

Optimisasi Parameter Desain *Corner-Filleted Hinge* Dengan Metode *Full Factorial* Untuk Penggunaan Pada *Ultrasonic Vibration Assisted Machining* (UVAM)

1st Fransiskus Kevin Kristanto

Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

fransiskuskevin@student.telkomunivers
ity.ac.id

2nd Rino Andias Anugraha

Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

rinoandias@telkomuniversity.ac.id

3rd Teddy Sjafrizal

Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

teddysjafrizal @telkomuniversity.ac.id

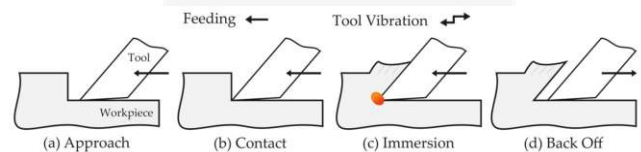
Abstrak— Permesinan Ultrasonic Vibration Assisted Machining (UVAM) muncul sebagai alternatif untuk menghasilkan komponen presisi tinggi dengan tingkat detail dan kehalusan yang luar biasa. Metode ini memanfaatkan getaran untuk menghasilkan gerakan relatif antara alat potong dan benda kerja, yang menghasilkan hasil potong dengan presisi tinggi. Getaran pada permesinan UVAM timbul dari penggunaan keramik piezoelektrik yang menghasilkan getaran ultrasonik. Namun, agar getaran ini dapat optimal, diperlukan dukungan dari desain vibration tool yang mampu meningkatkan tingkat deformasi yang dihasilkan yaitu dengan desain flexure hinge. Deformasi ini juga dipengaruhi oleh jenis flexure hinge yang digunakan. Salah satu jenis flexure hinge yang umum digunakan adalah Corner-filleted hinge, terutama dalam penggunaan pada vibration tool. Corner-filleted hinge merupakan jenis flexure hinge yang paling banyak digunakan dan memiliki peran penting dalam meningkatkan deformasi pada aplikasi tersebut. Pada kajian ini, Simulasi menggunakan metode finite element dilakukan untuk memahami respons dan karakteristik mekanis Corner-filleted Hinge dalam berbagai kondisi pembebanan vibrasi. Berdasarkan konteks yang telah disebutkan, tujuan dari kajian ini adalah untuk mempelajari penggunaan desain Corner-filleted Hinge pada vibration tool UVAM. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kombinasi parameter desain Corner-filleted hinge yang optimal, dengan mempertimbangkan parameter seperti radius, tebal hinge, dan panjang hinge, yang masing-masing dieksplorasi dengan 5 level nilai. Penelitian ini mengeksplorasi kemampuan Corner-filleted Hinge dalam meningkatkan deformasi dan meminimalisir stres melalui simulasi getaran yang realistis, menggunakan metode Design of Experiments (DOE) khususnya metode Full Factorial untuk mengkombinasikan parameter desain. Dengan demikian, hasil dari kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mengembangkan desain yang optimal untuk meningkatkan deformasi pada permesinan UVAM.

Kata kunci — Ultrasonic Vibration Assisted Machining, Flexure Hinge, Corner-filleted Hinge, Deformasi, Finite Element Method

I. PENDAHULUAN

Industri manufaktur modern menghadapi tekanan untuk meningkatkan produktivitas, kualitas produk, dan efisiensi

proses guna tetap bersaing di pasar global. Salah satu metode untuk meningkatkan hasil permesinan adalah *Ultrasonic Vibration Assisted Machining* (UVAM). UVAM menambahkan getaran ultrasonik pada proses pemotongan tradisional, seperti pembubutan, milling, dan pengeboran, yang secara signifikan meningkatkan performa pemotongan [1].



GAMBAR 1

Ilustrasi pemotongan *Ultrasonic Vibration-assisted Machining* (UVAM) (a) *cutting tool* mendekati *workpiece*, (b) sentuhan awal *tool* pada *workpiece*, (c) pemakanan *cutting tool* terhadap *workpiece*, (d) posisi intermittent (Diambil dari, Martins & Puga, (2023), © Author)

UVAM memulai proses dengan *cutting tool* mendekati benda kerja, mengaplikasikan getaran ultrasonik yang mengurangi gaya pemotongan awal dan meningkatkan presisi. Getaran ini membantu melepaskan *cutting tool* dari benda kerja tanpa merusak permukaan [3].

Untuk mengoptimalkan getaran, UVAM menggunakan *vibration tool* yang dilengkapi dengan *flexure hinge*. *Flexure hinge* menghasilkan getaran mekanis stabil melalui deformasi elastis [4], yang penting untuk efisiensi pemesian, terutama pada material rapuh dan keras [5].



GAMBAR 2

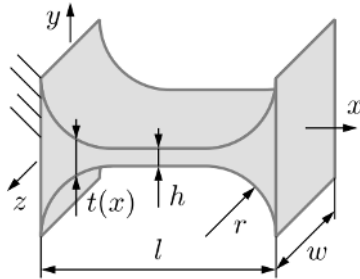
Tipe *flexure hinge*, (a) *leaf spring hinge*, (b) *corner-filleted hinge*, (c) *notch hinge*

(Dimodifikasi, dari, [6] © Author)

Jenis *flexure hinge* yang digunakan sangat mempengaruhi performa. Terdapat tiga bentuk umum: *Notch Hinge*, *Corner-*

Filleted Hinge, dan *Leaf-Spring Hinge*. *Corner-Filletted Hinge* menggabungkan keunggulan *Notch* dan *Leaf-Spring Hinge*, menahan beban besar dengan distribusi *stress* yang merata dan deformasi elastis tinggi [7].

Pengoptimalan desain *Corner-Filletted Hinge* diperlukan untuk mencapai deformasi elastis yang tinggi dan gerakan yang presisi. Parameter seperti radius (R), tebal *hinge* (h), dan panjang *hinge* (l) harus dikombinasikan untuk mencapai desain optimal [8].



GAMBAR 3

Parameter desain pada *Corner-filletted Hinge* (r) Radius, (h) tebal *hinge*, (l) panjang *hinge*
(Diambil, dari [8], © Author)

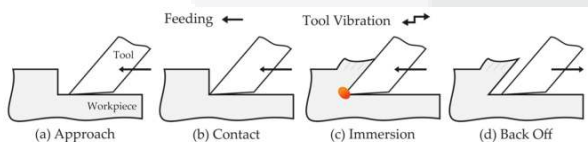
Dengan menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) dan *Grey Relational Analysis*, dilakukan kajian optimisasi parameter desain *corner-filletted hinge* untuk memaksimalkan deformasi dan meminimalkan stress pada proses UVAM. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan presisi dan efisiensi pemesinan dengan *stress* yang tetap dalam batas aman..

II. KAJIAN TEORI

Dalam penelitian ini, yaitu optimasi parameter desain *Corner-filletted Hinge* dalam aplikasi pada *vibration tool* VAM diperlukan beberapa informasi yang dikaji untuk mendukung penyelesaian masalah. Informasi tersebut meliputi *Vibration Assisted Machining* (VAM), *Vibration tool*, *Flexure hinge*, *Corner-filletted Hinge*, Penggunaan *Piezoelectric* dasar teori deformasi terutama yang sesuai dengan penerapan *Corner-filletted Hinge* dan *Finite Element*.

A. Ultrasonic Vibration Assisted Machining (UVAM)

Ultrasonic Vibration Assisted Machining (UVAM) adalah proses pemesinan yang memanfaatkan getaran berfrekuensi ultrasonik melalui piezoelektrik untuk menghasilkan deformasi pada *vibration tool*. Penerapan UVAM dalam proses pemesinan dapat mengurangi cacat permukaan dan menciptakan permukaan yang lebih seragam [9].



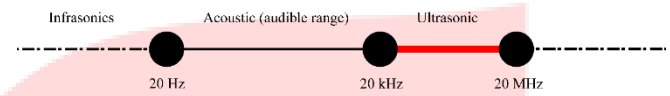
GAMBAR 4

Ilustrasi UVAM

(Diambil dari, [2] © Author)

Kontak yang terputus-putus mengurangi gesekan antara pahat dan benda kerja, memudahkan pemisahan serpihan, mengurangi pembentukan panas, dan meningkatkan masa pakai pahat. Hal ini juga meningkatkan kekasaran permukaan

benda kerja dan produktivitas permesinan serta akurasi dimensi [2]. Selain itu, Gelombang ultrasonik, dengan frekuensi di atas 20 kHz, menembus bahan dengan baik dan memberikan energi presisi tinggi ke lokasi tertentu, membantu dalam proses UVAM.



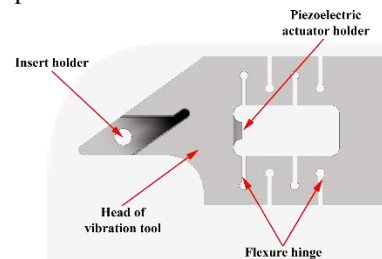
GAMBAR 5

Spektrum frekuensi

(Dimodifikasi dari [2], © Author)

B. Komponen pada *Vibration Tool*

Penyaluran getaran UVAM ditentukan oleh komponen *vibration tool* yang terdiri dari *flexure hinge*, *piezoelektrik*, dan *insert tool*. *Vibration tool* berfungsi sebagai wadah untuk mata pahat selama melakukan pemotongan[10]. *Vibration tool* ini dirancang untuk mendukung getaran konstan, dengan *flexure hinge* di sisi piezoelektrik dan klem piezoelektrik di bagian belakang untuk menjaga alat tetap pada tempatnya dan getarannya terfokus. Variasi pada komponen *flexure hinge* memungkinkan deformasi optimal dalam proses permesinan UVAM. Komponen yang ada pada *vibration tool* di ilustrasikan pada Gambar 6.



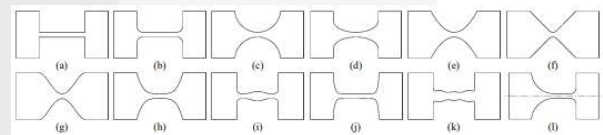
GAMBAR 6

Komponen *Vibration Tool*

(Dimodifikasi, dari [11] , © Author)

C. Fungsi dan Jenis *Flexure Hinge* pada *Vibration Tool*

Flexure hinge adalah komponen tipis yang memungkinkan rotasi relatif melalui pelenturan, menghasilkan daya balik yang menguntungkan untuk penyaluran getaran. Dengan fleksibilitasnya, *flexure hinge* dapat menangani getaran terbatas dan menyalurkannya ke alat seperti *vibration tool*, dengan batasan nilai regangan elastis materialnya [6].



GAMBAR 7

Pendekatan untuk desain geometris *flexure hinge* di kedua sisi: (a) *rectangular*, (b) *corner-filletted*, (c) *semi-circular*, (d) *elliptical*, (e) *parabolic*, (f) *hyperbolic*, (g) *cycloidal*, (h) *polynomial higher order*, (i) *spline function*, (j) *special mathematical functions*, (k) *freeform*, (l) *axial symmetric with transversal asymmetry*.

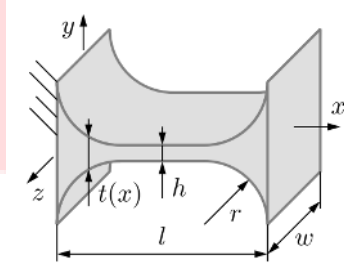
(Diambil dari, [6], © Author)

Flexure hinge dapat bereaksi terhadap pembengkokan dan pemuatan aksial, serta dikonfigurasi untuk aplikasi tiga dimensi seperti torsi [12]. Dalam industri otomotif dan

pesawat, *flexure hinge* berperan penting untuk sensor, pengaturan kursi, dan pengoperasian airbag.

1. Parameter Desain *Corner-Filleted Hinge*

Corner-filleted hinge adalah komponen penting yang layak diteliti dalam aplikasi pada VAM. Desain utamanya melibatkan parameter radius (r), tebal dinding (h), dan panjang hinge (l), yang mempengaruhi besaran deformasi. Proses optimisasi dilakukan melalui simulasi berbagai kombinasi parameter dan validasi dengan teori yang sesuai.



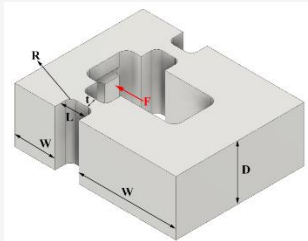
GAMBAR 8

Parameter desain *Corner-filleted Hinge*, dengan R = radius (mm), h = tebal hinge (mm), l = panjang hinge (mm)
(Diambil, dari [8], © Author)

Gambar 8 menggambarkan parameter desain *Corner-filleted hinge*, menunjukkan pentingnya ketiga aspek tersebut dalam menentukan kinerja optimal.

D. Penggunaan *Corner-Filleted Hinge*

Corner-filleted hinge adalah komponen kunci dalam vibration tool yang digunakan untuk mencapai deformasi maksimum saat digetarkan oleh *piezoelektrik*. Desainnya melibatkan penyesuaian parameter radius, tebal dinding, dan panjang hinge, yang memungkinkan perhitungan teoretis deformasi.



GAMBAR 9

Parameter desain *Corner-filleted Hinge* dan posisi *Force* (N)
(Dimodifikasi, dari [13])

Gambar 9 menunjukkan parameter desain dan posisi gaya yang digunakan dalam perhitungan. Rumus deformasi menggabungkan parameter-parameter tersebut, memastikan deformasi optimal dibandingkan dengan *notch hinge*. *Corner-filleted hinge* menghasilkan permukaan kerja yang lebih halus dan presisi, menjadikannya ideal untuk mendukung proses permesinan UVAM. Berikut merupakan rumus deformasi:

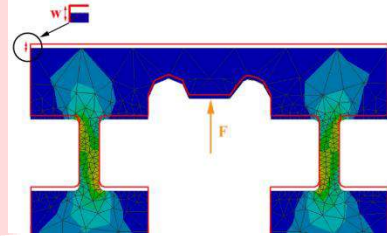
$$w = \frac{F}{ED(2R+t)} \left[kR \left(\frac{R^i L^m}{t} \right) + L + 2W + 2R \right] \quad (1)$$

dimana w = Deformasi (μm), F = Force (N), E = Modulus Young (GPa atau N/mm^2), k = koefisien konstan (6.8812), i

dan m adalah indeks yang sesuai dengan parameter geometri ($i = 0,3129$ dan $m = 0.3761$)

E. Pengaruh deformasi pada UVAM

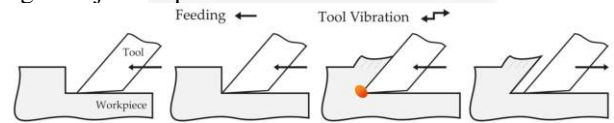
Dalam proses UVAM, deformasi merupakan parameter penting yang lebih kritis daripada parameter pemotongan. Meningkatkan deformasi dapat mengurangi kekuatan pemotongan, meningkatkan akurasi, dan menghilangkan lebih banyak material.



GAMBAR 10

Deformasi *Corner-filleted Hinge* pada gaya (F) dan deformasi (w), *Flexure hinge* merenggang ketika diberi gaya dan terdapat fokus stress yang tinggi pada dinding *Corner-filleted Hinge*

Gambar 10 menunjukkan bagaimana deformasi terjadi saat gaya diterapkan pada suatu benda, dengan fokus stres tinggi pada dinding *corner-filleted hinge*. Deformasi merupakan simpangan terjauh dari titik awal getaran, sangat dipengaruhi oleh frekuensi [14]. Deformasi yang meningkat mengurangi kontak alat dengan material, memungkinkan alat hanya menyentuh saat mencapai puncak deformasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.



GAMBAR 11

Ilustrasi deformasi ketika diberi getaran
(Diambil dari, [2] © Author)

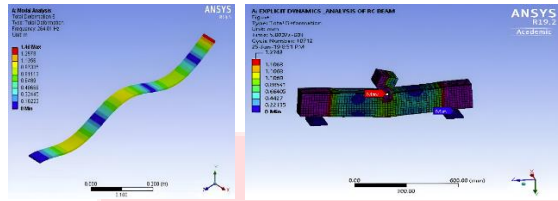
Besarnya deformasi dipengaruhi oleh frekuensi yang diteruskan melalui *flexure hinge*, dan dengan memilih parameter desain yang tepat, deformasi maksimum dengan tegangan minimum dapat dicapai.

F. Pengambilan Data Menggunakan Simulasi *Finite Element Method*

Finite Element Method (FEM) adalah sebuah metode numerik untuk memecahkan masalah matematis kompleks, terutama di bidang teknik dan ilmu pengetahuan. Metode ini membagi domain kompleks menjadi elemen-elemen lebih kecil yang memiliki persamaan matematika terkait dengan sifat fisik sistem yang dianalisis. Dengan menggabungkan persamaan ini, FEM dapat memberikan pendekatan numerik yang akurat terhadap solusi masalah yang kompleks.

Pemodelan dengan FEM dapat digunakan untuk mencari desain optimal pada kombinasi parameter desain seperti *Corner-filleted Hinge*. Terdapat dua jenis simulasi yang umum dilakukan: *modal analysis* dan *explicit dynamic*,

khususnya untuk aplikasi pada *piezoelectric* yang mengalami getaran.



GAMBAR 12

Hasil simulasi *Modal Analysis* (a) dan *Explicit Dynamic* (b)

1. *Modal Analysis*

- Digunakan untuk mempelajari perilaku dinamis, bentuk, dan frekuensi alami dari *tool holder*.
- Analisis ini menentukan modus getar utama dari *tool holder*, termasuk bentuk dan frekuensi resonansi yang terkait.
- Informasi ini penting untuk menghindari frekuensi yang dapat menyebabkan getaran tidak diinginkan atau kerusakan pada desain.

2. *Explicit Dynamic*

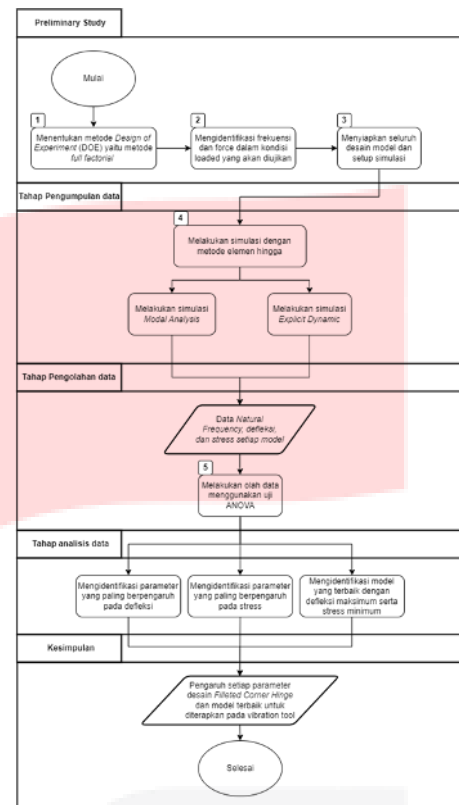
- Metode simulasi yang digunakan untuk memodelkan peristiwa dinamis yang cepat berubah, seperti benturan, ledakan, atau deformasi ekstrem.
- Memungkinkan simulasi yang akurat dan efisien dari respons struktur terhadap fenomena dinamis yang melibatkan perubahan cepat dalam waktu yang relatif singkat.

Keduanya, digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi yang perlu dihindari dalam penggunaan desain serta untuk mengevaluasi deformasi, deformasi, dan tegangan yang dihasilkan saat desain menerima gaya dari *piezoelectric*.

III. METODE

A. Tahap pendefinisian kebutuhan data

Penyelesaian masalah pemanfaatan desain *Corner-filletted Hinge* untuk aplikasi pada *vibration tool* UVAM diawali dengan pembelajaran awal mengenai masalah, lalu dilanjutkan dengan tahap pengumpulan data, pengolahan data, dan analisis data agar dapat menghasilkan suatu kesimpulan dari masalah yang dikaji.



GAMBAR 13

Sistematika Penyelesaian Masalah

Gambar 13 menunjukkan tahapan yang akan dilakukan pada penyelesaian masalah pemanfaatan desain *Corner-filletted Hinge* untuk aplikasi pada *vibration tool* UVAM. Berikut merupakan tahapan-tahapannya:

- Menentukan *Design of experiment* (DOE) menggunakan metode *full factorial*

Pada tahap ini, dilakukan variasi desain *Corner-filletted Hinge* untuk eksperimen menggunakan metode *full factorial*, yang memungkinkan semua aspek desain tercakup. Setiap parameter desain memiliki 5 level sesuai dengan referensi sebelumnya [8]. Detail level parameter desain ditampilkan pada Tabel 1:

TABEL 1
Hasil perhitungan *grey relational analysis*

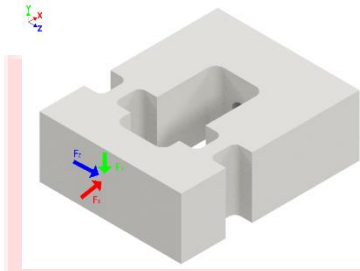
Parameter	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Radius fillet	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm
Tebal hinge	2 mm	2,5 mm	3 mm	3,5 mm	4 mm
Panjang hinge	5,5 mm	6 mm	6,5 mm	7 mm	7,5 mm

Kombinasi dari setiap level ini menghasilkan 125 kombinasi, yang selanjutnya dibuat model dan dimasukkan ke dalam software simulasi. Dengan bantuan *software* Minitab 19, perincian kombinasi parameter desain disusun untuk analisis lebih lanjut.

- Mengidentifikasi frekuensi yang akan diujikan dan force untuk kondisi loaded

Dalam kajian ini, digunakan frekuensi tinggi (ultrasonic) sebesar 20.000 Hz yang dihasilkan oleh *piezoelectric*. Kondisi loaded melibatkan penambahan gaya dari data *cutting force* yang diterapkan pada simulasi getaran untuk mensimulasikan proses UVAM. Data gaya terbesar yang digunakan adalah $F_x = 4,466$ N, $F_y = 139,024$ N, dan $F_z =$

80,282 N [15]. Gaya-gaya ini mempengaruhi besarnya deformasi dan *stress* pada model selama simulasi getaran. Ilustrasi arah *loaded force* pada model ditampilkan pada Gambar 14.

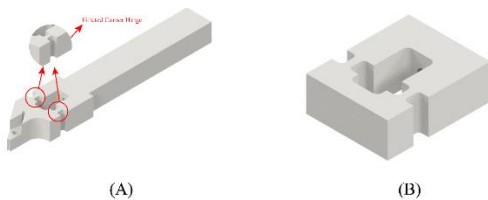


GAMBAR 14

Ilustrasi *loaded force* pada model saat simulasi getaran

3. Merancang model sesuai kombinasi parameter yang telah ditentukan dan mempersiapkan setup simulasi getaran

Pada tahap ini, pembuatan desain dilakukan menggunakan Autodesk Inventor 2023, dan setup simulasi dilakukan menggunakan Ansys Workbench 2021. Desain model yang disimulasikan ditunjukkan pada Gambar 15, dengan model yang lebih sederhana digunakan untuk mewakili *vibration tool*.



GAMBAR 15

Vibration tool dengan *Corner-filleted Hinge* (A) dan model yang akan disimulasikan (B)

Spesifikasi yang digunakan dalam kajian ini meliputi:

a. Piezoelectric Ceramic

TABEL 2
Spesifikasi *Piezoelectric* [16]

Spesifikasi	Keterangan
Tipe <i>piezoelectric</i>	PB10.18
Luas permukaan	10 × 10 mm
Panjang	18 mm
Force	3500 N

b. AISI 1040

TABEL 3
Spesifikasi AISI 1040 [17]

Jenis Data	Nilai
<i>Density</i>	7844,5 kgm ⁻³
<i>Young's Modulus</i>	201,6 GPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,26
<i>Bulk Modulus</i>	140 GPa
<i>Shear Modulus</i>	80 GPa
<i>Geometric Strain Limit</i>	0,003

c. Personal Computer

Personal Computer yang dilengkapi dengan Autodesk Inventor 2023 dan Ansys Workbench 2021 akan digunakan sebagai alat untuk melakukan simulasi getaran yang hasilnya akan diolah pada tahap selanjutnya.

Piezoelectric digunakan sebagai sumber getaran pada permesinan UVAM, dengan data input dari *Piezotechnics*. Material AISI 1040 digunakan dalam simulasi karena sifat elastisitas dan kekuatannya yang sesuai untuk *tool holder* UVAM. Simulasi dilakukan pada komputer yang dilengkapi dengan perangkat lunak yang diperlukan.

4. Melakukan simulasi *finite element*

Simulasi yang dilakukan pada Ansys Workbench 2021 adalah *Modal Analysis* untuk menentukan *natural frequency* pada model agar dihindari penggunaannya pada simulai getaran dan *explicit dynamic* untuk menentukan nilai deformasi dan stress.

5. Melakukan pengolahan data menggunakan uji ANOVA

Hasil simulasi berupa nilai deformasi dan stress akan diolah menggunakan *software* Minitab 19 untuk menentukan parameter yang paling berpengaruh serta desain terbaik dengan memaksimalkan deformasi dan meminimalkan stress. Uji ANOVA yang digunakan adalah one-way dan two-way dengan tingkat signifikansi 5%.

- One-way ANOVA: Digunakan untuk menentukan signifikansi masing-masing parameter desain serta kontribusinya dalam perubahan deformasi dan stress.
- Two-way ANOVA: Digunakan untuk menentukan signifikansi hubungan antara parameter-parameter desain saat diubah bersamaan terhadap perubahan deformasi dan stress serta nilai kontribusinya.

6. Menentukan desain yang optimal dengan metode grey relational analysis

Untuk menghasilkan parameter desain yang optimal, metode *grey relational analysis* menggunakan respons yang dimasukkan ke dalam software, yaitu memaksimalkan defleksi (*larger the better*) dan meminimalkan stress (*smaller the better*). Metode ini sesuai dengan teori hubungan hitam dan menghasilkan dua respons dan tiga parameter untuk diterapkan pada *vibration tool* UVAM. Tahapan optimisasi adalah sebagai berikut:

- Normalisasi nilai
- Menghitung nilai koefisien grey relational
- Menghitung grade of grey relational (GRG)

B. Persiapan simulasi dan pre-simulation

Penelitian ini mengumpulkan dua jenis data utama: data deformasi dan data tegangan. Data deformasi merupakan rata-rata deformasi pada sumbu X, yang menggambarkan seberapa jauh bentuk elemen struktural berubah ketika diberi beban seiring waktu. Sementara itu, data tegangan digunakan untuk menilai integritas struktural dan keamanan desain yang diuji. Proses pengumpulan data mengikuti tahapan yang ditunjukkan pada Gambar XX.



GAMBAR 16

Tahapan pengambilan data nilai defleksi dan stress pada simulasi getaran

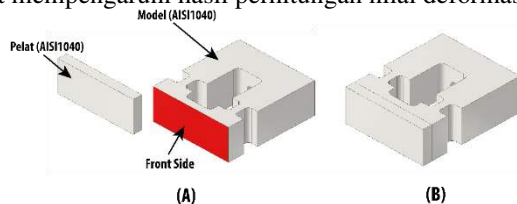
Berdasarkan Gambar 16, yang menjadi masukan pada tahap pengambilan data yaitu model corner-filleted hinge yang telah dibuat dengan kombinasi nilai parameter desainnya masing-masing. Untuk memperoleh natural frequency, deformasi dan stress setiap desain maka dapat dilakukan tahapan berikut.

1. Melakukan setup simulasi getaran untuk setiap desain

Pada tahap setup awal dimasukkan data spesifikasi material AISI 1040 yang diambil dari [17], yaitu Density, Young's Modulus, Poisson's Ratio, Bulk Modulus, dan Shear Modulus. Setelah material didefinisikan, desain dapat dimasukkan ke setup simulasi yang telah dibuat sebelumnya.

2. Memodifikasi model dengan menambahkan pelat

Desain yang digunakan dalam proses simulasi akan dimodifikasi dengan penambahan pelat di bagian depan sesuai pada Gambar 17 untuk kebutuhan perhitungan nilai deformasi dengan tujuan perhitungan terfokus pada sepasang hinge tanpa adanya pembengkokan pada bagian depan hinge yang dapat mempengaruhi hasil perhitungan nilai deformasi.



GAMBAR 17

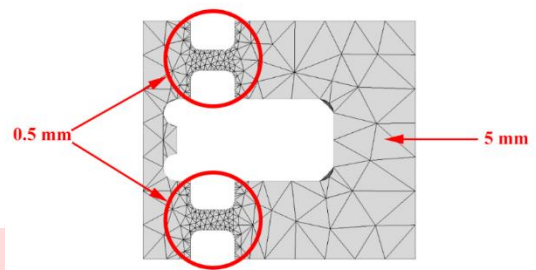
Posisi penambahan pelat (A) dan model yang telah ditambahkan pelat (B)

3. Melakukan simulasi Modal Analysis

Untuk simulasi Modal Analysis, pelat yang telah dibuat sebelumnya dihilangkan terlebih dahulu dengan melakukan "Suppress". Hal ini dilakukan agar pelat tidak ikut menjadi bagian yang dipertimbangkan pada simulasi Modal Analysis, sehingga hasil simulasi terfokus pada satu bagian yaitu bagian *Corner-filleted Hinge*. Selanjutnya dilakukan pengaturan mesh dengan spesifikasi pada Tabel IV.1.

Jenis Mesh	Type mesh	Nilai (mm)	Lokasi
Mesh	Automatic (tetrahedral)	5	Seluruh bagian
Face Sizing	Automatic (tetrahedral)	0,5	Hanya bagian <i>Corner-filleted Hinge</i>

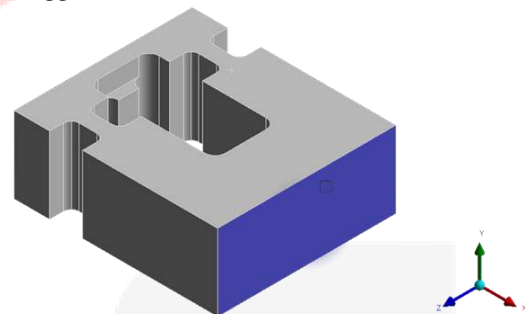
Pada bagian *Corner-filleted Hinge*, ukuran mesh dibuat lebih kecil dan rapat untuk menghasilkan perhitungan yang representatif dan detail pada area yang dibutuhkan. Pendekatan ini juga memungkinkan simulasi berjalan lebih cepat tanpa mengorbankan kualitas hasil secara signifikan. Tipe mesh yang digunakan adalah tetrahedral, sesuai dengan pengaturan otomatis dari software Ansys (2021), yang secara otomatis menyesuaikan ukuran elemen berdasarkan geometri model. Pilihan otomatis ini dianggap cukup sederhana untuk desain *Corner-filleted Hinge* yang tidak memerlukan perlakuan khusus. Gambar 18 menunjukkan bahwa bagian hinge memiliki lebih banyak elemen mesh dengan ukuran yang lebih kecil.



GAMBAR 18

Ukuran mesh yang terbentuk pada model

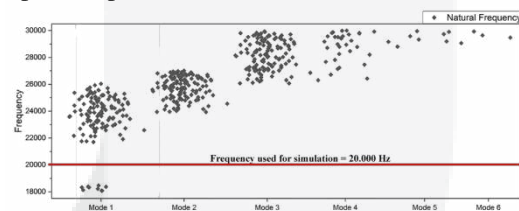
Pada bagian "*analysis setting*" juga dimasukkan batas frekuensi yang diambil yaitu 18000-30000 Hz, dimana frekuensi tersebut ditentukan sesuai dengan frekuensi yang diberikan oleh *piezoelectric*. Penentuan frekuensi tersebut juga sesuai dengan simulasi *Explicit Dynamic* nantinya yang akan menggunakan frekuensi sebesar 20000 Hz.



GAMBAR 19

Model *Corner-filleted Hinge* dengan penambahan *Fixed Support*

Penambahan fixed support dilakukan untuk merepresentasikan bagian yang tidak bergerak pada tool holder UVAM. Setelah semua terdefiniskan, maka natural frequency yang diperoleh dapat dilihat sebaran seluruh data yang diperoleh pada Gambar 20.



Gambar 20

Sebaran *natural frequency* pada setiap model

4. Melakukan simulasi Explicit Dynamic

Langkah pertama dalam menyiapkan simulasi adalah mendefinisikan material pelat dan *Corner-filleted Hinge* sebagai AISI 1040, dan mengatur sifat pelat menjadi rigid untuk mencegah pembengkokan selama simulasi. Kemudian dilakukan pengaturan mesh dengan spesifikasi sebagai yang ditampilkan pada tabel IV.2.

Jenis Data	Nilai
Step	5
End time	0,001 s
Geometric Strain Limit	0,003

Tujuan digunakannya analisis 5 step supaya terjadi pengulangan sebanyak 5 kali pada simulasi getaran dengan

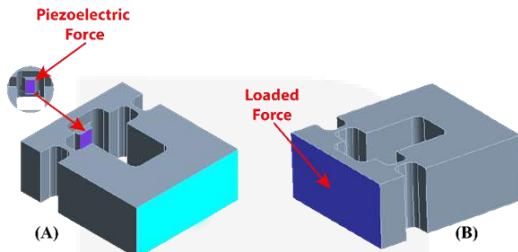
tujuan mencapai efek yang berkelanjutan dan menghasilkan deformasi maksimal. Untuk nilai end time selama 0,001 detik didapat dari rumus

$$T = \frac{1}{f} \times 20 \quad (2)$$

dengan T = waktu (s) dan f = frekuensi (Hz). Frekuensi yang digunakan adalah 20.000 Hz, dan nilai 20 dihasilkan dari pengulangan 20 kali, sehingga nilai tersebut digunakan sebagai *end time* setiap step. Kemudian, *Geometric Strain Limit* digunakan untuk menentukan batas kemampuan regangan desain hingga patah. Nilai tersebut didapatkan dari rumus

$$\varepsilon = \frac{\sigma_u}{E} \quad (3)$$

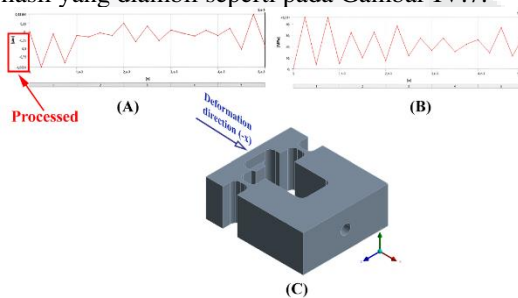
dengan ε = *Geometric strain limit*, σ_u = *Tensile strength* (MPa) dan E = *Young's modulus* (GPa). Digunakan nilai *Tensile strength* sebesar 601 MPa yang menghasilkan nilai *Geometric Strain Limit* sebesar 0,003. Kemudian, menentukan lokasi *fixed support* dan *force* pada desain sesuai dengan. Gambar IV.6.



GAMBAR 21

Penentuan bagian *fixed support*, Lokasi *actuated force* (A) dan *loaded-force* (B)

Pemilihan lokasi *fixed support* memiliki tujuan yang sama dengan simulasi *modal analysis*. Kemudian, *piezoelectric force* menjadi bagian yang diberikan *force* dari *piezoelectric* dengan frekuensi sebesar 20000 Hz dan *force* berbentuk solinoida sebesar 3500 N. *Force* ditempatkan pada posisi aktual *piezoelectric* akan ditempatkan yang merepresentasikan cara kerja *piezoelectric* dalam menghantarkan getaran. Setelah simulasi getaran dilakukan, maka hasil yang diambil seperti pada Gambar IV.7.



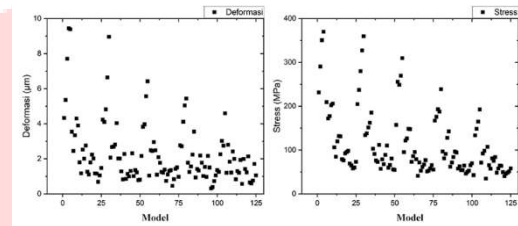
GAMBAR 22

Respon simulasi *explicit dynamic* terhadap deformasi (A), *Stress* (B), dan arah deformasi yang diambil ke arah datum -X (C)

Dari data deformasi yang ditampilkan pada Gambar 22, diambil rata-rata nilai negatif karena pada datum, nilai x positif mengarah ke belakang dan yang diinginkan adalah nilai x negatif. Untuk data tegangan, dipilih nilai terbesar. Penggunaan probe dilakukan agar hasil pengukuran deformasi

terfokus pada bagian depan, sedangkan pengukuran tegangan hanya difokuskan pada bagian hinge.

Setelah proses pengambilan data selesai, hasilnya dapat dilihat pada Gambar IV.8 dengan detailnya tercantum dalam Lampiran B. Selanjutnya, data dianalisis untuk menginvestigasi perubahan pada setiap parameter dan diuji menggunakan uji ANOVA.



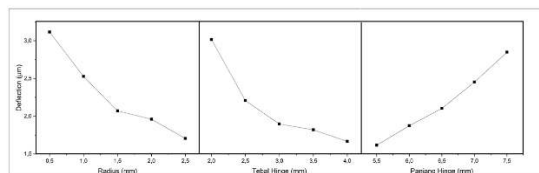
Gambar 23

Sebaran data deformasi dan *stress* setiap model

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Uji ANOVA setiap parameter terhadap deformasi dan *stress*

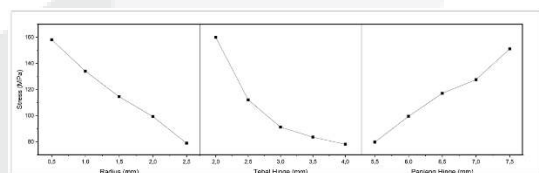
Data yang telah diperoleh sebelumnya diolah menggunakan uji ANOVA untuk mengevaluasi signifikansi dan kontribusi setiap parameter berdasarkan data yang telah dikumpulkan sebelumnya. Untuk dianggap signifikan, nilai P-Value harus kurang dari 0,05. Nilai P-Value yang lebih kecil dari 0,05 menunjukkan bahwa perubahan pada parameter tersebut secara signifikan mempengaruhi deformasi dan *stress*.



Gambar 24

Efek setiap parameter terhadap deformasi dan hasil uji ANOVA

Gambar 24 menunjukkan hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa semua parameter desain *Corner-filletted Hinge* signifikan terhadap perubahan deformasi karena memiliki P-Value < 0,05. Selain itu, interaksi antara radius dan tebal *hinge* juga signifikan, dengan tebal *hinge* menjadi parameter paling berpengaruh berdasarkan nilai F-Value 214,38.



GAMBAR 25

Efek setiap parameter terhadap *stress* dan hasil uji ANOVA

Hasil uji ANOVA terhadap *stress* menunjukkan bahwa semua parameter desain *corner-filletted hinge* memiliki P-Value < 0,05, menunjukkan dampak signifikan terhadap perubahan deformasi. Tebal *hinge* menjadi parameter yang paling berpengaruh terhadap nilai *stress*, dengan F-Value sebesar 465,38.

B. Penentuan desain optimal dengan metode optimasi multi-respon

Optimalisasi dilakukan untuk menemukan kombinasi parameter desain yang optimal dengan tujuan memaksimalkan deformasi dan meminimalkan *stress*. Untuk mencapai ini, digunakan metode *grey relational analysis*. Untuk optimalisasi, tahapan pertama adalah normalisasi nilai deformasi dan *stress* menggunakan rumus *larger the better*:

$$x_i(k) = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (2)$$

dan untuk *smaller the better* sebagai berikut:

$$x_i(k) = \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (3)$$

lalu dilanjutkan dengan menghitung nilai *deviation sequence* dengan rumus berikut:

$$\Delta_i = 1 - x_i(k) \quad (4)$$

dengan $x_i(k)$ = nilai normalisasi, $y_i(k)$ = nilai data, $\max y_i(k)$ = nilai maksimal kelompok data, $\min y_i(k)$ = nilai minimum kelompok data dan Δ_i = nilai *deviation sequence*. Selanjutnya, menghitung *grey relational coefficient* dengan rumus berikut:

$$\gamma_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \varphi \times \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \varphi \times \Delta_{\max}} \quad (5)$$

dengan $\gamma_i(k)$ = nilai *grey relational coefficient*, $\Delta_{\min}$ = nilai minimum *deviation sequence*, $\Delta_{\max}$ = nilai maksimum *deviation sequence*, dan φ = nilai antara 0 dan 1 yang meningkatkan maupun menurunkan nilai *grey relational coefficient*. Nilai φ yang digunakan yaitu 0,5 untuk memastikan bahwa nilainya tidak terlalu meningkat atau menurun.. Tahapan terakhir yaitu menghitung *grade of grey relational* menggunakan rumus berikut:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i(k) \quad (6)$$

Nilai tersebut selanjutnya diurutkan dari yang paling besar ke yang paling kecil. Detail peringkat 10 terbaik terdapat pada Tabel 4.

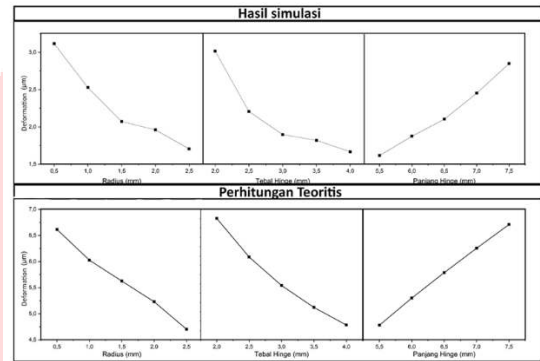
TABEL 4
hasil perhitungan *grey relational analysis*

Rank	R	t	l	D	S	D	S	D	S	γ_i
				$x_i(k)$	$x_i(k)$	Δ_i	Δ_i	$y_i(k)$	$y_i(k)$	
1	0,5	2	7	1,000	0,103	0	0,897	1,000	0,358	0,679
2	2,5	2,5	7	0,099	1,000	0,901	0,000	0,357	1,000	0,678
3	1,5	3	7,5	0,100	0,983	0,900	0,017	0,357	0,967	0,662
4	0,5	2	7,5	0,994	0,000	0,006	1,000	0,988	0,333	0,661
5	2,5	2	5,5	0,104	0,979	0,896	0,021	0,358	0,959	0,659
6	2,5	4	5,5	0,037	0,985	0,963	0,015	0,342	0,972	0,657
7	2,5	3,5	7,5	0,200	0,961	0,800	0,039	0,385	0,927	0,656
8	2	3,5	7	0,203	0,948	0,797	0,052	0,386	0,907	0,646
9	2,5	4	7	0,153	0,956	0,847	0,044	0,371	0,919	0,645
10	2,5	4	6	0,031	0,971	0,969	0,029	0,340	0,944	0,642

C. Pengaruh parameter desain *Corner-Fillet Hinge* terhadap deformasi

Dari grafik data ketiga parameter desain pada Gambar 16, didapati bahwa parameter tebal *hinge* berpengaruh paling besar terhadap perubahan nilai deformasi. Hal tersebut juga diperkuat dari nilai F-Value pada uji ANOVA sebesar 214,38 yang merupakan nilai terbesar dibandingkan parameter lain.

Setiap parameter memiliki tren tersendiri apabila nilainya diubah. Gambar 26 menunjukkan tren yang konsisten, antara hasil simulasi dan teori, yaitu nilai deformasi menurun seiring dengan besarnya radius dan tebal *hinge*. Sebaliknya, peningkatan nilai panjang *hinge* cenderung menaikkan nilai deformasi.



Gambar 26

Perbandingan deformasi hasil simulasi dan teori yang dikaji oleh [13]

Untuk radius, nilai deformasi cenderung menurun seiring dengan peningkatan luas permukaan. Selain itu, penambahan tebal *hinge* juga menyebabkan deformasi semakin kecil, dengan tebal *hinge* menjadi parameter paling berpengaruh dalam mengatur besaran deformasi, dibuktikan dengan F-Value tertinggi. Peningkatan panjang *hinge* menyebabkan deformasi semakin besar karena rasio panjang *hinge* dengan parameter lainnya, mengurangi persentase luas penampang desain *corner-filleted hinge*.

Mengurangi tebal *hinge* efektif untuk meningkatkan deformasi, sesuai dengan rumus yang menunjukkan pengaruh besar terhadap perubahan deformasi. Desain optimal harus mempertimbangkan deformasi dan nilai *stress* minimum, sehingga diperlukan analisis ulang terhadap *stress* yang dihasilkan oleh model desain untuk memastikan kesesuaiannya dengan kriteria yang ditetapkan.

D. Pengaruh parameter desain *Corner-Fillet Hinge* terhadap *stress*

Setiap parameter desain *corner-filleted hinge* mempengaruhi nilai *stress* yang dihasilkan. Semua parameter memiliki P-Value di bawah 0,05, namun grafik pada Gambar 26 menunjukkan bahwa tebal *hinge* memiliki pengaruh terbesar terhadap perubahan nilai *stress*. Meskipun perubahan tebal *hinge* 3,5-4 mm kurang signifikan, hal ini dibuktikan dengan nilai F-Value pada parameter tebal *hinge* yang tertinggi dibanding parameter lainnya.

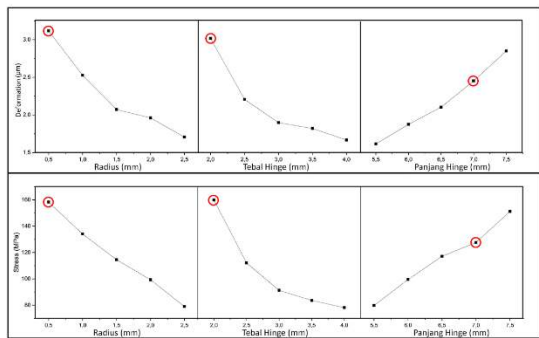
Setiap parameter desain mempengaruhi perubahan nilai *stress* yang dihasilkan. Tren ini sesuai dengan penelitian [7]). Parameter radius menunjukkan tren penurunan *stress* dengan peningkatan besarannya, dan tren yang sama terjadi pada tebal *hinge*, dimana semakin tebal *hinge*, semakin rendah nilai *stress*. Sebaliknya, peningkatan panjang *hinge* justru menyebabkan nilai *stress* yang lebih tinggi.

Tren yang dihasilkan setiap parameter menunjukkan bahwa nilai *stress* menurun seiring dengan peningkatan luas permukaan [18]. Peningkatan parameter radius dan tebal *hinge* memperbesar luas permukaan *corner-filleted hinge*, sehingga mengurangi *stress*. Sebaliknya, peningkatan panjang *hinge* mengurangi luas permukaan dan meningkatkan *stress*, sehingga panjang *hinge* tidak boleh terlalu panjang untuk

menurunkan *stress*. Menggabungkan perubahan parameter ini memungkinkan perancangan yang lebih baik dalam mengontrol *stress* pada *corner-tilleted hinge*.

E. Parameter desain *Corner-tilleted Hinge* yang optimal

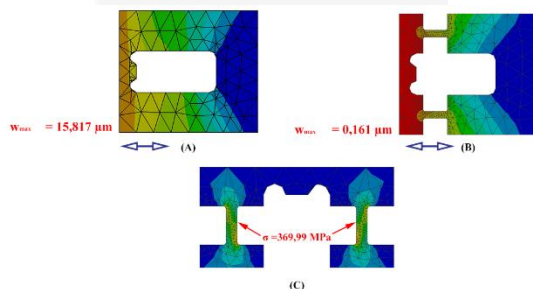
Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, parameter tebal *hinge* memiliki efek paling signifikan terhadap perubahan nilai deformasi dan *stress*. Parameter lain juga mempengaruhi hasil dari kedua hal tersebut. Solusi optimal ditampilkan pada Gambar 27, yang menunjukkan bahwa desain dengan parameter radius 0,5 mm, tebal *hinge* 2 mm, dan panjang *hinge* 7 mm adalah yang paling optimal untuk proses permesinan UVAM.



GAMBAR 27

Posisi setiap parameter desain optimal terhadap deformasi dan *stress*

Berdasarkan Gambar 27, kombinasi parameter optimal adalah radius 0,5 mm, tebal *hinge* 2 mm, dan panjang *hinge* 7 mm. Kombinasi ini memberikan nilai deformasi terbesar dengan tingkat *stress* yang masih dalam batas aman. Panjang *hinge* 7 mm dipilih karena memberikan deformasi tinggi tanpa menyebabkan *stress* berlebihan seperti pada panjang 7,5 mm, yang dapat melewati batas *tensile strength* dan berpotensi menyebabkan kegagalan struktural. Visualisasi deformasi dan *stress* pada desain yang optimal terdapat pada Gambar 20



GAMBAR 28

Hasil deformasi desain optimal (b) yang memiliki nilai deformasi 98 kali lebih besar dari model yang tidak menggunakan *flexure hinge* (a) dan *stress* (c) pada simulasi model yang optimal

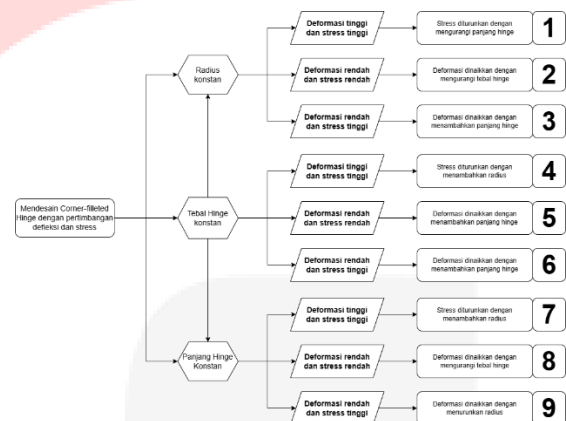
Gambar 28 menunjukkan hasil simulasi getaran dengan deformasi maksimum sebesar 15,817 µm, rata-rata deformasi 9,440 µm, dan *stress* sebesar 369,990 MPa. Nilai *stress* ini berada di bawah *tensile strength*, menandakan bahwa desain tidak melebihi batas regangan yang dapat menyebabkan kerusakan atau patah.

Gambar 28 (a) menunjukkan bahwa model tanpa *flexure hinge* memiliki nilai deformasi dan deformasi maksimum yang lebih rendah dibandingkan dengan model yang menggunakan *corner-tilleted hinge*. Oleh karena itu, hasil penelitian ini mendukung penerapan proses permesinan UVAM dengan

mengganti *tool holder* menggunakan desain *corner-tilleted hinge* dengan parameter ideal untuk memaksimalkan hasil permesinan berpresisi tinggi.

F. Alternatif pemanfaatan parameter desain *Corner-Fillet* pada UVAM

Untuk meningkatkan nilai deformasi, opsi utama adalah mengurangi ketebalan *hinge*, yang berkontribusi sekitar 80% dalam meningkatkan deformasi dan 76% dalam meningkatkan *stress* pada desain ideal. Parameter desain lainnya juga mempengaruhi deformasi dan *stress* sesuai dengan kebutuhan desain. Efek pengaturan parameter dapat ditunjukkan melalui berbagai skenario, yang telah disusun berdasarkan simulasi pada model sebelumnya dengan bahan AISI 1040.



GAMBAR 29

Skenario menaikkan maupun menurunkan deformasi dan *stress* apabila salah satu parameter tidak dapat diubah

Desain *corner-tilleted hinge* untuk UVAM harus dipertimbangkan dengan cermat untuk memastikan kinerja pemotongan *intermittent* yang optimal dan masa pakai komponen yang lama. Ukuran *corner-tilleted hinge* penting untuk mencapai keseimbangan antara deformasi yang tinggi dan nilai *stress* yang rendah. Contoh pendekatan solusi untuk situasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 29 adalah sebagai berikut:

1. Mengurangi panjang *hinge* sebanyak 0,5 mm dapat menurunkan deformasi $\approx -15\%$ dan dapat menurunkan *stress* $\approx -11\%$
2. Dengan mengurangi tebal *hinge* sebesar 0,5 mm, Tingkat deformasi yang dapat meningkatkan deformasi sebesar $\approx -13\%$ hingga $\approx -48\%$. Namun peningkatan deformasi yang dialami selaras dengan penambahan nilai *stress* sebesar $\approx -16\%$ hingga $\approx -44\%$
3. Untuk meningkatkan deformasi yang sudah memiliki nilai *stress* yang tinggi, maka dapat menambahkan panjang *hinge* sebanyak 0,5 mm yang akan memberikan penambahan deformasi $\approx -17\%$ dan hanya menambah nilai *stress* $\approx -10\%$
4. Dalam usaha menurunkan nilai *stress*, penambahan besaran radius dapat dilakukan karena penambahan besaran radius 0,5 mm dapat menurunkan nilai *stress* sebesar $\approx -15\%$ namun penurunan nilai *stress* yang didapat akan diiringi dengan pengurangan nilai deformasi sebesar $\approx -19\%$

5. Dengan menambah panjang *hinge* sebesar 0,5 mm, Tingkat deformasi yang dapat meningkatkan deformasi sebesar $\approx -17\%$. Namun peningkatan deformasi yang dialami selaras dengan penambahan nilai *stress* sebesar $\approx -10\%$
6. Untuk meningkatkan deformasi yang sudah memiliki nilai *stress* yang tinggi, maka dapat menambahkan panjang *hinge* sebanyak 0,5 mm yang akan memberikan penambahan deformasi $\approx -17\%$ dan hanya menambah nilai *stress* $\approx -10\%$
7. Dalam usaha menurunkan nilai *stress*, penambahan besaran radius dapat dilakukan karena penambahan besaran radius 0,5 mm dapat menurunkan nilai *stress* sebesar $\approx -15\%$ namun penurunan nilai *stress* yang didapat akan diiringi dengan pengurangan nilai deformasi sebesar $\approx -19\%$
8. Dengan mengurangi tebal *hinge* sebesar 0,5 mm, Tingkat deformasi yang dapat meningkatkan deformasi sebesar $\approx -13\%$ hingga $\approx -48\%$. Namun peningkatan deformasi yang dialami selaras dengan penambahan nilai *stress* sebesar $\approx -16\%$ hingga $\approx -44\%$
9. Untuk meningkatkan deformasi yang sudah memiliki nilai *stress* yang tinggi, maka dapat mengurangi besaran radius sebesar 0,5 mm yang akan memberikan penambahan deformasi $\approx -19\%$ dan hanya menambah nilai *stress* $\approx -15\%$

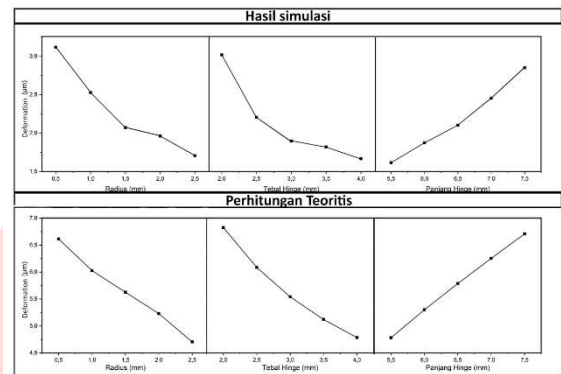
V. ANALISIS

Berdasarkan identifikasi data deformasi dan *stress* pada BAB IV, maka dilakukan analisis untuk menentukan pengaruh parameter desain serta desain yang paling optimal untuk memaksimalkan nilai deformasi dan meminimalkan *stress*. Nilai signifikan yang digunakan sebesar 5% untuk pengujian ANOVA.

1. Pengaruh parameter desain *Corner-Filletted Hinge* terhadap deformasi

Dari analisis data, ditemukan bahwa parameter tebal *hinge* memiliki pengaruh terbesar terhadap perubahan nilai deformasi, dengan nilai F-Value pada uji ANOVA sebesar 214,38, tertinggi dibandingkan parameter lainnya. Setiap parameter desain menunjukkan tren tertentu saat nilainya diubah:

- a. Tebal *Hinge*: Peningkatan tebal *hinge* cenderung menurunkan nilai deformasi. Ini menunjukkan bahwa tebal *hinge* sangat signifikan dalam mengatur besaran deformasi pada desain *Corner-filletted Hinge*.
- b. Radius: Nilai deformasi menurun seiring dengan peningkatan radius, sesuai teori bahwa deformasi berbanding terbalik dengan radius, karena luas permukaan yang lebih besar mengurangi deformasi.
- c. Panjang *Hinge*: Peningkatan panjang *hinge* menyebabkan nilai deformasi meningkat karena luas penampang yang efektif menurun.



Gambar 30 Perbandingan deformasi hasil simulasi dan teori yang dikaji oleh [13]

Gambar 30 menunjukkan konsistensi antara hasil simulasi dan teori, yaitu deformasi menurun dengan bertambahnya radius dan tebal *hinge*, sementara deformasi meningkat dengan panjang *hinge* yang lebih besar.

Untuk mencapai desain optimal, tidak hanya deformasi yang perlu diperhitungkan tetapi juga *stress* minimum. Analisis ulang *stress* diperlukan untuk memastikan desain sesuai dengan kriteria yang ditetapkan, menggabungkan parameter radius, tebal, dan panjang *hinge* untuk menghasilkan deformasi dan *stress* yang optimal.

2. Pengaruh parameter desain *Corner-filletted Hinge* terhadap stress

Setiap parameter desain *Corner-filletted Hinge* mempengaruhi nilai *stress* yang dihasilkan. Analisis menunjukkan bahwa tebal *hinge* memiliki pengaruh terbesar terhadap perubahan nilai *stress*, meskipun semua parameter memiliki nilai P-Value di bawah 0,05. Grafik pada Gambar 17 menunjukkan pengaruh signifikan dari tebal *hinge* terhadap *stress*, dengan nilai F-Value tertinggi dibandingkan parameter lainnya.

Beberapa tren yang ditemukan adalah:

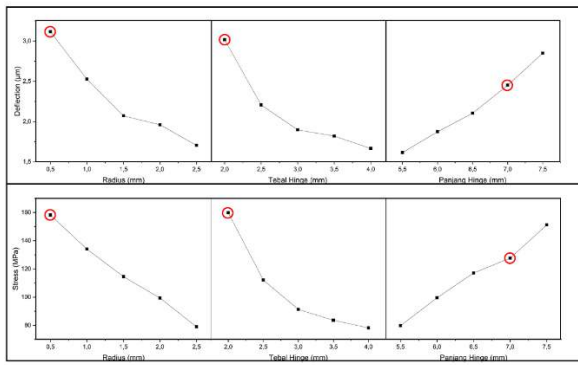
- Radius: Semakin besar radius, nilai *stress* menurun.
- Tebal *Hinge*: Semakin tebal *hinge*, nilai *stress* menurun.
- Panjang *Hinge*: Semakin panjang *hinge*, nilai *stress* meningkat.

Tren ini menunjukkan bahwa nilai *stress* menurun seiring dengan meningkatnya luas permukaan. Peningkatan parameter radius dan tebal *hinge* meningkatkan luas permukaan, sehingga mengurangi *stress*. Namun, peningkatan panjang *hinge* mengurangi luas permukaan, sehingga meningkatkan *stress*.

Dengan memahami pengaruh setiap parameter, desain yang optimal dapat dicapai untuk mengontrol *stress* pada *Corner-filletted Hinge*, misalnya dengan mengoptimalkan radius dan tebal *hinge* tanpa membuat panjang *hinge* terlalu besar.

3. Parameter desain *Corner-filletted Hinge* paling optimal

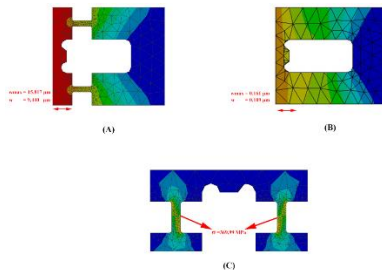
Berdasarkan analisis pada poin sebelumnya, tebal *hinge* merupakan parameter yang paling signifikan dalam mempengaruhi nilai deformasi dan *stress*. Namun, parameter lain juga berperan dalam mengoptimalkan hasil. Gambar 31 menunjukkan bahwa kombinasi parameter optimal untuk desain *Corner-filletted Hinge* adalah radius 0,5 mm, tebal *hinge* 2 mm, dan panjang *hinge* 7 mm, yang paling sesuai untuk proses permesinan UVAM.



GAMBAR 31

Posisi setiap parameter desain optimal terhadap deformasi dan stress

Gambar 31 mengilustrasikan posisi optimal setiap parameter desain terhadap deformasi dan stress. Kombinasi radius 0,5 mm, tebal *hinge* 2 mm, dan panjang *hinge* 7 mm memberikan deformasi yang tinggi dengan tingkat stress yang masih dalam batas aman. Panjang *hinge* 7 mm dipilih karena meskipun memberikan deformasi tinggi, stress yang dihasilkan tidak setinggi pada panjang 7,5 mm, sehingga mencegah kegagalan struktur akibat melebihi tensile strength.



GAMBAR 32

Hasil deformasi desain optimal (b) yang memiliki nilai deformasi 98 kali lebih besar dari model yang tidak menggunakan *flexure hinge* (a) dan stress (c) pada simulasi model yang optimal

Visualisasi deformasi dan stress pada desain optimal ditunjukkan pada Gambar 32. Hasil simulasi getaran menunjukkan deformasi maksimum (wmax) sebesar 15,817 μm dengan rata-rata 9,440 μm dan stress sebesar 369,990 MPa, yang berada di bawah nilai *tensile strength*. Hal ini menunjukkan bahwa desain tidak melebihi batas regangan yang dapat menyebabkan kerusakan.

Gambar 32 (b) menunjukkan bahwa model tanpa *flexure hinge* memiliki nilai deformasi dan deformasi maksimum lebih rendah dibandingkan dengan model *Corner-filleted*. Oleh karena itu, hasil penelitian ini mendukung penerapan proses permesinan UVAM dengan menggunakan desain *Corner-filleted Hinge* yang ideal untuk memaksimalkan hasil permesinan berpresisi tinggi.

4. Alternatif pemanfaatan parameter desain *Corner-filleted Hinge* pada UVAM

Untuk meningkatkan nilai deformasi pada desain *Corner-filleted Hinge*, opsi utama adalah mengurangi ketebalan *hinge*. Ketebalan dinding berkontribusi sebesar $\approx 80\%$ dalam meningkatkan deformasi dan $\approx 76\%$ dalam meningkatkan stress pada desain yang ideal. Parameter desain lainnya juga mempengaruhi deformasi dan stress. Beberapa skenario pengaturan parameter berdasarkan hasil simulasi menggunakan bahan AISI 1040 dan simulasi getaran FEA adalah sebagai berikut:

- Mengurangi panjang *hinge* sebanyak 0,5 mm dengan menurunkan deformasi $\approx 15\%$ dan menurunkan stress $\approx 11\%$.
- Mengurangi tebal *hinge* sebesar 0,5 mm dengan meningkatkan deformasi sebesar $\approx 13\%$ hingga $\approx 48\%$ dan meningkatkan stress sebesar $\approx 16\%$ hingga $\approx 44\%$
- Menambahkan panjang *hinge* sebanyak 0,5 mm untuk meningkatkan deformasi dengan menambah deformasi $\approx 17\%$ dan menambah stress $\approx 10\%$
- Menambah besaran radius sebesar 0,5 mm untuk menurunkan stress dengan menurunkan stress sebesar $\approx 15\%$ dan menurunkan deformasi sebesar $\approx 19\%$
- Mengurangi tebal *hinge* sebesar 0,5 mm lagi dengan meningkatkan deformasi sebesar $\approx 13\%$ hingga $\approx 48\%$ dan meningkatkan stress sebesar $\approx 16\%$ hingga $\approx 44\%$
- Menambahkan panjang *hinge* sebanyak 0,5 mm lagi untuk meningkatkan deformasi dengan menambah deformasi $\approx 17\%$ dan menambah stress $\approx 10\%$
- Menambah besaran radius sebesar 0,5 mm lagi untuk menurunkan stress dengan menurunkan stress sebesar $\approx 15\%$ dan menurunkan deformasi sebesar $\approx 19\%$
- Mengurangi tebal *hinge* sebesar 0,5 mm lagi dengan meningkatkan deformasi sebesar $\approx 13\%$ hingga $\approx 48\%$ dan meningkatkan stress sebesar $\approx 16\%$ hingga $\approx 44\%$
- Mengurangi besaran radius sebesar 0,5 mm untuk meningkatkan deformasi dengan menambah deformasi $\approx 19\%$ dan menambah stress $\approx 15\%$

VI. KESIMPULAN

Kajian yang dilakukan untuk mengetahui parameter desain optimal *filetted corner hinge* untuk penggunaan pada *ultrasonic vibration assisted machining* (UVAM) telah dilaksanakan. Ditemukan bahwa kombinasi parameter dengan ukuran radius (R) sebesar 0,5 mm (R), tebal *hinge* (t) sebesar 2 mm, dan panjang *hinge* (l) sebesar 7 mm merupakan desain optimal untuk memaksimalkan deformasi (w) serta meminimalkan stress (σ). Dengan nilai deformasi 9,440 dan deformasi maksimum 15,817 μm , model ini menunjukkan deformasi yang lebih besar daripada tanpa *flexure hinge*. Stress yang dihasilkan juga tidak melampaui *tensile strength* AISI 1040 (620 MPa), dengan nilai 369,990 MPa.

Selain itu dapat dipahami pengaruh setiap parameter desain serta alternatif untuk mengoptimalkan desain sebagai berikut:

- Analisis menunjukkan bahwa radius (R) memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap perubahan nilai deformasi (w), dan juga stress (σ). Namun efek yang diberikan tidak sebesar tebal *hinge* (t), sehingga dapat dijadikan pilihan alternatif dalam meningkatkan nilai deformasi.
- Tebal *hinge* (t) memiliki pengaruh terbesar terhadap perubahan nilai deformasi (w) dan stress (σ). Oleh karena itu, tebal *hinge* menjadi opsi utama untuk mengoptimalkan desain, meskipun perlu memperhatikan besaran stress yang dihasilkan supaya tidak melebihi *tensile strength* yang dapat mengakibatkan kegagalan struktur.

3. Walaupun tidak sebesar tebal *hinge*, panjang *hinge* (l) memiliki pengaruh yang besar terhadap deformasi (w) dan stress (σ), sehingga dapat menjadi opsi alternatif dalam meningkatkan deformasi namun tidak menambahkan terlalu banyak *stress*.

REFERENSI

- [1] W. Chen, L. Zheng, X. Teng, K. Yang, and D. Huo, "Cutting Mechanism Investigation in Vibration-Assisted Machining," *Nanomanufacturing and Metrology*, vol. 1, no. 4, pp. 268–276, Dec. 2018, doi: 10.1007/s41871-018-0031-x.
- [2] H. Martins and H. Puga, "Ultrasonic Assisted Machining Overview: Accessing Feasibility and Overcoming Challenges for Milling Applications," May 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/met13050908.
- [3] H. Z. Firouzabadi, "Precision Force Measurement and Control in Micro Ultrasonic Machining," 2017. [Online]. Available: www.SID.ir
- [4] X. Hao, K. Cai, Z. Xu, and X. Peng, "Design of Flexible Hinge of Micro-vibration Platform Based on Three-Translational Parallel Mechanism," in *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, IEEE, Mar. 2010, pp. 993–996. doi: 10.1109/ICMTMA.2010.452.
- [5] H. T. Kien, N. T. Van Phat, and P. D. Le Hai, "Design of the Flexure Hinge Utilized for Ultrasonic-Aided Machining," in *2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, IEEE, Nov. 2018, pp. 213–216. doi: 10.1109/GTSD.2018.8595592.
- [6] S. Linß, P. Schorr, and L. Zentner, "General design equations for the rotational stiffness, maximal angular deflection and rotational precision of various notch flexure hinges," *Mechanical Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 29–49, Jan. 2017, doi: 10.5194/ms-8-29-2017.
- [7] L. Rui-qi, "Analytical Solution of Stiffness for a Corner-Fillet Leaf-Spring Type Flexure Hinge with a Long Fatigue Life," *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, vol. 6, no. 3, p. 64, 2018, doi: 10.11648/j.ijmea.20180603.14.
- [8] F. Harfensteller, S. Henning, L. Zentner, and S. Husung, "Modeling of corner-fillet flexure hinges under various loads," *Mech Mach Theory*, vol. 175, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104937.
- [9] X. H. Shen, J. H. Zhang, H. Li, J. J. Wang, and X. C. Wang, "Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 63, no. 1–4, pp. 41–49, Nov. 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3882-5.
- [10] R. Andias Anugraha and A. Kusnayati, "OPTIMASI WAKTU & BIAYA PADA PROSES PENGUJIAN CUTTING TEMPERATURE PADA TOOL HOLDER ULTRASONIC VIBRATION ASSISTED TURNING DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA TIME & COST OPTIMIZATION OF CUTTING TEMPERATURE TEST ON ULTRASONIC VIBRATION ASSISTED TURNING TOOL HOLDER WITH FINITE ELEMENT METHOD."
- [11] H. Rachmat, M. R. Ibrahim, and S. Bin Hasan, "Design selection of an innovative tool holder for ultrasonic vibration assisted turning (IN-UVAT) using finite element analysis simulation," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Apr. 2017. doi: 10.1063/1.4981170.
- [12] N. Lobontiu, J. S. N. Paine, E. Garcia, and M. Goldfarb, "Corner-fillet flexure hinges," *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 123, no. 3, pp. 346–352, 2001, doi: 10.1115/1.1372190.
- [13] Y. Du and T. Li, "Empirical compliance equations for conventional single-axis flexure hinges," *SN Appl Sci*, vol. 1, no. 11, Nov. 2019, doi: 10.1007/s42452-019-1532-y.
- [14] C. Zhang, C. Cheung, B. Bulla, and C. Zhao, "An investigation of the high-frequency ultrasonic vibration-assisted cutting of steel optical moulds," *Micromachines (Basel)*, vol. 12, no. 4, Apr. 2021, doi: 10.3390/mi12040460.
- [15] L. Yang and M. Zhang, *Research on the Influence of Cutting Speed on Vibration Cutting Force*. 2017.
- [16] Piezotechnics GmbH., "Our Standard Piezo Actuator Stacks General Specifications.," <https://www.piezotechnics.com/piezos/piezo-stacks-specs/>.
- [17] Davey, "AISI 1040 Carbon Steel (UNSG10400)," 2012. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6525>
- [18] W. D. Pilkey, *Formulas for stress, strain, and structural matrices*. John Wiley & Sons, 2005.