SINERGI Polmed: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

PREDIKSI FAKTOR KONSENTRASI TEGANGAN GESER PADA POROS BERTINGKAT DENGAN *UNDERCUT* DIN 509 TIPE E MELALUI ANALISIS ELEMEN HINGGA

Muhammad Fuad Abdul Hakim[a*], Sutrisno[a]

[a]*Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Madiun, Jl. Serayu No.79, Kota Madiun, 63133, Indonesia*

**Penulis korespondensi: muhammadfuad@unmer-madiun.ac.id; muhammadfuad.a.hakim@gmail.com, (M.F.A. Hakim), Tel.: +62896-6195-0695*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 15 Juli 2026
Direvisi pada 27 September 2026
Disetujui pada 12 Oktober 2026
Tersedia daring pada 06 November 2026

Kata kunci:
Undercut; konsentrasi tegangan; poros bertingkat; torsi; metode elemen hingga.

Keywords:
undercut; stress concentration; stepped shaft; torsion; finite element method.

ABSTRAK

Pada poros bertingkat yang menerima beban torsi, akan mengalami konsentrasi tegangan, khususnya dibagian perubahan diameternya. Diperlukan nilai faktor konsentrasi tegangan (Kts) untuk menghitung tegangan maksimal yang terjadi pada poros bertingkat tersebut. Nilai Kts umumnya diperoleh dari grafik khusus, yang disusun berdasarkan geometri yang diberikan pada bagian perubahan diameter, seperti *fillet*. Namun, selain *fillet*, ada geometri lain yaitu *undercut* yang umum diberikan pada poros bertingkat, sehingga nilai Kts tidak bisa diperoleh dari grafik khusus tersebut karena berbeda geometri. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun grafik faktor konsentrasi tegangan untuk poros bertingkat dengan *undercut* yang diberikan beban torsi, agar dapat digunakan untuk menghitung tegangan maksimal yang terjadi. Dilakukan simulasi metode elemen hingga terhadap 492 variasi poros bertingkat dengan rasio perbandingan diameter besar dan diameter kecil (D/d) yaitu 1,11; 1,25; 1,43; dan 1,67; pada rentang diameter kecil 3 – 125 mm, dengan dimensi *undercut* tipe E yang mengacu pada standar DIN 509. Diperoleh grafik spesifik yang dapat digunakan untuk menentukan nilai faktor konsentrasi tegangan (Kts) pada poros bertingkat dengan *undercut* yang menerima beban torsi. Nilai Kts tersebut berkisar diantara 1,20 sampai dengan 2,21.

ABSTRACT

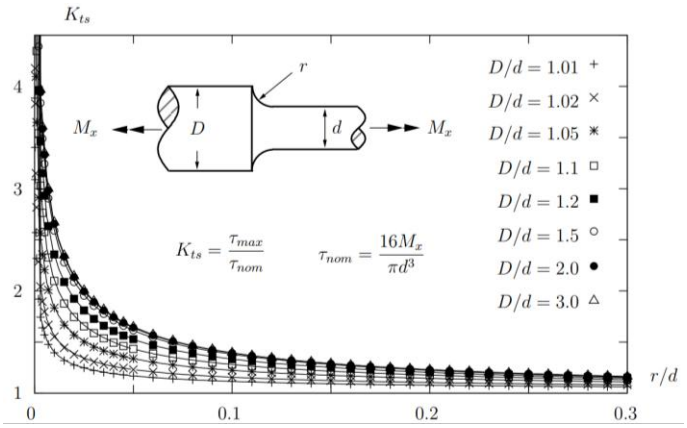
A stepped shaft subjected to torsional loading will experience stress concentration, particularly at the section of diameter change. A stress concentration factor (Kts) is required to calculate the maximum stress that occurs in the stepped shaft. The Kts is generally obtained from a specific chart, which is constructed based on the geometry provided at the section of diameter change, such as a fillet. However, in addition to the fillet, there is another geometry, namely the undercut, which is commonly applied to stepped shafts, such that the Kts cannot be obtained from that specific chart because of the different geometry. This research aims to construct a stress concentration factor chart for stepped shafts with an undercut subjected to torsional loading, such that it can be used to calculate the maximum stress that occurs. A finite element method simulation was carried out on 492 variations of stepped shafts with large-to-small diameter ratios (D/d) of 1.11, 1.25, 1.43, and 1.67, over a small-diameter range of 3–125 mm, with type E undercut dimensions referring to the DIN 509 standard. Specific charts were developed that can be used to determine the stress concentration factor (Kts) for stepped shafts with an undercut subjected to torsional loading. The Kts ranges from 1.20 to 2.21.

1. PENGANTAR

Poros digunakan pada berbagai sistem transmisi daya untuk meneruskan putaran dan torsi, antara lain dari motor, turbin, dan kotak roda gigi (Fitri & Saputra, 2023). Dalam penggunaannya, poros biasanya dipasangkan dengan bantalan, roda gigi, atau puli. Kebutuhan pemasangan tersebut sering mengharuskan perubahan geometri, misalnya berupa poros bertingkat atau penambahan alur pasak. Namun, perubahan diameter dapat menimbulkan konsentrasi tegangan pada daerah transisi karena distribusi tegangan tidak lagi seragam (Suryono dkk., 2022; H. Patel & P. Patel, 2023).

Pada poros bertingkat yang menerima torsi, tegangan geser di sekitar perubahan diameter dapat lebih tinggi daripada tegangan nominal pada penampang diameter kecil (Abbas dkk., 2025). Salah satu cara mengurangi konsentrasi tegangan ialah memberikan radius lengkung (*fillet*) pada bahu poros. Peningkatan radius *fillet* umumnya memperhalus perubahan geometri dan menurunkan tegangan lokal pada kondisi yang sebanding (Hafidzin & Noubnome, 2023).

Pengaruh perubahan geometri terhadap peningkatan tegangan dinyatakan melalui faktor konsentrasi tegangan geser (K_{ts}), yang merupakan perbandingan antara tegangan geser maksimum dan tegangan geser nominal (Jordaan, 2025). Pedersen (2018) memperkirakan Kts menggunakan serangkaian analisis elemen hingga, kemudian menyajikan hasilnya dalam grafik berdasarkan rasio diameter D/d dan rasio radius *fillet* r/d. Salah satu bentuk grafik tersebut ditunjukkan pada Gambar 1 dan digunakan sebagai acuan untuk poros dengan bahu *fillet*.



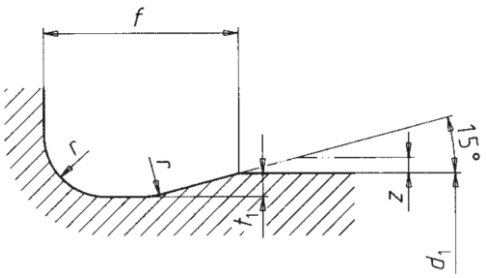
Gambar 1: Contoh grafik faktor konsentrasi tegangan pada poros bertingkat dengan *fillet* (Pedersen, 2018)

Grafik Kts memudahkan perancang memperkirakan konsentrasi tegangan dari rasio geometri tanpa perlu mengulang simulasi untuk setiap ukuran poros. Selain melalui analisis elemen hingga, nilai Kts dapat diestimasi menggunakan persamaan empiris dan pendekatan numerik (Rogers & Fleming, 2025). Jaringan saraf tiruan atau *artificial neural network* (ANN) juga telah digunakan untuk membangun model prediksi dari kumpulan data Kts (Kostic dkk., 2024). Perbedaan cakupan geometri, pembebanan, dan metode dalam penelitian sebelumnya dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1: Perbandingan Penelitian Terdahulu Tentang Faktor Konsentrasi Tegangan Pada Poros Bertingkat

Penelitian	Jenis Pembebanan	Geometri	Metode	Hasil
(Pedersen, 2018)	*Tension*, *bending* dan *torsion*	*Fillet*	Metode elemen hingga	Grafik khusus untuk memprediksi nilai Kts pada poros bertingkat yang diberikan *fillet*
(Abbas dkk., 2025)	*Tension*, *bending* dan *torsion*	*Fillet*, *chamfer* dan *keyseat*	Metode elemen hingga	Prediksi dan perbandingan nilai Kts antara poros bertingkat dengan dimensi tertentu yang diberikan *fillet, chamfer* dan *keyseat.*
(Rogers & Fleming, 2025)	*Bending* dan *torsion*	*Fillet*	Metode numerik	Grafik khusus untuk memprediksi nilai Kts pada poros bertingkat yang diberikan *fillet*
(Ozkan & Erdemir, 2020)	*Tension*	*Fillet*	Metode elemen hingga dan *Artificial Neural Networks (ANN)*	Model ANN untuk memprediksi nilai Kts pada poros bertingkat pejal dan *hollow* yang diberikan *fillet*
(Mayr & Rother, 2019)	*Tension, bending* dan *torsion*	*Fillet* dan *u-shaped groove*	Metode numerik	Persamaan untuk memprediksi nilai Kts pada poros bertingkat yang diberikan *fillet,* dan poros dengan *u-shaped groove*
(Kostic dkk., 2024)	*Tension*	*Fillet*	*Artificial Neural Networks*	Model ANN untuk memprediksi nilai Kts pada poros bertingkat yang diberikan *fillet*
(Chintala, 2018)	*Tension*, *bending* dan *torsion*	*Fillet*	Metode elemen hingga	Grafik khusus untuk memprediksi nilai Kts pada poros bertingkat yang diberikan *fillet*
(Sivák dkk., 2023)	*Tension*	*Fillet* dan *u-shaped groove*	Metode elemen hingga	Grafik khusus untuk memprediksi nilai Kts pada poros bertingkat yang diberikan *fillet* dan *u-shaped groove*
(Sinossi & Sadak, 2024)	*Tension*, *bending* dan *torsion*	*Fillet* dan *relief groove*	Metode elemen hingga	Grafik khusus untuk memprediksi nilai Kts pada poros bertingkat yang diberikan *fillet* dan *relief groove*

Sejumlah penelitian pada Tabel 1 membahas konsentrasi tegangan pada bahu poros yang menggunakan *fillet*, antara lain Pedersen (2018), Abbas dkk. (2025), Rogers dan Fleming (2025), Ozkan dan Erdemir (2020), Mayr dan Rother (2019), Kostic dkk. (2024), Chintala (2018), Sivák dkk. (2023), serta Sinossi dan Sadak (2024). Akan tetapi, perubahan diameter pada poros tidak selalu menggunakan fillet. Dalam aplikasi tertentu digunakan alur pembebas (*undercut*) agar komponen pasangan, termasuk bantalan, dapat terpasang dengan baik. Bentuk *undercut* berbeda dari *fillet* maupun alur berbentuk U, dan dimensinya dapat mengikuti ketentuan DIN 509, termasuk tipe E sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Perbedaan bentuk ini penting karena nilai Kts bergantung pada geometri lokal.

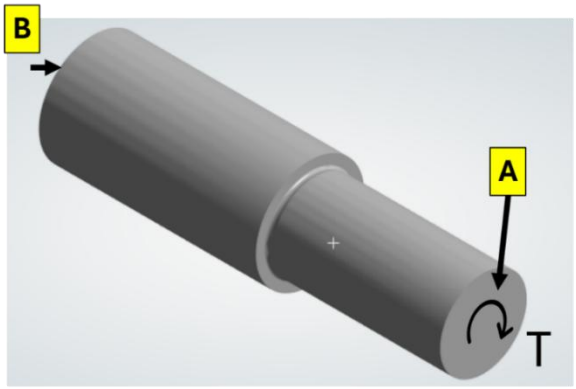


Gambar 2: Geometri *undercut* DIN 509 tipe E pada poros bertingkat (DIN 509, 2006)

Alur pembebas juga menimbulkan perubahan penampang yang berpotensi meningkatkan tegangan lokal (Ali dkk., 2022). Karena bentuknya berbeda, grafik Kts untuk *fillet* atau alur berbentuk U tidak dapat langsung digunakan untuk memprediksi perilaku *undercut* DIN 509 tipe E. Sinossi dan Sadak (2024) memang telah mengkaji *relief groove*, tetapi letak serta dimensi geometrinya tidak sama dengan konfigurasi pada penelitian ini. Berdasarkan studi yang dibandingkan pada Tabel 1, acuan Kts khusus untuk *undercut* DIN 509 tipe E pada bahu poros bertingkat masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini menyusun grafik dan persamaan prediksi Kts berbasis analisis elemen hingga untuk poros bertingkat yang menerima beban torsi. Kajian difokuskan pada empat rasio D/d dan kelompok ukuran *undercut* yang ditetapkan berdasarkan rentang diameter kecil poros hingga 125 mm.

2. METODE

Faktor konsentrasi tegangan pada poros bertingkat dengan *undercut* dianalisis menggunakan metode elemen hingga melalui perangkat lunak ANSYS Mechanical. Besaran utama yang diambil dari simulasi adalah tegangan geser maksimum (τmaks). Seperti ditunjukkan pada Gambar 3, torsi diterapkan pada muka ujung berdiameter kecil (A), sedangkan muka ujung berdiameter besar (B) diberi kondisi tumpuan tetap. Pemodelan menggunakan material *structural steel* bawaan perangkat lunak dengan modulus elastisitas 200.000 MPa dan rasio Poisson 0,3. Material dimodelkan sebagai material yang homogen, isotropik, dan elastik linier, sedangkan konfigurasi pembebanan mengacu pada metode yang digunakan oleh Abbas dkk. (2025).



Gambar 3: Kondisi pembebanan torsi pada sisi A dan pengekangan pada sisi B poros bertingkat

Nilai Kts dihitung dengan membagi tegangan geser maksimum hasil simulasi (τmaks, MPa) dengan tegangan geser nominal (τnom, MPa) pada penampang diameter kecil. Tegangan nominal ditentukan secara analitis berdasarkan torsi T (N·mm) dan diameter kecil poros d (mm) menggunakan Persamaan 1, sedangkan perbandingan tegangan dinyatakan melalui Persamaan 2 (Nooruldeen, 2026; Bhosle dkk., 2025; Jordaan, 2025).

$$K_{ts} = \frac{\tau}{\tau_{nom}} \quad (1)$$

$$\tau_{nom} = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot d^3} \quad (2)$$

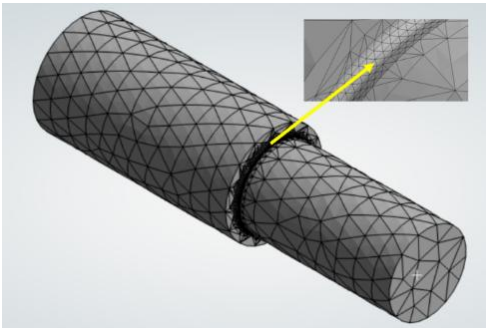
Ketelitian analisis elemen hingga dipengaruhi oleh representasi geometri, kondisi batas, dan ukuran elemen (*mesh*) (Ahmad dkk., 2025). Untuk mengkaji pengaruh perbandingan ukuran penampang, digunakan rasio diameter besar terhadap diameter kecil (D/d). Empat rasio awal diperoleh dari pasangan ukuran D = 50 mm dan d = 45, 40, 35, serta 30 mm, sehingga nilai D/d yang digunakan adalah 1,11; 1,25; 1,43; dan 1,67. Rasio ini kemudian diterapkan pada variasi diameter kecil dalam rentang penelitian.

Geometri *undercut* ditetapkan dengan mengacu pada DIN 509 tipe E. Sesuai Tabel 2 dan skema pada Gambar 2, d_1 = d menyatakan diameter kecil poros, f adalah lebar *undercut*, t_1 adalah kedalamannya, dan r merupakan radius lengkung pada alur. Dimensi tersebut berubah menurut kelompok diameter d yang tercantum dalam standar yang dirujuk.

Tabel 2: Dimensi *Undercut* DIN 509 Tipe E yang digunakan Dalam Pemodelan (DIN 509, 2006)

d_1 = d (mm)	f (mm)	t_1 = t (mm)	r (mm)
>3 sampai ≤18	2	0,2	0,6
>18 sampai ≤50	2,5	0,3	1,2
>50 sampai ≤80	4	0,3	1,6
>80 sampai ≤125	5	0,4	2,5

Tahap awal simulasi bertujuan memilih ukuran *mesh* yang memadai. Elemen yang digunakan adalah SOLID187, yaitu elemen tiga dimensi kuadratik. *Mesh* global diterapkan pada bagian utama poros, sedangkan daerah *undercut* diberi *mesh* lokal yang lebih rapat karena menjadi lokasi konsentrasi tegangan. Contoh pengaturan tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.



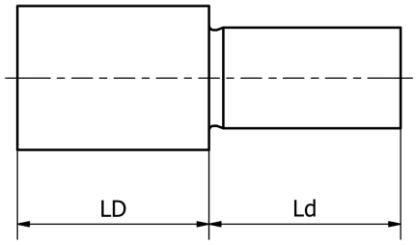
Gambar 4: Penerapan *mesh* lokal pada daerah undercut poros bertingkat

Pengaruh ukuran *mesh* diperiksa secara bertahap dengan membandingkan hasil simulasi pada beberapa tingkat kehalusan. Ukuran *mesh* global ditentukan relatif terhadap diameter kecil poros, misalnya d/2 dan d/3. Sementara itu, *mesh* lokal pada *undercut* ditetapkan relatif terhadap radius alur, seperti r/2, r/3, dan r/4. Pendekatan ini digunakan agar perbandingan ukuran elemen tetap terkait dengan skala geometri tiap model.

Perubahan nilai Kts antardua tingkat *mesh* berturutan digunakan sebagai indikator konvergensi numerik. Suatu ukuran *mesh* dipilih ketika perubahan relatif hasil berada di bawah 1 %, dengan perhitungan mengikuti Persamaan 3 (Shimasaki dkk., 2024). Kriteria tersebut menunjukkan kestabilan hasil terhadap penyempurnaan yang diuji, tetapi belum menggantikan kebutuhan verifikasi kualitas elemen atau validasi terhadap data acuan.

$$|\Delta| = \frac{\text{hasil } mesh \text{ terbaru} - \text{hasil } mesh \text{ sebelumnya}}{\text{hasil } mesh \text{ sebelumnya}} \tag{3}$$

Selain ukuran *mesh*, panjang poros perlu diperiksa agar pengaruh kondisi batas di kedua ujung tidak mendominasi tegangan di daerah *undercut*. Berdasarkan prinsip Saint-Venant, pengaruh lokal pembebanan cenderung berkurang pada bagian yang cukup jauh dari lokasi penerapan beban (Dong & Chen, 2026). Oleh karena itu, panjang bagian berdiameter besar (LD) dan berdiameter kecil (Ld) divariasikan dari satu hingga lima kali diameter masing-masing. Perubahan Kts antara dua variasi panjang dibandingkan dengan ambang 1 % untuk memilih panjang model yang digunakan pada simulasi berikutnya. Definisi LD dan Ld ditunjukkan pada Gambar 5.

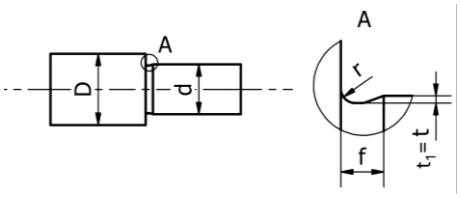


Gambar 5: Definisi panjang bagian poros berdiameter besar (LD) dan kecil (Ld)

Setelah ukuran *mesh* (global dan lokal) dan panjang poros bertingkat ditentukan, selanjutnya dilakukan simulasi untuk mencari tegangan maksimal. Dimensi poros bertingkat yang disimulasikan disajikan pada Tabel 3. D/d merupakan rasio perbandingan diameter besar (D) dengan diameter kecil (d) poros bertingkat, yang mana pada penelitian ini digunakan D/d yaitu 1,11; 1,25; 1,43 dan 1,67. Kemudian diameter kecil (d) poros bertingkat yang akan disimulasikan terbagi menjadi empat rentang, yaitu >3 sampai ≤18 mm, (b) >18 sampai ≤50 mm, (c) >50 sampai ≤80 mm dan (d) >80 sampai ≤125 mm, yang mana mengacu pada rentang yang disediakan pada standar DIN 509. Setiap rentang tersebut disimulasikan per kenaikan 1 mm, untuk seluruh rasio diameter besar dan kecil (D/d). Adapun diameter besar poros bertingkat (D) diperoleh dari hasil kali antara rasio diameter besar dan kecil (D/d) dengan diameter kecil (d). Panjang poros bertingkat untuk diameter besar (LD) dan diameter kecil (Ld). Adapun untuk dimensi *undercut* (Tipe E) mengacu pada standar DIN 509, baik untuk lebar *undercut* (f), kedalaman *undercut* (t) dan *fillet* atau radius pada *undercut* (r). Dengan demikian terdapat 492 variasi poros bertingkat yang dilakukan simulasi.

Tabel 3: Matriks Variasi Geometri Poros Bertingkat dan *Undercut* untuk Simulasi

D/d	Rentang d (mm)	D (mm)	f (mm)	$t = t_1$ (mm)	r (mm)
1,11	>3 sampai ≤18	D/d x d	2	0,2	0,6
1,25	>3 sampai ≤18	D/d x d	2	0,2	0,6
1,43	>3 sampai ≤18	D/d x d	2	0,2	0,6
1,67	>3 sampai ≤18	D/d x d	2	0,2	0,6
1,11	>18 sampai ≤50	D/d x d	2,5	0,3	1,2
1,25	>18 sampai ≤50	D/d x d	2,5	0,3	1,2
1,43	>18 sampai ≤50	D/d x d	2,5	0,3	1,2
1,67	>18 sampai ≤50	D/d x d	2,5	0,3	1,2
1,11	>50 sampai ≤80	D/d x d	4	0,3	1,6
1,25	>50 sampai ≤80	D/d x d	4	0,3	1,6
1,43	>50 sampai ≤80	D/d x d	4	0,3	1,6



D/d	Rentang d (mm)	D (mm)	f (mm)	$t = t_1$ (mm)	r (mm)
1,67	>50 sampai ≤80	D/d x d	4	0,3	1,6
1,11	>80 sampai ≤125	D/d x d	5	0,4	2,5
1,25	>80 sampai ≤125	D/d x d	5	0,4	2,5
1,43	>80 sampai ≤125	D/d x d	5	0,4	2,5
1,67	>80 sampai ≤125	D/d x d	5	0,4	2,5

Setiap model diberi torsi sebesar 450 N·mm. Beban yang sama digunakan untuk seluruh konfigurasi dalam analisis elastik linier. Tegangan geser maksimum hasil simulasi selanjutnya digunakan untuk menghitung Kts dan menyusun kurva prediksi pada masing-masing kelompok geometri. Pemeriksaan terhadap asumsi elastisitas material dan tegangan tertinggi tetap diperlukan, terutama untuk konfigurasi dengan diameter paling kecil.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Ukuran *mesh* global terlebih dahulu diperiksa pada satu diameter perwakilan dari setiap kelompok ukuran. Pengujian ini menggunakan rasio D/d = 1,11, torsi 450 N·mm, serta panjang kedua bagian poros masing-masing satu kali diameter. *Mesh* lokal *undercut* pada tahap awal ditetapkan sebesar r/2. Nilai Kts dari ukuran *mesh* global d/2 dan d/3 dibandingkan sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4: Evaluasi Ukuran *Mesh* Global Terhadap Nilai Kts

Rentang d (mm)	d (mm)	D (mm)	f (mm)	t_1 (mm)	r (mm)	*Mesh* Global		Kts	Selisih (%)
						d/n	Ukuran *Mesh* (mm)		
>3 sampai ≤18	11	12,2	2	0,2	0,6	d/2	5,5	1,4764	-
						d/3	3,7	1,4795	0,21
>18 sampai ≤50	35	38,9	2,5	0,3	1,2	d/2	17,5	1,7182	-
						d/3	11,7	1,7177	-0,03
>50 sampai ≤80	66	73,3	4	0,3	1,6	d/2	33,0	1,7853	-
						d/3	22,0	1,7792	-0,34
>80 sampai ≤125	103	114,3	5	0,4	2,5	d/2	51,5	1,7902	-
						d/3	34,3	1,7853	-0,27

Tabel 4 memperlihatkan bahwa perubahan Kts antara mesh global d/2 dan d/3 berada di bawah 1 % pada keempat kelompok diameter perwakilan. Berdasarkan kriteria yang ditetapkan, ukuran d/3 digunakan sebagai mesh global untuk pemodelan berikutnya. Temuan ini menunjukkan kestabilan relatif dalam dua ukuran yang diuji, bukan bukti independensi mesh pada seluruh konfigurasi.

Pengujian mesh lokal berikutnya dilakukan pada diameter perwakilan dan rasio D/d = 1,11 yang sama. Mesh global ditetapkan sebesar d/3 dan panjang kedua bagian poros tetap satu kali diameter. Ukuran elemen pada *undercut* divariasikan berdasarkan radius r, dengan hasil perubahan Kts ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5: Evaluasi Ukuran Mesh Lokal Pada *Undercut* Terhadap Nilai Kts

Rentang d (mm)	d (mm)	D (mm)	f (mm)	t_1 (mm)	r (mm)	*Mesh* Lokal		Kts	Selisih (%)
						r/n	Ukuran *Mesh* (mm)		
>3 sampai ≤18	11	12,2	2	0,2	0,6	r/2	0,300	1,4807	-
						r/3	0,200	1,5106	2,02
						r/4	0,150	1,4978	-0,84
>18 sampai ≤50	35	38,9	2,5	0,3	1,2	r/2	0,600	1,7114	-
						r/3	0,400	1,6996	-0,69
>50 sampai ≤80	66	73,3	4	0,3	1,6	r/2	0,800	1,7792	-
						r/3	0,533	1,7765	-0,15
>80 sampai ≤125	103	114,3	5	0,4	2,5	r/2	1,250	1,7981	-
						r/3	0,833	1,7898	-0,46

Berdasarkan Tabel 5, kelompok diameter terkecil (>3 hingga ≤18 mm) memerlukan mesh lokal r/4 untuk memenuhi ambang perubahan relatif di bawah 1% setelah pengujian r/3. Tiga kelompok diameter lainnya memenuhi kriteria pada ukuran r/3. Ukuran tersebut selanjutnya diterapkan sesuai kelompok diameter yang bersangkutan.

Pengaruh panjang model diperiksa dengan menggunakan mesh global d/3 dan mesh lokal sesuai hasil Tabel 5. Variasi panjang LD dan Ld dari satu hingga lima kali diameter dinilai pada rasio D/d = 1,11 dengan torsi 450 N·mm. Hasilnya digunakan untuk memilih panjang model yang memadai sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6: Pengaruh Variasi Panjang Poros Terhadap Faktor Konsentrasi Tegangan

Rentang d (mm)	d (mm)	D (mm)	f (mm)	t_1 (mm)	r (mm)	Panjang poros			Kts	Selisih (%)
						Pengali	Ld (mm)	LD (mm)		
>3 sampai ≤18	11	12,2	2	0,2	0,6	1 × diameter	11	12,2	1,4978	
						2 × diameter	22	24,4	1,4989	0,07
						3 × diameter	33	36,6	1,4980	-0,06
						4 × diameter	44	48,8	1,5016	0,24
						5 × diameter	55	61,1	1,4948	-0,45
>18 sampai ≤50	35	38,9	2,5	0,3	1,2	1 × diameter	35	38,9	1,6996	
						2 × diameter	70	77,7	1,6964	-0,19
						3 × diameter	105	116,6	1,7021	0,34
						4 × diameter	140	155,4	1,6978	-0,25
						5 × diameter	175	194,3	1,6975	-0,02
>50 sampai ≤80	66	73,3	4	0,3	1,6	1 × diameter	66	73,3	1,7765	
						2 × diameter	132	146,5	1,7752	-0,07
						3 × diameter	198	219,8	1,7819	0,38
						4 × diameter	264	293,0	1,7759	-0,34
						5 × diameter	330	366,3	1,7679	-0,45

Rentang d (mm)	d (mm)	D (mm)	f (mm)	t_1 (mm)	r (mm)	Panjang poros			Kts	Selisih (%)
						Pengali	Ld (mm)	LD (mm)		
>80 sampai ≤125	103	114,3	5	0,4	2,5	1 × diameter	103	114,3	1,7898	
						2 × diameter	206	228,7	1,7974	0,42
						3 × diameter	309	343,0	1,7964	-0,06
						4 × diameter	412	457,3	1,7937	-0,15
						5 × diameter	515	571,7	1,7908	-0,16

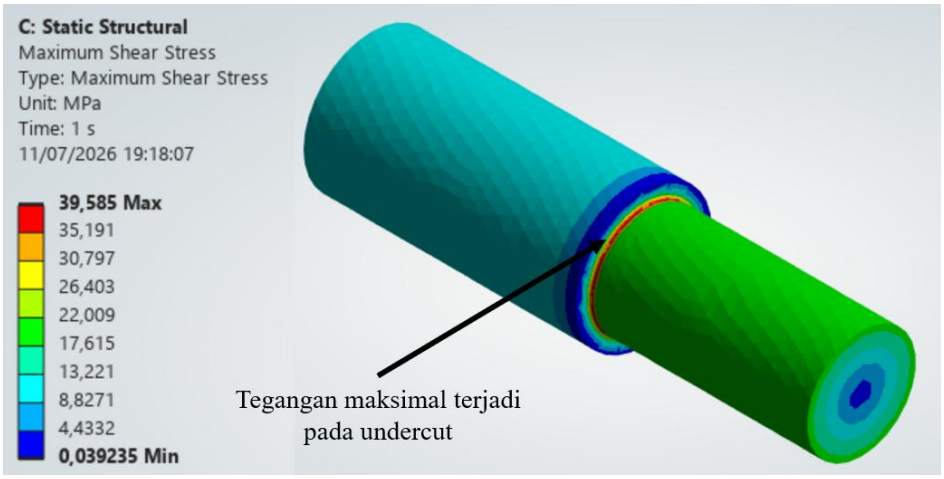
Pada Tabel 6, perubahan Kts antara panjang model berturutan berada di bawah 1 % untuk kasus perwakilan yang diperiksa. Oleh sebab itu, panjang LD dan Ld masing-masing satu kali diameter dipilih untuk tahap pemodelan berikutnya. Pemilihan ini berlaku untuk konfigurasi yang diuji dan perlu diperiksa kembali apabila kondisi pembebanan atau rasio geometri berubah secara signifikan.

Parameter mesh global, mesh lokal, dan panjang poros yang digunakan pada simulasi utama dirangkum dalam Tabel 7. Pengaturan tersebut diterapkan pada empat rasio D/d, yaitu 1,11; 1,25; 1,43; dan 1,67.

Tabel 7: Rekapitulasi Parameter Mesh dan Panjang Model yang Digunakan

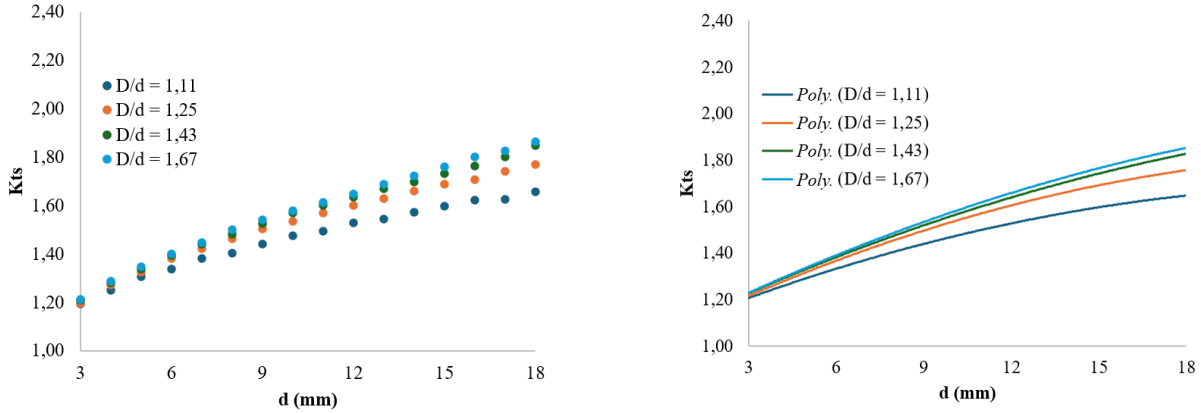
Rentang	*Mesh* Global	*Mesh* Lokal	Panjang Poros
>3 sampai ≤18	d/3	r/4	1 × diameter
>18 sampai ≤50	d/3	r/3	1 × diameter
>50 sampai ≤80	d/3	r/3	1 × diameter
>80 sampai ≤125	d/3	r/3	1 × diameter

Simulasi pada konfigurasi poros bertingkat yang dilaporkan menunjukkan bahwa tegangan geser tertinggi terkonsentrasi di sekitar *undercut*. Contoh distribusi tegangan ditampilkan pada Gambar 6, dengan area berwarna merah menunjukkan zona tegangan maksimum. Evaluasi ini mencakup empat nilai D/d dan dimensi *undercut* DIN 509 tipe E pada kelompok diameter yang ditetapkan.

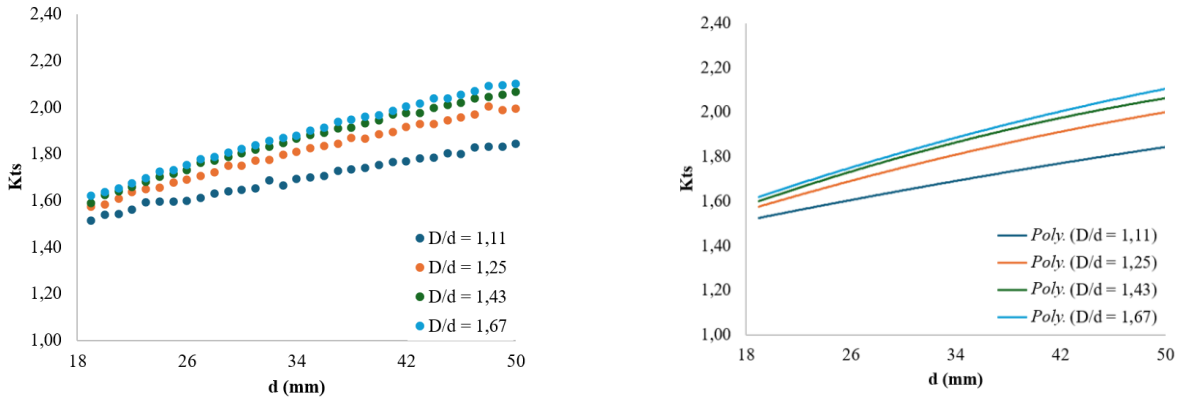


Gambar 6: Contoh distribusi tegangan geser maksimum pada daerah *undercut*

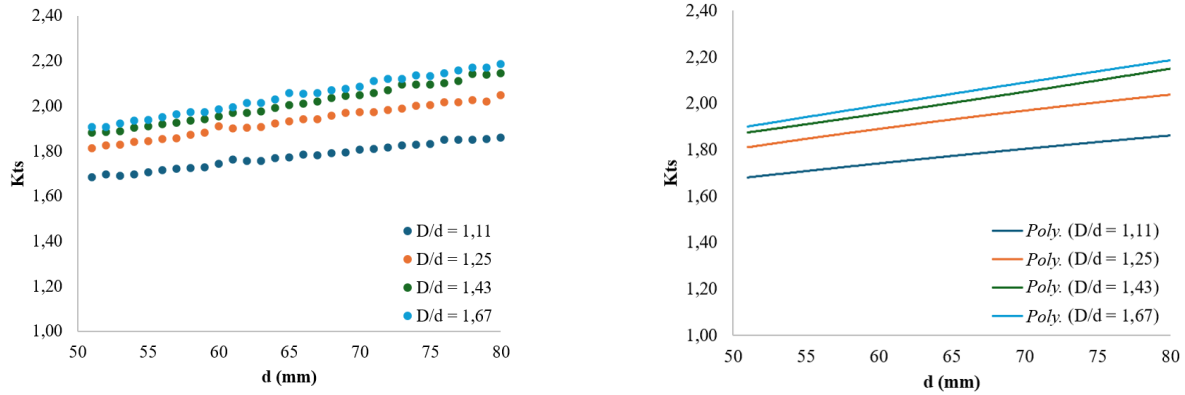
Nilai Kts dihitung dari tegangan maksimum hasil simulasi dan tegangan nominal berdasarkan Persamaan (1) serta (2). Hasilnya kemudian disusun menjadi empat kelompok grafik berdasarkan rentang diameter kecil dan kesamaan dimensi *undercut* pada masing-masing kelompok DIN 509, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7.



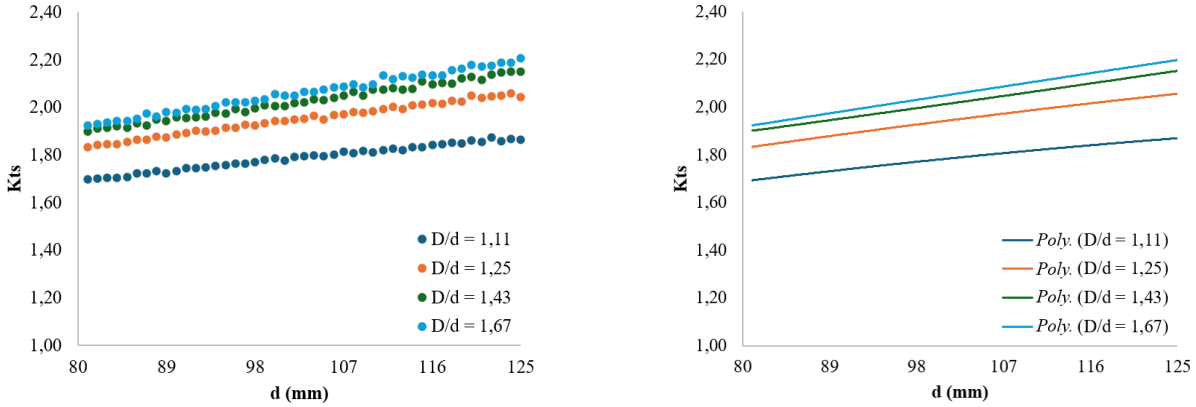
(a)



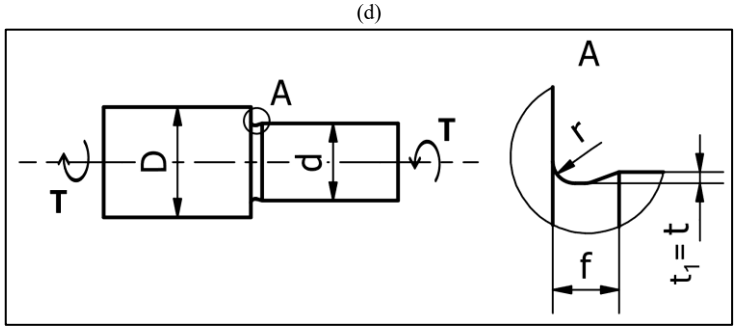
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 7: Nilai Kts hasil simulasi (kiri) dan kurva polinomial (kanan) untuk diameter kecil (a) >3–18 mm, (b) >18–50 mm, (c) >50–80 mm, dan (d) >80–125 mm; (e) definisi geometri

Data Kts dari masing-masing kelompok pada Gambar 7 didekati dengan persamaan polinomial orde dua. Bentuk persamaan tersebut dipilih untuk merepresentasikan kecenderungan tidak linier dengan jumlah parameter yang masih sederhana. Koefisien persamaan, koefisien determinasi (R^2), galat mutlak rata-rata (MAE), dan akar kuadrat galat rata-rata (RMSE) dirangkum pada Tabel 8.

Tabel 8: Persamaan Polinomial Prediksi Kts dan Nilai R^2, MAE, dan RMSE

Rentang d (mm)	D/d	Kts	R^2	MAE	RMSE
>3 sampai ≤18	1,11	Kts = -0,001d^2 + 0,0513d + 1,0637	R^2 = 0,9974	0,00881	0,01022
>3 sampai ≤18	1,25	Kts = -0,0012d^2 + 0,0612d + 1,0441	R^2 = 0,9976	0,00685	0,00820
>3 sampai ≤18	1,43	Kts = -0,001d^2 + 0,0602d + 1,0569	R^2 = 0,9971	0,00823	0,01151
>3 sampai ≤18	1,67	Kts = -0,001d^2 + 0,0629d + 1,0508	R^2 = 0,9980	0,00758	0,00903
>18 sampai ≤50	1,11	Kts = -5x$10^{-5}$$d^2$ + 0,0137d + 1,2828	R^2 = 0,9935	0,00563	0,00767
>18 sampai ≤50	1,25	Kts = -0,0001d^2 + 0,0217d + 1,2057	R^2 = 0,9971	0,02113	0,02439
>18 sampai ≤50	1,43	Kts = -0,0002d^2 + 0,0263d + 1,1609	R^2 = 0,9988	0,04405	0,04964
>18 sampai ≤50	1,67	Kts = -0,0001d^2 + 0,0244d + 1,2027	R^2 = 0,9991	0,03487	0,03919
>50 sampai ≤80	1,11	Kts = -2 x$10^{-5}$$d^2$ + 0,0094d + 1,2639	R^2 = 0,9937	0,01705	0,01820
>50 sampai ≤80	1,25	Kts = -5x$10^{-5}$$d^2$ + 0,0143d + 1,2118	R^2 = 0,9933	0,00411	0,00577
>50 sampai ≤80	1,43	Kts = 3x$10^{-5}$$d^2$ + 0,0061d + 1,4976	R^2 = 0,9953	0,01891	0,02028
>50 sampai ≤80	1,67	Kts = -1x$10^{-5}$$d^2$ + 0,0114d + 1,3485	R^2 = 0,9952	0,00753	0,00878
>80 sampai ≤125	1,11	Kts = -2x$10^{-5}$$d^2$ + 0,0082d + 1,1645	R^2 = 0,9927	0,00584	0,00705
>80 sampai ≤125	1,25	Kts = -2x$10^{-5}$$d^2$ + 0,0084d + 1,2603	R^2 = 0,9936	0,04022	0,04184
>80 sampai ≤125	1,43	Kts = 6x$10^{-6}$$d^2$ + 0,0045d + 1,4965	R^2 = 0,9920	0,00556	0,00666
>80 sampai ≤125	1,67	Kts = -2x$10^{-6}$$d^2$ + 0,0067d + 1,3941	R^2 = 0,9926	0,00534	0,00713

Pada setiap kelompok dimensi *undercut*, nilai (K_{ts}) menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan bertambahnya diameter kecil poros (d) (Gambar 7). Karena ukuran *undercut* dipertahankan di dalam satu kelompok, peningkatan d menyebabkan rasio radius alur terhadap diameter (r/d) mengecil. Kondisi ini dapat meningkatkan efek perubahan geometri terhadap tegangan lokal, sebagaimana dibahas pada kajian alur pembebas oleh Sinossi dan Sadak (2024).

Gambar 7 juga menunjukkan kecenderungan kenaikan Kts ketika rasio diameter besar terhadap diameter kecil (D/d) meningkat. Perbedaan diameter yang semakin besar mempertegas diskontinuitas geometri di sekitar bahu poros dan dapat meningkatkan konsentrasi tegangan akibat torsi pada rentang simulasi yang dikaji.

Kurva Kts pada Gambar 7 tidak membentuk satu hubungan kontinu di antara empat kelompok diameter. Perbedaan ini berkaitan dengan perubahan ukuran *undercut* yang ditetapkan berdasarkan DIN 509 ketika diameter kecil memasuki kelompok berikutnya. Oleh sebab itu, pengguna perlu memilih persamaan sesuai kelompok d, bukan melakukan ekstrapolasi secara langsung melintasi batas kelompok.

Grafik pada Gambar 7 dan persamaan pada Tabel 8 dapat digunakan untuk mengestimasi Kts dari diameter kecil d dan rasio D/d yang sesuai dengan konfigurasi simulasi. Seluruh kurva memiliki R^2 di atas 0,99 terhadap data yang digunakan dalam proses pencocokan. Nilai tersebut menggambarkan kesesuaian model polinomial dengan data numerik, tetapi tidak dapat dianggap sebagai bukti akurasi terhadap eksperimen maupun untuk geometri di luar rentang yang dianalisis.

Tabel 8 memuat MAE dan RMSE sebagai ukuran selisih antara prediksi polinomial dan Kts hasil simulasi. MAE tertinggi yang dilaporkan sebesar 0,04405 terdapat pada kelompok >18 hingga ≤50 mm dengan D/d = 1,43. Pada kelompok tersebut, Kts hasil simulasi berada sekitar 1,59–2,07. Oleh karena itu, galat model tampak terbatas relatif terhadap besaran yang diprediksi, tetapi evaluasi terhadap data uji independen masih diperlukan sebelum persamaan digunakan untuk desain di luar kumpulan data pelatihan.

Perbandingan antara *undercut* dan *fillet* pada tiga konfigurasi poros dengan rasio D/d = 1,11 disajikan pada Tabel 9. Nilai Kts untuk *fillet* diambil dari Pedersen (2018) serta Rogers dan Fleming (2025), sedangkan nilai *undercut* berasal dari simulasi penelitian ini. Ketiga kasus memperlihatkan Kts yang lebih tinggi untuk *undercut* daripada *fillet*. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pemakaian grafik *fillet* sebagai pengganti grafik *undercut* dapat menghasilkan estimasi yang tidak sesuai pada geometri yang dibandingkan. Temuan ini perlu ditafsirkan dalam batas tiga kombinasi ukuran serta kondisi pembebanan yang disajikan.

Tabel 9: Perbandingan Kts Poros Bertingkat dengan *Fillet* dan *Undercut* Pada Tiga Konfigurasi

D/d	D (mm)	d (mm)	r (mm)	Kts (*Fillet*) (Pedersen, 2018)	Kts (*Fillet*) (Rogers & Fleming, 2025)	Kts (*Undercut*) (Penelitian ini)
1,11	60	54	1,6	1,60	1,57	1,71
1,11	70	63	1,6	1,68	1,62	1,78
1,11	80	72	1,6	1,78	1,67	1,84

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan grafik dan persamaan prediksi faktor konsentrasi tegangan geser (Kts) pada poros bertingkat dengan alur pembebas (*undercut*) DIN 509 tipe E menggunakan metode elemen hingga. Simulasi dilakukan pada empat rasio diameter (D/d), yaitu 1,11; 1,25; 1,43; dan 1,67, dengan variasi diameter kecil poros dalam rentang yang dikaji hingga 125 mm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan geser maksimum terjadi di sekitar *undercut*, dengan nilai Kts berkisar antara 1,20 hingga 2,21. Nilai Kts cenderung meningkat seiring bertambahnya diameter kecil poros dan rasio D/d dalam kelompok geometri yang dianalisis. Evaluasi numerik menghasilkan penggunaan mesh global d/3, mesh lokal r/4 pada kelompok diameter terkecil dan r/3 pada kelompok lainnya, serta panjang masing-masing bagian poros sebesar satu kali diameternya, berdasarkan kriteria perubahan hasil kurang dari 1 % pada konfigurasi perwakilan. Sebanyak 16 persamaan polinomial orde dua yang dikelompokkan berdasarkan dimensi *undercut* dan rasio D/d menghasilkan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9920–0,9991 terhadap data simulasi.

Perbandingan terbatas dengan geometri *fillet* juga menunjukkan nilai Kts yang lebih tinggi pada konfigurasi *undercut* yang dianalisis. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan awal untuk memperkirakan faktor konsentrasi tegangan pada perancangan poros bertingkat dengan *undercut* DIN 509 tipe E. Namun, penerapan persamaan dibatasi pada rentang geometri dan kondisi pembebanan yang disimulasikan. Validasi eksperimental, pemeriksaan konsistensi jumlah konfigurasi, dan pembandingan dengan data acuan independen masih diperlukan untuk memastikan keandalan prediksi dalam aplikasi perancangan komponen mesin.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para *editor* dan *reviewer* atas masukan konstruktif yang diberikan demi perbaikan kualitas artikel ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat dianggap memengaruhi hasil atau pembahasan dalam artikel ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

KONTRIBUSI PENULIS

Muhammad Fuad Abdul Hakim : Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Visualisasi, Analisis Formal, Penulisan Draf.

Sutrisno : Supervisi, Metodologi, Analisis Formal, Peninjauan Naskah.

Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan.

DAFTAR PUSTAKA

Abbas, A. W. N., Hussein, A., & Al Shubber, H. A. (2025). A Numerical Analysis of Shaft Stress Concentration Using ANSYS. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(5), 26282–26289.

Ahmad, N. M., Althesa, A., Agus, M., Muchamad, M., Aan, B., & Hisyam, M. (2025). Studi Pengaruh Jumlah, Ukuran, Bentuk Mesh Terhadap Hasil Simulasi Rangka Sepeda Motor Listrik Menggunakan Metode Finite Element Analysis (Fea). *Jurnal Media Informatika (Jumin)*, 6(6), 2720–2731.

Ali, A., Permana, D. I., & Yudha, H. N. (2022). Analysis of variance dimension of reinforcement to stress concentration factor using Finite Element Method. *SINERGI*, 26(3), 295–302.

Bhosle, S. M., Bhosale, S. S., Mahadik, S. C., & Pondkule, S. M. (2025). Exploring research trends in use of finite element analysis for optimization of stress concentration factor in bars with fillets. *Discover Mechanical Engineering*, 4(68), 1-24.

Chintala, G. (2018). Stress Concentration Factors for Various Specimen with ANSYS. *International Journal of Management, Technology And Engineering*, 8(12), 2551–2562.

DIN 509. (2006). Technical drawings - Undercuts - Type and dimensions DIN 509.

Dong, X., & Chen, J. (2026). Finite Element Verification of Saint-Venant Principle based on Abaqus. *Scientific Journal of Technology*, 8(4), 26–30.

Fitri, M., & Saputra, D. D. (2023). Simulasi Putaran Kritis pada Poros dengan Beban Alat Uji Putaran Kritis Menggunakan Software ANSYS. *Jurnal Unitek*, 16(1), 103–114.

H. Patel, R., & P. Patel, B. (2023). Analyzing Stress Concentration Factor in Finite Plate with Different Polygonal Discontinuities Under Uniaxial Compression Using FEM. *Jurnal Kejuruteraan*, 35(5), 1033–1043.

Hafidzin, W. R., & Noubnome, V. (2023). Pengaruh Variasi Radius Fillet Pada Poros Bertingkat Dengan Beban Gabungan Terhadap Faktor Keamanan. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 9(2), 668–677.

Jordaan, J. (2025). Case Study: Evaluation of Stress Concentration Factors in Shaft Keyways Through FE Analysis. *R&D Journal*, 41(1), 1-8.

Kostic, N., Marjanovic, V., Petrovic, N., Pesic, Z. J., & Milenkovic, S. (2024). Predicting Stress Concentration Factors In Tensionloaded Shafts Using Artificial Neural Networks. *COMETa2024 7th International Scientific Conference*, 394–401.

Mayr, C. M., & Rother, K. (2019). Improved stress concentration factors for circular shafts for uniaxial and combined loading. *Materials Testing*, 61(3), 193–203.

Nooruldeen, H. M. (2026). Effect of Fillet Radius of the Shaft On Von Mises Stress. *International Journal of Multidisciplinary Research and Analysis*, 09(02), 542-548.

Ozkan, M. T., & Erdemir, F. (2020). Determination of stress concentration factors for shafts under tension. *Materials Testing*, 62(4), 413–421.

Pedersen, N. L. (2018). Aspects of stress in optimal shaft shoulder fillet. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 53(5), 285–294.

Rogers, L., & Fleming, R. A. (2025). Calculation of Stress Concentration Factors for Round Shafts with Shoulder Fillets. *ASEE Midwest Section Conference*.

Shimasaki, K., Nishino, T., Yoshizawa, T., Watanabe, R., Hirose, F., Yasunaga, S., & Mishima, H. (2024). Stress Analysis in Conversion Total Hip Arthroplasty: A Finite Element Analysis on Stem Length and Distal Screw Hole. *Journal of Clinical Medicine*, 14(1), 1-17.

Sinossi, M. I., & Sadak, T. W. (2024). Numerical Study Of Gradual Change In Shaft Diameter And Relief Groove Radius On Stress Concentration Factor. *Eurasian Physical Technical Journal*, 21(3), 125–131.

Sivák, P., Delyová, I., & Bocko, J. (2023). Comparison of Stress Concentration Factors Obtained by Different Methods. *Applied Sciences*, 13(24), 1-20.

Suryono, E., Jamaldi, A., Kristiawan, Y. Y., Margono, B., Susanto, H., & Wilis, G. R. (2022). Analisis Statik Poros Bintang Aisi 1045 Pada Motor Matic. *Teknika*, 7(4), 157–164.