

BAB II

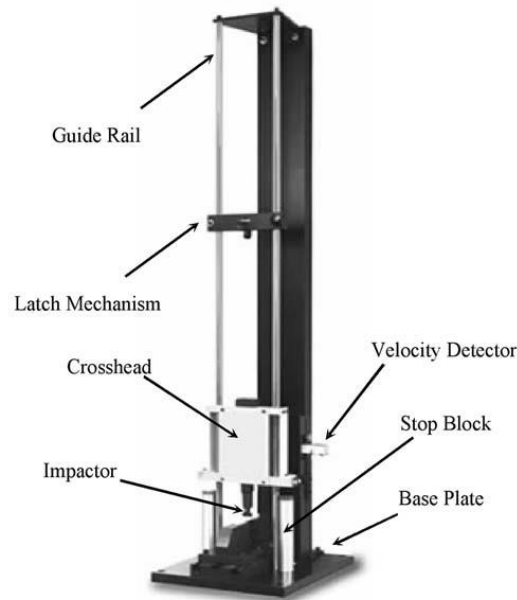
TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menyajikan tinjauan pustaka yang menjadi landasan teoritis penelitian mengenai pengujian impak dengan metode *drop test* pada material polimer, khususnya *polypropylene* (PP). Pembahasan diawali dengan prinsip dasar metode *drop test* sebagai teknik evaluasi beban kejut yang mampu merepresentasikan kondisi pembebanan impak secara vertikal. Selanjutnya, diuraikan struktur molekul dan sifat mekanik polimer yang berperan dalam menentukan respons material terhadap pembebanan dinamis. Konsep fisika seperti energi tumbukan, gerak jatuh bebas, impuls, dan momentum turut dijelaskan untuk memperkuat kerangka analisis. Selain itu, prosedur pelaksanaan pengujian *drop test*, parameter pengujian, serta perhitungan deformasi pada meja uji dipaparkan sebagai acuan teknis dalam pelaksanaan eksperimen. Secara keseluruhan, tinjauan ini memberikan landasan teoritis yang komprehensif guna mendukung pemahaman serta analisis perilaku material *polypropylene* terhadap beban impak dalam penelitian ini.

2.1. Drop Test

Drop Test merupakan salah satu metode didalam pengujian *impact* yang digunakan untuk mengevaluasi respon material atau struktur terhadap beban kejut yang diterima. Prinsip kerja *drop test* didasarkan pada jatuhnya beban (pendulum) dari ketinggian tertentu untuk menumbuk spesimen, yang di mana perbedaan ketinggian jatuh menghasilkan variasi energi tumbukan yang berdampak pada besarnya energi serap spesimen (Budianto et al., 2018). Metode ini bertujuan untuk

mensimulasikan kondisi beban kejut vertikal yang dapat terjadi pada struktur atau material dalam aplikasi nyata, seperti benturan benda berat, jatuhnya komponen, atau tabrakan (Cantwell & Morton, 1991).



Gambar 2.1 *Drop test machine mechanism*
(ASTM, 2012)

Pada Gambar 2.1 menunjukkan konfigurasi umum *drop test machine* dengan mengacu pada standarisasi ASTM D7136/D7136M– 12. Sistem ini terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu rel pemandu (*guide rail*), mekanisme pengunci (*latch mechanism*), beban penumbuk (*impactor*), pelat dasar (*base plate*), serta sistem pendeteksi kecepatan dan penghenti laju gerak. Susunan dan integrasi antar komponen tersebut dirancang untuk memastikan beban dijatuhkan secara vertikal, stabil, dan terkontrol, sehingga energi tumbukan yang dihasilkan sesuai dengan ketentuan prosedur pengujian dan dapat memberikan hasil pengujian yang konsisten serta dapat dilakukan pengujian berulang kali pada kondisi yang sama.



Gambar 2.2 *Drop test machine*
(Mohsin *et al.*, 2021)

Gambar 2.2 adalah alat pengujian *drop test* yang mengacu pada standar ASTM D7136 yang sesuai prosedur standar untuk mengukur ketahanan kerusakan (*damage resistance*) dari material komposit matriks polimer yang diperkuat serat (*fiber-reinforced polymer matrix composites*) akibat peristiwa benturan beban jatuh. Metode ini mensimulasikan kondisi pembebanan impact kecepatan rendah yang sering terjadi dalam layanan operasional, seperti jatuhnya peralatan pemeliharaan pada struktur pesawat atau benturan kerikil pada komponen otomotif. Dalam pelaksanaannya, spesimen uji diletakkan pada penumpu dengan bukaan tertentu, kemudian impaktor dengan massa dan geometri ujung yang telah ditentukan dijatuhkan untuk menghasilkan energi tumbukan spesifik, sehingga respons mekanik material terhadap beban dinamis dapat dianalisis secara terukur.

Energi tumbukan dari impaktor dikonversi menjadi energi kinetik saat mengenai pusat spesimen, di mana respons material terhadap beban dinamis tersebut direkam untuk analisis lebih lanjut. Akurasi dan keterulangan hasil uji sangat dipengaruhi oleh parameter pengujian, khususnya pada spesimen berukuran

kecil, yang meliputi massa dan geometri impaktor, ketinggian jatuh, kecepatan tumbukan, kondisi penumpuan spesimen, serta sistem pengukuran gaya. Keterkaitan antarparameter tersebut secara langsung menentukan besarnya energi tumbukan dan respons mekanik material, sehingga pengendalian parameter yang konsisten menjadi faktor utama dalam memperoleh hasil uji yang andal. Pengujian yang dilakukan (Zhou *et al.*, 2025) energi benturan dapat dikendalikan melalui variasi ketinggian jatuh dalam rentang 50–400 Joule, yang berkorelasi dengan tinggi jatuh 0,34–2,72 m dan kecepatan tumbukan 3,66–7,75 m/s sesuai standar pengujian.

Pemilihan metode pengujian impak yang tepat menjadi faktor penting dalam memperoleh hasil pengujian yang sesuai dengan karakteristik spesimen dan kondisi pembebanan yang dianalisis. Studi eksperimental yang dilakukan (Watanabe *et al.*, 2020) menunjukkan bahwa pengujian *weight drop impact test* pada energi rendah ($\approx 0,5-5$ J) lebih unggul dibandingkan uji *Charpy* dan *Izod* karena memungkinkan penentuan energi fraktur E50% tanpa penggunaan *notch*, sehingga hasil pengujian lebih representatif untuk spesimen berukuran kecil. Lebih lanjut penelitian yang dilakukan (Gunturi, Escobedo and Islam, 2019) menunjukkan bahwa *drop tower test* lebih unggul dibandingkan uji impak *Charpy V-Notch*, karena mampu merekam respons gaya dan energi secara kontinu selama impak, dimana pada pengujian brass dengan energi impak 40,96 J (2 m/s) spesimen mengalami kegagalan dalam waktu sekitar 1 ms dengan gaya puncak ± 9 kN, sementara uji *Charpy* hanya memberikan nilai energi serap tunggal sebesar 11 J tanpa informasi evolusi perilaku material akibat laju regangan.

2.1.1 Perbedaan Pengujian Impak

Uji impak *Charpy V* dan *drop test* merupakan dua metode pengujian impak yang memiliki tujuan, skala, serta jenis data yang berbeda. Perbedaan utama kedua pengujian ini terletak pada fokus evaluasi, yaitu sifat material dan respons struktur terhadap beban impak.

Uji impak *Charpy V* digunakan untuk mengevaluasi ketangguhan material secara intrinsik melalui pengukuran energi serap hingga terjadinya patah pada spesimen berlekuk (*notch*). Pengujian ini dilakukan pada spesimen berukuran kecil dengan kondisi yang terstandarisasi, sehingga hasilnya cocok untuk perbandingan karakteristik material dan analisis perilaku getas maupun ulet.

Sebaliknya, *drop test* bertujuan untuk mengevaluasi respons mekanik struktur atau komponen terhadap beban impak dinamis yang menyerupai kondisi aplikasi nyata. Data yang dihasilkan pada *drop test* tidak hanya berupa energi tumbukan, tetapi juga mencakup gaya puncak, waktu kontak, serta deformasi spesimen selama proses tumbukan. Oleh karena itu, *drop test* lebih relevan digunakan untuk validasi desain dan kinerja struktur, bukan sebagai penentu ketangguhan material semata.

Tabel 2.1 Perbandingan Alat Uji impak *drop test* dan *V-Charpy*

Aspek	<i>Drop Test</i>	<i>V-Charpy</i>
Standar pengujian	ASTM D7136	ASTM E23
Prinsip kerja	Impaktor dijatuhkan dari ketinggian tertentu untuk menghasilkan energi tumbukan	Pendulum diayunkan untuk mematahkan spesimen
Parameter input	Massa impaktor dan ketinggian jatuh	Massa pendulum dan sudut ayunan
Parameter terukur	Gaya, waktu kontak, deformasi, energi tumbukan	Energi serap hingga patah
Arah impak	Impak vertikal spesimen ditumbuk dari atas oleh beban terpandu.	Impak lateral horizontal spesimen ditopang di kedua ujung.
Keterbatasan	Memerlukan peralatan khusus, tidak cocok untuk QC	Titik data tunggal; sensitif terhadap variasi takik/suhu.
<i>Best For</i>	Ketahanan retak kritis	QC rutin, pemeriksaan keuletan
<i>Measurement</i>	Inisiasi/pertumbuhan retakan	Energi yang diserap (Joule)

(<https://www.worldoftest.com/articles/Charpy-impact-test-vs-drop-weight-test/>)

Tabel 2. 1 menyajikan perbandingan antara dua metode uji impak, yaitu *Drop Test* dan *V-Charpy*, berdasarkan delapan aspek teknis. *Drop Test* menggunakan impaktor yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu sesuai standar ASTM D7136, sedangkan *V-Charpy* memakai pendulum yang diayunkan untuk mematahkan spesimen sesuai ASTM E23. Parameter *input Drop Test* meliputi massa impaktor dan ketinggian jatuh, sementara *V-Charpy* menggunakan massa pendulum dan sudut ayunan. *Drop Test* mengukur gaya, waktu kontak, deformasi, dan energi tumbukan, sedangkan *V-Charpy* hanya mengukur energi serap hingga patah. Arah impak pada *Drop Test* bersifat vertikal, sedangkan *V-Charpy* bersifat lateral. *Drop Test* cocok untuk analisis ketahanan retak kritis, tetapi memerlukan alat khusus dan kurang cocok untuk QC. Sebaliknya, *V-Charpy* lebih cocok untuk QC rutin dan

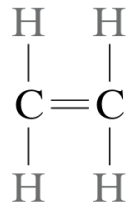
pemeriksaan keuletan, meskipun hanya menghasilkan satu titik data dan sensitif terhadap variasi takik atau suhu. Secara umum, *Drop Test* lebih kompleks dan mendalam, sedangkan *V-Charpy* lebih sederhana dan praktis.

2.2. Polimer

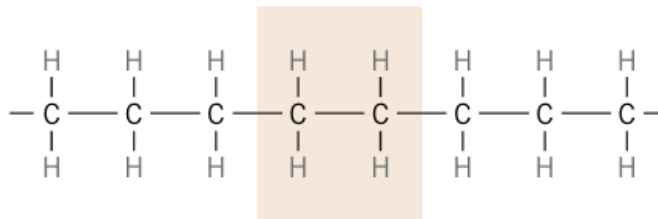
Polimer merupakan makromolekul yang terbentuk dari molekul-molekul kecil yang saling berkaitan satu sama lainnya melalui reaksi polimerisasi. Molekul-molekul penyusun tersebut dinamakan monomer, sedangkan proses pembentukan rantai makromolekul tersebut dikenal sebagai polimerisasi (Tunjungsari and Sumarni, 2019). Melalui proses ini, monomer-monomer tersusun membentuk rantai Panjang dengan struktur berulang yang menjadi ciri utama material polimer. Secara umum, sifat fisik dan mekanik suatu polimer sangat dipengaruhi oleh struktur molekul penyusunnya, seperti panjang rantai, tingkat percabangan, dan jenis ikatan antar molekul, karena parameter-parameter tersebut berperan penting dalam menentukan respons polimer terhadap pembebanan mekanik, perubahan temperatur, serta kondisi lingkungan sekitarnya (Aguilar-Vega, 2013)

Berdasarkan asalnya, polimer diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu polimer alami dan polimer sintetis atau polimer buatan. Polimer alami merupakan senyawa polimer yang secara alami terdapat di lingkungan dan berasal dari makhluk hidup, seperti kayu, sutra, dan protein. Sementara itu, polimer sintetis merupakan polimer buatan yang diproduksi melalui proses rekayasa kimia oleh manusia guna memperoleh sifat tertentu, contohnya seperti polietilena (PE), polivinil klorida (PVC), *Polypropylene* (PP), dan nilon. Menurut (Reimschuessel, 1975) istilah polimer sintetis merujuk pada suatu makromolekul yang tersusun atas unit-unit

struktur sederhana dan umumnya terbentuk dari monomer melalui suatu proses polimerisasi, di mana struktur kimianya ditentukan oleh parameter konstitusional dan konfigurasional yang berpengaruh terhadap sifat fisik dan mekanik material polimer tersebut.



(a)



(b)

Gambar 2.3 (a) Monomer (b) Polymer

(William D. Callister, 2013)

Pada Gambar 2.3 (a) menunjukkan struktur monomer *ethylene* (C_2H_4) yang ditandai oleh adanya ikatan rangkap antar atom karbon. Sementara itu, pada Gambar 2.3 (b) ditunjukkan struktur *polyethylene* (PE) yang terbentuk melalui proses polimerisasi adisi, sebagai hasil reaksi antara inisiator atau katalis dengan monomer etilena. Proses polimerisasi tersebut berlangsung dengan mekanisme polimerisasi adisi yang terdiri atas tiga tahapan utama, yaitu inisiasi, propagasi, dan terminasi. Tahap inisiasi terjadi karena terbentuknya pusat reaktif pada monomer, yang kemudian diikuti oleh tahap propagasi berupa penambahan monomer secara

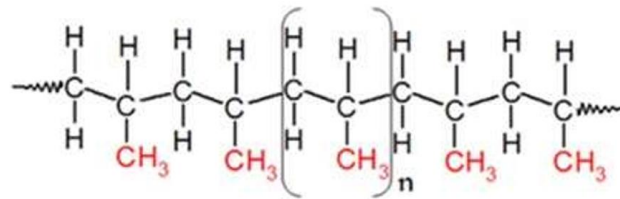
berulang pada rantai aktif hingga terbentuk makromolekul, serta tahap terminasi yang berperan menghentikan pertumbuhan rantai polimer (William D. Callister, 2013). Mekanisme pembentukan rantai polimer tersebut berperan langsung dalam menentukan sifat mekanik dan fungsional material, sehingga secara langsung memengaruhi kinerja serta cakupan pemanfaatan polimer dalam berbagai bidang industri.

Polimer banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang karena sifatnya yang ringan, kokoh, dan fleksibel. Penelitian yang dilakukan (Abdulqadir *et al.*, 2024) komposit serat karbon yang diperkuat polimer (CFRP) memiliki kekuatan tarik kuasi-statis sebesar 529–549 MPa, sebanding dengan baja DP600 (566–584 MPa) dan jauh lebih tinggi dibandingkan aluminium AC170 (193–212 MPa). Seiring meningkatnya kebutuhan akan material yang efisien dan berkinerja mekanik memadai, penggunaan polimer terus berkembang dalam aplikasi teknik dan industri, seperti *polypropylene* (PP), *polyethylene* (PE), *high density polyethylene* (HDPE), *polyvinyl chloride* (PVC), karet alam, serta polimer berbasis protein.

2.2.1 Polypropylene (PP)

Polypropylene (PP) merupakan polimer termoplastik yang dihasilkan melalui proses polimerisasi monomer *propylene* dengan rumus kimia (C_3H_6). Melalui proses polimerisasi tersebut, molekul-molekul *propylene* saling berikatan dan tersusun membentuk rantai makromolekul yang panjang dengan struktur berulang. Struktur molekul yang terbentuk inilah yang memberikan karakteristik yang unik pada material *polypropylene*, terutama yang berkaitan dengan sifat fisik dan mekaniknya. Contohnya densitas yang relatif rendah, ketahanan kimia yang baik, sifat mekanik yang seimbang, serta ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue*

resistance).



Gambar 2.4 *Polypropylene*

(Mandal and Šapčanin, 2023)

Struktur kimia *polypropylene* (PP) yang ditunjukkan pada Gambar 2. 4 tersusun dari unit monomer *propylene* (C₃H₆) yang mengalami polimerisasi adisi sehingga menghasilkan rantai polimer jenuh dengan unit berulang (C₃H₆)_n. Rantai utama karbon tersebut berikatan secara kovalen, di mana atom karbon sekunder membawa gugus metil (-CH₃) sebagai substituen. Keberadaan gugus metil tersebut menyebabkan keterbatasan rotasi rantai dan memengaruhi keteraturan susunan molekul, sehingga *polypropylene* dapat terbentuk dalam konfigurasi isotaktik, sindiotaktik, maupun ataktik. Tingkat keteraturan struktur ini berpengaruh langsung terhadap morfologi semikristalin *polypropylene*, di mana fase kristalin dan amorf terbentuk secara bersamaan.

Tabel 2.2 *Mechanical Properties Polypropylene*

No.	<i>Mechanical Properties</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
1.	<i>Density</i>	0.89-0.91	<i>g/cm³</i>
2.	<i>Modulus Elasticity</i>	1100 – 1550	<i>MPa</i>
3.	<i>Yield Strength</i>	31.0 – 37.2	<i>MPa</i>
4.	<i>Melting Point</i>	160-170	<i>°C</i>
5.	<i>Maximum Operating Temperature</i>	90-100	<i>°C</i>
6.	<i>Hardness</i>	65 - 80	<i>Shore H</i>
7.	<i>Young's Modulus</i>	1.1 - 1.55	<i>GPa</i>

(William D. Callister, 2013)

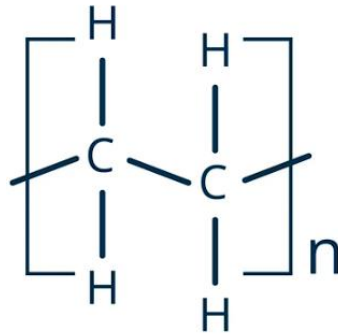
Karakteristik struktur molekul *polypropylene* tercermin pada sifat mekanik yang disajikan dalam Tabel 2. 2, yang menunjukkan bahwa material ini memiliki densitas rendah serta kombinasi modulus elastisitas, kekuatan tarik, dan ketangguhan retak yang memadai untuk aplikasi teknik. Sifat tersebut menjadikan *polypropylene* sebagai material yang ringan namun tetap mampu menahan beban mekanik pada berbagai kondisi operasional. Studi yang dilakukan (Gasses, 2020) *polypropylene* (PP) menyumbang 37% dari total plastik yang digunakan dalam mobil penumpang, meliputi komponen seperti bumper, panel pintu, dan *dashboard*. Hal tersebut menunjukkan bahwa *polypropylene* memiliki peran penting dalam industri otomotif modern karena sifat mekaniknya yang mendukung efisiensi desain dan proses produksi, serta berpotensi diterapkan pada berbagai sektor industri lainnya.

2.2.2 Polyethylene (PE)

Polyethylene (PE) merupakan polimer termoplastik berbasis hidrokarbon yang tersusun dari rantai panjang atom karbon dan hidrogen dengan struktur molekul yang relatif sederhana. Sifat dasar material ini ditentukan oleh ikatan kovalen pada rantai utama serta tingkat keteraturan susunan molekulnya, yang berpengaruh terhadap perilaku fisik dan mekanik yang beragam.

Variasi tingkat keteraturan tersebut berkaitan dengan perbedaan derajat kristalinitas dan morfologi rantai polimer, yang selanjutnya memengaruhi respons material terhadap pembebanan dan kondisi termal. Sebagai polimer semikristalin, *polyethylene* memiliki kombinasi sifat kekuatan, daktilitas, dan ketahanan kimia yang dapat disesuaikan melalui pengendalian struktur molekul dan kondisi proses

pembentukannya.



Gambar 2.5 *Polyethylene*

(<https://www.alamy.com/polyethylene-polythene-pe-polyethene-polymethylene-molecule-it-is-polymer-of-ethylene-the-most-common-plastic-skeletal-chemical-formula-vect-image457382008.html>)

Secara struktural, sebagaimana ditunjukkan Gambar 2. 5, *polyethylene* tersusun atas unit monomer *ethylene* dengan rumus (C_2H_4) yang mengalami polimerisasi adisi, sehingga membentuk rantai panjang karbon jenuh dengan unit ulangan (C_2H_4)_n dengan "n" menunjukkan jumlah unit yang berulang dalam rantai polimer tersebut. Setiap atom karbon pada rantai utama berikatan dengan dua atom hidrogen, sehingga menghasilkan struktur molekul yang dapat bersifat linier maupun bercabang, bergantung pada jenis *polyethylene* yang terbentuk, seperti *High Density Polyethylene* (HDPE) atau *Low Density Polyethylene* (LDPE).

Variasi struktur rantai dan tingkat keteraturan molekul tersebut membentuk morfologi semikristalin yang terdiri atas daerah kristalin dan amorf, dimana tingkat kristalinitas berperan penting dalam menentukan sifat mekanik *polyethylene* (Das-Gupta, 1994). Lebih lanjut, ketiadaan gugus fungsional polar menyebabkan *polyethylene* bersifat non-polar dan hidrofobik, serta memiliki ketahanan yang baik terhadap berbagai pelarut kimia (William D. Callister, 2013). Sifat ini menjadikannya ideal untuk aplikasi seperti kantong plastik, pipa, dan isolasi kabel.

Tabel 2.3 *Mechanical Properties Polyethylene*

No.	<i>Mechanical Properties</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
1.	<i>Density</i>	0.925 – 0.959	<i>g/cm³</i>
2.	<i>Modulus Elasticity</i>	0.172 – 1.08	<i>GPa</i>
3.	<i>Yield Strength</i>	9 – 33.1	<i>MPa</i>
4.	<i>Tensile Strength</i>	8.3 – 48.3	<i>MPa</i>
5.	<i>Fracture Toughness</i>	2.0 – 3.0	<i>MPa√m</i>
6.	<i>Thermal Conductivity</i>	0.33 – 0.52	<i>W/m.k</i>
7.	<i>Specific Heat</i>	1550	<i>J/kg.K</i>

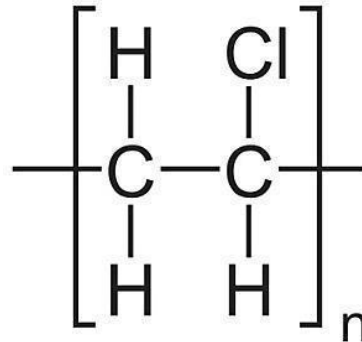
(William D. Callister, 2013)

Tabel 2. 3 menyajikan sifat mekanik utama *polyethylene* yang dipengaruhi oleh struktur molekul dan tingkat kristalinitas material. Rentang nilai densitas, modulus elastisitas, serta kekuatan tarik dan luluh menunjukkan bahwa *polyethylene* memiliki keseimbangan antara kekakuan dan daktilitas, sehingga material *polyethylene* banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Menurut (Chen and Lin, 2021) *polyethylene* merupakan resin polyolefin utama dengan kapasitas produksi global terbesar, dimana tahun 2019 total produksinya mencapai 105 juta ton, yang mencerminkan tingginya pemanfaatan material ini dalam berbagai aplikasi industri khususnya pada manufaktur plastik.

2.2.3 *Polyvinyl Chloride (PVC)*

Polyvinyl Chloride (PVC) merupakan salah satu polimer termoplastik berbasis *vinyl* yang tersusun dari unit monomer *vinyl chloride* dengan struktur rantai utama karbon yang mengandung atom *chlorine* sebagai gugus samping. Keberadaan atom *chlorine* dalam struktur molekul tersebut memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat fisik dan mekanik PVC, termasuk peningkatan kekakuan,

ketahan kimia, serta sifat tahan api relatif dibanding polimer hidrokarbon murni.



Gambar 2.6 *Polyvinyl chloride*

(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polyvinyl_chloride_Structural_Formula_V2.svg)

Pada Gambar 2.6 menunjukkan susunan struktur kimia *Polyvinyl Chloride* (PVC) yang terdiri dari unit monomer *vinyl chloride* ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$) yang mengalami polimerisasi adisi, menghasilkan rantai polimer jenuh dengan unit berulang $-\text{[CH}_2-\text{CHCl]}_n-$. Setiap unit berulang memiliki satu atom karbon primer yang terikat pada dua atom hidrogen, dan satu atom karbon sekunder yang terikat pada satu atom hidrogen dan satu atom klorin. Gugus klorin memberikan sifat polar pada PVC, meningkatkan kekuatan mekanik, ketahanan terhadap api, dan kestabilan kimia. Struktur ini bersifat semi-kristalin dan termoplastik, menjadikannya cocok untuk aplikasi seperti pipa, kabel, dan bahan konstruksi (William D. Callister, 2013).

Tabel 2.4 *Mechanical Properties Polyvinyl Chloride*

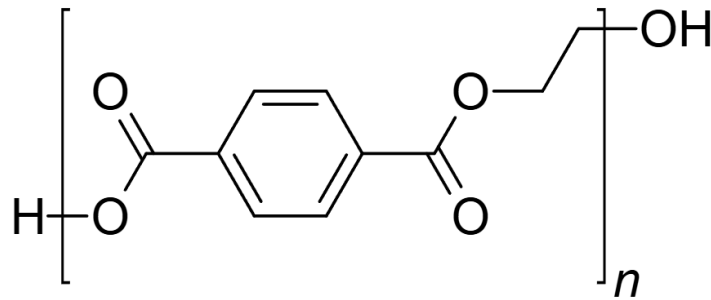
No.	<i>Mechanical Properties</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
1.	<i>Density</i>	1.41	g/cm^3
2.	<i>Modulus Elasticity</i>	2.5 – 3.0	<i>GPa</i>
3.	<i>Yield Strength</i>	40 – 60	<i>MPa</i>
4.	<i>Tensile Strength</i>	50 – 80	<i>MPa</i>
5.	<i>Fracture Toughness</i>	1.5 – 2.0	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
6.	<i>Thermal Conductivity</i>	0.16 – 0.25	<i>W/m.k</i>
7.	<i>Specific Heat</i>	880	<i>J/kg.K</i>

(William D. Callister, 2013)

Dalam konteks Tabel 2. 4 pengujian material teknik, spesimen PVC umumnya dikategorikan menjadi dua varian utama berdasarkan formulanya, yaitu unplasticized PVC (uPVC) yang bersifat kaku dan keras untuk aplikasi struktural seperti pipa, serta PVC fleksibel yang telah dimodifikasi dengan penambahan plasticizer untuk meningkatkan elastisitasnya. Sifat mekanik PVC sangat dipengaruhi oleh formulasi aditif ini oleh karena itu, identifikasi komposisi spesimen sebelum pengujian adalah langkah fundamental, karena keberadaan plasticizer dapat menurunkan kekuatan tarik dan modulus elastisitas secara drastis namun meningkatkan ketahanan terhadap benturan dan perpanjangan saat putus (Wilkes et al., 2005).

2.2.4 *Polyethylene Terephthalate (PET)*

Polyethylene Terephthalate (PET) merupakan polimer termoplastik dari kelompok *polyester* yang terbentuk melalui reaksi polimerisasi kondensasi antara etilena glikol dan asam tereftalat, menghasilkan rantai makromolekul dengan sifat mekanik dan termal yang relatif baik. Karakteristik utama PET meliputi kekuatan tarik yang cukup tinggi, stabilitas dimensi yang baik, serta ketahanan terhadap berbagai lingkungan kimia, sehingga material ini sering diaplikasikan pada produk kemasan, serat sintesis, dan komponen teknik lainnya. Sifat-sifat tersebut menjadikan PET sebagai salah satu polimer yang penting dalam pengembangan dan pengujian material polimer modern.



Gambar 2.7 *Polyethylene terephthalate*
(Scheirs & Long, 2003)

Secara struktural, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. 7, polyethylene terephthalate (PET) memiliki rantai molekul panjang yang tersusun dari unit berulang dengan gugus ester dan cincin aromatik pada tulang punggung rantai polimernya. Struktur tersebut menyebabkan PET bersifat semikristalin, dengan pembentukan daerah kristalin dan amorf yang dipengaruhi oleh kondisi proses dan riwayat termal material. Derajat kristalinitas serta orientasi rantai molekul berpengaruh terhadap sifat mekanik PET, khususnya kekuatan tarik dan modulus elastisitas, sehingga material ini banyak digunakan dalam aplikasi seperti kemasan makanan, botol minuman, dan serat tekstil (William D. Callister, 2013).

Tabel 2.5 *Mechanical Properties Polyethylene Terephthalate*

No.	<i>Mechanic Properties</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
1.	<i>Density</i>	1.35	g/cm^3
2.	<i>Modulus Elasticity</i>	2.76 – 4.14	<i>GPa</i>
3.	<i>Yield Strength</i>	59.3	<i>MPa</i>
4.	<i>Tensile Strength</i>	48.3 – 72.4	<i>MPa</i>
5.	<i>Fracture Toughness</i>	5	$MPa\sqrt{m}$
6.	<i>Thermal Conductivity</i>	0.15	<i>W/m.k</i>
7.	<i>Specific Heat</i>	1170	<i>J/kg.K</i>

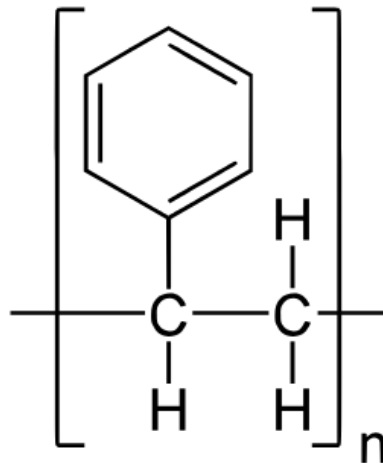
(William D. Callister, 2013)

Berdasarkan sifat mekanik yang ditunjukkan pada Tabel 2. 5, *polyethylene terephthalate* (PET) memiliki kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang memadai

untuk aplikasi struktural ringan. Hasil studi eksperimental yang dilakukan oleh (Sulyman, Haponiuk and Formela, 2016), yang menunjukkan bahwa PET banyak dimanfaatkan tidak hanya pada kemasan dan serat tekstil, tetapi juga sebagai material teknik, khususnya dalam modifikasi aspal jalan dan material konstruksi seperti beton, karena kemampuannya dalam meningkatkan stabilitas mekanik, ketahanan terhadap deformasi, serta umur layanan material, sekaligus memberikan manfaat lingkungan melalui pemanfaatan limbah plastik.

2.2.5 Polystyrene (PS)

Polystyrene (PS) merupakan polimer termoplastik aromatik yang tersusun dari monomer stirena, dikenal secara luas dalam rekayasa material karena sifatnya yang kaku, transparan, dan memiliki stabilitas dimensi yang baik. Dalam bentuk murninya, yang sering disebut sebagai *General Purpose Polystyrene* (GPPS), material ini memiliki struktur amorf yang mengakitkannya bersifat sangat getas (*brittle*) dengan ketahanan impak yang rendah. Karakteristik ini menjadikan spesimen GPPS sering digunakan dalam pengujian mekanik sebagai representasi standar dari perilaku patah getas (*brittle fracture*), di mana kegagalan struktur terjadi secara katastrofik tanpa adanya deformasi plastis yang signifikan sebelumnya. Kurva tegangan-regangan dari spesimen GPPS biasanya menunjukkan hubungan linier hingga titik patah, yang mengindikasikan bahwa material ini tidak memiliki titik luluh (*yield point*) yang nyata sebelum mengalami kegagalan (Scheirs & Priddy, 2003).



Gambar 2.8 *Polystyrene*

(https://www.researchgate.net/figure/Generalized-molecular-structure-of-polystyrene_fig42_325324706)

Gambar 2.8 merupakan susunan struktur kimia *polystyrene* yang tersusun dari unit monomer stirena ($C_6H_5-CH=CH_2$) yang mengalami polimerisasi adisi. Pada proses polimerisasi adisi, ikatan rangkap pada *styrene* terbuka dan membentuk rantai utama karbon jenuh, di mana setiap unit monomer memiliki gugus fenil (C_6H_5-) terikat pada atom karbon sekunder dalam rantai utama. Rantai utama *polystyrene* adalah rantai karbon jenuh $-[CH_2-CH(C_6H_5)]_n-$, di mana "n" menunjukkan jumlah unit berulang. Gugus fenil tersebut menimbulkan hambatan sterik yang membatasi pergerakan rantai polimer, sehingga meningkatkan kekakuan dan meningkatkan kekuatan mekanik serta kestabilan termal polimer. Secara strukturalnya, *polystyrene* umumnya bersifat amorf karena ukuran gugus fenil menghambat pembentukan susunan kristalin yang teratur. Hubungan antara struktur kimia dan struktur internal tersebut menjadi faktor utama yang menentukan sifat mekanik dan termal *polystyrene*.

Tabel 2.6 *Mechanical Properties Polystyrene*

No.	<i>Mechanic Properties</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
1.	<i>Density</i>	1.05	<i>g/cm³</i>
2.	<i>Modulus Elasticity</i>	2.28 – 3.28	<i>GPa</i>
3.	<i>Yield Strength</i>	25.0 – 69.0	<i>MPa</i>
4.	<i>Tensile Strength</i>	35.9 – 51.7	<i>MPa</i>
5.	<i>Fracture Toughness</i>	0.7 – 1.1	<i>MPa√m</i>
6.	<i>Thermal Conductivity</i>	0.13	<i>W/m.k</i>
7.	<i>Specific Heat</i>	1170	<i>J/kg.K</i>

(William D. Callister, 2013)

Tabel 2. 6 menyajikan sifat mekanik utama polistirena yang berkaitan erat dengan struktur molekulnya yang didominasi oleh gugus fenil pada rantai utama polimer. Nilai densitas, modulus elastisitas, serta kekuatan luluh dan tarik menunjukkan bahwa polistirena memiliki kekakuan yang relatif tinggi namun disertai dengan ketangguhan retak yang terbatas. Karakteristik tersebut mencerminkan sifat material yang cenderung kaku dan rapuh, sehingga respons mekaniknya sangat dipengaruhi oleh kondisi pembebanan dan lingkungan kerja. Sifat mekanik ini menjadi dasar pemanfaatan polistirena pada aplikasi yang memerlukan stabilitas dimensi dan kekakuan, namun tidak menuntut kemampuan deformasi plastis yang besar.

2.3. Energi Tumbukan

Beban dijatuhkan secara vertikal dari ketinggian tertentu, menghasilkan energi tumbukan yang menghasilkan potensial gravitasi saat mencapai spesimen. Energi didefinisikan sebagai kemampuan untuk melakukan kerja. Dalam fisika, energi merupakan besaran yang tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi hanya dapat berubah bentuk dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Energi tumbukan

E_p yang diberikan ke benda uji dihitung dengan rumus (ASTM International, 2020):

$$E = m \times g \times h \dots\dots\dots (2.1)$$

Di mana:

E = Energi tumbukan (Joule)

m = Massa benda (kg)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

h = Tinggi jatuh benda (m)

2.4. Gerak Jatuh Bebas

Gerak jatuh bebas adalah gerak benda yang dipengaruhi secara eksklusif oleh gaya gravitasi tanpa adanya gaya hambat lainnya, seperti hambatan udara (Giancoli, 2005). Gerak ini merupakan bagian dari Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB), di mana percepatan benda tetap sepanjang lintasannya. Dalam desain alat uji impak tipe *drop test*, pemahaman mengenai prinsip gerak jatuh bebas menjadi krusial untuk menghitung energi tumbukan yang dihasilkan dari massa yang dilepaskan secara vertikal terhadap benda uji.

Percepatan yang dialami benda dalam jatuh bebas adalah percepatan gravitasi bumi, disimbolkan dengan g , dengan nilai rata-rata 9,81 m/s². Jika benda dijatuhkan dari keadaan diam, kecepatannya saat mencapai permukaan dapat dihitung dengan persamaan (Young & Freedman, 2012):

$$v = \sqrt{2gh} \dots\dots\dots (2.2)$$

Di mana:

v = Kecepatan jatuh benda (m/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

h = Tinggi jatuh benda (m)

2.5. Impuls

Impuls adalah suatu gaya konstan yang merupakan hasil perkalian antara gaya dan selang waktu saat gaya tersebut bekerja pada suatu benda. Secara matematis, dirumuskan sebagai berikut (Susanto, 2016):

$$F = \frac{m \cdot v}{t} \dots\dots\dots (2.3)$$

Di mana:

F = Gaya konstan (N)

m = Massa benda (kg)

v = Kecepatan benda (m/s)

t = Selang waktu (s)

Persamaan ini merupakan bentuk turunan dari hukum kedua newton yang berkaitan dengan konsep impuls dan momentum. Berdasarkan hukum impuls-momentum, impuls yang diberikan pada suatu benda sama dengan perubahan momentumnya, yang dirumuskan berikut ini (Susanto, 2016):

$$I = F \cdot t = m \cdot v \dots\dots\dots (2.4)$$

Di mana:

I = Impuls (Ns)

F = Gaya konstan (N)

t = Selang waktu (s)

2.6. Momentum

Momentum suatu benda yang bergerak dihitung sebagai hasil kali antara massa benda dan kecepatannya. Secara matematis, momentum dirumuskan berikut (Susanto, 2016):

$$M = m \cdot v \dots\dots\dots (2.5)$$

Di mana:

M = Momentum benda (kg./ms)

m = Massa benda (kg)

v = Kecepatan benda (m/s)

2.7. Tegangan Impak

Tegangan impak didefinisikan sebagai intensitas gaya internal yang bekerja pada luas penampang material saat menerima beban kejut secara mendadak dari ketinggian tertentu. Pada pengujian *drop test*, fenomena ini terjadi dalam durasi waktu yang sangat singkat, sehingga material tidak memiliki waktu yang cukup untuk mendistribusikan beban secara merata seperti pada pengujian statik. Tegangan ini merepresentasikan kemampuan material dalam menahan beban dinamis sesaat sebelum terjadi deformasi plastis atau kegagalan struktural (Callister & Rethwisch, 2018)

Secara matematis, besarnya tegangan impak yang terjadi pada spesimen saat ditumbuk oleh massa beban dapat dihitung berdasarkan hubungan antara gaya kontak maksimum terhadap luas penampang material. Berdasarkan prinsip dasar

mekanika material, rumus perhitungan tegangan impak dinyatakan sebagai berikut (Beer, F. P., Johnston E.R. et al, 2020):

$$\sigma_{impact} = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2.6)$$

Di mana:

σ_{impact} = Tegangan impak (N/m²)

F = Gaya impak (N)

A = Luas penampang spesimen (m²)

2.8. Deformasi Meja

Dalam melakukan desain meja uji, diperlukan perhitungan faktor keamanan (*safety factor*) untuk memastikan bahwa selama proses pengujian, struktur meja tetap berada dalam batas aman. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa struktur meja mampu menahan beban impak yang terjadi selama pengujian tanpa mengalami deformasi permanen atau kegagalan struktural, sehingga operasional pengujian tetap berada dalam kondisi aman dan data yang dihasilkan dapat diterima (*valid*). Analisis deformasi pelat meja mengacu pada standar ASTM D5628 (*Drop Weight Impact Test*). Perhitungan deformasi meja yang nantinya digunakan sebagai berikut :

$$F = \Delta s / Ep \dots\dots\dots (2.7)$$

Di mana:

$\Delta s = 10\text{mm} = 0,01\text{m}$

F = Gaya tumbukan maksimum yang terjadi saat beban jatuh (satuan Newton, N)

E = Energi tumbukan beban sebelum jatuh (Joule)

Δs = Jarak deformasi saat tumbukan, atau seberapa jauh objek (meja/material uji) menyerap tumbukan dalam bentuk lenturan, peredaman, atau impak elastis/plastis (meter).

Analisis Kekuatan plat baja

$$P = F/A \dots\dots\dots (2.8)$$

Di mana:

P = Tekanan diukur dalam satuan Pascal (Pa) atau Newton per meter persegi (N/m²).

F = Gaya dalam satuan Newton (N).

A = Luas permukaan (m)

Analisis deformasi aksial pada kaki meja dengan menggunakan Hollow 40 x 40 x 3

$$\Delta = \frac{F.L}{A.E} \dots\dots\dots (2.9)$$

Diketahui:

Δ = Deformasi aksial kaki meja (m)

F = Gaya aksial yang bekerja pada kaki meja (N)

L = Panjang kaki meja (m)

A = Luas penampang kaki meja (m²)

E = Modulus elastisitas material kaki meja (N/m²)

Analisis *euler buckling load hollow* 40 x 40 x 3

$$P_{cr} = \frac{\pi^2.EI}{(K.L)^2} \dots\dots\dots (2.10)$$

Diketahui:

P_{cr} = Beban kritis *buckling* (N)

E = 200×10^9 N/m² (Baja)

I = Momen inersia penampang (m⁴)

L = 0,3 m

K = 0.5 (*K Factor*)

Menghitung Momen *Inersia Hollow*

$$I = \frac{1}{12}(B \cdot H^3 - b \cdot h^3)$$

Di mana:

B dan H = 0.04 m

b dan h = 0.03 m