

ANALISIS PENGARUH *RAKE ANGLE* TERHADAP DISTRIBUSI TEGANGAN PADA *EXCAVATOR BUCKET TEETH* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Sumar Hadi Suryo¹, Hendrawan Surya Hadijaya², Moch. Fihki Fahrizal³

Department of Mechanical Engineering, University of Diponegoro

Jl. Prof. H. Soedarto, SH Tembalang-Semarang, Indonesia, 50275

* Email: ¹sumarhs.undip@gmail.com, ²hendrawansurya58@gmail.com, ³fihki_izal@ymail.com

Abstrak

Excavator sering digunakan dalam kegiatan pertambangan maupun konstruksi. Alat berat yang lebih dikenal dengan nama backhoe ini merupakan mesin penggali yang biasanya digunakan untuk mengeruk bahan tambang, menggali tanah, meratakan tanah, mengeruk sungai, membongkar jalan atau merobohkan bangunan. Pada excavator terdapat komponen yang sering mengalami pergantian yaitu bucket teeth. Pergantian pada bucket teeth dilakukan karena habis masa pemakaian dan juga sering mengalami kegagalan seperti aus, bengkok, retak serta patah saat digunakan. Untuk mencegah terjadinya kegagalan tersebut perlu dilakukan analisa struktur pada bucket teeth. Analisa yang dilakukan adalah untuk mencari distribusi tegangan pada bucket teeth akibat pengaruh rake angle pada saat penggalian. Analisa dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan pembebanan statis serta permodelan dua dimensi untuk mengetahui besarnya gaya penetrasi dan gaya resistif pada bucket teeth. Dari hasil analisa dapat diketahui distribusi tegangan serta nilai tegangan maksimum von mises yang terjadi pada bucket teeth akibat pengaruh rake angle. Besarnya tegangan maksimum hasil analisa kemudian dibandingkan dengan tegangan ijin dari material bucket teeth. Hasilnya menunjukkan bahwa material yang digunakan masih dalam batas aman serta potensi terjadinya kegagalan juga kecil.

Kata kunci: *bucket teeth, excavator, kegagalan, rake angle*

1. PENDAHULUAN

Bentuk *bucket teeth* dan komposisi material *bucket teeth* yang tidak sesuai akan menyebabkan proses penggalian yang buruk, selain itu juga menyebabkan keausan yang tinggi pada *bucket teeth*, kerugian pada waktu dan biaya serta produktivitas akan berkurang (Shaikh dan Mulla, 2015). *Bucket teeth* memiliki dua karakteristik yang penting yaitu performa maksimal dan umur keausan. Performa yang maksimal dipengaruhi oleh desain dari *bucket teeth* sedangkan umur keausan dipengaruhi oleh kekuatan material *bucket teeth*. Untuk kekuatan *bucket teeth* didapat dari perpaduan komposisi material dan juga perlakuan pada saat proses pembuatan (Deere, 2002).

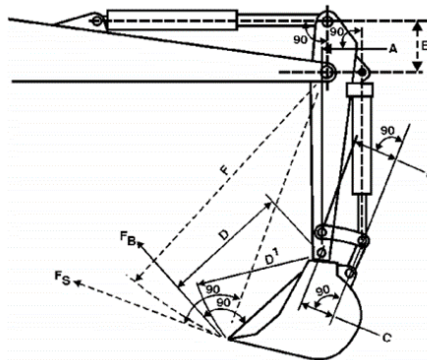
Pada penelitian ini, analisa yang digunakan adalah menggunakan metode elemen hingga. Metode elemen hingga atau *Finite Element Method* (FEM) adalah prosedur numeris yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah-masalah dalam bidang rekayasa (*engineering*). Metode ini digunakan pada masalah-masalah rekayasa dimana *exact solution* atau *analytical solution* tidak dapat menyelesaikannya. Inti dari metode elemen hingga adalah membagi suatu benda yang akan dianalisa, menjadi beberapa bagian dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian-bagian ini disebut elemen yang tiap elemen satu dengan elemen lainnya dihubungkan dengan titik nodal (*node*). Kemudian dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut (Zienkiewicz dkk., 2005).

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan mencari data spesifikasi *bucket teeth* dan spesifikasi tanah melalui pengujian. Kemudian setelah didapat data spesifikasi, dilakukan proses permodelan *bucket teeth* dengan *software SolidWorks* serta perhitungan gaya penetrasi dan gaya resistif. Untuk simulasi metode elemen hingga menggunakan *software Abaqus 6.12*. Setelah dilakukan simulasi maka hasilnya dapat diketahui distribusi tegangan yang terjadi pada *bucket teeth* akibat pengaruh *rake angle* pada saat proses penggalian.

2.1. Gaya Penetrasi

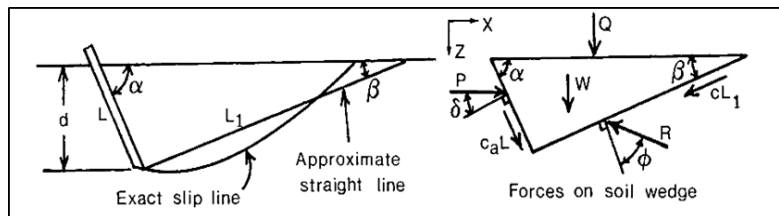
Penetrasi *bucket* ke dalam tanah akan menghasilkan gaya yaitu *bucket curling force* (F_b) dan *arm crowd force* (F_s). Tingkat dari gaya-gaya tersebut telah ditetapkan oleh standar SAE J1179 "Surface Vehicle Standards - Hydraulic Excavator and Backhoe Digging Forces" (SAE, 1990). Gaya tersebut dinilai dari gaya yang diberikan oleh bagian paling ujung pada *excavator* (*bucket teeth*). Nilai ini dapat dihitung dengan memfungsikan tekanan hidraulik silinder pada proses penggalian.



Gambar 1. Mekanisme gaya penggalian (McKyes, 1985)

2.2. Gaya Resistif

Ketika *bucket* sudah melakukan penetrasi ke tanah maka proses yang terjadi berikutnya adalah proses pengerukan/pemotongan. Pada proses ini akan dihasilkan gaya resistif atau bisa disebut *soil cutting force*. *Resistive force* merupakan gaya yang diperlukan oleh *bucket teeth* ketika memotong atau memecah tanah pada saat proses penggalian (Patel dkk., 2011)



Gambar 2. Permodelan resistive force (McKyes, 1985)

Gaya total pada arah vertikal dan horisontal diasumsikan bernilai nol karena kondisi keseimbangan sehingga didapat persamaan berikut :

$$\sum F_x = P \sin(\alpha + \delta) + c_a L \cos \alpha - R \sin(\beta + \phi) - cL_1 \cos \beta = 0 \tag{1}$$

$$\sum F_z = -P \cos(\alpha + \delta) + c_a L \sin \alpha - R \cos(\beta + \phi) + cL_1 \sin \beta + W + Q = 0 \tag{2}$$

Berdasarkan persamaan (2) dan (3) didapat besarnya total *resistive force* seperti berikut :

$$P = \frac{W + Q + cd[1 + \cot \beta \cot(\beta + \phi)] + c_a d[1 - \cot \alpha \cot(\beta + \phi)]}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \phi)} \tag{3}$$

Dimana Q adalah berat per unit panjang dari *failure wedge* (N/m). Ketika persamaan gaya resistif diatas ditulis kedalam persamaan *Fundamental Equation of Earthmoving* maka persamaan (4) menjadi seperti berikut :

$$P = (\gamma g d^2 N_y + cdN_c + qdN_q + c_a dN_{c_a})w \tag{4}$$

Dimana w adalah lebar dari *bucket* (m) dan faktor N dapat diperoleh dari persamaan berikut :

$$N_y = \frac{\cot \alpha + \cot \beta}{2[\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \phi)]} \quad (5)$$

$$N_c = \frac{[1 + \cot \beta \cot(\beta + \phi)]}{[\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \phi)]} \quad (6)$$

$$N_q = 2N_y \quad (7)$$

$$N_{ca} = \frac{[1 - \cot \alpha \cot(\beta + \phi)]}{[\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \phi)]} \quad (8)$$

Untuk menemukan sudut *failure wedge* (β) menggunakan nilai minimal dari sudut β_{cr} yang diperoleh dengan mencoba besar sudut β dari 0 hingga 90° yang dimasukkan ke dalam persamaan (5).

2.3. Spesifikasi Material *Bucket Teeth*

Tabel 1 memperlihatkan komposisi kimia material *bucket teeth*.

Tabel 1. Komposisi material *bucket teeth*.

<i>Chemical Composition (%)</i>									
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al
0,37	0,25	1,34	0,017	0,006	0,007	0,022	0,32	0,16	0,011

Sifat dari material baja yang digunakan dalam permodelan *bucket teeth* seperti yang tercantum pada Tabel 2. Sifat dari material didapat dari hasil pengujian yang telah dilakukan di laboratorium pengujian.

Tabel 2. Sifat material *bucket teeth*.

<i>Mechanical Properties</i>				
<i>Modulus of Elasticity (MPa)</i>	<i>Poisson's Ratio</i>	<i>Yield Strength (MPa)</i>	<i>Tensile Strength (Mpa)</i>	<i>Density (ton/mm³)</i>
205000	0,29	784	981	7,845 x 10 ⁹

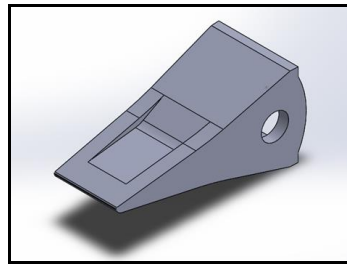
2.4. Pemodelan *Bucket Teeth*

Desain *bucket teeth* pada *SolidWorks* dilakukan setelah mendapat data dimensi seperti panjang, lebar dan tinggi *bucket teeth* yang didapat dari literatur. Dimensi *bucket teeth* secara garis besar ditunjukkan pada Tabel 3 berikut :

Tabel 3. Dimensi *bucket teeth* tipe standar.

Model	<i>Standard Bucket Teeth</i>
Kapasitas Mesin	20 – 25 ton
Panjang	225,5 mm
Lebar	98,5 mm
Tinggi	101,5 mm
Luas permukaan	88498,29 mm ²
Volume	593613,04 mm ³

Setelah mengetahui dimensi yang telah ditetapkan dalam geometri *bucket teeth*, maka dilakukan proses desain dengan menggunakan *software SolidWorks*. Berikut merupakan gambar permodelan *bucket teeth* yang telah dibuat.



Gambar 3. Desain *bucket teeth* 3D.

Pada penelitian ini, jenis *excavator* yang digunakan adalah Komatsu PC200 yang umum digunakan untuk proses penggalian pada pengerjaan konstruksi. Dari spesifikasi *excavator* didapat data yang digunakan untuk menghitung gaya penetrasi sebagai berikut :

Tabel 4. Data perhitungan gaya penetrasi.

d_A (mm)	d_B (mm)	d_C (mm)	d_D (mm)	d_E (mm)	d_f (mm)	D_A (mm)	D_B (mm)	P (MPa)
594	631	453	1496	829	4415	95	80	37,3

2.5. Perhitungan Gaya

Setelah didapat data hasil pengukuran pada *excavator* serta data pengujian tanah maka selanjutnya melakukan perhitungan gaya penetrasi dan gaya resistif. Berikut merupakan hasil perhitungan gaya penetrasi dan gaya resistif akibat pengaruh *rake angle* seperti ditunjukkan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Gaya penetrasi.

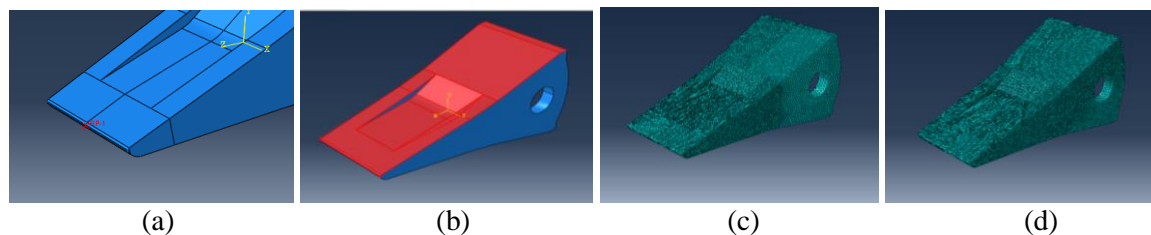
Fb (N)	8797,18
Fs (N)	7688,97

Tabel 6. Gaya resistif berdasarkan perbedaan *rake angle*.

<i>Rake Angle</i> (°)	<i>Failure Wedge Angle</i> (°)	Kedalaman Kerja (m)	Faktor Densitas Ny	Faktor Kohesi Nc	Total Gaya Resistif (N)	Gaya Resistif (N)	Total Tekanan (MPa)	Tekanan Normal (MPa)
15	31	0,0589	2,5538	1,6394	2857,50	571,50	0,0299	0,0274
30	33	0,1138	1,7869	1,7633	6019,06	1203,81	0,0629	0,0577
45	31	0,1609	1,7169	2,2326	10830,91	2166,18	0,1131	0,1038
60	26	0,1970	1,9958	3,2278	19156,70	3831,34	0,2001	0,1835
75	21	0,2197	2,8001	5,3421	35226,47	7045,29	0,3680	0,3375
90	14	0,2275	5,1231	11,383	77133,00	15426,60	0,8058	0,7390

2.6. Simulasi Metode Elemen Hingga

Berikut merupakan pembebanan dan pemberian kondisi batas menggunakan *software Abaqus* seperti ditampilkan pada Gambar 4.

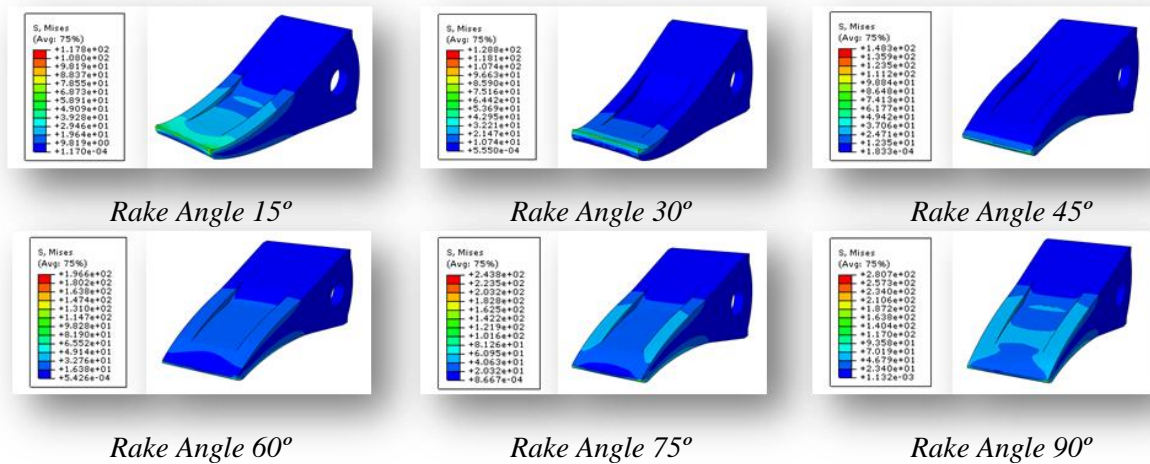


Gambar 4. (a) Pembebanan gaya penetrasi, (b) Pembebanan gaya resistif, (c) Pemberian *meshing* Gaya Penetrasi, (d) Pemberian *meshing* Gaya Resistif

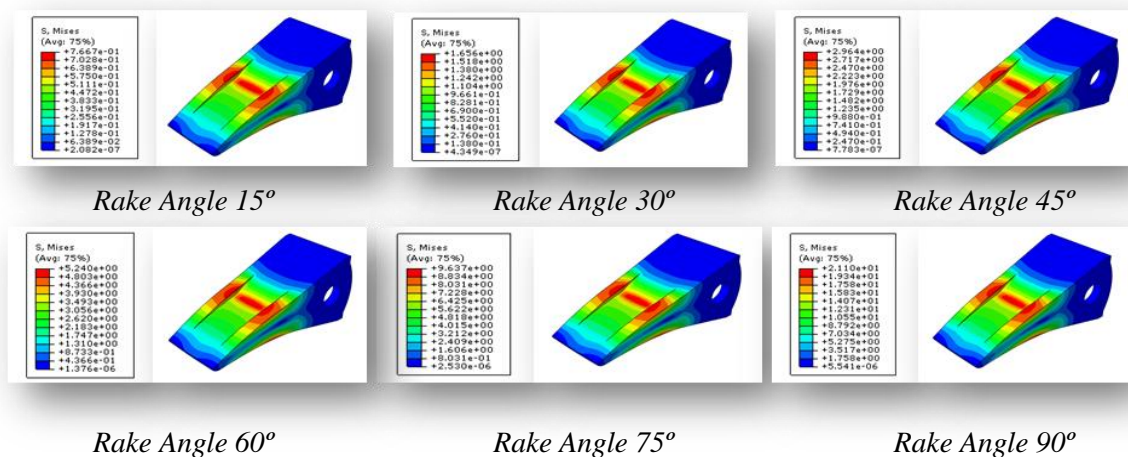
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan dengan 6 perbedaan *rake angle* yang menjadi pertimbangan utama dalam penelitian ini yaitu 15°, 30°, 45°, 60°, 75° dan 90°. Hasil simulasi seperti ditampilkan pada Gambar 5 dan Gambar 6 untuk nilai tegangan maksimal. Data yang ditunjukkan berupa tegangan *von mises* yang terjadi pada *bucket teeth*.



Gambar 5. Distribusi tegangan untuk pembebanan gaya penetrasi



Gambar 6. Distribusi tegangan untuk pembebanan gaya resistif.

3.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat distribusi tegangan yang tidak merata pada tiap *bucket teeth* akibat pengaruh *rake angle*. Besarnya tegangan maksimal yang terjadi pada *bucket teeth* hasil simulasi untuk pembebanan gaya penetrasi didapat tegangan maksimum pada kedua ujung sisi *bucket teeth*. Hal ini menunjukkan bahwa ketika *bucket teeth* digunakan secara terus-menerus maka akan mengalami kegagalan pada kedua ujung sisinya. Sedangkan untuk hasil simulasi dengan pembebanan gaya resistif dapat dilihat bahwa distribusi tegangan terjadi pada bagian tengah *bucket teeth*. Berikut merupakan hasil perhitungan tegangan ijin *bucket teeth* :

$$Safe\ Stress = \frac{Strength\ of\ Material}{Safety\ Factor} = \frac{784}{2} = 392\ MPa$$

Setelah didapat besarnya nilai tegangan ijin kemudian dibandingkan dengan hasil tegangan maksimal yang terjadi pada *bucket teeth* akibat pengaruh perbedaan *rake angle*. Tabel 7

menunjukkan rasio perbandingan tegangan maksimal terhadap tegangan ijin pada *bucket teeth* untuk pembebanan gaya penetrasi. Sedangkan Tabel 8 menunjukkan rasio perbandingan tegangan maksimal terhadap tegangan ijin untuk pembebanan gaya resistif.

Tabel 7. Rasio perbandingan untuk pembebanan gaya penetrasi.

<i>Rake Angle</i> (°)	<i>Maximum Von Mises Stress</i> (MPa)	<i>Maximum Displacement</i> (mm)	<i>Rasio</i> (%)	<i>Safe/Unsafe</i>
15	117,8	0,0128	30,05	<i>Safe</i>
30	128,8	0,0555	32,85	<i>Safe</i>
45	148,3	0,0320	37,83	<i>Safe</i>
60	196,6	0,0736	50,15	<i>Safe</i>
75	243,8	0,1104	62,19	<i>Safe</i>
90	280,7	0,1397	71,60	<i>Safe</i>

Tabel 8. Rasio perbandingan untuk pembebanan gaya resistif.

<i>Rake Angle</i> (°)	<i>Maximum Von Mises Stress</i> (MPa)	<i>Maximum Displacement</i> (mm)	<i>Rasio</i> (%)	<i>Safe/Unsafe</i>
15	0,767	0,0014	0,19	<i>Safe</i>
30	1,656	0,0031	0,42	<i>Safe</i>
45	2,964	0,0056	0,75	<i>Safe</i>
60	5,240	0,0100	1,33	<i>Safe</i>
75	9,637	0,0184	2,45	<i>Safe</i>
90	21,10	0,0402	5,38	<i>Safe</i>

4. KESIMPULAN

- Pada saat proses penggalian, besarnya gaya penetrasi tertinggi adalah 8797,18 N yang didapat dari *bucket curling force*. Sedangkan untuk gaya resistif, besarnya gaya selalu mengalami kenaikan yang berbanding lurus dengan naiknya *rake angle*. Besarnya gaya resistif tertinggi didapat pada *rake angle* 90° yaitu 15426,60 N untuk masing-masing *bucket teeth*.
- Besarnya nilai tegangan selalu mengalami kenaikan untuk setiap perbedaan pada *rake angle*. Untuk pembebanan gaya penetrasi didapat nilai tegangan tertinggi sebesar 280,7 MPa. Sedangkan untuk pembebanan gaya resistif didapat nilai tegangan tertinggi sebesar 21,1 MPa.
- Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa tegangan maksimal untuk pembebanan gaya penetrasi terjadi di ujung kedua sisi *bucket teeth*. Hal ini yang dapat menimbulkan kegagalan pada kedua ujung *bucket teeth* seperti aus, retak atau patah. Sedangkan untuk pembebanan gaya resistif dapat dilihat tegangan maksimal terjadi pada bagian tengah *bucket teeth*, tetapi nilai tegangan maksimal masih jauh dari tegangan yang diijinkan untuk *bucket teeth*.

DAFTAR PUSTAKA

- John Deere. 2002. *Bucket Tooth Catalogue*. USA : John Deere.
- McKyes, E. 1985. *Developments in Agricultural Engineering 7 "Soil Cutting and Tillage*. Amsterdam : Elsevier Science Publishers.
- Patel, BP. Prajapati, JM. and Gadhvi, BJ. 2011. An excavation force calculation and applications : an analytical approach. *International Journal of Engineering Science and Technology* 3 (5) pp.3831-3837.
- SAE International. 1990. SAE J1179 : *Hydraulic Excavator and Backhoe Digging Force*. Warrendale : SAE.
- Shaikh, BP and Mulla, AM. 2015. Analysis of bucket teeth of backhoe excavator loader and its weight optimization. *International Journal of Engineering Research & Technology* 4 (5) pp. 289-295.
- Zienkiewicz, OC. Taylor, RL and Zhu, JZ. 2005. *The Finite Element Method : Its Basis and Fundamentals 6th Edition*. Amsterdam : Elsevier.