



Evaluasi Kinerja Pola Pelayanan *Trunk-feeder* dan *Direct service* pada Sistem BRT menggunakan *Connection Search Algorithm*

Taufiq Suryo Nugroho*

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung

*) Email corresponding author: taufiq.nugroho@itb.ac.id

Received: 13 Maret 2025 Revised: 10 Agustus 2026 Accepted: 21 Agustus 2026

Abstract

The Government of Indonesia is currently developing more modern urban transportation systems to address mobility challenges in urban areas. One of the systems being developed is Bus Rapid Transit (BRT). A key challenge in BRT implementation lies in route planning and service operation patterns. This paper evaluates the BRT route planning stage by comparing trunk-feeder and direct service network configurations. For this purpose, a public transport assignment model was developed using the Connection Search Algorithm (CSA) method. The analysis was applied to a BRT planning case study in Batam City using PTV VISUM software. The results indicate that the trunk-feeder system is more suitable for public transport networks with moderate demand levels and service capacity, whereas the direct service system is more appropriate for networks with high demand volumes and service capacities.

Keywords: Urban transport; bus rapid transit; transit assignment; PTV VISUM

Abstrak

Saat ini Pemerintah Indonesia tengah mengembangkan sistem transportasi perkotaan yang lebih modern untuk menjawab tantangan mobilitas di kawasan perkotaan. Salah satu sistem yang dikembangkan adalah Bus Rapid Transit (BRT). Tantangan utama dalam implementasi BRT terletak pada perencanaan rute dan pola operasi layanan. Penelitian ini mengevaluasi tahap perencanaan rute BRT dengan membandingkan jaringan berbasis trunk-feeder dan direct service. Untuk tujuan tersebut, dikembangkan model pembebanan angkutan umum (transit assignment) menggunakan metode Connection Search Algorithm (CSA). Analisis diterapkan pada studi kasus perencanaan BRT di Kota Batam dengan memanfaatkan perangkat lunak PTV VISUM. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem trunk-feeder lebih sesuai diterapkan pada jaringan angkutan umum dengan volume permintaan dan kapasitas layanan menengah, sedangkan sistem direct service lebih tepat untuk jaringan dengan volume permintaan dan kapasitas layanan yang tinggi.

Kata kunci: Transportasi perkotaan; bus rapid transit; pembebanan jaringan transportasi publik; PTV VISUM

Pendahuluan

Kemacetan lalu lintas di kota-kota besar Indonesia terus meningkat setiap tahun, dan penyediaan angkutan umum menjadi salah satu strategi utama pemerintah untuk menekan kemacetan mempromosikan konsep transportasi berkelanjutan (Frazila *et al.*, 2021). Salah satu program yang tengah dikembangkan adalah layanan Bus Raya Terpadu (BRT) di berbagai kota (Rita Kurniati, 2021) Keberhasilan BRT sangat bergantung pada perencanaan rute yang optimal (McLeod *et al.*,

2017; Selten *et al.*, 2007) dan pemahaman mendalam mengenai perilaku pergerakan pengguna (Anggraini *et al.*, 2019). Keterbatasan anggaran dan tuntutan pencapaian target penumpang menjadikan isu perencanaan rute dan operasi BRT menjadi krusial bagi pengembangan sistem ini di Indonesia (Prayudyanto, 2021).

Perencanaan jaringan angkutan umum, dalam literatur, umumnya dibahas dalam kerangka *Transit Network Design Problem* (TNDP), yaitu persoalan optimasi jaringan dengan fungsi tujuan dan batasan

tertentu (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009). Berbagai aspek TNDP telah dikaji secara luas, mulai dari formulasi *mathematical programming* (Cancela *et al.*, 2015), metode penyelesaian metaheuristik (Mohaymany & Gholami, 2010; Pattnaik *et al.*, 1998), hingga pertimbangan waktu transfer (Feng *et al.*, 2019) dan variasi permintaan perjalanan (Lee & Vuchic, 2005). Namun, kajian yang secara eksplisit membandingkan kinerja jaringan berdasarkan tipologi operasinya masih terbatas. Secara umum terdapat dua tipologi operasi BRT: *trunk-feeder* dan *direct service*. Pada pola *trunk-feeder*, layanan *feeder* menghubungkan kawasan permukiman dengan layanan *trunk* berkapasitas besar yang melayani koridor utama menuju pusat kota. Pada pola *direct service*, penumpang dilayani langsung dari asal ke tujuan tanpa transfer, baik dari kawasan sub-urban ke urban maupun antar-kawasan sub-urban yang melintasi kota (*cross-city route*).

Beberapa studi telah membandingkan kedua konsep ini, sebagai contoh Gschwender *et al.*, (2016) dari perspektif ekonomi dan struktur biaya operator, serta Ferro & Behrens, (2015) dari sisi ekonomi, sosial, dan tata guna lahan. Secara umum, *direct service* dinilai lebih menguntungkan penumpang karena menghilangkan transfer dan memperpendek waktu perjalanan, sementara keberhasilan *trunk-feeder* sangat bergantung pada panjang rute *trunk*, pola sebaran permintaan, dan jumlah transfer yang diperlukan meski lebih unggul dari sisi efisiensi operasional, sistem ini cenderung kurang fleksibel dibanding *direct service*.

Dari sisi pengukuran kinerja, penelitian terdahulu banyak menggunakan indikator berorientasi pengguna seperti total waktu perjalanan, durasi perjalanan transit, dan jumlah transfer (Arbex & Da Cunha, 2015; Derrible & Kennedy, 2011; Weckström *et al.*, 2019), maupun indikator operasional seperti panjang dan jumlah perjalanan armada (Hörcher & Tirachini, 2021). Temuan-temuan ini kerap menunjukkan kecenderungan yang berlawanan antara kepentingan operator dan kepentingan penumpang, sehingga evaluasi yang mempertimbangkan kedua sisi secara bersamaan menjadi penting namun belum banyak dilakukan khususnya pada konteks kota-kota di Indonesia, di mana pemilihan pola operasi BRT masih lebih banyak didasarkan pada pertimbangan praktis di lapangan dibandingkan bukti kinerja komparatif yang sistematis.

Di sisi metodologi, evaluasi kinerja jaringan semacam ini idealnya menggunakan pendekatan pembebanan angkutan umum (*transit assignment*) yang mampu merepresentasikan perilaku transfer dan pemilihan rute penumpang secara realistis,

salah satunya melalui *Connection Search Algorithm* (CSA). Meskipun demikian, penerapan CSA termasuk variasi metodenya seperti *shortest path* dan *branch and bound* — masih jarang digunakan dalam studi evaluasi operasi angkutan umum, khususnya untuk membandingkan tipologi jaringan seperti *trunk-feeder* dan *direct service*.

Berdasarkan uraian di atas, terdapat dua celah penelitian yang menjadi dasar studi ini: (1) belum ada penelitian yang secara khusus mengkaji efektivitas pola operasi *trunk-feeder* dibandingkan *direct service* pada BRT di kota-kota Indonesia; dan (2) metode *transit assignment* berbasis CSA, beserta variasi metode *shortest path* dan *branch and bound* di dalamnya, belum umum diterapkan dalam kajian evaluasi kinerja operasi angkutan umum.

Untuk mengisi celah tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi dan membandingkan kinerja pola operasi *trunk-feeder* dan *direct service* pada studi kasus BRT di Kota Batam, menggunakan pendekatan *transit assignment* berbasis CSA pada platform PTV VISUM, dengan membandingkan pula dua metode CSA yang tersedia di dalamnya, yaitu *shortest path* dan *branch and bound*. Evaluasi dilakukan dengan mempertimbangkan indikator kinerja operator (rata-rata volume penumpang per perjalanan, total panjang perjalanan armada, dan potensi pendapatan) sekaligus indikator pelayanan penumpang (jumlah transfer, total waktu dan panjang perjalanan, serta komponen waktu perjalanan meliputi waktu di dalam kendaraan, waktu berjalan kaki saat transfer, dan waktu menunggu). Kota Batam dipilih sebagai studi kasus karena memiliki pembagian tata ruang yang relatif jelas antara kawasan permukiman dan kawasan bisnis sehingga rute *trunk-feeder* dapat diidentifikasi dengan baik serta kondisi geometri jalan dan jaringan yang relatif memadai untuk pengembangan koridor BRT dan penerapan algoritma CSA.

Metodologi

Salah satu metodologi yang krusial dalam evaluasi kinerja jaringan transportasi publik adalah metode pemilihan rute penumpang, yang umumnya dikenal sebagai pembebanan angkutan umum (*transit assignment*). Tujuan dari pembebanan angkutan umum ini adalah menjawab dua hal berikut: (1) memprediksi pemilihan rute penumpang dari suatu asal ke tujuan berdasarkan karakteristik jaringan rute dan frekuensi layanan angkutan umum yang tersedia serta (2) mengevaluasi efektivitas operasi sistem transportasi publik.

Proses utama yang mendasari pemodelan pemilihan rute pada *transit assignment* adalah bahwa seorang

penumpang membuat keputusan untuk memilih rute yang paling efisien secara waktu dan biaya untuk menyelesaikan perjalanannya. Perlu diperhatikan bahwa suatu perjalanan lengkap dalam sistem angkutan umum terbagi menjadi beberapa segmen berurutan, meliputi: akses ke halte, berjalan ke peron, menunggu untuk naik kendaraan, perjalanan di dalam kendaraan; turun dari kendaraan dan/atau berpindah ke jalur lain jika diperlukan, serta keluar.

Sejalan dengan proses pemilihan rute yang telah dijelaskan sebelumnya, salah satu metode yang umum digunakan dalam pembebanan angkutan umum adalah *Connection Search Algorithm* (CSA) (Fu *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2010). Metode CSA dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan *transit assignment* berbasis jadwal (*timetable-based*).

Secara umum proses CSA diawali dengan pemindaian data spasial dan temporal berupa jadwal keberangkatan dan kedatangan dari setiap rute angkutan umum pada masing-masing halte. Selanjutnya, CSA membentuk alternatif koneksi perjalanan yang layak dari perspektif pengguna untuk menghubungkan pasangan asal dan tujuan perjalanan. Skema penerapan CSA dalam proses *transit assignment* ditunjukkan pada Gambar 1.

Dalam implementasinya pada PTV VISUM, terdapat dua pendekatan utama dalam pencarian alternatif koneksi, yaitu metode *shortest path* dan *branch and bound*. Kedua pendekatan ini memiliki karakteristik dan kegunaan yang berbeda. Metode *shortest path* lebih sesuai diterapkan pada jaringan angkutan umum dengan pengguna yang memiliki tingkat pengetahuan jaringan yang tinggi, seperti pengguna komuter, sehingga cenderung memilih koneksi dengan nilai hambatan perjalanan (impedansi) minimum. Sebaliknya, metode *branch and bound* lebih tepat digunakan pada jaringan angkutan umum yang melayani pengguna dengan karakteristik dan tingkat pengetahuan jaringan yang beragam, karena mampu merepresentasikan proses pemilihan rute secara lebih realistis melalui pembentukan sekumpulan alternatif koneksi. Perbandingan tahapan *connection search algorithm* menggunakan metode *shortest path* dan *branch and bound* disajikan pada Gambar 2.

Metode *shortest path* merupakan pendekatan pencarian koneksi yang didasarkan pada prinsip pemilihan koneksi dengan nilai hambatan perjalanan (impedansi) minimum, khususnya koneksi yang menghasilkan waktu tempuh perjalanan tersingkat. Pada metode ini, *search impedance* yang digunakan dalam proses pencarian koneksi terpendek ditentukan berdasarkan pendekatan *bi-criteria selection*, yaitu dengan

mempertimbangkan dua parameter utama, yaitu waktu perjalanan (*journey time*) dan frekuensi perpindahan (*transfer frequency*), sebagaimana dirumuskan dalam Persamaan 1.

$$SI = a \text{ PJT} + b \text{ NT} \quad (1)$$

Dimana, *SI* adalah *search impedance*, *PJT* adalah *perceived journey time*, *NT* adalah *number of transfer* dan *a, b* adalah *weight parameters*.

Sementara itu, *perceived journey time* (PJT) secara umum didefinisikan sebagai penjumlahan dari seluruh komponen waktu perjalanan yang dialami penumpang, sebagaimana dirumuskan dalam Persamaan 2.

$$PJT = AC_T + IV_T + WK_T + WT_T + EG_T \quad (2)$$

Dimana, *AC_T* adalah *access time* / waktu akses menuju halte, *IV_T* adalah *in-vehicle time* / waktu perjalanan di dalam kendaraan, *WK_T* adalah *transfer walk time* / waktu berjalan kaki saat transfer, *WT_T* adalah *transfer wait time* / waktu menunggu saat transfer dan *EG_T* adalah *egress time* / waktu keluar dari sistem angkutan umum

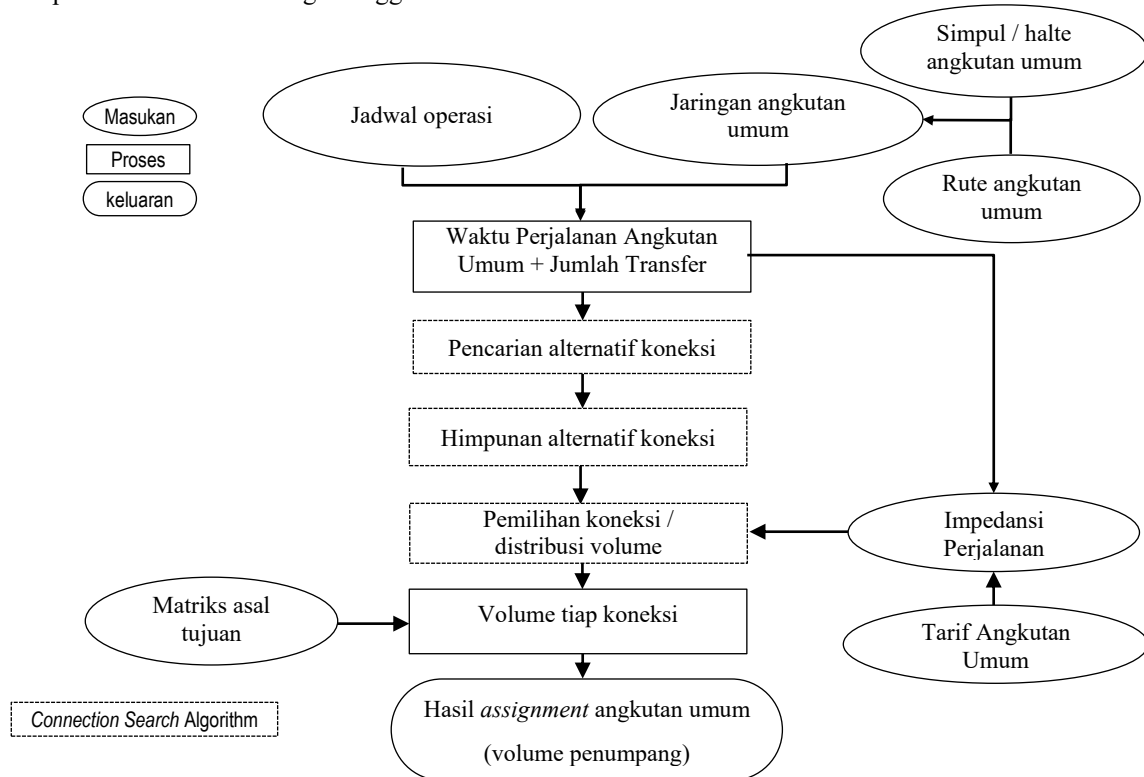
Metode *shortest path* hanya menghasilkan satu alternatif koneksi perjalanan, yaitu koneksi terbaik yang memiliki nilai hambatan perjalanan (impedansi) minimum atau waktu tempuh perjalanan paling singkat. Oleh karena itu, pada metode ini tidak diperlukan tahap tambahan untuk mendistribusikan volume perjalanan ke beberapa alternatif koneksi.

Seluruh permintaan perjalanan pada satu pasangan asal-tujuan dialokasikan pada koneksi terpilih tersebut. Selanjutnya, dengan melakukan agregasi terhadap seluruh pasangan asal-tujuan, diperoleh volume perjalanan pada jaringan angkutan umum. Perlu dicatat pada metode *shortest path* apabila terdapat dua atau lebih koneksi dengan nilai impedansi yang sama, maka koneksi-koneksi tersebut akan digunakan secara bersamaan dengan proporsi yang setara.

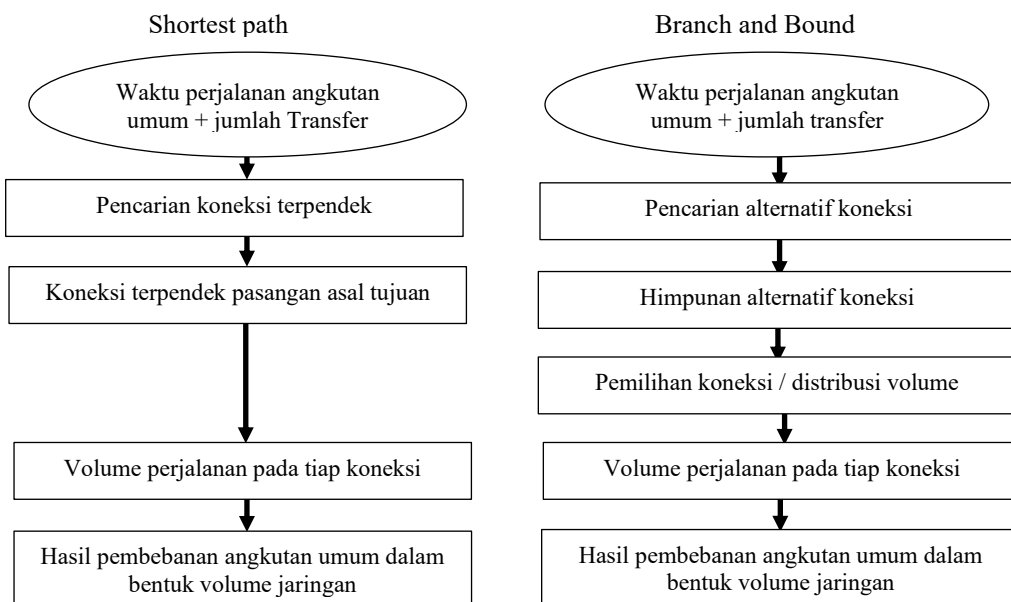
Metode *branch and bound* merupakan pendekatan pencarian koneksi berbasis multi-kriteria yang menghasilkan suatu himpunan alternatif koneksi (*connection set*). Proses pencarian diawali dengan pemindaian seluruh koneksi yang mungkin selama periode analisis, kemudian dilakukan seleksi koneksi yang relevan melalui mekanisme *branching* dan *bounding*. Seleksi ini didasarkan pada analisis dominasi, di mana koneksi yang memiliki kinerja lebih buruk dibandingkan koneksi lain pada kondisi temporal yang sama dianggap terdominasi dan dieliminasi dari himpunan koneksi. Selain itu, dalam PTV VISUM dapat diterapkan aturan tambahan untuk menghilangkan koneksi

yang tidak realistis, seperti koneksi dengan waktu tempuh yang jauh lebih besar dari rata-rata atau jumlah transfer yang berlebihan, misalnya koneksi dengan jumlah transfer lebih dari 5 kali. Jika dibandingkan dengan metode *shortest path*, pendekatan *branch and bound* memerlukan tahap tambahan berupa pemilihan. Pada tahap ini, probabilitas penggunaan setiap koneksi dalam himpunan koneksi dihitung menggunakan model

logit. Utilitas koneksi U_i didefinisikan sebagai fungsi negatif dari hambatan perjalanan (impedansi), sebagaimana dirumuskan pada Persamaan 3, di mana impedansi koneksi Imp_i merupakan kombinasi tertimbang dari *perceived journey time* (PJT_i) dan tarif perjalanan (FR_i) koneksi i , sebagaimana ditunjukkan Persamaan 4.



Gambar 1. Skema transit assignment metode *Connection Search Algorithm* (CSA)



Gambar 2. Perbandingan langkah metode CSA *Branch and Bound* vs *Shortest Path*

Perlu dicatat bahwa fungsi utilitas dari impedansi memiliki nilai negatif karena impedansi merupakan faktor yang mempunyai sifat *diminishing return* yaitu dimana nilai utilitas akan semakin buruk ketika nilai parameter semakin tinggi. Berdasarkan nilai utilitas tersebut, probabilitas penggunaan koneksi i (P_i) dihitung menggunakan model logit multinomial pada seperti pada Persamaan 5.

$$U_i = -\beta Imp_i \quad (3)$$

$$Imp_i = a PJT_i + b FR_i \quad (4)$$

$$P_i = \frac{\exp(U_i)}{\sum_i \exp(U_i)} \quad (5)$$

Dimana, U_i adalah utilitas untuk koneksi i , Imp_i adalah impedansi untuk koneksi i , PJT_i adalah *perceived journey time* untuk koneksi i , FR_i adalah tarif untuk koneksi i dan a, b adalah faktor bobot untuk PJT dan tarif

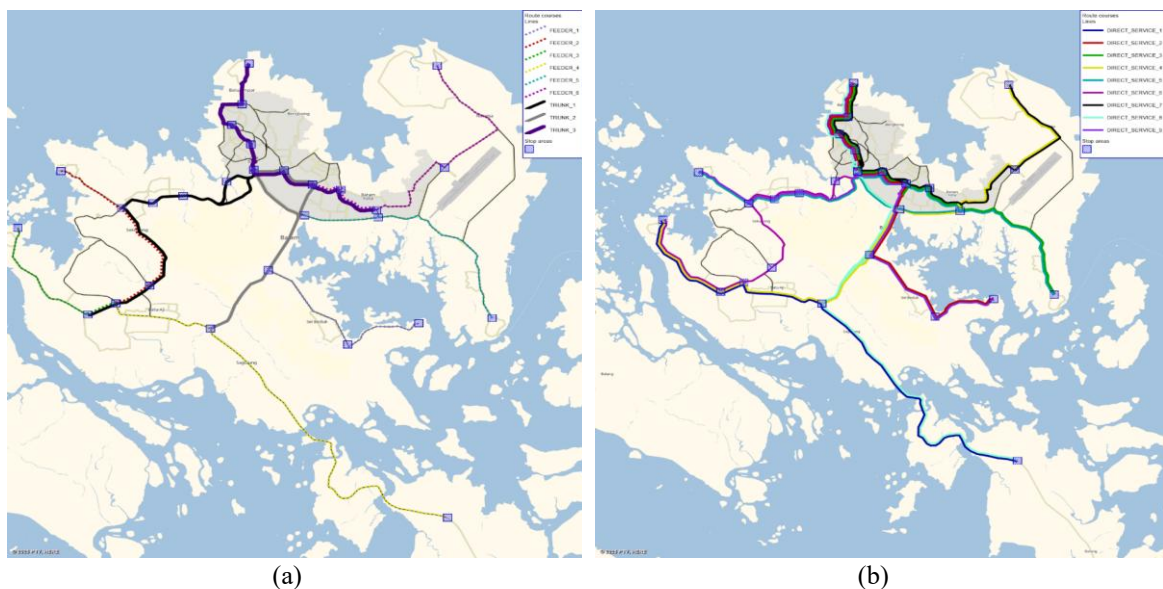
Selanjutnya, volume perjalanan untuk setiap koneksi diperoleh dengan mengalikan probabilitas P_i dengan volume pasangan asal-tujuan terkait. Sama seperti pada metode *shortest path*, agregasi volume seluruh koneksi menghasilkan volume pada jaringan sebagai keluaran akhir proses *transit assignment*.

Dalam penelitian ini, kinerja jaringan *trunk-feeder* dan *direct service* dibandingkan menggunakan sejumlah indikator kinerja yang dikelompokkan ke dalam dua aspek utama, yaitu aspek pelayanan penumpang dan aspek operasional. Seluruh indikator kinerja diperoleh dari hasil transit assignment menggunakan platform PTV VISUM. Indikator aspek pelayanan penumpang meliputi total waktu perjalanan penumpang yang terdiri atas:

(1) Waktu di dalam kendaraan, (2) Waktu berjalan kaki saat transfer, (3) Waktu menunggu, dan jumlah transfer penumpang dalam jaringan. Indikator aspek operasional jaringan angkutan umum meliputi : (1) *Load factor* sebagai ukuran utilisasi armada dengan asumsi armada adalah bus sedang dengan kapasitas 40 penumpang, (2) Total panjang perjalanan seluruh kendaraan dalam jaringan sebagai indikasi potensi biaya operasional, serta (3) Potensi pendapatan berdasarkan sistem tarif tertentu.

Studi kasus perencanaan BRT Kota Batam

Kota Batam dipilih sebagai studi kasus dalam penelitian ini karena sedang merencanakan pengembangan sistem Bus Rapid Transit (BRT). Studi kasus ini bertujuan untuk menganalisis perbedaan kinerja jaringan angkutan umum berbasis *trunk-feeder* dan *direct service* pada kondisi nyata. Kota Batam merupakan studi kasus yang relevan karena memiliki tingkat pertumbuhan perkotaan yang pesat serta karakteristik geometri jaringan jalan yang relatif sesuai untuk pengembangan koridor BRT dengan jalur khusus sebagai alternatif pengembangan rute *trunk*. Dari sisi pemodelan *transit assignment*, jaringan jalan Kota Batam juga relatif sederhana, sehingga proses pemindaian dan pembentukan koneksi perjalanan pada seluruh jaringan dapat dievaluasi dan dianalisis dengan lebih mudah. Penelitian ini menyusun model jaringan jalan dan jaringan angkutan umum di Kota Batam dengan fokus pada perencanaan jaringan Bus Rapid Transit (BRT). Analisis dilakukan terhadap dua skenario jaringan sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu sistem *trunk-feeder* dan sistem *direct service*.



Gambar 3. Perencanaan Jaringan BRT Kota Batam (a) *Trunk – feeder* (b) *Direct service*

Dalam pemodelan ini digunakan asumsi bahwa sistem BRT yang direncanakan akan menggantikan seluruh layanan angkutan umum eksisting di Kota Batam, sehingga angkutan umum eksisting tidak dimodelkan secara terpisah. Pada Gambar 3 menampilkan konfigurasi jaringan *trunk-feeder* dan *direct service* yang dikembangkan untuk Kota Batam.

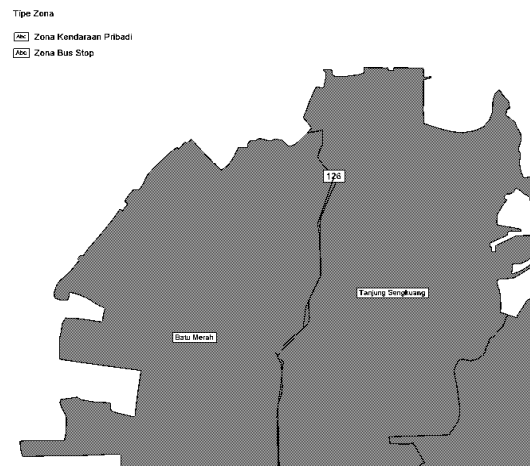
Pemodelan perencanaan angkutan BRT di kota Batam pada studi kasus terdiri dari 31 halte / bus stop dengan 9 rute, dan jumlah keberangkatan bus 162 kendaraan dengan waktu analisis 6 jam. Parameter diatas berlaku untuk kedua skenario agar perbandingan kinerja antara sistem *trunk-feeder* dan sistem *direct service* dilakukan secara *apple to apple* dimana kedua tipologi tersebut dibandingkan berdasarkan kriteria yang sama untuk mendapatkan kesimpulan yang adil dan relevan. Detail terkait operasi kendaraan untuk masing-masing sistem disajikan pada Tabel 1. Untuk perhitungan revenue, digunakan sistem berbasis jarak / *distance based fare* dimana diberlakukan ketentuan sebagai berikut: jarak kurang dari 3 km tarif Rp 3000, 3-5 km tarif Rp. 5000, 5-10 km tarif Rp. 8000 dan jarak lebih dari 10 km tarif Rp. 10.000.

Tabel 1. Detail operasi sistem *trunk-feeder* dan *direct service*

Nama rute	Keberang- katan kendaraan	Headway (menit)	Panjang rute (km)
Layanan trunk – feeder			
FEEDER_1	14	45	22
FEEDER_2	14	45	24
FEEDER_3	14	45	18
FEEDER_4	14	45	51
FEEDER_5	14	45	28
FEEDER_6	14	45	36
TRUNK_1	26	30	36
TRUNK_2	26	30	26
TRUNK_3	26	30	33
Layanan direct service			
DIRECT_SERVICE_1	18	40	69
DIRECT_SERVICE_2	18	40	58
DIRECT_SERVICE_3	18	40	56
DIRECT_SERVICE_4	18	40	81
DIRECT_SERVICE_5	18	40	61
DIRECT_SERVICE_6	18	40	70
DIRECT_SERVICE_7	18	40	60
DIRECT_SERVICE_8	18	40	82
DIRECT_SERVICE_9	18	40	66

Pengembangan permintaan perjalanan dilakukan dengan membentuk matriks asal tujuan antar zona transportasi dengan langkah-langkah sebagai berikut: (1) Pengembangan zona transportasi publik berbasis bus stop. Pada studi kasus ini terdapat 31 zona yang dimodelkan. (2) Pergerakan kendaraan pribadi berbasis zona administrasi. Pergerakan antar zona diperoleh dengan model

gravity berbasis populasi dan jarak tempuh antar zona yang kemudian divalidasi dari data traffic counting yang dilakukan pada tahun 2021. (3) Bangkitan, tarikan, dan proporsi asal-tujuan pada zona transportasi publik diturunkan secara proporsional berdasarkan pergerakan pada zona administrasi terdekat yang merepresentasikan pergerakan kendaraan pribadi. Sebagai contoh, zona transportasi publik pada halte 126 memperoleh proporsi permintaan penumpang dari zona administrasi Tanjung Sekuang dan Batu Merah (Gambar 4).



Gambar 4. Gambaran pembagian proporsi Zona angkutan umum dengan Zona Administrasi

Proporsi jumlah penumpang tersebut ditentukan berdasarkan kedekatan jarak antara zona administrasi dan lokasi halte, sehingga zona administrasi yang lebih dekat memiliki kontribusi permintaan yang lebih besar terhadap zona transportasi publik terkait. (4) Total terdapat 24.593 pergerakan dengan angkutan umum selama waktu analisis (6 jam). Perlu dijelaskan pula pengaturan parameter yang digunakan pada platform PTV VISUM. Penerapan Connection Search Algorithm (CSA) dalam PTV VISUM dilakukan menggunakan metode transit assignment berbasis jadwal (timetable-based), dengan pengaturan parameter sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Dalam penelitian ini dikembangkan tiga skenario pengaturan CSA, yaitu Branch and Bound – Default (BBD), Branch and Bound – Calibrated (BBC), dan Shortest Path – Default (SP).

Tabel 2. Kalibrasi parameter *branch and bound*

No	Parameter	BBD	BBC
1	<i>Preselection - Search impedance dan Journey time</i>	1.5 min + 10 min	1.2 min + 0 min
2	<i>Choice (β)</i>	0.25	10

Hasil dan Pembahasan

Bagian ini membahas analisis metodologi *Connection Search Algorithm* (CSA) dalam studi kasus pengembangan sistem BRT di Kota Batam. Indikator kinerja yang digunakan adalah total jumlah koneksi perjalanan yang dipertimbangkan dalam proses *transit assignment*. Jumlah koneksi yang lebih besar mengindikasikan potensi sebaran pergerakan penumpang yang lebih luas dalam jaringan angkutan umum. Tabel 3 menyajikan jumlah koneksi yang dihasilkan untuk setiap pengaturan parameter pada masing-masing skenario yang dianalisis.

Tabel 3. Jumlah koneksi metode CSA pada masing-masing skenario

Skenario	Metode	Jumlah koneksi
Trunk feeder	SP	947
	BBD	18.323
	BBC	1.191
Direct service	SP	1.148
	BBD	25.173
	BBC	2.230

Hasil analisis menunjukkan bahwa metode *shortest path* (SP) menghasilkan jumlah koneksi paling sedikit yaitu 947 koneksi dibandingkan metode CSA lainnya. Hal ini dapat dijelaskan karena metode *shortest path* hanya mempertimbangkan koneksi dengan nilai hambatan perjalanan minimum untuk setiap pasangan asal-tujuan. Sebaliknya, hasil analisis CSA menggunakan metode *branch and bound* tanpa kalibrasi (*Branch and Bound – Default*, BBD) menunjukkan jumlah koneksi yang sangat besar. Kondisi ini kurang merepresentasikan perilaku penumpang di lapangan, mengingat dalam praktiknya satu pasangan asal-tujuan umumnya hanya memiliki sejumlah terbatas rute yang realistis untuk dipertimbangkan.

Penerapan metode *branch and bound* yang telah dikalibrasi (*Branch and Bound – Calibrated*, BBC) terbukti mampu mengurangi jumlah koneksi yang dihasilkan sehingga lebih mendekati kondisi nyata, yaitu setiap pasangan asal-tujuan hanya memiliki sekitar satu hingga empat alternatif koneksi yang relevan. Berdasarkan karakteristik tersebut, metode *branch and bound* lebih sesuai untuk merepresentasikan perilaku pengguna dengan tingkat pengetahuan jaringan yang beragam, seperti wisatawan atau pengguna baru. Sebaliknya, metode *shortest path* lebih tepat diterapkan untuk pengguna komuter yang memiliki pemahaman jaringan yang baik dan cenderung memilih rute tercepat secara konsisten. Selain itu, hasil analisis CSA juga menunjukkan bahwa, dengan pengaturan parameter

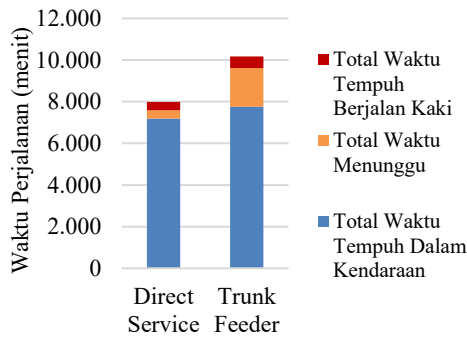
yang sama, jaringan *direct service* menghasilkan jumlah koneksi yang lebih banyak dibandingkan jaringan *trunk-feeder*. Temuan ini mengindikasikan bahwa jaringan *direct service* memiliki tingkat konektivitas asal-tujuan yang lebih tinggi, karena satu pasangan asal-tujuan dapat dilayani melalui lebih banyak alternatif koneksi. Analisis lebih lanjut mengenai perbandingan kinerja kedua skenario jaringan disajikan pada bagian berikutnya.

Selanjutnya disajikan analisis lanjutan terhadap indikator kinerja jaringan untuk membandingkan skenario jaringan BRT *trunk-feeder* dan *direct service*. Analisis ini menggunakan metode *shortest path*, karena pendekatan tersebut dinilai lebih merepresentasikan karakteristik pengguna angkutan umum di Kota Batam yang didominasi oleh komuter. Komuter merupakan pengguna angkutan umum yang secara rutin menggunakan layanan angkutan umum dan oleh karena itu, diasumsikan memiliki tingkat pengetahuan jaringan yang baik serta mampu memilih rute tercepat secara konsisten berdasarkan pasangan asal-tujuannya (Bastarianto *et al.*, 2019; Selten *et al.*, 2007).

Hasil *transit assignment* menunjukkan bahwa jaringan *trunk-feeder* menghasilkan total waktu perjalanan yang lebih panjang dibandingkan jaringan *direct service*. Total waktu perjalanan pada sistem *trunk-feeder* mencapai 10.174 perjalanan-jam, sedangkan pada sistem *direct service* sebesar 7.990 perjalanan-jam, sehingga terdapat selisih sekitar 22%. Temuan ini dapat dijelaskan oleh karakteristik sistem *trunk-feeder* yang mengharuskan penumpang berpindah rute (*transfer*), sehingga menimbulkan tambahan waktu perjalanan.

Analisis yang lebih rinci terhadap komponen waktu perjalanan memperkuat temuan tersebut. Waktu perjalanan di dalam kendaraan (*in-vehicle time*) tidak berbeda secara signifikan, dengan selisih hanya sebesar 7,3%. Sebaliknya, perbedaan terbesar terdapat pada komponen waktu menunggu saat transfer (*transfer waiting time*) dan waktu berjalan kaki saat transfer (*transfer walking time*). Jaringan *trunk-feeder* menghasilkan waktu menunggu yang lebih besar hingga 79% dan waktu berjalan kaki yang lebih besar sekitar 27% dibandingkan jaringan *direct service*.

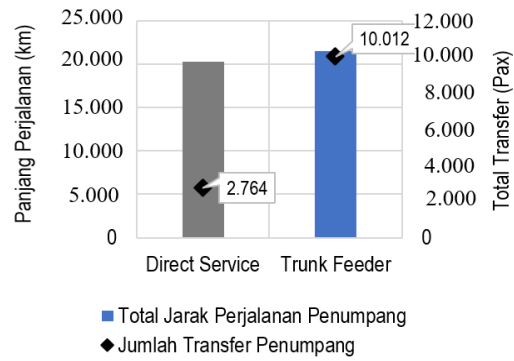
Temuan ini menunjukkan bahwa perancangan sistem *trunk-feeder* perlu memberikan perhatian khusus pada upaya meminimalkan waktu tunggu dan jarak berjalan kaki di titik transfer, misalnya melalui sinkronisasi jadwal dan penataan fasilitas pindah moda yang efisien. Gambar 5 menyajikan perbandingan total waktu perjalanan dan komponen penyusunnya untuk masing-masing skenario.



Gambar 5. Total waktu perjalanan

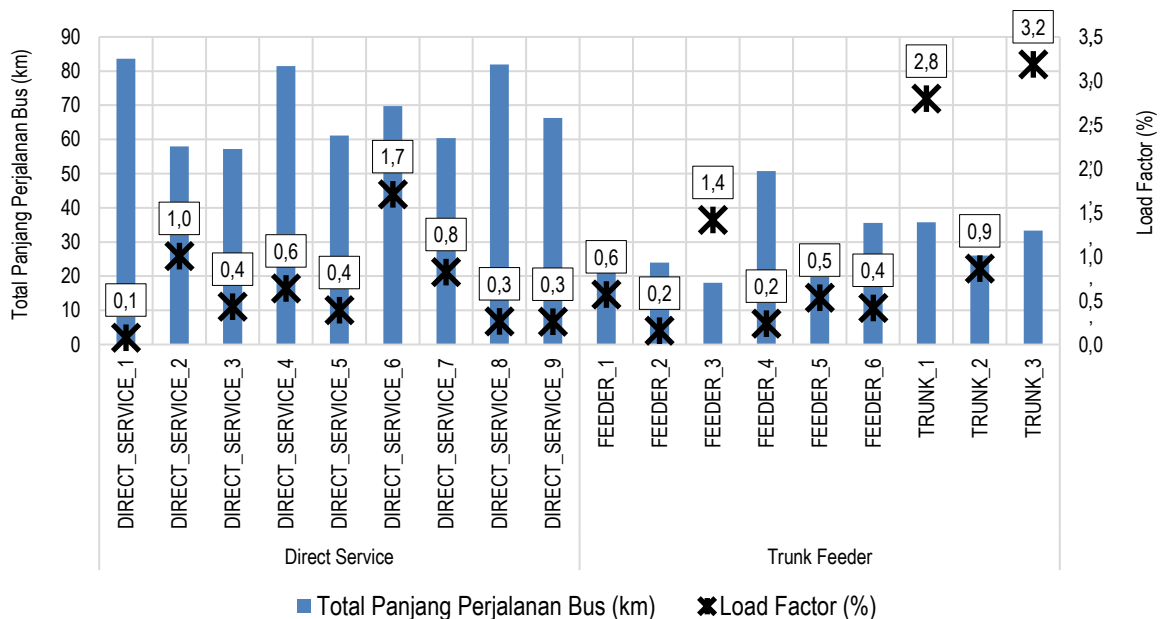
Analisis terhadap total panjang perjalanan dan jumlah transfer menunjukkan bahwa jaringan *trunk-feeder* memiliki nilai yang lebih tinggi 5.9% dibandingkan jaringan *direct service*. Total panjang perjalanan penumpang untuk sistem *trunk-feeder* adalah 214.903 perjalanan-km sedangkan *direct service* sebesar 202.980 perjalanan-km.

Parameter lain yang menarik adalah jumlah transfer penumpang untuk sistem *trunk-feeder* lebih besar hingga 262% dibandingkan sistem *direct-service* dengan jumlah transfer 10.012 untuk sistem *trunk-feeder* dan sistem *direct service* sebesar 2.764 transfer. Hal ini mencerminkan keterbatasan alternatif koneksi pada jaringan *trunk-feeder* yang menyebabkan perjalanan penumpang cenderung lebih panjang serta struktur jaringan yang mengharuskan penumpang melakukan transfer untuk mencapai tujuan akhir. Perbandingan total panjang perjalanan dan jumlah transfer masing-masing skenario ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Total panjang perjalanan dan transfer

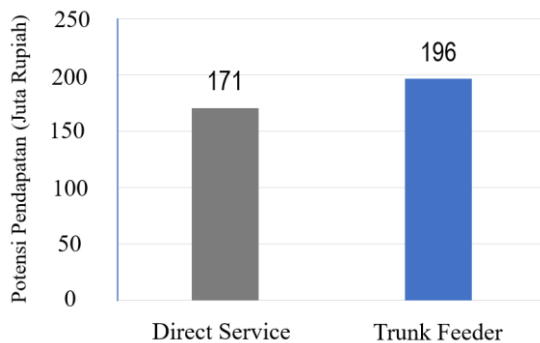
Pada Gambar 7 menyajikan perbandingan indikator kinerja operasional untuk masing-masing rute. Analisis aspek operasional perencanaan BRT dilakukan untuk setiap rute dengan menggunakan indikator utilisasi armada dan total panjang perjalanan kendaraan sebagai proksi efisiensi operasional dan potensi biaya penyelenggaraan layanan. Hasil analisis menunjukkan bahwa jaringan *trunk-feeder* memiliki efisiensi operasional yang lebih tinggi, yang ditunjukkan oleh total panjang perjalanan kendaraan yang lebih rendah dibandingkan jaringan *direct service*. Secara keseluruhan, jaringan *trunk-feeder* hanya memerlukan sekitar 44% dari total panjang perjalanan kendaraan pada jaringan *direct service*, (panjang perjalanan bus *trunk-feeder* 273,32 km, sedangkan *direct-service* 619 km) yang mengindikasikan potensi biaya operasional yang lebih rendah.



Gambar 7. Load factor dan total panjang perjalanan kendaraan

Berdasarkan indikator *load factor* (LF), tingkat keterisian dan utilisasi armada pada jaringan *trunk-feeder* lebih tinggi dibandingkan jaringan *direct service*. Rata-rata LF pada jaringan *trunk-feeder* mencapai sekitar 1,13, sedangkan pada jaringan *direct service* sebesar 0,62. Nilai LF yang melebihi satu, khususnya pada rute TRUNK_1 dan TRUNK_3, mengindikasikan perlunya penggunaan armada dengan kapasitas yang lebih besar untuk memenuhi permintaan pada rute *trunk* tersebut.

Analisis terakhir berkaitan dengan potensi pendapatan (*revenue*). Dengan penerapan sistem tarif berbasis jarak (*distance-based fare*), jaringan BRT berbasis *trunk-feeder* menunjukkan potensi pendapatan yang lebih tinggi dibandingkan jaringan *direct service*. Sejalan dengan temuan pada total panjang perjalanan penumpang, potensi pendapatan jaringan *trunk-feeder* tercatat sekitar 13% lebih tinggi dibandingkan jaringan *direct service*, meningkat dari 171 juta rupiah menjadi 196 juta rupiah. Perbandingan potensi pendapatan kedua jaringan tersebut disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Potensi pendapatan (juta rupiah)

Temuan-temuan tersebut mengindikasikan bahwa pemilihan pola operasi BRT idealnya tidak bersifat kaku, melainkan dapat diarahkan pada strategi operasional yang memanfaatkan keunggulan masing-masing pola sekaligus memitigasi kelemahannya. Pertama, mengingat kelemahan utama *trunk-feeder* terletak pada waktu tunggu saat transfer strategi operasional yang paling relevan adalah sinkronisasi jadwal antara headway rute *trunk* dan rute *feeder* di titik transfer, khususnya pada feeder yang melayani rute yang telah menunjukkan *load factor* tinggi. Penyelarasan jadwal ini berpotensi menekan waktu tunggu tanpa mengubah struktur jaringan maupun menambah armada.

Kedua, dari sisi kebijakan tarif, karena *trunk-feeder* menghasilkan total panjang perjalanan penumpang yang lebih besar namun juga membebani penumpang dengan biaya transfer tambahan penerapan skema tarif terintegrasi dengan

mekanisme free-transfer atau single-fare antara rute *trunk* dan *feeder* menjadi relevan untuk direkomendasikan. Skema ini menjaga daya tarik *trunk-feeder* bagi pengguna sekaligus tetap memungkinkan operator memperoleh potensi pendapatan yang lebih tinggi dari total jarak tempuh penumpang yang lebih panjang, sebagaimana teridentifikasi dalam analisis *load factor* dan panjang perjalanan penumpang pada studi ini.

Ketiga, dari perspektif perencanaan jaringan angkutan umum, temuan bahwa efisiensi operasional *trunk-feeder* terkonsentrasi pada rute-rute *trunk* tertentu sementara rute lain tidak menunjukkan pola serupa, mengindikasikan bahwa penerapan *trunk-feeder* sebaiknya bersifat selektif per-koridor berdasarkan karakteristik permintaan, bukan diterapkan secara seragam di seluruh jaringan. Hal ini membuka ruang bagi strategi jaringan hibrida, di mana koridor dengan volume permintaan tinggi dan pola pergerakan terkonsentrasi dilayani dengan *trunk-feeder* untuk efisiensi operator, sementara koridor dengan permintaan lebih tersebar tetap dilayani *direct service* untuk menjaga kualitas layanan pengguna.

Terakhir, dari sisi regulasi, ketiga strategi di atas yaitu penjadwalan terintegrasi, tarif terintegrasi, dan penerapan pola operasi secara selektif per-koridor memerlukan kewenangan perencanaan yang terpusat pada satu otoritas pengelola angkutan umum kota, agar keputusan desain rute, penjadwalan, dan tarif dapat dikoordinasikan lintas rute *trunk* dan *feeder* secara konsisten, alih-alih diserahkan pada masing-masing operator rute secara independen.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan evaluasi kinerja jaringan transportasi publik menggunakan metode *Connection Search Algorithm* (CSA) pada platform PTV VISUM, dengan membandingkan dua tipe jaringan, yaitu *trunk-feeder* dan *direct service*, melalui studi kasus perencanaan jaringan BRT di Kota Batam adalah sebagai berikut.

Connection Search Algorithm merupakan metode yang umum digunakan dalam pembebanan jaringan angkutan umum (*transit assignment*). Dalam PTV VISUM, CSA dapat diterapkan melalui dua pendekatan, yaitu *shortest path* dan *branch and bound*. Metode *shortest path* menghasilkan jumlah koneksi yang lebih sedikit karena hanya mempertimbangkan koneksi terbaik, sehingga lebih sesuai diterapkan pada sistem transit dengan perilaku penumpang yang relatif homogen, seperti pengguna komuter. Sebaliknya metode *branch and bound* lebih tepat digunakan untuk pengguna yang

lebih heterogen seperti turis dan pengguna awal. Hasil perbandingan jaringan *trunk-feeder* dan *direct service* menunjukkan bahwa tidak terdapat satu sistem yang secara mutlak lebih unggul dibandingkan yang lain. Sistem *trunk-feeder* lebih sesuai diterapkan pada kota dengan tingkat pergerakan yang tidak terlalu tinggi dan keterbatasan kapasitas fiskal, karena unggul dari sisi efisiensi operasional BRT, ditunjukkan oleh utilisasi armada yang lebih tinggi serta potensi pendapatan yang lebih besar. Sebaliknya, sistem *direct service* memberikan kinerja yang lebih baik dari sisi konektivitas penumpang, khususnya dalam hal waktu perjalanan yang lebih singkat dan jumlah transfer yang lebih sedikit.

Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada peningkatan desain infrastruktur transfer dalam sistem BRT berbasis *trunk-feeder*, mengingat waktu transfer merupakan salah satu kelemahan utama sistem tersebut. Selain itu, kajian lanjutan juga dapat menganalisis secara eksplisit pengaruh skema tarif terhadap pemilihan rute penumpang, khususnya pada kota-kota dengan sistem transportasi publik multimoda dan multi operator, seperti Jakarta. Perubahan kebijakan tarif dan dampaknya terhadap pengguna angkutan umum juga merupakan topik riset lanjutan yang relevan untuk dikaji melalui pendekatan pembebanan jaringan transportasi publik.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada program studi magister STJR ITB yang telah meminjamkan software PTV VISUM sebagai perangkat dalam melakukan analisis pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

Anggraini, R., Sugiarto, & Caesarina, I. (2019). Kajian Penentuan Tarif Bus Trans Koetaradja berdasarkan Ability to Pay(ATP) dan Willingness to Pay(WTP). *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 2, 81–89.

Arbex, R. O., & Da Cunha, C. B. (2015). Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81, 355–376. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.06.014>

Bastarianto, F., Irawan, M., Choudhury, C., Palma, D., & Muthohar, I. (2019). A Tour-Based Mode Choice Model for Commuters in Indonesia. *Sustainability*, 11(3), 788. <https://doi.org/10.3390/su11030788>

Cancela, H., Mauttone, A., & Urquhart, M. E. (2015). Mathematical programming formulations for transit network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, 17–37. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.03.006>

Derrible, S., & Kennedy, C. (2011). Applications of graph theory and network science to transit network design. *Transport Reviews*, 31(4), 495–519. <https://doi.org/10.1080/01441647.2010.543709>

Feng, X., Zhu, X., Qian, X., Jie, Y., Ma, F., & Niu, X. (2019). A new transit network design study in consideration of transfer time composition. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 66(3), 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.019>

Frazila, R. B., Zukhruf, F., Nugroho, T. S., Karsaman, R. H., & Rahman, H. (2021). Pengembangan metode penilaian indikator transportasi berkelanjutan di Indonesia. *Jurnal Teknik Sipil*, 28(1), 73–82. <https://doi.org/10.5614/jts.2021.28.1.8>

Fu, Q., Liu, R., & Hess, S. (2012). A Review on Transit Assignment Modelling Approaches to Congested Networks: A New Perspective. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, 1145–1155. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.829>

Gschwender, A., Jara-Díaz, S., & Bravo, C. (2016). Feeder-trunk or direct lines? Economies of density, transfer costs and transit structure in an urban context. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 88, 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.03.001>

Hörcher, D., & Tirachini, A. (2021). A review of public transport economics. *Economics of Transportation*, 25, 100196. <https://doi.org/10.1016/j.ecotra.2021.100196>

Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M. (2009). Transit route network design problem: Review. *Journal of Transportation Engineering*, 135(8), 491–505. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2009\)135:8\(491\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:8(491))

Lee, Y. J., & Vuchic, V. R. (2005). Transit network design with variable demand. *Journal of Transportation Engineering*, 131(1), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:1(1))

Liu, Y., Bunker, J., & Ferreira, L. (2010). Transit Users' Route-Choice Modelling in Transit

Assignment: A Review. *Transport Reviews*, 30(6), 753–769.

<https://doi.org/10.1080/01441641003744261>

McLeod, S., Scheurer, J., & Curtis, C. (2017). Urban Public Transport: Planning Principles and Emerging Practice. *Journal of Planning Literature*, 32(3), 223–239.

<https://doi.org/10.1177/0885412217693570>

Mohaymany, A. S., & Gholami, A. (2010). Multimodal feeder network design problem: Ant colony optimization approach. *Journal of Transportation Engineering*, 136(4), 323–331. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000110](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000110)

Ferro, P. S., & Behrens, R. (2015). From direct to trunk-and-feeder public transport services in the Urban South: Territorial implications. *Journal of Transport and Land Use*, 8(1), 123–136.

Pattnaik, B. S. B., Mohan, S., & Tom, V. M. (1998). Urban Bus Transit Route Network Design Using Genetic Algorithm. *Journal of Transport Geography*, 3(August), 368–375.

Prayudyanto, M. N. (2021). Model Buy The Services Angkutan Umum Massal Kota Metropolitan: Apakah Subsidi Masih Diperlukan. *Jurnal Penelitian Transportasi Darat*, 23(1), 55–71.

<https://doi.org/10.25104/jptd.v23i1.1734>

Rita Kurniati, N. L. W. (2021). Dampak Ekonomi Pengoperasian Transjakarta Ditinjau dari Persepsi Pengguna. *Jurnal Penelitian Transportasi Darat*, 22(2), 194–205.

<https://doi.org/10.25104/jptd.v22i2.1669>

Selten, R., Chmura, T., Pitz, T., Kube, S., & Schreckenberg, M. (2007). Commuters route choice behaviour. *Games and Economic Behavior*, 58(2), 394–406.

<https://doi.org/10.1016/j.geb.2006.03.012>

Weckström, C., Kujala, R., Mladenović, M. N., & Saramäki, J. (2019). Assessment of large-scale transitions in public transport networks using open timetable data: case of Helsinki metro extension. *Journal of Transport Geography*, 79, 102470. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102470>