

Optimisasi Parameter Desain *Asymmetric Notch Hinge* Dengan Metode Elemen Hingga Untuk Penggunaan Pada *Ultrasonic Vibration Assisted Turning* (UVAT)

1st Naufal Hilman Syafiq
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

naufalhilman@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Teddy Sjafrizal
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

teddysjafrizal@telkomuniversity.ac.id

3rd Rino Andias Anugraha
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

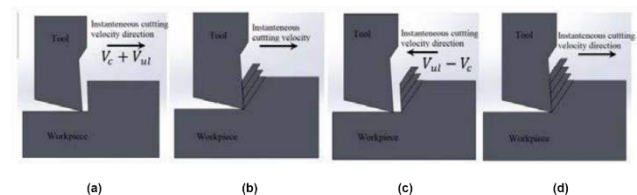
rinoandias@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Teknik permesinan Ultrasonic Vibration Assisted Turning (UVAT) adalah salah satu teknik permesinan yang menggunakan gelombang ultrasonik untuk menciptakan gerakan relatif antara alat potong dan benda kerja yang menghasilkan pemotongan dengan tingkat presisi tinggi. Kajian ini difokuskan pada peningkatan efisiensi dan kualitas permesinan UVAT dengan mempelajari karakteristik *asymmetric notch hinge*. Simulasi ini dilakukan untuk memahami karakteristik *asymmetric notch hinge* dengan parameter (radius, tebal hinge, dan jarak antar hinge) dalam menghantarkan getaran untuk memaksimalkan deformasi dan mengurangi hinge stress. Pengaruh dari setiap parameter desain akan dievaluasi menggunakan metode full factorial. Hinge yang lebih tebal dapat mengurangi stress dan mengurangi deformasi. Sementara radius yang lebih besar dapat memperbesar stress dan meningkatkan deformasi. Namun perubahan ukuran jarak antar hinge tidak diketahui pengaruh terhadap deformasi dan stress. Desain yang optimal ditentukan dengan metode gray relational analysis dengan hasil optimal yaitu 1 mm radius, 6.5 mm tebal hinge, dan 7 mm jarak antar hinge. Desain ini dapat memaksimalkan deformasi pada tool hingga 8.56 μm dan meminimasi stress yang diterima sebesar 216.91 Mpa. Dengan demikian, hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mengembangkan desain optimal yang dapat meningkatkan tingkat deformasi dalam permesinan UVAT.

Kata kunci— UVAT, Flexure Hinge, Asymmetric Notch Hinge, Deformasi, Parameter Desain, Finite Element

I. PENDAHULUAN

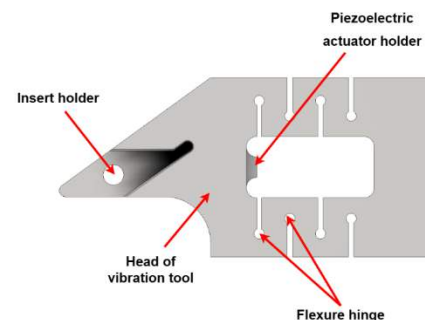
Ultrasonic Vibration Assisted Turning (UVAT) pada industri manufaktur merupakan teknik pemotongan benda kerja dengan memanfaatkan getaran pahat yang dihasilkan oleh *piezoelectric*. Mekanisme pemotongan pada UVAT dilakukan dengan *intermittent cutting mechanism* yaitu adanya gerakan pemisahan antara permukaan penggaruk alat pemotong (mata pahat) dengan material yang belum dipotong. Lalu, dengan adanya mekanisme UVAT membuat terjadinya pengurangan pada *cutting force* dan *cutting temperature* [1].



GAMBAR II.1

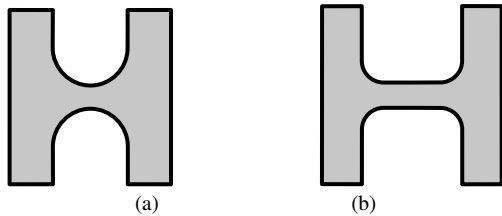
Ilustrasi pemotongan teknik *Ultrasonic Vibration Assisted Turning* (UVAT) (a) *cutting tool* mendekati *workpiece*, (b) posisi pemakanan awal, (c) posisi *intermitten* dan (d) melanjutkan pemakanan

Intermittent cutting mechanism yang digunakan dalam mekanisme UVAT diakibatkan oleh getaran yang berasal dari modul vibrator ataupun *piezoelectric* sehingga munculnya gerakan pemisahan yang dapat memengaruhi gaya yang bekerja pada mata pahat. *Piezoelectric* ditujukan untuk menghasilkan gerakan presisi dengan gaya yang konsisten dan dapat menghasilkan getaran berfrekuensi tinggi [2]. Dengan adanya *piezoelectric* tetap tidak cukup untuk menghasilkan deformasi yang lebih baik sehingga adanya desain yang disebut *flexure hinge* yang digunakan untuk membantu meningkatkan getaran yang dihasilkan oleh *piezoelectric*.



GAMBAR II.2
Komponen pada Vibration Tool

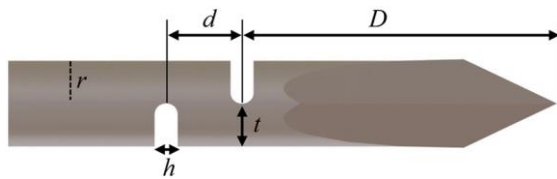
Vibration tool dengan mekanisme UVAT memanfaatkan desain *flexure hinge* untuk membantu dalam menghantarkan getaran yang dihasilkan oleh *piezoelectric* menuju *tool insert*. Ditemukan bahwa rentang perpindahan getaran yang terkait dengan aktuator piezo relatif kecil. Karena perpindahan getaran yang relatif kecil dan output gaya tinggi, *piezoelectric* diletakkan bersamaan dengan *flexure hinge* untuk memaksimalkan deformasi yang dihasilkan oleh *piezoelectric* [3].



GAMBAR II.3

Tipe Flexure Hinge, (a) Notch Hinge, (b) Leaf Spring Hinge

Flexure hinge merupakan bagian dinding tipis antara dua bagian kaku yang berdekatan melalui bentuk pelenturan atau pembengkokan [4]. *Notch hinge* (a) memiliki celah dengan bentuk lengkungan setengah lingkaran, berbeda dengan *leaf spring hinge* (b) memiliki celah yang bersifat tegak lurus dan berbentuk siku-siku. *Notch hinge* memiliki kekuatan yang lebih baik, akurasi yang lebih baik, dan deformasi yang lebih terpusat jika dibandingkan dengan deformasi pada *leaf spring hinge* yang lebih tersebar pada *vibration tool* [5].



GAMBAR II.4

Parameter desain Asymmetric Notch Hinge

Parameter desain pada *Asymmetric Notch Hinge* yaitu tebal *hinge* (t), radius *hinge* (h), jarak antar *hinge* (d). Berdasarkan kajian seperti [6] dan [1] belum adanya pembahasan mengenai penggunaan *Asymmetric Notch Hinge* pada *vibration tool*, tidak adanya pembahasan parameter desain dengan tujuan untuk menghasilkan deformasi yang maksimal dan *stress* yang minimum sehingga kajian mengenai optimasi parameter desain *Asymmetric Notch Hinge* dengan metode elemen hingga layak dilakukan guna menghasilkan desain yang optimal dalam memaksimalkan deformasi (w) serta meminimalkan *stress* (σ) untuk diterapkan pada permesinan UVAT.

Metode elemen hingga digunakan untuk melakukan kajian tersebut dengan tujuan memperoleh data dengan bantuan software Ansys Workbench untuk melakukan simulasi getaran dari *piezoelectric* dan melakukan uji ANOVA untuk mengidentifikasi parameter desain yang memiliki pengaruh paling signifikan. Dengan variasi parameter desain, Metode *Full Factorial* digunakan untuk menentukan kombinasi parameter desain untuk model yang disimulasikan dengan metode elemen hingga. Model yang optimal dapat ditentukan dengan metode *grey relational analysis* yang menggunakan respons yaitu memaksimalkan

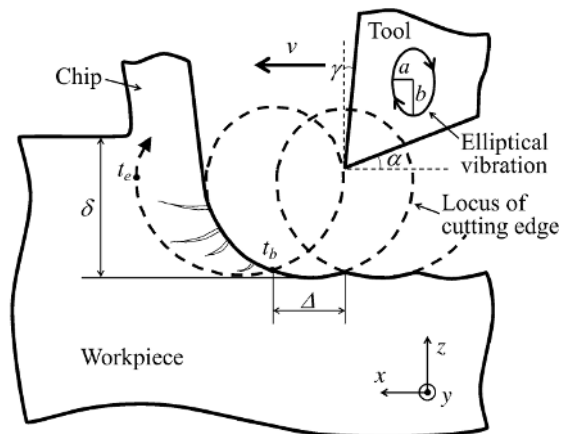
deformasi (*larger the better*) dan meminimalkan *stress* (*smaller the better*).

II. KAJIAN TEORI

Dalam melakukan kajian mengenai optimisasi parameter desain *notch hinge* untuk aplikasi pada *vibration tool* UVAT memerlukan informasi *Ultrasonic Vibration Assisted Machining* (UVAT), *vibration tool*, *flexure hinge*, *notch hinge*, deformasi, dan metode elemen hingga. Informasi tersebut dikaji dalam bab ini untuk mendukung penyelesaian masalah.

A. Karakteristik Ultrasonic Vibration Assisted Machining (UVAT)

Ultrasonic Vibration Assisted Machining (UVAT) merupakan teknik permesinan untuk menambahkan gaya berfrekuensi tinggi (>20000 Hz) dengan memanfaatkan getaran pahat yang dihasilkan oleh *piezoelectric* pada *vibration tool*.



GAMBAR II.1

Gerakan pemotongan intermiten dan garis putus-putus sebagai gerakan tool yang membentuk gelombang sinusoidal

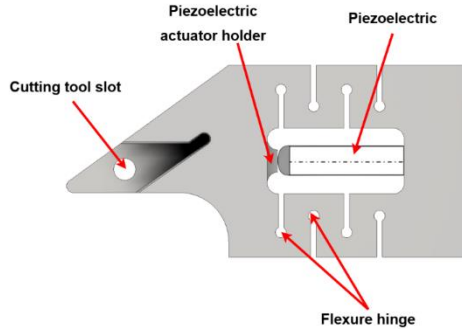
Mekanisme pemotongan pada UVAT dilakukan dengan *intermittent cutting mechanism* yaitu adanya gerakan pemisahan antara permukaan penggaruk alat pemotong dengan material yang belum dipotong ataupun gerakan sinusoidal. Lalu, dengan adanya mekanisme UVAT membuat terjadi pengurangan pada *cutting force* dan *cutting temperature* [1].

UVAT dapat menghasilkan permukaan yang presisi dan memberikan keunggulan seperti peningkatan umur alat, penurunan gaya pemotongan, dan peningkatan kemampuan permesinan bahan pemotongan yang keras. UVAT diusulkan untuk memberikan alternatif pengurangan deformasi plastis yang berlebihan selama proses permesinan. UVAT merupakan teknik permesinan yang digunakan pada proses pemotongan dimana frekuensi getaran tertentu diterapkan pada komponen *vibration tool* untuk mencapai performansi pemotongan yang lebih baik.

B. Komponen pada Vibration Tool

Teknik permesinan UVAT yang diterapkan pada *vibration tool* yang terdiri dari *tool insert*, *piezoelectric*, dan *flexure hinge*. *Vibration tool* dipasang pada mesin dan dapat bergerak sepanjang arah pemakanan sehingga pahat dapat

membuat pola pemotongan secara bertahap saat benda kerja berputar.



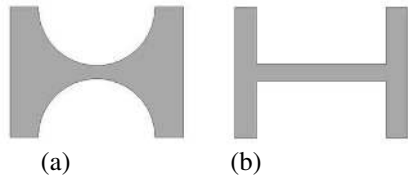
GAMBAR II.2
Komponen pada Vibration Tool

Getaran yang dihasilkan oleh *piezoelectric* dapat menghasilkan deformasi pada bagian insert holder yang membuat pemakanan bergerak secara elliptikal. Pada *vibration tool* terdapat desain *flexure hinge* agar dapat menghantarkan getaran yang dihasilkan *piezoelectric* menuju *insert holder* menjadi lebih baik. Desain *flexure hinge* memiliki variasi jenis yang dapat diterapkan pada *vibration tool* untuk mencapai deformasi maksimum namun tetap meminimasi *stress* pada *flexure hinge* selama proses permesinan UVAT.

C. Fungsi dan Desain *Flexure Hinge* untuk Peningkatan Vibrasi

Flexure Hinge merupakan bagian dinding tipis antara dua bagian kaku yang berdekatan melalui bentuk pelenturan atau pembengkokan. *Flexure Hinge* memiliki mekanisme dimana tidak memerlukan perbaikan karena mekanisme akan bekerja sampai gagal yang biasanya dikarenakan aus atau kelebihan beban [4]. Dengan fleksibilitasnya, *flexure hinge* dapat menangani pergerakan terbatas seperti getaran, yang dapat meningkatkan deformasi pada *vibration tool*. Penggunaan *flexure hinge* adalah pendekatan yang paling sesuai untuk meningkatkan getaran yang dihasilkan oleh bahan piezoelektrik.

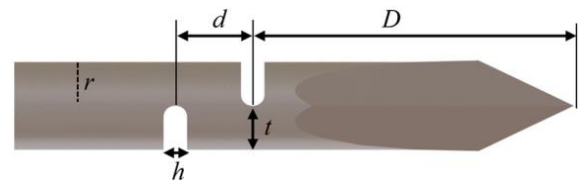
Secara umum ketika mekanisme aktuator listrik dirancang, seluruh struktur mekanisme dirancang, sedangkan mekanisme pada *Flexure Hinge* dirancang dengan bentuk yang ada. Terdapat dua jenis *Flexure Hinge* yang ada yaitu *Circular Flexure Hinges (Notch Hinge)* dan *Leaf Flexure Hinges* [7].



GAMBAR II.3
(a) *Notch Hinge* dan (b) *Leaf Flexure Hinge*

D. Parameter desain *Asymmetric Notch Hinge*

Asymmetric notch hinge dipilih untuk dikaji karena banyak diaplikasikan dalam bidang-bidang yang memerlukan fleksibilitas tinggi dalam pergerakannya. Gambar II.4 merupakan visualisasi bagian yang menjadi parameter utama pada *asymmetric notch hinge*.



GAMBAR II.4
Parameter desain *asymmetric notch hinge*

Berdasarkan Gambar II.4, Besarnya deformasi ditentukan oleh parameter desain pada *Asymmetric Notch Hinge* yaitu tebal *hinge* (t), radius *hinge* (h), jarak antar *hinge* (d). *Asymmetric notch hinge* memiliki konsentrasi tekanan di bagian tertipis pada *notch* dan menyediakan pusat sumbu rotasi sehingga menghasilkan sumbu rotasi yang terdefinisi dengan baik dari getaran yang disalurkan [8]. Dengan *asymmetric notch hinges* yang memiliki konsentrasi tekanan terpusat, maka getaran yang diberikan dapat tersalurkan dengan baik. Dengan media penyaluran getaran yang baik maka dapat memberikan efek baik pada kualitas *part*, masa pakai alat, dan produktivitas [6].

Efisiensi tinggi dan kualitas pemotongan mesin yang baik dapat dicapai dengan memanfaatkan deformasi dalam desain, sehingga diperlukan optimalisasi parameter desain untuk mencapai maksimal deformasi dan *stress* yang minimum.

E. Keterkaitan Deformasi dan *Stress*

Deformasi merupakan perubahan bentuk atau ukuran suatu material akibat gaya yang diterapkan. Deformasi (ω) didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan panjang (ΔL) dengan panjang awal (L_0). ω_{max}

$$\omega = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (II.1)$$

Modulus young merupakan perbandingan antara *stress* dan regangan. *Modulus young* dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$E = \frac{\sigma}{\omega} = \frac{FL_0}{A\Delta L} \quad (II.2)$$

Dimana E = *Modulus of Young* (GPa atau N/mm²), F = *Load* atau *force* (N), dan A = Luas penampang

Sementara *stress* adalah gaya internal per satuan luas yang bekerja dalam suatu material sebagai respons terhadap gaya eksternal yang diterapkan. Secara matematis, *stress* didefinisikan sebagai:

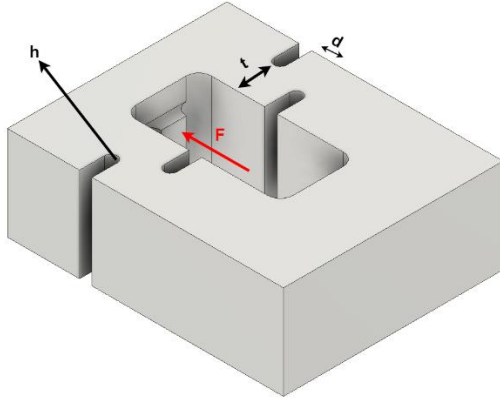
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (II.3)$$

Dimana σ = *Stress*, F = *Load* atau *force* (N), dan A = Luas penampang material

Persamaan II.2 dan II.3 menunjukkan adanya keterkaitan. Semakin besar nilai *stress* (σ) maka F pada persamaan II.3 akan memiliki nilai yang semakin besar. Semakin besar nilai F maka $\Delta x(\omega)$ akan memiliki nilai yang semakin besar dan juga sebaliknya.

F. Peran Asymmetric Notch *Hinge* terhadap Deformasi dan Stress

Asymmetric Notch Hinge berfungsi sebagai komponen yang meregang pada alat getar ketika digerakkan oleh piezoelektrik untuk mencapai deformasi maksimum dan minimum *stress*. Pada *asymmetric notch hinge*, parameter desain dapat diubah ukurannya sehingga menghasilkan luas penampang untuk mencapai deformasi yang diinginkan.



GAMBAR II.5

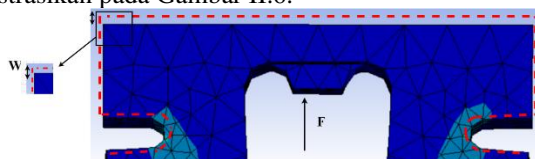
Parameter desain *asymmetric notch hinge* dan posisi *force* (N)

Arah *force* dan luas penampang memiliki keterkaitan yaitu gaya bekerja tegak lurus terhadap luas penampang. Luas penampang yang dihitung adalah area yang tegak lurus dengan arah *force*. *Stress* memiliki hubungan berbanding terbalik dengan luas penampang yang berarti bahwa jika luas penampang material semakin besar maka tegangan yang dialami akan semakin kecil dan berlaku sebaliknya. Hal tersebut sesuai dengan persamaan II.3.

Luas penampang yang lebih besar dapat menghasilkan *stress* yang lebih kecil dengan deformasi yang lebih kecil. Hal tersebut sesuai dengan persamaan II.2 yang menyatakan bahwa deformasi dan *stress* memiliki hubungan berbanding lurus sehingga diperlukan optimalisasi parameter desain untuk mencapainya.

G. Pengaruh Deformasi pada UVAT

Deformasi memiliki pengaruh yang signifikan pada UVAT (Ultrasonic Vibration Assisted Machining). Deformasi saat benda diberikan gaya dan frekuensi diilustrasikan pada Gambar II.6.



GAMBAR II.6

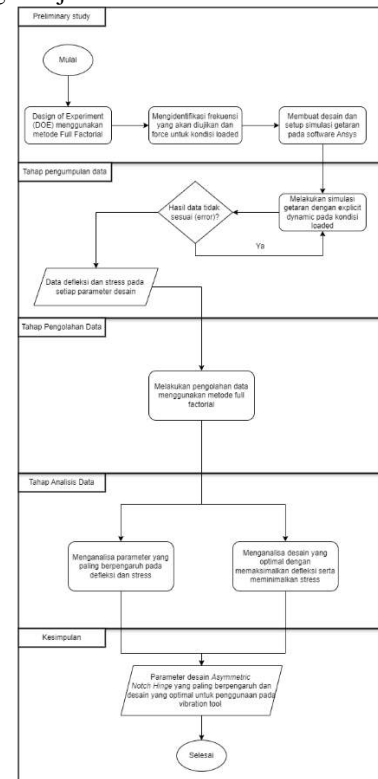
Ilustrasi deformasi pada *asymmetric notch hinge* pada gaya (F) dan deformasi (w), *asymmetric notch hinge* merenggang ketika diberi gaya

Deformasi adalah perubahan posisi atau perpindahan suatu struktur atau elemen dari posisi awalnya akibat adanya beban atau gaya yang bekerja padanya. Kontrol deformasi yang baik dapat meningkatkan kualitas permukaan akhir dengan menghasilkan hasil pemotongan yang lebih halus dan presisi tinggi. Selain itu, deformasi optimal meningkatkan efisiensi permesinan dengan mempercepat laju pemotongan dan mengoptimalkan penggunaan material. Dengan peningkatan deformasi juga dapat mengurangi kontak *tool* dengan material sesuai dengan teknik pemotongan *intermiten*

sehingga dapat mengurangi gaya pemotongan terhadap *tool* tersebut. Selain itu, mengendalikan deformasi meminimalkan risiko kerusakan atau cacat pada benda kerja selama proses pemesinan.

III. METODE

Penyelesaian masalah optimisasi parameter desain *asymmetric notch hinge* untuk aplikasi pada vibration tool UVAT dengan metode elemen hingga 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 II.7

Sistematika Penyelesaian Masalah

Berdasarkan pada alur proses pada Gambar III.1, penyelesaian masalah dilakukan melalui beberapa tahapan berikut yaitu :

1. *Design of experiment* (DOE) menggunakan metode *full factorial*

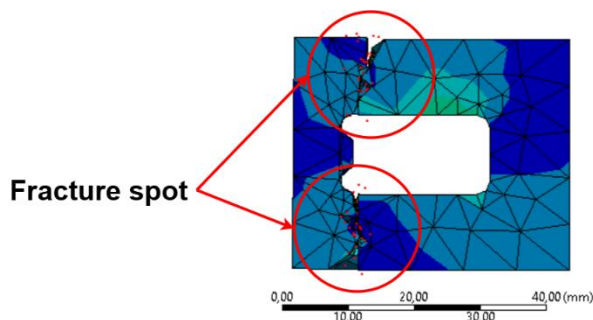
Pada langkah ini dilakukan pengujian variasi desain *notch hinge* yang berbeda yang akan digunakan dalam eksperimen yang dapat mencakup semua aspek dalam desain *Notch Hinge*. Untuk setiap parameter desain memiliki 5 level parameter. Berikut merupakan detail masing-masing level parameter desain pada Tabel III.1

TABEL II.1
Level Parameter Desain Asymmetric Notch Hinge

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Radius	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm

Tebal <i>Hinge</i>	6,5 mm	7 mm	7,5 mm	8 mm	8,5 mm
Jarak antar <i>hinge</i>	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm

Pemilihan ukuran level 1 pada setiap parameter didasari oleh uji coba yang gagal apabila nilainya diturunkan sebesar 0,5 mm. Hasil uji coba memperlihatkan model yang gagal secara struktur pada Gambar III.2 Model tersebut gagal secara struktur dikarenakan nilai *stress* yang melebihi *tensile strength* AISI 1040 yaitu 620 MPa. Interval setiap level hanya 0,5 mm agar menghasilkan kombinasi yang lebih terperinci. Sementara untuk parameter jarak antar *hinge* menggunakan interval 1 mm untuk memberikan hasil yang mewakili seluruh bagian yang dapat diaplikasikan desain *asymmetric notch hinge*. Maka dari itu dipilih parameter sesuai dengan Tabel III.1 untuk menilai kemampuan minimum dari *asymmetric notch hinge*.



GAMBAR II.8

Distribusi *stress* pada model dengan $R = 1$ mm, $t = 6$ mm dan $d = 4$ mm yang gagal secara struktur pada bagian *Notch Hinge* dikarenakan menerima *stress* yang lebih besar dari *tensile strength* yaitu 620 MPa

Level tersebut dikombinasi hingga menghasilkan 125 kombinasi yang selanjutnya dibuat desain yang akan dimasukkan pada software simulasi. Lalu dengan bantuan software minitab dapat menghasilkan perincian kombinasi parameter desain. Hasil kombinasi terdapat pada Lampiran A.

2. Mengidentifikasi frekuensi yang akan diujikan dan *force* untuk kondisi *loaded*

Pada kajian ini frekuensi yang digunakan yaitu frekuensi tinggi (*ultrasonic*) sebesar 20000 Hz yang dihasilkan oleh piezoelectric. Berdasarkan hasil *modal analysis* pada Lampiran A menunjukkan tidak ada data yang sama namun terdapat data yang mendekati nilai frekuensi yang digunakan sehingga perlu dilakukan simulasi *explicit dynamics* untuk mengetahui apakah terjadi kerusakan structural atau tidak.

Lalu, kondisi *loaded* dengan penambahan data *cutting force* yang diterapkan pada simulasi getaran ketika proses UVAT berlangsung. Force yang digunakan pada kondisi *loaded* menggunakan data terbesar sebagai berikut yaitu $F_x = 4,466$ N, $F_y = 139,024$ N dan $F_z = 80,282$ N [15] supaya mampu menguji kekuatan maksimal model.

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

Pada tahap ini dilakukan pembuatan model dengan menggunakan software yaitu Autodesk Inventor 2023 dan pembuatan setup simulasi menggunakan software yaitu

Ansys Workbench 2021. Kajian ini juga menggunakan komponen kelengkapan dengan spesifikasi sebagai berikut :

a. *Piezoelectric ceramic*

Piezoelectric digunakan sebagai sumber getaran yang akan digunakan pada permesinan dengan mekanisme UVAT. *Piezoelectric* dari Perusahaan piezotechnics digunakan sebagai data masukan dalam simulasi getaran dengan spesifikasi pada Tabel III.2.

TABEL II.2
Spesifikasi *Piezoelectric*

Spesifikasi		Keterangan
Tipe <i>piezoelectric</i>		PB10.18
Luas permukaan		10×10 mm
Panjang		18 mm
<i>Displacement</i>	0-150 V	20 μ m
	-30 – 150 V	28 μ m
<i>Force</i>		3500 N
<i>Stiffness</i>		200 kN/mm
Frekuensi gema		76 kHz

b. AISI 1040

Untuk melakukan setup simulasi getaran menggunakan software Ansys Workbench 2021, diperlukan input data material AISI 1040. AISI 1040 adalah jenis baja karbon menengah yang mengandung sekitar 0,40% karbon, yang memberikan keseimbangan antara kekuatan dan kemampuan mesin. Baja ini memiliki sifat mekanis yang baik, termasuk kekuatan tarik dan keuletan, sehingga dipilih menjadi material *tool holder* UVAT. AISI 1040 juga mudah ditempa, membuatnya fleksibel untuk berbagai proses manufaktur [16].

TABEL II.3
Spesifikasi AISI 1040

Jenis Data	Nilai
<i>Density</i>	7844,5 kgm ⁻³
<i>Young's Modulus</i>	201,6 GPa
<i>Poisson'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*

Untuk memperoleh data yang dibutuhkan, simulasi getaran dilakukan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor 2023 dan Ansys Workbench 2021. Autodesk Inventor 2023 digunakan untuk memodelkan dan merancang geometri benda kerja, sementara Ansys Workbench 2021 digunakan untuk menjalankan analisis getaran. Kombinasi kedua perangkat lunak ini memungkinkan pengkaji untuk secara akurat mensimulasikan kondisi getaran dan memperoleh data seperti deformasi dan tegangan yang terjadi pada model.

4. Melakukan simulasi getaran dengan metode elemen hingga

Simulasi yang dilakukan pada Ansys Workbench 2021 yaitu menggunakan *Modal Analysis* untuk mengidentifikasi *natural frequency* pada model dan *explicit dynamics* untuk mendapatkan nilai deformasi dan *stress*. Tahapan dalam melakukan simulasi getaran terdapat pada Lampiran C.

5. Melakukan pengolahan data menggunakan uji ANOVA. Data deformasi dan tegangan yang dihasilkan dari simulasi akan diolah menggunakan software Minitab 19 untuk mengidentifikasi parameter yang paling berpengaruh dan menentukan desain terbaik dengan cara memaksimalkan

deformasi dan meminimalkan tegangan. Uji ANOVA yang diterapkan mencakup one-way dan two-way dengan tingkat signifikansi 5%. Uji one-way digunakan untuk menentukan signifikansi dari masing-masing parameter terhadap perubahan deformasi dan *stress*, sedangkan uji two-way digunakan untuk mengevaluasi signifikansi korelasi antara dua parameter terhadap perubahan deformasi dan *stress*.

6. Menentukan desain yang optimal dengan metode *grey relational analysis*

Desain yang optimal dipilih menggunakan metode *grey relational analysis* dengan respon yang dimasukkan pada *software* yaitu memaksimalkan deformasi (*larger the better*) dan meminimalisir *stress* (*smaller the better*). Metode tersebut sesuai dengan teori *grey relational analysis* untuk menghasilkan parameter desain yang optimal dengan 2 respon dan 3 parameter untuk diterapkan pada *vibration tool* UVAT. Tahapan dalam melakukan optimisasi sebagai berikut:

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

A. Identifikasi Sistem Terintegrasi

Setiap komponen saling terintegrasi untuk mendukung pengerjaan tugas akhir. Energi yaitu listrik yang menjadi sumber tenaga dari mesin. Lalu mesin tersebut dioperasikan oleh manusia untuk melakukan proses simulasi getaran dengan menginput informasi pada *software* tersebut. Manusia sebagai operator mesin yang mengerjakan tugas akhir serta menerima informasi yang dapat mendukung pengerjaan tugas akhir.

Pada suatu sistem terintegrasi, setiap elemen yang ada pada sistem tersebut saling berkorelasi sehingga menjadi satu kesatuan dalam sistem tersebut untuk mencapai tujuan yang ditetapkan. Setiap elemen yang ada saling berkaitan dan tidak dapat dipisahkan antara satu dengan yang lainnya. Elemen yang terdapat pada sistem terintegrasi terdiri dari manusia (*man*), material (*material*), mesin (*machine*), informasi (*information*), dan energi (*energy*).

Elemen Sistem	Komponen Sistem
Manusia	Operator mesin
Material	AISI 1040
Mesin	<i>Personal computer</i> yang dilengkapi dengan <i>software</i> Autodesk Inventor 2023 dan Ansys Workbench 2021
Informasi	Ukuran parameter desain, frekuensi, nilai <i>force</i> , spesifikasi material, dan hasil simulasi
Energi	Listrik

Elemen manusia pada sistem berperan sebagai operator yang melakukan percobaan pada objek kajian. Material yang digunakan untuk bahan dari objek kajian yaitu *vibration tool* dengan *Asymmetric notch hinge* yaitu AISI 1040. Lalu mesin yang digunakan oleh operator yaitu *personal computer* yang dilengkapi dengan *software* Autodesk Inventor 2023 dan Ansys Workbench 2021. Informasi yang diperlukan selama melakukan simulasi seperti ukuran parameter desain,

frekuensi, nilai *force*, dan hasil simulasi. Serta listrik sebagai energi yang digunakan supaya mesin dapat beroperasi

B. Batasan dan Asumsi Kajian

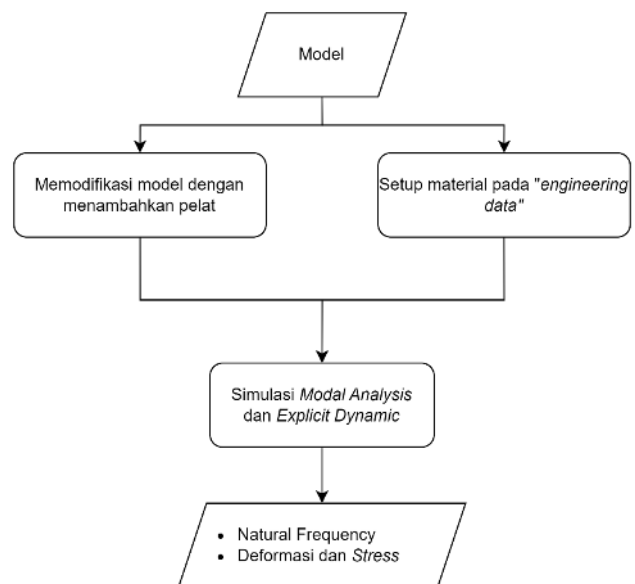
Pada kajian ini terdapat batasan dan asumsi yang diharapkan menjadi fokus serta batasan sesuai dengan tujuan kajian yaitu:

- Kajian ini dibatasi dengan waktu simulasi yaitu 0,001 s dengan jumlah gelombang sebanyak 20 serta diulangi sebanyak 5 kali (5 step). Hal tersebut dikarenakan jumlah gelombang tersebut sesuai dengan kondisi asli UVAT.
- Model pada simulasi getaran disederhanakan menjadi bagian *asymmetric notch hinge* dengan asumsi dapat mewakili model ketika diterapkan pada *vibration tool*.
- Nilai *cutting force* yang mewakili nilai ketika kondisi riil permesinan UVAT diambil nilai terbesar dari kajian yaitu $F_x = 4,466$ N, $F_y = 139,024$ N dan $F_z = 80,282$ N [17].

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan akan diolah dan dimasukkan sebagai *input* dalam membuat sebuah rancangan simulasi getaran pada *asymmetric notch hinge* dengan *finite element method*. Data yang akan digunakan berupa data dimensi bentuk *asymmetric notch hinge* 3D CAD file, sifat material yang digunakan, gaya yang akan digunakan pada simulasi, posisi susunan part untuk simulasi itu sendiri. Pada studi ini terdapat 3 parameter desain dengan masing-masing memiliki 5 level yang akan dikombinasi dengan metode *full factorial*. Proses pengambilan data mengikuti tahapan pada Gambar IV.1.



GAMBAR II.9

Tahapan pengambilan nilai deformasi dan stress

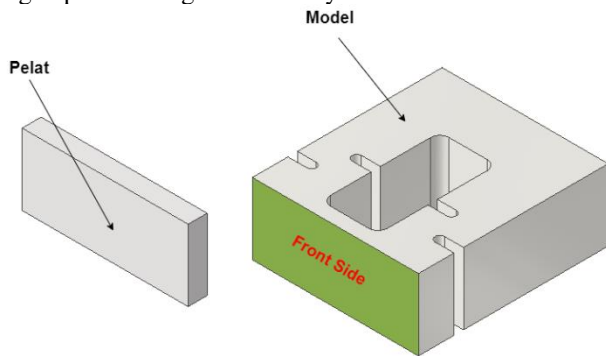
Berdasarkan Gambar IV.1, proses pengambilan data dimulai dengan memasukkan model sebagai objek yang akan disimulasikan. Simulasi dilakukan untuk memperoleh *natural frequency*, deformasi, dan *stress* pada setiap model maka dilakukan tahapan berikut.

1. Melakukan setup material pada *engineering data*

Pada tahap setup diperlukan data spesifikasi material *vibration tool* yang diambil dari Tabel III.3 yaitu *Density*, *Young's Modulus*, *Poisson's Ratio*, *Bulk Modulus*, dan *Shear Modulus*. Pendefinisian data material dilakukan untuk mengukur kemampuan model yang menggunakan sifat material AISI 1040.

2. Memodifikasi model dengan menambahkan pelat

Desain tersebut dimodifikasi untuk menambahkan pelat di sisi depan sesuai pada Gambar Hal tersebut diperlukan untuk menghitung nilai deformasi atau amplitudo untuk menghindari adanya pembengkokan pada sisi depan *hinge* yang dapat memengaruhi besarnya nilai deformasi.



(A)

GAMBAR II.10

Posisi penambahan pelat dan (B) Model yang telah ditambahkan pelat

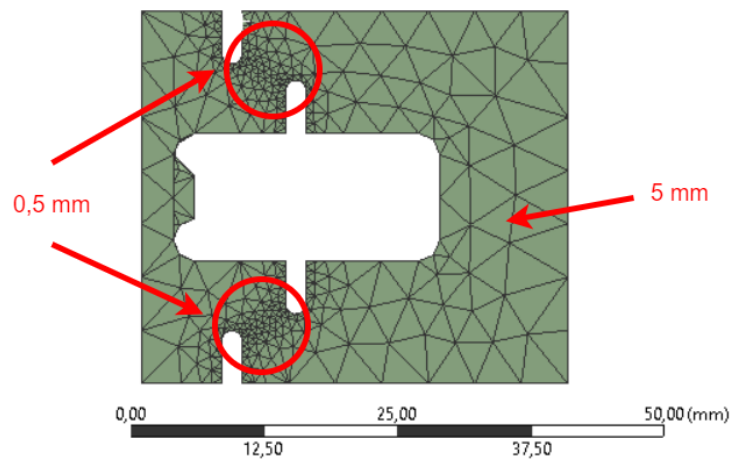
3. Melakukan simulasi *Modal Analysis*

Untuk simulasi *Modal Analysis*, pelat yang telah dibuat sebelumnya dihilangkan terlebih dahulu dengan melakukan "*suppress*" agar lebih terfokus pada bagian *asymmetric notch hinge*. Selanjutnya dilakukan pengaturan *mesh* dengan spesifikasi pada Tabel IV.1.

TABEL II.4
Pengaturan *mesh* pada simulasi *Modal Analysis*

Jenis Mesh	Tipe mesh	Nilai (mm)	Lokasi
Mesh	Automatic (tetrahedral)	5	Seluruh bagian
Face Sizing	Automatic (tetrahedral)	0,5	Hanya bagian Notch Hinge

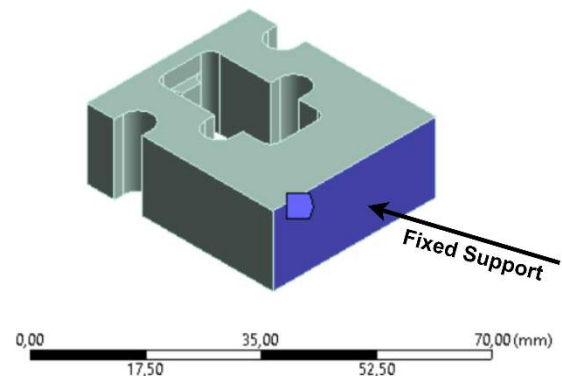
Ukuran *mesh* pada bagian *notch hinge* menggunakan ukuran yang lebih kecil supaya lebih fokus dan menghasilkan nilai yang lebih spesifik untuk nilai deformasi dan *stress* yang dihasilkan. Tipe *mesh* dapat dipilih sesuai dengan pengaturan otomatis dikarenakan *software* dapat secara otomatis mengatur ukuran elemen berdasarkan geometri model. Hasil *mesh* yang telah dilakukan terdapat pada Gambar IV.3 yang menunjukkan bagian *hinge* lebih banyak elemen *mesh* serta lebih kecil.



GAMBAR II.11

Detail ukuran *mesh* yang digunakan pada model

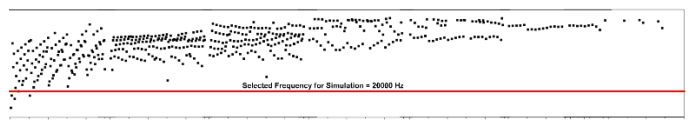
Pada bagian "*analysis settings*" dimasukkan batas frekuensi yaitu 18000-30000 Hz. Frekuensi tersebut ditentukan agar *natural frequency* yang mendekati 20000 Hz dapat teridentifikasi.



GAMBAR II.12

Model *Asymmetric notch hinge* dengan penambahan *Fixed Support*

Penambahan *fixed support* dilakukan untuk merepresentasikan bagian yang tidak bergerak pada *tool holder*. Setelah semua sesuai dengan tahapan Lampiran C, maka *natural frequency* dapat didapatkan dan dilihat sebaran seluruh data yang diperoleh pada Gambar IV.5

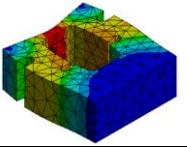
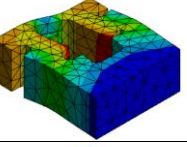
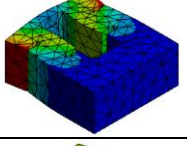
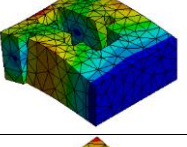
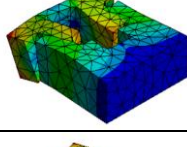
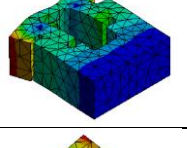
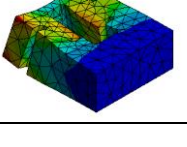


GAMBAR II.13

Sebaran *natural frequency* pada setiap model

Modal 1, 2, 3, 4, 5, 6, dan 7 merupakan tipe *natural frequency* yang memiliki perilaku dan arah berbeda-beda pada masing modal. Sebaran *natural frequency* pada Gambar IV.5 menunjukkan bahwa pada modal 1 tidak ada yang sama dengan frekuensi yang digunakan yaitu 20000 Hz namun mendekati 20000 Hz. Modal 2, 3, 4, 5, 6, dan 7 menunjukkan tidak ada yang sama bahkan mendekati 20000 Hz. Visualisasi gerakan pada setiap mode dapat dilihat pada Tabel IV.2

TABEL II.5
Visualisasi gerakan deformasi pada setiap mode

Mode	Visualisasi Gerakan	Gerakan
Mode 1		<i>Deformation to front</i>
Mode 2		<i>Bending left and right</i>
Mode 3		<i>Deformation to back</i>
Mode 4		<i>Bending up and down</i>
Mode 5		<i>Twisting</i>
Mode 6		<i>Deformation to left and right</i>
Mode 7		<i>Face Bending</i>

4. Melakukan simulasi Explicit Dynamics

Untuk setup simulasi *explicit dynamics* diperlukan untuk mendefinisikan material pelat dan *asymmetric notch hinge* menjadi AISI 1040 dan membuat sifat pelat menjadi *rigid* untuk menghindari pembengkokan ketika simulasi karena nilai deformasi yang diinginkan hanya pada bagian *Asymmetric notch hinge* saja. Selanjutnya adalah melakukan mesh dilakukan pengaturan sesuai dengan Tabel IV.2.

TABEL II.6
Pengaturan mesh pada simulasi *Explicit Dynamics*

Jenis Mesh	Tipe mesh	Nilai (mm)	Lokasi
Mesh	Automatic (tetrahedral)	5	Seluruh bagian
Face Sizing	Automatic (tetrahedral)	0,5	Hanya bagian Hinge

Pengaturan *mesh* memiliki tujuan yang sama dengan simulasi *Modal Analysis*, pada simulasi *Explicit Dynamics* juga diperlukan nilai deformasi dan stress yang lebih akurat

dengan ukuran mesh yang lebih kecil. Pada bagian "*analysis settings*" diubah sesuai dengan Tabel IV.3

TABEL II.7
Pengaturan "*analysis settings*" pada simulasi *Explicit Dynamics*

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

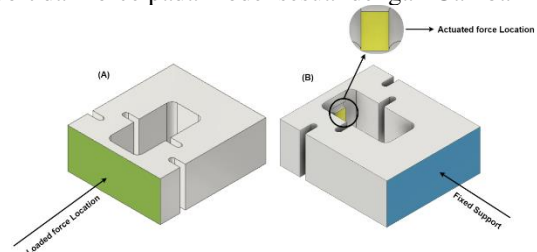
Penggunaan 5 step bertujuan untuk melakukan pengulangan sebanyak 5 kali getaran untuk efek berkelanjutan selama simulasi dilakukan. Nilai *end time* yaitu 0,001 s berasal dari persamaan

$$T = \frac{1}{f} \times 20$$

dengan T = waktu (s) dan f = frekuensi (Hz). Frekuensi yang digunakan sebesar 20000 Hz dan 20 didapatkan dari pengulangan sebanyak 20 kali maka menghasilkan nilai tersebut sebagai *end time* setiap step. Lalu, *geometric strain limit* digunakan untuk menentukan batas kemampuan regangan model hingga patah. Nilai tersebut didapatkan dari persamaan

$$\varepsilon = \frac{\sigma_u}{E}$$

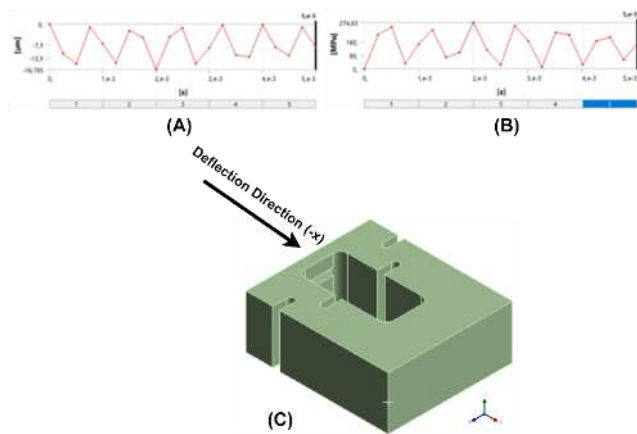
dengan ε = geometric strain limit, σ_u = tensile strength (MPa) dan E = young's modulus (GPa). Nilai tensile strength yang digunakan sebesar 620 MPa dan nilai young's modulus sebesar 200 GPa maka menghasilkan nilai geometric strain limit sebesar 0,003. Selanjutnya menentukan posisi fixed support dan force pada model sesuai dengan Gambar IV.6



GAMBAR II.14

Penentuan lokasi force, (A) Loaded Force dan (B) Actuated Force

Fixed support memiliki tujuan untuk menunjukkan bagian yang tidak bergerak pada *tool holder*. Pada bagian *actuated force* menjadi bagian yang diberikan gaya dari *piezoelectric* sebesar 3500 N berbentuk gelombang sinusoidal dengan frekuensi senilai 20000 Hz. Bagian *loaded-force* dimasukkan nilai sesuai dengan yang telah ditetapkan pada sub bab III.1 Setelah simulasi getaran dengan *explicit dynamics* dilakukan, maka hasil akan muncul seperti pada Gambar IV.7

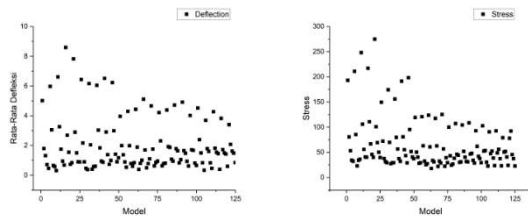


GAMBAR II.15

Respon simulasi *Explicit Dynamics* terhadap Deformasi (A), *Stress* (B), dan arah deformasi yang diambil menuju datum -X (C)

Berdasarkan Gambar IV.7, nilai deformasi pada hasil simulasi yang diambil merupakan hasil yang bernilai negatif saja dan dirata-ratakan. Pemilihan nilai negatif saja yang diambil sesuai dengan arah deformasi dalam proses simulasi pada Gambar IV.7 yaitu ke arah datum -x. Nilai *stress* yang diambil yaitu nilai yang paling besar. *Probe* digunakan pada kedua pengambilan data tersebut untuk menentukan nilai deformasi dan *stress* hanya pada sumbu x.

Setelah melakukan proses pengambilan data tersebut, maka data yang telah diperoleh terdapat pada Gambar IV.8 dan detailnya terdapat pada Lampiran B. Data tersebut selanjutnya diolah dengan statistika menggunakan uji ANOVA serta diperhatikan perubahan nilai deformasi dan *stress* pada setiap parameter.

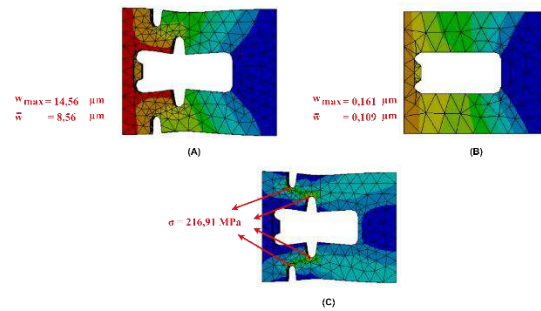


GAMBAR II.16

Sebaran deformasi dan stress setiap model

V.1 Parameter desain *Asymmetric Notch Hinge* yang optimal

Berdasarkan analisis pada sub bab V.1, parameter tebal *hinge* menjadi parameter dengan pengaruh yang paling signifikan dalam perubahan nilai deformasi dan *stress* dengan parameter radius menjadi pilihan alternatif. Parameter jarak antar *hinge* tidak dapat dijadikan opsi karena tidak adanya pengaruh yang signifikan. Tabel IV.6 menunjukkan bahwa model dengan ukuran radius 1 mm, tebal *hinge* 6,5 mm, dan jarak antar *hinge* 7 mm merupakan ukuran parameter desain optimal yang dapat digunakan pada proses permesinan UVAT. Kombinasi parameter yang terpilih adalah radius 1 mm, tebal *hinge* 6,5 mm, dan jarak antar *hinge* sebesar 7 mm. Kombinasi parameter ini dapat menghasilkan nilai deformasi yang terbesar dan menghasilkan *stress* yang tidak melebihi batas tensile strength.



GAMBAR II.17

Hasil deformasi pada simulasi yang optimal (a), nilai deformasi model yang tidak menggunakan flexure *hinge* (b) dan (c) *stress* pada simulasi model yang optimal

Gambar V.2 (A) dan (C) menunjukkan model setelah dilakukan simulasi getaran, deformasi maksimum (w_{max}) yang mampu dicapai sebesar 14,592 μm dengan rata-rata sebesar 8,5893 μm dan *stress* sebesar 216,91 MPa yang berada di bawah nilai *Tensile Strength* (620 MPa). Nilai *stress* yang tidak melebihi *tensile strength* menunjukkan bahwa desain tersebut tidak akan mengalami kegagalan secara struktur. Gambar V.2 (B) menunjukkan model yang tidak menggunakan flexure *hinge* menghasilkan nilai deformasi maksimum yang lebih kecil dibandingkan seluruh data hasil simulasi model dengan desain *Asymmetric Notch Hinge*.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian yang dilakukan, ditemukan bahwa kombinasi parameter desain *Asymmetric Notch Hinge* dengan ukuran radius (r) sebesar 1 mm, tebal *hinge* (t) sebesar 6,5 mm, dan jarak antar *hinge* (b) sebesar 7 mm dapat menghasilkan nilai deformasi sebesar 8,56 μm dengan deformasi maksimal sebesar 14,56 μm . Model ini memiliki nilai deformasi yang lebih besar dibandingkan model yang tidak menggunakan flexure *hinge* sebesar 0,109 μm dan deformasi maksimal sebesar 0,161 μm . *Stress* yang dihasilkan oleh model tersebut tidak melewati batasan *tensile strength* AISI 1040 (620 MPa) dengan nilai 216,91 MPa sehingga memiliki nilai *safety factor* sebesar 2,85 yang menunjukkan bahwa material tersebut dapat menahan beban sampai 2,85 lebih besar dari *stress* yang dihasilkan sebelum gagal.

Pada kajian ini juga mengidentifikasi pengaruh setiap parameter desain serta alternatif untuk mengoptimalkan desain sebagai berikut:

1. Rasio yang disarankan antara radius dan tebal *hinge* (r/t) adalah sekitar 0,15
2. Jarak antar *hinge* (b) tidak dapat menentukan pengaruh terhadap deformasi (w) dan juga *stress* (σ) sehingga tidak menjadi pilihan untuk memaksimalkan deformasi.

REFERENSI

- [1] D. E. Brehl and T. A. Dow, "Review of vibration-assisted machining," Jul. 2008. doi: 10.1016/j.precisioneng.2007.08.003.

- [2] S. Mohith, A. R. Upadhyay, K. P. Navin, S. M. Kulkarni, and M. Rao, "Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion and their applications: a review," Jan. 01, 2021, *IOP Publishing Ltd*. doi: 10.1088/1361-665X/abc6b9.
- [3] 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," *AIP Conf Proc*, vol. 1831, no. April, 2017, doi: 10.1063/1.4981170.
- [4] Z. Ying, L. Shu, and N. Sugita, "Experimental and Finite Element Analysis of Force and Temperature in Ultrasonic Vibration Assisted Bone Cutting," *Ann Biomed Eng*, vol. 48, no. 4, pp. 1281–1290, 2020, doi: 10.1007/s10439-020-02452-w.
- [5] J. Wu, Y. Zhang, S. Cai, and J. Cui, "Modeling and analysis of conical-shaped notch flexure hinges based on NURBS," *Mech Mach Theory*, vol. 128, pp. 560–568, 2018, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.07.005.
- [6] X. Long, H. Jiang, and G. Meng, "Active vibration control for peripheral milling processes," *J Mater Process Technol*, vol. 213, no. 5, pp. 660–670, 2013, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.11.025.
- [7] M. J. Madou *et al.*, *Nicolae Lobontiu-Compliant Mechanisms_ Design of Flexure Hinges-CRC Press* (2002), vol. 53, no. 9. 2013.
- [8] Z. Wang *et al.*, "A high-frequency non-resonant elliptical vibration-assisted cutting device for diamond turning microstructured surfaces," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 112, no. 11–12, pp. 3247–3261, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-06608-3.
- [9] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, "The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals Sixth edition." [Online]. Available: www.cimne.upc.es
- [10] R. Kumar Patel, R. K. Patel, G. K. Ghosh, and S. R. Pradhan, "Fatigue and Modal Analysis of Crankshaft Using ANSYS Software. Fatigue and modal analysis of Crankshaft using ANSYS software," 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/334415422>
- [11] N. A. Khadse and S. R. Zaweri, "Modal Analysis of Aircraft Wing using Ansys Workbench Software Package." [Online]. Available: www.ijert.org
- [12] G. Sandeep Kumar and R. Rajeswara Reddy, "Simulation of Turning Process using Explicit Dynamics," *International Research Journal of Engineering and Technology*, p. 1463, 2008, [Online]. Available: www.irjet.net
- [13] S. H. Montgomery and R. M. Merrill, "Title: 1 Divergence in brain composition during the early stages of ecological specialisation in 2 Heliconius butterflies 3 4 Authors: 5."
- [14] D. Julong Deynrt, "Introduction to Grey System Theory," 1988.
- [15] L. Yang and M. Zhang, *Research on the Influence of Cutting Speed on Vibration Cutting Force*. 2017.
- [16] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering : an introduction*.
- [17] L. Yang and M. Zhang, *Research on the Influence of Cutting Speed on Vibration Cutting Force*. 2017.