JURNAL REKAYASA SIPIL (JRS-UNAND)
Vol. 21 No. 3, Desember 2025
Diterbitkan oleh:
Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas (Unand)
ISSN (Print) : 1858-2133
ISSN (Online) : 2477-3484
http://jrs.ft.unand.ac.id

MANAJEMEN PERJALANAN PADA LRT SUMATERA SELATAN MENGGUNAKAN METODE INTEGER LINEAR PROGRAM

NANDA AHDA IMRON[1*], SATRIO ADITYA KRISTANTO[2], ARINDA LELIANA[3], HANANTO PRAKOSO[4], ARY PUTRA ISWANTO[5]

[1]*Manajemen Transportasi Perkeretaapian, Politeknik Perkeretaapian Indonesia, Madiun, Jawa Timur*
[2]*Manajemen Transportasi Perkeretaapian, Politeknik Perkeretaapian Indonesia, Madiun, Jawa Timur*
[3]*Manajemen Transportasi Perkeretaapian, Politeknik Perkeretaapian Indonesia, Madiun, Jawa Timur*
[4]*BPSDM Perhubungan, Pusat Pengembangan SDM Perhubungan Darat, Daerah Khusus Jakarta*
[5]*Manajemen Transportasi Perkeretaapian, Politeknik Perkeretaapian Indonesia, Madiun, Jawa Timur*

[*]*Corresponding Author:* nanda@ppi.ac.id

Naskah diterima: 9 Oktober 2024. Disetujui: 19 November 2025. Diterbitkan: 31 Desember 2025

ABSTRAK

Light Rail Transit (LRT) Sumsel merupakan moda transportasi kereta perkotaan yang menghubungkan Stasiun DJKA dengan Stasiun Bandara di Kota Palembang. Meskipun telah beroperasi, jumlah penumpang masih cenderung stagnan dengan tingkat okupansi hanya 23,7% dari kapasitas angkut pada tahun 2023. Kondisi ini menunjukkan adanya *over supply*, yaitu jumlah perjalanan yang tersedia lebih besar dibandingkan dengan jumlah penumpang yang menggunakan layanan. Selain itu, pola permintaan penumpang menunjukkan variasi/fluktuasi sepanjang jam operasi, sehingga diperlukan upaya optimalisasi agar jumlah perjalanan (*supply*) selaras dengan permintaan (*demand*). Penelitian ini menggunakan metode *Integer Linear Programming* (ILP) dengan bantuan perangkat lunak LINDO. Model matematika dibangun untuk menghubungkan fungsi tujuan (*objective function*) dengan batasan (*constraint*) yang relevan, seperti kapasitas angkut dan variasi permintaan penumpang. Melalui proses optimasi, diperoleh jumlah perjalanan optimal harian yang disesuaikan dengan karakteristik permintaan pada hari kerja maupun hari libur. Hasil optimasi menunjukkan bahwa jumlah perjalanan optimal adalah 72 perjalanan per hari pada hari kerja dan 82 perjalanan per hari pada hari libur. Efisiensi yang dicapai mencapai 23,4% per hari pada hari kerja dan 12,7% per hari pada hari libur. Efisiensi tersebut berdampak langsung pada konsumsi energi dan jam kerja. Terjadi penghematan energi listrik sebesar 17.140.817,52 kWh pada hari kerja dan 9.348.029,62 kWh pada hari libur, serta pengurangan jam kerja efektif sebesar 1.034 menit per hari pada hari kerja dan 564 menit per hari pada hari libur. Optimalisasi jumlah perjalanan LRT Sumsel menunjukkan bahwa efisiensi operasi dapat dicapai dengan menyesuaikan supply terhadap demand penumpang yang fluktuatif. Pengurangan jumlah perjalanan tidak hanya meningkatkan efisiensi energi dan jam kerja, tetapi juga dapat memperbaiki efektivitas pola operasi. Hal ini menegaskan bahwa pendekatan optimasi berbasis ILP dapat menjadi solusi strategis dalam pengelolaan layanan transportasi publik dengan permintaan yang tidak merata.

Kata kunci : Optimasi, Penjadwalan, *Integer Linear Programming*, Efisiensi, Frekuensi Perjalanan.

1. PENDAHULUAN

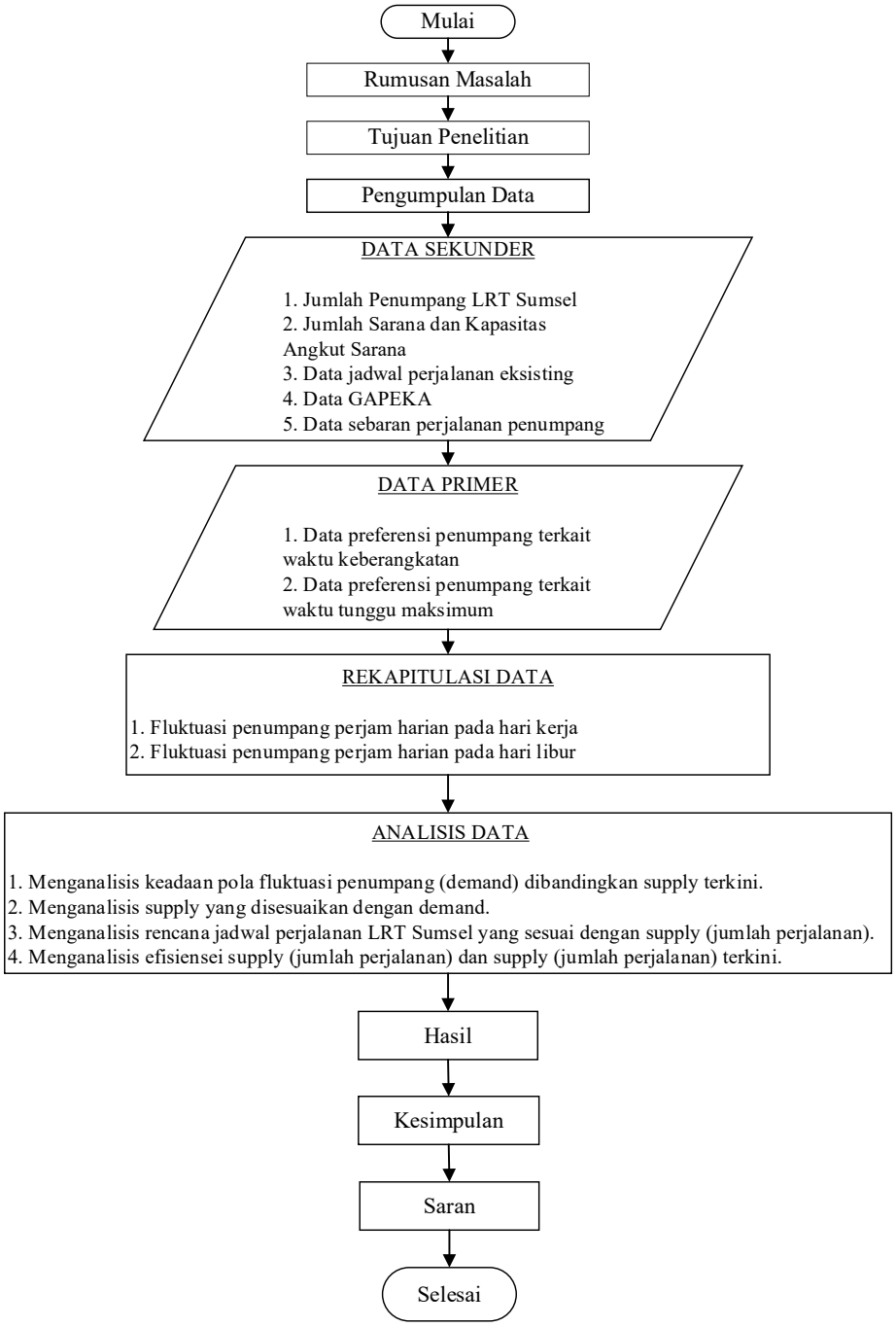
Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki jumlah pulau hingga 17.000, dan mempunyai jumlah penduduk sebanyak 275.361.267 jiwa (BPS, 2021). Dengan jumlah penduduk yang banyak, maka diperlukan sarana untuk mempermudah pergerakan/mobilitas tersebut. Mobilitas mengacu pada pergerakan manusia baik individu atau sekelompok orang dari satu tempat ke tempat lain dengan tujuan tertentu (Riadi, 2020).

Kota Palembang, sebagai ibu kota Provinsi Sumatera Selatan, merupakan wilayah dengan jumlah penduduk dan mobilitas tinggi. Provinsi ini berpenduduk 8.467.432 jiwa, meningkat dari 7.450.394 jiwa pada sensus 2010 dengan laju pertumbuhan 1,25% per tahun (BPS, 2022), di mana sekitar 1,6 juta jiwa berdomisili di Palembang (BPS, 2021). Kota ini menjadi pusat bisnis dan perekonomian utama Sumatera Selatan dengan kontribusi 33,69% terhadap PDRB provinsi (Kusnandar, 2021), serta memiliki potensi besar dalam peningkatan ekonomi (Kementerian PUPR, 2009). Tingginya mobilitas penduduk perlu diimbangi dengan sistem transportasi yang memadai, dan saat ini Palembang telah dilayani oleh berbagai moda transportasi umum seperti Bus Rapid Transit (BRT), angkot, dan Light Rail Transit (LRT) (Widayanti, 2019).

LRT dimaksud diberi nama LRT Sumsel oleh Pemerintah, yang merupakan kereta perkotaan. Pada proses pelayanan berjalan, kondisi *demand* penumpang pada LRT Sumsel masih relatif stagnan. Apabila dihitung, nilai okupansi (faktor muat atau tingkat keterisian penumpang) harian hanya sebesar 23,7 %, sangat jauh dibawah 50%. Nilai okupansi dapat dihitung dengan membagi total jumlah penumpang (*demand*) harian dengan total kapasitas angkut (kapsitas angkut sarana dikalikan frekuensi perjalanan) harian (atau *supply* harian) karena berdasarkan data *Feasibility Study* LRT Sumsel dalam 1 trainset dapat mengakomodasi sebesar 390 Penumpang. Berdasarkan data dari Balai Pengelola Kereta Api Ringan Sumatera Selatan (BPKARSS), terjadi fluktuasi/variasi jumlah penumpang pada LRT Sumsel dari awal jam operasi hingga akhir jam operasi (BPKARSS, 2023). Namun, *supply* yang diberikan selalu sama sepanjang waktu. Hal ini tentunya membuat kondisi pola operasi dari LRT Sumsel menjadi *over supply* karena jumlah layanan (frekuensi perjalanan) yang dberikan tidak sesuai dengan kondisi fluktuasi penumpang sehingga terjadi inefisiensi.

Kondisi over supply pada LRT Sumsel menuntut optimalisasi penjadwalan agar frekuensi perjalanan sesuai dengan kebutuhan penumpang (demand) demi terciptanya sistem transportasi yang efisien. Efisiensi berarti penggunaan waktu dan tenaga secara tepat tanpa pemborosan (Darpono, Niam, & Sungkar, 2020). Masalah utama penelitian ini adalah rendahnya tingkat okupansi LRT Sumsel yang hanya 23,7% pada 2023, sementara jumlah perjalanan masih tinggi, menyebabkan pemborosan energi, jam kerja, dan biaya operasional. Untuk itu, digunakan metode **Integer Linear Programming (ILP)** guna menyesuaikan jumlah perjalanan dengan fluktuasi demand penumpang. Metode ini sebelumnya diterapkan pada optimasi bus kota (Berhan et al., 2014) dan kini diadaptasi untuk moda LRT dengan mempertimbangkan karakteristik operasionalnya. Model matematika dibangun untuk menghubungkan fungsi tujuan dengan batasan yang ada, agar pola operasi LRT Sumsel menjadi lebih efisien tanpa mengurangi kualitas pelayanan. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan penjadwalan dengan menyesuaikan frekuensi terhadap fluktuasi demand, melalui tiga fokus utama: (1) menganalisis perbandingan demand dan supply terkini, (2) menyesuaikan supply dengan kebutuhan aktual penumpang, dan (3) mengevaluasi efisiensi antara kondisi eksisting dan hasil optimasi.

2. METODE PENELITIAN



Gambar 1. Bagan alir penelitian

Variabel *constrain* (batasan) yang digunakan dalam penelitian ini meliputi jumlah ketersediaan sarana, waktu *travel time* dan *roundtrip time,* jumlah penumpang, panjang rute, jam operasional, toleransi waktu tunggu dan kapasitas angkut. Dari acuan variabel-variabel *constrain* tersebut kemudian dibentuk variabel keputusan. Variabel keputusan ini digunakan dalam proses pengolahan data dan akan dibuat model matematika untuk memperoleh tujuan. Variabel keputusan yaitu (Berhan, Mengistu , Beshah, & Kitaw, 2014).

Persamaan 1 adalah "*objective function*" merupakan model matematika yang bermakna untuk meminimalkan jumlah frekuensi perjalanan yang disesuaikan dengan *demand* untuk tiap rute dan tiap *shift*. **j**: Indeks waktu pergeseran/ *shift* beserta Interval waktu yang ditetapkan, **i**: Indeks Rute, **Xij**: Banyaknya perjalanan pada rute i pada *shift* j, **Tij (*Trip Factor*)**: Jumlah faktor perjalanan adalah jumlah perjalanan yang dapat dilakukan oleh satu kereta pada durasi tertentu setiap *shift*.

$$\textbf{Tij} = \frac{\text{Total durasi dari } shift \text{ j (Menit)}}{roundtrip\ time} \dots\dots\dots\dots (1)$$

Dalam Persamaan 2, diartikan bahwa jumlah perjalanan (*trip*) yang dihasilkan oleh setiap sarana LRT Sumsel harus mampu melayani atau melebihi *demand* pada rute i *shift* j. **Wj (*Trip Required*)** merupakan jumlah minimum perjalanan yang diperlukan pada *shift* j untuk memenuhi waktu tunggu maksimum yang dapat diterima, hal ini bergantung pada durasi *shift* dan waktu tunggu maksimum.

$$Wj = \frac{\text{Total durasi pada } shift \text{ j (menit)}}{\text{Waktu tunggu maksimum}} \dots\dots\dots\dots (2)$$

Persamaan 3 menggambarkan bahwa total jumlah perjalanan yang dapat dioperasikan dan dijalankan adalah kurang dari atau sama dengan jumlah perjalanan yang mampu tersedia/dijalankan oleh setiap sarana LRT Sumsel. Dimana **Trip Available (A)** merupakan jumlah perjalanan yang dapat dilakukan oleh sarana pada shift tertentu, dengan formula:

$$\text{A} = \text{Jumlah sarana} \times \text{Tij} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (3)$$

Dari variabel keputusan tadi, dapat dibuat suatu formula atau fungsi tujuan yang bertujuan untuk mengoptimalkan jumlah perjalanan yang akan diberikan, Persamaan 4 menunjukkan bahwa jumlah perjalanan yang dihasilkan oleh tiap sarana LRT Sumsel adalah kurang dari atau sama dengan jumlah perjalanan minimum yang dibutuhkan oleh rute i dan *shift* j.

$$Minimum\ Z = \sum_{i=1}^{1} \sum_{j=1}^{4} Xij \dots\dots\dots (4)$$

Subject to:

390 Xij ≥ Dij ..... (5)

$\sum_{i=1}^{1} \sum_{j=1}^{4} = Xij \leq 6 \times \sum_{i=1}^{1} \sum_{j=1}^{4} = Tij$..... (6)

Xij ≥ Wj ..... (7)

Xij, ij ≥ 0 ..... (8)

4 : jumlah time interval
390: Kapasitas angkut LRT Sumsel (PT KAI, 2016))
6 : jumlah sarana yang bergerak (BPKARSS, 2023)

Variabel-variabel *constrain* tersebut nantinya akan diinput ke *software Linear Ineraktive Discrete Optimizer* (LINDO), yang akan menjadi persamaan yang saling terikat agar mewujudkan kondisi optimum sesuai kriteria (Eny, 2016). Persamaan 5-8 adalah persamaan yang menggambarkan batasan fungsi sebagai sebuah bentuk *non-negativity* sehingga nantinya *output* yang dihasilkan akan sesuai dengan model yang dibangun (Eny, 2016)

Dalam proses optimasi, digunakan *software* LINDO, LINDO adalah *software open source* yang dapat diunduh pada platform digital online (https://www.lindo.com/index.php/ls-downloads) yang digunakan untuk mencari dan menentukan penyelesaian dari permasalahan program linear. Dengan memanfaatkan LINDO, memungkinkan perhitungan masalah pemograman linear dengan *n* variable (Zaenal, 2018).

Setelah didapatkan frekuensi perjalanan yang optimal sesuai dengan *output* LINDO maka disusun terkait penjadwalan yang disesuaikan dengan frekuensi perjalanan tersebut dengan memperhatikan beberapa variable antara lain waktu keberangkatan, *Headway,* frekuensi perjalanan, Jumlah kebutuhan sarana yang optimum, dan *dwelling time* sarana di Stasiun

Dalam proses mendapatkan variabel dalam proses penjadwalan tersebut , digunakan beberapa rumus untuk mendapatkan nilai tersebut, antara lain:

Rumus perhitungan *headway* (Supriadi, 2008)*:*

$$Headway = \frac{\text{Total durasi pada shift (interval waktu) dalam menit}}{\text{Jumlah Frekuensi perjalanan (Xij)}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots (9)$$

Headway adalah interval, selang waktu, atau jarak waktu yang menunjukkan keadaan di mana waktu antara bagian depan suatu rangkaian kereta api telah mencapai suatu titik (stasiun) sampai dengan bagian depan rangkaian kereta api yang berada di belakangnya mencapai titik yag sama dengan satuan menit/KA (Supriadi, 2008).

Rumus perhitungan jumlah kebutuhan sarana (Berhan, Mengistu , Beshah, & Kitaw, 2014):

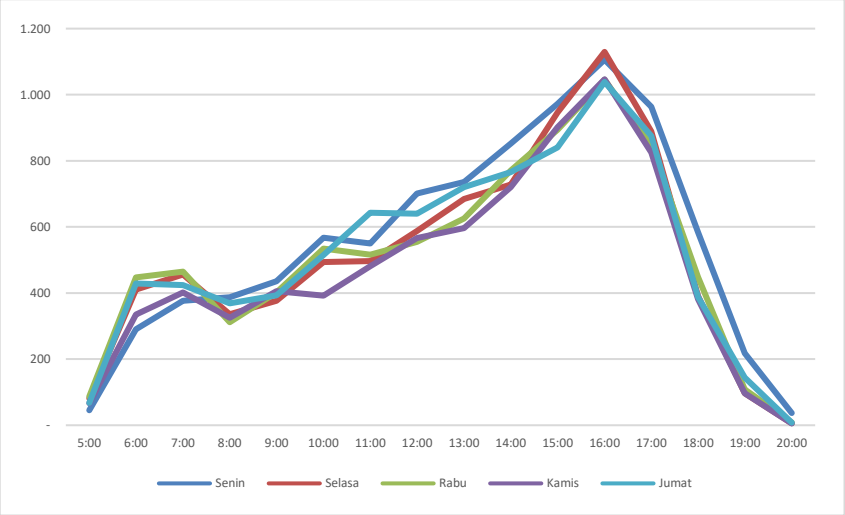
$$\text{Jumlah kebutuhan sarana} = \frac{\text{Frekuensi perjalanan optimal (Xij)}}{Trip\ Factor\ (Tij)} \dots\dots\dots\dots\dots (10)$$

Hasil pengolahan rumus tersebut akan menjadi variabel utama dalam proses penjadwalan yang harus disesuaikan agar mencakup seluruh aspek terkait. Menurut Baker dan Trietsch (2009) dalam Sulaeman & Nurjaman (2019), penjadwalan merupakan perencanaan yang menentukan kapan dan di mana pola perjalanan dilaksanakan dengan sumber daya terbatas, disertai alokasi waktu yang mempertimbangkan kapasitas yang ada. Setelah kondisi optimum diperoleh, dapat dihitung efisiensi yang dihasilkan, meliputi efisiensi jumlah perjalanan, penggunaan daya, dan jam kerja efektif. Frekuensi perjalanan yang optimal akan menciptakan selisih atau margin waktu pada jam kerja efektif, yaitu total jam kerja dikurangi waktu yang hilang karena tidak digunakan untuk bekerja. (*allowance*) (stekom.ac.id, 2019), masing-masing item tersebut dapat dihasilkan dengan menggunakan Persamaan 11-12 (Arieska & Herdiani, 2018).

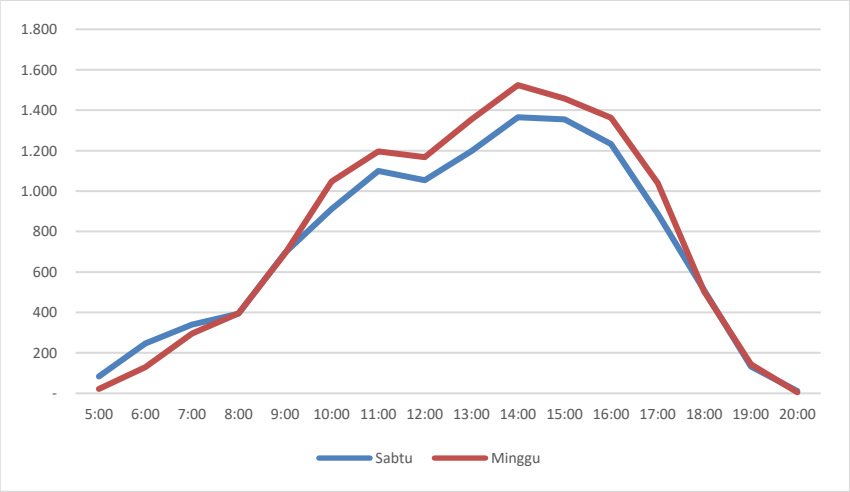
$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{selisih (margin)}}{\text{Kondisi eksisting}} \times 100\% \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (11)$$

$$\text{Efisiensi daya} = \frac{\text{Daya eksisting} - \text{daya Optimal}}{\text{Daya eksisting}} \times 100\% \dots\dots (12)$$

Pada proses optimasi penjadwalan ini, proses optimasi dibagi menjadi 2 (dua) interval hari, yakni interval hari kerja (senin-jumat) dan hari libur (sabtu-minggu), karena dua interval tersebut memiliki karakteristik *demand* yang berbeda, dapat dilihat pada grafik komparasi dibawah. Dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan karakteristik fluktuasi *demand* penumpang pada hari kerja dan hari libur (Gambar 2).



(a)



(b)

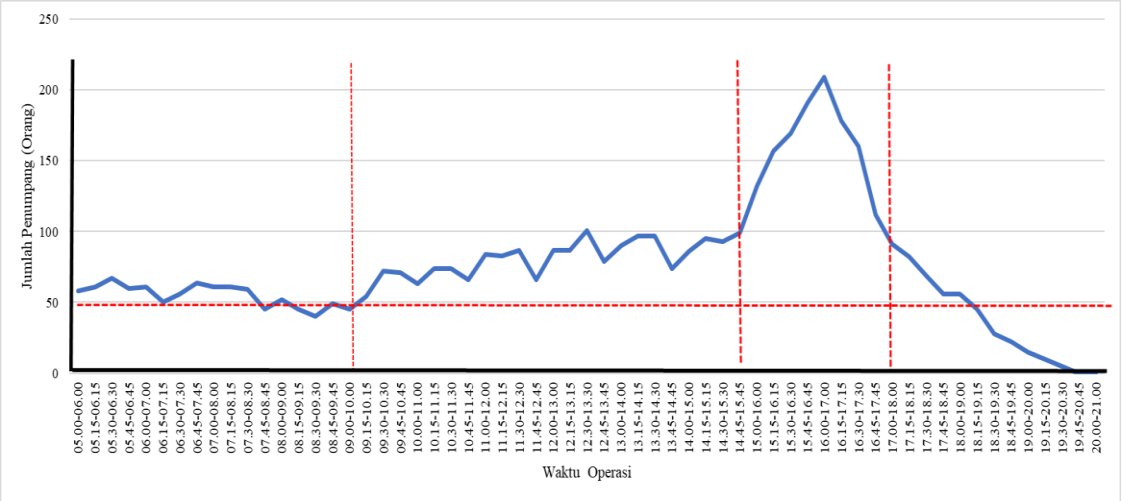
Gambar 2 Fluktuasi *demand* penumpang pada LRT Sumsel: a) hari kerja dan b)akhir pekan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

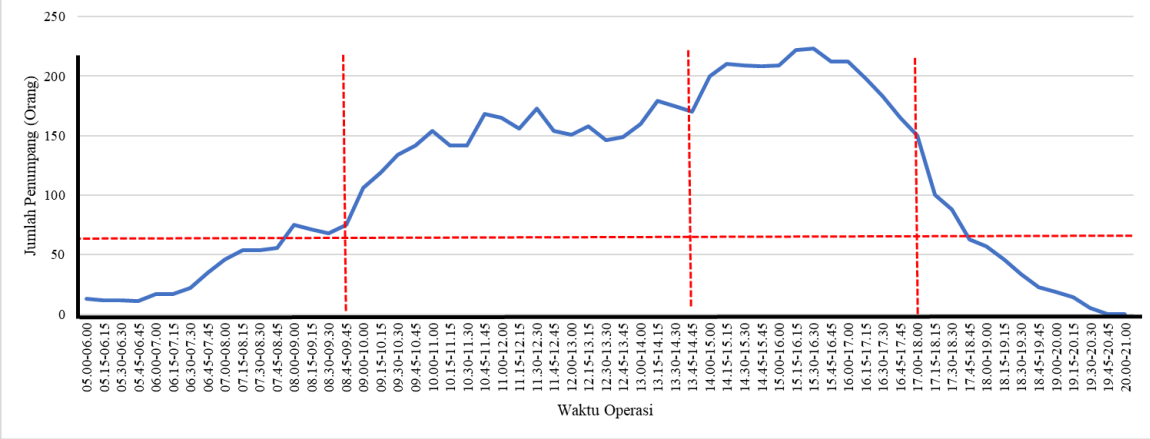
3.1. Analisis Penjadwalan

Setelah dilakukan pengolahan data terkait preferensi penumpang terhadap waktu keberangkatan, maka didapatkan grafik fluktuasi penumpang. Data preferensi penumpang tersebut diperoleh melalui survei yang dilakukan di Stasiun LRT Sumatera Selatan pada rentang bulan Januari hingga Maret 2023. Survei dilaksanakan di beberapa stasiun yang memiliki tingkat permintaan penumpang cukup tinggi, dan dilakukan sepanjang hari dari awal hingga akhir operasional Kereta untuk mengetahui preferensi serta fluktuasi jumlah

penumpang dari awal hingga akhir jam operasional. Setelah grafik fluktuasi diperoleh, grafik tersebut kemudian dibagi menjadi beberapa interval yang disesuaikan dengan pola variasi permintaan penumpang.



(a)



(b)

Gambar 3. Grafik fluktuasi penumpang pada : a)hari kerja dan b)akhir pekan

Berdasarkan gambar 3 terkait fluktuasi penumpang LRT Sumsel, dapat dilihat terkait grafik fluktuasi tersebut, pada waktu pagi hari *demand* LRT Sumsel memiliki demand yang rendah. Menurut (Haryomukti, 2022) bahwa moda yang digunakan oleh masyarakat palembang adalah menggunakan moda pribadi (mobil dan motor) dan moda umum selain kereta api, pada waktu mobilitas tertinggi pada waktu pagi hari berada pada pukul 07.00-08.00 WIB pada wilayah kota Palembang, dan didominasi oleh moda motor,mobil dan angkot. Sedangkan pada penelitian (Genta, Sadili, & Drajat, 2021) disebutkan bahwa pada waktu sore hari, 56% responden dari hasil survei menghasilkan bahwa maksud perjalanan pada pengguna moda kereta api LRT Sumsel adalah untuk pulang. Dalam hal ini dapat disimpulkan bahwa pola pergerakan penumpang masyarakat Palembang memilki karakteristik yang berbeda, karena pada pagi hari masyarakat Palembang lebih cenderung menggunakan moda pribadi dan umum selain LRT Sumsel sedangkan pada waktu sore hari

pola perjalanan penumpang LRT Sumsel bertujuan untuk pulang ke domisili asal menggunakan moda LRT Sumatera selatan, hal ini dibuktikan bahwa grafik *demand* penumpang mengalami peningkatan pada sore hari, artinya bahwa terjadi peningkatan jumlah penumpang yang menggunakan moda LRT Sumsel pada sore hari.

Pada proses penjadwalan tersebut dibagi dalam dua interval yakni pada hari kerja (senin-jumat) dan hari libur (sabtu-minggu). Penentuan pembagian interval hari tersebut dikarenakan dua interval tersebut memiliki karakteristik yang berbeda. Setelah dilakukan rekapitulasi dan analisis, maka keduanya dibagi menjadi 4 *shift*. Setelah didapatkan periode *shift* tersebut lalu prosentase pada masing-masing *shift* dikalikan dengan *total daily demand* penumpang LRT Sumsel, dan akan menghasilkan variable Dij yakni demand penumpang pada rute i dan j yang merupakan hasil perkalian antara proporsi presentasi penumpang dengan total daily demand, variabel Dij inilah yang akan diinput ke dalam LINDO guna menggambarkan kondisi demand penumpang per hari. Berikut ini adalah tabel analisis tersebut.

3.1.1 Analisis Pada Hari Kerja

Parameter lainnya yang digunakan dalam proses optimasi penjadwalan pada LRT Sumsel ini adalah waktu tunggu toleransi penumpang, yang didapatkan melalui survei kuesioner kepada penumpang LRT Sumsel. Sesuai dengan data yang diperoleh, dengan menggunakan software SPSS dengan mencari nilai rata-rata / mean, dihasilkan output seperti Tabel 1.

Tabel 1 Data waktu operasi dan penumpang pada hari kerja dan Waktu tunggu maksimum toleransi penumpang pada hari kerja

No Shift	Waktu Operasi	Total Pnp*	Presentasi (%)	Dij (%)*D	Waktu Tunggu (Menit)
1	05.00 - 10.00	205	22%	1758	27
2	10.00 - 15.00	317	34%	2721	27
3	15.00 - 18.00	348	37,30%	2983	27
4	18.00 - 20.00	62	6,70%	525	27
	TOTAL	932	100%	7.987**	27

*hasil survei
**((BPKARSS, 2023)) data diolah

Berdasarkan Tabel 1, hasil survei menunjukkan rata-rata waktu tunggu 27,1567 menit dengan standar deviasi 3,40609 pada hari kerja. Standar deviasi digunakan untuk menentukan interval nilai rata-rata, dan dalam kajian ini dibulatkan menjadi 27 menit sebagai parameter waktu tunggu maksimum penumpang LRT Sumsel. Program linier ini bertujuan menentukan jumlah minimum trip operasi LRT Sumsel dengan mempertimbangkan parameter pembatas seperti trip factor (Tij), trip required (Wij), passenger demand (D), objective function, Round Trip Time (RTT), waktu tunggu maksimum (WT), dan trip available (A). Tabel 2 dan Tabel 3 berikut menunjukkan hasil pengolahan parameter untuk optimasi penjadwalan LRT Sumsel pada hari kerja.

Tabel 2 Hasil perhitungan variable constrain Wij, Dij, dan Trip Available.

Hari	D	RTT	WT	Wij, Dij dan (A)			
	(pnp)	(Mnt)	(mnt)	*Shift* 1	*Shift* 2	*Shift* 3	*Shift* 4
Hari Kerja	7.987	104	27	W_{ij} = 12 D_{ij} = 1.758 A= 17,3	Wij = 11 Dij= 2.721 A= 18,18	Wij = 7 Dij= 2.983 A= 10,9	Wij = 5 Dij= 525 A= 7,2

D= demand, RTT= round trip time, Wt= waiting time

Table 3. Hasil perhitungan variable constrain Trip factor

Hari	RTT (Mnt)	T_{ij}			
		T_{ij} 1	T_{ij} 2	T_{ij} 3	T_{ij} 4
Hari Kerja	104	2,8	3,03	1,81	1,21

Setelah dilakukan kegiatan optimasi menggunakan metode Integer Linear Programming, maka dihasilkan kondisi frekuensi perjalanan yang optimal pada masing-masing interval seperti yang ditunjukan pada Tabel 4.

Tabel 3 Rekap Hasil *Running* model pada hari kerja

Shift	Interval waktu	Trip (Xij)
1	05.00 – 10.00	12 Trip
2	10.00 – 15.00	11 Trip
3	15.00 – 18.00	8 Trip
4	18.00 – 20.00	5 Trip
	Total	36 Trip

Setelah didapatkan hasil jumlah frekuensi perjalanan yang optimal, maka dapat dicari terkait variabel yang digunakan untuk proses penjadwalan, yakni *headway* dan jumlah kebutuhan sarana pada masing-masing *shift.* Pada proses perhitungan headway yang digunakan dalam proses penjadwalan, menggunakan Persamaan 9.

Table 5. perhitungan headway optimum

Hari	Headway optimum (menit)			
	Shift 1	Shift 2	Shift 3	Shift 4
Hari kerja	25	27	22	24

Pada Tabel 5 dapat dilihat terdapat perbedaan headway pada masing-masing interval waktu tersebut. Headway yang menunjukkan angka yang lebih kecil merepresentasikan bahwa pada interval shift waktu tersebut memiliki demand penumpang yang tinggi sehingga diperlukan supply yang lebih besar untuk mengakomodasi demand penumpang yang ada, dan untuk tetap menjaga aspek pelayanan transportasi, maka parameter waktu tunggu maksimum penumpang digunakan sebagai waktu maksimum penentuan headway agar dalam pelaksanannya tetap memperhatikan aspek pelayanan, namun disisi lain harus tetap mempertimbangkan fluktuasi demand penumpang agar tetap memunculkan kondisi yang optimal. Dalam proses perhitungan jumlah kebutuhan sarana yang optimal, menggunakan Persamaan 10.

Tabel 6. Perhitungan jumlah kebutuhan sarana optimum

Hari	Jumlah Sarana (*trainset*)			
Hari Kerja	5	4	5	5

Pada tabel 6 adalah tabel hasil perhitungan jumlah sarana yang dibutukan guna mengakomodasi kebutuhan frekuensi perjalanan yang telah optimal. Pada penentuan jumlah sarana yang optimal dapat dilihat pada jumlah kebutuhan sarana tertinggi pada hari tersebut. Dalam hal ini kebutuhan sarana dihitung dalam satuan *trainset,* dengan 1 *trainset* terdiri dari 3 kereta (MC-TC-MC). Dilihat pada hari kerja dapat dilihat jumlah sarana yang tertinggi pada interval hari kerja berada pada *shift* ketiga, yakni 5 *trainset.* Maka pada interval hari kerja jumlah sarana yang harus disiapkan untuk dioperasikan adalah 5 *trainset*

dalam keadaan Siap Operasi (SO), namun pada realisasinya dapat disesuaikan pada masing-masing *shift*

3.1.2 Analisis Pada Akhir Pekan

Sama halnya dengan hari kerja, parameter yang digunakan dalam proses optimasi penjadwalan pada LRT Sumsel ini adalah waktu tunggu toleransi penumpang, yang didapatkan melalui survei kuesioner kepada penumpang LRT Sumsel. Sesuai dengan data yang diperoleh, dengan menggunakan software SPSS dengan mencari nilai rata-rata / mean, dihasilkan output seperti dibawah ini:

Tabel 7 Data waktu operasi dan penumpang dan waktu tunggu maksimum toleransi penumpang pada akhir pekan

No Shift	Waktu Operasi	Total Pnp*	Presentasi (%)	Dij (%)*D	Waktu Tunggu (Menit)
1	05.00 - 10.00	151	12%	1431	27
2	10.00 - 15.00	619	49,1 %	5854	27
3	15.00 - 18.00	427	33,9 %	4043	27
4	18.00 - 20.00	63	5%	587	27
	TOTAL	1260	100%	11.915**	27

Berdasarkan Tabel 7, hasil survei menunjukkan rata-rata waktu tunggu sebesar 27,3183 menit dengan standar deviasi 4,55479 pada hari libur. Standar deviasi digunakan untuk menentukan interval minimum dan maksimum dari nilai rata-rata. Dalam kajian ini, nilai rata-rata dibulatkan menjadi 27 menit dan digunakan sebagai parameter waktu tunggu maksimum penumpang LRT Sumsel. Program linier ini bertujuan menentukan jumlah minimum trip dalam operasi LRT Sumsel dengan mempertimbangkan beberapa parameter pembatas, yaitu trip factor (Tij), trip required (Wij), passenger demand (D), objective function, Round Trip Time (RTT), waktu tunggu maksimum (WT), dan trip available (A). Tabel 8 dan 9 berikut menyajikan hasil pengolahan parameter yang digunakan dalam proses optimasi penjadwalan LRT Sumsel pada akhir pekan.

Tabel 8 Hasil perhitungan variable constrain Wij, Dij, dan Trip Available.

Hari	D	RTT	WT	Wij, Dij dan (A)			
	(pnp)	(Mnt)	(mnt)	*Shift* 1	*Shift* 2	*Shift* 3	*Shift* 4
Akhir pekan	11.915	104	27	Wij = 10 Trip Dij= 1.431 A= 16,4	Wij = 12 Trip Dij= 5.854 A= 17,3	Wij = 8 Trip Dij= 4.043 A= 11,25	Wij = 5 Trip Dij= 587 A= 6,19

D= demand, RTT= round trip time, Wt= waiting time

Tabel 9. Hasil perhitungan variable constrain Trip factor

Hari	RTT	T_{ij}			
	(Mnt)	T_{ij} 1	T_{ij} 2	T_{ij} 3	T_{ij} 4
Akhir Pekan	104	2,74	2,88	1,875	1,15

Setelah dilakukan kegiatan optimasi menggunakan metode *Integer Linear Programming,* maka dihasilkan kondisi frekuensi perjalanan yang optimal pada masing-masing interval seperti yang terlihat pada Tabel 10.

Tabel 10 Rekap Hasil *Running* model pada akhir pekan

Shift	Interval Waktu	Trip (Xij)
1	05.00 – 09.45	10 Trip
2	09.45 – 14.45	15 Trip
3	14.45 – 18.00	11 Trip
4	18.00 – 20.00	5 Trip
	Total	41 Trip

Setelah didapatkan hasil jumlah frekuensi perjalanan yang optimal, maka dapat dicari terkait variabel yang digunakan untuk proses penjadwalan, yakni *headway* dan jumlah kebutuhan sarana pada masing-masing *shift.* Pada proses perhitungan headway yang digunakan dalam proses penjadwalan, menggunakan Persamaan 9.

Hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada table dibawah ini:

Tabel 11 perhitungan headway optimum

	Headway optimum (menit)			
Hari	Shift 1	Shift 2	Shift 3	Shift 4
Akhir pekan	27	20	18	24

Tabel 11 menunjukkan perbedaan headway pada setiap interval waktu. Headway yang lebih kecil menandakan tingginya demand penumpang sehingga diperlukan peningkatan supply untuk mengakomodasinya. Parameter waktu tunggu maksimum digunakan sebagai batas penentuan headway agar aspek pelayanan tetap terjaga, namun tetap mempertimbangkan fluktuasi demand agar operasi berlangsung optimal. Dalam proses perhitungan jumlah kebutuhan sarana yang optimal, menggunakan Persamaan 10.

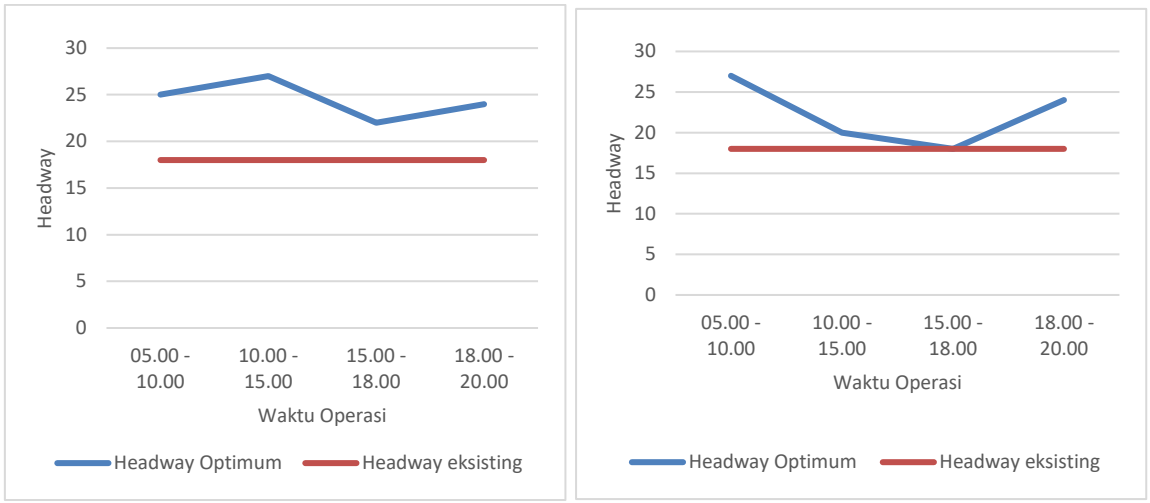
Tabel 12 Perhitungan jumlah kebutuhan sarana optimum

Hari	*Shift*			
	Jumlah Sarana (*trainset)*	Jumlah Sarana (*trainset*)	Jumlah Sarana (*trainset*)	Jumlah Sarana (*trainset*)
Akhir Pekan	4	6	6	5

Tabel 12 menunjukkan hasil perhitungan jumlah sarana yang dibutuhkan untuk memenuhi frekuensi perjalanan optimal. Jumlah sarana optimal ditentukan berdasarkan kebutuhan tertinggi pada hari tersebut, dihitung dalam satuan trainset (1 trainset = 3 kereta: MC-TC-MC). Pada hari libur, kebutuhan tertinggi tercatat pada shift 3 sebanyak 6 trainset, sehingga jumlah sarana yang disiapkan dalam kondisi Siap Operasi (SO) adalah 6 trainset, dengan penyesuaian sesuai kebutuhan tiap shift untuk menjaga efisiensi.

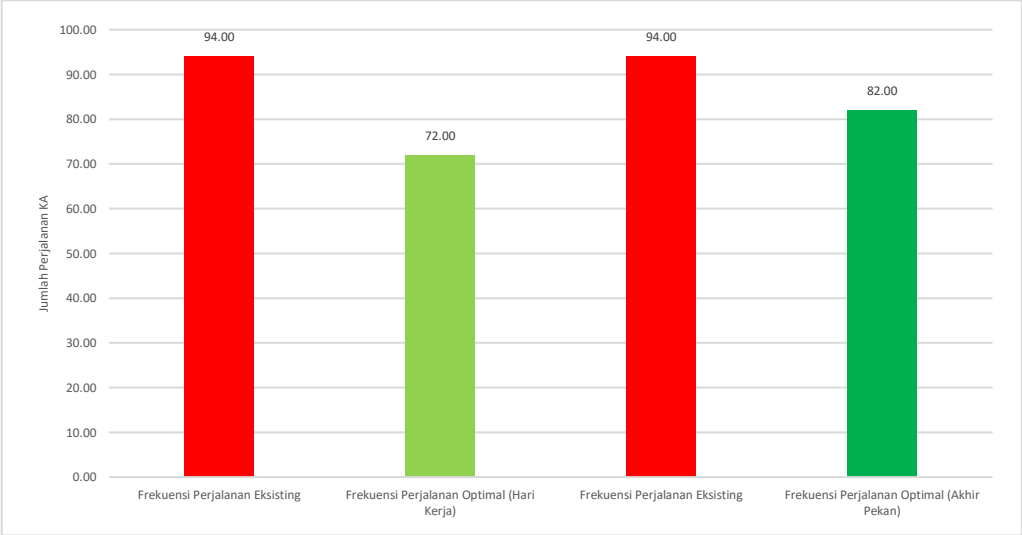
3.2. Analisis Efisiensi

Setelah dihasilkan terkait jumlah perjalanan yang optimal maka akan selaras dengan efisiensi lain yakni efisiensi headway, jumlah perjalanan, daya yang digunakan dan jam kerja efektif.



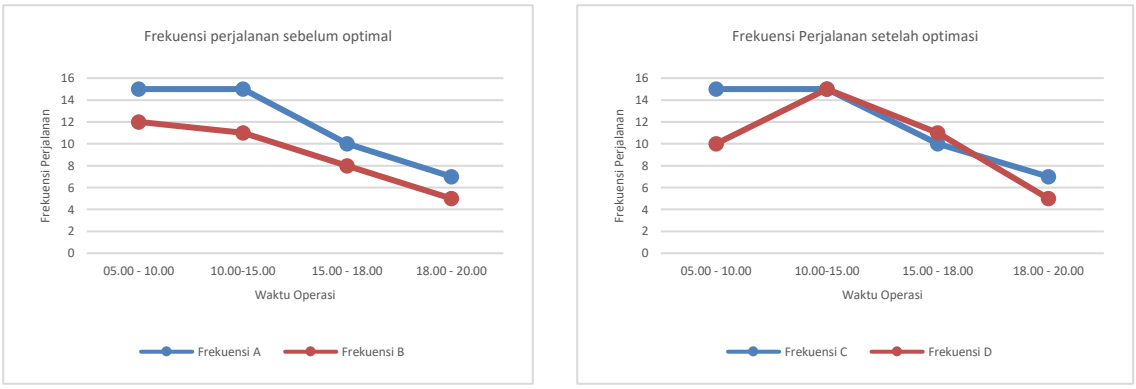
Gambar 4 Komparasi *headway* : a)hari kerja dan b)akhir pekan

Gambar 4 menunjukkan perbedaan headway antara kondisi eksisting dan optimal. Pada kondisi eksisting, headway tetap 18 menit, sedangkan pada kondisi optimal nilainya bervariasi mengikuti fluktuasi demand. Semakin tinggi jumlah penumpang, semakin kecil headway karena periode tersebut tergolong on peak. Penyesuaian ini memastikan frekuensi perjalanan sesuai kebutuhan dan menjaga kualitas pelayanan. Perubahan jumlah perjalanan LRT Sumsel ini juga menghasilkan efisiensi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Komparasi frekuensi perjalanan

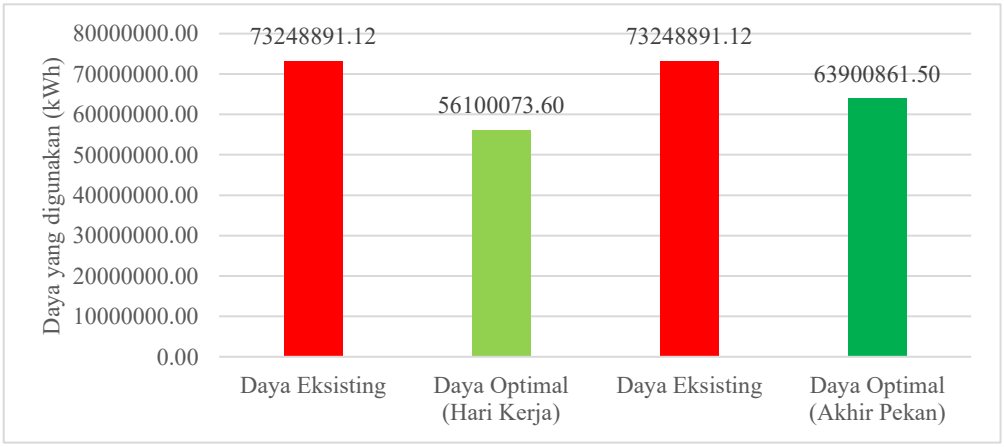
Setelah dilakukan optimasi pada perjalanan kereta api, maka didapatkan efisiensi pada frekuensi perjalanan dari sebelum optimasi dan sesudah optimasi sebagai berikut:



(a) (b)

Gambar 6 Komparasi frekuensi perjalanan sebelum (a) dan sesudah Optimasi (b)

Gambar 6 menunjukkan adanya perbedaan frekuensi perjalanan LRT Sumsel sebelum dan sesudah optimasi. Pada hari kerja, jumlah perjalanan berkurang dari 94 menjadi 72 perjalanan sehingga efisiensi mencapai 23,4%. Sementara itu, pada hari libur jumlah perjalanan berkurang menjadi 82 perjalanan dengan efisiensi 12,7%. Pengurangan perjalanan ini juga berdampak pada efisiensi penggunaan listrik, karena kebutuhan daya tiap trainset sebesar 994.824 kW dengan waktu tempuh 47 menit per perjalanan. Dari perhitungan menggunakan rumus penggunaan daya maka dapat dihitung penggunaan daya pada kondisi eksisting dan kondisi optimal. Efisiensi daya dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Komparasi daya listrik

Penyesuaian jumlah perjalanan sesuai demand penumpang juga menghasilkan efisiensi jam kerja efektif. Sebelum optimasi, LRT Sumsel melayani 94 perjalanan per hari dengan total jam kerja 4.418 menit. Setelah optimasi, jumlah perjalanan menjadi 72 pada hari kerja dan 82 pada hari libur, dengan jam kerja berkurang menjadi 3.384 menit dan 3.854 menit. Hal ini menghasilkan efisiensi sebesar 1.034 menit (23,4%) pada hari kerja dan 564 menit (12,7%) pada hari libur. Dengan demikian, optimasi tidak hanya mengurangi perjalanan, tetapi juga meningkatkan efisiensi waktu operasional dan penggunaan sumber daya secara keseluruhan.

4. KESIMPULAN

Hasil optimasi penjadwalan yang disesuaikan dengan demand penumpang menunjukkan adanya pengurangan jumlah perjalanan untuk mencapai kondisi operasi yang lebih efisien. Dari kondisi eksisting sebanyak 94 perjalanan, jumlahnya berkurang menjadi 72 perjalanan pada hari kerja dan 82 perjalanan pada hari libur. Pengurangan ini menghasilkan efisiensi penggunaan listrik sebesar 17.140.817,52 kWh pada hari kerja dan 9.348.029,62 kWh pada hari libur, serta efisiensi jam kerja efektif masing-masing 1.034 menit pada hari kerja dan 564 menit per hari pada hari libur. Secara keseluruhan, efisiensi operasi mencapai 23,4% pada hari kerja dan 12,7% pada hari libur. Hasil ini dapat menjadi dasar bagi operator LRT Sumsel untuk menerapkan pola operasi yang adaptif terhadap fluktuasi permintaan penumpang melalui evaluasi jadwal secara berkala, integrasi antarmoda, serta strategi promosi guna meningkatkan jumlah pengguna dan efisiensi berkelanjutan. Ke depan, penelitian dapat difokuskan pada optimalisasi waktu tempuh, analisis karakteristik penumpang, serta kajian aspek finansial dari proses optimasi frekuensi perjalanan.

DAFTAR PUSTAKA

Berhan, E., Mengistu , D., Beshah, B., & Kitaw, D. (2014, January). Modeling and Analysis of Bus Scheduling Systems of Urban Public Bus Transport. *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications., 6*, 404-412. doi:2150-7988

BPKARSS. (2023, Maret 17). Data Jumlah penumpang LRT Sumsel. Palembang, Sumastera Selatan, Indonesia. Retrieved Maret 18, 2023

Direktoran Jenderal Perhubungan Darat. (2010). Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Darat tentang Petunjuk Pelaksanaan Kegiatan Penghargaan Wahana Tata Nugraha. DKI Jakarta, Indonesia: Kementrian Perhubungan. Retrieved Mei 17, 2023

Elko, R. B. (2021, Agustus 25). *Mobilitas masyarakat Kota Palembang sempat di skala hitam.* Retrieved Februari 25, 2023, from Antara Sumsel: https://sumsel.antaranews.com/berita/694863/leodaniel-pertahankan-tradisi-ganda

Eny, H. (2016, Juni 29). Pemodelan Optimasi Penjadwalan Angkutan Pemadu Moda Bandara Dengan Pendekatan Program Lindo (Studi Kasus Bus Damri Bandara Soetta-Cengkareng). *Warta Ardhia, 42*(2), 63-70. Retrieved Desember 25, 2022

Genta, A., Sadili, R., & Drajat, B. (2021, April 6). Pemodelan Pemilihan Moda Transportasi Antara Lrt Sumsel Dan Bus Transmusi Lintas Bumi Sriwijaya-Komplek OPI. Retrieved Juli 7, 2023, from http://digilib.ptdisttd.net/722/

Haryomukti, I. H. (2022, Agustus 2). *Optimalisasi Penambahan Jam Operasional Light Rail Transit Sumatera Selatan.* PTDI STTD, Bekasi. Retrieved Juli 6, 2023, from http://digilib.ptdisttd.net/2552/1/MTP%203.4%20IZZUL%20HAQ%20ARYOMUKTI-%20FULL%20PRODI_removed.pdf

Imelda. (2013). Identifikasi Pusat Pertumbuhan dan Daerah Hinterland di Kota Palembang. *Jurnal Ekonomi Pembangunan, 11*, 54-66. doi:https://doi.org/10.29259/jep.v11i1.4913

Kusnandar, V. B. (2021, 11 5). *Perekonomian Kota Palembang Terbesar di Sumatera Selatan pada 2020.* (Databox) Retrieved Januari 8, 2023, from https://databoks.katadata.co.id/: https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2021/11/05/perekonomian-kota-palembang-terbesar-di-sumatera-selatan-pada-2020

Prakoso, H. (2014). Modelling And Analys of Bus Scehduling System. Jakarta, Indonesia. Retrieved Februari 13, 2023

PT KAI. (2016, Agustus 2). *Kajian Kelayakan Light Rail Transit* . Jakarta: PT Kereta Api Indonesia (persero). Retrieved Juni 18, 2023

Riadi, M. (2020, Maret 27). *Mobilitas Sosial (Pengertian, Bentuk, Dimensi dan Faktor yang Mempengaruhi).* Retrieved Januari 24, 2023, from KajianPustaka.com: https://www.kajianpustaka.com/2020/03/mobilitas-sosial.html

Silitonga, & Robby. (2020, Juni 18). Analisis Load Faktor (L/F)Penumpang Pesawat Terbang. *Jurnal teknika, 1*(2). doi:https://doi.org/10.52868/jt.v1i2.1250

Sopacua, M., & Daniel. (2015). Integer Linear Programming sSebagai Alternatif Penjadwalan. 120-128. Retrieved Maret 12, 2023, from https://media.neliti.com/media/publications/317378-integer-linear-programming-sebagai-model-f57a3d75.pdf

Sulaeman, F. S., & Nurjaman, M. F. (2019, Desember). Aplikasi Penjadwalan dan Booking Online Menggunakan Teknologi Android. *Media Jurnal Informatika, 11*(2), 8-14. Retrieved Desember 28, 2022, from http://jurnal.unsur.ac.id/mjinformatika

Supriadi, U. (2008). Pokok - Pokok Grapik Perjalanan Kereta Api. 78-90. Bandung, Jawa Barat, Indonesia: PT Kereta Api Indonesia (Persero). Retrieved Januari 18, 2023

Zaenal, A. (2018, Juli 1). Penggunaan Software LINDO dalam mata kuliah Program Linear. *3*(1), 1-9. Retrieved Juni 9, 2023, from https://media.neliti.com/media/publications/301718-penggunaan-software-lindo-dalam-matakuli-773c0fb8.pdf