalami *fracture*/patah. Semakin besar *stress – strain curve* yang ada pada Gambar 2.10., maka material tersebut memiliki *high toughness*.

2.2.4.1. Aluminium – 6061

Material Al-6061 biasa digunakan sebagai material produksi kerangka sepeda yang memiliki komposisi 97.9% Aluminium (Al), 1% *Magnesium* (Mg), 0.6% Silikon (Si), 0.28 *Copper* (Cu), dan 0.2 Kromium (Cr). Karakteristik dari Al-6016 dipaparkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Karakteristik Material Aluminium-6061

Parameter	Nilai
<i>Density</i> (g/cm ³)	2,70
<i>Tensile Strength</i> (MPa)	310
<i>Yield Strength</i> (MPa)	276
<i>Modulus of Elasticity</i> (GPa)	68,90
<i>Poisson's Ratio</i>	0,33
<i>Elongation</i> (%)	12 – 17

(Sumber: Azom, 2017)

2.2.4.2. Steel – 4130

Material ST-4130 juga menjadi material umum dalam produksi kerangka sepeda dengan komposisi 97.03 – 98.22% Besi (Fe), 0.8 – 1.1% Kromium (Cr), 0.4 – 0.6% *Manganese* (Mn), 0.28 – 0.33% Karbon (C), 0.15 – 0.3% Silikon (Si), 0.15 – 0.25% *Molybdenum* (Mo), 0.04% *Sulfur* (S), dan 0.035 *Phosphorous* (P). Karakteristik dari *Steel-4130* dipaparkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Karakteristik Material Steel-4130

Parameter	Nilai
<i>Density</i> (g/cm ³)	7,85
<i>Ultimate Strength</i> (MPa)	560
<i>Yield Strength</i> (MPa)	460
<i>Modulus of Elasticity</i> (GPa)	190 – 210
<i>Elongation at break in 50 mm</i> (%)	21,50
<i>Poisson's Ratio</i>	0,27 – 0,30

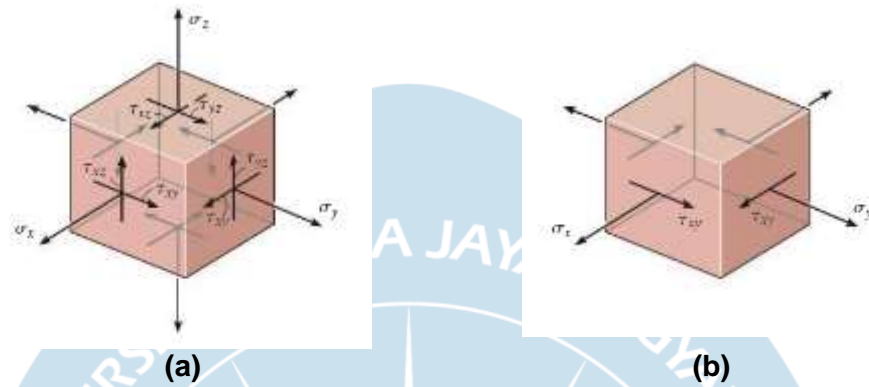
(Sumber: Azom, 2012)

2.2.5. Stress Transformation

2.2.5.1. Plane – Stress Transformation

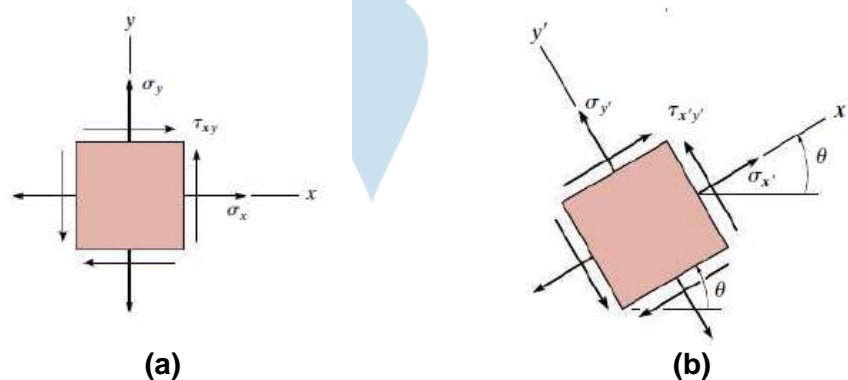
Plane Stress Transformation menurut Hibbeler (2014) adalah representasi dari keadaan titik tegangan bidang yang dipengaruhi oleh dua komponen tegangan, yaitu *normal stress* dan *shear stress* yang bekerja pada elemen tertentu. *Plane stress* menurut *The Efficient Engineer* (2019b) adalah komponen dikatakan berada dalam kondisi mengalami tegangan bidang apabila seluruh tegangan bekerja pada

bidang yang sama. *Plane stress* digunakan untuk merubah *3D problem* menjadi *2D problem* dengan mengasumsikan nilai arah Z pada *3D problem* = 0 sehingga lebih mudah untuk dilakukan perhitungan. Ilustrasi perubahan *plane stress* dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Plane Stress: (a)3D Problem, (b)2D Problem
(Sumber: Hibbeler, 2014)

Berdasarkan Gambar 2.11b. bidang akan menjadi *2D plane stress* seperti pada Gambar 2.12a. Kemudian, masing – masing komponen tersebut dapat dilakukan perhitungan *stress state* dengan orientasi θ yang berbeda. Pada struktur yang mempunyai daerah *weld* (pengelasan), maka diperlukan juga perhitungan *stresses perpendicular* yang berorientasi pada θ . Gambar perbedaan *plane stress* tidak berorientasi θ dan berorientasi θ dapat dilihat pada Gambar 2.12.



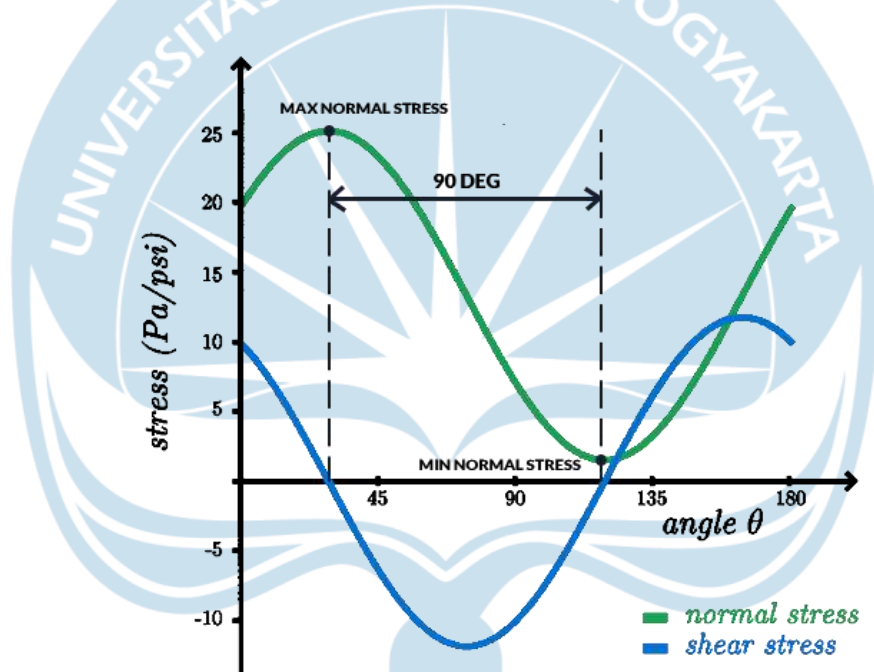
Gambar 2.12. Plane Stress: (a)Tidak Berorientasi θ , (b)Berorientasi θ
(Sumber: Hibbeler, 2014)

Berdasarkan Gambar 2.12b. perhitungan nilai *normal stress* dan *shear stress* dapat dilakukan dengan mengingat persamaan trigonometri sehingga diperoleh Persamaan 2.4. dan Persamaan 2.5.

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (2.4.)$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (2.5.)$$

Apabila rotasi perputaran *counter – clockwise* akan menghasilkan nilai θ positif. Berdasarkan perhitungan *stress state* yang berorientasi θ pada *plane stress* yang sama akan menghasilkan grafik pada Gambar 2.13.

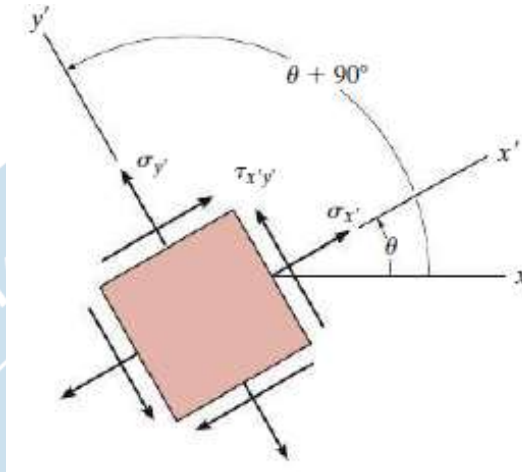


Gambar 2.13. Grafik Nilai Tegangan Normal dan Geser dengan Orientasi θ
(Sumber: *The Efficient Engineer*, 2019c)

Gambar 2.13. menyimpulkan jika melakukan orientasi θ hingga $<180^\circ$ maka akan menghasilkan nilai *normal* dan *shear stress* yang bervariasi, namun ketika orientasi berada $= 180^\circ$ maka nilai *normal* dan *shear stress* akan sama dengan nilai awal. Penyebab hal ini terjadi adalah perputaran *axis coordinate system* yang digunakan untuk memvisualisasikan *stress* pada satu lokasi ketika menghitung *stress state*. Nilai dari *maximum* dan *minimum stress* pada Gambar 2.13. diperoleh dengan rentang jarak rotasi sebesar 90° . Hal ini menandakan bahwa ketika memperoleh nilai *maximum stress* pada bidang x, maka akan selalu memiliki nilai

minimum stress pada bidang y. Rumus untuk menghitung nilai tegangan normal y dapat dilakukan dengan merubah nilai $\theta = \theta + 90^\circ$, sehingga diperoleh Persamaan 2.6.

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (2.6.)$$



Gambar 2.14. Elemen Bidang untuk menghitung Tegangan Bidang Y
(Sumber: Hibbeler, 2014)

Normal stress yang terletak pada maksimum dan minimum di Gambar 2.13. ditemukan bahwa nilai *shear stress* = 0 yang artinya disebut sebagai *principal planes*, sedangkan nilai *maximum* dan *minimum normal stresses* yang terjadi pada *principal planes* disebut sebagai *principal stresses* (The Efficient Engineer, 2019c).

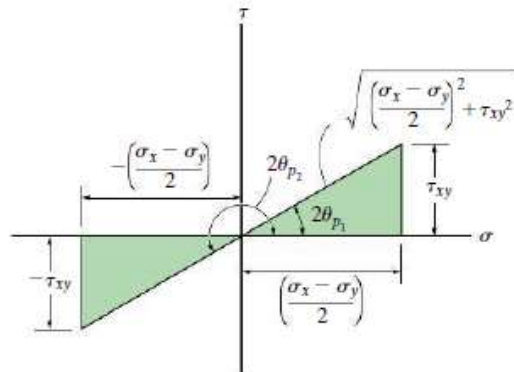
2.2.5.2. *Principal Stresses*

Principal stresses adalah representasi dari orientasi elemen yang menghasilkan maksimum dan minimum *normal stress*. Apabila suatu elemen telah merepresentasikan *principal stresses*, maka elemen tersebut tidak memiliki *shear stress* (Hibbeler, 2014). Penetapan maksimum dan minimum *normal stress* dapat dilakukan mengubah θ menjadi = 0 pada Persamaan 2.4. sehingga diperoleh Persamaan 2.7.

$$\frac{d\sigma_{x'}}{d\theta} = - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} (2 \sin 2\theta) + 2\tau_{xy} \cos 2\theta = 0 \quad (2.7.)$$

Penyelesaian dari Persamaan 2.7. akan diperoleh nilai orientasi $\theta = \theta_p$ pada bidang tegangan maksimum dan minimum, sehingga perhitungan tegangan geser maksimum *principal* dapat dilakukan dengan Persamaan 2.8.

$$\tan 2\theta_p = \frac{\tau_{xy}}{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2}} \quad (2.8.)$$



Gambar 2.15. In – Plane Principal Stresses
(Sumber: Hibbeler, 2014)

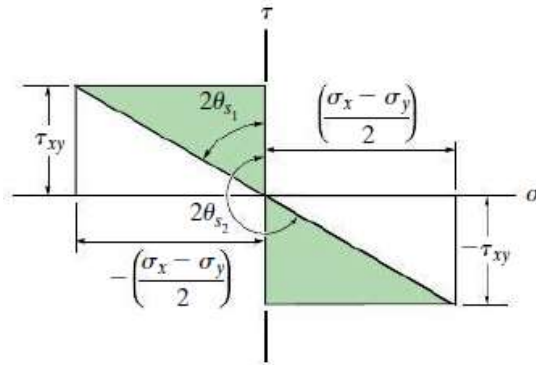
Berdasarkan Persamaan 2.4. dalam memperoleh besar tegangan maksimum dan minimum dengan menggunakan persamaan trigonometri diperoleh Persamaan 2.9.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.9.)$$

2.2.5.3. Maximum In-Plane Shear Stress

Keadaan *stress* pada suatu titik bidang dapat direpresentasikan dalam tegangan geser yang diikuti dengan rata – rata tegangan, sehingga tegangan geser maksimum dengan rata – rata tegangan diorientasikan dengan $\theta = 45^\circ$ dari elemen yang mewakili tegangan utama. Orientasi pada maksimum *shear stress* elemen dapat ditentukan juga seperti *principal stress* dengan merubah hasil θ menjadi = 0, sehingga menghasilkan persamaan perhitungan sudut tegangan geser maksimum pada *maximum in-plane shear stress* seperti pada Persamaan 2.10.

$$\tan 2\theta_s = \frac{-(\sigma_x - \sigma_y)}{2\tau_{xy}} \quad (2.10.)$$



Gambar 2.16. In – Plane Maximum Shear Stress
(Sumber: Hibbeler, 2014)

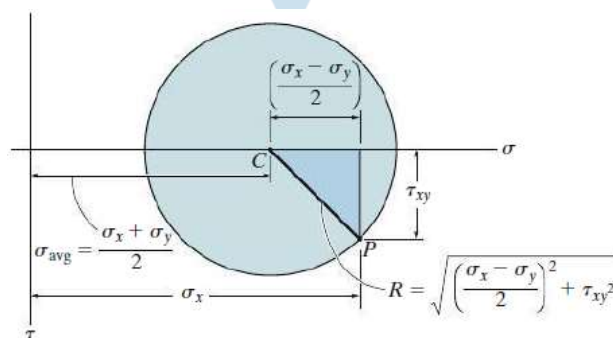
Berdasarkan Gambar 2.16. dapat dilakukan perhitungan untuk memperoleh nilai rata – rata *stress* dan *shear stress* maksimum dengan Persamaan 2.11. dan Persamaan 2.12.

$$\sigma_{avg} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad (2.11.)$$

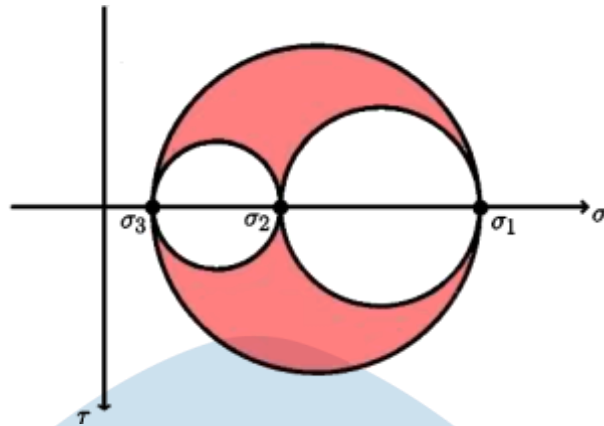
$$\tau_{max\ in\ plane} \text{ atau } R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.12.)$$

2.2.5.4. Mohr's Circle – Plane Stress

Mohr's Circle menurut *The Efficient Engineer* (2019c) adalah metode grafik yang digunakan untuk mendefinisikan nilai *normal* dan *shear stress* tanpa menggunakan rumus *stress transformation*. Konsep area lingkaran mohr, yaitu daerah σ ke kanan adalah positif sedangkan τ ke bawah adalah positif. Gambar *mohr's circle* dapat dilihat pada Gambar 2.17. dan Gambar 2.18.



Gambar 2.17. Mohr's Circle – Plane Stress 2D
(Sumber: Hibbeler, 2014)



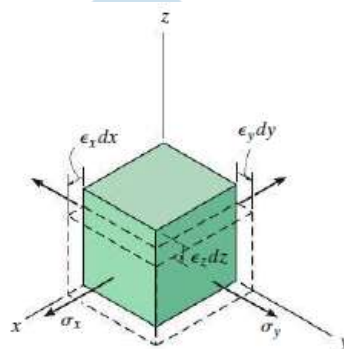
Gambar 2.18. Mohr's Circle – 3D Plane Stress
(Sumber: The Efficient Engineer, 2019c)

Berdasarkan Gambar 2.18. apabila menggunakan 3D plane stress, maka seluruh kombinasi *normal* dan *shear stress* kemungkinan berada pada batas atau arsiran merah bagian dalam lingkaran mohr.

2.2.6. Strain Transformation

2.2.6.1. Plane – Strain Transformation

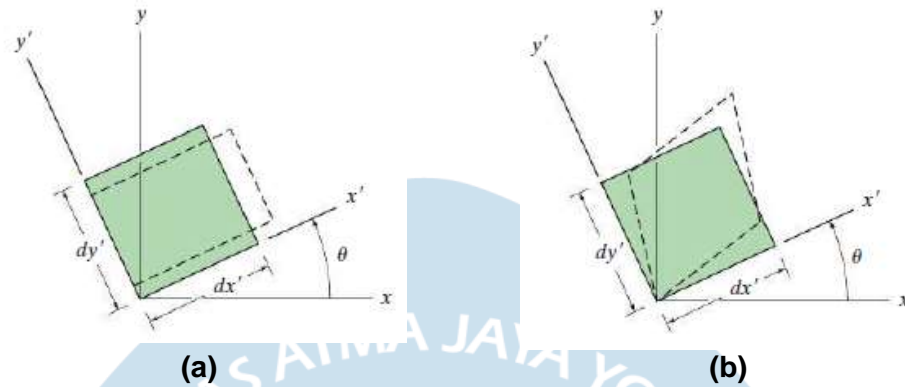
Menurut Hibbeler (2014) keadaan umum suatu regangan pada titik bidang direpresentasikan oleh kombinasi dari tiga komponen *normal strain* (ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z) dan tiga komponen *shear strain* (γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{xz}). Besaran *strain* biasanya diukur menggunakan *strain gauges* yang dapat mengukur *normal strain* dalam arah tertentu.



Gambar 2.19. Plane Strain
(Sumber: Hibbeler, 2014)

Berdasarkan Gambar 2.19. ϵ_z , γ_{yz} , γ_{xz} tidak digunakan karena umumnya *plane strain element* hanya berfokus pada ϵ_x , ϵ_y saja, karena tidak selalu tegangan

bidang menyebabkan regangan bidang meskipun ketiga komponen terletak pada bidang yang sama.



Gambar 2.20. Bentuk: (a) Normal Strain, (b) Shear Strain
(Sumber: Hibbeler, 2014)

Berdasarkan Gambar 2.20. penentuan nilai *normal* dan *shear strain* dengan trigonometri diperoleh Persamaan 2.13. dan Persamaan 2.14.

$$\epsilon_{x'} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad (2.13.)$$

$$\frac{\gamma_{x'y'}}{2} = - \left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \right) \sin 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \cos 2\theta \quad (2.14.)$$

Apabila hasil $\epsilon_{x'}$ positif maka elemen akan memanjang ke arah positif x' seperti pada Gambar 2.20a. jika hasil $\gamma_{x'y'}$ positif maka akan terdeformasi seperti Gambar 2.20b. Apabila *normal strain* pada arah y' dibutuhkan, maka dapat dilakukan dengan merubah nilai $\theta = \theta + 90^\circ$. Sehingga diperoleh Persamaan 2.15.

$$\epsilon_{y'} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} - \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad (2.15.)$$

2.2.6.2. Principal Strains

Prinsip regangan adalah sama seperti tegangan, dimana suatu deformasi elemen dapat terjadi hanya pada *normal strain* tanpa adanya *shear strain* (ketika bidang merepresentasikan *principal strains*), maka perhitungan orientasi sudut dan maksimum minimum *strain* diperoleh pada Persamaan 2.16. dan Persamaan 2.17.

$$\tan 2\theta_p = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (2.16.)$$

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (2.17.)$$

2.2.6.3. Maximum In – Plane Shear Strain

Shear strain sama seperti *shear stress* yaitu perhitungan regangan geser diikuti dengan regangan normal rata – rata, maka persamaan maksimum sudut *shear*, *shear strain* maksimum, dan *average strain* dapat dilihat pada Persamaan 2.18. hingga Persamaan 2.20.

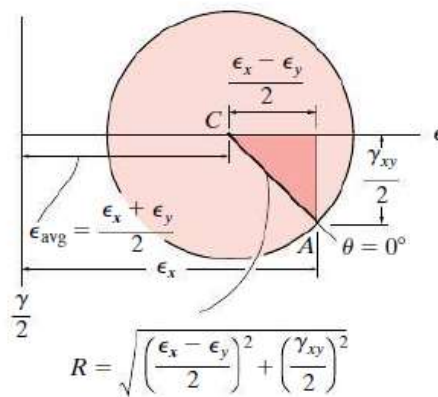
$$\tan 2\theta_s = -\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{\gamma_{xy}}\right) \quad (2.18.)$$

$$\frac{\gamma_{max\text{-in-plane}}}{2} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (2.19.)$$

$$\epsilon_{avg} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \quad (2.20.)$$

2.2.6.4. Mohr's Circle – Plane Strain

Lingkaran mohr merupakan metode yang tidak hanya digunakan pada visualisasi *stress*, namun dapat digunakan juga pada visualisasi *strain*. Perbedaan mendasar terletak pada komponen ϵ_x , ϵ_{avg} , dan $\frac{\gamma_{xy}}{2}$ yang menggantikan komponen σ_x , σ_{avg} , dan τ_{xy} . Gambar *mohr's strain circle* dapat dilihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21. Mohr's Circle – Plane Strain
(Sumber: Hibbeler, 2014)

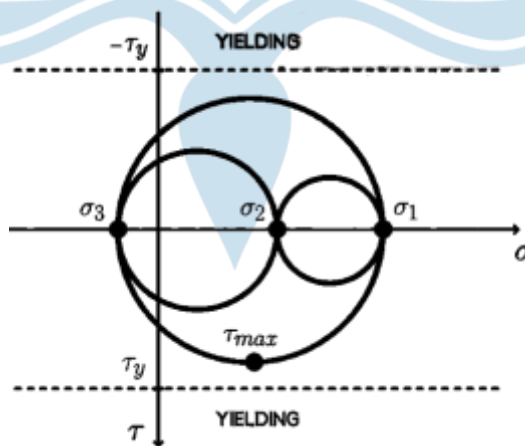
2.2.7. Theories of Failure

Teori kegagalan menurut Hibbeler (2014) merupakan hal penting dalam proses perancangan desain dengan material tertentu. Hal ini dilakukan dengan menetapkan batasan atas dalam keadaan *stress* yang dapat menyebabkan kegagalan material. Kegagalan material bergantung pada jenis materialnya, pada kasus *ductile material* kegagalan dipengaruhi oleh *yielding* (peluluhan), sedangkan untuk *brittle material* dipengaruhi oleh *fracture* (rekahan). Faktor eksternal seperti suhu, *rate of loading*, *chemical environment*, dan cara material dibentuk juga berpengaruh terhadap kegagalan material. Grafik ilustrasi kedua material dapat dilihat pada Gambar 2.10. Menurut *The Efficient Engineer* (2020) dalam memprediksi *failure*, *ductile material* memiliki lima teori, yaitu *Hosford*, *Gurson*, *Hill*, *von Mises*, dan *Tresca* dengan teori yang paling umum digunakan adalah *von Mises* dan *Tresca*, sedangkan pada *brittle material* terdapat tiga teori kegagalan, yaitu *Rankine*, *Coulomb – Mohr*, dan *Modified Mohr*.

2.2.7.1. Tresca – Maximum Shear Stress Theory

Henri Tresca sebagai penemu *MSS Theory* pada tahun 1868, mengatakan bahwa “*yielding occurs when the maximum shear stress is equal to the shear stress at yielding in a uniaxial tensile test*” (*The Efficient Engineer*, 2020). Berdasarkan pernyataan Henri Tresca, maka diperoleh Persamaan 2.21.

$$\tau_{max} = \tau_y \quad (2.21.)$$



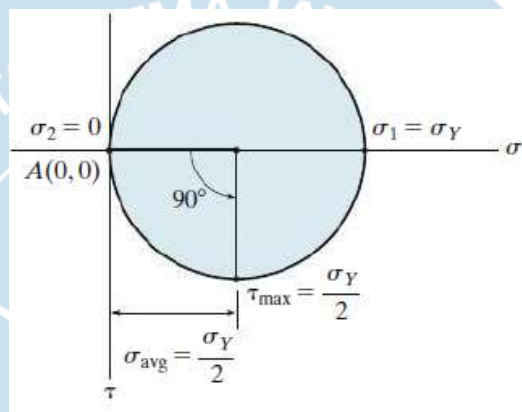
Gambar 2.22. *Mohr's Circle – Tresca (Triaxial)*
(Sumber: *The Efficient Engineer*, 2020)

Berdasarkan Gambar 2.22. dapat ditentukan bahwa teori ini tidak bergantung pada letak horizontal dari lingkaran Mohr, namun lebih berfokus pada besar τ_{\max} untuk mencapai *yielding* dan diperoleh Persamaan 2.22.

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_y \quad (2.22)$$

Uniaxial tensile test akan menghasilkan $\sigma_3 = \sigma_2 = 0$ dengan $\sigma_1 = \sigma_y$ sehingga diperoleh Persamaan 2.23.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y \quad (2.23.)$$



Gambar 2.23. Mohr's Circle – Tresca (Uniaxial)

(Sumber: Hibbeler, 2014)

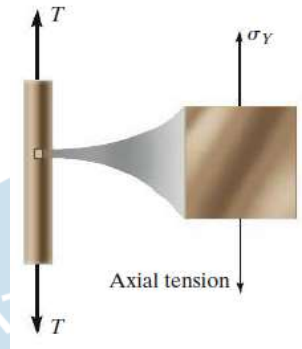
Menurut Hibbeler (2014) *yielding* pada *ductile material* kerap disebabkan oleh *slipping* dan menghasilkan tepi garis yang disebut sebagai *Lüder's line*. Gambar *Lüder's line* dapat dilihat pada Gambar 2.24.



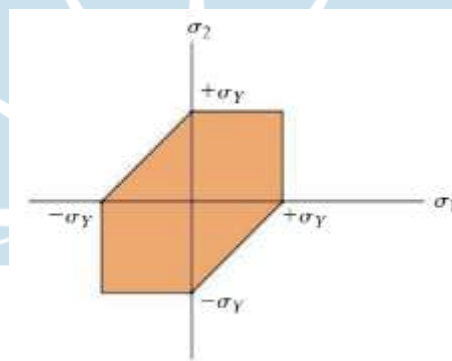
Gambar 2.24. Lüder's Line

(Sumber: Hibbeler, 2014)

Slipping biasanya terjadi karena *shear stress*, sebagai contoh ketika elemen material dikenakan oleh *yield stress* (σ_y) maka akan menghasilkan ilustrasi elemen material pada Gambar 2.25.



Gambar 2.25. Ilustrasi Material terkena Yield Stress σ_y
(Sumber: Hibbeler, 2014)



Gambar 2.26. Maximum Shear Stress – Plane Stress
(Sumber: Hibbeler, 2014)

Apabila suatu titik mengalami tegangan bidang dan tegangan utama dalam bidangnya diwakili oleh koordinat (σ_1 dan σ_2) yang diplot dengan batas atau diluar area heksagonal seperti pada Gambar 2.26. material akan mengalami *yielding* dan mengalami kegagalan pada titik tersebut.

2.2.7.2. Von Mises – Maximum Distortion Energy Theory

Von Mises ditemukan oleh Richard von Mises namun terdapat orang lain yang terlibat dalam penyempurnaannya, sehingga terkadang disebut sebagai *Maxwell – Hubert – Hencky – Von Mises Theory*. Teori ini mengatakan bahwa “*yielding occurs when the maximum distortion energy is equal to the distortion energy at yielding in a uniaxial tensile test*” (The Efficient Engineer, 2020). Berdasarkan pernyataan R. von Mises, maka diperoleh Persamaan 2.24. dan Persamaan 2.25.

$$U_d = U_{d,y} \quad (2.24.)$$

Distortion energy dapat dihitung dengan cara *principal stresses* yang kemudian diperoleh Persamaan 2.25.

$$U_d = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (2.25.)$$

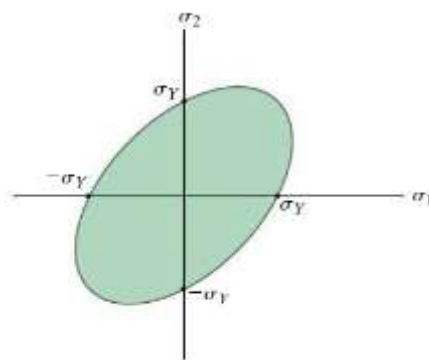
Mengingat *principal stresses* yang terjadi pada *uniaxial tensile test* menghasilkan $\sigma_3 = \sigma_2 = 0$ dengan $\sigma_1 = \sigma_y$, sehingga diperoleh penyederhanaan pada Persamaan 2.25. menghasilkan Persamaan 2.26. hingga Persamaan 2.28.

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.26.)$$

$$\sigma' = (\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.27.)$$

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma'^2 \quad (2.28.)$$

Suatu material dipastikan mengalami kegagalan apabila nilai *von mises stress* melebihi atau sama dengan nilai tegangan luluhnya. Menurut Hibbeler (2014) pembebanan eksternal terhadap material dapat menyebabkan perubahan bentuk (deformasi), hal ini disebabkan karena material menjadi menyimpan energi diseluruh internal volumenya. Energi per satuan volume disebut dengan *strain – energy density*. *Strain – energy density* terbagi dalam dua bagian, yaitu bagian energi pertama yang membuat perubahan volume elemen tanpa menyebabkan perubahan bentuk dan bagian energi kedua yang mendistorsi elemen. Berdasarkan Persamaan 2.28. diperoleh *plane stress ellipse* seperti pada Gambar 2.27.



Gambar 2.27. Maximum Distortion Energy – Plane Stress
(Sumber: Hibbeler, 2014)

Berdasarkan Gambar 2.27. apabila titik material memperoleh *stress* (σ_1, σ_2) hingga melewati plot batas maka material tersebut dapat dikatakan mengalami kegagalan. Kedua teori *maximum shear stress* dan *maximum distortion energy* dalam *principal stresses* akan menghasilkan nilai yang sama ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_y$), namun jika salah satu *stress* = 0 maka *stress* lainnya akan memiliki *magnitude* σ_y . Jika material mengalami *pure shear*, maka dapat menyebabkan perbedaan terbesar dalam memprediksi kegagalan. Berdasarkan uji torsi aktual dengan mengembangkan kondisi *pure shear* dalam spesimen *ductile material*, menunjukkan *maximum distortion energy* memberikan hasil *pure share failure* yang 15% lebih akurat dibandingkan *maximum shear stress theory*. *The Efficient Engineer* (2020) turut menuturkan bahwa pengaplikasian *Tresca Theory* cenderung lebih mudah dan konservatif dibandingkan *von Mises* yang lebih cocok digunakan pada *experimental data*.

2.2.8. Factor of Safety (FOS)

Menurut Hibbeler (2014) *factor of safety* (FOS) merupakan salah satu metode spesifik yang dapat digunakan untuk mengukur besar beban yang diperbolehkan, maka diperlukan angka keamanan (n) yang digunakan sesuai dengan pengujian beban yang ditentukan. Angka keamanan berdasarkan jenis beban terbagi menjadi 3, yaitu beban statis memiliki $n = 1,25 - 2,00$, beban dinamis = $2,00 - 3,00$, dan beban kejut = $3,00 - 5,00$ (Dobrovolsky dkk, 1978). Menurut Vidosic (1957) angka keamanan FOS terbagi menjadi beberapa kriteria, yaitu:

- a. $N = 1,25 - 1,50$, diperuntukan pada material *reliable* (diandalkan) yang terkendali dengan beban dan tegangannya dapat ditentukan secara pasti.
- b. $N = 1,50 - 2,00$, diperuntukan pada material *well-known* (sudah diketahui) dengan kondisi lingkungan konstan dengan beban dan tegangan yang mudah ditentukan.
- c. $N = 2,00 - 2,50$, diperuntukan pada material rata – rata dengan kondisi lingkungan biasa dengan beban dan tegangan yang dapat ditentukan.
- d. $N = 2,50 - 3,00$, diperuntukan pada *brittle material* (material getas) dengan kondisi lingkungan, beban, dan tegangan dibawah rata – rata.
- e. $N = 3,00 - 4,00$, diperuntukkan pada material yang belum pernah diuji pada lingkungan, beban, dan tegangan rata – rata maupun pada *well-known material* dengan tegangan yang tidak konstan.

- f. *Repeated Loads*, faktor n 1,25 – 4,00 dapat diterapkan namun harus mempertimbangkan batasan ketahanan dibandingkan *yield strength* materialnya.
- g. *Impact Forces*, faktor n pada poin c – e dapat diterapkan namun *impact factor* turut perlu diimplementasikan.
- h. *Brittle Materials*, ketika *ultimate strength* digunakan secara *theoretical maximum* maka penggunaan faktor n pada poin a – e dapat diterapkan dengan mengkalikan n dua kali lipat.
- i. Apabila terdapat faktor n yang lebih tinggi dari yang ada, maka analisis permasalahan lebih lanjut perlu dilakukan sebelum menentukan penggunaannya.

Penerapan angka keamanan (n) dapat digunakan dengan Persamaan 2.29. dan Persamaan 2.30. (Hibbeler, 2014).

$$FOS = \frac{F_{fail}}{F_{allow}} \quad (2.29.)$$

$$F_{fail} = FOS \times F_{allow} \quad (2.30.)$$

Berdasarkan Persamaan 2.29. hasil FOS harus lebih dari 1 untuk menghindari potensi adanya kegagalan pada desain yang dimiliki.

2.2.9. CAD

CAD (*Computer Aided Design*) menurut Dean dkk (2010) merupakan *software* berbasis komputer yang digunakan sebagai *platform* pemodelan produk 2D/3D. Pemodelan produk 2D/3D dibuat dengan penggabungan beberapa garis dan simbol, serta *constructive solid geometry* (CSG) membentuk suatu *shape*. *Solid geometry* tersebut dapat divisualisasikan dalam bentuk *edges*, *polygons*, dan *vertices* (sudut) yang didasarkan pada keinginan perancang.

2.2.10. SolidWorks 2018

SolidWorks 2018 merupakan *software* CAD dari *Dassault Systemes* yang akan digunakan sebagai *platform* mendesain dan melakukan simulasi FEA pada kerangka sepeda gunung. Penggunaan *software SolidWorks* 2018 akan dijelaskan secara umum dengan menggunakan pedoman buku *Training SolidWorks* serta pengalaman dalam menggunakan *software* tersebut.



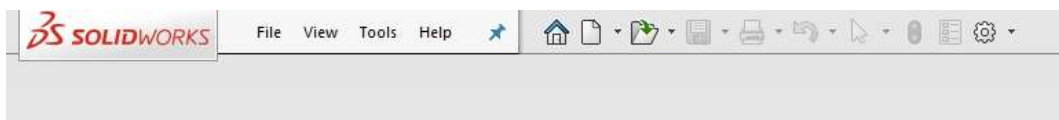
Gambar 2.28. Logo Software SolidWorks
(Sumber: *Dassault Systemes SolidWorks Corporation, 2021*)

Menurut *Dassault Systemes SolidWorks Corporation (2021)*, *SolidWorks 2018* mampu kompatibel dengan format *file* dari *software* CAD lainnya, seperti *software* *AutoDesk*[®] (.ipt dan .iam), *PTC*[®] (.prt, .prt*, .asm, dan .asm*), *Solid Edge*[®] (.par, .asm, dan .psm), *NX*[™] *Software* (.prt) dan *CATIA*[®] V5 (*CATPart* dan *CATProduct*).



Gambar 2.29. Interface Awal Software pada SolidWorks 2018

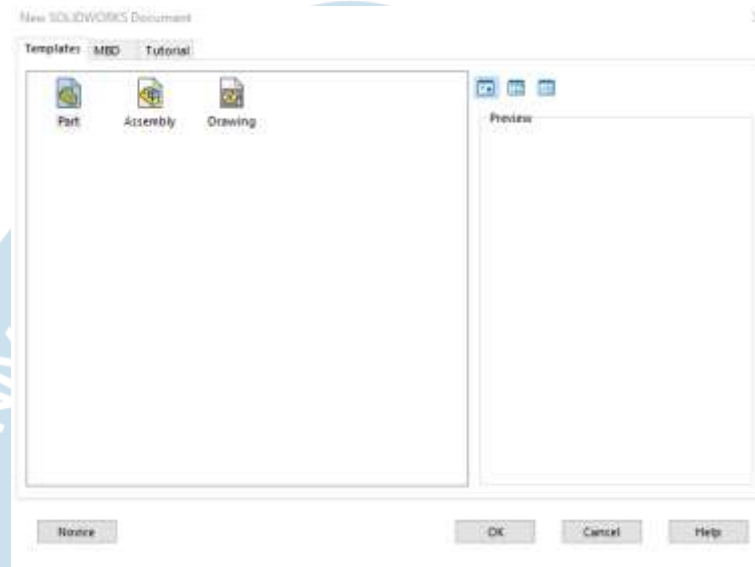
Pertama – tama ketika membuka *software* *SolidWorks 2018* akan dihadapkan pada Gambar 2.29. yang terdapat *menu bar* berisi *file*, *view*, *tools*, dan *help* yang dapat dilihat secara detil pada Gambar 2.30.



Gambar 2.30. Menu Bar Interface SolidWorks 2018

Menu file pada Gambar 2.30. berisi *new* dan *open*, dengan fungsi *new* berguna untuk membuat lembar kerja baru, sedangkan *open* berguna untuk membuka

lembar kerja yang telah kita simpan sebelumnya. *Menu view* digunakan sebagai konfigurasi untuk menampilkan *icon* atau *menu icon* yang ingin digunakan, sedangkan pada *menu tools* dan *help* berisi tentang konfigurasi (*options*) aplikasi serta *license*, *update software*. Dalam membuat sebuah lembar kerja baru, sebuah *dialog box* akan muncul dilayar dan memberikan pilihan berupa *part*, *assembly*, dan *drawing* seperti pada Gambar 2.31.



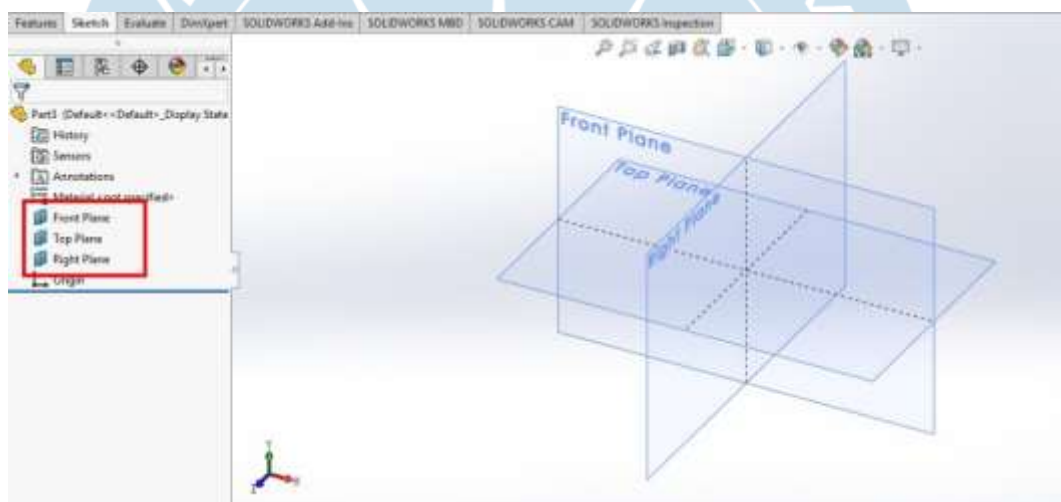
Gambar 2.31. New Dialog Box

Ikon *part* pada Gambar 2.31. digunakan untuk membuat desain *part* individu, sedangkan ikon *assembly* digunakan untuk menggabungkan *part-part* yang telah dibuat, sedangkan ikon *drawing* digunakan untuk membuat *drafting* gambar pada lembar kertas untuk memberikan informasi dimensi secara jelas kepada pembaca. Format *file* untuk *part* sendiri biasanya berekstensi *.SLDPRT*, *assembly* berekstensi *.SLDASM*, dan *drawing* berekstensi *.SLDDRW*.

Proses pembuatan sebuah geometri *solid* diawali dengan beberapa hal yang perlu diperhatikan, yaitu satuan unit yang akan digunakan apakah MKS (meter, kilogram, dan *second*), CGS (*centimeter*, gram, dan *second*), MMGS (milimeter, gram, dan *second*), dan IPS (*inch*, *pound*, dan *second*), serta penentuan *plane* yang akan digunakan sebagai media atau posisi pandangan menggambar apakah dari *front*, *right* atau *top*. Tampilan lembar kerja baru dan pemilihan *plane* dapat dilihat pada Gambar 2.32 dan Gambar 2.33.

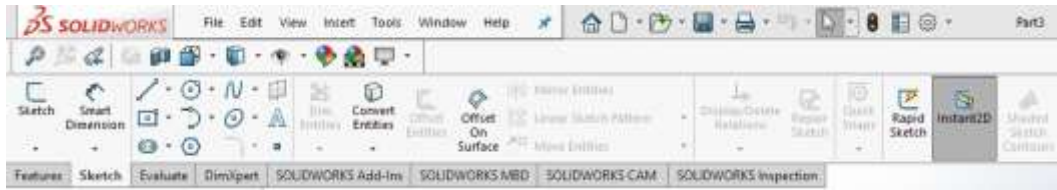


Gambar 2.32. Lembar Kerja Baru beserta Pemilihan Satuan Unit

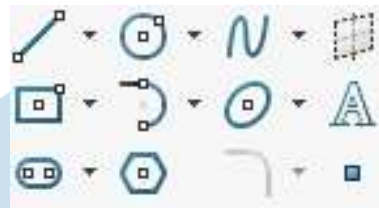


Gambar 2.33. Pemilihan Pandangan Plane

Berdasarkan Gambar 2.32. dan Gambar 2.33. penjelasan dilanjutkan pada ikon – ikon yang terdapat pada tab *sketch* dan *features*. Pembuatan sketsa CAD pada Tugas Akhir ini hanya menggunakan beberapa fitur *SolidWorks* 2018 saja, yaitu meliputi ikon *sketch* yang digunakan untuk memulai sketsa dan ikon *smart dimension* yang digunakan untuk memberikan dimensi ukuran pada sketsa yang dibuat. Kedua ikon tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.34. pojok kiri dan ikon *shape* yang digunakan untuk menggambar pada Gambar 2.35.



Gambar 2.34. Command Manager Sketch



Gambar 2.35. Icon Shape Sketch

Ikon *shape sketch* pada Gambar 2.35. akan dijelaskan kegunaannya masing – masing secara umum:

- a. Ikon *line*, terdapat tiga jenis line yang dapat digunakan yaitu *line*, *centerline*, dan *midpoint line*. *Line* berfungsi untuk menggambar garis biasa, *centerline* sebagai garis tengah putus – putus yang biasa digunakan sebagai titik acuan dalam menggambar, sedangkan *midpoint line* digunakan untuk menggambar garis dengan dimulai dari titik tengah yang digunakan.
- b. Ikon *circle* yang terdapat dua jenis circle yang dapat digunakan berupa *circle* dan *perimeter circle*. *Circle* digunakan untuk menggambar lingkaran dengan titik pusat berada ditengah, sedangkan *perimeter circle* digunakan untuk menggambar lingkaran dengan tiga titik yang dihubungkan melingkar.
- c. Ikon *spline* yang digunakan untuk membuat garis yang memiliki sudut bengkok atau berkelok - kelok, contohnya membuat huruf U.
- d. Ikon *plane* yang digunakan untuk memberikan tambahan *plane* apabila diperlukan menambah *sketch* pada bagian tertentu.
- e. Ikon *rectangle* yang berfungsi membuat kotak baik kotak biasa, kotak bertitik pusat tengah, kotak miring, dan jajargenjang.
- f. Ikon *tangent arc* berguna untuk membuat setengah lingkaran ataupun menghubungkan dua garis yang terpisah dengan bentuk setengah lingkaran.
- g. Ikon *ellipse* berguna untuk membuat bentuk *ellips*, parabola, dan *conic*.
- h. Ikon *text (A)* digunakan untuk memberikan kata – kata maupun kalimat pada bagian yang diinginkan.

- i. Ikon *slot* yang memiliki empat jenis yaitu *straight slot*, *centerpoint straight slot*, *3 point arc slot*, dan *centerpoint arc slot*. Kegunaan ikon *straight slot* dan *centerpoint straight slot* adalah membuat bentuk slot yang memiliki *centerpoint* berbeda, sedangkan *arc slot* digunakan untuk membuat slot yang berkelok (bersudut) dengan pilihan dua jenis titik tengah yang juga berbeda.
- j. Ikon *polygon* untuk membuat bentuk *polygon*.
- k. ikon *point* digunakan untuk memberikan titik – titik acuan untuk memudahkan pembuatan shape tambahan ataupun ketika ingin membuat *linear pattern*.

Command manager selanjutnya dilanjutkan pada *command manager features* yang ditampilkan pada Gambar 2.36.



Gambar 2.36. Command Manager Features

Fungsi *command manager features* pada Gambar 2.36. akan dijelaskan dari ikon paling kiri hingga paling kanan:

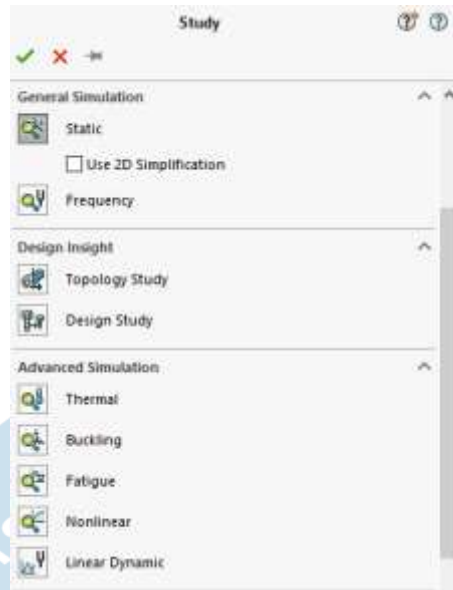
- a. *Extruded boss/base*: membangkitkan sketsa 2D menjadi bentuk 3D.
- b. *Revolved boss/base*: membangkitkan sketsa 2D dengan memutar sketsa 360° 2D sebagai garis tengah membentuk bentuk 3D
- c. *Swept boss/base*: membangkitkan bentuk 3D menggunakan dua plane yang berbeda dengan dua sketsa bidang (lingkaran, kotak, polygon, dan lain-lain) serta menggunakan garis sebagai acuan panjang dan alur.
- d. *Lofted boss/base*: fitur ini sama seperti *swept boss* namun dapat menggunakan dua bidang yang berbeda dalam menggabungkannya.
- e. *Boundary boss/base*: membangkitkan permukaan yang bersinggungan atau lengkungan di kedua arah (semua sisi permukaan).
- f. *Extruded cut*: melubangi bentuk 3D yang telah dibuat menggunakan bentuk sketsa yang ada.
- g. *Hole wizard*: membuat lubang *drill*, *counterbore*, *countersink*, *straight tap*, *tapered tap*, *counterbore slot*, *countersink slot*, dan *slot* serta membuat bentuk ulir baut atau mur.
- h. *Revolved cut*: memotong bentuk 3D dengan bangun putar menjadi acuan pemotongan.

- i. *Swept cut*: memotong bidang 3D dengan sketsa acuan berupa bidang garis dan bentuk (lingkaran, kotak, *ellipse*, dll).
- j. *Lofted cut*: memotong bidang 3D dengan sketsa pada *plane* berbeda dan bentuk yang berbeda.
- k. *Boundary cut*: memotong bidang 3D berdasarkan sketsa yang bersinggungan atau lengkungan di kedua arah.
- l. *Fillet*: memberikan ujung melengkung pada bidang 3D.
- m. *Linear pattern*: fungsi untuk membuat pattern pada bidang 3D dengan menggunakan satu acuan sketas atau bidang 3D untuk menduplikasi.
- n. *Rib*: membuat bentuk seperti rusuk atau penyangga.
- o. *Draft*: mengubah ketinggian bidang 3D dengan ketentuan sudut tertentu.
- p. *Shell*: memberikan rongga didalam bidang dengan ketebalan tertentu.
- q. *Wrap*: membuat permukaan planar dari model silinder, kerucut, atau ekstrusi.
- r. *Intersect*: memudahkan menambahkan geometri permukaan pada bidang 3D secara terbuka dan tertutup, serta menghilangkan material model.
- s. *Mirror*: memberikan efek cerminan (duplikasi) dari bidang yang telah dibuat berdasarkan arah *plane*.
- t. *Reference geometry*: membuat geometri acuan tambahan seperti *plane*, *axis*, dan *coordinate system*.
- u. *Curves*: membuat curva.
- v. *Instant 3D*: memudahkan dengan cepat membuat dan memodifikasi model geometri menggunakan *drag handle* dan penggaris.

Proses simulasi FEA dapat dilakukan dengan mengaktifkan *simulation* pada tab *SolidWorks Add-ins* pada Gambar 2.37. dan dilanjutkan dengan pemilihan jenis pengujian sesuai dengan yang ingin dilakukan seperti pada Gambar 2.38.



Gambar 2.37. Simulation Add-ins

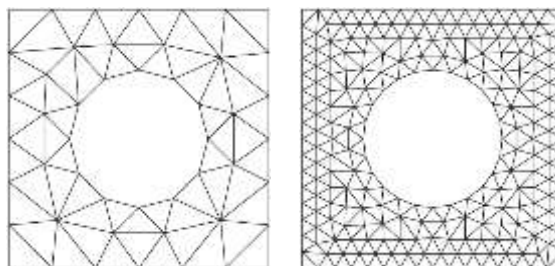


Gambar 2.38. New Study Simulation

2.2.11. Finite Element Method

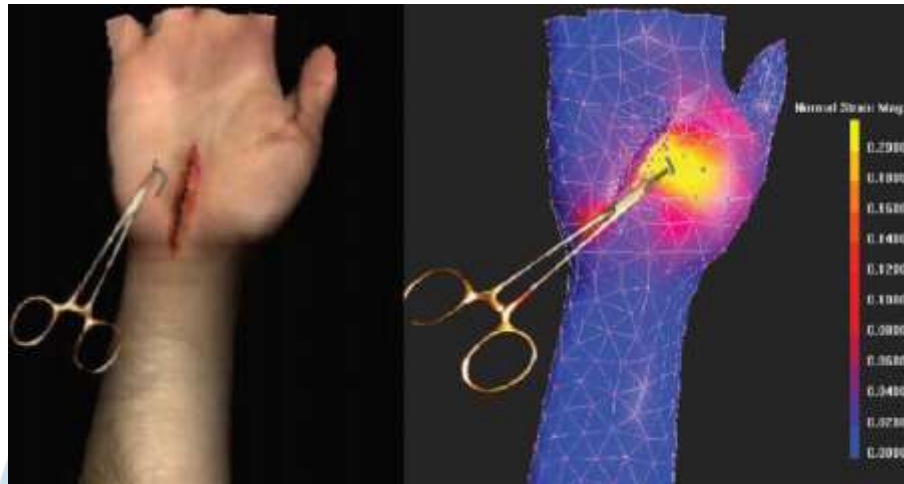
Metode perancangan didasarkan pada buku Fish dan Belytschko (2007) yang membahas *Finite Element Method* (FEM) merupakan pendekatan numerik yang persamaan diferensial parsialnya dapat diselesaikan dengan perkiraan. Metode penyelesaiannya dapat dilakukan dengan analisis tegangan, aliran fluida, perpindahan panas, dan uji elektromagnetik menggunakan *software* simulasi komputer (CAD).

Penggunaan FEM telah diterapkan oleh banyak insinyur dan ilmuwan, karena mampu memprediksi perilaku sistem struktural, listrik, termal, kimia, dan mekanik dalam analisis desain dan kinerja suatu barang atau produk. Secara umum, produk yang diuji akan dibagi menjadi *finite element* yang kemudian dihubungkan dengan *node* untuk mendapatkan solusi perkiraan. Contoh model *finite element mesh* dapat dilihat pada Gambar 2.39.



**Gambar 2.39. Finite Element Meshes
(Sumber: Fish dan Belytschko, 2007)**

Permasalahan utama dalam analisis tegangan, kimia, dan elektromagnetik terdapat variabel yang harus diperhatikan, yaitu *displacements* pada analisis tegangan, konsentrasi material pada analisis kimia, dan bidang potensial pada analisis elektromagnetik.

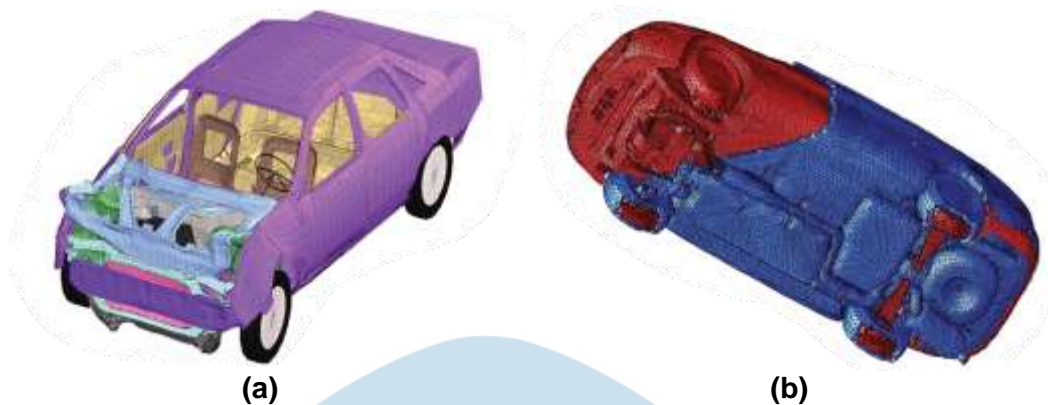


**Gambar 2.40. FEM pada Pengobatan Prediktif
(Sumber: Fish dan Belytschko, 2007)**

Pengaplikasian *finite element* tergolong sangat luas, sehingga terlalu besar apabila dijabarkan keseluruhannya. Secara garis besar, gambaran tentang fleksibilitas FEM disebut sebagai berikut:

- Analisis tegangan dan analisis thermal pada produk atau komponen industri seperti mesin otomotif, pesawat terbang, perangkat listrik, pipa, dan chip elektronik.
- Analisis seismik berupa bendungan air, perkotaan (bangunan), dan pembangkit listrik.
- Analisis kecelakaan transportasi.
- Analisis aliran fluida pada *cooler*, polutan, dan kontaminan udara pada sistem ventilasi
- Analisis elektromagnetik pada antena, transistor, dan radar pesawat terbang.
- Analisis prosedur medis seperti pembedahan berupa operasi plastik, rekonstruksi, dan koreksi tulang.

Berdasarkan Gambar 2.40. *finite element model* dapat digunakan dalam perencanaan prosedur bedah berupa pengoptimalan penjahitan, serta memprediksi respon pasien terhadap pengobatan alternatif tersebut.



Gambar 2.41. FEM pada Desain dan Keamanan Transportasi: (a) *Finite Element Model Crash Analysis*, (b) *Finite Model Stiffness Prediction*
(Sumber: Fish dan Belytschko, 2007)

Tahapan FEM terdiri atas lima tahapan, yaitu:

- a. *Pre-processing*: Pengelompokan permasalahan yang ada menjadi *finite element* model dengan mesin generator *mesh* otomatis.
- b. *Element formulation*: Pendeskripsian perilaku dari masing-masing elemen yang ada yang bertujuan untuk pengembangan persamaan diferensial parsial berdasarkan permasalahan dan bentuk yang lemah.
- c. *Assembly*: Memperoleh persamaan elemen – elemen seluruh sistem dari persamaan elemen individu berupa matriks.
- d. *Solving the equations*: Melakukan penyelesaian pada persamaan yang ada.
- e. *Post-processing*: Memperoleh data seperti *stress*, *strain*, dan visualisasi respon dari proses yang dilakukan.

2.2.12. AluTech Frame

AluTech Frame merupakan produksi kerangka yang menggunakan material dasar aluminium yaitu Al6 (Al-6061) yang diimplementasikan pada kerangka sepeda sejak tahun 90-an, dengan cara penggabungan tiga pipa tubing dan *heat treatment* untuk menghasilkan kerangka yang kuat, tahan lama, dan tahan karat (Polygon, 2018b).

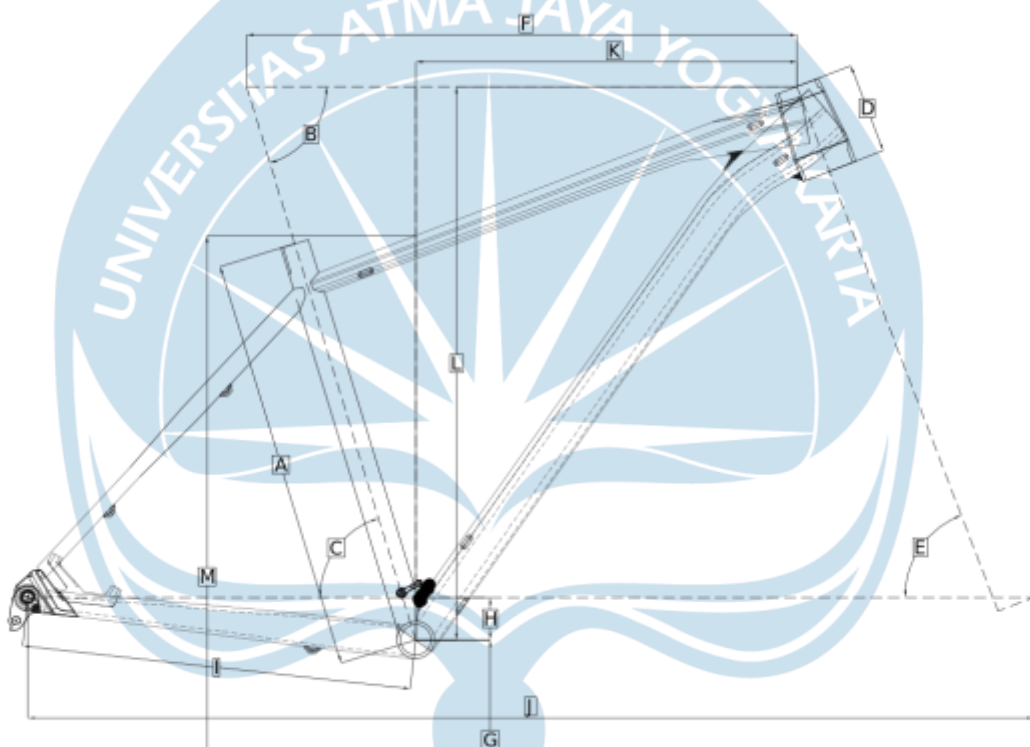
2.2.13. FeroTech Frame

FeroTech Frame merupakan produksi kerangka sepeda menggunakan material tabung besi tipe *straight gauge* dengan kelebihan yang terletak pada kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan yang tangguh dan handal, serta dapat

memaksimalkan performa penggunaan sepeda, namun penggunaan besi sebagai material dasar kerangka sepeda dapat menyebabkan karat (Polygon, 2018b).

2.2.14. Geometri Sepeda

Geometri sepeda gunung pada Tugas Akhir ini menggunakan geometri sepeda Polygon sebagai referensi ini karena anatomi umum tiap jenis sepeda sebenarnya sama, hanya saja berbeda pada bagian – bagian tertentu seperti pada fitur yang dimiliki sebuah sepeda (Sepeda Me, 2020). Gambar dan penjelasan geometri dapat dilihat pada Gambar 2.42. dan Tabel 2.6.



Gambar 2.42. Geometri Universal Sepeda Gunung
(Sumber: Polygon, 2018a)

Tabel 2.6. Parameter Geometri Sepeda Gunung

Huruf	Parameter
A	<i>Seat Tube Length</i>
B	<i>Seat Tube Angle</i>
C	<i>Effective Seat Tube Angle</i>
D	<i>Head Tube Length</i>
E	<i>Head Tube Angle</i>
F	<i>Effective Top Tube</i>
G	<i>Bottom Bracket Height</i>
H	<i>Bottom Bracket Offset</i>
I	<i>Chainstay Length</i>
J	<i>Wheelbase</i>
K	<i>Frame Reach</i>
L	<i>Frame Stack</i>
M	<i>Standover Height</i>

(Sumber: Polygon, 2018a)

Ukuran kerangka sepeda gunung panduan ukuran yang berguna untuk memperoleh ukuran kerangka yang sesuai dengan tinggi badan pengguna. Ukuran rekomendasi dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7. Ukuran Rekomendasi Pemilihan Kerangka Sepeda

Height (cm)	Size	Seat Tube Length (mm)
152,5 – 165	S	393,70 – 406,40
162,5 – 175	M	431,80 – 457,2
172,5 – 185	L	508
182,5 – 195	XL	533,40

(Sumber: Polygon, 2017)