

SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN CERDAS PENGEMBANGAN AGROINDUSTRI KARET ALAM DENGAN PENDEKATAN PRODUKTIVITAS HIJAU MENGGUNAKAN FUZZY AHP

INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR NATURAL RUBBER AGROINDUSTRY DEVELOPMENT WITH GREEN PRODUCTIVITY APPROACH USING FUZZY AHP

Hendra^{1,2)*}, Marimin³⁾, dan Yeni Herdiyeni^{2)*}

¹⁾Program Studi Mesin dan Peralatan Pertanian Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh
Jl. Raya Negara Km.7, Tanjung Pati, Kab. Lima Puluh Kota 26271, Sumatera Barat, Indonesia
E-mail: hendra.bgd@gmail.com

²⁾Departemen Ilmu Komputer, Institut Pertanian Bogor

³⁾Departemen Teknologi Industri Pertanian, Institut Pertanian Bogor

ABSTRACT

An industry that is closely related to environmental issues is the natural rubber industry. Production increase of natural rubber related with increase of garbage or waste that cause negative impact to the environment. Productivity is comparison between production outcome against resources used and productivity is one important indicator of production outcome assessment. The objectives of this research were to design software of intelligent decision support systems to measure the green productivity, to provide solutions and simulations an increase of productivity in the natural rubber agroindustry. The software used a fuzzy-rule to measure green productivity based on economic data and seven sources of waste generation data such as energy, water, materials, garbage, transportation, emissions, and biodiversity. Fuzzy analytical hierarchy process (Fuzzy AHP) was used to select the four alternatives on cultivation and processing of natural rubber agroindustry which have major influence on productivity improvement and reduce environmental impact which became a green productivity concept. The final results software was a simulation of the best alternative in the form of seven sources of waste generation and economic data.

Keywords: intelligent decision support system, fuzzy rule-base, fuzzy AHP, green productivity

ABSTRAK

Salah satu industri yang terkait erat dengan masalah lingkungan adalah industri karet alam, meningkatnya produksi karet alam berkaitan dengan meningkatnya sampah atau limbah yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Produktivitas merupakan perbandingan hasil produksi terhadap sumber daya yang digunakan dan produktivitas merupakan salah satu indikator penting penilaian hasil produksi. Tujuan penelitian ini adalah merancang perangkat lunak sistem pendukung keputusan cerdas yang dapat mengukur produktivitas hijau, memberikan solusi dan simulasi peningkatan produktivitas hijau dalam agroindustri karet alam. Perangkat lunak ini menggunakan *fuzzy ruled-base* untuk mengukur produktivitas hijau berdasarkan data ekonomi dan data tujuh sumber pembangkit limbah seperti energi, air, material, sampah, transportasi, emisi dan biodiversitas. *Fuzzy analytical hierarchy process (Fuzzy AHP)* digunakan untuk memilih empat alternatif pada proses budidaya dan pengolahan agroindustri karet alam yang mempunyai pengaruh besar terhadap peningkatan produktivitas dan penurunan dampak lingkungan yang menjadi konsep produktivitas hijau. Hasil akhir dari perangkat lunak adalah simulasi alternatif terbaik dalam bentuk tujuh sumber pembangkit limbah dan data ekonomi.

Kata kunci: sistem pendukung keputusan cerdas, *fuzzy rule-base*, fuzzy AHP, produktivitas hijau

PENDAHULUAN

Thailand, Indonesia dan Malaysia dikenal dengan *International Tripartite Rubber Council (ITRC)*. Ketiga negara tersebut penghasil karet alam terbesar. Thailand menjadi negara penghasil karet alam terbesar dengan produksi karet tahun 2011 sebesar 3,4 juta ton, sementara Indonesia di peringkat kedua dengan produksi karet sebesar 2,9 juta ton kemudian disusul oleh Malaysia dengan produksi 1 juta ton pada periode yang sama (IRSG, 2012). Konsumsi karet alam dunia selama tahun

2011 mencapai 11 juta ton, Indonesia memasok 26,4% dari konsumsi karet alam dunia.

Salah satu industri yang erat hubungannya dengan masalah lingkungan adalah agroindustri karet alam. Penelitian ini mencoba meminimasi penggunaan sumber daya pada agroindustri karet alam dengan cara memilih alternatif-alternatif yang mempunyai pengaruh besar terhadap penurunan dampak lingkungan dan peningkatan produktivitas. Menurut Saxena *et al.* (2003) kinerja suatu perusahaan tidak hanya dievaluasi berdasarkan parameter ekonomi saja, tetapi juga harus terintegrasi dengan kinerja lingkungan.

Pengembangan industri diarahkan dengan kontinuitas *output* dan meminimasi penggunaan *input* berupa bahan baku dan energi dalam proses produksi (UNIDO, 2009).

Penelitian ini merupakan pengembangan dalam bentuk aplikasi dari penelitian Marimin *et al.* (2013^a), Darmawan (2013) dan Marimin *et al.* (2013^b) yang menerapkan pendekatan produktivitas hijau dalam agroindustri karet alam pada suatu perusahaan menggunakan analisis pemetaan aliran nilai/*value stream mapping* (VSM). VSM digunakan untuk mengidentifikasi tujuh sumber pembangkit limbah pada setiap tahapan proses budidaya dan pengolahan karet alam. Produktivitas hijau adalah suatu strategi untuk meningkatkan produktivitas dan menurunkan dampak lingkungan (APO, 2006). Produktivitas hijau mempunyai konsep meningkatkan profit, meningkatkan kualitas hidup dan menurunkan dampak terhadap lingkungan (APO, 2006).

Penelitian ini merancang aplikasi berbasis *web* sistem pendukung keputusan cerdas yang terdiri dari subsistem-subsistem untuk mengukur produktivitas hijau, memberikan solusi dan simulasi peningkatan produktivitas hijau dalam agroindustri karet alam secara cepat. Menurut Phillips-Wren *et al.* (2009) struktur sistem pendukung keputusan cerdas digambarkan sebagai diagram *input*, proses dan *output*. *Input* sistem terdiri dari subsistem *database*, subsistem *model base* dan subsistem *knowledge base*. *Output* sistem berbentuk laporan solusi dan rekomendasi keputusan beserta penjelasan dampaknya.

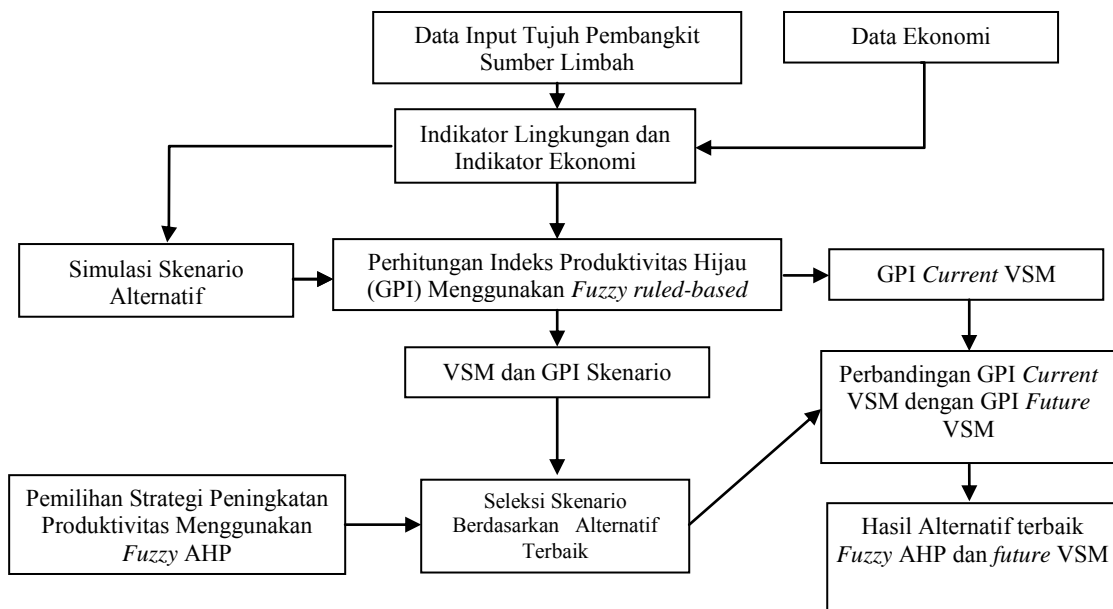
Aplikasi ini menggunakan *fuzzy analytic hierarchy process* (Fuzzy AHP) dalam pengambilan keputusan dan *fuzzy rule-based* dalam memperhitungkan indeks produktivitas hijau. Sistem mempunyai parameter *input* data tujuh sumber pembangkit limbah, data ekonomi dan data penilaian

pakar. Simulasi skenario dari alternatif terbaik merupakan *output* dari sistem. Tujuan penelitian ini adalah merancang aplikasi sistem pendukung keputusan cerdas dalam agroindustri karet alam berbasis *web*. Rancangan aplikasi ini diharapkan mampu mengukur produktivitas hijau, dapat memberikan rekomendasi peningkatan produktivitas berupa alternatif terbaik dan dapat mensimulasikan alternatif tersebut pada agroindustri karet alam.

METODE PENELITIAN

Kerangka Penelitian

Tahap awal dilakukan input data tujuh sumber pembangkit limbah yaitu energi, air, material, sampah, transportasi, emisi dan biodiversitas pada setiap tahap proses produksi per bulan. Data ekonomi berupa harga per ton, biaya per ton dan total produksi per bulan. Data tujuh sumber pembangkit limbah dan data ekonomi tersebut disebut dengan peta aliran nilai sekarang atau *current VSM*. Berdasarkan data input tersebut dihasilkan nilai indikator lingkungan dan nilai indikator ekonomi. Metode *fuzzy rule-based* digunakan untuk mengukur produktivitas hijau dalam bentuk nilai indeks produktivitas hijau (GPI *current VSM*) berdasarkan nilai indikator lingkungan dan nilai indikator ekonomi. Masing-masing alternatif disimulasikan untuk memperhitungkan indeks produktivitas hijau yang disebut dengan GPI skenario berdasarkan *current VSM*. Metode *fuzzy AHP* bertujuan untuk memberikan solusi peningkatan produktivitas hijau dengan cara memilih alternatif terbaik rekomendasi pakar. *Output* akhir dari sistem ini adalah simulasi alternatif terbaik dalam bentuk data peta aliran nilai yang akan datang (*future VSM*). Kerangka pemikiran digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pemikiran penelitian

Perhitungan Indeks Produktivitas Hijau (GPI) Menggunakan Fuzzy Rule-Based

Tahap ini memperhitungkan indikator ekonomi, indikator lingkungan dan indeks produktivitas hijau berdasarkan *current* VSM. Indikator ekonomi dihasilkan sesuai dengan persamaan 1 menurut Hur *et al.* (2004).

$$\text{Indikator ekonomi} = \frac{\text{Harga}}{\text{Biaya}} \dots\dots\dots (1)$$

Menurut Gandhi *et al.* (2006) indikator lingkungan diperhitungkan berdasarkan bobot *Environmental Sustainability Index* atau ESI (Yale Center for Environmental Law and Policy Report, 2005) seperti Tabel 1.

$$EI = w1GWG + w2WC + w3SWG + w4LC \dots\dots (2)$$

Keterangan :

- w1, w2, w3, w4 : bobot masing-masing indikator GPI
- GWG : pembangkit limbah gas (*gaseous wastes generation*)
- SWG : pembangkit limbah padat (*solid wastes generation*)
- WC : konsumsi air (*water consumption*)
- LC : tingkat pencemaran pada lahan perkebunan (*land contamination*)

Tabel 1 menggambarkan nilai bobot untuk masing-masing indikator GPI, w1=0,375, w2=0,25, w3=0,125, dan w4=0,25. Indikator lingkungan (EI) dalam kegiatan budidaya dan pengolahan karet alam dirumuskan dengan persamaan 3 :

$$EI = 0,375GWG + 0,25WC + 0,125SWG + 0,25LC \dots (3)$$

Pada penelitian ini perhitungan GPI menggunakan metode *fuzzy rule-based* berdasarkan bobot indikator ekonomi dan indikator lingkungan. Langkah *fuzzy rule-based* sebagai berikut:

Langkah 1: Fuzzifikasi

Proses budidaya mempunyai dua parameter input yaitu indikator-lingkungan, indikator-ekonomi dan satu parameter output yaitu GPI. Fungsi keanggotaan adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik masukan data ke dalam nilai keanggotaannya. Fungsi keanggotaan masing-masing parameter indikator-ekonomi (IE) proses budidaya dideskripsikan pada persamaan 4-6. Kusumadewi (2002).

Fungsi keanggotaan masing-masing parameter indikator-lingkungan (IL) proses budidaya dideskripsikan pada persamaan 7-9.

Tabel 1. Penurunan empat indikator lingkungan GPI (Yale Center for Environmental Law and Policy Report, 2005).

Indikator GPI	Kesetaraan Indikator ESI	Bobot dalam ESI	Penggabungan Bobot (x)	Bobot (w) dalam GPI (x/0,4)
Pembangkit Limbah Gas (GWG)	Kualitas udara	0,05	0,15	0,375
	Emisi gas rumah kaca	0,05		
	Penurunan tingkat Polusi udara	0,05		
Konsumsi Air (WC)	Kualitas air	0,05	0,1	0,25
	Jumlah air	0,05		
Pembangkit Limbah Padat (SWG)	Penurunan limbah padat Dan konsumsi material	0,05	0,05	0,125
Pencemaran Lahan (LC)	Biodiversitas	0,05	0,1	0,25
	Lahan dan tanah	0,05		
Total			0,4	1

$$\mu_{IE-Buruk}(x) = \begin{cases} (0,75 - x)/(0,75 - 0); & 0 \leq x < 0,75 \\ 0; & x \geq 0,75 \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

$$\mu_{IE-Normal}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 0,5 \text{ atau } x \geq 1,5 \\ (x - 0,5)/(1 - 0,5); & 0,5 < x < 1 \\ 1; & x = 1 \\ (1,5 - x)/(1,5 - 0,5); & 1 < x < 1,5 \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

$$\mu_{IE-Baik}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 1,4 \\ (x - 1,4)/(3 - 1,4); & 1,4 < x < 3 \\ 1; & x \geq 3 \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

$$\mu_{IL-Baik}(x) = \begin{cases} (0,65 - x)/(0,65 - 0); & 0 \leq x < 0,65 \\ 0; & x \geq 0,65 \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

$$\mu_{IL-Normal}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 0,6 \text{ atau } x \geq 0,9 \\ (x - 0,6)/(0,8 - 0,6); & 0,6 < x < 0,8 \\ 1; & x = 0,8 \\ (0,9 - x)/(0,9 - 0,6); & 0,8 < x < 0,9 \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

$$\mu_{IL-Buruk}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 0,85 \\ (x - 0,85)/(1 - 0,85); & 0,85 < x < 1 \\ 1; & x \geq 1 \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

Fungsi keanggotaan masing-masing parameter GPI proses budidaya dideskripsikan pada persamaan 10-14 dan Gambar 2.

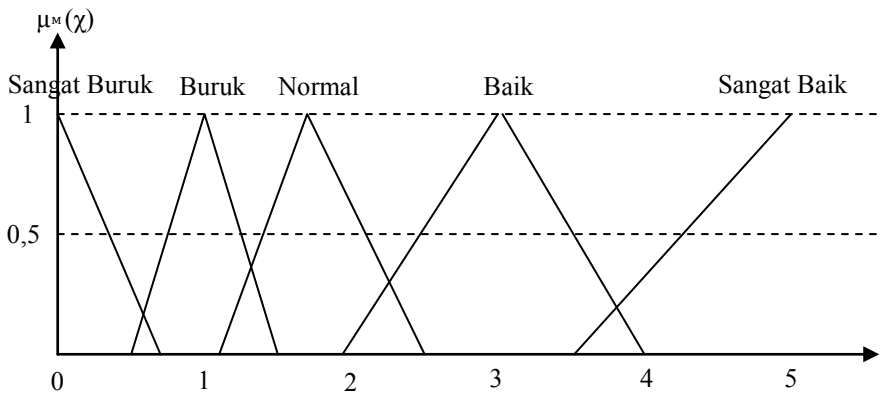
$$\mu_{GPI-SgtBuruk}(x) = \begin{cases} (0,75 - x)/(0,75 - 0); & 0 \leq x < 0,75 \\ 0; & x \geq 0,75 \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

$$\mu_{GPI-Buruk}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 0,5 \text{ atau } x \geq 1,5 \\ (x - 0,5)/(1 - 0,5); & 0,5 < x < 1 \\ 1; & x = 1 \\ (1,5 - x)/(1,5 - 0,5); & 1 < x < 1,5 \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

$$\mu_{GPI-Normal}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 1,25 \text{ atau } x \geq 2,5 \\ (x - 1,25)/(1,75 - 1,25); & 1,25 < x < 1,75 \\ 1; & x = 1,75 \\ (2,5 - x)/(2,5 - 1,25); & 1,75 < x < 2,5 \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

$$\mu_{GPI-Baik}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 2 \text{ atau } x \geq 4 \\ (x - 2)/(3 - 2); & 2 < x < 3 \\ 1; & x = 3 \\ (4 - x)/(4 - 2); & 3 < x < 4 \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

$$\mu_{GPI-Baik}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 3,5 \\ (x - 3)/(5 - 3,5); & 3,5 < x < 5 \\ 1; & x \geq 5 \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$



Gambar 2. Representasi kurva segitiga nilai GPI

Fungsi keanggotaan masing-masing parameter indikator-ekonomi proses pengolahan dideskripsikan pada persamaan 15-17.

$$\mu_{IE-Buruk}(x) = \begin{cases} (1 - x)/(1 - 0); & 0 \leq x < 1 \\ 0; & x \geq 1 \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

$$\mu_{IE-Normal}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 0,5 \text{ atau } x \geq 2,5 \\ (x - 0,5)/(1,5 - 0,5); & 0,5 < x < 1,5 \\ 1; & x = 1,5 \\ (2,5 - x)/(2,5 - 0,5); & 1,5 < x < 2,5 \end{cases} \dots\dots\dots (16)$$

$$\mu_{IE-Baik}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 2 \\ (x - 2)/(4 - 2); & 2 < x < 4 \dots\dots\dots (17) \\ 1; & x \geq 4 \end{cases}$$

Fungsi keanggotaan masing-masing parameter indikator-lingkungan proses pengolahan dideskripsikan pada persamaan 18-20.

$$\mu_{IL-Baik}(x) = \begin{cases} (0,8 - x)/(0,8 - 0); & 0 \leq x < 0,8 \\ 0; & x \geq 0,8 \end{cases} \dots\dots\dots (18)$$

$$\mu_{IL-Normal}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 0,7 \text{ atau } x \geq 1,4 \\ (x - 0,7)/(1 - 0,7); & 0,7 < x < 1 \\ 1; & x = 1 \\ (1,4 - x)/(1,4 - 0,7); & 1 < x < 1,4 \end{cases} \dots\dots\dots (19)$$

$$\mu_{IL-Buruk}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 1,3 \\ (x - 1,3)/(2 - 1,3); & 1,3 < x < 2 \dots\dots\dots (20) \\ 1; & x \geq 2 \end{cases}$$

Fungsi keanggotaan masing-masing parameter GPI proses pengolahan sama dengan proses budidaya dideskripsikan pada persamaan 10-14.

Langkah 2: Pembentukan Aturan (rule)

Berdasarkan dua input *fuzzy* indikator-lingkungan dan indikator-ekonomi dibuat aturan seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Aturan *fuzzy*

Input		Output
Indikator-Lingkungan	Indikator-Ekonomi	Indeks-GPI
Baik	Buruk	Buruk
Baik	Normal	Baik
Baik	Baik	Sangat Baik
Normal	Buruk	Buruk
Normal	Normal	Normal
Normal	Baik	Baik
Buruk	Buruk	Sangat-Buruk
Buruk	Normal	Buruk
Buruk	Baik	Buruk

Langkah 3: Defuzzifikasi

Pada tahap ini nilai *crisp* diperoleh dengan menggunakan *centre average defuzzifier* pada setiap alternatif yang ada. Simbol *centre average defuzzifier* pada Wang (1997) disesuaikan dengan kebutuhan penelitian ini sehingga menjadi persamaan 21.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \dots\dots\dots (21)$$

Simulasi Skenario Alternatif

Tahap ini bertujuan untuk menghasilkan simulasi skenario alternatif strategi peningkatan produktivitas yang diusulkan oleh pakar. Setiap alternatif dari pakar disimulasikan menjadi skenario-skenario yang terdiri dari data tujuh sumber pembangkit limbah dan data ekonomi. Data tujuh

sumber pembangkit limbah menghasilkan nilai indikator lingkungan menggunakan persamaan 3 dan nilai indikator ekonomi menggunakan persamaan 1, GPI dihitung menggunakan metode *fuzzy rule-based*.

Pemilihan Strategi Peningkatan Produktivitas Menggunakan Fuzzy AHP

Pemilihan strategi peningkatan produktivitas bertujuan untuk memilih alternatif strategi peningkatan produktivitas yang telah terbentuk secara hierarki oleh pakar yang bersumber pada penelitian Marimin *et al.* (2013^a) dan Darmawan *et al.* (2013). Metode yang digunakan adalah *fuzzy* AHP untuk menentukan bobot alternatif dan memilih bobot alternatif yang paling besar dari input kuesioner penilaian para pakar. Langkah *fuzzy* AHP sebagai berikut:

Langkah 1: Pembuatan struktur

Struktur AHP pada proses budidaya dan pengolahan karet alam terdiri dari lima level yaitu: fokus, faktor, aktor, tujuan dan alternatif. Struktur AHP budidaya karet alam seperti pada Gambar 6 (Marimin *et al.*, 2013^a) dan pada pengolahan karet alam seperti Gambar 8 (Darmawan *et al.*, 2013).

Langkah 2: Penilaian kriteria dan alternatif oleh pakar

Pakar melakukan penilaian tingkat kepentingan antar elemen berdasarkan definisi dan fungsi keanggotaan *fuzzy* pada Tabel 3 yang bersumber pada Ayag (2005) di dalam Marimin *et al.* (2013^c).

Langkah 3: Fuzzifikasi

Setiap nilai dari hasil penilaian pakar dihitung bilangan *fuzzy* berdasarkan fungsi

keanggotaan Tabel 3. Perhitungan bilangan *fuzzy* mempunyai nilai α yang harus dimasukkan pada Persamaan 22-26 untuk menghasilkan nilai $\alpha - cut$ *fuzzy* (Marimin *et al.*, 2013^c). Penelitian ini menggunakan nilai $\alpha = 0,5$, yaitu para pakar mempunyai tingkat kepercayaan rata-rata.

Langkah 4: Perhitungan nilai *crisp* (defuzifikasi)

Setiap nilai $\alpha - cut$ *fuzzy* dirubah kedalam nilai *crisp* dengan menggunakan Persamaan 27 (Marimin *et al.*, 2013^c). Penelitian ini menggunakan nilai indeks optimisme $\omega = 0,5$ yang menunjukkan bahwa penilaian yang diberikan tidak terlalu optimis dan tidak terlalu pesimis, sehingga setiap nilai *crisp* dihitung menggunakan persamaan 28-32.

Langkah 5: Pembuatan matrik perbandingan berpasangan

Setiap nilai *crisp* elemen dimasukkan kedalam matrik perbandingan berpasangan sesuai dengan kriteria pada struktur hirarki AHP.

Langkah 6: Perhitungan nilai bobot

Setiap matrik perbandingan berpasangan dimasukkan kedalam aplikasi *SuperDecisions* untuk menghasilkan bobot setiap elemen. Aplikasi *SuperDecisions* merupakan perangkat lunak yang berfungsi untuk memperhitungkan nilai bobot pada struktur hirarki AHP (www.superdecisions.com).

Langkah 7: Penggabungan pendapat pakar

Pendapat pakar digabungkan dengan menggunakan *geometric mean* seperti pada persamaan dibawah ini (Marimin dan Maghfiroh, 2010).

$$\bar{X}_G = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n X_i}$$

dimana n adalah jumlah pakar dan X_i adalah bobot dari masing-masing alternatif.

Tabel 3. Definisi dan fungsi keanggotaan bilangan *fuzzy*

Tingkat Kepentingan	Bilangan <i>fuzzy</i>	Defenisi	Fungsi Keanggotaan
1	$\tilde{1}$	Sama penting (E)	(1,1,3)
3	$\tilde{3}$	Sedikit lebih penting (W)	(1,3,5)
5	$\tilde{5}$	Jelas lebih penting (S)	(3,5,7)
7	$\tilde{7}$	Sangat jelas lebih penting (VS)	(5,7,9)
9	$\tilde{9}$	Mutlak lebih penting (A)	(7,9,11)

$$\tilde{1}_\alpha = [1, 3 - 2\alpha] \dots\dots\dots (22)$$

$$\tilde{3}_\alpha = [1 + 2\alpha, 5 - 2\alpha], \tilde{3}_\alpha^{-1} = [\frac{1}{5-2\alpha}, \frac{1}{1+2\alpha}] \dots\dots\dots (23)$$

$$\tilde{5}_\alpha = [3 + 2\alpha, 7 - 2\alpha], \tilde{5}_\alpha^{-1} = [\frac{1}{7-2\alpha}, \frac{1}{3+2\alpha}] \dots\dots\dots (24)$$

$$\tilde{7}_\alpha = [5 + 2\alpha, 9 - 2\alpha], \tilde{7}_\alpha^{-1} = [\frac{1}{9-2\alpha}, \frac{1}{5+2\alpha}] \dots\dots\dots (25)$$

$$\tilde{9}_\alpha = [7 + 2\alpha, 11 - 2\alpha], \tilde{9}_\alpha^{-1} = [\frac{1}{11-2\alpha}, \frac{1}{7+2\alpha}] \dots\dots\dots (26)$$

$$\tilde{\alpha}_{ij}^\alpha = \omega a_{iju}^\alpha + (1 - \omega) a_{iji}^\alpha, \forall \omega \in [0,1] \dots\dots\dots (27)$$

$$\tilde{1}_{ij}^\alpha = (\omega * 1) + (\omega * 2) \dots\dots\dots (28)$$

$$\tilde{3}_{ij}^\alpha = (\omega * 2) + (\omega * 4), \tilde{3}_{ij}^{\alpha^{-1}} = (\omega * 0,25) + (\omega * 0,5) \dots\dots\dots (29)$$

$$\tilde{5}_{ij}^\alpha = (\omega * 4) + (\omega * 6), \tilde{5}_{ij}^{\alpha^{-1}} = (\omega * 0,166) + (\omega * 0,25) \dots\dots\dots (30)$$

$$\tilde{7}_{ij}^\alpha = (\omega * 6) + (\omega * 8), \tilde{7}_{ij}^{\alpha^{-1}} = (\omega * 0,125) + (\omega * 0,166) \dots\dots\dots (31)$$

$$\tilde{9}_{ij}^\alpha = (\omega * 8) + (\omega * 10), \tilde{9}_{ij}^{\alpha^{-1}} = (\omega * 0,1) + (\omega * 0,125) \dots\dots\dots (32)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini membahas perancangan perangkat lunak yang bertujuan untuk memperhitungkan produktivitas dan memberikan rekomendasi alternatif peningkatan produktivitas. Data tujuh sumber pembangkit limbah dan data ekonomi dalam proses budidaya dan pengolahan dijadikan *input* dari aplikasi. *Output* dari aplikasi adalah alternatif yang mempunyai bobot terbesar dan simulasi alternatif tersebut dalam bentuk tujuh pembangkit sumber limbah dan data ekonomi. Pengguna aplikasi ini tidak hanya dapat mengetahui nilai dampak lingkungan dan produktivitas hasil produksi saat ini tetapi juga mendapatkan rekomendasi alternatif peningkatan produktivitas dan data tujuh sumber pembangkit limbah dari alternatif tersebut.

Sistem ini dirancang khusus untuk agroindustri karet alam proses budidaya dan pengolahan. Aplikasi ini dibuat dengan menggunakan *software* PHP *version* 5.2.6 untuk pembuatan antar-muka, MySQL Database *version* 5.0.51b untuk pembuatan *database* dan Aplikasi *SuperDecisions* untuk perhitungan AHP.

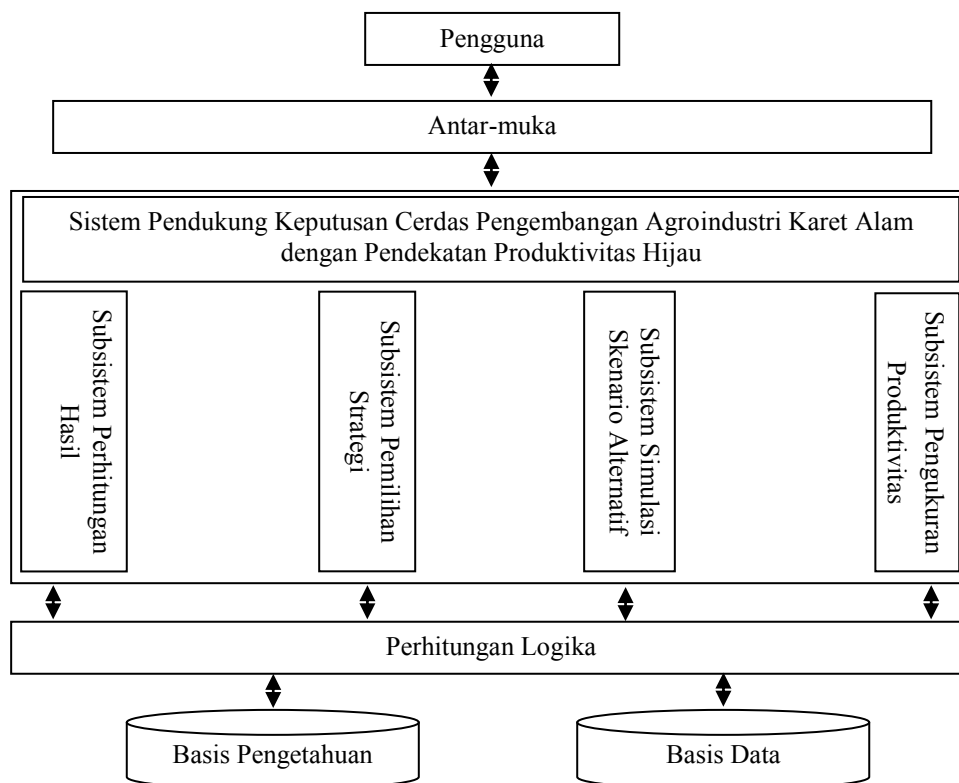
Hasil Arsitektur Sistem Pendukung Keputusan Cerdas

Rancangan perangkat lunak ini menghasilkan lima subsistem yaitu subsistem

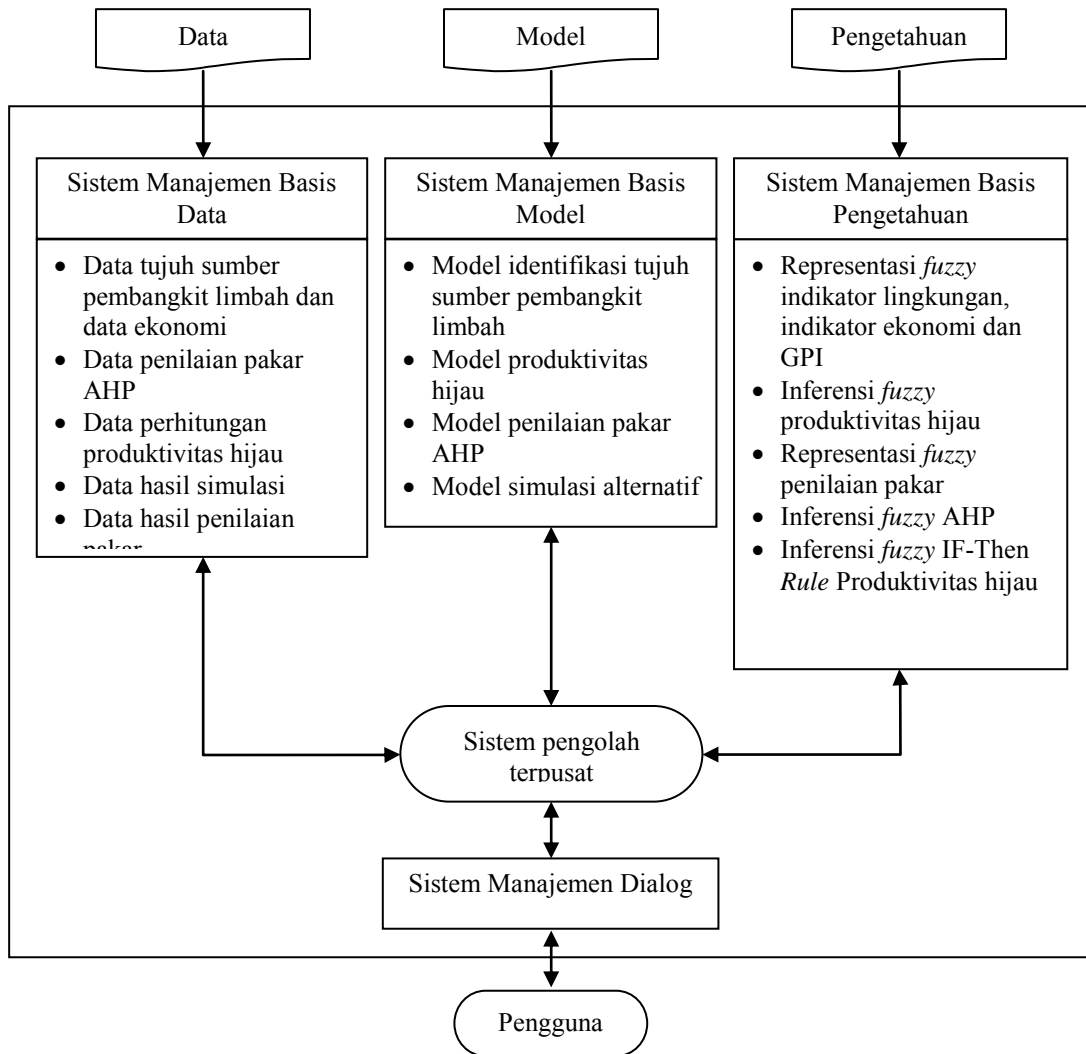
pengukuran produktivitas, subsistem simulasi skenario alternatif, subsistem pemilihan strategi, subsistem pemilihan kebijakan dan subsistem perhitungan hasil. Sistem mempunyai satu basis data dan basis pengetahuan. Ilustrasi arsitektur dari perangkat lunak dapat dilihat pada Gambar 3.

Subsistem pengukuran produktivitas berfungsi untuk menghitung tingkat produktivitas hijau dari *input* aktual pengguna dalam bentuk *current* VSM. Subsistem simulasi skenario alternatif berfungsi untuk mensimulasikan *current* VSM berdasarkan setiap alternatif yang diusulkan oleh pakar. Subsistem pemilihan strategi berfungsi untuk memilih alternatif berdasarkan kuesioner penilaian pakar menggunakan *fuzzy* AHP. Subsistem perhitungan hasil berfungsi untuk menampilkan hasil semua subsistem. Basis data berfungsi untuk menyimpan data *current* VSM, *future* VSM dan data penilaian pakar. Basis Pengetahuan berisi fungsi keanggotaan *fuzzy* dan aturan-aturan *fuzzy*.

Penelitian ini menghasilkan empat komponen utama sistem pendukung keputusan cerdas yaitu sistem manajemen basis model, sistem manajemen basis data, sistem manajemen basis pengetahuan dan sistem manajemen dialog. Arsitektur model sistem pendukung keputusan cerdas dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Arsitektur perangkat lunak sistem pendukung keputusan cerdas



Gambar 4. Arsitektur model sistem pendukung keputusan cerdas

Hasil Implementasi Perhitungan Produktivitas

Tahap ini menghasilkan nilai indikator lingkungan, indikator ekonomi dan GPI. Semakin besar nilai GPI maka semakin besar produktivitasnya, semakin besar nilai indikator ekonomi semakin besar keuntungan hasil produksi. Semakin kecil nilai indikator lingkungan maka semakin kecil dampak lingkungan yang dihasilkan proses produksi karena penggunaan tujuh sumber pembangkit limbah yang semakin sedikit. Tahap ini diuji menggunakan data *current* VSM seperti Tabel 4 dan data ekonomi berupa total produksi 413.558 kg per bulan, harga jual Rp 3.108.808 per ton dan biaya Rp 2.367.306 per ton pada proses budidaya (Marimin *et al.*, 2013^a). Data untuk proses pengolahan seperti Tabel 8 dan data ekonomi berupa total produksi 120.000 kg per bulan, harga jual Rp 45.000.000 per ton dan biaya Rp 21.817.971 per ton (Darmawan, 2013). Tahap analisa *current* VSM menghasilkan *output* berupa indikator ekonomi

menggunakan persamaan 1, indikator lingkungan menggunakan persamaan 3 dan untuk memperhitungkan nilai GPI menggunakan *fuzzy ruled-based*. Hasil perhitungan produktivitas dapat dilihat pada Tabel 5.

Dari Tabel 5 dapat dilihat nilai GPI dari proses budidaya menunjukkan masih dalam kategori normal sesuai dengan persamaan 12 karena indikator lingkungan proses budidaya dalam kategori normal sesuai dengan persamaan 8 dan indikator ekonomi dalam kategori normal sesuai dengan persamaan 6. Nilai GPI proses pengolahan menunjukkan kategori normal sesuai dengan persamaan 12 karena indikator lingkungan dalam kategori normal sesuai dengan Persamaan 19 dan indikator ekonomi dalam kategori normal sesuai dengan persamaan 16. Nilai GPI proses budidaya dan pengolahan masih dalam kategori normal sehingga perlu diambil alternatif-alternatif untuk peningkatan produktivitas hijau.

Tabel 4. *Current* VSM proses budidaya karet alam

Jenis Limbah	Proses Kegiatan							Total
	Pemasok-an	Pembibit-an	Perawat-an TBM	Perawat-an TM	Pemanen-an	Penyaring-an	Pengirim-an	
Energi (Kwh)	0	1830	0	0	0	0	0	1830
Air (m ³)	0	900	0	0	0	0	0	900
Material (kg)	0	2358,6	53670,5	75806,6	0	0	0	131836
Sampah (kg)	0	334	0	0	144000	3000	0	147334
Transportasi (km)	69,17	0	0	0	0	0	2700	2769,17
Emisi (kg)	37	1631	0	0	0	0	1426,3	3094,3
Biodiversitas (Ha)	0	193,96	762,83	1758,62	0,02	0,01	0	2715,44

Tabel 5. Hasil pengukuran produktivitas hijau

Proses	Hasil		GPI
	Indikator lingkungan	Indikator ekonomi	
Budidaya	0,671	1,313	1,83
Pengolahan	1,339	2,063	1,714

Hasil Implementasi Simulasi Skenario Alternatif

Tahap ini mensimulasikan setiap alternatif yang direkomendasikan oleh pakar yang bertujuan untuk melihat produktivitas hijau masing-masing alternatif dengan cara menghitung perubahan yang terjadi pada data ekonomi dan data tujuh sumber pembangkit limbah disajikan pada Tabel 6 dan Tabel 7. Setiap data tujuh sumber pembangkit limbah dan data ekonomi diperhitungkan menghasilkan indikator lingkungan menggunakan persamaan 3, indikator ekonomi menggunakan persamaan 1 dan GPI menggunakan *fuzzy ruled-based*. Hasil simulasi proses budidaya dapat dilihat pada Tabel 8 dan proses pengolahan dapat dilihat pada Tabel 9.

Pada Tabel 8 dan 9 dapat dilihat hasil simulasi penerapan alternatif-alternatif peningkatan produktivitas hijau, nilai indikator lingkungan mengalami penurunan dan nilai indikator ekonomi mengalami peningkatan sehingga nilai GPI mengalami peningkatan dibandingkan dengan Tabel 4 diatas. Nilai GPI sudah masuk dalam kategori baik sesuai dengan persamaan 13. Nilai GPI kategori baik dihasilkan dari indikator lingkungan dalam kategori baik dan nilai indikator ekonomi dalam kategori baik. Ini berarti alternatif-alternatif yang diusulkan pakar mempunyai dampak lingkungan yang kecil dan mempunyai produktivitas yang cukup baik. Alternatif-alternatif tersebut berdasarkan nilai GPI dapat direkomendasikan kepada pengguna sebagai pertimbangan dalam pengambilan keputusan untuk peningkatan produktivitas hijau.

Hasil Implementasi Pemilihan Strategi Peningkatan Produktivitas Menggunakan Fuzzy AHP

Tahap ini mempunyai tujuan untuk memilih alternatif-alternatif berdasarkan penilaian pakar

menggunakan *fuzzy* AHP. Metode *fuzzy* AHP memberikan hasil perhitungan penilaian pakar dari kuesioner yang dimasukkan ke sistem dan menghasilkan matriks perbandingan berpasangan dari hasil proses defuzzifikasi. Matriks perbandingan berpasangan dimasukkan ke aplikasi *SuperDecisions* dan hasilnya dimasukkan kembali ke sistem. Hasil tahap ini seperti Gambar 5 untuk proses budidaya dan Gambar 6 untuk proses pengolahan.

Pada Gambar 7 dan Gambar 8 dapat dilihat penggunaan metode *fuzzy* AHP dalam pemilihan alternatif proses budidaya menghasilkan alternatif semi intensif dan *replanting* tanaman berproduktivitas rendah mempunyai bobot tertinggi sebesar 0,344. Elemen-elemen yang mempunyai pengaruh besar yaitu faktor ketersediaan sarana dan prasarana karena faktor ini sangat menunjang dalam penerapan alternatif, Aktor direksi perusahaan karena aktor ini yang akan memutuskan alternatif yang akan diterapkan, tujuan meningkatkan jumlah produksi lateks karena menjadi tujuan perusahaan dalam meningkatkan produktivitas.

Simulasi skenario dari alternatif tanaman berproduktivitas rendah seperti pada Tabel 10 menghasilkan peningkatan produksi sebesar 20% dan penggunaan sumber tujuh pembangkit limbah dalam bentuk *future* VSM sama dengan *current* VSM. Alternatif ini dijadikan *output* dari aplikasi dan dapat direkomendasikan menjadi pertimbangan dalam pengambilan keputusan proses budidaya karet alam.

Pada Gambar 7 dan Gambar 8 dapat dilihat pemilihan alternatif proses pengolahan menggunakan metode *fuzzy* AHP menghasilkan alternatif bobot penggunaan air kembali (*reuse*) mempunyai bobot tertinggi 0,372. Elemen-elemen yang mempunyai pengaruh besar yaitu faktor kualitas SDM karena faktor ini yang akan menerapkan alternatif secara langsung, aktor industri hilir karena aktor ini menjadi sumber bahan baku utama dari pengolahan karet alam, tujuan pengurangan dampak terhadap lingkungan karena ini menjadi tujuan meningkatkan produktivitas yang ramah lingkungan.

Tabel 6. *Current VSM* proses budidaya karet alam

Jenis Limbah	Proses Kegiatan							Total
	Pemasokan	Pembibitan	Perawatan TBM	Perawatan TM	Pemanenan	Penyaringan	Pengiriman	
Energi (Kwh)	0	1830	0	0	0	0	0	1830
Air (m ³)	0	900	0	0	0	0	0	900
Material (kg)	0	2358,6	53670,5	75806,6	0	0	0	131836
Sampah (kg)	0	334	0	0	144000	3000	0	147334
Transportasi (km)	69,17	0	0	0	0	0	2700	2769,17
Emisi (kg)	37	1631	0	0	0	0	1426,3	3094,3
Biodiversitas (Ha)	0	193,96	762,83	1758,62	0,02	0,01	0	2715,44

Tabel 7. *Current VSM* proses pengolahan karet alam

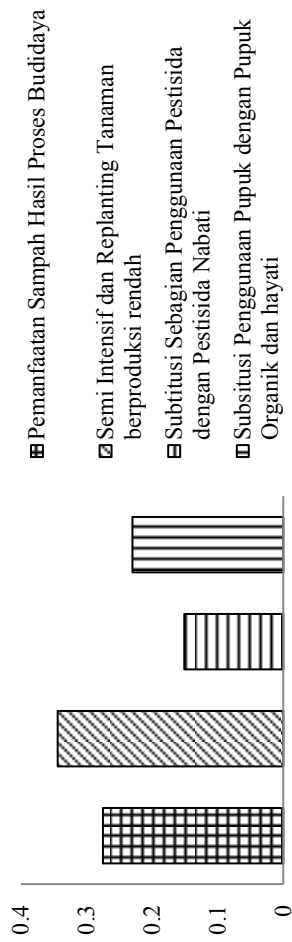
Jenis Limbah	Proses Kegiatan							Total
	Pemasokan	Penerimaan	Pengenceran	Penggilingan	Pengasapan	Sortasi	Pengepakan dan inventory	
Energi (Kwh)	0	99,9	6000	5100	0	0	1500	12699,9
Air (m ³)	0	0	213,742	175	0	0	0	388,742
Material (kg)	0	0	1125	0	0	0	0	1125
Sampah (kg)	0	0	0	0	19560	0	0	19560
Transportasi (km)	2700	0	0	0	0	0	0	2700
Emisi (kg)	1426,3	89,01	21364,4	22719	4419	0	8019	58036,7
Biodiversitas (Ha)	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 8. Simulasi alternatif proses budidaya karet alam

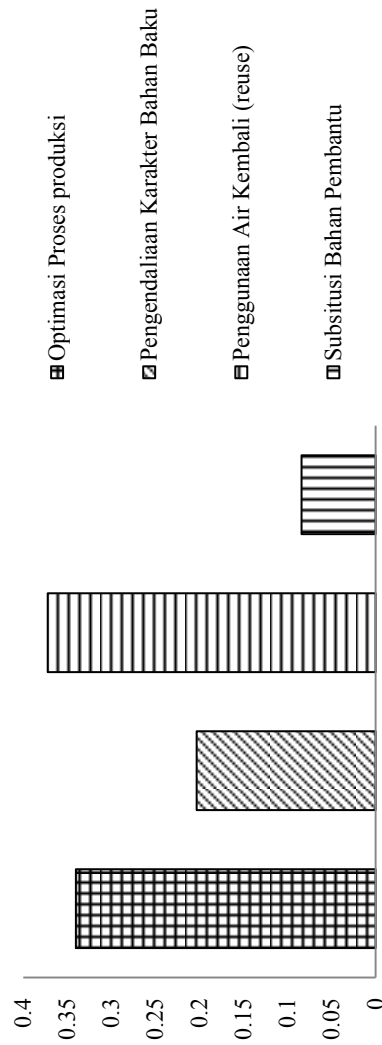
Alternatif	Hasil		
	Indikator lingkungan	Indikator ekonomi	GPI
Pemanfaatan sampah hasil proses budidaya	0,631	1,309	2,041
Substitusi penggunaan pupuk dengan pupuk organik dan hayati	0,734	1,275	1,891
Substitusi sebagian penggunaan pestisida dengan pestisida nabati	0,633	1,635	2,483
Semi intensif dan <i>replanting</i> tanaman berproduksi rendah	0,559	1,576	2,676

Tabel 9. Simulasi alternatif proses pengolahan karet alam

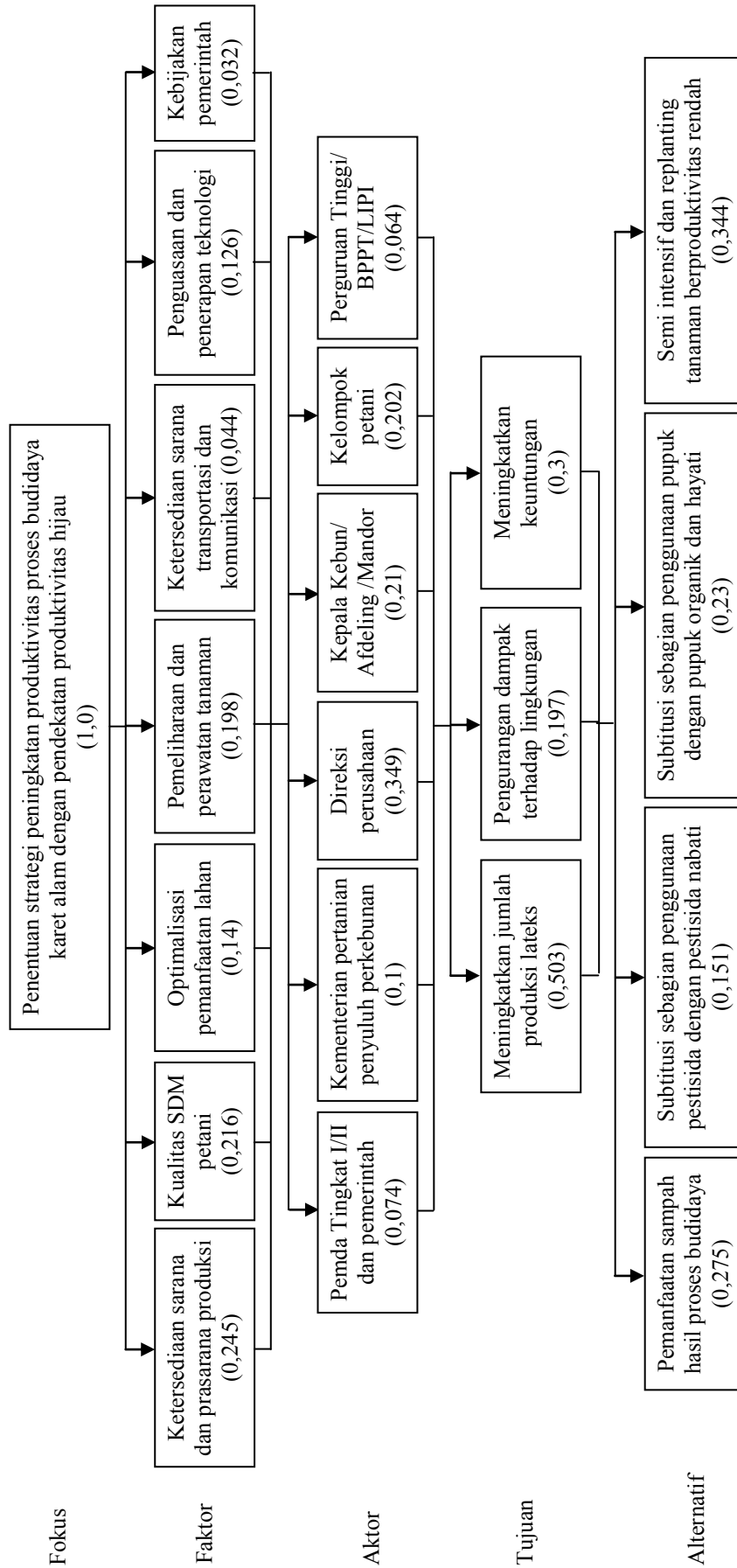
Alternatif	Hasil		
	Indikator lingkungan	Indikator ekonomi	GPI
Optimasi proses produksi	1,339	2,475	2,267
Pengendalian karakteristik bahan baku	1,193	2,232	1,923
Substitusi bahan pembantu	1,278	2,271	1,976
Penggunaan air kembali (<i>reuse</i>)	0,639	2,461	2,695



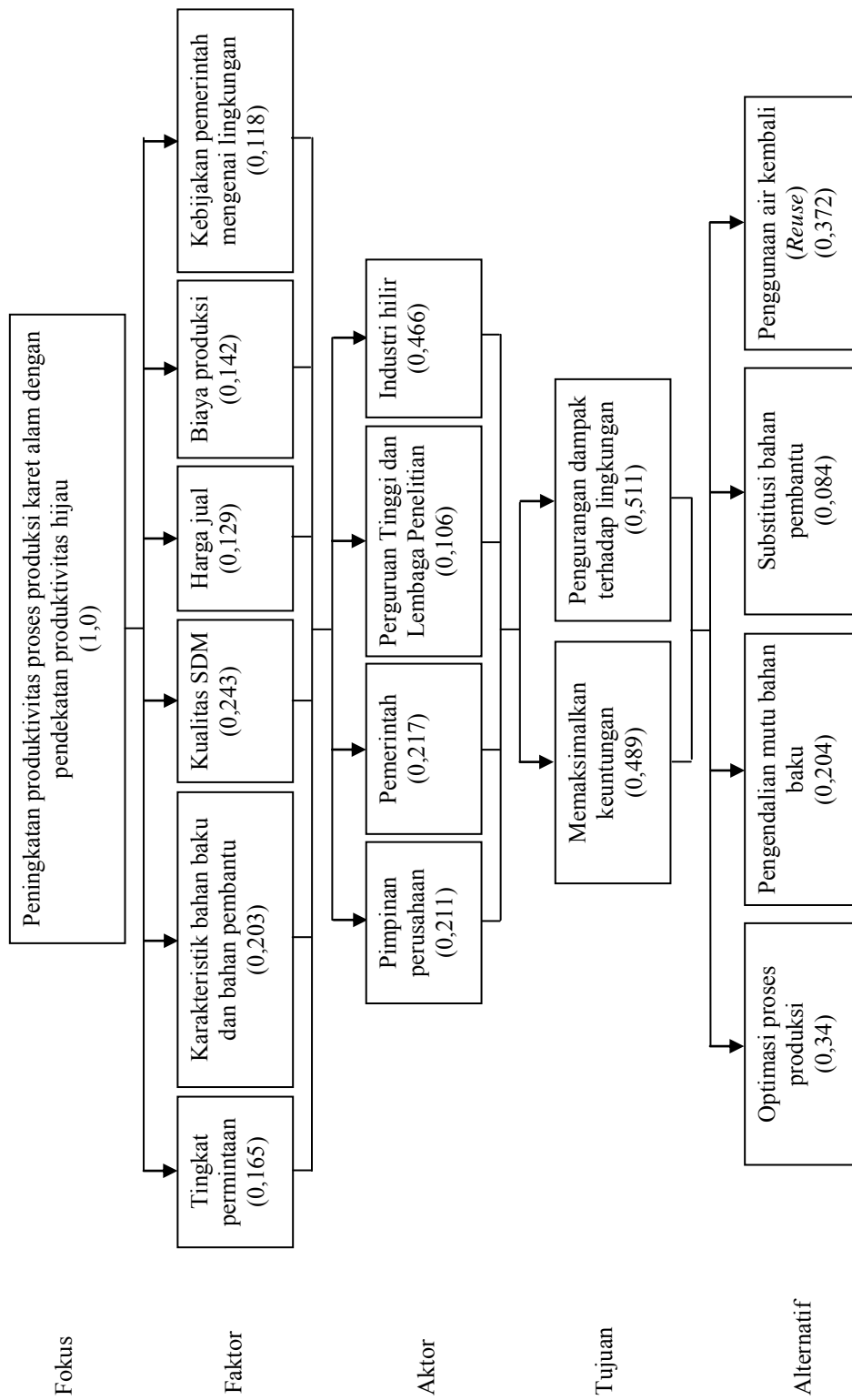
Gambar 5. Grafik pemilihan alternatif menggunakan fuzzy AHP proses budidaya



Gambar 6. Grafik pemilihan alternatif menggunakan fuzzy AHP proses pengolahan



Gambar 7. Struktur hirarki peningkatan produktivitas proses budidaya karet alam dengan pendekatan produktivitas hijau



Gambar 8. Struktur hirarki peningkatan produktivitas proses pengolahan karet alam dengan pendekatan produktivitas hijau

Tabel 10. *Future VSM* proses budidaya karet alam

Jenis Limbah	Proses Kegiatan							Total
	Pemasok-an	Pembibit-an	Perawat-an TBM	Perawat-an TM	Pemanen-an	Penyarin-gan	Pengirim-an	
Energi (Kwh)	0	1830	0	0	0	0	0	1830
Air (m ³)	0	900	0	0	0	0	0	900
Material (kg)	0	2358,6	53670,5	75806,6	0	0	0	131835,7
Sampah (kg)	0	334	0	0	144000	3000	0	147334
Transportasi (km)	2700	0	0	0	0	0	2700	5400
Emisi (kg)	1426,3	1631	0	0	0	0	1426,3	3094,3
Biodiversitas (Ha)	0	193,96	762,83	1758,62	0,02	0,01	0	2715

Simulasi skenario dari alternatif penggunaan air kembali (*reuse*) seperti pada Tabel 10 menghasilkan penurunan biaya 15% dan *future VSM* berupa penurunan emisi sampai 40%, penggunaan air mengalami penurunan hingga 50% dan penggunaan sumber tujuh pembangkit limbah dalam bentuk *future VSM* sama dengan *curent VSM*. Alternatif ini dapat direkomendasikan menjadi pertimbangan dalam pengambilan keputusan pada proses pengolahan karet alam.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini telah menghasilkan rancangan perangkat lunak berbentuk *web*. Perangkat lunak ini telah dapat memberikan informasi data pengukuran produktivitas, dapat memberikan rekomendasi alternatif terbaik dan dapat mensimulasikan alternatif terbaik tersebut sebagai pertimbangan kepada pengguna perangkat lunak. Pengguna perangkat lunak ini tidak hanya dapat mengukur produktivitas hijau dalam agroindustri karet alam tetapi juga dapat mengetahui solusi peningkatan produktivitas dan simulasi solusi tersebut jika diimplementasikan.

Hasil pemilihan alternatif terbaik menggunakan *fuzzy AHP* adalah alternatif semi intensif dan *replanting* tanaman berproduktivitas rendah pada budidaya karet alam. Alternatif tersebut dapat meningkatkan produktivitas produksi lateks dan mengoptimalkan lahan yang ada sedangkan pada proses pengolahan karet alternatif terbaik adalah penggunaan air kembali (*reuse*). Alternatif tersebut dapat mengurangi penggunaan air dan energi sehingga mengurangi biaya dan emisi yang dihasilkan selama proses pengolahan.

Saran

Sistem dapat dikembangkan lebih lanjut dengan mengintegrasikan perhitungan *AHP* yang masih menggunakan aplikasi *Super Decisions* ke dalam *web* dan penggunaan intelijensi buatan lain yang lebih optimal. Sistem masih dalam bentuk *prototype* sehingga masih perlu dikembangkan dalam bentuk implementasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [APO] Asian Productivity Organization. 2006. *Handbook on Green Productivity*. Tokyo: Asian Productivity Organization.
- Ayag Z. 2005. A Fuzzy AHP-based simulation approach to concept. *IIE Trans.* 37: 827–842.
- Darmawan MA, Wiguna B, Marimin, Machfud. 2013. Peningkatan produktivitas proses produksi karet alam dengan pendekatan *green productivity*: Studi Kasus di PT X. *J Tek Ind Pert.* 22 (2): 98-105.
- Gandhi M, Selladurai V dan Santhi P. 2006. Green productivity indexing: a practical step towards integrating environmental protection into corporate performance. *Int J Prod and Perform Mgmt.* 55 (7): 594-606.
- Hur T, Kim I dan Yamamoto R. 2004. Measurement of green productivity and its improvement. *J Clean Prod.* 12 (7): 673-683.
- [IRSG] International Rubber Study Group. 2012. *Rubber Statistical Bulletin*. Singapura (SG): *Rubber Statistical Bulletin* 67: 4-6.
- Kusumadewi S. 2002. *Analisis dan Desain Sistem Fuzzy Menggunakan Toolbox Matlab*. Yogyakarta (ID): Graha Ilmu.
- Marimin, Darmawan MA, Machfud, Putra MP. 2013. Peningkatan produktivitas proses budidaya karet alam dengan pendekatan *green productivity*: Studi Kasus di PT XYZ. *J Agritech* 33 (4):433-441.
- Marimin, Darmawan MA dan Machfud. 2013. Decision support system for natural rubber supply chain management with green supply chain operations reference approach: a case study. *Proceeding of Industrial Engineering and Service Science*. Surabaya : 20-22 Agustus 2013.
- Marimin, Djatna T, Suharjo, Hidayat S, Utama DN, Astuti R, Martini S. 2013. *Teknik dan Analisis Pengambilan Keputusan Fuzzy dalam Manajemen Rantai Pasok*. Bogor: IPB Press.
- Marimin dan Maghfiroh N. 2010. *Aplikasi Teknik Pengambilan Keputusan Dalam*

- Manajemen Rantai Pasok*. Bogor: IPB Press.
- Phillips-Wren G, Mora M, Forgionne GA, Gupta JND. 2009. An integrative evaluation framework for intelligent decision support systems. *Eur J Opr Res*. 195: 642–652.
- Saxena AK, Bhardwaj KD, dan Sinha KK. 2003. Sustainable growth through green productivity: A case of edible oil industry in India. *Int Energy J*. 4 (1): 81-91.
- [UNIDO] United Nations Industrial Development Organization. 2009. *A Greener Footprint for Industry: Opportunities and Challenges of Sustainable Industrial Development*. Vienna: United Nations Industrial Development Organization.
- Wang LX. 1997. *A Course in Fuzzy System and Control*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Yale Center for Environmental Law and Policy Report. 2005. *Environmental Sustainability Index: Benchmarking National Environmental Stewardship*. <http://www.yale.edu/esl>. Yale (US): Yale University. [1 Agustus 2013].