

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil dan pembahasan dari penelitian mengenai rancang bangun serta pengujian *drop test machine* untuk material polimer *polypropylene* (PP). Setelah melalui tahapan perancangan dan fabrikasi, alat uji yang dihasilkan digunakan untuk memperoleh data eksperimen yang mencakup energi tumbukan, gaya puncak, serta kedalaman cekungan residu pada spesimen. Data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan persamaan teknis untuk menilai respons dinamis material terhadap variasi energi impact. Analisis dilakukan secara bertahap pada empat spesimen dengan massa impaktor berbeda, sehingga memberikan gambaran komprehensif mengenai perilaku *polypropylene* dalam menyerap energi melalui deformasi plastis tanpa mengalami fraktur. Hasil pengujian ini kemudian dibandingkan dengan referensi jurnal internasional untuk menilai akurasi dan validitas data, sekaligus mengidentifikasi perbedaan performa antara *polypropylene* murni dengan material komposit yang diperkuat. Dengan demikian, Bab IV tidak hanya menampilkan hasil eksperimen, tetapi juga membahas implikasi ilmiah dari ketahanan kerusakan (*damage resistance*), kekuatan dinamis, serta mode kegagalan material, sehingga memperkuat relevansi penelitian terhadap aplikasi nyata dalam bidang teknik material.

4.1 Hasil Perancangan dan Fabrikasi Alat Uji

Setelah proses perancangan dilakukan berdasarkan parameter teknis yang telah ditetapkan, serta melalui tahapan fabrikasi dan perakitan, bagian ini menyajikan hasil

akhir realisasi *drop test machine* seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4.1 Hasil fabrikasi *drop test machine*

Drop test machine pada Gambar 4.1 ini memuat seluruh komponen utama hasil desain sebelumnya, mulai dari sistem jatuh penampang dengan pemberian beban hingga pengukuran parameter teknis yang dapat diuji dalam berbagai variasi pengujian yang telah ditetapkan.

4.2 Data Penelitian

Proses pengambilan data penelitian pada *drop test machine* disajikan dalam bentuk tabel untuk mempermudah proses perhitungan serta analisis. Data penelitian yang telah dikumpulkan kemudian dilakukan perhitungan sehingga mendapatkan parameter yang akan dibahas seperti variabel input energi tumbukan, respons gaya dinamis, dan kerusakan residu (ketahanan kerusakan). Hasil pengambilan data tersebut dapat dilihat berikut.

Tabel 4.1 Data Setelah Pengujian

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Material spesimen	<i>Polypropylene</i>	-
2	Ketebalan spesimen PP	6	mm
3	Dimensi spesimen PP	100 x 150	mm
4	Ketebalan residu (T_r)	10.5, 16, 17, 22.3	mm
6	Variasi massa impaktor (kg)	17.7, 27.6, 37.5, 47.4	kg
5	Gaya maksimum <i>load cell</i> (kg)	25.56, 29.02, 38.87, 52.39	kg

4.3 Pengolahan Data

Pengolahan data adalah bentuk kalkulasi dari data hasil pengujian *drop test* dengan metode *impact* yang telah dilakukan. Perhitungan dalam pengolahan data ini menggunakan rumus-rumus teknis seperti variabel input energi tumbukan, respons gaya dinamis, dan kerusakan residu (ketahanan kerusakan).

4.3.1. Spesimen Pertama

a. Energi Tumbukan (E)

Menetapkan energi input konstan untuk semua spesimen, dasar untuk perbandingan yang valid. Berikut persamaan yang digunakan (ASTM International, 2020):

$$E = m \times g \times h$$

Di mana:

E = Energi tumbukan (Joule)

m = Massa impaktor aktual (kg)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

h = Ketinggian jatuh (m)

Diketahui bahwa,

$m = 17,7$ kg

$g = 9,81$ m/s²

$h = 90$ cm = 0,9 m

Sehingga.

$E = 17,7 \times 9,81 \times 0,9$

$E = 156,27$ J

b. Energi Serap (E_{abs})

Energi yang diserap oleh spesimen dalam pengujian ini pada dasarnya adalah selisih antara energi tumbukan awal beban sebelum dijatuhkan dengan sisa energi setelah tumbukan terjadi. Berikut cara perhitungannya (ASTM International, 2020):

$$E_{abs} = m \times g(h_1 - h_2)$$

Dimana:

E_{abs} = Energi serap spesimen (Joule)

m = Massa impaktor aktual (kg)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

h_1 = Ketinggian jatuh awal (m)

h_2 = Ketinggian akhir (m)

Diketahui bahwa,

$$m = 17,7 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$h_1 = 90 \text{ cm} = 0,9 \text{ m}$$

$$h_2 = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$$

Sehingga,

$$E_{abs} = 17,7 \times 9,81(0,9 - 0,4)$$

$$E_{abs} = 86,8 \text{ J}$$

c. Energi Tumbukan Spesifik ($E_{spesifik}$)

Menormalkan energi terhadap variasi ketebalan spesimen. Untuk membuat analisis lebih kuat, hitung Energi Tumbukan Spesifik (Energi yang dinormalisasi terhadap ketebalan). Berikut perhitungannya (Belingardi, G., & Vadori, R., 2002):

$$E_{spesifik} = \frac{E}{T}$$

Di mana:

$$E_{spesifik} = \text{Energi spesifik (J/mm)}$$

$$E = \text{Energi tumbukan (Joule)}$$

$$T = \text{Ketebalan spesimen (mm)}$$

Diketahui bahwa,

$$E = 156,27 \text{ J}$$

$$t = 6 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$E_{spesifik} = \frac{156,27}{6}$$

$$E_{spesifik} = 26,04 \text{ J/mm}$$

d. Gaya Puncak (F_{max})

Menunjukkan kekuatan maksimum melalui *load cell* yang mampu ditahan oleh spesimen sebelum kerusakan meluas. Cara menghitung gaya puncak dengan persamaan ini (Cantwell & Morton, 1991):

$$F_{max} = m_{puncak} \cdot g$$

Di mana:

F_{max} = Gaya puncak (N)

m_{puncak} = Massa puncak (kg)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

Diketahui bahwa,

$m_{puncak} = 25,56 \text{ kg}$

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Sehingga,

$$F_{max} = 25,56 \times 9,81$$

$$F_{max} = 250,79 \text{ N}$$

e. Kedalaman Cekungan Residu (δ_{dent})

Menunjukkan tingkat deformasi plastis atau kerusakan permanen. Ini adalah indikator primer *Damage Resistance*. Gunakan persamaan berikut untuk menemukan kedalaman cekungan (Sutherland, L. S., & Soares, C. G., 2005):

$$\delta_{dent} = T_r - T_0$$

Di mana:

δ_{dent} = Kedalaman cekungan (mm)

T_r = Ketebalan residu (mm)

T_0 = Ketebalan awal (mm)

Diketahui bahwa,

$T_r = 10,5 \text{ mm}$

$T_0 = 6 \text{ mm}$

Sehingga,

$\delta_{dent} = 10,5 - 6$

$\delta_{dent} = 4,5 \text{ mm}$

Tabel 4.2 Analisis Spesimen Pertama

No.	Keterangan	Nilai	Satuan
1.	Energi Tumbukan (E)	156,27	J
2.	Energi Serap (E_{abs})	86,8	J
3.	Energi Tumbukan Spesifik ($E_{spesifik}$)	26,04	J/mm
4.	Gaya Puncak (F_{max})	250,79	N
5.	Kedalaman Cekungan Residu (δ_{dent})	4,5	mm



Gambar 4.2 Hasil uji spesimen pertama

Gambar 4. 2 menunjukkan hasil uji pada spesimen *polypropylene* dengan beban

17,7 kg. Terlihat adanya cekungan signifikan di titik tumbukan, menandakan deformasi plastis akibat energi yang cukup besar. Tipe kerusakan yang terjadi termasuk indentasi permanen tanpa retakan atau pecah, menunjukkan bahwa *polypropylene* menyerap energi tumbukan dengan deformasi lokal. Kedalaman cekungan mengindikasikan bahwa material mengalami yielding namun tetap mempertahankan integritas strukturalnya. Tidak tampak delaminasi atau fraktur, yang menandakan *polypropylene* memiliki *toughness* yang cukup baik terhadap beban jatuh.

4.3.2. Spesimen Kedua

a. Energi Tumbukan (E)

Menetapkan energi input konstan untuk semua spesimen, dasar untuk perbandingan yang valid. Berikut persamaan yang digunakan (ASTM International, 2020):

$$E = m \times g \times h$$

Di mana:

E = Energi tumbukan (Joule)

m = Massa impaktor aktual (kg)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

h = Ketinggian jatuh (m)

Diketahui bahwa,

$m = 27,6$ kg

$g = 9,81$ m/s²

$$h = 90 \text{ cm} = 0,9 \text{ m}$$

Sehingga.

$$E = 27,6 \times 9,81 \times 0,9$$

$$E = 243,68 \text{ J}$$

b. Energi Serap (E_{abs})

Energi yang diserap oleh spesimen dalam pengujian ini pada dasarnya adalah selisih antara energi tumbukan awal beban sebelum dijatuhkan dengan sisa energi setelah tumbukan terjadi. Berikut cara perhitungannya (ASTM International, 2020):

$$E_{abs} = m \times g(h_1 - h_2)$$

Dimana:

E_{abs} = Energi serap spesimen (Joule)

m = Massa impaktor aktual (kg)

g = Percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

h_1 = Ketinggian jatuh awal (m)

h_2 = Ketinggian akhir (m)

Diketahui bahwa,

$$m = 27,6 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$h_1 = 90 \text{ cm} = 0,9 \text{ m}$$

$$h_2 = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$$

Sehingga.

$$E_{abs} = 27,6 \times 9,81(0,9 - 0,4)$$

$$E_{abs} = 135,37 J$$

c. Energi Tumbukan Spesifik ($E_{spesifik}$)

Menormalkan energi terhadap variasi ketebalan spesimen. Untuk membuat analisis lebih kuat, hitung Energi Tumbukan Spesifik (Energi yang dinormalisasi terhadap ketebalan). Berikut perhitungannya (Belingardi, G., & Vadori, R., 2002):

$$E_{spesifik} = \frac{E}{T}$$

Di mana:

$E_{spesifik}$ = Energi spesifik (J/mm)

E = Energi tumbukan (Joule)

T = Ketebalan spesimen (mm)

Diketahui bahwa,

$$E = 243,68 J$$

$$T = 6 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$E_{spesifik} = \frac{243,68}{6}$$

$$E_{spesifik} = 40,61 J/mm$$

d. Gaya Puncak (F_{max})

Menunjukkan kekuatan maksimum melalui *load cell* yang mampu ditahan oleh spesimen sebelum kerusakan meluas. Cara menghitung gaya puncak dengan persamaan ini (Cantwell & Morton, 1991):

$$F_{max} = m_{puncak} \cdot g$$

Di mana:

F_{max} = Gaya puncak (N)

m_{puncak} = Massa puncak (kg)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

Diketahui bahwa,

$m_{puncak} = 29,02$ kg

$g = 9,81$ m/s²

Sehingga,

$$F_{max} = 29,02 \times 9,81$$

$$F_{max} = 284,68 \text{ N}$$

e. Kedalaman Cekungan Residu (δ_{dent})

Menunjukkan tingkat deformasi plastis atau kerusakan permanen. Ini adalah indikator primer *Damage Resistance*. Gunakan persamaan berikut untuk menemukan kedalaman cekungan (Sutherland, L. S., & Soares, C. G., 2005):

$$\delta_{dent} = T_r - T_0$$

Di mana:

δ_{dent} = Kedalaman cekungan (mm)

T_r = Ketebalan residu (mm)

T_0 = Ketebalan awal (mm)

Diketahui bahwa,

$T_r = 16$ mm

$$T_0 = 6 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$\delta_{dent} = 16 - 6$$

$$\delta_{dent} = 10 \text{ mm}$$

Tabel 4.3 Analisis Spesimen Kedua

No.	Keterangan	Nilai	Satuan
1.	Energi Tumbukan (E)	243,68	J
2.	Energi Serap (E_{abs})	135,37	J
3.	Energi Tumbukan Spesifik ($E_{spesifik}$)	40,61	J/mm
4.	Gaya Puncak (F_{max})	284,68	N
5.	Kedalaman Cekungan Residu (δ_{dent})	10	mm



Gambar 4.3 Hasil uji spesimen kedua

Gambar 4. 3 menunjukkan hasil uji pada spesimen *polypropylene* dengan beban 27,6 kg. Terlihat cekungan yang lebih dalam dan luas dibandingkan pengujian sebelumnya, menandakan peningkatan energi tumbukan yang diserap oleh material. Tipe kerusakan yang terjadi adalah deformasi plastis signifikan tanpa retakan, menunjukkan *polypropylene* mengalami *strain* lokal tinggi namun tetap tidak mengalami fraktur. Kedalaman cekungan menunjukkan bahwa material telah melewati batas elastis dan mengalami *yielding* yang lebih ekstrem. Tidak tampak kerusakan struktural menyeluruh, sehingga dapat disimpulkan bahwa *polypropylene* memiliki

duktilitas tinggi dan mampu menyerap energi tumbukan besar dengan deformasi lokal.

4.3.3. Spesimen Ketiga

a. Energi Tumbukan (E)

Menetapkan energi input konstan untuk semua spesimen, dasar untuk perbandingan yang valid. Berikut persamaan yang digunakan (ASTM International, 2020):

$$E = m \times g \times h$$

Di mana:

E = Energi tumbukan (Joule)

m = Massa impaktor aktual (kg)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

h = Ketinggian jatuh (m)

Diketahui bahwa,

$m = 37,5$ kg

$g = 9,81$ m/s²

$h = 90$ cm = 0,9 m

Sehingga.

$$E = 37,5 \times 9,81 \times 0,9$$

$$E = 331,08 \text{ J}$$

b. Energi Serap (E_{abs})

Energi yang diserap oleh spesimen dalam pengujian ini pada dasarnya adalah selisih antara energi tumbukan awal beban sebelum dijatuhkan dengan sisa energi setelah tumbukan terjadi. Berikut cara perhitungannya (ASTM International, 2020):

$$E_{abs} = m \times g(h_1 - h_2)$$

Dimana:

E_{abs} = Energi serap spesimen (Joule)

m = Massa impaktor aktual (kg)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

h_1 = Ketinggian jatuh awal (m)

h_2 = Ketinggian akhir (m)

Diketahui bahwa,

$$m = 37,5 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$h_1 = 90 \text{ cm} = 0,9 \text{ m}$$

$$h_2 = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$$

Sehingga.

$$E_{abs} = 37,5 \times 9,81(0,9 - 0,4)$$

$$E_{abs} = 183,93 \text{ J}$$

c. Energi Tumbukan Spesifik ($E_{spesifik}$)

Menormalkan energi terhadap variasi ketebalan spesimen. Untuk membuat analisis lebih kuat, hitung Energi Tumbukan Spesifik (Energi yang dinormalisasi terhadap ketebalan). Berikut perhitungannya (Belingardi, G., & Vadori, R., 2002):

$$E_{\text{spesifik}} = \frac{E}{T}$$

Di mana:

E_{spesifik} = Energi spesifik (J/mm)

E = Energi tumbukan (Joule)

T = Ketebalan spesimen (mm)

Diketahui bahwa,

$$E = 331,08 \text{ J}$$

$$T = 6 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$E_{\text{spesifik}} = \frac{331,08}{6}$$

$$E_{\text{spesifik}} = 55,18 \text{ J/mm}$$

d. Gaya Puncak (F_{max})

Menunjukkan kekuatan maksimum melalui *load cell* yang mampu ditahan oleh spesimen sebelum kerusakan meluas. Cara menghitung gaya puncak dengan persamaan ini (Cantwell & Morton, 1991):

$$F_{\text{max}} = m_{\text{puncak}} \cdot g$$

Di mana:

F_{max} = Gaya puncak (N)

m_{puncak} = Massa puncak (kg)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

Diketahui bahwa,

$$m_{puncak} = 38,87 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Sehingga,

$$F_{max} = 38,87 \times 9,81$$

$$F_{max} = 381,31 \text{ N}$$

e. Kedalaman Cekungan Residu (δ_{dent})

Menunjukkan tingkat deformasi plastis atau kerusakan permanen. Ini adalah indikator primer *Damage Resistance*. Gunakan persamaan berikut untuk menemukan kedalaman cekungan (Sutherland, L. S., & Soares, C. G., 2005):

$$\delta_{dent} = T_r - T_0$$

Di mana:

δ_{dent} = Kedalaman cekungan (mm)

T_r = Ketebalan residu (mm)

T_0 = Ketebalan awal (mm)

Diketahui bahwa,

$$T_r = 17 \text{ mm}$$

$$T_0 = 6 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$\delta_{dent} = 17 - 6$$

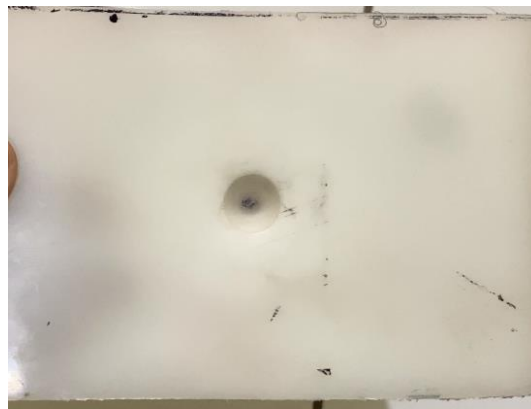
$$\delta_{dent} = 11 \text{ mm}$$

Spesimen ketiga menunjukkan respon dinamis dengan beban maksimum sebesar

± 42.774 gram. Setelah fase puncak, terjadi penurunan dan fluktuasi beban yang mengindikasikan proses redistribusi tegangan sebelum mencapai kondisi relatif stabil pada kisaran 37.000–39.000 gram.

Tabel 4.4 Analisis Spesimen Ketiga

No.	Keterangan	Nilai	Satuan
1.	Energi Tumbukan (E)	331,08	J
2.	Energi Serap (E_{abs})	183,93	J
3.	Energi Tumbukan Spesifik ($E_{spesifik}$)	55,18	J/mm
4.	Gaya Puncak (F_{max})	381,31	N
5.	Kedalaman Cekungan Residu (δ_{dent})	11	mm



Gambar 4.4 Hasil uji spesimen ketiga

Gambar 4. 4 menunjukkan hasil uji ketiga pada spesimen *polypropylene* dengan beban 37,5 kg. Terlihat cekungan yang lebih dalam dan luas dibandingkan pengujian sebelumnya, menandakan bahwa energi tumbukan yang diterima material sangat tinggi. Tipe kerusakan yang terjadi adalah deformasi plastis ekstrem, ditandai dengan cekungan dalam dan permanen di titik tumbukan. Tidak tampak retakan atau pecah, menunjukkan *polypropylene* tetap mempertahankan integritas strukturalnya meskipun mengalami tekanan besar. Kedalaman cekungan mengindikasikan bahwa material telah melewati batas elastis dan mengalami *flow* plastis lokal, mencerminkan

toughness dan *ductility* yang baik. Fokus kerusakan berada tepat di pusat tumbukan, menunjukkan distribusi energi yang terkonsentrasi dan respons material yang lentur terhadap gaya impulsif.

4.3.4. Spesimen Keempat

a. Energi Tumbukan (E)

Menetapkan energi input konstan untuk semua spesimen, dasar untuk perbandingan yang valid. Berikut persamaan yang digunakan (ASTM International, 2020):

$$E = m \times g \times h$$

Di mana:

E = Energi tumbukan (Joule)

m = Massa impaktor aktual (kg)

g = Percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

h = Ketinggian jatuh (m)

Diketahui bahwa,

$m = 47,4 \text{ kg}$

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$h = 90 \text{ cm} = 0,9 \text{ m}$

Sehingga.

$E = 47,4 \times 9,81 \times 0,9$

$E = 418,49 \text{ J}$

b. Energi Serap (E_{abs})

Energi yang diserap oleh spesimen dalam pengujian ini pada dasarnya adalah selisih antara energi tumbukan awal beban sebelum dijatuhkan dengan sisa energi setelah tumbukan terjadi. Berikut cara perhitungannya (ASTM International, 2020):

$$E_{abs} = m \times g(h_1 - h_2)$$

Dimana:

E_{abs} = Energi serap spesimen (Joule)

m = Massa impaktor aktual (kg)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

h_1 = Ketinggian jatuh awal (m)

h_2 = Ketinggian akhir (m)

Diketahui bahwa,

$m = 47,4 \text{ kg}$

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$h_1 = 90 \text{ cm} = 0,9 \text{ m}$

$h_2 = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$

Sehingga.

$$E_{abs} = 47,4 \times 9,81(0,9 - 0,4)$$

$$E_{abs} = 232,49 \text{ J}$$

c. Energi Tumbukan Spesifik ($E_{spesifik}$)

Menormalkan energi terhadap variasi ketebalan spesimen. Untuk membuat analisis lebih kuat, hitung Energi Tumbukan Spesifik (Energi yang dinormalisasi

terhadap ketebalan). Berikut perhitungannya (Belingardi, G., & Vadori, R., 2002):

$$E_{spesifik} = \frac{E}{T}$$

Di mana:

$E_{spesifik}$ = Energi spesifik (J/mm)

E = Energi tumbukan (Joule)

T = Ketebalan spesimen (mm)

Diketahui bahwa,

$$E = 418,49 \text{ J}$$

$$T = 6 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$E_{spesifik} = \frac{418,49}{6}$$

$$E_{spesifik} = 69,74 \text{ J/mm}$$

d. Gaya Puncak (F_{max})

Menunjukkan kekuatan maksimum melalui *load cell* yang mampu ditahan oleh spesimen sebelum kerusakan meluas. Cara menghitung gaya puncak dengan persamaan ini (Cantwell & Morton, 1991):

$$F_{max} = m_{puncak} \cdot g$$

Di mana:

F_{max} = Gaya puncak (N)

m_{puncak} = Massa puncak (kg)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

Diketahui bahwa,

$$m_{puncak} = 52,39 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Sehingga,

$$F_{max} = 52,39 \times 9,81$$

$$F_{max} = 513,94 \text{ N}$$

e. Kedalaman Cekungan Residu (δ_{dent})

Menunjukkan tingkat deformasi plastis atau kerusakan permanen. Ini adalah indikator primer *Damage Resistance*. Gunakan persamaan berikut untuk menemukan kedalaman cekungan (Sutherland, L. S., & Soares, C. G., 2005):

$$\delta_{dent} = T_r - T_0$$

Di mana:

$$\delta_{dent} = \text{Kedalaman cekungan (mm)}$$

$$T_r = \text{Ketebalan residu (mm)}$$

$$T_0 = \text{Ketebalan awal (mm)}$$

Diketahui bahwa,

$$T_r = 22,3 \text{ mm}$$

$$T_0 = 6 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$\delta_{dent} = 22,3 - 6$$

$$\delta_{dent} = 16,3 \text{ mm}$$

f. Tegangan Impak

Dimana :

σ_{impak} = Tegangan impak

F_{max} = Gaya puncak

A = Luas spesimen

Diketahui

$F_{max} = 513,94 \text{ N}$

$A = 600 \text{ mm}^2$

$$\sigma_{impak} = \frac{513,94}{600} = 0,856 \text{ MPa}$$

Tabel 4.5 Analisis spesimen keempat

No,	Keterangan	Nilai	Satuan
1.	Energi Tumbukan (E)	418,49	J
2.	Energi Serap (E_{abs})	232,49	J
2.	Energi Tumbukan Spesifik ($E_{spesifik}$)	69,74	J/mm
3.	Gaya Puncak (F_{max})	513,94	N
4.	Kedalaman Cekungan Residu (δ_{dent})	16,3	Mm
5.	Tegangan Impak	0,856	MPa



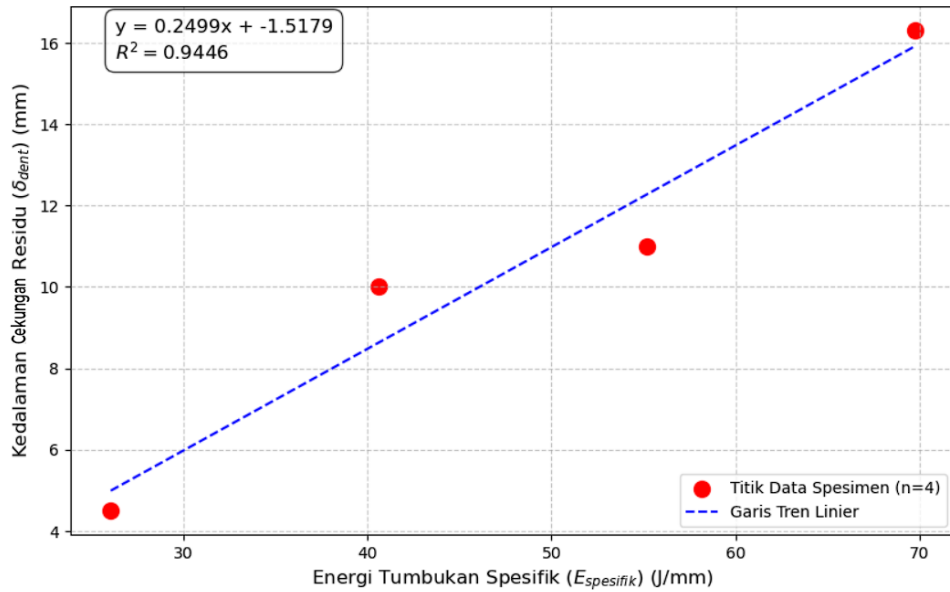
Gambar 4.5 Hasil uji spesimen keempat

Gambar 4. 5 menunjukkan hasil uji pada spesimen keempat *polypropylene*

dengan beban 47,4 kg. Terlihat cekungan yang sangat dalam dan lebar di titik tumbukan, menandakan bahwa energi tumbukan yang diterima material sangat besar. Tipe kerusakan yang terjadi adalah deformasi plastis ekstrem, dengan indikasi *flow plastis* yang meluas dari pusat tumbukan. Kedalaman cekungan menunjukkan bahwa *polypropylene* telah mengalami penyerapan energi maksimum sebelum terjadi fraktur, namun tidak tampak retakan atau pecah, menandakan ketangguhan dan fleksibilitas tinggi dari material. Fokus kerusakan berada tepat di pusat tumbukan, dengan distribusi tekanan yang menyebar secara radial, menunjukkan respons material terhadap gaya impulsif yang besar.

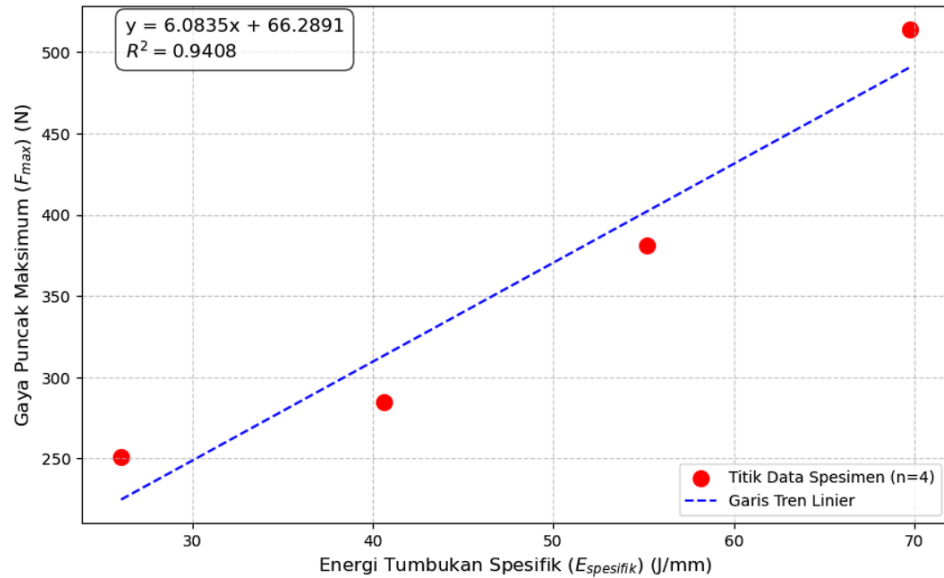
4.3.5. Damage Resistance

Berdasarkan dari keempat spesimen yang telah diuji, ketahanan kerusakan (*damage resistance*) material *Polypropylene* (PP) material menunjukkan ketahanan kerusakan yang sangat baik (*superior damage resistance*) karena memiliki kemampuan tinggi untuk menahan penambahan kerusakan permanen (δ_{dent}) meskipun energi tumbukan (E) dinaikkan.



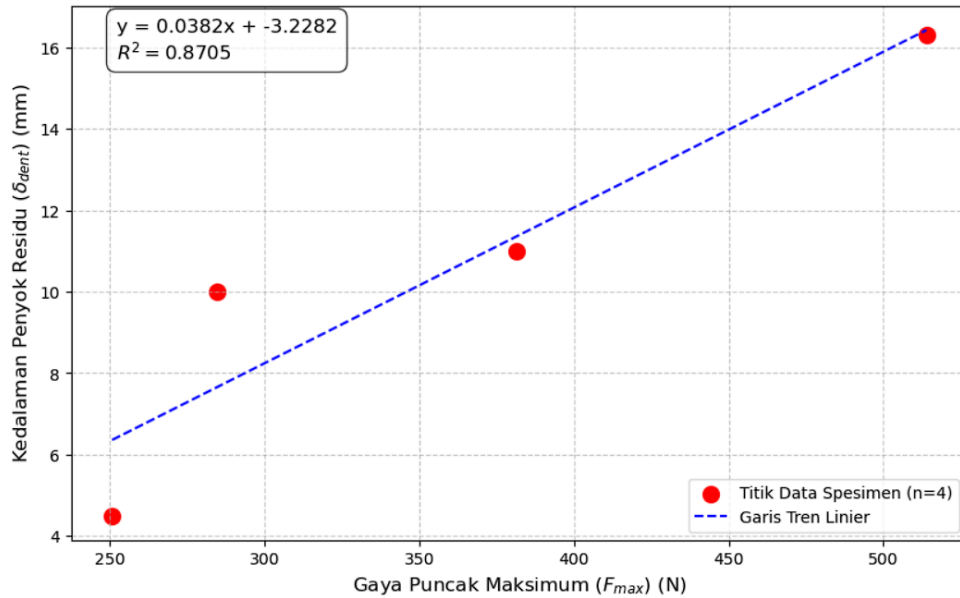
Gambar 4.6 Analisis kurva ketahanan kerusakan

Grafik Gambar 4. 6 menunjukkan grafik kedalaman cekungan (δ_{dent}) (Y-axis) terhadap energi tumbukan spesifik ($E_{spesifik}$) (X-axis), yang merupakan konfigurasi standar untuk menganalisis ketahanan kerusakan (*damage resistance*), dibuktikan oleh koefisien determinasi $R^2 = 0.9446$ dan nilai *slope* adalah 0.2499. *Slope* positif ini menegaskan bahwa setiap penambahan energi akan menyebabkan peningkatan kerusakan, yang secara fisik benar. Nilai 0.2499 mengukur sensitivitas kerusakan material, untuk setiap 1 J/mm energi yang ditambahkan, kedalaman cekungan akan bertambah sebesar 0.2499 mm. Ini menunjukkan material memiliki mode kegagalan yang ulet (*ductile*), di mana energi diserap melalui deformasi permanen.



Gambar 4.7 Analisis kurva kekuatan dinamis

Kurva pada Gambar 4. 7 ini menganalisis kekuatan dinamis, yaitu kemampuan material merespons energi input. Hubungan yang terjalin adalah sangat kuat dengan $R^2 = 0.9408$, yang membuktikan bahwa respons gaya puncak (F_{max}) sangat dapat diprediksi oleh energi tumbukan spesifik ($E_{spesifik}$). *Slope* kurva ini adalah 6.0835 N/(J/mm). *Slope* yang positif ini berarti material merespons kenaikan energi dengan peningkatan gaya yang ditahan. Secara spesifik, setiap penambahan 1 J/mm energi spesifik ($E_{spesifik}$) menyebabkan peningkatan gaya puncak (F_{max}) sebesar 6.0835 N. Analisis ini mengonfirmasi stabilitas dan konsistensi respon kekuatan material selama pengujian.



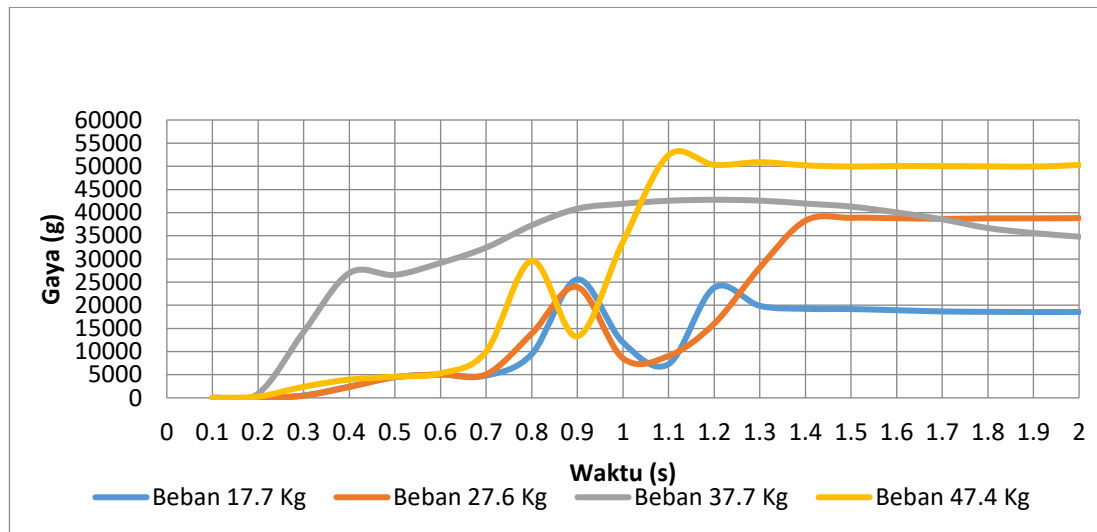
Gambar 4.8 Analisis kurva mode kegagalan

Kurva pada Gambar 4. 8 ini adalah kunci untuk menilai *trade-off* kekuatan vs kerusakan (mode kegagalan). Determinasi yang dihasilkan kuat dengan $R^2 = 0.8705$, meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan dua kurva lainnya, tetapi masih sangat valid. *Slope* kurva ini adalah 0.0382 mm/N. Nilai *slope* yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa material memiliki ketahanan kerusakan yang kuat, material mampu menahan gaya puncak (F_{max}) yang besar (semakin ke kanan pada sumbu X) tanpa mengalami peningkatan kedalaman cekungan (δ_{dent}) yang drastis. Artinya, hanya 0.0382 mm kerusakan yang terjadi untuk setiap penambahan 1 N gaya puncak (F_{max}). Secara keseluruhan, material menunjukkan mode kegagalan yang terkendali, menunjukkan ia lebih cenderung menyerap energi daripada cepat hancur.

4.4 Analisis Respon Gaya Impak terhadap Waktu pada Pengujian *Drop Test Machine*

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, diperoleh data pengukuran

gaya impact yang direpresentasikan dalam bentuk grafik hubungan gaya terhadap waktu pada setiap percobaan.



Gambar 4.9 Grafik respon *load cell* terhadap waktu

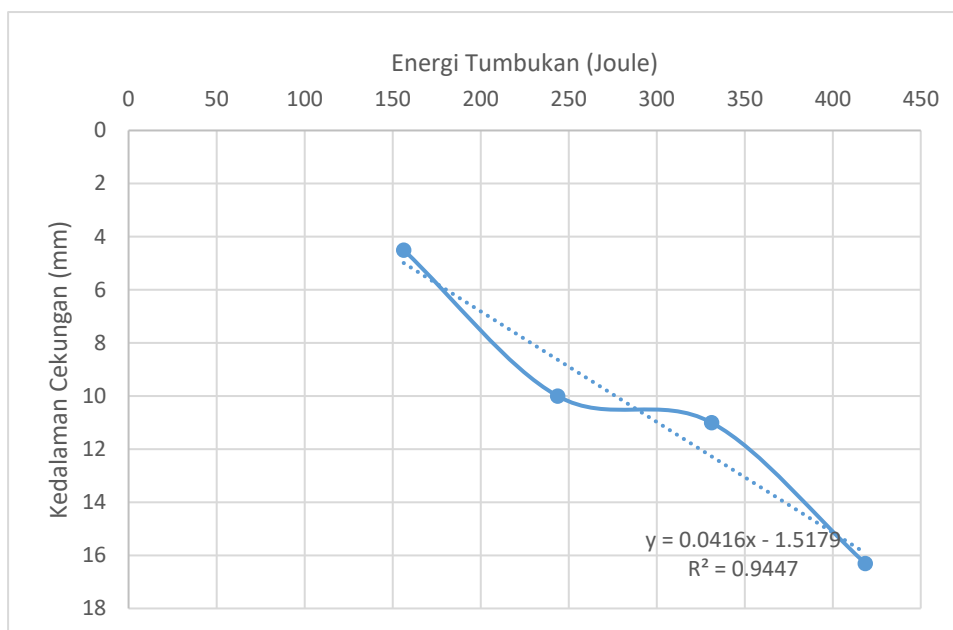
Berdasarkan grafik hubungan respon load cell terhadap waktu yang ditunjukkan pada Gambar 4. 9 yang diperoleh dari empat percobaan, dapat dianalisis bahwa sistem *drop test machine* menunjukkan respon dinamis yang bervariasi pada setiap pengujian, namun tetap memiliki pola umum yang serupa. Pada fase awal pengujian (0–0,5 s), seluruh percobaan menunjukkan nilai berat yang relatif rendah kemudian meningkat secara bertahap seiring terjadinya tumbukan dan proses transmisi gaya ke sensor *load cell*. Percobaan ketiga menunjukkan kenaikan yang lebih cepat dibandingkan percobaan lainnya, yang mengindikasikan bahwa sistem memiliki sensitivitas yang baik dalam mendeteksi gaya impact sejak awal kontak.

Memasuki rentang waktu sekitar 0,7–1,1 s, terlihat adanya puncak impact yang ditandai dengan lonjakan nilai berat secara signifikan. Pada fase ini, Percobaan keempat menunjukkan puncak tertinggi yang mencapai sekitar 52.000 g, sedangkan percobaan pertama dan percobaan kedua memperlihatkan fluktuasi yang cukup tajam

sebelum mencapai kondisi yang lebih stabil. Fluktuasi tersebut menunjukkan adanya respon transien sistem yang dipengaruhi oleh getaran struktur, pantulan beban, serta karakteristik dinamis sensor load cell dalam merekam gaya tumbukan secara real time. Selanjutnya, pada fase setelah tumbukan utama (sekitar 1,1–2,0 s), grafik menunjukkan kecenderungan stabilisasi pada masing-masing percobaan, di mana nilai berat mulai konvergen dan membentuk kondisi steady-state. Percobaan keempat cenderung stabil pada nilai yang lebih tinggi dibandingkan percobaan lainnya, sedangkan Percobaan ketiga menunjukkan kestabilan yang relatif baik dengan penurunan bertahap. Sementara itu, Percobaan pertama dan percobaan kedua cenderung stabil pada nilai yang lebih rendah. Pola stabilisasi ini menunjukkan bahwa sistem pengukuran mampu meredam respon transien setelah tumbukan dan menghasilkan pembacaan yang konsisten pada kondisi akhir pengujian.

4.5 Analisis Performa Alat

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental yang telah dilakukan, dilakukan analisis menyeluruh terhadap performa operasional *drop test machine* untuk memvalidasi keandalan data yang dihasilkan. Berikut ini



Gambar 4.10 Analisis penetrasi kedalaman residu terhadap energi tumbukan

Pada gambar 4. 10 menyajikan profil korelasi antara energi tumbukan (E) terhadap kedalaman cekungan residu (δ_{dent}) pada spesimen polipropilena. Grafik tersebut disajikan dengan sumbu vertikal terbalik (*inverted axis*) untuk memberikan representasi visual yang sesuai dengan fenomena fisik tumbukan, di mana nilai kedalaman yang semakin besar menunjukkan penetrasi *indenter* yang semakin jauh ke bawah permukaan material. Secara teknis, terdapat tiga poin utama yang menjadi fokus analisis performa alat pada sub-bab ini.

Pertama, aspek *linieritas* dan konsistensi data. Hasil regresi menunjukkan nilai Koefisien Determinasi (R^2) sebesar 0,9447. Nilai ini mengindikasikan *linieritas* yang sangat kuat antara peningkatan energi dengan respons deformasi material. Hal ini membuktikan bahwa alat bekerja secara stabil dan memiliki presisi yang baik, di mana persebaran data (*scatter*) berada sangat dekat dengan garis tren.

Kedua, aspek akurasi. Akurasi alat divalidasi melalui perhitungan *Percentage Error* (selisih antara hasil pengukuran sensor terhadap perhitungan teoritis pada jurnal

internasional) yang dibahas pada sub-bab selanjutnya. Dengan nilai determinasi yang tinggi pada grafik ini, dapat disimpulkan bahwa sistem pengukuran memiliki reliabilitas yang baik dalam menangkap tren perubahan beban tumbukan.

Ketiga, aspek *repeatability* dan rentang kecepatan. Seluruh data diambil pada kecepatan konstan 4,20 m/s dengan tinggi jatuh 0,9 m. Konsistensi hasil pada setiap titik uji spesimen 1-4 menunjukkan kemampuan alat untuk melakukan pengulangan pengujian *repeatability* dengan parameter yang tetap terjaga dalam rentang standar ASTM D7136 (3,66 – 7,75 m/s).

4.6 Analisis Validasi Data dan *Standard Error (SE)*

Pada bagian ini, dilakukan validasi terhadap data hasil pengujian *drop test* pada material *Polypropylene (PP)* murni. Validasi dilakukan dengan dua cara pertama, membandingkan parameter serta tren penelitian dengan jurnal referensi (Daiyan et al., 2010), dan kedua, menghitung nilai *Standard Error of the Estimate (SEE)* untuk mengukur tingkat presisi alat uji yang telah dirancang.

4.6.1 Perbandingan Parameter Penelitian

Penyajian perbandingan antara variabel penelitian ini dengan penelitian referensi bertujuan untuk memberikan konteks ilmiah terhadap perbedaan hasil absolut yang diperoleh. Perbedaan karakteristik material dan geometri spesimen sangat memengaruhi besaran gaya puncak (*peak force*) yang terbaca.

Tabel 4.6 Perbandingan parameter dan hasil pengujian

Parameter	Hasil Eksperimen	Referensi	Satuan
Jenis Material	Polypropylene (PP) Murni	Modified PP (Mineral & Elastomer)	-
Kekakuan Material	Rendah (Lebih fleksibel)	Tinggi (Lebih kaku/stiff)	-
Ketebalan Plat	6	2,0 – 3,9	Mm
<i>Standard Error Of the Estimate</i>	8%	9%	-
Karakteristik Grafik	Kenaikan gaya linear terhadap energi	Kenaikan gaya linear terhadap energi	-
Gaya Puncak (F_{max})	250,79 – 513,94	1.500 – 3.500	N

(Daiyan et al., 2010)

Berdasarkan Tabel 4. 6, dengan mengasumsikan pada nilai gaya puncak yang berbeda dikarenakan adanya perbedaan beban yang diberikan terhadap spesimen, namun berdasarkan rasio error sekitar 9% untuk rentang gaya 1500–3500 N diperoleh estimasi SEE sekitar 200–250 N sedangkan Hasil Eksperimen di dapatkan nilai SEE 30-35 N dengan gaya puncak 250,79 – 513,94 dan *Standard Error Of the Estimate* di dapatkan rasionya 8% dimana semakin kecil nilai SEE maka semakin baik pula pengujian itu dilakukan. Perbedaan gaya puncak bukan menjadi acuan validasi alat tersebut namun standar eror yang dihasilkan dari pengujian yang menjadikan pengujian itu dikatakan akurat dan di dapat perbedaan yaitu 1% dari hasil eksperimen dengan referensi. Namun demikian, nilai ini merupakan pendekatan dan tidak merepresentasikan hasil perhitungan langsung akibat keterbatasan data pada penelitian referensi.

4.6.2 Perhitungan *Standard Error of the Estimate* (SEE)

Untuk memvalidasi konsistensi data eksperimen terhadap model regresi linear yang dihasilkan, dilakukan perhitungan *Standard Error of the Estimate* (SEE). Nilai

ini merepresentasikan standar deviasi dari titik-titik data eksperimen terhadap garis regresi. Semakin kecil nilai SEE, semakin tinggi tingkat akurasi model dalam memprediksi perilaku material. Persamaan regresi yang diperoleh dari data eksperimen adalah:

$$\hat{y} = 6.0835(E_{spesifik}) + 66.2891$$

Dimana:

\hat{y} = Prediksi gaya puncak (N)

$E_{spesifik}$ = Energi spesifik (J/mm)

Berikut ada tabel untuk membantu dalam perhitungan SEE berdasarkan 4 spesimen uji:

Tabel 4.7 Perhitungan selisih kuadrat (*residuals*)

Spesimen	$E_{spesifik}(x)$	$F_{max}(y)$	Prediksi Model (\hat{y})	$(y - \hat{y})^2$
1	26,04	250,79	224,70	680,68
2	40,61	284,68	313,34	821,41
3	55,18	381,31	401,99	427,66
4	69,74	513,94	490,55	547,09
			Total	2461,07

Setelah mendapat total selisih kuadrat, nilai SEE dihitung menggunakan rumus statistik berikut:

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{y})^2}{n - 2}}$$

$$SEE = \sqrt{\frac{2461,07}{4 - 2}}$$

$$SEE = \sqrt{\frac{492214}{20}}$$

$$SEE = 35,07 N$$

4.6.3 Interpretasi Hasil Validasi

Perbedaan nilai gaya puncak yang diperoleh dipengaruhi oleh perbedaan komposisi material yang digunakan. Pada jurnal referensi, material polipropilena (PP) telah dimodifikasi dengan penambahan mineral dan elastomer yang meningkatkan kekuatan mekanis serta modulus elastisitasnya. Sementara itu, penelitian ini menggunakan PP murni yang memiliki sifat lebih ulet (*ductile*), namun menghasilkan nilai gaya puncak yang relatif lebih rendah.

Nilai *standard error* sebesar 35,07 N menunjukkan bahwa alat uji *drop test machine* yang dirancang memiliki tingkat konsistensi yang baik, dengan tingkat penyimpangan yang relatif kecil, yaitu berada pada kisaran $\pm 8-12\%$ terhadap nilai prediksi. Penyimpangan tersebut masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk pengujian material polimer, dengan mempertimbangkan adanya faktor eksternal seperti getaran pada struktur alat serta karakteristik viskoelastik dari material PP yang digunakan.