

KONSTRUKSI RANGKA KENDARAAN

Penulis :
Sudiro, ST, M.Si
Didik Sugiyanto, ST, M.Eng



GETPRESS INDONESIA

KONSTRUKSI RANGKA KENDARAAN

Penulis: Sudiro, ST, M.Si
Didik Sugiyanto, ST, M.Eng

ISBN:

Editor: Yuliatr Novita, M.Hum.
Dede Ahsani Aulia, ST.

Penyunting: Mila Sari, M.Si.

Desain Sampul dan Tata Letak: Handri Maika Saputra, S.ST.

Penerbit : GETPRESS INDONESIA
Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat

website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, November 2023

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT. Salawat serta salam kami sampaikan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW. Atas berkat dan rahmatNya sehingga MONOGRAF “KONSTRUKSI KENDARAAN” dari Penelitian dengan judul “Studi Tentang Fenomena Collapse dan Buckling Pada Rangka Bodi Mobil” dapat terselesaikan dengan baik meskipun masih jauh dari sempurna.

Dengan selesainya penulisan MONOGRAF ini maka penulis mengucapkan terima kasih yang sebanyak-banyaknya kepada:

1. Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (DRPM) KEMENRISTEK DIKTI
2. Direktur Politeknik Indonusa Surakarta
3. Ketua UPPM Politeknik Indonusa Surakarta
4. Rekan Dosen Politeknik Indonusa Surakarta yang selalu memberi inspirasi penulis.
5. Mahasiswa Politeknik Indonusa Surakarta khususnya Program Studi Sarjana Terapan teknologi Otomotif .

Begitu terbatasnya pengetahuan kami sehingga luaran hasil penelitian ini masih jauh dari kesempurnaan. Maka dari itu, kami dengan tangan terbuka menerima saran dan kritik yang bersifat membangun. Akhir kata, semoga hasil penelitian ini bermanfaat bagi pembaca dan penulis dan mendapat berkah dari Allah SWT. Amin.

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	I
DAFTAR ISI	II
DAFTAR GAMBAR.....	iv
DAFTAR TABEL	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Konstruksi Kendaraan.....	1
1.1.1 Bagian Kontruksi Kendaraan.....	1
1.1.2 Teknologi Rangka.....	5
BAB II FRAME CHASIS	9
2.1. Frame Chassis	9
2.1.1. Ladder Frame Design.....	9
2.1.2. Backbone Design	11
2.1.3. Space Frame Design	11
2.1.4. Monocoque Frame Design	12
2.2. Sasis FE 74 Mitsubishi	12
2.3. Metode Analisa Perancangan Produk.....	14
2.4. Metode Finite Element Analysis (FEA)	17
2.4.1. Momen dan Gaya	18
2.4.2. Beban	19
2.4.3. Tegangan dan Kekuatan Bahan	20
2.4.4. Defleksi.....	21
BAB III <i>IMPACT DAN BUCKLING</i>	23
3.1 Pengertian	23
3.2 Teori Elastis dan Plastisitas Pelat	24
3.3 Metode Energi (Energy Methode).....	28
3.4 Metoda Elemen Hingga	30
3.5 Persamaan Euler.....	33
BAB IV <i>UJI COLLAPSE AND BUCKLING</i>	37
4.1 Bahan Penelitian	37
4.2 Alat Penelitian.....	38
4.3 Desain Rangka	38
4.4 Proses Pembuatan Alat Uji.....	39
4.5 Proses Pembuatan Rangka Uji.....	40
4.6 Prosedur Pelaksanaan Pengujian.....	40

4.7 Pemodelan Pembebanan Struktur Rangka	42
4.7.1 Gaya yang bekerja Pada Rangka	42
4.7.2 Clamp.....	44
4.8 Langkah-langkah pemrograman dalam Program	
Simulasi Abaqus	45
4.9 Diagram Alir Uji	48
BAB V HASIL UJI <i>COLLAPSE AND BUCKLING</i>	49
5.1 Data Hasil Penelitian	49
5.1.1 Posisi Rangka Sebelum Tabrakkan.....	49
5.1.2 Posisi Rangka pada saat terjadi Tabrakan.....	50
5.2 Hasil Simulasi	51
5.2.1 Grafik energi kinetik dari hasil simulasi numerik yang telah dilakukan.....	51
5.2.2 Grafik Penyerapan energi dari hasil simulasi numerik yang telah dilakukan.....	53
5.3 Hasil Analisa Eksperimen	56
5.3.1. Analisis Perhitungan Secara Teori.....	56
5.3.2. Analisa Perhitungan dari Eksperimen.....	60
5.4 Pembahasan Hasil Eksperimen	70
5.4.1. Hubungan Gaya dengan Jarak.....	70
5.4.2. Hubungan Energi Regangan dengan Jarak	73
5.4.3 Grafik Tegangan – Regangan pada simulasi dan eksperimen	75
BAB VI PENUTUP	79
6.1 Kesimpulan.....	79
6.2 Saran	80
DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>ladder frame chassis</i>	10
Gambar 2.2 <i>C Channel side member</i>	10
Gambar 2.3 <i>Backbone design chassis</i>	11
Gambar 2.4 <i>Space frame chassis</i>	11
Gambar 2.5 <i>Monocoque frame design</i>	12
Gambar 2.6 truk mitsubishi FE 74	13
Gambar 2.7 Spesifikasi unit FE 74	13
Gambar 2.8 <i>House of Quality</i>	16
Gambar 2.9 Beban terpusat.....	19
Gambar 2.10 Beban merata.....	20
Gambar 2.11 Defleksi yang terjadi pada struktur	22
Gambar 3.1. (a) kedua ujung membulat atau bersumbu; (b) kedua ujung mati; (c) satu ujung bebas dan ujung yang lain mati; (d) satu ujung bulat dan terarah dan ujung lain mati.....	34
Gambar 3.2. Benda yang mendapat gaya	26
Gambar 3.3. Batang dikenai beban tarik	26
Gambar 3.4. Diagram tegangan-regangan	28
Gambar 3.5. diagram Energi Regangan.....	29
Gambar 3.6. diagram deformasi beban.....	29
Gambar 4.1. desain alat uji.....	38
Gambar 4.2. desain rangka uji	39
Gambar 4.3 Pembebanan pada rangka	42
Gambar 4.3 Pembebanan radial pada rangka	43
Gambar 4.4 Pembebanan aksial pada rangka	43
Gambar 4.5 Pengkonstrainan pada struktur rangka	44
Gambar 4.6. Gambar dua dimesi dari rangka 15°	45
Gambar 4.7. Bentuk tiga dimensi rangka 15°.....	45
Gambar 4.9. Assembly rangka 15° dengan benda rigid.....	45
Gambar 4.10. Rangka yang telah <i>velocity</i> dan konstrain benda rigid diberikan.....	47

Gambar 4.11. rangka dan benda rigid yang dimesh.....	47
Gambar 4.14 Diagram Alir Uji.....	48
Gambar 5.1 Posisi sebelum Rangka mengalami tabrakan.....	49
Gambar 5.2 Rangka yang mengalami tabrakan	50
Gambar 5.3 Grafik Hubungan antara Time dengan energi kinetik rangka 15°	51
Gambar 5.4 Grafik Hubungan antara Time dengan energi kinetik rangka 30°	52
Gambar 5.5 Grafik Hubungan antara Time dengan energi kinetik rangka 45°	52
Gambar 5.6 Grafik Hubungan antara Time dengan Energi regangan rangka 15° (a)	53
Gambar 5.7 Grafik Hubungan antara Time dengan Energi regangan rangka 30° (b)	54
Gambar 5.8 Grafik Hubungan antara Time dengan Energi regangan 45° (c)	54
Gambar 5.9 penampang rangka uji.....	56
Gambar 5.10 rangka dengan sudut 15°	57
Gambar 5.11 rangka dengan sudut 30°	58
Gambar 5.12 rangka dengan sudut 45°	59
Gambar 5.13 Grafik hubungan gaya dengan jarak pada sudut 15°	70
Gambar 5.14 Grafik hubungan gaya dengan jarak pada sudut 30°	71
Gambar 5.15 Grafik hubungan gaya dengan jarak pada sudut 45°	71
Gambar 5.16 Grafik hubungan gaya dengan jarak pada sudut 15°, 30° dan 45°	72
Gambar 5.17 Grafik hubungan energi regangan dengan jarak pada sudut 15°	73

Gambar 5.18 Grafik hubungan energi regangan dengan jarak
pada sudut 30⁰ 73

Gambar 5.19 Grafik hubungan energi regangan dengan jarak
pada sudut 45⁰ 74

Gambar 5.20 Grafik hubungan energi regangan dengan jarak
pada sudut 15⁰, 30⁰ dan 45⁰ 75

Gambar 5.21 Grafik tegangan-regangan rangka sudut 15⁰..... 75

Gambar 5.22 Grafik tegangan-regangan rangka sudut 30⁰..... 76

Gambar 5.23 Grafik tegangan-regangan rangka sudut 45⁰..... 76

DAFTAR TABEL

Tabel 5.1 Data Hasil Eksperimen.....	60
Tabel 5.2 Gaya yang terjadi pada sudut 15^0	61
Tabel 5.3 Tegangan yang terjadi pada sudut 15^0	62
Tabel 5.4 Energi regangan yang terjadi pada sudut 15^0	63
Tabel 5.5 Gaya yang terjadi pada sudut 30^0	64
Tabel 5.6 Tegangan yang terjadi pada sudut 30^0	65
Tabel 5.7 Energi Regangan yang terjadi pada sudut 30^0	66
Tabel 5.8 Gaya yang terjadi pada Sudut 45^0	66
Tabel 5.9 Tegangan yang terjadi pada Sudut 45^0	68
Tabel 5.11 Beban kritis secara teori dan beban kritis dengan eksperimen	69
Tabel 5.12. tegangan simulasi dan eksperimen	77

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Konstruksi Kendaraan

1.1.1 Bagian Kontruksi Kendaraan

Sampai saat ini, bodi kendaraan masih didominasi oleh komponen berasal dari plat besi dengan ketebalan 0,6 sampai 0,9 mm. Perkembangan bodi melalui teknologi komponen bodi dengan bahan plastik dan fiber belum bisa sepopuler plat, namun demikian beberapa komponen bodi yang memiliki komponen utama plat, kadang juga memiliki komponen plastik, fiber bahkan serat karbon. Konstruksi dari bodi kendaraan dibagi menjadi beberapa bagian, diantaranya adalah:

1. Konstruksi Luar Bagian ini merupakan tempat menempelnya berbagai macam panel dan dapat diumpamakan sebagai kulit dalam tubuh kita. Bagian ini terdiri dari beberapa panel-panel yang disatukan dengan beberapa jenis sambungan dan dapat terlihat secara langsung dari luar, misalnya bumper, engine hood, pintu-pintu, *sunroof*, *roof head lining*, *fender*, kaca, *boot lid/ deck lid*, lampulampu *radiator grill*, dan lain sebagainya.
2. Konstruksi Dalam Bagian ini terdiri dari komponen-komponen yang ada di dalam bodi kendaraan, penguat-penguat dan panel-panel yang digunakan untuk menguatkan bodi kendaraan
3. Lantai (*Under Body*) Lantai biasanya terdiri dari beberapa komponen kecil yang dilas secara bersama-sama menjadi satu unit lantai. Semua panel-panel lantai memiliki penguat pada bagian bawah. Bentuk dari lantai tidaklah rata, disesuaikan dengan tujuan masing-masing, untuk tempat roda, sebagai

ruang komponen kendaraan, tempat kaki penumpang, tempat dudukan komponen bodi yang lain, aspek aerodinamis, aspek estetika, aspek ergonomi dan lain sebagainya. Pada tipe komposit biasanya rata dan terpisah dengan *casis*, sedangkan pada tipe integral menyatu dengan *casis* dan biasanya tidak rata.

4. *Engine Hood* *Engine hood* merupakan bagian bodi kendaraan yang menutupi komponen mesin. Secara umum ada 2 tipe pemasangan *hinged*, yaitu *Rear hinged (Front Opening Type)* dan *Front Hinged (Rear Opening Type)*. Pengoperasian kunci dilakukan dengan menggunakan kabel yang dapat dioperasikan dari kursi pengemudi. Pada jenis kendaraan tertentu, saluran *washer* terpasang pada *hood* ini.

Jika berdasar perkembangannya ada beberapa tipe *engine hood*. Pada awalnya, tipe gabungan, dimana pemasangan *engine hood* pada konstruksi bodi utama menggunakan baut secara keseluruhan, pada bagian atas di *cowl* dan di bagian depan dengan bodi dekat radiator. Selanjutnya, tipe piano, yaitu pemasangannya *engine hood* menggunakan engsel pada bagian tepi dan tengah.

Tipe yang ketiga disebut dengan *mono type* atau *one-piece type*, dimana engsel *engine hood* dapat terletak didepan atau belakang. Misal engsel *engine hood* di depan, maka dapat dibuka dari bagian belakang dan sebaliknya. Namun sekarang kebanyakan menggunakan tipe engsel dibelakang dan membuka dari depan. Tipe *mono type* biasanya permukaan *engine hood* lebar, untuk memudahkan dalam buka-tutupnya dilengkapi dengan pegas torsi atau penegang.

Penyetelan *engine hood* dapat dilakukan dengan menggeser posisi engsel. Perlu diperhatikan pada saat penyetelan adalah sikap hati-hati, jangan sampai merusak cat kendaraan dan penyetelan celah yang sama terhadap *fender* samping dan *cowl*, serta penyetelan pengunci *engine hood*.

Kendaraan yang menggunakan hood atau (penutup mesin) biasanya berjenis sedan dan beberapa kendaraan penumpang (seperti Toyota Kijang, Daihatsu Taruna, Mitsubishi Kuda dan lainnya). *Hood* ini dipasang ke bodi utama menggunakan *hood hinge*.

5. Fender atau wing adalah komponen kendaraan yang menutupi roda-roda. Tiap kendaraan memiliki 4 buah fender, tiap roda memiliki satu fender. Fender melindungi konstruksi suspensi dan melindungi dari kotoran dan lumpur.

Fender depan kendaraan biasanya terpasang pada konstruksi utama dari bodi menggunakan baut sehingga dapat dilepas. Untuk menambah kekuatan dan menghindari vibrasi yang terjadi, biasanya dudukan baut dibuat mati dengan bodi utama. Fender ini dapat dilakukan penyetelan ke depan dan ke belakang dengan mengatur lubang posisi baut. Penyetelan tidak bisa dilakukan terhadap fender yang sudah dipasang permanen dengan menggunakan las.

Pada fender depan biasanya terpasang lampu utama dan lampu samping atau sein. Terkadang terdapat trim, hiasan atau chrom, terpasang pada bagian fender sebagai pemanis yang dapat dibongkar pasang dengan mudah karena hanya menggunakan klip.

Sedangkan konstruksi fender bagian belakang agak berbeda susunannya. Memang ada beberapa kendaraan yang memiliki fender belakang dapat dilepas, akan tetapi kebanyakan fender belakang menyatu dengan bodi bagian dalam dengan sistem pengelasan, sehingga tidak dapat dilepas atau dilakukan penyetelan. Pengelasan dengan bodi bagian bawah dilakukan secara penuh, sehingga dapat mencegah kotoran yang masuk keatas diantara konstruksi luar dan bodi utama.

6. *Cowl* dan *Dash Panel* *Cowl* merupakan panel yang terdapat pada bagian depan kendaraan sebagai pemisah antara ruang mesin

dan ruang penumpang serta biasanya terbentuk dari gabungan panel-panel kecil. *Cowl* bagian atas dan bagian samping biasanya disambung menggunakan las menjadi satu kesatuan. Ada beberapa kendaraan yang menerapkan kerangka kaca pada bagian *cowl* ini. Kadang engsel pintu pun dapat diletakkan pada *cowl*.

7. Atap (*roof panel*) Atap merupakan bagian bodi yang paling besar dibanding bagian lain, dan memiliki konstruksi yang paling sederhana. Biasanya *roof* menggunakan bahan lembaran plat besi. Ada beberapa jenis atap, atap sampai pada atas kaca depan, atap sampai kaca belakang, ada atap sampai belakang dan tersambung dengan *quarter panel*.

Kebanyakan atap memiliki penguat dari plat tipis menyilang secara beraturan yang berada didalam *roof*. Penguat ini biasanya disatukan dengan las dan merupakan bagian untuk memegang kawat untuk pemasangan roof head lining.

8. Bodi Belakang (*Quarter Panel*) Komponen ini biasanya menyatu dengan sayap belakang, dan memiliki konstruksi luar dan dalam. Konstruksi luar menekuk dan disatukan dengan konstruksi dalam dengan las dan baut. Pada bagian ini berhubungan dengan konstruksi pintu bagian belakang dan konstruksi kursi belakang.
9. Pillar Tengah Pilar tengah merupakan penopang bagian tengah dan samping dari atap. Oleh karena itu, konstruksi ini haruslah kuat. Pada pillar tengah ini juga berfungsi sebagaiudukan engsel pintu belakang danudukan pengunci pintu depan. Beberapa pabrik membuat pillar lebar dan terlihat dari luar, tetapi juga kadang tidak terlihat dari luar. Konstruksi pillar tengah biasanya tidak beraturan, menyesuaikan bentuk dari pintu saat terbuka, dan bentuk tidak beraturan tersebut menyebabkan konstruksi ini kuat dan kokoh.

10. Pintu-pintu Berbagai macam tipe pintu yang digunakan dalam kendaraan. Namun pada dasarnya, pintu dibuat dari dua panel utama, panel luar dan panel dalam, terbuat dari plat baja. Pintu kendaraan memiliki kekuatan yang berasal dari panel dalam yang memiliki tekukan dan lekukan (dipres) sehingga ketika tepinya disatukan dengan panel luar dan menjadi satu kesatuan, maka konstruksi ini akan kuat.

Panel dalam terdapat lubang, celah dan sebagainya, misal untuk pemasangan trim, pemasangan regulator kaca dan pengunci dalam dan handel dalam. Bagian atas dari pintu terdapat bidang luasan yang ditutup dengan kaca, yang telah disiapkan dengan alurnya serta karet perapatnya, sehingga saat ditutup maka akan melindungi dari air hujan, debu dan kotoran.

11. *Deck Lid* Merupakan komponen pintu sebagai jalan keluar masuk barang yang terletak di belakang kendaraan. Komponen ini juga terdiri dari 2 panel utama, yaitu panel luar dan dalam yang disatukan menjadi satu dengan las. Beberapa pabrik menggunakan handel pada bagian luar untuk membuka *deck lid*, namun ada yang tidak dilengkapi dengan pembuka bagian luar, tetapi dapat dioperasikan oleh pengemudi karena menggunakan kabel.

1.1.2 Teknologi Rangka

Teknologi di bidang *engineering* dan rekayasa rancang bangun mesin mengharuskan desain yang *optimal* pada rangka automobil dan kendaraan bermotor sehingga memberikan jaminan kenyamanan dan keamanan bagi pengendara. Prinsip utama dari desain dan pembuatan rangka adalah kokoh, ringan, dan anti karat maka tidak mengherankan jika banyak industri automobil yang melirik teknologi pesawat terbang untuk ditransfer ke dalam teknologi automobil.

Rangka mobil biasanya terbuat dari batang besi *rectangular* berlubang dengan ketebalan plat $\pm 6,4 \text{ mm} - 10 \text{ mm}$. Rangka mobil sengaja dibuat *rectangular* berlubang karena dengan bentuk seperti ini kekuatannya bertambah dan energi yang terjadi akibat tabrakan (*impact*) akan terserap habis. Salah satu integrasi teknologi bahan pesawat kedalam teknologi rangka (*casis*) adalah penggunaan bahan Alumunium (Al) dengan grade 5754-0, Casting A356-T6 dan Extrusion 6061-T6 dan *mild steel* dipakai untuk rangka secara torsional adalah 9000 Nm/derajat dan tekukan 7800 Nm/derajat (Majalah Mobil Motor Edisi 01/xxx/15 – 28 Januari 2001: 9 – 10)

Rangka mobil yang didesain tidak hanya kokoh, ringan dan mampu menyerap energi tumbukan (*impact*), tetapi juga harus memiliki karakteristik elastisitas yang baik. Dari sifat tersebut maka akan mempengaruhi kerja *engine* karena apabila mobil ringan maka kerja yang dikeluarkan kecil sehingga bahan bakar hemat (ringan = kerja kecil = bahan bakar sedikit).

Tantangan tersebut menuntut para perencana struktur kendaraan untuk menggunakan dan mengembangkan metoda perancangan serta analisa yang modern berbasis komputer. Metode *numeric* yang banyak digunakan pada saat ini adalah Metoda Elemen Hingga (*Finite Element Methods*), penerapan metode ini banyak digunakan oleh para ahli diberbagai kasus antara lain: Siswanto. W.A (2000), menganalisa tentang *Tooling Design Optomisation For Multistage Sheet Metal Forming*, Riyadi (2003) yang melakukan optimasi rangka *bus Mercedes Benz*, Chuzaironi (2003) menghitung frekuensi alami *bus Mercedes Benz*.

Penulis menggunakan Metoda Elemen Hingga untuk menganalisa prototipe eksperimen Fenomena *Collapse and Buckling* pada Rangka Penguat Bodi Mobil dengan bentuk *rectangular hole*

dari bahan mild steel dengan variasi sudut rangka dengan arah gaya aksial.

Apabila struktur rangka diberikan gaya sesuai dengan kondisi pembebanan sesungguhnya, maka di sekitar daerah tertentu akan terjadi konsentrasi tegangan. Hal ini merupakan fenomena biasa yang terjadi di suatu struktur.

Pengaruh pemusatan tegangan yang terjadi pada daerah struktur rangka sangat menarik untuk dianalisis karena tegangan tersebut sangat berpengaruh untuk terjadinya *collapse*.

Dengan hadirnya program abakus/eksplisit masalah diatas dapat didekati penyelesaiannya, karena program ini ideal untuk problem tersebut yang akan menjadi pembanding (*comparison*) dengan eksperimen.

BAB II

FRAME CHASIS

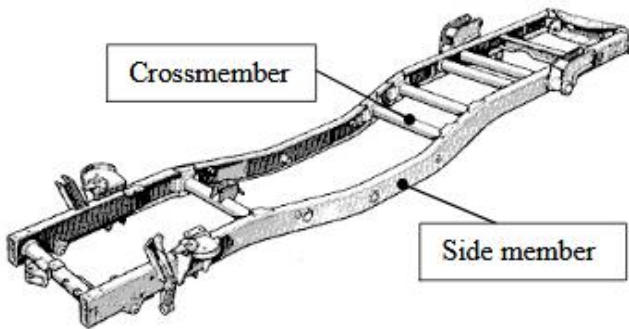
2.1. *Frame Chassis*

Sasis atau *frame chassis* atau *frame assy* dibidang otomotif adalah sebuah rangka pada kendaraan yang berfungsi menopang seluruh komponen kendaraan, dan menjadi dasar bagi sebuah kendaraan. Fungsi lain dari sasis adalah mentransfer beban vertikal dan lateral, yang disebabkan oleh beban muatan pada kendaraan yang kemudian diteruskan ke suspensi dan dua sumbu roda. Berdasarkan konstruksi menempelnya bodi pada sasis atau rangka, sasis di bedakan menjadi dua konstruksi kendaraan yaitu: konstruksi *composite* (terpisah) dan konstruksi *monocoque* (menyatu), berikut adalah beberapa tipe dari sasis.

2.1.1. *Ladder Frame Design*

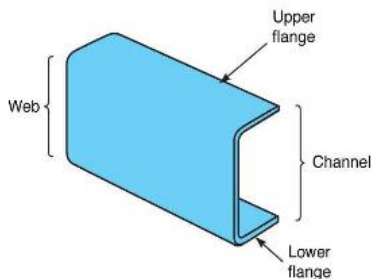
Ladder frame atau *frame* berbentuk tangga adalah model paling sederhana dan paling tua yang masih dan banyak digunakan pada konstruksi kendaraan moderen. *Frame* tipe ini diadaptasi dari kereta kuda yang dapat mengangkat dan menahan berat dari beban, *frame* ini terdiri dari dua buah batang rangka inti memanjang sepanjang kendaraan dan dihubungkan dengan bagian yang melintang yaitu *crossmember* dan *reinforcement* sebagai penguat. Pada sasis model ini rangka terpisah dengan bodi sehingga antara sasis dan bodi kendaraan dapat dilepas. Karakter sasis ini adalah dapat mereduksi getaran akibat jalan yang tidak rata, karena adanya bantalan yaitu *frame* tersebut. Dari sisi desain juga lebih sederhana dan bodi kendaraan dapat diubah atau divariasi dengan sasis yang

sama. Sasis pada kendaraan komersil sebagian besar menggunakan jenis sasis ini, begitu juga sasis FE74 long Mitsubishi juga termasuk jenis *ladder frame*.



Gambar 2.1 *ladder frame chassis*

Side member pada sasis tipe *ladder frame* ini sering menggunakan channel dengan bentuk C (*Open channel section*), karena sangat baik dalam hal kekuatan lentur dan kekakuan (*Bending strength & stiffness*). Pada area *flange* adalah area dimana terdistribusinya momen inersia yang terjadi pada kendaraan. Bentuk C pada *side member* memudahkan akses tersambung atau menyatunya *bracket*, *crossmember* dan komponen lain dalam hal desain sasis secara keseluruhan.



Gambar 2.2 *C Channel side member*

2.1.2. Backbone Design

Sasis dengan konsep dasar menghubungkan stuktur depan dan belakang kendaraan dengan sebuah rangka inti, rangka ini yang menopang semua beban kendaraan dan lengan yang menonjol sebagai pemegang bodi. Konstruksi rangka model ini memungkinkan titik pusat berat kendaraan dibuat lebih rendah.



Gambar 2.3 *Backbone design chassis*

2.1.3. Space Frame Design

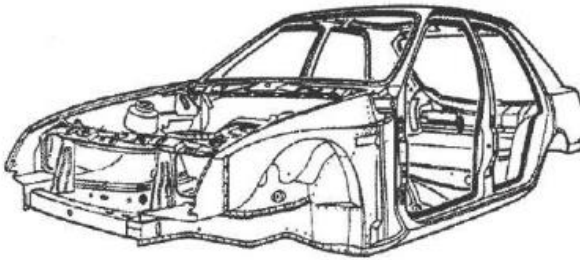
Dianggap sebagai salah satu metode terbaik dimana sangat baik dalam segi ketahanan terhadap torsi, menahan beban, dan ketahanan terhadap *impact*. Desain ini sering diaplikasikan pada kendaraan kompetisi, dan kendaraan *sport*. Berbentuk seperti halnya jaring dengan pola segitiga untuk mendistribusikan seluruh beban kearah aksial sehingga beban tidak terkonsentrasi pada satu bagian sasis saja.



Gambar 2.4 *Space frame chassis*

2.1.4. Monocoque Frame Design

Rangka atau konstruksi bodi jenis ini menggunakan prinsip kulit telur dimana bodi dan rangka tersusun menjadi satu kesatuan yang utuh sehingga semua beban terbagi merata pada semua bagian kulit, pertautan antara bodi dengan rangka menggunakan las. Kendaraan yang menggunakan rangka jenis ini bentuknya dapat menjadi lebih rendah dibanding dengan tipe terpisah, sehingga titik berat kendaraan juga rendah yang menjadikan kendaraan lebih stabil.



Gambar 2.5 *Monocoque frame design*

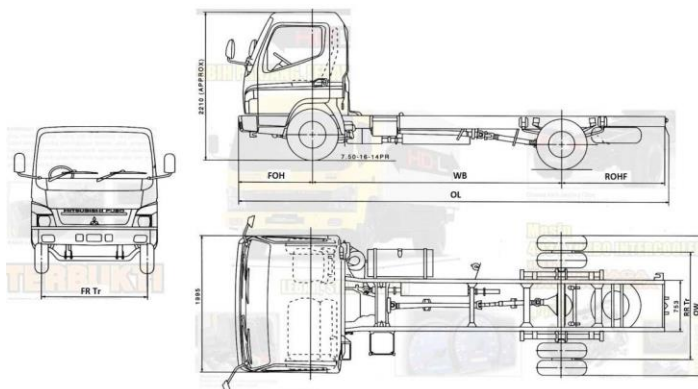
2.2. Sasis FE 74 Mitsubishi

Sasis FE 74 *long* adalah pengembangan dari sasis FE 74, kendaraan truk yang menggunakan sasis FE 74 adalah jenis kendaraan niaga mitsubishi *new colt diesel* model FE 74 S dan FE 74 HD 125 PS. Spesifikasi teknis truk FE 74 terdapat pada halaman lampiran.

COLT DIESEL
TURBO INTERCOOLER



Gambar 2.6 truk mitsubishi FE 74



Gambar 2.7 Spesifikasi unit FE 74

Keterangan:

WB = *Wheel Base*, Jarak sumbu roda (mm)

OL = *Overall Length*, Panjang total (mm)

OW = *Overall Width*, Lebar total (mm)

OH = *Overall Hight*, Tinggi total (mm)

FR Tr = Lebar jejak depan (mm)

RR Tr = Lebar jejak belakang (mm)

FOH = *Front Overhang*, Julur depan (mm)

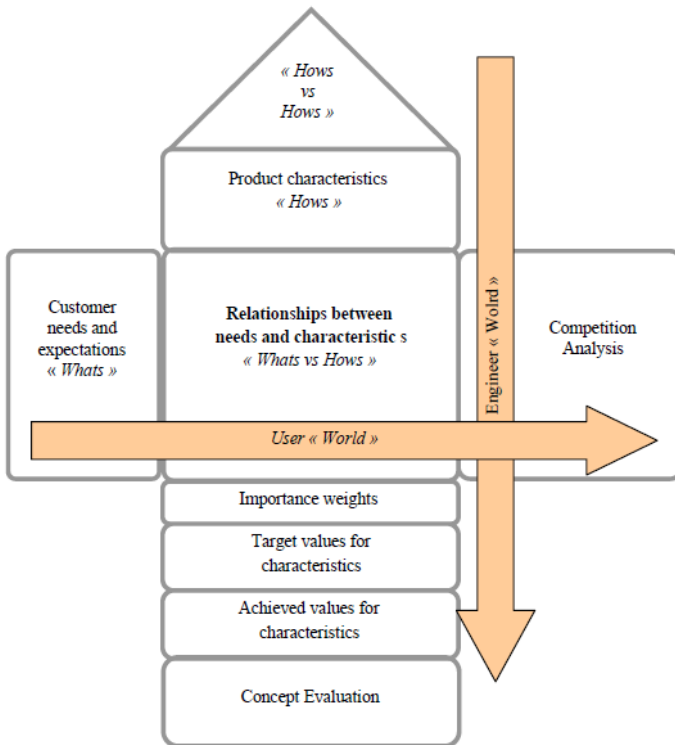
ROHF = *Rear Overhang*, Julur belakang (mm)

2.3. Metode Analisa Perancangan Produk

Analisa kebutuhan mencakup pekerjaan penentuan kebutuhan atau kondisi yang harus dipenuhi dalam suatu produk baru atau perubahan produk. Menurut Morrison, kebutuhan (*need*) adalah kesenjangan antara apa yang diharapkan dan kondisi yang sebenarnya, sedangkan analisa kebutuhan adalah alat untuk mengidentifikasi masalah guna menentukan tindakan yang tepat. *Quality function deployment (QFD)* dikembangkan dengan fokus utama yaitu pemenuhan harapan dan kebutuhan pelanggan yang mengacu pada suara pelanggan, sehingga menjamin produk yang memasuki tahap produksi benar-benar sesuai dengan keinginan pelanggan tidak berlebihan dan tidak kurang dari segi fungsi dan desain.

Menurut Cohen (1995), QFD adalah sebuah metode yang dipakai untuk mengembangkan dan merencanakan produk agar tim pengembang dapat menspesifikasi secara rinci kebutuhan dan keinginan pelanggan. Menurut Ermer (1995), QFD adalah sebuah metode perbaikan kualitas yang didasarkan pada pencarian input secara langsung dari konsumen untuk selanjutnya dipikirkan bagaimana cara memenuhi input tersebut. Dengan QFD pelanggan

dilibatkan sedini mungkin, karena meskipun produk yang dihasilkan sesempurna mungkin tetapi pelanggan tidak menginginkan atau membutuhkannya maka pelanggan tidak akan puas dengan produk tersebut. Langkah-langkah dalam metode QFD meliputi 4 proses utama, yaitu *product planning*, *design planning*, *process planning*, dan *production planning*. Fase pertama adalah tahap perencanaan produk (*House of Quality*) pada fase ini suara pelanggan menjadi acuan dan diterjemahkan menjadi rencana dari karakteristik produk. Fase kedua adalah tahap perencanaan produk (*Part Deployment*) Persyaratan desain dari output *house of quality* dibawa ke langkah selanjutnya untuk menentukan rancangan bentuk atau desain sesuai karakteristik. Fase ketiga adalah tahap perancangan proses (*Process Deployment*) Proses produksi ditentukan sesuai tingkat kualitas yang ditetapkan pada fase sebelumnya. Fase terakhir adalah tahap perancangan produksi (*Manufacturing / Production Planning*) pada fase ini dihasilkan *prototype*. Analogi yang paling sering digunakan untuk menggambarkan struktur QFD adalah suatu matriks yang berbentuk rumah. Istilah yang sering digunakan yaitu *House of Quality* yang digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.8 *House of Quality*

QFD adalah matriks yang digunakan untuk menunjukkan hubungan secara langsung antara kebutuhan dan keinginan pelanggan dengan spesifikasi teknis dari produk atau jasa yang dihasilkan. Pada kolom kiri (*Customer needs and expectations*) adalah data kebutuhan dan harapan pelanggan dari suatu produk, data tersebut merupakan inputan dalam HoQ. Kemudian pada kolom langit-langit (*Product Characteristics*) adalah susunan karakteristik teknik atau persyaratan teknik seperti apa yang dapat mempengaruhi satu atau lebih persyaratan pelanggan. Pada bagian tengah rumah adalah kolom dimana dibandingkan persyaratan pelanggan dengan persyaratan teknik dan ditentukan hubungan masing-masing. Pada bagian atap adalah matriks hubungan antar

persyaratan teknik, dengan tujuan mengetahui persyaratan teknik mana saja yang saling mendukung dan saling bertentangan. Terakhir pada bagian bawah merupakan daftar prioritas persyaratan proses produksi.

2.4. Metode Finite Element Analysis (FEA)

Metode FEA digunakan dengan tujuan mengurangi biaya pengujian *prototype* suatu produk secara eksperimen. Istilah *finite element analysis* atau metode elemen hingga muncul pada tahun 1960, yang kemudian diakui sebagai cara yang efektif sehingga menjadi bidang pengkajian yang terkemuka di kalangan akademisi. Metode ini tidak hanya diterapkan dalam bidang aliran fluida, perpindahan kalor, medan magnet dan lainnya. Dalam bidang struktur, metode ini telah dikembangkan untuk menyelesaikan persoalan statik, dinamik, linier ataupun non linier. Metode *finite element analysis* adalah sebuah metode penyelesaian numerik yang menggunakan pendekatan dengan membagi-bagi (diskritasi) benda yang akan dianalisa menjadi bentuk elemen-elemen yang berhingga dan saling berkaitan. *Software* MSC FEA Package (Patran dan Nastran) adalah program paket yang dapat memodelkan elemen hingga, untuk menyelesaikan masalah yang berhubungan dengan mekanika, Secara umum metode penyelesaian FEA menggunakan MSC FEA dapat dibagi mejadi tiga langkah:

1. *Processing* (Pendefinisian masalah), pada langkah ini desainer membuat model 3D data dari struktur atau benda yang akan dianalisa, dapat dibuat di *software* Patran, dapat pula mengimpor data dari *software* CAD seperti *Solid Works* sehingga lebih mudah dalam menggambar model yang rumit. Kemudian model tersebut dibagi-bagi menjadi bagian kecil berupa elemen, proses ini disebut juga sebagai proses *meshing*. Elemen-elemen tadi

dihubungkan dengan titik diskritisasi yang disebut *node*, *node* tertentu akan ditetapkan sebagai bagian yang kaku (*fix displacement*) dan *node* lain didefinisikan sebagai bagian yang terkena pembebanan (*load*). Pada proses ini juga didefinisikan sifat material yang digunakan seperti berat jenis, modulus elastisitas dan poisson rasio. Semua proses ini dikerjakan pada *software* Patran.

2. *Analysis*, Pada tahap ini seluruh data yang telah diinput pada langkah *processing* sebelumnya akan digunakan sebagai input pada kode elemen hingga untuk membangun dan menyelesaikan menggunakan sistem persamaan aljabar linier atau non linier.
3. *Post Processing*, adalah langkah akhir dari tahapan penggunaan *software* MSC FEA, tahap ini menampilkan hasil akhir analisa numerik dengan tampilan data *displacement* dan *stress* maksimum. data yang ditampilkan adalah grafis dengan kontur warna yang berdegradasi yang menggambarkan tingkatan tegangan yang terjadi pada model geometri.

2.4.1. Momen dan Gaya

Bila jumlah gaya yang bekerja pada suatu partikel sama dengan nol, maka partikel tersebut akan tetap diam (jika mula-mula diam). atau akan bergerak dengan kecepatan tetap $\sum F=0$ (hukum newton1) Gaya adalah hasil dari beban yang bekerja pada struktur, Gaya dapat dirumuskan sebagai berikut : $F = m.a$

Dimana : F = gaya (Newton)

m = massa (Kg)

a = percepatan gravitasi (m/s)

Gaya aksi-reaksi dapat dicontohkan dengan seseorang yang memegang batang kayu dengan posisi tegak lurus (vertikal) yang beratnya 5kgf, agar tangan dapat menahan kayu maka: tangan memberikan gaya reaksi kearah atas sebesar 5 kgf atau sama dengan gaya aksi yang dilakukan kayu ke tangan. Jadi bila suatu benda melakukan aksi gaya terhadap benda lain, maka benda tersebut akan menerima reaksi yang sama besar dengan arah yang berlawanan

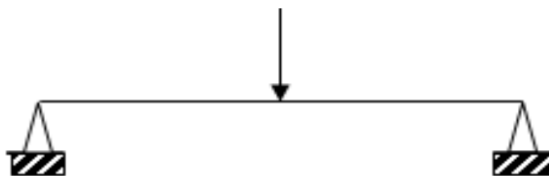
$$F \text{ aksi} = - F \text{ reaksi (hukum newton 3)}$$

Momen dapat pula dicontohkan dengan analogi saat seseorang memegang kayu dengan posisi horizontal dengan berat yang sama 5kgf, maka akan terasa lebih berat bila dibandingkan dengan posisi tegak lurus. Keadaan tersebut disebabkan karena tangan menahan berat kayu sebesar 5kgf atau F dan momen sebesar F dikalikan jarak titik berat kayu sampai tangan.

2.4.2. Beban

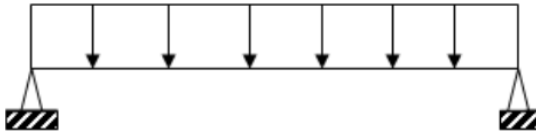
Pembebanan yang bekerja pada struktur dibedakan menjadi dua:

1. Beban terpusat, yaitu beban yang bekerja pada luasan yang kecil, dan untuk memudahkan perhitungan luasan kecil tadi dianggap sebagai titik, penggambarannya dapat dilihat pada gambar



Gambar 2.9 Beban terpusat

2. Beban merata, yaitu beban yang bekerja merata pada seluruh luasan permukaan struktur,



Gambar 2.10 Beban merata

2.4.3. Tegangan dan Kekuatan Bahan

Jika sebuah batang baja dengan jenis material ST37 dijepit pada satu sisi, dan ditarik dengan gaya F , berapa besar gaya F yang menyebabkan batang tersebut putus? material ST37 berarti bahwa kekuatan tarik baja (*S/tensile strength*) tersebut adalah 37 kgf/mm². Jika tegangan yang terjadi pada material lebih besar dari 37 kgf/mm², maka batang tersebut akan putus. Tegangan adalah: Gaya per satuan luas penampang.

$$\sigma = F / A \text{ atau } F = \sigma A$$

Dimana :

σ = tegangan

F = gaya (newton)

A = luas penampang (mm²)

Jika batang tersebut berbentuk silinder dengan diameter 10mm, maka luas penampang batang tersebut adalah 78.5 mm² ($\pi D^2/4$). Batang akan putus jika σ (tegangan yang terjadi) = S (kekuatan material). Gaya F yang menyebabkan silinder tersebut putus adalah:

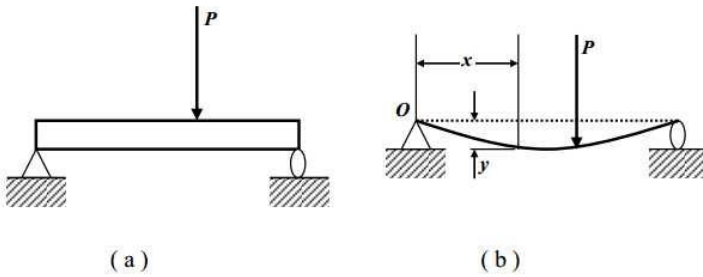
$$\begin{aligned}
 F &= \sigma \cdot A \\
 &= S \cdot A \\
 &= 37 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \times 78,54 \text{ mm}^2 \\
 F &= 2906 \text{ Kgf} = 2,9 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Pada kasus ini tegangan yang terjadi arahnya tegak lurus terhadap penampang, sehingga tegangan tersebut disebut tegangan normal, notasi tegangan normal adalah σ (baca: sigma), tegangan normal yang melebihi kekuatan tarik material mengakibatkan benda akan rusak (patah atau putus). Kemudian pada kasus berikutnya terdapat dua pelat yang disambung dengan paku keling yang terbuat dari material ST37. Pelat tersebut ditarik dengan gaya F searah pelat. Tentukan gaya F yang menyebabkan paku keling patah? Pada paku keling akan timbul tegangan geser τ (baca: tau), besarnya: $\tau = F/A$ atau $F = \tau \cdot A$. Paku keling akan putus apabila tegangan geser yang terjadi lebih besar dari kekuatan geser material, dimana kekuatan geser material = kekuatan tarik. Dengan persamaan $F = \tau \cdot A$, maka didapat bahwa gaya tarik yang menyebabkan material putus adalah 1453 Kgf atau 1,5 ton.

2.4.4. Defleksi

Defleksi terjadi akibat adanya gaya atau beban pada struktur, permukaan atas dari struktur akan mengalami tekanan dan permukaan bawah akan mengalami tegangan tarik, kegagalan yang terjadi adalah ketika struktur mengalami patah pada bagian bawah yang disebabkan tidak mampu menahan tegangan tarik yang terjadi. Defleksi diukur dari titik awal sebelum pembebanan ke posisi setelah terjadi deformasi. pada gambar 2.11 jarak y adalah defleksi batang. Salah satu faktor baik tidaknya suatu struktur adalah nilai defleksi, suatu struktur yang baik tidak hanya mampu menahan

beban yang diterima, namun juga mampu mengatasi terjadinya defleksi sampai batas tertentu.



Gambar 2.11 Defleksi yang terjadi pada struktur

BAB III

IMPACT DAN BUCKLING

3.1 Pengertian

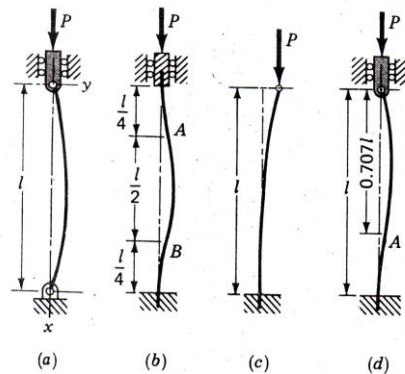
Kejadian yang sering terjadi pada mobil adalah tabrakan/tumbukan (*impact*) dengan kendaraan atau mobil lain dan dengan sesuatu benda yang menyebabkan deformasi, kerusakan pada mobil atau kendaraan terutama bagian bodi dan rangka (*cassis*). Untuk itu diperlukan desain rangka yang mampu menyerap energi pada saat terjadi tabrakan (*impact*) dengan benda lain (Honda R&D, 2004).

Menurut Bourke (2003) Pengaruh *impact* dan *buckling* pada material yang memiliki sifat kekakuan sangat sulit untuk dianalisa karena terjadi kondisi yang sangat kompleks pada saat terjadi kontak antara material logam satu dengan yang lain, diantaranya adalah deformasi dan pergeseran (*friction*) molekul logam.

Apabila struktur rangka diberikan gaya sesuai dengan kondisi pembebanan sesungguhnya, maka di sekitar daerah tertentu akan terjadi konsentrasi tegangan. Hal ini merupakan fenomena biasa yang terjadi disuatu struktur (Timoshenko, 1986).

Shigley dan Mitchell (1983) menyatakan bahwa suatu batang pendek yang dibebani gaya tekan murni oleh gaya P yang bekerja sepanjang sumbu tengah akan memendek, sesuai dengan hukum Hooke, sampai tegangan mencapai batas elastis dari bahan. Kalau P masih terus dinaikkan, bahan akan menonjol dan terdesak menjadi cakra yang datar atau retak. Ketika suatu batang panjang, kecil, dan

lurus dibebani gaya tekan murni oleh gaya P yang bekerja sepanjang sumbu batang, sementara P terus naik dari nol maka batang akan memendek mengikuti hukum Hooke. Hal ini akan terjadi jika batang tersebut cukup panjang, sementara P terus naik mendekati harga kritis yang dinyatakan dengan P_{cr} . Berkaitan dengan kondisi keseimbangan yang tidak stabil, pada titik ini setiap bengkokkan (*buckling*) kecil dari batang atau sedikit pergeseran beban atau tumpuan akan menyebabkan batang rubuh (*collapse*) karena tekukan. Untuk kriteria keamanan terdiri dari perbandingan antara beban sebenarnya dengan beban kritis. Hal ini dapat dilihat dari gambar 2.1.



Gambar 3.1. (a) kedua ujung membulat atau bersumbu; (b) kedua ujung mati; (c) satu ujung bebas dan ujung yang lain mati; (d) satu ujung bulat dan terarah dan ujung lain mati.

3.2 Teori Elastis dan Plastisitas Pelat

Pada studi dan eksperimen *Collapse and Buckling* rangka mobil perlu diperhatikan sifat mekanik yang dimiliki material antara lain kekuatan (*strength*), keliatan (*ductility*), kekerasan (*hardness*), dan kekuatan lelah (*fatigue*). Sebuah plat yang dikenai beban atau gaya akan mengalami deformasi, pada pembebanan dibawah titik luluh

deformasi akan kembali hilang hal ini disebabkan material memiliki sifat elastis. Jika beban ditingkatkan sampai melewati titik luluh maka deformasi akan terjadi secara permanen atau terjadi deformasi plastis, tetapi apabila ditingkatkan hingga melewati tegangan maksimal maka material akan mengalami patah (Timoseuko, 1986).

1. Tegangan

Tegangan adalah ketahanan material terhadap gaya luar. Tegangan diukur dalam bentuk gaya per luas, tegangan dibagi menjadi dua yaitu :

Tegangan Normal adalah Tegangan yang bekerja tegak lurus terhadap bidang luas. Secara matematis tegangan dinyatakan dengan (Timoshenko, 1986):

$$\sigma = \frac{F_a}{A} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan :

- σ = Tegangan normal (N/m²)
- F_a = Gaya (N)
- A = Luas permukaan benda (m²)

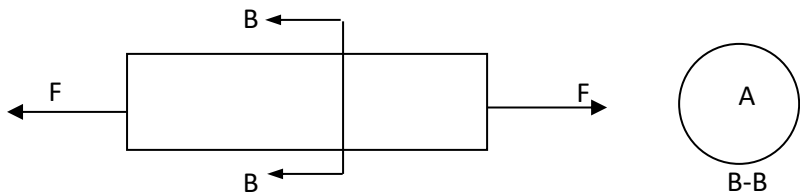
Tegangan Geser adalah Tegangan tangensial atau sejajar yang bekerja pada bidang

$$\tau = \frac{F_t}{A} \dots\dots\dots (2)$$

Dengan :

- τ = Tegangan geser (N/m²)
- F_t = Gaya Tangensial (N)
- A = Luas permukaan benda (m²)

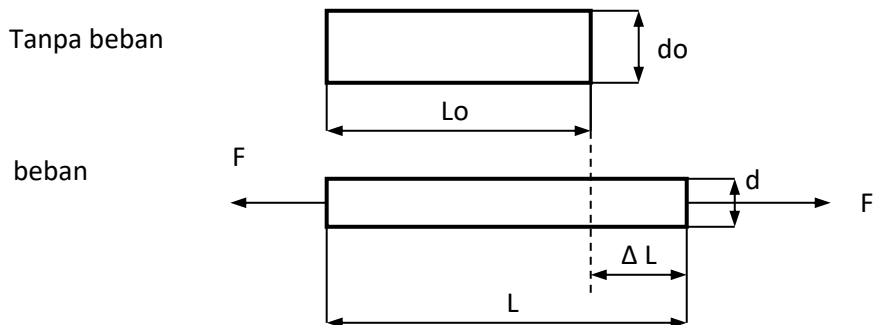
Diasumsikan bahwa tegangan adalah sama untuk setiap bagian permukaan yang membentuk permukaan total (A) sehingga tegangan didistribusikan secara seragam. Jika gaya luar atau beban diterapkan pada suatu bahan, tegangan dapat dihitung dari luas permukaan dan gaya yang bereaksi pada luas permukaan tersebut seperti pada gambar 2.2.



Gambar 3.2. Benda yang mendapat gaya

2. Regangan

Regangan adalah perubahan ukuran atau bentuk material dari ukuran semula akibat pembebanan pada material tersebut. Ilustrasi struktur yang dikenai beban teknik pada gambar 2.3.



Gambar 3.3. Batang dikenai beban tarik

$$\begin{array}{llll} \Delta L & = \delta & = L - L_o & \text{(deformasi Aksi total)} \\ \Delta d & = \delta & = d - d_o & \text{(deformasi lateral total)} \end{array}$$

Pada diagram Tegangan-Regangan dapat dilihat bahwa regangan terjadi pada sifat elastis bersifat linier sedangkan pada saat melewati batas proporsional maka regangan tidak lagi linier besarnya regangan teknik aksial adalah :

$$\bar{\epsilon} = \frac{l - l_0}{l} \dots\dots\dots (3)$$

Dengan :

$\bar{\epsilon}$ = Regangan teknik aksial

l_0 = Panjang mula-mula

l = Panjang akhir

Regangan teknik lateral :

$$\epsilon_{lat} = \frac{\Delta d}{d_0} \dots\dots\dots (4)$$

Rasio dari regangan lateral terhadap regangan aksial diberi lambang ν dikenal sebagai rasio poisson.

$$\nu = \frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{aks}} \dots\dots\dots (5)$$

Regangan aksial lebih besar dari regangan lateral sehingga rasio poisson lebih kecil dari satu.

Besarnya regangan Logaritmik:

$$\epsilon = \ln(1 + \bar{\epsilon}) \dots\dots\dots (6)$$

Hubungan tegangan dan regangan dikenal dalam diagram tegangan-regangan yang dinyatakan dalam diagram hooke :

$$\sigma = E \cdot \epsilon \dots\dots\dots (7)$$

Dengan :

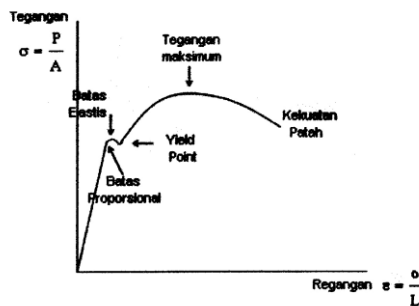
E = Modulus elastisitas bahan (N/m^2)

Sehingga dari persamaan 1 dan 3 diperoleh :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\delta/l} \dots\dots\dots (8)$$

3. Diagram tegangan - regangan dan Hukum Hooke

Diagram tegangan-regangan teknik untuk menentukan bagaimana suatu bahan akan bereaksi terhadap beban (Gambar.2.14)

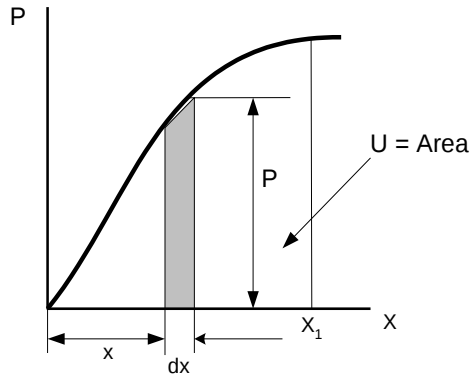


Gambar 3.4. Diagram tegangan-regangan (Timoseuko, 1986)

3.3 Metode Energi (*Energy Methode*)

1. Energi Regangan (*Strain Energy*)

Konsep energi regangan terutama digunakan dalam menentukan efek dari beban kejut (*Impact loading*) pada struktur atau komponen mesin (Beer, 1986). Penentuan rumusan energi regangan sama dengan luasan dibawah kurva tegangan – regangan pada gambar 2.15 di bawah, luasan sama dengan lebar dx dan beban P . Kerja total U ditentukan oleh perpanjangan deformasi x_1 , sehingga energi regangan bisa ditulis : $dU = P \cdot dx$

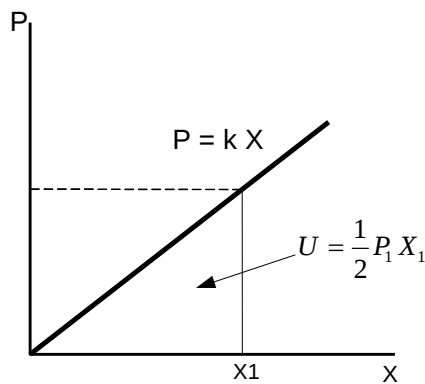


Gambar 3.5. diagram Energi Regangan

Dengan mengintegalkan luasan dibawah kurva tegangan – regangan diperoleh persamaan:

$$U = \int_0^{x_1} P dx$$

Pada kasus deformasi elastis dan linier, besarnya diagram deformasi beban secara keseluruhan bisa ditunjukkan oleh persamaan garis lurus, $P = k \cdot x$



Gambar 3.6. diagram deformasi beban

Substitusi P pada persamaan energi regangan adalah :

$$U = \int_0^{x_1} k x dx$$

$$= \frac{1}{2} k x^2$$

Dengan mensubstitusikan persamaan diatas dengan persamaan garis lurus $P_1 = k . x_1$, diperoleh persamaan energi regangan:

$$U = \frac{1}{2} P_1 x_1 \quad \dots\dots\dots (20)$$

Dimana P_1 adalah harga dari beban yang sesuai untuk deformasi x_1 .

3.4 Metoda Elemen Hingga

Metoda Elemen Hingga merupakan pendekatan terbaik yang dapat digunakan sebagai analisis numerik suatu kontinum. Metoda ini menjadi suatu solusi permasalahan yang sering dijumpai dalam dunia teknik seperti perpindahan kalor, mekanika fluida, analisis struktur, mekanika benda pejal, hingga masalah getaran.

1. Konsep Dasar Metoda Elemen Hingga

Proses diskriminasi atau pembagian suatu kontinum menjadi beberapa bagian yang lebih kecil, bagian – bagian kecil ini disebut elemen hingga. Dinamakan elemen hingga karena ukuran elemen ini kecil berhingga dan umumnya mempunyai bentuk geometri yang lebih sederhana dibandingkan dengan kontinumnya (Weaver, 1993).

Dengan menggunakan metode elemen hingga jumlah derajat kebebasan kontinyu yang tidak berhingga dapat didekati dengan jumlah derajat kebebasan tertentu, sehingga pemecahannya menjadi lebih sederhana.

2. *Static Implicit Element Hingga*

Metode ini digunakan untuk simulasi numerik pada *Collapse and Buckling Respon*, karena sangat *efisien* untuk menganalisa *static* dan *quasi-static* dengan mengabaikan stabilitas dan pengaruhnya terhadap waktu *increment*.

Teknik iterasi mengikuti pengoperasian :

$$\Delta u^{i+1} = \Delta u^i + K_t^{-1} (F^i - I^i) \dots\dots\dots (26)$$

dengan :

- i = Jumlah increment
- u = Vektor perpindahan nodal
- K_t = Matrik kekuatan tegangan
- F = Gaya luar
- I = gaya dalam

Gaya dalam dicari dengan menambahkan vektor gaya dalam hitungan elemen

$$I = \sum_k I_k \dots\dots\dots (27)$$

Dengan :

$$I_k = \int B_k \cdot \sigma_k \cdot dv_k \dots\dots\dots (28)$$

Dengan :

- B_k = Matriks perubahan tegangan untuk elemen k
- σ_k = Tegangan tarik dalam vektor
- V_k = Volume elemen

3. Dinamik eksplisit Metode Elemen Hingga

Metode dinamik eksplisit digunakan untuk menyelesaikan masalah dinamik dan dapat diterapkan sebagai alternatif lain untuk menyelesaikan masalah pada *Collapse and Buckling* pada material. Metode eksplisit intinya adalah untuk menyelesaikan persamaan pada (t) waktu dengan pengintegralan waktu secara langsung menggunakan beda pusat kecepatan dan perubahan beda pusat didefinisikan sebagai (Weaver, 1987) :

$$\left\{\ddot{D}_j\right\}=\frac{1}{\Delta t^2}\left(\left\{D_{j+1}\right\}+\left\{D_{j-1}\right\}-2\left\{D_j\right\}\right) \quad \text{..... (29)}$$

$$\left\{\dot{D}\right\}=\frac{1}{2 \Delta t}\left(\left\{D_{j+1}\right\}-\left\{D_{j-1}\right\}\right) \quad \text{..... (30)}$$

Dengan :

- D = Vektor perpindahan
- D_{j+1} = Vektor kecepatan
- D_{j-1} = Vektor percepatan
- Δt = Waktu increment
- j = Jumlah iterasi

Ekstrapolasi dinamik eksplisit berisi prosedur yang menyatakan gerak pada waktu t_{i+1} dalam bentuk perpindahan kecepatan atau percepatan pada waktu tertentu :

$$\left(\frac{[M]}{\Delta t^2}+\frac{[C]}{2 \Delta t}\right)\left\{D_{j+1}\right\}=F_j-R_j-\left(\frac{[M]}{\Delta t^2}-\frac{[C]}{2 \Delta t}\right)\left\{D_{j-1}\right\}-$$

$$\left([S]-\frac{2}{\Delta t^2}[M]\right)\left\{D_j\right\} \quad \text{..... (31)}$$

Dengan :

- [M] = Matrik massa
- [C] = Matrik redaman
- [S] = Matrik kekakuan
- F_j = Vektor gaya luar dengan jumlah waktu incremen j
- R_j = Vektor gaya luar pada jumlah waktu incremen j

Eksplisit prosedur mempunyai waktu kritis, menjadi solusi numerik tidak stabil dan divergen, nilai waktu kritis adalah :

$$\Delta t = \frac{2}{\omega_n} \dots\dots\dots (32)$$

Dengan :

ω_n = Frekuensi angular terbesar dalam analisis model

3.5 Persamaan Euler

Suatu bidang yang dibebani gaya tekan murni oleh gaya P yang bekerja sepanjang sumbu tengah akan memendek sesuai dengan hukum Hooke sampai tegangan mencapai batas elastis dari bahan. Jika P masih terus dinaikkan bahan akan menonjol dan terdesak.

Jika dibayangkan suatu batang panjang dan lurus yang dibebani gaya tekan murni oleh gaya P yang lain yang bekerja sepanjang sumbu tengah batang sementara P naik dari nol, batang itu memendek mengikuti hukum Hooke seperti sebelumnya. Beban P yang naik mendekati harga kritis dinyatakan dalam P_{cr} . Pada hukum ini setiap kebengkokan kecil dari batang atau pergeseran beban atau tumpuan akan menyebabkan batang rubuh karena tekukan.

Suatu batang dikenai beban maka akan terjadi momen $M = -Py$ dimana P adalah beban dan y adalah kelengkungan batang, dengan menggunakan persamaan defleksi maka dapat ditulis.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{Py}{EI} \text{ atau } \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{Py}{EI} = 0$$

Persamaan diatas bentuknya sama dengan gerak selaras.

$$y = A \cdot \sin \lambda \cdot x + B \cdot \cos \lambda \cdot x$$

$$\text{Jika } \lambda^2 = P/(EI)$$

$$y = A \cdot \sin \sqrt{\frac{P}{EI}} \cdot x + B \cdot \cos \sqrt{\frac{P}{EI}} \cdot x$$

A dan B adalah tetapan yang ditentukan dari syarat kondisi batas, syarat tersebut adalah:

$$y_{(0)} = 0 \text{ dan } y_{(L)} = 0$$

jadi,

$$y_{(0)} = 0 = A \sin 0 + B \cos 0$$

$$B = 0$$

$$y_{(L)} = 0 = A \sin \lambda L$$

Persamaan tersebut juga dapat dipenuhi dengan mengambil $A = 0$

$$y_{(L)} = 0 = B \sin \lambda L$$

Jika $\lambda L = n \pi$, dimana $\lambda = \sqrt{P/EI}$ sehingga $\sqrt{P/(EI)} L = n\pi$

Beban kritis dapat dicari dengan persamaan diatas

$$\frac{P^2}{EI^2} L^2 = n^2 \pi^2$$

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad \Rightarrow \quad P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}$$

sehingga n dapat mengindikasikan variabel dari π yang merupakan bilangan bulat 1, 2, 3.

Persamaan diatas digunakan untuk kolom yang ujungnya dipasak. Untuk kolom yang dengan ujung dimatikan titik infleksi adalah pada A dan B berjarak $l/4$ dari masing-masing ujungnya yang mati, sedangkan jarak buckling sempurna adalah $l/2$ menggantikan l pada kondisi semua ujung dipasak sehingga bila dimasukkan ke dalam persamaan diatas diperoleh :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(L/2)^2} = \frac{4 \pi^2 EI}{L^2}$$

Jika kolom dengan satu ujung mati dan ujung yang lain dipasak titik infleksi adalah A seperti pada gambar yang jaraknya adalah 0,707 L maka :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(0.707L)^2} = \frac{2\pi^2 EI}{L^2}$$

Dapat diterangkan berbagai kondisi tersebut dengan menulis persamaan euler sebagai berikut :

$$P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad \text{atau} \quad P_{cr} = \frac{C^2 \pi^2 EI}{L^2}$$

Disini C atau N adalah sama disebut konstanta kondisi ujung dan bisa berupa salah satu dari harga teoritis 1, 2, 3 atau 4 tergantung dari cara bagaimana beban bekerja. Dalam praktek adalah sulit,

bahkan tak mungkin mengikuti mati suatu ujung sehingga faktor $C = 2$ atau 4 . Walaupun ujung tersebut dilas, beberapa defleksi akan timbul karena itu beberapa perencana tidak pernah menggunakan harga C lebih dari satu. Begitupun kalau faktor keamanan yang dipakai cukup bebas dan beban kolom diketahui setepatnya maka harga C tidak melebihi $1,2$. (Shigley E. J; Gandhi Harahap, 1994).

Setelah diketahui beban kritis P_{cr} maka dapat diturunkan persamaan untuk mencari tegangan kritis yakni tegangan rata-rata terhadap luas penampang A pada beban kritis P_{cr} persamaan tersebut adalah:

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A}$$

Dimana:

σ_{cr} = Tegangan kritis (MPa)

P_{cr} = Beban kritis (N) A = Luas penampang
(mm²)

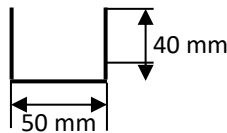
BAB IV

UJI *COLLAPSE AND BUCKLING*

4.1 Bahan Penelitian

Pengadaan bahan meliputi penentuan bahan yang digunakan untuk membuat mesin uji *collapse and buckling*, dan bahan untuk rangka yang akan diuji.

1. Bahan untuk membuat alat uji terdiri dari :
 - a. Dongkrak hidrolik dengan kekuatan 2 ton dengan pengukur tekanan (*pressure gauge*).
 - b. Rangka utama alat uji dibuat dari besi **U** dengan tebal 6 mm.



- c. Plat dengan ketebalan 10 mm dan 6 mm untuk membuat *support*.
 - d. Baja Karbon dengan ketebalan 150 mm untuk membuat *slid*.
2. Bahan untuk rangka yang diuji terdiri dari :

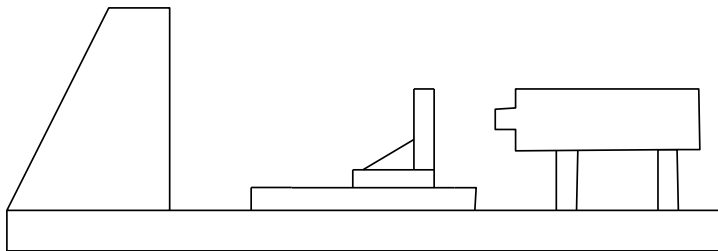
Plat besi yang digunakan adalah besi *mild steel* dengan ukuran sebagai berikut:

 - a. Ketebalan 1,2 mm dengan ukuran 500x25 mm sebanyak 6 plat.
 - b. Ketebalan 1,2 mm dengan ukuran 500x38 mm sebanyak 6 plat.

- c. Ketebalan 2 mm dengan ukuran 90x80 mm sebanyak 6 plat.

4.2 Alat Penelitian

Meliputi proses desain awal untuk menggambar alat lengkap dengan detail gambar serta pemahaman cara kerja alat agar saat proses eksperimen berlangsung sesuai dengan perencanaan yang dilakukan.

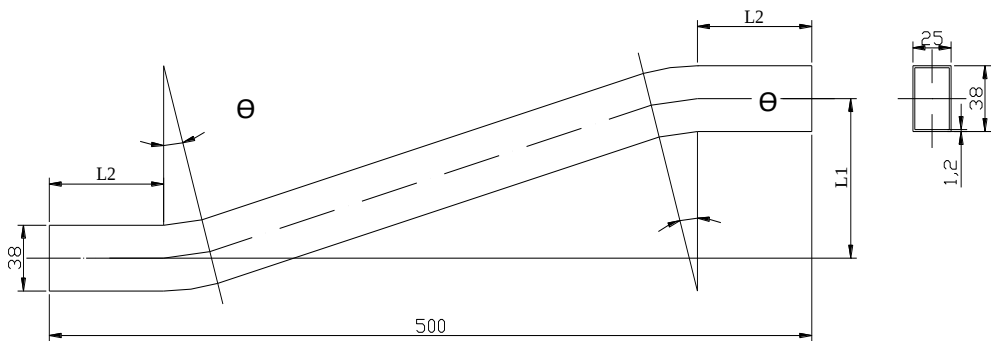


Gambar 4.1. desain alat uji

4.3 Desain Rangka

Meliputi desain rangka dengan 3 sudut berbeda (15° , 30° , dan 45°) dengan data sebagai berikut :

Rangka	Sudut, θ	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	Panjang Horisontal (mm)
1	15°	97	75	500
2	30°	158	75	500
3	45°	173	75	500



Gambar 4.2. desain rangka uji

4.4 Proses Pembuatan Alat Uji

Alat eksperimen berupa alat uji *collapse* dan *buckling* yang terdiri dari :

1. *Rangka utama* dibuat dari besi **U** ukuran 1100x200 mm yang berfungsi untuk menempatkan semua bagian dari alat uji.
2. *Slid Ekor Burung* merupakan bagian dari alat uji untuk meletakkan plat yang berfungsi untuk menempelkan rangka uji.
3. *Dongkrak Hidrolik* bagian ini berfungsi untuk menekan rangka uji yang menempel pada *plat slid ekor burung*. Dongkrak ini telah mengalami penambahan *pressure gauge* yang berfungsi untuk mengetahui tekanan yang dihasilkan dari dongkrak saat melakukan penekanan.
4. *Support* merupakan bagian dari mesin uji yang berfungsi untuk menempelkan benda uji dan sebagai penahan rangka uji saat dilakukan penekanan dengan dongkrak hidrolik.

4.5 Proses Pembuatan Rangka Uji

Rangka uji terbuat dari besi *mild steel* dengan ketebalan 1,2 mm yang didesain seperti pada gambar 3.3. Rangka uji yang kita buat ada sebanyak 3 buah. Adapun langkah-langkah dalam pembuatannya :

1. Pembuatan model rangka dengan sudut 15° , 30° , 45° .
2. Model rangka yang telah kita buat kemudian kita taruh pada lembaran plat ST37, kemudian plat yang sudah ditempel model rangka kemudian dipotong.
3. Plat yang telah kita potong tersebut kemudian kita satukan dengan las karbon pada setiap sisinya. Adapun spesifikasi dari proses pengelasan :
 - a. DC +
 - b. Amper : 60 – 80 A
 - c. Tegangan : 30 V
 - d. Diameter elektroda : 0,8 mm
4. Setelah jadi kemudian setiap kedua ujung rangka kita tempelkan plat besi dengan pengelasan. Plat ini mempunyai ketebalan 2 mm dan mempunyai ukuran 90x80 mm.

4.6 Prosedur Pelaksanaan Pengujian

Pengujian dilakukan setelah alat uji *collapse and buckling* serta rangka yang akan diuji diselesaikan pembuatannya dan juga penyiapan alat bantu lainnya yang akan digunakan dalam proses eksperimen ini. Adapun langkah pengujian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Menempelkan rangka uji dengan *support* dan plat pada *slid ekor burung* dengan cara dibaut, rangka uji harus menempel dengan

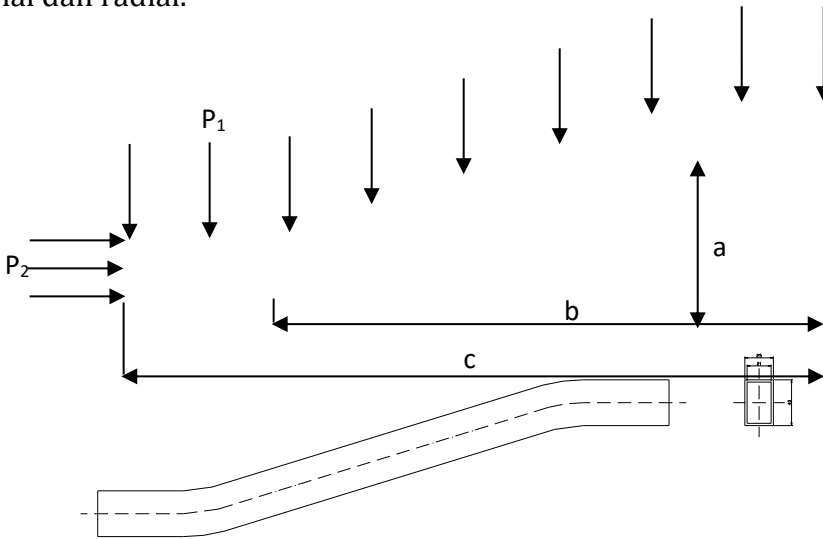
support dan *plat* secara tegak lurus sesuai dengan sudut masing-masing rangka uji (15^0 , 30^0 , 45^0).

2. Setelah rangka uji benar-benar menempel dengan tepat kemudian baut yang berfungsi untuk mengencangkan plat rangka dengan plat yang terdapat pada *slid* dilepas. Khusus untuk dua lubang dibawah hanya mur yang dilepas dan baut masih tetap menempel.
3. Dongkrak hidrolik dipompa dengan jarak yang telah ditentukan. Pada langkah ketiga ini kita harus mengamati *displacement* (jarak) dongkrak dan tekanan pada *pressure gauge* secara teliti dan cermat sehingga tidak terjadi kesalahan yang *fatal* saat pengambilan data.
4. Dongkrak hidrolik dipompa sampai rangka mengalami *collapse* (sudah terjadi tegangan maksimal).
5. Ulangi langkah-langkah diatas untuk rangka uji dengan sudut yang berbeda supaya diperoleh data yang bervariasi untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya *collapse and buckling*.

4.7 Pemodelan Pembebanan Struktur Rangka

4.7.1 Gaya yang bekerja Pada Rangka

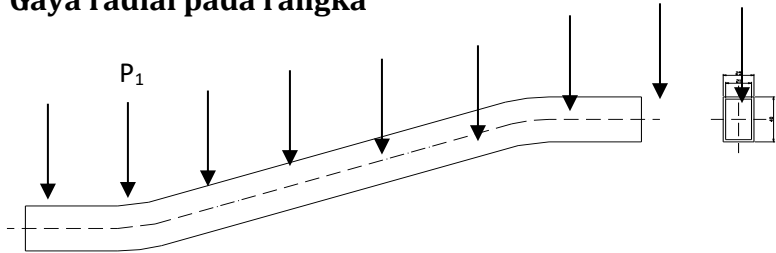
Rangka akan mengalami berbagai gaya dan momen pada saat berhenti, bergerak start, bergerak stasioner, menikung, mengerem, dan yang paling kritis adalah ketika mendapatkan benturan (*impact*). Secara garis besar rangka akan dikenai dua gaya yaitu gaya aksial dan radial.



Gambar 4.3 Pembebanan pada rangka

- P_1 = Gaya radial
- P_2 = Gaya aksial
- a = jarak kelengkungan rangka
- b = Panjang rangka

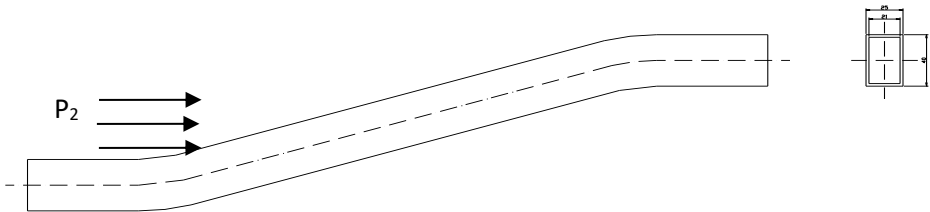
4.1.1. Gaya radial pada rangka



Gambar 4.3 Pembebanan radial pada rangka

Gaya-gaya tersebut antara lain adalah: gaya akibat beban frame bodi, beban kursi, beban kaca, beban *air conditioner*, beban plat besi penutup frame, beban mesin, dan lain-lain

4.1.2. Gaya aksial pada rangka



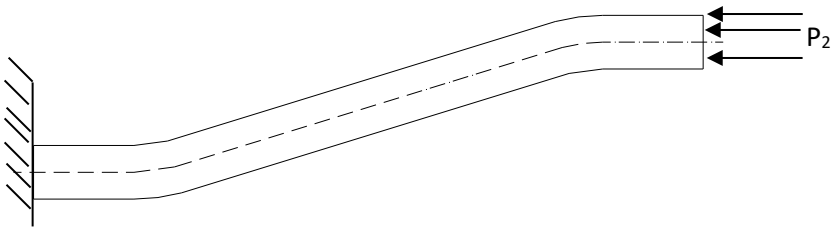
Gambar 4.4 Pembebanan aksial pada rangka

Gaya ini bekerja searah dan sejajar sumbu rangka, gaya-gaya ini cenderung dinamis dengan perubahan kecepatan yang signifikan sehingga gaya-gaya ini sering mengakibatkan *collapse* pada sturkur

rangka kendaraan bermotor. Untuk pembahasan penulisan ini dibatasi pada pembebanan yang arahnya radial. Adapun gaya-gaya yang biasa bekerja pada arah radial antara lain adalah: gaya *impact*.

4.7.2 Clamp

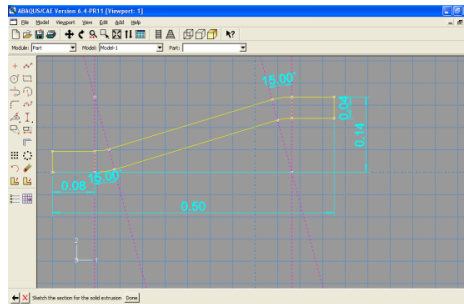
Clamp adalah suatu restrain yang diaplikasikan pada suatu permukaan dimana semua titik nodal dipermukaan tersebut diblokir pada analisa yang dilakukan. Clamp diberikan agar permukaan tidak bergerak sesuai dengan kondisi batas yang sesungguhnya pada system yang dianalisa. Clamp dilakukan pada salah satu ujung rangka, hal ini sesuai dengan kondisi rangka ketika terjadi *impact*, maka salah satu ujung rangka dianggap terkonstrain.



Gambar 4.5 Pengkonstrainan pada struktur rangka

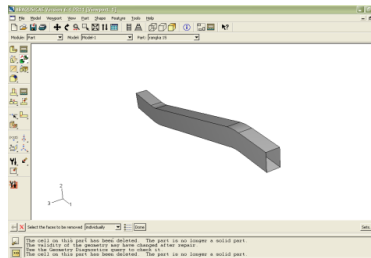
4.8 Langkah-langkah pemrograman dalam Program Simulasi Abaqus

1. Penggambaran model rangka 15°



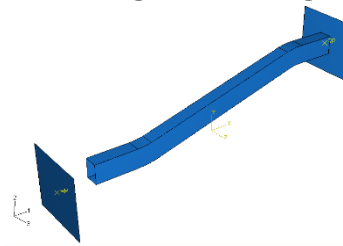
Gambar 4.6. Gambar dua dimesi dari rangka 15°

2. Realisasi Model dalam bentuk 3D yang berupa shell (Surface)



Gambar 4.7. Bentuk tiga dimensi rangka 15°

3. Assembly rangka 150 dengan benda rigid

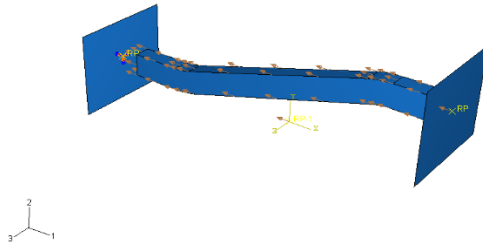


Gambar 4.9. Assembly rangka 15° dengan benda rigid

Model yang telah selesai diassemble selanjutnya model diberikan step yaitu dengan membuat set terlebih dahulu. Set yang harus dimasukan adalah:

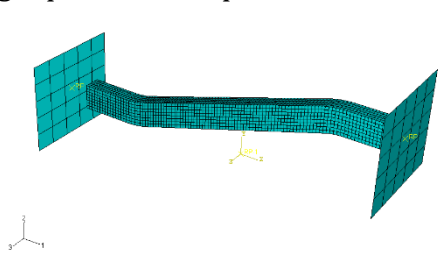
1. Rigid bawah, yaitu benda rigid yang menempel pada permukaan depan rangka.
2. Referensi point, yaitu titik referensi yang ada pada benda rigid.
3. Permukaan depan, yaitu permukaan yang menempel pada benda rigid bawah.
4. Rangka, yaitu seluruh permukaan rangka 15°.
5. Rigid atas, yaitu benda rigid yang berada tepat didepan rangka dan referensi pointnya.

Membuat *surface*, *surface* yang dibuat adalah rangka dan benda rigid. Setelah selesai buat stepnya pada inisial step, *general type* dan *dynamic Explicit*. Langkah selanjutnya adalah mendeskripsikan interaksi pada modul *interaction* yaitu dengan mengisi *property* pada *interaction* dengan tipe *contact* dan dideskripsikan sebagai *friction* 0.1 artinya bahwa pada *contact* ada gesekan sebesar 0.1. Membuat interaksi dengan mengisi step pada rangka 15° dengan tipe interaksi adalah *generalcontact (Explicit)*. Pada bagian bawah yang terdapat permukaan rangka yang menempel dengan benda rigid maka harus dikonstrain. Untuk mengkonstrain dilakukan pada modul *interaction* yaitu pada bagian *constraint*, antara benda rigid dengan permukaan bawah dikonstrain dengan tipe-tipe sedangkan titik referensi dengan benda rigid dikonstrain dengan tipe *rigid body* setelah selesai maka dilanjutkan pada modul load. Pada modul ini akan dimasukan parameter *velocity* yaitu sebesar 35 m/s pada arah x sedangkan *boundary condition* adalah *displacement/rotation* seperti ditunjukkan pada gambar dibawah.



Gambar 4.10. Rangka yang telah *velocity* dan konstrain benda rigid diberikan

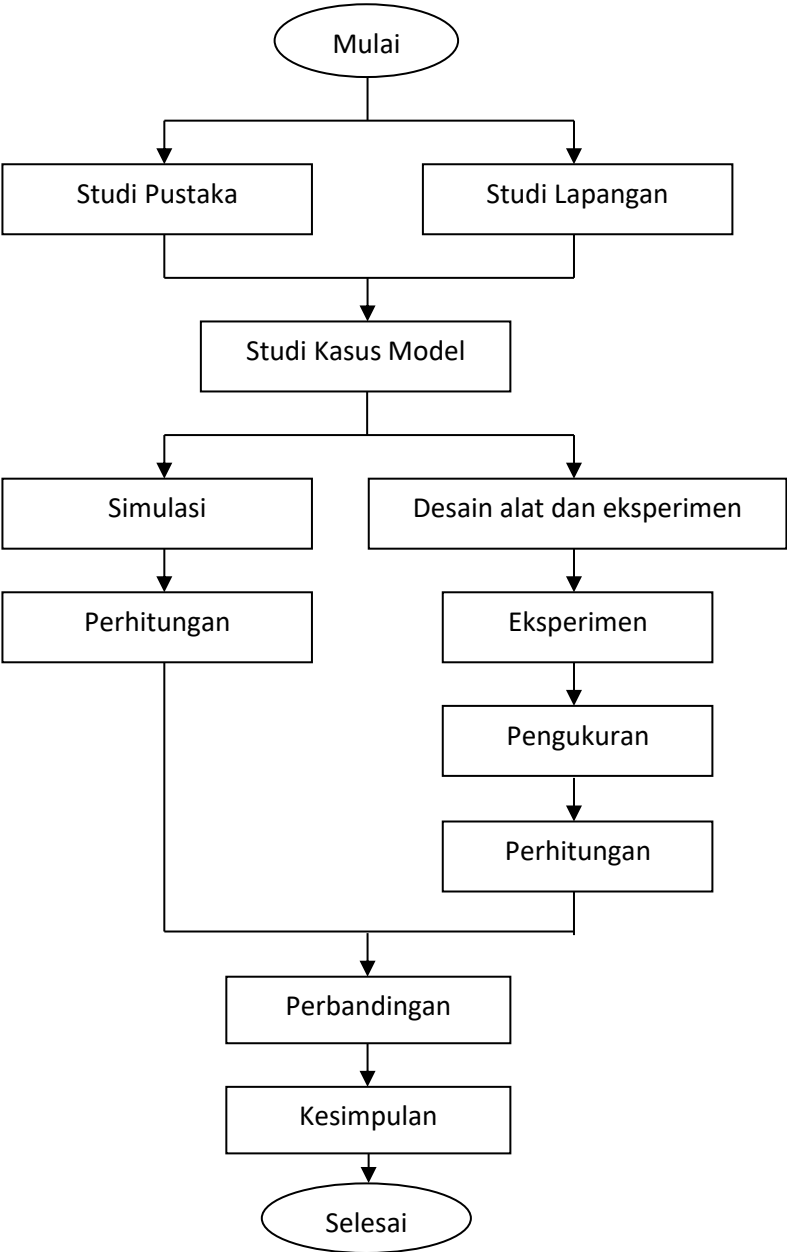
Kecepatan yang bekerja pada rangka dan benda rigid dalam gambar diatas ditunjukkan oleh vektor garis dengan arah x (sejajar sumbu). Meshing dilakukan pada modul mesh dengan menentukan jumlah nodal dari tiap bagian. Untuk benda rigid dapat dibuat jumlah nodal yang sedikit karena tidak *deformable* sedangkan untuk rangka dibuat nodal yang lebih banyak sehingga lebih teliti. Jenis elemen yang dipilih adalah quadrial untuk struktur.



Gambar 4.11. rangka dan benda rigid yang dimesh

Untuk menganalisa dilakukan pada modul *job*, dari *job* ini dapat dimonitor selama proses analisa setelah *job* menyatakan *complete* maka hasil *running* dapat divisualisasikan dan dapat melihat hasilnya berupa simulasi. untuk hasil lain dapat dilihat pada report. Langkah yang sama juga dilakukan pada rangka 30° dan 45° .

4.9 Diagram Alir Uji



Gambar 4.12. Diagram Alir Uji

BAB V

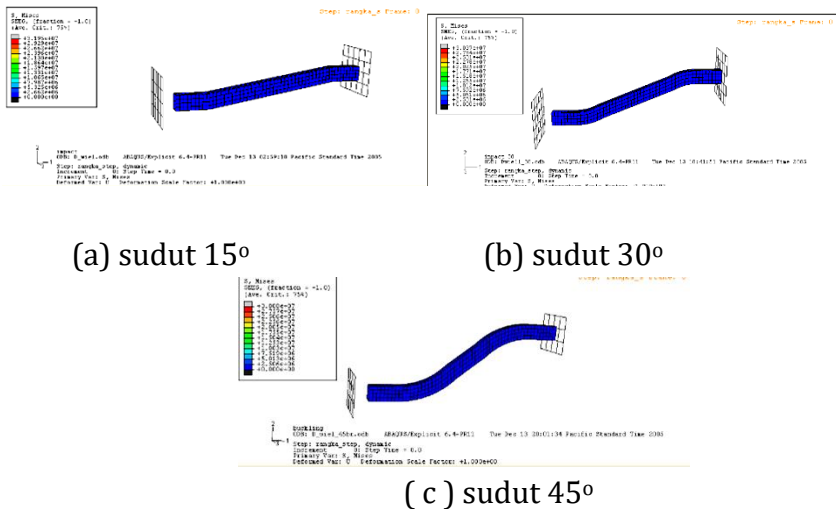
HASIL UJI *COLLAPSE AND BUCKLING*

5.1 Data Hasil Penelitian

Simulasi benturan (*impact*) dilakukan dengan memberikan step time 1 dan kecepatan rangka untuk melakukan tabrakan dengan benda rigid adalah 35 m/s. Daerah rangka yang mengalami collapse dan buckling dapat dilihat dan besarnya energi kinetic, energi regangan, tegangan-regangan dan gaya tumbuk (*impact*) yang dialami oleh rangka dapat diketahui dari grafik yang ditunjukkan oleh output.

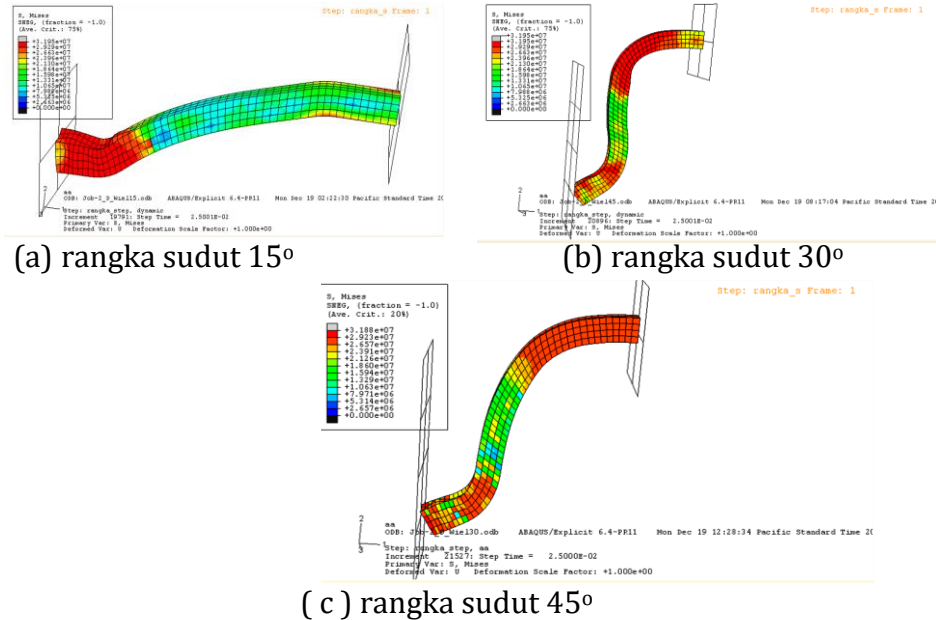
5.1.1 Posisi Rangka Sebelum Tabrakan

Simulasi sebelum rangka bertabrakan, Posisi rangka 15°, 30° dan 45° adalah 0, Step time 0,00 dengan increment 0.



Gambar 5.1 Posisi sebelum Rangka mengalami tabrakan

5.1.2 Posisi Rangka pada saat terjadi Tabrakan



Gambar 5.2 Rangka yang mengalami tabrakan

Pada kondisi seperti gambar hasil simulasi diatas rangka mengalami *buckling* pada bagian radiusnya. Kondisi tersebut terjadi karena adanya konsentrasi tegangan pada bagian yang memiliki radius. Tabrakan tersebut menyebabkan deformasi plastis pada rangka, dengan adanya deformasi plastis maka akan terjadi regangan. Regangan ini akan dimanfaatkan untuk mendapat serapan energi kinetik. Pada rangka 15° *Buckling* terjadi pada daerah radius yang ada didepan, selanjutnya energi kinetik diteruskan ke batang.

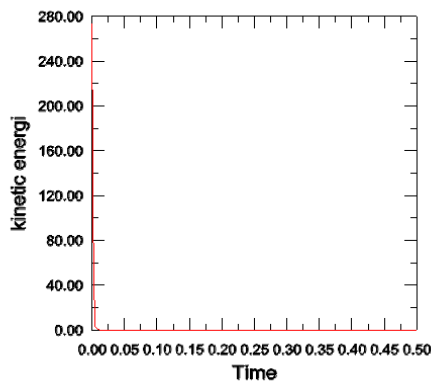
Setelah mencapai daerah radius yang ada di belakang maka daerah tersebut akan mengalami *buckling* hal ini juga disebabkan oleh adanya konsentrasi tegangan yang ada di daerah tersebut. Pada

rangka 45° saat terjadi tabrakan kedua daerah radius mengalami *buckling* karena energi kinetik langsung diteruskan dari depan sampai ke daerah radius yang ada di belakang. Hal ini disebabkan karena rangka lebih panjang dan memiliki radius yang besar demikian halnya dengan rangka dengan sudut 30°. Fenomena *buckling* ditunjukkan oleh kontur warna merah pada rangka.

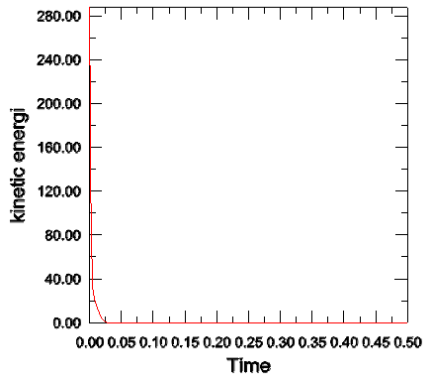
5.2 Hasil Simulasi

Simulasi dan analisa numerik dari abaqus memberikan output berupa simulasi secara visual dan secara grafik, adapun secara visual telah ditunjukkan seperti gambar diatas. Untuk hasil analisa secara grafik akan ditunjukkan pada gambar dibawah. Grafik yang akan dikeluarkan adalah berupa energi kinetik, energi regangan, diagram tegangan-regangan yang dialami oleh rangka.

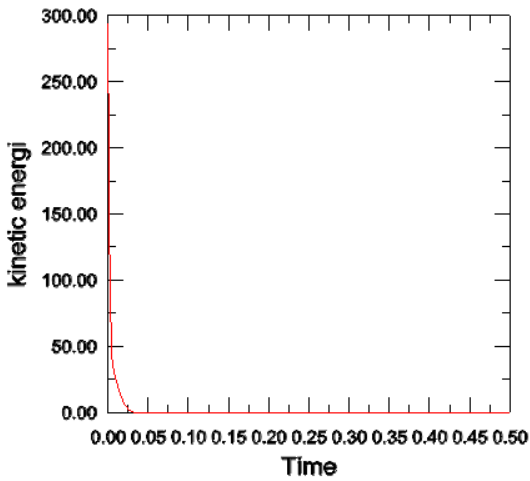
5.2.1 Grafik energi kinetik dari hasil simulasi numerik yang telah dilakukan



Gambar 5.3 Grafik Hubungan antara Time dengan energi kinetik rangka 15°



Gambar 5.4 Grafik Hubungan antara Time dengan energi kinetik rangka 30°



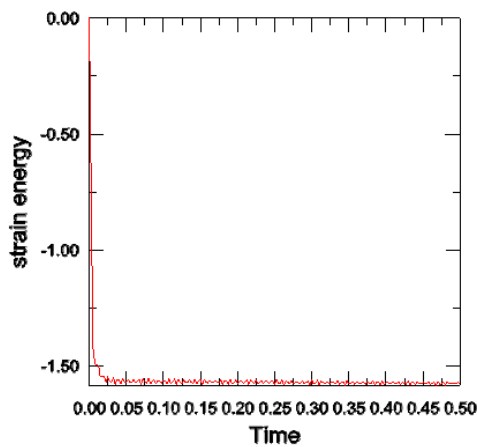
Gambar 5.5 Grafik Hubungan antara Time dengan energi kinetik rangka 45°

Grafik energi kinetik dengan time menunjukkan bahwa energi kinetik dari adanya kecepatan yang diberikan pada rangka mulai berkurang pada awal terjadinya tumbukan. Penurunan tersebut terus berlanjut hingga berakhir waktu yang diberikan. Penurunan

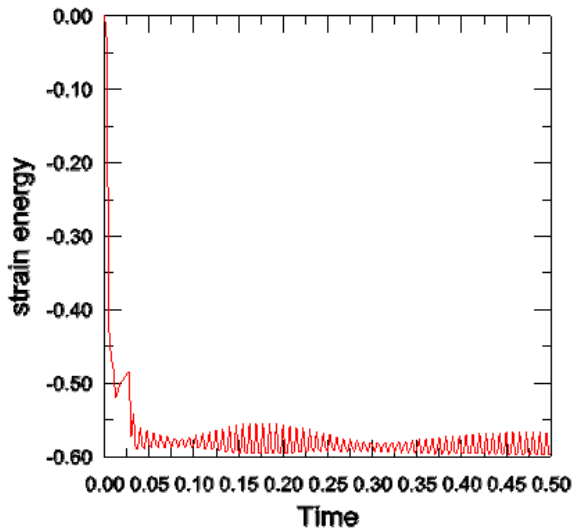
energi kinetik ini dapat diartikan sebagai penurunan kecepatan setelah rangka mengalami kontak dengan benda rigid.

Energi kinetik yang terjadi sebelum rangka 15° bertabrakan dengan benda rigid yang berada didepannya sampai rangka pertama kali menyentuh benda rigid adalah sebesar $278 \text{ kg.m}^2/\text{s}^2$ atau 278 J. Hal ini juga dialami oleh rangka 30° dan 45°, energi kinetik rangka 30° sebelum bertabrakan sampai pertama kali menyentuh benda rigid adalah $280 \text{ kg.m}^2/\text{s}^2$ dan rangka 45° sebesar $297 \text{ kg.m}^2/\text{s}^2$.

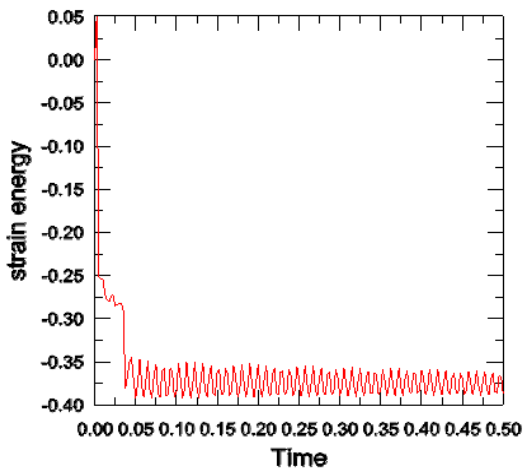
5.2.2 Grafik Penyerapan energi dari hasil simulasi numerik yang telah dilakukan



Gambar 5.6 Grafik Hubungan antara Time dengan Energi regangan rangka 15° (a)



Gambar 5.7 Grafik Hubungan antara Time dengan Energi regangan rangka 30° (b)



Gambar 5.8 Grafik Hubungan antara Time dengan Energi regangan 45° (c)

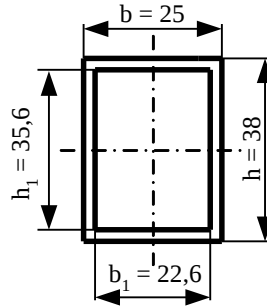
Grafik energi regangan (a) menunjukkan bahwa pada rangka 15° energi regangan terus meningkat, artinya rangka mampu menyerap tumbukan sampai batas maksimal kemampuan rangka. Energi regangan ini akan diteruskan ke seluruh bagian rangka, karena sudut yang kecil maka seolah-olah tumbukan diteruskan ke rangka bagian belakang tanpa hambatan. Harga yang ditunjukkan pada grafik energi regangan menunjukkan harga negatif karena rangka mengalami beban atau gaya tekan. Energi regangan kritisnya adalah 1.52 kg.m atau 1520 kg.mm . Pada kondisi ini rangka telah mengalami deformasi plastis.

Grafik (b) menunjukkan energi regangan yang terjadi pada rangka 30° , energi regangan meningkat hingga mencapai harga energi regangan sebesar 0.52 kg.m atau 520 kg.mm . Setelah angka ini maka terjadi penurunan harga energi regangan hingga mencapai angka 0.48 kg.m karena pada daerah ini distribusi energi melewati daerah radius yang lebih besar sehingga pada daerah tersebut kecepatan akan naik kembali, namun hanya sesaat karena setelah melewati daerah tersebut rangka akan kembali lurus sehingga terjadi osilasi harga energi regangan karena distribusi gaya yang akhirnya menyebabkan buckling di bagian belakang rangka. Pada kondisi tersebut harga tertingginya rata-rata adalah 0.59 kg.m atau 590 kg.m

Pada grafik (c) untuk rangka 45° energi regangan meningkat hingga mencapai harga energi regangan sebesar 0.38 kg.m atau 380 kg.m , pada rangka ini juga terjadi fenomena seperti pada rangka 30° dengan harga rata-rata 0.39 kg.m atau 390 kg.mm . Jadi pada rangka 30° dan 45° energi regangan mengalami siklus naik turun yang signifikan setelah melewati daerah radius bagian depan.

5.3 Hasil Analisa Eksperimen

5.3.1. Analisis Perhitungan Secara Teori



Gambar 5.9 penampang rangka uji

- Momen Inersia Rangka Uji :

$$I = \frac{1}{12} (b \times h^3 - b_1 \times h_1^3)$$

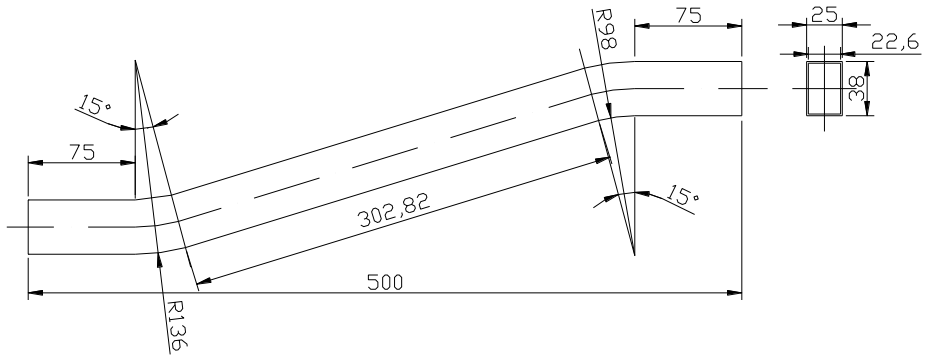
$$I = \frac{1}{12} (25 \times 38^3 - 22,6 \times 35,6^3)$$

$$I = 29344,40 \text{ mm}^4$$

- Luas Penampang Rangka Uji :

$$\begin{aligned} A &= (p \times l) - (p_1 \times l_1) \\ &= (38 \times 25) - (35,6 \times 22,6) \\ &= 145,44 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

❖ Sudut 15°



Gambar 5.10 rangka dengan sudut 15°

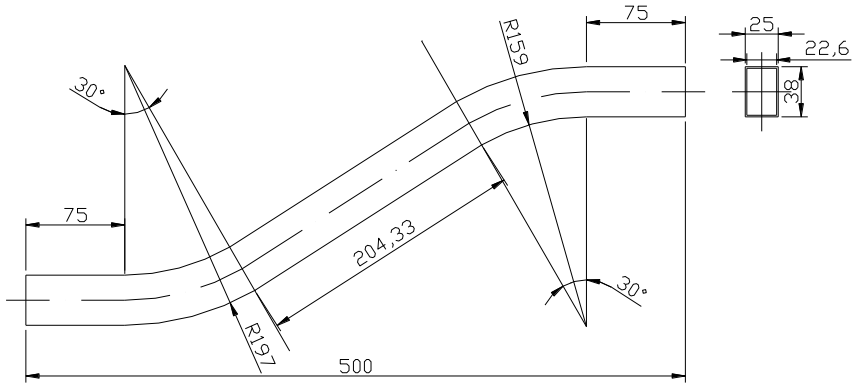
1. Beban Kritis (P_{cr})

$$\begin{aligned}
 P_{cr} &= \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \\
 &= \frac{1^2 \times 3,14^2 \times 11511,24 \times 29344,40}{758,78^2} \\
 &= \frac{3330478534}{575747,09} \\
 &= 5784,62 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

2. Tegangan Kritis (σ_{cr})

$$\begin{aligned}
 \sigma_{cr} &= \frac{P_{cr}}{A} \\
 &= \frac{5784,62}{145,44} \\
 &= 39,77 \text{ kg/mm}^2
 \end{aligned}$$

❖ Sudut 30°



Gambar 5.11 rangka dengan sudut 30°

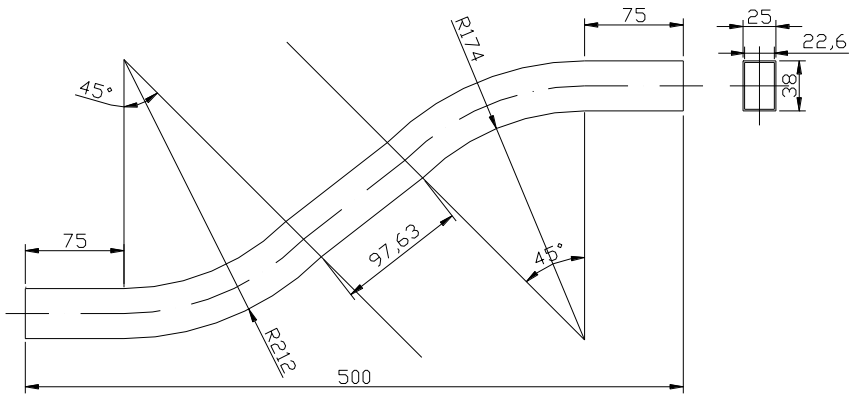
1. Beban Kritis (P_{cr})

$$\begin{aligned}
 P_{cr} &= \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \\
 &= \frac{1^2 \times 3,14^2 \times 11511,24 \times 29344,40}{822^2} \\
 &= \frac{3330478534}{675684} \\
 &= 4929,05 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

2. Tegangan Kritis (σ_{cr})

$$\begin{aligned}
 \sigma_{cr} &= \frac{P_{cr}}{A} \\
 &= \frac{4929,05}{145,44} \\
 &= 33,89 \text{ kg/mm}^2
 \end{aligned}$$

❖ Sudut 45°



Gambar 5.12 rangka dengan sudut 45°

1. Beban Kritis (P_{cr})

$$\begin{aligned}
 P_{cr} &= \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \\
 &= \frac{1^2 \times 3,14^2 \times 11511,24 \times 29344,40}{780,66^2} \\
 &= \frac{3330478534}{609430,04} \\
 &= 5464,91 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

2. Tegangan Kritis (σ_{cr})

$$\begin{aligned}
 \sigma_{cr} &= \frac{P_{cr}}{A} \\
 &= \frac{5464,91}{145,44} \\
 &= 37,57 \text{ kg/mm}^2
 \end{aligned}$$

5.3.2. Analisa Perhitungan dari Eksperimen

Tabel 5.1 Data Hasil Eksperimen

NO	SUDUT 15 ⁰		SUDUT 30 ⁰		SUDUT 45 ⁰	
	Jarak (mm)	P _{pressure} (kg/cm ²)	Jarak (mm)	P _{pressure} (kg/cm ²)	Jarak (mm)	P _{pressure} (kg/cm ²)
1	3	10	3	20	2	12
2	4	45	5	48	4	35
3	6	70	7	70	7	48
4	7	103	9	80	9	50
5	8	115	12	92	11	55
6	9	124	14	100	14	62
7	11	130	15	104	16	70
8	12	140	17	62	18	78
9	14	150	20	52	20	85
10	15	158	22	44	22	90
11	16	160	24	40	24	95
12	18	155	26	38	25	102
13	21	152	28	30	27	108
14	23	80	30	28	28	110
15	25	65			30	80
16	28	60			33	55
17	29	50			34	50
18	31	48			36	48

Luas Penampang Dongkrak :

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{4} \pi D_0^2 - \frac{1}{4} \pi D_1^2 \\
 &= (0,25 \times 3,14 \times 56,1^2) - (0,25 \times 3,14 \times 51,9^2) \\
 &= 356,1 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

❖ Sudut 15^0

a. Gaya (F)

$$\begin{aligned} F_1 &= P_{\text{gauge1}} \times A \\ &= 0,1 \text{ kg/mm}^2 \times 356,1 \text{ mm}^2 \\ &= 35,61 \text{ kg} \end{aligned}$$

Tabel 5.2 Gaya yang terjadi pada sudut 15^0

No	P_{gauge} (kg/mm ²)	Adongkrak (mm ²)	F (kg)
1	0.1	356.1	35.61
2	0.45	356.1	160.25
3	0.7	356.1	249.27
4	1.03	356.1	366.78
5	1.15	356.1	409.52
6	1.24	356.1	441.56
7	1.3	356.1	462.93
8	1.4	356.1	498.54
9	1.5	356.1	534.15
10	1.58	356.1	562.64
11	1.6	356.1	569.76
12	1.55	356.1	551.96
13	1.52	356.1	541.27
14	0.8	356.1	284.88
15	0.65	356.1	231.47
16	0.6	356.1	213.66
17	0.5	356.1	178.05
18	0.46	356.1	163.81

b. Tegangan (σ)

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{F_1}{A_{\text{rangka}}} \\ &= \frac{35,61}{145,44} \\ &= 0,24 \text{ kg/mm}^2\end{aligned}$$

Tabel 5.3 Tegangan yang terjadi pada sudut 15°

No	F (kg)	A rangka uji (mm ²)	σ (kg/mm ²)
1	35.61	145.44	0.24
2	160.25	145.44	1.1
3	249.27	145.44	1.71
4	366.78	145.44	2.52
5	409.52	145.44	2.82
6	441.56	145.44	3.04
7	462.93	145.44	3.18
8	498.54	145.44	3.43
9	534.15	145.44	3.67
10	562.64	145.44	3.87
11	569.76	145.44	3.92
12	551.96	145.44	3.8
13	541.27	145.44	3.72
14	284.88	145.44	1.96
15	231.47	145.44	1.59
16	213.66	145.44	1.47
17	178.05	145.44	1.22
18	163.81	145.44	1.13

c. Energi Regangan (U)

$$U = \frac{1}{2} P \times \quad \text{dengan, } P = F = \text{Beban}$$

x = Jarak setiap penekanan

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{1}{2} P_1 \times x_1 \\ &= 0,5 \times 35,61 \times 3 \\ &= 53,415 \text{ kg.mm} \end{aligned}$$

Tabel 5.4 Energi regangan yang terjadi pada sudut 15°

No	X (mm)	F (kg)	U (kg.mm)
1	3	35.61	53.415
2	4	160.25	320.49
3	6	249.27	747.81
4	7	366.78	1283.74
5	8	409.52	1638.06
6	9	441.56	1987.04
7	11	462.93	2546.12
8	12	498.54	2991.24
9	14	534.15	3739.05
10	15	562.64	4219.79
11	16	569.76	4558.08
12	18	551.96	4967.6
13	21	541.27	5683.36
14	23	284.88	3276.12
15	25	231.47	2893.31
16	28	213.66	2991.24
17	29	178.05	2581.73
18	31	163.81	2538.99

❖ Sudut 30°

a. Gaya (F)

$$\begin{aligned} F_1 &= P_{\text{gauge}} \times A \\ &= 0,2 \text{ kg/mm}^2 \times 356,1 \text{ mm}^2 \\ &= 71,22 \text{ kg} \end{aligned}$$

Tabel 5.5 Gaya yang terjadi pada sudut 30°

No	P _{gauge} (kg/mm ²)	A (mm ²)	F (kg)
1	0.2	356.1	71.22
2	0.48	356.1	170.9
3	0.7	356.1	249.3
4	0.8	356.1	284.9
5	0.92	356.1	327.6
6	1	356.1	356.1
7	1.04	356.1	370.3
8	0.62	356.1	220.8
9	0.52	356.1	185.2
10	0.44	356.1	156.7
11	0.4	356.1	142.4
12	0.38	356.1	135.3
13	0.3	356.1	106.8
14	0.28	356.1	99.71

b. Tegangan (σ)

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{F_1}{A_{\text{rangka}}} \\ &= \frac{71,22}{145,44} \\ &= 0,49 \text{ kg/mm}^2\end{aligned}$$

Tabel 5.6 Tegangan yang terjadi pada sudut 30°

No	F (kg)	A rangka uji (mm ²)	σ (kg/mm ²)
1	71.22	145.44	0.49
2	170.9	145.44	1.18
3	249.3	145.44	1.71
4	284.9	145.44	1.96
5	327.6	145.44	2.25
6	356.1	145.44	2.45
7	370.3	145.44	2.55
8	220.8	145.44	1.52
9	185.2	145.44	1.27
10	156.7	145.44	1.08
11	142.4	145.44	0.98
12	135.3	145.44	0.93
13	106.8	145.44	0.73
14	99.71	145.44	0.69

c. Energi Regangan (U)

$$\begin{aligned}U_1 &= \frac{1}{2} P_1 x_1 \\ &= 0,5 \times 71,22 \times 3 \\ &= 106,83 \text{ kg.mm}\end{aligned}$$

Tabel 5.7 Energi Regangan yang terjadi pada sudut 30⁰

No	X (mm)	F (kg)	U (kg.mm)
1	3	71.22	106.83
2	5	170.9	427.32
3	7	249.3	872.45
4	9	284.9	1282
5	12	327.6	1965.7
6	14	356.1	2492.7
7	15	370.3	2777.6
8	17	220.8	1876.6
9	20	185.2	1851.7
10	22	156.7	1723.5
11	24	142.4	1709.3
12	26	135.3	1759.1
13	28	106.8	1495.6
14	30	99.71	1495.6

❖ Sudut 45⁰

a. Gaya (F)

$$\begin{aligned}
 F_1 &= P_{\text{gauge}} \times A \\
 &= 0,12 \text{ kg/mm}^2 \times 356,1 \text{ mm}^2 \\
 &= 42.732 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Tabel 5.8 Gaya yang terjadi pada Sudut 45⁰

No	P _{gauge} (kg/mm ²)	A (mm ²)	F (kg)
1	0.12	356.1	42.732
2	0.35	356.1	124.64
3	0.48	356.1	170.93

No	P _{gauge} (kg/mm ²)	A (mm ²)	F (kg)
4	0.5	356.1	178.05
5	0.55	356.1	195.86
6	0.62	356.1	220.78
7	0.7	356.1	249.27
8	0.78	356.1	277.76
9	0.85	356.1	302.69
10	0.9	356.1	320.49
11	0.95	356.1	338.3
12	1.02	356.1	363.22
13	1.08	356.1	384.59
14	1.1	356.1	391.71
15	0.8	356.1	284.88
16	0.55	356.1	195.86
17	0.5	356.1	178.05
18	0.48	356.1	170.93

b. Tegangan (σ)

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= \frac{F_1}{A_{\text{rangka}}} \\
 &= \frac{42,732}{145,44} \\
 &= 0,29 \text{ kg/mm}^2
 \end{aligned}$$

Tabel 5.9 Tegangan yang terjadi pada Sudut 45⁰

No	F (kg)	A rangka uji (mm ²)	σ (kg/mm ²)
1	42.732	145.44	0.29
2	124.64	145.44	0.86
3	170.93	145.44	1.18
4	178.05	145.44	1.22
5	195.86	145.44	1.35
6	220.78	145.44	1.52
7	249.27	145.44	1.71
8	277.76	145.44	1.91
9	302.69	145.44	2.08
10	320.49	145.44	2.2
11	338.3	145.44	2.33
12	363.22	145.44	2.5
13	384.59	145.44	2.64
14	391.71	145.44	2.69
15	284.88	145.44	1.96
16	195.86	145.44	1.35
17	178.05	145.44	1.22
18	170.93	145.44	1.18

c. Energi Regangan (U)

$$\begin{aligned}
 U_1 &= \frac{1}{2} P_1 \times x_1 \\
 &= 0,5 \times 42,732 \times 3 \\
 &= 64,098 \text{ kg.mm}
 \end{aligned}$$

Tabel 5.10 Energi Regangan yang Terjadi pada Sudut 45⁰

No	X (mm)	F (kg)	U (kg.mm)
1	3	42.732	64.098
2	5	124.64	311.588
3	7	170.93	598.248
4	9	178.05	801.225
5	11	195.86	1077.2
6	14	220.78	1545.47
7	16	249.27	1994.16
8	18	277.76	2499.82
9	20	302.69	3026.85
10	22	320.49	3525.39
11	24	338.3	4059.54
12	25	363.22	4540.28
13	27	384.59	5191.94
14	28	391.71	5483.94
15	30	284.88	4273.2
16	33	195.86	3231.61
17	34	178.05	3026.85
18	36	170.93	3076.7

Tabel 5.11 Beban kritis secara teori dan beban kritis dengan eksperimen.

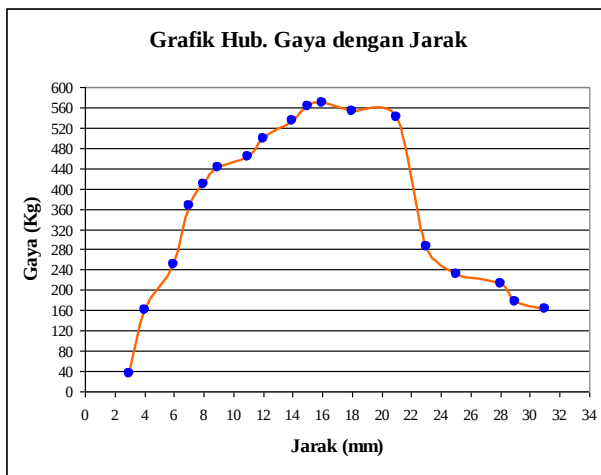
No.	Sudut	P _{cr} teori (kg)	P _{cr} eksperimen (kg)
1	15 ⁰	5784,62	569,76
2	30 ⁰	4929,05	370,3
3	45 ⁰	5464,91	391,71

5.4 Pembahasan Hasil Eksperimen

Pada pembahasan data hasil eksperimen ini akan menjelaskan hasil dari eksperimen dan analisis perhitungan dengan menggunakan grafik.

5.4.1. Hubungan Gaya dengan Jarak

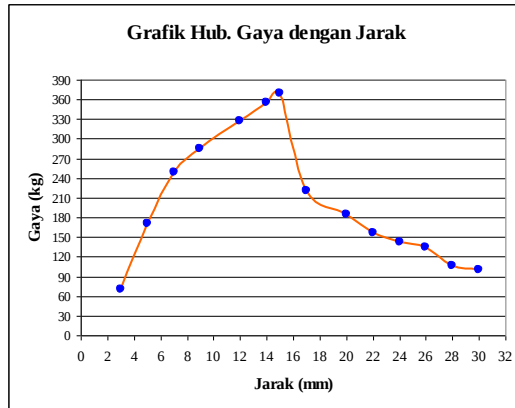
❖ Sudut 15^0



Gambar 5.13 Grafik hubungan gaya dengan jarak pada sudut 15^0

Dari gambar 5.13 menunjukkan bahwa beban puncak (kritis) terjadi pada jarak 16 mm dengan gaya maksimal 569,76 kg. Setelah melampaui gaya maksimal dan jarak 16 mm akan terjadi *collapse* (runtuhnya spesimen), sehingga terjadi penurunan kemampuan dalam menahan gaya.

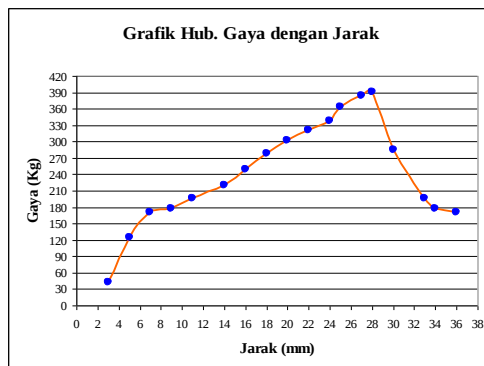
❖ Sudut 30°



Gambar 5.14 Grafik hubungan gaya dengan jarak pada sudut 30°

Dari gambar 5.14 menunjukkan bahwa beban puncak (kritis) terjadi pada jarak 15 mm dengan gaya maksimal 370,3 kg. Setelah melampaui gaya maksimal dan jarak 15 mm, rangka akan mengalami *collapse* (runtuhnya specimen), sehingga terjadi penurunan kemampuan dalam menahan gaya.

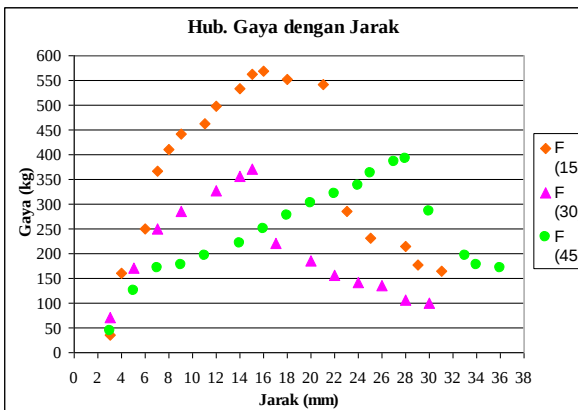
❖ Sudut 45°



Gambar 5.15 Grafik hubungan gaya dengan jarak pada sudut 45°

Dari gambar 5.15 menunjukkan bahwa beban puncak (kritis) terjadi pada jarak 28 mm dengan gaya maksimal 391,71 kg. Setelah melampaui gaya maksimal dan jarak 28 mm, rangka akan mengalami *collapse* (runtuhnya specimen), sehingga terjadi penurunan kemampuan dalam menahan gaya.

❖ Sudut 15°, 30°, 45°

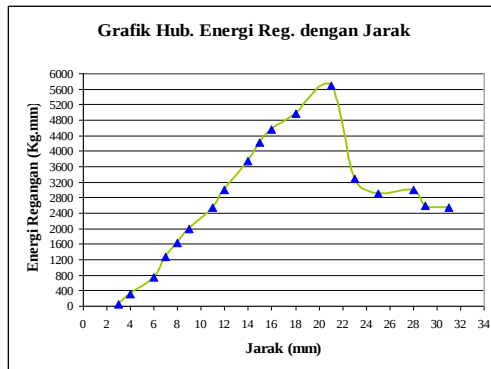


Gambar 5.16 Grafik hubungan gaya dengan jarak pada sudut 15°, 30° dan 45°

Dari gambar 5.16 diatas dapat diambil kesimpulan bahwa setelah mengalami beban puncak rangka akan mengalami *collapse*, sehingga rangka akan mengalami penurunan kemampuan dalam menahan gaya. Dari ketiga sudut yang kita uji, ternyata gaya terbesar hingga mencapai batas antara *buckling* dengan *collapse* terjadi pada sudut 15° dengan jarak yang tidak terlalu besar.

5.4.2. Hubungan Energi Regangan dengan Jarak

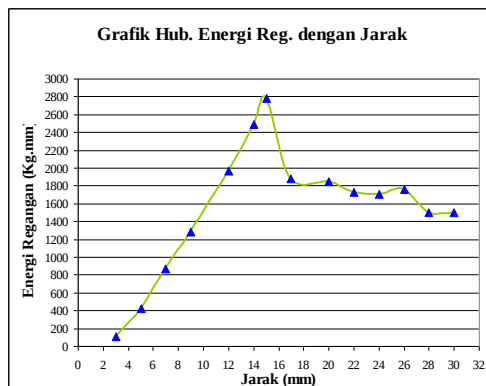
❖ Sudut 15°



Gambar 5.17 Grafik hubungan energi regangan dengan jarak pada sudut 15°

Dari gambar 5.17 menunjukkan bahwa energi regangan tertinggi terjadi pada jarak 21 mm dengan energi yang mampu diserap sebesar 5683,36 kg.mm.

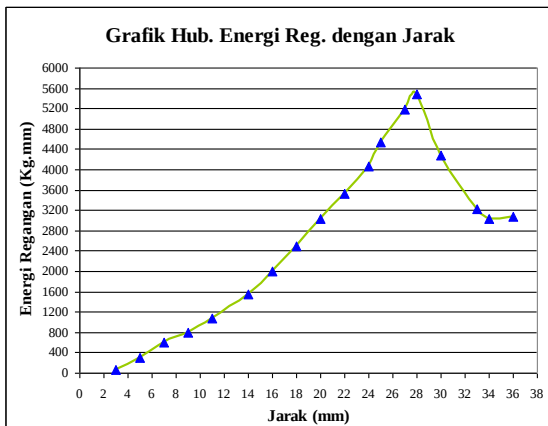
❖ Sudut 30°



Gambar 5.18 Grafik hubungan energi regangan dengan jarak pada sudut 30°

Dari Gambar 5.18 menunjukkan bahwa energi regangan tertinggi terjadi pada jarak 15 mm dengan energi yang mampu diserap sebesar 2777,6 kg.mm.

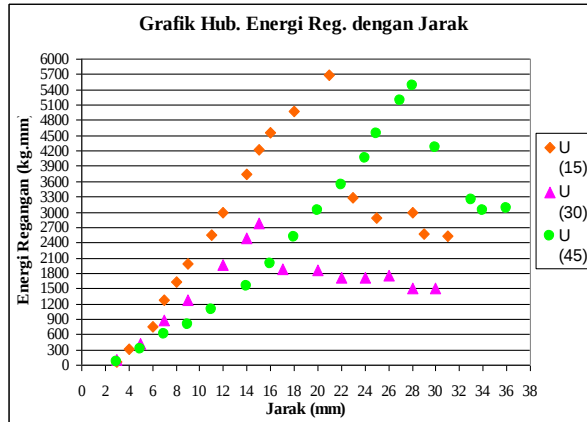
❖ Sudut 45⁰



Gambar 5.19 Grafik hubungan energi regangan dengan jarak pada sudut 45⁰

Dari Gambar 5.19 menunjukkan bahwa energi regangan tertinggi terjadi pada jarak 28 mm dengan energi yang mampu diserap sebesar 5483,94 kg.mm.

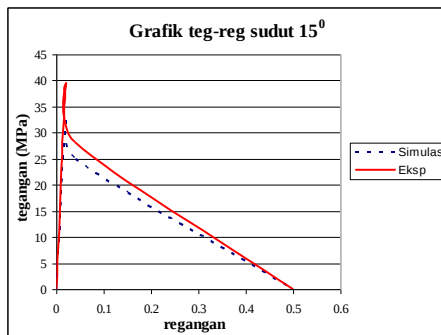
❖ Sudut 15°, 30°, 45°



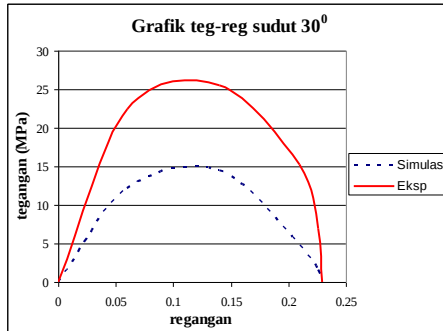
Gambar 5.20 Grafik hubungan energi regangan dengan jarak pada sudut 15°, 30° dan 45°

Dari Gambar 5.20 diatas dapat diambil kesimpulan bahwa Energi regangan tertinggi terjadi pada sudut 15° dengan jarak sepanjang 21 mm dan energi yang mampu diserap sebesar 5683,36 kg.m.

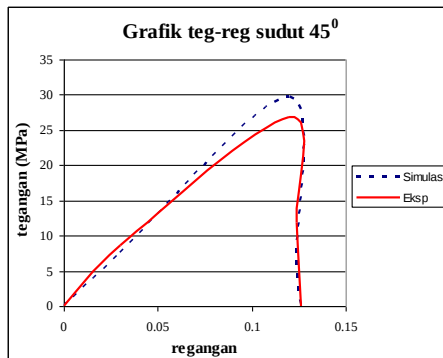
5.4.3 Grafik Tegangan – Regangan pada simulasi dan eksperimen



Gambar 5.21 Grafik tegangan-regangan rangka sudut 15°



Gambar 5.22 Grafik tegangan-regangan rangka sudut 30°



Gambar 5.23 Grafik tegangan-regangan rangka sudut 45°

Pada grafik tegangan-regangan rangka 15° elemen kritis yang diambil adalah pada elemen 25. Setelah diplot didalam abaqus tegangan terhadap time dan regangan terhadap time selanjutnya diambil tabel dan di gambarkan dalam exel sehingga diperoleh tegangan maksimal adalah 32.1×10^6 Pa sedangkan eksperimen adalah 39.2×10^6 Pa.

Pada grafik tegangan – regangan (b) yaitu pada yaitu rangka 30° elemen kritis yang diambil adalah pada elemen 5. Setelah diplot didalam abaqus tegangan terhadap time dan regangan terhadap time selanjutnya diambil tabel dan di gambarkan dalam exel sehingga diperoleh tegangan maksimal adalah 15.1×10^6 Pa dan eksperimen diperoleh 25.5×10^6 .

Dengan cara yang sama maka pada rangka 45° dengan elemen kritis terletak pada elemen 471 diperoleh harga tegangan maksimal atau teganan kritis sebesar 29.7×10^6 Pa untuk eksperimen diperoleh 26.9×10^6 .

Grafik tegangan regangan tesebut diatas dapat dibandingkan secara jelas sesuai dengan tabel dibawah:

Tabel 5.12. tegangan simulasi dan eksperimen

Tegangan pada Eksperimen (Pa)	Tegangan pada Simulasi (Pa)
37.2×10^6	32.1×10^6
25.5×10^6	15.1×10^6
26.9×10^6	29.7×10^6

Dari tabel diatas dapat di ketahui bahwa abaqus dapat digunakan sebagai pendekatan analisis dari suatu model karena hasil mendekati dengan eksperimen dan hasil cukup ideal.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisa numerik eksperimen diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Beban puncak (kritis) dan penyerapan energi tertinggi terjadi pada sudut 15^0 dengan gaya sebesar 569,76 kg, pada jarak 16 mm dan dengan energi regangan sebesar 5683,36 kg.mm, pada jarak 21 mm.
2. Dari hasil eksperimen, dapat diambil kesimpulan bahwa desain rangka yang paling ideal atau paling aman adalah desain rangka dengan sudut 15^0 . Karena pada rangka dengan sudut 15^0 mempunyai nilai energi regangan yang paling besar.
3. Rangka dengan sudut 15^0 beban puncak (kritis) terjadi pada jarak 16 mm dengan gaya maksimal 569,76 kg. Setelah melampaui gaya maksimal dan jarak 16 mm, rangka akan mengalami *collapse* (runtuh). Rangka dengan sudut 30^0 beban puncak (kritis) terjadi pada jarak 15 mm dengan gaya maksimal 370,3 kg. Setelah melampaui gaya maksimal dan jarak 15 mm, rangka akan mengalami *collapse* (runtuh). Rangka dengan sudut 45^0 beban puncak (kritis) terjadi pada jarak 28 mm dengan gaya maksimal 391,71 kg. Setelah melampaui gaya maksimal dan jarak 28 mm, rangka akan mengalami *collapse* (runtuh).
4. Berdasarkan simulasi semakin besar kecepatan yang diberikan maka deformasi yang dialami rangka juga semakin besar, tegangan tertinggi terjadi pada rangka 15^0 sebesar 32.1×10^6 Pa.

5. Terjadi korelasi antara eksperimen dengan menggunakan simulasi program komputer, dapat dilihat dari hasil analisa tegangan maksimal yaitu secara simulasi sebesar 32.1×10^6 Pa untuk rangka 15° , 15.1×10^6 Pa untuk rangka 30° dan 29.7×10^6 Pa untuk rangka 45° . Sedangkan secara eksperimen diperoleh: 37.2×10^6 untuk rangka 15° , 25.5×10^6 untuk rangka 30° dan 26.9×10^6 Pa untuk rangka 45° .

6.2 Saran

Dari hasil proses simulasi dan analisa numerik ada beberapa hal yang perlu diperhatikan:

1. Untuk memperoleh hubungan antara program dan eksperimen perlu dilakukan pengujian untuk mengetahui propertis dari material.
2. Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya rangka dibuat tanpa pengelasan (dibuat secara ekstrusi).
3. Pengukuran hasil eksperimen dilakukan terhadap waktu bukan terhadap jarak.
4. Untuk penelitian lebih lanjut diperlukan perencanaan dan persiapan yang lebih baik sehingga waktu yang digunakan akan lebih efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Aita.S; El Khaldi, F.; Fontaine, L.; Tamada, T.; Tamura, E., 1997, *Numerical Simulation of a Stretch Drawn Auto Body:Part II-Validation Versus Exsperiments for Various Holding and Drawbead Conditions*, Journal of Material Processing Technology, 920640.
- Anonim. (1991). Buku Pedoman Perbaikan Komponen Rangka Isuzu Panther. Jakarta: PT. Pantja Motor.
- Bourke, M. A. M.; Beyerlein, I. J.; Alexander, D. J.; Clausen, B., 2003, *Finite element Analysis of The Plastic Deformation Zone and Working Load in Equal Channel Angular Extrusion*, Journal of Material Processing Technolgy, NM 87545, USA
- Honda R & D, 2004, *Quasi-Static Collapse of Spot-Welded, Thin-walled Curved Beams*, Journal ABAQUS Technology Brief, TB-03-TWCB-1.
- Herminarto Sofyan, Dr. (1993). Konstruksi Badan Kendaraan. Diklat. Yogyakarta: IKIP Yogyakarta
- Ishigaki, H., *Deformation Analysis of Large Sized Panels in The Press Shop*, Toyota Motor Company, Japan.
- Jansson, T., 2002, *Optimisation of Sheet Metal Forming Processes*, Division of Solid Mechanics, Linköping University.
- Kleiner, M.; Gartzke, A.; Kolleck, R., 1997, *Experimental and Finite Element Analysis of Capabilities and Limits of a Combinet Pneumatic and Mechanical Deep-Drawing Process*, Lehrstuhl Konstruktion und Fertigung, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Germany.
- Popov, 1986, *Mekanika Teknik*, Erlangga, Jakarta.

- Shigley, J.E; Witchell, L. D, 1991, *Perencanaan teknik Mesin*, Erlangga, Jakarta.
- Siswanto, W. A, 2000, *Tooling Design Optimisation for Multistage Sheet Metal Forming*, RMIT Institute of Technology, Melbourne, Australia.
- Sugiyanto, Didik., Sudiro. (2017). Studi Kajian Tentang Fenomena Collapse dan Buckling Pada Rangka Bodi Mobil. Jurnal Autindo, 3(2), 10-15.
- Tang, S. C.; Hu, Y., 1995, *Quasi-Static Analysis of Sheet Metal Forming Processes on a Parallel Computer*, Balkema, Rotterdam.
- Thimoshenko, S. T.; Goodier, J. N., 1970, *Theory of Elasticity*, McGraw Hill, New York.
- Weaver, W.; Johnsnton, P. R., 1987, *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice Hall Inc.

LAMPIRAN

1. Mesin dan Bahan Uji



Foto Alat Uji Tekan dan Uji Tarik



Foto Spesimen Uji Tarik Sebelum Dilakukan Pengujian



Foto Spesimen Uji Tarik Setelah Dilakukan Pengujian



Foto Spesimen Uji Tekan



Foto Saat Dilakukan Uji Tekan