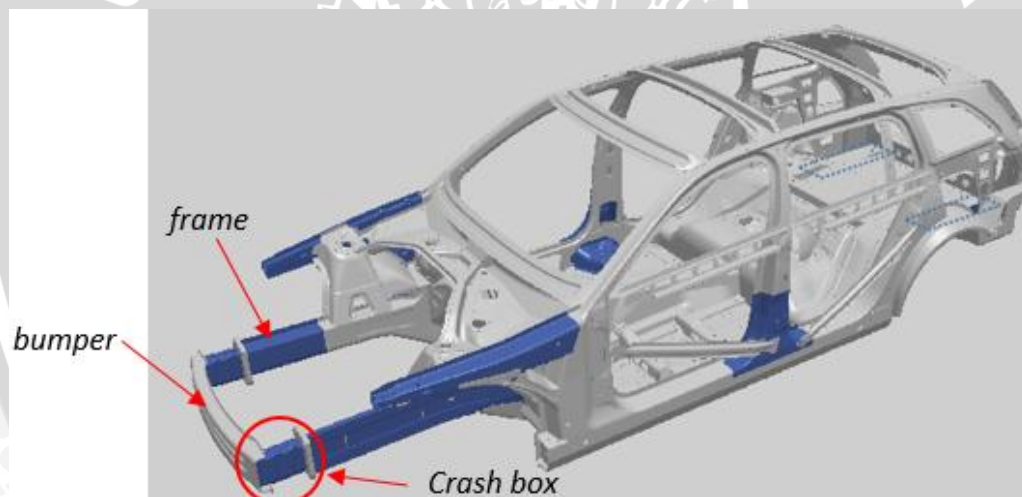


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

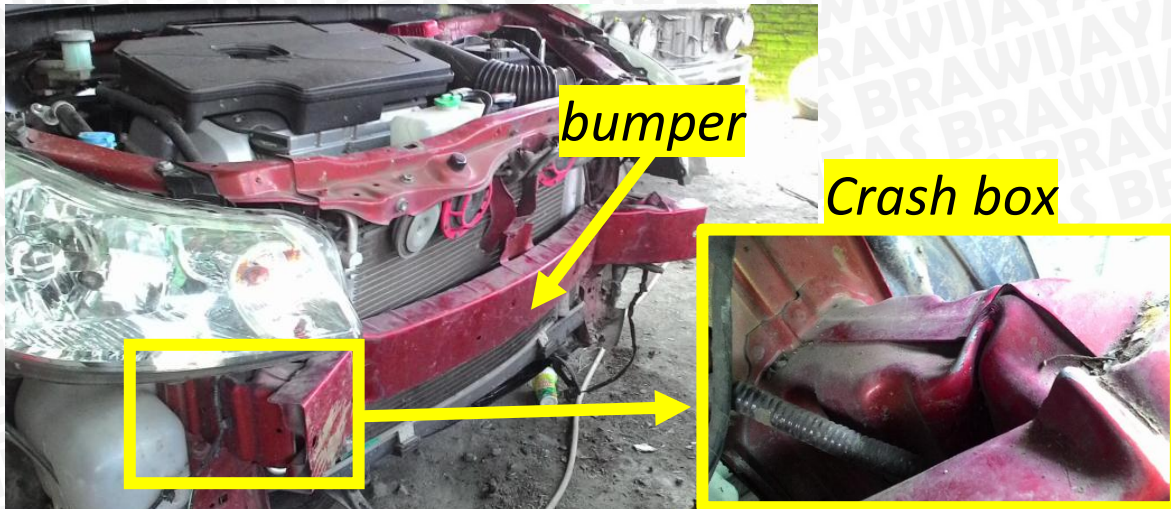
2.1 *Crash Box*

2.1.1 Pengertian *Crash Box*

Crash box merupakan komponen keselamatan pasif pada kendaraan beroda empat. *Crash box* merupakan material *deformable* yang dipasang diantara *frame* dan *bumper* dengan harapan, ketika terjadi tabrakan *crash box* akan menyerap energi impact akibat tabrakan dan merubahnya menjadi deformasi plastis pada *crash box*, sehingga energi akibat tabrakan yang diteruskan pada kabin pengemudi dapat dikurangi. Gambar 2.1 merupakan contoh struktur mobil yang menggunakan *crash box*, dimana *crash box* deletakkan pada *frame* yang sekaligus berfungsi sebagai tumpuan *bumper*. Gambar 2.2 merupakan contoh *crash box* pada struktur mobil yang terdeformasi akibat tabrakan.



Gambar 2.1 struktur mobil dengan *crash box*
Sumber: Hilfrich dan Seidner (2008:14)



Gambar 2.2 Bagian depan mobil Suzuki X-over setelah mengalami tabrakan
Sumber: dokumen pribadi

Adapun kriteria yang harus dimiliki *crash box* antara lain:

- *Crash box* harus murah dan mudah diproduksi, karena *crash box* merupakan komponen sekali pakai.
- Diharapkan *crash box* mampu menyerap energi dampak akibat tabrakan semaksimal mungkin.

2.1.2 Jenis-jenis *Crash Box*

Crash box memiliki berbagai macam bentuk dan terus berkembang seiring semakin banyaknya penelitian mengenai optimasi desain *crash box*. Macam-macam *crash box* antara lain *crash box* berpenampang lingkaran (*circular tubes*), berpenampang persegi (*square tubes*), *corrugated tubes*, *multicorner columns*, *frusta*, *struts*, *honeycomb cells*, *sandwich plates* dll.



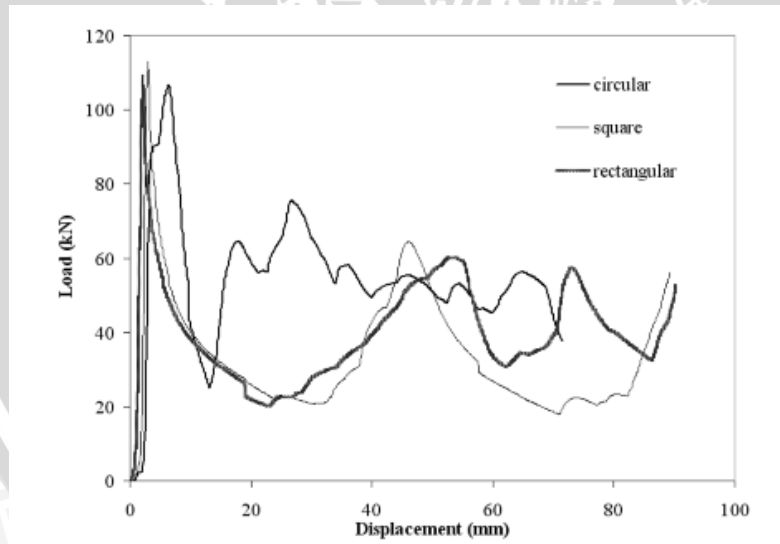
Gambar 2.3 Jenis-jenis *Crash box*
Sumber : Li (2013)

2.2 Penelitian Sebelumnya

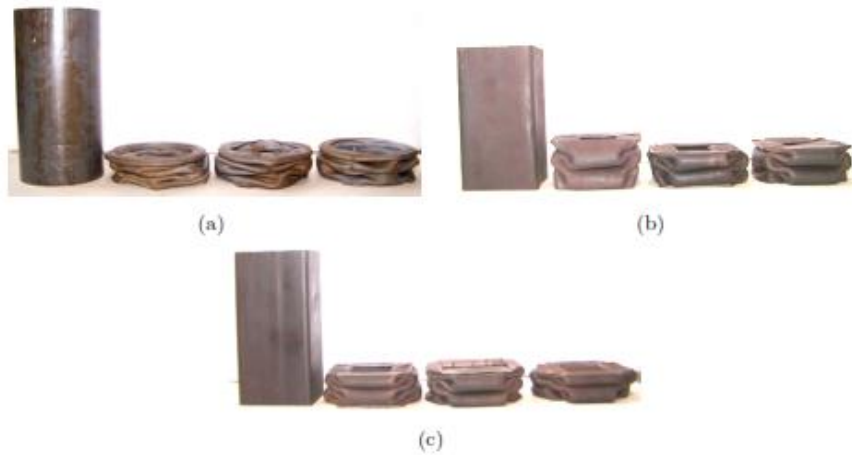
2.2.1 Energy Absorption Characteristics of Annealed Steel Tubes of Various Cross Sections in Static and Dynamic Loading

Velmurugan (2009) melakukan penelitian terhadap penyerapan energi dan pola doformasi *crash box* dengan material ASTM E-04. Variabel yang divariasikan adalah bentuk penampang *crash box*, yaitu lingkaran, persegi, dan persegi panjang, dimana luas penampang dan ketebalannya adalah sama. Penelitian dilakukan dalam 2 uji, yaitu *quasi-static test* dan *dynamic test* dengan pembebanan arah aksial.

Pengujian secara *quasi-static* dilakukan dengan menekan spesimen dengan massa 20 ton menggunakan *Universal Testing Machine*. dari pengujian *quasi-static* didapatkan bahwa *crash box* berpenampang lingkaran mampu menyerap energi dengan lebih baik dari pada lainnya dengan nilai *peak force* terendah, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4. Pola deformasi yang terbentuk pada penampang lingkaran adalah *axisymmetric mode*, sedangkan pada penampang persegi dan persegi panjang memiliki pola deformasi *symmetric mode* dan lipatan berbentuk *diamond*. Spesimen setelah terdeformasi dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.4 Grafik Load-displacement quasi-static test crash box model Velmurugan. Sumber: Velmurugan (2009:391)

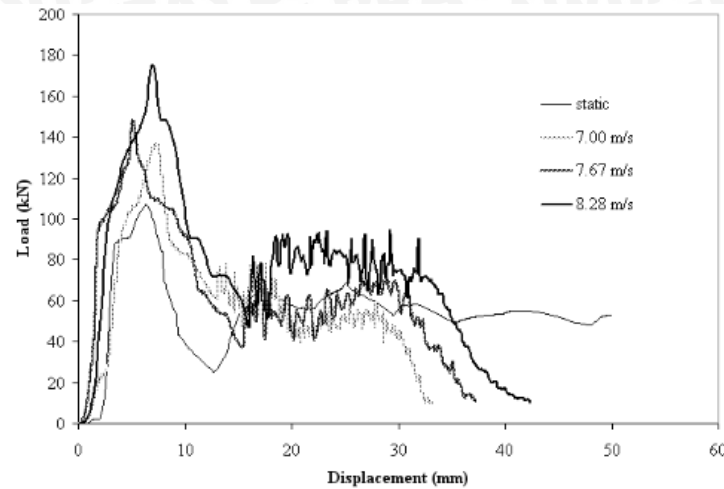


Gambar 2.5 Spesimen model Velmurugan setelah *quasi-static test*: (a) Penampang Lingkaran. (b) Penampang persegi. (c) Penampang Persegi Panjang.
Sumber: Velmurugan (2009:390)

Pengujian yang kedua menggunakan *dynamic test* dengan instrumen *drop mass*. *Crash box* dihantam dengan discs bermassa 103 kg dari ketinggian tertentu, dengan kecepatan 7,00 m/s, 7,67 m/s, dan 8,28 m/s tercatat pada saat *discs* menyentuh permukaan teratas *crash box*. Dari penelitian didapatkan bahwa *crash box* berpenampang lingkaran memiliki performa terbaik dibanding penampang lain. Dan pola yang terbentuk pada *dynamic test* ini sedikit berbeda dibanding *quasi-static test*. Pada *crash box* berpenampang lingkaran, pola yang terbentuk adalah axisymmetric mode dan akan membentuk pola *diamond* ketika kecepatan tumbuk meningkat seperti pada Gambar 2.6. Adapun grafik *load-displacement* *crash box* berpenampang lingkaran dengan variasi kecepatan tumbuk dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.6 Pola deformasi yang terbentuk pada *crash box* berpenampang lingkaran dengan variasi kecepatan tumbukan.
Sumber: Velmurugan (2009:395)



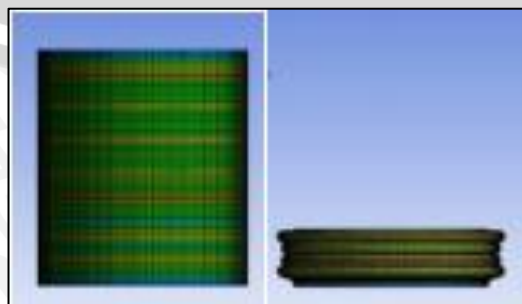
Gambar 2.7 Grafik *Load-displacement* pada *crash box* berpenampang lingkaran dengan variasi kecepatan tumbukan.

Sumber: Velmurugan (2009:395)

2.2.2 Analisis Penyerapan Energi dan Deformasi *Crash Box* dengan Variasi Diameter dan Panjang pada Uji *Dropped Weight Impact*

Talib (2013) melakukan penelitian untuk mengetahui penyerapan energi pada *crash box* berpenampang lingkaran dengan variasi tinggi dan diameter lingkaran. Material *crash box* yang digunakan adalah AISI 1340 *Steel annealed at 910°*. *Crash box* memiliki tebal dan massa yang tetap secara berurutan yaitu 1,6 mm dan 0,447 kg. Penelitian dilakukan dengan simulasi menggunakan software berbasis FEM dengan pemodelan beban dinamik yang ditumbukkan pada *crash box* dengan arah aksial. *Impactor* ditumbukkan berkecepatan 7,67 m/s dengan massa 103 kg.

Dari penelitian ini didapatkan bahwa penambahan diameter dapat meningkatkan penyerapan energi, dan sebaliknya, penambahan tinggi *crash box* menyebabkan energi yang diserap semakin berkurang. Adapun penyerapan energi terbesar terjadi pada *crash box* dengan diameter 97,34 mm dan tinggi 115 mm dengan hasil deformasi terlihat pada Gambar 2.8.

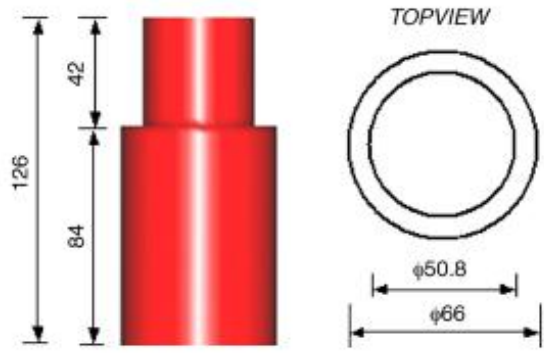


Gambar 2.8 *Crash box* model Talib (D=97,34 mm dan L=115 mm)

Sumber: Talib (2013:4)

2.2.3 Evaluation of The Crash Energy Absorption of Hydroformed Bumper Stays

Sohn (2007) melakukan penelitian terhadap penyerapan energi dan perilaku deformasi pada *hydroformed bumper stay* dengan material STKM11A. Adapun dimensi *bumper stau* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 2.9.

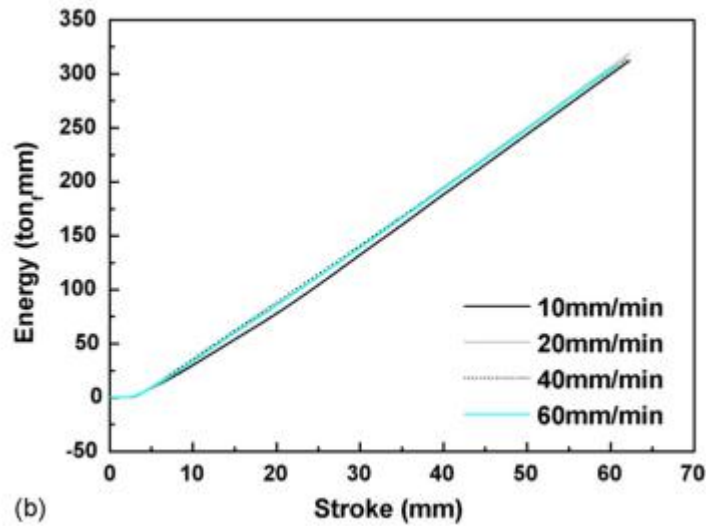


Gambar 2.9. Dimensi *Hydroformed Bumper Stay* model Sohn
Sumber: Sohn (2007:284)

Pengujian pertama dilakukan dengan *static compression test* menggunakan *hydraulic press testing machine*. pengujian ini dilakukan untuk mengatuhui perilaku deformasi *hydroformed bumper stay* dan penyerapan energinya dibawah tekanan dengan kecepatan 10-60mm/min dengan massa penekan 20 ton. Dari pengujian didapatkan bahwa *hydroformed bumper stay* memiliki pola deformasi *axisymmetric mode* seperti pada gambar 2.10. Selain itu, variasi kecepatan penekanan hanya memberi sedikit perbedaan pada penyerapan energinya, seperti yang terlihat pada Gambar 2.11.

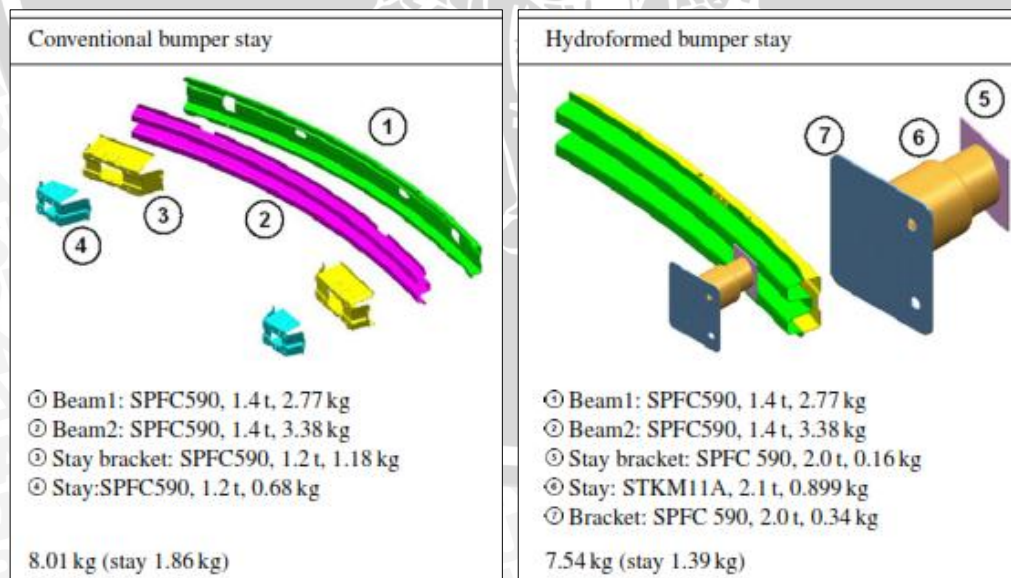


Gambar 2.10 *Hydroformed Bumper Stay* setelah dilakukan static-compression
Sumber: Sohn (2007:285)



Gambar 2.11 Grafik penyerapan energi dengan variasi kecepatan penekanan pada *hydroformed bumper stay*.
 Sumber: Sohn (2007:285)

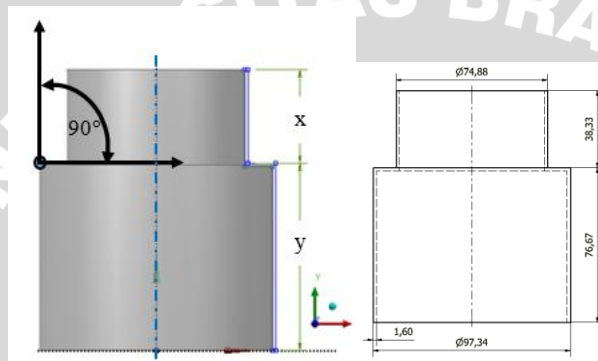
Pengujian kedua dilakukan dengan *impact test* menggunakan pendulum bermassa 1 ton dan variasi kecepatan pendulum dari 3.2 – 10,4 m/jam. Pengujian dilakukan untuk membandingkan defleksi pada *conventional bumper stay* dan *hydroformed bumper stay*, dengan rakitan seperti terlihat pada gambar 2.12. dari pengujian didapat bahwa defleksi yang terjadi pada kecepatan rendah cenderung sama. Peningkatan defleksi pada *hydroformed bumper stay* baru terlihat ketika kecepatan pendulum meningkat.



Gambar 2.12 rakitan *bumper stay*
 Sumber: Sohn (2007:285)

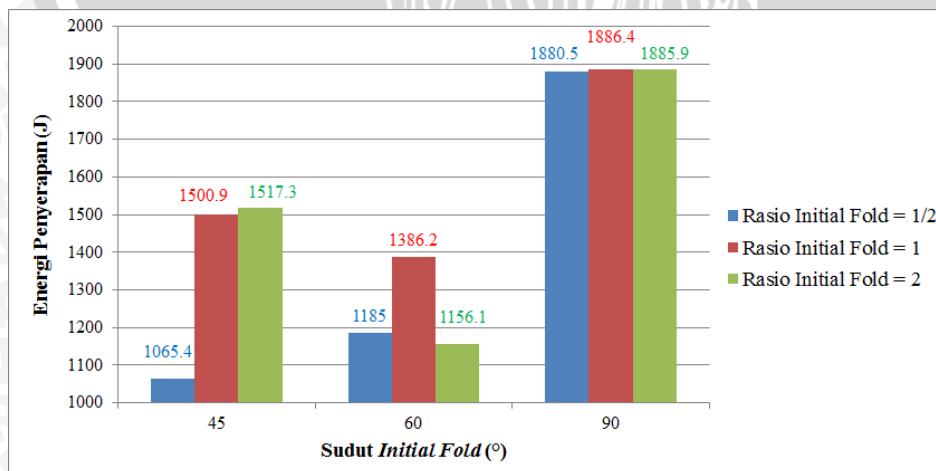
2.2.4 Analisis Pola Deformasi dan *Energy Absorption* pada *Initial Fold Crash Box* Menggunakan Metode *Frontal Crash Test*

Ilman Fauza meneliti penyerapan energi dan pola deformasi pada *initial fold crash box* (IFCB) dengan menggunakan metode simulasi dengan *software* berbasis *finite element method* (FEM). IFCB menggunakan material ASTM E-04 dengan variasi sudut *initial fold* dan rasio peletakkan *fold* (x:y), seperti digambarkan pada Gambar 2.13. Sudut yang divariasikan yaitu 45° , 60° , dan 90° , dan rasio x:y sebesar 0,5;1; dan 2. Pembebanan dilakukan dengan impactor bermassa 103 kg yang bergerak dengan kecepatan 7,67 m/s searah sumbu -Y dalam 0,00485s.



Gambar 2.13 Desain dan Dimensi IFCB Ilman Fauza
Sumber: Ilman Fauza (2015:19)

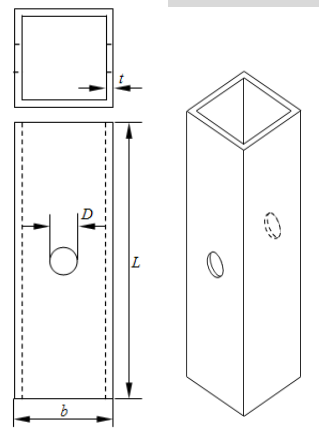
Hasil dari penelitian ini adalah pola deformasi pada setiap desain adalah *axixymmetric mode dan concertina*. Desain IFCB dengan sudut *fold* 90° dan rasio x:y=1 memiliki nilai penyerapan energi yang terbesar. Hal ini dapat dibandingkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Grafik penyerapan energi pada semua desain IFCB
Sumber: Ilman Fauza (2015:34)

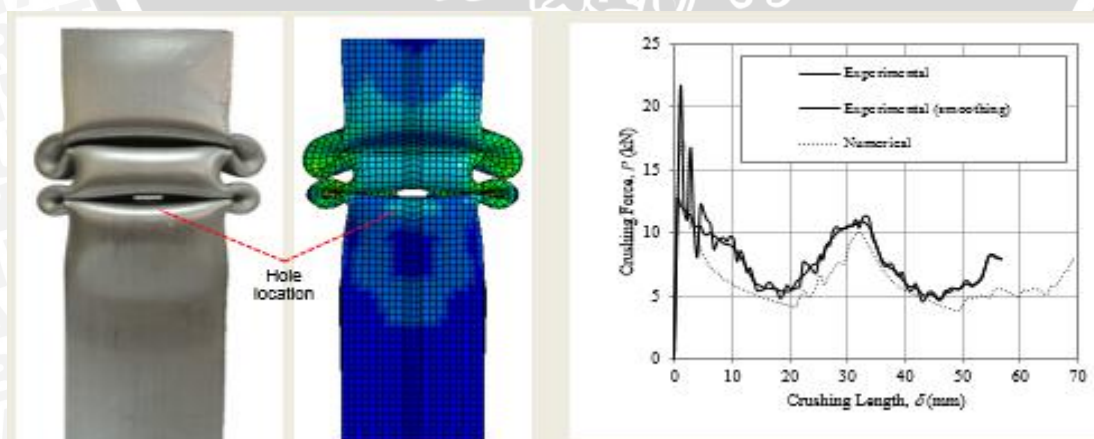
2.2.5 Numerical and Experimental Impact Analysis of Square Crash Box Structure with Holes

S. A. Sitompul (2013) melakukan analisis secara eksperimental dan numerik terhadap *crash force efficiency* (CFE) *crash box* dengan penampang persegi dengan lubang. Material yang digunakan adalah AA 6063-T1. Lubang yang ditambahkan memiliki rasio diameter 0,0; 0,2; 0,3; dan 0,5 terhadap panjang sisi penampang. Dimensi *crash box* dapat dilihat pada Gambar 2.15.

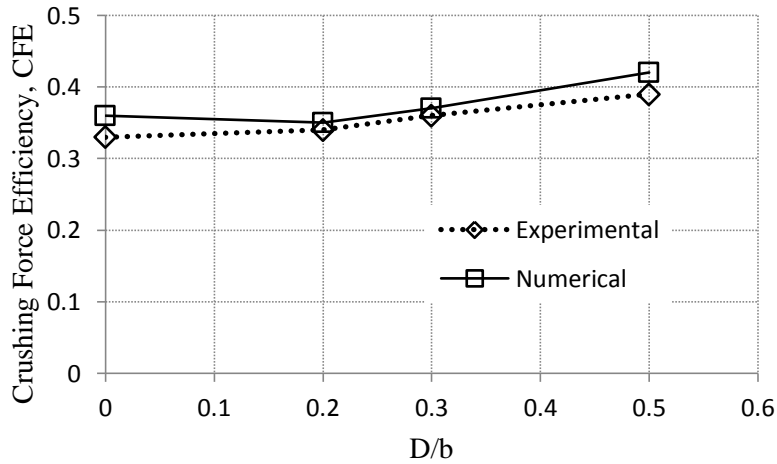


Gambar 2.15 Dimensi *Crash Box* ($b=38$ mm, $t=1,15$ mm, $L=180$ mm)
Sumber: S. A. Sitompul (2013:448)

Dari penelitiannya didapatkan bahwa analisis numerikal dapat memprediksi analisis secara eksperimental seperti yang terlihat pada Gambar 2.16. selain itu, penambahan lubang dengan peningkatan diameter lubang dapat meningkatkan nilai *crash force efficiency* (CFE) seperti yang tergambar pada Gambar 2.17.



Gambar 2.16 Grafik *Load-displacement* pada *crash box* dengan dua lubang dan rasio diameter 0,2.
Sumber: S.A Sitompul (2013:450)



Gambar 2.17 Grafik CFE pada *crash box* dengan dua lubang.
Sumber: S.A. Sitompul (2013)

2.3 Pengujian Destruktif *Crash Box*

2.3.1 Drop Weight Impact Test

Drop weight impact test merupakan pengujian destruktif dengan cara menjatuhkan beban *impactor* searah sumbu *crash box* dari ketinggian dan dengan kecepatan yang ditetapkan pada *crash box* yang ditumpu dengan *fix support* dari ketinggian, energi potensial *impactor* akan diubah menjadi energi kinetik saat jatuh hingga menghantam *crash box* yang menyebabkan deformasi plastik dan akhirnya terhenti.



Gambar 2.18 *drop weight impact test*
Sumber: S. A. Sitompil (2013:17)

2.3.2 Quasi-Static Test

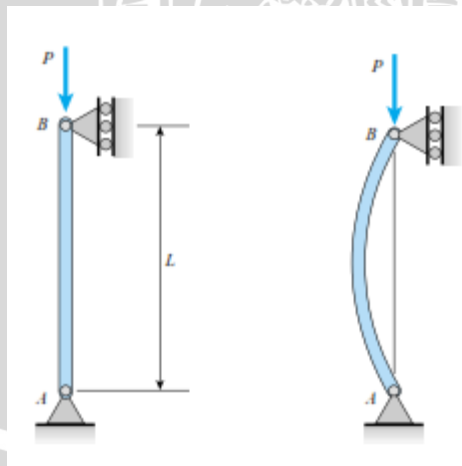
Pengujian *quasi-static* merupakan pengujian dengan cara menekan *crash box* dengan kecepatan yang rendah. Pengujian ini biasanya menggunakan *universal testing machine*.



Gambar 2. 19 *universal testing machine*
Sumber: S. A. Sitompul (2013:17)

2.4 Tekuk (*Buckling*)

Tekuk (*buckling*) merupakan kegagalan pada struktur berbentuk kolom yang ramping. *Buckling* terjadi akibat struktur kolom dikenai gaya secara aksial. Jika kolom relatif tipis dan tidak mampu menahan beban, maka kolom akan mengalami defleksi secara lateral atau juga bisa disebut sebagai *bending*. Saat terjadi defleksi lateral inilah dikatakan bahwa kolom mengalami *buckling*. Seiring dengan bertambahnya beban aksial, maka defleksi lateral akan bertambah juga. Gambar 2.20 merupakan contoh kolom yang mengalami beban aksial.



Gambar 2.20 struktur kolom tipis yang dikenakan beban aksial
Sumber: Gere (2004:748)

Buckling tidak hanya terbatas pada struktur kolom, namun juga dapat terjadi pada berbagai jenis struktur lain, misalnya pada kaleng alumunium yang diinjak, silinder berdinding tipis akan terdefleksi akibat beban tubuh si penginjak.

Crash box merupakan komponen pengaman pasif pada kendaraan roda empat yang berfungsi menyerap energi kinetik akibat tabrakan dan mengubahnya menjadi deformasi plastis dengan bentuk tekukan atau buckling. Dengan mengubahnya menjadi deformasi plastis inilah menyebabkan energi akibat tabrakan dapat dikurangi sebelum akhirnya tersalur pada rangka.

Transisi antara kondisi stabil dan tidak stabil yang terjadi pada pembebanan aksial tertentu disebut dengan beban kritis (*critical load*). Terdapat tiga perilaku yang ditunjukkan struktur kolom ketika dikenai beban, yaitu:

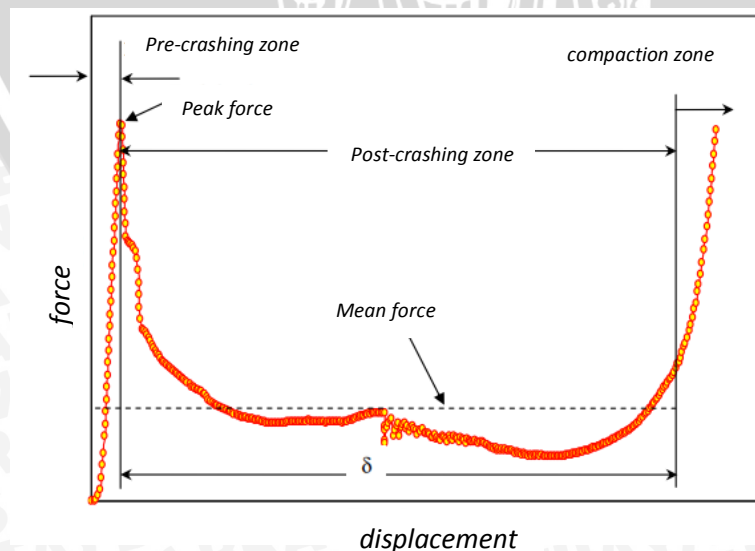
- Ketika $P < P_{cr}$, struktur kolom tetap dalam kondisi stabil dan belum mengalami tekuk.
- Ketika $P = P_{cr}$, struktur kolom dalam kondisi netral, yaitu hampir mengalami tekuk.
- Ketika $P > P_{cr}$, struktur kolom dalam kondisi tidak stabil sehingga terjadi tekuk.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (2-1)$$

2.5 Crash Force Efficiency (CFE)

Crash force efficiency (CFE) merupakan persentasi yang menyatakan kemampuan struktur untuk mengalami *buckling*. *Crash force efficiency* (CFE) hanyalah digunakan sebagai pembandingan pada desain-desain yang diamati. Semakin rendah nilai CFE berarti *crash box* semakin sulit untuk mengalami *folding* pertama. Selain itu, rendahnya CFE juga dapat meningkatkan kemungkinan *crash box* pecah.

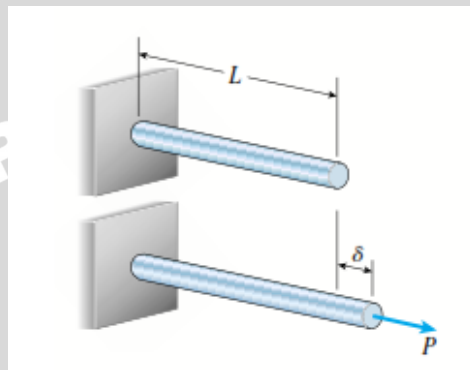
$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} \times 100\% \quad (2-2)$$



Gambar 2.21 *load-displacement* diagram
Sumber: S. Attaollahi (2011:2)

2.6 Energi Regangan

Energi regangan merupakan konsep dasar mekanika yang banyak digunakan untuk untuk mengetahui respon struktur baik terhadap beban statik ataupun dinamik. Gambar 2.22 memperlihatkan batang dengan panjang L dikenai gaya tarik secara aksial sebesar P . Beban P adalah beban statik yang bekerja dari nol hingga titik maksimum ketika beban mencapai nilai maksimum sebesar P . Beban P menyebabkan perpindahan sejauh δ , sehingga dapat dikatakan bahwa P telah melakukan kerja terhadap batang.



Gambar 2. 22 Pembebanan arah aksial pada batang
Sumber: Gere (2004:16)

Hubungan antara beban dan besarnya perpindahan akan menghasilkan diagram load-displacement seperti pada gambar 2.23 Dimana bentuk grafik berbeda-beda sesuai dengan properties material yang digunakan. Dari grafik dapat dilihat bahwa dP telah mengakibatkan batang mengalami perpanjangan sebesar $d\delta$ dengan besarnya kerja ditunjukkan pada area yang di arsis di bawah kurva. Sehingga, total kerja yang dilakukan beban P terhadap batang L adalah seluruh area di bawah kurva.

$$W = \int_0^{\delta} P d\delta \quad (2-3)$$

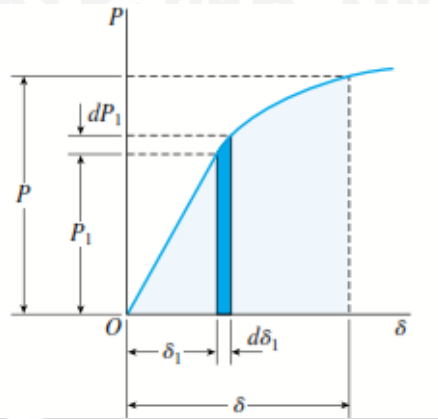
Dengan :

U = Energi regangan (J)

W = Usaha (J)

P_1 = Beban (N)

δ_1 = Perpindahan akibat deformasi (m)

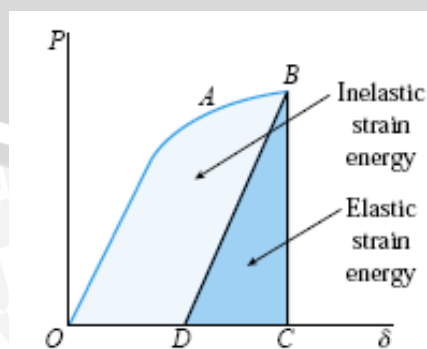


Gambar 2.23 Diagram load-displacement
Sumber: Gere (2004:116)

Ketika beban dikenakan pada batang, regangan terbentuk. Terbentuknya regangan ini menyebabkan peningkatan energi pada batang itu sendiri yang disebut energi regangan (*strain energy*). Energi regangan didefinisikan sebagai energi yang diserap batang selama proses pembebanan. Sehingga, dapat diambil kesimpulan bahwa energi regangan sama dengan kerja yang dilakukan beban terhadap batang.

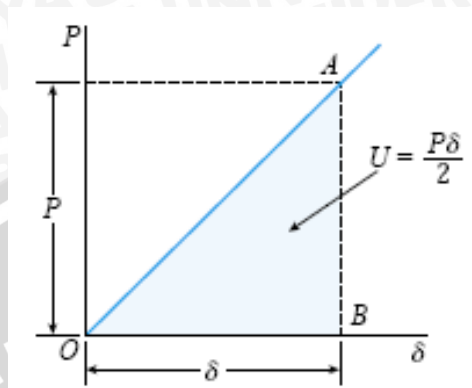
$$U = W = \int_0^{\delta} P d\delta \quad (2-4)$$

Energi regangan dibagi menjadi dua yakni energi regangan elastis dan energi regangan inelastis (gambar 2.23). Saat pembebanan dihilangkan perlahan-lahan material akan kembali ke bentuk semula. Namun material tidak akan kembali ke bentuk semula bila batas elastis terlampaui. Hanya sebagian dari energi regangan yang dipulihkan bila pembebanan melewati batas elastis. Selama pembebanan dihilangkan, maka diagram akan berubah menurut garis BD. Energi regangan inelastis (OABDO) merupakan energi yang diserap dalam proses untuk mengubah bentuk secara permanen.



Gambar 2.24 Energi regangan elastis dan plastis
Sumber: Gere (2004 : 117)

Pada batas elastis, diagram beban-perpindahan mengikuti garis linear (Gambar 2.25). 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 2.25 Diagram beban-perpindahan elastis

Sumber : Gere, 2004 : 118

Sehingga rumus energi regangan dalam kondisi elastis dapat ditulis :

$$U = W = \frac{P\delta}{2} \quad (2-5)$$

Dimana dapat diperoleh hubungan antara perpindahan dengan beban:

$$\delta = \frac{PL}{EA} \quad (2-6)$$

Dan persamaan energi regangan dapat dirumuskan menjadi :

$$U = \frac{P^2L}{2EA} \quad (2-7)$$

2.7 Pola Deformasi

2.4.1 Pola Deformasi Berdasarkan Sumbu

Saat mengalami tumbukan, crash box akan mengubah energi tumbukan menjadi deformasi plastis dalam bentuk tekukan-tekukan (*buckling*). Tekukan-tekukan ini akan memiliki karakteristik tersendiri yang disebut dengan pola deformasi. pada *crash box* berpenampang lingkaran pola deformasi dibagi menjadi 2, yaitu ditinjau berdasarkan sumbu dan berdasarkan jumlah sudut.

Pola deformasi berdasarkan sumbu dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Axial mode

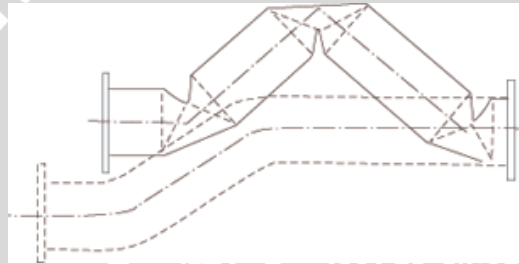
Axial mode terbentuk dari frontal crash yang menyebabkan pola deformasi simetris terhadap garis sumbu material.



Gambar 2.26 *Axial Mode*
Sumber: Paul (2004: 42)

2. *Bending mode*

Berlawanan dengan *axial mode*, *bending mode* biasanya terjadi pada struktur yang garis sumbuinya tidak lurus atau pada crash box yang mengalami tabrakan secara *oblique*. Pola deformasi yang terbentuk akan membentuk sudut-sudut dan tidak simetris terhadap garis sumbu.



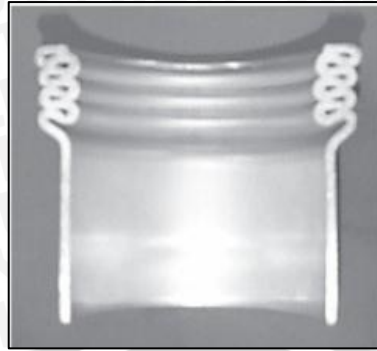
Gambar 2.27 *Bending Mode*
Sumber: Paul (2004: 43)

pola deformasi yang diharapkan merupakan *axial mode*. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Han (1999) pada kolom berdinding tipis yang dikenakan tumbukan miring (*oblique crash*). Dari hasil penelitiannya tersebut didapatkan bahwa pada *oblique test* dengan kemiringan 8° energi yang diserap 40% lebih kecil dibanding yang dikenakan *axial test*.

Pola deformasi berdasarkan sudut dibagi menjadi tiga, yaitu:

1. *Concertina mode*

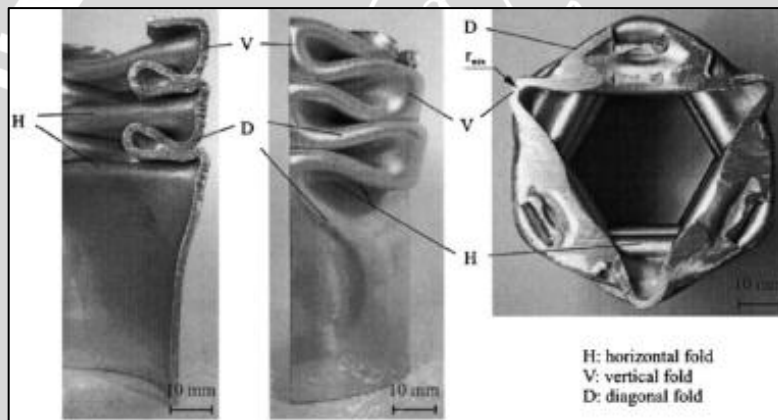
Concertina mode akan menghasilkan betuk lipatan yang simetris terhadap garis sumbu (*axisymmetric*).



Gambar 2.28 *concertina mode*
 Sumber: Toksoy (2009: 33)

2. *Diamond mode*

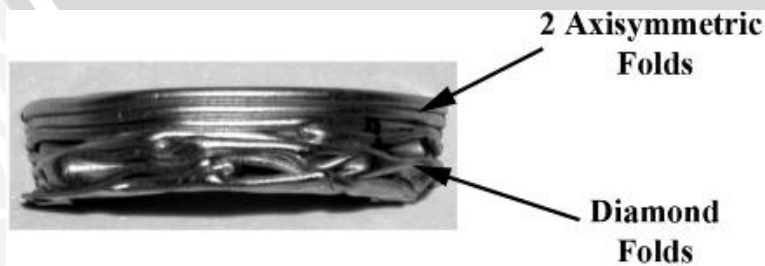
Diamond mode akan menghasilkan bentuk lipatan yang tidak simetri dan biasanya akan membentuk sudut-sudut pada lipatannya.



Gambar 2.29 *diamond mode*
 Sumber: Toksoy (2009: 33)

3. *Mixed mode*

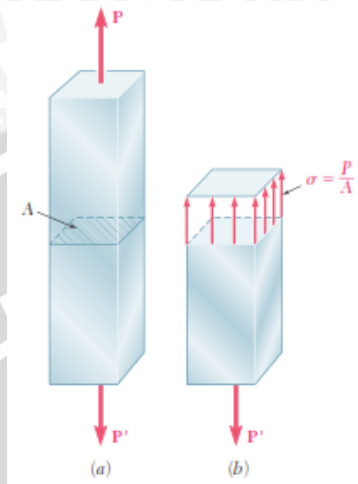
Mixed mode merupakan gabungan dari *concertina mode* dan *diamond mode*.



Gambar 2.30 *Mixed Mode*
 Sumber: Toksoy (2009: 33)

2.8 Analisis Tegangan-Regangan

Tegangan (*stress*) adalah gaya yang terdistribusi pada setiap satuan luas penampang. Tegangan dibagi menjadi tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal adalah tegangan yang disebabkan oleh gaya yang arahnya tegak lurus terhadap penampangnya.

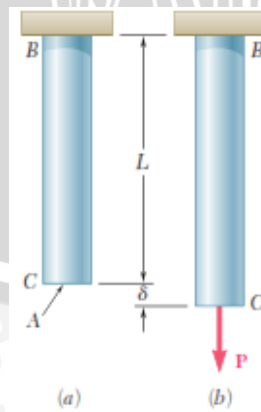


Gambar 2.31 Tegangan Normal Pada Batang
Sumber: Beer (2012: 5)

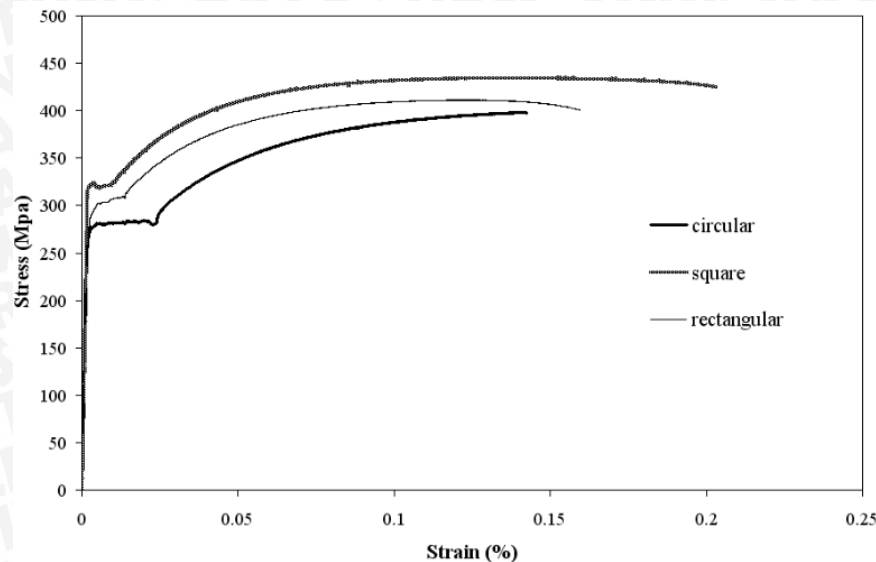
$$\sigma = \frac{P}{A}$$

(2-8)

Ketika suatu struktur dikenai gaya, maka akan menyebabkan regangan pada struktur tersebut. Regangan adalah perbandingan antara perubahan panjang dengan panjang awal suatu benda seperti pada Gambar 2.32. Adapun diagram tegangan-regangan *mild steel* ASTM E-04 dapat dilihat pada Gambar 3.33.



Gambar 2.32 Regangan Pada Batang
Sumber: Beer (2012: 66)



Gambar 2.33 Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan
Sumber: Velmurugan (2009: 389)

Modulus Elastisitas (E) atau juga disebut sebagai *young's modulus*, merupakan perbandingan antara tegangan normal dan regangan normal. Modulus elastisitas digunakan untuk menunjukkan ketahanan material untuk mengalami deformasi. Semakin kaku material maka modulus elastisitanya semakin tinggi.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2-9)$$

$$E = \frac{F/A}{\delta/L_0} \quad (2-10)$$

Poisson's ratio adalah konstanta yang menyatakan perbandingan antara regangan lateral dan regangan aksial. Regangan lateral adalah regangan yang terjadi tegak lurus terhadap arah pembebanan, sedangkan regangan aksial adalah regangan yang arahnya sama dengan arah pembebanan.

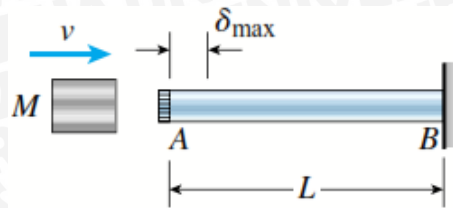
Pada beban tarik regangan lateral bernilai negatif, karena luas penampangnya mengalami penyempitan. Sedangkan pada regangan aksial bernilai positif, karena benda mengalami perpanjangan (mulur).

$$\nu = - \frac{\text{regangan lateral}}{\text{regangan aksial}} \quad (2-11)$$

2.9 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*).

Beban *impact* terjadi ketika dua objek bertumbukan atau dijatuhkan dari ketinggian tertentu sehingga menumbuk struktur lainnya. Gambar 2.34 mengilustrasikan beban impact yang terjadi pada sebuah batang.



Gambar 2.34 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:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{EA\delta_{max}^2}{2L} \quad (2-12)$$

Untuk menentukan δ_{max} , maka:

$$\delta_{max} = \sqrt{\frac{mv^2L}{EA}} \quad (2-13)$$

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:

$$\delta_{st} = \frac{WL}{EA} = \frac{mgL}{EA} \quad (2-14)$$

Selanjutnya *impact factor* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Impact Factor} = \frac{\delta_{max}}{\delta_{st}} = \sqrt{\frac{EA v^2}{mg^2 L}} \quad (2-15)$$

2.10 Metode Elemen Hingga (MEH)

Metode elemen hingga adalah prosedur numerik dengan menjadikan elemen tak hingga menjadi elemen hingga (diskretisasi). Dengan mengubah suatu kontinum menjadi elemen hingga akan didapat geometri yang lebih sederhana, sehingga dapat dilakukan perhitungan numerik. Perhitungan numerik ini tidak menghasilkan nilai nyata, melainkan hanya berupa pendekatan saja.

1. Diskretisasi dan pemilihan elemen

Diskretisasi merupakan pembagian suatu benda menjadi elemen hingga. Pertemuan tiap elemen ini akan membentuk *node*, pada *node* inilah perhitungan dilakukan.

Pemilihan jenis elemen untuk struktur dua dimensi dapat menggunakan elemen segitiga, segiempat maupun kuadrilateral. 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.

3. Menurunkan persamaan matrik kekakuan

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

$$[k] = \int [B]^T [C] [B] dV \quad (2-16)$$

Dengan:

$[k]$ = matrik kekakuan

$[B]$ = matrik hubungan regangan-perpindahan

$[C]$ = matrik hubungan tegangan-regangan

V = volume

4. Menghitung matrik beban total

$$F = Q_{NF} + Q_{BF} + Q_T \quad (2-17)$$

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 harus memenuhi sifat sinambung, yaitu titik-titik yang semula bersebelahan harus tetap bersebelahan setelah elemen dikenai beban. Bentuk persamaan global elemen:

$$[K]\{q\} = \{R\} \quad (2-18)$$

Dengan:

$[K]$ = matrik sifat/kekakuan elemen

$\{q\}$ = vektor perpindahan *node*

$\{R\}$ = matrik beban total

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 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$.

$$\begin{aligned} k_{1,1} q_1 + k_{1,2} q_2 + \dots + k_{1,n} q_n &= R_1 \\ k_{2,1} q_1 + k_{2,2} q_2 + \dots + k_{2,n} q_n &= R_2 \\ &\dots \\ k_{n,1} q_1 + k_{n,2} q_2 + \dots + k_{n,n} q_n &= R_n \end{aligned} \quad (2-19)$$

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.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2-20)$$

Hubungan tegangan-regangan:

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad (2-21)$$

Hubungan regangan-perpindahan:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \quad (2-22)$$

Sehingga tegangan dapat dirumuskan sebagai:

$$\{\sigma\} = [C][B]\{d\} \quad (2-23)$$

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.

2.11 Software Berbasis FEM

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)

- Mendefinisikan analisis solusi yang dipakai (*analysis type*).
- Pemodelan geometri: 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.
- Memasukkan kondisi batas (*constrain*).
- Menerapkan pembebanan.

2. *Solution* (proses solusi)

- 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. Di sini 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 perpindahan, tegangan dan regangan yang terjadi pada tiap node maupun elemennya.

- *Animation*

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

2.12 Hipotesis

Dari dasar teori yang ada dapat diambil hipotesis bahwa penambahan lubang pada *initial fold crash box* akan menurunkan nilai P_{max} sehingga meningkatkan *Crash Force Efficiency* (CFE).

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}}$$

Seiring bertambahnya rasio diameter lubang, mengakibatkan menurunnya momen inersia material, yang menyebabkan nilai P_{cr} juga menurun, sehingga nilai P_{max} juga menurun.

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

Dengan menurunnya nilai P_{max} berarti gaya awal yang dibutuhkan untuk mengakibatkan *folding* lebih rendah. Sehingga *crash box* lebih mudah terdeformasi.

