

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Produktivitas dan *Match factor* Aktual

4.1.1 Perhitungan Tingkat Efisiensi Kerja Alat

Berdasarkan data penelitian, diketahui nilai waktu ketersediaan alat selama satu bulan pada bulan oktober 2025. Pada tabel 4.1 diketahui bahwa alat memiliki beberapa klasifikasi waktu ketersediaan yang digunakan untuk mengetahui efisiensi kerja alat. Tabel 4.1 menyajikan rekapitulasi waktu ketersediaan alat selama periode pengamatan, yang terbagi ke dalam tiga komponen utama: waktu perbaikan (R), waktu siap tidak beroperasi (S), dan waktu kerja produktif (W)

Tabel 4. 1 Tabel Waktu Ketersediaan Alat Pada Bulan Oktober 2025

Keterangan	R (Jam)	S(Jam)	W(Jam)	Total
Alat Gali Muat	103.84	174.85	1,209.32	1,488.00
Alat Angkut	381.67	1,330.73	11,679.60	13,392.00

Pada alat gali muat, total waktu terjadwal tercatat sebesar 1.488,00 jam, dengan rincian waktu perbaikan sebesar 103,84 jam, waktu standby sebesar 174,85 jam, dan waktu kerja produktif sebesar 1.209,32 jam. Adapun pada alat angkut, total waktu terjadwal jauh lebih besar yakni 13.392,00 jam. Nilai tersebut mencerminkan jumlah unit dump truck yang lebih banyak dengan waktu perbaikan 381,67 jam, waktu standby 1.330,73 jam, dan waktu kerja produktif 11.679,60 jam. Proporsi waktu kerja produktif terhadap total waktu terjadwal pada alat gali muat mencapai 81,3%, sedangkan pada alat angkut sebesar 87,2%, yang menunjukkan bahwa alat angkut memiliki tingkat pemanfaatan waktu yang lebih tinggi dibandingkan alat gali muat. Besarnya waktu *standby* pada alat angkut sebesar 1.330,73 jam mengindikasikan adanya waktu tunggu yang signifikan akibat ketidakserasian antara kapasitas alat gali muat dan alat angkut. Untuk memperjelas sumber nilai *availability* dan *utilization* secara , dilakukan penelusuran lebih lanjut terhadap data status alat harian selama periode penelitian pada tabel 4.2

Tabel 4. 2 Rincian komponen pada Waktu Ketersediaan Alat

Kategori	Alat Gali Muat (jam / %)	Alat Angkut (jam / %)
Pergantian Shift	41,56 (23,8%)	223,26 (16,8%)
Menunggu Truck Sampai / Di Area Excavator	32,20 (18,4%)	110,27 (8,3%)
Safety Talk Mingguan	19,45 (11,1%)	164,78 (12,4%)
Sholat	6,85 (3,9%)	265,19 (19,9%)
Tidak Ada Alat Muat	–	78,78 (5,9%)
PM Service (Down)	66,29 (63,8%)	137,46 (36,0%)
Kebocoran / Tyre Rotation (Down)	–	139,10 (36,4%)

Berdasarkan rekapitulasi data pada tabel 4.2, komponen waktu *standby* dan *delay* (S) pada alat gali muat sebesar 174,85 jam sebagian besar disumbang oleh pergantian shift (23,8%), diikuti oleh waktu menunggu kedatangan truk (menunggu *truck* sampai) sebesar 18,4%, serta kegiatan administratif dan keselamatan kerja seperti *safety talk* mingguan dan persiapan area kerja. Pada alat angkut, komponen S sebesar 1.330,73 jam didominasi oleh waktu ibadah (sholat) sebesar 19,9%, pergantian *shift* sebesar 16,8%, dan *safety talk* mingguan sebesar 12,4%, sementara kategori menunggu di area *excavator* dan tidak tersedianya alat muat secara gabungan menyumbang sekitar 14,2% dari total waktu *standby* truk.

Temuan ini menunjukkan bahwa sebagian besar komponen S bersifat administratif dan rutin (pergantian *shift*, ibadah, briefing keselamatan) yang secara umum tidak dapat dihindari dalam operasional harian tambang. Namun, kategori menunggu *truck* sampai pada alat gali muat serta menunggu di area *excavator* dan tidak ada alat muat pada alat angkut mengindikasikan adanya ketidakserasian kapasitas antara jumlah dan siklus kerja kedua jenis alat. Dengan demikian, nilai UA sebesar 87,4% pada alat gali muat dan 89,8% pada alat angkut tidak semata-mata disebabkan oleh hambatan administratif, tetapi juga mencerminkan indikasi awal ketidakseimbangan *fleet* yang menjadi dasar evaluasi lebih lanjut dalam penelitian ini.

Sementara itu, komponen waktu perbaikan (R) pada kedua jenis alat didominasi oleh kegiatan pemeliharaan terjadwal (PM *Service*), yaitu sebesar 63,8% pada alat gali muat dan 36,0% pada alat angkut, dengan tambahan kontribusi dari *tyre rotation* terjadwal sebesar 18,2% pada alat angkut. Hal ini menunjukkan

bahwa waktu perbaikan yang tercatat sebagian besar merupakan aktivitas pemeliharaan yang telah direncanakan, bukan kerusakan mendadak (breakdown) yang tidak terduga. Kondisi ini memperkuat interpretasi nilai *Mechanical Availability* (MA) sebesar 92,1% pada alat gali muat dan 96,8% pada alat angkut sebagai representasi dari manajemen pemeliharaan alat yang relatif baik, sesuai dengan klasifikasi Arief Adilah dkk., (2019) yang menempatkan nilai tersebut pada kategori sangat tinggi.

Perhitungan ketersediaan dan efisiensi kerja alat dilakukan dengan menggunakan empat indikator, yaitu *Physical Availability* (PA), *Mechanical Availability* (MA), *Use of Availability* (UA), dan *Effective Utilization* (EU). Keempat indikator tersebut diturunkan dari tiga komponen waktu operasional yang telah direkap pada Tabel 4.1, yakni waktu kerja produktif (W), waktu siap tidak beroperasi (S), dan waktu perbaikan (R). Perhitungan dilakukan per unit alat dari data rata-rata nilai tiap komponen per hari selama satu bulan untuk memperoleh nilai representatif masing-masing alat. Perhitungan dilakukan dengan contoh perhitungan sebagai berikut :

$$PA = \frac{W + S}{W + S + R}$$

$$PA = \frac{1209,32 + 174,85}{1209,32 + 174,85 + 103,84} \times 100\%$$

$$PA = 93,0\%$$

$$MA = \frac{W}{W + R}$$

$$MA = \frac{1209,32}{1209,32 + 103,84} \times 100\%$$

$$MA = 92,1\%$$

$$UA = \frac{W}{W + S}$$

$$UA = \frac{1209,32}{1209,32 + 174,85} \times 100\%$$

$$UA = 87,4\%$$

$$EU = \frac{W}{W + S + R}$$

$$EU = \frac{1209,32}{1209,32+174,85+103,84} \times 100\%$$

$$EU = 81,3\%$$

Perhitungan dengan persamaan yang sama dilakukan pada alat angkut terdapat pada lampiran. Perhitungan lengkap terdapat pada lampiran 1 dan hasil perhitungan dapat terlihat pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Perhitungan PA, MA, UA, dan EU Alat

	PA	MA	UA	EU
Alat Gali Muat	93,0%	92,1%	87,4%	81,3%
Alat Angkut	97,2%	96,8%	89,8%	87,2%

Pada tabel 4.3 yang berisi hasil perhitungan PA, MA, UA, dan EU, Excavator menunjukkan nilai *Physical Availability* (PA) sebesar 93,0%, yang berarti secara fisik alat tersedia dan tidak dalam kondisi perbaikan selama 93,0% dari total waktu terjadwal. Nilai *Mechanical Availability* (MA) sebesar 92,1% mengindikasikan bahwa dari waktu alat beroperasi dan dalam perbaikan, proporsi waktu kerja produktif cukup tinggi. Namun demikian, nilai *Use of Availability* (UA) sebesar 87,4% menunjukkan bahwa tidak seluruh waktu ketersediaan fisik dimanfaatkan secara optimal, yang mengindikasikan adanya waktu tunggu atau hambatan operasional. Secara keseluruhan, *Effective Utilization* (EU) excavator tercatat sebesar 81,3%, artinya hanya 81,3% dari total waktu terjadwal yang digunakan untuk kegiatan produksi aktual.

Dump Truck memiliki nilai PA sebesar 97,2%, MA sebesar 96,8%, dan UA sebesar 89,8%, yang secara umum lebih baik dibandingkan excavator dari sisi ketersediaan mekanis. Nilai EU dump truck sebesar 87,2% juga lebih tinggi dibandingkan excavator, menunjukkan tingkat pemanfaatan waktu produktif yang lebih baik. Berdasarkan klasifikasi yang digunakan oleh (Arief Adilah dkk., 2019), nilai *availability* dan *utilization* pada rentang 83–92% termasuk dalam kategori baik, sedangkan nilai di atas 92% menunjukkan tingkat ketersediaan alat yang sangat tinggi. Dengan demikian, hasil perhitungan pada penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja alat gali muat maupun alat angkut berada pada kondisi yang baik,

sehingga kedua alat memiliki tingkat kesiapan dan pemanfaatan yang memadai untuk mendukung kegiatan produksi.

4.1.2 Perhitungan Produktivitas Aktual

Perhitungan produktivitas aktual dilakukan untuk mengetahui kemampuan produksi excavator berdasarkan kondisi operasi aktual di lapangan. Produktivitas dihitung dengan mempertimbangkan kapasitas bucket, *fill factor*, *swell factor*, *cycle time*, dan efisiensi kerja alat. Pada perhitungan produktivitas aktual lapangan menggunakan satuan ton perjam. Hal tersebut disebabkan karena pengangkutan dilakukan secara bersamaan antara tanah penutup dan bijih.

Tabel 4. 4 Perhitungan Produktivitas Aktual Alat

PRODUKTIVITAS	
Alat gali Muat	Alat Angkut
$Q_m = \frac{3600 \times Cb \times FF \times SF \times Density \times E}{CTm}$ $= \frac{3600 \times 12 \times 0,91 \times 0,85 \times 2,22 \times 81,27\%}{38}$ $Q_m = 1.586,51 \text{ ton/jam}$	$Q_m = \frac{3600 \times Ct \times E}{CTa}$ $Q_m = \frac{60 \times 94,72 \times 87,21\%}{30}$ $Q_m = 165,2106 \text{ ton/jam}$

Berdasarkan hasil perhitungan, produktivitas aktual alat gali muat diperoleh sebesar 1.586,51 ton/jam, sedangkan produktivitas aktual alat angkut sebesar 165,2106 ton/jam. Nilai tersebut telah melampaui target produktivitas perusahaan, yaitu 1.395 ton/jam untuk alat gali muat dan 150 ton/jam untuk alat angkut. Hasil ini menunjukkan bahwa dari sisi kapasitas produksi, kombinasi alat yang digunakan telah mampu memenuhi bahkan melebihi target yang ditetapkan. Berdasarkan capaian produktivitas aktual alat, diketahui bahwa alat gali muat dapat melebihi target produksi harian hingga 15 ton per jam, sedangkan pada alat angkut capaian produktivitas dapat lebih besar hingga 192 ton per jam.

Berdasarkan data sekunder jarak angkut, diperoleh rata-rata jarak tempuh kosong sebesar 4.059,8 meter dan bermuatan sebesar 4.048,4 meter, sehingga total jarak tempuh per siklus (*round trip*) mencapai rata-rata 8.124 meter. Kondisi jalan angkut pada lokasi penelitian merupakan jalan tanpa perkerasan (*unpaved*) dengan lebar yang memadai serta dilengkapi tanggul pengaman pada tikungan, namun berpotensi menurunkan kecepatan alat angkut saat kondisi permukaan basah atau

licin. Berdasarkan data cuaca operasional selama periode penelitian pada lampiran 1, tercatat total gangguan cuaca sebesar 128 jam yang tersebar pada 21 dari 31 hari kerja, dengan kontribusi terbesar berasal dari kabut pada malam hari 94,24 jam, diikuti hujan 17,65 jam dan kondisi jalan licin 15,94 jam. Kondisi kabut dan jalan licin tersebut berpotensi menurunkan kecepatan tempuh alat angkut sehingga memperbesar *travel time* pada CTa. Meskipun demikian, gangguan cuaca yang tercatat relatif singkat dibandingkan total jam kerja dalam sebulan, sehingga pengaruhnya terhadap produktivitas aktual (PRODUKTIVITAS) tetap terkendali. Jarak angkut dan kondisi jalan ini berkontribusi pada komponen *travel time* dalam *cycle time* alat angkut (CTa), yang berbanding terbalik dengan nilai produktivitas (Produktivitas) sesuai persamaan (2.2), dimana semakin jauh jarak tempuh, semakin besar CTa dan semakin sedikit siklus kerja yang dapat diselesaikan per jam.

Tingginya produktivitas alat gali muat dipengaruhi oleh nilai fill factor sebesar 0,91 dan efisiensi kerja sebesar 81%. Sementara itu, produktivitas alat angkut dipengaruhi oleh *cycle time* sebesar 30 menit dan efisiensi kerja sebesar 87%, sehingga kemampuan produksi setiap unit *dump truck* lebih rendah dibandingkan alat gali muat. Oleh karena itu, diperlukan analisis lebih lanjut terhadap jumlah kombinasi alat gali muat dan alat angkut melalui perhitungan *match factor* untuk memperoleh sistem kerja yang seimbang dan meminimalkan waktu tunggu alat. Hasil ini sejalan dengan penelitian Nuryanneti dkk. (2025) yang memperoleh produktivitas aktual *Shovel* Komatsu PC3000 sebesar 1.043 BCM/jam atau 625.800 BCM/bulan. Penelitian tersebut menyatakan bahwa produktivitas alat dipengaruhi oleh kondisi operasional, efisiensi kerja, serta waktu tunggu antar alat.

4.1.3 Perhitungan *Match factor* Aktual

Perhitungan *match factor* dilakukan untuk mengetahui tingkat keserasian kerja antara alat gali muat dan alat angkut pada kondisi aktual. Nilai *match factor* digunakan untuk mengevaluasi keseimbangan kapasitas produksi kedua alat sehingga dapat diketahui adanya potensi waktu tunggu pada salah satu alat. *Match factor* dihitung menggunakan persamaan (2.3).

$$Qm = \frac{pax \ Ctm}{pm \times CTA}$$

$$Qm = \frac{9 \times 152}{1 \times 1800}$$

$$Qm = 0,76$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai *match factor* sebesar 0,76 pada kombinasi 1 unit alat gali muat dan 9 unit alat angkut. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem kerja alat gali muat dan alat angkut pada kondisi aktual belum sepenuhnya seimbang karena nilai *match factor* masih berada di bawah satu. Kondisi ini sejalan dengan hasil perhitungan produktivitas yang menunjukkan bahwa produktivitas alat gali muat sebesar 1587 ton/jam jauh lebih besar dibandingkan produktivitas satu unit alat angkut sebesar 165,22 ton/jam, sehingga diperlukan beberapa unit dump truck untuk mengimbangi kemampuan produksi alat gali muat dan mengurangi potensi waktu tunggu selama operasi penambangan. Hasil ini berbeda dengan penelitian Nuryanneti dkk., (2025) yang memperoleh nilai *match factor* sebesar 1,11, yang menunjukkan bahwa alat angkut mengalami waktu tunggu akibat kapasitas alat gali muat yang menjadi pembatas sistem. Penelitian Anggara dkk., (2024b) juga menjelaskan bahwa kondisi ideal dicapai ketika nilai *match factor* sama dengan satu, sedangkan nilai yang lebih kecil dari satu menunjukkan adanya waktu tunggu pada alat muat dan nilai yang lebih besar dari satu menunjukkan adanya waktu tunggu pada alat angkut. Oleh karena itu, nilai *match factor* aktual pada penelitian ini menjadi dasar dalam penyusunan skenario optimasi jumlah alat.

4.2 Penentuan Skenario Alternatif Kombinasi Alat Gali Muat dan Angkut

4.2.1 Penentuan Kriteria dan Bobot

Tahap awal metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dilakukan dengan menyusun matriks perbandingan berpasangan antar kriteria yang terdiri atas produktivitas, *match factor*, dan *idle time*. Penentuan kriteria dalam metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) harus didasarkan pada tujuan pengambilan keputusan serta faktor-faktor yang memiliki pengaruh langsung terhadap permasalahan yang dikaji. Menurut (Hadiwijaya & Sundari, 2020), kriteria pada

AHP disusun berdasarkan tujuan keputusan dan harus mampu merepresentasikan aspek-aspek yang memengaruhi pencapaian tujuan tersebut sebelum dilakukan pembobotan melalui perbandingan berpasangan. Penilaian dilakukan berdasarkan tingkat kepentingan relatif masing-masing kriteria terhadap tujuan penelitian, yaitu menentukan kombinasi alat gali muat dan alat angkut yang paling optimal.

Tabel 4. 5 Skala Kepentingan perbandingan kriteria

Tingkat Kepentingan	Nilai
Sama penting	1
Sedikit lebih penting	3
Lebih penting	5
Sangat penting	7
Mutlak lebih penting	9

(Sumber : Wind & Saaty, 1980)

Pada tabel 4.5, terdapat nilai-nilai yang dapat digunakan untuk mempertimbangkan bagaimana nilai kepentingan dari setiap kriteria apabila dibandingkan. Setiap kriteria akan dibandingkan dengan kriteria lainya untuk melihat kriteria mana yang mempunyai nilai lebih tinggi (Wind & Saaty, 1980). Penentuan nilai pada kriteria menggunakan studi literatur berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya agar dapat dipertimbangkan secara ilmiah.

Bobot kriteria dalam AHP ditentukan berdasarkan seberapa dekat kriteria tersebut dengan tujuan akhir penelitian Kusri (2007). Produktivitas diberi bobot tertinggi karena merupakan ukuran hasil akhir yang paling langsung mencerminkan tercapainya target produksi, sedangkan *match factor* (MF) dan *idle time* hanya menjelaskan penyebab tercapai atau tidaknya produktivitas tersebut. Hal ini didukung oleh temuan Adam dkk., (2026), yang menunjukkan bahwa nilai MF sebesar 1,07 (tergolong baik) tidak menjamin produktivitas tercapai, karena produktivitas aktual tetap rendah akibat kondisi jalan hauling yang licin, front yang sempit, dan fragmentasi batuan yang tidak merata. Artinya, MF yang ideal belum tentu menghasilkan produktivitas optimal, sehingga MF lebih tepat menjadi indikator pendukung, bukan indikator utama. Sementara itu, *idle time* diberi bobot terendah karena pengaruhnya terhadap produktivitas relatif kecil. Prayoga dkk., (2025) menemukan bahwa *idle time* hanya berpengaruh sebesar 2,56% terhadap produktivitas dan secara statistik tidak signifikan. Temuan ini diperkuat oleh (Yansen dkk., 2018), yang menunjukkan bahwa kehilangan produksi akibat idle

time (15.597,53 BCM) jauh lebih kecil dibandingkan kehilangan akibat *standby* alat mekanis (49.611,01 BCM). Berdasarkan hal tersebut, urutan bobot Produktivitas > MF > idle time dalam penelitian ini didasarkan pada kedekatan masing-masing kriteria terhadap tujuan akhir: Produktivitas sebagai ukuran hasil, MF sebagai indikator pendukung, dan idle time sebagai faktor dengan pengaruh paling kecil.

Tabel 4. 6 Penilaian Perbandingan Kriteria

Kriteria	Produktivitas	<i>Match factor</i>	<i>Idle time</i>
Produktivitas	1/1	3/1	5/1
<i>Match factor</i>	1/3	1/1	3/1
<i>Idle time</i>	1/5	1/3	1/1

Penilaian perbandingan kriteria pada Tabel 4.6 dilakukan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dengan skala kepentingan Saaty untuk menentukan tingkat prioritas masing-masing kriteria dalam pemilihan kombinasi alat gali muat dan alat angkut yang optimal. Pada lampiran 2, memperlihatkan nilai pada setiap sel yang menunjukkan tingkat kepentingan suatu kriteria dibandingkan kriteria lainnya. Nilai 1 menunjukkan kedua kriteria memiliki tingkat kepentingan yang sama, sedangkan nilai 3 menunjukkan suatu kriteria sedikit lebih penting dibandingkan kriteria lainnya, dan nilai 5 menunjukkan suatu kriteria lebih penting. Sebaliknya, nilai 1/3 dan 1/5 merupakan nilai resiprokal yang menunjukkan bahwa kriteria pada baris memiliki tingkat kepentingan yang lebih rendah dibandingkan kriteria pada kolom.

Berdasarkan hasil perbandingan, kriteria produktivitas dinilai sedikit lebih penting dibandingkan *match factor*, yang ditunjukkan oleh nilai 3, karena pencapaian target produksi merupakan tujuan utama dalam kegiatan penambangan. Selain itu, produktivitas juga dinilai lebih penting dibandingkan *idle time* dengan nilai 5, yang menunjukkan bahwa kemampuan sistem menghasilkan produksi menjadi prioritas utama dibandingkan besarnya waktu menganggur alat. Sementara itu, *match factor* memperoleh nilai 3 terhadap *idle time*, yang menunjukkan bahwa keserasian kerja antara alat gali muat dan alat angkut lebih diprioritaskan karena secara langsung memengaruhi kontinuitas siklus kerja dan efisiensi operasi.

Berdasarkan hasil penilaian tersebut dapat diketahui bahwa urutan tingkat kepentingan kriteria dalam penelitian ini adalah produktivitas, *match factor*, dan *idle time*. Penetapan urutan tersebut didasarkan pada tujuan penelitian, yaitu memperoleh kombinasi alat yang tidak hanya mampu memenuhi target produksi, tetapi juga memiliki tingkat keserasian kerja yang baik serta meminimalkan waktu menganggur alat. Hasil perbandingan berpasangan ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses perhitungan bobot prioritas pada metode AHP sehingga setiap kriteria memberikan kontribusi yang proporsional terhadap hasil akhir pengambilan keputusan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Fahreza dkk (2025) yang memperoleh bobot terbesar pada kriteria kualitas produk sebesar 0,30 dibandingkan kriteria lainnya. Kesamaan tersebut menunjukkan bahwa dalam metode pengambilan keputusan multikriteria, kriteria yang dianggap paling berpengaruh terhadap tujuan penelitian akan memperoleh bobot terbesar sehingga memberikan pengaruh dominan terhadap hasil akhir keputusan. Pada tabel 4.6, terdapat nilai pada setiap kolom kriteria, nilai tersebut perlu dilakukan normalisasi sebagai nilai bobot yang akan digunakan. Normalisasi dilakukan dengan persamaan 2.7 sebagai berikut :

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

$$a'_{ij} = \frac{1}{1,533}$$

$$a'_{ij} = 0.65$$

Pada persamaan tersebut diketahui bahwa bobot pada kolom pertama yakni kolom produktivitas yang dibandingkan dengan produktivitas mempunyai bobot sebesar 0,65. Perhitungan lebih lengkap penentuan normalisasi dan bobot terdapat pada lampiran 2. Persamaan yang sama digunakan pada setiap nilai pada semua kolom. Hasil pembobotan dapat terlihat pada tabel 4.6.

Tabel 4. 7 Normalisasi Matriks dari dan Penentuan Bobot

Kriteria	Normalisasi Matriks			BOBOT
Produktivitas	0.65	0.69230769	0.555556	0.63335
<i>Match factor</i>	0.2173913	0.23076923	0.333333	0.26050
<i>Idle time</i>	0.13043478	0.07692308	0.111111	0.10616

Pada tabel 4.7, terlihat hasil normalisasi matriks menghasilkan bobot prioritas masing-masing kriteria, yaitu produktivitas sebesar 0,63335, *match factor* sebesar 0,26050, dan *idle time* sebesar 0,10616. Nilai bobot tersebut menunjukkan bahwa produktivitas memiliki tingkat kepentingan tertinggi dengan kontribusi sebesar 63,34% terhadap proses pengambilan keputusan. Hal ini mengindikasikan bahwa kemampuan kombinasi alat dalam menghasilkan produksi menjadi pertimbangan utama dibandingkan kriteria lainnya.

Kriteria *match factor* memiliki bobot sebesar 0,26050 atau sekitar 26,05%, sehingga menempati urutan kedua dalam tingkat kepentingan. Nilai tersebut menunjukkan bahwa keserasian antara alat gali-muat dan alat angkut juga menjadi faktor yang perlu diperhatikan karena berpengaruh terhadap kelancaran operasi pemuatan dan pengangkutan material. Semakin baik nilai *match factor* yang diperoleh, maka tingkat sinkronisasi antara kedua jenis alat akan semakin tinggi sehingga waktu tunggu alat dapat diminimalkan dan produktivitas operasi dapat ditingkatkan.

Sementara itu, kriteria *idle time* memiliki bobot sebesar 0,10616 atau sekitar 10,61%, yang menunjukkan bahwa waktu menganggur alat memiliki tingkat kepentingan paling rendah dibandingkan dua kriteria lainnya. Meskipun demikian, *idle time* tetap menjadi parameter yang perlu dipertimbangkan karena waktu menganggur yang tinggi dapat menyebabkan penurunan efisiensi operasi serta berpotensi menurunkan produktivitas alat secara keseluruhan. Dengan demikian, kombinasi alat yang dipilih tidak hanya diharapkan mampu menghasilkan produktivitas yang tinggi, tetapi juga memiliki tingkat keserasian kerja yang baik serta waktu menganggur yang relatif rendah.

Setelah diperoleh bobot prioritas masing-masing kriteria, dilakukan uji konsistensi untuk mengevaluasi tingkat konsistensi penilaian pada matriks perbandingan berpasangan. Uji konsistensi dilakukan melalui perhitungan nilai λ_{max} , *Consistency Index* (CI), dan *Consistency Ratio* (CR). Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa bobot yang dihasilkan telah memenuhi tingkat

konsistensi yang dapat diterima sehingga dapat digunakan pada tahap analisis selanjutnya. Pengujian dilakukan dengan persamaan pada tabel 4.8 sebagai berikut:

Tabel 4. 8 Uji Konsistensi dari Bobot	
λ_{max}	3.038714681
CI	$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$
	$CI = \frac{3.038714681 - 3}{3 - 1}$
	$CI = 0,01935$
CR	$CR = \frac{CI}{RI}$
	$CR = \frac{0,01935}{0,58}$
	$CR = 0.033374725$

Hasil uji konsistensi menunjukkan bahwa nilai eigen maksimum (λ_{max}) yang diperoleh sebesar 3,03871 dengan nilai *Consistency Index* (CI) sebesar 0,01936. Selanjutnya, diperoleh nilai *Consistency Ratio* (CR) sebesar 0,03337 atau 3,34% dengan menggunakan nilai RI sebesar 0,58 mengacu pada studi (Salomon & Gomes, 2024) yang menyimulasikan 500 matriks perbandingan acak untuk berbagai ordo matriks (n). Nilai tersebut lebih kecil dari batas toleransi yang ditetapkan oleh Saaty, yaitu sebesar 0,10, sehingga matriks perbandingan berpasangan yang digunakan dapat dinyatakan konsisten. Dengan demikian, bobot kriteria yang diperoleh dinilai konsisten dan layak digunakan sebagai dasar dalam proses pengambilan keputusan menggunakan metode AHP. Interpretasi ini sejalan dengan penelitian Solahudin dkk.(2025) dengan menggunakan ketentuan Saaty, menyatakan bahwa matriks perbandingan dianggap konsisten apabila nilai $CR \leq 0,10$, sehingga hasil pembobotan dapat digunakan pada tahap analisis berikutnya.

4.2.2 Penentuan Skenario Alternatif dan Perhitungan SAW

Penentuan skenario optimasi dilakukan berdasarkan perhitungan *Match factor* (MF) untuk memperoleh kombinasi alat gali-muat dan alat angkut yang lebih seimbang. Kondisi aktual menunjukkan penggunaan 1 unit excavator dan 9 unit dump truck dengan nilai *Match factor* sebesar 0,76. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem kerja aktual belum seimbang sehingga masih terdapat potensi waktu tunggu pada salah satu alat. Berdasarkan hasil perhitungan *Match factor*, dibentuk

beberapa alternatif kombinasi jumlah excavator dan dump truck yang kemudian dijadikan sebagai skenario optimasi.

Tabel 4. 9 Penentuan Skenario Alternatif Kombinasi Alat

Skenario	Alat gali muat	Alat Angkut	Produktivitas Exca	Produktivitas DT	MF
A1	1	6	1,586.54	826.09	0.42
A2	1	7	1,586.54	991.30	0.51
A3	1	8	1,586.54	1,156.52	0.59
A4	1	9	1,586.54	1,321.74	0.68
A5	1	10	1,586.54	1,486.95	0.76
A6	1	11	1,586.54	1,652.17	0.84
A7	1	12	1,586.54	1,817.39	0.93
A8	1	13	1,586.54	1,982.60	1.01
A9	1	14	1,586.54	2,147.82	1.10
A10	1	15	1,586.54	2,313.04	1.18
A11	1	16	1,586.54	2,478.26	1.27
A12	1	17	1,586.54	2,643.47	1.35
A13	1	18	1,586.54	2,808.69	1.44
A14	1	19	1,586.54	2,973.91	1.52
A15	1	20	1,586.54	3,139.12	1.60
A16	1	21	1,586.54	3,304.34	1.69
A17	1	22	1,586.54	3,469.56	1.77
A18	1	23	1,586.54	3,634.78	1.86
A19	1	24	1,586.54	3,799.99	1.94

Pada tabel 4.9 terdapat skenario yang telah ditentukan dari perhitungan *match factor*. Pada tabel juga terlihat bahwa terdapat perkiraan produktivitas dan *match factor* yang bisa dicapai pada setiap skenario. Nilai-nilai tersebut akan dilakukan normalisasi menggunakan persamaan 2.5 untuk kriteria dengan tipe benefit, sedangkan kriteria dengan tipe cost menggunakan persamaan 2.6, yaitu sebagai berikut :

$$rij = \frac{xij}{\max i xij}$$

$$rij = \frac{991.30}{1586,54}$$

$$rij = 0,6248$$

$$r_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}}$$

$$r_{ij} = \frac{2,24}{45,42}$$

$$r_{ij} = 0,0556$$

Persamaan diatas dilakukan pada semua skenario dengan kriteria-kriteria yang telah digunakan yang terdapat pada lampiran 3. Setelah mengetahui nilai normalisasi, selanjutnya adalah melakukan penjumlahan pada setiap nilai yang telah diketahui melalui tabel 4.9 dan dilakukan penyusunan peringkat. Penjumlahan bobot dilakukan dengan menjumlahkan semua hasil normalisasi dengan masing-masing bobot, yaitu sebagai berikut:

$$Skor = (bobot \times Nilai \text{ Normalisasi}) + (bobot \times Nilai \text{ Normalisasi}) + (bobot \times Nilai \text{ Normalisasi})$$

$$Skor = (0,63335 \times 0,6248) + (0,26050 \times 0,5195) + (0,10616 \times 0,000)$$

$$Skor = 0,5172$$

Berdasarkan perhitungan tersebut dapat mengetahui skor *final* masing-masing alternatif menggunakan metode *Simple Additive Weighting*. Skor tersebut yang menjadi nilai penentu dalam pemilihan skenario alternatif terbaik. Tabel lengkap hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Nilai bobot kriteria pada setiap skenario

Skenario	Produktivitas	MF	Idle time	Skor	Rank
A1	0.6248	0.5195	0.0000	0.5172	19
A2	0.7290	0.6017	0.0556	0.6095	18
A3	0.8331	0.6840	0.1111	0.7017	17
A4	0.9372	0.7662	0.1667	0.7940	12
A5	1.0000	0.8485	0.2222	0.8608	6
A6	1.0000	0.9307	0.2778	0.8889	3
A7	1.0000	0.9870	0.3333	0.9105	1
A8	1.0000	0.9048	0.3889	0.8967	2
A9	1.0000	0.8225	0.4444	0.8829	4
A10	1.0000	0.7403	0.5000	0.8692	5
A11	1.0000	0.6580	0.5556	0.8554	7
A12	1.0000	0.5758	0.6111	0.8416	8
A13	1.0000	0.4935	0.6667	0.8279	9
A14	1.0000	0.4113	0.7222	0.8141	10
A15	1.0000	0.3290	0.7778	0.8004	11

Skenario	Produktivitas	MF	Idle time	Skor	Rank
A16	1.0000	0.2468	0.8333	0.7866	13
A17	1.0000	0.1645	0.8889	0.7728	14
A18	1.0000	0.0823	0.9444	0.7591	15
A19	1.0000	0.0000	1.0000	0.7453	16

Pada tahap selanjutnya dilakukan pemilihan 5 skenario terbaik berdasarkan nilai bobotnya, yang dapat dilihat pada tabel 4.10 dengan perhitungan lengkap setiap skenario alternatif terdapat pada lampiran 3.

Tabel 4. 11 Ranking Alternatif Berdasarkan SAW

Skor	Rangking	Skenario Optimasi	Jumlah Exca	Jumlah DT
0.9105	1	A7	1	12
0.8967	2	A8	1	13
0.8889	3	A6	1	11
0.8829	4	A9	1	14
0.8692	5	A10	1	15

Selanjutnya, seluruh skenario dievaluasi menggunakan metode *Simple Additive Weighting* (SAW) dengan mempertimbangkan kriteria produktivitas, *match factor*, dan *idle time*. Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 4.10 menggunakan metode *Simple Additive Weighting* (SAW), diperoleh lima alternatif dengan nilai preferensi tertinggi, yaitu skenario A7, A8, A6, A9, dan A10. Skenario A7 yang menggunakan kombinasi 1 unit alat gali muat dan 12 unit alat angkut memperoleh nilai preferensi tertinggi sebesar 0,9105, sehingga ditetapkan sebagai alternatif terbaik. Selanjutnya, skenario A8 (1:13) memperoleh nilai 0,8967, diikuti skenario A6 (1:11) sebesar 0,8889, skenario A9 (1:14) sebesar 0,8829, dan skenario A10 (1:15) sebesar 0,8692. Perbedaan nilai preferensi tersebut menunjukkan bahwa setiap kombinasi alat memiliki tingkat kinerja yang berbeda berdasarkan hasil pembobotan kriteria produktivitas, *match factor*, dan *idle time*. Bobot pada kriteria dan bobot pada hasil normalisasi *Simple Additive Weighting* berpengaruh besar pada hasil akhir perankingan, apabila terjadi perubahan pada masing-masing kriteria maka mempengaruhi nilai akhir *Simple Additive Weighting* (Afshari dkk., 2010).

Hasil perankingan menunjukkan bahwa penambahan jumlah dump truck hingga 12 unit mampu memberikan keseimbangan terbaik antara produktivitas,

keserasian kerja alat, dan waktu menganggur dibandingkan alternatif lainnya. Setelah jumlah dump truck melebihi 12 unit, nilai preferensi cenderung mengalami penurunan meskipun produktivitas angkut meningkat. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penambahan alat angkut secara terus-menerus tidak selalu menghasilkan kinerja sistem yang lebih baik karena mulai terjadi penurunan efisiensi akibat berkurangnya keserasian kerja antar alat. Oleh karena itu, skenario A7 dipilih sebagai alternatif yang paling optimal untuk dianalisis lebih lanjut melalui simulasi Monte Carlo guna mengevaluasi tingkat keandalan hasil keputusan yang diperoleh dari metode SAW.

4.3 Perhitungan Probabilitas Produktivitas Alternatif SAW Menggunakan Monte Carlo

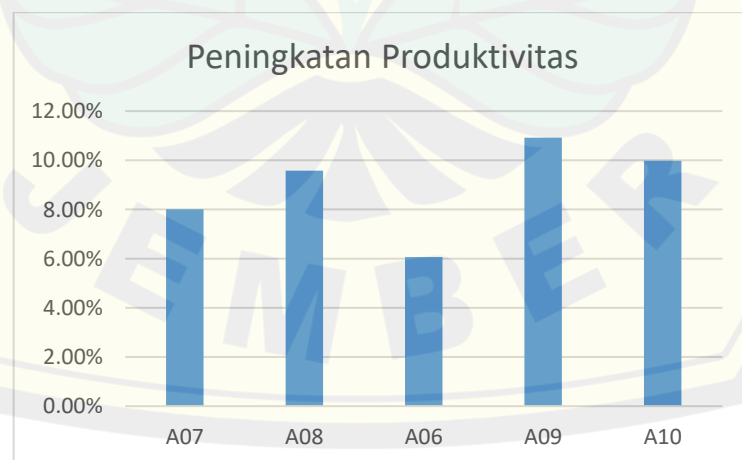
Simulasi Monte Carlo dilakukan sebagai tahap validasi terhadap hasil pemeringkatan alternatif menggunakan metode *Simple Additive Weighting* (SAW). Simulasi ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat keandalan setiap alternatif dengan mempertimbangkan ketidakpastian yang terjadi pada parameter *cycle time* selama operasi penambangan. Pengacakan dilakukan menggunakan distribusi normal pada pengacakan *cycle time* alat gali muat dan lognormal pada pengacakan *cycle time* alat angkut dengan menggunakan parameter minimum, median, dan maksimum pada setiap komponen *cycle time* sebanyak 1000 iterasi, sehingga diperoleh distribusi nilai produktivitas dan *match factor* yang lebih merepresentasikan kondisi lapangan. Pengacakan sebanyak 1000 iterasi dilakukan untuk mendapatkan 1000 nilai *cycle time* yang dimana merupakan jumlah yang cukup untuk menggambarkan persebaran data *cycle time* alat. Menurut penelitian (Yu dkk., 2023) Jumlah iterasi dilakukan diatas 1000 iterasi dengan tujuan menampilkan data yang konvergen dan stabil sesuai kebutuhan data, sementara penambahan iterasi hanya berpengaruh terhadap waktu komputasi. Penggunaan distribusi Normal pada *cycle time* excavator karena variasi operasinya relatif kecil dan cenderung berfluktuasi di sekitar nilai rata-rata. Sementara itu, *cycle time* dump truck dimodelkan dengan distribusi Lognormal karena dipengaruhi lebih banyak faktor operasional, seperti kondisi jalan, antrian, dan kecepatan angkut, sehingga

datanya hanya bernilai positif dan cenderung memiliki distribusi yang menceng ke kanan (*right-skewed*). Ketentuan tersebut mengacu pada penelitian Jung dkk., (2021) dimana persebaran data mempengaruhi penggunaan distribusi probabilitas pada monte carlo. Oleh karena itu, kedua distribusi tersebut dipilih agar karakteristik masing-masing alat dapat direpresentasikan secara lebih realistis dalam simulasi Monte Carlo. Perhitungan lengkap terdapat pada lampiran 4.

Tabel 4. 12 Perhitungan *Percentile* dari 5 skenario terbaik SAW

Kriteria	Metrik	Sk.1 (Rank1)	Sk.2 (Rank2)	Sk.3 (Rank3)	Sk.4 (Rank4)	Sk.5 (Rank5)
Produktivitas (Ton/Jam)	P10	1.246,13	1.248,36	1.247,40	1.264,89	1.240,23
	P50	1.592,70	1.615,77	1.612,68	1.621,42	1.601,54
	P90	1.982,81	2.088,50	1.817,39	2.089,87	2.067,40
Match Factor	P10	0,7351	0,8020	0,6922	0,8631	0,9348
	Mean	0,9803	1,0597	0,8972	1,1308	1,2283
	P90	1,2407	1,3417	1,1361	1,4260	1,5582

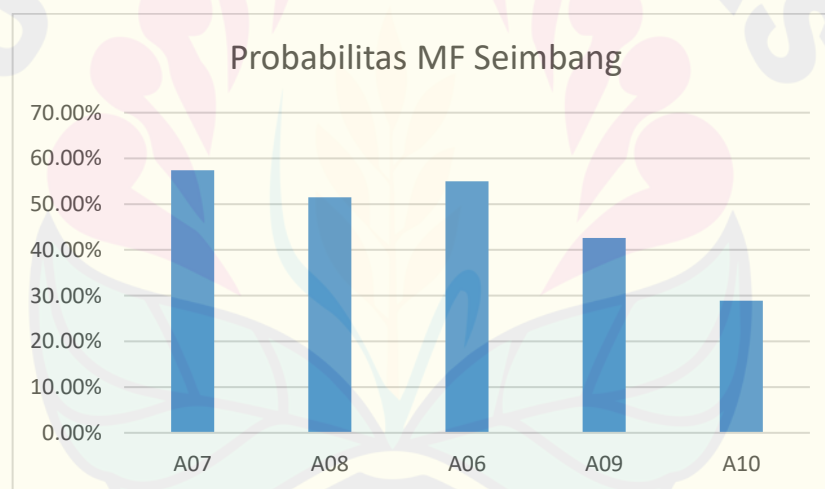
Hasil simulasi Monte Carlo juga diringkas dengan persentil P10, P50, dan P90 tabel 4.12. P50 menunjukkan nilai yang paling mungkin terjadi, sedangkan P10 dan P90 menggambarkan batas bawah dan batas atas yang realistis secara statistik. Pada Produktivitas, seluruh skenario memiliki P50 di atas kondisi aktual (1.486,95 ton/jam), dengan Skenario rank 4 menghasilkan median tertinggi. Pada MF, Skenario 1 memiliki mean (0,9803) paling mendekati kondisi ideal (MF=1) dengan rentang P10–P90 sebesar 0,7351–1,2407, didukung probabilitas keseimbangan MF tertinggi (57,40%), jauh di atas kondisi aktual yang seluruhnya berada pada kategori excavator idle (MF=0,64).



Gambar 4. 1 Grafik Peningkatan Produktivitas Fleet

Berdasarkan Gambar 4.1, seluruh alternatif menunjukkan rata-rata peningkatan produktivitas dibandingkan kondisi aktual. Persentase peningkatan produktivitas berkisar antara sekitar 6,07% hingga 11,8%, yang menunjukkan bahwa seluruh alternatif hasil optimasi mampu meningkatkan kinerja produksi dibandingkan kondisi eksisting. Skenario A9 (1:14) memberikan peningkatan produktivitas tertinggi dengan nilai mendekati 11,8%, sedangkan skenario A6 (1:11) menghasilkan peningkatan terendah sekitar 6,7%.

Meskipun demikian, peningkatan produktivitas yang lebih besar tidak secara langsung menunjukkan bahwa suatu alternatif merupakan pilihan terbaik. Produktivitas hanya menggambarkan kemampuan sistem dalam menghasilkan produksi, sedangkan tingkat keserasian kerja alat juga perlu dipertimbangkan agar peningkatan produksi tidak diikuti oleh bertambahnya waktu tunggu salah satu alat. Oleh karena itu, hasil peningkatan produktivitas perlu dianalisis bersamaan dengan probabilitas tercapainya kondisi *match factor* yang seimbang.



Gambar 4. 2 Grafik Probabilitas *Match factor* Seimbang

Berdasarkan Gambar 4.2, probabilitas tercapainya kondisi *match factor* dalam rentang $0,8 \leq MF \leq 1,1$ menunjukkan variasi pada setiap alternatif hasil simulasi Monte Carlo. Skenario A7 (1:12) memiliki probabilitas tertinggi, yaitu sekitar 58%, diikuti A6 sebesar 55%, A8 (1:13) sebesar 51,5%, A9 (1:14) sebesar 42%, dan A10 sebesar 28%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa setiap alternatif

memiliki peluang yang berbeda untuk mempertahankan keserasian kerja antara alat gali muat dan alat angkut ketika terjadi variasi *cycle time* selama operasi.

Probabilitas yang lebih tinggi mengindikasikan bahwa suatu alternatif memiliki peluang lebih besar untuk beroperasi pada kondisi yang mendekati seimbang, sehingga potensi terjadinya waktu tunggu pada salah satu alat menjadi lebih kecil. Sebaliknya, penurunan probabilitas pada skenario A9 (1:14) dan A10 (1:15) menunjukkan bahwa penambahan jumlah alat angkut cenderung meningkatkan peluang sistem berada di luar rentang keserasian yang diharapkan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penambahan jumlah dump truck secara terus-menerus tidak selalu meningkatkan kualitas sistem operasi, karena dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara kapasitas alat gali muat dan alat angkut.

Hasil simulasi Monte Carlo juga menunjukkan bahwa A7 (1:12) memberikan rata-rata peningkatan produktivitas yang lebih besar dibandingkan A6 (1:11) meskipun lebih kecil dibandingkan dengan A8 (1:13), namun pada probabilitas *match factor* A7 (1:12) memiliki nilai tertinggi. Oleh karena itu, skenario A7 (1:12) tetap direkomendasikan sebagai alternatif terbaik karena mampu memberikan keseimbangan antara peningkatan produktivitas dan peluang tercapainya kondisi operasi yang serasi. Dengan demikian, hasil simulasi Monte Carlo memperkuat hasil pemerinkatan metode SAW bahwa kombinasi 1 unit alat gali muat dan 12 unit alat angkut merupakan alternatif yang paling optimal pada penelitian ini.

