

Potensi Kebijakan Kontrak Pemeliharaan Mesin dalam Menunjang Keberhasilan Mekanisme Industri Pertanian

Hennie Husniah^{1*}, Udjiana S. Pasaribu², Abdul Hakim Halim³, Bermawi Priyatna Iskandar³

Abstract: In this paper we discuss a mathematical model of maintenance policy for certain type of agricultural equipments. It is assumed that the equipments are repairable and sold with two-dimensional warranty, i.e. a warranty with two scales of limit, such as the age of the equipment and the usage of the equipment. As an example in the case of automobile, the warranty is cease whenever the age of the automobile reaches 5 years or its mileage reaches 50.000 km, whichever occurs first. The model is intended to provide the best contract-based preventive maintenance (PM) strategy chosen from available options. A method to determine the optimal cost of service contract, both from user and producer view points, is presented. Numerical simulations reveal that the resulting optimal strategy depends on the level of the consumer usage pattern. In this paper we show that the selection of optimal policy is potential in supporting the performance of mechanization in agricultural industry in terms of choosing the best strategy to maintain agricultural equipments effectively (is able to reduce the failure rate of the equipment) with a minimal cost.

Keywords: Maintenance model; preventive maintenance; two-dimensional warranty; agricultural equipment.

Pendahuluan

Seiring dengan meningkatnya skala industri pertanian, berbagai pekerjaan penting seperti persiapan tanah, penyemaian bibit, pemeliharaan tanaman, pemanenan, dan transportasi hasil industri sudah tidak dapat dilakukan lagi tanpa bantuan mesin, apabila ingin ada peningkatan efektivitas dan efisiensi pekerjaan (Rijk [1]). Pemakaian mesin pada industri pertanian sudah mulai dilakukan sejak awal abad ke 16 (*animal-drawn*) dan berkembang pesat sampai dengan akhir abad ke 19 dengan digunakannya mesin-mesin bertenaga uap. Mekanisasi ini menandai fase pertama dari revolusi pertanian. Selanjutnya Mazoyer dan Roudart [2] menyebutkan bahwa fase kedua terjadi saat memasuki abad ke 20 yang berbentuk motorisasi dari berbagai mesin pertanian. Di masa mendatang trend penggunaan peralatan bermesin/bermotor dalam pertanian masih terus akan meningkat mengingat kompleksitas pertanian yang juga meningkat (Kutzbach [3]). Review terkini mengenai mekanisasi dan motorisasi pertanian di berbagai negara terdokumentasi dalam berbagai literatur, misalnya Soni dan Ou [4] untuk kawasan Asia.

Pemeliharaan, baik yang bertujuan untuk peningkatan produktifitas maupun peningkatan keselamatan, merupakan salah satu hal yang penting di dalam penggunaan mesin-mesin pertanian (Guo dan Geng [5]). Beberapa contoh studi tentang strategi pemeliharaan peralatan pertanian diantaranya yang dikaitkan dengan optimisasi biaya pemeliharaan (Moris [6]; Khoub-bakht *et al.* [7]) serta yang dikaitkan dengan asesmen untuk keselamatan (Javadi dan Rostami [8]). Secara umum, pemeliharaan merupakan upaya yang mampu mengatasi terjadinya kerusakan yang tidak terencana - disebut sebagai upaya pemeliharaan preventif/*preventive maintenance* (PM) - dan mampu mengembalikan kendaraan pada kondisi terbaiknya - disebut sebagai upaya pemeliharaan korektif/*corrective maintenance* (CM) (Pierskalla dan Voelker [9]; Valdez-Flores dan Feldman [10]; Husniah *et al.*, [11,12,13,14,15,16] Iskandar dan Husniah [17]). Berbagai kebijakan PM untuk produk yang mengalami degradasi karena umur (deteriorasi) telah banyak diteliti (Barlow dan Hunter [18]; Barlow *et al.* [19]; Pierskalla dan Voelker [9]; Beichelt [20]; Boland, [21]; Husniah *et al.* [22, 23, 24, 25]; Nggada [26]). Hal ini dikarenakan kebijakan pemeliharaan preventif mampu memperlambat proses degradasi produk. Khusus untuk peralatan pertanian, review terkini dapat dilihat pada Khodabakhshian [27]. Di sisi lain, upaya pemeliharaan membutuhkan fasilitas dan sumber daya yang tidak murah. Bagi perusahaan hal ini dapat menjadi kendala karena mahalnya investasi yang dikeluarkan. Pada kondisi ini, melakukan *in-house maintenance service* bukan solusi yang ekonomis lagi. Alternatif lain adalah dengan

¹ Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Industri, Universitas Langlangbuana, Jl. Karapitan 116, Bandung 40261 Indonesia. Email: Hennie.husniah@gmail.com

² Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Kelompok Keahlian Statistika, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132 Indonesia.

³ Fakultas Teknik Industri, Kelompok Keahlian Rekayasa Sistem Manufaktur, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia.

* Penulis korespondensi

melakukan *maintenance out sourcing* dengan keuntungan selain dapat menjamin ketersediaan maksimum juga lebih ekonomis (Murthy dan Ashgarizadeh, [28]; Ashgarizadeh dan Murthy [29]; Rinsaka dan Sandoh, [30]).

Penelitian kebijakan pemeliharaan yang telah dikembangkan umumnya didasarkan pada skala tunggal, seperti umur atau penggunaan, dan hanya beberapa yang mempertimbangkan skala multipel, seperti umur dan penggunaan secara simultan (Gertsbakh [31]; Nat *et al.* [32]; Frickenstein dan Whitaker [33]). Dewasa ini, karena ada kecenderungan garansi diberikan dalam perioda yang lebih lama (contoh: 3-5 tahun) atau berdasarkan penggunaan yang lebih panjang (contoh: 30.000-90.000 km), maka sudah selayaknya kebijakan pemeliharaan, baik *in-house maintenance service* maupun *maintenance out sourcing*, mempertimbangkan garansi dua dimensi. Dalam hal ini garansi dua dimensi didefinisikan sebagai garansi yang diberikan di mana batas garansi berdasarkan dua skala, seperti umur peralatan dan penggunaan peralatan. Misalnya pada kendaraan bermotor, garansi habis jika kendaraan tersebut sudah mencapai usia 5 tahun atau penggunaannya sudah mencapai 50.000 km (mana saja yang tercapai lebih dulu).

Kebanyakan penelitian terdahulu mengenai strategi pemeliharaan alat-alat industri oleh Husniah *et al.* di atas berfokus pada model kebijakan pemeliharaan untuk peralatan bergaransi dua dimensi, di mana pada model-model tersebut karakteristik penggunaan dari konsumen sudah dipertimbangkan. Dari sekian banyak literatur yang dikembangkan mempunyai anggapan upaya pemeliharaan dilakukan oleh pemilik mesin industri (*in-house maintenance service*). Kenyataannya, melakukan *in-house maintenance service* sudah banyak ditinggalkan karena berbagai alasan diantaranya investasi fasilitas dan teknisi yang mahal, mesin industri yang semakin canggih dan kompleks sehingga perlu perlakuan khusus.

Di lain pihak, banyak konsumen menginginkan jaminan bahwa peralatan industrinya atau peralatan pertaniannya selalu dalam kondisi baik tanpa perlu melakukan upaya pemeliharaan sendiri. Untuk itu, penelitian tentang strategi pemeliharaan peralatan industri ini perlu dilakukan dengan mempertimbangkan kebijakan pemeliharaan jika upaya pemeliharaan dilakukan oleh pihak lain, yakni oleh *original equipment manufacturer* (OEM) atau *independent agent*, sekaligus melibatkan keberadaan garansi. Hal ini sudah mulai menjadi pilihan bagi pemilik dalam melakukan pemeliharaan terhadap peralatannya, dan untuk bidang pertanian beberapa OEM sudah mulai menawarkan pelayanan seperti ini, misalnya *extended warranty*

schedule yang ditawarkan oleh pamanufaktur Kubota untuk pemeliharaan traktor, *wheel loader*, *excavator* dan berbagai mesin pertanian lainnya (Kubota [34]). Hal serupa juga ditawarkan oleh pamanufaktur Komatsu berupa pelayanan *extended maintenance* (Komatsu [35]). Mengingat pentingnya layanan ini, di beberapa negara parktek ini, yang kadang-kadang juga disebut "*servive/maintenance contract*" dibebaskan dari beberapa jenis pajak (Department of Revenue [36]) yang dimaksudkan untuk mendukung kelancaran kontrak pelayanan ini. Hal ini juga nampaknya akan menjadi trend di negara-negara berkembang yang masih mengandalkan sektor pertanian dalam roda perekonomiannya.

Untuk keperluan tersebut di atas, di dalam makalah ini dibahas mengenai sebuah model tentang kebijakan pemeliharaan preventif (PM) berbasis kontrak pemeliharaan dengan garansi dua dimensi. Model ini bersifat studi eksploratif dan antisipatif, yang mungkin masih belum populer di bidang pertanian, tetapi sudah biasa dilakukan di bidang pertambangan dan transportasi. Strategi optimal yang akan ditentukan dikembangkan dari sisi pamanufaktur dan konsumen dengan mempertimbangkan *consumer usage pattern*. Metode penelitian yang dipakai adalah pemodelan matematika (Meyer [37]), dengan melalui tahapan formulasi model dan analisis model sebagaimana yang akan dijelaskan pada bagian berikut ini.

Metode Penelitian

Formulasi Model Kebijakan Pemeliharaan

Strategi yang dibahas dalam pengembangan model kebijakan adalah pemeliharaan dan penggantian pengembangan dari Djamaludin *et al.* [38]. Sebelum dilakukan formulasi model, berikut akan dijelaskan beberapa notasi dan simbol yang akan digunakan pada formulasi model tersebut, yang dirangkum dalam Tabel 1.

Pertama akan ditinjau strategi pemeliharaan dan penggantian periodik untuk laju pemakaian konstan yang diberikan, kemudian strategi untuk berbagai nilai laju pemakaian. Misalkan L menunjukkan nilai maksimum dari *useful life* produk. Lebih jauh lagi, pamanufaktur dan konsumen memiliki informasi yang lengkap dan sempurna tentang keandalan produk. Asumsikan bahwa pamanufaktur memiliki tiga pilihan maka konsumen memiliki beberapa pilihan sebagaimana terlihat pada Tabel 2 di mana tingkat pemeliharaan preventif mempunyai tingkat mutu yang berbeda. Dalam hal ini diasumsikan tingkat mutu kontrak pemeliharaan (1/Blue) kurang dari tingkat mutu kontrak pemeliharaan (2/Silver), dan tingkat mutu kontrak pemeliharaan (2/Silver) kurang dari tingkat mutu kontrak pemeliharaan (3/Gold).

Tabel 1. Notasi dan simbol

L	batas kontrak servis
W	batas waktu garansi
U	batas penggunaan garansi
m	level PM
M	batas atas level PM
x	waktu
y	laju penggunaan
L_y	batas kontrak servis untuk laju penggunaan y
W_y	batas waktu garansi untuk laju penggunaan y
$F_0(x)[f_0(x)]$	fungsi distribusi kerusakan tanpa PM (fungsi densitas kerusakan tanpa PM)
$F_m(x)[f_m(x)]$	fungsi distribusi kerusakan dengan PM (fungsi densitas kerusakan dengan PM)
$r_0(x)$	laju kerusakan tanpa PM
$r_m(x)$	laju kerusakan dengan PM
$r_y(x)$	laju kerusakan pada laju penggunaan tertentu
C_m	ongkos PM
C_R	ongkos pemeliharaan korektif
m_i	level PM ke- i
$J(m, L_y)$	ekspektasi ongkos selama kontrak servis L dengan level PM m

Tabel 2. Pilihan kontrak pemeliharaan yang disediakan pemanufaktur untuk dipilih konsumen

Pilihan	Konsumen		
	Awal garansi (A)	Setelah garansi berakhir (B)	Tidak membeli (C)
Kontrak pemeliharaan (1/Blue)	(1,A)	(1,B)	(1,C)
Kontrak pemeliharaan (2/Silver)	(2,A)	(2,B)	(2,C)
Kontrak pemeliharaan (3/Gold)	(3,A)	(3,B)	(3,C)

Produk atau peralatan yang dipertimbangkan bersifat reparabel dan dijual dengan garansi dua dimensi NFRW (*Non Free Replacement Warranty*) dengan area garansi $[W, 0) \times [0, V)$. Semua kerusakan yang terjadi di dalam area $[W, 0) \times [0, V)$ akan direktifikasi oleh pemanufaktur tanpa membebankan ongkos kepada pembeli. Produk memiliki masa pakai selama L , dan ongkos rektifikasi pada interval $[W, L)$ setelah garansi berakhir ditanggung oleh pembeli. Pendekatan pemodelan kerusakan dua dimensi dapat dilihat pada Husniah dan Iskandar [24]. Peralatan bersifat reparabel, setiap kerusakan dianggap direktifikasi dengan perbaikan minimal (*minimal repair*), yakni laju kerusakan setelah perbaikan sama dengan sebelum terjadi kerusakan. Diasumsikan bahwa lama waktu melakukan rektifikasi relatif kecil dibandingkan dengan waktu rata-rata antar kegagalan/*Mean Time Between Failure* (MTBF) sehingga dapat diabaikan.

Opsi Pemeliharaan Preventif

Pertama akan dimodelkan kasus ketika tidak melakukan pemeliharaan preventif atau tanpa PM, yakni;

Pilihan C. Misalkan $F_0(x)[f_0(x)]$ menyatakan fungsi distribusi kerusakan (fungsi densitas) peralatan. Berdasarkan Barlow dan Hunter [18] terjadinya kerusakan sepanjang waktu mengikuti NHPP (*non-homogeneous poisson process*) dengan fungsi intensitas $r_0(x) = \frac{f_0(x)}{1-F_0(x)}$. Dalam hal ini diasumsikan bahwa tindakan PM terjadi pada selang waktu yang pendek sehingga dapat dimodelkan terjadi sepanjang waktu secara kontinu.

Misalkan untuk laju penggunaan y tertentu, laju kerusakan peralatan yang menjadi objek perhatian ketika pemeliharaan peralatan tersebut dilakukan tanpa PM, baik sebelum atau pun setelah garansi, adalah $r_0(x)$. Grafik kerusakannya terhadap waktu ditunjukkan pada Gambar 1 untuk pilihan C (tidak melakukan PM, baik sebelum atau pun setelah garansi). Selanjutnya akan dipertimbangkan pilihan A dan B (yaitu melakukan PM). Pada pilihan A, PM dilakukan sejak peralatan dibeli. Pada pilihan B, PM dilakukan setelah garansi berakhir. Jika tingkat pemeliharaan m dibatasi pada $0 \leq m \leq M$, dan misalkan $r_m(x)$ menunjukkan laju kerusakan dari pemeliharaan yang sudah dilakukan dengan tingkat pemeliharaan m , maka grafik kerusakan peralatan untuk masing-masing pilihan ditunjukkan pada Gambar 1 (untuk masing-masing pilihan A dan B). Dalam hal ini laju kerusakan dengan PM untuk A (baik sebelum atau pun setelah garansi) akan kurang dari laju kerusakan dengan PM untuk B (hanya setelah garansi berakhir). Begitu pula laju kerusakan dengan PM untuk B akan kurang dari laju kerusakan tanpa PM untuk C, sehingga diperoleh $r_m(x) < r(x; m) < r_0(x)$. Sehingga diperoleh laju kerusakan untuk ke tiga pilihan adalah

Pilihan A:

$$r(t; m) = r_m(t) \tag{1}$$

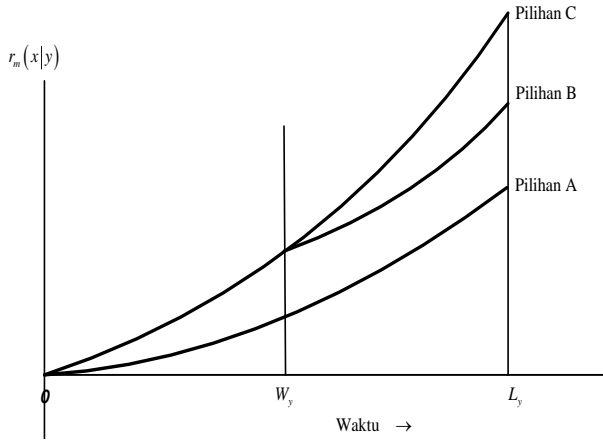
Pilihan B:

$$r(x; m) = \begin{cases} r_0(x) & 0 \leq x < W \\ [r_0(W) - r_m(W)] + r_m(x) & W \leq x < L \end{cases} \tag{2}$$

Pilihan C:

$$m = 0 \Rightarrow r(t; 0) = r_0(t) \tag{3}$$

Catatan: Dalam hal ini $r_0(x) - r_m(x)$ merupakan fungsi naik terhadap m . Untuk $m = M$, $r_m(t)$ merupakan fungsi naik terhadap t artinya walaupun dilakukan upaya pemeliharaan yang maksimum, laju kerusakan tetap naik terhadap waktu/umur produk. Secara umum situasi pilihan A, B, dan C dapat terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Laju kerusakan untuk Pilihan A, B dan C terhadap waktu

Ongkos Pemeliharaan Preventif

Pada bagian ini akan ditentukan ekspektasi ongkos PM selama siklus hidup mesin bagi pemilik mesin (*buyer*) dan ekspektasi ongkos garansi pamanufaktur (*seller*) untuk ke tiga pilihan pemeliharaan di atas. Misalkan C_m menyatakan ongkos per satuan waktu untuk tingkat pemeliharaan m yang merupakan fungsi naik terhadap m . Selanjutnya misalkan C_R menyatakan rata-rata ongkos setiap perbaikan, di mana ongkos perbaikan ini bergantung pada banyaknya kerusakan pada interval $[W_y, L_y)$.

Kerusakan direktifikasi dengan perbaikan minimal dan waktu perbaikan diabaikan, maka ekspektasi banyaknya kerusakan, $\{N(x|y)\}$, dinyatakan sebagai integral dari fungsi laju kerusakan pada interval $(0, t)$. Ekspektasi banyaknya kerusakan selama garansi adalah $\int_0^{W_y} r_y(x; m) dx$ sedangkan setelah garansi berakhir $\int_{W_y}^{L_y} r_y(x; m) dx$. Ongkos PM untuk pilihan A, B, C berturut-turut adalah $C_m, L_y, C_m(L_y - W_y)$ dan nol. Melihat opsi pemeliharaan pada Tabel 2, diperoleh pemilihan strategi berikut:

$$(1, A) \equiv A1 = C_{m1}L_y; (1, B) \equiv B1 = C_{m1}(L_y - W_y); \\ (1, C) \equiv C1 = 0 \quad (4)$$

$$(2, A) \equiv A2 = C_{m2}L_y; (2, B) \equiv B2 = C_{m2}(L_y - W_y); \\ (2, C) \equiv C2 = 0 \quad (5)$$

$$(3, A) \equiv A3 = C_{m3}L_y; (3, B) \equiv B3 = C_{m3}(L_y - W_y); \\ (3, C) \equiv C3 = 0 \quad (6)$$

Hasil dan Pembahasan

Analisis Model Kebijakan Pemeliharaan

Strategi PM Konsumen

Misalkan L_y menyatakan parameter yang menyatakan waktu penggantian untuk laju pemakaian y .

Konsumen memiliki strategi pemeliharaan dan penggantian periodik untuk suatu laju pemakaian y yang diberikan, yang didefinisikan sebagai berikut:

Strategi A dibedakan menjadi tiga berdasarkan kontrak pemeliharaan *blue* (A1), *silver* (A2) dan *golden* (A3). Masing-masing kontrak memiliki tingkat pemeliharaan m_1 untuk *blue*, m_2 untuk *silver* dan m_3 untuk *golden*, dari saat produk dibeli sampai produk diganti apabila umurnya mencapai L_y ($L_y > W_y$). Apabila produk tersebut mengalami kerusakan pada umur x , dengan $x < L_y$, maka produk diperbaiki dengan perbaikan minimal.

Hal ini berlaku pula untuk Strategi B, baik *blue* (B1), *silver* (B2) dan *golden* (B3) namun tingkat pemeliharaan ini dilakukan setelah garansi berakhir.

Pada Strategi C, konsumen tidak membeli kontrak pemeliharaan (*blue* (C1), *silver* (C2) ataupun *golden* (C3)).

Catatan: Tingkat pemeliharaan m_i menunjukkan keandalan yang didapat dimana semakin meningkat tingkat pemeliharaan yang dilakukan maka keandalan yang diperoleh semakin tinggi, yakni $m_1 < m_2 < m_3$.

Ekspektasi Ongkos PM per Siklus

Nilai ekspektasi ongkos pemeliharaan preventif per siklus bagi konsumen untuk suatu nilai laju pemakaian y adalah $J(m, L_y)$. Nilai ini untuk masing-masing strategi dengan dengan $i = 1, 2, 3$ diberikan oleh:

Strategi A: Jika konsumen membeli kontrak pemeliharaan dari awal garansi

$$J_{A_i}(m, L_y) = C_R \int_{W_y}^{L_y} r_{m_i}(x|y) dx + C_{m_i}L_y \quad (7)$$

Strategi B: Jika konsumen membeli kontrak pemeliharaan setelah garansi berakhir:

$$J_{B_i}(m, L_y) = C_R \int_{W_y}^{L_y} (r_0(W|y) - r_{m_i}(W|y) + r_{m_i}(x|y)) dx + C_{m_i}(L_y - W_y) \quad (8)$$

Strategi C: Jika konsumen tidak membeli kontrak pemeliharaan:

$$J_{C_i}(m, L_y) = C_R \int_{W_y}^{L_y} r_0(x|y) dx \quad (9)$$

Nilai optimal m_i untuk L_y pada Strategi A dan B didapat dengan meminimumkan ekspektasi ongkos $J_{A_i}(m_i, L_y)$ dan $J_{B_i}(m_i, L_y)$. Dalam hal ini, jika m_i bersifat kontinu, maka nilai optimal ekspektasi ongkos per siklus, J^* , diperoleh melalui turunan pertama dari ekspektasi ongkos per siklus terhadap m_i .

Nilai optimal m_i merupakan titik interior dari $[0, m_i]$, atau jika tidak memenuhi syarat maka m_i bernilai nol (tidak ada PM) atau bernilai M_i (maksimum PM). Di lain pihak, jika m_i bersifat diskrit maka nilai optimal m_i diperoleh melalui evaluasi dari ekspektasi ongkos per siklus terhadap berbagai nilai m_i dan kemudian dilakukan perbandingan terhadap ekspektasi ongkos per siklus yang diperoleh (lihat contoh simulasi numerik).

Nilai ekspektasi ongkos garansi bagi pamanufaktur $J(W_y)$ untuk suatu nilai laju pemakaian y , dari setiap strategi yang diberikan adalah:

Ekspektasi ongkos untuk strategi A,
 $J_{A_i}(W_y) = C_R \int_0^{W_y} r_{m_i}(x|y) dx$ (10)

Ekspektasi ongkos untuk strategi B,
 $J_{B_i}(W_y) = C_R \int_0^{W_y} r_{m_i}(x|y) dx$ (11)

Ekspektasi ongkos untuk strategi C,
 $J_{C_i}(W_y) = C_R \int_0^{W_y} r_{m_i}(x|y) dx$ (12)

$r_m(x|y) < r_0(x|y)$, ekspektasi ongkos garansi bagi pamanufaktur pada Strategi A lebih kecil dibandingkan pada Strategi B dan C. Pamanufaktur akan lebih diuntungkan apabila konsumen melakukan PM selama garansi. Dari sisi konsumen, apabila m_i merupakan variabel kontinu, maka mencari nilai optimal m_i dan L_y , untuk $r_m(x|y)$ sebarang dengan prosedur analitik sulit diperoleh, akan tetapi untuk kasus $r_m(x|y)$ yang diketahui berdistribusi tertentu dapat dilakukan sebagaimana pada contoh kasus distribusi Weibull berikut

Contoh Kasus Kerusakan Distribusi Weibull

Dalam bagian ini dibahas kasus khusus untuk x yang mengikuti fungsi distribusi Weibull. Sebenarnya ada beberapa distribusi peluang yang dapat menggambarkan reliabilitas dan availabilitas dari suatu sistem peralatan, seperti distribusi Weibull (dengan dua atau tiga parameter), distribusi eksponensial dan distribusi lognormal. Namun studi kasus untuk peralatan pertanian (*sugarcane 7000 series chopper harvester*) yang telah dilakukan memperlihatkan bahwa dengan menggunakan tes *goodness of fit* pada ReliaSoft Weibull++6, keseluruhan subsistem (ada sembilan subsistem) dari peralatan yang diuji tersebut memperlihatkan bahwa uji kecocokan terbaik diberikan untuk distribusi Weibull (Najafi *et al.*, [39]). Selain itu juga pada studi kasus “*tillage equipment*” untuk pencaangkulan tanah, distribusi Weibull sangat baik menggambarkan distribusi reliabilitas alat tersebut (Olaoye dan Adekanye, [40]). Referensi lainnya juga menunjukkan bahwa distribusi Weibull adalah yang paling umum dijumpai dalam peralataan pertanian (Alcock, [41]; An dan Xiangming [42]).

Selanjutnya diketahui bentuk distribusi Weibull adalah $F_0(x; \alpha_0) = 1 - \exp(-x/\alpha_0)^\beta$ di mana β merupakan parameter bentuk. Efek dari PM pada distribusi kerusakan dimodelkan pada perubahan parameter skala α . Apabila tingkat pemeliharaan m dilakukan selama siklus hidup produk, maka distribusi kerusakan menjadi distribusi Weibull dengan parameter bentuk β dan parameter skala α_m , dimana:

$$\alpha_m = \left(\frac{M}{M-m}\right)^\gamma \alpha_0 \text{ dengan } 0 \leq m < M, \gamma > 0 \quad (13)$$

Selanjutnya pengaruh laju penggunaan pada distribusi kerusakan dengan tingkat pemeliharaan m dimodelkan oleh AFT/Accelerated Failure Time (Husniah dan Iskandar, [24]), sehingga fungsi distribusi kerusakan kondisional untuk laju pemakaian y dan tingkat pemeliharaan m , yakni $F(x; \alpha_m(y))$, diberikan oleh $F(x; \alpha_m(y)) = 1 - \exp(-x/\alpha_m(y))^\beta$ dengan $\alpha_m(y) = (y_0/y)^\gamma \alpha_m = (y_0/y)^\gamma (M/(M-m))^\gamma \alpha_0$

Fungsi hazard yang bersesuaian dengan $F(x; \alpha_m(y))$ diberikan oleh:

$$r_m(x|y) = r(x; \alpha_m(y)) = \beta \frac{x^{\beta-1}}{[\alpha_m(y_0/y)^\gamma]^\beta} = \beta \frac{x^{\beta-1}}{\left[\alpha_0 \left(\frac{y_0}{y} \frac{M}{M-m}\right)^\gamma\right]^\beta} \quad (14)$$

Selanjutnya, karena semua perbaikan bersifat minimal (lihat juga Husniah *et al.* [14]), maka $\lambda_m(x|y) = r(x; \alpha_m(y))$ dengan fungsi hazard kumulatif diberikan oleh:

$$\int_0^{W_y} r_m(x|y) dx = \frac{W_y^\beta}{\left[\alpha_0 \left(\frac{y_0}{y} \frac{M}{M-m}\right)^\gamma\right]^\beta} \quad (15)$$

Ekspektasi ongkos siklus hidup dari sisi konsumen untuk laju penggunaan y diberikan oleh:

Strategi A, jika konsumen membeli kontrak pemeliharaan dari awal garansi

$$J_{A_i}(m, L_y) = C_R \int_{W_y}^{L_y} r_{m_i}(x|y) dx + C_{m_i} L_y = C_R \int_{W_y}^{L_y} \beta \frac{x^{\beta-1}}{\left[\alpha_0 \left(\frac{y_0}{y} \frac{M}{M-m}\right)^\gamma\right]^\beta} dx + C_{m_i} L_y = C_R / \alpha(y)_{m_i}^\beta (L_y^\beta - W_y^\beta) + C_{m_i} L_y \quad (16)$$

Strategi B, jika konsumen membeli kontrak pemeliharaan setelah garansi berakhir

$$J_{B_i}(m, L_y) = C_R \int_{W_y}^{L_y} (r_0(W|y) - r_{m_i}(W|y)) dx + C_{m_i} (L_y - W_y) = C_R \int_{W_y}^{L_y} \beta \frac{W_y^{\beta-1}}{\left[\alpha_0 \left(\frac{y_0}{y} \frac{M}{M-0}\right)^\gamma\right]^\beta} dx - C_R \int_{W_y}^{L_y} \beta \frac{W_y^{\beta-1}}{\left[\alpha_0 \left(\frac{y_0}{y} \frac{M}{M-m_i}\right)^\gamma\right]^\beta} dx +$$

$$C_R \int_{W_y}^{L_y} \beta \frac{x^{\beta-1}}{\left[\alpha_0 \left(\frac{y_0 - M}{y - M - m_i}\right)^\gamma\right]^\beta} dx + C_{m_i}(L_y - W_y)$$

$$= C_R \left[\beta W_y^{\beta-1} (L_y - W_y) \left(\frac{1}{\alpha(y)_0^\beta} - \frac{1}{\alpha(y)_{m_i}^\beta} \right) + \frac{1}{\alpha(y)_{m_i}^\beta} (L_y^\beta - W_y^\beta) \right] + C_{m_i}(L_y - W_y) \quad (17)$$

Strategi C₂ jika konsumen tidak membeli kontrak pemeliharaan

$$J_{C_i}(m, L_y) = C_R \int_{W_y}^{L_y} r_0(x|y) dx$$

$$= C_R \int_{W_y}^{L_y} \beta \frac{x^{\beta-1}}{\left[\alpha_0 \left(\frac{y_0 - M}{y - M - 0}\right)^\gamma\right]^\beta} dx$$

$$= C_R \frac{L_y^\beta - W_y^\beta}{\alpha(y)_0^\beta} \text{ dengan } i = 1, 2, 3 \quad (18)$$

Selanjutnya ekspektasi ongkos garansi bagi pema-
nuufaktur, untuk suatu nilai laju pemakaian y, di-
berikan oleh $J(W_y)$ dengan nilai untuk setiap strategi
diberikan oleh:

Ekspektasi ongkos garansi untuk Strategi A,

$$J_{A_i}(W_y) = C_R \int_0^{W_y} r_{m_i}(x|y) dx =$$

$$C_R \int_0^{W_y} \beta \frac{x^{\beta-1}}{\left[\alpha_0 \left(\frac{y_0 - M}{y - M - m_i}\right)^\gamma\right]^\beta} dx = C_R \frac{W_y^\beta}{\alpha(y)_{m_i}^\beta} \quad (19)$$

Ekspektasi ongkos untuk Strategi B dan Strategi C

$$J_{B_i}(W_y) = J_{C_i}(W_y) = C_R \int_0^{W_y} r_0(x|y) dx =$$

$$C_R \int_0^{W_y} \beta \frac{x^{\beta-1}}{\left[\alpha_0 \left(\frac{y_0 - M}{y - M - 0}\right)^\gamma\right]^\beta} dx = C_R \frac{W_y^\beta}{\alpha(y)_0^\beta} \quad (20)$$

Simulasi Numerik dengan Kerusakan Berdis- tribusi Weibull

Dalam contoh hipotetikal ini dimisalkan $L = 5, W = 2$ (tahun) dan $U = 2(\times 10^4 \text{ Km})$, sehingga $U/W = 1$; Reliabilitas disain: ($\times 10^4 \text{ Km per tahun}$), $\alpha_0 = 1$ (tahun) dan $\beta = 2$; Model AFT: $\gamma = 1,5; E[X]_r = \mu_r = \alpha\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})$. Diasumsikan m bernilai diskrit dengan kriteria pada Tabel 3 dan parameter lainnya pada Tabel 4.

Hasil simulasi diperlihatkan pada Tabel A.1 dan Tabel A.2 (lihat Lampiran). Beberapa ringkasan hasil yang diperoleh dari analisis dan simulasi numerik di atas untuk kasus distribusi Weibull dapat disampaikan sebagai berikut. Hasil simulasi untuk laju penggunaan $y < 1$ (Tabel A1 pada Lampiran), jika ongkos korektif kurang dari 420 strategi optimalnya adalah tidak melakukan PM selama siklus hidup produk (Strategi C). Sedangkan jika ongkos korektif lebih dari 500 strategi optimalnya adalah melakukan PM sepanjang siklus hidup

Tabel 3. Tingkat pemeliharaan preventif (tingkat PM)

Pilihan	Pemanufaktur			
	Kontrak pemeliharaan <i>Blue</i>	Kontrak pemeliharaan <i>Silver</i>	Kontrak pemeliharaan <i>Gold</i>	
Tingkat PM	m	1, 2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9

Tabel 4. Tingkat pemeliharaan m, α_m, C_m untuk laju penggunaan y dan $\gamma = 1$

	m	α_m	C_m	$\alpha_m(y=0,8)$	$\alpha_m(y=2,0)$
Tanpa PM	0	1,00	-	3,95	1,00
	1	1,11	50	4,39	1,11
<i>Blue</i> PM	2	1,25	100	4,94	1,25
	3	1,43	150	5,65	1,43
	4	1,67	200	6,59	1,67
<i>Silver</i> PM	5	2,00	250	7,91	2,00
	6	2,50	300	9,88	2,50
	7	3,33	350	13,18	3,33
<i>Gold</i> PM	8	5,00	400	19,76	5,00
	9	10,00	450	39,53	10,00

produk (Strategi A). Selain itu, terdapat variasi pada tingkat pemeliharaan optimal yang dihasilkan, semakin tinggi ongkos korektif maka tingkat pemeliharaan pada strategi A dengan jenis kontrak blue juga semakin meningkat. Sebagai ilustrasi, pada ongkos korektif kurang dari 600 strategi optimalnya adalah A dengan kontrak blue pada tingkat pemeliharaan 1, sedangkan untuk ongkos korektif sama dengan 700 level dan ongkos korektif lebih dari 600 tingkat pemeliharaan kontrak blue masing-masing 2 dan 3. Selanjutnya untuk laju penggunaan $y > 1$ (Tabel A2 pada Lampiran), jika ongkos korektif kurang dari 40 strategi optimalnya adalah melakukan PM garansi berakhir (Strategi B), sedangkan jika ongkos korektif lebih dari 60 strategi optimalnya adalah melakukan PM sepanjang siklus hidup produk (Strategi A) dengan jenis kontrak pemeliharaan gold pada tingkat pemeliharaan bervariasi dari 7 (ongkos korektif lebih dari 60), 8 (ongkos korektif lebih dari 120) dan 9 (ongkos korektif lebih dari 340). Semakin tinggi ongkos korektif maka tingkat pemeliharaan pada Strategi A juga semakin meningkat.

Simpulan

Keberhasilan proses industri sangat bergantung kepada keandalan peralatan yang dipakai pada proses industri tersebut. Di dalam makalah ini telah dibahas sebuah model matematika mengenai kebijakan pemeliharaan peralatan yang digunakan pada proses industri. Model yang dibuat bertujuan menentukan strategi terbaik pemeliharaan preventif (PM) berbasis kontrak (*maintenance service*

contract) untuk menentukan biaya pemeliharaan optimal, baik dari sisi pemakai peralatan (konsumen) maupun dari sisi pembuat peralatan (pemanufaktur), telah dikembangkan. Model yang dikembangkan ini telah berhasil menentukan pilihan terbaik yang dapat meningkatkan keandalan melalui pemeliharaan preventif dengan biaya yang minimum. *Maintenance service contract* sudah mulai menjadi pilihan bagi pemilik peralatan industri di bidang pertambangan dan transportasi dalam melakukan pemeliharaan terhadap peralatannya. Untuk bidang pertanian beberapa OEM sudah mulai menawarkan pelayanan seperti ini, misalnya *extended warranty schedule* yang ditawarkan oleh pamanufaktur Kubota untuk pemeliharaan traktor, *wheel loader, excavator* dan berbagai mesin pertanian lainnya. Hal serupa juga ditawarkan oleh pamanufaktur Komatsu berupa pelayanan *extended maintenance*. Dalam makalah ini diberikan contoh perhitungan numerik mengenai perhitungan pemilihan opsi pada pemeliharaan preventif berbasis kontrak, dengan data hipotetikal yang tipikal sering muncul dalam berbagai analisis keandalan peralatan pertanian. Simulasi numerik tersebut memperlihatkan bahwa strategi optimal sangat bergantung pada pola pemakaian peralatan, akan tetapi secara umum dapat diperoleh opsi optimal yang dapat meningkatkan keandalan peralatan dengan biaya minimum. Hal ini mengindikasikan bahwa kebijakan yang optimal mempunyai potensi untuk menunjang keberhasilan mekanisasi industri pertanian melalui strategi pemeliharaan aset/peralatan pertanian yang efektif, yakni mengurangi laju kerusakan peralatan sehingga pemakaian peralatan sebagai mesin produksi juga bisa optimal.

Contoh dalam simulasi numerik memperlihatkan adanya keterkaitan yang kuat antara ongkos korektif pada PM dengan strategi yang harus dipilih. “*Insight*” ini perlu diuji lebih jauh lagi secara analitis untuk memperoleh hasil yang lebih kuat untuk berbagai distribusi kerusakan peralatan pada berbagai bidang pertanian/kehutanan, mengingat bahwa bidang yang berbeda akan mempunyai *consumer usage pattern* yang berbeda.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan buat kedua orang reviewer yang telah memeriksa versi awal dari makalah ini dengan memberikan kritik dan saran yang membangun untuk memperbaiki isi dan penyampaian makalah ini.

Daftar Pustaka

1. Rijk, A. G., Agricultural Mechanization Strategy in Stout, B. A., and Cheze, B. (eds.), *Plant Pro-*

- duction Engineering, *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, 3, ASAE, St. Joseph-MI, 1999, pp. 536-555.
2. Mazoyer, M.L., and Roudart, L., *A History of World Agriculture: From the Neolithic Age to the Current Crisis*. Earthscan Publ., Quicksilver Drive, Sterling-VA, USA, 2006.
3. Kutzbach, H. D., Trends in Power and Machinery, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(3), 2000, pp. 237-247.
4. Soni, P., and Ou, Y., *Agricultural Mechanization at a Glance Selected Country Studies in Asia on Agricultural Machinery Development*. UN-APCAEM-ESCAP Technical Report, 2010.
5. Guo, T., and Geng, D. Y., Application of RCM in the Maintenance of Agricultural Machinery, *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007(12), 2007, pp. 236-239.
6. Moris, J., Estimation of Tractor Repair and Maintenance Costs. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 41(3), 1988, pp. 191-200.
7. Khoubakht, G. M., Ahmadi, H., Akram, A., and Karimi, M., Repair and Maintenance Cost Models for MF285 Tractor: A Case Study in Central Region of Iran. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*, 4(1), 2008, pp. 76-80.
8. Javadi, A., and Rostami, M. A., Safety Assessments of Agricultural Machinery in Iran. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 13(3), 2007, pp. 275-284.
9. Pierskalla, W. P., and Voelker, J. A., A Survey of Maintenance Models: The Control and Surveillance of Deteriorating Systems, *Naval Research Logistics*, 23(3), 1976, pp. 353–388.
10. Valdez-Flores, C., and Feldman, R. M., A Survey of Preventive Maintenance Models for Stochastically Deteriorating Single-Unit Systems, *Naval Research Logistics*, 36(4), 1989, pp. 419–446.
11. Husniah, H., and Iskandar, B. P., An Optimal Periodic Replacement Policy for a Product Sold with a Two-Dimensional Warranty, *Proceedings of the 9th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference (APIEMS)*, Denpasar, 2008, pp. 232-238.
12. Husniah, H., Pasaribu, U. S., Halim, A. H., and Iskandar, B. P., An Optimal Replacement Policy Based on the Number of Failures After the Expiry of Warranty, *Proceedings of the 5th AOTULE International Postgraduate Students Conference on Engineering*, Bandung, 2010, pp. B-15 99-102.
13. Husniah, H., Pasaribu, U. S., Halim, A. H., and Iskandar, B. P., A hybrid Minimal Repair and Age Replacement Policy, *Proceedings of the 2nd Asia Pacific Conference on Manufacturing System*, Yogyakarta, 2009, pp. VII25-VII30.
14. Husniah, H., Pasaribu, U. S., Halim, A. H., and Iskandar, B.P., Hybrid Minimal Repair and Age

- Replacement Policy for Two Dimensional Warranted Products, *International Journal of Collaborative Enterprise*, 2(4), 2011, pp. 284-301.
15. Husniah, H., Pasaribu, U. S., Halim, A. H., and Iskandar, B. P., Maintenance Service Contract with Discrete Preventive Maintenance for Equipment Sold with One-Dimensional Warranty, *Proceedings of the International Conference of Mathematics and Natural Science*, Bandung, 2012.
 16. Husniah, H., Pasaribu, U. S., and Iskandar, B. P., Two-Dimensional Maintenance Service Contracts for Dump Trucks Used in Mining Industry, *Proceedings of the International Congress on Mathematics*, Seoul, 2014.
 17. Iskandar, B. P., and Husniah, H., On the Application of Copula in Modeling Maintenance Contract, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 114, 2016, 012085 doi: 10.1088/1757-899X/114/1/012085.
 18. Barlow, R. E., and Hunter, L., Optimal Preventive Maintenance Policies. *Operations Research*, 8(1), 1960, pp. 90–100.
 19. Barlow, R. E., Proschan, F., and Hunter, C. H., *Mathematical Theory of Reliability*, John Wiley, New York, 1965
 20. Beichelt, F., A General Preventive Maintenance Policy, *Mathematik Operationsforschung und Statistik*, 7(6), 1976, pp. 927-932.
 21. Boland, P. J., Periodic Replacement when Minimal Cost Vary with Time. *Naval Research Logistics Quarterly*, 29(4), 1982, pp. 541-546.
 22. Husniah, H., Pasaribu, U. S., Halim, A. H., and Iskandar, B. P., A hybrid Minimal Repair and Age Replacement Policy, *Proceedings of the 2nd Asia Pacific Conference on Manufacturing System*, Yogyakarta, 2009, pp. VII25-VII30.
 23. Husniah, H., Pasaribu, U. S., and Iskandar, B. P., A Servicing Strategy Involving Imperfect Repair for Two Dimensional Warranties, *Proceedings of the Computer and Industrial Engineering*, 43, Hongkong, 2013.
 24. Husniah, H., and Iskandar, B. P., Performance-Based Maintenance with Imperfect Preventive Maintenance, *Proceedings of 6-th Asia Pacific Symposium on Advanced Reliability and Management*, Sapporo, 2014.
 25. Husniah, H., Pasaribu, U. S., and Iskandar, B. P. Optimal Servicing Strategy Involving Imperfect Repair and Preventive Maintenance for Products Sold with One-Dimensional Warranties. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 53(4), 2015, pp. 114-125.
 26. Nggada, S.H., Optimisation of Preventive Maintenance Scheduling under Heterogeneous Policy, *International Journal of Control and Automation*, 9(1), 2016, pp.133-146.
 27. Khodabakhshian, R., A Review of Maintenance Management of Tractors and Agricultural Machinery: Preventive Maintenance Systems. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(4), 2013, pp. 147-159.
 28. Murthy, D. N. P., and Ashgarizadeh, E., Optimal Decision Making in a Maintenance Service Operation, *European Journal of Operational Research*, 116(2), 1999, pp. 259-273.
 29. Ashgarizadeh, E., and Murthy, D.N.P., Service Contracts: A Stochastic Model, *Mathematical and Computer Modelling*, 31(10), 2000, pp. 11-20.
 30. Rinsaka, K., and Sandoh, H., A Stochastic Model on an Additional Warranty Service Contract. *Computers and Mathematics with Applications*, 51(2): 2006, pp. 179-188.
 31. Gertsbakh, I. B., *Models of Preventive Maintenance*, North-Holland, Amsterdam, 1977.
 32. Nat, J., Iskandar, B. P., and Murthy, D. N. P., A Repair-Replace Strategy Based on Usage Rate for Items Sold with a Two-Dimensional Warranty, *Reliability Engineering and System Safety*, 94(2), 2009, pp. 611-617.
 33. Frickenstein, S. G., and Whitaker, L. R., Age Replacement Policies in Two Time Scales. *Naval Research Logistics*, 50(6), 2003, pp. 592 – 613.
 34. Kubota, Extended Warranty Schedule, web: <http://www.kubota.com.au/wp-content/uploads/2015/10/Kubota-Powertrain-Protection-Plan.pdf> (diakses tanggal 15/05/2016).
 35. Komatsu, Komatsu Care, web: <http://www.komatsuamerica.com/service-and-support/komatsu-care> (diakses tanggal 15/05/2016).
 36. Departmen of Revenue - Dakota, Agriculture Equipment and services, web: http://dor.sd.gov/taxes/business_taxes/publications/pdfs/agriculture0713.pdf(diakses tanggal 15/05/2016).
 37. Meyer, W.J., *Concepts of Mathematical Modeling*. Dover Publications, New-York, USA., 2004.
 38. Djamaludin, I., Murthy, D.N., and Kim C.S., Warranty and Preventive Maintenance. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering* 8(2), 2001, pp. 89-107.
 39. Najafi, R.P., Asoodar, M.A., Marzban, A., and Hormozi, M.A., Reliability Analysis of Agricultural Machinery: A Case Study of Sugarcane Chopper Harvester, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 17(1), 2015, pp. 158-165.
 40. Olaoye, J.O., and Adekanye, T.A., A Survey of Reliability of Tillage Equipment in Osun State, Nigeria, *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 8(1), 2015, pp. 1-12.
 41. Alcock, R., *Tractor-Implement System*, Springer-Verlag, Connecticut, 1986.
 42. An, X., and Xiangming, Q., Analysis on Reliability Characteristic Values of Agricultural Transport Vehicle, *Proceedings of the International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM)*, Changsa, 2011.

Lampiran

Tabel A.1. Ekspektasi ongkos per siklus untuk strategi A, B dan C pada laju penggunaan tertentu, $\gamma=0,8$ [$\beta=3$ dan berbagai nilai Cr]

Cr	Strategi A															Strategi B									
	Blue PM					Silver PM					Gold PM					Blue PM			Silver PM			Gold PM			
	1	2	3	4	5	4	5	6	7	8	7	8	9	1	2	3	2	3	4	5	6	7	6	7	8
20	37,8866	277,619	519,398	762,995	1008,18	1254,74	1649,76	1751,02	2000,30	2250,04	195,834	205,827	217,639	231,042	245,809	261,713	278,526	296,021	313,97						
40	75,7732	305,239	538,796	775,99	1016,37	1259,47	1799,52	1752,05	2000,61	2250,08	241,668	261,655	285,279	312,085	341,619	373,426	407,052	442,042	477,941						
60	113,66	332,858	558,194	788,985	1024,55	1264,21	1949,28	1753,07	2000,91	2250,11	287,502	317,482	352,918	393,127	437,428	485,139	535,578	588,063	641,911						
80	151,546	360,477	577,592	801,98	1032,73	1268,94	2099,04	1754,09	2001,21	2250,15	333,336	373,31	420,557	474,170	533,238	596,852	664,104	734,083	805,881						
100	189,433	388,097	596,990	814,976	1040,92	1273,68	2248,8	1755,11	2001,52	2250,19	379,170	429,137	488,196	555,212	629,047	708,565	792,630	880,104	969,852						
120	227,32	415,716	616,388	827,971	1049,10	1278,41	2398,56	1756,14	2001,82	2250,23	425,004	484,964	555,836	636,254	724,857	820,278	921,156	1026,13	1133,82						
240	454,639	581,432	732,775	905,941	1098,20	1306,83	3297,12	1762,28	2003,64	2250,45	700,009	819,929	961,671	1122,51	1299,71	1490,56	1692,31	1902,25	2117,64						
250	473,583	595,242	742,474	912,439	1102,29	1309,20	3372,00	1762,79	2003,79	2250,47	722,926	847,842	995,491	1163,03	1347,62	1546,41	1756,57	1975,26	2199,63						
340	644,072	719,529	829,765	970,917	1139,12	1330,51	4045,92	1767,39	2005,15	2250,64	929,179	1099,07	1299,87	1527,72	1778,76	2049,12	2334,94	2632,35	2937,50						
400	757,732	802,387	887,959	1009,90	1163,67	1344,72	4495,20	1770,46	2006,06	2250,76	1066,68	1266,55	1502,79	1770,85	2066,19	2384,26	2720,52	3070,42	3429,41						
420	795,619	830,006	907,357	1022,90	1171,85	1349,45	4644,96	1771,48	2006,36	2250,8	1112,52	1322,38	1570,42	1851,89	2162,00	2495,97	2849,05	3216,44	3593,38						
500	947,165	940,484	984,949	1074,88	1204,59	1368,4	5244,00	1775,57	2007,58	2250,95	1295,85	1545,68	1840,98	2176,06	2545,24	2942,83	3363,15	3800,52	4249,26						
600	1136,6	1078,58	1081,94	1139,85	1245,51	1392,07	5992,80	1780,69	2009,09	2251,14	1525,02	1824,82	2179,18	2581,27	3024,28	3501,39	4005,78	4530,63	5069,11						
700	1326,03	1216,68	1178,93	1204,83	1286,42	1415,75	6741,60	1785,8	2010,61	2251,33	1754,19	2103,96	2517,37	2986,48	3503,33	4059,96	4648,41	5260,73	5888,96						
800	1515,46	1354,77	1275,92	1269,80	1327,34	1439,43	7490,40	1790,92	2012,12	2251,52	1983,36	2383,10	2855,57	3391,70	3982,38	4618,52	5291,04	5990,83	6708,81						
900	1704,9	1492,87	1372,91	1334,78	1368,26	1463,11	8239,20	1796,03	2013,64	2251,70	2212,53	2662,23	3193,77	3796,91	4461,42	5177,09	5933,67	6720,94	7528,67						
1000	1894,33	1630,97	1469,9	1399,76	1409,18	1486,79	8988,00	1801,15	2015,15	2251,89	2441,7	2941,37	3531,96	4202,12	4940,47	5735,65	6576,3	7451,04	8348,52						

Tabel A.2. Ekspektasi ongkos per siklus untuk strategi A, B dan C pada laju penggunaan tertentu, $y=2.0$ [$\rho=3$ dan berbagai nilai C_{rl}]

Cr	Strategi A												Strategi B																							
	Blue PM				Silver PM				Gold PM				Blue PM				Silver PM				Gold PM															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9									
20	2057,92	1769,76	1600,64	1535,68	1560	1658,72	1816,96	2019,84	2252,48	2103,92	1661,76	1338,64	1119,68	990,0	934,72	938,960	987,840	1066,48	3865,84	3039,52	2451,28	2071,36	1870	1817,44	1883,92	2039,68	2254,96	4007,84	3123,52	2477,28	2039,36	1780	1669,44	1677,92	1775,68	1932,96
40	5673,76	4309,28	3301,92	2607,04	2180	1976,16	1950,88	2059,52	2257,44	5911,76	4585,28	3615,92	2959,04	2570	2404,16	2416,88	2563,52	2799,44	7481,68	5579,04	4152,56	3142,72	2490	2134,88	2017,84	2079,36	2259,92	7815,68	6047,04	4754,56	3878,72	3360	3138,88	3155,84	3351,36	3665,92
80	9289,60	6848,80	5003,20	3678,40	2800	2293,60	2084,80	2099,20	2262,40	9719,60	7508,80	5893,20	4798,40	4150	3873,60	3894,80	4139,20	4532,40	11097,5	8118,56	5853,84	4214,08	3110	2452,32	2151,76	2119,04	2264,88	11623,5	8970,56	7031,84	5718,08	4940	4608,32	4633,76	4927,04	5398,88
120	21945,0	15737,1	10957,7	7428,16	4970	3404,64	2553,52	2238,08	2279,76	23047,0	17741,1	13863,7	11236,2	9680	9016,64	9067,52	9654,08	10597,8	22849,0	16372,0	11383,0	7696,00	5125	3484,00	2587,00	2248,00	2281,00	23999,0	18472,0	14433,0	11696,0	10075	9384,00	9437,00	10048,0	11031,0
240	30984,6	22085,9	15210,9	10106,6	6520	4198,24	2888,32	2337,28	2292,16	38278,4	29435,2	22972,8	18593,6	16000	14894,4	14979,2	15956,8	17529,6	36408,4	25895,2	17762,8	11713,6	7450	4674,40	3089,20	2396,80	2299,60	32566,6	25049,9	19556,9	15834,6	13630	12690,2	12762,3	13593,3	14930,2
400	38216,3	27165,0	18613,4	12249,3	7760	4833,12	3156,16	2416,64	2302,08	40182,3	30897,0	24111,4	19513,3	16790	15629,1	15718,2	16744,6	18396,1	45448,0	32244,0	22016,0	14392,0	9000	5468,00	3424,00	2496,00	2312,00	47798,0	36744,0	28666,0	23192,0	19950	18568,0	18674,0	19896,0	21862,0
600	54487,6	38592,8	26269,2	17070,4	10550	6261,60	3758,80	2595,20	2324,40	57317,6	44052,8	34359,2	27790,4	23900	22241,6	22368,8	23835,2	26194,4	63527,2	44941,6	30522,4	19748,8	12100	7055,20	4093,60	2694,40	2336,80	66837,2	51361,6	40052,4	32388,8	27850	25915,2	26063,6	27774,4	30526,8
800	72566,8	51290,4	34775,6	22427,2	13650	7848,80	4428,40	2793,60	2349,20	76356,8	58670,4	45745,6	36987,2	31800	29588,8	29758,4	31713,6	34859,2	81606,4	57639,2	39028,8	25105,6	15200	8642,40	4763,20	2892,80	2361,60	85876,4	65979,2	51438,8	41585,6	35750	33262,4	33453,2	35652,8	39191,6
1000	90646,0	63988,0	43282,0	27784,0	16750	9436,00	5098,00	2992,00	2374,00	95396,0	73288,0	57132,0	46184,0	39700	36936,0	37148,0	39592,0	43524,0	90646,0	63988,0	43282,0	27784,0	16750	9436,00	5098,00	2992,00	2374,00	95396,0	73288,0	57132,0	46184,0	39700	36936,0	37148,0	39592,0	43524,0