

# Pengaruh Rasio Geometri Alur Pasak Poros Terhadap Kegagalan *Fatigue*

Bachry Fahmiansyah, Sunardi, dan Erny Listijorini  
 Jurusan Teknik Mesin, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa  
 Jl. Raya Jakarta Km 4 Pakupatan Kota Serang Provinsi Banten 42124  
 e-mail: [bachryfahmi19@gmail.com](mailto:bachryfahmi19@gmail.com)

**Abstrak**— *Fatigue* merupakan salah satu penyebab kerusakan dari suatu poros. Kerusakan *fatigue* tidak dapat diprediksi, bisa terjadi secara tiba-tiba. Oleh karena itu perlu diteliti lebih lanjut tentang penyebab kegagalan *fatigue*. Pada penelitian sebelumnya sudah banyak yang melakukan *improvement* pada material yang biasa digunakan sebagai poros untuk meningkatkan kekuatan *fatigue*, tetapi masih sedikit penelitian yang membahas pengaruh kondisi permukaan pada poros terhadap kekuatan *fatigue*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh rasio geometri alur pasak poros terhadap kegagalan *fatigue* dengan melihat pada rasio kedalaman berapa material akan cepat patah. Metode yang digunakan adalah metode simulasi dengan *software SolidWorks*. Simulasi *fatigue* yang digunakan yaitu tipe *rotary bending* dengan standar pengujian ASTM E466. Varian rasio alur pasak yaitu 3:1 mm, 3:2 mm, dan 3:3 mm dengan masing-masing diberi beban 40%, 50%, 60%, 70%, dan 80% dari *ultimate tensile strength* material. Hasil yang didapat pada beban 40% untuk varian 1,2,3 mencapai lebih dari 1.000.000 siklus sampai patah. Pembebanan 50% sama seperti pembebanan 40%. Pembebanan 60% varian 1 masih mencapai 1.000.000 siklus, sedangkan varian 2 mendapat 402.699 siklus, varian 3 mendapatkan 317.727 siklus sampai material patah. Pembebanan 70% varian 1 mendapatkan 641211 siklus, varian 2 mendapatkan 201.348 siklus, varian 3 mendapatkan 166.116 siklus sampai material patah. Pembebanan 80% varian 1 mendapatkan 311.218 siklus, varian 2 mendapatkan 123.921 siklus, varian 3 mendapatkan 102.371 siklus sampai material patah. Dengan posisi patah yang sama pada setiap *fillet* alur pasak.

**Kata Kunci**— *Fatigue*, Poros, Pasak, Simulasi, *SolidWorks*.

## I. PENDAHULUAN

*Fatigue* atau kelelahan adalah kerusakan material yang diakibatkan oleh adanya tegangan yang berfluktuasi yang besarnya lebih kecil dari tegangan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) ( $\sigma$ ) maupun tegangan luluh (*yield*) material yang diberikan beban konstan. Resistensi kelelahan (*fatigue*) adalah kemampuan material untuk menerima pembebanan berulang dan berfluktuasi selama periode tertentu sampai material mengalami perpatahan. Terdapat tiga fase dalam perpatahan fatik yaitu permulaan retak, penyebaran retak, dan patah. Salah satu komponen mesin yang dapat mengalami *fatigue* adalah poros. Poros digunakan untuk meneruskan putaran atau mentransmisikan putaran dari penggerak dan kepada yang digerakkan. Dalam menjalankan tugasnya sebagai sumbu putar, poros memiliki alur pasak untuk tempat diselipkannya pasak yang digunakan untuk kunci dari poros terhadap puli atau semacamnya. Pasak merupakan sepotong baja lunak (*mild steel*) yang berfungsi sebagai pengunci yang disisipkan diantara poros dan *hub* (bos) sebuah roda puli atau roda gigi agar keduanya

tersambung dengan pasti sehingga mampu meneruskan momen putar/torsi.

Komponen mesin yang memiliki konsentrasi tegangan akan berpengaruh terhadap performanya. Sunardi et.al [1] melakukan riset tentang bentuk-bentuk konsentrasi tegangan terhadap perubahan kekuatan, kekakuan dan getaran balok. Dari riset ini diketahui bahwa konsentrasi tegangan berbentuk balok memiliki performa yang paling baik jika dibandingkan dengan bentuk lainnya. Jarak antara konsentrasi tegangan juga berpengaruh sangat signifikan terhadap perubahan kinerja balok. Dari riset ini diketahui bahwa semakin dekat jarak antar titik-titik konsentrasi tegangan maka akan semakin besar tegangan, defleksi dan getaran yang terjadi pada balok [2].

Model elemen hingga dari sampel pengujian *fatigue* dari bahan baja berkekuatan tinggi Weldox 960 dibuat dalam program ADINA. Model bahan simulasi sesuai dengan bahan nyata yang digunakan dan didasarkan pada uji tariknya. Pembebanan sampel diterapkan dalam bentuk sudut rotasi (sesuai dengan torsi siklik) dan serangkaian simulasi untuk setiap level pembebanan dilakukan. Nilai tegangan dan regangan diperoleh untuk setiap level beban dan menjadi dasar untuk pengukuran eksperimental *fatigue* pada sampel nyata [3]. Pengujian *fatigue* dilakukan dengan cara memberikan *stress level* tertentu sehingga spesimen patah pada siklus tertentu [4].

CAD (*Computer Aided Design*)/CAE (*Computer Aided Engineering*) adalah suatu perkembangan teknologi didalam dunia *engineering*, salah satunya untuk meningkatkan metode yang digunakan untuk mengetahui umur *fatigue* material [5]. Liangmo Wang et.al [5] melakukan penelitian yaitu mensimulasikan pengujian *fatigue* dengan tipe *rotary bending* dengan *software ABAQUS* pada velg mobil berbahan aluminium. Hasilnya pada percobaan pertama didapatkan keretakan velg mobil terjadi pada sekitaran daerah lubang baut dan takik. Kemudian dilakukan perbaikan dengan memperkuat area yang lemah dan merevisi geometri pada daerah yang retak dengan desain yang sama.

Material *bronze* diuji dengan mesin *rotary bending* untuk mengetahui kekuatan *fatigue* dari material tersebut. *Bronze* diuji sebanyak 5 kali dengan pembebanan 10 kg, 15 kg, 20 kg, 25 kg, dan 30 kg. dari hasil penelitian ini akan terlihat hasil bahwa ketahanan *fatigue* dari material *bronze* akan menurun seiring dengan bertambahnya beban yang diberikan dan siklus putaran akan semakin sedikit. *Fatigue* sangat berbahaya dibanding kegagalan statis karena *fatigue* terjadi tanpa ada peringatan terlebih dahulu atau secara tiba tiba dan menyeluruh [6]. Oleh sebab itu pengujian *fatigue* sangat perlu dilakukan pada sebuah material untuk mengetahui

ketangguhan dari sebuah material.

Alur pasak dapat menjadi penyebab utama kegagalan *fatigue* dari poros. O.A. Zambrano et.al [7] melakukan penelitian terhadap poros mesin crane untuk bangunan. Metode yang digunakan beraga, antara lain analisa komposisi bahan material, inspeksi visual, *fractography*, analisa metallografi, mengukur kekerasan, dan analisa elemen hingga. Hasilnya ditemukan kerusakan pada alur pasak dari poros tersebut, selain karena oksidasi dan inklusi pada material, geometri alur pasak yang salah pun menjadi penyebab utama dari kerusakan poros. Kemudian dilakukan pengembangan pada alur pasak dengan memberikan koreksi geometri dan membuatnya lebih halus pada *radius*, tinggi, dan lebar alur pasak. Dari kasus ini geometri alur pasak sangat berpengaruh terhadap kegagalan *fatigue* suatu poros.

Pasak dan alur pasak adalah salah satu koneksi poros-*hub* yang paling umum. Desain sering diatur oleh standar yang hampir setengah abad, dan sebagian besar hasil yang dilaporkan dalam literatur didasarkan pada analisis fotoelastik eksperimental. Makalah ini menunjukkan bagaimana analisis elemen hingga numerik dapat meningkatkan prediksi konsentrasi tegangan di alur pasak. Dengan menggunakan pengoptimalan bentuk dan bentuk super elips sederhana, ditunjukkan bahwa usia kelelahan alur pasak dapat sangat ditingkatkan dengan pengurangan hingga 50% pada tegangan maksimum [8]. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk alur pasak sangat mempengaruhi kekuatan *fatigue* material.

Isranuri et.al [9] Memodifikasi material dengan mencampurkan 96% aluminium dan 4% magnesium, kemudian material tersebut diuji kekuatan *fatigue* nya dan membandingkan hasil uji *fatigue* sebenarnya dengan hasil uji *fatigue* dengan simulasi. Jenis uji *fatigue* nya adalah *rotary bending*. Simulasi ini menggunakan *software* ANSYS dan didapatkan hasil beban 117,13 N dengan siklus 47.120, beban 74,752 N dengan siklus 82.565, beban 58,5657 N dengan siklus 135.515. Faktor kunci dalam analisis elemen hingga adalah perhitungan numerik dengan maksud memperkirakan semua parameter dan batas yang disepakati [10]. Analisis kegagalan adalah sesuatu yang sangat diperlukan yang digunakan secara luas oleh sektor industri untuk mengembangkan atau meningkatkan desain produk. Kegagalan elemen mesin dipelajari secara luas oleh ilmuwan untuk menemukan metode untuk mengidentifikasi penyebabnya dan untuk mencegahnya terulang kembali. Untuk menentukan mode kegagalan, metode analisis elemen analitik, eksperimental, dan elemen hingga dapat digunakan [11].

*Fillet* pada poros membawa zona tegangan dari daerah yang dilalui seperti alur pasak dan lubang ke bentuk. Garis-garis gaya yang berubah pada titik ini dan mengubah arah ketajamannya dibulatkan untuk mencoba mengurangi efek takik yang terjadi pada gaya dinamis dan dalam bahan yang ringkih. [12]. Kelelahan logam adalah masalah yang signifikan karena dapat terjadi karena beban berulang di bawah kekuatan luluh statis. Hal ini dapat mengakibatkan kegagalan yang tidak terduga dan bencana dalam penggunaan karena sebagian besar bahan teknik mengandung diskontinuitas. Sebagian besar retakan fatik berawal dari diskontinuitas di daerah komponen yang sangat tertekan. Kegagalan mungkin disebabkan oleh diskontinuitas, desain,

perawatan yang tidak tepat atau penyebab lainnya. Analisis kegagalan dapat menentukan penyebab kegagalan [13]. Kegagalan *fatigue* dimulai dengan terjadinya retakan pada permukaan benda uji. Hal ini membuktikan bahwa sifat – sifat *fatigue* sangat peka terhadap kondisi permukaan, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain kekasaran permukaan, perubahan sifat sifat permukaan dan tegangan sisa permukaan [14].

Penelitian ini bertujuan untuk meneliti pada setiap rasio geometri alur pasak poros, yaitu rasio antara lebar pasak dengan kedalaman pasak terhadap kelelahannya (*fatigue*) pada material baja AISI 410. Untuk melihat apakah alur pasak dapat menjadi pemicu adanya permulaan retak pada poros. Serta apakah kedalaman alur pasaka berpengaruh besar terhadap kegagalan *fatigue*.

## II. METODE PENELITIAN

### A. Material

Bahan yang digunakan pada simulasi pengujian ini adalah baja AISI 410. Baja AISI (*American Iron and Steel Institute*) 410 termasuk ke dalam *stainless steel* atau baja tahan karat. Dalam SAE *International (Society of Automotive Engineers)*, baja ini juga bernomor 410 karena AISI dan SAE keduanya terlibat dalam upaya untuk membakukan penomoran baja. Kemudian di dalam UNS (*Unified Numbering System*) baja ini bernomor S41000. Baja AISI 410 termasuk ke dalam *stainless steel* seri 400 yaitu *ferritic and martensitic chromium alloys*, dan tipe 410 ini termasuk ke dalam *martensitic (high - strength iron / chromium)* mempunyai kekuatan aus yang tinggi tetapi ketahanan korosi yang kurang hingga cukup [15]. Karena baja AISI 410 ini mempunyai ketahanan aus yang tinggi, material ini cocok digunakan untuk poros.

Tabel 1.  
Komposisi Baja AISI 410

Unsur	%Berat
C	0,03
Cr	12,8
S	0,0012
Ni	0,155
Mn	0,34
Si	0,68
Mo	0,0002
P	0,0162
Fe	Bal.

Tabel 2.  
Sifat Mekanik Baja AISI 410

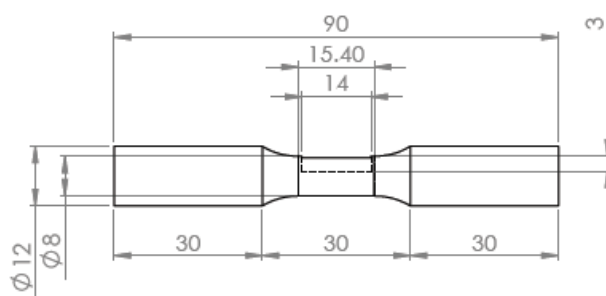
Sifat	Nilai	Satuan
Modulus Elastisitas	200	GPa
Rasio Poisson	0,28	
Modulus Geser	77,52	GPa
Masa Jenis	7740	kg/m <sup>3</sup>
Kekuatan Tarik	510	MPa
Kekuatan Luluh	310	MPa
Koefisien Ekspansi Thermal	9,9	K <sup>-1</sup>
Konduktivitas Thermal	18,3	W/(m.K)
Panas Spesifik	460	J/(kg.K)

**B. Metode**

Metode pengujian menggunakan metode simulasi, yaitu mensimulasikan pengujian *fatigue* dengan menggunakan *software* SolidWorks. Pada metode simulasi material dibentuk dengan *software* SolidWorks mengacu pada dimensi standar ASTM E466 yang mana standar ini juga biasa digunakan pada uji *fatigue* tipe *rotary bending*. Kemudian simulasi pengujian material dilakukan juga dengan *software* SolidWorks menggunakan pembebanan lentur dan *fatigue* untuk mendapatkan hasil yang mendekati dengan pengujian *real* di lapangan. Kemudian untuk pembebanan material diberikan beban 40%, 50%, 60%, 70%, dan 80% dari *ultimate tensile strength* material.

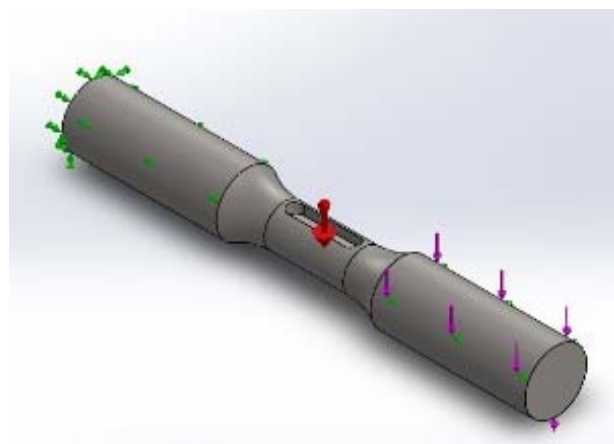
**C. Standar Pengujian**

Standar untuk pengujian *rotary bending* menggunakan ASTM E466, simulasi ini juga menggunakan bentuk ASTM E466 dengan variasi kedalaman alur pasak 1 mm, 2 mm, dan 3 mm. Sedangkan untuk lebar dan panjang alur pasak di setiap variasi adalah sama yaitu 3 mm x 14 mm.



Gambar 1. Standar ASTM E466

Tumpuan dan beban pada material dibuat agar sama persis dengan kondisi *real* pengujian. Untuk tumpuan menggunakan tumpuan *roll* dan *fix* karena untuk pengujian *fatigue* akan menggunakan jenis *rotary bending*. Untuk tumpuan *roll* ditunjukkan pada gambar 2 dengan anak panah hijau kecil yang mengarah ke kiri, sedangkan untuk tumpuan *fix* terletak pada penampang kiri spesimen. Untuk beban ditunjukkan oleh panah ungu yang mengarah kebawah, beban diberikan pada tempat yang serupa mungkin dengan pengujian eksperimental. Kemudian untuk beban gravitasi ditunjukkan oleh panah merah besar mengarah kebawah



Gambar 2. *Boundary and Load Condition*

Pengujian *fatigue* dilakukan dengan tipe *rotary bending* menggunakan simulasi pada *software* SolidWorks. Jika benda uji diputar dan diberi beban, maka akan terjadi momen lentur pada benda uji. Momen lentur ini menyebabkan terjadinya beban lentur pada benda uji. Momen lentur ini menyebabkan terjadinya beban lentur pada permukaan benda uji dan besarnya dihitung dengan persamaan (1) [5]. Sebelum melakukan simulasi, terlebih dahulu mencari nilai beban lentur sebagai variasi pembebanan. Beban lentur dapat dihitung dengan menggunakan rumus tegangan lentur. Menurut Budiyanto et.al [4] bahwa untuk menentukan besarnya tegangan lentur dapat digunakan rumus di bawah ini:

$$\sigma = \frac{w \times l / 2}{\pi / 32 \times d^3} \tag{1}$$

- $\sigma$  = Tegangan lentur (Pa)
- $w$  = Beban lentur (N)
- $d$  = Diameter benda uji (m)
- $l$  = Panjang benda uji (m)

Penyajian data *fatigue* rekayasa adalah menggunakan kurva S-N yaitu pemetaan tegangan atau *stress* (S) terhadap jumlah siklus (*number of cycles*) sampai terjadi kegagalan (N). Kurva S-N ini lebih diutamakan menggunakan skala semi log. Kurva tersebut didapat dari pemetaan tegangan terhadap jumlah siklus sampai terjadi kegagalan pada benda uji. Pada kurva ini siklus menggunakan skala logaritma. Batas ketahanan *fatigue* (*endurance limit*) baja ditentukan pada jumlah siklus  $N > 10^7$  [16].

Pengujian *fatigue* dilakukan dengan cara memberikan *stress level* tertentu sehingga spesimen patah pada siklus tertentu. Dieter [16] Menyatakan untuk mendapatkan kurva S-N dibutuhkan 8-12 spesimen. Retak *fatigue* biasanya dimulai pada permukaan di mana lentur dan torsi menyebabkan terjadinya tegangan-tegangan yang tinggi atau di tempat-tempat yang tidak rata menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan. Oleh karena itu, batas ketahanan (*endurance limit*) sangat tergantung pada kualitas penyelesaian permukaan [17].

**III. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Merujuk pada persamaan (1), maka hasil perhitungan beban pengujian untuk beban 40%, 50%, 60%, 70%, dan 80% secara berturut-turut adalah sebagai berikut:

Tabel 3.  
Variasi Nilai Beban

UTS (MPa)	Variasi Pembebanan (%)	$\sigma$ (MPa)	w (N)
510	40	204	227,76
	50	255	284,69
	60	306	341,632
	70	357	398,571
	80	408	455,509

Setelah menghitung beban yang akan diberikan saat simulasi, selanjutnya adalah melakukan simulasi pembebanan lentur dengan memasukkan variasi pembebanan pada setiap variasi rasio alur pasak. Masukkan nilai beban dengan satuan Newton pada daerah yang ditunjukkan oleh panah berwarna ungu (Gambar 2) dengan mengarah ke

bawah, karena di pengujian sebenarnya dengan mesin pun material ditarik ke bawah sambil diputar sampai material patah.

Setelah melakukan simulasi pembebanan lentur maka akan didapatkan nilai deformasi dari setiap spesimen, semakin besar beban yang diberikan maka semakin besar nilai deformasinya. Spesimen yang sudah melakukan simulasi pembebanan lentur selanjutnya melakukan simulasi uji *fatigue*. Simulasi uji *fatigue* ini adalah untuk mendapatkan nilai *life* dan *safety factor* dari spesimen uji ASTM E466, dengan variasi rasio alur pasak 3:1 mm, 3:2 mm, dan 3:3 mm. *Life* adalah nilai siklus dari material. *Safety factor* adalah nilai yang menyatakan adanya potensi bahaya atau tidak. Berikut ini adalah tabel hasil dari simulasi pembebanan lentur dan uji *fatigue* dari setiap varian:

Tabel 4.  
Hasil Simulasi Rasio Alur 3:1

Keterangan	Variasi Rasio Alur Pasak				
	3:1 mm				
Beban (%)	40	50	60	70	80
$\sigma$ (MPa)	204	255	306	357	408
Deformasi (mm)	0,012	0,015	0,018	0,021	0,024
Siklus	1e06	1e06	1e06	641.211	311.218
<i>Safety Factor</i>	1,66	1,33	1,11	0,95	0,8

Tabel 5.  
Hasil Simulasi Rasio Alur 3:2

Keterangan	Variasi Rasio Alur Pasak				
	3:2 mm				
Beban (%)	40	50	60	70	80
$\sigma$ (MPa)	204	255	306	357	408
Deformasi (mm)	0,012	0,015	0,018	0,021	0,024
Siklus	1e06	1e06	402.699	201.348	123.921
<i>Safety Factor</i>	1,32	1,06	0,88	0,76	0,66

Tabel 6.  
Hasil Simulasi Rasio Alur 3:3

Keterangan	Variasi Rasio Alur Pasak				
	3:2 mm				
Beban (%)	40	50	60	70	80
$\sigma$ (MPa)	204	255	306	357	408
Deformasi (mm)	0,013	0,016	0,019	0,022	0,025
Siklus	1e06	1e06	317.727	166.116	102371
<i>Safety Factor</i>	1,25	1,00	0,84	0,72	0,63

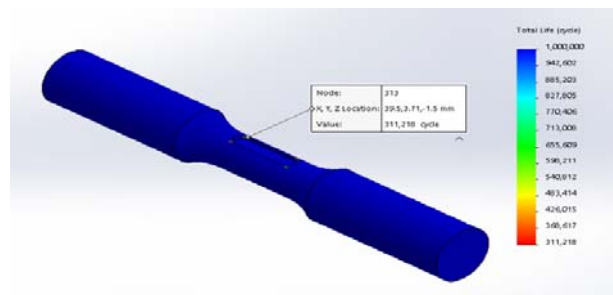
Dari hasil pengujian yang terdapat pada tabel 4, 5 dan 6 masing – masing memiliki nilai yang berbeda, semakin dalam kedalaman alur dan semakin besar pembebanannya maka umur material akan semakin pendek dilihat dari minimum siklus yang di dapat. Nilai siklus minimal tertinggi terdapat pada simulasi *fatigue* dengan variasi rasio alur pasak 3:1 yaitu mencapai 1.000.000 siklus sedangkan nilai siklus minimal terendah terdapat pada rasio alur pasak 3:3 yaitu 102.371

siklus.

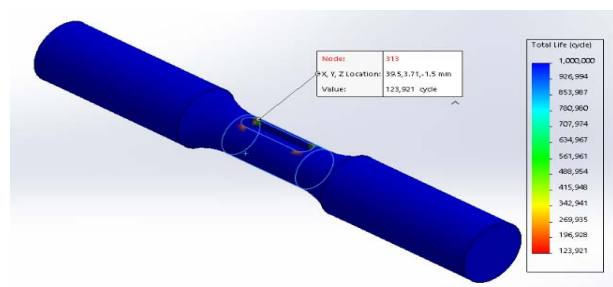
Kemudian dari tabel di atas dapat kita lihat bahwa terdapat 3 varian pengujian yaitu 3:1 mm, 3:2 mm, dan 3:3 mm dengan 5 variasi pembebanan yaitu 40%, 50%, 60%, 70%, dan 80% dari *ultimate tensile strength* material.

Untuk varian 1, 2, dan 3 pada pembebanan 204 MPa dan 255 MPa dapat mencapai di atas 1.000.000 siklus sampai material patah. Hingga pembebanan 306 MPa untuk varian 1 masih bisa mencapai 1.000.000 siklus, sedangkan varian 2 hanya dapat mencapai 402.699 dan varian 3 hanya mencapai 317.727 siklus sampai material patah. Kemudian pada pembebanan 357 MPa untuk varian 1 mendapatkan 641.211 siklus, varian 2 mendapatkan 201.348 siklus, dan varian 3 mendapatkan 166.116 siklus sampai material patah. Pada variasi pembebanan terakhir yaitu 408 MPa untuk varian 1 mendapatkan 311.218 siklus, varian 2 mendapatkan 123.921, sedangkan varian 3 mendapatkan 102.371 siklus sampai material patah.

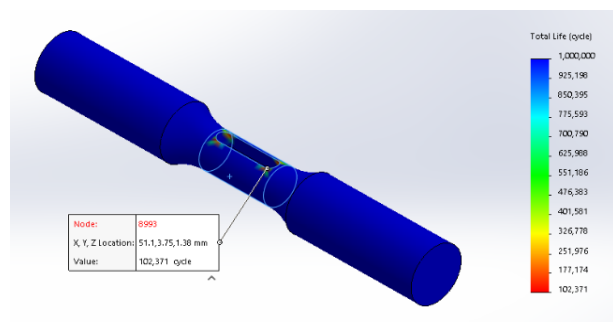
Dari tabel 4, 5, 6 juga dapat dilihat nilai *safety factor* dari setiap hasil simulasi. Untuk hasil simulasi yang memiliki nilai *safety factor* di bawah 1, maka dari hasil simulasi tersebut dapat mengindikasikan pada konsisi real pengujian dengan beban yang diberikan sama, material akan mengalami kerusakan sebelum 1.000.000 siklus. Namun jika nilai *safety factor* masih di atas atau sama dengan 1 maka pada kondisi *real* pengujian material masih dinyatakan aman dan tidak mengalami kerusakan sampai 1.000.000 siklus [18].



Gambar 3. Simulasi Uji Fatigue Rasio Alur Pasak 3:1



Gambar 4. Simulasi Uji Fatigue Rasio Alur Pasak 3:2



Gambar 5. Simulasi Uji Fatigue Rasio Alur Pasak 3:3

Dari gambar 3, 4, dan 5 dapat dilihat bahwa posisi titik yang mendapatkan tegangan maksimum sedikit berbeda. Pada varian 1 dan 2 titik itu berada pada sudut alur pasak di posisi sudut kanan atas, ditunjukkan oleh kotak keterangan di dalam gambar (Gambar 3 dan 4), tepatnya pada *node* 313. Sedangkan pada varian 3, titik yang mendapatkan tegangan maksimum ada pada sudut alur pasak di posisi sudut kiri bawah, ditunjukkan oleh kotak keterangan di dalam gambar (Gambar 5), tepatnya pada *node* 8993. Hal ini disebabkan karena kedalaman alur yang berbeda dari setiap varian menghasilkan titik-titik konsentrasi tegangan yang berbeda. Semakin bertambah kedalaman alur maka akan semakin dekat titik konsentrasi tegangan dengan permukaan yang diberikan beban, karena saat diberikan beban pada alur pasak yang lebih dalam, luas penampang yang terdampak akan semakin kecil luasannya sehingga rambatan tegangan akan terhenti pada titik yang dekat dengan takikkan.

Dapat dilihat pada gambar 3, 4, dan 5 bahwa daerah yang mengalami kelelahan *fatigue* ditunjukkan oleh daerah yang berwarna merah yang terdapat pada *radius* fillet dari alur pasak. Semakin dalam alur pasak maka daerah *radius* fillet tersebut akan semakin berwarna merah, hal ini menunjukkan bahwa di daerah tersebut terjadi konsentrasi tegangan yang lebih tinggi dan akan menimbulkan kerusakan saat digunakan sebagai poros.

Konsentrasi tegangan yang terjadi pada *radius* fillet alur pasak disebabkan karena posisi *radius* fillet tersebut berada pada sudut lekukan dari bentuk alur pasak. Ketika material diberi beban maka tegangan yang lebih besar akan terjadi pada sudut-sudut alur pasak tersebut.

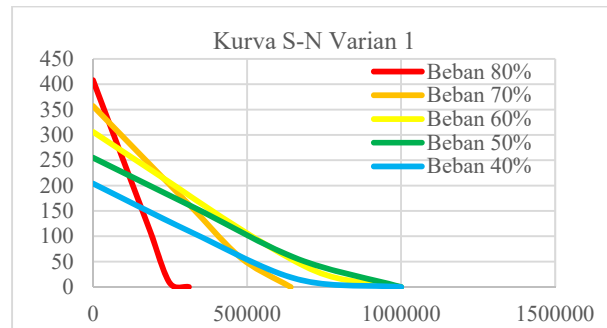
Tegangan yang lebih besar juga dapat terjadi karena perbedaan luas penampang pada setiap varian spesimen. Luas penampang pada varian 1 lebih besar dibandingkan varian 2 dan varian 3 karena kedalaman alur varian 2 dan varian 3 lebih dalam 1 mm dan 2 mm dibandingkan dengan varian 1. Semakin dalam kedalaman alur maka luas penampang tegangan akan semakin kecil sehingga tegangan yang bekerja pun akan semakin besar. Pada gambar 3, 4, dan 5 dibuktikan dengan luasan warna merah pada sudut-sudut alur pasak, pada varian 1 luasannya hanya titik kecil, varian 2 mulai membesar, dan varian 3 luasan yang berwarna merah semakin melebar yang mengindikasikan tegangan yang bekerja lebih besar.

Deformasi yang terjadi dari hasil pengujian juga dibuktikan oleh data pada tabel 4, 5, dan 6. Terlihat bahwa nilai deformasi pada varian 3 lebih besar dari varian 1 dan 2, hal ini mengindikasikan bahwa pada varian 3 material lebih mudah ter deformasi dengan beban yang sama sehingga material akan lebih cepat mengalami kerusakan.

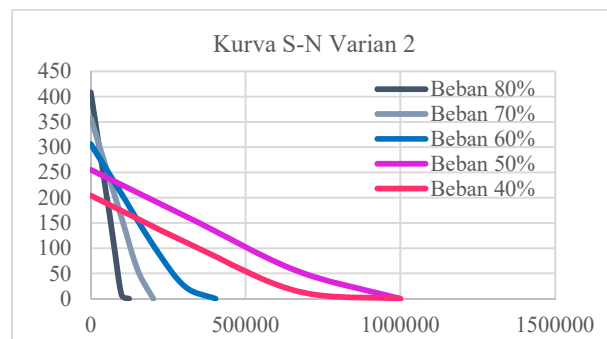
Kedalaman alur, konsentrasi tegangan, dan deformasi nilainya berbanding lurus, artinya semakin besar kedalaman alur maka akan semakin besar konsentrasi tegangan yang bekerja dan deformasi material nilainya akan lebih besar, begitu juga sebaliknya. Tetapi ketiga nilai tersebut akan berbanding terbalik dengan luas penampang untuk tegangan yang bekerja, semakin besar kedalaman alur, konsentrasi tegangan, dan defomasi, maka akan semakin kecil luas penampang yang menahan tegangan yang bekerja.

Setelah melakukan simulasi uji *fatigue* dan simulasi pembebanan lentur maka dari data yang dihasilkan, dapat dibuat kurva S-N dari hasil pengujian. Kurva S-N ini

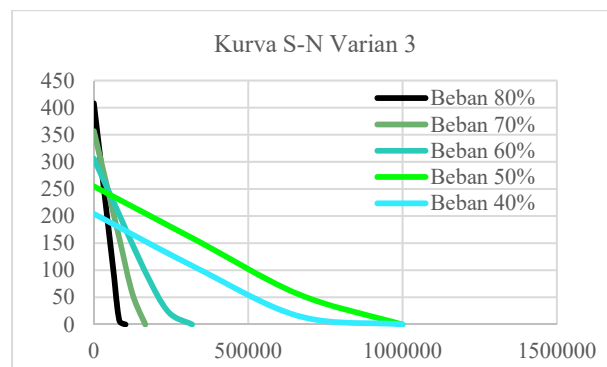
memudahkan untuk melihat umur material. Berikut ini adalah kurva S-N sesuai dengan variannya.



Gambar 6. Kurva S-N Varian 1



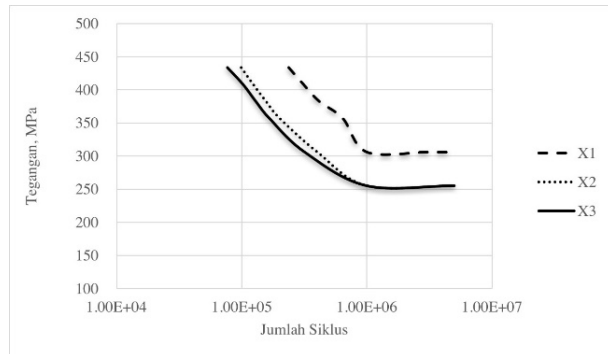
Gambar 7. Kurva S-N Varian 2



Gambar 8. Kurva S-N Varian 3

Kurva S-N ini menunjukkan sampai pada siklus ke berapa material mengalami kerusakan. Pada kurva S-N dapat dilihat bahwa hasil simulasi pengujian, variasi rasio alur pasak yang paling kuat terhadap *fatigue* adalah rasio 3:1 mm, pada pembebanan 70% varian 1 menerima beban sebesar 357 MPa dan mendapat siklus minimal 641.211 siklus. Sedangkan pada variasi rasio alur pasak 3:2 mm material akan mengalami kerusakan pada pembebanan 60% dengan menerima beban sebesar 306 MPa dan mendapat siklus minimal 402.699 siklus. Kemudian nilai kekuatan *fatigue* terendah didapat pada variasi rasio alur pasak 3:3 mm, pada pembebanan 60% menerima beban sebesar 306 MPa mendapatkan siklus minimal 317.727 siklus. Kedalaman alur pasak sangat berpengaruh terhadap umur material, terbukti pada varian 1 material masih tahan sampai 1.000.000 siklus hingga pembebanan 60% dari *ultimate tensile strength* material, sedangkan pada varian 2 dan 3, material akan mengalami kerusakan pada pembebanan yang sama yaitu 60% dari *ultimate tensile strength* material, terbukti pada

siklus minimal yang didapat dari hasil simulasi pengujian. Jadi pada simulasi dengan variasi rasio alur pasak ini semakin besar rasio nya dan beban sudah melebihi 50% dari *ultimate tensile strength* material, maka material tersebut terindikasi akan mengalami kerusakan akibat kegagalan *fatigue*.



Gambar 9. Kurva S-N Beban 80%

Grafik di atas menunjukkan perbedaan umur material pada pembebanan yang sama yaitu 80% dengan varian rasio alur pasak yang berbeda. Terlihat bahwa varian 3 atau X3 umurnya lebih pendek dibandingkan dengan varian 2 atau X2 dan varian 1 atau X1. Umur varian 1 bisa menjadi lebih panjang dikarenakan konsentrasi tegangan yang bekerja lebih sedikit dibandingkan varian 2 dan varian 3.

Tegangan dapat didefinisikan sebagai besaran gaya yang bekerja pada suatu luas permukaan benda, secara matematis dituliskan dengan persamaan sebagai berikut [19]:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2}$$

- $\sigma$  = Tegangan (Pa)
- F = Gaya yang bekerja (N)
- A = Luas permukaan (m)

Untuk perhitungan tegangan yang bekerja pada setiap varian adalah gaya yang bekerja dibagi dengan luas penampang yang terdampak. Berdasarkan persamaan (2), persamaan untuk perhitungan tegangan yang bekerja pada setiap varian adalah sebagai berikut:

$$\sigma_{work} = \frac{w}{(2\pi r \times lt) - (a \times (2lt + 2\pi 1,5))} \tag{3}$$

- $\sigma_{work}$  = Tegangan yang bekerja (Pa)
- w = Beban lentur (N)
- r = Jari-jari diameter tengah (m)
- lt = Panjang silinder tengah (m)
- a = Kedalaman alur pasak (m)

Untuk luas penampangnya adalah luas permukaan silinder bagian tengah dikurangi dengan luas permukaan dinding alur pasak. Merujuk pada persamaan (3), hasil perhitungan yang didapat pada varian 1 didapatkan tegangan yang bekerja sebesar 1,28 MPa, varian 2 tegangan yang bekerja sebesar 1,41 MPa, sedangkan varian 3 tegangan yang bekerja sebesar 1,56 MPa.

Dari hasil perhitungan tegangan ini dapat dilihat bahwa varian 1 tegangan yang bekerjanya nilainya paling kecil karena total luas penampang yang terkena gaya masih lebih besar dibandingkan 2 varian lainnya dan kedalaman alur yang tidak terlalu dalam menyebabkan konsentrasi tegangan yang

bekerja pada lekukan alur tidak terlalu besar sehingga hanya berpengaruh kecil terhadap *fatigue*.

Oleh sebab itu untuk varian 1 umur *fatigue* nya akan lebih lama dibandingkan dengan varian 2 dan varian 3. Sedangkan varian 2 dan varian 3 dilihat dari grafik S-N pada gambar 9 memiliki kemiripan grafik karena beban yang bekerja lebih besar juga kedalaman alur yang bertambah menyebabkan konsentrasi tegangan di lekukan pada alur pasak di kedua varian ini menjadi lebih besar karena luas penampang yang menerima gaya menjadi lebih kecil luasannya seiring bertambahnya kedalaman alur sehingga menyebabkan material akan cepat patah dan umur material akan lebih pendek.

#### IV. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kedalaman alur pasak sangat berpengaruh terhadap umur *fatigue* material. Semakin dalam alur pasak maka umur lelah material akan semakin pendek dan begitu juga sebaliknya.
2. Rasio alur pasak yang lebih cepat mengalami kegagalan *fatigue* adalah 3:3 yaitu 3 mm lebar pasak dan 3 mm kedalaman pasak dengan pembebanan 80% sebesar 408 MPa mendapatkan siklus minimal 102.371 dan nilai *safety factor* 0,63 yang mana nilai *safety factor* di bawah 1 mengindikasikan akan terjadi kegagalan *fatigue* pada material sebelum mencapai 1.000.000 siklus.
3. Semakin besar beban yang diberikan saat pengujian akan semakin besar juga tegangan yang bekerja pada penampang. Secara berurutan nilai tegangan yang bekerja pada penampang adalah 1,28 MPa, 1,41 MPa, dan 1,56 MPa.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Sunardi, E. Listijorini, and R. Sandro, "Pengaruh Bentuk Bukaan Terhadap Kekuatan dan Getaran Balok," *Sintek J. Mesin Teknol.*, vol. 12, no. 2, pp. 107–112, 2018.
- [2] Sunardi, E. Listijorini, and M. Sahroni, "PENGARUH JARAK SEL BUKAAN BALOK TERHADAP KEKUATAN MATERIAL DAN KARAKTERISTIK GETARAN," *Mach. ; J. Tek. Mesin*, vol. 2, no. 2, pp. 6–10, 2016.
- [3] M. Blatnická, M. Sága, P. Kopas, and M. Handrik, "Numerical simulation and experimental verification of torsion fatigue tests for material Weldox," *Transp. Res. Procedia*, vol. 40, pp. 631–638, 2019, doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.090.
- [4] E. Budiyanto, E. Nugroho, and A. Zainudin, "Uji Ketahanan Fatik Aluminium Scrap Hasil Remelting Piston Bekas Menggunakan Alat Uji Fatik Tipe Rotary Bending," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 7, no. 1, 2018, doi: 10.24127/trb.v7i1.717.
- [5] L. Wang, Y. Chen, C. Wang, and Q. Wang, "Fatigue life analysis of aluminum wheels by simulation of rotary fatigue test," *Stroj. Vestnik/Journal Mech. Eng.*, 2011, doi: 10.5545/sv-jme.2009.046.
- [6] R. Rahmatullah and R. Ahmad, "Analisa Pengujian Lelah Material Bronze Dengan Menggunakan Rotary Bending Fatigue Machine," *J. Rekayasa Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 1, no. 1, pp. 1–11, 2018, doi: 10.30596/rmme.v1i1.2430.
- [7] O. A. Zambrano, J. J. Coronado, and S. A. Rodriguez, "Failure analysis of a bridge crane shaft," *Case Stud. Eng. Fail. Anal.*, 2014, doi: 10.1016/j.csefa.2013.12.002.
- [8] N. L. Pedersen, "Stress concentrations in keyways and optimization of keyway design," *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 45, no. 8, pp. 593–604, 2010, doi: 10.1243/03093247JSA632.
- [9] I. Isranuri, S. Abda, F. Ariani, D. T. Mesin, F. Teknik, and U. S. Utara, "Pengujian Fatik Pada Material Paduan Aluminium," no. 3, pp. 51–59, 2017.
- [10] S. O. Afolabi, B. I. Oladapo, C. O. Ijagbemi, A. O. M. Adeoye, and J.

- F. Kayode, "Design and finite element analysis of a fatigue life prediction for safe and economical machine shaft," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 105–111, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2017.10.007.
- [11] B. Engel, S. Sara, and A.-M. Hassan, "Failure Analysis and Fatigue Life Estimation of a Shaft of a Rotary Draw Bending Machine," *Int. Sch. Sci. Res. Innov.*, vol. 11, no. 11, pp. 1785–1790, 2017.
- [12] M. T. Ozkan and F. Erdemir, "Determination of stress concentration factors for shafts under tension," *Mater. Test.*, vol. 62, no. 4, pp. 413–421, 2020, doi: 10.3139/120.111500.
- [13] S. P. Raut and L. P. Raut, "A review of various methodologies used for shaft failure analysis," *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 159–171, 2014.
- [14] B. Prato and N. Apriansyah, "Analisis Kekuatan Fatik Baja Karbon Rendah SC10 Dengan Tipe Rotary Bending," *J. Tek. Mesin Univ. Bandar Lampung*, vol. 2, no. 1, pp. 49–58, 2016.
- [15] AzoM, "Stainless Steel - Grade 410 ( UNS S41000 )," pp. 1–5, 2001.
- [16] G. E. Dieter, *Mechanical metallurgy*. 2011.
- [17] V. L. H. Vlack, *Ilmu dan Teknologi Bahan (Ilmu Logam dan Bukan Logam)*. 1994.
- [18] J. Marta, "Simulasi Pengujian Fatigue Pada Fork Racing Bicycle Menggunakan Standar Cen 14781," 2016.
- [19] E. Sutikno, "ANALISIS TEGANGAN AKIBAT PEMBEBANAN STATIS PADA DESAIN CARBODY TeC RAILBUS DENGAN METODE ELEMEN HINGGA," *J. Rekayasa Mesin*, 2011.