

PERANCANGAN ALAT PENCEKAM UNTUK PEMESINAN POLYURETHANE FOAM PADA PROSES FACE MILL CUTTING MESIN CNC ROUTER 3 AXIS DENGAN METODE VDI 2221

Archi Kun Cahyo Utomo ¹⁾, Ubaidillah ¹⁾ ✉, Wijang Wisnu Raharjo ¹⁾, Fitriani Imaduddin ³⁾, Dikky Kusuma Wijaya ²⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik

Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir Sutami No.36, Kec. Jebres, Kota
Surakarta, Jawa Tengah 57126
archikuncahyo@gmail.com
ubaidillah_ft@staff.uns.ac.id
m_asyain@staff.uns.ac.id
fitriani@ft.uns.ac.id

²⁾ Program Studi Teknik Mesin Industri
Politeknik ATMI Surakarta
Jl. Mojo No.1, Karangasem, Kec. Laweyan,
Kota Surakarta, Jawa Tengah 57145
dikky.kusuma@atmi.ac.id

³⁾ Department of Mechanical Engineering
Islamic University of Madinah
Medina, 42351, Saudi Arabia

Abstract

Due to the highly brittle structure of polyurethane (PU) foam, a specialized clamping mechanism is required to consider the material's strength and hardness to avoid damaging the workpiece and to withstand the cutting forces during milling and machining. Using a polymer as an alternative for creating clamping tools with characteristics similar to PU foam offers a promising solution. The slightly harder polymer material is expected to address the need for a gripping tool that will not harm the PU foam upon application. The VDI 2221 method, a structured approach to the design and coordination of evolving design techniques, is employed in this study. The advantage of this methodology lies in its ability to adapt continuously through research. A comparative analysis of two design models produced via 3D printing reveals that Design 5 exhibits superior strength under increased stress. Moreover, Design 5 is more effective in gripping the workpiece, as a single gripper can withstand cutting forces from two directions simultaneously, reducing material deformation. This advancement is expected to minimize the risk of material damage during the machining process. This research's novelty lies in applying an optimized polymer clamping device for PU foam, ensuring improved performance and reduced damage during machining.

Keywords: Polyurethane Foam, Clamping Device, VDI 2221, 3D Printing

1. PENDAHULUAN

Busa *polyurethane* (PU) memiliki beragam aplikasi karena fleksibilitasnya, terutama dalam industri manufaktur, otomotif, dan medis. Namun, struktur yang rapuh dari busa PU menimbulkan tantangan signifikan dalam proses pemesinan, terutama saat digunakan dengan perangkat pengekam. Sistem pengekam tradisional sering gagal untuk mengamankan benda kerja busa PU tanpa menyebabkan kerusakan atau deformasi material selama proses seperti freis dan pemotongan. Sebagai solusi, terdapat minat yang terus berkembang dalam mengembangkan alat pengekam alternatif menggunakan material canggih seperti elastomer termoplastik dan polimer.

Penelitian terkini telah mengeksplorasi berbagai cara untuk mengoptimalkan perangkat pengekam untuk busa PU. Sebagai contoh, Guerrero-Vacas *et al.* (2024) mengusulkan penggunaan cetakan *thermoplastic* yang diproduksi dengan teknologi pencetakan 3D untuk

Corresponding Author:

✉ Ubaidillah

Received on: 2024-01-29

Revised on: 2024-12-25

Accepted on: 2024-12-25

prototyping cepat produk berbahan busa PU, yang menawarkan alternatif lebih murah dan lebih cepat dibandingkan cetakan logam tradisional. Pendekatan mereka menekankan peran *fused filament fabrication* (FFF) dalam meningkatkan proses pencetakan, yang sangat penting untuk aplikasi dalam industri otomotif dan perangkat medis ^[1].

Demikian pula, Natali *et al.* (2024) mempelajari penggunaan elastomer termoplastik poliuretan (TPU) yang dicetak dengan 3D, untuk meniru perilaku mekanik busa PU. Temuan mereka menunjukkan bahwa sifat mekanik TPU dapat dimodulasi melalui penggunaan berbagai parameter pencetakan, yang menunjukkan potensi material ini sebagai alternatif untuk perangkat penekam. Penggunaan TPU tidak hanya meniru perilaku busa PU tetapi juga memberikan manfaat tambahan berupa kemampuan daur ulang ^[2].

Penggunaan teknologi pencetakan 3D dalam pengembangan perangkat medis seperti orthosis kaki dan *scaffold* juga semakin banyak diperhatikan dalam beberapa tahun terakhir. Sebagai contoh, Iacob *et al.* (2023) mengevaluasi kinerja *fatigue* lentur dari orthosis kaki berbahan TPU yang dicetak dengan 3D, dan menemukan bahwa TPU memberikan daya tahan jangka panjang tanpa kegagalan material yang signifikan, bahkan setelah penggunaan yang ekstensif ^[3].

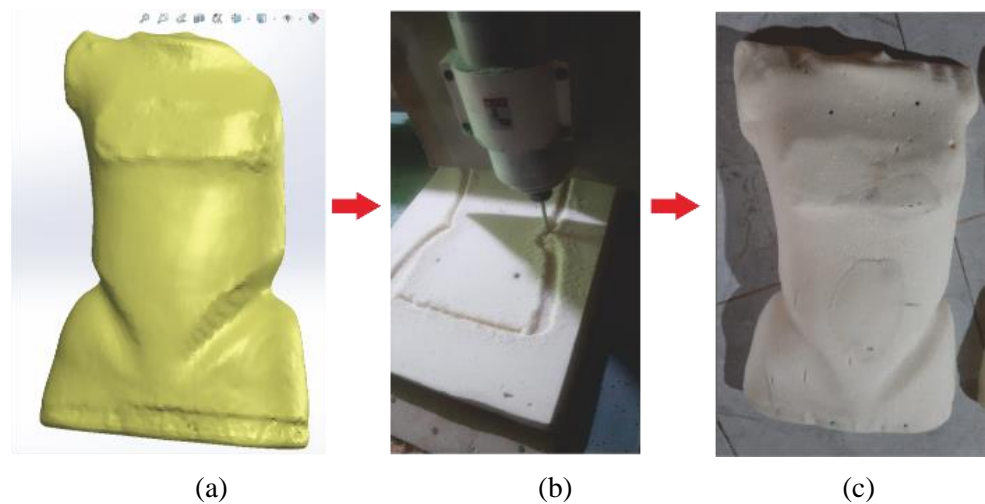
Kebaruan dari penelitian ini terletak pada integrasi metodologi desain VDI 2221 untuk mengembangkan perangkat penekam yang dioptimalkan untuk busa PU menggunakan material polimer yang dicetak dengan 3D. Dengan menerapkan pendekatan desain yang terstruktur ini, penelitian ini bertujuan untuk mengatasi keterbatasan sistem penekam tradisional dan menawarkan solusi yang meminimalkan kerusakan material serta meningkatkan kekuatan penekaman. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang fokus pada sifat mekanik material, penelitian ini mengintegrasikan inovasi desain dengan pemilihan material untuk mengatasi tantangan unik yang dihadapi dalam pemesinan busa PU.

Secara khusus, penggunaan material polimer yang sedikit lebih keras, dikombinasikan dengan proses desain VDI 2221, merupakan kontribusi baru yang signifikan dalam bidang ini. Analisis komparatif terhadap dua desain perangkat penekam yang dicetak dengan 3D menunjukkan pengurangan deformasi yang signifikan dan kemampuan penekaman yang lebih efektif. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kinerja perangkat penekam tetapi juga berkontribusi pada kemajuan proses manufaktur yang lebih berkelanjutan dan efisien dalam industri pemesinan busa.

Kemajuan teknologi membuat industri manufaktur semakin maju dan canggih. Sejalan dengan perkembangan teknologi, industri manufaktur mulai membutuhkan produk-produk yang bermutu dan berkualitas tinggi sehingga dibutuhkan teknik-teknik pemrosesan yang terus menerus dikembangkan terutama untuk produk-produk dengan tujuan khusus seperti busa PU. Proses pemesinan busa PU biasanya ditujukan untuk produk-produk yang tidak diproduksi secara massal dan hanya diproduksi dengan bentuk dan tujuan tertentu, misalnya untuk cetakan proses *thermoforming*, pembuatan patung-patung khusus, atau isolator dengan bentuk dan ukuran khusus ^[4]. Produk dengan dimensi dan bentuk khusus seringkali membutuhkan penekaman yang khusus juga untuk menghindari distorsi bahkan kecacatan yang mungkin terjadi pada saat proses pemesinan ^[5].

Pada proses industri manufaktur, mesin milling sering digunakan untuk menghasilkan komponen dengan tingkat kepresisian yang tinggi dan kompleksitas geometri yang beragam^[6]. Salah satu faktor kunci yang memengaruhi keberhasilan proses milling adalah penekaman yang tepat pada benda kerja. Penekaman yang tepat dalam proses pemesinan milling diperlukan dalam mencapai presisi yang tinggi. Dengan mengamankan benda kerja dengan stabil, gaya pemakanan dan gaya potong dapat diterapkan dengan akurat, menghasilkan permukaan yang halus dan dimensi yang sesuai dengan spesifikasi. Penekaman yang buruk dapat mengakibatkan pergeseran benda kerja, getaran, atau

deformasi, yang dapat mengurangi tingkat kepresisian atau bahkan menghasilkan produk yang cacat ^[7].



Gambar 1. Model CAD 3-D yang Digunakan Dalam Produksi Produk Busa PU.

Terdapat beberapa teknik pengekaman yang digunakan dalam mesin *milling*. Salah satu metode yang populer adalah pengekaman mekanis menggunakan klem atau sekrup untuk mengunci benda kerja pada meja mesin. Teknik ini relatif sederhana dan efektif untuk benda kerja yang memiliki permukaan datar atau sederhana ^[8]. Namun, untuk benda kerja dengan kompleksitas geometri yang tinggi, teknik pengekaman mekanis mungkin tidak memadai. Teknik pengekaman hidrolik untuk mengunci benda kerja, memberikan kekuatan pengekaman yang lebih merata dan stabil. Pengekaman hidrolik sering digunakan pada mesin *milling* dengan benda kerja berat dan besar, di mana diperlukan daya tahan yang tinggi dan pengekaman yang kuat ^[9]. Teknik pengekaman vakum juga menjadi pilihan yang populer, terutama untuk benda kerja dengan permukaan yang rata. Teknik ini melibatkan penggunaan tekanan negatif untuk memegang benda kerja pada meja mesin menggunakan daya hisap. Pengekaman vakum memiliki keuntungan dalam memungkinkan akses yang lebih baik ke permukaan benda kerja dan meminimalkan deformasi pada benda kerja ^[10].

Pemilihan teknik pengekaman yang tepat harus mempertimbangkan beberapa faktor. Salah satunya adalah jenis material benda kerja. Bahan yang lebih rapuh atau mudah terdeformasi mungkin memerlukan pendekatan pengekaman yang berbeda untuk menghindari kerusakan. Selain itu, ukuran, bentuk, dan kompleksitas geometri benda kerja juga harus dipertimbangkan, serta kebutuhan presisi dan stabilitas yang diperlukan. Pengekaman yang tepat pada mesin *milling* memiliki dampak yang signifikan terhadap kualitas dan kepresisian produk yang dihasilkan. Dalam memilih teknik pengekaman yang tepat, perlu mempertimbangkan berbagai faktor seperti jenis benda kerja, kompleksitas geometri, dan tingkat kepresisian yang dibutuhkan. Dengan memperhatikan pengekaman yang baik, proses manufaktur dapat mencapai hasil yang presisi, stabilitas dimensi yang tinggi, dan meningkatkan efisiensi produksi secara keseluruhan ^[9].

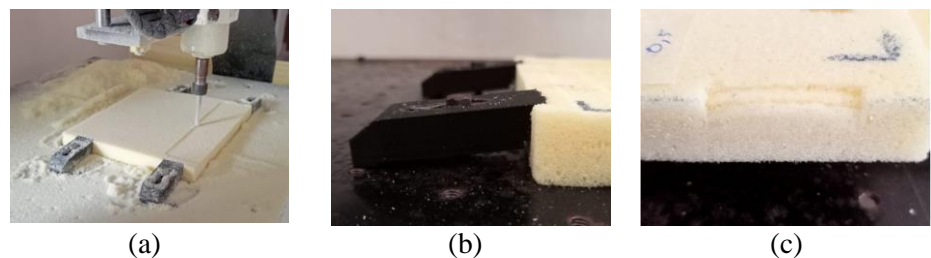
Deformasi selama proses pemesinan tetap menjadi tantangan utama yang diselidiki oleh banyak peneliti. Brinksmeier dan Sölter ^[5] pada tahun 2009 telah melakukan analisis literatur terkait beberapa hal yang menjadi penyebab utama penyimpangan geometris produk selama pemesinan antara lain: Kecepatan pemotongan material yang tidak seragam yang diakibatkan oleh perbedaan gaya statis, dinamis, dan gaya eksternal saat proses pemotongan ^[11], regangan

akibat panas yang dihasilkan selama proses pemotongan ^[12], transformasi fasa material akibat perubahan temperatur dan gaya proses yang mengubah kerapatan material ^[13], dan tegangan sisa yang terjadi akibat pembentukan lapisan bawah permukaan material yang terdeformasi secara plastis ^[11]. Terkhusus untuk proses pemesinan busa PU dimana biasanya ditujukan untuk produk-produk yang tidak diproduksi secara massal dan hanya diproduksi dengan bentuk dan tujuan tertentu serta dengan bentuk dan ukuran khusus ^[14].

Faktor-faktor yang disebutkan sebelumnya perlu diperhatikan untuk sebagai pertimbangan pemilihan pengecaman pada proses pemotongan material busa PU pada pemesinan *milling*. Busa PU termasuk polimer dengan struktur yang sangat rapuh ^[15], sehingga memerlukan jenis pengecaman khusus dengan mempertimbangkan kekuatan dan kekerasan bahan pembuat alat pengecam agar tidak merusak material benda kerja yang akan diproses namun mampu menahan gaya potong yang terjadi. Polimer bisa menjadi salah satu pilihan yang bisa dipilih untuk pembuatan alat pengecaman yang sesuai dengan karakter busa PU. Selisih kekerasan antara busa PU dengan material polimer yang akan digunakan untuk pengecaman yang tidak terlalu jauh, diharapkan mampu menjawab kebutuhan akan alat pengecam yang tidak menimbulkan kerusakan saat diaplikasikan pada busa PU.

Penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai kajian secara teoritis dan praktis bagi pihak-pihak yang mengembangkan teknik pemesinan untuk membuat produk khusus dengan material busa PU antara lain: untuk menentukan rancangan alat pengecaman yang sesuai dengan karakteristik material serta proses pemesinan busa PU berdasarkan analisis teori, untuk menganalisa alat pengecaman yang sesuai dengan karakteristik material serta proses pemesinan busa PU berdasarkan efektifitas serta kegunaannya dan untuk membuat purwarupa alat pengecaman yang sesuai dengan pendekatan manufaktur aditif.

Masalah utama untuk pemesinan produk yang berasal dari material yang relatif lunak adalah kemungkinan bahwa material yang diproses akan terdistorsi selama proses pemesinan ^[16]. Distorsi yang dihasilkan sudah cukup untuk mengklasifikasikan produk berada di luar toleransi. Kemungkinan pemborosan akibat waktu finishing tambahan yang dibutuhkan, maupun kemungkinan produk tidak masuk spesifikasi menjadi sangat tinggi ^[17]. Kesimpulannya adalah bahwa salah satu penyebab utama distorsi pada material polimer foam adalah fixture dan pengecaman produk pada saat proses pemesinan seperti ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. (a) Proses Pemesinan Milling (b) Metode Pengecaman yang Digunakan (c) Cacat Akibat Pengecaman.

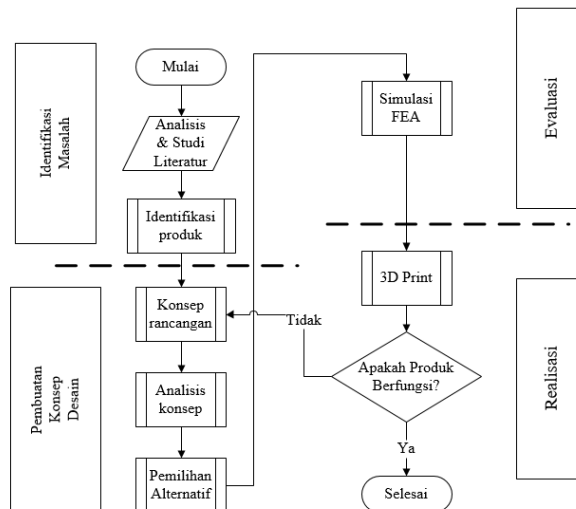
Gambar 2 (a) menunjukkan proses pemesinan dan pengecaman material busa PU. Terlihat pada pengecaman konvensional yaitu pengecaman dengan dengan bantuan baut pengencang (gambar 2 (b)), busa PU tertekan hanya di sebagian bagian sehingga menimbulkan cacat akibatnya seperti terlihat pada gambar 2 (c). Cacat pada produk seringkali menjadi masalah utama pada kualitas, sehingga diperlukan adanya pengembangan untuk meminimalisir atau bahkan menghilangkan resiko cacat yang disebabkan karena pengecaman.

2. METODE DAN BAHAN

Sebuah produk yang bertujuan mengatasi masalah-masalah yang timbul akibat pengekaman kemudian dirancang agar dapat memenuhi toleransi produk yang ditentukan. Perancangan ulang alat pencekam dengan berbagai pertimbangan untuk memfasilitasi kemungkinan masalah yang timbul. Beberapa model alat cekam yang diadopsi dari produk alat pencekaman standar di pasaran akan ditinjau kelebihan, kekurangan, maupun kesesuaiannya. Metode perancangan yang digunakan adalah dengan pendekatan studi literatur metode *Verein Deutsche Ingenieuer* (VDI) 2221. VDI 2221 adalah sebuah metode pendekatan sistematis terhadap desain untuk merumuskan dan mengarahkan berbagai macam metode desain yang makin berkembang akibat kegiatan riset^[18]. Metode ini sering digunakan oleh insinyur-insinyur Jerman untuk menjabarkan sebuah ide yang dimiliki untuk menyelesaikan suatu permasalahan.

Penjabaran ide tersebut menjadi sebuah desain yang dibutuhkan dalam suatu permasalahan dan dapat menghasilkan sebuah karya yang riil dan dapat dipertanggung jawabkan secara ilmiah. Tahapan dalam metode VDI 2221 adalah mengidentifikasi masalah yang terjadi dengan cara menyusun beberapa permasalahan yang mungkin timbul pada proses pengekaman busa PU. Setelah daftar tuntutan tersusun, dilanjutkan dengan pembuatan konsep perancangan disesuaikan dengan masalah yang terjadi melalui tahapan pembuatan tuntutan kebutuhan perancangan, pemilihan jenis umum, dan identifikasi prinsip-prinsip alat pencekam. Pembuatan konsep perancangan dilanjutkan dengan perancangan pre-desain dengan pertimbangan penentuan dimensi menggunakan data kebutuhan, menilai pre-desain dengan menambahkan kekuatan bahan yang diperlukan agar rancangan dapat menahan beban pengekaman yang mungkin terjadi.

Dari hasil pre-desain yang telah dibuat dengan mempertimbangkan dimensi dengan menggunakan perhitungan kekuatan beban, dilakukan evaluasi untuk mengetahui pre-desain perlu dilakukan perbaikan atau tidak. Tahapan terakhir adalah evaluasi hasil rancangan. Setelah melalui tahapan VDI 2221 dilakukan analisis kondisi sebelum menggunakan rancangan dan setelah menggunakan rancangan yang telah disempurnakan. Analisis yang dilakukan selanjutnya diharapkan mampu memberikan jawaban untuk menjawab kebutuhan alat pengekaman yang sesuai dengan material busa PU.



Gambar 3. Flow Chart Proyek Pembuatan Alat Pengekaman.

Metode VDI 2221 tetap digunakan dalam penelitian ini karena pendekatannya yang sistematis dalam perancangan produk. Tahapan-tahapan VDI 2221 adalah:

1. Identifikasi masalah dan kebutuhan pengekaman untuk material busa PU.
2. Pembuatan konsep desain sesuai kebutuhan pengekaman.
3. Evaluasi desain menggunakan simulasi elemen hingga (FEA) dan pengujian aktual.
4. Realisasi desain melalui proses manufaktur aditif menggunakan 3D printer.

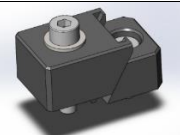

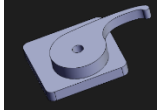

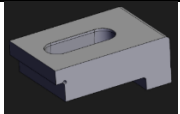

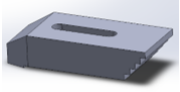

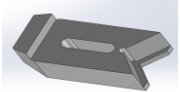
Sedangkan untuk memastikan keakuratan data, dilakukan kalibrasi dan validasi metode yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Kalibrasi Mesin CNC Router 3-Axis
Proses kalibrasi dilakukan menggunakan alat ukur dial indicator untuk memastikan posisi sumbu X, Y, dan Z tepat dengan toleransi ± 0.01 mm. Pengujian akurasi feed rate dilakukan dengan pengukuran ulang jarak tempuh spindle pada sumbu yang berbeda.
2. Kalibrasi Mesin 3D Printer Ender 3 Pro
Suhu *nozzle* dikalibrasi menggunakan thermocouple untuk memastikan suhu sesuai pengaturan (260°C). Proses cetak diuji dengan geometri kalibrasi seperti 20 mm calibration cube untuk memeriksa dimensi hasil cetakan.
3. Validasi Perangkat Lunak Simulasi (*SolidWorks* 2015)
Hasil simulasi gaya dan deformasi dibandingkan dengan pengujian nyata menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) sesuai standar ASTM D790.

3. HASIL DAN DISKUSI

Analisis memainkan peran penting selama desain produk serta berkontribusi tinggi dalam pengoptimalan produk sambil mengurangi biaya dan waktu desain. Untuk aplikasi analisis, adaptasi geometri produk diperlukan dan terdiri dari menghasilkan model ideal dari sebuah produk [19]. Terdapat beberapa usulan konsep desain yang akan dipertimbangkan dan dikembangkan selanjutnya dengan melalui beberapa pertimbangan. Beberapa rancangan yang akan dipertimbangkan secara lebih lanjut ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rancangan Alat Pengekaman untuk Proses Pemesinan *Milling*

Nomor	Model	Keterangan
Desain 1		Diadaptasi dari merk leave industrial free jaw vice CP11 [20] 
Desain 2		Diadaptasi dari merk elesa+ganter GN 918 [21] 
Desain 3		Diadaptasi dari merk TE-CO Workholding step clamp [22] 
Desain 4		Diadaptasi dari merk vertex step clamp [23] 
Desain 5		Usulan modifikasi desain untuk meminimalkan kecacatan produk

Tabel 1 menyajikan beberapa model yang akan dibandingkan dengan beberapa kriteria antara lain penjaminan akan kebutuhan, pemenuhan secara kebutuhan, pemenuhan prinsip

fungsional, kemudahan pemasangan, pemenuhan faktor keamanan, serta pemilihan perancangan. *Matrix* morfologi dibuat untuk mengerucutkan pemilihan model menjadi 2 kemungkinan. *Matrix* morfologi menyediakan cara mudah untuk membuat modifikasi model desain dengan menanalisa parameterisasi fitur dan proses rekonstruksi, dimana keduanya memungkinkan perancang membuat model *solid* berdasarkan model ideal, dengan menggunakan analisis rekonstruksi berparameter [24].

Desain yang dipilih melalui *matrix* morfologi adalah desain 4 dan desain 5, untuk kemudian akan ditinjau dengan analisa pembebanan dengan metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak *Solid Works* 2015. Desain dengan kesesuaian pembebanan pengecaman selanjutnya akan dibuat purwarupanya dengan prinsip manufaktur additif serta diproduksi dengan mesin 3D *printer* Ender 3 Pro untuk kemudian diuji kemampuan menghilangkan cacat pada saat pengecaman busa PU.

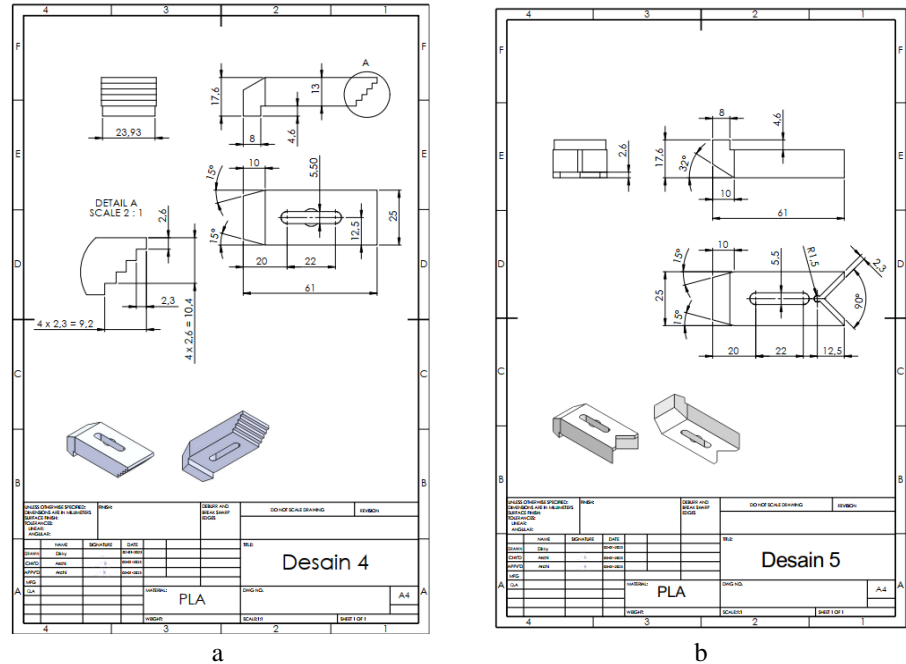
Tabel 2. *Matrix* Morfologi Desain

Mekanisme Pengecaman Busa PU											
Solusi Alternatif	Peringkat	Kriteria Pemilihan				Keputusan				Keputusan	
		(+) ya				(+) ya					
		(?) kurang informasi				(?) kurang informasi					
		(-) tidak				(-) tidak					
		(!) periksa daftar kebutuhan				(!) periksa daftar kebutuhan					
		Memenuhi fungsi sebagai alat pengecam									Keterangan
		Mudah dibuat dengan metode manufaktur additif									
		Potensi meninggalkan cacat bekas cekaman									
Terdapat tekanan vertikal ke arah permukaan atas benda kerja											
Terdapat tekanan aksial ke arah sisi samping benda kerja											
Kemampuan untuk memposisikan benda kerja											
Keterangan											
A	B	C	D	E	F						
Desain 1	5	+	-	-	-	+	-	Tekanan pengecaman mengarah kedalam benda. Tidak menimbulkan cacat bekas cekaman. Berpotensi menyebabkan benda melengkung ke atas, Ketika dikencangkan berpotensi menusuk material foam yang di dicekam.	-		
Desain 2	4	+	-	-	-	+	-	Tekanan mengarah ke dalam benda. Tidak menimbulkan cacat bekas cekaman. Berpotensi menyebabkan benda melengkung ke atas.	-		
Desain 3	3	+	+	-	+	-	-	Pengecaman kuat. Tekanan mengarah ke bawah dan dalam benda. Menimbulkan cacat bekas cekaman. Berpotensi menyebabkan benda melengkung ke atas. Posisi alas yang tidak rata bisa menyebabkan pengecaman miring dan menusuk material foam ketika dipasang.	-		
Desain 4	2	+	+	+	+	+	-	Pengecaman sangat kuat. Tekanan mengarah ke bawah dan ke dalam benda. Menimbulkan cacat bekas cekaman. Berpotensi menyebabkan benda melengkung ke atas. Profil step pada pengecaman dapat menahan material foam dengan sangat kuat.	+		
Desain 5	1	+	+	+	+	+	+	Pengecaman kuat. Tekanan mengarah ke bawah. Tidak menimbulkan cacat bekas cekaman. Tidak menyebabkan benda melengkung.	+		

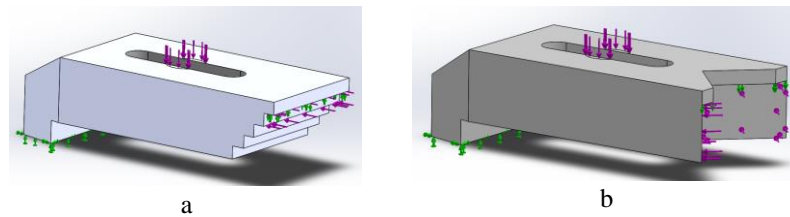
3.1. Pemodelan Metode Elemen Hingga

Model 3D dari dua rancangan alat pengecam terpilih dibuat sesuai dengan dimensi yang dibutuhkan oleh mesin *milling* CNC. Keseluruhan dimensi umum dibuat setara agar bisa dibandingkan melalui simulasi pembebanan dengan metode elemen hingga yang akan

dilakukan selanjutnya. Gambar 4 menunjukkan bentuk dan dimensi dari 2 model alat pengecam yang akan dianalisa dengan memanfaatkan perangkat lunak CAE Solid Works.



Gambar 4. Gambar Kerja Alat Pengecam yang Akan Dibuat Dengan FDM.



Gambar 5. Pemodelan Pembebanan yang Terjadi Pada Alat Pengecam.

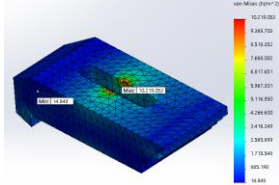
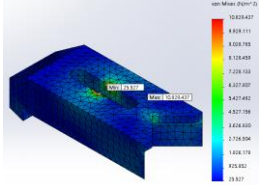
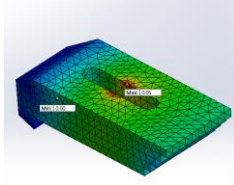
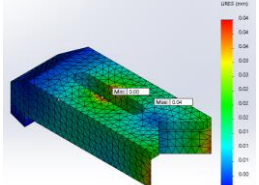
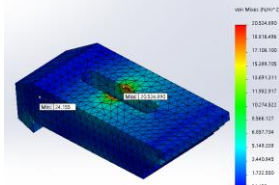
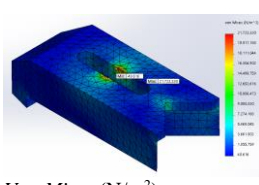
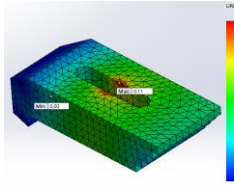
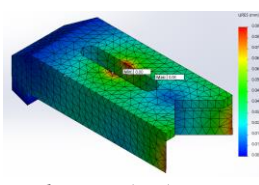
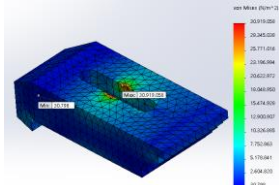
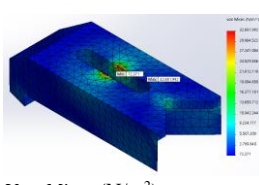
Analisis pembebanan kemudian dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Solid Works 2015 dengan menerapkan fixture dengan posisi yang tetap (digambarkan dengan panah berwarna hijau), interval yang digunakan 500 kali pembebanan, serta variasi gaya pembebanan 100, 200, 300, 400, serta 500N pada posisi yang tetap juga (panah berwarna ungu) seperti dijelaskan pada gambar 5.

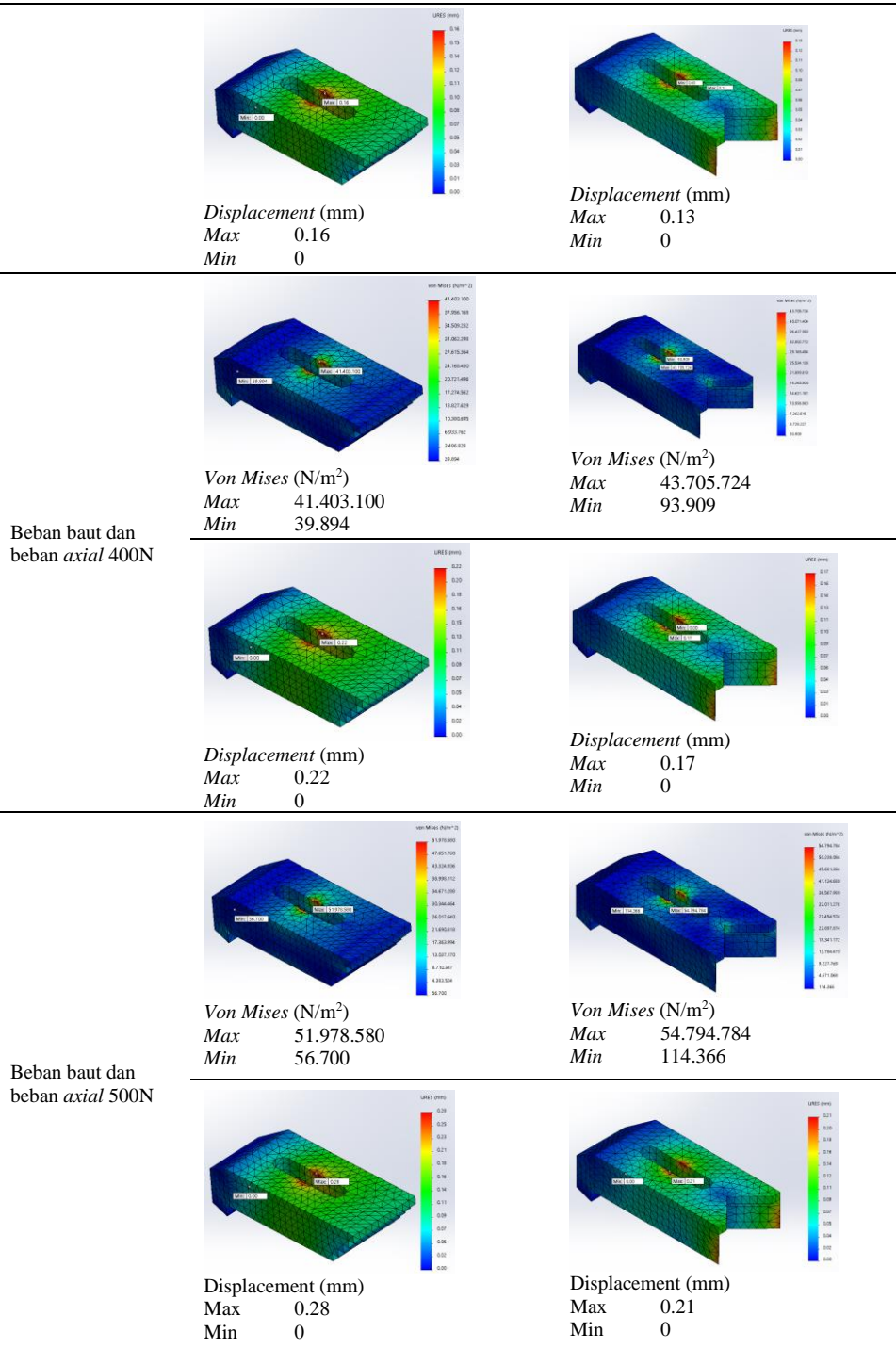
3.1.1. Pemodelan Metode Elemen Hingga

Simulasi pembebanan dilakukan dengan menempatkan gaya tekan baut pada arah vertikal alat pengecam, sedangkan gaya axial diterapkan horisontal searah dengan penggunaan alat pengecam pada saat proses pengecaman. Melalui analisis kegagalan Von Mises serta memperhitungkan deformasi yang terjadi pada benda kerja didapatkan data analisa seperti ditunjukkan pada tabel 3. Teori Von Mises merujuk pada beberapa konsep yang dikembangkan oleh ahli fisika dan insinyur Austria-Hungaria, Richard von Mises (1883-1953). Namun, istilah "teori Von Mises" sering kali lebih spesifik merujuk pada Teori Tegangan Mises, yang berkaitan dengan mekanika bahan dan kekuatan material [25]. Perhitungan yang digunakan ditunjukkan pada persamaan 1, dimana σ_1 , σ_2 , dan σ_3 adalah tegangan utama pada tiga arah ortogonal.

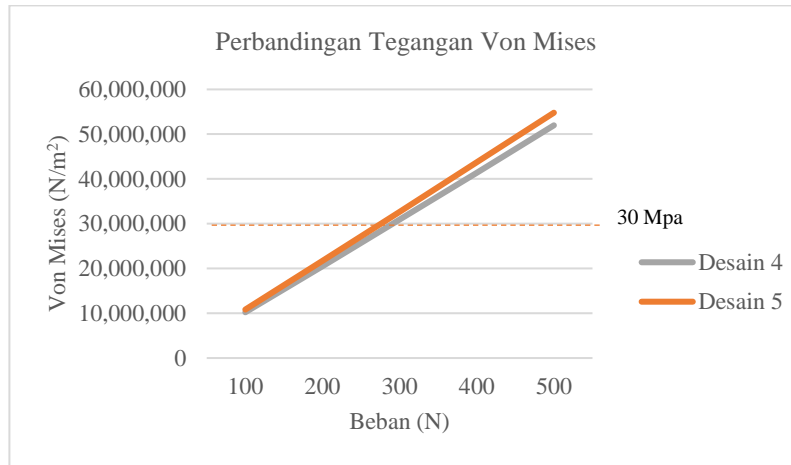
$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1)$$

Tabel 3. Hasil Simulasi Pembebanan

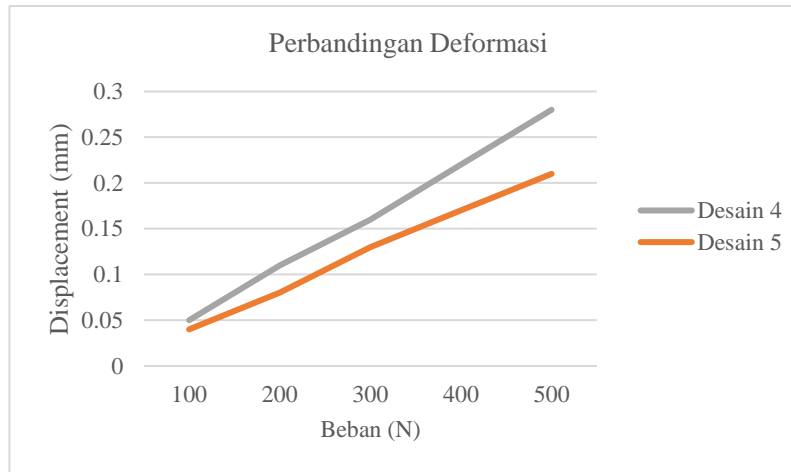
Pembebanan	Desain 4	Desain 5
Beban baut dan beban <i>axial</i> 100N	 <p><i>Von Mises</i> (N/m²) Max 10.219.053 Min 14.848</p>	 <p><i>Von Mises</i> (N/m²) Max 10.829.437 Min 25.527</p>
	 <p><i>Displacement</i> (mm) Max 0.05 Min 0</p>	 <p><i>Displacement</i> (mm) Max 0.04 Min 0</p>
Beban baut dan beban <i>axial</i> 200N	 <p><i>Von Mises</i> (N/m²) Max 20.524.890 Min 24.155</p>	 <p><i>Von Mises</i> (N/m²) Max 21.723.330 Min 49.616</p>
	 <p><i>Displacement</i> (mm) Max 0.11 Min 0</p>	 <p><i>Displacement</i> (mm) Max 0.08 Min 0</p>
Beban baut dan beban <i>axial</i> 300N	 <p><i>Von Mises</i> (N/m²) Max 30.919.058 Min 30.798</p>	 <p><i>Von Mises</i> (N/m²) Max 32.681.992 Min 72.371</p>



Dari analisis metode elemen hingga yang dilakukan, dapat dibuat grafik untuk membandingkan tegangan *von mises* serta dieformasi yang mungkin terjadi akibat variasi pembebanan yang diterapkan pada benda kerja. Grafik perbandingan dapat dilihat pada gambar 6 dan 7.

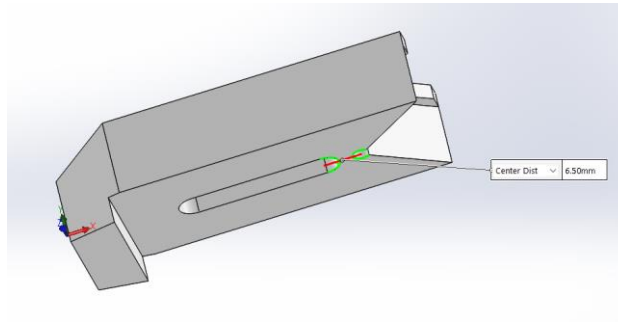


Gambar 6. Grafik Perbandingan *Von Mises* pada Variasi Pembebanan.



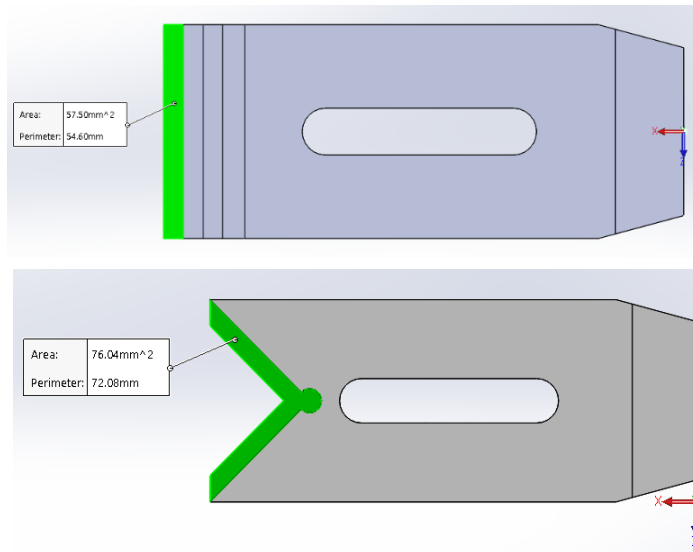
Gambar 7. Grafik Perbandingan Deformasi pada Variasi Pembebanan.

Pada analisis pembebanan dinamis yang disimulasikan dengan metode elemen hingga, dapat terlihat bahwa terdapat perbedaan kemampuan dari kedua rancangan dalam menahan beban. Tegangan gabungan dengan metode *von mises* yang terjadi pada desain 5 menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan pada desain 4 seperti ditunjukkan pada gambar 6. Hal tersebut disebabkan karena pada desain 5 terdapat area kritis pada jarak lubang yang relatif dekat (gambar 8), sehingga mengakibatkan tegangan yang meningkat pada bagian yang mendapatkan beban secara langsung akibat baut pengunci. Tegangan maksimal akibat beban yang mampu ditahan oleh material ABS adalah 30 Mpa, sehingga melalui simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa gaya maksimal yang mampu diterima oleh desain alat pengecam yang dibuat dengan dimensi seperti desain adalah kurang dari 300 N. Material akan mengalami kerusakan pada bagian-bagian yang kritis apabila dibebani lebih dari itu.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Deformasi pada Variasi Pembebanan.

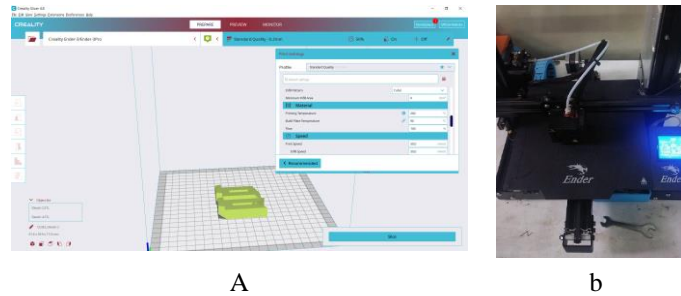
Hal yang berbeda terlihat dari distorsi akibat regangan yang terjadi, dimana desain 5 mengalami resiko distorsi yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan desain 4 (gambar 7). Hal ini disebabkan karena pada desain 5 memiliki luasan tumpuan pada ujung cekaman yang lebih besar apabila dibandingkan dengan desain 4 seperti ditunjukkan pada gambar 9. Sehingga menghasilkan ketegaran yang lebih baik terhadap deformasi yang mungkin terjadi akibat pembebanan.



Gambar 9. Perbedaan Luasan Tumpuan Pencekaman (a) Desain 4 (b) Desain 5.

3.2. Proses Produksi Dengan 3D *Print*

Tahapan selanjutnya adalah merencanakan produksi dengan mesin 3D print dengan merk *creality ender 3 pro* dengan material filamen ABS berwarna hitam serta pengaturan *infill* 50%, temperatur *nozzle* 260°, temperatur bed mesin 90°, dan penambahan support di lokasi yang diperlukan seperti ditunjukkan oleh gambar 10 (a) sedangkan gambar 10 (b) merepresentasikan proses pencetakan 3 dimensi dengan mesin 3D *printing ender 3 pro* buatan *creality*.

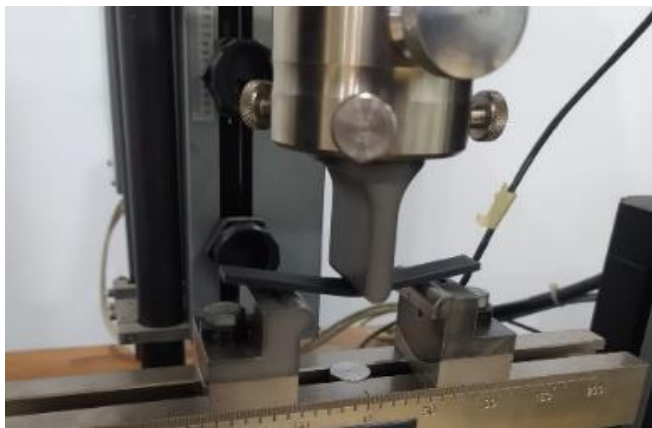


Gambar 10. (a) Parameter Mesin 3D Print Ender 3 Pro dengan Perangkat Lunak *Creality Slicer* (b) Proses Pencetakan dengan Mesin 3D Print Ender 3 Pro.

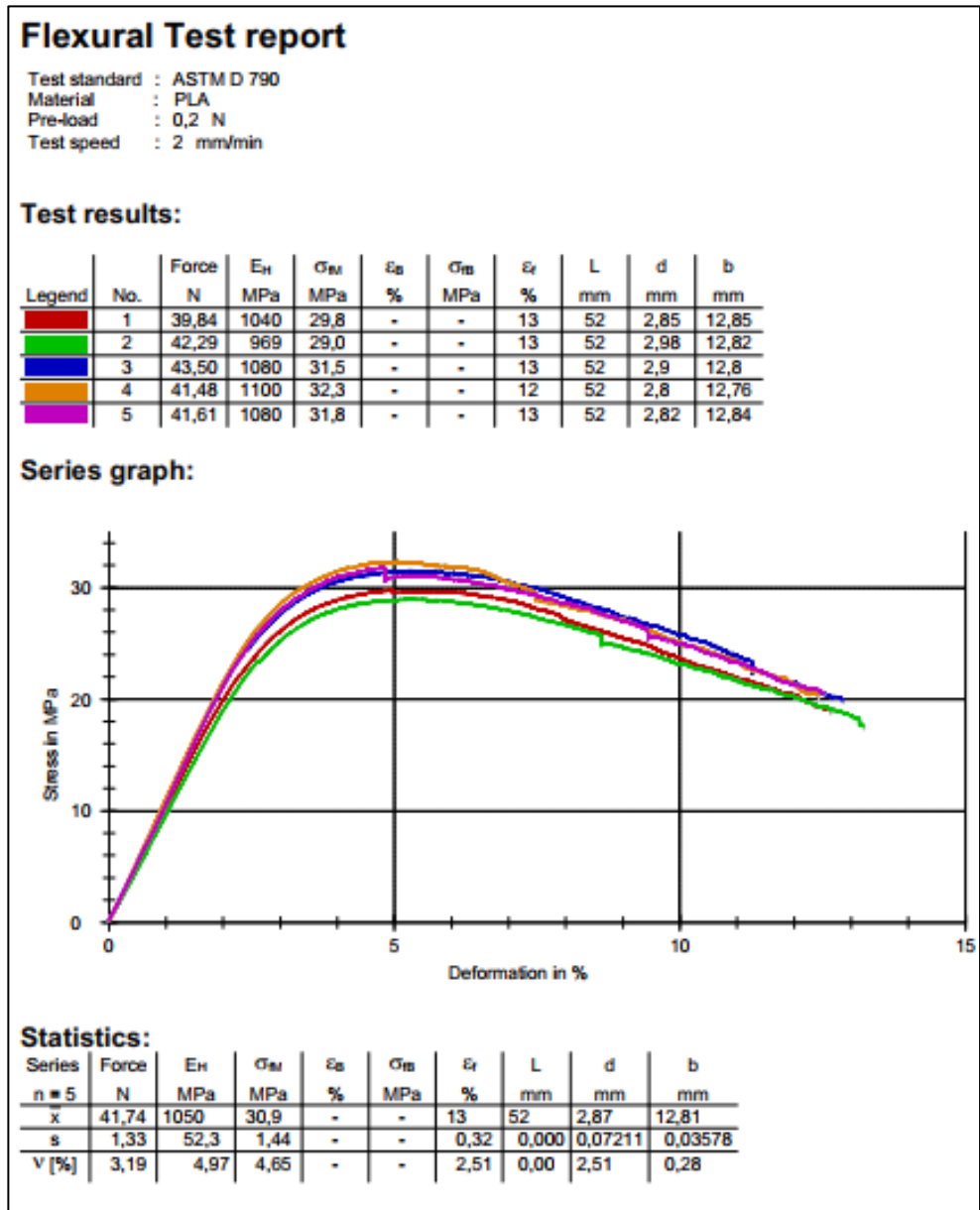
3.3. Verifikasi *Flexural Test* dengan *Universal Testing Machine*

Dalam dunia rekayasa dan teknologi, pengujian bahan merupakan langkah krusial untuk memastikan kinerja dan keamanan suatu produk atau struktur [26]. Salah satu uji yang umum dilakukan adalah uji lentur atau *flexural test*. Artikel ini akan membahas peran penting *flexural test* dalam memverifikasi analisis beban pada alat pengekaman. Alat pengekaman merupakan perangkat yang sering digunakan dalam berbagai aplikasi industri, laboratorium, dan penelitian. Untuk memastikan keandalan dan keamanan penggunaan alat pengekaman, analisis beban harus dilakukan. Analisis tersebut melibatkan pemodelan matematis dan simulasi untuk memprediksi respons alat terhadap beban tertentu. Namun, hasil analisis tersebut harus diverifikasi melalui uji fisik, dan *flexural test* menjadi salah satu pilihan yang efektif [27].

Flexural test, juga dikenal sebagai uji tiga titik atau uji lentur, dilakukan dengan memberikan beban pada suatu benda uji yang didukung di kedua ujungnya dan ditempatkan di tengah dengan satu titik beban [28]. Pada alat pengekaman, uji ini dapat mensimulasikan situasi beban nyata yang mungkin terjadi selama penggunaan alat. Bahan yang digunakan untuk benda uji harus mewakili karakteristik material dari alat pengekaman [29]. Dimensi benda uji harus sesuai dengan spesifikasi standar atau disesuaikan dengan kondisi beban yang diinginkan. Verifikasi analisis beban bertujuan untuk mengonfirmasi keakuratan prediksi analisis beban yang dilakukan dengan perangkat lunak CAE yang telah dilakukan sebelumnya. Menyediakan data eksperimental untuk perbandingan dengan hasil simulasi diharapkan dapat memastikan bahwa alat pengekaman memenuhi standar keamanan dan kinerja yang diperlukan [30].



Gambar 11. *Flexural Testing* dengan UTM

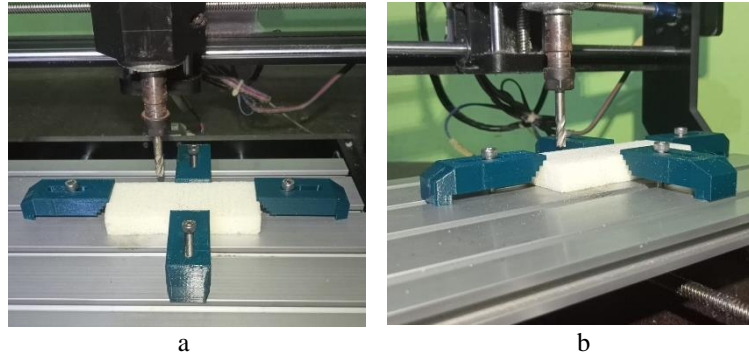


Gambar 12. Hasil *Flexural Test*

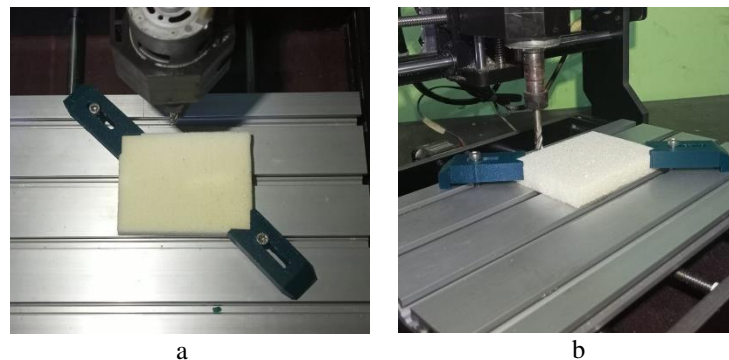
Flexural test yang digunakan menggunakan standart ASTM D790, dimana metode pengujian ini dapat digunakan untuk menentukan lentur dari material plastik dengan atau tanpa penguat. Metode ini menggunakan sistem pembebanan tiga titik untuk menerapkan beban untuk spesimen berbentuk balok yang ditumpu oleh dua penyangga (Gambar 11) Penting untuk memilih bahan dan prosedur uji yang sesuai dengan karakteristik alat pencekaman yang akan diuji agar hasilnya relevan dan dapat diandalkan^[31]. Dari Gambar 12 didapatkan hasil *flexural test* yaitu nilai tegangan rata-rata yang mampu ditahan oleh material adalah sebesar 30,88 Mpa, dan sesuai dengan asumsi yang dibuat pada hasil simulasi pembebanan yang telah dilakukan sebelumnya.

3.4. Aplikasi PENCEKAMAN Untuk Material BUSA Poliuretan

Model 3 dimensi yang telah dibuat dengan 3D printing selanjutnya diaplikasikan ke pengecaman material busa PU sebelum mengalami proses pemesinan. Percobaan ini bertujuan untuk menganalisa kemampuan cekaman kedua model alat pengecam yang telah dibuat dengan metode manufaktur aditif seta membandingkan kemampuan keduanya. Melalui analisis tersebut diharapkan dapat memberikan referensi model pengecaman yang lebih sesuai apabila digunakan untuk proses manufaktur material busa PU ke depannya



Gambar 13. (a) 4 buah alat pengecam desain 4 untuk memposisikan material busa PU berbentuk balok (b) Pengecaman dengan alat pengecam desain 4.



Gambar 14. (a) 2 buah alat pengecam desain 5 untuk memposisikan material busa PU berbentuk balok (b) Pengecaman dengan alat pengecam desain 5.

Gambar 13 dan 14 memperlihatkan proses pengecaman benda kerja busa PU. Proses pengecaman menggunakan desain 4 memerlukan 4 buah pengecam untuk menahan gaya penyayat dari arah sumbu X dan Y. Pengecaman menggunakan desain 5 menggunakan 2 buah pengecam untuk menahan gaya penyayat dari sumbu X dan Y. Pada Gambar 14 (a) memperlihatkan bahwa 1 pengecam dengan model desain 5 dapat menahan gaya dari 2 arah sekaligus. Sehingga untuk menahan gaya penyayat dari arah sumbu X, X-, Y, dan Y- hanya memerlukan 2 buah pengecam, sedangkan desain 4 membutuhkan 4 buah alat pengecam untuk menahan gaya dengan arah yang sama (gambar 13 (a)).

Pemberian gaya pengecaman dilakukan dengan menggunakan prinsip pengencangan baut dengan torsi sebesar 20 Nm. Gambar 13 (b) menunjukkan penekanan pengecam desain 4 yang berlebih terhadap material sehingga menyebabkan material mengalami deformasi berlebih pada saat pengecaman. Sedangkan gambar 13 (b) memperlihatkan deformasi yang terjadi bisa diminimalisir. Hal tersebut disebabkan karena perbedaan luas permukaan penekanan yang terjadi pada masing-masing desain. Perbedaan luasan permukaan pengecaman dapat diamati pada gambar 9 dimana terlihat perbedaan yang signifikan antara luas permukaan pengecaman antara desain 4 dan desain 5. Desain 4 memiliki luasan 57,5 mm² (gambar 9 (a)) sedangkan desain 5 memiliki luasan 76,04 mm² (gambar 9 (b)).

Perbedaan luas permukaan ini yang menyebabkan perbedaan tekanan yang diterima oleh material busa PU.

3.5. Hasil Utama Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk merancang alat pengecam yang efektif dalam pemesian busa PU, dengan fokus pada pemilihan bahan dan metodologi perancangan menggunakan pendekatan VDI 2221. Hasil utama dari penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan polimer dengan kekerasan sedikit lebih tinggi dari PU foam dapat mengatasi tantangan dalam pemesian material ini, mengurangi risiko kerusakan pada foam, serta memberikan stabilitas yang cukup terhadap gaya pemotongan yang diterapkan selama proses *face mill cutting*.

Dari hasil pengujian, diperoleh bahwa alat pengecam yang dirancang dengan bahan polimer ini mampu menahan gaya pemotongan yang lebih besar dibandingkan dengan penggunaan bahan lain yang lebih lunak, tanpa merusak material PU foam yang rapuh. Hal ini sangat penting untuk meningkatkan presisi dan efisiensi dalam proses pemesian, yang sebelumnya sering kali terkendala oleh kerusakan pada material akibat kekurangan daya cengkeram. Jika melihat kembali penelitian-penelitian terdahulu dari Guerrero-Vacas *et al.* (2024), Natali *et al.* (2024), dan Iacob *et al.* (2023), penelitian ini memberikan kontribusi baru dengan menekankan pada aspek ketahanan terhadap gaya pemotongan yang lebih intens, sambil tetap menjaga integritas PU foam. Penelitian ini, juga menunjukkan bahwa polimer yang sedikit lebih keras dari PU foam memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas dan perlindungan terhadap material kerja.

Implikasi dari temuan ini cukup signifikan dalam industri manufaktur, khususnya dalam proses pemesian bahan yang rapuh seperti PU foam. Alat pengepakan yang dirancang dengan menggunakan polimer sebagai bahan utama diharapkan dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi produksi. Selain itu, penerapan metode VDI 2221 dalam perancangan alat ini memberikan pendekatan yang sistematis, yang memungkinkan penyesuaian desain sesuai dengan kebutuhan spesifik material yang diproses.

Penelitian ini juga memberikan gambaran bahwa pemilihan bahan untuk alat pengepakan tidak hanya dipengaruhi oleh kekerasan material, tetapi juga oleh aspek lainnya seperti elastisitas dan kemampuan untuk menyerap gaya pemotongan tanpa merusak material kerja. Oleh karena itu, penelitian ini membuka peluang untuk pengembangan alat pengepakan dengan bahan komposit atau polimer lainnya yang memiliki sifat serupa.

Kekuatan utama dari penelitian ini terletak pada penerapan metodologi VDI 2221, yang memberikan pendekatan yang terstruktur dalam mendesain alat pengepakan sesuai dengan prinsip rekayasa yang matang. Selain itu, penelitian ini juga menunjukkan potensi besar dari penggunaan polimer untuk meningkatkan daya cengkeram tanpa merusak material PU foam yang rapuh.

Namun, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam penelitian ini. Salah satunya adalah keterbatasan dalam variabilitas bahan polimer yang diuji, yang hanya mencakup beberapa jenis bahan yang diproduksi secara laboratorium. Uji lapangan dalam kondisi industri nyata perlu dilakukan untuk memastikan efektivitas dan daya tahan alat pengepakan ini dalam skala produksi massal. Selain itu, penelitian ini hanya menguji alat pengecam pada mesin CNC Router 3 Axis, sehingga penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk menguji alat ini pada jenis mesin atau aplikasi lainnya.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji perancangan alat pengecam untuk pemesian *polyurethane foam* (PU foam) pada proses *face mill cutting* menggunakan mesin CNC router 3-axis. Salah satu tantangan utama dalam pemesian PU foam adalah sifat material yang sangat rapuh, yang

menyebabkan kerusakan atau deformasi selama pemrosesan. Oleh karena itu, alat pengecam yang dirancang harus dapat mencengkeram benda kerja dengan kuat tanpa merusak material, serta mampu menahan gaya potong yang besar selama proses pemesinan. Penelitian ini menyarankan penggunaan polimer sebagai bahan alternatif untuk alat pengecam yang memiliki kekerasan sedikit lebih tinggi daripada *PU foam*, dengan tujuan mengurangi risiko kerusakan pada material.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan desain berbasis polimer untuk alat pengecam *PU foam* memiliki potensi besar dalam meningkatkan performa pemesinan. Khususnya, desain 5 yang dicetak menggunakan teknologi *3D printing* dan *additive manufacturing* menunjukkan kekuatan yang lebih baik dalam menahan tekanan dan gaya potong dibandingkan dengan desain lainnya. Desain ini mampu mencengkeram benda kerja dengan efektif dari dua arah sekaligus, yang mengurangi deformasi material dan memperbaiki stabilitas selama pemesinan. Inovasi utama dari penelitian ini adalah pengaplikasian alat pengecam yang dioptimalkan dengan material polimer, yang dapat meningkatkan efisiensi pemesinan dan meminimalkan kerusakan pada *PU foam* yang rapuh.

Namun, ada beberapa batasan dalam penelitian ini. Pertama, model desain yang digunakan masih berbasis pada teknologi *3D printing*, yang meskipun memberikan hasil yang baik dalam percobaan laboratorium, belum tentu dapat diterapkan secara optimal dalam skala industri yang lebih besar. Selain itu, kekuatan dan ketahanan jangka panjang dari material polimer yang digunakan masih memerlukan evaluasi lebih lanjut, mengingat polimer yang digunakan dalam penelitian ini mungkin memiliki keterbatasan dalam hal ketahanan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu mengeksplorasi berbagai jenis material polimer yang lebih tahan lama dan lebih sesuai untuk aplikasi industri, serta menguji desain alat pengecam ini dalam berbagai kondisi pemesinan yang lebih bervariasi.

Penelitian ini memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengembangan teknologi alat pemesinan untuk material rapuh seperti *PU foam*. Dengan menggantikan material konvensional dengan polimer yang lebih tahan terhadap gaya potong dan tekanan, penelitian ini menawarkan solusi inovatif untuk mengurangi kerusakan material dan meningkatkan kualitas hasil pemesinan. Metode VDI 2221 yang digunakan dalam perancangan alat memberikan pendekatan sistematis yang dapat diadaptasi dan dioptimalkan seiring berjalannya waktu. Penemuan ini membuka peluang untuk pengembangan lebih lanjut dalam desain alat pemesinan dengan mempertimbangkan kekhususan material yang diproses, yang dapat diterapkan pada berbagai bidang teknik lainnya.

Penelitian ini menunjukkan pendekatan yang sangat relevan dan inovatif dalam menghadapi tantangan pemesinan material rapuh. Penggunaan material polimer untuk alat pengecam memberikan wawasan baru dalam desain alat pemesinan yang lebih ramah terhadap material sensitif, yang dapat meningkatkan kualitas dan efisiensi proses produksi. Namun, ada potensi untuk meningkatkan penelitian ini dengan pengujian dalam skala industri dan uji jangka panjang pada material polimer untuk memastikan ketahanan dan performa yang lebih baik. Sebagai langkah selanjutnya, penelitian lebih lanjut mengenai variasi material polimer serta evaluasi penerapannya dalam kondisi pemesinan yang lebih beragam akan memperkaya temuan dan aplikasinya dalam dunia industri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Guerrero-Vacas, J. Gómez-Castillo, and O. Rodríguez-Alabanda, "Manufacture of thermoplastic molds by fused filament fabrication 3D printing for rapid prototyping of polyurethane foam molded products," *Rapid Prototype. J.*, vol. 30, no. 11, pp. 32–49, 2023, doi: 10.1108/RPJ-03-2023-0085.
- [2] P. Natali *et al.*, "Study of the Behavior of 3D Printed Thermoplastic Elastomers

- Structures Aimed at Emulating Traditional Polyurethane Foams,” Macromol. Symp.*, vol. 413, no. 4, pp. 1–3, 2024, doi: 10.1002/masy.202400027.
- [3] M. C. Iacob, D. Popescu, D. Petcu, and R. Marinescu, “Assessment of the Flexural Fatigue Performance of 3D-Printed Foot Orthoses Made from Different Thermoplastic Polyurethanes,” *Appl. Sci.*, 2023.
- [4] R. Stewart, “New mould technologies and tooling materials promise advances for composites,” *Reinf. Plast.*, vol. 54, no. 3, pp. 30–36, 2010, doi: 10.1016/S0034-3617(10)70110-7.
- [5] E. Brinksmeier and J. Sölter, “Prediction of shape deviations in machining,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 507–510, 2009, doi: 10.1016/j.cirp.2009.03.123.
- [6] N. K. Naulakha, D. Thapa, and S. K. R. B. | N. Karthik, “An Overview on Latest Trend of Face Milling Operation,” *Int. J. Trend Sci. Res. Dev.*, vol. Volume-2, no. Issue-4, pp. 1799–1802, 2018, doi: 10.31142/ijtsrd14446.
- [7] C. Costa, F. J. G. Silva, R. M. Gouveia, and R. P. Martinho, “Development of hydraulic clamping tools for the machining of complex shape mechanical components,” *Procedia Manuf.*, vol. 17, pp. 563–570, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.097.
- [8] S. Zhang, X. Ai, J. Li, and X. Fu, “Failure analysis on clamping bolt of milling cutter for high-speed machining,” *Int. J. Mach. Mach. Mater.*, vol. 1, no. 3, pp. 343–353, 2006, doi: 10.1504/IJMMM.2006.011369.
- [9] S. Ramesh, S. Denis Ashok, N. K. Naulakha, C. R. Adithyakumar, M. Lohith Kumar Reddy, and S. K. Reddy, “Energy Efficient Hydraulic Clamping System using Variable Frequency Drive in a CNC Machine,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 376, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/376/1/012124.
- [10] N. Ab Wahab, J. L. Martius, A. K. Nordin, M. Zahari, S. M. Najib, and M. Saifizi, “Design And Development Of Portable Vacuum Clamping (Pvac Clamp) For Tool Room,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1529, no. 4, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1529/4/042027.
- [11] E. Brinksmeier, J. Sölter, and C. Grate, “Distortion engineering - identification of causes for dimensional and form deviations of bearing rings,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 109–112, 2007, doi: 10.1016/j.cirp.2007.05.028.
- [12] T. Nishihara, S. Okuyama, S. Kawamura, and S. Hanasaki, “Study on the geometrical accuracy in surface grinding: —Thermal deformation of workpiece in traverse grinding—,” *J. Japan Soc. Precis. Eng.*, vol. 59, no. 7, pp. 1145–1150, 1993, doi: 10.2493/jjspe.59.1145.
- [13] J. M. Svanberg and J. A. Holmberg, “An experimental investigation on mechanisms for manufacturing induced shape distortions in homogeneous and balanced laminates,” *Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 32, no. 6, pp. 827–838, 2001, doi: 10.1016/S1359-835X(00)00173-1.
- [14] R. Hafner, F. Pušavec, L. Čerče, and J. Kopač, “Influence of milling process on machined surface of porous polyurethane (PU) foam,” *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.*, vol. 23, no. 4, pp. 1089–1093, 2016, doi: 10.17559/tv-20150729135016.
- [15] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed. in Cambridge Solid State Science Series. Cambridge University Press, 1997. doi: 10.1017/CBO9781139878326.
- [16] S. Selvakumar, K. P. Arulshri, and K. P. Padmanaban, “Clamping Force Optimization for Minimum Deformation of Workpiece by Dynamic Analysis of Workpiece-fixture System,” *World Appl. Sci. J.*, vol. 11, no. 7, pp. 840–846, 2010.
- [17] J. H. Yu, Z. T. Chen, and Z. P. Jiang, “A control process for machining distortion by using an adaptive dual-sphere fixture,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 86, no. 9–12, pp. 3463–3470, 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8470-2.

- [18] G. . Pahl, W. . Beitz, J. Feldhusen, and K. H. . Grote, *Engineering design. [electronic book] : a systematic approach: University of Liverpool Library*. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-319-2%0Ahttps://extras.springer.com/?query=978-1-84628-318-5>
- [19] F. Alizon, S. B. Shooter, and H. J. Thevenot, "Design structure matrix flow for improving identification and specification of modules," *Proc. ASME Des. Eng. Tech. Conf.*, vol. 2006, pp. 1–13, 2006.
- [20] "CP11-FREE JAW VISE | CNC Fixture, Jaw, Tombstone Manufacturer | Leave Industrial." Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: https://www.leave-fixture.com/en-US/pfilter209_36-cp11
- [21] "GN 918 Eccentric cams | Elessa+Ganter." Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.elesa-ganter.com/en/www/Machine-elements--Eccentric-cams--GN918>
- [22] "Item # 30804, Step Clamps On TE-CO." Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://catalog.te-co.com/item/clamps-clamping-accessories2/step-clamps/30804>
- [23] "Detail." Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: http://www.vertex-tw.com.tw/products/print_detail.php?cid=54
- [24] M. Fagnoli, E. Rovida, and R. Troisi, "The morphological matrix: Tool for the development of innovative design solutions," *Proc. ICAD*, pp. 1–6, 2006, [Online]. Available: http://www.axiod.com/technology/icad/icad2006/icad2006_21.pdf
- [25] Ferdinand P. Beer and J. T. D. Jr., E. Russell Johnston, "Mechanics Of Materials SI Unit Fourth Edition," 2006.
- [26] C. Kim and C. H. Kim, "Universal testing apparatus implementing various repetitive mechanical deformations to evaluate the reliability of flexible electronic devices," *Micromachines*, vol. 9, no. 10, 2018, doi: 10.3390/mi9100492.
- [27] M. Rizal, U. Aulia, and R. Yudiansyah, "Development of a Portable Universal Testing Machine for Investigating the Mechanical Properties of Medium-Strength Materials," *Aceh Int. J. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 25–32, 2023, doi: 10.13170/aijst.12.1.31159.
- [28] Annual Book of ASTM Standards, "ASTM D790-61.pdf," 1961. [Online]. Available: https://lhc-div-mms.web.cern.ch/tests/MAG/docum/Radiation_resistance/Literature/Standards/ASTM D790-61.pdf
- [29] S. Gudlavalleti, B. P. Gearing, and L. Anand, "Flexure-based micromechanical testing machines," *Exp. Mech.*, vol. 45, no. 5, pp. 412–419, 2005, doi: 10.1177/0014485105057758.
- [30] E. Szewczak, A. Winkler-Skalna, and L. Czarnecki, "Sustainable test methods for construction materials and elements," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 3, 2020, doi: 10.3390/ma13030606.
- [31] E. Lucon, *Testing of Small-Sized Specimens*, vol. 1. Elsevier, 2014. doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00110-2.