



Pemodelan Kelayakan Investasi dan Pembagian Biaya Konsorsium Berbagi Informasi Berbasis Blockchain untuk Mereduksi Waktu Tunggu Komponen Aircraft on Ground: Pendekatan Cooperative Game Theory

Bobi Gumelar Raspati¹

¹Program Studi Magister Teknik Industri, Universitas Pasundan, Bandung 40132, Indonesia
Email: bobi.gumelar725@gmail.com

ABSTRACT / ABSTRAK

Abstract: This study addresses Aircraft on Ground (AOG) waiting time for components in Garuda Indonesia Group. The data record 126 AOG events and 1,056.40 hours over 382 days. Using a cost proxy of USD 7,500 per hour, the estimated loss reaches IDR 132.48 billion per year (95% bootstrap interval: IDR 95.9 to 174.2 billion). The study models an information-sharing consortium among an MRO, an airline, an OEM, and customs, with blockchain as one technology option. Model 1 assesses investment feasibility through NPV, IRR, BCR, and a break-even information-sharing effectiveness (ϵ^*), including a non-blockchain shared-database comparator. Model 2 allocates costs with the Shapley value in a four-player cooperative game and tests it against the core and the nucleolus. At the management target effectiveness of 25%, a CAPEX of IDR 35 billion and an OPEX of IDR 6 billion per year yield an NPV of IDR 12.03 billion, an IRR of 23.0%, and a BCR of 1.20. The break-even effectiveness is 20.9%. Switching technology shifts NPV by at most IDR 1.5 billion, while raising effectiveness from 15% to 25% shifts it by about IDR 29 billion. The Shapley value gives IDR 3.63 billion each to the MRO, airline, and OEM, and IDR 1.13 billion to customs. Both the Shapley value and the nucleolus lie in the core. A two-group cost-sharing design is recommended for implementation. Consortium value comes from information sharing, not from blockchain, and the OEM is a pivotal player.

Abstrak: Penelitian ini membahas waktu tunggu komponen Aircraft on Ground (AOG) pada Garuda Indonesia Group. Data mencatat 126 kejadian AOG dan 1.056,40 jam selama 382 hari. Dengan proksi biaya USD 7.500 per jam, kerugian diperkirakan Rp132,48 miliar per tahun (interval bootstrap 95%: Rp95,9 sampai 174,2 miliar). Penelitian ini memodelkan konsorsium berbagi informasi antara MRO, maskapai, OEM, dan Pabean, dengan blockchain sebagai salah satu opsi teknologi. Model 1 menilai kelayakan investasi melalui NPV, IRR, BCR, dan ambang efektivitas berbagi informasi (ϵ^*), termasuk pembandingan basis data bersama non-blockchain. Model 2 membagi biaya dengan Shapley Value dalam permainan kooperatif empat pemain dan mengujinya terhadap core dan nucleolus. Pada target manajemen efektivitas 25%, CAPEX Rp35 miliar dan OPEX Rp6 miliar per tahun menghasilkan NPV Rp12,03 miliar, IRR 23,0%, dan BCR 1,20. Ambang efektivitasnya 20,9%. Mengganti teknologi hanya menggeser NPV paling banyak Rp1,5 miliar, sedangkan menaikkan efektivitas dari 15% ke 25% menggeser NPV sekitar Rp29 miliar. Shapley Value memberi MRO, maskapai, dan OEM masing-masing Rp3,63 miliar dan Pabean Rp1,13 miliar. Shapley Value dan nucleolus sama-sama berada dalam core. Desain pembagian biaya dua kelompok direkomendasikan untuk implementasi. Nilai konsorsium berasal dari berbagi informasi, bukan dari blockchain, dan OEM adalah pemain

ARTICLE INFO

Article history :

Received month dd, yyyy

Revised month dd, yyyy

Accepted month dd, yyyy

Published online month dd, yyyy

Keywords: *Aircraft on Ground, Information Sharing, Blockchain, Techno-Economic Analysis, Shapley Value, Cooperative Game Theory, MRO*

Kata Kunci: *Aircraft on Ground, Berbagi Informasi, Blockchain, Analisis Tekno-Ekonomi, Shapley Value, Teori Permainan Kooperatif, MRO*

Kecap Konci: *Aircraft on Ground, Babagi Informasi, Blockchain, Analisis Tekno-Ekonomi, Shapley Value, Téori Kaulinan Koperatif, MRO*

*Corresponding author :

Bobi Gumelar Raspati

bobi.gumelar725@gmail.com

penentu.

Abstrak: Ieu panalungtikan ngabahas waktu ngadagoan komponén Aircraft on Ground (AOG) di Garuda Indonesia Group. Data nyatet 126 kajadian AOG jeung 1.056,40 jam salila 382 poé. Ku proksi waragad USD 7.500 per jam, karugianana diperkirakeun Rp132,48 miliar per taun (interval bootstrap 95%: Rp95,9 nepi ka 174,2 miliar). Ieu panalungtikan nyieun modél konsorsium babagi informasi antara MRO, maskapai, OEM, jeung Pabéan, kalawan blockchain minangka salah sahiji pilihan téknologi. Modél 1 meunteun kalayakan investasi ngaliwatan NPV, IRR, BCR, jeung ambang éféktivitas babagi informasi (ϵ^*), kaasup babandingan jeung basis data babarengan non-blockchain. Modél 2 ngabagi waragad ku Shapley Value dina kaulinan kooperatif opat pamaén sarta ngujina ku core jeung nucleolus. Dina target manajemén éféktivitas 25%, CAPEX Rp35 miliar jeung OPEX Rp6 miliar per taun ngahasilkeun NPV Rp12,03 miliar, IRR 23,0%, jeung BCR 1,20. Ambang éféktivitasna 20,9%. Ngaganti téknologi ngan ukur ngageser NPV pangloba Rp1,5 miliar, sedengkeun naékkeun éféktivitas ti 15% ka 25% ngageser NPV kira-kira Rp29 miliar. Shapley Value méré MRO, maskapai, jeung OEM masing-masing Rp3,63 miliar sarta Pabéan Rp1,13 miliar. Shapley Value jeung nucleolus duanana aya dina core. Désain babagi waragad dua kelompok disarankeun pikeun implementasi. Ajén konsorsium asalna tina babagi informasi, lain tina blockchain, sarta OEM mangrupa pamaén panangtu.

PENDAHULUAN

Aircraft on Ground (AOG) terjadi ketika pesawat tidak dapat dioperasikan karena menunggu komponen, dokumen, atau keputusan teknis. Setiap jam AOG membawa biaya operasi, kompensasi penumpang, dan kehilangan pendapatan. Federal Aviation Administration (2024b) menyediakan proksi biaya operasi pesawat per jam yang lazim dipakai dalam analisis investasi sektor penerbangan. Permintaan suku cadang pesawat bersifat intermiten dan sulit diramalkan (Ghobbar & Friend, 2003; Regattieri et al., 2005). Akibatnya, komponen sering tidak tersedia di lokasi yang tepat saat dibutuhkan (Kennedy et al., 2002).

Masalah ini nyata pada Garuda Indonesia Group. Laporan AOG Garuda Indonesia (GA) dan Citilink (QG) selama 8 Agustus 2025 sampai 24 Agustus 2026 mencatat 126 kejadian dengan total 1.056,40 jam. Dengan proksi USD 7.500 per jam dan kurs Rp17.500, kerugian tersebut diperkirakan Rp132,48 miliar per tahun. Stok MRO yang kosong menyumbang 61,8% jam AOG. Penyebab ini bersumber dari informasi yang tidak sampai ke pihak yang mengambil keputusan stok.

Literatur rantai pasok menunjukkan bahwa berbagi informasi permintaan menurunkan kekurangan stok dan distorsi permintaan (Lee et al., 1997; Lee et al., 2000; Cachon & Fisher, 2000). Blockchain menawarkan catatan bersama yang sulit diubah lintas organisasi (Kshetri, 2018; Saberi et al., 2019). Namun, penelitian blockchain di MRO masih berhenti pada rancangan aplikasi dan hambatan adopsi (Ho et al., 2021; Richardo et al., 2022; Efthymiou et al., 2022). Kasus TradeLens memperlihatkan bahwa platform yang matang secara teknis dapat dihentikan karena persoalan pembagian nilai dan tata kelola (Jensen et al., 2019; A.P. Moller–Maersk, 2022).

Dua pertanyaan belum terjawab. Pertama, apakah investasi konsorsium berbagi informasi layak secara ekonomi. Kedua, bagaimana biayanya dibagi agar adil dan stabil di antara MRO, maskapai, OEM, dan otoritas kepabeanan. Alokasi biaya kooperatif sudah dipakai pada *pooling* suku cadang (Wong et al., 2007) dan rantai pasok berbasis blockchain (Li & Qu, 2023). Kedua arus itu belum dirangkai dengan valuasi investasi pada konsorsium MRO.

Penelitian ini bertujuan merumuskan syarat kelayakan investasi konsorsium dan pembagian biaya yang stabil di antara empat pemain. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi berurutan antara

model kelayakan investasi dan model permainan kooperatif empat pemain. Nilai setiap koalisi diturunkan langsung dari data penyebab waktu tunggu. Penelitian ini juga memasukkan aktor publik sebagai pemain dan membandingkan blockchain dengan basis data bersama non-blockchain.

TINJAUAN PUSTAKA DAN PROPOSISI PENELITIAN

Berbagi Informasi pada Rantai Pasok Suku Cadang Aviasi

Asimetri informasi membuat pihak yang memegang data enggan atau tidak mampu membaginya (Akerlof, 1970). Pada rantai pasok, kondisi ini memicu efek *bullwhip* dan stok yang salah tempat (Lee et al., 1997). Lee et al. (2000) serta Cachon dan Fisher (2000) membuktikan bahwa berbagi informasi permintaan menurunkan biaya persediaan dan kekurangan stok. Pada suku cadang aviasi, manfaat ini lebih penting karena permintaan bersifat *lumpy* dan biaya kekurangan sangat tinggi (Regattieri et al., 2005).

Blockchain sebagai Opsi Teknologi

Blockchain bukan satu-satunya cara berbagi informasi. Wüst dan Gervais (2018) serta Pedersen et al. (2019) menyusun kerangka keputusan kapan blockchain diperlukan: banyak pihak menulis data bersama, para pihak tidak saling percaya penuh, dan tidak ada operator tepercaya bersama. Pada kasus ini syarat tersebut hanya terpenuhi sebagian. MRO dan maskapai berada dalam satu grup, sedangkan pemerintah sudah memiliki INSW dan agenda Ekosistem Logistik Nasional (Republik Indonesia, 2020). Karena itu, penelitian ini mendefinisikan efektivitas sebagai efektivitas berbagi informasi, bukan efektivitas blockchain, dan menghitung pembandingan basis data bersama.

Valuasi Investasi Teknologi

Kelayakan investasi dinilai dengan *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Benefit-Cost Ratio* (BCR) (Boardman et al., 2018; Newnan et al., 2017; Blank & Tarquin, 2018). Analisis titik impas menunjukkan nilai parameter kunci yang membuat NPV sama dengan nol. Pendekatan ini cocok ketika parameter utama belum dapat diukur langsung, karena kesimpulan dapat dinyatakan sebagai syarat.

Teori Permainan Kooperatif dan Alokasi Biaya

Brandenburger dan Stuart (1996) menegaskan bahwa nilai harus tercipta sebelum dapat dibagi. Shapley Value membagi nilai bersama menurut rata-rata kontribusi marginal setiap pemain atas semua urutan kedatangan (Shapley, 1953). Core memuat alokasi yang membuat tidak ada koalisi lebih untung bila keluar (Gillies, 1959). Nucleolus memilih alokasi yang meminimalkan ketidakpuasan koalisi yang paling dirugikan (Schmeidler, 1969). Pada permainan konveks, Shapley Value pasti berada dalam core (Shapley, 1971). Alokasi biaya kooperatif sudah diterapkan pada biaya pendaratan pesawat (Littlechild & Thompson, 1977), sumber daya air (Young et al., 1982), dan transportasi kolaboratif (Frisk et al., 2010; Guajardo & Rönnqvist, 2016).

Proposisi Penelitian

Penelitian pemodelan normatif menguji proposisi yang dapat ditolak oleh hasil model (Bertrand & Fransoo, 2002). Penelitian ini merumuskan dua proposisi:

P1: Investasi konsorsium berbagi informasi layak ($NPV \geq 0$) pada nilai acuan efektivitas 25% sesuai target manajemen, dengan masa implementasi satu tahun.

P2: Alokasi Shapley empat pemain berada dalam core dan bernilai nonnegatif bagi seluruh pemain.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan pemodelan kuantitatif normatif (Bertrand & Fransoo, 2002) dengan desain studi kasus tunggal-terjalin (Yin, 2018). Sistem dirumuskan dengan pendekatan sistem (Daellenbach

et al., 2012). Pemainnya adalah MRO (M), maskapai (A), OEM (O), dan Pabean (P). Tiga simpul nilai menghubungkan penyebab waktu tunggu dengan informasi yang hilang: N1 visibilitas komponen rawan AOG, N2 sinyal permintaan ke OEM, dan N3 pra-verifikasi dokumen.

Data AOG diklasifikasikan ke dalam empat penyebab: C1 stok MRO kosong, C2 OEM atau vendor lambat, C3 logistik fisik, dan C4 dokumen dan otoritas. Jam AOG dianalisis dengan faktor 365/382. Ketidakpastian estimasi kerugian diukur dengan *bootstrap* 10.000 sampel ulang (Efron & Tibshirani, 1993). C3 dikeluarkan dari manfaat karena perjalanan fisik komponen tidak dapat dipercepat oleh informasi.

Model 1 menghitung manfaat bersih tahunan sebagai berikut:

$$B_t = a_t \cdot c_{AOG} \cdot \sum H_k \cdot \varepsilon - K_{inv}, \quad k \in \{C1, C2, C4\} \quad (1)$$

a_t adalah tingkat adopsi (0 pada tahun implementasi, 50% pada tahun operasi pertama, 100% sesudahnya). c_{AOG} adalah biaya AOG per jam. H_k adalah jam AOG per tahun akibat penyebab k . ε adalah efektivitas berbagi informasi. K_{inv} adalah biaya penempatan stok tambahan. Kelayakan dinilai dengan NPV pada diskonto 15%, dan ambang ε^* diperoleh dari:

$$NPV(\varepsilon^*) = -I_0 + \sum (B_t - C_t) / (1 + r)^t = 0 \quad (2)$$

Model 2 membentuk permainan kooperatif dengan fungsi karakteristik nilai kini dan opsi keluar, yaitu koalisi yang merugi memilih tidak berinvestasi:

$$v(S) = \max\{0, b(S) - c(S)\} \quad (3)$$

$b(S)$ adalah nilai kini manfaat dari simpul yang aktif pada koalisi S , dan $c(S)$ adalah biaya inti ditambah biaya titik sambung (node) setiap anggota. Shapley Value dihitung dengan:

$$\varphi_i = \sum [S! / (n - |S| - 1)! / n!] \cdot [v(S \cup \{i\}) - v(S)] \quad (4)$$

Kewajiban biaya setiap pemain dihitung sebagai $x_i = B_i - \varphi_i$, dengan B_i porsi manfaat pemain i . Stabilitas diuji terhadap core dan dibandingkan dengan nucleolus. Verifikasi dan validasi model mengikuti Sargent (2013). Tabel 1 menyajikan parameter baseline.

Tabel 1. Parameter baseline model

Parameter	Nilai	Sumber
Data AOG	126 kejadian; 1.056,40 jam; 382 hari	Laporan AOG GA dan QG
Biaya AOG per jam	USD 7.500	FAA (2024b)
Kurs	Rp17.500 per USD	Rata-rata satu tahun terakhir
CAPEX	Rp35 miliar (inkremental)	Estimasi bottom-up
OPEX	Rp6 miliar per tahun	Estimasi bottom-up
Biaya penempatan stok	Rp1 miliar per tahun mulai tahun ke-2	Silver et al. (2017)
Lini masa; diskonto	1 tahun implementasi + 5 tahun operasi; 15%	Asumsi model
ε acuan; sensitivitas	25%; 20% dan 15%	Target manajemen; uji kepekaan

Sumber: data internal Garuda Indonesia Group dan hasil olahan peneliti

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Profil Kejadian AOG

Tabel 2 menyajikan jam AOG menurut penyebab setelah analisis. C1, C2, dan C4 dapat dipengaruhi informasi, sehingga kerugian yang dapat disasar mencapai Rp114,55 miliar per tahun atau 86,5% dari kerugian awal. Distribusi durasi sangat menceng: median 2,46 jam, rata-rata 8,38 jam, dan 15 kejadian di atas 24 jam menyumbang 55,7% jam. Komponen yang berulang hanya menyumbang 15,4% jam AOG.

Tabel 2. Jam AOG dan kerugian menurut penyebab

Penyebab	Kejadian	Jam per tahun	Porsi	Kerugian (Rp miliar/tahun)	Disasar
C1 Stok MRO kosong	84	624,10	61,8%	81,91	Ya
C2 OEM/vendor lambat	26	181,29	18,0%	23,79	Ya
C3 Logistik fisik	14	136,64	13,5%	17,94	Tidak
C4 Dokumen dan otoritas	2	67,36	6,7%	8,84	Ya
Jumlah	126	1.009,39	100%	132,48	114,55

Sumber: data internal Garuda Indonesia Group, diolah; interval bootstrap 95% kerugian awal Rp95,9 sampai 174,2 miliar

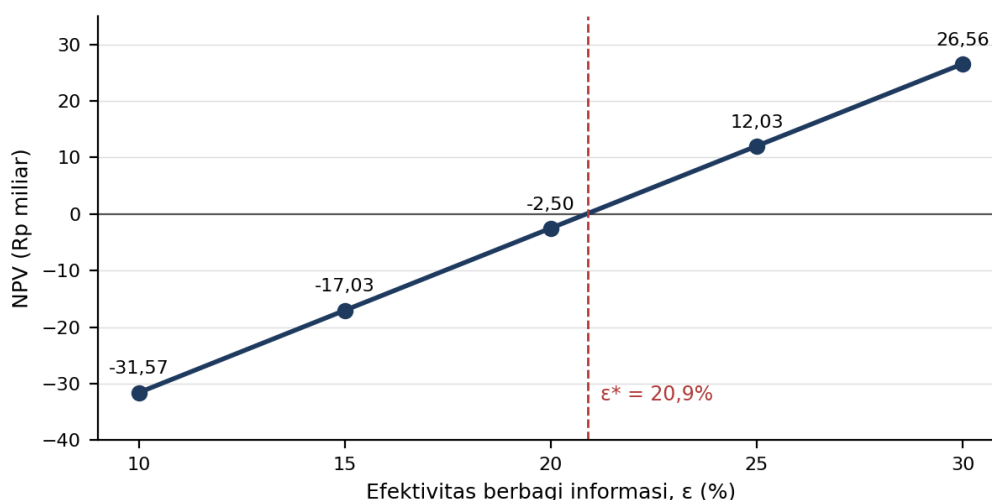
Hasil Model 1: Kelayakan Investasi

Tabel 3 dan Gambar 1 menyajikan hasil Model 1. Pada nilai acuan ϵ 25%, investasi menghasilkan NPV Rp12,03 miliar, IRR 23,0%, BCR 1,20, dan *payback* terdiskonto 4,8 tahun. Pada ϵ 20% dan 15%, NPV menjadi negatif. Titik impas berada pada ϵ^* 20,9%, atau 4,1 poin persen di bawah nilai acuan.

Tabel 3. Hasil Model 1 (Rp miliar)

Skenario	Manfaat penuh per tahun	NPV	IRR	BCR	Payback terdiskonto
ϵ 15% (sensitivitas)	17,18	-17,03	0,7%	0,72	> 6 tahun
ϵ 20% (sensitivitas)	22,91	-2,50	13,2%	0,96	> 6 tahun
ϵ 25% (acuan)	28,64	12,03	23,0%	1,20	4,8 tahun

Sumber: hasil perhitungan

**Gambar 1.** NPV menurut efektivitas berbagi informasi

Uji kepekaan menunjukkan kesimpulan bertahan bila CAPEX naik 20% (NPV 5,03), OPEX naik 20% (7,48), atau implementasi molor dua tahun (0,67). Kesimpulan berbalik bila biaya per jam turun 20% atau porsi waktu tunggu murni hanya 80% (masing-masing -2,50), dan bila beberapa risiko terjadi bersamaan (-12,16). Adopsi penuh sejak tahun operasi pertama menurunkan ambang menjadi 18,2%.

Pembandingan Basis Data Bersama

Opsi basis data bersama memerlukan CAPEX Rp32 miliar dan OPEX Rp5,5 miliar per tahun, tetapi diasumsikan tidak membuka simpul N3. Tabel 4 menunjukkan selisih NPV kedua opsi kecil dan berganti tanda menurut ϵ . Tambahan biaya blockchain dalam nilai kini sebesar Rp4,89 miliar baru tertutup oleh manfaat N3 bila ϵ di atas sekitar 21,8%.

Tabel 4. NPV blockchain konsorsium dan basis data bersama (Rp miliar)

ϵ	Blockchain konsorsium	Basis data bersama	Nilai tambah blockchain
15%	-17,03	-15,51	-1,53
20%	-2,50	-2,10	-0,41
25%	12,03	11,31	+0,72

Sumber: hasil perhitungan; estimasi biaya opsi pembandingan bersifat kasar

Hasil Model 2: Nilai Koalisi dan Pembagian Biaya

Pada ϵ 25%, nilai kini manfaat simpul N1, N2, dan N3 masing-masing Rp49,04 miliar, Rp15,09 miliar, dan Rp5,61 miliar, dengan total Rp69,73 miliar. Nilai kini biaya mencapai Rp57,71 miliar. Dengan opsi keluar, hanya dua koalisi yang bernilai positif (Tabel 5). Koalisi MRO dan maskapai tanpa OEM merugi Rp6,57 miliar dan baru layak bila ϵ mencapai 28,2%. Nilai koalisi besar sama dengan NPV Model 1, sehingga kedua model konsisten.

Tabel 5. Nilai koalisi terpilih (nilai kini, Rp miliar, ϵ 25%)

Koalisi	Simpul aktif	b(S)	c(S)	v(S)
{M, A}	N1	49,04	55,61	0 (-6,57)
{M, A, P}	N1, N3	54,64	56,71	0 (-2,06)
{M, A, O}	N1, N2	64,13	56,61	7,52
{M, A, O, P}	N1, N2, N3	69,73	57,71	12,03

Sumber: hasil perhitungan; sebelas koalisi lain bernilai 0

Tabel 6 menyajikan Shapley Value dan nucleolus. Pabean hanya menambah nilai sebesar 4,51 ketika melengkapi koalisi {M, A, O}, yang terjadi pada seperempat urutan kedatangan, sehingga bagiannya 1,13. Sisanya dibagi rata kepada tiga pemain penentu. Nucleolus menempatkan Pabean di tengah rentang wajarnya, 0 sampai 4,51. Kedua alokasi berada dalam core, dan permainannya konveks.

Tabel 6. Shapley Value dan nucleolus (nilai kini, Rp miliar)

Konsep solusi	MRO	Maskapai	OEM	Pabean	Dalam core
Shapley Value	3,63	3,63	3,63	1,13	Ya
Nucleolus	3,26	3,26	3,26	2,25	Ya

Sumber: hasil perhitungan; spesifikasi empat pemain dengan opsi keluar

Tabel 7 menyajikan kewajiban biaya. Pada Shapley empat pemain murni (S1), OEM dan Pabean justru menerima kompensasi. Desain dua kelompok (S4) lebih mudah diterapkan: maskapai dan MRO menanggung biaya inti, OEM membayar iuran tetap sebesar biaya node-nya, dan Pabean menyumbang dalam bentuk natura berupa integrasi sistem. Porsi manfaat 70/25/5 bersifat ilustratif dan tidak mengubah untung bersih setiap pihak.

Tabel 7. Kewajiban biaya dan untung bersih (nilai kini, Rp miliar)

Pihak	Manfaat	Kewajiban S1	Kewajiban S4	Untung bersih S4
Maskapai	48,81	45,18	43,49	5,32
MRO	17,43	13,80	12,11	5,32
OEM	3,49	-0,15	1,00	2,49
Pabean	0*	-1,13	1,10 (natura)	-1,10
Jumlah	69,73	57,71	57,70	12,03

Sumber: hasil perhitungan; ϵ 25%; porsi manfaat ilustratif 70/25/5; *manfaat publik Pabean belum dirupiahkan

ANALISIS DAN PEMBAHASAN INTEGRATIF

Nilai berasal dari berbagi informasi. Mengganti teknologi hanya menggeser NPV paling banyak Rp1,5 miliar. Menaikkan efektivitas dari 15% ke 25% menggeser NPV sekitar Rp29 miliar. Temuan ini sejalan dengan Lee et al. (2000) dan Cachon dan Fisher (2000) bahwa nilai terletak pada informasi itu sendiri. Temuan ini juga mendukung kerangka Wüst dan Gervais (2018): ketika sebagian pihak saling percaya dan operator tepercaya tersedia, blockchain tidak memberi keunggulan besar.

OEM adalah pemain penentu. Koalisi MRO dan maskapai tanpa OEM tidak layak. OEM membuka simpul N2 dan mengubah nilai koalisi dari negatif menjadi positif. Hasil ini sejalan dengan prinsip alokasi biaya kooperatif bahwa bagian setiap pemain mencerminkan kontribusi marginalnya terhadap nilai bersama (Shapley, 1953; Tijs & Driessen, 1986). Dalam praktik, OEM perlu dilibatkan sejak tahap perancangan konsorsium.

Pabean berperan sebagai compliance enabler. Simpul N3 hanya terdiri atas dua kejadian. Kejadian C4 terpanjang disebabkan menunggu persetujuan otoritas bandara, dan C4 pada armada A320 hanya 0,5 jam. Kontribusi Pabean lebih tepat dipahami sebagai kepastian prosedur dan integrasi INSW (Okazaki, 2018; World Customs Organization, 2018). Manfaat publiknya berupa jam kerja petugas dan pemeriksaan fisik yang berkurang, yang belum dapat dirupiahkan (Moore, 1995).

Batas absolut konsorsium digital. Logistik fisik (C3) tidak dapat dipangkas oleh informasi. Informasi mempercepat keputusan penempatan stok, bukan perjalanan komponen. Karena komponen berulang hanya 15,4% jam AOG, manfaat terbesar ada pada penempatan stok di stasiun luar negeri.

Berdasarkan hasil tersebut, P1 terdukung bersyarat: investasi layak bila efektivitas berbagi informasi minimal 20,9%. P2 juga terdukung bersyarat: alokasi Shapley stabil dalam core bila pemain yang merugi boleh memilih tidak ikut. Tanpa opsi keluar, OEM dan Pabean memperoleh bagian negatif sehingga tidak rasional bergabung.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa konsorsium berbagi informasi untuk mereduksi waktu tunggu komponen AOG layak secara ekonomi pada target manajemen efektivitas 25%, dengan NPV Rp12,03 miliar, IRR 23,0%, dan BCR 1,20. Ambang kelayakannya 20,9%. Nilai konsorsium berasal dari berbagi informasi, sedangkan pilihan teknologi hanya berpengaruh kecil. Shapley Value memberi MRO, maskapai, dan OEM masing-masing Rp3,63 miliar dan Pabean Rp1,13 miliar, stabil dalam core, dan dekat dengan nucleolus. Desain dua kelompok (S4) membuat seluruh pemain swasta memperoleh untung bersih positif.

Rekomendasi

1. **Manajerial:** Garuda Indonesia Group disarankan mengunci investasi pada komitmen target perbaikan delay AOG 25%, memprioritaskan penempatan stok dan data keandalan per tipe armada di stasiun luar negeri, melibatkan OEM sejak awal sebagai pemain penuh, dan mempercepat *onboarding* anggota. Untuk lingkup satu grup, basis data bersama atau integrasi INSW layak dipertimbangkan sebagai alternatif blockchain.
2. **Akademis:** Penelitian selanjutnya dapat mengukur ε melalui elisitasi ahli terstruktur (O'Hagan et al., 2006) dan simulasi Monte Carlo (Vose, 2008), memakai biaya AOG per kejadian dari data keuangan, mengukur waktu rilis kepabeanan dengan *Time Release Study*, serta memperluas data menjadi minimal tiga tahun dan multikasus.

DAFTAR PUSTAKA

- A.P. Moller–Maersk. (2022, 29 November). *A.P. Moller–Maersk and IBM to discontinue TradeLens* [Siaran pers]. A.P. Moller–Maersk.
- Akerlof, G. A. (1970). The market for “lemons”: Quality uncertainty and the market mechanism. *The Quarterly Journal of Economics*, 84(3), 488–500.
- Bertrand, J. W. M., & Fransoo, J. C. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(2), 241–264.
- Blank, L., & Tarquin, A. (2018). *Engineering economy* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2018). *Cost-benefit analysis: Concepts and practice* (5th ed.). Cambridge University Press.
- Brandenburger, A. M., & Stuart, H. W. (1996). Value-based business strategy. *Journal of Economics & Management Strategy*, 5(1), 5–24.
- Cachon, G. P., & Fisher, M. (2000). Supply chain inventory management and the value of shared information. *Management Science*, 46(8), 1032–1048.
- Daellenbach, H. G., McNickle, D. C., & Dye, S. (2012). *Management science: Decision-making through systems thinking* (2nd ed.). Palgrave Macmillan.
- Efron, B., & Tibshirani, R. J. (1993). *An introduction to the bootstrap*. Chapman & Hall.
- Efthymiou, M., McCarthy, K., Markou, C., & O'Connell, J. F. (2022). An exploratory research on blockchain in aviation: The case of maintenance, repair and overhaul (MRO) organizations. *Sustainability*, 14(5), 2643. <https://doi.org/10.3390/su14052643>
- Federal Aviation Administration. (2024b). *Economic values for FAA investment and regulatory decisions, a guide: Section 4, aircraft operating costs*. FAA Office of Aviation Policy and Plans.
- Frisk, M., Göthe-Lundgren, M., Jörnsten, K., & Rönqvist, M. (2010). Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research*, 205(2), 448–458. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.01.015>
- Ghobbar, A. A., & Friend, C. H. (2003). Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation: A predictive model. *Computers & Operations Research*, 30(14), 2097–2114.
- Gillies, D. B. (1959). Solutions to general non-zero-sum games. Dalam A. W. Tucker & R. D. Luce (Ed.), *Contributions to the theory of games IV* (hlm. 47–85). Princeton University Press.
- Guajardo, M., & Rönqvist, M. (2016). A review on cost allocation methods in collaborative transportation. *International Transactions in Operational Research*, 23(3), 371–392. <https://doi.org/10.1111/itor.12205>
- Ho, G. T. S., Tang, Y. M., Tsang, K. Y., Tang, V., & Chau, K. Y. (2021). A blockchain-based system to enhance aircraft parts traceability and trackability for inventory management. *Expert Systems with Applications*, 179, 115101. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115101>
- Jensen, T., Hedman, J., & Henningsson, S. (2019). How TradeLens delivers business value with blockchain technology. *MIS Quarterly Executive*, 18(4), 221–243.
- Kennedy, W. J., Patterson, J. W., & Fredendall, L. D. (2002). An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of Production Economics*, 76(2), 201–215.
- Kshetri, N. (2018). Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. *International Journal of Information Management*, 39, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005>
- Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997). Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management Science*, 43(4), 546–558.
- Lee, H. L., So, K. C., & Tang, C. S. (2000). The value of information sharing in a two-level supply chain. *Management Science*, 46(5), 626–643.
- Li, S., & Qu, S. (2023). The three-level supply chain finance collaboration under blockchain: Income sharing with Shapley value cooperative game. *Sustainability*, 15(6), 5367.

- Littlechild, S. C., & Thompson, G. F. (1977). Aircraft landing fees: A game theory approach. *The Bell Journal of Economics*, 8(1), 186–204.
- Moore, M. H. (1995). *Creating public value: Strategic management in government*. Harvard University Press.
- Newnan, D. G., Eschenbach, T. G., & Lavelle, J. P. (2017). *Engineering economic analysis* (13th ed.). Oxford University Press.
- O'Hagan, A., Buck, C. E., Daneshkhah, A., Eiser, J. R., Garthwaite, P. H., Jenkinson, D. J., Oakley, J. E., & Rakow, T. (2006). *Uncertain judgements: Eliciting experts' probabilities*. Wiley.
- Okazaki, Y. (2018). *Unveiling the potential of blockchain for customs* (WCO Research Paper No. 45). World Customs Organization.
- Pedersen, A. B., Risius, M., & Beck, R. (2019). A ten-step decision path to determine when to use blockchain technologies. *MIS Quarterly Executive*, 18(2), 99–115.
- Regattieri, A., Gamberi, M., Gamberini, R., & Manzini, R. (2005). Managing lumpy demand for aircraft spare parts. *Journal of Air Transport Management*, 11(6), 426–431.
- Republik Indonesia. (2020). *Instruksi Presiden Nomor 5 Tahun 2020 tentang Penataan Ekosistem Logistik Nasional*.
- Richardo, C., Rasheed, N. A., Maulana, T. N. A., & Gunawan, A. A. S. (2022). Development of supply chain spare part application in maintenance, repair, and overhaul (MRO) industry using blockchain technology. Dalam *2022 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech)* (hlm. 624–629). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIMTech55957.2022.9915226>
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>
- Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, 7(1), 12–24.
- Schmeidler, D. (1969). The nucleolus of a characteristic function game. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 17(6), 1163–1170.
- Shapley, L. S. (1953). A value for n-person games. Dalam H. W. Kuhn & A. W. Tucker (Ed.), *Contributions to the theory of games II* (hlm. 307–317). Princeton University Press.
- Shapley, L. S. (1971). Cores of convex games. *International Journal of Game Theory*, 1(1), 11–26.
- Silver, E. A., Pyke, D. F., & Thomas, D. J. (2017). *Inventory and production management in supply chains* (4th ed.). CRC Press.
- Tijs, S. H., & Driessen, T. S. H. (1986). Game theory and cost allocation problems. *Management Science*, 32(8), 1015–1028.
- Vose, D. (2008). *Risk analysis: A quantitative guide* (3rd ed.). Wiley.
- Wong, H., Van Oudheusden, D., & Cattrysse, D. (2007). Cost allocation in spare parts inventory pooling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(4), 370–386. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.01.001>
- World Customs Organization. (2018). *Guide to measure the time required for the release of goods (Time Release Study)*, version 3. WCO.
- Wüst, K., & Gervais, A. (2018). Do you need a blockchain? Dalam *2018 Crypto Valley Conference on Blockchain Technology (CVCBT)* (hlm. 45–54). IEEE.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.
- Young, H. P., Okada, N., & Hashimoto, T. (1982). Cost allocation in water resources development. *Water Resources Research*, 18(3), 463–475.