Technical Paper

Analisis Pindah Panas pada Pipa Utama Sistem Hidroponik dengan Pendinginan Larutan Nutrisi

Heat Transfer Analysis in The Main Pipe of Hydroponic System with Nutrient Solution Cooling

Nurul Choerunnisa, Departemen Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Institut Pertanian Bogor,
Email: choerunnisa_nurul@yahoo.com
Herry Suhardiyanto, Departemen Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Institut Pertanian Bogor,
Email: herrysto@yahoo.com

Abstract

In a hydroponic culture with root zone cooling system, the temperature of cooled nutrient solution rises during distribution to the root zone of the plants. The aims of the research were to analyze the heat transfer from environment to nutrient solution in the main pipe of irrigation for hydroponic system, to validate the heat transfer model, and to develop a guidance to determine the inlet temperature for nutrient solution cooling. Mathematical model for heat transfer in the pipe was developed from heat transfer and fluid flow equations. Temperature of nutrient solution at the inlet position in the main distribution pipe was calculated by using validated heat transfer model. Validation of heat transfer model was done to compare the calculated temperature of nutrient solution with that of measured temperature. The results of heat transfer model validation showed that the heat transfer model is accurate to predict the temperature of nutrient solution in the main pipe. Therefore, the heat transfer model has been used to develop a guidance to determine inlet temperature of nutrient solution for certain condition of thermal environment and expected outlet temperature of nutrient solution.

Keywords: *heat transfer analysis, nutrient solution cooling, main pipe, substrate hydroponic system*

Abstrak

Dalam kultur hidroponik dengan sistem pendinginan terbatas, suhu larutan nutrisi mengalami kenaikan selama didistribusikan menuju zona perakaran tanaman. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis pindah panas pada pipa utama sistem hidroponik, melakukan validasi terhadap model pindah panas tersebut, dan mengembangkan panduan untuk menentukan suhu dalam pendinginan larutan nutrisi pada posisi inlet. Model matematika untuk pindah panas dalam pipa tersebut dikembangkan dari persamaan-persamaan pindah panas dan aliran fluida. Suhu dari larutan nutrisi pada posisi inlet dari pipa distribusi utama dihitung dengan menggunakan model pindah panas yang telah divalidasi. Validasi model pindah panas dilakukan untuk membandingkan suhu larutan nutrisi hasil perhitungan dengan hasil pengukuran. Hasil validasi dari model pindah panas menunjukkan bahwa model pindah panas akurat untuk memprediksi suhu larutan nutrisi di dalam pipa utama. Oleh karena itu, model pindah panas tersebut digunakan untuk mengembangkan panduan dalam menentukan suhu larutan nutrisi pada posisi inlet untuk kondisi lingkungan tertentu dan suhu larutan nutrisi posisi outlet.

Kata kunci: analisis pindah panas, pendinginan larutan nutrisi, pipa utama, sistem hidroponik substrat

Diterima: 09 Oktober 2014; Disetujui: 07 Januari 2015

Pendahuluan

Kondisi lingkungan merupakan aspek yang sangat penting dalam budidaya tanaman. Lingkungan harus dijaga agar berada atau mendekati kondisi optimum bagi tanaman yang dibudidayakan. Penggunaan rumah tanaman dan hidroponik merupakan salah satu metode budidaya tanaman dalam lingkungan yang terkendali (Suhardiyanto 2009). Teknologi ini memungkinkan produksi secara lebih terencana, baik dari segi kuantitas, kualitas, maupun waktu panen.

Indonesia termasuk ke dalam kawasan tropika basah yang menerima radiasi matahari sangat

tinggi. Radiasi matahari yang tinggi menyebabkan suhu di dalam rumah tanaman juga menjadi tinggi. Tingginya suhu udara di dalam rumah tanaman dapat mencapai tingkat yang dapat memicu *stress* pada tanaman (Suhardiyanto 2009). Menurut Kozai et al. (1985) dalam Suhardiyanto (2009), pengendalian suhu udara di dalam rumah tanaman secara mekanik membutuhkan energi yang sangat besar.

Sejak tahun 1990-an, telah dikembangkan sistem pendinginan terbatas (*zone cooling*) dimana pendinginan tidak dilakukan terhadap keseluruhan volume udara di dalam rumah tanaman, melainkan terhadap daerah sekitar tanaman yang paling membutuhkan (Suhardiyanto 2009). Dalam budidaya tanaman secara hidroponik, pendinginan larutan nutrisi lebih tepat dibandingkan dengan pendinginan udara. Panas jenis air lebih tinggi daripada udara sehingga larutan yang didinginkan akan bertahan pada suhu rendah lebih lama dibandingkan dengan udara (Suhardiyanto *et al*. 2007).

Sistem pendinginan terbatas di daerah tropika basah belum banyak dikembangkan. Beberapa pengembangan sistem pendinginan terbatas di daerah tropika basah yang telah dilakukan, yaitu pengembangan sistem pendinginan terbatas daerah perakaran secara NFT (*Nutrient Film Technique*) untuk tanaman selada (Chadirin 1991) dan tomat (Cipta 2007), serta pendinginan terbatas daerah perakaran secara aeroponik untuk tanaman selada (He *et al*. 2001; Jie and Kong 1998) dan kentang (Sumarni 2013).

Kajian analisis termal telah dilakukan terhadap beberapa sistem pendinginan terbatas dengan pendinginan larutan nutrisi. Randiniaty (2007) melakukan analisis termal untuk memprediksi distribusi suhu larutan nutrisi pada bedeng tanaman dalam sistem NFT. Suhardiyanto *et al.* (2007) melakukan analisis pindah panas pada pipa vertikal yang mengalirkan air dari tangki yang dipendam dalam tanah untuk mendinginkan larutan nutrisi menuju pipa utama irigasi. Sumarni *et al*. (2013) melakukan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) untuk memprediksi sebaran suhu di *chamber* pada sistem aeroponik yang didinginkan dengan larutan nutrisi yang disemprotkan melalui *nozzel* (Sumarni *et al*. 2013). Dalam kajian analisis termal yang dilakukan di atas, sifat fisik larutan nutrisi diasumsikan sama dengan air.

Analisis pindah panas dari lingkungan menuju larutan nutrisi yang mengalir di dalam pipa utama dalam sistem hidroponik substrat perlu dilakukan sebagai dasar perencanaan pendinginan terbatas daerah perakaran. Prinsip-prinsip pindah panas dan mekanika fluida digunakan untuk memprediksi suhu larutan nutrisi selama dialirkan di dalam pipa. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis pindah panas pada pipa utama sistem hidroponik substrat dengan pendinginan larutan nutrisi, melakukan validasi model pindah panas melalui perbandingan hasil pengukuran dan perhitungan, dan mengembangkan panduan dalam menentukan suhu larutan nutrisi pada posisi inlet.

Bahan dan Metode

Waktu dan Tempat

Penelitian dilakukan di rumah tanaman tipe *modified standard peak* Laboratorium Lapangan Siswadhi Soepardjo, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Rumah tanaman berukuran 6 m x 12 m yang dibangun membujur ke arah utara-selatan. Dindingnya terbuat dari kawat kassa dengan mesh 1 mm^2. Lokasi penelitian berada di dataran rendah dengan ketinggian 250 dpl. Pelaksanaan penelitian dilakukan pada bulan Juni–Agustus 2013.

Bahan dan Alat

Bahan dan alat yang digunakan meliputi air sebagai pengganti larutan nutrisi, sistem pendinginan larutan nutrisi, sistem irigasi tetes, dan sistem akuisisi data. Sistem pendinginan larutan nutrisi meliputi pendingin Elitech tipe STC 8080H dan pompa celup Wasser tipe WD 101 dengan kapasitas maksimal 70 liter $menit^{-1}$ dan *total head* 6 m. Sistem irigasi tetes meliputi bak penampung larutan nutrisi, pompa listrik Panasonic GA 130JAK (kapasitas 32 liter $menit^{-1}$, daya hisap 9 m, daya dorong 18 meter, dan daya listrik 125 W), pipa utama dari PVC ukuran ¾ inch, pipa lateral, dan *emitter*. Alat ukur yang digunakan meliputi termometer bola basah bola kering, termokopel dan *hybrid recorder* Yokogawa tipe MV Advance 1000, *weather station* Vantage Pro 2, dan *flow meter* Inline tipe panel.

Prosedur Pengambilan Data

Pengukuran dilakukan terhadap pipa utama yang merupakan bagian dari sistem irigasi tetes. Pipa utama yang digunakan adalah pipa PVC berukuran ¾ inch dengan panjang 5 meter. Insulasi yang digunakan adalah busa yang telah diukur konduktivitas termalnya dengan menggunakan *thermal conductivity meter*. Konduktivitas termal dari pipa PVC menurut Harper (2006) berada pada kisaran 0.14-0.19 W m^{-1} K^{-1}. Pengukuran dilakukan mulai dari titik 0 meter hingga titik 5 m pipa utama dengan jarak antar titik sebesar 1 m sehingga terdapat 6 titik di sepanjang pipa utama. Titik pengukuran dinyatakan sebagai jarak relatif terhadap ujung hilir pipa (x/L = 1.0), dimana x adalah jarak titik pengukuran terhadap hilir pipa (m) dan L adalah panjang pipa utama (m). Pada setiap titik diukur suhu larutan nutrisi, suhu dinding dalam pipa, suhu dinding luar pipa, dan suhu bagian luar insulasi. Debit air diukur ketika air masuk dan keluar dari pipa utama dengan menggunakan *flow meter*.

Pengukuran dilakukan pada pukul 7.00 – 17.00 pada tanggal 19 Agustus 2013. Pengambilan data

dilakukan setiap 30 menit. Suhu input larutan nutrisi berkisar antara 8 - 25 ^{O}C. Besarnya debit diatur dengan menggunakan katup yang dipasang sebelum pipa utama. Suhu udara, kelembaban udara, dan radiasi matahari diukur sepanjang hari.

Analisis Pindah Panas

Analisis pindah panas dilakukan terhadap aliran air yang melalui pipa utama. Dalam penelitian ini diambil beberapa asumsi, yaitu: (1) sifat fisik larutan nutrisi dianggap sama dengan air; (2) perpindahan panas yang terjadi hanya melalui proses konveksi dan konduksi dengan batas sistem adalah dinding paling luar saluran larutan nutrisi; dan (3) perpindahan panas terjadi pada satu dimensi ke arah radial dalam keadaan *steady*.

Aliran kalor menyeluruh sebagai hasil gabungan proses konduksi dan konveksi pada kondisi *steady* akan menghasilkan suatu tahanan termal (Çengel dan Turner 2011). Persamaan total tahanan termal tersebut adalah sebagai berikut:

$$R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o \quad (1)$$

dimana R_i adalah tahanan termal karena pindah panas secara konveksi antara fluida di dalam saluran dan dinding saluran bagian dalam (W^{-1}), R_{wall} adalah tahanan panas dari dinding saluran (W^{-1}), dan R_o adalah tahanan panas karena pindah panas secara konveksi antara dinding saluran bagian luar dan fluida di luar saluran (W^{-1}).

Dalam penelitian ini, sistem dibatasi sampai dengan permukaan insulasi. Oleh karena itu diadakan pengukuran di permukaan tersebut. Apabila pipa utama akan diberi insulasi, maka R_{wall} terdiri dari tahanan termal dari dinding pipa dan dinding insulasi sehingga persamaannya menjadi sebagai berikut:

$$R_{total} = \frac{1}{hA_1} + \frac{\mathrm{In}(D_2/\mathrm{D}_1)}{2\pi k_p L} + \frac{\mathrm{In}(D_3/\mathrm{D}_2)}{2\pi k_i L} \quad (2)$$

dimana $A_1 = \pi D_1 L$, h adalah koefisien pindah panas konveksi (W m^{-2} K^{-1}), k_p adalah konduktivitas termal pipa (W m^{-1} K^{-1}), k_i adalah konduktivitas termal bahan insulasi (W m^{-1} K^{-1}), L adalah panjang pipa (m), D_1 adalah diameter pipa bagian dalam (m), D_2 adalah diameter pipa bagian luar (m), dan D_3 adalah diameter pipa ditambah dengan insulasi (m).

Laju perpindahan panas kemudian dapat diketahui dengan menggunakan persamaan:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = U A \Delta T \quad (3)$$

dimana U adalah *overall heat transfer coefficient* yang satuannya W m^{-2} (Çengel, 2011), DT adalah perbedaan suhu menyeluruh (K), dan A adalah luas penampang benda yang tegak lurus terhadap aliran panas (m^2). Dengan demikian, *overall heat transfer coefficient* (U) dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut:

$$U = \frac{1}{\frac{A_3}{hA_1} + \frac{A_3 \ln(D_2/D_1)}{2\pi k_p L} + \frac{A_3 \ln(D_3/D_2)}{2\pi k_i L}} \quad (4)$$

Bilangan Reynold perlu diketahui untuk menentukan jenis aliran suatu fluida. Bilangan Reynold (*Re*) dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (5)$$

dimana ρ adalah massa jenis fluida (kg m^{-3}), V adalah kecepatan aliran fluida (m s^{-1}), D_h adalah diameter hidrolik (m), dan μ adalah viskositas dinamik fluida (kg m^{-1} s^{-1}).

Hukum pertama termodinamika secara sederhana dapat ditulis sebagai berikut:

$$Q_{in} - Q_{out} = Q_{stored} \quad (6)$$

dimana Q_{in} adalah jumlah panas yang masuk ke dalam sistem (Watt) dan Q_{out} adalah jumlah panas yang keluar dari dalam sistem (Watt).

Panas yang disimpan oleh air selama mengalir dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (7)$$

dimana $\dot{m}$ adalah laju aliran massa (kg s^{-1}) dan C_p adalah kalor jenis (J kg^{-1} ^{O}C^{-1}). Dengan demikian, persamaan di atas dapat dikembangkan menjadi (Holman, 2009):

$$\dot{m}\, Cp\left(T_o' - T_i\right) = UA\left(\frac{(T_d - T_n) - \left(T_d - T_o'\right)}{\ln\left(\frac{T_d - T_i}{T_d - T_o'}\right)}\right) \quad (8)$$

Persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$T_o' = T_d - \left(\frac{T_d - T_n}{\exp\left(\frac{U\,A}{m\,C_p}\right)}\right) \quad (9)$$

dimana T_o' adalah suhu larutan nutrisi yang keluar dari pipa utama hasil perhitungan (^{O}C), T_d adalah suhu dinding pipa utama atau insulasi bagian luar (^{O}C), dan T_n adalah suhu larutan nutrisi (^{O}C).

Menurut Kreith (2010), untuk aliran di dalam pipa atau saluran yang panjang, panjang-penting dalam bilangan *Nusselt* (*Nu*) adalah garis tengah atau hidroliknya atau D_h, yang berdefinisi:

$$D_h = 4\frac{\text{Luas penampang aliran}}{\text{Keliling basah}} \quad (10)$$

Tabel 1. Ikhtisar persamaan-persamaan yang digunakan dalam perpindahan panas konveksi paksa di dalam saluran

Sistem	Persamaan	
Pipa panjang (L/D > 20) Aliran laminar (Re < 2100)	$Nu = 1.86\ (Re\ Pr\ DH/L))^{0.33}\ (\mu b/\mu s)^{0.14}$ Pemanasan cairan $\mu b/\mu s = 0.36$ Pendinginan cairan $\mu b/\mu s = 0.20$	(13)
Pipa pendek (L/D < 20) Aliran laminar (Re < 2100)	$Nu = Re\ Pr\ DH/(4L)\ \ln\ (1 - (2.6(Pr^{0.167}(Re\ Pr\ DH/L)^{0.5}))^{-1}$	(14)
Pipa panjang (L/D > 20) Aliran turbulen (Re > 2100)	$Nu = 0.023\ Re^{0.8} Pr^{0.33}$	(15)
Pipa pendek (L/D < 20) Aliran turbulen (Re > 2100)	$Nu = 0.023\ (1 + DH/L)^{0.7}\ Re^{0.8}\ Pr^{0.33}$	(16)

[a]*Sumber: (Kreith 2010)*

Luas penampang aliran pipa adalah $\frac{\pi D^2}{4}$ dan keliling basahnya (*wetted perimeter*) adalah πD. Oleh karena itu, garis tengah dalam pipa sama dengan garis tengah hidroliknya. Dengan demikian, D_h dapat dihitung dengan persamaan:

$$D_h = 4\,\frac{(4/\pi)(D^2_{out} - D^2_i)}{\pi\,(D_i - D_{out})} = D_{out} - D_i \qquad (11)$$

dimana D_i adalah diameter pipa bagian dalam (m) dan D_{out} adalah diameter pipa bagian luar (m).

Koefisien konveksi antara dinding pipa dan air ditentukan berdasarkan persamaan:

$$h = \frac{k_a Nu}{D_h} \qquad (12)$$

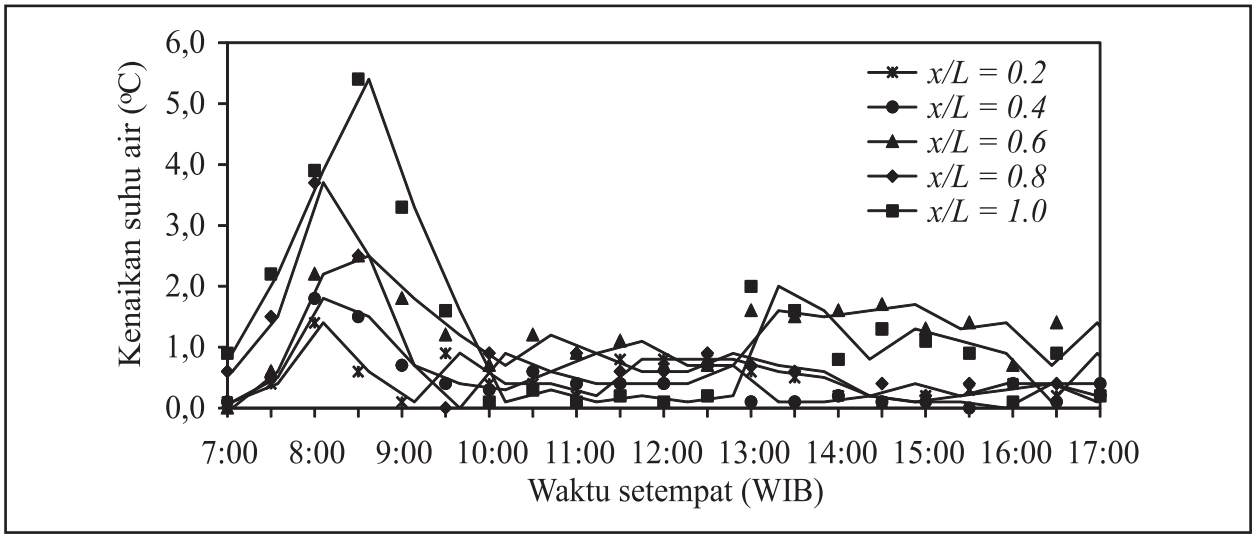
dimana k_a adalah konduktivitas termal air (W m^{-1} ^{o}C^{-1}).

Nilai *Nu* diperoleh dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada Tabel 1. Persamaan yang digunakan untuk menghitung *Nu* tergantung dari bilangan Reynold dan perbandingan L/D_h. Nilai *Vs, Ka,* C_p, μ, dan *Pr* dari air diperoleh dari tabel *Properties of saturated water* (Çengel dan Turner 2011).

Hasil dan Pembahasan

Perubahan Suhu Air di dalam Pipa

Data pengukuran yang diolah adalah data pengukuran pada hari cerah pada tanggal 19 Agustus 2013. Radiasi matahari tertinggi terjadi pada pukul 13.00 WIB yaitu 912 W m^{-2} dan menjadi nol pada pukul 18.00 WIB. Suhu udara di dalam rumah tanaman tertinggi terjadi pada pukul 13.30 WIB yaitu 35.5 ^{O}C dan suhu udara di luar rumah tanaman tertinggi terjadi pada pukul 14.30 WIB yaitu 33.5 ^{O}C. Perbedaan waktu tercapainya suhu udara maksimum di dalam dan di luar rumah tanaman ini disebabkan karena kelembaban udara di dalam rumah tanaman pada pukul 13.00-14.30 WIB konstan dan lebih tinggi (81%) jika dibandingkan



Gambar 1. Kenaikan suhu air di sepanjang pipa utama sistem hidroponik (19 Agustus 2013)

Tabel 2. Gradien dan intersep garis regresi linier antara suhu air hasil perhitungan dan hasil pengukuran serta koefisien determinasinya.

No	*x/L*	Gradien	Intersep	Koefisien determinasi
1	0.2	1.0127	-0.0432	0.9781
2	0.4	1.0199	-0.2642	0.9764
3	0.6	0.9724	-0.5486	0.9706
4	0.8	1.0258	-0.2770	0.9363
5	1.0	0.9215	0.0404	0.8098
6	Keseluruhan	0.9668	0.0893	0.9114

kelembaban udara di luar rumah tanaman yang menurun dan lebih rendah (55-44%). Suhu udara di dalam rumah tanaman rata-rata lebih tinggi 2 ^{O}C daripada suhu udara di luar rumah tanaman.

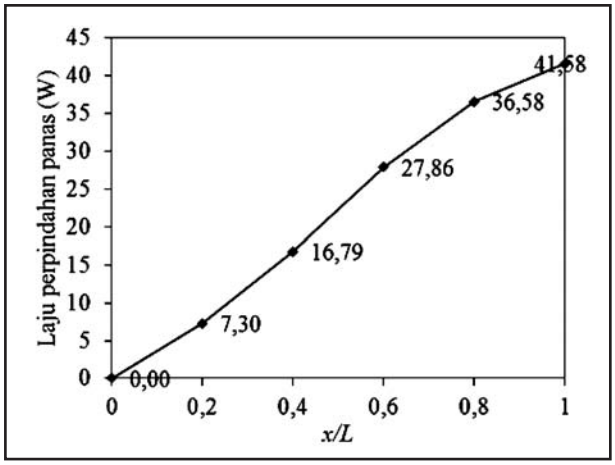
Air yang dialirkan di dalam pipa utama sistem hidroponik mengalami kenaikan suhu yang terjadi akibat proses pindah panas dari lingkungan menuju air. Faktor lingkungan yang mempengaruhi proses pindah panas tersebut adalah udara di dalam rumah tanaman dan lantai rumah tanaman. Kenaikan suhu rata-rata pada *x/L* = 0.2 adalah 0.40 ^{O}C, pada *x/L* = 0.4 adalah 0.42 ^{O}C, pada *x/L* = 0.6 adalah 0.54 ^{O}C, pada *x/L* = 0.8 adalah 0.64 ^{O}C, dan pada *x/L* = 1.0 adalah 1.25 ^{O}C. Dari pukul 06.00 WIB sampai pukul 08.00 WIB terjadi kenaikan suhu yang cukup nyata pada setiap titik pengukuran. Baik suhu maupun kelembaban udara di dalam rumah tanaman juga mengalami kenaikan yang cukup nyata. Namun, kenaikan suhu dan kelembaban ini tidak merata di dalam rumah tanaman. Titik pengukuran *x/L* = 1.0 merupakan titik pengukuran dengan rata-rata kenaikan suhu air yang paling tinggi karena posisinya berada di timur sehingga menerima radiasi matahari lebih besar daripada bagian lain di dalam rumah tanaman. Kenaikan suhu air dapat dilihat pada Gambar 1.

Laju Perpindahan Panas di Sepanjang Pipa Utama

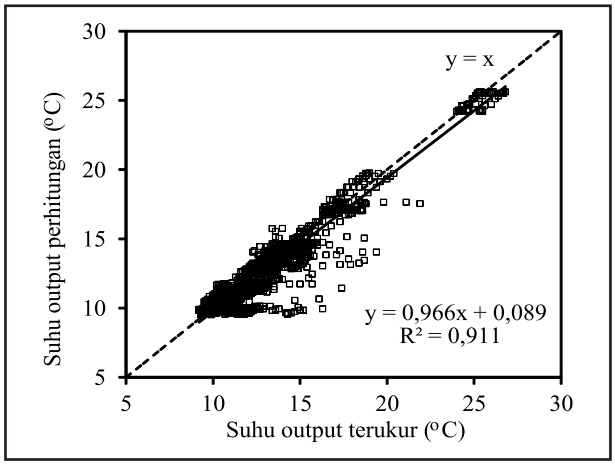
Hasil perhitungan laju perpindahan panas di sepanjang pipa ditunjukkan pada Gambar 2. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa laju perpindahan panas semakin meningkat dari *x/L* = 0.2 ke *x/L* = 1.0 yaitu 7.30-41.58 W. Hal ini disebabkan karena tahanan termal yang semakin menurun seiring dengan meningkatnya panjang pipa yang dilalui aliran air. Laju perpindahan panas ini diukur pada debit aliran sebesar 0.00025 m^3 s^{-1}. Debit aliran larutan nutrisi sebelum dan sesudah memasuki pipa utama besarnya sama sehingga dapat dipastikan tidak terjadi penurunan tekanan. Penurunan tekanan sebetulnya selalu terjadi dalam setiap aliran fluida di dalam pipa. Karena nilai penurunan tekanan ini sangat kecil dan penurunan tekanan dapat diabaikan, aliran dianggap *steady*.

Validasi Model Pindah Panas

Validasi model pindah panas pada penelitian ini dilakukan dengan metode analisis regresi linier. Suhu air hasil prediksi dan hasil pengukuran diplot untuk mendapatkan hubungan linier antara kedua variabel tersebut. Kemudian, garis linier yang terbentuk dibandingkan dengan garis y = x. Prediksi suhu air semakin akurat jika garis linier tersebut semakin mendekati garis y = x atau nilai gradien dari



Gambar 2. Laju perpindahan panas di sepanjang pipa utama sistem hidroponik (19 Agustus 2013)



Gambar 3. Plot data suhu air pada posisi outlet hasil perhitungan dengan hasil pengukuran keseluruhan.

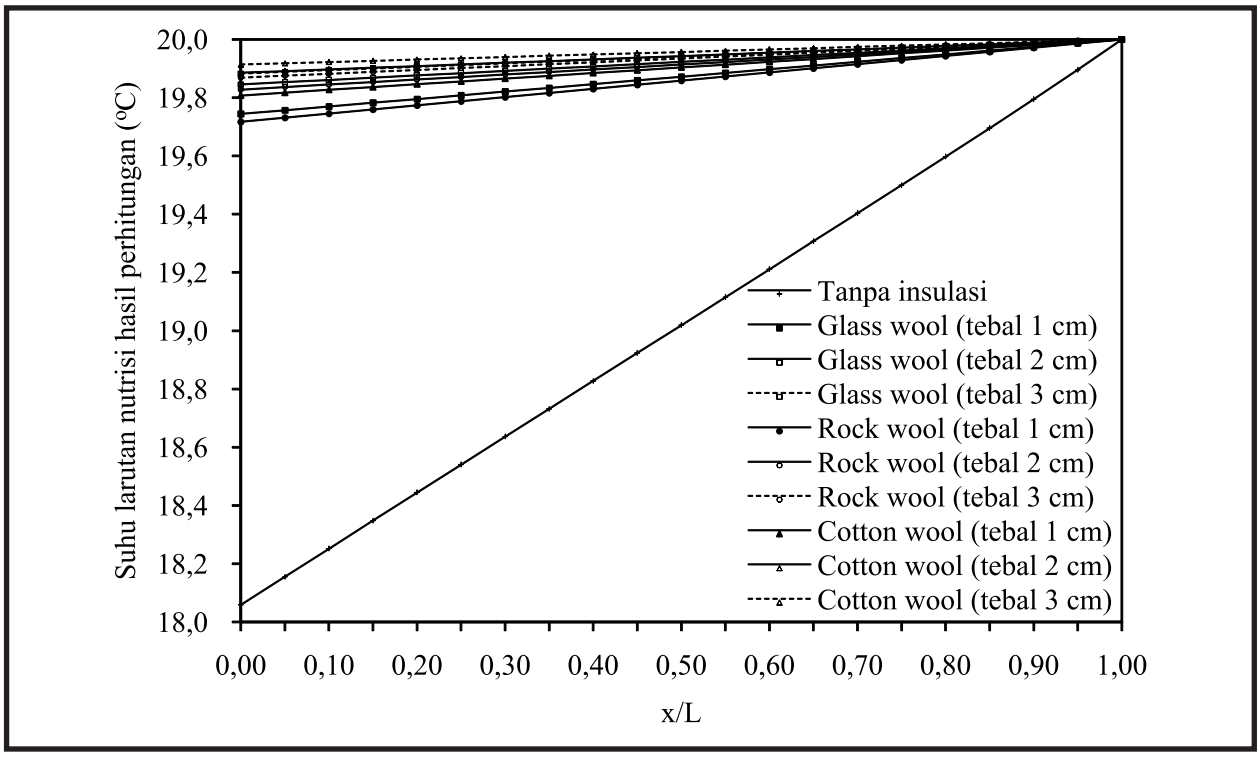
Tabel 3. Input data untuk penentuan suhu larutan nutrisi pada posisi inlet pipa.

Input data	Lambang	Satuan	Nilai
Suhu output larutan nutrisi	T_o	°C	20
Debit	Q	$m^3 s^{-1}$	0.000163
Suhu dinding	T_d	°C	33
Panjang total pipa	L	m	20
Diameter dalam pipa	D_1	m	0.022
Diameter luar pipa	D_2	m	0.026
Tebal insulasi	T	m	0.01-0.03
Konduktivitas termal pipa (PVC 3/4 inch)	k_p	$W m^{-1} K^{-1}$	0.16
Konduktivitas termal insulasi bahan *glass wool*	k_i	$W m^{-1} K^{-1}$	0.040
Konduktivitas termal insulasi bahan *rock wool*	k_i	$W m^{-1} K^{-1}$	0.045
Konduktivitas termal insulasi bahan *cotton wool*	k_i	$W m^{-1} K^{-1}$	0.029

persamaan regresi linier tersebut mendekati satu sedangkan intersepnya mendekati nol. Koefisien determinasi (R^2) yang dihasilkan dapat digunakan untuk menunjukkan tingkat keeratan korelasi antara hasil perhitungan dengan hasil pengukuran. Nilai maksimum R^2 adalah 1.

Validasi model pindah panas dilakukan pada *x/L* = 0.2 hingga *x/L* = 1.0. Plot data hasil perhitungan dan hasil pengukuran suhu air dan garis regresi linier yang dihasilkan untuk keseluruhan posisi pada pipa utama dapat dilihat pada Gambar 3 dan ikhtisar garis regresi linier per titik serta keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 2. Secara umum, gradien garis regresi yang diperoleh mendekati satu dan intersepnya mendekati nol. Koefisien determinasi yang dihasilkan juga mendekati 1. Hal ini menunjukkan bahwa model pindah panas yang dikembangkan akurat dalam memprediksi suhu air yang keluar dari pipa utama. Model tersebut dapat digunakan untuk perencanaan sistem pendinginan larutan nutrisi untuk hidroponik substrat.

Tabel 2 menunjukkan bahwa koefisien determinasi cenderung semakin menurun ketika jarak titik pengukuran dari posisi inlet aliran air semakin jauh. Hal ini dapat disebabkan karena nilai konduktivitas termal dari pipa PVC yang diambil dari literatur lebih rendah daripada nilai konduktivitas termal pipa PVC yang digunakan pada saat penelitian. Selain itu, adanya bagian pipa yang tidak tertutup insulasi dengan sempurna terutama pada



Gambar 4. Penentuan suhu larutan nutrisi pada posisi inlet yang dibutuhkan untuk mendapatkan suhu larutan nutrisi pada posisi outlet 20°C

bagian sambungan insulasi sehingga pindah panas yang terjadi lebih besar daripada yang seharusnya juga dapat menjadi penyebab terjadinya hal tersebut.

Penentuan Suhu Larutan Nutrisi pada Posisi Inlet

Model pindah panas digunakan untuk perencanaan pendinginan terhadap larutan nutrisi agar pada posisi outlet pipa utama diperoleh suhu output yang optimum bagi tanaman. Tanaman yang akan digunakan sebagai contoh adalah tanaman kentang. Menurut Hancock *et al*. (2013), suhu siang hari yang optimum bagi produktivitas tanaman kentang berada pada kisaran 14-22°C. Suhu larutan nutrisi pada posisi outlet dari pipa utama ditentukan dari kisaran suhu optimum tersebut yaitu 20°C. Suhu dinding pipa ditentukan berdasarkan suhu rata-rata dinding pipa selama pengukuran pada tanggal 19 Agustus 2013, yaitu sebesar 33°C. Pada perancangan ini digunakan pipa PVC berdiameter ¾ inch yang biasa digunakan sebagai pipa utama pada sistem irigasi untuk hidroponik. Debit aliran larutan nutrisi untuk perancangan ditetapkan 0.163 liter detik^{-1} per 100 m^2 karena menurut Muro dan Lamsfus (1997) aplikasi penggunaan air untuk irigasi tetes pada rumah tanaman berada pada kisaran 0.068-0.163 liter detik^{-1} per 100 m^2. Rumah tanaman yang digunakan untuk budidaya tanaman kentang diasumsikan memiliki luas 100 m^2 sehingga debitnya menjadi 0.163 liter detik^{-1}. Panjang pipa utama ditentukan sebesar 20 m. Berdasarkan asumsi dan dimensi rancangan sistem hidroponik dengan pendinginan larutan nutrisi tersebut kemudian dilakukan penentuan suhu larutan nutrisi pada posisi inlet dari pipa utama sistem hidroponik. Rincian data input untuk perancangan ditunjukkan pada Tabel 3.

Sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4, untuk memperoleh suhu 20°C pada jarak 20 meter diperlukan suhu 18.059^{o}C tanpa insulasi. Jika diberi insulasi, suhu larutan nutrisi pada posisi inlet dapat lebih tinggi daripada pada pipa yang tidak diberi insulasi sehingga tidak perlu didinginkan sampai suhu yang terlalu rendah. Suhu larutan nutrisi di sepanjang pipa yang diberi insulasi akan lebih seragam sehingga seluruh tanaman kentang di sepanjang pipa utama dapat memperoleh suhu yang lebih seragam.

Untuk mencapai suhu larutan nutrisi 20°C pada posisi outlet dari pipa 20 m insulasi *glass wool* dengan ketebalan 1, 2, dan 3 cm, *rock wool* dengan ketebalan 1, 2, dan 3 cm, serta *cotton wool* dengan ketebalan 1, 2, dan 3 cm maka suhu larutan nutrisi pada posisi inlet masing-masing adalah 19.74, 19.85, dan 19.88^{o}C, 19.72, 19.83, dan 19.87^{o}C, serta 19.81, 19.89, dan 19.91^{o}C. Dapat dilihat bahwa semakin tebal insulasi semakin kecil perpindahan panas yang terjadi dan semakin kecil kenaikan suhu atau semakin seragam. Akan tetapi penambahan ketebalan ini menimbulkan konsekuensi teknis dan biaya. Hal ini karena menurut Cengel dan Turner (2011), ketebalan insulasi memang akan meningkatkan resistansi termal konduksi dari bahan insulasi namun semakin tebal insulasi tahanan termal konveksi akan menurun karena luas permukaan bagian luar insulasi semakin besar yang menyebabkan perpindahan panas secara konveksi juga semakin tinggi.

Simpulan

Berdasarkan analisis pindah panas diketahui bahwa perubahan suhu air di sepanjang pipa bervariasi yaitu antara 0.21-0.25^{o}C dengan rata-rata laju perpindahan panas bervariasi yaitu antara 7.30 W sampai 41.58 W. Hasil validasi menunjukkan bahwa model pindah panas yang dikembangkan dapat digunakan untuk memprediksi suhu air pada posisi outlet dari pipa utama sebelum masuk ke dalam pipa lateral pada jaringan irigasi tetes untuk hidroponik substrat di dalam rumah tanaman. Hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk mendapatkan suhu larutan nutrisi 20°C pada posisi outlet dari pipa utama berbahan PVC ukuran ¾ inch tanpa insulasi dengan panjang pipa 20 m maka suhu larutan nutrisi pada posisi outlet harus 18.06^{o}C. Suhu larutan nutrisi pada posisi inlet dapat lebih tinggi dengan mengunakan insulasi sehingga mengurangi beban pendinginan. Pipa utama sistem hidroponik dengan pendinginan larutan nutrisi sebaiknya diberi insulasi yang tepat dengan ketebalan yang optimum agar suhu di sepanjang pipa seragam.

Daftar Pustaka

Çengel, Y.A., R.H. Turner. 2011. Fundamentals of Thermal Fluid Sciences. 4th Ed. McGraw-Hill Company, Inc. New York.

Cipta, S.W. 2007. Pendinginan siang/malam (*day/night cooling*) larutan nutrisi pada budidaya tanaman tomat (*Lycopersicum esculetum Mill*) menggunakan sistem NFT di dalam rumah kaca. (Skripsi). Departemen Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian, IPB. Bogor.

Chadirin, Y. 1991. Pendinginan larutan tanaman selada sistem NFT. (Skripsi). Departemen Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian, IPB. Bogor.

Hancock, R.D, W.L. Morris, L.J.M. Ducreux, J.A. Morris, M. Usman, S.R. Verral, J. Fuller, C.G. Simpson, R. Zhang, P.E. Hedley and M.A. Taylor. 2013. Physiological, biochemical and molecular responses of the potato (*Solanum tuberosum L*.) plant to moderately elevated temperature. Plant, Cell and Environment. Vol. 37(2): 439-450.

Harper, C. 2006. Handbook of Plastics Technologies. McGraw-Hill Company, Inc. New York.

He, J., S.K. Lee, and I.C. Dodd. 2001. Limitation to photosynthesis of lettuce grown under tropical condition: Alleviation by root-zone cooling. Journal of Experimental Botany. Vol 52: 359: 1323-1330.

Holman, J.P. 2009. Heat Transfer. 10th Ed. McGraw-Hill Company, Inc. New York.

Jie, H., L.S. Kong. 1998. Growth and photosynthetic characteristics of lettuce (*Lactuca sativa* L.) under fluctuating hot ambient temperatures with the manipulation of cool root-zone temperature. Plant Physiol. W,L152: 387-391.

Kreith, F., M.S. Bohn. 2010. Principles of Heat Transfer. 7th Ed. Brookscole. New York.

Muro, J.V.D.G., C. Lamsfus. 1997. Comparison of hydroponic culture and culture in a peat/san mixture and the influence of nutrient solution and plant density on seed potato yields. Potato Research. Vol. 40(4): 431-440.

Randiniaty, Y. 2007. Analisis termal pendinginan siang/malam (*day/night cooling*) larutan nutrisi pada budidaya tanaman tomat (*Lycopersicon esculentum Mill*) dengan sistem *nutrient film technique* (*NFT*). (Skripsi). DepartemenTeknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian, IPB. Bogor.

Suhardiyanto, H. 2009. Teknologi Rumah Tanaman untuk Iklim Tropika Basah: Pemodelan dan Pengendalian Lingkungan. IPB Press. Bogor.

Suhardiyanto, H., M.M. Fuadi dan Y. Widaningrum. 2007. Analisis pindah panas pada pendinginan dalam tanah untuk sistem hidroponik. Jurnal Keteknikan Pertanian Vol.21 (4): 355-362.

Sumarni, E. 2013. Pengembangan *zone cooling system* untuk produksi benih kentang secara aeroponik di dataran rendah tropika basah. (Disertasi). Sekolah Pascasarjana, IPB. Bogor.

Sumarni, E. H. Suhardiyanto, K.B. Seminar, S.K. Saptomo. 2013. Temperature distribution in aeroponics system with root zone cooling for the production of potato seed in tropical lowland. International Journal of Scientific & Engineering Research. Vol. 4 (6): 779-784.

Technical Paper

Analisis CFD Aliran Udara Panas pada Pengering Tipe Rak dengan Sumber Energi Gas Buang

Distibtuion Analysis Hot Air Flow of Rack Type Dryer With Energy Source From Exhaust Gas Using Computational Fluid Dynamics (CFD)

Hablinur Al-Kindi, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: angintimur88@gmail.com
Y Aris Purwanto, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.Email: arispurwanto@gmail.com
Dyah Wulandani, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: dyahwulandani@yahoo.com

Abstract

Hot air from residual biomass combustion in biomass power plant can be used for drying process. The objective of this syudy was to analyze the distribution of hot air inside tray dryer using Computational Fluid Dynamic (CFD) and to modify the dryer room for copra drying based on the result of CFD analysis. Result of CFD analysis shows that the distribution of hot air inside dryer room was not homogen among trays. The average temperature at top tray (I) was 90.0±10.8^{o}C and bottom tray (IV) was below 49°C. Modification of dryer room was carried out by adding partition wall in the end of tray to allow the hot air flow through all trays. After modification, the temperature of drying air inside dryer room increased and the temperature distribution was better than that before modification. Form CFD simulation it was resulted the temperature of drying air at tray I, II, III and IV were 114°C, 124°C, 135°C and 119°C respectively. Fruther modification was carried out to obtain the drying temperature of 75-90°C. This drying temperature was achieved by decreasing the frequency electricity for suction fan from 50 to 25 Hz, 20 Hz and 15 Hz. From CFD simulation was indicated that in order to obtain the temperature inside dryer room of 75-90°C, the frequency of electricity should be decreased to 206.9^{o}C (20 Hz) to 230.7^{o}C (25 Hz).

Keywords : *gas from residual biomass combustion, CFD, temperature distribution, tray dryer.*

Abstrak

Udara panas sisa pembakaran biomassa pada alat pembangkit listrik tenaga biomassa dapat dimanfaatkan untuk proses pengeringan. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis sebaran suhu pada ruang pengering dari alat pengering tipe rak yang memanfaatkan udara panas sisa pembakaran biomass menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan melakukan modifikasi ruang pengering berdasarkan hasil simulasi CFD yang sesuai untuk pengeringan kopra. Hasil analisis CFD untuk sebaran panas di ruang pengering menunjukkan ketidakrataan sebaran udara panas antar rak pengering. Suhu rata-rata pengukuran rak paling atas (I) 90.0±10.8^{o}C, sedangkan rak IV (bawah) 49°C. Modifikasi ruang pengering dilakukan dengan menambahkan dinding pembagi untuk mengarahkan udara pengering yang diletakkan di ujung rak I, II, dan III. Setelah penambahan dinding, udara panas lebih merata dan terjadi kenaikan suhu yang disebabkan karena panas gas buang yang besar yaitu sekitar 294.5^{o}C. Suhu rata- rata simulasi CFD setiap rak I, II, III dan IV masing masing 114°C, 124°C, 135°C dan 119°C. Modifikasi selanjutnya dilakukan untuk mendapatkan suhu pengeringan antara 75-90°C yang sesuai untuk pengeringan kopra dengan menurunkan frekuensi kipas hisap dari 50 Hz menjadi 25 Hz, 20Hz, dan 15 Hz. Penurunan frekuensi kipas hisap menyebabkan penurunan suhu dalam ruang pengering. Dari hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa untuk mendapatkan suhu dalam ruang pengering 75-90°C, maka suhu gas buang diturunkan menjadi 206.9^{o}C (20 Hz) hingga 230.7^{o}C (25 Hz).

Kata kunci: gas sisa pembakaran biomassa, CFD, distribusi suhu, pengering tipe rak

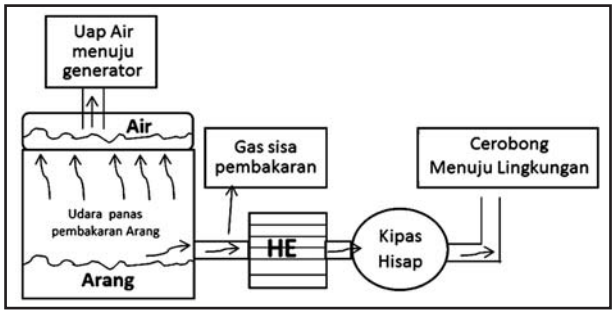
Diterima: 22 Oktober 2014; Disetujui: 15 Januari 2015

Pendahuluan

Pengeringan merupakan salah satu proses paska panen yang umum dilakukan pada berbagai produk pertanian yang bertujuan untuk menurunkan kadar air bahan sampai tingkat yang aman untuk penyimpanan atau digunakan pada proses lainnya. Proses pengeringan produk pertanian yang banyak dilakukan oleh petani Indonesia adalah dengan cara penjemuran. Cara ini memiliki banyak kelemahan, selain dibutuhkan lahan yang luas, juga terjadi kontaminasi produk oleh debu, kotoran dan polusi, dan ketergantungan terhadap kondisi iklim (Sayful dan Hargono 2009). Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi (P3TKEBTKE) LEMIGAS, telah membuat model pengeringan tipe rak yang memanfaatkan panas dari biomassa. Model pengeringan ini dapat mengeringkan bahan pertanian tanpa harus bergantung pada panas matahari, ramah lingkungan, tidak memerlukan banyak tempat, dan terhindar dari debu dan kotoran.

Pengering terkogenerasi dengan sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Panas gas buang dari pembakaran biomassa di dalam boiler digunakan untuk pengeringan. Komoditi perkebunan yang dipilih untuk pengeringan adalah kopra. Suhu pengeringan ideal untuk kopra adalah 90°C (Guarte*et al*. 1996). Suhu pengeringan kopra bisa dilakukan lebih rendah lagi yaitu 65-85°C. (Niamnuy dan Devahastin 2005). Pada kopra, pengeringan bertujuan menurunkan kadar air putih lembaga dari kadar air 50-55% menjadi 7% (Mohanraj dan Chandrasekar 2008).

Pengering tipe rak banyak digunakan untuk pengeringan karena disain yang simpel dan mempunyai daya tampung yang besar. Kelemahan terbesar dari pengering tipe rak adalah tidak meratanya sebaran suhu pada ruang pengering (Misha *et al*. 2013). Bentuk geometri dari ruang pengering mempengaruhi kualitas dan kesegeraman bahan yang dikeringkan (Tzempelikos *et al*. 2012). Pola aliran udara dalam pengering perlu diketahui dengan melakukan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Salah satu keunggulan analisis CFD antara lain, memberikan pemahaman rinci tentang distribusi aliran pindah panas dan massa, dan memungkinkan untuk mengevaluasi perubahan geometrik (Xia dan Sun 2002). Simulasi CFD untuk pengeringan telah banyak dilakukan seperti Mirade dan Daudin (2002) mempelajari medan kecepatan pada pengering sosis modern untuk memberikan informasi tentang sirkulasi udara dalam ruang pengering dan Mathioulakis *et al.*(1998) menggunakan CFD untuk mengetahui pergerakan udara dalam pengering buah.Puji Widodo (2009) menggunakan CFD untuk pengerik tipe rak berputar.



Gambar 1. Model kogenerasi PLTU dan sistem pengeringan.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis sebaran suhu pada ruang pengering dan besarnya suhu setiap rak dengan menggunakan analisis CFD. Hasil simulasi CFD digunakan untuk memodifikasi ruang pengering. Diharapkan setelah modifikasi, sebaran suhu di dalam ruang pengering relatif merata dan suhu udara setiap rak berkisar 75-90°C.

Bahan dan Metode

Waktu dan Tempat

Waktu penelitian dimulai dari bulan April 2013 hingga Juli 2014 bertempat di Laboratorium Boiler. Lemigas Jakarta

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan antara lain perangkat lunak *Solidworks*, ruang pengering, termometer, termokopel, RH meter, anemometer, *Logger* (HIOKI LR8500), dan inverter. *Solid Works* merupakan perangkat lunak *Computer Aided Design* yang mempunyai analisis CFD. Bahan yang digunakan adalah arang dari batok kelapa yang diletakan di dalam boiler.

Ruang pengering terbuat dari bahan *stainles stell* di bagian dalam dan seng bagian luar. Terdapat insulator berupa rockwool di bagian tengahnya. terdapat 4 rak dimana jarak antar rak 12 cm dengan ketebalan 5 mm. Dimensi ruang pengering 75 cm x 50 cm x 55.5 cm. Kecepatan kipas hisap dan kipas hembus adalah 2800 rpm dan 1400 rpm. *Heat exchanger* (HE) yang digunakan bertipe cross flow. *Heat exchanger* dirakit oleh bengkel. Dimensi HE 30.4 cm x 30.4 cm x 30.4 cm dan terdapat 97 pipa yang terbuat dari tembaga dengan panjang pipa 30,4 cm dan ukuran diamter dalam dan diameter luar masing-masing 15.88 cm dan 13.88 cm. Gambar 1 menunjukkan model kogenerasi PLTU dan pengeringan dan Gambar 2 menunjukkan model pembangkit listrik dan model pengeringan kopra.

Udara panas hasil pembakaran biomassa arang digunakan untuk memanaskan air menjadi uap panas untuk menggerakkan generator. Udara panas tersebut tidak dibuang melainkan dimanfaatkan untuk pengeringan. Dalam model pengeringan

tersebut terdapat boiler, *heat exchanger* (HE), kipas hisap, kipas hembus, dan ruang pengering. Udara panas hasil pembakaran biomassa arang dari boiler (A) masuk kedalam *heat exchanger* (B) akibat hisapan dari kipas hisap (C). Kipas hembus (D) menghembuskan udara lingkungan ke *heat exchanger* dan masuk ke dalam ruang pengering (E). Sehingga udara yang masuk ke dalam ruang pengering merupakan udara bersih.

Simulasi CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan program komputer perangkat lunak untuk memprediksi dan menganalisis secara kuantitatif aliran fluida, perpindahan panas, transpor fenomena dan reaksi kimia. CFD merupakan analisis numerik dengan kontrol volume sebagai elemen dari integrasi persamaan-persamaan, yang terdiri dari persamaan keseimbangan massa, momentum dan energi (Versteeg and Malalasekera, 1995).

Hukum kesetimbangan massa sebagai berikut :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial z} \quad (1)$$

Persamaan momentum 3 dimensi :
Momentum arah x:

$$\rho\left[u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right]=\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right]+S_{Mx} \quad (2)$$

Momentum arah y :

$$\rho\left[u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right]=\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right]+S_{My} \quad (3)$$

Momentum arah z :

$$\rho\left[u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right]=\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right]+S_{Mz} \quad (4)$$

Persamaan energi :

$$\rho\left[u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right]=\rho\left[\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right]+k\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right]+S_i \quad (5)$$

Pada prinsipnya, ada tiga langkah yang harus dilakukan untuk menggunakan CFD, yaitu sebelum proses, saat proses, dan setelah proses (Shaw,1992).

Langkah sebelum proses antara lain *thinking, meshing,* dan pembuatan model komputasi atau model perhitungan. Pada tahap *thinking,* analisis memperhitungkan masalah aliran fluida dan menganalisis tentang masalah tersebut. Tahap *meshing* menciptakan bentuk domain masalah yang akan di analisis. Hal ini biasanya diakukan dengan program *computer aided design* (CAD). Tahap pembuatan model antara lain: membuat batas-batas domain masalah, menentukan kondisi awal (input nilai), pengaturan sifat fisik fluida dan pengaturan parameter kontrol numerik.

Pada langkah proses memerlukan komputer untuk memecahkan ribuan persamaan. Proses ini membutuhkan waktu yang lama tergantung banyaknya *mesh* yang dibuat.

Tahap setelah proses adalah tahap dimana mengevaluasi data yang dihasilkan CFD. Model yang telah diselesaikan oeh CFD dapat dianalisis dengan numerik dan grafis. CFD dapat membuat visualisasi dari yang sederhana grafik 2-D hingga gambar 3-D.

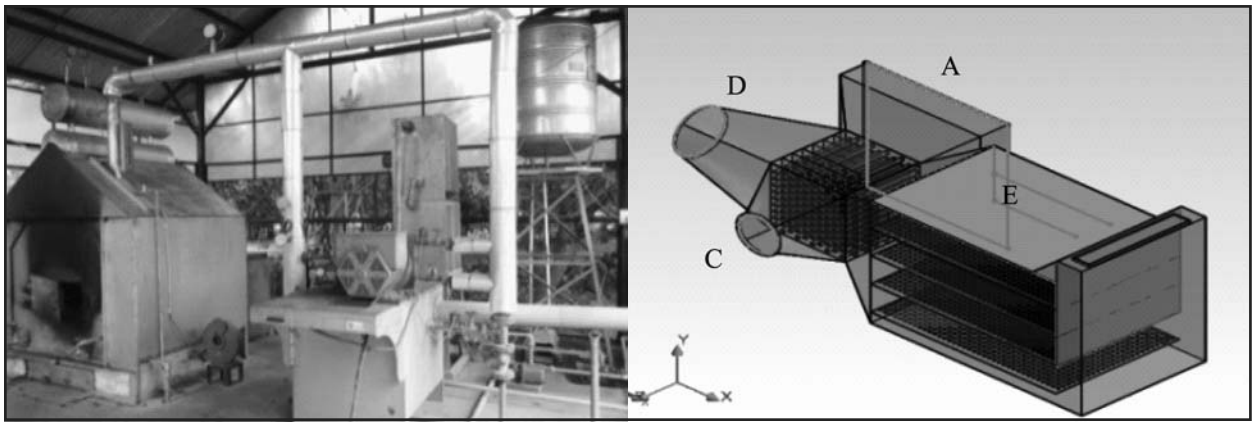
Data kondisi awal dibagi menjadi dua, yaitu data yang didapat dari pengukuran langsung dan data dari perhitungan matematika. Data pengukuran pengukuran langsung antara lain: suhu keluar boiler (294.5^{o}C), suhu awal (30°C), debit udara masuk ke HE (0.32 m^3/s), kecepatan kipas hembus (2.2 m/s), material bahan (tembaga untuk HE dan *stainless steel* untuk ruang pengering), model aliran (laminer), dan suhu lingkungan (30°C). Data-data tersebut dimasukkan ke dalam data input *flow simulation*.

Sedangkan data input dari perhitungan matematika adalah koefesien pindah panas pada HE sebesar 24.36 W/m^2 ^{o}C. Persamaan untuk mencari koefesien pindah panas di dapat dengan:

$$U=\frac{1}{Rt} \quad (1)$$

Dimana:
U = Koefisien pindah panas (W/m^2 .K)
Rt = Tahanan termal keseluruhan (m^2 .K/W)

Tahanan termal keseluruhan dapat diperoleh sebagai berikut:



Gambar 2. Model pembangkit listrik tenaga uap (kiri) dan model pengeringan (kanan)

$$Rt = Ri + RF_1 + Rk + RF_2 + Ro \quad (2)$$

Dimana:

Ri = Tahanan termal akibat konveksi udara

RF_1 = Tahanan termal akibat faktor pengotor udara (0.00035 m^2.K/W)

Rk = Tahanan termal akibat konduktivitas bahan

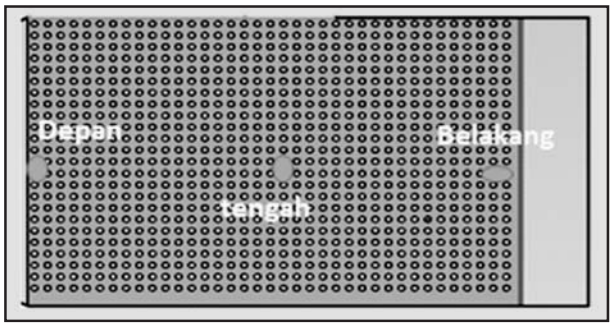
RF_2 = Tahanan termal akibat faktor pengotor gas buang (0.00176m^2 .K/W)

Ro = Tahanan termal akibat konveksi gas buang

Setelah simulasi CFD selesai, data hasil simulasi (arah sebaran suhu, suhu fluida, dan kecepatan fluida) dianalisis sehingga dapat dilakukan modifikasi (bila diperlukan). Bila hasil modifikasi telah baik untuk pengeringan kopra, maka dilakukan proses validasi. Jika belum, maka harus dilakukan modifikasi lagi. Validasi dilakukan dengan membandingkan data dari pengukuran langsung dan data dari simulasi CFD. Bila koefesien determinasi (R^2) mendekati 1 maka simulasi CFD sudah mendekati hasil sebenarnya. Asumsi aliran udara dalam keadaan *steady*.

Pengukuran Langsung

Penilitian ini tidak memasukkan kopra ke dalam ruang pengering saat pengukuran langsung. Data yang diukur adalah suhu fluida di 10 titik dalam ruang pengering. Terdapat 10 termokopel yang tersambung dengan *logger* yang akan mencatat suhu pada 10 titik di ruang pengering. Sepuluh titik tersebut antara lain tiga di rak I (depan, tengah, dan belakang), dua di rak II (depan dan belakang), tiga di rak III (depan, tengah, dan belakang), dan dua di rak IV (depan dan belakang). Gambar 2 menunjukkan titik termokopel di rak I dan III.Pada percobaan pertama, termokopel diletakkan ditengah rak dan pada percobaan kedua termokopel digeser ke pinggir rak. Percobaan dilakukan dua kali dengan menggeser posisi termokopel.Percobaan dilakukan selama 30 menit dengan bahan bakar arang sebanyak 15 kg.

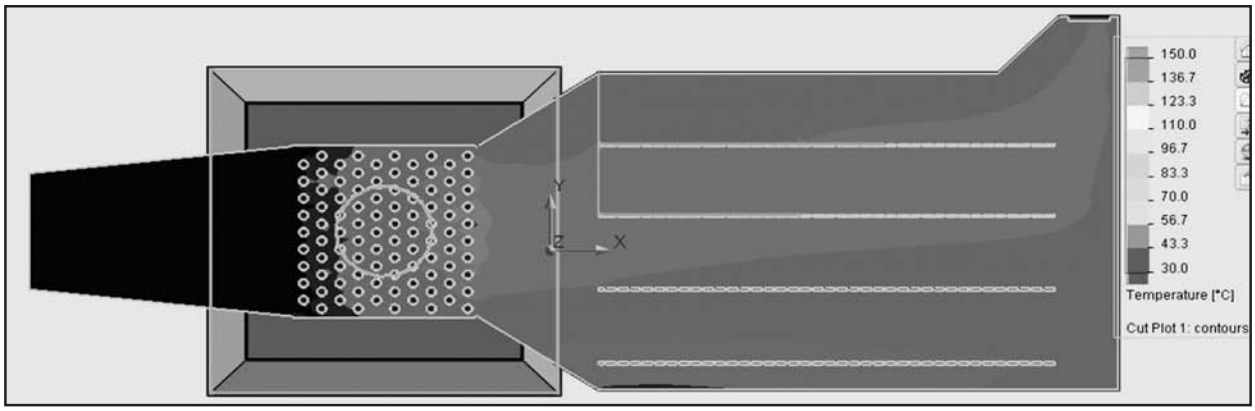


Gambar 2. Posisi termokopel di rak I dan III

Hasil dan Pembahasan

Udara panas masuk ke dalam ruang hanya pada satu sisi. Udara bergerak menuju outlet akibat dorongan dari kipas hembus. Posisi outlet berada pada bagian atas sisi lainya. Pada penelitian pendahuluan, sebaran suhu rata-rata pada setiap rak (dimulai dari rak paling atas) sekitar 90ºC, 60ºC, 49ºC, dan 41ºC. Dari data ini dapat disimpulkan bahwa disain ruang pengering kurang baik untuk mengeringkan kopra dikarenakan sebaran suhu tidak merata. Oleh karena itu, ruang pengering perlu dimodifikasi. Dengan simulasi CFD, sebaran suhu dan arah aliran udara pada ruang pengering dapat diketahui. Gambar 3 menunjukkan sebaran suhu pada ruang pengering sebelum modifikasi hasil simulasi CFD, dengan debit aliran udara 0,31 m^3/s dan suhu keluar boiler 270-320ºC.

Dari hasil simulasi CFD terlihat perbedaan suhu yang signifikan antara rak I dan rak IV. Perbedaan suhu rata-rata rak I (rak paling atas) dan IV (rak paling bawah) berbeda sekitar 50ºC. Sehingga diperlukan modifikasi dalam ruang pengering agar terjadi pemerataan suhu. Bentuk modifikasi adalah penambahan penghalang yang tertempel pada ujung rak I, II, dan III. Penambahan penghalang bertujuan agar terjadi penghambatan aliran udara panas, sehingga diharapkan udara panas akan terjebak lama dalam ruang pengering. Diharapkan nantinya, setelah penambahan penghalang suhu pada rak I akan menyebar ke rak II, III, dan IV.



Gambar 3. Sebaran Suhu pada ruang pengering sebelum modifikasi.

Gambar 4 menunjukkan perbedaan dalam ruang pengering sebelum dan sesudah modifikasi. Penghalang terbuat dari bahan *stainless steel*.

Setelah desain bangunan di ruang pengering diubah, simulasi pengeringan dilakukan lagi. Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi setelah modifikasi.

Dari hasil simulasi CFD, sebaran suhu pada ruang pengering lebih merata dibandingkan sebelum modifikasi. Setelah modifikasi, udara panas yang masuk ruang pengering cenderung mengalir ke rak II dan rak III. Maka syarat pertama telah terpenuhi yaitu pemerataan sebaran suhu. Akan tetapi, suhu di dalam ruang pengering setelah di modifikasi menjadi naik secara signifikan. Dimana kisaran suhu setiap rak 130 (I), 140 (II), 145 (III), dan 130 (IV)^{o}C. Hal ini disebabkan karena suhu udara panas yang masuk ke HE tinggi (270-320°C). Perlu dilakukan modifikasi lanjutan agar suhu udara dalam ruang pengering mempunyai kisaran 75-90°C dengan cara menurunkan laju aliran udara yang masuk ke HE. Modifikasi yang dilakukan adalah dengan menambahkan *heat exchanger* penurun suhu yang diletakkan sebelum HE, maka suhu udara yang masuk ke HE akan turun (Gambar 6).

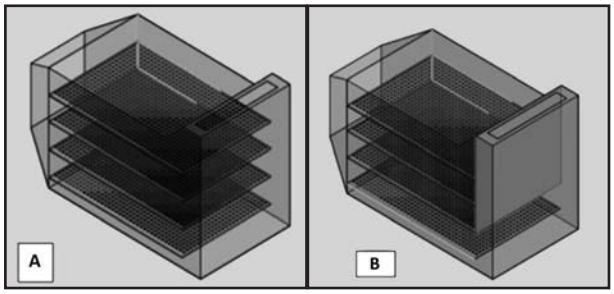
Menggunakan *heat exchanger* (HE') penurun suhu dikarenakan rancangan awal sistem pengeringan LEMIGAS menggunakan HE'. Penurunan suhu dilakukan dengan mengalirkan air dalam pipa-pipa untuk menurunkan suhu gas buan. Sebelum membuat HE', perlu ditentukan besarnya nilai suhu udara T yang masuk ke HE. Nilai suhu tersebut digunakan sebagai kebutuhan disain HE'. Besarnya suhu udara T yang keluar dari HE' dianalis dengan analisis CFD dan pengukuran langsung.

Metode pengukuran langsung dengan menurunkan frekuensi kipas hisap dengan inverter, sehingga kecepatan kipas hisap berkurang. Dengan menurunkan kecepatan kipas hisap, maka suhu udara yang keluar dari boiler menurun. Pada dasarnya kecepatan kipas hisap tidak boleh diturunkan, karena bila diturunkan akan berpengaruh pada kinerja PLTU. Penurunan kipas hisap dilakukan hanya untuk kebutuhan penelitian agar mendapatkan suhu udara T.

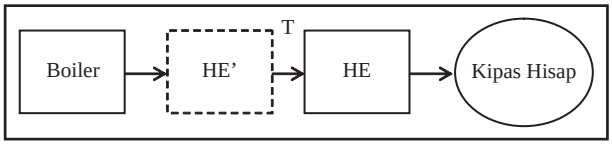
Frekuensi kipas awal 50 Hz diturunkan menjadi 25, 20, dan 15 Hz. Sehingga didapatkan nilai suhu udara T yang masuk ke dalam HE agar suhu dalam ruang berkisar (75-90°C). Sebaran suhu setiap rak dihitung dengan termokopel yang terhubung dengan *logger. Logger* akan mencatat perubahan suhu pada 10 termokopel setiap lima detik sekali selama 30 menit. Pengambilan data dilakukan dua kali kecuali pada frekuensi 50 Hz, dikarenakan sudah terlihat jelas perbedaan suhu setiap rak yang berbeda secara signifikan. Uji 1 termokopel diletakan di tengah rak dan uji 2 termokopel ditaruh di pinggir rak. Data suhu dari pengujian pada Gambar 7.

Suhu pada bagian tengah rak relatif jauh lebih besar daripada pinggir rak. Dari data hasil pengukuran langsung, didapat pada frekuensi 20 Hz suhu dalam ruang pengering 75-90°C. Suhu rata-rata rak pada frekuensi 20 Hz adalah 84.5^{o}C.

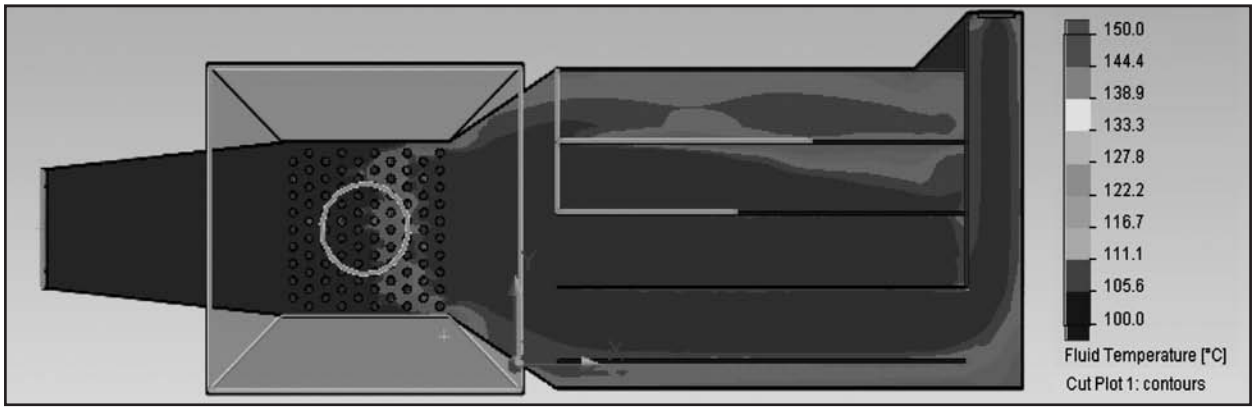
Analisis CFD dilakukan dengan memasukkan nilai suhu dan debit udara menuju HE ke dalam data input simulasi. Suhu udara yang dimasukkan adalah suhu rata-rata pembakaran biomassa 15 kg selama 30 menit yang diukur dengan termokopel sebelum masuk ke HE. Kecepatan udara dihitung



Gambar 4. (a) ruang pengering sebelum di modifikasi dan (b) sesudah modifikasi.



Gambar 6. Skema modifikasi penambahan *heat exchanger* penurun suhu.



Gambar 5. Hasil simulasi setelah modifikasi.

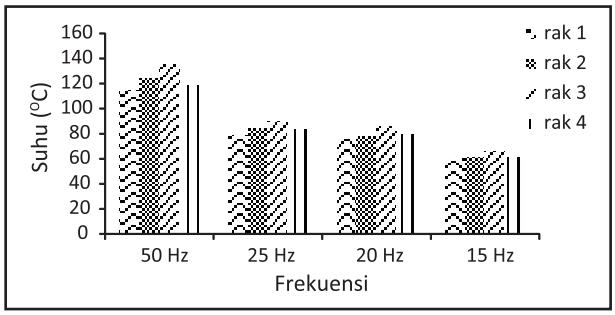
Tabel 1. Kecepatan udara panas yang keluar dari boiler

Frekuensi (Hz)	Kecepatan Udara di cerobong (m/s)	Suhu udara rata-rata keluar boiler (°C)	Luas penampang cerobong (m^2)	Debit udara (m^3/s)
50	10	294.5	0.03	0.31
25	6	230.67	0.03	0.18
20	4.8	206.92	0.03	0.15
15	3.4	177.17	0.03	0.1

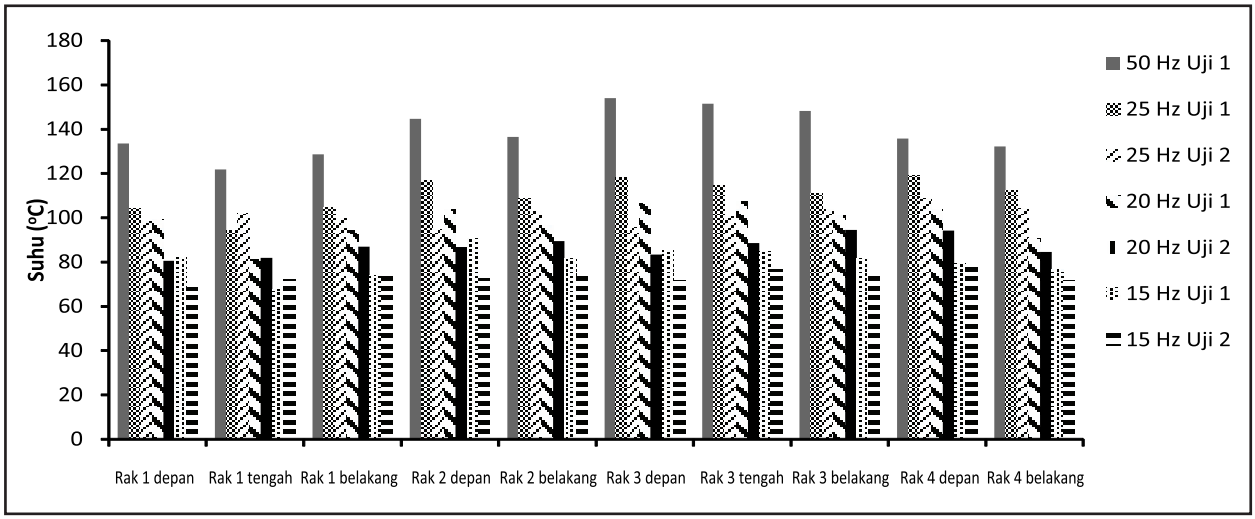
dengan anemometer. Debit udara tersaji pada Tabel 1.

Penggunaan simulasi CFD berguna untuk melihat kontur sebaran suhu pada setiap rak. Selain itu CFD dapat mengetahui suhu maksimum, minimum, dan rata-rata setiap rak lebih baik dari pada pengukuran langsung. Suhu rata-rata rak pengering pada simulasi CFD sebanyak 122 titik. Gambar 8 menunjukkan suhu rata-rata setiap rak hasil simulasi CFD.

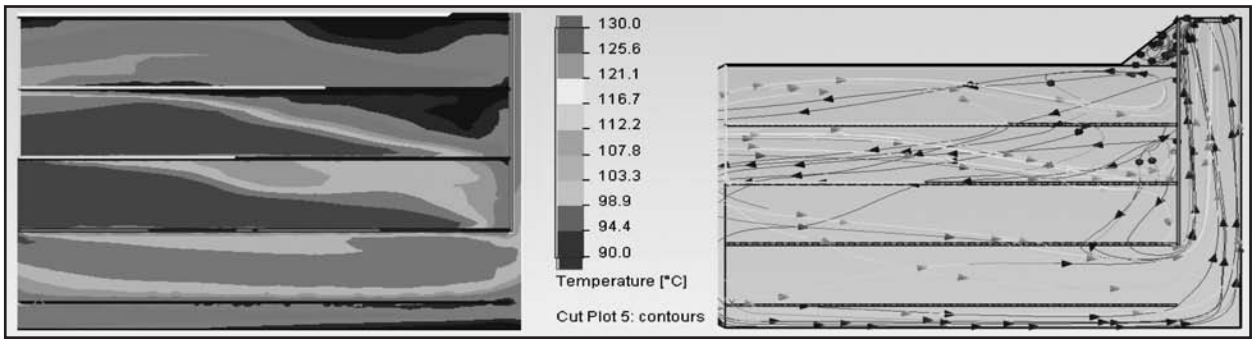
Dari data Gambar 8 menunjukkan bahwa pada frekuensi kipas hisap 25 Hz (230.67°C) dan 20 Hz (206.92°C) merupakan frekuensi yang menghasilkan suhu T yang diinginkan (75-90°C). Pada frekuensi 25 Hz (230.67°C), suhu rata-rata 4 rak sebesar 83.98±8.82°C, dengan suhu tertinggi pada rak III sebesar 89.72°C dan suhu terendah pada rak I sebesar 78.8°C. Pada frekuensi 20 Hz (206.92°C), suhu rata-rata 4 rak sebesar 79.78±4.38°C, dengan



Gambar 8. Suhu rata-rata simulasi CFD pada dari 122 titik setiap rak.



Gambar 7. Suhu 10 titik yang didapat dari pengukuran langsung.



Gambar 9. (A) Kontur suhu pada samping rak dan (B) vektor aliran udara tampa dari samping rak pada frekuensi 25 Hz.

suhu rak tertinggi pada rak III sebesar 85.9°C (rak III) dan suhu terendah pada rak I sebesar 75.62°C. *Heat exchanger* penurun suhu yang nantinya akan ditambahkan pada model sistem pengering dapat menurunkan suhu yang keluar dari boiler menjadi 230.67-206.92°C. Pada frekuensi 15 Hz, suhu rata-rata 4 rak 70.85°C.

Gambar 9 menunjukkan sebaran suhu pada samping rak dan arah vektor udara pada ruang pengering. Udara panas yang masuk ke ruang pengering cenderung bergerak ke rak II dan III. Suhu udara di depan rak realtif lebih tinggi dibandingkan di belakang rak. Udara akan dipantulkan dinding modifikasi sehingga udara panas lebih lama berada di ruang pengering.

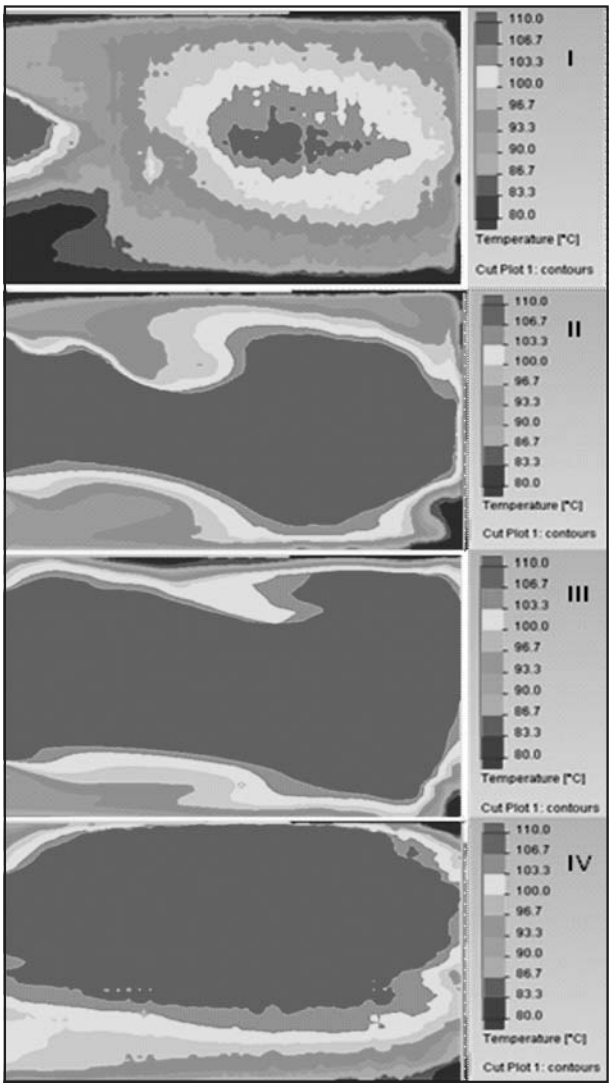
Sebaran suhu pada setiap rak pada frekuensi 25 Hz ditunjukkan pada Gambar 10. Kontur 2D sebaran suhu berada di 0.5 cm di atas rak. Sebaran suhu lebih seragam pada rak II, III, dan IV. Pada rak I, sebaran suhu tidak seragam.

Validasi hasil dari setiap frekuensi tersaji pada Gambar 11. Terdapat 20 titik data yang dibandingkan (10 titik pada tengah rak dan 10 titik pinggir rak) kecuali frekuensi 50 Hz hanya 10 titik.

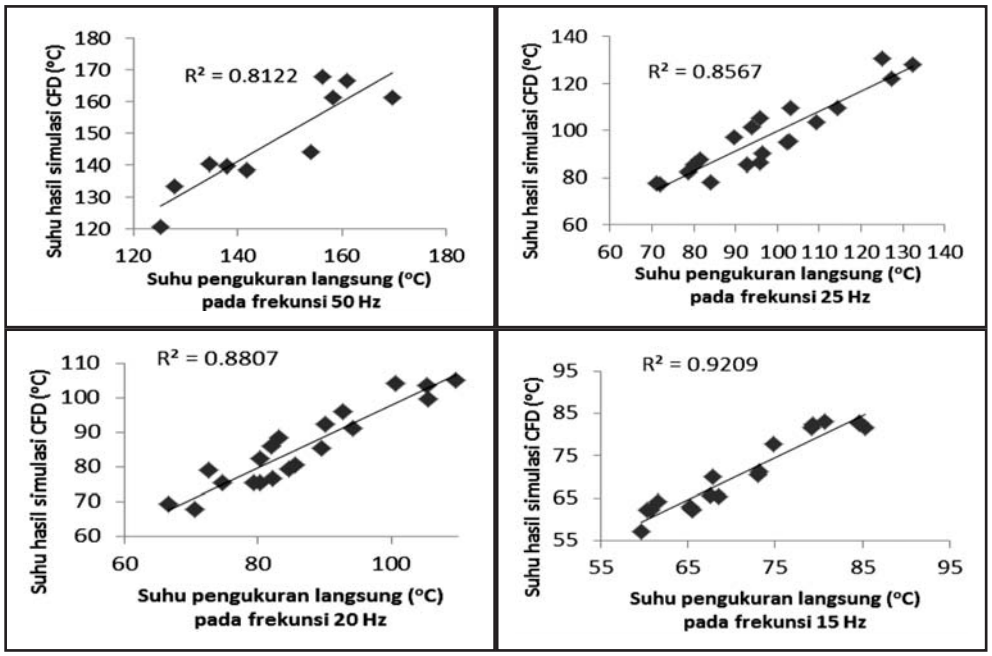
Semakin besar frekuensi maka nilai koefesien determinasi semakin kecil. Semua nilai koefesien drerminasi (R^2) diatas 0.8. Sehingga dapat dikatakan hasil simulasi CFD baik untuk prediksi kondisi yang sebenarnya.

Nilai validasi bergantung pada :

1. Getaran yang terjadi pada ruang pengering, semakin tinggi frekuensi kipas hisap maka getaran dalam ruang pengeringsemakin besar. Sehingga posisi termokopel ikut bergetar
2. Suhu udara keluar boiler, pada pengukuran langsung berubah-ubah sedangkan pada simulasi CFD tetap.



Gambar 10. Kontur suhu pada setiap rak pada frekuensi 25 Hz.



Gambar 11. Validasi hasil pengukuran dengan hasil simulasi CFD.

Simpulan

Sebaran suhu dan arah vektor udara pada ruang pengering dapat diketahui dalam bentuk kontur dengan menggunakan CFD. Penambahan dinding untuk menghambat laju udara panas mampu menyebarkan suhu ke setiap rak pengering. Akan tetapi, suhu rata-rata dalam ruang pengering menjadi semakin besar. Udara panas yang masuk yang masuk ke ruang pengering cenderung ke rak II dan III.

Penurunan suhu dalam ruang pengering (agar suhu dalam ruang pengering 75-90°C) dengan menambahkan *heat exchanger* penurun suhu yang diletakan sebelum *heat exchanger* awal. *Heat exchanger* penurun suhu akan menurunkan suhu udara panas yang keluar dari boiler 270-320°C menjadi 206.92-230.67^{o}C.

Dari gambar kontur 2-D dapat diketahui udara panas yang masuk ke ruang pengering cenderung mengalir ke rak II dan rak III. Sebaran suhu lebih merata pada rak II, III, dan IV. Sifat pengering tipe rak yang statis (tidak bergerak) mepersulit meratakan suhu setiap raknya. Selain itu, bentuk geometri dari ruang pengering merupakan faktor utama untuk menratakan suhu udrara di dalamnya. Posisi rak yang dekat dengan sumber panas akan menerima panas lebih besar dibandingkan posisi rak yang dekat dengan outlet ruang pengering.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi (P3TKEBTKE) LEMIGAS yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian model pengering tipe rak di laboratorium boiler. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Bapak Paber dan Bapak Dedi sebagai pembimbing lapang serta Bapak Y. Aris Purwanto dan Ibu Dyah Wulandani sebagai pembimbing tesis.

Daftar Pustaka

Guarte, R.C., W. Mühlbauer, M. Kellert. 1996. Drying characteristics of copra and quality of copra and coconut oil. Postharvest Biology and Technology Vol. 9(3): 361-372.

Mathioulakis, E., V.T. Karathanos, V.G. Belessiotis. 1998. Simulation of air movement in a dryer by computational fluid dynamics: application for the drying of fruits. Journal of Food Engineering Vol. 36(2): 183–200.

Mirade, P.S., J.D. Daudin. 2000. A numerical study of the airflow patterns in a sausage dryer. Drying Technology Vol. 18(1–2): 81–97.

Misha, S., M. Sohif, H.R. Mohd, S. Kamaruzzaman, Elias S. 2013. The Prediction of Drying Uniformity in Tray Dryer System using CFD Simulation. International Journal of Machine Learning and Computing Vol. 3(5): 419-423

Mohanraj, M., P. Chandrasekar. 2008. Drying of copra in a forced convection solar drier. Biosystems Engineering Vol. 99(4): 604-607.

Niamnuy, C., S. Devahastin. 2005. Drying kinetics and quality of coconut dried in a fluidized bed dryer. Journal of food engineering Vol. 66: 267-271.

Puji, W., W. Dyah, Y. Aris P. 2009. Kajian sebaran aliran udara panas pada model pengering efek rumah kaca hibrid tipe rak berputar menggunakan Computational Fluid Dynamic (CFD). *Jurnal Enjinering Pertanian.* Vol. 8(2): 105-115

Sayful, M., Hargono. 2009. Profil suhu pada proses pengeringan produk pertanian dengan simulasi computational Fluid dynamics (CFD). Reaktor Vol. 12(3): 195-202.

Shaw, C.T. 1992. *Using Computational Fluid Dynamics*. Prentice Hall. New Jersey. SA.

Tzempelikos, D.A., A.P. Vouros, A.V. Bardakas, A.E. Filios, D.P. Margaris. 2012. Analysis of air velocity distribution in a laboratory batch-type tray air dryer by computational fluid dynamics. International journal of mathematics and computers in simulation Vol. 5(6): 413-421.

Versteeg, H.K., W. Malalasekera. 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method.* Longman Sc & Technical. Malaysia.

Xia, B., D.W. Sun. 2002. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. Computers and Electronics in Agriculture. Vol. 34(1): 5-24.

Technical Paper

Desain Model Diagnostik Resiko Ergonomi pada Kelapa Sawit Secara Manual

Ergonomic Risk Assesment's Tool of Oil Palm Manual Harvesting

Nugrahaning Sani Dewi, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor, Email: nugrahaningsani@gmail.com
M. Faiz Syuaib, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor, Email: faizs@ipb.ac.id
Lenny Saulia, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor, Email: lsaulia@gmail.com

Abstract

Oil palm harvesting activity is mostly done by 'human power' manual handling, therefore the activity may cause work safety and health problems.This research is deal with anthropometry, motion study and biomechanic to find out the risk of manual handling and to develop ergonomic assessment model of oil palm harvesting. This model was designed in the aims to find out better work motion, good procedure and better design of harvesting tool, so the manual harvesting can be done in more safe, efficient and productive. The formula for the appropriate distance between harvester's position and the tree and the length of egrek show that oil palm harvesting for more than 16 m bunches's height is not safe with 'egrek'. Critical load for neck, shoulder and forearm are 21.85 N, 1091.96 N and 1634.31 N. Ergonomic risk assesment's tool of oil palm manual harvesting was designed with the parameter: appropriate distance (dt), the length of egrek (lp), critical range of motion (CRM) and critical load (CL) for neck, shoulder and forearm.

Keywords: *biomechanic, ergonomic, motion study, manual harvesting, oil palm.*

Abstrak

Pemanenan kelapa sawit secara manual berpotensi menimbulkan permasalahan keselamatan dan kesehatan kerja. Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan biomekanik, studi gerak dan antropometri untuk mendesain model diagnostik resiko ergonomi pada pemanenan kelapa sawit secara manual. Model ini didesain untuk menghasilkan gerak kerja pemanenan dan prosedur pemanenan yang lebih baik serta rekomendasi panjang egrek yang dibutuhkan sehingga kegiatan pemanenan dapat dilakukan secara aman, efektif dan produktif. Hasil simulasi pemanenan menghasilkan formulasi jarak aman *dt* (m) dan formulasi panjang egrek yang dibutuhkan *lp* (m). Berdasarkan formula tersebut, pemanenan kelapa sawit dengan tinggi target pohon lebih dari 16 m sudah tidak aman untuk dilakukan dengan menggunakan egrek. Batas beban (*critical load*) yaitu 21.85 N untuk otot leher, 1,091.96 N untuk otot *deltoid* bahu dan 1,634.31 N untuk otot *branchioradialis* lengan bawah. Model diagnostik resiko ergonomi pada pemanenan kelapa sawit telah dirancang dengan parameternya adalah jarak aman (*dt*), panjang batang egrek yang dibutuhkan (*lp*), *critical range of motion* (CRM) dan *critical load* (CL) pada leher, bahu dan lengan bawah.

Kata kunci: ergonomika, studi gerak, biomekanik, kelapa sawit, pemanenan.

Diterima: 28 Oktober 2014; Disetujui: 20 Januari 2015

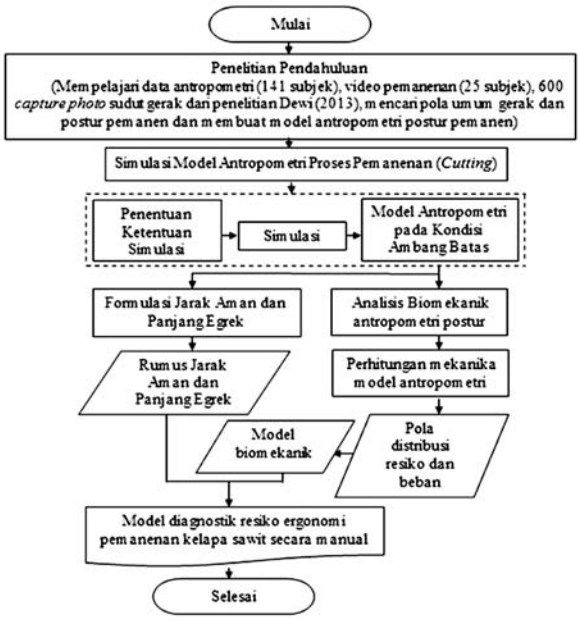
Pendahuluan

Permintaan kepala sawit dunia untuk produk makanan (74%) dan kebutuhan industri (24%) terus meningkat (USDA 2010). Permintaan kelapa sawit yang terus meningkat akan berimplikasi pada terus ditingkatkannya produktivitas. Proses pemanenan merupakan termasuk faktor penting dalam pencapaian produktivitas panen kelapa sawit. Keberhasilan pemanenan akan menunjang pencapaian produktivitas tanaman (Pusat Penelitian Kelapa Sawit 2007). Saat ini, aktivitas pemanenan di hampir semua perkebunan kelapa sawit di Indonesia masih dilakukan secara manual dan mengandalkan tenaga manusia. Kegiatan pemanenan secara manual berpotensi untuk menimbulkan permasalahan keselamatan dan kesehatan kerja (K3). Hasil penelitian Hendra dan Rahardjo (2009) menyatakan bahwa resiko pekerjaan pemanenan, yaitu panen dan muat

mempunyai kategori tinggi (skor 8-10) berdasarkan metode *rapid entire body assessment (REBA)*. Syuaib (2012) dan Dewi (2013) juga menjelaskan bahwa hasil analisis selang alami gerakan (SAG) terhadap prosedur pemanenan yang dilakukan saat ini menunjukkan bahaya resiko ergonomi yang secara umum terjadi pada semua anggota tubuh bagian atas pemanen, yaitu leher, bahu dan lengan bawah. Namun, penelitian tersebut masih menggunakan pendekatan pada lingkup gerakannya saja sehingga belum mencerminkan pembebanan sebenarnya yang diterima oleh pemanen. Maka dari itu diperlukan penelitian lanjutan yaitu dengan pendekatan biomekanik untuk menganalisis gaya yang dibutuhkan otot untuk merespon tekanan tersebut sehingga resiko cidera otot dapat dihindari. Tujuan penelitian ini adalah mendesain model diagnostik resiko ergonomi pada pemanenan kelapa sawit secara manual berdasarkan antropometri, studi gerak dan biomekanik.

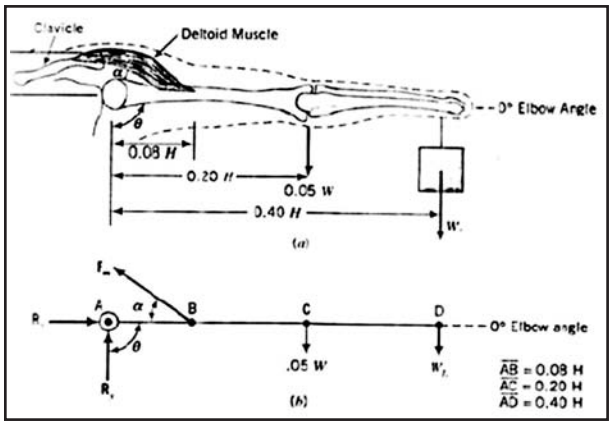
Bahan dan Metode

Penelitian dilaksanakan mulai bulan Januari 2014 hingga bulan Juni 2014 di Laboratorium Ergonomika, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB. Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah seperangkat komputer dan alat tulis untuk proses pengolahan data. Beberapa perangkat lunak yang digunakan adalah *spreadsheet* dan *computer aided design* (CAD). Subjek yang digunakan untuk mendapatkan data antropometri pemanen kelapa sawit berjumlah 48 pemanen di PT Sari Lembah Subur (SLS), Riau, 43 pemanen di PT Waru Kaltim Plantation (WKP), Kalimantan Timur, dan 50 pemanen di PT Pasangkayu (PKY), Sulawesi Barat. Sedangkan subjek yang diteliti untuk mengetahui tingkat resiko gerakan pada proses pemanenan kelapa sawit berjumlah 9 pemanen di SLS, 5 pemanen di WKP, dan 11 pemanen di PKY. Data tersebut berasal dari penelitian Dewi (2013). Penelitian yang dilakukan terdiri dari penelitian pendahuluan, simulasi model antropometri pemanenan, formulasi jarak aman dan panjang egrek yang dibutuhkan serta analisis biomekanik yang secara umum dijelaskan melalui bagan alir pada Gambar 1.

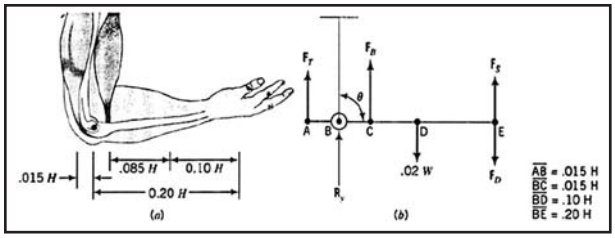


Gambar 1. Bagan alir prosedur penelitian.

Penelitian pendahuluan dimulai dengan mempelajari data sudut gerak tubuh berdasarkan penelitian Dewi (2013) untuk mencari pola umum gerak dan postur pemanen serta pembuatan model antropometri postur. Proses formulasi jarak aman dan panjang egrek yang dibutuhkan dilakukan setelah simulasi model antropometri pada kondisi ambang batas ekstrim dilakukan. Dari kondisi tersebut ditemukan sudut antara egrek dan pohon (*θ)* Sudut ini nantinya akan menghasilkan formulasi jarak aman dan panjang egrek yang dibutuhkan. Simulasi model antropometri pemanenan dilakukan untuk mencari postur pemanen yang terjadi pada kondisi ambang batas ekstrim. Kondisi ambang batas ekstrim yang dimaksud adalah kondisi tersulit yang masih bisa diterima pemanen. Hal ini dilakukan untuk mencari batas resiko maksimal yang dapat terjadi. Analisis biomekanika dilakukan berdasarkan perhitungan mekanika yang nantinya akan diterapkan pada setiap model antropometri postur pemanen dalam kondisi ambang batas ekstrim yang telah dihasilkan pada tahap simulasi sebelumnya. Gambar postur pemanen tersebut digambarkan sudut-sudut gerakannya menggunakan CAD.



Gambar 2. Perhitungan kinetika pada bahu.



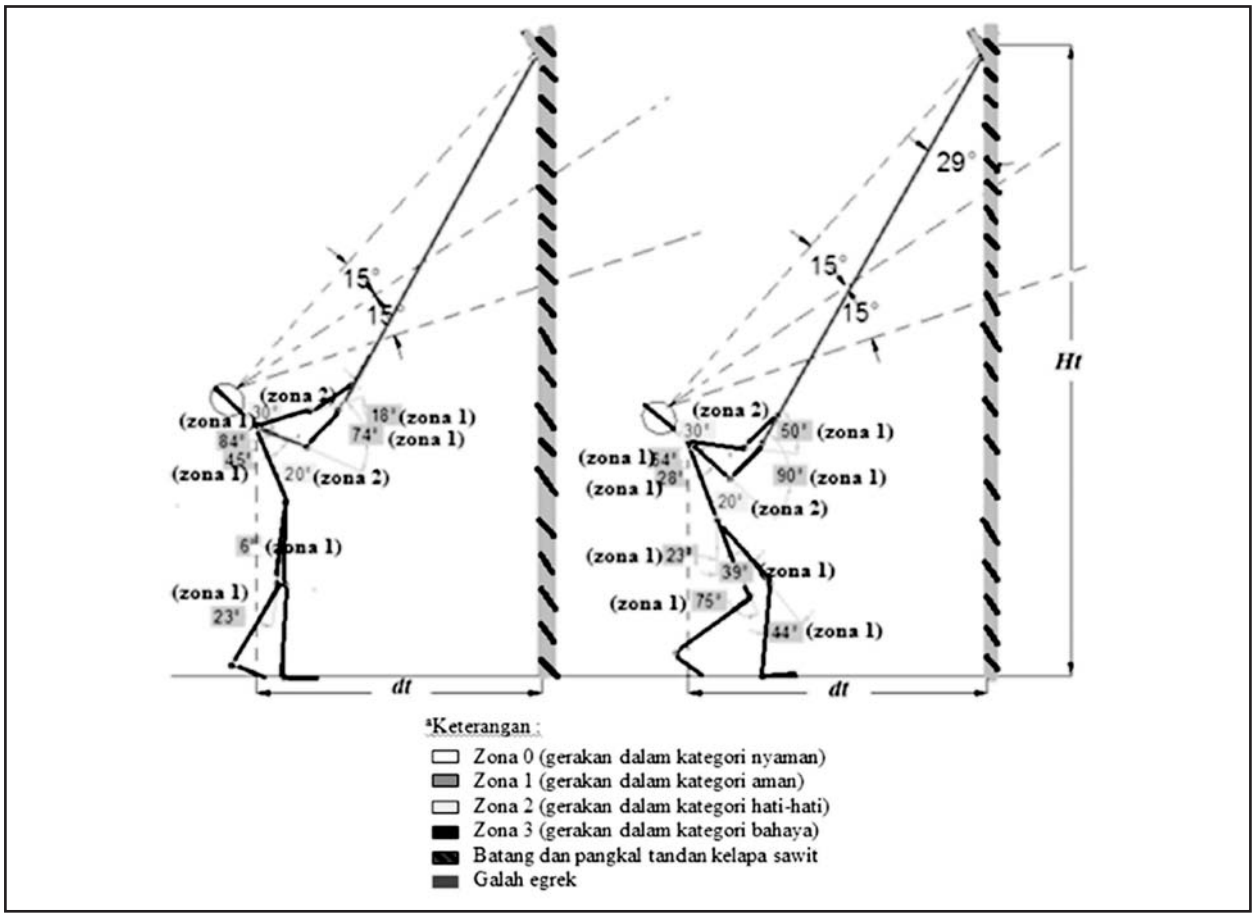
Gambar 3. Perhitungan kinetika pada lengan bawah.

Perhitungan mekanika dilakukan pada segmental tubuh yang kritis seperti leher, bahu dan lengan bawah. Perhitungan mekanika pada bahu dan lengan berdasarkan persamaan yang dibuat oleh Philip (2000) yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3.

Hasil dan Pembahasan

Simulasi Model Antropometri Pemanenan pada Kondisi Ambang Batas Ekstrim

Simulasi dilakukan pada dua postur pemanenan yaitu postur sebelum dan sesudah gerakan memotong pelepah dan tandan buah segar (TBS). Hal ini dilakukan untuk mendapatkan batas resiko maksimal yang dapat terjadi pada postur saat memanen. Ketentuan simulasi yang pertama adalah model menggunakan antropometri pemanen persentil 5 karena pemanen dengan ukuran tubuh persentil 5 memiliki kondisi yang lebih sulit (ekstrim) pada saat proses pemanenan. Diharapkan pemanen dengan ukuran tubuh persentil 5 akan mewakili resiko maksimal yang diterima dalam sampel populasi pemanen pada penelitian ini. Ketentuan yang kedua yaitu sudut gerak pada joint di leher, punggung dan *joint* siku. Hal ini dikarenakan pada *joint-joint* tubuh tersebut sangat mempengaruhi terbentuknya sudut gerak yang ekstrim pada *joint-joint* tubuh yang lain seperti pada bahu dan *joint* pada anggota tubuh bawah seperti tungkai atas dan tungkai bawah. Pada *joint* di leher menggunakan gerakan ekstensi leher (He) yang menggunakan sudut maksimum kurang dari 31° yaitu 30°. Sedangkan pada *joint* di punggung menggunakan sudut gerak ekstensi punggung (Be) yang menggunakan sudut maksimum kurang dari 21 yaitu 20°. Selain itu agar membentuk gaya momen yang besar pada *joint* siku menggunakan gerak fleksi siku tangan (Ef) sebesar 90°. Hal ini berdasarkan Kroemer dan Grandjean (1997) yang menyebutkan bahwa gaya momen paling besar pada siku yang membengkok kedalam (fleksi) berada pada sudut gerak antara 90° dan 120°. Ketentuan berikutnya adalah sudut pandang pemanen. Besarnya sudut pandang pemanen menggunakan sudut pandang 15° (Kroemer dan Grandjean 1997). Ketentuan yang terakhir adalah letak egrek. Letak egrek dalam hal ini adalah posisi egrek terhadap postur pemanen yang letak ujung batang egreknya sejajar dengan garis bahu agar membentuk sudut fleksi pada bahu mendekati sudut ekstrim. Hasil simulasi model antropometri pada kondisi ambang batas ekstrim dapat dilihat pada Gambar 4.



[a] *Pengelompokkan zona berdasarkan Openshaw (2006) dengan modifikasi penerjemahan kategori zona.*

Gambar 4. Model antropometri pemanenan saat kondisi ambang batas ekstrim yaitu pada postur sebelum (A) dan sesudah (B) gerakan memotong pelepah dan tandan.

Formulasi Jarak Aman dan Panjang Egrek yang Dibutuhkan

Dari simulasi pada tahapan sebelumnya didapat besarnya sudut antara egrek dengan pohon (*θ*) yaitu sebesar 29° berdasarkan sudut gerak yang dibuat pada ambang batas beban maksimum yang masih dapat diterima. Formulasi jarak dan panjang egrek dapat dibuat berdasarkan sudut tersebut yang digambarkan pada Gambar 5.

Berdasarkan gambar tersebut, jarak aman pemanenan (*dt*) dan panjang egrek yang dibutuhkan (*lp*) dapat ditentukan. Untuk mencari *dt* maka nilai *a* harus dicari. Jarak antara titik pada pangkal bahu (A) dengan titik perpotongan tangan dan ujung batang egrek (B) disebut dengan *a*. Besarnya dapat dicari dengan menggunakan rumus Phytagoras. Simulasi yang dilakukan dalam kondisi ambang batas ekstrim sehingga menggunakan data antropometri persentil 5. Untuk pemanen dengan persentil 5, panjang lengan atasnya yaitu 26 cm sedangkan lengan bawahnya sepanjang 23 cm. Sehinga perhitungannya dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$a = \sqrt{26^2+23^2} = 34.71 \approx 35 \text{ cm} \quad (1)$$

Jika tinggi bahu (*Hs*) dan tinggi pohon (*Ht*) diketahui maka garis AB (*dh*) dapat diketahui dengan rumus yang terlihat pada Persamaan 2.

$$dh = (Ht\text{-}Hs)\tan 29° \quad (2)$$

Setelah *a* dan *dh* diketahui maka rumus jarak aman antara pemanen dan pohon (*dt*) dapat dirumuskan seperti pada Persamaan 3, 4 dan 5.

$$dt(\text{m}) = dh + a \quad (3)$$

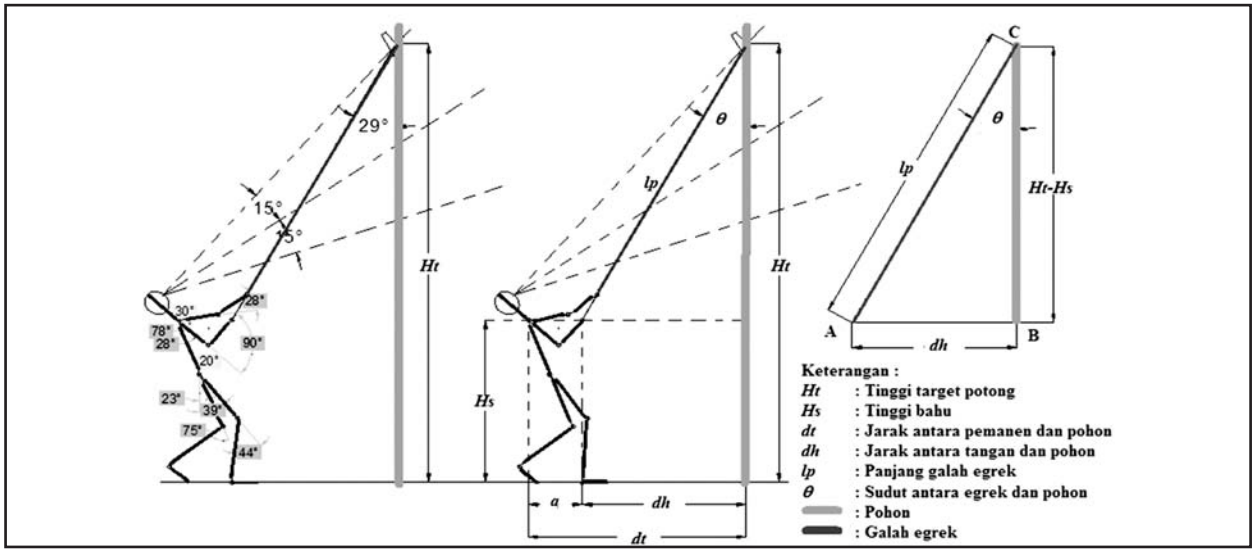
$$dt(\text{m}) = (Ht\text{-}Hs)\tan 29° + a \quad (4)$$

$$dt(\text{m}) = 0.5(Ht\text{-}Hs) + 0.35 \quad (5)$$

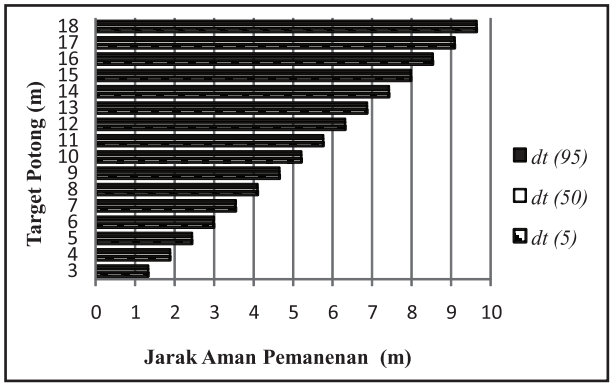
Dari persamaan persamaan di atas maka didapat juga panjang egrek yang dibutuhkan, yang dirumuskan pada Persamaan 6.

$$lp = (Ht\text{-}Hs)/\cos\theta \quad (6)$$

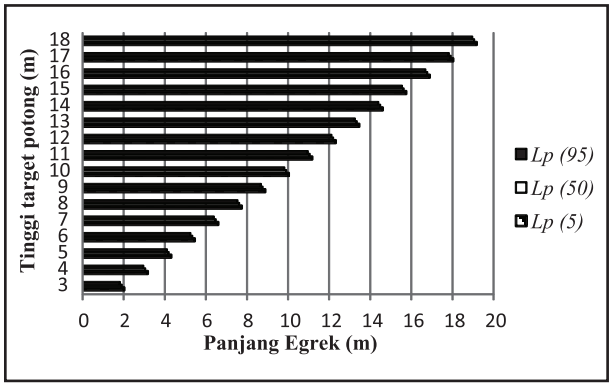
Persamaan jarak aman dan panjang egrek yang dibutuhkan dapat disimulasikan ke dalam *spreadsheet* dengan memodifikasi ketentuan tinggi pohon sawit dan tinggi bahu pemanen. Grafik



Gambar 5. Gambaran formulasi rumus jarak aman dan panjang egrek.



Gambar 6. Grafik pengaruh tinggi target potong (*Ht*) terhadap jarak aman (*dh*).



Gambar 7. Grafik pengaruh tinggi target potong (*Ht*) terhadap panjang egrek yang dibutuhkan (*lp*).

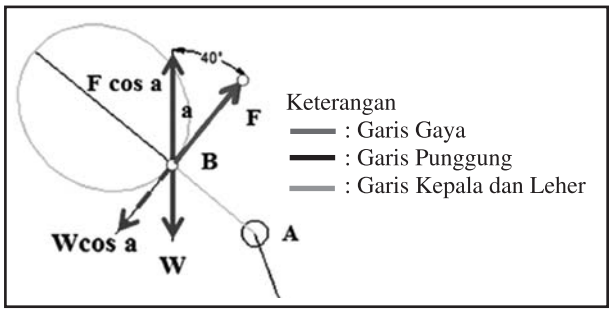
pengaruh tinggi target potong (*Ht*) terhadap jarak aman (*dh*) dan panjang egrek yang dibutuhkan (*lp*) disajikan pada Gambar 6 dan 7.

Kedua grafik di atas memuat data jarak aman dan panjang egrek ideal yang dapat terbentuk pada kegiatan memotong pelepah dan tandan, dengan menggunakan model pemanen persentil 5, 50 dan 95 serta pertambahan tinggi target potong. Pada grafik dapat dilihat bahwa semakin tinggi target potong maka semakin panjang jarak antara pemanen dengan pohon untuk mendapatkan kondisi yang aman dan semakin panjang pula panjang egrek yang diperlukan. Selain itu, dapat terlihat semakin tinggi ukuran tubuh pemanen yang diwakili oleh populasi pemanen persentil 5, 50 dan 95 yang digunakan untuk model antropometri maka panjang egrek yang dibutuhkan semakin kecil. Secara garis besar bahwa tinggi target potong lebih dari 16 m menghasilkan jarak aman lebih dari 9 m. Hal ini tidak memungkinkan untuk dilakukan pada kondisi perkebunan kelapa sawit sekarang ini yang memiliki rata-rata jarak tanam sepanjang 9 m (Pahan 2007). Maka dari itu jika panjang jarak panen sudah melebihi 10 m, maka kegiatan panen tersebut tidak dapat dilakukan dengan aman.

Analisis Biomekanika

Analisis Biomekanika Saat Kondisi Ambang Batas Ekstrim

Analisis biomekanika dilakukan pada model antropometri saat kondisi ambang batas ekstrim (*critical range of motion*) agar didapat batas resiko beban yang diterima pemanen pada kondisi tersebut. Analisis ini dilakukan pada dua postur gerakan yaitu gerakan awal sebelum pemotongan dan gerakan akhir setelah pemotongan, untuk segmen tubuh leher, bahu dan lengan bawah. Segmen-segmen tubuh tersebut menahan beban dalam keadaan statik mengikuti hukum kesetimbangan benda tegar. Contoh analisis biomekanika pada segmen leher dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Analisis biomekanika pada segmen leher.

Dari gambaran tersebut didapat persamaan mekanika yang dijelaskan pada Persamaan 7 dan 8.

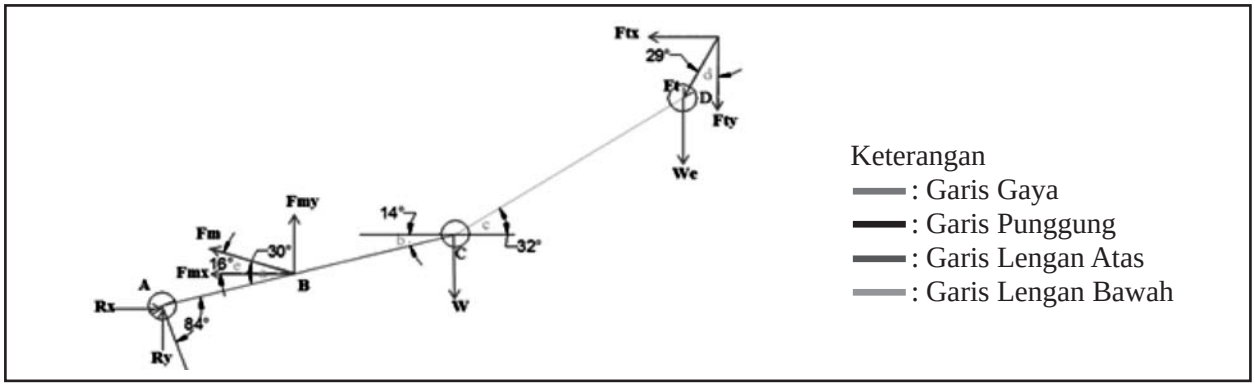
$$M_A = 0 \quad (7)$$

$$F = W \cos a \quad (8)$$

Dari persamaan tersebut dilakukan perhitungan yang menghasilkan nilai *F*. Nilai *F* merupakan besarnya momen gaya yang dibutuhkan leher agar dapat menahan gaya berat (*W*) agar tetap setimbang. Pada kondisi tersebut, besarnya batas beban yang diterima leher adalah 19.02 Nm. Cara yang sama dilakukan juga pada segmen tubuh bahu dan lengan bawah untuk mencari besarnya momen gaya pada otot *deltoid* (bahu) dan otot *brachioradialis* (lengan bawah). Ada dua analisis biomekanika pada bahu dan lengan bawah yang menghasilkan masing-masing dua macam model biomekanik untuk bahu dan lengan bawah berdasarkan besarnya sudut fleksi gerakan yang terbentuk. Pada bahu, analisis biomekanik dibagi berdasarkan sudut fleksi gerakan ≥90° dan ≤90° dan untuk lengan bawah dibagi berdasarkan sudut fleksi gerakan ≥30° dan ≤30°. Diagram gaya dan persamaan biomekaniknya ditunjukkan pada Gambar 9, 10, 11 dan 12 serta Persamaan 9 sampai dengan16.

$$M_A = 0 \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow Fm = W \cos b\,AC + We\,(\cos b\,AC + \cos c\,CD) - Ft \sin d\,(\sin b\,AC + \sin c\,CD) + Ft \cos d\,(\cos b\,AC + \cos c\,CD) / (\sin e \cos b\,AB) + (\cos e \sin b\,AB) \quad (10)$$



Gambar 9. Diagram gaya pada segmen bahu untuk sudut fleksi ≥90°.

Tabel 1. Batas beban yang masih dapat diterima pada bahu dan lengan bawah.

Postur		*Fm* (N)	
		Bahu	Lengan Bawah
Gerakan awal	kanan	887.74	788.95
	kiri	1,091.96	1,634.31
Gerakan akhir	kanan	742.60	782.75
	kiri	1,035.75	1,145.80

$$M_A = 0 \quad (11)$$

$$\Leftrightarrow Fm = W \cos b\,AC + We\,(\cos b\,AC + \cos c\,CD) - Ft \sin d\,(\sin b\,AC + \sin c\,CD) + Ft \cos d\,(\cos b\,AC + \cos c\,CD) / (\sin (a+b) \cos b\,AB) + (\cos (a+b) \sin AB) \quad (12)$$

$$M_A = 0 \quad (13)$$

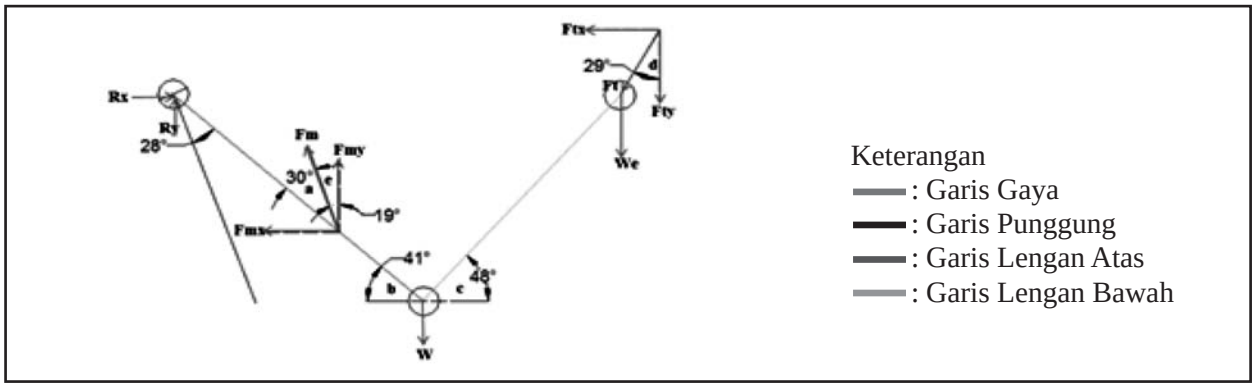
$$\Leftrightarrow Fm = W \cos b\,AC + We \cos b\,AD - Ft \sin d \sin b\,AD + Ft \cos d \cos b\,AD / (\sin e \cos b\,AB) - (\cos e \sin b\,AB) \quad (14)$$

$$M_A = 0 \quad (15)$$

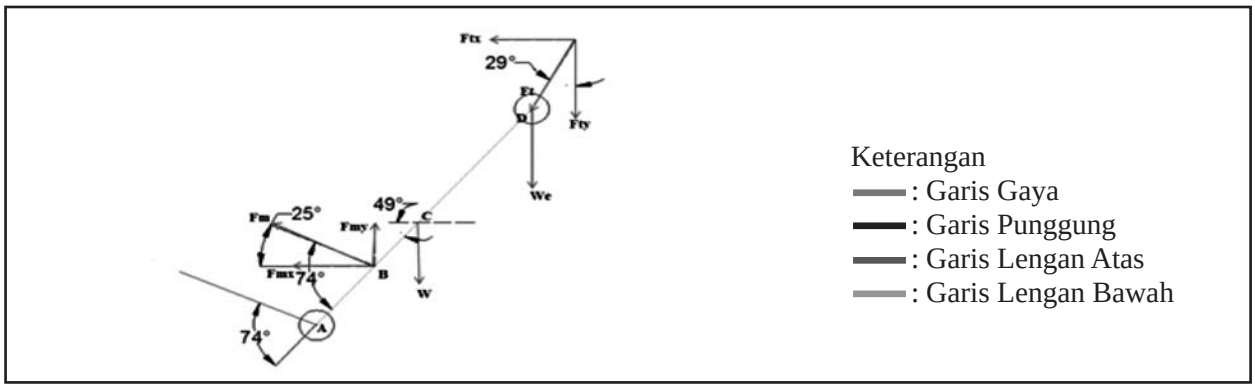
$$\Leftrightarrow Fm = W \cos b\,AC + We \cos b\,AD - Ft \sin d \sin b\,AD + Ft \cos d \cos b\,AD / (-\cos e \cos b\,AB) + (\sin e \sin b\,AB) \quad (16)$$

Sudut ambang batas ekstrim leher ekstensi 30° menghasilkan sudut a sebesar 40° dan gaya berat segmen leher 28.52 N yaitu 21.85 N yang didapat dengan Persamaan 9. Batas beban yang dapat diterima oleh bahu dan lengan bawah dapat dilihat pada Tabel 1.

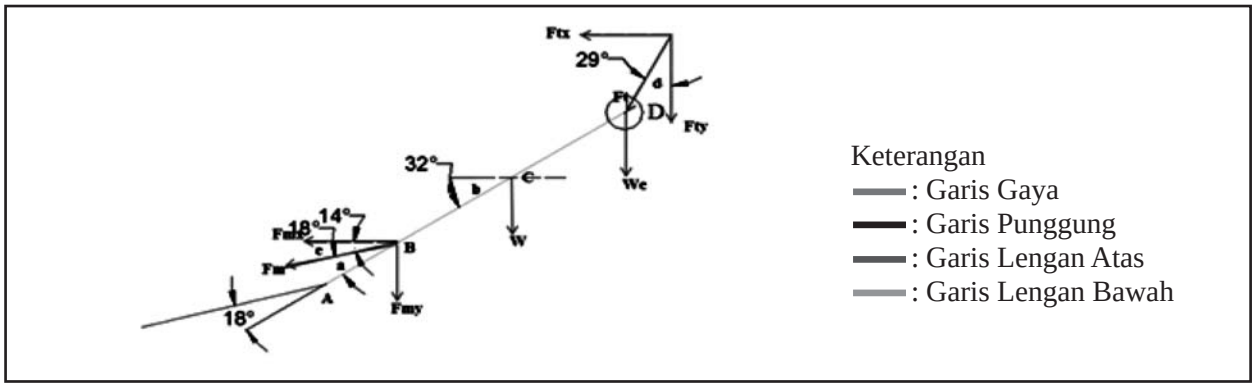
Dari data pada tabel di atas dapat dilihat bahwa untuk lengan bawah, semua beban pada postur gerakan akhir lebih besar daripada gerakan awal.



Gambar 10. Diagram gaya pada segmen bahu untuk sudut fleksi ≤ 90°.



Gambar 11. Diagram gaya pada segmen lengan bawah untuk sudut fleksi ≥30°.



Gambar 12. Diagram gaya pada segmen lengan bawah untuk sudut fleksi ≤30°.

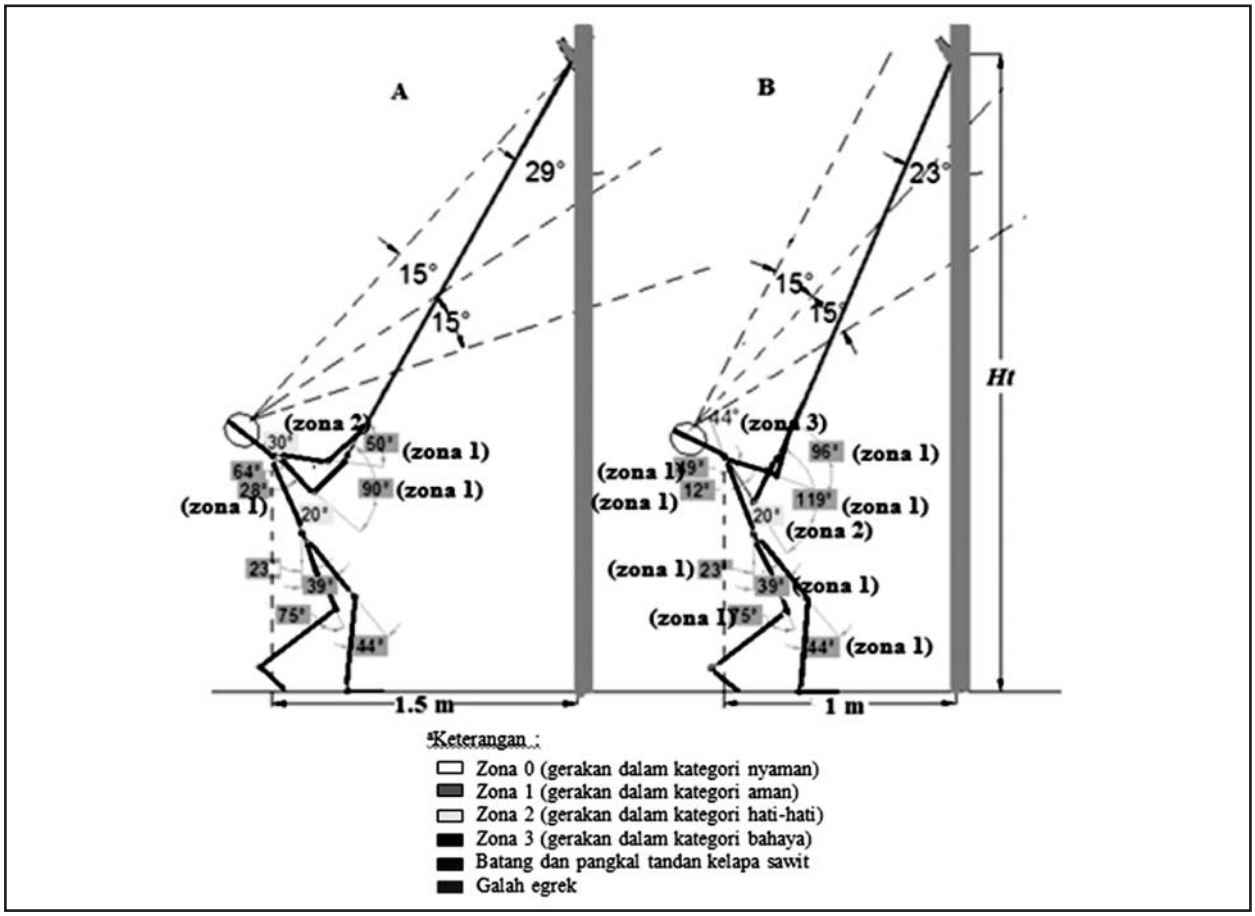
Besarnya beban di otot *branchioradialis* pada lengan bawah untuk gerakan akhir yaitu antara 782.75 N sampai 1,145.80 N menunjukkan bahwa pada saat menarik, otot *branchioradialis* melakukan fleksi yang sangat kuat karena otot ini merupakan otot superfisial pada sisi radial (sisi ibu jari), siku dan lengan bawah yang berhubungan dengan otot fleksor jari superfisialis yang berfungsi untuk melakukan fleksi di keempat jari dan pergelangan tangan. Otot ini berperan penting dalam fleksi yang kuat terhadap tahanan (Sloane 1994). Tahanan yang besar di permukaan besi galvanis pada batang egrek terlihat dalam perilaku pemanen yang lebih memilih untuk tidak menggunakan sarung tangan (*gloves*) yang diberikan perusahaan sebagai alat pelindung diri (APD). Penggunaan sarung tangan akan mengurangi kekuatan genggaman (Wang et al. 1987) dalam Sanders dan Cormick (1993). Penurunan kekuatan genggaman tangan ini menghasilkan konsekuensi negatif seperti terlepasnya alat, rendahnya kontrol pada tangan, kualitas kerja yang buruk dan meningkatnya kelelahan otot (Sanders dan Cormick 1993). Sehingga pembuatan grip pada pegangan egrek dapat direkomendasikan untuk diaplikasikan pada proses pemotongan pelepah dan tandan agar dapat meningkatkan kekuatan genggaman tangan.

Berdasarkan analis biomekanika pada kondisi *critical range of motion* (CRM), diketahui bahwa distribusi beban otot pada otot *splenius* (leher), otot *deltoid* (bahu) dan otot *branchioradialis* (lengan bawah) berturut-turut adalah 21.85 N, 1,091.96 N dan 1,634.31 N. Berdasarkan Rohmert (1966) dalam Kroemer dan Grandjean (1997), beban maksimal yang dapat ditarik oleh manusia saat melakukan pekerjaan menarik pada posisi berdiri adalah 120% dari berat tubuhnya. Hal tersebut sangat tergantung letak posisi lengan dan tangan. Letak lengan dan tangan pada saat melakukan gerakan memotong pelepah atau tandan berada pada sudut 120º-150º dari posisi normal (0º) lengan tangan yang lurus ke bawah. Pada selang sudut tersebut, menurut Rohmert (1966) dalam Kroemer dan Grandjean (1997) direkomendasikan beban maksimal yang dapat ditarik adalah 20-40% dari berat tubuh.

Diagnosa Beban Biomekanik pada Postur Saat Ini

Pada kondisi *real* di lapangan sering sekali pemanen memanen pada jarak yang dekat dengan pohon sehingga sudut antara egrek dengan pohon (θ) lebih kecil dari sudut θ yang dihasilkan oleh rumus jarak aman seperti yang terlihat pada Gambar 13.

Dari gambar 13, terdapat dua jenis postur yang akan dikaji yaitu postur yang mengikuti aturan jarak aman dari simulasi ambang batas ekstrim (postur



[a] *Pengelompokkan zona berdasarkan Openshaw (2006) dengan modifikasi penerjemahan kategori zona.*

Gambar 13. Gambar postur model antropometri pada postur yang disarankan (A) dan postur saat ini (B).

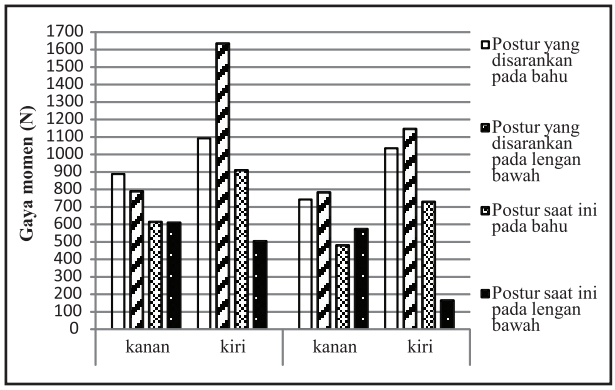
yang disarankan) dan postur *real* yang ada di lapang (*existing posture*). Dari kedua postur tersebut kita dapat menganalis beban biomekaniknya. Pada segmen leher terjadi pertambahan beban dari 21.85 Nm pada postur yang disarankan menjadi 25.63 Nm pada postur saat ini. Hal ini dikarenakan terjadi pertambahan sudut ekstensi pada leher dari ambang batas maksimal sudut ekstensi 30º menjadi 44º yang melebihi batas aman.

Grafik tersebut menunjukkan bahwa hampir semua beban pada postur saat ini di bahu dan lengan bawah lebih kecil daripada postur yang disarankan. Hal ini dikarenakan pada postur saat ini, anggota tubuh gerak atas seperti bahu dan lengan bawah mudah menjangkau egrek karena sudut θ yang kecil. Selain itu, sudut θ yang kecil ini membuat jarak pemanenan semakin pendek. Jarak pemanenan yang pendek menyebabkan panjang egrek yang dibutuhkan semakin pendek. Hal ini menyebabkan resiko terjadinya lenturan pada batang egrek semakin kecil.

Dari simulasi model antropometri pemanenan pada postur saat ini dapat disimpulkan bahwa, terjadi penurunan beban pada segmen lengan yaitu bahu dan lengan bawah, namun diiringi peningkatan beban pada segmen leher. Meskipun demikian, dengan mempertimbangan resiko postur dan resiko beban, segmen leher merupakan bagian tubuh yang harus diprioritaskan karena tidak hanya memiliki resiko postur tapi juga memiliki resiko beban sehingga dampak resikonya lebih besar.

Simpulan

1. Formula jarak aman (*dt*) dan panjang egrek yang dibutuhkan (*Lp*) pada proses pemanenan kelapa sawit yaitu *dt* (m) = 0.5 *(Ht-Hs)* + 0.35 dan *Lp* = (*Ht-Hs*)/cos θ dimana *Ht* adalah tinggi target potong dan *Hs* adalah tinggi bahu pemanen.
2. Pemanenan kelapa sawit dengan tinggi target pohon lebih dari 16 m sudah tidak aman untuk dilakukan secara manual dengan menggunakan egrek.



Gambar 14. Grafik perbandingan beban mekanik pada postur yang disarankan dan postur saat ini.

3. Berdasarkan hasil analisis biomekanika gerak panen, diketahui bahwa distribusi beban (*critical load*) otot pada kondisi CRM adalah 21.85 N pada otot *splenius* (leher), 1,091.96 N pada otot *deltoid* (bahu) dan 1,634.31 N untuk otot *branchioradialis* (lengan bawah).
4. Hasil analisis biomekanik terhadap postur kerja pemanenan yang ada di lapang saat ini (*existing posture*), disimpulkan bahwa resiko ergonomi pada bahu dan lengan bawah relatif lebih kecil dari *critical load* (CL) dan c*ritical range of motion* (CRM), namun demikian pada leher, CL dan CRM sudah melewati ambang batas yang diterima. Oleh karena itu, postur ini direkomendasikan untuk tidak dilakukan dan perlu diperbaiki dengan menggunakan postur yang disarankan.
5. Model diagnostik resiko ergonomi pada pemanenan kelapa sawit telah dirancang dengan parameter nya adalah jarak aman (*dt*), panjang batang egrek yang dibutuhkan (*lp*), *critical range of motion* (CRM) dan *critical load* (CL) pada leher, bahu dan lengan bawah.

Daftar Pustaka

Dewi, N.S. 2013. Studi gerak dan aplikasinya untuk peningkatan efektivitas dan keselamatan kerja pemanenan kelapa sawit secara manual. (skripsi). Departemen Teknik Mesin dan Biosistem Fakultas Teknologi Pertanian. Bogor

Hendra, S. Rahardjo. 2009. Risiko ergononomi dan keluhan musculoskeletal disorders (MSDs) pada pekerja panen kelapa sawit. Prosiding Seminar Nasional Ergonomi IX, Semarang, 17-18 November, 2009. D11-1 –D11-18

Kroemer, K.H.E., E. Grandjean. 1997. Fitting the Task to The Human. (5th ed). London: Taylor and Francis

PahanI. 2008. Panduan Lengkap Kelapa Sawit : Manajemen Agribisnis dari Hulu hingga Hilir. Jakarta. Niaga Swadaya.

[PPKS] Pusat Penelitian Kelapa Sawit. 2007. Budidaya Kelapa Sawit.Pusat Penelitian Kela Sawit. Jakarta

Sanders, S.M., McCormick. 1993. Human Factor Engineering and Design Seventh Edition. Mc Graw Hill. New Delhi.

Sloane, E. 1994. Anatomy and Physiology: An Easy Learner.Jones and Barlett Publishers, Inc. Sudbury.

Syuaib, M.F., S. Herodian, D.A. Hidayat, R. Fil'aini, T.N. Sari, K.A. Putranti. 2012. Laporan Hasil Kajian Ergonomika untuk Penyempurnaan Sistem dan Produktivitas Kerja Panen-muat Sawit di kebun PT Astra Agro Lestari. FATETA. IPB

Technical Paper

Evaluasi Sistem Penggerak dan Modifikasi Mesin Penanam Jagung Bertenaga Traktor Tangan

Evaluation of Driving System and Modification of Corn Planter Powered by Hand Tractor

Wawan Hermawan, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fateta-IPB. Email: w_hermawan@ipb.ac.id
Tineke Mandang, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fateta-IPB.
Email: tineke_mandang_2003@yahoo.com
Agus Sutejo, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fateta-IPB. Email: dtm_cyber@yahoo.com
Agustami Sitorus, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fateta-IPB. Email:at.sitorus@gmail.com

Abstract

To improve the performance of corn planter powered by hand tractor, the following efforts were carried out: a) the evaluation of minimum tillage (strip tillage) using rotary tiller, b) the evaluation of the performance of the drive system for seed metering device; and c) modifications of the planting and fertilizing units. The machine capacity to be improved by using two planting rows in one pass. The machine was driven by a hand tractor equipped with a rotary tiller unit. The experiment results show that the strip tillage using the rotary tiller could be done when the soil is plowed, in a relatively loose condition. Among the five types of drive wheel to rotate the seed metering device, lugged rubber wheel had the lowest level of sliding (21-22%), and produced seed spacing of the closest to the target (19-21 cm). The evaluation showed that one drive wheel is not able to drive two units of seed metering device and two units of fertilizer metering device. Rotation of tractor axle can be used effectively to drive the rotor of two units of the fertilizer applicator and corn seed metering devices of two planter units, using the sprocket-chain transmission. Modifications were constructed for two planting units; two fertilizing units; and the addition of drive system for the metering devices using rotation of the tractor axle.

Keywords: *Planting machine, fertilizer applicator, corn, tractor wheel axle, hand tractor*

Abstrak

Untuk meningkatkan kinerja mesin penanam dan pemupuk jagung bertenaga traktor tangan, telah dilakukan: a) evaluasi pengolahan tanah minimal (*strip tillage*) menggunakan unit pengolah tanah rotari, b) evaluasi kinerja sistem penggerak bagian penjatah benih; dan c) modifikasi pada unit penanam dan pemupuk jagung. Kapasitas mesin ditingkatkan dengan penanaman dua alur dalam satu lintasan. Mesin penanamdigerakkan oleh traktor tangan yang dilengkapi unit pengolah tanah rotari. Hasil percobaan menunjukkan bahwa pengolahan tanah *strip* dengan unit pengolah tanah rotari bisa dilakukan dengan baik bila tanah sudah dibajak, dalam kondisi yang relatif gembur. Dari lima jenis roda bantu untuk menggerakkan sistem penjatah benih, roda penggerak karet bersirip memiliki tingkat luncuran yang paling rendah (21-22%), dan menghasilkan jarak tanam benih yang paling mendekati target (19-21 cm). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sebuah roda bantu tidak mampu menggerakkan dengan baik dua unit penjatah benih dan dua unit penjatah pupuk. Putaran poros roda traktor dapat digunakan secara efektif untuk menggerakkan poros rotor penjatah pupuk pada dua unit pemupuk dan poros piringan penjatah benih jagung pada dua unit penanam, menggunakan transmisi sproket-rantai. Modifikasi terlah berhasil dilakukan pada unit penanam, pemupuk dan penambahan sistem penggerak unit penjatah benih dan pupuk dari putaran poros roda traktor.

Kata kunci: Mesin penanam, pemupuk, jagung, poros roda traktor, traktor tangan

Diterima: 06 November 2014; Disetujui: 05 Februari 2015

Pendahuluan

Secara teknis, upaya peningkatan produksi jagung di dalam negeri dapat ditempuh melalui perluasan areal tanam dan peningkatan produktivitas (Suryana, *et al.,*2007). Untuk mendukung itu, aplikasi teknologi mekanisasi dalam budidaya jagung sangat diperlukan termasuk aplikasi mesin pengolahan tanah, mesin penanam dan pemupuk. Beberapa peneliti telah mendesain

dan mengembangkan alat penanam jagung yang diharapkan dapat meningkatan kapasitas kerja dibandingkan penanaman manual (Pitoyo, *et al.,* 2007; Hermawan, *et al.,* 2009; Hermawan, 2012).

Kapasitas kerja dan efisiensi biaya untuk mesin tersebut masih dapat ditingkatkan dengan cara menggabungkan (mengintegrasikan) tiga kegiatan yaitu pengolahan tanah, penanaman dan pemupukan dalam satu lintasan menggunakan sebuah mesin yang terintegrasi. Pada tahun 2009, tim peneliti (Hermawan,*et al*., 2009) telah berhasil mendesain dan menguji coba mesin pengolah tanah, penanam dan pemupuk jagung terintegrasi dengan tenaga gerak traktor berroda-2. Mesin ini digerakkan oleh traktor berroda-2 dan mampu melakukan proses pengolahan tanah, pembentukan guludan tanam, penanaman benih jagung dan pemupukan (Urea, TSP dan KCl) secara simultan. Kinerja pengolahan tanah dan pembentukan guludan sudah cukup baik, dengan ukuran potongan labar bawah ±60 cm, lebar atas ±20 cm dan tinggi ±25 cm. Penanaman benih 1-2 benih per lubang, pemupukan Urea, TSP dan KCl dapat dilakukan dengan dosis 100-150 kg/ha (dapat diatur). Kapasitas lapangan teoritis dari penenaman dengan prototipe mesin hasil rancangan rata-rata 0.13 ha/jam, kapasitas lapangan efektifnya 0.11 ha/jam pada kecepatan maju 0.48 m/s. Selanjutnya prototipe pertama tersebut telah diperbaiki terutama pada kinerja penjatahan pupuk dan kapasitas pemupukannya (Hermawan, 2012).

Namun demikian, konstruksi mesin penanam dan pemupuk jagung terintegrasi (prototipe-1) perlu dimodifikasi agar dapat ditingkatkan kinerjanya: 1) kapasistas penanamannya dari satu alur tanam menjadi dua alur tanam sekali lintasan mesin, 2) kinerja penanaman dan pemupukannya yang meliputi ketepatan penjatahan benih jagung, ketepatan jarak tanam, ketepatan penjatahan pupuk, dan kapasitas hoper pupuknya. Unit penanam harus mampu menanam benih dengan jumlah benih per lubang tanam yang sesuai kebutuhan (1-2 benih) serta dalam jarak tanam 20 cm dalam barisan dan 50 cm antarbaris (tanam legowo 50-100), dengan satu tanaman per rumpun. Penempatan benih pada kedalaman 3-5 cm. Mekanisme penjatah benih dapat diset sesuai kebutuhan budidayanya. Untuk penjatahan pupuk, maka pada saat tanam diberi takaran pupuk 250 kg/ha NPK, dan atau 100-150 kg/ha urea. Pencampuran pupuk dengan tanah, melalui pengolahan tanah menggunakan *rotary tiller,* sebelum penempatan benih. Penjatahan pupuk dapat diatur sesuai kebutuhan.

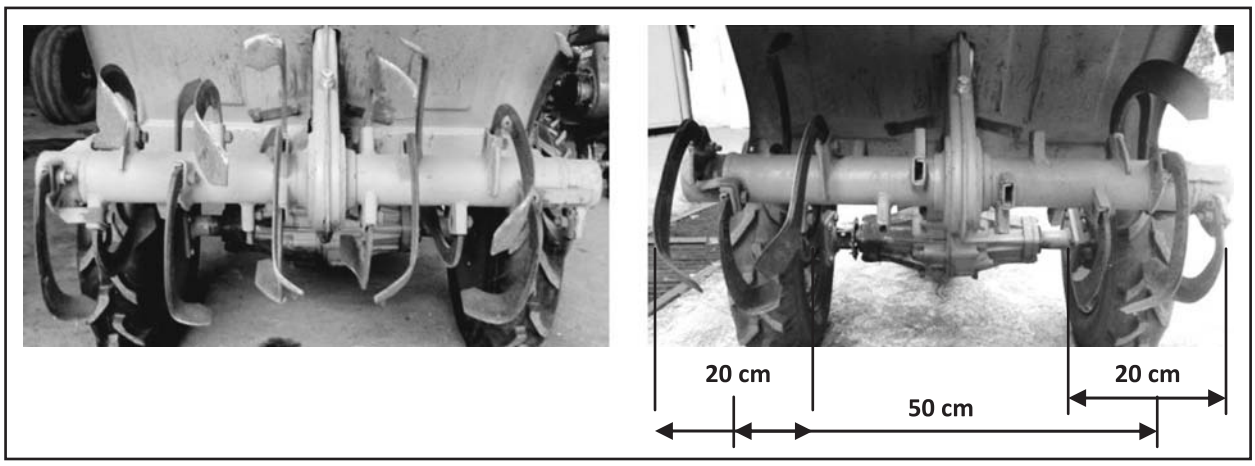
Tujuan dari penelitian ini adalah: menguji dan mengevaluasi kinerja roda penggerak *metering device* unit penanam, dan meningkatkan kapasitas mesin penanam dan pemupuk jagung terintegrasi dengan tenaga gerak traktor beroda.

Bahan dan Metode

Tahapan Penelitian

Sesuai dengan tujuannya, pembahasan dibatasi pada evaluasi kinerja roda penggerak *metering device* unit penanam dan modifikasi unit penanam dan pemupuk. Penelitian ini dilakukan berdasarkan kaidah perancangan (modifikasi), dengan tahapan penelitian sebagai berikut.

1. Analisis kinerja prototipe-1 mesin penanam dan pemupuk jagung
2. Evaluasi kinerja pengolahan tanah strip menggunakan *rotary tiller*
3. Desain dan evaluasi kinerja roda penggerak penjatah benih
4. Perancangan sistem penggerak penjatah benih dan pupuk menggunakan putaran poros roda traktor
5. Desain unit penanam benih jagung dan desain unit pemupuk
6. Pembuatan gambar kerja mesin penanam dan pemupuk
7. Pembuatan (fabrikasi) prototipe mesin penanam dan pemupuk
8. Uji kinerja proptotipe mesin penanam dan pemupuk.



Gambar 1. Pisau *rotary* sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) modifikasi.

Evaluasi Kinerja Pengolahan Tanah Strip Menggunakan *Rotary Tiller*

Untuk mengevaluasi kinerja pengolahan tanah minimum tipe strip digunakan *rotary tiller* yang dimodifikasi, sedemikian rupa sehingga pengolahan tanah dilakukan pada alur tanam jagung (jarak antar alur 50 cm), lebar alur yang diolah 20 cm. Susunan pisau rotary ditata ulang sehingga hanya terpasang lima pisau untuk pengolahan tanah di alur kiri dan lima pisau di sisi kanan (Gambar 1).

Uji pengolahan tanah dilakukan pada tiga kondisi tanah kering, yaitu : 1) tanah keras yang belum diolah, 2) tanah hasil pembajakan menggunakan bajak piringan, dan 3) tanah hasil penggaruan dengan garu rotary. Pengujianan dilakukan pada tiga alur, dengan ukuran petakan masing-masing lebar 2 m dan panjang 10 m. Traktor tangan dioperasikan pada kecepatan putar engine 2000 rpm, kecepatan *Low-1* dan kecepatan putar rotary *High*. Hasil pengolahan tanah yang diukur adalah: 1) kedalaman pengolahan tanah, dan 2) *bulk density* tanah hasil pengolahan.

Evaluasi Kinerja Roda Penggerak untuk *Metering Device*

Karena ada dua unit penanam dan dua unit pemupuk yang akan digunakan, maka kemampuan roda penggerak perlu dianalisis dan dievaluasi. Torsi yang dapat dihasilkan oleh putaran (gelinding) roda dihitung menggunakan prinsip gaya geser dan gaya gesek maksimum yang terjadi pada kontak roda dengan permukaan tanah. Diasumsikan bahwa roda kaku, dan masuk pada permukaan tanah sedalam *z* (*sinkage*). Untuk roda bersirip, siripnya masuk ke permukaan tanah sehingga menghasilkan geseran tahanan tanah.Gaya geser F_r yang dihasilkan dihitung dengan persamaan [1] (Liljedahl,*et al*., 1989). Untuk roda tanpa sirip, gaya gesek roda dengan permukaan tanah F_f dihitung dengan persamaan [2]. Selanjutnya torsi roda T_r dihitung dengan mengalikan gaya F_r atau F_f dengan jari-jari rodanya R_r.

$$F_r = AC + W \tan(\varphi) \quad (1)$$

$$F_f = AC_a + W \tan(\delta) \quad (2)$$

$$T_r = F_r \times R_r \quad (3)$$

di mana:
F_r : gaya geser (N),
A : luas kontak roda dengan tanah (m^2),
C : kohesi tanah (Pa),
W : bobot dinamis pada roda (N),
φ : sudut gesek internal tanah (derajat),
F_f : gaya gesek (N),
C_a : adhesi tanah dengan bahan roda (Pa),
δ : sudut gesek tanah-bahan roda (derajat),
T_r: torsi roda (N.m),
R_r : jari-jari roda (m).

Dengan memperhatikan posisi roda pada permukaan tanah dengan keamblasan *z*, maka luas kontak roda dengan permukaan tanah (*A*) dihitung dengan menggunakan rumus:

$$l = 2\sqrt{R_r^2 - (R_r - z)^2} \quad (4)$$

$$A = l \times b \quad (5)$$

di mana:
l : panjang penampang sentuh roda dengan tanah (m),
b : lebar roda (m).

Pengukuran kondisi tanah dilakukan untuk mendapatkan data: a) *bulk density* (ρ_d), b) kadar air (K_a), c) kohesi (*C*), d) sudut gesekan dalam tanah (φ), e) adhesi (C_a), dan f) sudut gesekan dalam tanah dan bahan roda (δ). Kondisi tanah diukur pada dua keadaan yaitu kadar air 30% dan 52%. Pengukuran dilakukan di permukaan tanah sampai kedalaman 5 cm dari permukaan tanah.*Bulk density* dan kadar air diukur dengan mengambil contoh tanah menggunakan *ring sample* pada kedalaman 0-5 cm, dan menggunakan metode gravimetri.

Uji geser tanah di lapangan dilakukakan menggunakan cincin geser yang dipasangkan pada ujung penetrometer SR-2. Demikian juga untuk mengukur sifat-sifat gesekan tanah dengan bahan digunakan cincin gesek yang dipasangkan pada penetrometer SR-2. Cincin geser maupun cincin gesek yang digunakan memiliki diameter luar 10 cm dan diameter dalam 6 cm. Untuk pengukuran tersebut dilakukan penekanan pada penetrometer dengan dua tingkat gaya tekan yaitu: 20 kg (196.2 N) dan 40 kg (392.4 N). Ada dua jenis bahan yang diuji karakteristik gesekannya dengan tanah, yaitu bahan baja dan karet. Hasil pengukuran torsi pada uji geser dan gesek digunakan untuk menghitung kohesi (*C*) dan sudut gesekan dalam tanah (φ) (Oida, 1992). Dengan cara yang sama juga dihitung sifat-sifat gesekan tanah yaitu adhesi (C_a) dan gesekan dalam tanah dan bahan lain (δ).

Dalam pengujian kinerja roda, digunakan lima jenis roda yaitu: 1) roda karet bersirip karet, 2) roda baja bersirip karet, 3) roda baja bersirip baja, 4) roda baja tanpa sirip dan 5) roda karet tanpa sirip, seperti diperlihatkan pada Gambar 2. Diameter roda 25 cm dan lebar roda 10 cm. Roda dipasangkan pada unit penanam benih, lalu diujicoba dalam penanaman di tanah kering (kadar air 30%) dan tanah basah (kadar air 52%). Kinerja roda yang diukur antara lain: tingkat luncuran roda dan berat tanah yang lengket pada roda.

Pengukuran luncuran roda dilakukan dengan cara mengukur jarak tempuh dalam tiga putaran roda penggerak penjatah benih saat mengoperasikan mesin tanam. Pengukuran masing-masing dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan untuk setiap jenis roda. Luncuran (sliding) roda dihitung

menggunakan rumus:

$$S_{ld} = \left(\frac{S_{rp}}{K_{rp} \times 3} \right) \times 100\% \quad (6)$$

Dalam hal ini: S_{ld} adalah luncuran roda penggerak (%); S_{rp} adalah jarak tempuh roda penggerak dalam tiga putaran (m); K_{rp} adalah keliling roda penggerak (m).

Pengukuran kelengketan tanah pada masing masing roda penggerak dilakukan dengan menimbang tanah lengket pada roda setiap jarak 10 m.

Modifikasi Prototipe-1 Mesin Penanam dan Pemupuk

Berdasarkan analisis kinerja dari mesin penanam dan pemupuk jagung yang sebelumnya, maka dilakukan modifikasi sebagai berikut ini.

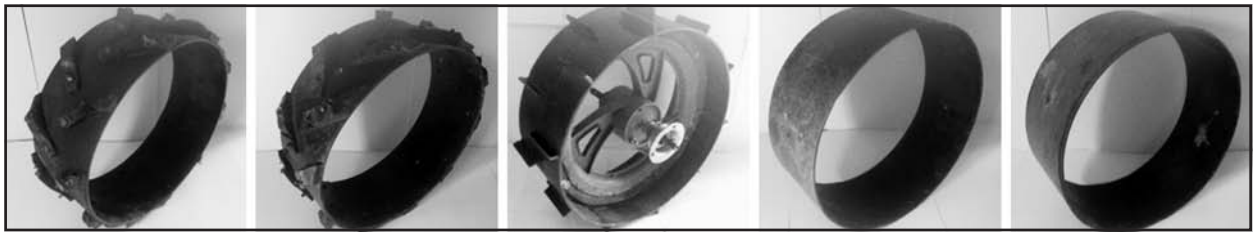
1. Untuk meningkatkan kapasitas penanaman dan pemupukan, maka digunakan dua alur penanaman dalam satu kali lintasan traktor. Pertimbangan teknisnya adalah: a) daya traksi traktor masih mampu menarik tambahan beban dua pembuka alur tanam, b) prototipe mesin yang sebelumnya mampu menarik singkal pembuat guludan (kiri dan kanan), sehingga dengan meniadakan pembuat guludan daya yang tersedia dapat menarik dua unit penanam dan pempuk, c) lebar kerja pengolah tanah rotari adalah 65 cm, hanya bisa untuk menanam dua baris tanam dengan jarak antarbaris sekitar 50 cm. Dengan demikian, digunakan dua unit penanam dan dua unit pemupuk.
2. Unit penanam dan pemupuk ditata dengan posisi: hopper benih di belakang (kiri dan kanan), hopper pupuk di depan (kiri dan kanan). Ukuran hopper pupuk diperbesar berkapasitas 10-15 kg pupuk.
3. Rotor penjatah pupuk diberi tambahan silinder pengatur dosis yang dapat digeser sesuai kebutuhan.
4. Sistem penjatah (benih dan pupuk) digerakkan menggunakan tenaga putaran poros roda traktor. Untuk itu perlu didesain sistem transmisi tenaga putarnya.
5. Pengolahan tanah minimum tipe alur (*strip tillage*) menggunakan rotary tiller dengan pisau rotari yang dipasang dan dioperasikan pada alur olah saja.

Pengujian Kinerja Prototipe-2

Pengujian kinerja prototipe-2 dilakukan pada petak pengujian berukuran lebar 25 m, dan panjang 40 m. Jarak tanam jagung yang dicoba adalah 50 cm x 20 cm. Dengan demikian jarak antar barisan adalah 50 cm.

Selama pengujian mesin, dilakukan pengukuran kinerja mesin di lapangan yang meliputi:

1. pengukuran kapasitas lapangan teoritis (K_{LT}), kapasitas lapangan efektif (K_{LE}) dan menghitung efisiensi lapanganya,
2. pengukuran kinerja penanaman: jumlah benih



(1) (2) (3) (4) (5)

Gambar 2. Lima jenis roda yang diuji: 1) roda karet bersirip karet, 2) roda baja bersirip karet, 3) roda baja bersirip baja, 4) roda baja tanpa sirip dan 5) roda karet tanpa sirip.

(a) (b)

Gambar 3. Pengujian rotary tiller pada tanah keras (a), tanah gembur (b).

Tabel 1. Nilai kohesi, sudut gesekan dalam, adhesi dan sudut gesekan tanah-bahan

Kadar air tanah (%)	Kohesi (kPa)	Ø(°)	Gesekan tanah- karet		Gesekan tanah- baja	
			Adhesi (kPa)	δ (°)	Adhesi (kPa)	δ (°)
30	3.98	30.6	3.53	36.1	1.99	46.3
52	2.39	29.2	4.77	24.8	5.97	30.1

per lubang, jarak antar benih dalam barisan tanam, kedalaman penempatan benih, dan kerusakan benih,

3. pengukuran kinerja pemupukan: takaran pupuk yang diberikan (NPK, Urea, TSP dan KCl), tingkat pemerataan pencampuran pupuk dalam tanah.

Hasil dan Pembahasan

Kinerja Pengolahan Tanah Strip Menggunakan *Rotary Tiller*

Hasil pengujian pengolahan tanah strip menggunakan rotary tiller menunjukkan bahwa rotary tiller dapat mengolah tanah dengan baik pada kondisi tanah yang gembur, yaitu tanah yang sudah dibajak dengan bajak piringan atau digaru rotary. Namun tidak dapat bekerja dengan baik pada tanah yang keras (belum dibajak). Pada tanah yang masih keras, pisau rotari tidak mampu memotong tanah lebih dalam dari 5 cm (Gambar 3(a)). Sementara pada tanah yang sudah dibajak, pengolahan tanah dengan *rotary tiller* dapat dilakukan dengan baik. Pisau dapat memotong dan menggemburkan tanah sampai kedalaman 8-10 cm (Gambar 3(b)).

Karakteristik Geseran dan Gesekan Tanah

Tanah kering (kadar air 30%) memiliki kohesi 3.98 kPa, yang lebih besar dari tanah basah (kadar air 52%) sebesar 2.39 kPa (Tabel 1). Bahan baja memiliki nilai adhesi yang paling besar, khususnya di tanah basah. Dalam kondisi tanah kering, nilai adhesi bahan karet lebih besar dari bahan baja. Karakteristik tanah ini sangat penting dalam perhitungan torsi yang dapat dihasilkan roda, baik roda bersirip maupun roda tanpa sirip untuk kedua jenis bahan tersebut.

Hasil Analisis Torsi Roda Penggerak dan Evaluasi Kinerjanya

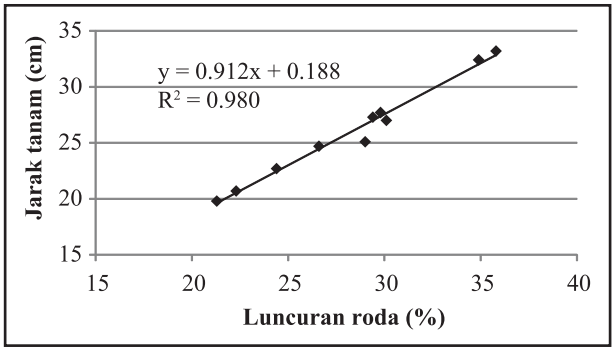
Berdasarkan data karakteristik geseran tanah (Tabel 1) maka dapat dihitung torsi putar maksimum yang dihasilkan oleh roda penggerak pada beberapa tingkat keamblasan roda (*sinkage*). Semakin berat gaya tekan roda pada tanah maka semakin tinggi torsi yang dapat dihasilkan. Untuk roda dengan bobot dinamis 20 kg pada keamblasan roda 2 cm dapat menghasilkan torsi sekitar 50 Nm di tanah kering. Torsi yang dihasilkan pada tanah basah lebih kecil dari tanah kering. Pada tanah basah, roda dengan bobot dinamis 20 kg pada keamblasan roda 2 cm dapat menghasilkan torsi sekitar 40 Nm.

Tabel 2. Hasil perhitungan torsi roda tanpa sirip untuk bahan karet dan baja dengan bobot dinamis roda 20 kg dan *sinkage* 2 cm

Bahan roda	Kadar air tanah (%)	Torsi roda (Nm)
Karet	30	54.3
	52	47.2
Baja	30	62.4
	52	59.1

Untuk roda tanpa sirip, maka yang terjadi adalah gesekan permukaan roda dengan permukaan tanah. Dengan cara yang sama, maka dapat dihitung besarnya torsi roda yang dapat dihasilkan untuk setiap bobot dinamis roda dan keamblasan rodanya. Tabel 2 menunjukkan hasil perhitungan torsi roda yang dapat dihasilkan oleh roda karet dan roda baja dengan bobot dinamis roda 20 kg dan *sinkage* 2 cm.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa roda mampu memutar kedua piringan penjatah benih, baik pada tanah kering maupun tanah basah. Tabel 3 menunjukkan luncuran roda untuk lima jenis roda yang diuji pada tanah kering dan tanah basah. Roda karet sirip karet mempunyai luncuran paling kecil yaitu 21.3% pada tanah kering dan 22.3% pada tanah basah. Tiap jenis roda mencapai kemampuan torsi putar untuk mengatasi kebutuhan torsi putar sistem penjatah pada tingkat luncuran yang berbeda dari 21-35%. Hasil ini sejalan dengan hasil penelitian Schreiber and Kutzbach (2008) di mana *net traction ratio* roda di lahan pertanian akan meningkat seiring peningkatan slip roda hingga sekitar 20-25%, dan akan menurun setelah



Gambar 4. Hubungan luncuran roda dengan jarak tanam.

Tabel 3. Luncuran pada masing-masing roda penggerak

Kadar air tanah (%)	Luncuran roda (%)				
	Roda karet sirip karet	Roda baja sirip karet	Roda baja sirip baja	Roda baja tanpa sirip	Roda karet tanpa sirip
30	21.3	24.4	29.4	34.9	35.8
52	22.3	26.6	29.0	30.1	29.8

Tabel 4. Jarak tanam benih yang dihasilkan menggunakan masing-masing roda penggerak.

Kadar air tanah (%)	Jarak tanam rata-rata (cm)				
	Roda karet sirip karet	Roda baja sirip karet	Roda baja sirip baja	Roda baja tanpa sirip	Roda karet tanpa sirip
30	19.8	22.7	27.3	32.4	33.2
52	20.7	24.7	25.1	27.0	27.7

Tabel 5. Tanah yang lengket pada roda pada tanah kering dan basah

Kadar air tanah (%)	Tanah yang lengket pada roda (gram)				
	Roda karet sirip karet	Roda baja sirip karet	Roda baja sirip baja	Roda baja tanpa sirip	Roda karet tanpa sirip
30.1	12	4	28	3	2
52.4	2373	2798	2608	1274	987

itu. Tingkat luncuran roda penggerak merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja alat penanam. Menurut Hermawan (2012) kemacetan atau luncuran roda penggerak mengakibatkan jarak tanam yang dihasilkan akan bertambah besar. Tingkat luncuran roda yang tinggi akan menambah jarak tanam yang dihasilkan, dari target jarak tanam 20 cm (Tabel 3).Seperti ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 4, pengaruh luncuran roda cukup nyata dengan kecenderungan jarak tanam meningkat secara linier dengan penigkatan tingkat luncuran roda. Hal ini dikarenakan putaran roda secara langsung menentukan putaran piringan penjatah, dan menentukan juga intensitas penjatuhan benihnya.

Tanah yang lengket pada roda penggerak juga akan mempengaruhi kinerja roda penggerak, khususnya pada roda yang bersirip. Pada konsisi tanah basah, jumlah tanah yang lengket pada roda cukup banyak (Tabel 5). Ada kecenderungan tanah yang lengket pada roda karet lebih sedikit dari pada tanah roda baja. Hal ini dikarenakan nilai adhesi karet-tanah (4.78 kPa) lebih kecil dari nilai adhesi baja-tanah (5.97 kPa). Untuk tanah basah, ada kecenderungan bahwa jumlah tanah yang lengket pada roda bersirip lebih banyak dari roda tanpa sirip. Tentu saja dengan semakin banyak tanah yang lengket akan menyulitkan putaran roda, dan juga akan mempengaruhi kinerja penjatahan benihnya.

Hasil evaluasi terhadap roda penggerak (roda bantu) menyimpulkan bahwa satu buah roda tidak mampu menggerakkan sistem penjatah dari dua unit penanam dan dua unit pemupuk. Berdasarkan hasil pengujian Ichniarsyah (2013), sebuah rotor penjatah pupuk dengan panjang 8 cm memerlukan torsi putar 0.54 Nm. Bila panjang rotor dibuat 10 cm, maka kebutuhan torsi bersihnya 0.68 Nm. Bila efisiensi transmisi 50%, maka diperlukan torsi 1.36 Nm per rotor. Bila ada dua unit pemupuk yang digerakkan maka dibutuhkan 2.72 Nm, sehingga semakin sulit dipenuhi oleh torsi roda penggerak, karena harus mengerakkan juga penjatah benih pada dua unit penanam. Selain itu tingkat luncuran roda di atas 20%, dan adanya tanah yang lengket pada roda penggerak membuat sistem penggerak ini tidak efektif menjaga konsistensi putaran penjatah. Sebagai salah satu solusinya, sistem penjatahan pupuk dan benih, semuanya digerakkan oleh putaran poros roda traktor, yang memiliki torsi putar sangat besar dan luncuran rodanya saat pengukuran berkisar 0-3%.

Desain dan Konstruksi Mesin Penanam dan Pemupuk

Desain mesin penanam dan pemupuk hasil rancangan disajikan pada Gambar 5. Rangka didesain sehingga dapat dijadikan landasan dan tempat duduk dari semua komponen mesin. Rangka ini dipasangkan di atas punggung *rotary tiller*.Ada dua unit pemupuk yang dipasangkan pada rangka di sebelah kiri dan di kanan. Berdasarkan ruang yang tersedia di atas tutup rotari dan di kiri kanan stang kemudi traktor, maka volume hoper pupuk yang memungkinkan masing-masing adalah 15 l.

Hoper pupuk dibuka dari sebelah luar, sehingga memudahkan dalam pengisian pupuk. Desain mekanisme penjatahannya disajikan pada Gambar 6. Rotor penjatah pupuk diputar oleh putaran porosnya yang digerakkan oleh putaran poros roda traktor melalui transmisi sproket-rantai.

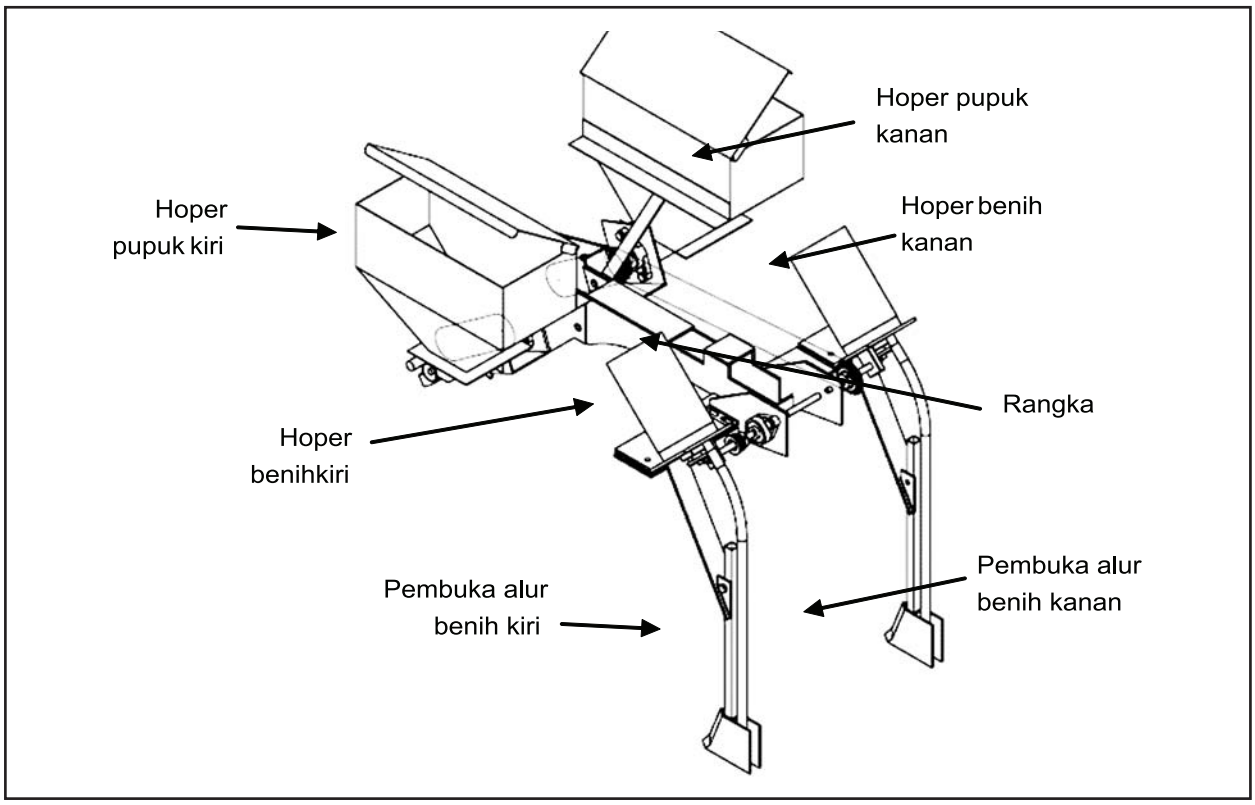
Ada dua unit penanam benih yang ditempatkan di sisi kiri dan kanan. Desainnya disajikan pada Gambar 7. Plat piringan penjatah benih dipasang miring 45°. Plat diputar dengan mekanisme bevel gir dari poros pemutarnya. Poros diputar oleh poros roda traktor melalui mekanisme sproket-rantai (Gambar 8). Saat plat tiputar benih jagung akan masuk ke celah (lubang benih) dan terbawa ke atas lalu dijatuhkan di lubang pengeluaran yang berada di sisi atas.

Hoper pupuk di bagian depan, sementara hoper benih di bagian belakang. Bagian rangka terbuat dari plat baja tebal 6 mm. Hoper pupuk terbuat dari plat *stainless steel* tebal 2 mm. Hoper benih terbuat dari tabung transparan berbahan polyetilen. Sistem penggerak metering device terdiri dari susunan sproket 1 di poros roda traktor, dihubungkan dengan sproket di poros dua dengan rantai. Dari poros dua akan ditransmisikan ke poros penggerak rotor penjatah pupuk (Gambar 8). Lalu dari poros penjatah pupuk akan ditransmisikan dengan rantai ke poros penjatah benih di belakang.

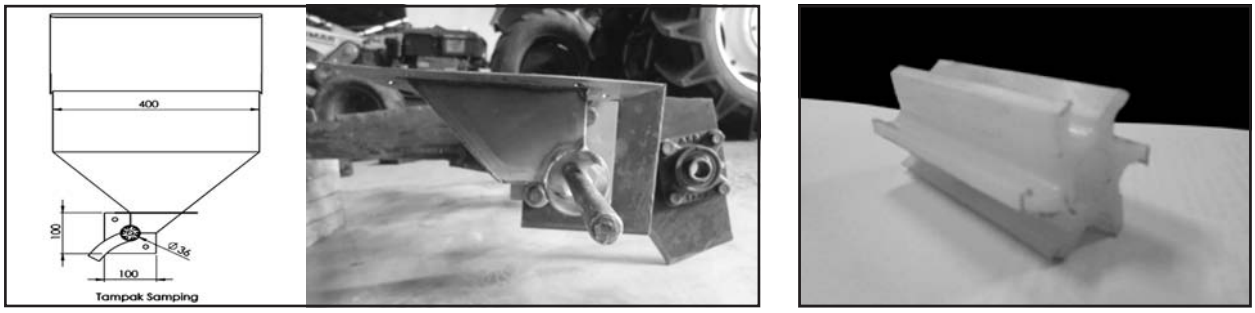
Dengan kecepatan operasi rata-rata hasil pengukuran sebesar

Simpulan

1. Pengolahan tanah minimal (*strip tillage*) dengan *rotary tiller* bisa dilakukan dengan baik bila tanah sudah dibajak, dalam kondisi yang relatif gembur.



Gambar 5. Desain mesin penanam dan pemupuk.



(a) (b)

Gambar 6. Desain dan konstruksi bagian penjatah pupuk (a) dan rotornya (b).

2. Roda penggerak karet bersirip karet memiliki tingkat luncuran yang paling rendah, dan menghasilkan jarak tanam benih yang paling mendekati target.
3. Mesin penanam dan pemupuk jagung terintegrasi dengan pengolahan tanah strip telah berhasil dimodifikasi dan dibuat.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih dan penghargaan disampaikan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi yang telah memberikan dukungan dana penelitian melalui skema Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi – Desentralisasi di IPB tahun 2014.

Daftar Pustaka

Hermawan, W., T. Mandang, dan R.P.A. Setiawan. 2009. Aplikasi Mesin Pengolah Tanah, Penanam dan Pemupuk Terintegrasi untuk Peningkatan Efisiensi dan Produktivitas Jagung. Laporan Akhir Penelitian Strategis Aplikatif – IPB, Bogor.

Hermawan, W. 2012. Perbaikan desain mesin penanam dan pemupuk jagung bertenaga traktor tangan. JTEP Jurnal Keteknikan Pertanian 24(1).

Liljedahl, J.B., P.K. Turnquist, D.W. Smith, and M. Hoki. 1989. Tractors and Their Power Units. Fourth edition. Van Nostrand Reinhold, New York.

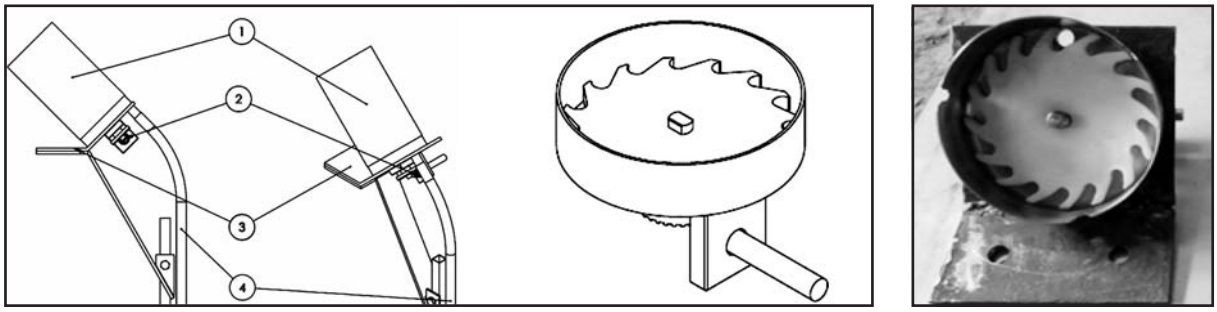
Oida, A. 1992. *Report on Terramechanics, FEM and FFT Analyzer*. JICA-DGHE/IPB PROJECT: JTA-9a(132). Academic Development of the Graduate Program, IPB.

Pitoyo, J. dan N. Sulistyosari. 2006. Alat penanam jagung dan kedelai (*seeder*) untuk permukaan bergelombang. Prosiding Seminar Mekanisasi Pertanian. Balai Besar Pengembangan Mekanisasi Pertanian, Bogor. pp. 75-81.

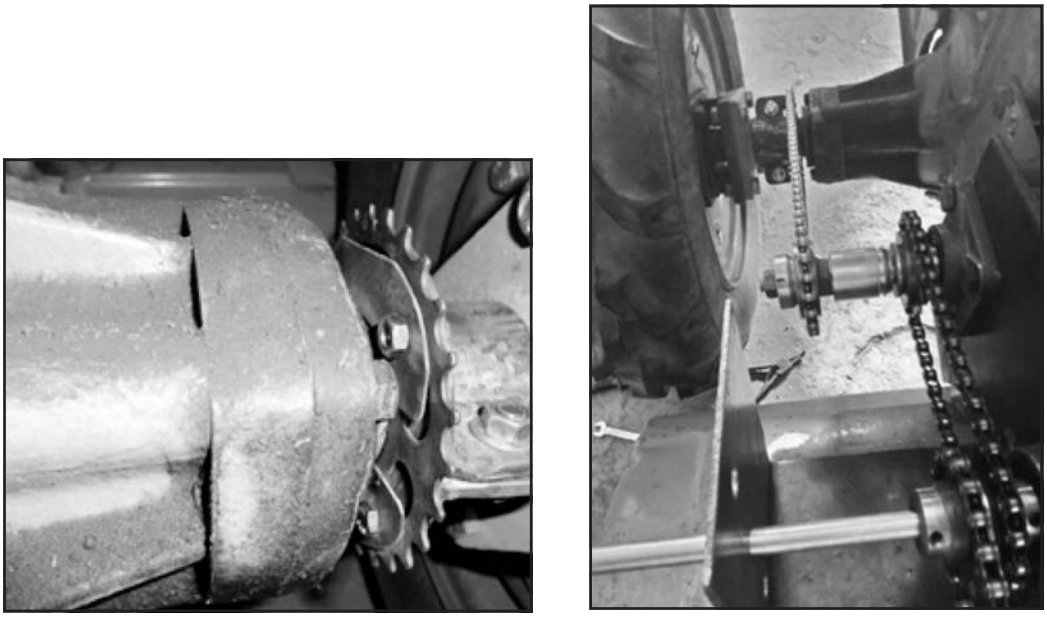
Schreiber, M., H.D. Kutzbach. 2008. *Influence of soil and tire parameters on traction*. RES. AGR. ENG., *54*, 2008 (2): 43–49.

Ichniarsyah, A.N. 2013. Analisis kebutuhan torsi dan desain penjatah pupuk butiran tipe *edge-cell* untuk mesin pemupuk jagung [tesis]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.

Suryana, A., Suyamto, Zubachtirodin, M.S. Pabbage, dan S. Saenong. 2007. Jagung. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Jakarta.



Gambar 7. Desain dan konstruksi mekanisme penjatahan benih.



Gambar 8. Sistem transmisi dari poros roda traktor ke poros 1 dan poros pemutar rotor penjatah pupuk.

Technical Paper

Optimisasi Pemilihan Supplier Susu Murni untuk Produksi Susu Kental Manis dan *Ready To Drink* (Studi Kasus di PT. Frisian Flag Indonesia)

Freshmilk Supplier Selection Optimization for the Production of Sweetened Condensed Milk and Ready To Drink (Case Study at PT. Frisian Flag Indonesia)

Wibowo Setio Laksono, Program Pascasarjana Manajemen dan Bisnis, Institut Pertanian Bogor, email: wibowo8@gmail.com
Amzul Rifin, Departemen Agribisnis, Fakultas Ekonomi dan Manajemen Institut Pertanian Bogor, email: amzul_rifin@yahoo.com
Imam Teguh Saptono, Program Pascasarjana Manajemen dan Bisnis, Institut Pertanian Bogor, email: itsaptono@yahoo.co.id

Abstract

Fresh milk is the raw material in milk processing industries. In fact, the amount of fresh milk tend to decrease every year. PT Frisian Flag Indonesia (FFI) is one of Milk Processing Industries in Indonesia. FFI has 18 fresh milk suppliers which locate in DKI Jakarta, West Java, Central Java and East Java. This scarcity of fresh milk will affect the continuity of production in FFI. The high demands of sweetened condensed milk (SCM) and ready to drink (RTD) products constrain FFI to be selective in choosing suppliers. Due to limited amount of fresh milk supplies, optimization of fresh milk supplies needs to be carried out in order to maintain the business. It was expected that linear programming model could provide an overview of fresh milk allocation from each supplier, therefore the amount of supplier could be maintained. The results showed that FFI required only 14 out of 18 existing suppliers for producing SCM and RTD. FFI needed 30.6 billion rupiah of 31 billion rupiah for allocating fresh milk supplies budget. Post optimal analysis using the sensitivity analysis, we can see the changes in the amount of supply cost, fresh milk supplies, demand level and budget cost to get know about the permitted changes but did not affect the optimal value obtained.

Keywords: *fresh milk, supply, demand, linear programming, sensitivity analysis*

Abstrak

Susu murni merupakan bahan baku dalam industri pengolahan susu (IPS). Kenyataannya, jumlah susu murni selalu mengalami penurunan setiap tahunnya. PT. Frisian Flag (FFI) merupakan salah satu dari IPS yang ada di Indonesia. Jumlah supplier FFI untuk susu murni mencapai 18 supplier yang tersebar di DKI, Jawa Barat, Jawa Tengah dan Jawa Timur. Kelangkaan susu murni ini mempengaruhi kelangsungan produksi di FFI. Permintaan yang tinggi produk susu kental manis (SKM) dan *ready to drink* (RTD) mengharuskan FFI untuk selektif dalam memilih *supplier* yang ada. Dengan keterbatasan jumlah pasokan susu murni, perlu dilakukan optimisasi pengadaan susu murni. Hal ini bertujuan untuk menjaga kelangsungan bisnis perusahaan. Penggunaan model *linear programming* diharapkan mampu memberikan gambaran dalam pengalokasian susu murni dari setiap *supplier* sehingga jumlah pasokan bisa terjaga. Hasil akhir yang didapat dari penghitungan ini adalah dengan 18 *supplier* yang ada, FFI hanya membutuhkan 14 *supplier* untuk memproduksi SKM dan RTD. Selain itu, dengan biaya anggaran pasokan susu murni sebesar Rp 31 milyar per bulan, didapatkan hasil optimal sebesar Rp 30.6 milyar per bulan. Dengan bantuan analisis sensitivitas, perubahan jumlah biaya pasokan, *supply* susu murni, tingkat kebutuhan, dan anggaran biaya dapat dilihat untuk mengetahui perubahan yang diperbolehkan namun tidak mempengaruhi nilai optimal yang didapat.

Kata kunci : susu murni, *supply*, permintaan, *linear programming*, analisis sensitivitas

Diterima: 14 November 2014; Disetujui: 10 Februari 2015

Pendahuluan

Susu merupakan salah satu sumber kebutuhan manusia dalam pemenuhan gizi serta sebagai pelengkap kesempurnaan makanan. Konsumsi susu, khususnya penduduk di Indonesia, setiap tahun mengalami peningkatan. Rata-rata konsumsi susu masyarakat Indonesia pada tahun 2011 sebesar 12.85 liter perkapita per tahun.

Peningkatan konsumsi susu ini membuat permintaan susu murni meningkat. Permintaan yang tinggi ini tidak diimbangi dengan populasi sapi perah sebagai penghasil susu murni. Populasi sapi perah di Indonesia hanya berjumlah 444.221 ekor. Hal ini menyebabkan permintaan susu murni dari segi kuantitas tidak dapat terpenuhi.

Produk olahan susu murni seperti SKM dan RTD merupakan salah satu produk yang banyak dicari oleh masyrakat. Penjualan susu kental manis oleh FFI mencapai 50% dari total penjualan di Indonesia, sedang penjualan RTD sedang mengalami peningkatan yang tinggi pada tahun sekarang. Untuk menghasilkan produk SKM dan RTD, kualitas susu murni menjadi penting. Tanpa kualitas yang baik produk susu yang dihasilkan tidak berkualitas.

Pemilihan dan perencanaan yang tepat harus dilihat dari berbagai aspek. Konsep *supply chain management* (SCM) dapat digunakan untuk memperoleh sistem yang efisien dan efektif. Hal ini karena SCM memiliki konsep dasar yaitu mengatur aliran barang secara vertikal untuk memenuhi permintaan barang dan jasa. Marimin, *et al* (2013) menjelaskan bahwa SCM merupakan serangkaian pendekatan yang diterapkan untuk mengintegrasikan pemasok, pengusaha, gudang dan tempat penyimpanan lainnya secara efisien sehingga produk yang dihasilkan dapat didistribusikan dengan kuantitas, tempat dan waktu yang tepat untuk memperkecil biaya namun tetap memuaskan pelanggan. Optimisasi terkait dengan bahan baku perlu dilakukan untuk menghindari atau mengurangi terjadinya kegagalan berbisnis.

Berdasarkan uraian tersebut, optimisasi pemilihan *supplier* susu murni sangat dibutuhkan. Hal ini digunakan untuk menjaga kelangsungan pasokan susu murni untuk memproduksi SKM dan RTD. Dengan mengetahui supplier yang harus dipilih, FFI dapat membuat kebij untuk mengantisipasi keterbatasan jumlah pasokan susu murni. Hal ini nantinya berguna bagi FFI maupun peternak.

Bahan dan Metode

Koperasi dan peternak yang dijadikan objek penelitian adalah peternak dan koperasi yang berada di DKI, Jawa Barat, Jawa Tengah dan Jawa Timur. Pemilihan lokasi tersebut berdasarkan tingkat frekuensi pengiriman ke FFI dan pemasok yang masih aktif mengirimkan susu murninya. Adapun koperasi dan peternak tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Model yang digunakan adalah program linear. Dimana model ini sangat cocok untuk mengatasi permasalahan alokasi dengan *supply* terbatas. Model ini dapat digunakan untuk menentukan jumlah alokasi pasokan dari setiap pemasok. Model ini dibangun meliputi fungsi obyektif dan batasan-batasan. Formulasi model merujuk pada Wouda (2002). Obyektif yang digunakan dalam model ini adalah minimisasi biaya pasokan susu (Z). Di mana model matematik untuk obyektif tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Min\ Z = A(C_1X_1 + C_2X_2 + \ldots + C_{18}X_{18}) + B(C_{19}X_{19} + C_{20}X_{20} + \ldots + C_{36}X_{36}) \quad (1)$$

Dengan kendala :

$$A(\sum_{1}^{18} X_i) + B(\sum_{19}^{36} X_i) \leq \sum_{1}^{36} S_i(1 - \%r_i) \quad (2)$$

$$A(\sum_{1}^{18} C_iX_i) + B(\sum_{19}^{36} C_iX_i) \leq C \quad (3)$$

$$A(\sum_{1}^{18} X_i) \geq Da \quad (4)$$

$$B(\sum_{19}^{36} X_i) \geq Db \quad (5)$$

$$\sum_{1}^{36} X_i > 0 \quad (6)$$

Indikator untuk susu kental manis ditandai dengan huruf A, sedang untuk RTD ditandai dengan huruf B. Jumlah variable sebanyak 36 variable berasal dari jumlah supplier yang ada. Variable yang ada dilambangkan dengan huruf X. Nilai *demand* dari susu murni dilambangkan dengan huruf D. Permintaan susu murni ini dibedakan untuk susu kental manis dan RTD, sehingga permintaan susu murni untuk susu kental manis dilambangkan dengan Da dan RTD dengan Db. Tingkat kemampuan *supply* dari setiap supplier dilambangkan dengan huruf S. Jumlah *supply* susu murni ini akan dipengaruhi pula oleh tingkat penolakan atau kualitas dari susu murni. Tingkat penolakan terhadap kualitas dilambangkan dengan huruf r_i.

Obyektif yang dicapai dituliskan dalam persamaan (1) yaitu minimisasi biaya pasokan susu. Biaya pasokan dihitung untuk setiap Rp/liter susu murni dari setiap pemasok. Kendala atau batasan dalam model ini terdiri dari beberapa kendala.

Kendala pertama dalam persamaan (2) adalah kemampuan para pemasok susu murni dalam mensuplai susu murni terhadap kebutuhan FFI. Jumlah *supply* dari setiap pemasok dilihat dalam liter. *Supply* susu murni yang dikirimkan tidak

Tabel 1. Daftar pemasok susu murni sebagai objek penelitian.

No	Pemasok / *Supplier*	Daerah	Tipe
1	KSP Sejahtera	Boyongbong, Garut	Koperasi
2	KUD Rukun Sentosa	Blitar	Koperasi
3	GKSI Lembang	Lembang	Koperasi
4	KPBS Pangalengan	Pangalengan	Koperasi
5	CV Sumber Alam Jaya	Pondok Rangon	Koperasi
6	CV. Lembah Kemuning	Kuningan	Koperasi
7	KPPC Sinar Mulya	Parongpong	Koperasi
8	KOP Bangun Lestari	Tulung Agung	Koperasi
9	Jampang Dairy Farm	Parung	Peternak
10	KUD Sarwa Mukti	Cisarua	Koperasi
11	KPRI KOKARNABA	Baturaden	Koperasi
12	Koperasi Pesat	Banyumas	Koperasi
13	KUD Mojosongo	Boyolali	Koperasi
14	KSU Mitra Jaya Mandiri	Ciwidey	Koperasi
15	KUD. Makmur Sukabumi	Sukabumi	Koperasi
16	CV. Tujuh Mutiara Sejahtera	Jakarta	Peternak
17	CV. Kemayoran Machinery	Jakarta	Peternak
18	Erif Farm	Cisarua	Peternak

boleh melebihi jumlah *supply* di tempat pemasok. Kendala kedua yang terlihat dari persamaan (3) yaitu ketersediaan anggaran yang dialokasikan untuk pengadaan susu murni. Batasan anggaran ini disesuaikan berdasarkan kebij perusahaan. Kendala ketiga berdasarkan persamaan (4) dan (5) adalah kebutuhan jumlah pasokan susu murni untuk produk SKM dan RTD. Kebutuhan susu murni FFI ini dilihat dalam liter. Dan kendala keempat adalah kualitas susu murni dari setiap pemasok. Kualitas susu murni setiap pemasok setiap bulannya digunakan sebagai data untuk melihat kualitas setiap pemasok. Kualitas susu murni dilihat berdasarkan tingkatan pencapaiannya sesuai dengan spesifikasi dari FFI. Batasan kualitas ini berhubungan erat dengan kendala pertama yaitu kemampuan *supply* dari setiap pemasok. Hal ini dikaren jumlah penol akibat ketidaksesuaian dengan kualitas yang ada mempengaruhi jumlah *supply* yang dikirim ke FFI. Sehingga batasan kualitas dimasukkan kedalam persamaan (2).

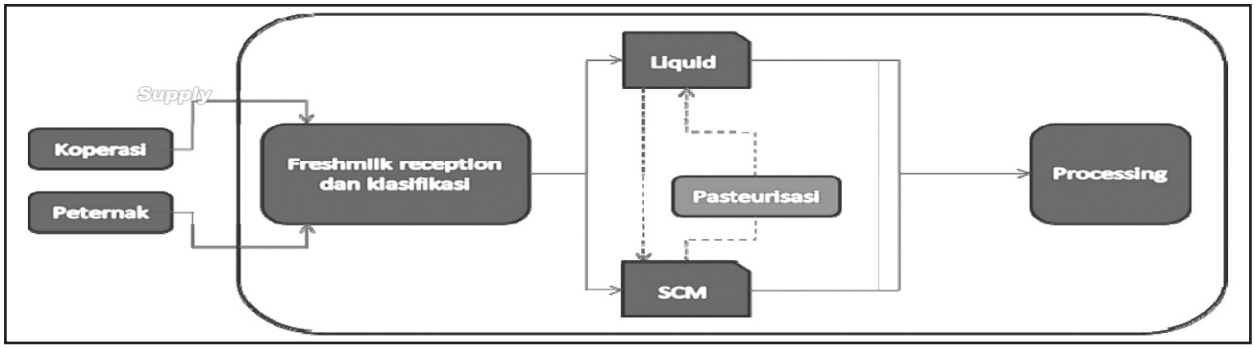
Hal selanjutnya yang dilakukan adalah menyelesaikan persamaan dan melakukan analisis sensitivitas. Analisis ini dilakukan setelah solusi optimal didapatkan. Analisis sensitivitas dilakukan untuk melihat berapa besar perubahan yang masih dapat ditolerir sebelum solusi optimal mulai kehilangan optimalitasnya (Siringoringo, 2005). Parameter yang dianalisis adalah koefisien variable fungsi tujuan dan fungsi kendala.

Hasil dan Pembahasan

Alur Pasokan Susu Murni dari Supplier ke FFI

Susu murni yang dikirimkan ke FFI berasal dari dua jenis supplier, yaitu peternak dan koperasi. Supplier yang ada mengirimkan susu murninya sesuai dengan permintaan FFI. Pengiriman susu murni ini dalam satu bulan bisa beberapa kali, sesuai dengan jumlah yang diminta.

Susu murni yang diterima oleh FFI dibed peruntukannya. Susu murni yang berasal dari koperasi Sejahtera, Rukun Sentosa, Lembang dan Pangalengan khusus digunakan untuk memproduksi RTD. Sedang sisanya dapat digunakan untuk RTD dengan syarat terdapat proses pasteurisasi terlebih dahulu. Alur pasokan susu murni di FFI dapat dilihat pada Gambar 1.

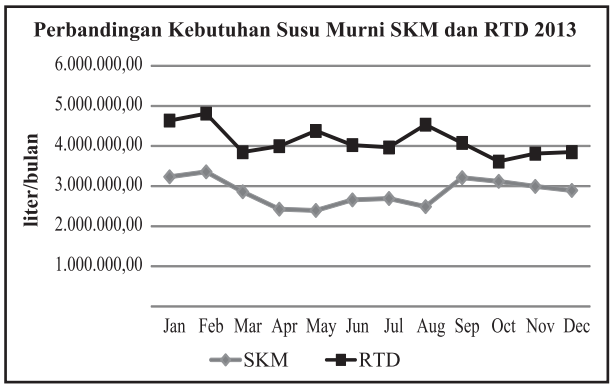


Gambar 1. Alur pasokan susu murni FFI.

Kebutuhan Susu Murni untuk Memproduksi SKM dan RTD

Kebutuhan susu murni di FFI sangat tinggi. Pada tahun 2013 kebutuhan susu murni mencapai 6.9 Juta liter per bulan. Kebutuhan tersebut digunakan untuk memproduksi susu kental manis dan RTD. Kebutuhan susu kental manis lebih rendah dibandingkan dengan susu RTD. Kebutuhan susu kental manis hanya sebesar 40.93% sedangkan RTD mencapai 59.07%. Konsumsi susu murni untuk RTD mencapai 4,1 juta liter per bulan, sedang untuk susu kental manis hanya sekitar 2.8 juta liter per bulan. Pada Gambar 2 dapat dilihat tingkat kebutuhan susu murni.

Jumlah kebutuhan susu murni dilihat dari *sales forecast* yang didapat setiap bulannya dari team sales. Data yang didapat berasal dari semua wilayah yang ada di Indonesia. Jumlah susu yang diminta tersebut dibed sesuai dengan jenisnya. Berdasarkan data tersebut, kebutuhan susu murni dihitung. Studi terdahulu yang dilakukan oleh Zuo, (1996) memperlihatkan bahwa salah satu yang mempengaruhi tingginya permintaan susu adalah kondisi demografi suatu wilayah.



Gambar 2. Jumlah kebutuhan susu murni untuk SKM dan RTD.

Kemampuan *Supply* Susu Murni dari Setiap Supplier

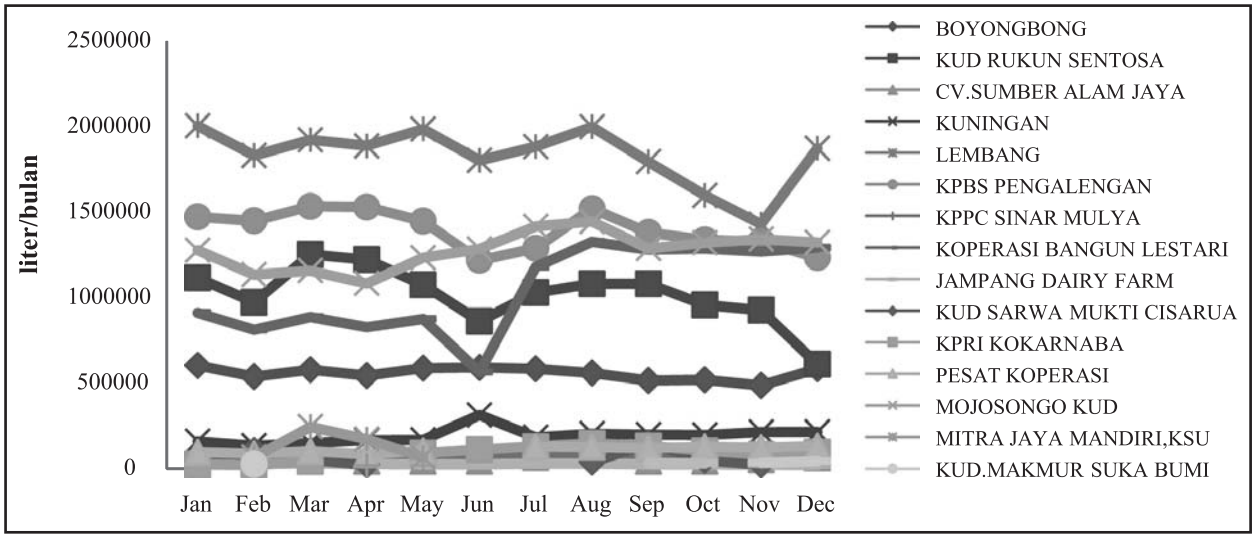
Pasokan susu murni yang terbatas menjadi kendala bagi FFI. Jumlah pemasok susu murni sebanyak 18 supplier tidak hanya men*supply* untuk FFI saja, namun untuk Industri Pengolahan Susu (IPS) yang ada di Indonesia. Sebagian besar supplier tersebut dikategorikan sebagai koperasi (14 supplier) dan hanya sebanyak 4 supplier yang dikategorikan sebagai peternak individu. Sebanyak 55.55% supplier berada di area Jawa barat dan sisanya berada di DKI Jakarta (16.67%), Jawa Tengah (16.67%), dan Jawa Timur (11.11%). Jumlah susu murni yang dapat di *supply* oleh 18 supplier sebesar 7.7 juta liter per bulan. Jumlah *supply* susu murni dari setiap supplier dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sapi jenis Brown Swiss memiliki tingkat produktivitas perhari lebih rendah daripada Friesian Holstein sebesar 9%. Namun komposisi protein dan casein lebih baik daripada Friesian Holstein (De Marchi, *et al.,* 2008).

Perhitungan kemampuan *supply* dari setiap supplier susu murni dihitung berdasarkan rata-rata jumlah pengiriman yang dilakukan ke FFI. Data yang diambil untuk menentukan jumlah *supply* susu murni diambil selama tahun 2013. Berdasarkan rata-rata ini, dapat dilihat trend *supply* susu murni yang ada di FFI dari setiap supplier.

Berdasarkan tren *supply* susu murni, didapatkan beberapa waktu, angka *supply* dari setiap supplier melebihi angka rata-rata yang didapat. Angka yang berada diatas rata-rata ini, dapat dijadikan tolak ukur bahwa kemampuan *supply* susu murni dari supplier masih dapat ditingkatkan hingga ke angka tersebut.

Kualitas Susu Murni dari Setiap Supplier

Kualitas dari setiap supplier susu murni berbeda-beda. Kualitas susu murni dilihat dari beberapa aspek. Aspek mikrobiologi dan kimia merupakan



Gambar 3. Jumlah *supply* susu murni.

parameter yang dijadikan acuan baik atau tidaknya susu murni. Persentase penyimpangan susu murni mempengaruhi jumlah *supply* yang dikirimkan ke FFI. Persentase penyimpangan susu murni tertinggi sesuai dengan standar. penerimaan FFI berasal dari daerah Jawa Timur. Persentase penyimpangan mencapai 1.82% dari total pengiriman susu murni yang dilakukan ke FFI. Sedangkan daerah Jawa Barat menduduki urutan kedua terkait dengan penyimpangan susu murni mencapai 0.86%, diikuti Jawa Tengah 0.35% dan DKI Jakarta 0.02%. Perbandingan kondisi kualitas dari setiap daerah dapat dilihat pada Gambar 4.

Biaya Anggaran dan Pasokan Susu Murni

Biaya pasokan susu murni ini berbeda-beda untuk setiap supplier baik koperasi maupun peternak. Biaya yang dihitung adalah biaya per liter. Beberapa hal yang mempengaruhi dan menentukan besar atau kecil biaya pasokan susu murni adalah kualitas, kuantitas, tingkat inflasi, dan biaya proses produksi. Biaya pasokan per daerah dapat dilihat pada Gambar 5.

Jawa Timur memiliki biaya per liter lebih besar daripada daerah yang lain. Hal ini dapat disebabkan karena jarak *supply* susu murni dan waktu tempuh yang cukup lama dibandingkan dengan daerah yang lain. Biaya transportasi menjadi salah satu penentu tingginya harga per liter. Sedang untuk daerah DKI, memiliki harga per liter terbesar kedua setelah Jawa Timur. Walaupun jarak tempuh jauh lebih dekat bila dibandingkan dengan Jawa Timur, namun karena kuantitas yang dapat di*supply* hanya sebesar 19 ribu liter per bulan membuat harga yang diberikan menjadi lebih besar, jauh dibandingkan dengan *supply* yang dapat diberikan oleh daerah Jawa Timur (1 juta liter per bulan). Hal ini sesuai dengan konsep *supply* dan *demand* dalam ilmu ekonomi. Besanko and Braeutigam (2010) menjelaskan terkait dengan empat dasar hukum dari *supply* dan *demand*,

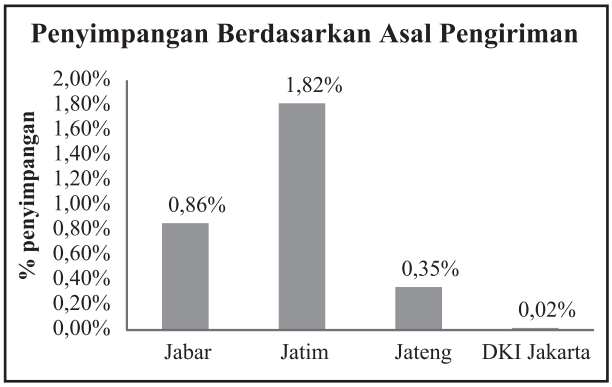
1. Jika *demand* meningkat (kurva *demand* bergerak ke kanan) dan *supply* tidak berubah, shortage muncul dan harga berada diatas titik keseimbangan.
2. Jika *demand* menurun (kurva *demand* bergerak ke kiri) dan *supply* tidak tidak berubah, surplus muncul dan harga berada dibawah titik keseimbangan.
3. Jika *demand* tidak berubah dan *supply* meningkat (kurva *supply* bergerak ke kanan), surplus muncul dan harga berada dibawah titik keseimbangan.
4. Jika *demand* tidak berubah dan *supply* menurun (kurva *supply* bergerak ke kiri), shortage muncul dan harga berada diatas titik keseimbangan.

Selain hal tersebut, supplier melihat kontrak yang diberikan untuk menentukan harga *supply* susu murni. Frank and Hauser (2012) menjelaskan bahwa supplier susu murni ketika mengirimkan susu murni yang dihasilkannya kepada IPS, tidak hanya melihat harga yang diberikan oleh pihak IPS, namun kejelesan kontrak yang diberikan menjadi salah satu pertimbangan.

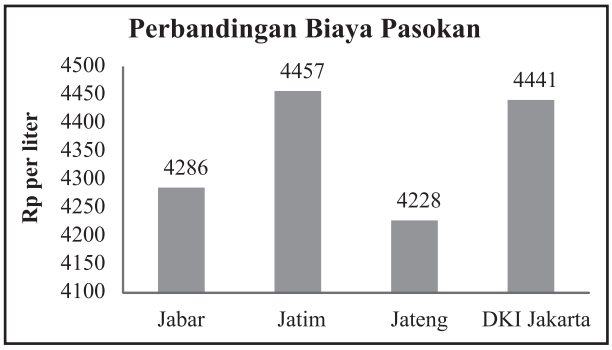
Penentuan Solusi Optimal dalam Penentuan Supplier

Berdasarkan data – data kebutuhan dan jumlah *supply* susu murni yang ada, dapat dibuatkan sebuah simulasi untuk mengoptimalkan pengadaan susu murni. Metode yang digunakan dalam mencarikan solusi optimal dengan menggunakan linear programming (LP) yang telah dirumuskan sebelumnya**.** *Lot sizing* dan pemilihan *vendor* merupakan hal yang sangat penting dan krusial bagi kegiatan SCM (Jonnavithula, 2010). Salah satu hal terpenting dalam organisasi saat ini adalah evaluasi, pemilihan dan peningkatan supplier (Gilaninia, *et al.*, 2012). Simulasi model digunakan sebagai salinan struktur sistem dengan bantuan sistem komputer, secara spesifik ditujukan untuk mendapatkan metode investigasi sistem, pendukung pengambilan keputusan dan alat untuk perumusan hipotesa (Vegnerova, 2008).

Higle dan Wallace (2003) menyatakan bahwa linear programming telah memiliki peran penting sebagai alat untuk memecahkan masalah dan alat analisis. Biaya pengadaan susu murni yang dipengaruhi oleh jumlah *supply* dari setiap supplier dicarikan solusi optimalnya dengan menggunakan LINDO (*Linear, Interactive and Discrete Optimizer*).



Gambar 4. Persentase penyimpangan susu murni.



Gambar 5. Biaya pasokan setiap daerah.

Tabel 2. Kondisi optimal alokasi susu murni SKM dan RTD.

No	Koperasi	Kemampuan *Supply* (l/bulan)	Kondisi Optimal SKM (l/bulan)	Kondisi Optimal RTD (l/bulan)
1	BOYONGBONG	532.997	0	185.035
2	KUD RUKUN SENTOSA	902.645	133.229	769.416
3	LEMBANG	1.816.789	0	1.816.788
4	KPBS PENGALENGAN	1.357.774	0	1.357.774
5	CV.SUMBER ALAM JAYA	38.337	0	0
6	KUNINGAN	169.954	169.954	0
7	KPPC SINAR MULYA	63.548	0	0
8	KOPERASI BANGUN LESTARI	983.208	983.207	0
9	JAMPANG DAIRY FARM	10.420	10.420	0
10	KUD SARWA MUKTI CISARUA	20.306	20.306	0
11	KPRI KOKARNABA	70.158	70.158	0
12	PESAT KOPERASI	97.591	97.590	0
13	MOJOSONGO KUD	1.237.661	1.237.661	0
14	MITRA JAYA MANDIRI,KSU	123.415	123.415	0
15	KUD.MAKMUR SUKA BUMI	12.830	12.830	0
16	TUJUHMUTIARASEJAHTERA, CV	2.340	2.340	0
17	KEMAYORAN MACHINERY.CV	17.490	0	0
18	ERIF FARM	23.730	0	0

Sumber : Hasil penghitungan LINDO

Hasil analisis menunjukkan bahwa, untuk memenuhi kebutuhan susu murni SKM dan RTD diperlukan 14 supplier dari 18 supplier yang ada. Empat supplier yang tidak diterima adalah CV Sumber Alam Jaya, KCP Sinar Mulya, CV Kemayoran Machinery dan Erif Farm. Nilai optimal yang didapat dengan memilih 14 supplier tersebut, biaya pasokan susu murni optimal pada nilai Rp.30.6 milyar, dengan biaya anggaran sebesar Rp. 31 milyar per bulan. Jumlah perbandingan susu murni yang harus diterima dengan jumlah pasokan setiap koperasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Analisis Sensitifitas

Parmar dan Keshari (2012) menjelaskan bahwa analisis sensitifitas merupakan teknik yang digunakan untuk mengassess efek dari ketidakpastian dalam parameter model terhadap parameter output. Analisis sensitifitas melihat seberapa besar tingkat perubahan biaya pasokan susu murni yang bisa ditingkatkan dan diturunkan. Biaya pasokan susu murni untuk produk SKM masih dapat dinaikkan dengan kisaran Rp. 14 – 30 per liter susu murni. Supplier tersebut adalah Koperasi Bangun Lestari, Jampang Dairy, KUD Sarwa Mukti, KPRI Kokarnaba, Pesat Koperasi, KUD Mojosongo, Mitra Jaya Mandiri KSU, KUD Makmur Sukabumi dan CV Tujuh Mutiara Sejahtera. Susu murni produk RTD, tidak dianjurkan untuk ditingkatkan biaya pasokan susu murninya, karena tidak berpengaruh terhadap nilai optimal. Nilai sensitifitas dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4.

Simpulan

Minimisasi biaya pasokan susu murni di FFI, dapat dilakukan dengan pemilihan supplier. Hasil analisis menunjukkan bahwa untuk mendapatkan hasil optimal dibutuhkan 14 dari 18 supplier. Supplier yang tidak dipilih adalah CV Sumber Alam Jaya, KCP Sinar Mulya, CV Kemayoran Machinery dan Erif Farm. Hasil optimal yang dapat dicapai, sesuai dengan perhitungan sebesar Rp. 30.6 milyar per bulan. Alokasi pengadaan susu murni untuk produk SKM berbeda dengan RTD. Supplier yang dipilih untuk memproduksi SKM berasal dari 11 supplier, namun untuk RTD hanya dari 4 supplier. KUD Rukun Sentosa merupakan satu-satunya supplier yang dipilih untuk produk SKM maupun RTD.

Daftar Pustaka

Besanko, D., dan R. Braeutigam. 2010. Microeconomics 4th edition. USA: John Wiley and Son Inc.

De Marchi, M., G. Bittante, R. Dal Zotto, C. Dalvit, M. Cassandro. 2008. Effect of holstein friesian and brown Swiss breed on quality of milk and cheese. J. Dairy Sci. 91, 4092-4102.

Frank, J., dan S. Hauser. 2012. Milk prices in

Tabel 3. Analisis sensitifitas produk SKM..

Supplier	Curr Cost (Rp/ltr)	Jumlah peningkatan (Rp/ltr)	Jumlah penurunan (Rp/ltr)	Supply Aktual (ltr/bln)	Jumlah peningkatan (ltr/bln)	Jumlah penurunan (ltr/bln)
BOYONGBONG	4.468	∞	0	53.997	∞	347.962
KUD RUKUN SENTOSA	4.461	0	0	902.645	185.035	347.962
LEMBANG	4.468	∞	0	1.816.789	185.035	347.962
KPBS PENGALENGAN	4.274	∞	0	1.357.774	185.035	347.962
CV.SUMBER ALAM JAYA	4.482	∞	14	38.337	∞	38.336
KUNINGAN	4.468	0	∞	169.954	133.229	169.954
KPPC SINAR MULYA	4.481	∞	13	63.548	∞	63.547
KOPERASI BANGUN LESTARI	4.454	14	∞	983.208	133.229	347.692
JAMPANG DAIRY FARM	3.890	29	∞	10.42	133.229	10.420
KUD SARWA MUKTI CISARUA	3.824	30	∞	20.306	133.229	20.306
KPRI KOKARNABA	3.991	30	∞	7.158	133.229	70.158
PESAT KOPERASI	4.389	29	∞	97.591	133.229	97.590
MOJOSONGO KUD	4.305	29	∞	1.237.661	133.229	347.692
MITRA JAYA MANDIRI,KSU	4.007	29	∞	123.411	133.229	123.415
KUD.MAKMUR SUKA BUMI	3.967	29	∞	12.830	133.229	12.830
TUJUH MUTIARA SEJAHTERA	4.274	29	∞	2.340	133.229	2.340
KEMAYORAN MACHINERY.CV	4.569	∞	101	17.490	∞	17.490
ERIF FARM	5.018	∞	550	23.730	∞	23.730

Tabel 4. Analisis sensitifitas produk RTD.

Supplier	Curr Cost (Rp/ltr)	Jumlah peningkatan (Rp/ltr)	Jumlah penurunan (Rp/ltr)	Supply Aktual (ltr/bln)	Jumlah peningkatan (ltr/bln)	Jumlah penurunan (ltr/bln)
BOYONGBONG	4.468	0	0	532.997	0	∞
KUD RUKUN SENTOSA	4.461	0	0	902.645	133.229	∞
LEMBANG	4.468	0	∞	1.816.789	0	∞
KPBS PENGALENGAN	4.274	0	∞	1.357.774	0	∞
CV.SUMBER ALAM JAYA	4.511	∞	43	38.337	0	∞
KUNINGAN	4.497	∞	29	169.954	169.954	∞
KPPC SINAR MULYA	4.510	∞	42	63.548	0	∞
KOPERASI BANGUN LESTARI	4.483	∞	29	983.208	983.207	∞
JAMPANG DAIRY FARM	3.919	∞	29	10.420	10.420	∞
KUD SARWA MUKTI CISARUA	3.854	∞	30	20.306	20.306	∞
KPRI KOKARNABA	4.021	∞	30	70.158	70.158	∞
PESAT KOPERASI	4.418	∞	29	97.591	97.590	∞
MOJOSONGO KUD	4.334	∞	29	1.237.661	1.237.661	∞
MITRA JAYA MANDIRI,KSU	4.036	∞	29	123.411	23.411	∞
KUD.MAKMUR SUKA BUMI	3.996	∞	29	12.830	12.830	∞
TUJUH MUTIARA SEJAHTERA	4.303	∞	29	2.340	2.340	∞
KEMAYORAN MACHINERY.CV	4.598	∞	130	17.490	0	∞
ERIF FARM	5.047	∞	579	23.730	0	∞

deregulated market. British Food Journal 114(1), 121-142.

Gilaninia, S., S.J. Mousavian, L. Masoomi, M.S. Arjmandi, S. Abaszadeh, F.Z. Seighalani. 2012. Supplier selected to optimize the supply chain through combination of A,B,C. J.Basic.Appl.Sci. Res 2(3), 3081-3093.

Higle, J., dan S. Wallace. 2003. Sensitivity analysis and uncertainty in linear programming. Interface Informs 33 (4), 53-60.

Jonnavithula, C. 2010. The multi period multi item lot sizing problem with vendor selection. Thesis. Illinois: Northern Illinois University.

Marimin, D. Taufik, Suharjito, H. Syarif, N. Ditdit, A. Retno, 2013. Teknik dan Analisis Pengambilan Keputusan Fuzzy dalam Manajemen Rantai Pasok. Bogor: IPB Press.

Pamar, D., dan A. Keshari. 2012. Sensitivity Analysis of Water Quality for Delhi Strecth of the River Yamuna India. *Springer Science and Business Media*, 1487-1508.

Siringoringo, H. 2005. Seri Teknik Riset Operasional : Pemrograman Linier. Yogyakarta: Graha Ilmu.

Vegnerova, P. 2008. Stock control in automotive industry with simulation utilization. Vizja-Kwartalnik 008 (4), 107-112.

Wouda, F. H., van Beek, P., van der Vorst, J., Tacke, H. 2002. An application of mixed integer linear programming models on redesign of the supply network of nutricia dairy and drink group in Hungary. OR Spectrum 24, 449-465.

Zuo, J. 1996. Health information, consumer participation and market demand: the case of freshmilk in the United States. (Dissertation) Ohio: Ohio State University.

Technical Paper

Analisis Perubahan Kualitas Pascapanen Pepaya Varietas IPB9 pada Umur Petik yang Berbeda

Analysis of Postharvest Quality Changes of Papaya cv. IPB9 at Different Picking Date

Nur Arifiya, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Email: pipiya27@gmail.com
Y. Aris Purwanto, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Email: arispurwanto@gmail.com
I Wayan Budiastra, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Email: wbudiastra@yahoo.com

Abstract

Papaya is generally harvested at condition of hard green mature. The maturity level depends on the market destination. Understanding the maturity level and its postharvest quality changes of papaya during storage is important in order to determine the market destination. The objective of this study was to investigate the effect of different picking date on the postharvest quality and shelf life of papaya cv. IPB9 during storage period. Sample of papaya fruits were harvested at 135, 131, 128, 121 and 114 days after anthesis. After harvesting, papaya fruits were ripened artificially by injecting 50ppm of ethylene during 24 hand then were placed in the room temperature. The results showed that picking date of 128 has the highest starch content. After ripening, this papaya fruit has soluble solid content (SSC) of 6.7^{o}Brix. For those papaya fruits with picking date of 135 and 131 have SSC of 8.3^{o}Brix dan 7.5^{o}Brix *at four days storage. Papaya fruit with picking days of 128 has the longest shelf life until six days. The shortest shelf life was papaya fruits with picking date of 131 and 135 until four days. These picking date of 114 and 121 showed the lowest SSC. It could be concluded that for papaya fruit cv IPB9, the picking date of 128 was the most suitable for long distance market.*

Keywords : *picking date, papaya cv. IPB9, starch content, storage, shelf life*

Abstrak

Pepaya biasanya dipanen pada kondisi masih hijau tetapi sudah tua. Tingkat ketuaan pepaya yang dipanen tergantung dari tujuan pasar. Pengetahuan tentang tingkat ketuaan panen pepaya dan pengaruhnya terhadap perubahan kualitas pasca panen selama penyimpanan sangat penting untuk diketahui dalam kaitannya dengan tujuan pasar. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh umur petik pepaya varietas IPB9 terhadap perubahan kualitas dan masa simpannya. Sampel buah pepaya dipanen pada tingkat ketuaan yang dinyatakan dalam hari setelah pembungaan, yaitu 135, 131, 128, 121 dan 114. Setelah dipanen, pepaya diperam dalam alat pemeram buatan dengan perlakuan penambahan gas etilen 50 ppm selama 24 jam. Setelah proses pemeraman, sampel buah pepaya diletakkan di suhu ruang. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa buah pepaya yang dipanen pada hari ke 128 mempunyai kandungan pati tertinggi. Setelah proses pemeraman, umur petik 128 hari mempunyai kadar total padatan terlarut sebesar 6.7^{o}Brix. Sementara untuk pepaya dengan umur petik 135 dan 131 menunjukkan kandungan total padatan terlarut sebesar 8.3^{o}Brix dan 7.5^{o}Brix pada hari penyimpanan keempat. Untuk umur simpan, pepaya yang dipetik pada umur 128 mempunyai umur simpan yang paling lama selama enam hari, sedangkan pepaya pada umur petik 131 dan 135 hari mempunyai umur simpan yang terpendek selama empat hari. Pepaya yang dipetik pada hari ke 114 dan 121 menunjukkan kandungan total padatan terlarut terendah. Dapat disimpulkan bahwa pepaya dengan umur petik 128 hari sesuai untuk tujuan pemasaran jarak jauh karena mempunyai umur simpan yang paling lama.

Kata Kunci : umur petik, pepaya varietas IPB9, kandungan pati, penyimpanan, umur simpan

Diterima: 27 November 2014; Disetujui: 19 Februari 2015

Pendahuluan

Pepaya merupakan salah satu buah tropis yang banyak dikonsumsi oleh masyarakat. Pepaya banyak tersedia di pasaran dengan harga yang relatif terjangkau. Umumnya pepaya dikonsumsi dalam bentuk pepaya matang segar karena banyak mengandung vitamin C dan vitamin A (Ahamed dan Choundhary 1995; Tirkey et al. 2014). Beberapa tahun terakhir, sebagai akibat dari berkembangnya kawasan perdagangan bebas, banyak jenis pepaya impor masuk ke pasar lokal dengan kualitas yang jauh lebih unggul. Untuk menyaingi buah pepaya impor, Institut Pertanian Bogor telah mengembangkan varietas pepaya IPB9 yang dikenal dengan nama pasar pepaya Calina. Varietas ini telah dikenal oleh masyarakat dan sudah banyak dikembangkan untuk mengisi pasar domestik dan mempunyai peluang untuk diekspor.

Umumnya pepaya dipanen pada kondisi hijau tetapi sudah tua, tingkat ketuaan ini sangat dipengaruhi oleh tujuan pemasarannya. Karena pepaya termasuk buah tropis klimakterik maka masa simpannya dapat diperpanjang dengan cara menyimpannya pada kondisi hijau tetapi sudah tua. Pepaya yang dipanen pada kondisi yang sudah mendekati matang biasanya ditujukan untuk pasar lokal, sementara untuk pasar yang jauh, pepaya dipanen pada kondisi yang masih hijau tua. Tingkat ketuaan ini sangat berbeda untuk tiap varietas pepaya. Untuk itu, penentuan tingkat ketuaan pepaya untuk tiap varietas pepaya perlu diketahui untuk penentuan indeks panen yang tepat dalam rangka perencanaan tujuan pasar, sebagai data dasar untuk perancangan fasilitas penyimpanan dan transportasi jarak jauh. Pepaya varietas IPB9 sebagai varietas yang baru dikembangkan, masih sedikit data pascapanen yang dapat dijadikan referensi untuk penentuan waktu panen yang tepat dalam kaitannya dengan tujuan pasar. Untuk itu, penelitian yang terkait dengan data teknis pascapanen dari varietas IPB9 masih sangat diperlukan.

Tingkat ketuaan optimum pepaya yang dipanen sangat diperlukan untuk keperluan pemasaran agar diperoleh buah pepaya dengan kualitas yang baik. Buah pepaya yang dipanen pada kondisi belum tua akan menghasilkan buah matang dengan kualitas yang tidak optimum. Sementara untuk buah pepaya yang dipanen pada kondisi sudah mulai matang akan berakibat pendeknya periode pemasarannya. Buah pepaya yang dipanen pada kondisi ketuaan yang optimum akan menghasilkan buah pepaya dengan kualitas yang optimum (Peirs et al. 2000). Buah pepaya yang bersifat klimakterik berpotensi untuk disimpan dalam jangka waktu yang panjang pada kondisi masih hijau tetapi sudah tua. Ini adalah cara yang digunakan oleh pelaku agribisnis pepaya untuk proses pemasaran jarak jauh. Kualitas buah klimakterik sangat tergantung dari ketepatan waktu panen dan cara penyimpanannya (Bertone et al. 2012). Jika tingkat ketuaan buah dapat diprediksi dengan tepat sebelum proses pemanenan maka akan mempermudah para pelaku agribisnis pepaya dalam mengatur tujuan pemasarannya.

Tingkat ketuaan buah biasanya ditentukan berdasarkan kecenderungan klimakterik, hari setelah berbunga, kenampakan luar seperti bentuk buah dan warna kulit yang semuanya ditentukan oleh pengalaman petani atau operator panen. Untuk memastikan tingkat ketuaan buah yang dipanen di lapangan seringkali dilakukan sampel acak dengan mengukur kandungan padatan terlarut buah. Parameter kualitas buah yang menunjukkan perbedaan tingkat ketuaan buah adalah kandungan pati, total padatan terlarut, kekerasan, keasaman dan warna kulit buah (Kingston 2010).

Beberapa penelitian telah dilakukan pada buah segar untuk memperoleh kualitas pascapanen yang baik dengan menggunakan parameter antara lain kandungan pati saat dipetik pada buah mangga (Saranwong et al. 2004), kadar air dan karbohidrat pada buah pepaya (Chukwuka et al. 2013; Nwofia et al.2012), kekerasan dan total padatan terlarut pada buah pepaya (Abu Goukh et al. 2010). Untuk apel, Bertone et al. (2012) menggunakan parameter kandungan klorofil umtuk menentukan umur petik, sedangkan Peirs et al. (2000) menggunakan total asam dan kekerasan. Tujuan penelitian ini adalah untuk melakukan analisis perubahan kualitas dan masa simpan pepaya varietas IPB9 dari umur petik yang berbeda. Data karakteristik perubahan kualitas dari umur petik buah pepaya yang diperoleh dapat digunakan untuk penentuan tujuan pasar, perancangan fasilitas penyimpanan jangka panjang dan transportasi jarak jauh.

Bahan dan Metode

Persiapan Bahan

Sampel buah pepaya varietas IPB9 diperoleh dari kebun percobaan IPB yang dipetik pada umur 135, 131, 128, 121 dan 114 hari setelah bunga mekar. Penentuan waktu petik didasarkan pada pengalaman operator panen yang sudah sangat terlatih untuk proses pemanenan buah pepaya. Pemanenan buah dilakukan pada pagi hari setelah matahari terbit untuk menghindari embun yang menempel di kulit buah. Setelah dipanen, buah pepaya disortasi berdasarkan berat pada selang 880 – 1200 g, selanjutnya dibersihkan dan diangkut ke Laboratorium dalam keranjang plastik dengan masing-masing buah dibungkus kertas untuk melindungi dari kerusakan mekanis selama pengangkutan. Proses pengangkutan buah dilakukan pada kondisi suhu udara ruang selama 1 jam perjalanan dengan menggunakan moda

transportasi darat. Setelah sampai di laboratorium, buah diberi label sesuai umur petik masing-masing dan diberi tanda pada bagian buah yang digunakan saat pengukuran parameter kualitas. Parameter yang diukur meliputi kandungan pati, total padatan terlarut, kadar air, dan kekerasan.

Tahapan Penelitian

Sampel buah pepaya untuk semua umur panen selanjutnya diperam di dalam alat pemeram buatan dengan perlakuan penambahan gas etilen 50 ppm pada suhu 20°C selama 24 jam. Setelah proses pemeraman selesai, sampel buah pepaya diletakkan di suhu ruang. Pengukuran parameter kualitas dilakukan pada saat setelah dipetik (hari ke-0), selanjutnya pada hari ke-1, ke-3, dan ke-5 setelah pemeraman untuk umur petik 135, 131, dan 128 hari setelah bunga mekar. Sedangkan untuk umur petik 121 dan 114 hari setelah bunga mekar, pengukuran dilakukan pada waktu petik (hari ke-0), selanjutnya pada hari ke-1, ke-3, dan ke-7 setelah pemeraman. Parameter yang diukur adalah kandungan pati, total padatan terlarut, kadar air, dan kekerasan. Pengukuran dilakukan tiga kali ulangan dengan menggunakan tiga buah pepaya yang berbeda untuk masing-masing umur petik.

Masing-masing buah pepaya yang dianalisis mewakili bagian pangkal, tengah, dan ujung buah pepaya. Pengukuran kekerasan buah pepaya dilakukan dengan menggunakan Rheometer mode CR-300. Untuk pengukuran total padatan terlarut dan kandungan pati, buah pepaya dikupas tipis kulitnya dan bagian dalamnya dibuang hingga ±5mm ketebalannya. Kadar air buah diukur dengan menggunakan metode oven. Total padatan terlarut diukur menggunakan Refraktometer dengan 3 ulangan per buah sedangkan pengukuran kandungan pati dilakukan dengan metode Spektrofotometer dengan menggunakan *Antron* (Yoshida et al. 1979).

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Pepaya Berdasarkan Umur Petik yang Berbeda

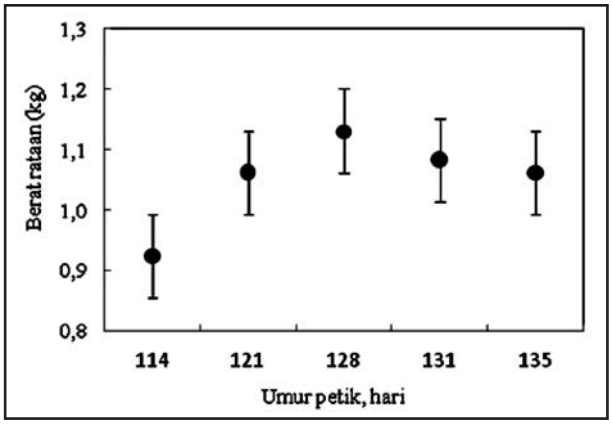
Gambar 1 menunjukkan berat rata-rata sampel buah pepaya yang digunakan untuk masing-masing umur petik. Berat rataan pada umur 114 dan 121 hari setelah bunga mekar masih mengalami peningkatan yang menunjukkan bahwa proses pertumbuhan dan pembesaran sel masih terus berlangsung. Sedangkan pada umur petik 128 hari setelah bunga mekar berat rataan dari sampel yang digunakan sudah mencapai berat maksimum dan pada umur petik 131 dan 135 hari setelah bunga mekar berat rataan buah sudah mulai menurun akibat dari proses pematangan yang sedang berlangsung. Oleh karena itu mutu buah yang baik saat dikonsumsi akan diperoleh jika pemanenan buah dilakukan pada umur petik yang tepat (Peirs et al. 2000; Francois et al. 2009) sehingga diperoleh umur simpan yang lebih lama.

Pepaya dengan kualitas premium dipetik sebelum mencapai puncak klimakterik saat buah masih hijau tetapi sudah tua yang dikenal dengan sebutan matang fisiologis, matang fisiologis terjadi saat kandungan pati pada buah pepaya belum terhidrolisis menjadi gula. Saranwong et al. (2004) menyatakan bahwa untuk buah mangga yang baru dipetik memiliki kandungan pati tertinggi, untuk mendapatkan total padatan terlarut tertinggi, buah perlu disimpan selama kurang lebih lima hari. Hasil pengukuran kandungan pati, total padatan terlarut, kadar air, dan kekerasan pepaya varietas IPB9 pada umur petik yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 2.

Pepaya dengan umur petik 128 hari setelah bunga mekar memiliki kandungan pati tertinggi sebesar 4.38 mg pati/g berat kering dan nilai total padatan terlarut yang masih rendah sebesar 4.7°Brix jika dibandingkan dengan umur petik 131 dan 135 hari setelah bunga mekar. Hal ini menunjukkan kandungan pati belum terhidrolisis menjadi gula-gula sederhana pada umur petik 128 hari setelah bunga mekar. Menurut Wurochekke *et al.* (2013) yang membandingkan kandungan nutrisi dari buah pepaya dengan tingkat kematangan yang berbeda, menyatakan bahwa buah pepaya yang belum matang (unripe) memiliki karbohidrat yang masih sedikit jika dibandingkan buah pepaya yang hampir matang (semi ripe) dan matang fisiologi (ripe).

Sedangkan nilai kadar air dan kekerasan pada umur petik 128 hari juga masih lebih tinggi dibandingkan dengan umur petik 131 dan 135 hari, yang menunjukkan proses pematangan buah belum terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa buah pepaya varietas IPB9 yang dipetik pada umur 128 hari telah tua atau matang fisiologis, dimana buah telah mencapai kondisi optimum untuk dipetik dan buah sudah mulai matang meski kualitasnya belum sesuai tuntutan konsumen (Novita 2000).

Pepaya pada umur petik 131 dan 135 hari setelah

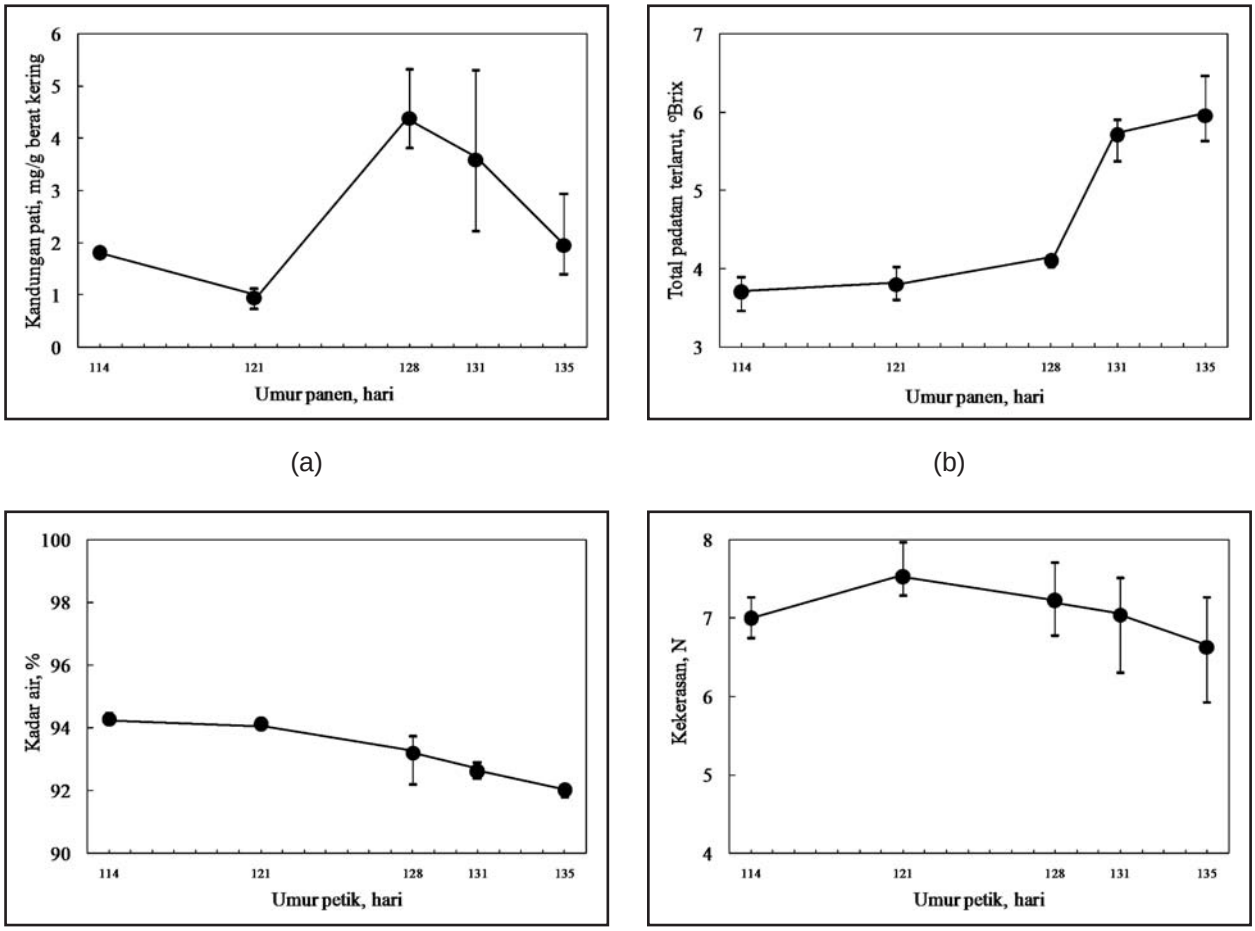


Gambar 1. Berat rataan buah pepaya pada umur petik yang berbeda

bunga mekar kandungan patinya sudah terhidrolisis menjadi gula-gula sederhana pada proses pematangan yang ditandai dengan nilai kandungan pati, kadar air, dan kekerasan yang lebih rendah dan nilai total padatan terlarut yang lebih tinggi dibandingkan dengan umur petik 128 hari. Tahapan ini dikenal dengan tahapan pematangan yang menyebabkan buah pepaya mengalami banyak perubahan seperti rasa, warna dan tekstur yang menyebabkan terjadinya perubahan fisiologis yang menentukan kualitas buah saat dikonsumsi (Syska 2006). Dapat dilihat pada Gambar 2a, pepaya pada umur petik 135 hari setelah bunga mekar proses pematangan sudah berlangsung, sehingga nilai kandungan pati sesaat setelah petik sudah rendah. Namun kandungan pati pada umur petik 131 hari setelah bunga mekar tidak berbeda nyata dengan umur petik 128 bunga mekar, hal ini dikarenakan pada umur petik 131 proses pematangan baru dimulai sehingga nilai kandungan pati antara kedua umur petik ini tidak jauh berbeda.

Proses pematangan pada buah pepaya ditandai dengan penurunan kekerasan pada buah yang merupakan dampak dari proses pematangan akibat adanya proses degradasi pektin menjadi protopektin yang menyebabkan tekanan turgor dinding sel menurun dan menyebabkan buah menjadi lunak saat proses pematangan (Billy et al. 2008). Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kinerja enzim dalam dinding sel yaitu pektinmetilesterase yang berfungsi untuk mendegradasi selulosa dan hemi selulosa bersamaan dengan meningkatnya laju respirasi menuju puncak klimakterik.

Menurut Novita (2000) pada saat buah mulai matang kadar gula akan meningkat akibat terjadinya hidrolisis polisakarida menjadi gula, hal ini disebabkan oleh kandungan gula pada pepaya lebih dominan dibandingkan kandungan asam, sehingga rasa yang timbul adalah manis. Hasil yang sama dinyatakan oleh Abu Goukh et al. (2010) yang menyatakan bahwa peningkatan ^{o}Brix pada total padatan terlarut bersamaan dengan meningkatnya kandungan gula pada buah tersebut pada proses pematangan. Pepaya pada umur petik 121 dan 114 hari setelah bunga mekar nilai kandungan pati dan total padatan terlarut masih rendah, jika dibandingkan dengan tiga umur yang lain. Namun nilai kadar air dan kekerasan pada kedua umur petik ini tinggi, karena pektin yang tidak larut dalam air belum dirubah menjadi protopektin yang larut



Gambar 2. Kandungan pati (a), TPT (b), Kadar air (c), Kekerasan (d) pepaya varietas IPB9 pada umur petik yang berbeda.

dalam air, sehingga menyebabkan tekstur buah masih keras. Pepaya merupakan sumber kalsium, menurut Willats *et al.* (2006) kalsium pada buah pepaya merupakan elemen penting penyusun dinding sel dan merupakan bagian dari struktur kompleks pembentuk molekul pektin, sehingga saat buah matang dan tingkat kekerasan menurun, maka kandungan kalsium pada pektin dalam buah pepaya juga menurun (Oliveira & Victoria 2011). Hal ini menunjukkan bahwa buah pada kedua umur petik ini proses pematangan buah belum berlangsung dan masih berada pada tahapan pertumbuhan dan pembesaran sel (Novita 2000) yang terlihat dari berat rataan buah pepaya sesaat setelah dipetik pada Gambar 1.

Karakteristik Pepaya Setelah Pemeraman

Kandungan Pati

Pepaya merupakan buah klimakterik yang masih dapat mencapai puncak respirasi meski telah dipanen, selain itu buah juga masih melakukan proses metabolisme yang menunjukkan proses kehidupan masih berlangsung. Oleh karena itu perlu diperhatikan penentuan umur petik yang tepat agar memperoleh kualitas buah yang baik dengan umur simpan yang lama. Adapun selama proses pematangan buah-buahan mengalami perubahan darikeempat parameter yang diamati. Parameter-parameter tersebut sangat penting dan dapat mempengaruhi mutu buah saat buah dikonsumsi.

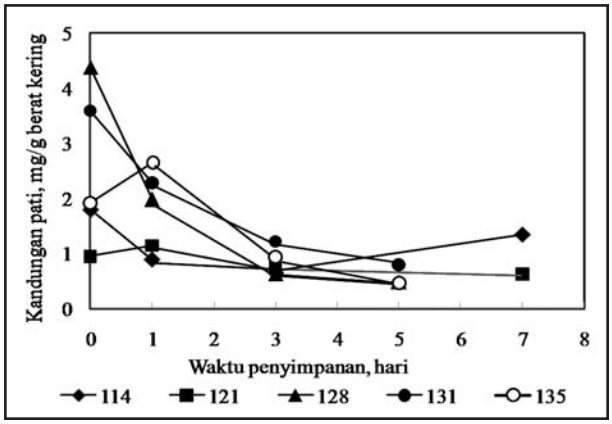
Gambar 3 menunjukkan perubahan kandungan pati setelah pemeraman selama penyimpanan. Perubahan kandungan pati pada umumnya mengalami penurunan seiring dengan proses pematangan akibat terhidrolisisnya kandungan pati menjadi gula-gula sederhana yang menyebabkan kandungan pati pada semua umur petik menurun. Peningkatan ^{o}Brix pada total padatan terlarut bersamaan dengan meningkatnya kandungan gula pada buah pada proses pematangan (Abu Goukh et al.2010), sehingga nilai total padatan terlarut pada umumnya mengalami peningkatan.

Total Padatan Terlarut

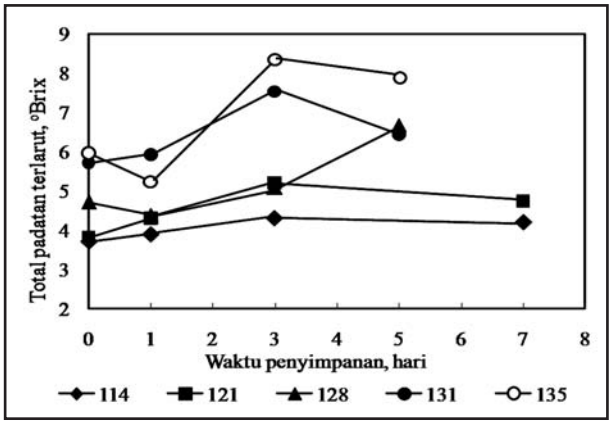
Gambar 4 menunjukkan perubahan total padatan terlarut pepaya setelah pemeraman selama penyimpanan. Buah pepaya dengan umur petik 131 dan 135 hari setelah bunga mekar memiliki nilai total padatan terlarut tertinggi pada hari ke-3 setelah pemeraman, tetapi pada hari yang sama pula nilai kekerasan buah mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kinerja enzim dalam dinding sel yaitu pektin metilesterase yang berfungsi untuk mendegradasi selulosa dan hemi selulosa bersamaan dengan meningkatnya laju respirasi menuju puncak klimakterik. Abu Goukh et al.(2010) menyatakan bahwa buah pepaya yang dipetik terlalu matang ataupun terlalu muda akan berdampak pada kualitasnya. Pada hari ke-5 setelah pemeraman nilai total padatan terlarut pada kedua umur petik ini mengalami penurunan. Tirkey et al. (2014) menyatakan bahwa penurunan nilai total padatan terlarut karena terdegradasinya gula menjadi asam saat buah mulai rusak dan membusuk. Oleh karena itu pada umur petik 131 dan 135 hari setelah bunga mekar penyimpanan maksimum dapat dilakukan selama 3 hari setelah pemeraman bersamaan saat buah mencapai puncak klimakteriknya, sehingga sesuai untuk buah yang dipasarkan dengan jarak dekat ke pasar lokal.

Kadar Air

Perubahan kadar air setelah pemeraman selama penyimpanan dapat dilihat pada Gambar 5. Pepaya pada umur petik 114 hari SBM memiliki kadar air terbesar, dan terus menurun seiring dengan semakin tuanya umur petik (121, 128, 131, dan 135 hari setelah bunga mekar). Hal ini disebabkan oleh proses pematangan pada buah yang dipetik lebih tua telah berlangsung sehingga buah pepaya telahmendekati puncak klimakteriknya yang ditandai oleh meningkatnya laju respirasinya. Semakin tinggi laju respirasi, maka semakin cepat pula proses penguapan (transpirasi) dari buah ke lingkungan.



Gambar 3. Perubahan kandungan pati pepaya setelah pemeraman selama penyimpanan.



Gambar 4. Perubahan total padatan terlarut pepaya setelah pemeraman selama penyimpanan.

Penguapan air yang terjadi selama proses penyimpanan dapat menyebabkan terjadinya susut bobot, selain itu kehilangan air pada buah pepaya dapat menyebabkan kerusakan dan menurunkan mutu buah pepaya. Menurut Kader (2002) transpirasi dapat menyebabkan kehilangan air, menurunkan bobot, dan menurunkan penampilan buah. Proses transpirasi sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti suhu, lama penyimpanan, dan kelembaban lingkungan saat penyimpanan. Selama penyimpanan buah pepaya varietas IPB9 ini berada pada kondisi RH berkisar 60% sampai 70% dan suhu 25°C sampai 29°C, sehingga proses transpirasi atau proses kehilangan air dari buah ke lingkungan berlangsung lebih cepat.

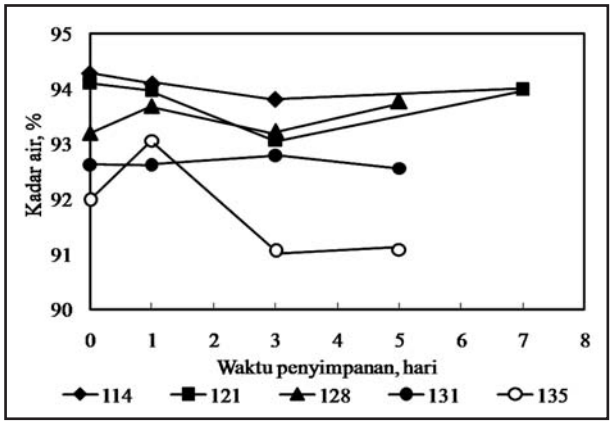
Kekerasan

Proses penurunan kekerasan buah pepaya varietas IPB9 selama penyimpanan berlangsung cepat, hal ini disebabkan suhu penyimpanan menggunakan suhu ruang. Sehingga proses metabolisme berlangsung dengan cepat seiring dengan peningkatan suhu yang digunakan selama penyimpanan (Gambar 6). Suhu rendah dapat memperlambat proses respirasi dan metabolisme pada buah, sehingga perubahan tekstur dan pelunakan buah berlangsung lebih lambat. Namun proses pematangan pada penelitian ini hanya menggunakan suhu ruang, perubahan metabolisme mempengaruhi proses respirasi, pematangan, proses penuaan, tekstur, dan warna (Novita 2011).

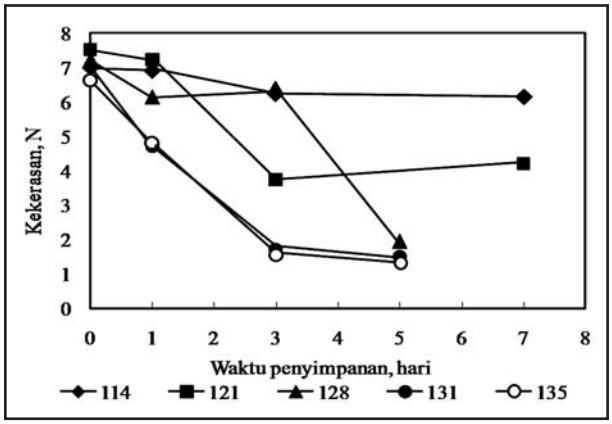
Proses transpirasi dan respirasi pada buah-buahan dapat berlangsung lebih cepat pada suhu ruang, sehingga penurunan kadar air kulit buah lebih cepat dibandingkan pada suhu dingin. Hukum Vant't Hoffme nyatakan bahwa laju reaksi kimia dan biokimia meningkat dua atau tiga kali untuk setiap kenaikan suhu 10°C (Novita 2011). Proses transpirasi terjadi di ruang-ruang antar sel yang menyebabkan sel menciut sehingga ruang antar sel menyatu dan zat pektin saling berikatan (Qanytah 2004). Kadar air dan kekerasan secara umum pengalami penurunan, karena perubahan pektin yang tidak larut dalam air berubah menjadi protopektin yang larut dalam air, sehingga menyebabkan tekstur buah menjadi lunak dan kadar air menurun. Menurut Billy et al. (2008) dalam penelitiannya pada buah apel, menyebutkan bahwa pektin dan kekerasan memiliki korelasi positif, semakin tinggi kandungan pektin pada buah maka semakin tinggi tingkat kekerasan pada buah tersebut.

Pada pepaya dengan umur petik 128 hari setelah bunga mekar, nilai total padatan terlarut mengalami kenaikan dan mencapai maksimum pada hari ke-5 setelah pemeraman bersamaan saat nilai kekerasan mengalami penurunan. Penurunan kekerasan selama penyimpanan disebabkan oleh perombakan protopektin yang tidak larut dalam air menjadi asam pektat dan pektin yang larut dalam air (Novita 2011). Hal ini menyebabkan penurunan kekerasan pada buah pepaya menjadi lunak seiring dengan berlangsungnya proses pematangan. Senyawa dinding sel yang terdiri atas selulosa, hemiselulosa, pektin, dan lignin, degradasi hemiselulosa dan pektin pada proses pematangan membuat buah menjadi lunak.

Dapat dikatakan bahwa pepaya dengan umur petik 128 hari mempunyai umur simpan yang lebih lama yaitu 5 hari setelah pemeraman, sehingga buah pepaya dengan umur petik 128 hari setelah bunga mekar sesuai untuk tujuan pasar jarak jauh. Hal ini disebabkan pada umur petik 128 hari setelah bunga mekar mencapai puncak klimakteriknya lebih lambat jika dibandingkan dengan umur petik 131 dan 135 hari setelah bunga mekar. Sedangkan umur petik 114 dan 121 hari setelah bunga mekar memiliki nilai total padatan terlarut yang rendah dan nilai kekerasan yang masih tinggi jika dibandingkan dengan umur petik 128, 131, dan 135 hari setelah bunga mekar karena buah tidak dapat matang sempurna. Hal ini disebabkan saat buah dipetik masih berada pada tahapan pertumbuhan dan pembesaran sel, sehingga kondisi buah belum optimum yang ditandai oleh kandungan pati yang masih rendah dan menyebabkan proses pematangan tidak dapat berlangsung secara sempurna.



Gambar 5. Perubahan kadar air pepaya setelah pemeraman selama penyimpanan.



Gambar 6. Perubahan kekerasan pepaya setelah pemeraman selama penyimpanan.

Simpulan

Buah pepaya dengan umur petik 135 dan 131 hari setelah bunga mekar mengalami proses pematangan yang optimum atau puncak klimakterik pada hari ketiga setelah pemeraman, sehingga sesuai untuk buah yang dipasarkan jarak dekat dengan nilai total padatan terlarut berturut-turut sebesar 8.3^{O}Brix dan 7.5^{o}Brix. Sedangkan untuk buah pepaya dengan umur petik 128 hari setelah bunga mekar, proses pematangan optimum atau puncak klimakterik terjadi pada hari kelima setelah pemeraman, sehingga sesuai untuk buah dengan tujuan pasar jarak jauh dengan nilai total padatan terlarut sebesar 6.7^{o}Brix. Pada umur petik 121 dan 114 hari setelah bunga mekar buah tidak dapat matang sempurna dengan nilai total padatan terlarut tertinggi berturut-turut sebesar 5.2^{o}Brix dan 4.3^{o}Brix.

UcapanTerima Kasih

Penelitian ini merupakan bagian dari skema penelitian Hibah Penelitian Kerjasama Luar Negeri dan Publikasi Internasional, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Indonesia No 13/IT3.11/LT/2014.

Daftar Pustaka

Abu Goukh, A.B.A., A.E.T. Shattir, dan E.F.M. Mahdi. 2010. Physico-Chemical Changes During Growth and Development of Pepaya Fruit. II : Chemical Changes. J. Agriculture and Biology Journal of North America. Vol 1 (5): 871-877

Ahamed, J. dan D.R. Choundhary. 1995. Osmotic dehydration of pepaya. J Indian Food Packer Vol. 49: 5-9

Billy, L., E.Mehinagic, G. Royer, C.M.G.C. Renard, G. Arvisenet, C. Prost, F. Jourjon. 2008. Relationship between texture and pectin composition of two apple cultivars during storage. J. Postharvest Biology and Technology 47: 315-324

Bertone, E., A. Venturello, R. Leardi, F. Geobaldo. 2012. Prediction of the optimum harvest time of Scarlet apples using DR-UV-Vis and NIR spectroscopy. Postharvest Biology and Technology 69, 15-23.

Chukwuka, K.S., M. Iwuagwu, U.N. Uka. 2013. Evaluation of nutrional components of Carica papaya L. at different stages of ripening. Journal of Pharmacy and Biological Sciences 6: 13-16.

Francois, I.M., E. Marien, K. Brijs, P. Coppin, M.D. Proft. 2009. The use of Vis/NIR spectroscopy to predict the optimal root harvesting date of chicory (Cichorium intybus L.). J Postharvest Biology and Technology. 53: 77-83

Kader. A.A., N.F. Sommer, M.L. Arpaia. 2002. Postharvest handling systems of tropical fruits. In: Kader A A (Ed). Postharverst echonology of horticultural crops. 3rd Edition. Publication 3311. Pp. 385-398. Division of Agriculture and Natural Resources, University of California, Oakland, California, USA.

Kingston, C.M. 2010. Maturity indices for apple and pear. In: Janick, J. (Ed.), Horticultural Reviews, vol. 13. John Wiley & Sons, Inc., Oxford, 407–422.

Novita, T. 2000. Peran Fisiologi Poliamin dan Etilen pada Proses Pemasakan Buah Pepaya Solo (*Caricapepaya* L.). (Tesis). Institut Pertanian Bogor. Bogor.

Novita, D.D. 2011. Penentuan pola peningkatan kekerasan kulit buah manggis selama penyimpanan dingin dengan metode NIR *spectroscopy.*(Tesis). Institut Pertanian Bogor. Bogor.

Nwofia, G.E., P. Ojimelukwe, C. Eji. 2012. Chemical composition of leaves, fruit pulp and seeds in some *Caricapapaya* (L) morphotypes. *J Med. Arom. Plants* 2: 200-206.

Oliviera, J.G. dan A.P. Vitoria. 2011. Pepaya: Nutrional and pharmacological characterization, and quality loss due to physiological disorders. An overview. J Food Research International 44: 1306-1313

Peirs, A.J., K. Lammertyn, B.M. Ooms, Nicolai. 2000. Prediction of the optimal picking date of different apple cultivars by means of VIS/NIR spectroscopy. Postharvest Biology and Technology 21, 189-199.

Qanytah. 2004. Kajian perubahan mutu buah manggis (Garcinia mangostana L.) dengan perlakuan precooling dan penggunaan giberrelin selama penyimpanan. (Tesis). Institute Pertanian Bogor. Bogor.

Saranwong, S., J. Sornsrivichai, S. Kawano. 2004. Prediction of ripe-stage eating quality of mango fruit from its harvest quality measured nondestructively by near infrared spectroscopy. J postharvest Biology and Technology 31: 137-145.

Syska, K. 2006. Kajian Pengaruh Suhu dan Konsentrasi Etilen terhadap Perubahan Fisiologi dan Mutu Buah Pepaya Varietas IPB 1. (Tesis). Departemen Teknik Mesin dan Biosistem. Institut Pertanian Bogor. Bogor.

Tirkey, B., U.S. Pal, L.M. Bal, N.R. Sahoo, C.K. Bakhara, M.K. Panda. 2014. Evaluation of physic-chemical changes of fresh-cut unripe pepaya during storage. J. Food Packanging and Self Life I : 190-197

Willats, W.G.T., J.P. Knox, J.D. Mikkelsen. 2006. Pectin: new insights into an old polymer are starting to gel. J. Trends in Food Science and Technology Vol. 17: 97-104.

Wurochekke, A.U., H.T. Eze, B. Declan. 2013. Comparative study on nutritional content of Carica papaya at different ripening stages. Int. J. Pure Appl. Sci. Technology 14(2): 80-83.

Yoshida, S., D. Forno, J. Cock, dan K. Gomez. 1979. Laboratory Manual for Physiological Studies Rice. IRRI. Philipines.

Technical Paper

Studi Gerak Kerja Pemanenan Kelapa Sawit Secara Manual

Motion Study of Oil Palm Manual Harvesting

M. Faiz Syuaib, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian, Bogor,
Email: faizs@ipb.ac.id
Nugrahaning Sani Dewi, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian, Bogor,
Email: nugrahaningsani@gmail.com
Tri Novita Sari, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian, Bogor,
Email: tri_novita_sari@yahoo.com

Abstract

Good harvesting technique and timing is necessary to result good productivity in oil-palm industies. The harvesting activity is mostly conducted by 'human powered' manual handling which quite arduous and risky in term of work safety and musculoskeletal disorders (MSD). This research deals with anthropometry and motion study to analyse manual harvesting activity in oil palm plantation so the activity can be done in more safety, efficient and productive. Motion study using Natural Range of Motion (ROM) is applied to know the level of motion risk based on ROM indeks and appropriate antropometry. Manual harvesting tasks by using conventional tools named 'dodos' and 'egrek' were studied in this research. The aims of this research is to know the pattern and risks distribution of the work motions, and then to determine a good harvesting procedure to minimize the risk. The anthropometry result show that the harvester posture is ideal and uniform. The 'cutting with egrek (CuE)' was found as the most risky work element in the manual harvesting task, and the MSD risks occur on the neck, shoulder, forearm, back and ankle.Such work procedures should be designed and appropriate working distance and length of tool are required to prevent the risks. Work motion simulation revealed that 1.5, 2.5, 5.5, and 8.5 mare suitable working distance to harvest 3, 6, 12 dan 18 mheight of targeted bunches, respectively.

Keywords: *ergonomic, manual harvesting, oil palm, motion study, anthropometry*

Abstrak

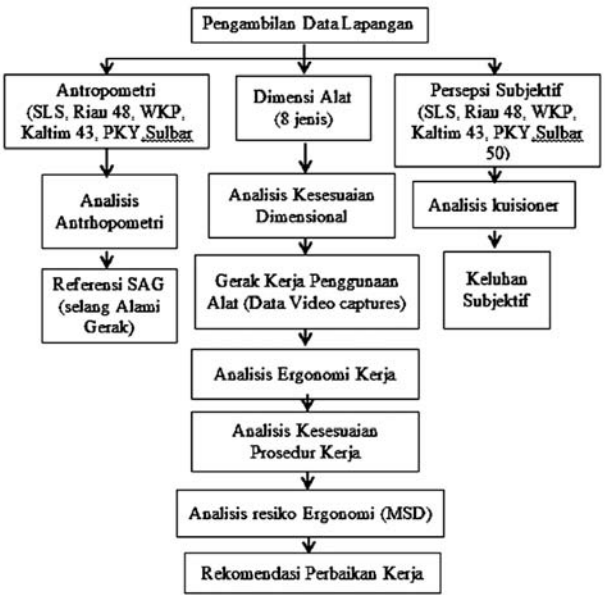
Teknik dan waktu pemanenan yang tepat diperlukan untuk mencapai produktivitas yang baik di industri kelapa sawit. Kegiatan panen sawit secara umum masih dilakukan secara manual mengandalkan tenaga manusia yang tergolong cukup sulit dan beresiko tinggi dalam hal keselamatan kerja dan gangguan *muskuloskeletal* (MSD). Tujuan dari kajian ini adalah untuk menganalisis kegiatan panen-muat kelapa sawit di beberapa perkebunan sawit dengan pendekatan ergonomi dan mekanisme kerja yang optimal, baik dari sudut pandang efektivitas maupun keselamatan kerja. Lingkup yang dikaji dalam kajian ini adalah berfokus pada analisis antropometri serta gerak kerja pemanenan dengan pendekatan selang gerak alami (*natural Range of Motion*: ROM). Kajian ini juga meliputi dua metode dan alat panen yang lazim digunakan, yaitu 'dodos' dan 'egrek'. Hasil analisis antropometri secara umum menunjukkan bahwa pemanen di ketiga lokasi memiliki karakteristik postur tubuh yang relatif sama. Analisis gerak membuktikan bahwa elemen kerja yang terkait pemotongan tandan buah segar (TBS) memiliki resiko yang lebih tinggi dibandingkan dengan elemen kerja yang terkait dengan evakuasi dan pengumpulan TBS. Elemen kerja 'cutting egrek (CuE)' teridentifikasi sebagai pekerjaan paling beresiko, dimana segmen tubuh yang paling beresiko adalah leher, bahu, punggung-pinggang, lengan hingga pergelangan kaki. Desain ergonomis terkait prosedur dan jarak kerja diperlukan untuk meminimasi resiko tersebut, dan hasil simulasi menunjukkan bahwa jarak kerja yang ideal dan aman untuk ketinggian target potong (TBS) 3, 6, 12 dan 18 m berturut-turut adalah 1,5, 2,5, 5,5 dan 8,5 m.

Kata Kunci : ergonomika, pemanenan manual, kelapa sawit, studi gerak, antropometri

Diterima: 02 Desember 2014 ; Disetujui: 24 Februari 2015

Pendahuluan

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan tumbuhan penghasil minyak yang potensial. Menurut FAO (2002) dengan *yield* yang tinggi, kelapa sawit dapat menghasilkan lebih dari 20 ton tandan buah segar (TBS)/ha setiap tahunnya di bawah pengelolaan ideal yang sama dengan 5 ton minyak/ha/tahun. Proses budidaya berperan sangat penting untuk menghasilkan produk akhir, baik kuantitas maupun kualitas. Panen merupakan kegiatan penting dalam kegiatan budidaya dan pengelolaan kelapa sawit. Keberhasilan pemanenan akan menunjang pencapaian produktivitas tanaman (Pusat Penelitian Kelapa Sawit, 2007).Dewasa ini, alat dan sistem yang digunakan untuk panen dan muat sawit pada umumnya adalah secara manual oleh petani dengan menggunakan alat dodos dan egrek untuk panen serta gerobak atau angkong untuk angkut muat. Beberapa jenis alat atau teknologi sudah banyak diintrodusir dan digunakan saat ini, untuk sebagian kondisi alat/teknologi tersebut cukup efektif, tetapi untuk beberapa kondisi lainnya sulit atau pun kurang ekonomis untuk diaplikasikan. Kegiatan pemanenan secara manual juga berpotensi untuk menimbulkan permasalahan keselamatan dan kesehatan kerja (K3). Hasil penelitian Hendra dan Rahardjo (2009) tentang keluhan *Musculoskeletal Disorders (MSD)* pada pemanen kelapa sawit menyatakan bahwa resiko pekerjaan pemanenan (panen dan muat) mempunyai kategori tinggi (skor 8-10) berdasarkan metode *Rapid Entire Body Assessment (REBA)*. Oleh karena itu, kegiatan panen yang secara umum masih mengandalkan kerja manual perlu dikaji secara ergonomi, direncanakan dan diorganisir sehingga metode dan kapasitas panen yang optimal dapat ditentukan sesuai dengan kapasitas tenaga panen dan kaidah-kaidah keselamatan dan kesehatan kerja.



Gambar 1. Alur Metode Analisis Gerak

Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi acuan sekaligus pertimbangan solutif untuk menyempurnakan dan mengoptimalkan peforma sistem dan mekanisme kerja yang dilaksanakan saat ini sehingga produktivitas kerja 'panen-angkut' dapat dioptimalkan. Selain itu, hasil kajian ergonomi ini dapat dijadikan referensi untuk merumuskan standar operasi serta target kerja pemanenan yang ideal untuk dilaksanakan di perkebunan sawit. Tujuan dari kajian ini adalah untuk menganalisis kegiatan panen-muat kelapa sawit di beberapa kebun di PT Astra Agro Lestari dengan pendekatan ergonomi dan mekanisme kerja yang optimal, baik dari sudut pandang efektivitas, efisiensi dan produktivitas maupun keselamatan dan kenyamanan kerja. Lingkup yang dikaji dalam kajian ini adalah analisis gerak pemanenan (*motion analysis*) yang dilakukan untuk mengetahui tingkat keamanan dan resiko ergonomis pemanenan berdasarkan indeks selang alami gerak dan kesesuaian antropometri pemanen.

Bahan dan Metode

Pengambilan data lapangan dilaksanakan pada tanggal 26 Juni - 4 Agustus 2012 di tiga lokasi Perkebunan Kelapa Sawit PT Astra Agro Lestari, Tbk yaitu di PT Waru Kaltim Plantation (WKP), Kalimantan Timur, PT Sari Lembah Subur (SLS), Riau, dan PT Pasangkayu (PKY), Sulawesi Barat. Selanjutnya data dari lapang diolah dan dianalisis di Laboratorium Ergonomika Fakultas Teknologi Pertanian, IPB pada Agustus sampai Februari 2013. Alat yang digunakan adalah *digital video camera* antropometer, seperangkat alat tulis dan komputer. Beberapa *software* pendukung pengolahan dan analisis data, diantaranya *spread sheet, computer aided design* (CAD), dan *Video Converter to Jpeg.* Subjek yang digunakan adalah pemanen kelapa sawit sebanyak 43 pemanen (WKP), 48 pemanen (SLS), dan 50 pemanen (PKY) untuk mengetahui antropometri pemanen kelapa sawit. Untuk mengetahui tingkat resiko gerakan pemanenan kelapa sawit menggunakan alat egrek dan dodos subyek yang digunakan adalah 5 pemanen (WKP), 9 pemanen (SLS), dan 11 pemanen (PKY). Alat panen yang diteliti dalam penelitian ini difokuskan pada alat panen egrek dan dodos. Secara umum, alur metodologis analisis gerak adalah sebagaimana disajikan pada Gambar 1.

Observasi Pendahuluan

Observasi pendahuluan dilaksanakan dengan tujuan untuk mengamati kondisi eksisting kerja di lapangan sehingga dapat diketahui gambaran umum sistem kerja, rangkaian kegiatan kerja, variasi kondisional lahan dan aktivitas kerja, peralatan, mengamati dan menentukan beberapa

Tabel 1. Elemen-elemen kerja pemanenan sawit.

No	Elemen Kerja	Lambang Huruf
1	Mengidentifikasi/verifikasi tandan matang	Ve
2	Menyiapkan alat panen	Pr
3	Memotong tandan dan pelepah	CuD/CuE
4	Mencacah dan memindahkan pelepah	Ba
5	Membuang sisa Tandan Buah Segar (TBS)/cangkam kodok	Ck
6	Memungut berondolan (buah yang terserak)	Br
7	Memuat tandan ke angkong	Lo
8	Perpindahan dari satu tempat ke tempat lain	Mo
9	Membongkar dan merapihkan tandan di Tempat Pengumpulan Hasil (TPH)	Un

faktor yang diduga kuat mempengaruhi proses dan produktivitas kerja panen. Hasil observasi ini selanjutnya dijadikan landasan untuk pengambilan data di lapangan. Kemudian, ditentukan kategorisasi kondisi kerja yang dianggap mempengaruhi tingkat kesulitan dan produktivitas kerja secara signifikan yang meliputi: tinggi pohon, relief topografis lahan dan kondisi atau struktur tanah.

Pengambilan Data Lapangan

Data yang diambil berupa rekaman video (gerak dan waktu) aktivitas kerja panen dengan menggunakan digital video camera, pengukuran anthropometri tubuh pemanen dengan menggunakan 51 parameter dimensi tubuh, pengukuran dimensi alat-alat yang digunakan untuk kerja panen, dan kuisener perspektif subjektif pemanen. Pengambilan data kondisi pengukuran dilakukan pada topografi teras (T), *rolling* (R), dan *flat* (F), lahan basah (B) dan kering (K), ketinggian pohon 3 m (H1), ketinggian pohon 3-6 m (H2), ketinggian pohon 6-12 m (H3) dan ketinggian pohon 12 m (H4). Topografi teras merupakan topografi yang memiliki bentuk lahan berundak-undak, topografi flat memiliki lahan berbentuk lahan datar agak bergelombang dan topografi *rolling* memiliki bentuk lahan berbukit dan bergelombang. Lahan kering merupakan lahan yang memiliki jenis tanah mineral dan kering sedangkan lahan basah memiliki jenis tanah organik (rawa) dan agak lembab namun tidak terendam oleh air.

Metodologi yang digunakan merupakan kombinasi dari pendekatan kesesuaian dimensional (*anthropometric*), selang alami gerak (*kinesthetic*) dan persepsi subjektif. *Antropometric* adalah analisis dimensi tubuh manusia. Data antropometri merupakan data yang digunakan untuk menentukan dimensi fisik dari ruang kerja, peralatan, *furniture* dan pakaian untuk memastikan terhindarnya ketidakcocokan antara dimensi alat dengan dimensi pengguna (Bridger 2003). Dalam kaitannya dengan studi ini, data-data dikumpulkan secara empiris dari pengukuran terhadap 101 orang subjek pemanen yang dipilih secara acak dari ketiga lokasi studi. Data yang diambil terdiri dari 51 parameter dimensi skeletal (skeletal dimension) pada posisi berdiri dan duduk. Selang alami gerak (SAG) adalah rentang angular gerakan persendian yang secara alami dapat dilakukan oleh manusia normal pada setiap segmen tubuhnya. Semakin besar rentang gerak yang harus dilakukan bearti semakin besar pula upaya dan resiko yang harus dikeluarkan. Terdapat empat zona yang dihadapi manusia ketika duduk atau berdiri (Openshaw 2006) yaitu zona 0 (zona putih), zona 1 (zona hijau), zona 2 (zona kuning) dan zona 3 (zona merah).

Analisis Ergonomi Gerak Kerja (*Motion Analysis*)

Analisis ergonomi gerak kerja dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian prosedural kerja terhadap karakteristik alami fisiologi gerak (kinestetik) pekerja sehingga selanjutnya dapat dianalisis resiko ergonomi (MSD: *musculo-skeletal disorder*) yang mungkin terjadi pada pekerja panen. Tinggi rendahnya resiko kelelahan otot atau cidera akan berpengaruh terhadap tingkat produktivitas kerja.

Menurut Barnes (1980), study gerak (*motion study*) merupakan salah satu cabang dalam kajian ergonomi yang lazim dilakukan guna mendesain suatu metode atau prosedur atau cara kerja yang efektif – yaitu dengan *effort* sekecil mungkin untuk mendapatkan hasil sebaik mungkin – dimana prosedur atau metode kerja tersebut juga harus sesuai dengan karakteristik orang yang melakukannya. Oleh karena itu, *motion study* boleh juga dimaknai sebagai *work method design*.

Lebih lanjut, Barnes (1980) mengungkapkan bahwa studi gerak yang dilakukan bersamaan dengan studi waktu (*motion and time study*) merupakan pendekatan yang lazim digunakan untuk: (1) mendesain metode atau prosedur kerja yang sesuai, (2) standardisasi suatu operasi (pekerjaan), (3) menentukan waktu standar dari suatu pekerjaan, (4) training bagi operator dari suatu pekerjaan. Dalam kaitannya dengan penelitian ini, studi gerak dilakukan untuk mengevaluasi dan mendesain prosedur kerja yang lebih baik pada proses pemanenan sawit di lokasi studi.

Hasil dan Pembahasan

Analisis elemen kerja

Analisis elemen kerja dilaksanakan dengan

Tabel 2. Antropometri pemanen di ketiga lokasi studi'

No	Parameter Pengukuran	Rata-rata	SD	Min	Maks	Persentil		
						5	50	95
Posisi Berdiri								
1	Berat badan[b]	56.16	7.94	38.00	82.00	46.00	55.00	71.00
2	Tinggi badan	160.07	6.60	139.50	175.00	149.50	160.00	170.00
3	Tinggi mata	148.78	7.05	127.00	165.70	137.40	149.10	160.00
4	Tinggi bahu	133.03	5.93	115.90	145.10	123.00	133.50	141.20
5	Tinggi siku tangan	101.21	12.61	85.60	199.50	91.20	99.50	109.00
6	Tinggi pinggang	93.42	6.50	68.40	108.00	83.50	93.50	103.50
7	Tinggi pinggul	85.83	5.59	70.00	97.80	77.60	86.00	95.00
8	Tinggi genggaman tangan (*knuckle*)	68.34	5.54	52.70	93.40	60.00	68.10	76.00
9	Tinggi ujung tangan	57.84	4.67	42.20	82.10	51.50	57.90	63.00
10	Jangkauan tangan keatas terbuka	201.78	9.46	175.60	222.20	187.80	202.00	217.80
11	Jangkauan tangan keatas menggenggam	192.08	9.51	166.00	215.00	178.00	192.00	208.00
12	Jangkauan tangan kedepan terbuka	76.11	6.15	61.20	87.20	66.50	77.00	85.00
13	Jangkauan tangan kedepan menggenggam	65.85	5.17	54.90	89.30	57.70	66.00	73.50
14	Jengkal 2 tangan kesamping terbuka	165.64	13.98	60.60	196.50	152.50	167.30	178.00
15	Jengkal 2 tangan kesamping menggenggam	147.29	7.41	127.00	169.70	135.50	147.00	157.90
16	Jengkal 2 siku	84.25	6.07	56.50	99.00	73.00	84.60	93.00
17	Panjang telapak kaki	24.33	1.45	20.50	28.00	22.00	24.40	26.50
18	Lebar telapak kaki	10.45	0.76	8.40	13.00	9.30	10.50	11.50
Posisi Duduk								
19	Lebar telapak tangan	9.45	1.13	7.50	12.50	8.10	9.10	11.10
20	Panjang telapak tangan	18.33	4.80	8.20	71.90	16.40	18.00	20.00
21	Keliling genggaman tangan	26.71	1.75	21.50	31.00	23.60	27.00	29.20
22	Panjang ibu jari	6.74	4.80	5.20	63.00	5.60	6.20	7.20
23	Panjang jari telunjuk	9.04	7.54	6.00	97.00	6.60	8.80	9.90
24	Panjang jari tengah	9.41	1.35	6.50	12.00	7.20	9.80	11.20
25	Panjang jari manis	9.43	8.65	6.00	110.40	6.80	9.00	10.50
26	Panjang jari kelingking	6.98	1.04	4.70	9.10	5.20	7.00	8.50
27	Panjang jengkal tangan	20.28	1.90	9.20	24.40	17.50	20.50	23.00
28	Tinggi duduk	82.22	3.82	73.00	93.00	76.00	82.30	88.20
29	Tinggi mata	70.82	3.85	61.70	80.50	64.00	71.20	77.00
30	Tinggi bahu	56.23	3.67	48.40	78.20	50.40	56.10	60.80
31	Tinggi siku tangan	21.30	3.11	14.40	30.00	16.70	21.00	26.00
32	Jangkauan tangan keatas terbuka	125.40	6.74	105.40	153.40	114.20	125.40	135.60
33	Jangkauan tangan keatas menggenggam	115.04	6.65	91.90	133.40	105.00	114.30	126.80
34	Tinggi lutut	48.68	2.98	40.20	58.00	44.50	49.00	53.00
35	Tinggi lipatan lutut dalam	40.49	2.94	33.00	51.00	36.00	40.30	45.00
36	Jangkauan tangan kebawah terbuka	73.28	3.88	63.20	87.00	67.20	73.70	79.00
37	Jangkauan tangan kebawah menggenggam	62.43	3.88	53.00	73.10	56.00	62.00	69.20
38	Panjang lengan atas	30.74	3.00	21.20	36.50	26.00	31.00	35.00
39	Panjang lengan bawah terbuka	43.80	2.63	38.00	50.00	39.40	44.00	48.00
40	Panjang lengan bawah tergenggam	34.20	2.98	29.00	46.00	30.00	34.00	39.30
41	Jarak pantat lutut	53.28	3.06	45.60	60.00	48.10	53.50	58.00
42	Jarak pantat lipatan lutut dalam	43.58	3.33	36.00	51.00	37.90	43.40	49.00
43	Panjang leher	18.16	1.05	15.00	22.00	16.60	18.00	20.00
44	Lebar leher	16.12	1.25	14.00	20.00	14.60	15.90	19.00
45	Lebar bahu (biacromial)	31.22	5.81	21.00	86.00	23.00	31.40	35.50
46	Lebar bahu (bideltoid)	42.77	3.55	25.00	54.00	38.50	42.90	48.00
47	Lebar pinggul	31.88	2.61	26.00	38.40	28.00	32.00	35.90
48	Tebal dada	20.46	1.87	15.90	26.00	17.60	20.30	24.00

tujuan utama untuk mengetahui pola umum dan sekuensial dalam kerja pemanenan kelapa sawit. Kemudian pola dan sekuen tersebut di-dekomposisi menjadi elemen-elemen kerja untuk dapat dianalisis lebih detail dari segi gerak. Berdasarkan elemen-elemen kerja tersebut kemudian dianalisis kesesuaian, resiko maupun optimasi kerja panen dapat dilaksanakan.

Secara umum dapat disimpulkan adanya suatu "pola umum" sekuensial proses kerja pemanenan tandan buah segar (TBS) dari atas pohon hingga ke tempat pengumpulan hasil (TPH) dan satu siklus panen tersebut dapat didekomposisi menjadi 9 elemen kerja yang perpola dan berlaku secara umum serta satu elemen lain yang dinamakan "istirahat tersembunyi "(HR: *Hidden Rest*). Deskripsi elemen kerja pemanenan sawit disajikan pada Tabel 1.

Analisis Antrhopometri (Dimensi Tubuh) Pemanen

Dalam kajian ini, 48 parameter antrhopometri diambil secara acak dari 48 orang pemanen di SLS Riau, 43 orang pemanen di WKP Kaltim dan 50 orang pemenen di PKY Sulbar. Postur tubuh pemanen di ketiga lokasi adalah relatif ideal dan seragam. Tinggi badan rata-rata adalah 160 cm dan berat badan 55 kg. Koefisien keragaman untuk berat badan dan tinggi badan berturut-turut adalah sekitar 15% dan 5%. Rata-rata tinggi jangkauan tangan ke atas menggegam adalah 190 cm di SLS, 191.5 di WKP dan 195.5 di PKY. Ringkasan antropometri pemanen di masing-masing lokasi pada persentil 5, 50 dan 95 disajikan pada Tabel 2. Data anthropometri sangat penting untuk dijadikan dasar dalam mendesain alat, perlengkapan dan prosedur kerja agar kesesuaian produktivitas menjadi optimal.

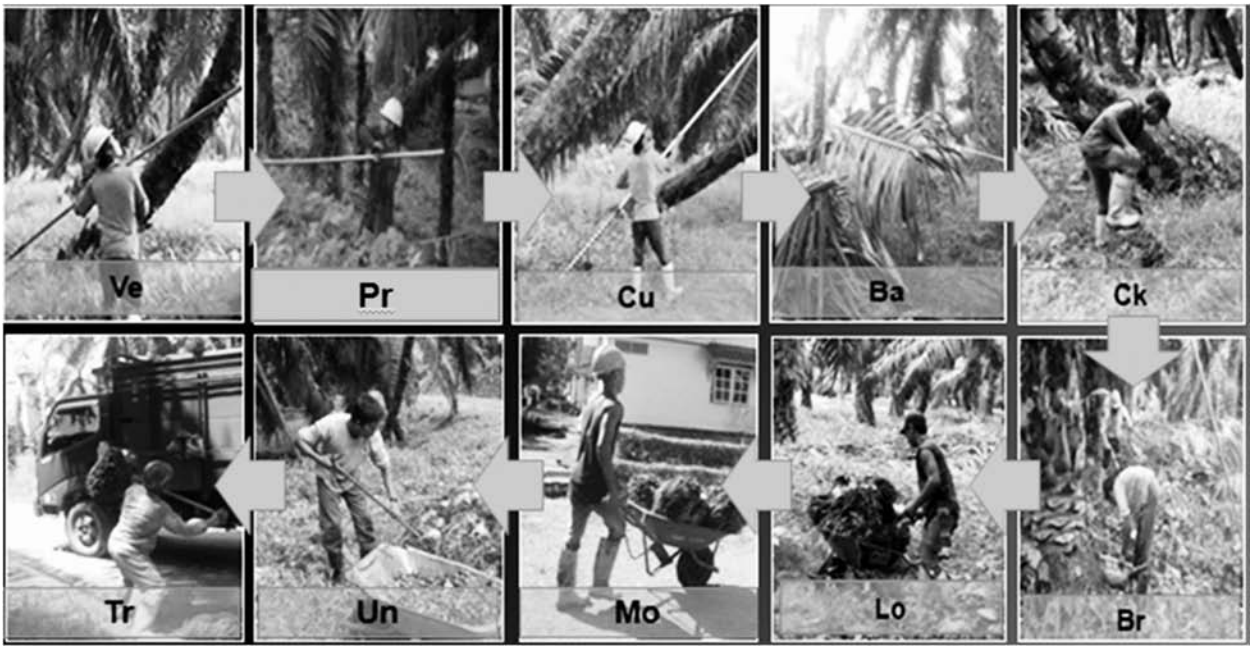
Studi/Analisis Gerak

Analisis atau studi gerak ini dilakukan dengan pendekatan *kinesiology* gerak kerja pemanenan dengan tolok ukur kesesuaian ataupun resiko gerak berdasarkan kriteria antropometri dan selang alami gerakan (SAG) tubuh. Analisis gerak kerja dimulai dengan mencermati rekaman video gerakan kerja oleh masing-masing subjek untuk masing-masing elemen kerja. Kemudian video tersebut di-*capture* menjadi segmen-segmen gerak untuk masing-masing ulangan data. Masing-masing segmen video tersebut diubah menjadi beberapa *frame* gerak yang mewakili sekuen yang ada. Contoh frame gerak untuk masing-masing elemen kerja dapat dilihat pada Gambar 2.

Berdasarkan hasil analisis gerak dan selang gerak alami (SAG) tiap elemen panen kelapa sawit secara keseluruhan, maka dapat dianalisis resiko ergonomi dalam aspek gerak kerja seperti yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 menjelaskan resiko gerak pada tiap-tiap segmen persendian secara akumulatif untuk masing-masing elemen kerja. Zona-0 (putih) dan zona-1 (hijau) merupakan zona yang aman untuk otot dan sendi subjek ketika bekerja; zona-2 (kuning) merupakan zona yang masih diperbolehkan namun dengan waktu yang singkat, beban tidak terlalu berat dan tidak terlalu repetitif, tetapi harus waspada dan berhati-hati untuk bekerja yang agak lama dan repetitive; sedangkan zona-3 (merah) merupakan zona yang seharusnya dihindari karena berbahaya untuk sendi dan otot (Openshaw 2006).

Mencermati hasil analisis dari perspektif ergonomi gerak, elemen-elemen kerja yang terkait evakuasi tandan buah segar (TBS) tergolong tidak terlalu beresiko dibanding elemen kerja yang terkait pemotongan TBS. Elemen kerja preparasi (Pr) dan



Gambar 2. Contoh frame gerak dan analisis gerak dari beberapa elemen kerja (Ve, Pr, Cu, Br, Ba, Ck,Lo, Mo, Un, Tr).

Tabel 3. Resiko Ergonomi dalam gerak kerja pada masing-masing elemen kerja pemanenan.

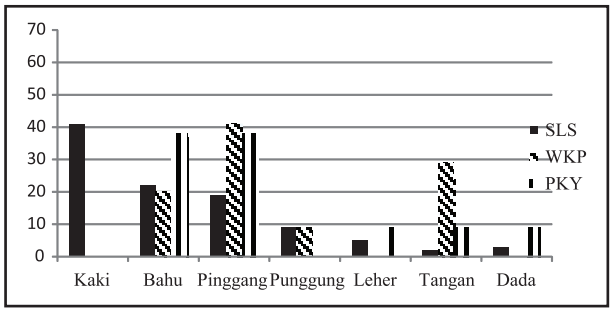
No	Elemen Kerja	NE	NF	BF	SF	AF	LE	LF	KF	AnF
1	Ve (Verifikasi)	3	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Pr(Preparasi)	3	-	2	3	2	-	1	2	3
3	CuD (Cutting dodos)	3	-	2	2	2	-	1	2	2
4	CuE (Cutting egrek)	3	-	2	3	3	-	1	2	3
5	Ba (Barking)	2	-	3	3	2	-	1	2	2
6	Ck (Cangkam Kodok)	3	-	3	3	2	-	2	2	-
7	Br (Berondolan):Jongkok	-	1	1	2	2	-	3	3	3
8	Br (Berondolan):Bungkuk	2	-	3	2	2	-	1	2	3
9	Lo (loading)	-	2	2	2	2	-	1	2	3
10	MoAT (moving angkong+tandan) dorong	2	-	2	1	1	-	-	2	-
11	MoAT (moving angkong+tandan) tarik	-	1	1	-	-	1	-	1	-
12	MoA (moving angkong) tarik	-	-	-	-	-	-	-	2	-
13	MoA (moving angkong) dorong	-	2	1	-	-	2	-	2	-
14	MoK (moving kosong)	-	2	1	-	1	-	1	2	-
15	MoT (moving tandan)	-	2	2	2	2	-	-	2	-
16	Un (unloading)	-	2	2	2	2	-	1	2	3
17	Tr (Trucking)	3	-	2	3	2	-	1	1	2

Ket. *: Zona 3 (bahaya),* *: Zona 2 (hati-hati)* *: Zona 1 (aman)* *: Zona 0 (normal)*

NE: neck extension, NF: neck flexion, BF: back flexion, SF: shoulder flexion, AF: arm flexion, LE: leg extension, LF: leg flexion, KF: knee flexion, AnF: ankle flexion

cutting-egrek (CuE) teridentifikasi sebagai pekerjaan yang paling beresiko dari sisi ergonomi gerak, dimana cidera akibat gerak beresko tinggi terjadi di sebagian besar segmen vital tubuh, yaitu leher (NE), punggung-pnggang (BF), bahu (SF), lengan (AF) hingga pergelangan kaki (AnF) sebagai tumpuan beban. Secara spesifik, elemen kerja memuat truk (*trucking*: Tr) beresiko tinggi pada leher (NE) dan bahu (SF) sedangkan pada pinggang-punggung (BF), lengan (AF) dan kaki (AnF) diperlukan kehati-hatian dalam melakukan gerakan kerja.

Melihat ketepatan pemahaman dari para pekerja sendiri, hasil analisis kuisioner sebagaimana disajikan pada Gambar 3, menunjukkan bahwa persepsi subjektif tentang bagian tubuh yang paling lelah tidaklah sepenuhnya sama. Walaupun demikian, sebagian besar pemanen menyatakan bahwa bagian tubuh yang paling lelah adalah pinggang dan bahu, lalu secara lokasional diikuti oleh kaki dan tangan. Secara umum, para pemanen memiliki persepsi yang benar tentang bagian tubuh yang paling beresiko, oleh karena itu dapat dijadikan modal dasar untuk melakukan intervensi ergonomi guna mengurangi resiko kerja yang sekaligus juga berarti meningkatkan produktivitas. Perbaikan prosedur kerja, penyempurnaan desain alat dan penggunaan perlengkapan/pakaian pelindung diri adalah tiga alternatif yang dapat dilakukan.



Gambar 3. Persepsi subjektif tentang bagian tubuh yang paling lelah berdasarkanhasil kuisioner 141 responden di SLS, WKP dan PKY.

Gerak Elemen Kerja Cutting dengan Egrek (CuE)

Penggunaan egrek jauh lebih dominan dibandinkan dodos untuk memanen secara umum. Egrek diunakan untuk memanen pohon > 3 m. Hasil analisis gerak membuktikan bahwa pemanenan dengan menggunakan egrek (CuE) relatif lebih sulit dan beresiko dibandingkan panen dengan dodos (CuD). Gambar 4 menunjukkan analisis selang alami gerak pada elemen kerja *cutting* dengan egrek saat gerakan posisi awal saat egrek sudah siap untuk ditarik yang berarti pisau egrek sudah dalam posisi mengait tandan kelapa sawit atau pelepah (a), gerakan menarik egrek yang pertama (b) dan yang terakhir adalah gerakan menarik egrek yang kedua sampai tandan kelapa sawit atau pelepah berhasil terpotong (c)

Gambar 4 merupakan contoh dari rangkaian gerakan *cutting* dengan menggunakan egrek pada lahan datar untuk tinggi target potong 3-6 m (E2) yang dilakukan oleh subjek C4. SAG maksimum untuk pengoperasian egrek pada gambar tersebut adalah 48 ekstensi leher (NE), fleksi punggung (BF) 9, fleksi lengan atas/ bahu (SF) 112, fleksi lengan bawah/

Tabel 4. Jarak aman yang terbentuk dari simulasi posisi dan gerak kerja yang aman untuk ketinggian target potong 3, 6, 12 dan 18 m.

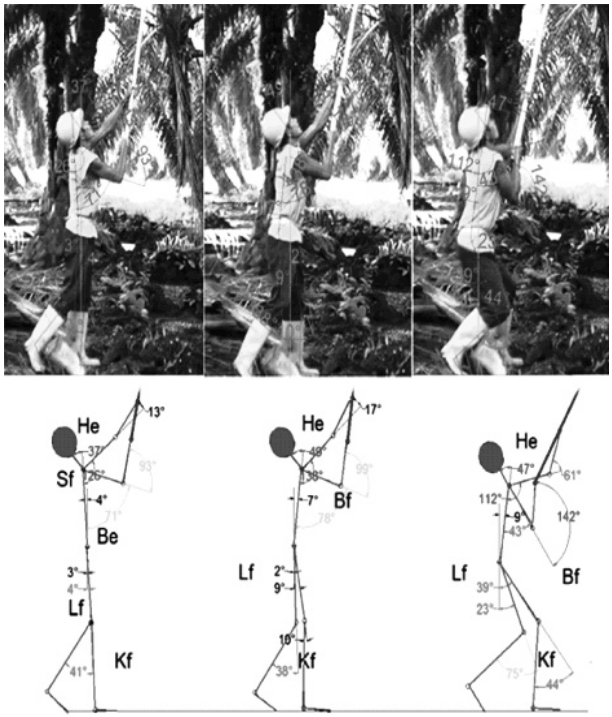
No	Tinggi Target Potong (*h*)	Tinggi Pemanen (*t*)	Sudut Antara Batang Egrek dan Pohon (°)	Jarak antara Pemanen dan Pohon (*d*)
1	3	1.3	26°	1.5
2	6	1.3	26°	2.5
3	12	1.3	26°	5.5
4	18	1.3	26°	8.5

[a]*Satuan panjang dalam m dan satuan sudut dalam derajat (°)*

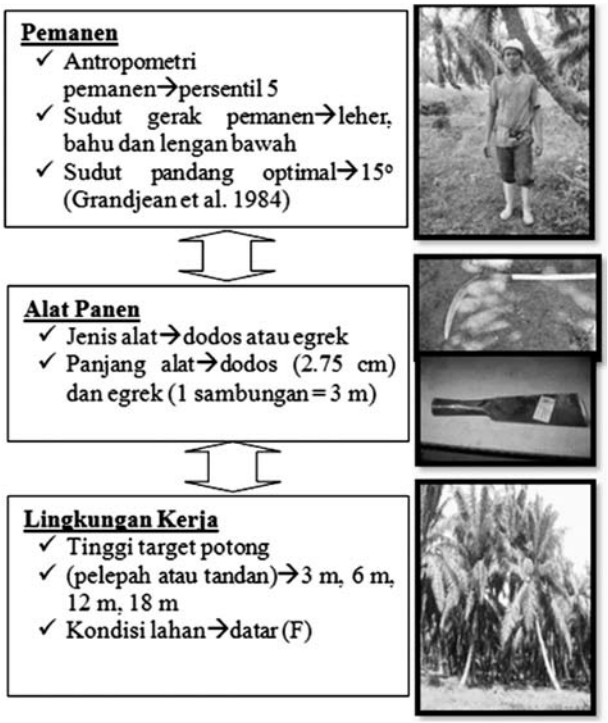
siku (AF) 142, fleksi tungkai (LF) 39 dan fleksi lutut (KF) 44. Dengan demikian, zona 3 (merah, bahaya) beresiko pada leher (NE), bahu (SF) dan lengan/ siku (AF). Zona 2 (kuning, hati-hati terjadi pada lutut (KF) sedangkan segmen tubuh lainnya relatif aman. *Cutting* egrek ini membutuhkan elemen kerja membutuhkan spesifikasi pekerja yang sekaligus memiliki keahlian (*skill*), pengalaman (*maturity*) dan tenaga (*power*). Ketiga spesifikasi tersebut sangat menentukan seberapa lama dan seberapa berat pekerjaan ini berlangsung, yang bearti pula akan menentukan resiko ergonomis yang mungkin mengikutinya. Oleh karena itu, prosedur kerja dan alat egrek (mata pisau maupun batang egrek) perlu didesain sedemikian rupa sehingga efektivitas kerja yang tetap tinggi dapat dilaksanakan dengan gerak kerja ergonomis dan aman. Dibandingkan dengan elemen kerja lainnya, *cutting* dengan menggunakan egrek memiliki karakteristik tekanan/kejut otot (*muscular impact*) yang relatif besar. Selain itu pekerjaan ini tergolong repetitif karena siklus tarikan egrek harus dilakukan beberapa kali. Oleh karena itu apabila gerakan dengan impak yang besar dan repetitif tersebut terjadi pada zona-3 (merah, bahaya) maka akibatnya akan menaikkan resiko sekaligus juga tingkat fasilitasnya (*risk fatality*). Oleh karena itu, Perlengkapan Pelindung Diri (PPD) patut digunakan terutama pelindung (decker) untuk siku dan bahu, serta penggunaan sepatu kerja yang tepat (*safety shoe* setinggi di atas mata kaki) dapat berfungsi melindungi sendi pergelangan kaki sekaligus juga kaki secara keseluruhan.

Jarak Kerja yang Aman

Pada kegiatan *cutting* dengan egrek, resiko ergonomi tergolong tinggi sehingga memerlukan perbaikan prosedur kerja. Salah satu perbaikan prosedur kerja yaitu dengan cara membuat simulasi jarak kerja yang aman sehingga menghasilkan panduan prosedur jarak pemanenan yang aman. Simulasi jarak kerja yang aman dibuat dari informasi tingkat dan distribusi resiko gerakan setiap bagian tubuh pemanen, model manekin pemanen dan data dimensi alat. Dalam pembuatan simulasi ini ditentukan parameter-parameter yang mengatur 3 unsur utama yang berpengaruh dalam ergonomi



Gambar 4. Tiga tahapan gerakan *cutting* dengan menggunakan egrek.



Gambar 5. Parameter simulasi jarak kerja yang aman.

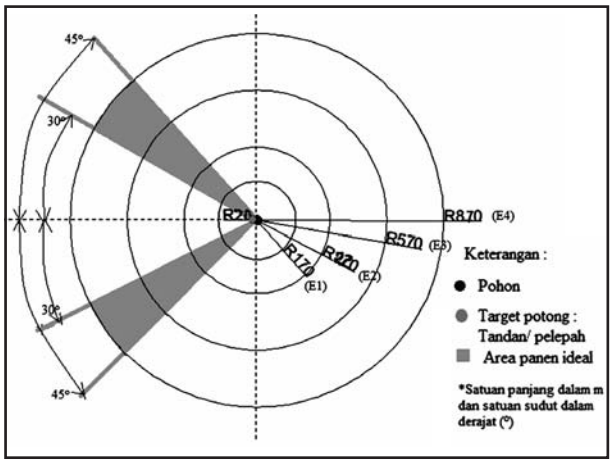
yaitu pengguna (*user*), alat dan lingkungan kerjanya. Parameter-parameter tersebut dijelaskan dalam Gambar 5.

Hasil simulasi jarak kerja yang aman untuk penggunaan egrek dapat dilihat pada Tabel 4. Jarak aman kerja juga menunjukkan radius kerja pemanen untuk setiap kategori tinggi pohon. Dalam simulasi yang dilakukan digunakan diameter pohon sawit yaitu 40 cm sebagai pusat area kerja. Jarak aman bagi pemanen agar sudut gerak kerjanya dibawah zona bahaya atau aman adalah 1.5 m, 2.5 m, 5.5 m, dan 8.5 m untuk tinggi maksimal target potong berturut-turut 3, 6, 12 dan 18 m. Radius jarak kerja pemanen untuk setiap kategori tinggi target potong dan posisi relatif pemanen terhadap target potong disajikan pada Gambar 6.

Simpulan

Kajian ergonomi terhadap aktivitas panen-muat sawit telah dilaksanakan dengan kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil analisis antrhopometri pemanen di tiga lokasi menunjukkan bahwa postur tubuh pemanen relatif ideal dan seragam. Tinggi badan rata-rata adalah 160 cm dan berat badan 55 kg dengan koefisien keragaman untuk berat badan dan tinggi badan berturut-turut adalah 5% dan 5%.
2. Hasil analisis gerak mikro (*micro motion analysis*) menunjukkan bahwa segmen-segmen tubuh yang terlibat secara intensif dalam aktivitas panen-muat adalah leher, bahu, punggung-pinggang, lengan, tangan, tungkai, lutut, kaki dan pergelangan kaki.
3. Tinjauan perspektif ergonomi gerak menunjukkan bahwa elemen kerja yang terkait evakuasi TBS tidak terlalu beresiko dibandingkangn elemen kerja yang terkait pemotongan TBS. Elemen kerja *cutting* egrek (CuE) teridentifikasi sebagai pekerjaan paling beresiko dari sisi ergonomi gerak, dimana segmen tubuh yang beresiko yaitu leher, bahu, punggung-pinggang, lengan hingga pergelangan kaki.
4. Jarak aman bagi pemanen agar sudut gerak kerjanya dibawah zona bahaya atau aman adalah 1.5 m, 2.5 m, 5.5 m, dan 8.5 m untuk tinggi maksimal target potong berturut-turut 3, 6, 12 dan 18 m.



Gambar 6. Radius jarak kerja pemanen untuk setiap kategori tinggi target potong dan posisi relatif pemanen terhadap target potong.

Saran

Perlu dilakukan tiga alternatif penyempurnaan metode panen muat yang meliputi perbaikan prosedur gerak kerja, penyempurnaan desain alat dan peggunaan perlengkapan alat pelindung diri untuk segmen tubuh yang beresiko seperti penggunaan *decker* untuk persendian punggung-pinggang, bahu, siku, *safety boots* untuk perlindungan pergelangan kaki dan dan *safety helmet* untuk perlindungan kepala dan leher.

Ucapan Terima Kasih

PT Astra Agro Lestari, Tbk atas segala bantuan dan fasilitas yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat dilakukan dengan baik dan lancar.

Daftar Pustaka

Barnes, R.M. 1980. Motion *and Time Study: Design and Measurement of Work*. [handbook, 7th ed.]. John Wiley & Sons. New York & Toronto.

Bridger, R.S. 2003. Introduction to Ergonomics. Taylor & Francis.London & New York.

[FAO] Food and Agriculture Organization. 2002. Small-Scale Palm oil processing in Africa. *Bulletin of FAO Agricultural Services*. Page 148 ISSN 1010-1365. Rome, Italy.

Hendra dan S. Rahardjo. 2009. Risiko Ergononomi dan Keluhan Musculoskeletal Disorders (MSDs) pada Pekerja Panen Kelapa Sawit. Prosiding Seminar Nasional Ergonomi IX. Halaman 27-32. Semarang.

Openshaw S., E. Taylor. 2006. *Ergonomics and Design A Reference Guide*. [e-book] Allsteel inc. [diunduh 20 Mei 2012]. Tersedia pada: http://www.allsteeloffice.com/ergo.

[PPKS] Pusat Penelitian Kelapa Sawit.2007. Budidaya Kelapa Sawit. Pusat Penelitian Kela Sawit. Jakarta

Syuaib, M.F, et.al. 2012. Kajian Ergonomi untuk Penyempurnaan Sistem & Produktivitas Kerja Panen-Muat Sawit di Kebun PT. Astra Agro Lestari. [Laporan Hasil Kajian]. Kerjasama PT. Astra Agro Lestari, Tbk dan Fakultas Teknologi Pertanian IPB.

Technical Paper

Prediksi Kandungan Kimia Mangga Arumanis selama Penyimpanan dengan Spektroskopi NIR

Arumanis Mango Chemical Contents Prediction during Storage using NIR Spectroscopy

Sri Agustina, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Email: sriagustina34@yahoo.com
Y. Aris Purwanto, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Email: arispurwanto@gmail.com
I Wayan Budiastra, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Email: wbudiastra@yahoo.com

Abstract

The various internal qualities attributes of fruits and vegetables were able to be predicted non-destructively by using near infrared spectroscopy techniques. The objective of this study was to develop a calibration model for prediction of starch content, soluble solids content and water content of mango fruit by using near infrared spectroscopy and chemometric. The reflectance spectra of mango fruit were obtained in the wavelength range from 1000 nm to 2500 nm. The effects of different pre-process methods and spectra treatments, such as smoothing 3 points (sa3), first derivative Savitzky-golay 9 points (dg1), and combination of smoothing 3 points (sa3) and first derivative Savitzky-golay 9 points (dg1) were analyzed. The prediction models were developed by partial least square regression (PLS). The results show that the correlation coefficient, standard error calibration and consistency for starch content of 0.95, 1.20% and 86.89% were achieved using pre-process of first derivatif Savitzky-golay 9 points; for soluble solid content of 0.90, 1.34^{o}Brix and 86.24% were achieved using combination of smoothing 3 points and first derivatif Savitzky-golay 9 point and for water content of 0.78, 0.850 % and 99.74% were achieved using smoothing 3 points. This showed the capability of near infrared spectroscopy and the important role of chemometric in developing accurate models for the prediction of internal quality characteristics of mango fruit.

Keywords: *near infrared spectroscopy, internal quality, chemometric, mango, non destructive*

Abstrak

Kualitas internal dari produk buah dan sayuran mampu dievaluasi dengan baik secara non destruktif menggunakan metode spektroskopi *near infrared*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan model kalibrasi untuk memprediksi kandungan pati, total padatan terlarut dan kadar air buah mangga selama penyimpanan menggunakan spektroskopi *near infrared* dan kemometrik. Spektra reflektan buah mangga diukur pada panjang gelombang 1000 nm sampai 2500 nm. Pengaruh metode pra-proses data yaitu penghalusan 3 titik, turunan pertama Savitzky-golay 9 titik, serta kombinasi penghalusan 3 titik dengan turunan pertama Savitzky-golay 9 titik terhadap ketelitian model kalibrasi juga dianalisis. Model prediksi dikembangkan dengan menggunakan regresi *partial least square* (PLS). Model prediksi dengan spektroskopi *near infrared* yang dikembangkan menghasilkan koefisien korelasi, *standard error calibration* (SEC) dan konsistensi untuk kandungan pati adalah 0.95, 1.20%, dan 86.89% yang diperoleh dari data pra-proses turunan pertama Savitzky-golay 9 titik, untuk total padatan terlarut, yaitu 0.90, 1.34^{o}Brix, dan 86.24% yang diperoleh dengan menggunakan kombinasi antara penghalusan 3 titik dan turunan pertama Savitzky-golay 9 titik, sedangkan untuk kadar air yaitu 0.78, 0.850%, dan 99.74% diperoleh dengan menggunakan penghalusan 3 titik. Dapat disimpulkan bahwa model prediksi spektroskopi *near infrared* untuk menduga kandungan internal dari buah mangga arumanis telah dikembangkan dengan baik.

Kata kunci: spektroskopi *near infrared*, kualitas internal, kemometrik, mangga, non destruktif

Diterima: 10 Desember 2014; Disetujui: 09 Maret 2015

Pendahuluan

Evaluasi kualitas dari sayur dan buah merupakan isu yang sangat penting di bidang industri pangan. Prediksi ketuaan dan kematangan buah merupakan bagian penting dari evaluasi kualitas yang tergantung dari beberapa faktor seperti kandungan pati, total padatan terlarut dan kadar air. Penentuan ketuaan dan kematangan buah didasarkan pada pengamatan secara visual, sementara untuk evaluasi kualitas internal seperti kadar pati dan kadar air menggunakan metode destruktif yang memerlukan biaya, waktu pengukuran dan melibatkan prosedur pengukuran yang rumit. Untuk itu, perlu dikembangkan suatu metode yang efisien dan non destruktif untuk mengevaluasi kualitas internal buah.

Menurut Saranwong (2004) yang melakukan penelitian hubungan kualitas panen dengan kualitas buah mangga saat dikonsumsi menyatakan bahwa kandungan pati saat dipanen sangat berpengaruh terhadap tingkat kemanisan (total padatan terlarut) pada buah saat dikonsumsi. Dengan demikian parameter kandungan pati saat dipanen sangat penting diketahui untuk memperoleh kualitas buah saat dikonsumsi. Tetapi, untuk mengetahui kandungan pati saat panen biasanya dilakukan dengan cara destruktif (metode konvensional) dengan analisa laboraturium sehingga kurang sesuai untuk penanganan pasca panen buah segar yang memerlukan waktu analisis yang cepat dan tanpa merusak produk.

Kemometrik merupakan pengaplikasian matematika, prosedur statistik untuk pengolahan data dan evaluasi serta interpretasi data dengan jumlah yang besar. Kemometrik berfungsi untuk mencari korelasi statistik yang baik antara data spektra dengan data parameter kimia yang melibatkan pra-proses data serta berbagai prosedur untuk proses pengembangan model.

Spektroskopi *near infared* merupakan metode non destruktif yang cepat, mudah digunakan (Day dan Fearn 1982). Salah satu keuntungan dari spektroskopi *near infared* adalah dapat menganalisis lebih dari satu parameter kualitas secara bersamaan. Spektroskopi *near infared* telah digunakan untuk memprediksi kualitas internal dari buah seperti apel (Fan *et al*. 2009); buah pir (Nicolai *et al*. 2008); buah kiwi (Clark *et al*. 2004); peach (Carlomagno *et al*. 2004; Golic dan Walsh 2006); tomat (Pedro dan Ferreira 2005; Shao *et al*. 2007) dan buah alpukat (Clark *et al*. 2003). Pendugaan kualitas mangga untuk varietas Gedong gincu selama penyimpanan telah dilakukan oleh Purwanto *et al.* (2013a) untuk parameter pH dengan nilai koefisien korelasi 0.9042 dan *standard error prediction* (SEP) 0.12. Selanjutnya Purwanto *et al.* (2013b) menduga secara simultan kandungan bahan terlarut, kekerasan dan pH yang dikaitkan dengan periode waktu konsumsi mangga yang paling optimum. Nilai koefisien korelasi dari model prediksi yang dikembangkan dihasilkan masing-masing untuk kandungan bahan terlarut, pH dan kekerasan adalah 0.756, 0.94 dan 0.89.

Peralatan spektroskopi *near infared* telah dikembangkan untuk merespon kebutuhan analisis yang cepat dan sesuai dengan bentuk sampel yang berbeda. Meskipun telah mengalami perkembangan, spektroskopi *near infared* modern menghasilkan spektra dalam jumlah yang besar sehingga banyak mengandung *noise* dan dipengaruhi oleh jumlah variabel fisik, kimia dan struktur sampel. Hal ini menyebabkan terjadinya kesulitan dalam membedakan spektra (Blanco and Villarroya 2002). Spektra *near infared* mempunyai rentang yang besar dan bertumpuk, sehingga tidak mungkin dilakukan evaluasi hanya dengan melihat grafik panjang gelombangnya. Pada teknologi spektroskopi *near infared*, analisis kemometrik memainkan peranan yang penting dalam menganalisis spektra yang tumpang tindih. *Partial Least Square* (PLS) merupakan teknik kemometrik yang dapat menganalisis informasi besar yang tersembunyi dalam data spektra. PLS digunakan untuk memperkirakan serangkaian peubah tidak bebas (respon) dari peubah bebas (prediktor) yang jumlahnya sangat banyak, memiliki struktur sistemik linier atau nonlinier dengan atau tanpa data yang hilang dan memiliki kolinearitas yang tinggi. Metode PLS membentuk model dari peubah-peubah yang ada untuk membentuk serangkaian respon dengan menggunakan regresi kuadrat terkecil dalam bentuk matriks.

Data spektra yang diperoleh dari spektrometer *near infared* tidak hanya mengandung informasi sampel akan tetapi juga mengandung informasi latar belakang dan *noise* (Cen dan He 2007), oleh karena itu perlu dilakukan pra-proses sebelum membangun model kalibrasi. Pra-proses merupakan suatu langkah transformasi data untuk memperbaiki spektrum yang kurang baik akibat pembauran cahaya saat akuisisi data *near infared*, *noise*, gangguan dari lingkaran luar serta masalah lainnya sehingga menyebabkan informasi yang terkandung dalam spektrum menjadi sulit untuk ditelaah. Berbagai jenis pra-proses yang biasa dimanfaatkan dalam pengolahan data NIR spektroskopi diantaranya *first derivative Savitsky Golay 9 points* (dg1) and *smoothing 3 points* (sa3). Puncak dan lembah spektra akan menjadi jelas dengan menggunakan dg1 dibandingkan dengan spektra asli (Cen dan He 2007). Meskipun penelitian *near infared* untuk buah-buahan sudah banyak dilakukan, namun penelitian *near infared* untuk prediksi kandungan kimia mangga arumanis belum dilakukan. Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji penggunakan spektroskopi *near infared* dan kemometrik untuk memprediksi kandungan kimia mangga 'Arumanis' selama penyimpanan menggunakan metode PLS.

Bahan dan Metode

Persiapan Bahan

Bahan penelitian berupa mangga 'Arumanis' berasal dari kebun di Indramayu, Jawa Barat dengan umur panen 105, 98, 91 dan 84 hari. Pengelompokan umur panen ditentukan dari indeks panen secara visual berdasarkan pengalaman operator panen mangga 'Arumanis' dengan pertimbangan tujuan pasar. Proses pemanenan mangga dilakukan pada pagi hari, selanjutnya sampel buah mangga dibungkus dengan koran dan disusun ke dalam kardus yang telah dilubangi setiap sisinya. Sampel buah mangga diangkut ke Laboratorium menggunakan transportasi darat pada kondisi suhu ruang dengan waktu perjalanan 8 jam. Setelah sampai di Laboratorium, buah mangga diletakkan di suhu ruang dan dilakukan sortasi untuk memilih sampel yang baik untuk masing-masing kelompok umur panen. Untuk masing-masing kelompok umur panen digunakan 20 sampel buah mangga yang dibagi menjadi 4 untuk sampel pengukuran spektra dan pengukuran parameter kualitas secara destruktif pada hari penyimpanan ke 0, 3, 6 dan 9.

Akuisisi Data Spektrum NIR

Reflektan NIR pada buah mangga diukur di 3 titik yang berbeda sebanyak 1 ulangan, dengan menggunakan spektrometer NIRFlex N-500, *fiber optik solid* dengan panjang gelombang 1000-2500 nm dengan interval 0.4 nm. Pengukuran dilakukan pada kondisi suhu ruang (25°C). Prinsip pengukuran spektra adalah menembakkan cahaya dari lampu halogen ke sampel. Sebagian energi yang dipantulkan akan diterima oleh detektor sebagai data frekuensi getaran dan ditransformasikan dengan metode *fourier* menjadi grafik dan reflektan (R) menjadi absorban (log 1/R). Data reflektan yang telah diukur disimpan dalam database NIR*Cal* 5.2 yang merupakan program olah data yang terintegrasi dengan spektrometer NIR*Flex* N- 500.

Pengukuran Parameter Kimia

Pengukuran parameter kualitas secara destruktif terdiri dari kandungan pati, TPT (total padatan terlarut), dan kadar air. Pengukuran kandungan pati (Kim *et al.* 2003) dilakukan dengan mengambil daging buah sekitar 1g, kemudian dibekukan dan dilakukan homogenisasi dengan menambah 10 ml air. Padatan tersuspensi disaring dengan filter Millipore "Biomax-10" (10.000 batas nominal berat molekul) pada 5000g, selama 90 menit. Kemudian diinjeksikan alikuot 10 µL ke kromatografi (HPLC). TPT diukur menggunakan alat *refractometer*. Bahan terlebih dahulu dihaluskan dengan cara ditumbuk. Setelah itu, cairan dari sampel yang telah ditumbuk diletakkan diatas obyek gelas yang terdapat pada alat sehingga total padatan terlarut dapat terbaca langsung pada *display* dalam satuan ^{O}Brix. Pengukuran kadar air sampel mangga arumanis dilakukan dengan menggunakan metode pengeringan (*thermogravitimetri*) berdasarkan SNI 01-3751-2006. Pengukuran kadar air dilakukan dengan oven pada suhu 105°C selama 26 jam.

Pra-Proses Data

Pada penelitian ini spektra *near infared* diolah dengan menggunakan pra-proses penghalusan setiap 3 titik (sa3), derivatif pertama Savitzky-golay 9 titik (dg1), dan kombinasi penghalusan setiap 3 titik dengan derivatif pertama Savitzky-golay 9 titik (sa3 dan dg1). Selanjutnya dilakukan kalibrasi dan validasi dengan kandungan kimia kandungan pati, TPT dan kadar air menggunakan PLS. Pra-proses dg1 merupakan metode untuk menghitung turunan orde pertama dan orde yang lebih besar yang meliputi faktor *smoothing* didalamnya, sehingga dapat menentukan seberapa besar variabel yang berdekatan untuk memprediksi pendekatan polinomial pada suatu turunan (Karoui *et al.* 2006). Sa3 berfungsi untuk memilih penghalusan fungsi dengan teliti tanpa menghilangkan informasi spektrum yang ada, mengurangi guncangan (noise), dan memperkecil galat (kekeliruan) yang terjadi selama pengukuran *near infared* dan analisis kimia laboratorium (Tiaprasit dan Sangpithukwong 2010). Kombinasi sa3 dan dg1 dapat diterapkan untuk mendapatkan bentuk dan model persamaan regresi kalibrasi yang optimum, layak, dan dapat dipercaya. (Blanco dan Villaroya 2002).

Model Kalibrasi dan Validasi

Tahap kalibrasi dilakukan untuk menentukan prediksi antara komposisi kimia mangga arumanis dengan data reflektan *near infared* dengan menggunakan metode PLS. Setelah diperoleh model persamaan regresi kalibrasi, selanjutnya dilakukan tahap validasi dengan menggunakan data yang lain. Data sampel yang berbeda tersebut dimasukkan ke dalam persamaan regresi kalibrasi, sehingga diperoleh data kandungan pati, totak padatan terlarut dan kadar air mangga arumanis dugaan *near infared*. Validasi bertujuan untuk menguji ketepatan pendugaan komposisi kimia dengan persamaan regresi kalibrasi yang telah dibangun. Parameter statistik yang digunakan untuk mengevaluasi model yang dihasilkan adalah *coefficient of determination* (R^2), *standard error of calibration set* (SEC), *standard error of validation set* (SEP), *coefficient of variation* (CV), *ratio prediction to deviation* (RPD) dan nilai konsistensi (Williams and Norris 2001, Saputra et al, 1995). Hasil kalibrasi dan validasi yang baik dilihat dari nilai R^2 yang terbesar, nilai SEC dan SEP terkecil, CV terkecil, sedangkan nilai konsistensi model berada pada kisaran 80-110% serta nilai RPD terbesar.

Tabel 1. Deskripsi statistik kandungan kimia berdasarkan pra-proses data menggunakan PLS.

Kandungan kimia		R^2	SEC	SEP	CV(%)	RPD	Konsistensi(%)
Kandungan Pati (%)	sa3	0.94	1.32	1.60	18.20	3.01	82.35
	dg1	**0.95**	**1.20**	**1.38**	**15.73**	**3.48**	**86.89**
	sa3 dan dg1	0.94	1.24	1.39	15.42	3.41	88.47
TPT (°Brix)	sa3	0.89	1.37	1.68	11.39	2.16	81.59
	dg1	0.90	1.31	1.59	10.78	2.28	82.49
	sa3 dan dg1	**0.90**	**1.34**	**1.55**	**10.50**	**2.34**	**86.24**
Kadar Air)%)	**sa3**	**0.78**	**0.850**	**0.853**	**1.04**	**2.11**	**99.74**
	dg1	0.74	0.91	1.06	1.30	1.97	85.95
	sa3 dan dg1	0.73	0.94	1.03	1.26	1.91	91.56

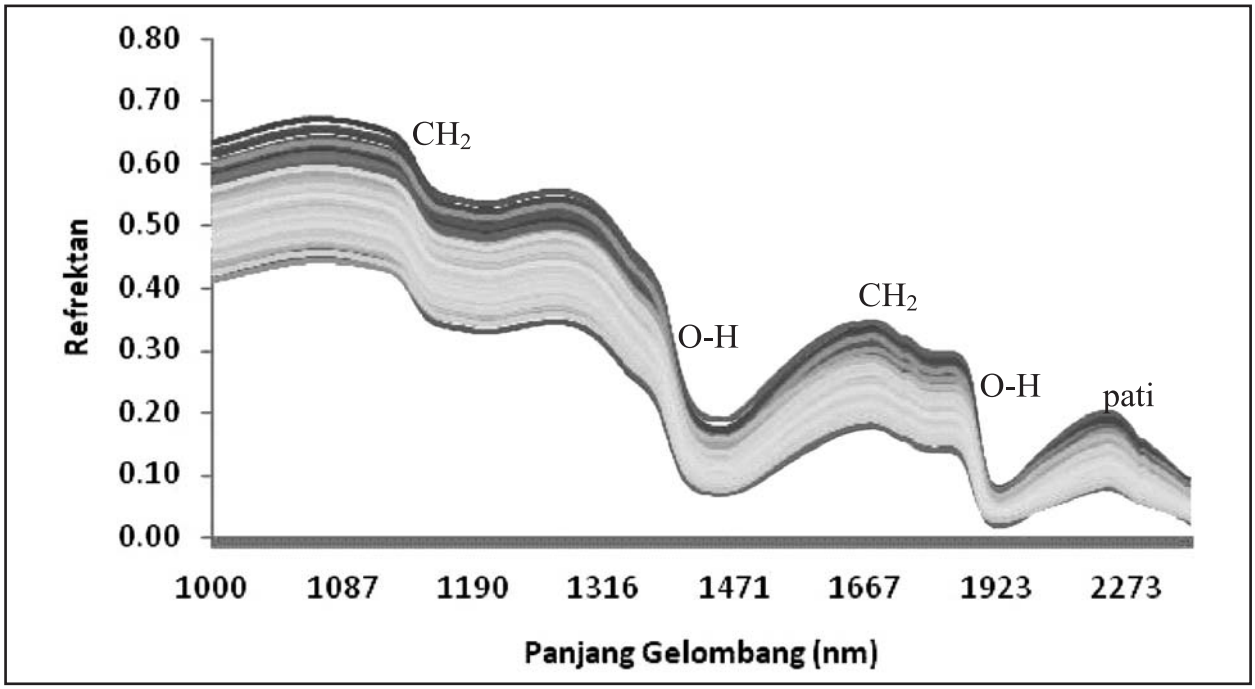
Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Spektra NIR Mangga Arumanis

Karakteristik *spektra* reflektan mangga 'Arumanis' ditunjukkan pada pada Gambar 1. Reflektan mangga 'Arumanis' berkisar antara 0.02 sampai 0.68. Semakin tinggi kadar air maka absorbsi semakin tinggi dan sebaliknya reflektan semakin kecil. Ikatan hidrogen karena atom hidrogen merupakan atom yang paling kuat menyerap gelombang NIR (Hruschka 1990). Ikatan hidrogen ini dapat berupa ikatan C–H, N–H, S–H atau O–H. Tiga lembah penyerapan yang terjadi pada panjang gelombang 1180 nm, 1411 nm dan 1888 nm menunjukkan adanya kandungan air (Louw dan Theron 2010). Lembah penyerapan ini terjadi karena terdapat ikatan O-H (O–H *str first overtone*) pada panjang gelombang tersebut (Osborne *et al*. 1993). Lembah penyerapan juga terjadi pada panjang gelombang 1756 - 1780 nm, dimana ikatan atom C–H pada panjang gelombang tersebut menunjukkan adanya kandungan CH_2 dan selulosa. Kandungan pati terdapat pada panjang gelombang 1450 nm, 2461 nm, 2488 nm dan 2500 nm. Kandungan pati pada panjang gelombang 1450 nm ini sulit terlihat karena saling berhimpit dengan kandungan air pada panjang gelombang yang sama, kandungan pati ini memiliki ikatan O–H. *str first overtone* (Osborne *et al*. 1993).

Pengaruh Pra-proses Data terhadap Kalibrasi dan Validasi

Tabel 1 menunjukkan pengaruh pra-proses terhadap model kalibrasi yang dihasilkan. Data yang ditunjukkan pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa pra-proses bertahap tidak selalu lebih baik dibandingkan pra-proses tunggal. Hal ini disebabkan karena komposisi bahan berpengaruh terhadap ketepatan jenis pra-proses yang digunakan. Dapat ditunjukkan bahwa pra-proses dg1 mampu



Gambar 1. Spektrum reflektan NIR mangga arumanis.

menghasilkan model PLS kandungan pati yang baik dibandingkan sa3 atau kombinasi sa3 dan dg1. Penggunaan kombinasi sa3 dan dg1 lebih tepat digunakan dalam mengembangkan model PLS untuk parameter TPT. Sedangkan pra-proses sa3 baik digunakan dalam pengembangan model PLS untuk kadar air.

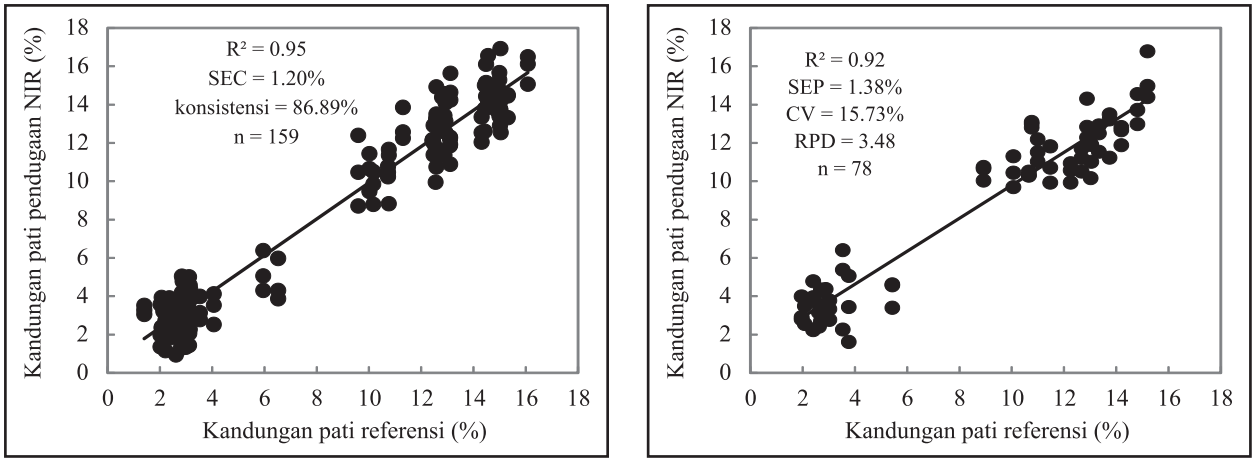
Model Kalibrasi dan Validasi Kandungan Kimia dengan NIR menggunakan PLS

Data yang terukur pada *software* NirCal dibagi 2/3 menjadi set kalibrasi dan 1/3 data menjadi set validasi dengan total jumlah data yang tersimpan sebanyak 237 buah. Kandungan pati terus berkurang selama proses pematangan, hal ini disebabkan karena ukuran granula pati yang ada di dalam kloroplas mengecil. Gambar 2 menunjukkan sebaran data yang dihasilkan menggunakan pra-proses dg1 yang memiliki rentang cukup besar yaitu antara nilai 2 hingga 16.

Deskripsi statistik untuk kandungan pati pada Tabel 1 menunjukkan bahwa model PLS yang dikembangkan dengan menggunakan beberapa pra-proses mampu menghasilkan R^2 diatas 0.9, SEC dan SEP yang kecil, CV yang memenuhi standar, nilai RPD diatas 2, serta konsistensi yang baik. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa model yang dikembangkan menghasilkan model yang sudah baik. Dari seluruh pra-proses yang digunakan, pra-proses dg1 adalah yang terbaik dengan nilai R^2, SEP, CV, dan RPD sebesar 0.95, 1.38%, 15.73% dan 3.48.

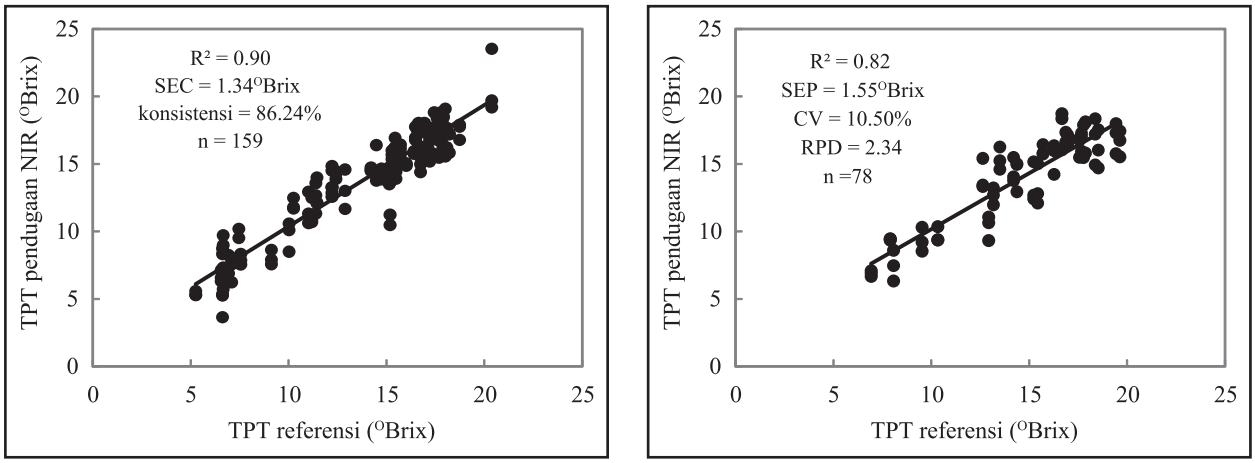
Penggunaan pra-proses dg1 lebih efektif dibandingkan pra-proses lainnya. Hal ini disebabkan karena spektra original dengan informasi kandungan pati yang tertutup dapat dimunculkan dengan dg1. Penggunaan pra-proses sa3 berfungsi untuk menghaluskan spektra, sehingga tidak tepat untuk memunculkan informasi pada spektra yang tertutup. Untuk pra-proses kombinasi sa3 dan dg1 juga tidak sebaik pra-proses tunggal dg1, hal ini disebabkan karena pada penggunaan pra-proses sa3 dilakukan perhitungan rata-rata pada spektra yang justru menutupi informasi pati yang ada.

Gambar 3 menunjukkan sebaran data yang merata dari nilai 5 hingga 20 baik pada set data



a. Kalibrasi b. Validasi

Gambar 2. Hasil kalibrasi dan validasi untuk kandungan pati.



a. Kalibrasi b. Validasi

Gambar 3. Hasil kalibrasi dan validasi untuk total padatan terlarut.

kalibrasi maupun validasi. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi data kedua set baik dan mampu menghasilkan model PLS yang baik pula. Deskripsi statistik TPT pada Tabel 1 menunjukkan bahwa penggunaan beberapa pra-proses menghasilkan nilai parameter yang baik, sehingga dapat dikatakan bahwa model yang dikembangkan sudah baik. Dari seluruh pra-proses, kombinasi sa3 dan dg1 adalah yang terbaik dibandingkan dengan pra-proses tunggal sa3 ataupun dg1. Kombinasi sa3 dan dg1 menghasilkan nilai R^2, SEP, CV, dan RPD sebesar 0.90, 1.55ºBrix, 10.50% dan 2.34. Penggunaan kombinasi sa3 dan dg1 lebih tepat digunakan dibandingkan pra-proses lainnya. Hal ini disebabkan karena spektra yang mengandung infromasi TPT tertutupi dan terdapat *noise*, selain itu data destrukrif yang didapat terdapat kesalahan yang dapat diperbaiki dengan kombinasi sa3 dan dg1.

Hasil deskripsi statistik kadar air pada Tabel 1 menunjukkan bahwa tidak semua penggunaan pra-proses menghasilkan parameter nilai statistik yang baik. Penggunaan pra-proses dg1 serta kombinasi sa3 dan dg1 menunjukkan bahwa model PLS yang dihasilkan tidak baik. Sebaliknya pada saat ditambahkan pra-proses sa3 dapat menghasilkan nilai R^2, SEP, CV, dan RPD masing-masing sebesar 0.78, 0.853%, 99.74%, dan 2.11, dimana nilai-nilai tersebut menunjukkan model PLS yang dikembangkan sudah baik. Jika dilihat dari pra-proses yang digunakan, spekra yang memuat informasi kadar air tidak tertutup oleh spektra lainnya, namun penggunaan pra-proses sa3 ini menunjukkan bahwa pengujian desktruktif kadar air masih perlu diperbaiki. Gambar 4 menunjukkan rentang data yang dihasilkan merata antara 77 hingga 89. Meskipun nilai-nilai parameter uji statistik yang dihasilkan tidak sebaik kandungan pati atau TPT, model yang sudah dibangun masih dapat digunakan untuk memprediksi kadar air.

Simpulan

Spektra original mangga 'Arumanis' menunjukkan adanya lembah di panjang gelombang kisaran 1180 nm, 1411 nm, 1756 - 1780 nm, dan 2461 nm yang mengindikasikan ikatan kimia CH_2, O-H dan pati. Metode *near infrared* dengan PLS dan pra-proses dg1 mampu memprediksi kandungan pati dengan nilai R^2, SEC, dan konsistensi sebesar 0.95, 1.20%, dan 86.89%. Pendugaan total padatan terlarut terbaik didapatkan dengan pra-proses kombinasi sa3 dan dg1 yang menghasilkan nilai R^2, SEC, dan konsistensi sebesar 0.90, 1.34ºBrix, dan 86,24%. Pendugaan kadar air terbaik didapatkan dengan pra-proses sa3 yang menghasilkan nilai R^2, SEC, dan konsistensi sebesar 0.78, 0.850%, dan 99.74%.

Ucapan Terima Kasih

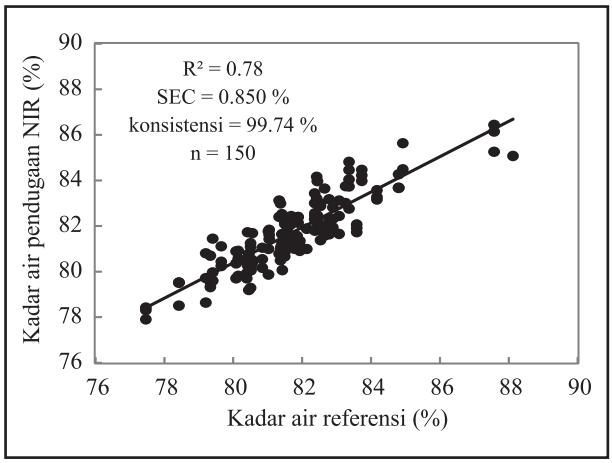
Penelitian ini merupakan bagian dari skema penelitian Hibah Penelitian Kerjasama Luar Negeri dan Publikasi Internasional, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Indonesia No 13/IT3.11/LT/2014.

Daftar Pustaka

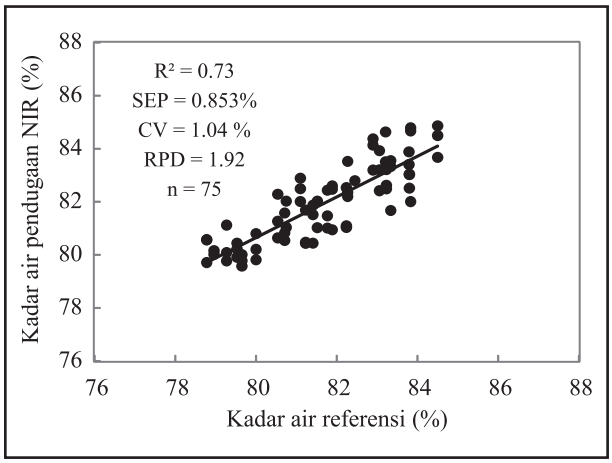
Blanco, M., I. Villarroya. 2002. NIR spectroscopy: a rapid-response analytical tool. *Trends in Analytical Chemistry.* 21: 240-250.

Carlomagno, G., L. Capozzo, G. Attolico, D. Aistante. 2004. Non-destructive grading of peaches by near-infrared spectrometry. *Infrared Physics Technology*. 46: 23-29.

Cen, H., Y. He. 2007. Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. *Trends in Food Science Technology*. 18: 72-83.



a. Kalibrasi



b. Validasi

Gambar 4. Hasil kalibrasi dan validasi untuk kadar air.

Clark, C.J., V.A. McGlone, H.N. De Silva, M.A. Manning, J. Burdon, A.D. Mowat. 2004. Prediction of storage disorders of kiwifruit (Actinidia chinensis) based on visible-NIR spectral characteristics at harvest. *Postharvest Biology and Technology*. 32: 147-158.

Clark, C.J., V.A. McGlone, C. Requejo, A. White, A.B. Woolf. 2003. Dry matter determination in 'Hass' avocadoby NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*. 29: 301-308.

Day, M.S., F.R.B. Fearn. 1982. Near Infrared reflectance as an analytical technique, part 1. *History and development. Laboratory Practice*. 31: 328-330.

Fan, G., J. Zha, R. Du, L. Gao. 2009. Determination of soluble solids and firmness of apples by Vis/NIR transmittance. *Journal of Food Engineering*. 93: 416-420.

Golic, M., K.B. Walsh. 2006. Robustness of calibration models based on near infrared spectroscopy for the in-line grading of stone fruit for total soluble solids content. *Analytica Chimica Acta*. 555: 286-291.

Hruschka, W.R. 1990. Data Analysis: Wavelength Selection Methods. Di dalam: Williams P, Norris K, editor. *Near Infrared Technology in The Agricultural and Food Industries*. Ed. Ke-2. St.Paul, Minnesota, USA.

Karoui, R., A.M. Mouazen, E. Dufour, L. Pillonel, E. Schaller, J.D. Baerdemaeker, J.O. Bosset . 2006. Chemical Characterisation of European Emmental Cheeses by Near Infrared Spectroscopy Using Chemometric Tools. *International Dairy Journal*. 16(1): 1211-1217.

Kim, S.K., J.E. Kwak, W.K. Kim. 2003. A simple method for estimationof enzyme-resistant starch content. Starch. 55: 366-368.

Louw, E.D., K.I. Theron. 2010. Robust Prediction Models for Quality Parameters in Japanese Plums (Prunus salicina L.) Using NIR Spectroscopy. *Postharvest Biol. And Tech*. 58: 176-184.

Nicolai, B.M., B.E. Verlinden, M. Desmet, Saevels S, Saeys W, Theron K, R. Cubeddu, A. Pifferi, A. Torricelli. 2008. Time-resolved and continuous wave NIR reflectance spectroscopy to predict soluble solids content and firmness of pear. *Postharvest Biologyand Technology*. 47: 68-74.

Osborne, B.G., T. Fearn, P.H. Hindle, D. Browning. 1993. Practical NIR Spectroscopy in Food and Baverage Analysis. Ed ke-2. Longman Scientific Technical, New York.

Pedro AMK, Ferreira MMC. 2005. Nondestructive determination of solids and carotenoids in tomato products by near-infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Analytical Chemistry*. 77: 2505-2511.

Purwanto, Y.A. P.W. Zainal, U. Ahmad, S. Mardjan, Y. Makino, S. Oshita, Y. Kawagoe and S. Kuroki. 2013a. Non Destructive Prediction of pH in Mango Fruits cv. Gedong Gincu Using NIR Spectroscopy. *International Journal of Engineering & Technology* Vol 13 Issue 3. pp. 70-73.

Purwanto, Y.A., P.W. Zainal, Sutrisno, U. Ahmad, Y. Makino, S. Oshita, Y. Kawagoe and S. Kuroki. 2013b. Non destructive prediction of ripe-stage quality of mango fruit cv 'Gedong Gincu'stored in low temperature by NIR Spectroscopy. Proceeding of the International Symposium on Agricultural and Biosystem Engineering -ISABE-2013, Yogyakarta, Indonesia

Saranwong, S., J. Sornsrivichai, S. Kawano. 2004. Prediction of ripe stage eating quality of mango fruit from its harvest quality measured nondestructively by near infrard spectroscopy. Vol 31: 137-145.

Shao, Y., Y. He, A.H. Gomez, A.G. Pereir, Z. Qiu, Y. Zhag. 2007. Visible/near infrared spectrometri ctechnique for nondestructive eassessment of tomato 'Heatwave' (Lycopersicumesculentum) quality characteristics. *Journal of Food Engineering*. 81: 672-678.

Tiaprasit, W., C. Sangpithukwong. 2010. BUCHI NIRFlex N-500 *Training Course.* BUCHI NIR Application Support, Bangkok, Thailand.

Technical Paper

Perancangan Kemasan Transportasi Buah Jambu Air (*Syzygium aqueum)* cv Camplong

Design of Packaging for Transportation of Jamboo cv Camplong (Syzygium aqueum)

Iswahyudi, Mahasiswa Pascasarjana P.S. Teknologi Pascapanen, Insitut Pertanian Bogor.
Email : wahyu44.bofas@gmail.com
Emmy Darmawati, Staf Pengajar Teknologi Pascapanen, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
Email : darmawatihandono@gmail.com
Sutrisno, Staf Pengajar Teknologi Pascapanen, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
Email : kensutrisno@yahoo.com

Abstract

Jamboo cv Camplong was an exotic fruit from Sampang Indonesia which had high economic values. The quality of fresh Jamboo was greatly influenced by the types of packaging and ways of its transportation that affected its shelf life. The purpose of this research were designing a primary packaging and analyzing the quality of Jamboo cv Camplong after short transportation (from Sampang to Surabaya). Farmers used conventional packaging with capacity of 8.4 kg/box (dimension 478 mm x 146 mm x 354 mm). Based on theoretical packaging design showed that the flute BC cardboard (capacity 4.5 kg/box, dimension 357 mm x 217 mm x 216 mm) with partition flute A cardboard. In fact, there was needed modification of the dimension (342 mm x 210 mm x 200 mm) because of the fruits diameter (60-65 mm). This result did not change the efficiency usage of transportation space (91-95%) and compression strength of box can support (7 boxes/ stack). The result showed that the mechanical damage after transportation were 20.87% for conventional packaging (as control) and 7.70% for modification packaging design (packaging with partition).

Keywords: *Jamboo cv Camplong, packaging, transportation.*

Abstrak

Jambu air camplong merupakan salah satu buah lokal yang menjadi unggulan dan memiliki nilai ekonomi. Terdapat kerusakan buah yang cukup tinggi saat buah di transportasikan dari Sampang ke Surabaya dikarenakan cara kemasan dan penanganan (*handling*) yang kurang tepat. Pengemasan yang tepat serta transportasi yang baik menjadi titik kritis pascapanen buah untuk menjaga kesegaran buah saat didistribusikan hingga ke konsumen. Tujuan penelitian ini adalah merancang kemasan primer untuk transportasi buah jambu air camplong dan mengkaji kerusakan buah pasca transportasi. Secara teoritis hasil rancangan kemasan menggunakan karton gelombang flute BC berkapasitas 4.5 kg per kemasan, mempunyai dimensi 357 mm x 217 mm x 216 mm dengan partisi antar buah berupa karton flute A. Dalam penerapanya dilakukan penyesuaian dimensi menjadi 342 mm x 210 mm x 200 mm karena buah yang didapat saat penelitian pada kisaran 60-65 mm, hasil ini tidak merubah efisiensi penggunaan ruang angkut (91-95%) dan kekuatan kemasan untuk menahan 7 susunan kemasan dalam transportasi. Sebagai kontrol digunakan kemasan karton dari petani dengan kapasitas 8.4 kg dimensi 478 mm x 146 mm x 354 mm. Kerusakan mekanis yang terjadi pasca transportasi adalah 20.87% untuk jambu pada kemasan kontrol (petani), dan 7.70% pada kemasan hasil rancangan bersekat.

Kata Kunci: Jambu air Camplong, pengemasan, transportasi.

Diterima: 18 Desember 2014 ; Disetujui: 17 Maret 2015

Pendahuluan

Jambu air camplong merupakan salah satu buah unggulan daerah Jawa Timur sesuai dengan SK Mentan No. 40/Kpts/TP.240/I/97. Sentra produksi buah jambu camplong terdapat di Kabupaten Sampang Madura. Luas areal tanaman jambu jenis camplong ini mencapai 780 hektar dengan jumlah tanaman sekitar 160,000 pohon yang memiliki 3 kali musim panen dalam setahun yakni pada bulan Februari, Juni dan Oktober. Menurut data BPS (2013), produksi jambu air camplong pada tahun 2010, 2011 dan 2012 berturut-turut adalah 8067.9 ton, 2549.4 ton, dan 3694.7 ton.

Hasil analisis SWOT tentang pemasaran buah lokal di Jawa Timur yang dilakukan oleh Sudiyarto

(2011) menunjukkan bahwa faktor peluang dan kekuatannya mempunyai nilai lebih tinggi daripada faktor ancaman dan kelemahan. Hal ini menunjukkan pasar buah lokal berpotensi besar. Di Indonesia pasar tradisional masih menjadi tujuan pemasaran komoditas buah lokal termasuk jambu air camplong. Perbaikan pascapanen pada tingkat petani menjadi sangat penting agar buah lokal dapat bersaing dengan buah-buahan impor yang telah menyerbu pasar tradisional (Siswadi 2007).

Salah satu rantai pascapanen jambu air camplong yang menyumbang kerusakan dan kehilangan cukup tinggi adalah pada proses transportasi dan distribusi. Perlakuan selama transportasi menjadi hal penting yang perlu diperhatikan. Perbaikan pada pengemasan merupakan salah satu cara yang dapat menekan kerusakan produk selama transportasi.

Buah jambu air camplong memiliki bentuk buah menyerupai kerucut (lonceng), kulit yang tipis bertekstur lunak dengan kadar air yang tinggi, sangat mudah mengalami memar terhadap tekanan yang menimpanya. Pengemasan yang tepat dapat mengurangi kerusakan mekanis karena dampak getaran dan beban kompresi pada saat transportasi berlangsung (Pathare dan Opara 2014). Penelitian mengenai kemasan transportasi telah dilakukan pada buah tomat (Sharan *et al*. 2009), anggur (Ngcobo *et al*. 2013), dan buah jeruk (Purba dan Haloho 2013).

Perancangan kemasan yang sesuai dengan pasar tujuan diharapkan mampu menekan kerusakan dan meningkatkan nilai jual jambu air camplong baik dipasar tradisional maupun pasar institusi. Penelitian perlu dilakukan untuk menghasilkan kemasan yang tepat untuk transportasi dan distribusi buah jambu air camplong dengan memperhatikan jenis kemasan, bersifat tepat guna dan efisien dalam penggunaan bak alat transportasi untuk mengurangi tingkat kerusakan jambu air camplong selama transportasi.

Tujuan penelitian ini adalah merancang kemasan untuk transportasi buah jambu air camplong, dan mengkaji kerusakannya pasca transportasi.

Bahan dan Metode

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan terdiri dari timbangan *mettle* PM-4800 untuk mengukur susut bobot, *texture analyzer* untuk mengukur kekerasan, penggaris dan jangka sorong untuk mengukur dimensi buah, serta mobil Pick-Up L300 dengan lebar bak 1600 mm, panjang 2425 mm dengan kapasitas 2540 kg.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas bahan utama dan bahan penunjang. Bahan utama adalah jambu air camplong, dan kemasan berbahan karton bergelomba tipe *flute* BC dengan kemasan tipe RSC (*Regular Selotted Container*). Jambu air camplong yang digunakan merupakan jambu air camplong kelas I dengan dimensi panjang 55 - 60 mm, diameter kepala 60-65 mm dan bobot berkisar 90 g – 120 g, berumur 60 hari setelah berbunga yang diperoleh dari kebun petani jambu air camplong di Kecamatan Camplong Kabupaten Sampang Madura. Jambu air camplong dipanen sesuai prosedur pemanenan yang benar.

Metode Penelitian

Penelitian ini terdiri atas tiga tahapan. Tahap pertama melakukan pengukuran sifat fisik dan mekanis buah. Tahap kedua merancang dimensi kemasan dan menguji kekuatan kemasan. Tahap ketiga adalah mentransportasikan buah jambu air camplong menggunakan kemasan hasil rancangan.

Bahan kemasan yang digunakan adalah karton bergelombang dengan tipe *flute* BC. Jenis karton ini termasuk jenis yang banyak digunakan untuk kemasan buah impor dan mudah didapat di pasar. Tipe kemasan yang dirancang adalah tipe RSC karena mudah dibuat dan mudah dibongar-pasang. Tipe RSC banyak digunakan untuk kemasan buah. Buah jambu air adalah buah yang sangat rentan rusak karena kulit yang sangat tipis sehingga kemasan dirancang menggunakan sekat antar buah. Sekat yang digunakan adalah karton gelombang *flute* A dengan tebal 3 mm.

Kemasan dirancang untuk transportasi jambu air camplong dari kabupaten Sampang ke pasar tradisional pasar Kembang yang ada di Surabaya. Alat transport yang digunakan adalah yang biasa digunakan oleh petani yaitu *pick-up* dengan ukuran bak 2425 mm x 1600 mm x 1500 mm (panjang x lebar x tinggi). Jarak tempuh 123 km dengan kondisi jalan termasuk jalan kelas dalam kota.

Pengukuran sifat fisik dan mekanis

Sifat fisik yang diukur adalah berat dan dimensi individu buah. Berat diukur dengan timbangan, sedangkan dimensi diukur dengan jangka sorong. Adapun sifat mekanis buah berupa *bioyield, strain, deformasi, stress* dan *firmness* diukur menggunakan alat UTM (*Universal Texture Machine*).

Perancangan dimensi kemasan

Perancangan dimensi dalam kemasan:

a. Menghitung luas bak/kontainer alat transport
   Luas bak/container digunakan untuk menghitung efisiensi susunan kemasan didalamnya

$$Luas\ bak\ (LB) = P \times L \quad (1)$$

   Dimana : P : Panjang bak/kontainer
   L : Lebar bak/kontainer

b. Menetukan dimensi dalam kemasan
   Dimensi dalam ditentukan berdasarkan jumlah

buah yang disusun searah sumbu panjang dan sumbu lebar kemasan ditambah dengan sekat yang ada diantara buah. Penetuan jumlah buah dilakukan dengan simulasi yang hasilnya berupa ukuran panjang dan lebar kemasan yang bila disusun dalam bak/kontainer menghasilkan efisiensi tertinggi.

- $Panjang\ (PK_{dalam}) = n_P\ x\ D + n_2\ x\ tebal\ flute\ partisi$ (2)

- $Lebar\ (LK_{dalam}) = n_L\ x\ D + n_2\ x\ tebal\ flute\ partisi$ (3)

Dimana :
D = diameter bagian kepala jambu air,
n_P = Jumlah buah arah panjang kemasan
n_L = Jumlah buah arah lebar kemasan
n_2 = Jumlah sekat dengan $n_2 = n_p$-1 atau n_L-1

c. Perhitungan dimensi desain
Dimensi desain adalah dimensi untuk pembuatan kemasan dari bahan dalam bentuk lembaran karton menjadi bentuk kemasan box. Untuk bahan karton gelombang *flute* BC, dimensi desain dihitung dalams satuan mm dengan persamaan:

$$Panjang\ (PK_{desain}) = PK_{dalam} + 8 \quad (4)$$

$$Lebar\ (LK_{desain}) = LK_{dalam} + 4 \quad (5)$$

$$Tinggi\ (TK_{desain}) = TK_{dalam} + 4 \quad (6)$$

d. Perhitungan dimensi luar kemasan

$$PK_{luar} = PK_{desain} + 2\ x\ tebal\ flute \quad (7)$$

$$LK_{luar} = LK_{desain} + 2\ x\ tebal\ flute \quad (8)$$

$$Luas\ Kemasan\ (LK) = PK_{luar}\ x\ LK_{luar} \quad (9)$$

e. Pola susunan kemasan dalam bak/kontainer alat transport
Beberapa pola susunan kemasan dicoba untuk menghasilkan susunan yang paling efisien dengan dimensi kemasan hasil rancangan. Setiap pola akan menghasilkan jumlah kemasan pada lapisan dasar (lapisan pertama) bak/ kontainer sebanyak N. Data ini digunakan untuk menghitung efisiensi penggunaan bak/ kontainer.

f. Efisiensi penggunaan bak alat transportasi
Luas permukaan susunan kemasan pada dilapisan pertama (TLK)

$$TLK = N\ x\ LK \quad (10)$$

$$Efisiensi = TLK / LB \quad (11)$$

Pola susunan kemasan yang dipilih adalah pola yang mempunyai efisiensi tertinggi. Dari hasil ini akan didapat ukuran panjang dan lebar kemasan bagian dalam maupun bagian luar.

g. Perhitungan kekuatan kemasan (KK) secara teoritis dengan persamaan Mc Kee (Peleg 1985)
Dengan mengetahui panjang dan lebar kemasan, maka dapat dihitung kekuatan kemasan teoritis menggunakan persamaan berikut:

$$KK = 5.87\ Pm\ .\sqrt{hz} \quad (12)$$

Dimana :
Pm = Nilai *edgewise compressive strength* (untuk *flute* BC = 6 (kgf/ cm)
h = tebal *flute*
z = keliling sisi atas kemasan

h. Tinggi kemasan
Tinggi kemasan ditentukan berdasarkan tinggi tumpukan kemasan yang optimum dalam mengisi tinggi bak alat angkut, berat buah perkemasan, dan kekuatan kemasan. Oleh karena itu tinggi kemasan dihitung dengan tahapan sebagai berikut: Jumlah tumpukan kemasan pada bak (NT)

$$NT = Tinggi\ bak\ /\ Tinggi\ Kemasan \quad (13)$$

Tinggi tumpukan akan menentukan berat perkemasan yang diperbolehkan agar total beban yang diterima oleh kemasan dilapisan paling bawah sesuai dengan kekuatan kemasan. Berat per kemasan (GK) dihitung dengan persamaan:

$$GK = KK\ /\ (NT\text{-}1)\ x\ 9.8 \quad (14)$$

Jumlah buah yang dapat disusun pada arah tinggi kemasan

$$(n_t) = TK\ /\ TB \quad (15)$$

Dimana : TK = Tinggi kemasan
TB = Tinggi individu buah

Tinggi kemasan (TK) merupakan fungsi dari jumlah buah yang tersusun arah tinggi dan berat perkemasan. Untuk itu dilakukan perbandingan antara berat per kemasan hasil penetapan tinggi kemasan (GK_1) dengan berat per kemasan (GK) hasil dari Persamaan 11. Tinggi kemasan yang dipilih adalah TK yang menghasil selisih nilai GK_1 dan GK kecil dengan jumlah buah yang dapat disusun sesuai dengan susunan buah yang didapat pada Persamaan 16 dan Persamaan 17
GK_1 dihitung dengan persamaan:

$$GK_1 = n_T\ x\ n_L\ x\ n_P\ x\ G \quad (16)$$

Dimana :
n_T = Jumlah buah pada arah tinggi kemasan,
n_L = Jumlah buah pada arah lebar kemasan
n_P = Jumlah buah pada arah panjang kemasan
G = berat individu buah

Dimensi tinggi kemasan desain

$$TK_{desain} = TK_{dalam} + 4 \quad (17)$$

Dimensi tinggi kemasan luar

$$TK_{Luar} = TK_{desain} + (2 \times tebal\ flute) \quad (18)$$

Diagram alir perancangan kemasan disajikan pada Gambar 1

Transportasi dan pengamatan mutu pasca transportasi

Transportasi dirancang untuk membawa jambu air camplong dari kabupaten Sampang ke pasar tradisional pasar kembang yang ada di Surabaya, menggunakan alat transportasi yang biasa digunakan oleh petani yaitu *pick-up* dengan ukuran bak 2425 mm x 1600 mm x 1500 mm (panjang x lebar x tinggi). Transportasi dilakukan dari Sampang ke Surabaya dengan jarak 123.7 km dan waktu 2 jam 30 menit dengan kondisi jalan dalam kota dan lalu lintas sedikit macet.

Pengujian mutu pasca transportasi adalah kerusakan mekanis dan kerusakan fisiologis. Kerusakan mekanis adalah kerusakan buah yang dilihat langsung setelah transportasi dilakukan, sedangkan kerusakah fisiologis adalah kerusakan karena adanya aktivitas fisiologis buah yang menyebabkan penurunan mutu fisologis pasca transportasi. Penurunan mutu fisiologis dihitung berdasarkan jumlah buah pasca transportasi yang rusak setiap harinya sampai jumlah buah habis.

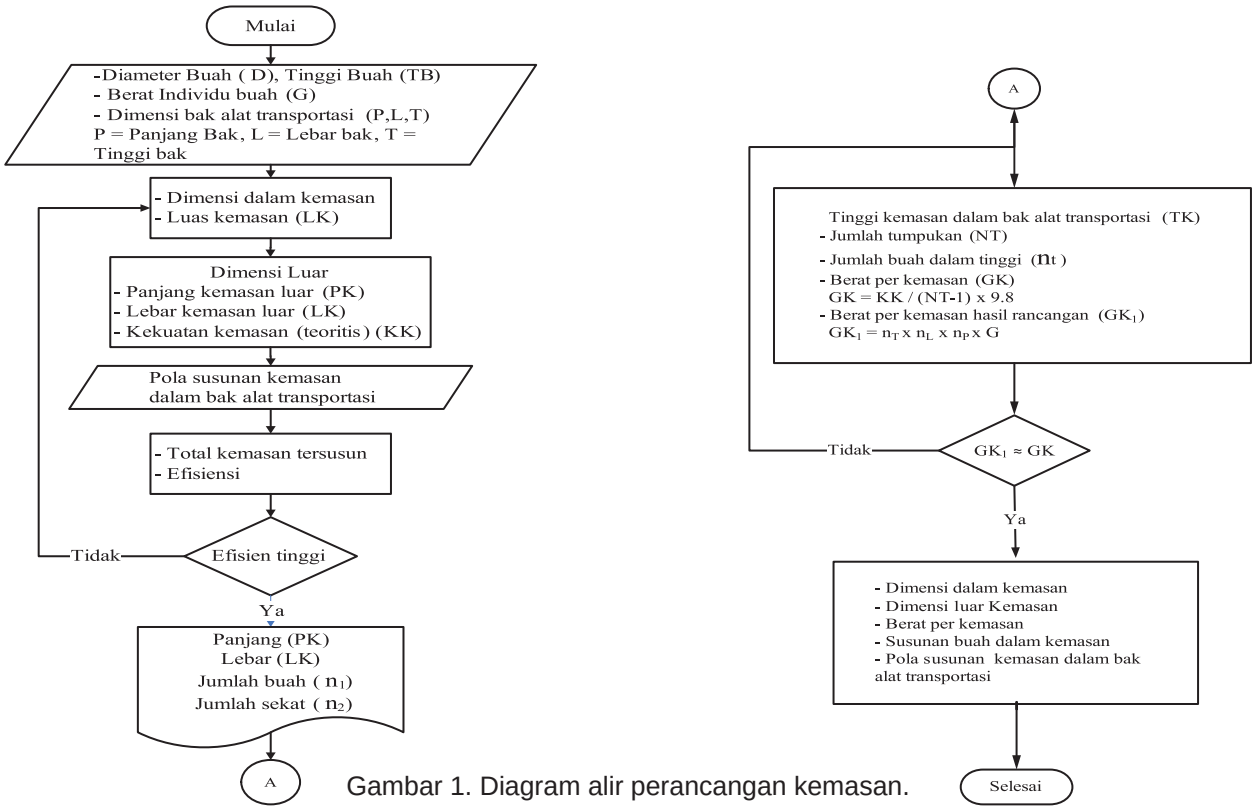
Hasil dan Pembahasan

Sifat Fisik dan Mekanis Buah Jambu Air Camplong

Sifat fisik buah yang diperlukan dalam rancangan adalah bentuk geometri, dimensi dan berat individu buah. Berat rata-rata buah yang diperoleh dari petani setelah disortasi keseragamannya adalah 110±0.7 g. Geometri buah jambu camplong mendekati bentuk kerucut (lonceng) dengan diameter bawah 5.91±0.5 cm dan tinggi 5.54 ±0.5 cm. Uji sifat mekanik dilakukan untuk menentukan beban maksimum yang dapat diterima oleh buah tanpa menyebabkan kerusakan pada buah. Dari hasil pengujian, diketahui bahwa rata-rata *bioyield* jambu air adalah 2.1 kgf, *deformasi* 1.6 cm dan *firmness* 3.60 kg/cm.

Penentuan Dimensi Kemasan (Panjang dan Lebar)

Dimensi panjang dan lebar bagian dalam kemasan dihitung dengan Persamaan 2 dan 3. Dimensi panjang dan lebar luar kemasan dihitung dengan Persamaan 7 dan 8. Dengan menggunakan simulasi penyusunan buah arah panjang dan arah lebar maka akan diperoleh banyak nilai kombinasi panjang dan lebar kemasan. Penentuan panjang dan lebar kemasan dilakukan dengan menggunakan Persamaan 7, 8 dan 9. Hasil yang didapat adalah



Gambar 1. Diagram alir perancangan kemasan.

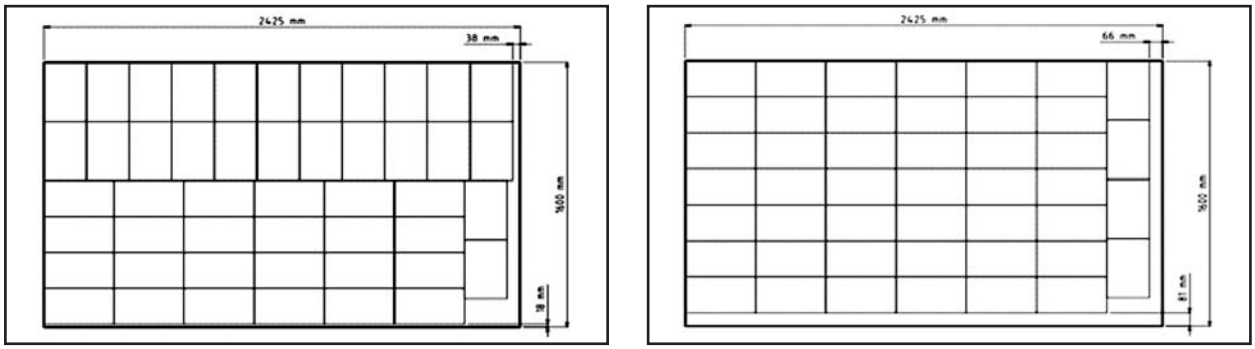
Tabel 1. Dimensi kemasan hasil rancangan.

Parameter		Rancangan	
		Partisi 4.5 kg	Petani
Jumlah Buah		45	84
Jumlah Buah dalam baris	Panjang	5	7
	Lebar	3	4
	Tinggi	3	3
Dimensi dalam kemasan (mm)	Panjang	337	470
	Lebar	201	138
	Tinggi	200	350
Volume (cm^3)	Buah dalam kemasan	2278.48	4253.16
	Kemasan	13486.74	22701
Packing Density (%)		16.89	18.73
Dimensi desain kemasan (mm)	Panjang	345	47.70
	Lebar	205	14.70
	Tinggi	204	35.70
	Tutup	145	11.30
Dimensi luar kemasan (mm)	Panjang	357	478
	Lebar	217	146
	Tinggi	216	354

jumlah buah pada arah panjang adalah 5 buah dan pada arah lebar adalah 3 buah. Susunan tersebut menghasilkan ukuran dalam kemasan 337 mm untuk panjang dan lebar 201 mm. Karton gelombang dengan *flute* BC mempunyai tebal 6 mm, sehingga panjang dan lebar kemasan luar adalah 357 mm dan lebar 217 mm.

Dimensi panjang dan lebar yang diperoleh menghasilkan efisiensi penggunaan bak *pick up* sebesar 95% dengan pola susunan seperti pada Gambar 2 (a) mampu disusun kemasan sebanyak 48 karton box. Ruang yang tersisa pada bak bagian belakang 38 mm dan samping 18 mm. Alternatif pola susunan yang mudah saat penanganan di lapang dapat menggunakan pola seperti pada Gambar 2 (b) dengan efisiensi 91%. Ruang yang tersisa pada bak bagian belakang 66 mm dan samping 81 mm. Sisa ruang tersebut digunakan untuk meberikan kemudahan pada saat penyusunan dan pembongkaran serta tersedianya sirkulasi udara yang ada diantara kemasan.

Dalam pelaksanaannya di lapangan, kemasan yang digunakan berukuran panjang 342 mm dan lebar 210 mm. Hal tersebut disebabkan pada saat penelitian dilakukan, diameter jambu air camplong yang diperoleh dari petani rata-rata 60 mm, sedangkan rancangan awal menggunakan diameter buah 65 mm. Oleh karena itu dilakukan penyesuaian terhadap dimensi dari hasil rancangan. Dimensi tersebut tidak mempengaruhi pola susunan dan efisiensi pemakaian ruang yang optimal yaitu 95% untuk pola Gambar 2 (a) dan 91% pada pola Gambar 2 (b).



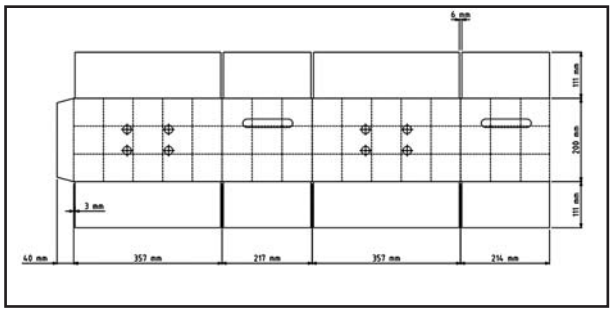
(a) (b)

Gambar 2. Pola penyusunan kemasan pada bak *pick-up* (a) 48 kemasan, (b) 46 kemasan.

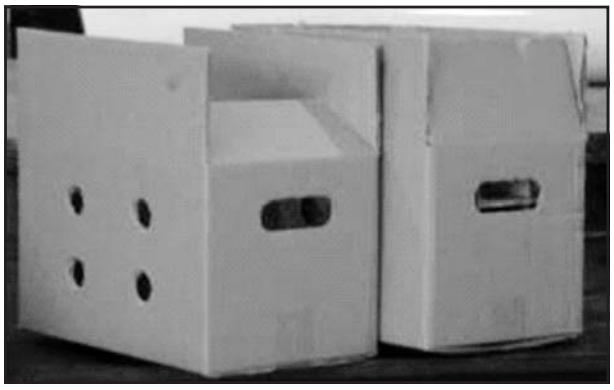
Dimensi kemasan dan cara penyusunan akan mempengaruhi efisiensi pemanfaatan ruang bak *pick-up* sebagai alat transportasi yang biasa digunakan petani. Analisis efisiensi muatan telah banyak digunakan dengan berbagai macam ukuran kemasan dan luasan bak alat transportasi dengan tujuan efisiensi distribusi produk yang dijual sehingga dapat memaksimalkan pengiriman (Qanytah dan Ambarsari 2011).

Perhitungan Kekuatan dan Penenentuan Dimensi Tinggi

Kekuatan kemasan secara teoritis dihitung menggunakan Persamaan 12, dengan panjang 357 mm dan lebar 217 mm adalah 292.31 kgf. Hasil pengujian kekuatan kemasan yang diukur langsung menggunakan UTM INSTRON adalah 258.59 kgf. Perbedaan hasil perhitungan dengan hasil pengukuran langsung disebabkan antara lain oleh cara pengikatan (*bending*) kemasan, adanya ventilasi, dan jenis kertas untuk pembuatan karton bergelombang.



Gambar 3. Desain kemasan hasil rancangan partisi.



Gambar 4. Kemasan hasil rancangan.

Kekuatan kemasan karton gelombang dapat ditingkatkan dengan memilih bahan yang kuat dan menggunakan partisi didalamnya atau pelapis tambahan. Kekuatan kemasan hasil rancangan yang ditambah dengan partisi untuk pemisah buah menjadi lebih besar yaitu 401.92 kgf.

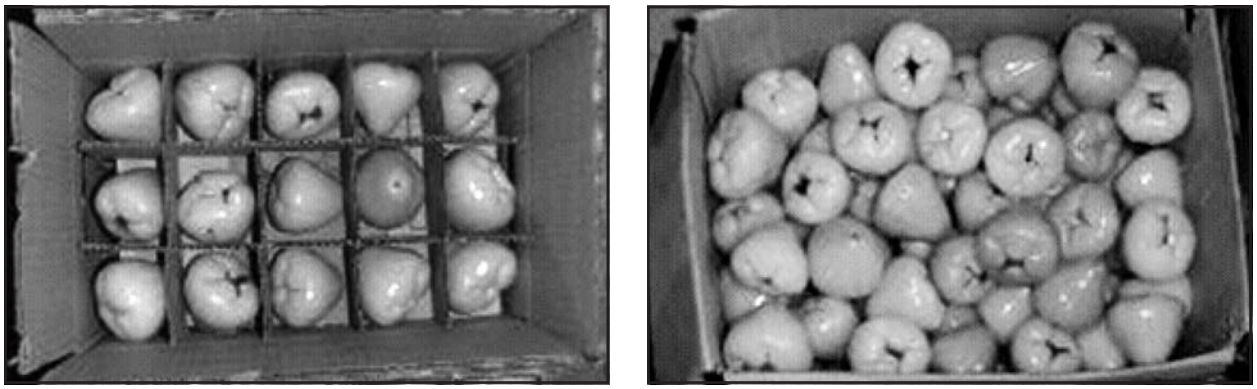
Penentuan tinggi susunan kemasan pada bak *pick-up* (Persamaan 13) dengan asumsi tinggi kemasan 200 mm maka diperoleh tinggi susunan kemasan sebanyak 7 dan berat perkemasan (Persamaan 14) sebesar 4.73 kg. Dengan menggunakan Persamaan 15 dan 16 didapat dimensi dalam kemasan 337 mm x 201 mm x 200 mm. Selanjutnya menggunakan (Persamaan 17 dan 18) didapatkan dimensi luar 357 mm x 217 mm x 216 mm. Dimensi kemasan hasil rancangan secara rinci pada Tabel 1, desain kemasan pada Gambar 3 dan kemasan dalam bentuk box ditunjukkan pada Gambar 4.

Pada arah tinggi kemasan dapat disusun 3 buah jambu yang sesuai dengan susunan buah arah panjang serta arah lebar. Secara keseluruhan pada kemasan dengan dimensi 357 mm x 217 mm x 216 mm dapat diisi 45 buah dengan berat rata-rata 4.5 kg per kemasan. Hasil ini sedikit berbeda dengan perhitungan teoritis yang besarnya 4.73 kg per kemasan. Perbedaan tersebut disebabkan oleh penyesuaian jumlah buah dalam kemasan yang diberi partisi.

Berat per kemasan secara teoritis adalah 4.5 kg didasarkan pada jumlah buah dalam kemasan sebanyak 45 dengan rata-rata berat per buah 100 g. Berat buah yang disortasi dari hasil panen petani ada pada kisaran 90-120 g, dan populasi terbanyak adalah 90 g sehingga rata-rata berat per kemasan menjadi 4.2 kg.

Transportasi dan Pengamatan Mutu

Transportasi dilakukan dari Sampang ke



(a) (b)

Gambar 5. Posisi jambu air camplong dalam kemasan. (a) kemasan rancangan berpartisi, (b) kemasan petani.

Tabel 2. Berat bersih dan jumlah buah per kemasan.

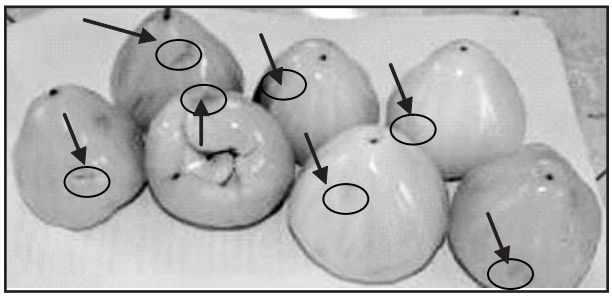
Kapasitas (Kg)	Dimensi (mm^3)	Jumlah Buah	Berat Buah (Kg)
Petani 8.4	478 x 146 x 354	73	7.3
Partisi 4.5	342 x 210 x 200	45	4.2

Surabaya dengan jarak 123.7 km dan waktu 2 jam 30 menit dengan kondisi jalan kota (*hotmix* mulus) dan lalu lintas sedikit macet. Buah jambu air camplong dikemas dengan kemasan hasil rancangan dan disusun seperti pada Gambar 5 (a). Sebagai kontrol dilakukan transportasi menggunakan kemasan yang biasa digunakan petani. Adapun kemasan yang digunakan petani adalah kemasan karton dengan dimensi seperti pada Tabel 2 dan cara penyusunan buah seperti pada Gambar 5 (b).

Soleimani dan Ahmadi (2014) menyatakan bahwa getaran yang telah terjadi pada saat transportasi memiliki dampak yang signifikan terhadap tingkat kerusakan produk. Tingkat getaran yang terjadi selama transportasi tergantung pada banyak faktor, seperti: jenis suspensi, kecepatan perjalanan, kondisi jalan, dan fitur kemasan. Selama proses distribusi, buah-buahan dan sayuran mengalami tingkat getaran yang berbeda dari kendaraan transportasi yang digunakan. Nilai getaran yang dihasilkan paling dominan adalah getaran dalam arah vertikal. Hasil pengamatan Lu, *et al.* (2010) menunjukkan bahwa adanya pengaruh kecepatan mobil dengan tingkat guncangan dan getaran yang dihasilkan selama transportasi berlangsung.

Jambu air camplong dikatakan rusak atau cacat apabila ditemukan luka memar, luka goresan buah dan buah yang melesak kedalam (penyok). Buah dikatakan melesak jika dijumpai kondisi kulit buah dan daging buah yang tidak rata dengan kulit sekitarnya. Dalam penelitian ini, buah penyok dan kelopak rusak yang ditemukan pasca transportasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Kerusakan mekanis seperti buah melesak, dan memar mudah ditandai dengan pengamatan visual. Kulit buah ditandai dengan memar parah yang memberikan bentuk tidak mulus pada permukaan kulit. Kerusakan mekanis yang terjadi pada buah jambu camplong pasca transportasi seperti pada Gambar 6.



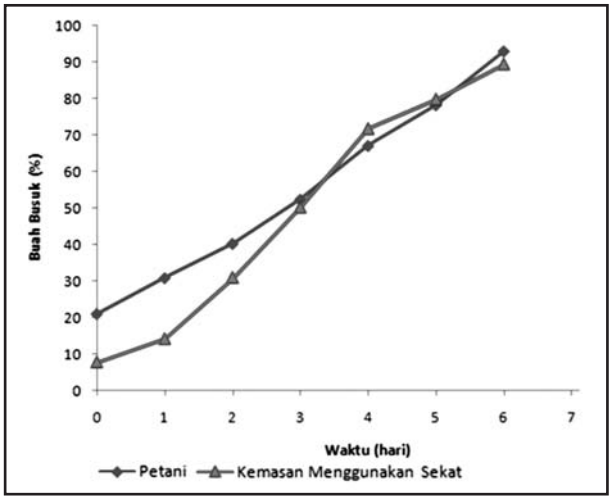
Gambar 6. Kerusakan fisik jambu air camplong pasca transportasi.

Tabel 3. Persentase rusak mekanis jambu air camplong pasca transportasi

No	Perlakuan	% Susut
1	Petani	20.87 ± 2.95
2	Kemasan menggunakan partisi	7.70

Kerusakan mekanis rendah diperoleh pada kemasan rancangan menggunakan partisi yaitu 7.70%, karena pola penyusunan buah dalam kemasan memiliki partisi antar buah, sehingga meminimalisir benturan yang terjadi antar buah saat transportasi. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Muslim dan Trisnowati (2014) menyatakan bahwa penggunaan kemasan kardus menggunakan dapat mengurangi kerusakan fisik sebesar 5% dan memperpanjang umur simpan buah 3 hari lebih lama. Permukaan jambu air memiliki struktur rentan yang mudah rusak, sehingga kerusakan fisik dalam bentuk buah memar dan lebam memberi nilai kerusakan. Kerusakan buah pada kemasan menggunakan partisi disebabkan karena pembuatan partisi yang masih kurang sempurna, terdapat ujung yang runcing pada sisi partisi karena *cutting* yang kurang baik sehingga menyebabkan luka gores pada buah. Perlu ditambahkan kemasan pengisi (*net foam* atau kertas buah) agar dapat melindungi buah jambu air yang memiliki kulit tipis tersebuat agar tidak mudah tergores oleh partisi pada kemasan.

Rendahnya tingkat kerusakan fisik pada kemasan menggunakan partisi merupakan butkti bahwa kemasan partisi baik untuk melindungi buah. Oleh karena itu, pengemasan menggunakan



Gambar 7. Persentase jumlah buah busuk selama penyimpanan.

partisi dapat diterapkan untuk menghindari kerusakan selama transportasi jambu air camplong. Berdasarkan pengamatan yang dilakukan selama 6 hari penyimpanan pada suhu ruang, ditemukan bahwa persentase jumlah busuk dalam setiap perlakuan meningkat (Gambar 7). Pada hari ke 6 diperoleh persentase jumlah busuk pada kemasan petani sebesar 93% dan 89.3% pada kemasan menggunakan partisi. Sisa buah baik pada hari ke 6 pada kemasan petani sebanyak 3 dan 2 pada kemasan menggunakan partisi.

Tingginya kerusakan pada permukaan kulit buah menyebabkan hilangnya lapisan lilin buah. Akibatnya, aktivitas transpirasi dan kehilangan air berlangsung lebih cepat menyebabkan penurunan susut bobot lebih cepat. Kehilangan air dari buah terjadi melalui lubang alami yang terdapat pada permukaan jaringan luar buah segar yang dipengaruhi oleh faktor internal seperti memar pada permukaan buah (Utama 2002).

Simpulan

1. Berdasarkan sifat fisik buah, luas bak *pick-up* dan tinggi tumpukan kemasan, dihasilkan rancangan kemasan dengan dimensi luar 357 mm x 217 mm x 216 mm, berat per kemasan 4.5 kg dan efisiensi penggunaan bak pick up sebesar 91 – 95% tergantung dari pola susunan kemasan yang dipilih
2. Dalam penerapannya di lapangan dilakukan penyesuaian dimensi kemasan dikarenakan dimensi buah yang digunakan dalam penelitian pada kisaran 60-65 mm dengan berat 90-120 g. dimensi kemasan hasil penyesuaian adalah 342 mm x 210 mm x 200 mm dengan berat rata-rata kemasan 4.2 kg hasil ini tidak merubah pola susunan kemasan pada bak pick up maupun efisiensi hasil rancangan teoritis.
3. Kekuatan kemasan yang digunakan adalah 258.59 kgf dan dengan adanya partisi kekuatan kemasan menjadi 401.92 kgf. Kekuatan ini mampu menahan beban setinggi 7 susunan dengan berat per kemasan 4.5 kg.
4. Kerusakan mekanis yang terjadi pasca transportasi adalah 20.87% untuk jambu air pada kemasan kontrol (petani), 7.70% pada kemasan hasil rancangan dengan partisi.

Saran

Perlu dilakukan penelitian lanjut untuk menambah kemasan pengisi berupa *net foam* atau kertas buah untuk mengurangi gesekan buah dengan dinding karton yang permukaannya kurang halus (tidak dilaminasi dengan plastik) dan ujung partisi yang tajam.

Daftar Pustaka

[BPS] Badan Pusat Statistik. 2013. Produk Domestik Regional Bruto Kabupaten Sampang.

Ngcobo, M.E.K., M.A. Delele, U.L. Opara, C.J. Meyer. 2013. Performance of Multi-Packaging for Table Grapes Based on Airflow, Cooling Rates and Fruit Quality. Journal of Food Engineering 116: 613–621.

Lu, F., Y. Ishikawa, H. Kitazawa, T. Satake. 2010. Effect Of Vehic Le Speed On Shock And Vibration Levels On Truck Transport. Journal Packaging Technology and Science 23,101-109.

Muslim, A., S. Trisnowati. 2014. Pengaruh Cara Pengemasan Terhadap Perubahan Mutu Buah Sawo (*Manilkara Zapota* (L.) van Royen) Setelah Pengiriman. [skripsi]. Yogyakarta: Program Sarjana, Universitas Gadjah Mada.

Pathare, P.B., Opara, L. Umezuruike. 2014. Structural Design Of Corrugated Boxes For Horticultural Produce: A review. Biosystems Engineering 125: 128–140

Peleg, K. 1985. Storage and Preservation Techniques. Dalam Produce Handling, Packaging and Distribution. Westport. Connecticut. AVI Publishing Co. Inc.

Purba, T., J.D. Haloho. 2013. Teknologi Berbagai Kemasan terhadap Mutu Buah Jeruk Siam dan Jeruk Keprok Terigas. Prosiding Seminar Nasional Pekan Inovasi Teknologi Hortikultura Nasional: Penerapan Inovasi Teknologi Hortikultura dalam Mendukung Pembangunan Hortikultura yang Berdaya Saing dan Berbasis Sumberdaya Genetik Lokal. Lembang 5 Juli 2012. ISBN 978-979-8257-49-0.

Qanytah, Ambarsari I. 2011. Efisiensi Penggunaan Kemasan Kardus Distribusi Mangga Arumanis. Jurnal Litbang Pertanian Vol 30 Januari 2011.

Sharan, G.S., K.P. Srivastav, Rawale, U. Dave. 2009. Development of Corrugated Fiber Board Cartons for Long Distance Transport of Tomatoes in India. International Journal for Service Learning in Engineering 4(1); 31-43, Springer 2009. ISSN 1555-9033.

Siswadi. 2007. Penanganan Pasca Panen Buah-Buahan Dan Sayuran. Innofarm: Jurnal Inovasi Pertanian Vol. 6 Maret 2007.

Soleimani, B., E. Ahmadi. 2014. Evaluation and Analysis Of Vibration During Fruit Transport As A Function Of Road Conditions, Suspension System And Travel Speeds. Engineering in Agriculture, Environment and Food. ISSN 1881-8366 (p).

Sudiyarto. 2011. Strategi Pemasaran Buah Lokal Jawa Timur. Jurnal J-SEP Vol. 5 Maret 2011.

Utama, I Made. 2002. Horticulture Post Harvest Technology. (in Bahasa Indonesia). Assessment Center for Tropical Fruits Udayana University. Bali.

Yulianti, N., Sutrisno, E. Darmawati. 2010. Improvement of the Technology Packaging for the Transportation of Mangosteen. JTEP ISSN 0216-3365 Vol.24 April 2010.

Technical Paper

Pelapis Nanokomposit untuk Pengawetan Salak Pondoh Terolah Minimal

Edible Coating Nanocomposites to Maintain Quality of Minimally-Processed Snake Fruit

Monika Marpaung, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Gedung Fateta Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680
Email : monicamarpaung@ymail.com
Usman Ahmad, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Gedung Fateta Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680.
Email: uahmad2010@gmail.com
Nugraha Edhi S, Departemen Ilmu Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Gedung Fateta Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680. Email: Nugrahaedhi@yahoo.com

Abstract

Minimally-processed snake fruit is a perishable product with a very short shelf life. Edible coating is one of the alternative technologies to prolong the shelf life of minimally-processed fruit. The research aimed to examine antimicrobial activity of edible coating nanocomposites-based pectin and starch with NP-ZnO suspensions and the influence of edible coating on quality of minimally-processed snake fruit during storage. Quality parameters measured were on the weight loss, browning index, the hardness, and sensory evaluation. The result showed that antimicrobial activity of edible coating nanocomposites againts Escherichia coli and Staphylococcus aureus. The application of nanocomposites are able to maintain the quality of minimally-processed snake fruit during the storage periods. Minimally-processed snake fruit with edible coating made from nanocomposites-based pectin and starch with NP-ZnO can extend its shelf life and maintained its quality until 14 days, while minimally-processed snake fruit without edible coating can extend only 8 days

Keywords: *minimally-processed, nanocomposites, NP-ZnO, snake fruit*

Abstrak

Buah salak pondoh terolah minimal merupakan buah dengan umur simpan yang pendek. Salah satu alternatif yang dapat diterapkan untuk memperpanjang umur simpan buah terolah minimal adalah dengan penggunaan *edible coating.* Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji aktivitas antimikroba pelapis nanokomposit berbasis pektin dan pati dengan NP-ZnO dan pengaruhnya terhadap mutu salak pondoh terolah minimal selama penyimpanan. Parameter mutu yang dianalisis adalah susut bobot, *browning index*, kekerasan, dan uji organoleptik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelapis nanokomposit memiliki aktivitas antimikroba terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus.* Aplikasi pelapis nanokomposit dapat mempertahankan mutu salak pondoh terolah minimal selama penyimpanan. Salak pondoh terolah minimal dengan pelapis nanokomposit berbasis pektin dan pati dengan NP-ZnO dapat memperpanjang umur simpan dan mempertahankan kualitas hingga hari ke-14, sedangkan salak pondoh terolah minimal tanpa pelapis hanya dapat bertahan hingga hari ke-8.

Kata kunci : nanokomposit, NP-ZnO, salak pondoh, terolah minimal

Diterima: 19 Desember 2014; Disetujui: 25 Maret 2015

Pendahuluan

Buah salak pondoh merupakan salah satu jenis buah tropis asli Indonesia yang terkenal di daerah Sleman, Yogyakarta. Salak pondoh ini banyak digemari konsumen termasuk dari luar negeri karena mempunyai rasa yang manis, renyah dan sebagai salah satu sumber nutrisi. Salak mengandung zat gizi dan antioksidan yang sebanding dengan kiwi (Gorinstein 2009). Konsumsi buah-buahan segar dalam menu makanan sehari-hari sangat diperlukan. Masalah utama mengkonsumsi buah salak segar adalah memerlukan waktu dalam penyajian karena harus mengupas buah dan untuk

sebagian orang tahapan ini kurang disukai karena kulit salak bersisik dan tajam. Hal ini menyebabkan peluang pengolahan salak menjadi buah terolah minimal menjadi penting. Disamping itu buah terolah minimal lebih menawarkan jaminan mutu dibandingkan buah dalam kondisi utuh karena konsumen dapat langsung melihat kondisi buahnya, bebas dari resiko membeli buah salak yang busuk.

Buah terolah minimal adalah buah yang telah mengalami perlakuan pencucian, pengupasan, pemotongan atau pengirisan. Hal ini menyebabkan sebagian besar sel-sel di bagian permukaan buah terluka sehingga integritas sel rusak. Dalam keadaan demikian sel menjadi rentan terhadap pengaruh oksigen dan mikroorganisme yang akan mengakibatkan buah menjadi cepat rusak dan busuk. Salah satu perlakuan yang dapat diterapkan untuk melindungi dan menghambat kerusakan pada produk terolah minimal adalah penggunaan *edible coating* (Lin dan Zhao 2007).

Dengan teknik pelapisan menggunakan *edible coating*, sel-sel luka dapat terselimuti sehingga terhindar dari pengaruh oksigen dan mikroorganisme, perubahan fisiologis dan proses penguapan air dapat dikendalikan sehingga kesegaran buah dapat terjaga dan buah tetap dapat melakukan respirasi. Pektin dan pati merupakan bahan dasar pembuatan *edible coating* berbasis polisakarida yang efektif sebagai penahan gas dan akan melekat sempurna pada permukaan buah dan sayuran yang dikupas atau di iris namun sangat lemah sebagai penahan uap air (Baldwin *et al*. 1995). Untuk itulah diperlukan formulasi penyusun *edible coating*. Penggunaan pelapis *edible* dari pektin buah pala dan kitosan dan penyimpanan dalam kemasan atmosfer termodifikasi mampu mempertahankan mutu salak pondoh terolah minimal (Lintang 2011).

Komposit disusun dari minimal dua komponen yaitu matrik atau resin, dan penguat atau *filler*. *Filler* dapat berupa struktur, partikel atau serat yang berfungsi sebagai penguat. Nanokomposit merupakan material yang dibuat dengan menambahkan nanopartikel sebagai *filler* dalam sebuah matriks. Nanokomposit didefenisikan sebagai material multi fase, dimana setiap fase memiliki satu, dua, atau tiga dimensi yang kurang dari 100 nanometer (nm). Studi terbaru menunjukkan bahwa nanopartikel yang terbuat dari oksida logam, seperti Nanopartikel Zink oksida (NP-ZnO) memiliki toksisitas selektif terhadap bakteri *E. coli* dan *S. aureus* (Li *et al.* 2009). Nanopartikel (NP) yang terbuat dari oksida logam dengan ukuran kurang dari 100 nm menunjukkan aktivitas antimikroba. Liu *et al*. (2009) menunjukkan bahwa NP-ZnO pada konsentrasi yang lebih tinggi dari 3 mmol/l secara signifikan dapat menghambat pertumbuhan *E. coli*, dibandingkan dengan kontrol. NP-ZnO menunjukkan sifat antibakteri terhadap *E. coli* dan efek penghambatan meningkat jika konsentrasi NP-ZnO meningkat. NP-ZnO dapat mendistorsi membran sel bakteri yang menyebabkan hilangnya komponen intraseluler, dan akhirnya kematian sel. Hal ini menunjukkan bahwa NP-ZnO berpotensi sebagai antibakteri yang efektif untuk bahan pengawet. Penggunaan kemasan yang mengandung NP-ZnO dapat mempertahankan kualitas apel fuji terolah minimal selama penyimpanan (Li *et al.* 2011).

Zat seng/*zink* merupakan salah satu mikromineral esensial yang di perlukan oleh tubuh. Zn berperan dalam berbagai aktivitas metabolisme antara lain: sintesis dan degradasi karbohidrat, protein, lipida, dan asam nukleat, sintesis DNA dan RNA. Defisiensi gizi mikro seperti defisiensi zink (Zn) merupakan masalah kesehatan masyarakat di banyak negara berkembang termasuk di Indonesia. Hotz *et al*. (2004) mengungkapkan bahwa resiko defisiensi seng yang terjadi di negara berkembang sekitar 15%. Survey nasional tahun 2003 pada skala kecil yang dilakukan di Nusa Tenggara Timur dan Pulau Jawa melaporkan bahwa prevalensi defisiensi *zinc* sekitar 6-39% (Atmarita 2005). Zink oksida (ZnO) merupakan salah satu senyawa yang digunakan sebagai suplemen nutrisi zink (Zn), termasuk kategori *generally recognized as safe* (GRAS) dan dinyatakan aman oleh FDA di Amerika (Saghaie *et al*. 2006).

Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji efektifitas antimikroba pelapis nanokomposit dari pektin dan pati dengan nanopartikel ZnO sebagai *filler* untuk pengawetan salak pondoh terolah minimal dan mengkaji pelapis nanokomposit dari pektin, pati dan nanopartikel ZnO terhadap mutu salak pondoh terolah minimal selama penyimpanan.

Bahan dan Metode

Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah buah salak pondoh yang diperoleh dari petani salak di Turi, Sleman, dengan umur panen ±5 bulan setelah penyerbukan, pektin yang diperoleh dari Nacalai Tesque Inc (Jepang), pati singkong yang diperoleh dari PT. Budi Starch & Sweetener Tbk (Indonesia), nanopartikel ZnO/NP-ZnO (Ø 20 nm) yang diperoleh dari Wako Pure Chemical Industries (Jepang), gliserol, Media *Potato Dextrose Agar* (PDA), *Nutrient Agar* (NA), *Nutrient Broth* (NB), dan *Potato Dextrose Agar* (PDB) yang diperoleh dari OXOID (Inggris), kultur uji yaitu *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923), *Saccharomyces cerevisiae* (ATCC 9763), *Aspergillus niger* (ATCC 16404), *Fusarium oxysporum*, *dan Penicillium digitatum* yang diperoleh dari koleksi laboratorium Mikrobiologi Pangan, Fateta, IPB.

Peralatan yang digunakan adalah timbangan digital, *rheometer, chromameter*, *homogenizer*, *styrofoam,* plastik *wrapping*, *hot plate* dan *magnetic stirrer*, lemari pendingin, oven, termometer dan alat-

alat lain yang dibutuhkan dalam proses pembuatan larutan pelapis nanokomposit, pengujian aktivitas antimikroba, dan proses pencelupan serta yang digunakan dalam analisa mutu salak pondoh terolah minimal.

Prosedur Penelitian

Pembuatan Larutan Pelapis Nanokomposit Pektin + NP-ZnO

Pelapis nanokomposit pektin + NP-ZnO dibuat dengan melarutkan (0 dan 100 mg) NP-ZnO dalam 1000 mL aquades. Kemudian larutan dihomogenisasi menggunakan *homogenizer* selama 3 menit dengan kecepatan maksimum. Kemudian dilakukan pencampuran dengan pektin sebanyak 10g (1%) menggunakan *magnetic stirrer* dan gliserol sebanyak 10% dari berat pektin sehingga diperoleh larutan nanokomposit dengan konsentrasi pektin + NP-ZnO 0% dan 1% (b/b pektin).

Pembuatan Larutan Pelapis Nanokomposit Pati + NP-ZnO

Pelapis nanokomposit pati + NP-ZnO dibuat dengan melarutkan (0 dan 100 mg) NP-ZnO dalam 1000 mL aquades. Kemudian larutan dihomogenisasi menggunakan *homogenizer* selama 3 menit dengan kecepatan maksimum. Setelah itu diberi pati singkong 10g (1%) sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* kecepatan tinggi di atas *hot plate*. Pelarutan pati dalam larutan NP-ZnO dilakukan sedikit demi sedikit sambil dipanaskan dan diaduk perlahan agar terbentuk gel campuran pati dan NP-ZnO yang larut secara sempurna. Setelah itu baru ditambahkan gliserol sebanyak 20% dari berat pati. Larutan dipanaskan sampai berwarna jernih dengan suhu berkisar 90°C atau dikatakan telah terjadi proses gelatinisasi. Sehingga diperoleh larutan nanokomposit dengan konsentrasi pati + NP-ZnO 0% dan 1% (b/b pati).

Pengujian Aktivitas Antimikroba Larutan Pelapis Nanokomposit

Pengujian aktivitas antimikroba pelapis nanokomposit terhadap mikroba patogen dilakukan dengan metode sumur. Kultur uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah *E. coli (gram negatif)*, *S. aureus (gram positif), S. cerevisiae (khamir), A. niger (jamur), F. oxysporum (jamur) dan P. digitatum (jamur)*. Kultur uji diinokulasikan sebanyak 0.1 ml ke dalam 100 ml media NA (untuk isolat bakteri)/ PDA (untuk isolat jamur/khamir). Selanjutnya 20 ml media NA/PDA yang telah berisi kultur uji dituangkan ke cawan petri steril dan dibiarkan hingga beku. Setelah membeku kemudian dibuat 5 lubang (sumur) dengan berdiameter sekitar 10 mm. Kedalam tiap lubang diinokulasikan 150 µL larutan pelapis nanokomposit. Selanjutnya diinkubasi pada suhu 37°C selama 24 jam. Kemudian diukur diameter zona hambatan yang terbentuk. Zona penghambatan adalah areal bening yang terbentuk di sekitar sumur yang diukur dengan jangka sorong dengan satuan mm.

Aplikasi Pelapis Nanokomposit pada Buah Salak Pondoh Terolah Minimal

Buah salak yang telah dipanen lalu disortasi, kemudian dilakukan pengupasan kulit dan kulit ari. Buah yang telah dikupas kemudian dicelupkan ke dalam larutan pelapis nanokomposit selama 30 detik dan dikeringanginkan. Setelah kering buah salak pondoh terolah minimal tersebut dikemas dalam *Styrofoam* dan plastik *wrapping.* Selanjutnya dilakukan penyimpanan pada suhu 10°C. Pengamatan dilakukan setiap dua hari hingga buah rusak atau tidak dapat diterima oleh panelis dengan parameter yang diamati adalah susut bobot, *browning index*, kekerasan, dan uji organoleptik.

Parameter Pengamatan

Susut Bobot

Susut bobot diukur menggunakan timbangan digital. Pengukuran susut bobot dilakukan secara gravimetri, berdasarkan persentase penurunan bobot (berat basah) bahan sejak awal penyimpanan sampai akhir penyimpanan selama periode pengamatan. Persamaan yang digunakan untuk menghitung susut bobot adalah sebagai berikut:

$$\%\ \text{Susut bobot} = \frac{W - Wa}{W}\ x100\%$$

Dimana:

W = bobot bahan pada awal penyimpanan (g)

Wa = bobot bahan pada akhir penyimpanan (g)

Kekerasan

Kekerasan diukur menggunakan *Rheometer* tipe CR 300 DX, dengan kecepatan tekanan 30 mm/menit, beban maksimum 2 kg dan kedalaman tusukan 10 mm. Salak pondoh terolah minimal ditekan pada bagian bawah bahan, dan nilainya langsung tertera pada display rheometer dan dinyatakan dalam Newton (N).

Browning Index (Indeks Kecoklatan)

Intensitas warna diukur dengan menggunakan *Chromameter Minolta* CR-200. Pada *chromameter* ini digunakan sistem warna L, a dan b. Nilai L* menunjukkan kecerahan, nilai a* dan b* adalah koordinat kromasitas yang digunakan untuk mengetahui nilai hue angle dan saturation index. Nilai a negatif untuk warna hijau dan positif untuk warna merah, sedangkan nilai b negatif untuk warna biru dan positif untuk warna kuning. Untuk melihat perubahan warna salak terolah minimal akibat peristiwa browning enzimatis, maka dilakukan perhitungan *browning index* dengan persamaan sebagai berikut:

$$B = \frac{[100(x - 0.3)]}{0.17} \text{ dimana } x = \frac{(a + 1.75L)}{(5.645 + a - 3.012)}$$

Tabel 1. Hasil uji aktivitas antimikroba pelapis nanokomposit.

Pelapis	Diameter penghambatan (mm)					
	E. coli	*S. aureus*	*S. cerevisiae*	*A. niger*	*F. oxysporum*	*P. digitatum*
Pektin 1%	-	-	-	-	-	-
Pektin 1% + NP-ZnO 1%	15.75±0.0248	20.15±0.764	-	-	-	-
Pati 1%	-	-	-	-	-	-
Pati 1% + NP-ZnO 1%	-	17.66±0.332	-	-	-	-
Kontrol	-	-	-	-	-	-

Keterangan : (-) Tidak ada zona penghambatan

Uji Organoleptik Penerimaan Keseluruhan

Uji organoleptik penerimaan keseluruhan merupakan penilaian terhadap mutu produk berdasarkan panca indera manusia melalui sensorik terhadap parameter warna, tekstur, aroma, rasa. Panelis sebanyak 20 orang diminta untuk mengemukakan tingkat kesukaan pada buah salak pondoh terolah minimal. Digunakan 7 skala hedonik berurutan mulai dari 1 (sangat tidak suka), 2 (tidak suka), 3 (agak tidak suka), 4 (biasa saja/netral), 5 (agak suka), 6 (suka), dan 7 (sangat suka). Batas penolakan konsumen adalah 3.5 ke bawah.

Analisis Statistik

Penelitian dilakukan dengan menggunakan Rancangan Acak Kelompok Lengkap (RAKL) dengan tiga kali ulangan dan perlakuannya yaitu larutan pelapis nanokomposit dari pektin + NP-ZnO dengan dua taraf: NP-ZnO 0%, 1%, larutan pelapis dari pati + NP-ZnO dengan dua taraf: NP-ZnO 0%, 1%, dan kontrol (tanpa perlakuan).

Data dianalisis menggunakan analisis sidik ragam dengan taraf nyata 5%, dan bila diperlukan maka dilanjutkan uji lanjut DMRT (*Duncan Multiple Range Test*).

Hasil dan Pembahasan

Aktivitas Antimikroba

Aktivitas antimikroba pelapis nanokomposit terhadap bakteri, khamir, dan jamur ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan hasil diameter zona hambat yang diperoleh menunjukkan bahwa pelapis nanokomposit mempunyai potensi aktivitas antimikroba terhadap bakteri. Pelapis nanokomposit dengan penambahan NP-ZnO 1% mempunyai penghambatan terhadap pertumbuhan *E. coli* dan *S. aureus*, tetapi tidak memiliki aktivitas penghambatan terhadap pertumbuhan khamir *S. cerevisiae* dan jamur *A. niger, F. oxysporum,* dan *P. digitatum*. Hal ini menunjukkan bahwa bakteri *E. coli* dan *S. aureus* lebih sensitif terhadap NP-ZnO dibandingkan dengan khamir dan jamur. Adanya pelepasan ion Zn dari NP-ZnO dan terjadinya akumulasi ion pada membran sel bakteri menyebabkan kerusakan stuktur membran akibat ion Zn mampu mengikat membran sel sehingga menyebabkan kematian sel bakteri. Hal ini sesuai dengan pendapat Liu *et al*. (2009) bahwa nanopartikel ZnO menunjukkan sifat antibakteri terhadap *E. coli* dan efek penghambatan akan meningkat jika konsentrasi nanopartikel ZnO meningkat. Nanopartikel ZnO dapat mendistorsi membran sel bakteri, menyebabkan hilangnya komponen intraseluler, dan akhirnya kematian sel. Sesuai juga dengan pendapat Li *et al.* (2009) bahwa *film* yang mengandung nanopartikel ZnO menunjukkan aktivitas antibakteri terhadap *E. coli* dan *S. aureus*, namun tidak menunjukkan aktivitas antijamur terhadap *A. flavus* dan *P. citrinum* yang memiliki struktur dinding sel yang sangat kompleks.

Zona hambat terhadap bakteri *E. coli* lebih kecil dibandingkan dengan *S. aureus* (Tabel 1). Perbedaan ini menunjukkan bahwa NP-ZnO lebih efektif terhadap *S. aures* dibandingkan *E. coli*. Hal ini disebabkan karena perbedaan struktur dinding sel kedua jenis bakteri tersebut. Hal ini sesuai dengan pendapat Premanathan *et al.* (2011) bahwa bakteri Gram positif seperti *S. aureus* lebih rentan terhadap nanopartikel ZnO dibandingkan bakteri Gram negatif. Bakteri gram positif memiliki satu membran plasma dan dinding tebal yang terdiri atas lapisan peptidoglikan, sedangkan bakteri Gram negatif memiliki struktur dinding sel yang lebih kompleks dengan lapisan peptidoglikan antara membran luar dan membran plasma (Wahab *et al*. 2010).

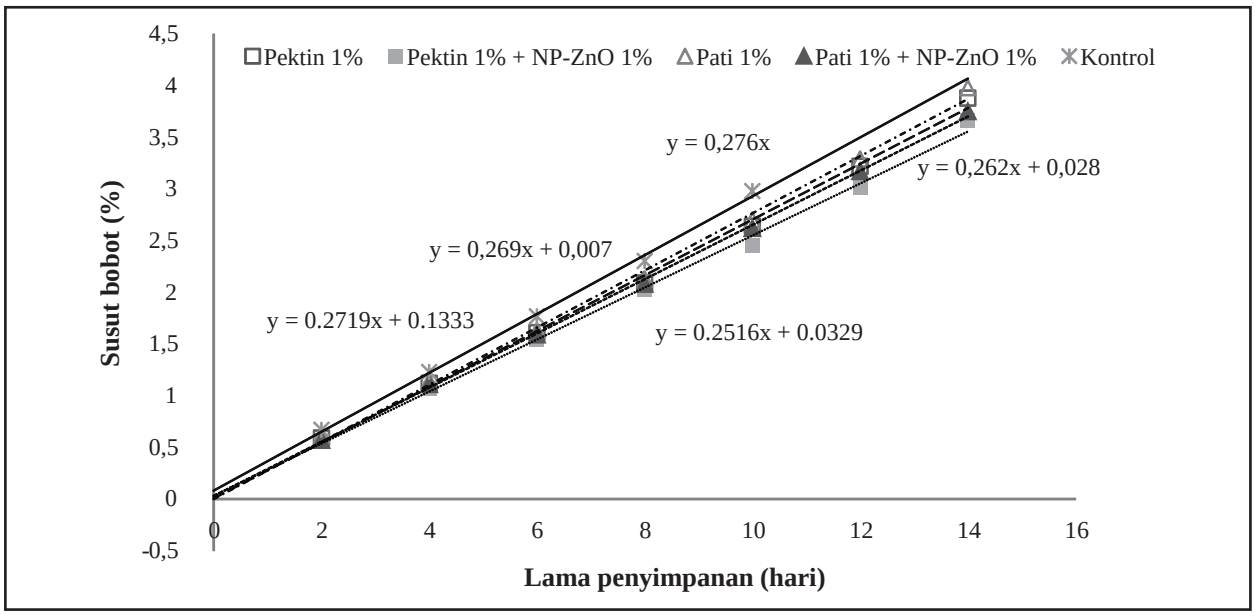
Susut Bobot

Susut bobot merupakan salah satu faktor yang mengindikasikan penurunan mutu buah dan menunjukkan tingkat kesegaran. Susut bobot pada buah-buahan yang disimpan terutama disebabkan oleh kehilangan air sebagai akibat adanya proses transpirasi dan respirasi. Selama penyimpanan terjadi peningkatan susut bobot buah salak pondoh terolah minimal (Gambar 1). Hilangnya air menyebabkan salak terolah minimal mengalami penurunan bobot. Disamping itu proses respirasi atau pemecahan senyawa-senyawa kompleks menjadi senyawa sederhana dengan berat molekul rendah juga menyebabkan bobot buah menjadi

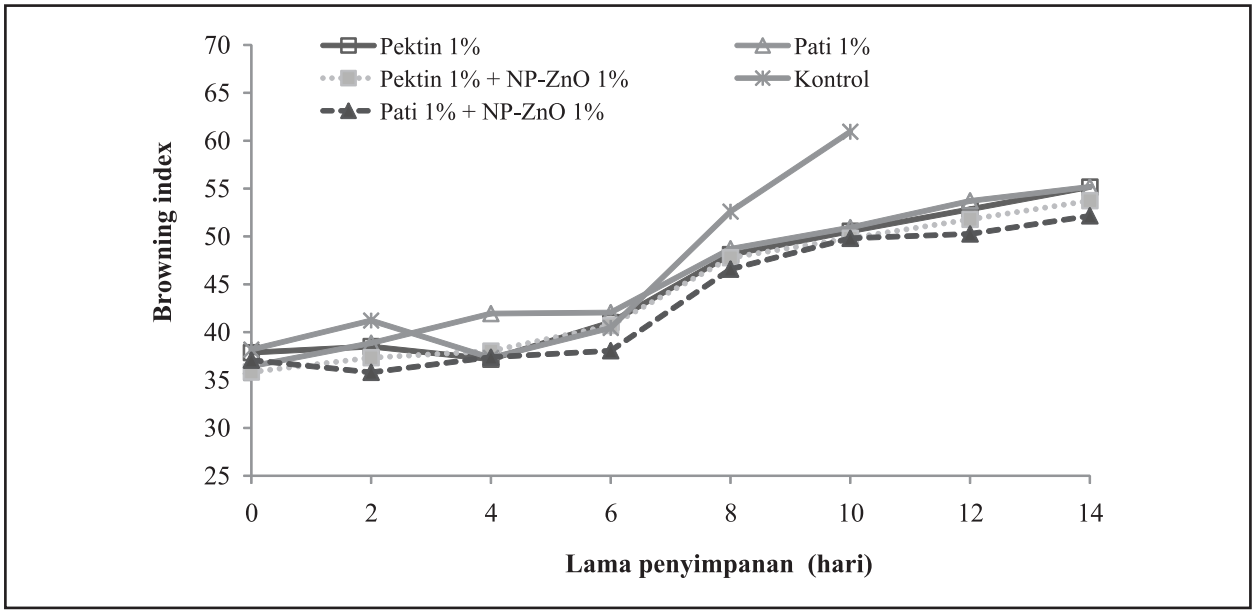
berkurang. Sesuai dengan pendapat Muchtadi *et al*. (2010) bahwa kehilangan air selama penyimpanan tidak hanya menurunkan susut bobot, akan tetapi juga menurunkan mutu dan menimbulkan kerusakan. Kehilangan air dalam jumlah banyak akan menjadikan buah layu dan keriput.

Perubahan susut bobot terbesar terdapat pada salak pondoh terolah minimal tanpa pelapis sedangkan perubahan terkecil terdapat pada perlakuan pelapis nanokomposit pektin 1% + NP-ZnO 1% dan pati 1% + NP-ZnO 1%. Hal ini menunjukkan bahwa pelapisan mampu mengurangi laju penguapan uap air dan proses penguraian senyawa-senyawa kompleks, sehingga dapat menekan laju kehilangan bobot buah selama penyimpanan. Hal ini sesuai dengan pendapat Lin dan Zhao (2007) bahwa *edibel coating* dari bahan polisakarida dapat berfungsi sebagai penghalang uap air, gas, dan zat terlarut lainnya. Selain itu juga sebagai pembawa bahan fungsional seperti agen antimikroba sehingga meningkatkan kualitas dan memperpanjang umur simpan buah-buahan dan sayuran segar terolah minimal. Penambahan nanopartikel akan meningkatkan karakteristik *edible film*, seperti kekuatan, antimikroba, dan memperbaiki sifat-sifat *barrier* sebagai pengemas (Alexandra dan Dubois 2000).

Hasil uji DMRT pada taraf ($\alpha<0.05$) menunjukkan bahwa perlakuan pelapis nanokomposit dari pektin 1% + NP-ZnO 1% menghasilkan nilai lebih kecil dan berbeda nyata dengan perlakuan tanpa pelapis (kontrol). Hal ini disebabkan karena penambahan nanopartikel ZnO ke dalam polimer mampu meningkatkan sifat fisik mekanik dari polimer yang



Gambar 1. Perubahan susut bobot salak pondoh terolah minimal selama penyimpanan.



Gambar 2. Perubahan *browning index* salak pondoh terolah minimal selama penyimpanan.

digunakan. Sesuai dengan pendapat Chang *et al*. (2010) yang menggabungkan pati kentang dengan nanokitin menunjukkan bahwa nanokitin dapat terdispersi dengan baik dalam matriks pati dapat meningkatkan sifat penghalang terhadap uap air. Penambahan partikel nanoclay kedalam matriks polimer pektin-karagenan dapat meningkatakan sifat mekanik dan memiliki permeabilitas terhadap uap air dan CO_2 yang lebih rendah (Coelhoso *et al*. 2010).

Browning Index (Indeks Kecoklatan)

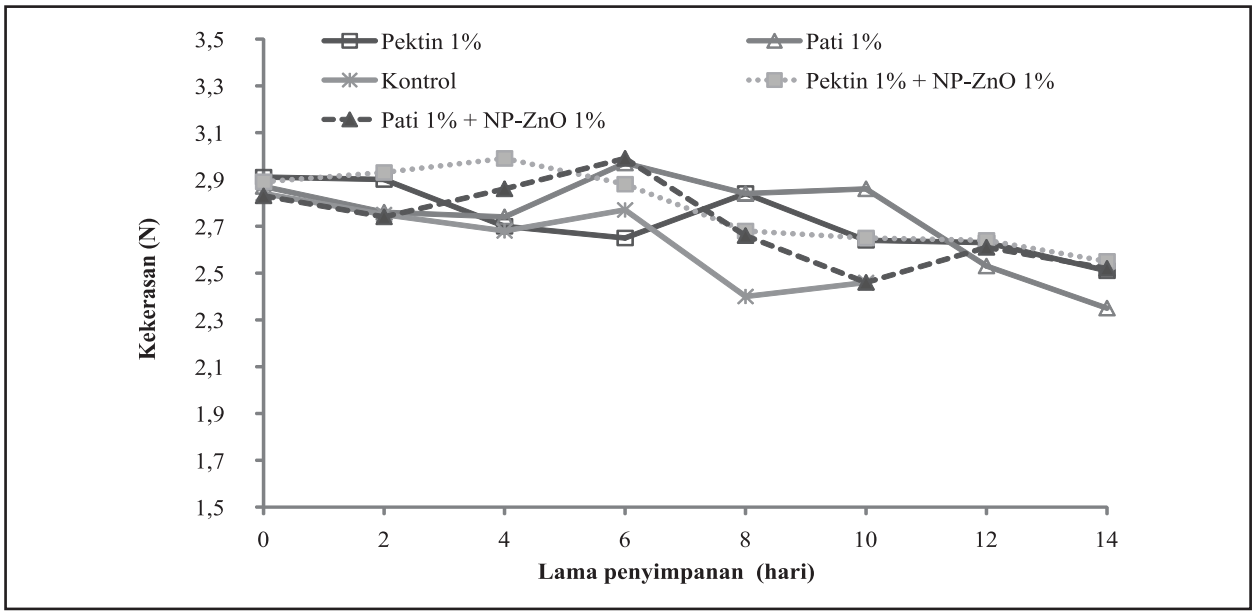
Warna merupakan salah satu kriteria penting dalam melihat perubahan mutu salak pondoh terolah minimal. Selama penyimpanan warna salak pondoh cenderung berubah menjadi cokelat atau biasa disebut dengan *browning* (pencoklatan). Selama penyimpanan nilai *browning index* salak pondoh terolah minimal cenderung meningkat untuk semua perlakuan (Gambar 2). Peningkatan nilai *browning index* terkecil terdapat pada perlakuan pelapis nanokomposit dan peningkatan terbesar terdapat pada perlakuan tanpa pelapis. Hal ini menunjukkan bahwa adanya pelapis yang berfungsi sebagai *barrier* gas yang mampu menghambat terjadinya reaksi pencoklatan atau browning enzimatis pada salak. Hal ini sesuai dengan pendapat Li *et al*. (2011) bahwa penyimpanan apel fuji terolah minimal dalam kemasan yang mengandung NP-ZnO secara signifikan mengurangi aktivitas polifenol oksidase dan menghasilkan *browning index* yang lebih rendah dibandingkan dengan kontrol.

Perubahan warna pada buah salak pondoh terolah minimal menjadi cokelat disebabkan peristiwa browning enzimatis akibat oksidasi yang menyebabkan terbentuknya senyawa melanin yang berwarna cokelat. Akibat adanya pengupasan kulit salak pondoh memperluas kontak buah dengan oksigen, sehingga aktifitas enzim fenolase semakin tinggi. Semakin tinggi aktifitas enzim maka semakin tinggi pula terbentuknya senyawa melanin yang dapat meningkatkan nilai indeks browning atau menurunkan kecerahan salak. Sesuai dengan pendapat Winarno (2002) bahwa reaksi pencoklatan terjadi akibat oksigen dapat berhubungan langsung dengan poliphenol dengan dikatalisa oleh enzim poliphenol oksidase membentuk senyawa melanin berwarna cokelat. Oksigen dapat berhubungan dengan poliphenol bila terdapat sel atau jaringan yang terbuka akibat luka. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa pelapis *edibel* berbasis polisakarida mampu memperlambat transfer gas, sehingga mengurangi respirasi dan mencegah reaksi pencoklatan seperti yang dilaporkan Brasil *et al*. (2012).

Pada daging buah disamping terjadi kerusakan akibat pencoklatan juga terjadi karena serangan mikroba terutama jamur/kapang seperti *Aspergillus niger*. Hal ini sesuai dengan pendapat Soesanto (2006) bahwa jamur *Aspergillus* sp. merupakan salah satu jamur kontaminan yang umum jumpai di dalam ruang penyimpanan produk pascapanen. Jamur ini menimbulkan bercak yang berukuran besar sehingga warna buah menjadi cokelat sampai kehitaman. Selain itu, daging buah juga mengalami kerusakan dan tidak dapat dikonsumsi.

Kekerasan

Kekerasan salak pondoh terolah minimal cenderung menurun selama penyimpanan ditunjukkan pada Gambar 3. Hal ini menunjukkan bahwa daging buah salak selama penyimpanan mengalami perubahan menjadi lebih lunak. Pelunakan tersebut terjadi karena adanya proses perubahan protopektin yang tidak larut menjadi pektin yang dapat larut. Selain itu, adanya akitivitas mikroba pada salak pondoh juga menyebabkan buah salak pondoh menjadi lunak dan berair. Hal



Gambar 3. Perubahan kekerasan salak pondoh terolah minimal selama penyimpanan.

ini sesuai dengan pendapat Muchtadi *et al*. (2010) bahwa dalam proses pematangan buah zat pektin yang tidak larut (protopektin) berubah menjadi pektin yang larut air, sehingga jumlah pektin yang larut air bertambah dan protopektin tak larut akan berkurang. Keadaan ini menyebabkan ketegaran sel buah akan menjadi menurun dan buah menjadi lunak.

Perubahan kekerasan terkecil salak pondoh terolah minimal terdapat pada perlakuan pelapis nanokomposit pektin 1% + NP-ZnO 1% dan pati 1% + NP-ZnO 1% sedangkan perubahan kekerasan terbesar terdapat pada salak pondoh terolah minimal tanpa pelapis. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian pelapis nanokomposit pada salak pondoh terolah minimal ternyata mampu mempertahankan kekerasan buah selama penyimpanan dan menghambat pertumbuhan mikroba yang menyebabkan pelunakan atau kerusakan selama penyimpanan. Hal ini sesuai dengan pendapat Oms-Oliu *et al*. (2008) bahwa pelapisan dengan *edible coating* berbasis polisakarida dapat mempertahankan kekerasan *fresh-cut* melon selama penyimpanan.

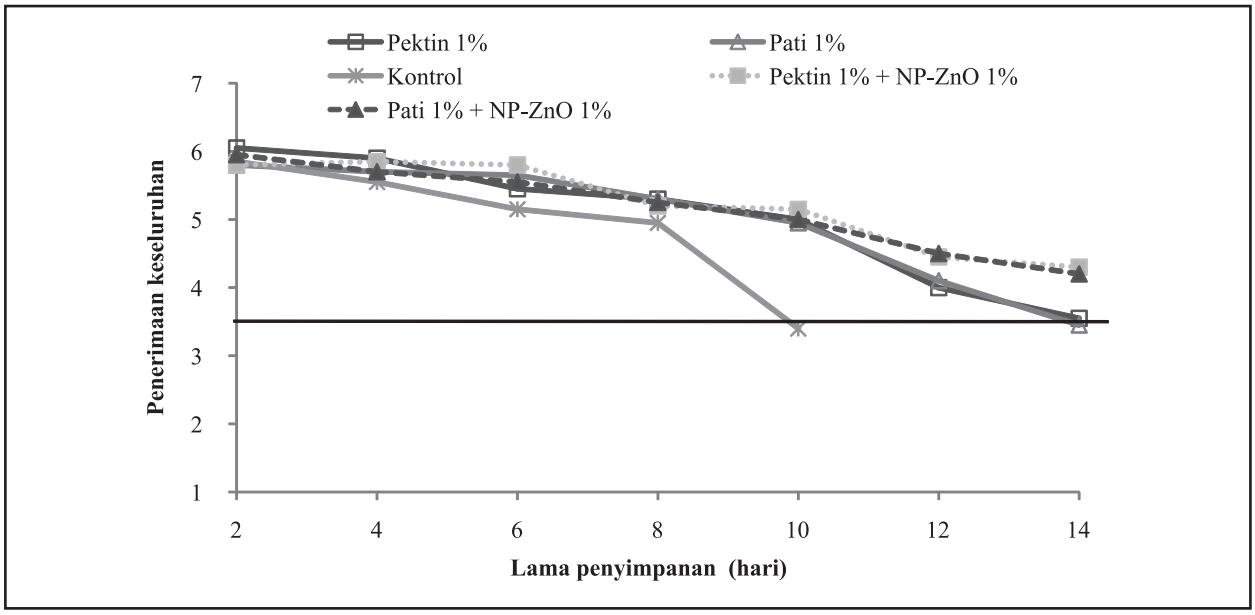
Uji Organoleptik Penerimaan Keseluruhan

Parameter keseluruhan pada uji organoleptik merupakan parameter penilaian tingkat kesukaan secara keseluruhan terhadap produk yang dinilai oleh panelis. Penerimaan keseluruhan merupakan gabungan tingkat kesukaan konsumen terhadap warna, aroma, tekstur, dan rasa daging salak yang diamati. Penurunan tingkat kesukaan panelis terhadap mutu salak pondoh terolah minimal secara keseluruhan menandakan bahwa terjadinya penurunan mutu salak pondoh terolah minimal selama penyimpanan (Gambar 4). Hal ini disebabkan karena setelah dipanen atau selama penyimpanan buah masih melakukan metabolisme dengan memanfaatkan sumber nutrisi yang ada. Proses ini mengakibatkan terjadinya perubahan-perubahan selama penyimpanan dan menyebabkan penurunan mutu.

Hasil uji organoleptik penerimaan keseluruhan menujukkan bahwa perubahan penerimaan keseluruhan paling kecil terdapat pada perlakuan pelapis nanokomposit pektin 1% + NP-ZnO 1% dan pati 1% + NP-ZnO 1%. Pemberian pelapis nanokomposit dapat mempertahankan mutu salak pondoh terolah minimal selama penyimpanan hingga hari ke-14, ditunjukkan dari hasil penilaian panelis berturut-turut yaitu sebesar 4.30 dan 4.20 setara netral. Sedangkan perlakuan tanpa pelapis hanya mampu bertahan hingga hari ke-8 dengan penilaian panelis sebesar 4.95 setara agak suka, dan pada hari ke-10 panelis memberikan penilaian sebesar 3.40 setara agak tidak suka. Hal ini menunjukkan bahwa pelapis nanokomposit dapat mempertahankan mutu salak pondoh terolah minimal selama penyimpanan. *Edible coating* dapat bergabung dengan bahan tambahan makanan dan substansi lain untuk meningkatkan kualitas warna, aroma, dan tekstur produk, untuk mengontrol pertumbuhan mikroba, serta untuk meningkatkan seluruh kenampakan. Penggunaan kemasan yang mengandung NP-ZnO dapat mempertahankan umur simpan jus orange selama 28 hari tanpa ada pengaruh negatif terhadap parameter sensorik (Emamifar *et al*. 2010).

Simpulan

Perubahan yang terjadi pada salak pondoh terolah minimal selama penyimpanan diantaranya penurunan bobot, warna, kekerasan, dan penuruan



Gambar 4. Tingkat kesukaan panelis terhadap penerimaan keseluruhan salak pondoh terolah minimal selama penyimpanan.

tingkat kesukaan terhadap mutu salak pondoh terolah minimal. Perlakuan pelapis pada salak pondoh terolah minimal memperlihatkan pengaruh nyata pada, susut bobot, warna, kekerasan, dan uji organoleptik.

Pelapis nanokomposit memiliki potensi aktivitas antimikroba terhadap baketri *E. coli* dan *S. aureus*. Salak pondoh terolah minimal tanpa pelapis hanya mampu bertahan hingga penyimpanan 8 hari, sedangkan salak pondoh terolah minimal terlapis nanokomposit dari pektin 1% + NP-ZnO 1% dan pati 1% + NP-ZnO 1% mampu mempertahankan mutu salak pondoh terolah minimal selama penyimpanan 14 hari dengan mutu akhir yaitu susut bobot sebesar 3.66% dan 3.75%, nilai *browning index* sebesar 53.74 dan 52.15, kekerasan sebesar 2.55 N dan 2.52 N dan uji organoleptik untuk penerimaan keseluruhan yaitu 4.30 dan 4.20 dari maksimal 7.

Daftar Pustaka

Alexandra, M.D.P. dan Dubois. 2000. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. *Materials Science Engineering*. 28:1−63.

Baldwin, E.A., M.O. Nisperos, Baker. 1995. Use of edible coating to preserve quality of lightly (and slightly) processed product. *J Critical Review in Food Science and Nutrition*. 35(6): 509-524.

Brasil, I.M., C. Gomes, A. Puerta-Gomes, M.E. Castell-Perez, R.G. Moreira. 2012. Polysaccharide-based multilayered antimicrobial edible coating enhances quality of fresh-cut papaya. *LWT-Food Science and Technology.* 47: 39-45.

Chang, P.R., R. Jian, J. Yu, X. Ma. 2010. Starch-based composites reinforced with novel chitin nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*. 80: 420−425.

Coelhoso, I.M., A.R.V. Ferreira, V.D. Alves. 2014. Biodegradable barrier membranes based on nanoclays and carrageenan/pectin blends. *Int J of Memb Sci and Tech*. 1: 23-30.

Emamifar, A., M. Kadivar, M. Shahedi, S.Z. Soleimanian. 2010. Evaluation of nanocomposite packaging containing Ag and ZnO on shelf life of fresh orange juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 11: 742-748.

Gorinstein, S., R. Haruenkit, S. Poovarodom, P. Yong-Seo, S. Vearasilp, M. Suhaj, H. Kyung-Sik, C. Ja-Yong, H.G. Jang. 2009. The comparative characteristics of snake and kiwi fruits. *Food and Chemical Toxicology*. 47: 1884-1891.

Li, X., Y. Xing, Y. Jiang, Y. Ding, W. Li. 2009. Antimicrobial activities of ZnO powder-coated PVC fill to inactive food pathogens. *International Journal of Food Science and Technology*. 44: 2161–2168.

Li, X., W. Li, Y. Jiang, Y. Ding, J. Yun, Y. Tang, P. Zhang. 2011. Effect of nano-ZnO-coated active packaging on quality of fresh-cut “fuji” apple. *International Journal of Food Science and Tech*. 46: 1947-1955.

Lin, D. dan Y. Zhao. 2007. Innovation in the development and application of edible coating for fresh and minimally processed fruits and vegetables. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 6: 60-75.

Lintang, M.M.J. 2011. Aplikasi pelapis edible pektin dan kitosan pada salak pondoh terolah minimal dalam kemasan atmosfer termodifikasi [tesis]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.

Liu, Y., L. He, A. Mustapha, H.Q. Li, Z. Hu. M. Lin. 2009. Antibacterial activities of zinc oxide nanoparticles against *Escherichia coli* O157:H7. *Journal of Applied Microbiology*. 107: 1193–1201.

Muchtadi, T.R., Sugiyono, F. Ayustaningwarno. 2010. *Ilmu Pengetahuan bahan pangan*. Bogor (ID): Alfabeta.

Oms-Oliu, G., R. Soliva-Fortuny, Martin-Belloso. 2008. Using polysaccharide-based edible coatings to enhance quality and antioxidant properties of fresh-cut melon. *LWT-Food Science and Technology*. 41: 1862-1870.

Saghaie, L., G. Houshfar, M. Neishabor. 2006. Synthesis and determination of partition coefficients of zinc complexes with clinical potential application. *Journal of Pharmaceutical Research*. 3: 179-189

Soesanto, L. 2006. *Penyakit pascapanen*. Yogyakarta (ID): Penerbit Kanisius.

Wahab, R., A. Mishra, S. Yun, Y. Kim, H. Shin. 2010. Antibacterial activity of ZnO nanoparticles prepared via non-hydrolytic solution route. *Appl Microbiol Biotechnol*. 87: 1917–1925.

Winarno, F.G. 2002. *Fisiologi lepas panen produk hortikultura*. Bogor (ID): M-BRIO Press.