

MEKANISME DAN TORSI PENGEPRASAN TUNGGUL TEBU MENGUNAKAN PISAU BAJAK PIRING YANG DIPUTAR

Mechanism and Cutting Torque of Sugar Cane Stubble by Using Rotating Disk Plow

Lisyanto¹, E Namaken Sembiring², I Nengah Suastawa³,
Radite P A Seliawan⁴, M H Bintoro Djoefrie⁵

ABSTRACT

Cutting of sugar cane stubble is one of important activities in sugar cane agriculture system. Problems on labor and low quality of cutting have not been solved by manual cutting system. In addition, a kind of farm machinery, which work in rotating ways did not give a good result in doing the cutting of sugar cane stubble. Due to low quality of cutting and broken sugar cane stubble, it is not used any more. The problem of broken sugar cane stubble in mechanical cutting system should be solved by changing the system of cutting mechanism, preferring impact cutting to chips forming. The goal of the study is to analyze the mechanism of cutting on sugar cane stubble by using rotating disk plow and to develop a mathematical model in order to determine cutting force of sugar cane stubble. Method of analyzing on movement of node on edge is used to describe a curve of edge movement. A mathematical model of cutting force was developed base on instant cutting area which was calculated using Simpson method, numerical integration system. Equations resulted from this study can be applied to simulate the movement of edge using input parameters, mainly: tilt angle, disk angle, angular velocity, linier velocity. Variety of PA 198 has the higher specific cutting resistance per area of cutting than the other varieties. The mathematical model developed can be used to determine the cutting force with a good result.

Keywords : ratoon, sugar cane stubble, torque, cutting, disk plow

Diterima: 12 Desember 2006; Disetujui: 12 Maret 2007

PENDAHULUAN

Pengeprasan merupakan kegiatan pemotongan sisa-sisa tunggul tebu setelah penebangan yang dilakukan pada posisi tepat atau lebih rendah dari

permukaan guludan (Koswara 1989). Tanaman tebu yang tumbuh kembali dari jaringan batang yang masih tertinggal di dalam tanah disebut dengan tanaman keprasan (Barnes 1964). Pengeprasan bertujuan untuk mengkondisikan agar

¹ Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jl. Willem Iskandar Pasar V, Medan Estate, Medan Sumatera Utara, e-mail: Lisyantocd@yahoo.com.

^{2, 3, 4} Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian IPB, Darmaga PO BOX 220 Bogor 16002

⁵ Departemen Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian IPB, Bogor 16680 Telp. (0251) 629347

tunas tanaman keprasan tumbuh dari mata tunas batang tebu yang terdapat di bawah permukaan tanah sehingga tunas tebu tersebut dapat tumbuh dengan baik. Oleh karena itu, pengeprasan merupakan salah satu kegiatan penting dalam budidaya tanaman tebu.

Hingga saat ini pengeprasan tebu masih dilakukan secara manual. Persoalan utama yang dihadapi dalam pengeprasan manual adalah masalah ketersediaan tenaga kerja baik dari aspek kuantitas maupun kualitasnya. Sutjahjo dan Kuntohartono (1994) mengemukakan bahwa tenaga kerja yang tersedia untuk mengelola lahan tebu hanya tinggal sepertiga dari jumlah tenaga kerja pada masa sebelum tahun 1975. Diperkirakan pada tahun-tahun mendatang tekanan masalah tenaga kerja tersebut semakin berat, terutama disebabkan oleh upah yang tinggi dan semakin terbukanya peluang kerja di sektor industri. Masalah lain yang dihadapi dalam pengeprasan manual adalah rendahnya tingkat keseragaman hasil keprasan dan kecilnya kapasitas lapangan.

Pengeprasan yang efektif dan efisien hanya dapat diperoleh melalui penerapan alat dan mesin (alsin) kepras yang sesuai dengan kondisi lapangan. Di lain pihak, alat kepras mekanis (*stubble shaver*) yang ada saat ini dan pernah digunakan oleh beberapa pabrik gula belum memberikan hasil yang optimal, sehingga alat kepras hasil impor tersebut tidak dipergunakan lagi. Pramudya *et al.* (1995) mengemukakan bahwa tidak optimumnya alsin budidaya tebu diakibatkan oleh tidak sesuai ukuran alsin tersebut dengan kondisi pengoperasian di lahan, suku cadang yang tersedia sangat terbatas, dan pengelolaannya yang belum baik.

Pisau yang digunakan pada alat kepras mekanis (*stubble shaver*) tersebut adalah jenis rotari. Pemotongan dengan pisau rotari membutuhkan gaya pukul (*impact*) yang sangat tinggi dan memberikan hasil potongan yang

cenderung pecah. Dobler (1972), diacu dalam Persson (1987) menunjukkan bahwa pada pemotongan batang gandum dengan kecepatan potong yang lebih rendah dari 26 m s^{-1} (7 dan 15 m s^{-1}) memberikan hasil potongan yang tidak rata atau pecah. Wieneke (1972) dan Svensson (1973) diacu dalam Persson (1987) mengemukakan bahwa pecahnya hasil potongan yang diberikan oleh pisau *flail* dan pisau rotari tentu akan mengakibatkan kerusakan pada tanaman, meskipun besar kecilnya kerusakan tersebut bergantung pada kondisi pertumbuhan setelah pemotongan atau pemanenan.

Pecahnya tunggul tebu dan tingginya gaya *impact* dalam pengeprasan mekanis dapat dihindari dengan cara mengubah prinsip desain pemotongan cara *impact* dengan prinsip menggergaji menggunakan pisau bajak piring yang diputar. Pisau bajak piring digunakan dalam penelitian ini dikarenakan pisau tersebut lebih cocok untuk tanah yang berat dan berakar serta mudah diperoleh di lingkungan pabrik gula.

Penelitian ini bertujuan (1) menganalisis mekanisme pemotongan tunggul tebu menggunakan pisau bajak piring yang diputar, (2) menentukan tahanan potong spesifik pada pemotongan satu tunggul tebu untuk empat varietas tebu (PA 198, PA 183, Triton, dan PA 022), (3) mengembangkan model matematika untuk menduga gaya pengeprasan rumpun tunggul tebu varietas PA 198, dan (4) membandingkan gaya hasil pendugaan menggunakan model matematika dengan gaya hasil pengukuran pada percobaan pengeprasan skala laboratorium.

METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Budidaya Pertanian,

Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Penelitian berlangsung delapan bulan, yakni dari bulan Juni 2005 sampai dengan Februari 2006.

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain (1) alat uji pengepresan tunggul tebu (*stubble bin test apparatus*) dan kelengkapannya, (2) instrumen pengukuran dan perekaman data yang terdiri atas sensor torsi, *slip ring*, *bridge box*, *strain amplifier*, *analog to digital converter (ADC)*, dan komputer, (3) mesin-mesin perkakas untuk pembuatan alat uji, dan (4) alat pendukung lainnya seperti *tool kit*, *digital tachometer*, *stop watch*, dan *multitester*.

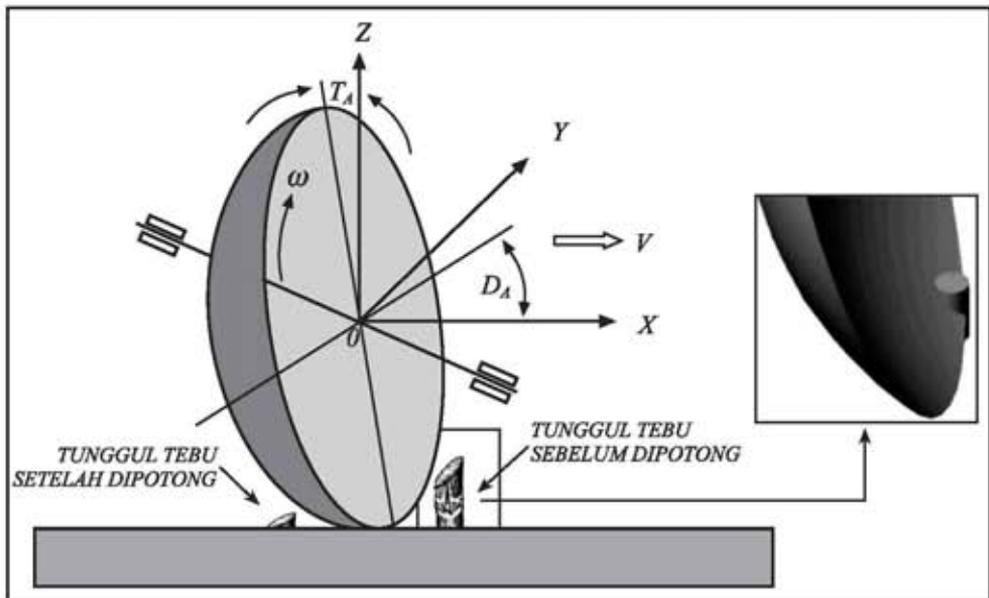
Bahan yang digunakan adalah tunggul tebu sisa penebangan dari tanaman keprasan ketiga (*ratoon ke-3*) yang diambil dari lahan PG Jatitujuh Cirebon, Jawa Barat dengan kondisi 3 hari setelah dibakar. Selanjutnya rumpun tersebut disimpan di Laboratorium Departemen Teknik Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

Penyiraman dilakukan tiap dua hari sekali untuk menjaga agar rumpun tunggul tebu tersebut tidak kering pada saat digunakan untuk percobaan pengepresan. Bagian yang dipotong pada percobaan pemotongan adalah ruas kelima dari daerah perakaran tunggul tebu atau pada posisi rata dengan permukaan tanah. Kadar air rata-rata pada saat percobaan pemotongan sebesar 20.28%.

Metode Analisis Mekanisme Pengepresan Tunggul Tebu

Mekanisme pemotongan tunggul tebu menggunakan pisau bajak piring yang diputar didekati melalui analisis gerakan dan lintasan pisau. Beberapa asumsi yang digunakan dalam analisis tersebut adalah:

- 1) pisau bajak piring berputar pada porosnya dengan kecepatan putar tetap,
- 2) pisau bajak piring yang diputar tersebut bergerak maju dengan jalur lurus di atas permukaan tanah yang datar pada kecepatan maju yang konstan,



Gambar 1. Mekanisme pemotongan satu tunggul tebu menggunakan pisau bajak piring yang diputar dan beberapa parameter yang relevan.

- 3) kadar air tunggul tebu pada saat pemotongan seragam,
- 4) pemotongan hanya terjadi pada tunggul tebu tanpa mengenai tanah, dan
- 5) tunggul tebu memiliki penampang batang berbentuk lingkaran.

Gambar 1 memperlihatkan skema mekanisme pemotongan satu tunggul tebu menggunakan pisau bajak piring yang diputar dan beberapa parameter yang relevan. Gerakan dari sebuah pisau atau benda kaku dapat didefinisikan sebagai gerakan dari satu atau lebih titik-titik yang terdapat pada pisau tersebut (Martin 1990). Kurva gerakan (*locus*) dari pisau bajak piring tersebut memiliki bentuk *helicoid* yang dihasilkan dari kombinasi antara kecepatan sudut (ω) dan kecepatan maju (V). Sudut kemiringan pisau terhadap sumbu Z disebut *tilt angel* (T_A), sedangkan sudut kemiringan pisau terhadap arah gerak maju (sumbu X) disebut *disk angel* (D_A).

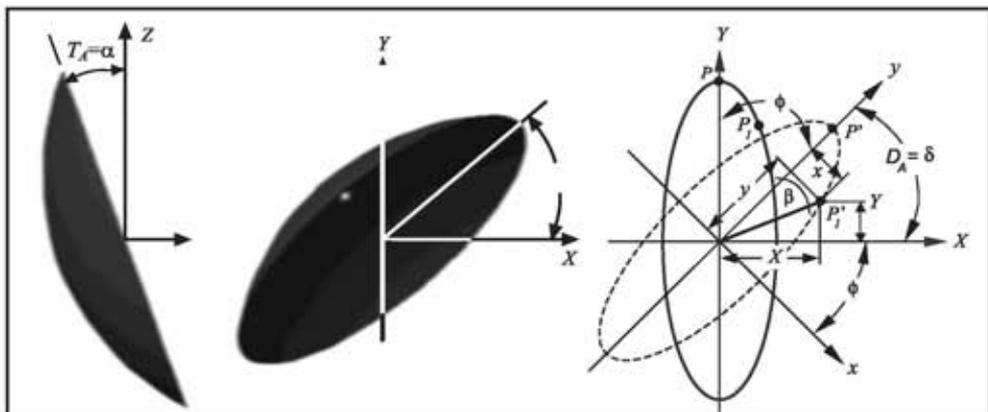
Posisi sebuah titik P pada mata pisau bajak piring dianalisis menggunakan bidang tiga dimensi (XYZ). Titik yang digunakan sebagai referensi dalam analisis gerakan pisau tersebut adalah titik P yang terdapat pada sumbu Y positif (Gambar 2). Pada posisi tersebut titik P memiliki koordinat $P = [0, R, 0]$.

Selanjutnya, setelah pisau tersebut diputar searah jarum jam sebesar θ , maka posisi titik P bergeser menjadi $P_1 = [0, R \cos \theta, - R \sin \theta]$.

Tilt angel (T_A) diperoleh dengan cara memutar pisau tersebut terhadap sumbu Y sebesar α ($D_A = 90^\circ$ dan $T_A = \alpha$). Titik P tidak berubah dari posisi awalnya yakni $P = [0, R, 0]$, namun setelah poros pisau tersebut diputar searah jarum jam sebesar θ , posisi titik P_1 yang awalnya $P_1 = [0, R \cos \theta, - R \sin \theta]$, berubah menjadi $P_1 = [R \sin \alpha \sin \theta, R \cos \theta, - R \cos \alpha \sin \theta]$. Perubahan posisi titik P_1 tersebut hanya terjadi untuk X dan Z, sedangkan untuk $Y = R \cos \theta$ tidak mengalami perubahan dikarenakan pisau tersebut dimiringkan atau diputar terhadap sumbu Y.

Disk angel (D_A) diperoleh dengan cara memutar sumbu XY terhadap sumbu Z sebesar ϕ . Gambar 3 mengilustrasikan sistem pemutaran sumbu Z dan munculnya sudut baru (β) yang menentukan posisi titik-titik pada mata pisau dalam dua peubah sudut kemiringan pisau yakni $D_A = \delta$ dan $T_A = \alpha$.

Titik P_1' tersebut sekarang memiliki koordinat P_1' (x, y) dan P_1' (X, Y) yakni $x = R \sin \theta$ dan $y = R \cos \beta$, sedangkan $X = R \sin (\beta + \phi)$ dan $Y = R \sin (\beta + \phi)$. Nilai sudut β dapat ditentukan dengan



Gambar 3. Sistem pemutaran sumbu Z untuk menentukan *disk angel* ($D_A = 90^\circ - \phi$) mata pisau pada $T_A = \delta$ dan $T_A = \alpha$.

cara memasukkan persamaan posisi titik P_1' (x,y) tersebut ke dalam persamaan posisi sembarang titik P_1 (XY) sebelum posisi pisau digeser sebesar ϕ , yakni $P_1 = [R \sin \alpha \sin \theta, R \cos \theta]$. Substitusi persamaan posisi titik P_1' (x,y) dan P_1 (XY) dapat diuraikan sebagai berikut:
 $P_1' = [R \sin \beta, R \cos \beta]$,

$$x = R \sin \beta \text{ dan } y = R \cos \beta$$

$$P_1 = [R \sin \alpha \sin \theta, R \cos \theta],$$

$$X = R \sin \alpha \sin \theta \text{ dan } Y = R \cos \theta$$

Penggabungan nilai x dan X dari kedua titik tersebut menghasilkan sudut $\beta = \sin^{-1}(\sin \alpha \sin \theta)$. Sudut β juga bisa ditentukan melalui penggabungan nilai y dan Y , yakni $\beta = \cos^{-1}(\cos \theta)$. Nilai β tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter dalam formulasi pemutaran sumbu Z yang menghasilkan garis mata pisau berbentuk *ellips*.

Metode Pendugaan Tahanan Potong Spesifik Tunggul Tebu

Tahanan potong spesifik tunggul tebu (σ) diduga berdasarkan hubungan antara luas pemotongan (A_T) dan gaya hasil pengukuran pada pemotongan satu tunggul tebu (F_{UT}). Nilai A_T dihitung

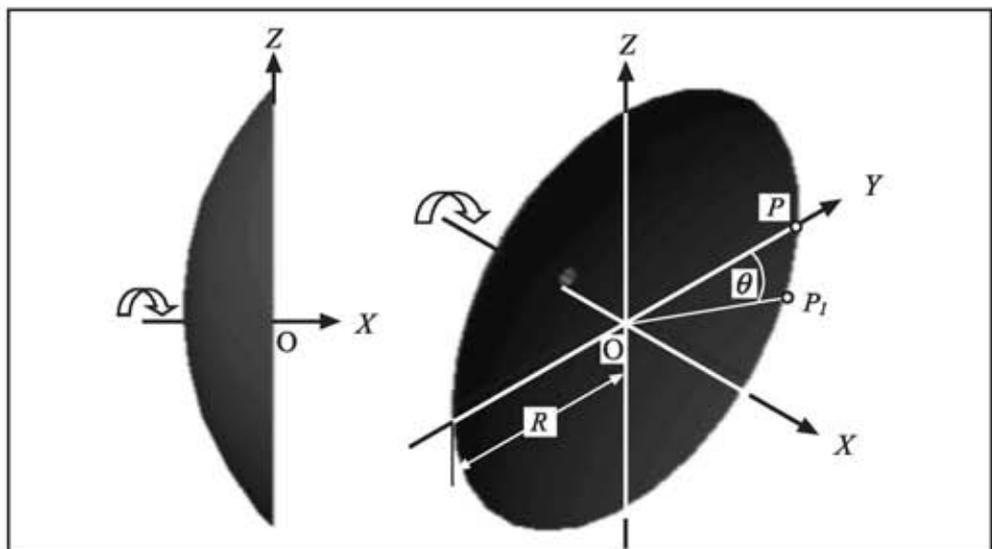
berdasarkan pendekatan integrasi yang dibatasi oleh titik potong antara kurva mata pisau bajak piring dan kurva penampang tunggul tebu, sedangkan F_{UT} diperoleh dari torsi pengukuran pada pemotongan satu tunggul tebu (T_{PT}) dibagi dengan radius (R) mata pisau yang digunakan.

Prinsip *least squares* diterapkan untuk mengepas garis (*fitting a line*) antara data A_T (x) dan F_{UT} (y). Persamaan linier untuk garis tersebut umumnya dinyatakan dengan

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x \tag{1}$$

Dalam hal ini \hat{y} merupakan gaya hasil pendugaan pada pemotongan satu tunggul tebu (F_{MT}), β_1 ialah tahanan potong spesifik tunggul tebu (σ), x adalah luas pemotongan (A_T), dan β_0 adalah intersep garis tersebut yang dinyatakan dengan konstanta (C). Berdasarkan persamaan (1), model pendugaan untuk F_{MT} dan C dapat dituliskan sebagai berikut:

$$F_{MT} = C + \sigma A_T \tag{2}$$



Gambar 2. Gerakan dari titik referensi P pada mata pisau saat $D_A = 90^\circ$ dan $T_A = 0^\circ$ dengan sudut putar θ .

Metode Penentuan Luas Pemotongan Tunggul Tebu

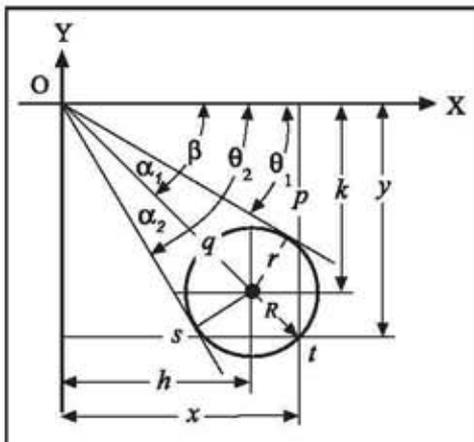
Luas pemotongan tunggul tebu (A_T) dihitung menggunakan pendekatan integrasi numerik kaidah *Simpson*. Sistem koordinat polar digunakan untuk menentukan titik potong antara kurva mata pisau bajak piring yang berbentuk elips dan kurva tunggul tebu berbentuk lingkaran yang digeser. Persamaan koordinat polar untuk mendeskripsikan radius (R) kurva mata pisau bajak piring yang memiliki bentuk elips tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{(R \cos \theta)^2}{a^2} + \frac{(R \sin \theta)^2}{b^2} = 1 \quad (3)$$

Radius kurva lingkaran tebu (R) yang ditentukan menggunakan sistem koordinat polar memiliki dua bagian kurva, yakni radius positif (R^+) dan radius negatif (R^-). Persamaan untuk menentukan radius (R) penampang satu tunggul tebu yang digeser tersebut adalah:

$$(x - h)^2 + (y - k)^2 = r^2 \quad (4)$$

Gambar 4 menunjukkan beberapa parameter yang terkait dalam penentuan



Gambar 4. Parameter yang terkait dalam penentuan persamaan radius (R) kurva satu tunggul tebu yang digeser menggunakan sistem koordinat polar.

persamaan radius (R) kurva tunggul tebu menggunakan sistem koordinat polar.

$$x = R \cos \theta \text{ dan } y = R \sin \theta$$

$$\beta = \theta_1 + \alpha_1; \tan \beta = k/h; \beta = \tan^{-1} (k/h)$$

$$\sin \alpha_1 = r / (h^2 + k^2)^{1/2};$$

sehingga $\alpha_1 = \sin^{-1} \{ r / [h^2 + k^2]^{1/2} \}$

$$\theta_1 = \beta - \alpha_1 \text{ dan } \theta_2 = \beta - \alpha_2$$

Metode Pendugaan Gaya Pengeprasan Rumpun Tunggul Tebu

Persamaan (2) merupakan model linier untuk pendugaan gaya pemotongan pada satu tunggul tebu. Selanjutnya, model tersebut juga digunakan untuk pendugaan gaya pemotongan pada pengeprasan rumpun tebu (F_{MR}) yang terdiri atas beberapa tunggul tebu dengan diameter dan posisi tunggul yang berbeda. Oleh karena itu, luas pemotongan tunggul tebu (A_T) pada model tersebut digantikan dengan luas pemotongan rumpun tebu (A_R). A_R merupakan penjumlahan dari luas pemotongan pada tiap-tiap tunggul tebu yang secara bersamaan terpotong oleh garis mata pisau. Dengan demikian model matematika untuk pendugaan gaya pengeprasaan rumpun tunggul tebu dinyatakan dengan:

$$F_{MR} = C + \sigma A_R \quad (5)$$

Metode Pengukuran Torsi dan Sistem Perekaman Data

Pengukuran torsi pemotongan dilakukan menggunakan alat uji pengeprasan tunggul tebu yang dilengkapi dengan sistem perekaman data. Pada poros penggerak pisau yang terdapat pada alat tersebut dipasang 4 buah sensor berupa *strain gages* untuk mengindra torsi yang terjadi pada saat proses pemotongan. Sebelum alat tersebut digunakan untuk uji pemotongan, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi transduser torsi dan kalibrasi alat (*strain*

amplifier). Data pengukuran yang dihasilkan dari sistem perekaman data tersebut adalah sinyal listrik dalam bentuk tegangan, sehingga perlu dilakukan konversi nilai tegangan (v) menjadi nilai torsi (T). Persamaan kalibrasi untuk konversi parameter tersebut adalah:

$$T = 26.866 v + 0.2507 \quad (6)$$

Pengukuran torsi dilakukan secara berkelanjutan mulai sebelum pemotongan, selama pemotongan, dan setelah pemotongan dengan periode perekaman data setiap 0.01 detik. Gambar 5 mengilustrasikan alat uji pengepresan tebu menggunakan pisau bajak piring yang diputar skala laboratorium dengan seperangkat instrumentasi dan komputer untuk sistem peragaan dan perekaman data.

Teknik Analisis Data Torsi Pemotongan

Torsi pemotongan satu tunggul tebu (T_{PT}) adalah torsi keseluruhan pada saat pemotongan berlangsung (T_{KP}) dikurangi torsi untuk mengatasi gesekan dan beban pemutaran pisau sebelum pemotongan (T_{SP}). Hal yang sama juga berlaku untuk torsi pengepresan rumpun tunggul tebu (T_{PR}), yakni:

$$T_{PR} = T_{KP} - T_{SP} \quad (7)$$

Gaya hasil pengukuran pada pengepresan rumpun tunggul tebu (F_{UR}) diperoleh dari T_{PR} dibagi dengan radius (R) mata pisau yang digunakan. Selanjutnya F_{UR} tersebut digunakan sebagai pembanding (validasi) terhadap gaya pengepresan rumpun tunggul tebu yang diperoleh dari pendugaan menggunakan model matematika.

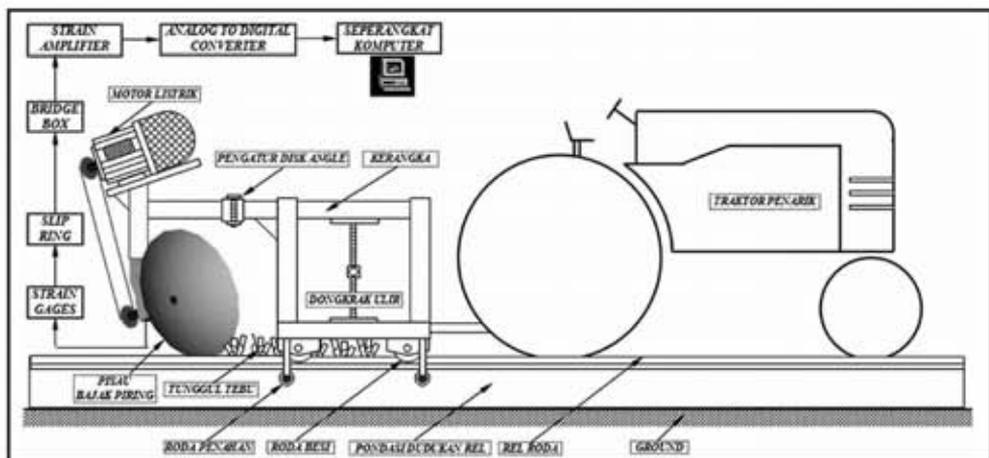
HASIL DAN PEMBAHASAN

Gerakan Mata Pisau Bajak Piring yang Diputar

Gerakan dari sebuah titik pada mata pisau bajak piring yang diputar dan digerakkan maju dengan sudut kemiringan *disk angle* (D_A) dan *tilt angle* (T_A) tertentu memiliki kurva gerakan berbentuk spiral atau *helicoid*. Persamaan gerakan dari sebuah titik pada mata pisau tersebut dalam bidang XY adalah:

$$X = [R \sin \alpha \sin (\omega t) \cos \phi + R \cos (\omega t) \sin \phi] + Vt \quad (8)$$

$$Y = [R \cos (\omega t) \cos \phi - R \sin \alpha \sin (\omega t) \sin \phi] \quad (9)$$



Gambar 5. Alat uji pengepresan tunggul tebu skala laboratorium menggunakan pisau bajak piring yang diputar beserta seperangkat instrumentasinya.

Gambar 6 menunjukkan contoh hasil simulasi bentuk gerakan dari sebuah titik pada satu mata pisau ($k=1$) yang digambarkan dalam bidang XY pada putaran pisau (N) yang berbeda. Pada $N=60$ rpm (Gambar 6a) pisau tersebut hanya berputar satu kali dengan *feed* (f) sebesar 0.15 m per putaran, sedangkan pada $N=500$ rpm (Gambar 6b) pisau tersebut berputar 8.3 kali dengan *feed* (f) 0.018 m per putaran. *Feed* merupakan jarak linier yang ditempuh oleh mata pisau dalam satu putaran.

Persamaan gerakan untuk setiap titik yang terdapat pada mata pisau bajak piring bentuk coak dengan jumlah coakan 12 ($k=12$) pada prinsipnya hampir sama dengan persamaan (8) dan (9). Dalam simulasi tersebut pisau ke-1 ditentukan dari posisi awal $X=0$, $Y=R$, dan $Z=0$, sehingga pada kondisi tersebut pisau bajak piring memiliki kemiringan $T_A \geq 0^\circ$ dan $D_A = 90^\circ$. Pisau ke-2, ke-3, dan seterusnya ditentukan setelah pisau ke-1 dengan cara menghitung ke arah berlawanan dengan jarum jam. Persamaan gerakan dari setiap titik yang terdapat pada 12 mata pisau yang diurutkan dari $i=1$ sampai $i=12$ pada bidang XY secara umum dapat dituliskan sebagai berikut:

$$X = \left[R \sin \alpha \sin \left[\omega t - \frac{(i-1) 2\pi}{k} \right] \right] \cos \phi \quad (10)$$

$$+ R \cos \left[\omega t - \frac{(i-1) 2\pi}{k} \right] \sin \phi + Vt$$

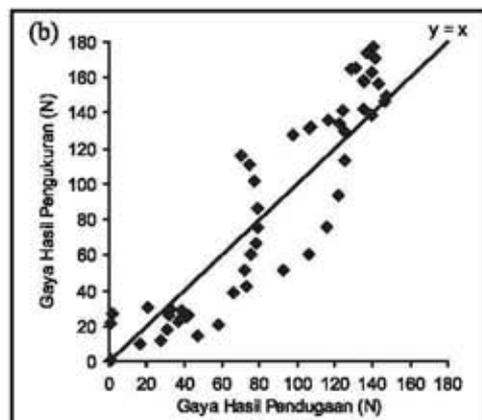
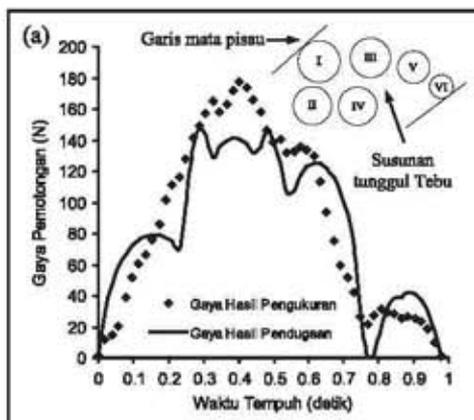
$$Y = R \cos \left[\omega t - \frac{(i-1) 2\pi}{k} \right] \cos \phi - \quad (11)$$

$$\left[R \sin \alpha \sin \left[\omega t - \frac{(i-1) 2\pi}{k} \right] \right] \sin \phi$$

Hasil simulasi persamaan (10) dan (11) dengan masukan $T_A = 15^\circ$, $D_A = 45^\circ$, $N = 60$ rpm, $V = 0.15 \text{ m s}^{-1}$, dan $k = 12$ menghasilkan *feed* pemotongan (f) sebesar 0.0125 m per mata pisau atau 12 kali lebih kecil dari *feed* untuk $k=1$. Besarnya *feed* pemotongan dipengaruhi oleh peubah V , N , dan k yang secara matematis dapat dituliskan:

$$f = \frac{60V}{kN} \text{ (m per putaran)} \quad (12)$$

Tabel 1 menunjukkan bahwa pada V dan N yang sama, pisau bajak piring dengan $k=12$ (bentuk coak) menghasilkan *feed* yang lebih kecil dibandingkan dengan pisau bajak piring dengan $k=1$.



Gambar 6. Hasil simulasi bentuk gerakan sebuah titik pada mata pisau dalam bidang XY untuk pisau bajak piring dengan $k=1$, $T_A=25^\circ$, $D_A=40^\circ$, $N= 60$ rpm, $V = 0.15 \text{ m s}^{-1}$ (a), dan $T_A = 25^\circ$, $D_A = 40^\circ$, $N = 500$ rpm, $V = 0.15 \text{ m s}^{-1}$ (b).

Tabel 1. Nilai *feed* (*f*) pada dua tingkat peubah kecepatan maju (*V*) dan kecepatan putar (*N*) untuk pisau bajak piring dengan *k* =1 dan *k* =12

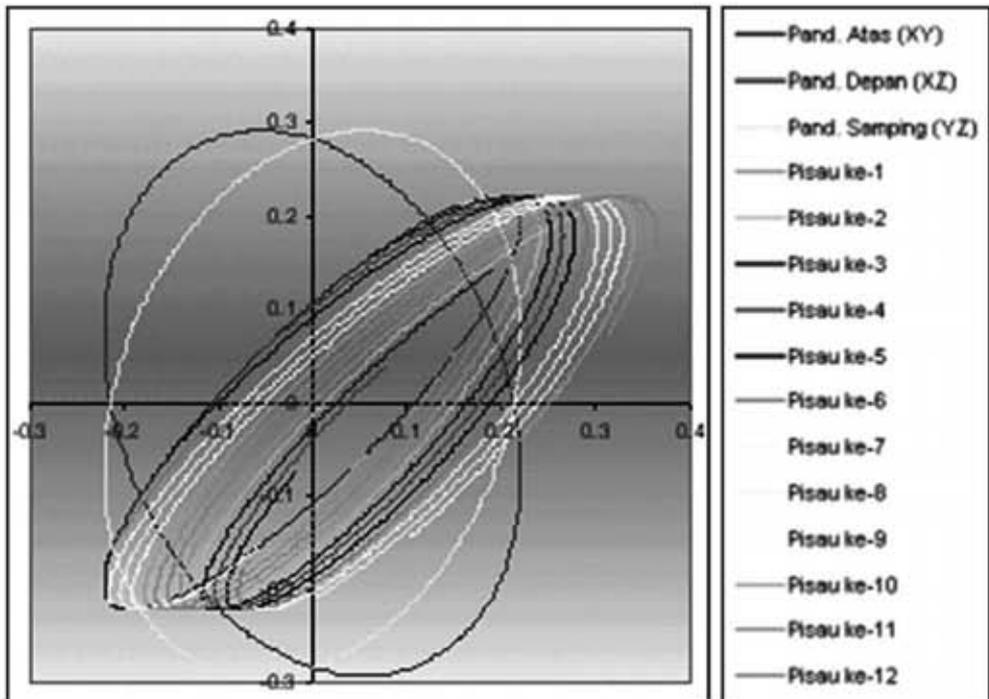
Kecepatan maju (<i>V</i>) dalam m s ⁻¹	Jumlah putaran (<i>N</i>) dalam rpm	<i>Feed</i> (<i>f</i>) pada pisau dengan <i>k</i> =1 (m/put)	<i>Feed</i> (<i>f</i>) pada pisau dengan <i>k</i> =12 (m/put)
0.15	500	0.018	1.5 x 10 ⁻³
0.15	1000	0.009	0.75 x 10 ⁻³
0.30	500	0.036	3.0 x 10 ⁻³
0.30	1000	0.018	1.5 x 10 ⁻³

Gambar 7 memperlihatkan satu contoh hasil simulasi gerakan dari setiap titik pada ke-12 mata pisau yang terdapat pada pisau bajak piring bentuk coak dengan peubah masukan $T_A = 15^\circ$, $D_A = 45^\circ$, $N = 60$ rpm, $V = 0.15$ ms⁻¹, dan $k = 12$.

Tahanan Potong Spesifik Tunggul Tebu

Nilai tahanan potong spesifik tunggul tebu (σ) sangat bergantung pada kondisi

tunggul tebu terutama kadar air, ketajaman mata pisau, dan kinematika pemotongan. Pendugaan σ dilakukan berdasarkan hubungan antara luas pemotongan (A_T) dan gaya hasil pengukuran pada pemotongan satu tunggul tebu (F_{UT}). Luas pemotongan (A_T) antara kurva mata pisau bajak piring yang berbentuk elips (R_P) dan kurva tunggul tebu berbentuk lingkaran yang digeser (R_T) dihitung melalui pendekatan integrasi



Gambar 7. Kurva gerakan dari sebuah titik yang terdapat pada setiap mata pisau untuk pisau bajak piring bentuk coak ($k=12$), $T_A=25^\circ$, $D_A=40^\circ$, $N=60$ rpm, dan $V = 0.15$ m s⁻¹..

Tabel 2. Nilai tahanan potong spesifik tunggul tebu (σ), konstanta (C), dan koefisien determinasi (R^2) untuk varietas PA 183, Triton, dan PA 022

Varietas tebu	Diameter tunggul (cm)	σ dalam (Pa)	C dalam (N)	R^2
PA 183	3.0	1.02×10^6	0.98	0.99
Triton	2.6	0.80×10^6	0.92	0.97
PA 022	2.6	0.95×10^6	0.61	0.96

sebagai berikut:

$$A_r = \frac{1}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} (R_p^2 - R_r^2) d\theta \quad (13)$$

$$R_p = \left[\frac{a^2 b^2}{b^2 \cos^2(D_A - \theta) + a^2 \sin^2(D_A - \theta)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$R_{T(0, \alpha)} = (h \cos \theta + k \sin \theta) \pm \left[(h \cos \theta + k \sin \theta)^2 - (h^2 + k^2 - r^2) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$A_r = \frac{1}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[\left(\frac{a^2 b^2}{b^2 \cos^2(D_A - \theta) + a^2 \sin^2(D_A - \theta)} \right)^{\frac{1}{2}} \pm \left[(h \cos \theta + k \sin \theta) \pm \left((h \cos \theta + k \sin \theta)^2 - (h^2 + k^2 - r^2) \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \right] d\theta$$

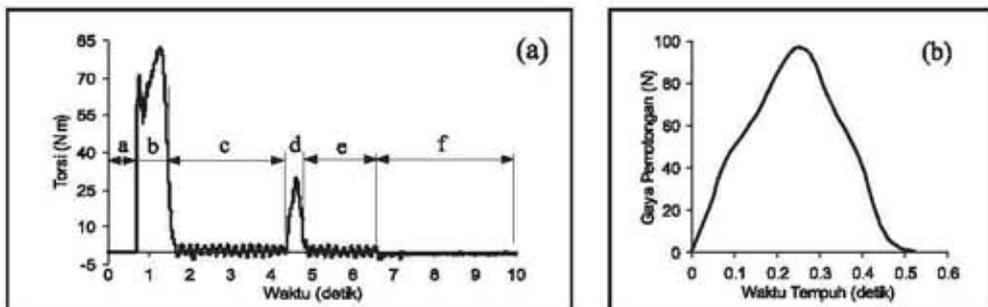
Hasil pendugaan menggunakan model linier [persamaan (2)] menunjukkan bahwa pada pemotongan satu tunggul tebu varietas PA 198 berdiameter 3.0 cm menggunakan mata pisau bajak piring bentuk rata, $T_A = 15^\circ$, $D_A = 45^\circ$, $N = 1000$ rpm, V aktual = 10.8 cm s^{-1} , dan kadar air 20.28% menghasilkan nilai $\sigma = 1.15 \times 10^6 \text{ Pa}$, $C = 0.99 \text{ N}$, dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.94. Dengan metode pemotongan yang sama seperti pada varietas PA 198, nilai σ , C , dan R^2

untuk tiga varietas uji lainnya ditunjukkan pada Tabel 2.

Torsi dan Gaya Pemotongan Satu Tunggul Tebu

Pola torsi hasil pengukuran dalam pemotongan satu tunggul tebu varietas PA 198 dapat diuraikan menjadi beberapa bagian dalam proses percobaan (Gambar 8a), sedangkan gaya pemotongan hasil pengukuran (Gambar 8b) diperoleh dari torsi pengukuran (segmen d) dibagi dengan radius (R) mata pisau yang digunakan yakni 0.3025 m.

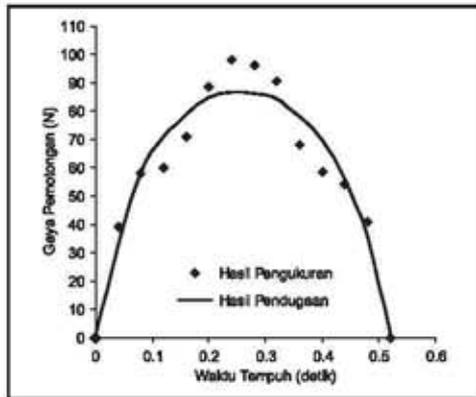
Pada selang waktu percobaan dari 0 sampai 0.68 detik komputer mulai merekam data, namun motor listrik sebagai sumber gerakan putar pisau belum dihidupkan sehingga torsi masih mendekati nol (a). Berikutnya, pada saat motor listrik dihidupkan dan pisau mulai berputar, torsi meningkat secara tajam (81.98 N m) yang kemudian menurun dengan cepat (b). Hal tersebut terjadi akibat dari beban kejut pemutaran pisau. Selanjutnya pisau yang berputar tersebut



Gambar 8. Pola torsi pengukuran (a) dan gaya pemotongan (b) satu tunggul tebu varietas PA 198 berdiameter 3.0 cm menggunakan mata pisau bajak piring bentuk rata, $T_A = 15^\circ$, $D_A = 45^\circ$, $N = 1000$ rpm, dan $V = 10.8 \text{ cm s}^{-1}$.

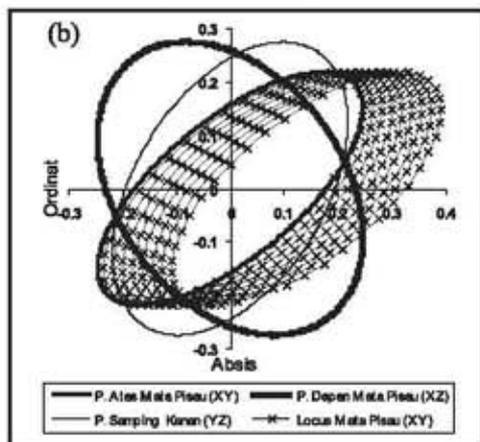
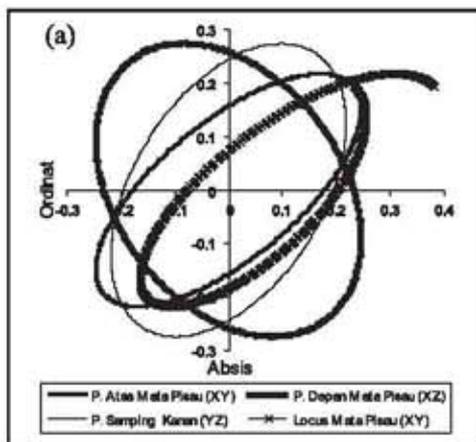
digerakkan maju melalui kereta pembawa yang ditarik oleh traktor 4 roda. Gerakan luncur yang kurang stabil dari kereta pembawa mengakibatkan torsi sebelum pemotongan berfluktuasi meskipun relatif kecil (c). Hal tersebut disebabkan oleh kurang presisinya pemasangan rel dan roda kereta pembawa. Pemotongan satu tunggul tebu mulai terjadi ketika mata pisau tersebut menyentuh tunggul tebu,

sehingga torsi kembali meningkat dengan tajam (d). Torsi pemotongan tersebut membentuk kurva normal (setangkap) karena tunggul tebu yang dipotong memiliki penampang mendekati lingkaran, sehingga pada saat mata pisau mencapai sekitar garis tengah lingkaran, torsi pemotongan berada pada posisi maksimum. Kereta pembawa masih terus ditarik maju meskipun tunggul tebu tersebut sudah terpotong sehingga torsi pengukuran berfluktuasi kembali (e). Setelah kereta pembawa tersebut berhenti motor listrik baru dimatikan, namun pisau masih memiliki putaran sisa sehingga komputer masih merekam torsi meskipun sangat kecil (f). Gaya pemotongan maksimum untuk tunggul tebu varietas PA 198 berdiameter 3.0 cm menggunakan mata pisau bajak piring bentuk rata, $T_A = 15^\circ$, $D_A = 45^\circ$, $N = 1000$ rpm, dan $V = 10.8 \text{ cm s}^{-1}$ tersebut sebesar 96.21 N (Gambar 8b).



Gambar 9. Pola gaya hasil pendugaan dan hasil pengukuran pada pemotongan satu tunggul tebu varietas PA 198 berdiameter 3.0 cm menggunakan mata pisau bajak piring bentuk rata, $T_A = 15^\circ$, $D_A = 45^\circ$, $N = 1000$ rpm, dan $V = 10.8 \text{ cm s}^{-1}$.

Gambar 9 menunjukkan perbandingan antara pola gaya pemotongan hasil pendugaan menggunakan metode *least square* (F_{MT}) dengan pola gaya hasil pengukuran pada pemotongan satu tunggul tebu (F_{UT}) untuk varietas PA 198 berdiameter 3.0 cm. Secara lengkap F_{MT} tersebut dinyatakan dengan:



Gambar 10. Pola gaya hasil model dan hasil pengukuran (a) dan perbandingan antara gaya hasil model matematika dan hasil pengukuran (b) pada pengepresan rumpun tunggul tebu varietas PA 198 yang terdiri atas enam tunggul tebu.

$$F_{MR} = 1.15 \times \frac{1}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[\left(\frac{a^2 b^2}{b^2 \cos^2(D_A - \theta) + a^2 \sin^2(D_A - \theta)} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 d\theta + 0.99 \left[(h \cos \theta + k \sin \theta) \pm \left((h \cos \theta + k \sin \theta)^2 - (h^2 + k^2 - r^2) \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (14)$$

Di mana: a = sumbu mayor elips (mm), b = sumbu minor elips (mm), h = jarak pergeseran pusat penampang tunggul tebu sejajar sumbu X (mm), k = jarak pergeseran pusat penampang tunggul tebu sejajar sumbu Y (mm), r = radius penampang tunggul tebu (mm), dan = 1.15 N mm^{-2} .

Model matematika untuk menduga gaya pemotongan satu tunggul tebu [(persamaan (14)) tersebut kemudian digunakan untuk menduga gaya pengepresan rumpun tunggul tebu (F_{MR}) yang terdiri atas beberapa tunggul dengan diameter dan posisi yang berbeda. Gambar 10a menunjukkan bahwa gaya hasil pendugaan memiliki pola yang mirip dengan gaya hasil pengukuran pada pengepresan rumpun tebu yang terdiri atas enam tunggul tebu. Selanjutnya, plot antara gaya hasil pendugaan (x) dan gaya hasil pengukuran (y) menunjukkan bahwa data (x, y) tersebut memiliki sebaran yang mendekati garis $y = x$ (Gambar 10b).

Gambar tersebut dapat ditafsirkan bahwa model matematika yang telah dikembangkan dapat menduga dengan baik terhadap gaya pengepresan rumpun tebu yang terdiri atas sejumlah tunggul tebu dengan diameter dan posisi yang berbeda. Hal tersebut diindikasikan oleh pola sebaran data gaya hasil model matematika dan hasil pengukuran yang mendekati garis $y=x$. Namun demikian model matematika tersebut masih kurang presisi karena plot antara gaya hasil model dan hasil pengukuran tidak terletak pada posisi satu garis dengan garis $y=x$. Kurang presisinya model matematika tersebut disebabkan oleh bentuk

penampang tunggul tebu dalam model diasumsikan lingkaran sempurna, sedangkan dalam pengukuran tidak demikian. Di samping itu, parameter-parameter lain dalam pemotongan seperti ketajaman, kecepatan maju, dan kecepatan putar masih dianggap sebagai konstanta dan belum diuraikan secara terperinci dalam model matematika tersebut.

KESIMPULAN

1. Mekanisme pemotongan satu tunggul tebu menggunakan pisau bajak piring yang diputar dapat dijelaskan melalui pendekatan kinematika sebuah titik pada mata pisau tersebut dalam bidang tiga dimensi.
2. Tahanan potong spesifik (τ) pada pemotongan satu tunggul tebu menggunakan mata pisau bajak piring bentuk rata, $T_A = 15^\circ$, $D_A = 45^\circ$, $N = 1000 \text{ rpm}$, $V_{\text{aktual}} = 10.8 \text{ cm s}^{-1}$, dan kadar air 20.28% untuk varietas PA 198 adalah $1.15 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, varietas PA 183 sebesar $1.02 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, varietas Triton sebesar $0.80 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, dan varietas PA 022 adalah $0.95 \cdot 10^6 \text{ Pa}$.
3. Model matematika yang dikembangkan berdasarkan pendekatan luas pemotongan dapat digunakan dengan baik untuk menduga besarnya gaya pengepresan rumpun tebu yang terdiri atas beberapa tunggul tebu.

SARAN

1. Sensor kecepatan maju dan kecepatan putar perlu ditambahkan pada alat uji pengeprasan tersebut agar kecepatan aktual saat pemotongan dapat diindera.
2. Tunggul tebu yang digunakan sebagai bahan uji pemotongan sebaiknya pada kondisi sebelum dibakar atau maksimum 7 hari setelah penebangan.
3. Parameter-parameter lain dalam model yang masih dianggap sebagai konstanta seperti ketajaman pisau, kecepatan maju, dan kecepatan putar perlu diuraikan lebih terperinci lagi pada penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, D., Roy, S.K., Jelani, A.R. 2000. Evaluation of design parameters of sikle cutter and claw cutter for cutting oil palm frond. *Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America*. 31: 55-60.
- Barnes, A.C. 1964. *The Sugar Cane*. London: Leonard Hill.
- Hutasoit, G.F. 1978. Penelitian pendahuluan tentang hubungan sifat fisik tebu dengan tingkat pencacahan. Balai penyelidikan perusahaan gula. Juni, Th. XIV No.2.
- Koswara, E. 1989. Pengaruh kedalaman kepras terhadap pertunasan tebu. Makalah Prosiding seminar budidaya tebu lahan kering, 23-25 November 1989. P3GI. Pasuruan.
- Lisyanto, Sembiring, E.N., Suastawa, I N., Setiawan, R.P.A., Djoefrie, M.H.B. 2005. Karakteristik lahan dan tunggul tebu sisa panen: Kajian awal untuk perancangan alat dan mesin kepras tebu. Di dalam: Peran Serta Teknik Pertanian dalam Usaha Revitalisasi Pertanian, Perikanan, dan Kehutanan dalam Rangka Meningkatkan Ketahanan Pangan. Prosiding Seminar Nasional Tahunan; Bandung, 15-16 November 2005. Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia.
- Martin, G.H. 1992. *Kinematika dan Dinamika Teknik*. Setiyobakti, penerjemah. Jakarta: Penerbit Erlangga. Terjemahan dari: *Kinematics and Dynamics of Machines*.
- Persson, S. 1987. *Mechanics of Cutting Plant Material*. Michigan: American Society of Agricultural Engineers.
- Prabawa, S. 1998. Model Pengadaan Alat dan Mesin Budidaya Tebu bagi Pabrik Gula di Lahan Kering [tesis]. Bogor: Institut Pertanian Bogor, Fakultas Teknologi Pertanian.
- Pramudya, B. *et al.* 1995. Rancangan Sistem Perencanaan Optimal untuk Budidaya Tebu secara Mekanis Selektif di Perusahaan Industri Gula. Fateta IPB Bogor.
- Sutjahyo, G.I., Kuntohartono, T. 1994. Penyusutan dan peningkatan kualitas tenaga kerja di kebun tebu. *Majalah Gula Indonesia*. 2: 14-16.

