

Karakterisasi Gaya Tekan Maksimum Limbah Botol Plastik Sebagai Dasar Perancangan Mesin Press Botol Plastik

Sufiyanto^{1*}, Marfizal¹, Heriyanto¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional

* Corresponding author, e-mail: sufiyanto@stiteknas.ac.id

ABSTRACT

Plastic bottle waste occupies a large volume despite its relatively low weight, making compaction essential to improve storage and transportation efficiency before recycling. This study aimed to characterize the maximum compressive force of various types of plastic bottle waste as a basis for designing a plastic bottle press machine. Compression tests were conducted on five types of plastic bottle waste, namely 220 mL polypropylene (PP) drinking cups, 330 mL, 600 mL, and 1500 mL polyethylene terephthalate (PET) bottles, and high-density polyethylene (HDPE) lubricant bottles. Each specimen was tested ten times using a digital force gauge-based compression testing device under static axial loading. The data were analyzed using descriptive statistics, the Shapiro–Wilk normality test, Levene's homogeneity test, and one-way ANOVA. The average maximum compressive forces were 33.80 N, 59.78 N, 122.34 N, 253.18 N, and 638.64 N, respectively. The ANOVA results showed that the type of plastic bottle significantly affected the maximum compressive force ($p < 0.05$). Applying a safety factor of 1.5 yielded a design force of 957.96 N, which can serve as the basis for determining the capacity of a plastic bottle press machine.

Keyword: maximum compressive force; plastic bottle waste; press machine.

ABSTRAK

Limbah botol plastik memiliki volume yang besar dengan massa yang relatif ringan sehingga memerlukan proses pemadatan untuk meningkatkan efisiensi penyimpanan dan transportasi menuju industri daur ulang. Perancangan mesin press yang optimal memerlukan informasi mengenai gaya tekan maksimum yang dibutuhkan oleh berbagai jenis limbah botol plastik. Penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi gaya tekan maksimum berbagai jenis limbah botol plastik sebagai dasar perancangan mesin press. Pengujian dilakukan terhadap lima jenis limbah botol plastik, yaitu gelas air mineral 220 mL berbahan *polypropylene* (PP), botol *polyethylene terephthalate* (PET) berkapasitas 330 mL, 600 mL, dan 1500 mL, serta botol oli berbahan *high density polyethylene* (HDPE). Setiap jenis botol diuji sebanyak sepuluh kali menggunakan alat uji tekan berbasis *digital force gauge* dengan pembebanan tekan statis. Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif, uji normalitas *Shapiro–Wilk*, uji *homogenitas Levene*, dan analisis varians satu arah (*One-Way ANOVA*). Hasil penelitian menunjukkan rata-rata gaya tekan maksimum sebesar 33,80 N, 59,78 N, 122,34 N, 253,18 N, dan 638,64 N untuk masing-masing jenis botol. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa jenis limbah botol plastik berpengaruh signifikan terhadap gaya tekan maksimum ($p < 0,05$). Dengan faktor keamanan 1,5 diperoleh gaya desain sebesar 957,96 N yang dapat digunakan sebagai parameter awal dalam perancangan mesin press botol plastik.

Kata kunci: gaya tekan maksimum; limbah botol plastik; mesin press.

PENDAHULUAN

Peningkatan konsumsi produk berbahan plastik dalam beberapa dekade terakhir telah menyebabkan akumulasi limbah plastik yang semakin besar dan menjadi salah satu permasalahan lingkungan global. Plastik masih menjadi

material utama pada industri pengemasan karena memiliki massa jenis rendah, ketahanan korosi yang baik, mudah diproses, serta biaya produksi yang relatif murah. Namun demikian, karakteristik tersebut menyebabkan plastik sulit terdegradasi secara alami sehingga jumlah limbahnya terus meningkat dari tahun ke tahun. Kemasan plastik sekali

pakai, khususnya botol minuman, menjadi salah satu penyumbang utama timbulan limbah plastik yang memerlukan sistem pengelolaan dan daur ulang yang lebih efektif untuk mendukung konsep ekonomi sirkular (*circular economy*) [1], [2].

Di Indonesia, limbah botol plastik merupakan salah satu komponen utama sampah anorganik yang memiliki nilai ekonomi tinggi sebagai bahan baku industri daur ulang. Jenis limbah tersebut didominasi oleh botol minuman berbahan *Polyethylene Terephthalate* (PET), gelas plastik berbahan *Polypropylene* (PP), serta botol pelumas berbahan *High Density Polyethylene* (HDPE). Meskipun memiliki nilai ekonomi yang relatif tinggi, limbah botol plastik mempunyai volume yang besar dengan massa yang ringan sehingga menghasilkan densitas curah (*bulk density*) yang rendah. Kondisi tersebut menyebabkan kebutuhan ruang penyimpanan menjadi besar dan biaya transportasi meningkat selama proses pengumpulan maupun distribusi menuju industri daur ulang. Oleh karena itu, proses pemadatan (*compaction*) diperlukan untuk mengurangi volume limbah sehingga efisiensi penyimpanan dan transportasi dapat ditingkatkan [3], [4].

Pemadatan limbah plastik umumnya dilakukan menggunakan mesin press dengan berbagai mekanisme, seperti sistem hidrolik, mekanisme ulir (*screw press*), maupun mekanisme mekanik lainnya. Keberhasilan proses pemadatan sangat ditentukan oleh kemampuan sistem menghasilkan gaya tekan yang mampu menyebabkan deformasi permanen pada struktur botol plastik. Besarnya gaya tekan merupakan parameter penting dalam menentukan kapasitas motor penggerak, mekanisme transmisi daya, dimensi rangka, serta faktor keamanan pada proses perancangan mesin press [5], [6]. Oleh karena itu, penentuan kebutuhan gaya tekan secara eksperimental menjadi tahapan penting sebelum proses perancangan mesin dilakukan.

Secara mekanik, botol plastik merupakan struktur berdinding tipis (*thin-walled structure*) yang menunjukkan perilaku deformasi nonlinier ketika menerima pembebanan tekan aksial. Pada tahap awal pembebanan terjadi deformasi elastis yang kemudian berkembang menjadi *local buckling*, diikuti *progressive collapse*, hingga akhirnya struktur

mengalami pemadatan (*densification*). Perilaku tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain jenis material, ketebalan dinding, kapasitas volume, bentuk geometri, serta konfigurasi profil pengaku (*rib*) pada badan botol. Akibatnya, setiap jenis botol memiliki karakteristik gaya tekan maksimum yang berbeda meskipun berasal dari kelompok material polimer yang sama [5], [7].

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji karakteristik mekanik botol plastik melalui pengujian tekan maupun simulasi elemen hingga untuk mengevaluasi perilaku *top-load compression*, deformasi, dan fenomena *buckling*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa geometri botol, bentuk penampang, ketebalan dinding, dan konfigurasi *rib* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekakuan struktur serta beban kritis *buckling*. Selain geometri, karakteristik mekanik material kemasan, seperti PET, PP, dan HDPE, turut memengaruhi respons deformasi, kekakuan struktur, serta stabilitas botol selama menerima pembebanan tekan. Botol dengan geometri silindris umumnya memiliki ketahanan tekan yang lebih tinggi dibandingkan geometri non-silindris, sedangkan penambahan *rib* mampu meningkatkan kekakuan struktur secara signifikan. Perbedaan sifat mekanik masing-masing material menyebabkan kebutuhan gaya tekan maksimum pada setiap jenis botol tidak sama meskipun memiliki dimensi atau kapasitas yang serupa [8], [9], [10].

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berorientasi pada optimasi desain kemasan baru untuk industri minuman maupun pelumas. Parameter yang dievaluasi umumnya berupa *top-load strength*, kestabilan struktur selama distribusi, optimasi ketebalan dinding, maupun analisis numerik perilaku deformasi botol. Sementara itu, penelitian mengenai mesin *press* limbah plastik lebih banyak berfokus pada perancangan mekanisme, analisis elemen mesin, maupun evaluasi kinerja mesin setelah *prototipe* selesai dibuat, tanpa didahului karakterisasi eksperimental mengenai kebutuhan gaya tekan berbagai jenis limbah botol plastik yang umum dijumpai pada aktivitas pengumpulan dan daur ulang [5], [6].

Berdasarkan telaah pustaka tersebut, masih terdapat kesenjangan penelitian, yaitu belum tersedianya data

eksperimental mengenai gaya tekan maksimum berbagai jenis limbah botol plastik yang mewakili variasi material, kapasitas, dan geometri sebagai parameter dasar dalam perancangan mesin press botol plastik. Akibatnya, penentuan kapasitas mesin press masih banyak dilakukan berdasarkan pendekatan empiris atau asumsi konservatif sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan karakteristik mekanik limbah botol plastik yang dijumpai pada kondisi lapangan.

Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini melakukan karakterisasi gaya tekan maksimum terhadap lima jenis limbah botol plastik yang umum dijumpai pada aktivitas pengumpulan limbah, yaitu gelas air mineral 220 mL berbahan PP, botol PET 330 mL, botol PET 600 mL, botol PET 1500 mL, serta botol oli berbahan HDPE. Pengujian dilakukan menggunakan alat uji tekan berbasis *force gauge* dengan pembebanan tekan statis untuk memperoleh data gaya tekan maksimum masing-masing jenis botol.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada penyusunan basis data eksperimental mengenai gaya tekan maksimum berbagai jenis limbah botol plastik yang mewakili variasi material, kapasitas, dan geometri sebagai parameter dasar dalam perancangan mesin press botol plastik. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang lebih berfokus pada evaluasi kekuatan kemasan dan optimasi desain botol, penelitian ini menghasilkan data gaya tekan aktual yang dapat digunakan secara langsung dalam menentukan kapasitas sistem penekan, spesifikasi motor penggerak, mekanisme transmisi, dimensi rangka, serta faktor keamanan pada proses perancangan mesin press.

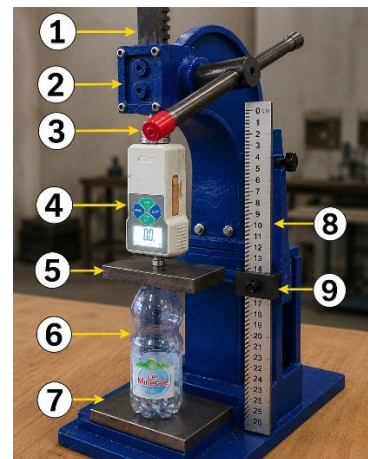
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menentukan gaya tekan maksimum berbagai jenis limbah botol plastik melalui pengujian eksperimental menggunakan alat uji tekan berbasis *force gauge*; (2) menganalisis pengaruh jenis material, kapasitas, dan geometri botol terhadap gaya tekan maksimum; serta (3) menetapkan gaya tekan rujukan sebagai dasar dalam perancangan mesin press botol plastik.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang bertujuan untuk mengkarakterisasi gaya tekan maksimum berbagai jenis limbah botol plastik sebagai dasar dalam perancangan mesin press botol plastik. Pengujian dilakukan menggunakan alat uji tekan berbasis *digital force gauge* dengan metode pembebanan tekan statis (*quasi-static compression*). Parameter utama yang diamati meliputi gaya tekan maksimum, deformasi maksimum, dan persentase reduksi tinggi spesimen setelah proses penekanan. Seluruh pengujian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin, Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional (STITKENAS) Jambi.

A. Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan alat uji tekan berbasis *digital force gauge* yang dirancang untuk menghasilkan pembebanan tekan secara aksial terhadap spesimen botol plastik. Mekanisme pembebanan menggunakan sistem *rack* dan *pinion gear* sehingga gerakan putar tuas diubah menjadi gerakan translasi vertikal pada plat penekan. Konfigurasi alat uji ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alat Uji Tekan Berbasis *Force Gauge*

Berdasarkan Gambar 1, alat uji terdiri atas mekanisme penggerak vertikal (1) yang berfungsi menghasilkan gerakan translasi pada sistem penekan, rumah mekanisme atau dudukan penggerak (2) sebagai penopang sistem pembebanan, serta tuas pemutar (3) yang digunakan

untuk mengoperasikan mekanisme *rack* dan *pinion* secara manual. Besarnya gaya tekan selama proses pengujian diukur menggunakan digital *force gauge* (4) yang dipasang segaris dengan arah pembebanan, sehingga nilai yang ditampilkan merepresentasikan gaya tekan yang bekerja langsung pada spesimen.

Pembebanan diteruskan melalui plat penekan baja bagian atas (5) yang berfungsi mendistribusikan gaya secara merata pada permukaan botol plastik (6), sedangkan plat penumpu baja bagian bawah (7) berfungsi sebagai landasan spesimen selama proses pengujian. Untuk mengamati deformasi akibat pembebanan, alat uji dilengkapi dengan skala pengukuran vertikal (8) yang dipadukan dengan indikator posisi (9), sehingga perubahan tinggi spesimen selama proses penekanan dapat diamati secara langsung.

Bahan penelitian berupa lima jenis limbah botol plastik yang umum dijumpai pada aktivitas pengumpulan dan industri daur ulang, yaitu gelas air mineral berbahan *Polypropylene* (PP) berkapasitas 220 mL, botol air mineral berbahan *Polyethylene Terephthalate* (PET) berkapasitas 330 mL, botol PET berkapasitas 600 mL, botol PET berkapasitas 1500 mL, serta botol oli motor berbahan *High Density Polyethylene* (HDPE).

B. Variabel Penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis limbah botol plastik yang terdiri atas lima variasi spesimen, yaitu gelas air mineral berbahan PP berkapasitas 220 mL, botol air mineral berbahan PET berkapasitas 330 mL, botol PET berkapasitas 600 mL, botol PET berkapasitas 1500 mL, dan botol oli motor berbahan HDPE. Variabel terikat adalah gaya tekan maksimum yang diperoleh selama proses pengujian menggunakan digital *force gauge*. Untuk menjamin konsistensi hasil pengujian, beberapa variabel dikendalikan, yaitu kondisi spesimen dalam keadaan kosong dan tanpa tutup, posisi botol ditempatkan tegak lurus terhadap arah pembebanan, penggunaan alat uji dan mekanisme pembebanan yang sama, laju pembebanan yang dibuat relatif konstan melalui pengoperasian tuas secara manual, serta seluruh pengujian dilakukan oleh operator yang sama pada kondisi lingkungan laboratorium yang seragam.

C. Rancangan Percobaan

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL) satu faktor, yaitu jenis limbah botol plastik. Faktor perlakuan terdiri atas lima taraf yang mewakili jenis botol plastik. Setiap perlakuan diuji sebanyak 10 kali pengulangan menggunakan spesimen yang berbeda sehingga jumlah seluruh spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah 50 botol plastik.

Pengujian dilakukan secara acak untuk meminimalkan pengaruh faktor luar yang dapat memengaruhi hasil pengujian. Parameter utama yang diamati adalah gaya tekan maksimum yang diperoleh dari setiap spesimen selama proses pembebanan tekan. Rancangan percobaan penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Rancangan Percobaan Penelitian

Kode Perlakuan	Jenis Botol Plastik	Material	Jumlah Sampel
P1	Gelas air mineral 220 ml	PP	10
P2	Botol air mineral 330 ml	PET	10
P3	Botol air mineral 600 ml	PET	10
P4	Botol air mineral 1500 ml	PET	10
P5	Botol oli motor	HDPE	10

D. Prosedur Pengujian

Sebelum pengujian dilakukan, seluruh spesimen dibersihkan dan dipastikan dalam kondisi kosong tanpa tutup untuk memperoleh kondisi pengujian yang seragam. Selanjutnya, setiap botol diberi kode sesuai dengan jenis perlakuan dan dilakukan pengukuran dimensi awal menggunakan jangka sorong digital serta penimbangan massa menggunakan timbangan digital. Setelah itu, spesimen ditempatkan secara tegak lurus di atas plat penumpu alat uji sehingga sumbu botol sejajar dengan arah pembebanan.

Proses pengujian dilakukan menggunakan alat uji tekan berbasis *digital force gauge* dengan mekanisme pembebanan *rack and pinion* yang dioperasikan secara manual melalui tuas pemutar. Pemutaran tuas menghasilkan gerakan translasi vertikal pada plat penekan sehingga gaya tekan diberikan secara bertahap dan kontinu pada bagian atas spesimen. Selama proses pembebanan berlangsung,

nilai gaya tekan diamati melalui digital *force gauge*, sedangkan perubahan bentuk spesimen diamati secara visual untuk memastikan terjadinya deformasi akibat pembebanan aksial.

Pembebanan dilanjutkan hingga spesimen mengalami deformasi permanen yang ditandai dengan terbentuknya lipatan (*buckling*) pada badan botol dan nilai gaya tekan yang ditunjukkan oleh digital *force gauge* mencapai nilai maksimum. Nilai gaya terbesar yang tercatat selama proses pengujian ditetapkan sebagai gaya tekan maksimum setiap spesimen. Pengujian dilakukan sebanyak sepuluh kali pada masing-masing jenis limbah botol plastik menggunakan spesimen yang berbeda sehingga diperoleh sebanyak lima puluh data gaya tekan maksimum yang selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis statistik.

E. Metode Analisis

Data hasil pengujian gaya tekan maksimum dari setiap jenis limbah botol plastik dianalisis secara bertahap untuk memperoleh karakteristik data serta mengetahui pengaruh jenis botol terhadap gaya tekan maksimum. Tahapan analisis meliputi statistik deskriptif untuk menggambarkan karakteristik data, uji normalitas untuk mengevaluasi distribusi data, uji homogenitas untuk menguji kesamaan varians antar kelompok, serta uji hipotesis menggunakan analisis varians satu arah (*One-Way ANOVA*) untuk menentukan signifikansi perbedaan rata-rata gaya tekan maksimum antar jenis limbah botol plastik.

1) Statistik Deskriptif

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk memperoleh nilai rata-rata dan sebaran data. Nilai rata-rata (*mean*) dihitung menggunakan persamaan:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1)$$

Sedangkan standar deviasi dihitung menggunakan persamaan:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Menurut [11], [12], statistik deskriptif merupakan tahap awal dalam analisis eksperimen yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik data sebelum dilakukan analisis inferensial.

2) Uji Normalitas

Uji normalitas dilakukan menggunakan Shapiro–Wilk test untuk mengetahui distribusi data. Hipotesis yang digunakan adalah:

- H_0 : data berdistribusi normal
- H_1 : data tidak berdistribusi normal

Kriteria pengambilan keputusan adalah:

$p > 0,05 \Rightarrow$ data berdistribusi normal

$p \leq 0,05 \Rightarrow$ data tidak berdistribusi normal

Metode ini banyak digunakan dalam analisis data eksperimen karena memiliki sensitivitas tinggi untuk ukuran sampel kecil hingga menengah [13], [14].

3) Uji Homogenitas

Uji homogenitas varians dilakukan menggunakan Levene test untuk mengetahui kesamaan varians antar kelompok data. Hipotesis yang digunakan adalah:

- H_0 : varians antar kelompok homogen
- H_1 : varians tidak homogen

Kriteria pengambilan keputusan:

$p > 0,05 \Rightarrow$ varians homogen

$p \leq 0,05 \Rightarrow$ varians tidak homogen

Menurut [15], *Levene test* merupakan metode yang robust dan umum digunakan untuk menguji kesamaan varians antar kelompok pada penelitian eksperimen.

4) Uji Hipotesis (*One-Way ANOVA*)

Untuk mengetahui perbedaan rata-rata gaya tekan maksimum antar jenis limbah botol plastik digunakan analisis varians satu arah (*One-Way ANOVA*). Hipotesis yang digunakan adalah:

- H_0 : tidak terdapat perbedaan rata-rata gaya tekan maksimum antar jenis botol.
- H_1 : terdapat perbedaan rata-rata gaya tekan maksimum antar jenis botol.

Statistik uji ANOVA dinyatakan sebagai:

$$F = \frac{MS_{between}}{MS_{within}} \quad (3)$$

$$MS_{between} = \frac{SS_{between}}{k-1} \quad (4)$$

$$MS_{within} = \frac{SS_{within}}{N-k} \quad (5)$$

dengan:

- $SS_{between}$ = jumlah kuadrat antar kelompok (*sum of squares between groups*);
- SS_{within} = jumlah kuadrat dalam kelompok (*sum of squares within groups*);
- $MS_{between}$ = kuadrat tengah antar kelompok (*mean square between groups*);
- MS_{within} = kuadrat tengah dalam kelompok (*mean square within groups*);
- k = jumlah kelompok perlakuan;
- N = jumlah seluruh pengamatan.

Kriteria pengambilan keputusan adalah:

$$p < 0,05 \Rightarrow H_0 \text{ ditolak dan } H_1 \text{ diterima}$$

$$p \geq 0,05 \Rightarrow H_0 \text{ diterima dan } H_1 \text{ ditolak}$$

F. Penentuan Gaya Desain

Nilai gaya tekan maksimum yang diperoleh dari hasil pengujian digunakan sebagai dasar dalam menentukan gaya desain (*design load*) mesin *press* botol plastik. Penentuan gaya desain dilakukan dengan

mempertimbangkan nilai gaya tekan maksimum terbesar yang diperoleh dari seluruh jenis limbah botol plastik yang diuji. Untuk mengantisipasi variasi karakteristik limbah, ketidakpastian pembebanan, serta menjamin keamanan operasi mesin, gaya tekan maksimum dikalikan dengan faktor keamanan (*safety factor*) sehingga diperoleh gaya desain yang digunakan sebagai dasar perancangan sistem penekan [16].

$$F_d = SF \times F_{max} \quad (6)$$

dengan:

F_d = gaya desain (N);

F_{max} = gaya tekan maksimum hasil pengujian (N);

SF = faktor keamanan (*safety factor*) 1,5.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini menyajikan karakteristik gaya tekan maksimum dari lima jenis limbah botol plastik yang diperoleh melalui pengujian tekan statis menggunakan alat uji berbasis digital force gauge. Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis secara statistik untuk mengetahui karakteristik data serta pengaruh jenis limbah botol plastik terhadap gaya tekan maksimum.

A. Karakteristik Gaya Tekan Maksimum

Pengujian gaya tekan maksimum dilakukan terhadap lima jenis limbah botol plastik, yaitu gelas air mineral berbahan *Polypropylene* (PP) berkapasitas 220 mL, botol *Polyethylene Terephthalate* (PET) berkapasitas 330 mL, 600 mL, dan 1500 mL, serta botol oli berbahan *High Density Polyethylene* (HDPE). Setiap jenis botol diuji sebanyak sepuluh kali menggunakan alat uji tekan berbasis digital force gauge dengan pembebanan tekan statis hingga spesimen mengalami deformasi permanen. Nilai gaya tekan maksimum yang diperoleh dari setiap pengujian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Gaya Tekan Maksimum Berbagai Jenis Limbah Botol Plastik.

No.	Gelas PP 220 mL (N)	Botol PET 330 mL (N)	Botol PET 600 mL (N)	Botol PET 1500 mL (N)	Botol Oli HDPE (N)
1	34.0	63.5	142.6	246.8	683.2
2	31.4	61.2	122.3	300.8	657.7
3	34.6	64.7	125.8	259.7	644.8
4	38.1	53.9	107.9	236.7	636.5
5	31.1	54.9	118.5	278.1	583.5
6	31.1	60.7	126.3	233.1	617.6
7	38.3	58.4	111.2	264.6	629.3
8	35.1	65.1	129.5	216.9	697.6
9	30.1	59	117.8	230.8	665.5
10	34.2	56.4	121.5	264.3	570.7

Hasil pengujian pada Tabel 2 menunjukkan bahwa setiap jenis limbah botol plastik memiliki karakteristik gaya tekan maksimum yang berbeda. Gelas PP 220 mL menghasilkan gaya tekan maksimum paling rendah dengan kisaran 30,1–38,3 N, sedangkan botol oli HDPE memerlukan gaya tekan terbesar dengan kisaran 570,7–697,6 N. Botol PET menunjukkan kecenderungan peningkatan gaya tekan maksimum seiring bertambahnya kapasitas botol, yaitu berkisar 53,9–65,1 N pada botol PET 330 mL, 107,9–142,6 N pada botol PET 600 mL, dan 216,9–300,8 N pada botol PET 1500 mL

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan gaya tekan maksimum dipengaruhi oleh karakteristik struktur masing-masing botol. Secara umum, semakin besar dimensi dan kapasitas botol, semakin besar pula gaya yang diperlukan untuk menghasilkan deformasi permanen. Selain kapasitas, perbedaan jenis material dan bentuk geometri juga berkontribusi terhadap variasi gaya tekan maksimum. Botol oli berbahan HDPE membutuhkan gaya tekan paling besar karena memiliki ketebalan dinding yang lebih tinggi, bentuk geometri yang lebih kaku, serta dirancang untuk menahan beban mekanik yang lebih besar dibandingkan kemasan minuman berbahan PET maupun gelas PP. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa kekakuan struktur botol dipengaruhi oleh jenis material, ketebalan dinding, konfigurasi rib, dan geometri kemasan

sehingga setiap jenis botol memiliki respons mekanik yang berbeda terhadap pembebanan tekan [5], [7]–[10].

B. Analisis Statistik Gaya Tekan Maksimum

Analisis statistik dilakukan untuk menggambarkan karakteristik data hasil pengujian sekaligus menguji pengaruh jenis limbah botol plastik terhadap gaya tekan maksimum. Tahapan analisis meliputi statistik deskriptif, uji normalitas menggunakan metode *Shapiro–Wilk*, uji homogenitas varians menggunakan Levene test, dan uji hipotesis menggunakan *One-Way ANOVA*. Hasil analisis statistik digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi apakah perbedaan gaya tekan maksimum antar jenis limbah botol plastik terjadi secara signifikan.

1) Statistik Deskriptif

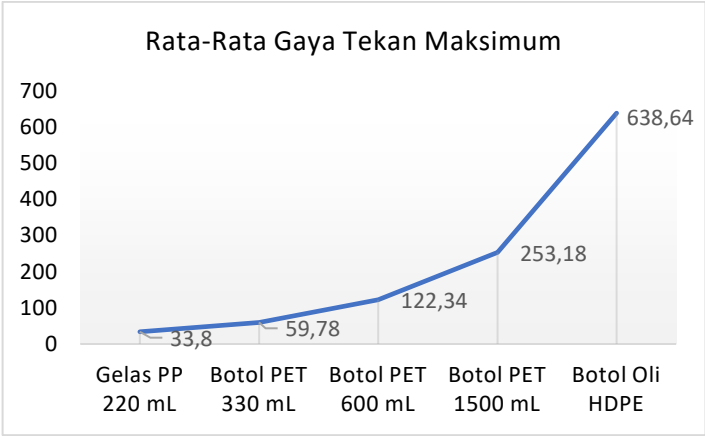
Statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik data hasil pengujian melalui nilai rata-rata (mean), standar deviasi, nilai minimum, dan nilai maksimum gaya tekan maksimum pada setiap jenis limbah botol plastik. Hasil perhitungan statistik deskriptif disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Statistik Deskriptif Gaya Tekan Maksimum Berbagai Jenis Limbah Botol Plastik

Jenis Botol	Jumlah Sampel (n)	Rata-rata (N)	Standar Deviasi (N)
Gelas PP 220 mL	10	33,80	2,88
Botol PET 330 mL	10	59,78	4,11
Botol PET 600 mL	10	122,34	9,72
Botol PET 1500 mL	10	253,18	26,79
Botol Oli HDPE	10	638,64	40,08

Tabel 3 menunjukkan bahwa rata-rata gaya tekan maksimum meningkat seiring perubahan jenis material dan geometri botol plastik. Gelas PP 220 mL memiliki rata-rata gaya tekan maksimum terendah sebesar $33,80 \pm 2,88$ N, sedangkan botol oli HDPE memiliki rata-rata tertinggi sebesar $638,64 \pm 40,08$ N. Nilai standar deviasi yang relatif kecil pada seluruh kelompok menunjukkan bahwa hasil pengujian memiliki tingkat penyebaran data yang rendah sehingga pengukuran dapat dianggap cukup konsisten.

Adapun trend data perbandingan rata-rata gaya tekan maksimum berbagai jenis limbah botol plastik ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan Rata-rata Gaya Tekan Maksimum Berbagai Jenis Limbah Botol Plastik

2) Uji Normalitas

Sebelum dilakukan analisis varians, data terlebih dahulu diuji normalitasnya menggunakan metode *Shapiro–Wilk* untuk mengetahui apakah distribusi data pada masing-masing kelompok mengikuti distribusi normal. Hasil uji normalitas disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji Normalitas

Jenis Botol	Shapiro–Wilk (W)	p-value	Kriteria Keputusan
Gelas PP 220 mL	0,907	0,263	Distribusi normal
Botol PET 330 mL	0,948	0,645	Distribusi Normal
Botol PET 600 mL	0,958	0,769	Distribusi Normal
Botol PET 1500 mL	0,967	0,860	Distribusi Normal
Botol Oli HDPE	0,970	0,887	Distribusi Normal

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh kelompok data memiliki nilai p-value lebih besar dari 0,05. Dengan demikian, data gaya tekan maksimum pada masing-masing jenis limbah botol plastik berdistribusi normal sehingga memenuhi salah satu asumsi dasar untuk dilakukan analisis menggunakan *One-Way ANOVA*.

3) Uji Homogenitas

Uji homogenitas varians dilakukan menggunakan *Levene test* untuk mengetahui kesamaan varians antar kelompok data. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji Homogenitas Varians (*Levene Test*)

Statistik Levene	p-value	Keterangan
9,928	0,000008	Varians tidak homogen

Hasil uji homogenitas menggunakan *Levene test* menunjukkan nilai p-value < 0,05, sehingga hipotesis nol ditolak. Hal ini menunjukkan bahwa varians gaya tekan maksimum antar kelompok tidak homogen. Perbedaan varians ini dapat dipengaruhi oleh variasi karakteristik material, kapasitas, dan geometri masing-masing jenis botol plastik yang menghasilkan rentang gaya tekan yang berbeda.

4) Uji Hipotesis (*One-Way ANOVA*)

Perbedaan rata-rata gaya tekan maksimum antar jenis limbah botol plastik dianalisis menggunakan *One-Way ANOVA*, nilai tersebut memenuhi hubungan:

$$MS_{between} = \frac{2.462.267,44}{4} = 615.566,86$$
$$MS_{within} = \frac{21.568,08}{45} = 479,29$$

sehingga

$$F = \frac{615.566,86}{479,29} = 1284,33$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh analisis varians sebagaimana disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Analisis Varians Satu Arah (*One-Way ANOVA*)

Sumber Keragaman	SS	db	MS	F _{hitung}	p-value
Antar Kelompok (<i>Between Groups</i>)	2.462.267,44	4	615.566,86	1,284,33	<0,001
Dalam Kelompok (<i>Within Groups</i>)	21.568,08	45	479,29		
Total	2.483.835,52	49			

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai F_{hitung} sebesar 1284,33 dengan p -value kurang dari 0,001. Nilai tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang sangat signifikan pada rata-rata gaya tekan maksimum antar jenis limbah botol plastik. Dengan demikian, hipotesis nol (H_0) ditolak dan hipotesis alternatif (H_1) diterima. Hasil ini mengindikasikan bahwa perbedaan jenis material, kapasitas, dan geometri botol memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kebutuhan gaya tekan maksimum.

C. Implikasi Hasil terhadap Perancangan Mesin Press Botol Plastik

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa setiap jenis limbah botol plastik memiliki kebutuhan gaya tekan maksimum yang berbeda secara signifikan. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh kombinasi karakteristik material, kapasitas, ketebalan dinding, dan geometri botol. Oleh karena itu, penentuan kapasitas mesin press tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan ukuran botol, tetapi harus mempertimbangkan gaya tekan maksimum yang dibutuhkan untuk menghasilkan deformasi permanen pada jenis limbah yang akan diproses.

Berdasarkan hasil pengujian, botol oli berbahan HDPE memerlukan gaya tekan maksimum tertinggi dengan nilai rata-rata sebesar 638,64 N, sedangkan gelas air mineral berbahan PP memerlukan gaya tekan terendah sebesar 33,80 N. Sementara itu, botol berbahan PET menunjukkan peningkatan kebutuhan gaya tekan seiring bertambahnya kapasitas botol, yaitu 59,78 N pada botol PET 330 mL, 122,34 N pada botol PET 600 mL, dan 253,18 N pada botol PET 1500 mL. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar kapasitas dan semakin kaku struktur botol, semakin besar gaya yang diperlukan untuk menghasilkan deformasi permanen.

Dalam perancangan mesin press, kapasitas sistem penekan harus dirancang berdasarkan kondisi pembebanan terbesar agar mesin mampu memproses seluruh jenis limbah botol plastik yang menjadi objek penelitian. Oleh karena itu, gaya tekan maksimum hasil pengujian dijadikan sebagai dasar penentuan gaya desain (*design load*) dengan menerapkan faktor keamanan (*safety factor*) sebesar 1,5, sebagaimana dijelaskan pada bagian metode penelitian.

Berdasarkan nilai rata-rata gaya tekan maksimum botol oli HDPE sebesar 638,64 N, menggunakan Persamaan (6) diperoleh gaya desain (F_d) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} F_d &= 1,5 \times 638,64 \\ &= 957,96 \text{ N} \end{aligned}$$

Nilai tersebut merupakan gaya minimum yang harus mampu dihasilkan oleh mekanisme penekan agar seluruh jenis limbah botol plastik dapat dipadatkan dengan aman. Oleh karena itu, kapasitas aktuator, mekanisme transmisi, poros, rangka, serta komponen struktural lainnya sebaiknya dirancang untuk mampu menghasilkan gaya tekan sekurang-kurangnya 958 N.

Selain sebagai dasar penentuan kapasitas sistem penekan, data karakterisasi gaya tekan maksimum juga dapat digunakan dalam proses pemilihan motor penggerak dan mekanisme transmisi. Informasi mengenai besarnya gaya desain memungkinkan perancang menentukan kebutuhan torsi, rasio reduksi transmisi, dimensi elemen mesin, serta kapasitas bantalan secara lebih rasional dibandingkan menggunakan pendekatan empiris. Dengan demikian, mesin press yang dirancang diharapkan memiliki kapasitas yang sesuai dengan karakteristik mekanik limbah botol plastik yang diproses, sehingga mampu meningkatkan efisiensi proses pemadatan tanpa menghasilkan dimensi maupun kapasitas mesin yang berlebihan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengkarakterisasi gaya tekan maksimum lima jenis limbah botol plastik melalui pengujian eksperimental menggunakan alat uji tekan berbasis *digital force gauge*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata gaya tekan maksimum berturut-turut sebesar 33,80 N untuk gelas PP 220 mL, 59,78 N untuk botol PET 330 mL, 122,34 N untuk botol PET 600 mL, 253,18 N untuk botol PET 1500 mL, dan 638,64 N untuk botol oli berbahan HDPE.

Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa data memenuhi asumsi normalitas dan terdapat perbedaan yang signifikan pada rata-rata gaya tekan maksimum antar jenis limbah botol plastik ($p < 0,05$). Perbedaan tersebut

dipengaruhi oleh karakteristik material, kapasitas, dan geometri botol sehingga setiap jenis limbah memerlukan gaya tekan yang berbeda untuk menghasilkan deformasi permanen.

Berdasarkan hasil karakterisasi, botol oli berbahan HDPE memiliki kebutuhan gaya tekan terbesar sehingga digunakan sebagai acuan dalam penentuan gaya desain mesin press. Dengan menerapkan faktor keamanan sebesar 1,5, diperoleh gaya desain sebesar 957,96 N. Nilai tersebut dapat dijadikan sebagai parameter awal dalam menentukan kapasitas sistem penekan, mekanisme transmisi, motor penggerak, serta dimensi komponen struktural pada perancangan mesin press botol plastik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Sekolah Tinggi Teknologi Nasional (STITKENAS) Jambi, khususnya Laboratorium Teknik Mesin Program Studi Teknik Mesin, atas dukungan fasilitas laboratorium dan peralatan penelitian yang digunakan selama pelaksanaan pengujian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada dosen, laboran, dan rekan-rekan mahasiswa yang telah membantu dalam proses persiapan spesimen, pelaksanaan pengujian, pengambilan data, serta penyusunan naskah sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Nistico, "Polyethylene Terephthalate (PET) in the Packaging Industry," *Polymer Testing*, vol. 90, 2020.
- [2] K. M. Bataineh, "Life Cycle Assessment of Recycling Post-Consumer High-Density Polyethylene and Polyethylene Terephthalate," *Advances in Civil Engineering*, 2020.
- [3] G. Fitriyano and D. A. Rahim, "Tinjauan Potensi Pemanfaatan Botol Bekas Berbahan Polyethylene Terephthalate (PET) di Indonesia," *Eksergi*, vol. 16, no. 1, pp. 18–24, Jul. 2019, doi: 10.31315/e.v16i1.2747
- [4] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, *Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN)*, Jakarta, 2024.
- [5] Y. Wang, X. Zhang, and Y. Liu, "Advances in Polyethylene Terephthalate Beverage Bottle Optimization: A Mini Review," *Polymers*, vol. 14, no. 16, 2022.
- [6] K. Thongkaew and T. Naemsai, "Mechanical Properties and Cost-Minimized Design of 6-Liter PET Bottle Using Finite Element Method," *Walailak Journal of Science and Technology*, vol. 17, no. 6, 2020.
- [7] D. Karalekas, D. Rapti, and G. Papakaliatakis, "Numerical and Experimental Investigation of the Deformational Behaviour of Plastic Containers," *Packaging Technology and Science*.
- [8] R. van Dijk, J. C. Sterk, and F. van Keulen, "Lateral Deformation of Plastic Bottles: Experiments, Simulations and Prevention," *Packaging Technology and Science*.
- [9] L. Lapcik et al., "Study of the Material Engineering Properties of High-Density Polyethylene/Perlite Nanocomposite Materials," *Nanotechnology Reviews*, vol. 9, no. 1, 2020.
- [10] A. S. Farshidi, M. R. Ayatollahi, and M. M. Hashemi, "Experimental and Numerical Investigation of Buckling Behavior of Thin-Walled PET Bottles under Axial Compression," *Thin-Walled Structures*, vol. 181, 2022.
- [11] Montgomery, D. C., *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed. John Wiley & Sons, 2019.
- [12] Kim, T. K., "Understanding One-Way ANOVA Using Conceptual Figures," *Korean Journal of Anesthesiology*, vol. 70, no. 1, pp. 22–26, 2017.
- [13] Razali, N. M., and Y. B. Wah, "Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests," *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, vol. 2, no. 1, pp. 21–33, 2011.
- [14] Ghasemi, A., and S. Zahediasl, "Normality Tests for Statistical Analysis: A Guide for Non-Statisticians," *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, vol. 10, no. 2, pp. 486–489, 2012.
- [15] Gastwirth, J. L., Y. R. Gel, and W. Miao, "The Impact of Levene's Test of Equality of Variances on Statistical

Theory and Practice," Statistical Science, vol. 24, no. 3, pp. 343–360, 2009.

- [16] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, Shigley's Mechanical Engineering Design, 11th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2020