

BAB II

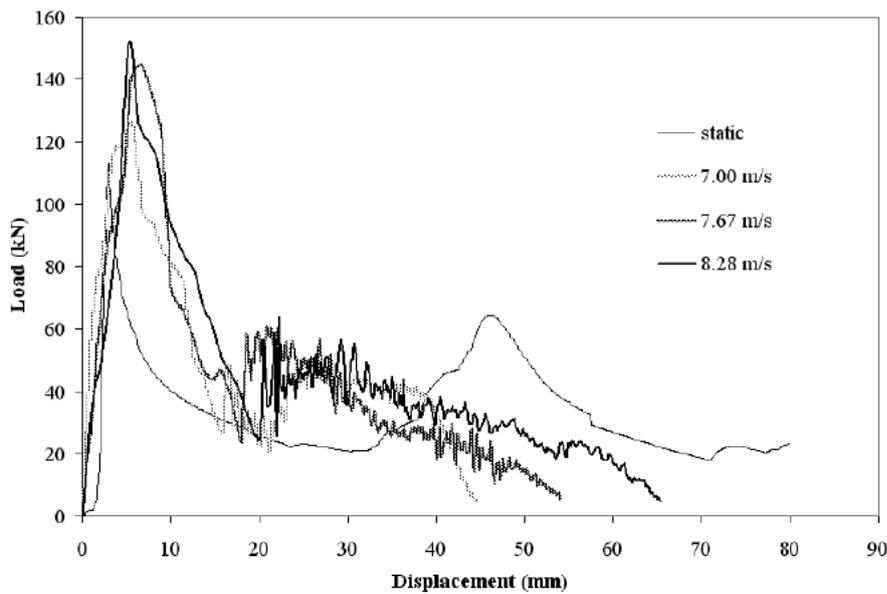
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Velmurugan dan Muralikannan (2009) meneliti karakteristik penyerapan energi pada *crash box* dengan melakukan pengujian statik dan pengujian dinamik dari beberapa macam bentuk penampang di antaranya lingkaran, persegi, dan persegi panjang masing-masing *crash box* memiliki keliling, ketebalan, dan tinggi yang sama, hasil penelitian tersebut menunjukkan penyerapan energi spesifik pada penampang lingkaran (*circle*) lebih tinggi dari penampang persegi (*square*) dan persegi panjang (*rectangular*) sedangkan penampang persegi (*square*) lebih baik dari persegi panjang (*rectangular*). Pengujian statik *crash box* dilakukan dengan *Universal Testing Machine* dengan pembebanan maksimal 20 ton. Pengujian dinamik menggunakan metode *drop weight test* sedangkan pengujian dinamik menggunakan metode *drop weight test* dengan massa *impactor* sebesar 103 kg. dengan variasi kecepatan 7,00 m/s, 7,67 m/s, dan 8,28 m/s. Gambar 2.1 menunjukkan hasil pengujian *crash box* berpenampang persegi dengan panjang sisi 60 mm dan panjang 120 mm dengan ketebalan 1.6 mm. Hubungan antara *load* dan *displacement* yang terjadi pada *crash box* disajikan dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Energi penyerapan pada masing-masing *crash box* dapat ditentukan dengan menghitung luasan di bawah kurva pada grafik hubungan *load* dan *displacement*.



Gambar 2.1 Hasil pengujian dinamik terhadap *crash box* berpenampang persegi
Sumber : Velmurugan (2009 : 390)



Gambar 2.2 Grafik load-displacement crash box berpenampang persegi dengan pengujian dinamik

Sumber : Velmurugan (2009:391)

A. Eyvazian et al (2014) meneliti karakteristik penyerapan energi dan deformasi pada *crash box* dengan pengujian *quasi-statik* dengan material aluminium ASTM:E8/E8M-11 dengan dinding yang bergelombang dan dinding lurus dan diperoleh hasil dengan dinding bergelombang pola deformasi yang terjadi adalah pola *concertina* yang memiliki kemampuan penyerapan energi yang lebih baik. Karena pada spesimen dengan dinding bergelombang lebih mudah terbentuk menjadi pola *concertina*.



(a)



(b)

Gambar 2.3 Hasil pengujian statik terhadap *crash box* (a) bergelombang (b) tidak bergelombang

Sumber : A. Eyvazian et al (2014 : 1032)

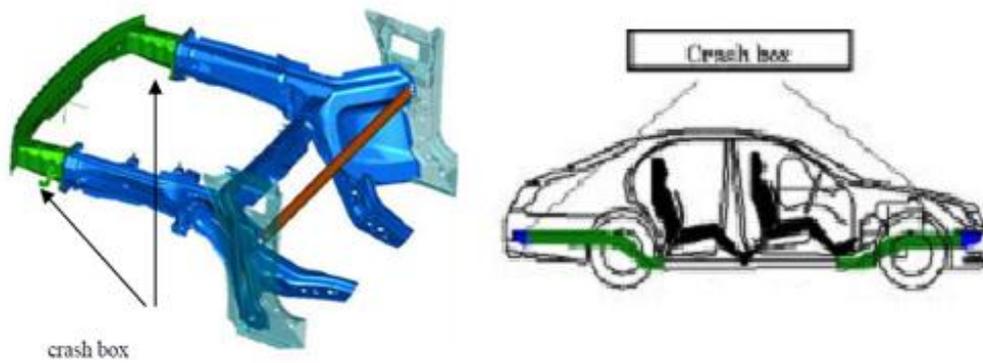
Toksoy dan Guden (2010) meneliti karakteristik penyerapan energi pada *crash box* dengan melakukan pengujian quasi-statik dari beberapa macam ketebalan 2 mm, 2,5 mm dan 3 mm dengan bentuk penampang persegi, hasil penelitian tersebut menunjukkan penyerapan energi paling baik terjadi pada *crash box* dengan ketebalan 3 mm. Tetapi semakin tebal dinding *crash box* menyebabkan nilai P_{\max} semakin tinggi hal ini dikarenakan kekakuan *crash box* juga meningkat hal ini berpengaruh pada efisiensi penyerapan *crash box*. Dan juga berpengaruh pada penyerapan energi spesifik (SEA) karena berat *crash box* juga meningkat.

Berdasarkan penelitian di atas, dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh variasi ketebalan dinding pada tiap spesimen simulasi *crash box* yang ditentukan oleh lekukan pada dinding *crash box* yang dikenai gaya *frontal*. Dipilih *crash box* yang berpenampang persegi untuk mendukung hasil penelitian sebelumnya.

2.2 *Crash Box*

Crash box adalah salah satu jenis penyerap energi yang diletakkan diujung rangka depan kendaraan yang berfungsi menyerap energi akibat tabrakan pada bagian depan, pada saat terjadi tabrakan depan (*frontal crash*), diharapkan *crash box* dapat terdeformasi dengan menyerap energi tabrakan sebelum mengenai bagian yang dilindungi sehingga kerusakan pada rangka kabin utama dapat diminimalisasi dan penumpang dapat selamat. Energi yang diterima oleh *crash box* saat terjadi tabrakan diserap melalui deformasi plastis pada *crash box* itu sendiri, *crash box* menyerap energi dan mengurangi gaya maksimalnya dimana seluruh energi tabrakan didistribusikan secara merata dan besar gayanya tidak melebihi nilai yang diizinkan agar struktur yang lain terlindung dari kerusakan yang parah. Agar *crash box* dapat memproteksi struktur dengan baik maka desain *crash box* harus mengikuti kriteria sebagai berikut :

- Energi impak akibat tabrakan sebanyak mungkin harus dapat didistribusikan menjadi deformasi *irreversible* atau energi tabraknya diubah menjadi deformasi plastis.
- *Crash box* adalah peralatan sekali pakai sehingga harus mudah diproduksi dan biayanya rendah serta mudah pemasangan dan pelepasannya.
- *Crash box* harus cukup panjang agar jalur deformasi untuk penyerapan energi tabrakan semakin panjang pula, tetapi tidak mengambil terlalu banyak ruang pada bagian depan kendaraan.



Gambar 2.4 Crash box pada struktur rangka kendaraan
Sumber : Liu Yanjie (2008)

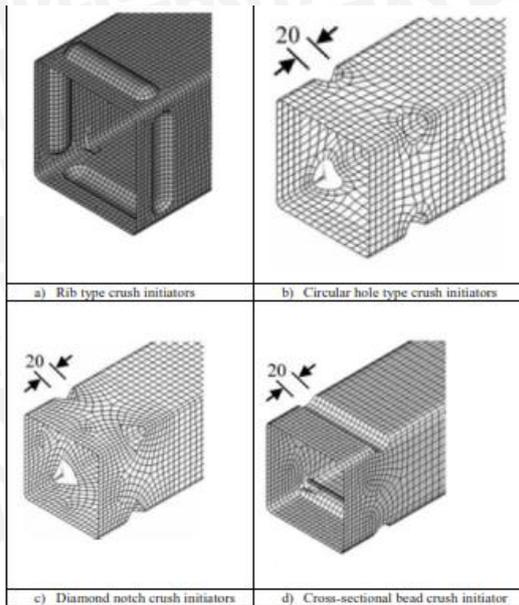
2.2.1 Jenis-jenis *Crash box*

Crash box sebagai sistem keamanan pasif pada kendaraan memiliki beragam jenis diantaranya adalah tabung berpenampang lingkaran (*circular tubes*), tabung berpenampang persegi (*square tubes*), *corrugated tubes*, *multicorner columns*, *frusta*, *struts*, *honeycomb cells*, *sandwichplates* dan bentuk-bentuk khusus lain yang sesuai dengan kegunaannya sebagai penyerap energi impact akibat tabrakan depan. Contoh jenis *crash box* dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Jenis-jenis *Crash box*
Sumber : Jiayao Ma and Zhong You (2008)

Selain memiliki bentuk penampang, untuk mengoptimasi sebuah *Crash Box* digunakan *crush initiator*. *Crush Initiator* adalah variasi bentuk yang dilakukan terhadap *Crash Box* dengan tujuan sebagai *initial folding* sehingga mampu memaksimalkan penyerapan energi dan mode deformasi. Bentuk dari *crush initiator* sendiri bermacam-macam seperti lubang, cekukan, *diamond*, *bead*, dan lain-lain.



Gambar 2.6 Macam-macam bentuk *crush initiator*

Sumber : Shinde (2014:17)

2.3 Macam-macam Pola Deformasi

Secara umum pola deformasi yang terjadi untuk seluruh *crash box* telah sesuai dengan yang dikemukakan oleh Velmurugan dan Muralikannan (2009) dalam penelitiannya bahwa pada *axially loaded test* pola deformasi *crash box* mode aksial atau biasa disebut *concertina* dan mode *bukling* atau biasa disebut *diamond*. dan *mixed* mode yaitu campuran antara mode *concertina* dan *diamond*. Berikut adalah macam-macam deformasi yaitu:

a. Mode *Concertina*

Mode *concertina* atau biasa disebut dengan pola aksial yaitu deformasi yang terbentuk adalah pola aksimetris dan simetris dimana lipatan berbentuk rapi dan merata mulai dari awal sampai akhir. Pola aksial adalah pola deformasi yang diharapkan terjadi pada saat *crash box* mengalami beban impact, karena energi yang diserap oleh *crash box* akan semakin besar.



Gambar 2.7 Mode *Concertina*

Sumber : A. Eyvazian et al (2014: 1035)

b. Mode *Diamond*

Mode *diamond* dimana suatu spesimen *crash box* mengalami bukling dimana dinding *crash box* mengalami lipatan sebagian atau tidak berbentuk pola. Tidak ada pola lipatan biasa diperoleh dan kurva beban-defleksi tidak menunjukkan puncak sekunder konsisten dan panjang gelombang.

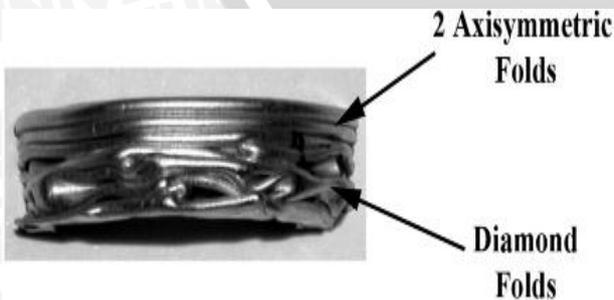


Gambar 2.8 Mode *Diamond*

Sumber : A. Eyvazian et al (2014: 1035)

c. *Mixed mode (axisymmetric-diamond)*

Mixed mode adalah campuran antara mode *concertina* dan mode *diamond*. Jika *crash box* sudah mengalami *diamond mode* maka dinding *crash box* tidak bisa kembali ke mode *concertina*.



Gambar 2.9 *Mixed mode (axisymmetric-diamond)*

Sumber : A. Eyvazian et al (2014: 1036)

d. Deformasi karena panjang

Deformasi ini terjadi karena spesimen *crash box* terlalu panjang. Atau biasa disebut *Euler buckling*.

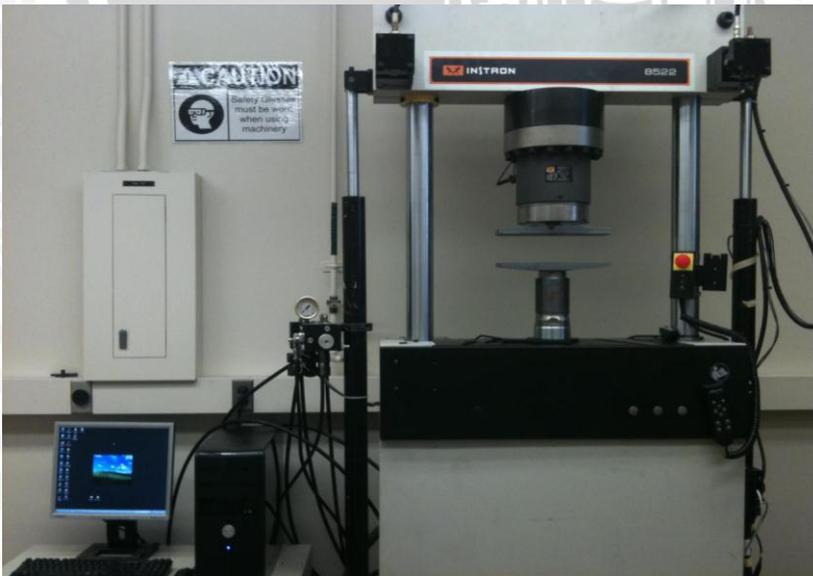


Gambar 2.10 Deformasi karena panjang
Sumber : A. Eyvazian et al (2014: 1036)

2.4 Pengujian *Crash Box* Skala Laboratorium

2.4.1 *Quasi-Static Test*

Quasi-Static Test merupakan suatu pengujian destruktif yang digunakan untuk menguji kekuatan *crash box*, prosedur pengujiannya dengan cara spesimen *crash box* diletakkan di dasar mesin uji dengan tumpuan baja (*steel base*) dan kemudian dikenai kompresi aksial dengan kelajuan konstan sebesar 7,67 m/s. Peralatan *Quasi Statictest* dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 *Quasi-Static testmachine*
Sumber : Chun Hou, 2013

2.4.2 Pengujian Dinamis

Pengujian Dinamis dilakukan dengan menggunakan *Instrumented Drop Mass Setup* (gambar 2.12). Pengujian ini fleksibel karena dapat memvariasikan massa dari *Impactor* dan ketinggian pelepasan *Impactor* yang dapat diatur. *Impactor* sendiri tersusun atas lempengan logam berpenampang lingkaran dengan massa masing-masing 7 dan 10 kg. Setelah *Impactor* memiliki ketinggian yang sudah diinginkan, *Impactor* akan jatuh bebas lurus mengenai *Crash Box* dengan kecepatan maksimal 10 m/s.



Gambar 2.12 Pengujian dinamis melalui *instrumented drop mass setup*
Sumber : Velmurugan (2009:394)

2.4.3 Software ANSYS

Software yang berbasis elemen hingga ini mempunyai kelebihan yaitu kemampuan untuk mendiskritisasi model dengan sangat halus, mampu bekerja dengan elemen lebih banyak dan menghasilkan output dengan ketelitian tinggi. ANSYS dapat digunakan untuk menganalisis antara lain: struktural, termal, elektris, magnetis, dan fluida.

Secara umum langkah-langkah analisis dengan menggunakan ANSYS dibagi menjadi tiga, yaitu :

1. *Preprocessing* (Proses Awal)

Tahap-tahap penting dalam *Preprocessing* :

- Pemodelan geometri : disini dilakukan proses modeling geometri baik 1D, 2D maupun 3D.

- Pemilihan tipe elemen : digunakan untuk mendiskritisasikan model yang dibuat.
- *Material properties* : input data material yang digunakan.
- *Meshing* : pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil/elemen diskrit.

2. *Solution* (Proses Solusi)

Tahap-tahap penting dalam *Solution* :

- Mendefinisikan analisis solusi yang dipakai (*Analysis Type*).
- Memasukkan kondisi batas (*constrain*).
- Menerapkan pembebanan.
- Penyelesaian (*Solving*).

3. *General Postprocessing* (Proses Pembacaan Hasil)

• *Plot Result*

Dengan menggunakan *contour plot* akan tampak distribusi tegangan atau variabel lain pada model sehingga mudah dalam menginterpretasikan informasi yang disajikan. Disini model digambarkan dengan sebaran warna yang menunjukkan besarnya tegangan yang terjadi.

• *List Result*

Hasil analisis dalam bentuk *List Result* berupa tabel yang memberikan informasi secara detil mengenai perindahan, tegangan dan regangan yang terjadi pada tiap node maupun elemennya.

• *Animation*

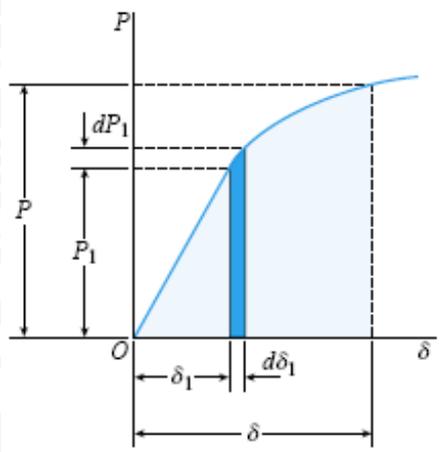
Hasil analisa yang diperoleh juga ditampilkan dalam bentuk simulasi (animasi).

2.5 Energi Regangan

Tumbukan dua buah benda akan menimbulkan konversi energi dari energi kinetik menjadi energi regangan (*strain energy*) pada material dengan mengabaikan perubahan energi ke bentuk lain. Energi regangan merupakan konsep dasar dalam mekanika terapan yang banyak digunakan untuk menentukan respon struktur terhadap beban statik dan dinamik.

Pada kondisi statik, pembebanan diterapkan secara perlahan-lahan sehingga beban bertambah dari nol ke harga maksimum. Pembebanan akan menyebabkan material

mengalami pertambahan panjang (perpindahan akibat deformasi) hingga mencapai pertambahan panjang maksimum sesuai besar pembebanan. Fenomena ini umumnya disajikan dalam bentuk diagram beban-perpindahan (*load-displacement diagrams*) seperti pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Diagram beban-perpindahan

Sumber : Gere, 2004 : 116

Berdasarkan tinjauan geometrik, usaha yang dilakukan oleh beban dalam rentang nilai P dan δ dinyatakan sebagai luas daerah dibawah kurva beban-perpindahan, sehingga dapat dirumuskan usaha total yang dilakukan oleh beban :

$$U = W = \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta \dots\dots\dots (2-1)$$

Dengan :

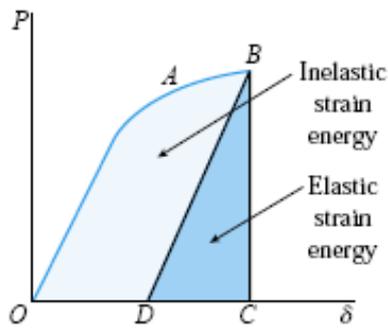
U = Energi regangan (J)

W = Usaha (J)

P = Beban (N)

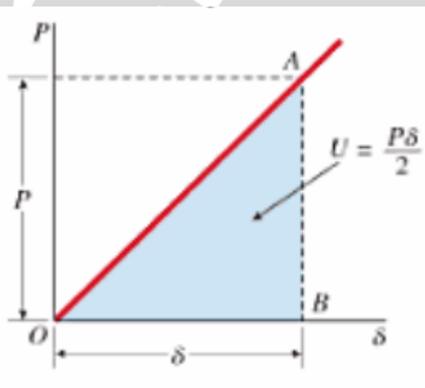
δ = Perpindahan (m)

Energi regangan dibagi menjadi dua yakni energi regangan elastis dan energy regangan inelastis (gambar 2.14). Saat pembebanan dihilangkan perlahan-lahan material akan kembali ke bentuk semula. Namun material tidak akan kembali ke bentuk semula bila batas elastik terlampaui. Hanya sebagian dari energi regangan yang dipulihkan bila pembebanan melewati batas elastic. Selama pembebanan dihilangkan, maka diagram akan berubah menurut garis BD. Energi regangan inelastis (OABDO) merupakan energi yang hilang dalam proses untuk mengubah bentuk secara permanen.



Gambar 2.14 Energi regangan elastis dan plastis
 Sumber : Gere, 2004 : 117

Pada batas elastis, diagram beban – perpindahan mengikuti garis linear (Gambar 2.15). sehingga besar energi regangan yang tersimpan adalah sebesar luas daerah segitiga yang dibentuk oleh garis linear A dengan sumbu x. Besar energi regangan yang tersimpan sama dengan usaha yang dilakukan oleh beban.



Gambar 2.15 Diagram beban-perpindahan elastis
 Sumber : Gere (2004 : 118)

Sehingga rumus energi regangan dalam kondisi elastis dapat ditulis :

$$U = W = \frac{P\delta}{2} \dots\dots\dots(2-2)$$

Dimana dapat diperoleh hubungan antara perpindahan dengan beban :

$$\delta = \frac{PL}{EA} \dots\dots\dots(2-3)$$

Dan persamaan energi regangan dapat dirumuskan menjadi :

$$U = \frac{P^2L}{2EA} \dots\dots\dots(2-4)$$



Dengan :

P = Beban (N)

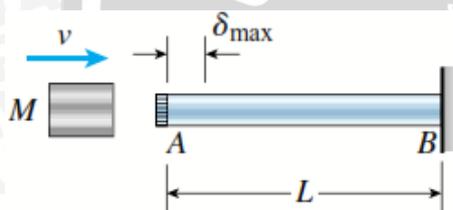
L = Panjang material (m)

E = Modulus elastisitas (Pa)

A = Luas penampang (m^2)

2.6 Beban *Impact*

Beban (*load*) dibagi menjadi dua, yaitu beban statik dan dinamik. Beban statik diberikan secara perlahan, bertahap dari nol menuju nilai maksimalnya kemudian konstan, sehingga fungsi waktu diabaikan. Beban dinamik diberikan secara tiba-tiba (*impact load*), sedangkan satu lagi diberikan dalam jangka waktu panjang dan intensitas variasi beban secara kontinyu (*fluctuating load*). Beban *impact* terjadi ketika dua objek bertumbukan atau dijatuhkan dari ketinggian tertentu sehingga menumbuk struktur lainnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Beban *impact* pada batang horizontal

Sumber : Gere (2004: 135)

Perpendekan maksimum pada batang dapat dianalisis dengan metode yang sama dengan pembahasan sebelumnya, yaitu dengan mengabaikan semua kerugian energi dan mengasumsikan energi *impact* ditransformasi menjadi *strain energy* pada batang. Energi *impact* pada *impactor* dirumuskan dengan energi kinetik $mv^2/2$. Besarnya *strain energy* pada batang ketika *impactor* berhenti pada perpendekan maksimum adalah $EA\delta_{max}^2/2L$, sehingga dua persamaan tersebut dapat dituliskan dalam persamaan :

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{EA\delta_{max}^2}{2L} \dots\dots\dots(\text{Gere, 2004 : 135}) \text{ (2-5)}$$

Untuk menentukan δ_{max} , maka :

$$\delta_{max} = \sqrt{\frac{mv^2L}{EA}} \dots\dots\dots(\text{Gere, 2004 : 135}) \text{ (2-6)}$$

Untuk menentukan *impact factor* maka harus mengetahui nilai *static displacement* dari batang. Pada kasus ini, *static displacement* adalah perpendekan terhadap berat

impactor yang diterapkan sebagai beban kompresi pada batang, sehingga dapat dirumuskan pada persamaan :

$$\delta_{st} = \frac{WL}{EA} = \frac{mgL}{EA} \dots\dots\dots(Gere, 2004 : 135) (2-7)$$

Selanjutnya *impact factor* dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Impact\ Factor = \frac{\delta_{max}}{\delta_{st}} = \sqrt{\frac{EA v^2}{mg^2 L}} \dots\dots\dots(Gere, 2004 : 135) (2-8)$$

Tegangan kompresi maksimum pada batang ditentukan dari perpendekan maksimum yang dapat dituliskan pada persamaan :

$$\sigma_{max} = \frac{E \delta_{max}}{L} = \frac{E}{L} \sqrt{\frac{mv^2 L}{EA}} = \sqrt{\frac{mv^2 E}{AL}} \dots\dots\dots(Gere, 2004 : 135) (2-9)$$

2.6.1 Impuls

Impuls merupakan hasil perkalian antara waktu dan gaya resultan. Impuls adalah besaran vektor yang memiliki arah sama dengan arah resultan gaya. Nilai impuls dari gaya konstan pada interval waktu tertentu t_2-t_1 adalah $P(t_2-t_1)$. Jika nilai gaya tidak konstan namun arahnya konstan maka persamaan impuls menjadi :

$$I = \int_{t_1}^{t_2} P dt \dots\dots\dots(2-10)$$

Keterangan :

I = impuls (Ns)

P = gaya (N)

t = waktu (s)

2.6.2 Momentum

Besarnya momentum dipengaruhi oleh massa dan kecepatan. Perubahan momentum suatu benda sama dengan impuls yang diaplikasikan pada benda tersebut. Berdasarkan Hukum II Newton, besarnya gaya dipengaruhi oleh massa dan percepatan.

$$P = m \frac{dv}{dt} \dots\dots\dots(2-11)$$

$$P dt = m dv \dots\dots\dots(2-12)$$

Persamaan 2-13 dapat dihubungkan dengan persamaan 2-14. Apabila v_1 adalah kecepatan ketika t_1 dan v_2 ketika t_2 maka :

$$\int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{v_1}^{v_2} m dv \dots\dots\dots(2-13)$$

Keterangan :

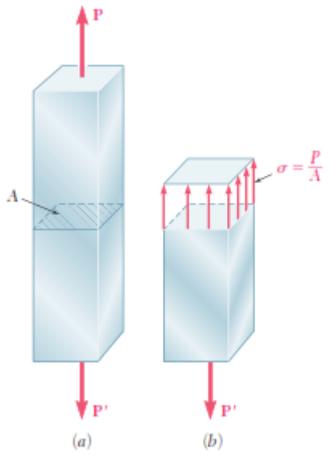
m = massa (kg)

v = kecepatan (m/s)



2.7 Analisis Tegangan dan Regangan

Tegangan (*stress*) dapat didefinisikan sebagai gaya yang terdistribusi pada setiap satuan luas penampang (*cross section*). Secara umum tegangan dibagi menjadi dua yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal adalah tegangan yang disebabkan oleh gaya yang bekerja secara tegak lurus luas permukaan benda seperti pada Gambar 2.17.



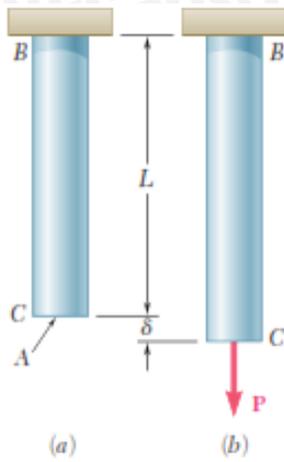
Gambar 2.17 Tegangan normal pada batang
Sumber : Beer (2012 : 5)

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(2-14)$$

Keterangan :

- σ = tegangan normal (N/m^2)
- P = gaya normal (N)
- A = luas permukaan gaya bekerja (m^2)

Bila suatu benda diberi gaya maka akan terjadi tegangan pada elemen-elemen benda tersebut. Tegangan yang terjadi akan menimbulkan regangan. Regangan didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan panjang dengan panjang awal suatu benda. Regangan pada suatu batang dapat dilihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Regangan pada batang
 Sumber : Beer (2012 : 66)

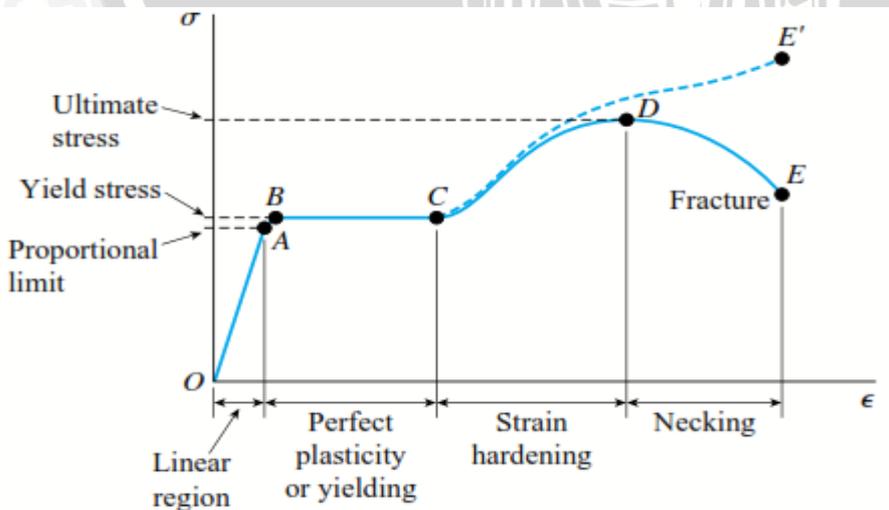
Regangan dibagi menjadi dua, yaitu regangan normal dan regangan geser.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \dots\dots\dots(2-15)$$

Keterangan :

- ϵ = regangan normal
- δ = perubahan panjang (*m*)
- L_0 = panjang awal (*m*)

Rasio antara tegangan normal dan regangan normal disebut modulus elastisitas (E) atau Modulus Young. Modulus ini berlaku pada garis lurus sebelum batas proporsional atau daerah elastis material. Hubungan antara tegangan dan regangan ditampilkan dalam kurva tegangan dan regangan seperti pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Grafik hubungan tegangan dan regangan
 Sumber : Gere (2004 : 15)



Sehingga dapat ditulis rumusan untuk modulus elastisitas :

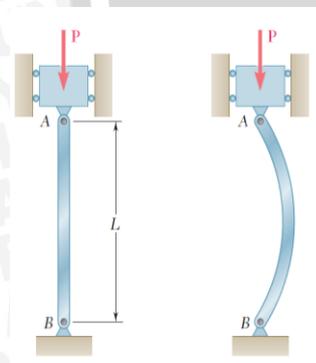
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots(2-16)$$

Material yang mengalami pembebanan secara aksial akan mengalami regangan searah maupun tegak lurus arah pembebanan. Konstanta yang menyatakan hubungan regangan tegak lurus arah pembebanan (*lateral*) ini dengan regangan aksial disebut rasio Poisson (*Poisson's ratio*).

$$\nu = - \frac{\text{regangan lateral}}{\text{regangan aksial}} \dots\dots\dots(2-17)$$

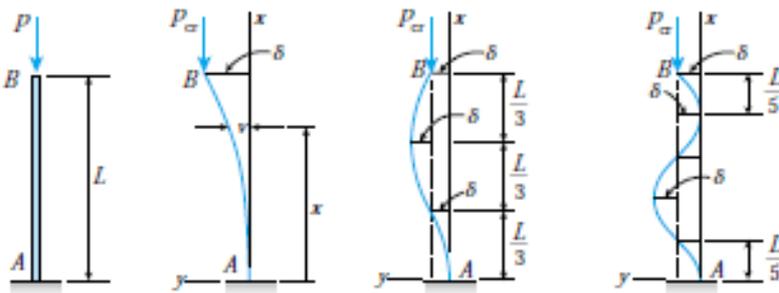
2.8 Tekuk (*Buckling*)

Buckling merupakan suatu jenis dari kegagalan struktur yang terjadi pada struktur kolom atau struktur berbentuk tiang, hal ini terjadi akibat pembebanan secara aksial pada struktur tersebut, jika suatu tiang yang tipis diberi tekanan maka tiang tersebut akan membengkok dan terdefleksi secara lateral sehingga dapat dikatakan struktur tersebut mengalami *buckling*. Dengan bertambahnya beban aksial pada struktur kolom maka defleksi lateral juga akan bertambah dan pada akhirnya kolom akan benar-benar terdeformasi plastis. Ilustrasi *buckling* dapat dilihat pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 *Buckling* pada struktur kolom
Sumber :.Beer, 2006: 635

Crash box merupakan salah satu jenis komponen yang berfungsi untuk menyerap energi kinetik akibat tabrakan dimana energi tersebut diubah kebentuk lain yaitu deformasi plastis pada struktur dengan bentuk tekukan – tekukan yang disebut *buckling*, sehingga dengan adanya *buckling* pada *crash box* tersebut energi kinetik akibat tabrakan yang diterima oleh kendaraan tidak langsung tersalur ke rangka utama yang akan menyebabkan kerusakan parah dan cedera pada penumpang.



Gambar 2.21 Teori dasar buckling pada crash box
 Sumber : Gere, 2003 : 765

Perilaku struktur kolom yang ideal ketika diberi beban secara aksial ada tiga yaitu :

- Jika $P < P_{cr}$, maka struktur kolom dalam keadaan stabil dan setimbang dengan posisi tegak lurus.
- Jika $P = P_{cr}$, maka struktur kolom berada dalam kondisi netral ekuilibrium baik dalam posisi tegak atau sedikit membengkok.
- Jika $P > P_{cr}$, maka struktur kolom berada dalam kondisi ekuilibrium yang tidak stabil pada keadaan tegak dan karena itu terjadi *buckling*.

$$P_{cr} = \frac{C\pi^2 EI}{L^2} \dots\dots\dots(2-18)$$

Dengan :

- P_{cr} = Beban kritis (N)
- E = Modulus Elastisitas (Pa)
- I = Momen inersia penampang (m^4)
- L = Panjang kolom (m)
- C = Kondisi tumpuan

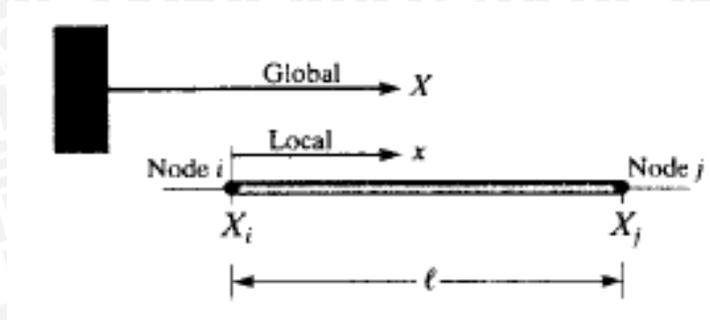
2.9 Metode Elemen Hingga

2.9.1 Sistem Koordinat

Sistem koordinat dalam analisis dengan metode elemen hingga dibagi menjadi tiga macam, yaitu:

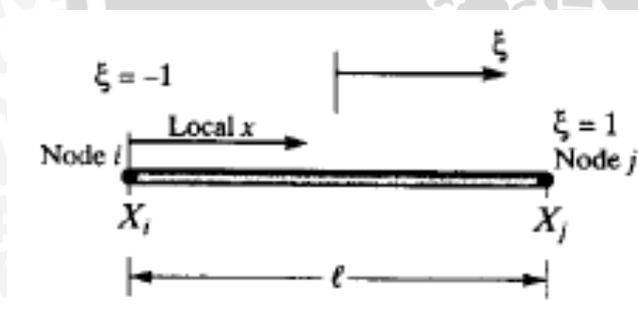
- a. Sistem koordinat global adalah kerangka dari acuan untuk bagian keseluruhan. Semua titik diletakkan pada penggunaan jarak sistem koordinat global, hanya ada satu sistem global dalam sebuah analisa khusus seperti pada gambar 2.22.

- b. Sistem koordinat lokal adalah pendekatan terhadap elemen. Orientasinya relatif terhadap elemen yang tidak memperdulikan perubahan dari orientasi relatif elemen ke sistem global. Dapat dijelaskan seperti pada gambar 2.22.



Gambar 2.22 Hubungan sistem koordinat global dengan koordinat elemen.
Sumber : Moaveni, 1999 : 131

- c. Sistem koordinat alamiah (natural). Sistem ini terdiri dari koordinat dimensi yang letaknya ditandai pada elemen tanpa memperdulikan ukuran atau bentuk elemennya seperti pada gambar 2.23.



Gambar 2.23 Hubungan sistem koordinat lokal dengan koordinat natural elemen.
Sumber : Moaveni, 1999 : 132

2.9.2 Prosedur Perhitungan Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu prosedur numerik dengan konsep dasar adalah pembagian (diskretisasi) suatu kontinum menjadi elemen-elemen kecil yang berhingga dan memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana dari kontinumnya yang disebut elemen hingga. Analisa metode elemen hingga dilakukan untuk mendapatkan suatu nilai pendekatan (bukan eksak) berdasarkan asumsi perpindahan atau asumsi tegangan atau dapat juga berdasarkan kombinasi keduanya.

1. Diskretisasi dan pemilihan elemen

Diskretisasi adalah proses membagi suatu struktur menjadi elemen-elemen kecil yang berhingga dan memiliki geometri yang lebih sederhana. Elemen-elemen ini berhubungan pada titik-titik simpul (node) membentuk rangkaian yang secara bersama dan keseluruhan mendekati bentuk struktur sebenarnya. Jadi bentuk geometri struktur yang kompleks dapat disederhanakan dengan diskretisasi untuk lebih mempermudah penganalisaan.

Pemilihan jenis elemen tergantung pada karakteristik rangkaian kesatuan dan idealisasi yang dipilih. Idealisasi struktur dua dimensi dapat menggunakan elemen segitiga, segiempat maupun kuadrilateral, sedangkan struktur tiga dimensi dapat menggunakan elemen heksahedron.

2. Memilih fungsi pendekatan

Variasi perpindahan pada suatu elemen didekati dengan fungsi interpolasi yang didasarkan pada harga simpul yang mengitari. Fungsi yang umum digunakan adalah polinomial. Pendekatan dengan fungsi interpolasi ini disebabkan sulitnya mencari jawaban tertutup, sehingga dipilih suatu bentuk jawaban, yaitu distribusi perpindahan yang merupakan besaran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi yang harus memenuhi hukum, prinsip dan syarat batas yang menjadi sifat persoalan.

3. Menurunkan persamaan matrik kekakuan

Prinsip usaha virtual menghasilkan persamaan matrik kekakuan elemen, yang dinyatakan sebagai:

$$[k] = \int [B]^T [C] [B] dV \quad \dots\dots\dots (2-19)$$

Dengan:

$[k]$ = matrik kekakuan elemen

$[B]$ = matrik konstitutive hubungan regangan-perpindahan

$[C]$ = matrik konstitutive hubungan tegangan-regangan

V = volume

4. Menghitung matrik beban total

Beban yang bekerja didefinisikan menjadi tiga macam, sehingga beban total adalah:

$$F = Q_{NF} + Q_{BF} + Q_T \quad \dots\dots\dots (2-20)$$

Dengan:

- Q_{NF} = beban pada konsentrasi node
- Q_{BF} = beban akibat beban sendiri (*body force*)
- Q_T = beban traksi (*surface traction*)

5. Merakit elemen menjadi struktur

Perakitan persamaan elemen dibawa ke bentuk persamaan global. Prosesnya harus memenuhi sifat konvergen dan sifat sinambung, yaitu titik-titik yang semula bersebelahan harus tetap bersebelahan setelah elemen dikenai beban. Bentuk persamaan global elemen:

$$[K]\{q\} = \{R\} \tag{2-21}$$

ngan:

- $[K]$ = matrik sifat/kekakuan elemen
- $\{q\}$ = vektor perpindahan node
- $\{R\}$ = matrik beban total

Setelah matrik kekakuan global diperoleh dan syarat-syarat batasnya dimasukkan maka perpindahan simpul (q) dapat dicari. Suatu syarat batasmemberikan informasi bagaimana struktur ditopang dalam ruang, dengan memasukkan nilai perpindahan yang telah ditetapkan sesuai kondisi pada struktur.

6. Mendapatkan perpindahan global

Persamaan global yang mendapatkan syarat batas merupakan sekumpulan persamaan linier yang dapat diselesaikan dengan cara eliminasi Gauss untuk mendapatkan besaran-besaran primer, yaitu $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$.

$$\begin{aligned} k_{1,1} q_1 + k_{1,2} q_2 + \dots + k_{1,n} q_n &= R_1 \\ k_{2,1} q_1 + k_{2,2} q_2 + \dots + k_{2,n} q_n &= R_2 \\ \dots & \\ k_{n,1} q_1 + k_{n,2} q_2 + \dots + k_{n,n} q_n &= R_n \end{aligned} \tag{2-22}$$

Persamaan diatas akan diselesaikan dengan cara eliminasi Gauss untuk mendapatkan besaran-besaran rimer yaitu $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$.



7. Mendapatkan besaran sekunder dan interpretasi hasil

Dari besaran pertamanya yang berupa perpindahan, dapat dicari besaran sekunder yang berupa tegangan atau regangan, dengan menggunakan hubungan antar keduanya. Hubungan tegangan-regangan pada kondisi 3D dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2-23)$$

Hubungan tegangan-regangan:

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \dots\dots\dots(2-24)$$

Hubungan regangan-perpindahan:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \dots\dots\dots(2-25)$$

Sehingga tegangan dapat dirumuskan sebagai:

$$\{\sigma\} = [C][B]\{d\} \dots\dots\dots(2-26)$$

Hasil akhir dari perhitungan dengan metode elemen hingga ini berupa harga distribusi tegangan yang akan ditampilkan di sepanjang struktur untuk dianalisa sesuai dengan rumusan masalah.

2.10 Hipotesis

Semakin besar ketebalan pada *crash box* maka kemampuan *crash box* tersebut dalam menyerap energi akan semakin meningkat, karena kekakuannya yang semakin meningkat. Dengan adanya lekukan pada dinding *crash box* maka deformasi yang terjadi adalah pola *concertina* karena terjadi pemusatan tegangan didaerah lekukan sehingga pola deformasi yang terjadi dapat lebih terkontrol dan stabil.