

Rekomendasi Rute Pilot Bus Listrik untuk Trans Semarang

Desember 2023





Institute for Transportation Development Policy (ITDP) merupakan lembaga nirlaba yang sudah berdiri sejak tahun 1985 dan berkantor pusat di New York, Amerika Serikat, dengan fokus utama menciptakan transportasi yang berkelanjutan di kota-kota di dunia. ITDP Indonesia telah lebih dari dua puluh tahun memberikan bantuan teknis kepada pemerintah kota-kota di Indonesia untuk peningkatan layanan transportasi publik, peningkatan aksesibilitas pejalan kaki dan pesepeda, transit-oriented development (TOD) serta manajemen pengendalian kendaraan bermotor.

Didukung oleh:



Dipublikasikan oleh:

Institute for Transportation and Development Policy (ITDP) Indonesia

Disusun oleh:

Vinensia Nanlohy

Editor:

Mizandaru Wicaksono

Alfisahr Ferdian

Rifqi Khoirul Anam

Kontak:

Fani Rachmita - Senior Communications & Partnership Manager

fani.rachmita@itdp.org

Vinensia Nanlohy - Public Transport & Electrification Associate II

vinensia.nanlohy@itdp.org

Dipublikasikan pada:

Desember 2023

Daftar Isi

Daftar Isi.....	3
Daftar Gambar.....	5
Daftar Tabel.....	6
Kata Pengantar.....	7
1 Pendahuluan.....	8
1.1 Latar Belakang.....	8
1.2 Tujuan.....	11
2 Gambaran Umum Transportasi Publik di Semarang.....	12
2.1 <i>Trans Semarang</i>	12
2.1.1 Operasional Trans Semarang.....	12
2.2 Rencana Bus Rapid Transit (BRT) Semarang.....	14
2.2.1 Hasil Pre-Feasibility Study ITDP Indonesia.....	15
2.2.2 Hasil Feasibility Study PT SMI.....	17
2.2.3 Perbandingan Hasil Studi ITDP Indonesia dengan PT SMI.....	20
3 Teknologi Bus Listrik dan Infrastruktur Pengisian Daya.....	22
3.1 Bus Listrik.....	22
3.2 Teknologi Baterai.....	24
3.3 Teknologi Pengisian Daya.....	26
3.3.1 Pengisian Daya Konduktif.....	26
3.3.2 Pengisian Daya Induktif.....	29
3.4 Strategi Pengisian Daya.....	30
3.4.1 Pengisian Daya di Malam Hari (overnight charging/depot charging).....	30
3.4.2 Pengisian Daya di Siang Hari (Opportunity charging/fast charging).....	31
3.4.3 Penukaran Baterai (Battery Swap).....	31
4 Metodologi dan Analisis Rute Pilot Bus Trans Semarang.....	33
4.1 Metodologi Pemilihan Rute Pilot Bus Listrik.....	33
4.2 Analisis Elektrifikasi Rute Pilot Bus Listrik untuk Trans Semarang.....	33
4.2.1 Pengumpulan Data dan Analisis Pasar.....	33
4.2.2 Identifikasi Rute Potensial Pilot Bus Listrik.....	35
4.2.3 Identifikasi Strategi Pengisian Daya untuk Rute Potensial Pilot Bus Listrik.....	36
4.2.4 Analisis Total Biaya Kepemilikan.....	43
4.2.5 Analisis Dampak Lingkungan.....	48
4.3 Perencanaan Infrastruktur untuk Rute Pilot Bus Listrik.....	50
4.3.1 Konseptual Desain untuk Tipikal Depo Bus Listrik.....	50
4.3.2 Dampak Implementasi Rute Pilot Bus Listrik pada Jaringan Listrik.....	54
5 Penutup.....	56

6 Daftar Pustaka.....	58
7 Lampiran.....	60
Lampiran A. Komponen Biaya untuk Analisis Total Biaya Kepemilikan (TCO).....	60
Lampiran B. Faktor Emisi.....	63

Daftar Gambar

Gambar 1. Konsentrasi PM2.5 di beberapa kota besar di Indonesia selama lima tahun terakhir	9
Gambar 2. Target Kementerian Perhubungan terkait Elektrifikasi Transportasi Publik di Indonesia.....	11
Gambar 3. Bus sedang Trans Semarang (kiri) dan armada feeder Trans Semarang (kanan) (Sumber: ITDP Indonesia, 2022).....	13
Gambar 4. Rute Trans Semarang Saat Ini.....	15
Gambar 5. Rekomendasi Jalur Khusus dan Stasiun BRT Semarang.....	16
Gambar 6. Usulan Rute Direct Service BRT Semarang.....	17
Gambar 7. Lokasi Stasiun BRT Rencana Hasil Studi PT SMI.....	19
Gambar 8. Usulan Rute BRT Hasil Studi PT SMI.....	20
Gambar 9. Penggunaan Plug-in Charger di Transjakarta (Sumber: ITDP Indonesia, 2022).....	27
Gambar 10. Tipe Konektor Plug-in.....	28
Gambar 11. Penggunaan pantograph up di Bandar Udara Schiphol Amsterdam (kiri) dan penggunaan pantograph down di Hamburg, Jerman (kanan).....	29
Gambar 12. Penggunaan In-motion charging untuk bus trolis di Gdynia, Polandia.....	30
Gambar 13. Contoh wireless charging di Washington, Amerika Serikat.....	30
Gambar 14. Metodologi Pemilihan Rute Pilot Bus Listrik.....	34
Gambar 15. Potensi Lokasi Pengisian Daya untuk Elektrifikasi Trans Semarang berdasarkan Rencana Koridor BRT Semarang.....	38
Gambar 16. Hasil Analisis TCO/km untuk Rute Koridor 1 Trans Semarang (Durasi Kontrak 10 Tahun).....	46
Gambar 17. Hasil Analisis TCO/km untuk Rute Koridor 4 Trans Semarang (Kontrak 10 Tahun)....	47
Gambar 18. Hasil Analisis TCO/km untuk Rute Koridor 1 Trans Semarang (Kontrak 15 Tahun)...	48
Gambar 19. Hasil Analisis TCO/km untuk Rute Koridor 4 Trans Semarang (Kontrak 15 Tahun)...	48
Gambar 20. Estimasi Penurunan Polusi Udara dari Implementasi Rute Pilot Bus Listrik di Koridor 1 dan Koridor 4 Trans Semarang.....	50
Gambar 21. Estimasi Penurunan Emisi GRK dari Implementasi Rute Pilot Bus Listrik di Koridor 1 dan Koridor 4 Trans Semarang.....	51
Gambar 22. Urutan kegiatan di depo bus listrik.....	52
Gambar 23. Desain Tipikal untuk Depo Bus Listrik.....	53
Gambar 24. Rekomendasi Rute Pilot Bus Listrik Trans Semarang dan Lokasi Pengisian Daya....	58

Daftar Tabel

Tabel 1. Rute Trans Semarang.....	13
Tabel 2. Usulan Rute BRT Hasil Studi ITDP Indonesia.....	16
Tabel 3. Rencana Kebutuhan Armada untuk Rute Hasil Studi PT SMI.....	19
Tabel 4. Perbandingan Hasil Studi ITDP Indonesia dengan Hasil Studi PT SMI.....	21
Tabel 5. Hasil Analisis Pasar Bus Besar Listrik (Ukuran 12 m).....	22
Tabel 6. Hasil Analisis Pasar Bus Sedang Listrik (Ukuran 9 m).....	23
Tabel 7. Rangkuman Teknologi Pengisian Daya.....	30
Tabel 8. Rangkuman terkait Strategi Pengisian Daya Baterai.....	32
Tabel 9. Rekomendasi Rencana Operasional Trans Semarang.....	34
Tabel 10. Karakteristik Rute Trans Semarang untuk Pemilihan Rute Pilot Bus Listrik.....	36
Tabel 11. Estimasi Jarak Terdekat dari Terminus Rute Trans Semarang ke Depo Potensial.....	37
Tabel 12. Estimasi Jarak Terdekat dari Terminus Rute Trans Semarang ke Depo Potensial.....	39
Tabel 13. Analisis Ketersediaan Lahan untuk Pengisian Daya di Siang Hari (Jika Diperlukan).....	41
Tabel 14. Analisis Strategi Pengisian Daya berdasarkan Ketersediaan Lahan untuk Pengisian Daya di Siang Hari.....	42
Tabel 15. Strategi Pengisian Daya untuk Rute Pilot Bus Listrik Trans Semarang.....	43
Tabel 16. Alokasi ruang tiap fasilitas untuk depo bus listrik khusus.....	53
Tabel 17. Estimasi Kedatangan Bus Listrik pada Depo untuk Rute Pilot Trans Semarang.....	53
Tabel 18. Estimasi Konsumsi Energi untuk Pengisian Daya Malam Hari di Depo.....	54
Tabel 19. Estimasi Konsumsi Energi untuk Pengisian Daya Malam Hari di Depo.....	55
Tabel 20. Rangkuman Analisis Rute Pilot Bus Listrik Trans Semarang.....	56

Kata Pengantar

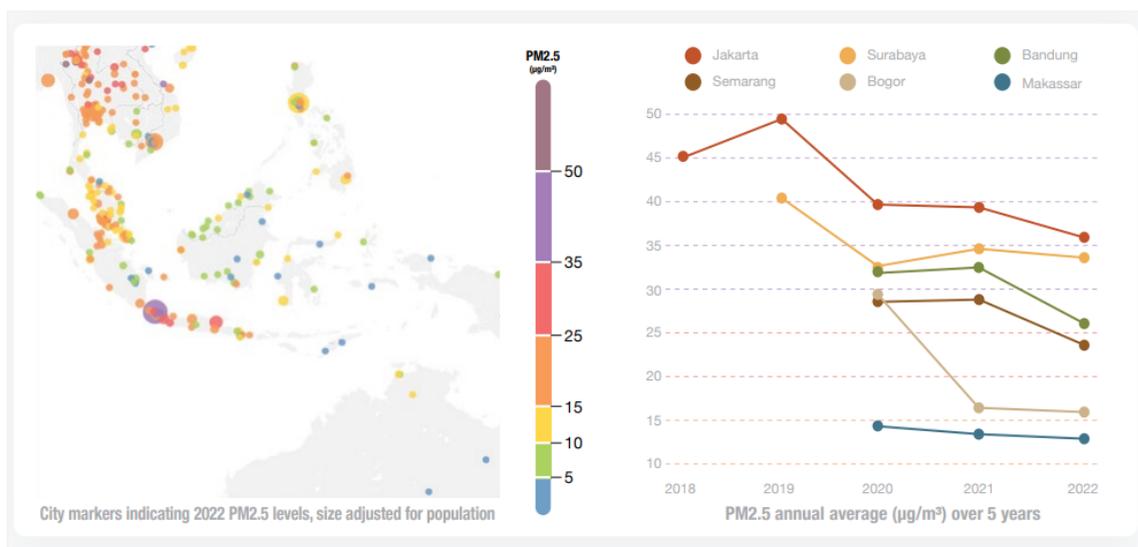
Sejak tahun 2016 hingga tahun 2022, Institute for Transportation and Development Policy (ITDP) telah melakukan asistensi teknis dan pendampingan terhadap Pemerintah Kota Semarang dalam mempercepat transisi ke pembangunan sistem transportasi perkotaan yang berkelanjutan dan berkeadilan. Kegiatan ini meliputi rekomendasi pengembangan *Bus Rapid Transit* (BRT), *non-motorized transportation* (kendaraan tidak bermotor), kebijakan *traffic demand management* (TDM), dan mobilitas inklusif di Kota Semarang.

Melanjutkan program yang telah dilakukan sebelumnya, di tahun 2022-2023 ITDP melalui kegiatan “Scaling Up Clean Urban Mobility in Indonesia” yang didanai oleh ClimateWorks Foundation (CWF) telah berkomitmen untuk membantu Pemerintah Kota Semarang dalam menginisiasi dan menerapkan sistem transportasi perkotaan yang terintegrasi, rendah karbon, dan inklusif. Salah satu hasil dari kegiatan ini adalah Dokumen Rekomendasi Rute Pilot Bus Listrik untuk Trans Semarang. Dokumen ini dibuat sebagai rekomendasi awal untuk membantu Pemerintah Kota Semarang dalam implementasi bus listrik pada sistem Trans Semarang, yang rencananya akan diadopsi ke dalam rencana pembangunan sistem BRT di Kota Semarang. Dokumen ini diharapkan mampu memberikan gambaran kepada para pemangku kepentingan terkait kebutuhan operasional bus listrik untuk rute pilot, yang meliputi kebutuhan armada, strategi pengisian daya dan jumlah alat pengisian daya yang diperlukan, analisis total biaya kepemilikan (TCO), manfaat lingkungan dan analisis awal terkait kebutuhan infrastruktur untuk mendukung implementasi pilot bus listrik.

1 Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Kualitas udara yang buruk merupakan ancaman bagi sebagian besar kota-kota di Indonesia, karena memberikan dampak negatif terhadap kondisi kesehatan masyarakat. Berdasarkan konsentrasi *particulate matter* (PM)_{2.5}¹, data dari IQAir mencatat bahwa pada tahun 2022, Indonesia menempati peringkat pertama kondisi kualitas udara terburuk di Asia Tenggara (peringkat 26 di dunia) dengan rata-rata konsentrasi PM_{2.5} mencapai 30,4 mikrogram per meter kubik (µg/m³).² Meskipun angka rata-rata konsentrasi PM_{2.5} ini lebih rendah 11% dari tahun 2021, angka ini enam kali lipat lebih tinggi dari standar yang ditetapkan oleh *World Health Organization* (WHO) untuk konsentrasi PM_{2.5} tahunan yaitu sebesar 5 µg/m³. Beberapa kota besar di Indonesia, seperti Jakarta, Surabaya, dan Bandung bahkan memiliki rata-rata konsentrasi PM_{2.5} yang lebih tinggi dari rata-rata nasional pada tahun 2022 (lihat Gambar 1).



Gambar 1. Konsentrasi PM_{2.5} di beberapa kota besar di Indonesia selama lima tahun terakhir³

Salah satu upaya Pemerintah Indonesia untuk mengatasi masalah polusi udara dan menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) adalah melalui dekarbonisasi sektor transportasi. Hal ini dikarenakan, di Indonesia, emisi dari sektor transportasi menjadi penyumbang 27% dari emisi karbon dioksida (CO₂)—terbesar kedua setelah sektor ketenagalistrikan—di sektor energi

¹ PM 2.5 adalah partikel dengan ukuran diameter sekitar 2,5 mikrometer, yang umumnya berasal dari pembakaran kayu, asap kompor, asap kendaraan bermotor, sisa pembakaran energi dari pembangkit listrik dan industri, serta asap rokok. Karena ukurannya yang sangat kecil, partikel ini dapat melayang di udara dalam waktu lama, serta dapat terhirup manusia dan memicu gangguan kesehatan, seperti asma, sakit paru-paru, sakit jantung, sampai kanker.

² IQAir. (2022). *Laporan Kualitas Udara Dunia Peringkat PM 2.5 Region dan Kota*. <https://www.iqair.com/id/world-air-quality-report>.

³ Ibid.

pada tahun 2020.⁴ Emisi di sektor transportasi ini didominasi oleh penggunaan bahan bakar fosil. Untuk mengurangi polusi udara ini, pada tahun 2019, Pemerintah Indonesia telah mengesahkan Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (*Battery Electric Vehicle*) untuk transportasi jalan. Sejak dikeluarkannya Perpres ini, beberapa kebijakan pendukung telah dikeluarkan oleh kementerian terkait untuk mendukung percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (KBLBB) di Indonesia.

Agenda nasional percepatan KBLBB ini menargetkan penjualan kendaraan listrik setidaknya 20% dari total penjualan kendaraan di pasar Indonesia pada tahun 2025. Data dari Kementerian Energi Sumber Daya dan Mineral (ESDM) mencatat bahwa terdapat sebanyak 53.091 unit kendaraan listrik terdiri dari 40.312 unit kendaraan roda dua, 297 unit kendaraan roda tiga, 12.395 unit mobil penumpang, 77 unit bus, dan 10 unit mobil barang yang terdaftar di awal tahun 2023.⁵ Untuk mencapai target adopsi KBLBB, salah satu fokus Pemerintah Indonesia adalah adopsi kendaraan listrik pada sistem transportasi publik berbasis jalan. Pemerintah DKI Jakarta, misalnya, telah menerbitkan Keputusan Gubernur (Kepgub) Nomor 1053 Tahun 2022 tentang Pedoman Percepatan Program Penggunaan Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai Dalam Layanan Angkutan Transjakarta. Dalam peraturan ini, terdapat target percepatan penggunaan 10.047 armada KBLBB dalam layanan Transjakarta pada tahun 2030.⁶ Selain itu, Pemerintah DKI Jakarta juga berkomitmen dalam penyediaan infrastruktur pengisian daya KBLBB dan pengadaan dan/atau pembiayaan kegiatan percepatan KBLBB dalam layanan transportasi publik di Provinsi DKI Jakarta.⁷

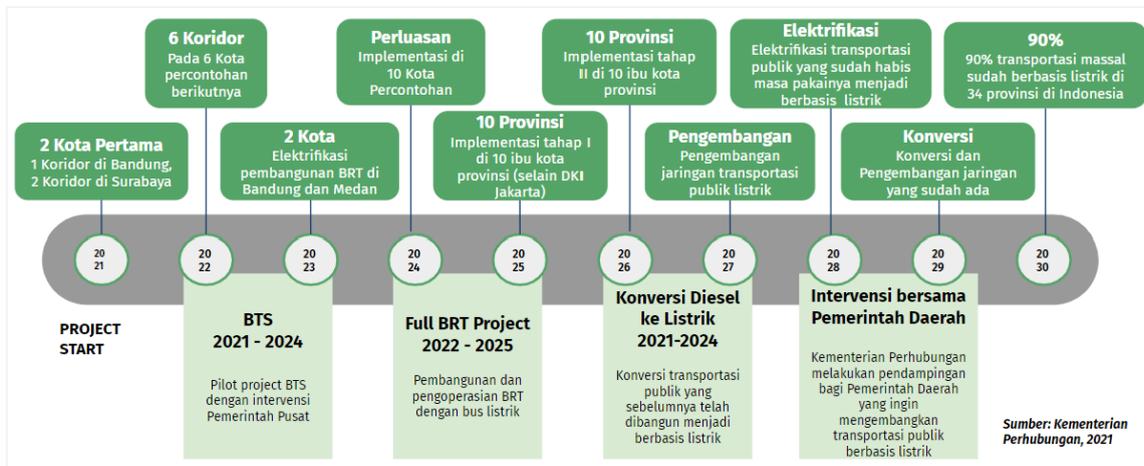
Di tingkat nasional, Pemerintah Indonesia melalui Kementerian Perhubungan telah menetapkan target untuk melakukan elektrifikasi 90% transportasi publik berbasis jalan di 34 provinsi di Indonesia pada tahun 2030. Target implementasi bus listrik (di luar Transjakarta) dan menggunakan intervensi Pemerintah Pusat atau Pemerintah Daerah untuk mengembangkan transportasi publik di luar DKI Jakarta dapat dilihat pada Gambar 2.

⁴ Climate Transparency. (2021). *Climate Transparency Report: Comparing G20 Climate Action Towards Net Zero*. <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2021/10/CT2021Indonesia.pdf>.

⁵ Kompas.com. (2023). *Jumlah Kendaraan Listrik di Indonesia diklaim Terus Meningkat*. <https://otomotif.kompas.com/read/2023/03/08/141200115/jumlah-kendaraan-listrik-di-indonesia-diklaim-terus-meningkat#:~:text=%E2%80%9CBerdasarkan%20jumlah%20sertifikat%20registrasi%20uji.439%20unit%2C%E2%80%9D%20ucap%20Inten>. (diakses pada 28 April 2023, Pukul 16.05).

⁶ Gubernur Daerah Khusus Ibukota Jakarta. (2022). *Keputusan Gubernur Nomor 1053 Tahun 2022 tentang Pedoman Percepatan Program Penggunaan Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai Dalam Layanan Angkutan Transjakarta*.

⁷ Ibid.



Gambar 2. Target Kementerian Perhubungan terkait Elektrifikasi Transportasi Publik di Indonesia

Sebagai langkah awal adopsi bus listrik pada sistem transportasi publik berbasis jalan di kota-kota di Indonesia, Kementerian Perhubungan melalui program “buy-the-service (BTS) Teman Bus”⁸ telah melakukan implementasi bus listrik di Bandung dan Surabaya pada Desember 2022. Selain program BTS, Kementerian Perhubungan juga berencana membangun sistem *bus rapid transit (BRT)* baru di beberapa kota metropolitan di Indonesia seperti Medan, Bandung, Semarang, Surabaya dan Makassar, yang merupakan kota prioritas pembangunan transportasi massal dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020-2024.⁹ Dari kelima kota tersebut, sistem BRT di wilayah metropolitan Bandung dan Medan rencananya akan mulai dibangun pada tahun 2023 dan diharapkan untuk beroperasi sepenuhnya pada tahun 2027 dengan menggunakan bus listrik.¹⁰

Selain kedua kota tersebut, Kota Semarang juga merupakan salah satu kota yang telah fokus untuk melakukan pembangunan sistem BRT. Dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RPJMD) Kota Semarang Tahun 2021-2026 terdapat rencana pembangunan BRT *dedicated lane*.¹¹ Pembangunan BRT dengan jalur khusus di Kota Semarang ini akan didasarkan pada rute transportasi publik eksisting. Rute Trans Semarang yang saat ini melayani kebutuhan transportasi publik di Kota Semarang akan diintegrasikan ke dalam sistem BRT Semarang.¹² Pembangunan BRT Semarang ini diharapkan dapat meningkatkan layanan transportasi publik dari segi kapasitas, kualitas, dan cakupan layanan, serta dapat memberikan manfaat lingkungan dari rencana transportasi rendah karbon. Untuk mencapai manfaat ini, salah satu rekomendasi yang diberikan pada studi kelayakan BRT Semarang adalah penggunaan teknologi kendaraan yang lebih bersih, yaitu dengan penggunaan bus jenis EURO IV ke atas, termasuk bus listrik. Penerapan bus listrik pada perencanaan sistem BRT Semarang sangat diperlukan karena dapat memberikan manfaat untuk mengatasi masalah polusi udara di kota ini,

⁸ Skema pembelian layanan oleh pemerintah pusat dari anggaran pendapatan dan belanja negara (APBN) Kementerian Perhubungan untuk membayar operator yang menyediakan layanan transportasi publik dengan mekanisme lelang berbasis standar pelayanan minimal (SPM) yang telah ditetapkan pada trayek tertentu di beberapa kota di Indonesia.

⁹ Presiden Republik Indonesia. (2020). *Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional 2020-2024*.

¹⁰ The World Bank. (2022). *E-mobility Adoption Road Map For The Indonesian Mass Transit Program*.

¹¹ Wali Kota Semarang. (2021). *Peraturan Daerah Kota Semarang Nomor 6 Tahun 2021 Tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Tahun 2021-2026*.

¹² PT Mitra Pembangunan Jaya. (2020). *Studi Kelayakan Bus Rapid Transit Semarang: Laporan Akhir*.

mengurangi dampak perubahan iklim, dan dapat menciptakan peluang untuk pembiayaan ramah lingkungan.

Institute for Transportation and Development Policy (ITDP) Indonesia melalui kegiatan *Scaling Up Clean Urban Mobility in Indonesia* yang didanai oleh ClimateWorks Foundation (CWF) sejak tahun 2022 telah berkomitmen untuk membantu Pemerintah Kota Semarang untuk mempercepat dan mewujudkan sistem transportasi yang berkelanjutan dan berkeadilan. Salah satu fokus dari kegiatan ini adalah analisis adopsi bus listrik pada sistem BRT Semarang. Didasarkan pada studi kelayakan BRT Semarang yang menunjukkan bahwa seluruh rute bus Trans Semarang saat ini akan diadopsi ke dalam sistem BRT Semarang, maka studi ini akan berfokus pada analisis awal rute Trans Semarang yang dapat dijadikan rute *pilot* untuk adopsi bus listrik pada sistem transportasi publik di Kota Semarang.

1.2 Tujuan

Dokumen ini bertujuan memberikan rekomendasi awal untuk membantu Pemerintah Kota Semarang dalam implementasi bus listrik pada sistem Trans Semarang. Lingkup utama dari dokumen ini adalah, sebagai berikut:

- Memberikan rekomendasi rute *pilot* untuk implementasi bus listrik pada sistem Trans Semarang; dan
- Menganalisis kebutuhan operasional bus listrik untuk rute pilot, termasuk kebutuhan armada, strategi pengisian daya, analisis total biaya kepemilikan (TCO), dan analisis kebutuhan listrik.

Selanjutnya, ITDP Indonesia akan tetap berkoordinasi dengan Pemerintah Kota Semarang dan Pemerintah Pusat untuk memastikan rencana desain pembangunan transportasi publik yang berkelanjutan dan berkeadilan untuk semua.

2 Gambaran Umum Transportasi Publik di Semarang

Kota Semarang merupakan salah satu kota besar di Indonesia, dan merupakan Ibu Kota Provinsi Jawa Tengah. Dengan luas sebesar 373.78 km², pada tahun 2022, Kota Semarang tercatat memiliki populasi penduduk sebesar 1,659,975 jiwa, dan rata-rata kepadatan penduduk sebesar 4.441 penduduk per km².¹³ Untuk melayani kebutuhan transportasi publik di Kota Semarang, saat ini terdapat dua layanan transportasi publik yang melayani wilayah ini yaitu Trans Semarang dan Trans Jateng. Dokumen ini akan fokus pada analisis rute Trans Semarang untuk elektrifikasi.

2.1 Trans Semarang

2.1.1 Operasional Trans Semarang

Trans Semarang merupakan sistem bus transit yang dikelola dan dibiayai oleh Pemerintah Kota Semarang melalui anggaran pendapatan belanja daerah (APBD) Kota Semarang. Layanan Trans Semarang mulai beroperasi pada tahun 2009 melayani rute Terminal Mangkang ke Terminal Penggaron. Hingga saat ini, jumlah layanan dan rute Trans Semarang yang dikelola oleh Badan Layanan Umum Unit Pelaksana Teknis Dinas (BLU UPTD) Trans Semarang semakin bertambah, di mana terdapat delapan rute bus dan empat rute angkutan pengumpan (*feeder*) Trans Semarang yang menghubungkan berbagai titik dalam Kota Semarang dan sekitarnya.



Gambar 3. Bus sedang Trans Semarang (kiri) dan armada *feeder* Trans Semarang (kanan) (Sumber: ITDP Indonesia, 2022)

Layanan bus Trans Semarang dilayani oleh dua jenis bus, yaitu bus besar 12 meter, dan bus sedang dengan panjang 7-7.5 meter. Saat ini armada bus besar dan bus sedang yang digunakan adalah sejumlah 144 armada siap operasi (SO) dan 16 armada siap guna operasi (SGO). Selain armada bus, pada tahun 2019, Pemerintah Kota Semarang juga telah mulai mengoperasikan rute pengumpan, atau dikenal dengan *feeder* Trans Semarang, untuk memperluas jangkauan

¹³ Badan Pusat Statistik Kota Semarang. (2023). *Kota Semarang Dalam Angka 2023*.

layanan transportasi publik. Terdapat 4 rute pengumpan yang terhubung dengan beberapa koridor utama Trans Semarang. Layanan pengumpan ini menggunakan armada sepanjang 6-meter sebanyak 89 armada SO dan 8 armada SGO. Daftar rute layanan bus dan *feeder* Trans Semarang disajikan dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Rute Trans Semarang^{14,15,16}.

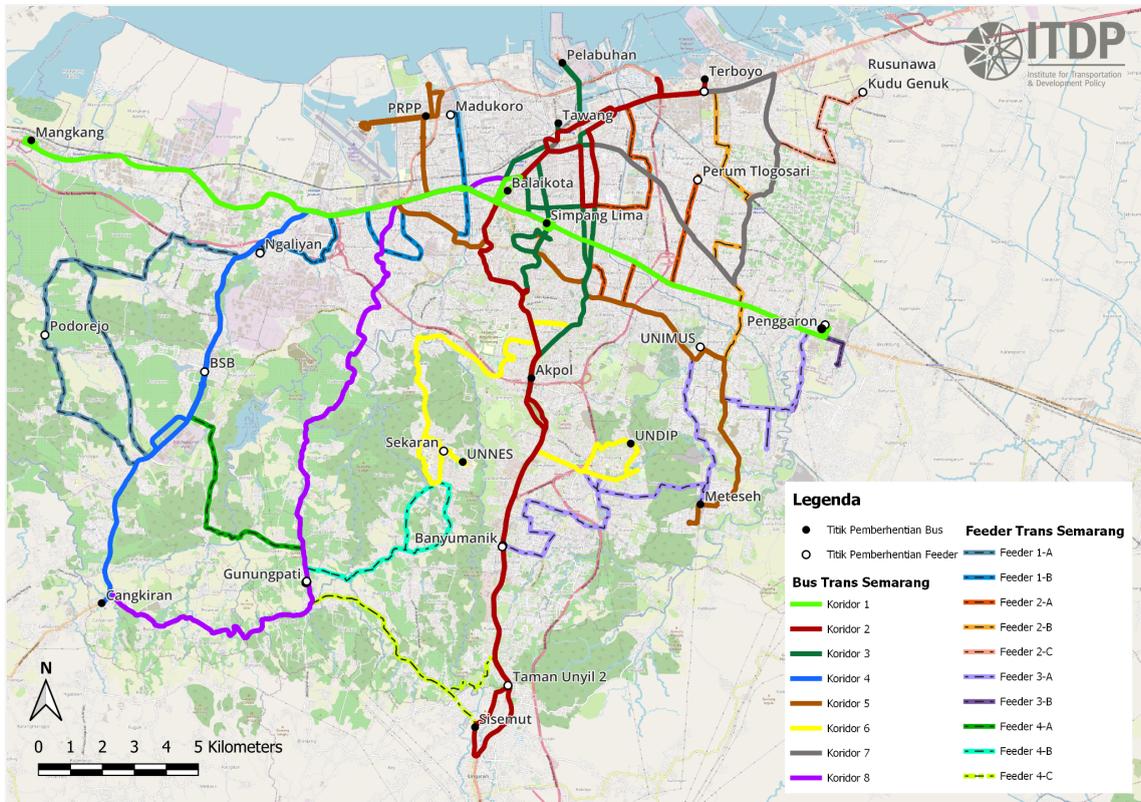
No.	Rute	Asal - Tujuan	Panjang Rute (km)	Jumlah Armada		Waktu Tempuh Jam Sibuk (menit)	Waktu Tunggu (Headway) Jam Sibuk (menit)	Tahun Beroperasi
				SO	SGO			
1	Koridor 1	Mangkang - Penggaron	29	22	3	100	5	2009
2	Koridor 2	Terboyo - Sisemut (Ungaran)	30	24	2	100	5	2012
3	Koridor 3	Pelabuhan - Elisabeth	30	16	2	100	7	2014
4	Koridor 4	Cangkiran - Tawang	30	24	2	100	6	2013
5	Koridor 5	PRPP - Meteseh	32	14	2	115	8	2017
6	Koridor 6	UNDIP - UNNES	25	14	2	90	8	2017
7	Koridor 7	Terboyo - Balaikota	42	14	1	130	8	2018
8	Koridor 8	Cangkiran - Simpang Lima	59	16	2	130	8	2019
9	Feeder 1	Ngaliyan - Suratmo	30	22	2	90	10	2019
10	Feeder 2	Terboyo - Lamper	30	22	2	95	10	2019
11	Feeder 3	Penggaron - Banyumanik	30	20	2	95	6	2022
12	Feeder 4	Gunung Pati - BSB - UNNES	20	25	2	90	5	2020
13	Koridor 1M	Mangkang - Simpang Lima	20	4	6	95	10	2022

Layanan bus dan *feeder* Trans Semarang secara umum beroperasi sejak pukul 05.30-18.20 WIB setiap harinya, dengan *headway* pada jam sibuk berkisar antara 5 sampai dengan 10 menit. Selain itu, terdapat layanan bus yang beroperasi di malam hari yaitu Koridor 1M. Koridor 1M merupakan layanan malam atau perpanjangan waktu operasional pada Koridor 1 dengan rute Mangkang - Simpang Lima yang beroperasi pada pukul 18.00-23.00 WIB. Gambar 4 memberikan ilustrasi terkait cakupan layanan Trans Semarang.

¹⁴ BLU UPTD Trans Semarang. (2023). *Daftar Operator dan Jumlah Armada BRT Semarang Tahun 2023*.

¹⁵ PT Mitra Pembangunan Jaya. (2020). *Laporan Akhir Studi Kelayakan Bus Rapid Transit Semarang*.

¹⁶ BLU UPTD Trans Semarang. (2023). *Rata-Rata Konsumsi Pemakaian Bahan Bakar Solar*.



Gambar 4. Rute Trans Semarang Saat Ini

2.2 Rencana Bus Rapid Transit (BRT) Semarang

Sejak tahun 2009, Pemerintah Kota Semarang meluncurkan layanan yang disebut dengan Bus Rapid Transit (BRT) Semarang yang telah melayani pergerakan masyarakat di Kota Semarang. Namun, hingga saat ini masih terdapat beberapa kekurangan dalam implementasi ini yang menyebabkan layanan tersebut belum bisa diklasifikasikan sebagai layanan BRT, yaitu sebagai berikut:

- Tidak adanya jalur khusus (*Dedicated Right of Way*), sehingga tidak terdapat peningkatan kecepatan pada sistem Trans Semarang karena bus beroperasi di jalur yang sama dengan kendaraan lainnya. Hal ini menyebabkan tidak adanya penghematan waktu dan membuat masyarakat kurang berminat untuk beralih ke transportasi publik.
- Tidak terdapat perlakuan khusus di persimpangan (*Intersection Treatment*), yang berdampak juga pada waktu tempuh.
- Penempatan stasiun di sisi trotoar cenderung menyulitkan aksesibilitas bagi pejalan kaki.
- Pembelian tiket di dalam bus (*on-board Fare Collections*), sehingga berdampak pada kehandalan operasional.

Untuk mengatasi isu-isu di atas, maka dilakukan perencanaan dan pengembangan sistem transportasi publik di Semarang yaitu melalui rencana pembangunan BRT dengan jalur khusus. Pembangunan BRT Semarang bertujuan agar dapat melayani pergerakan masyarakat dengan lebih optimal dengan meningkatkan kinerja transportasi publik. Konsep BRT yang akan digunakan di Semarang adalah konsep layanan langsung (*direct service*), yang merupakan konsep layanan BRT dengan pengoperasian bus dapat beroperasi di dalam koridor maupun di luar koridor sehingga meminimalkan jumlah penumpang yang melakukan pindah layanan atau transfer. Sistem ini dapat meningkatkan kapasitas jalur karena terdapat tambahan rute yang akan beroperasi pada sistem BRT, serta dapat meminimalkan waktu tunggu atau *headway*. Perencanaan koridor dan rute telah dilakukan pada beberapa studi sebelumnya, yang akan dijabarkan pada sub-bab berikut.

2.2.1 Hasil Pre-Feasibility Study ITDP Indonesia

Berdasarkan hasil studi ITDP Indonesia berjudul “Rekomendasi Peningkatan Mobilitas di Kota Semarang” pada tahun 2017, usulan untuk jalur khusus BRT Semarang adalah pada sebagian dari Koridor 1 Trans Semarang saat ini. Rekomendasi koridor ini adalah dari Jrahah-Pemuda-Soekarno Hatta, di mana direncanakan terdapat 27 stasiun BRT di sepanjang 18,14 km dari koridor tersebut.¹⁷ Koridor BRT dan usulan lokasi stasiun BRT rencana ditunjukkan pada Gambar 5.

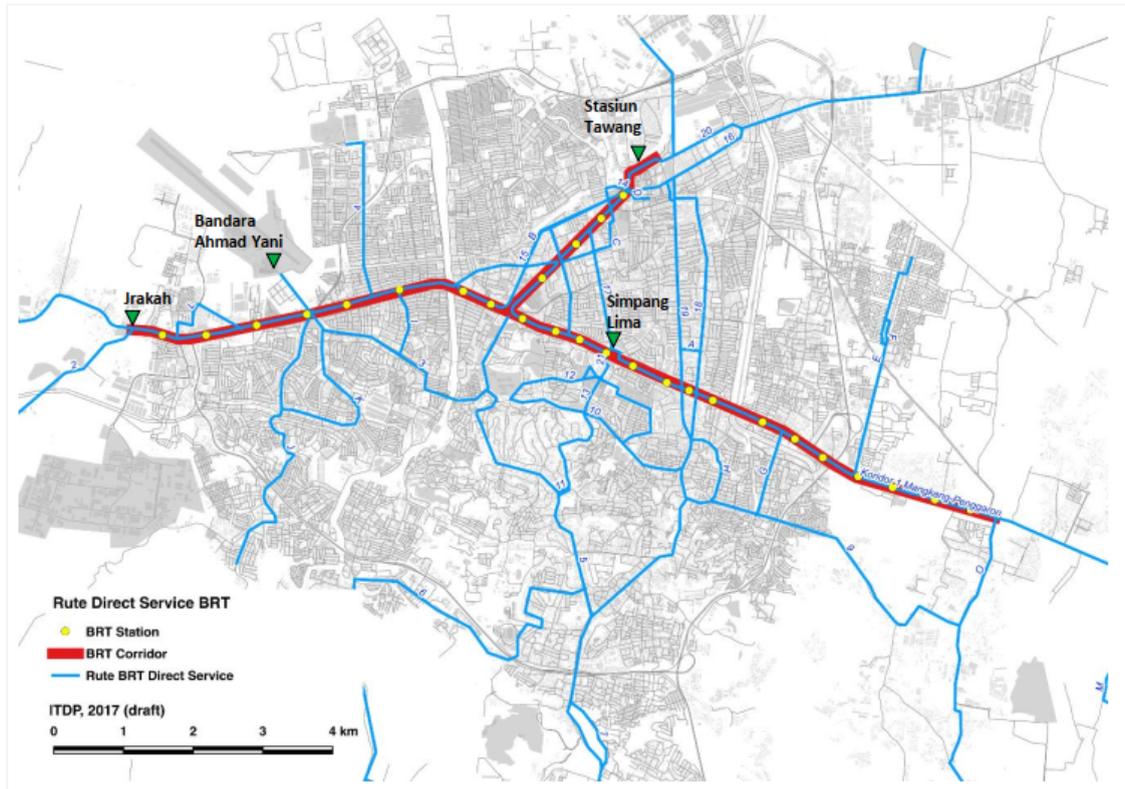


Gambar 5. Rekomendasi Jalur Khusus dan Stasiun BRT Semarang¹⁸

¹⁷ ITDP Indonesia. (2017). *Menuju Mobilitas Semarang yang Setara dan Berkelanjutan: Rekomendasi Peningkatan Mobilitas di Kota Semarang*.

¹⁸ Ibid

Untuk rute *direct service*, 19 rute dipilih dari rute angkot dan bus eksisting yang memiliki persentase overlap dengan koridor BRT lebih dari 20% dan frekuensi di atas empat kendaraan per jam. Selain itu, rute eksisting Trans Semarang seluruhnya juga akan diadopsi ke dalam sistem BRT Semarang. Seluruh rute yang akan diterapkan menjadi rute BRT yang dapat beroperasi di dalam koridor BRT dan di luar koridor (lihat Gambar 6).



Gambar 6. Usulan Rute *Direct Service* BRT Semarang¹⁹

Tabel 2 berikut ini menunjukkan karakteristik dan data operasional dari 19 rute yang telah dipilih sebagai rute BRT Semarang.

Tabel 2. Usulan Rute BRT Hasil Studi ITDP Indonesia²⁰

Rute	Asal-Tujuan (OD)	Tipe Bus	Total Panjang Rute (km)	Durasi Pulang - Pergi	Estimasi Jumlah Bus*	Jarak Tempuh Harian (km)
C3	Johar - Penggaron	Sedang	12	01 h 43 m	20	192,00
C4	Johar - Perum Tlogosari	Sedang	10,6	01 h 43 m	16	169,60
C7	Johar - Kalipancur	Sedang	10,6	01 h 31 m	16	190,80
C8	Penggaron - Karang Ayu	Besar	14,3	01 h 46 m	26	228,80

¹⁹ ITDP Indonesia. (2017). *Menuju Mobilitas Semarang yang Setara dan Berkelanjutan: Rekomendasi Peningkatan Mobilitas di Kota Semarang*.

²⁰ Ibid.

Rute	Asal-Tujuan (OD)	Tipe Bus	Total Panjang Rute (km)	Durasi Pulang - Pergi	Estimasi Jumlah Bus*	Jarak Tempuh Harian (km)
C9	Mangkang - Johar	Sedang	18,5	02 h 26 m	30	222,00
R3A	SMA 7 - Karang Ayu	Sedang	6,75	01 h 06 m	10	175,50
R3C	Soeratmo - Karang Ayu	Sedang	5,21	00 h 53 m	7	166,70
R12C	Taman Raden Saleh - Perum Pucang Gading	Sedang	12,8	02 h 13 m	8	153,60
B28	Jl. Majapahit - Batas Kota Ungaran dan Semarang	Sedang	21,3	03 h 05 m	11	170,40
B34	Mangkang - Terboyo	Sedang	22	02 h 48 m	26	220,00
B35	Cangkiran - Terboyo	Sedang	28,5	03 h 00 m	11	228,00
B31	Plamongan Indah - Mangkang	Sedang	25,5	03 h 04 m	7	204,00
I	Mangkang - Penggaron	Besar	29	03 h 13 m	40	232,00
II	Sisemut - Terboyo	Sedang	30,1	03 h 32 m	44	240,80
III	Tanjung Mas - AKPOL	Sedang	29,2	01 h 45 m	24	467,20
IV	Cangkiran - Stasiun Tawang	Sedang	30,7	03 h 25 m	50	245,60
V	PRPP - Meteseh	Sedang	27,8	03 h 33 m	36	222,40
VI	UNDIP - UNNES	Sedang	22,4	02 h 37 m	18	224,00
Trans Jateng	Terminal Bawen - Stasiun Tawang	Sedang	72,7	04 h 16 m	29	436,20

Dalam studi tersebut, dijelaskan bahwa total prakiraan permintaan penumpang BRT Semarang dalam sistem *direct service* adalah mencapai 277.645 penumpang per hari. Untuk melayani penumpang tersebut, direncanakan terdapat 429 armada termasuk dengan bus cadangan sebesar 10%²¹. Berdasarkan rencana operasional yang ditampilkan pada Tabel 2 hanya dua rute yang akan menggunakan bus besar (12 m) yaitu rute C8 dan Koridor 1 dengan total jumlah bus sejumlah 66 armada, sedangkan 17 rute lainnya akan menggunakan bus sedang (9 m) dengan total jumlah bus adalah 363 armada.²²

2.2.2 Hasil Feasibility Study PT SMI

Studi lanjutan dari *pre-feasibility study* kemudian dikembangkan ke dalam *feasibility study* (FS) PT SMI (2020). Dalam hasil studi ini, terdapat perubahan koridor BRT yang terpilih untuk rencana pengembangan lajur khusus BRT, yaitu koridor Barat-Timur, dengan meniadakan sisi ke Utara-Selatan (lihat Gambar 6 dan Gambar 7). Koridor BRT yang diusulkan pada FS ini adalah sepanjang 12,83 km dengan 27 stasiun BRT rencana dari Simpang Ngaliyan-Simpang Pedurungan. Koridor usulan dan daftar lokasi stasiun BRT rencana ini ditunjukkan pada Gambar 7.

²¹ Menteri Perhubungan. (2019). *Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 15 Tahun 2019 Tentang Penyelenggaraan Angkutan Orang Dengan Kendaraan Bermotor Umum Dalam Trayek*.

²² ITDP Indonesia. (2017). *Menuju Mobilitas Semarang yang Setara dan Berkelanjutan: Rekomendasi Peningkatan Mobilitas di Kota Semarang*.

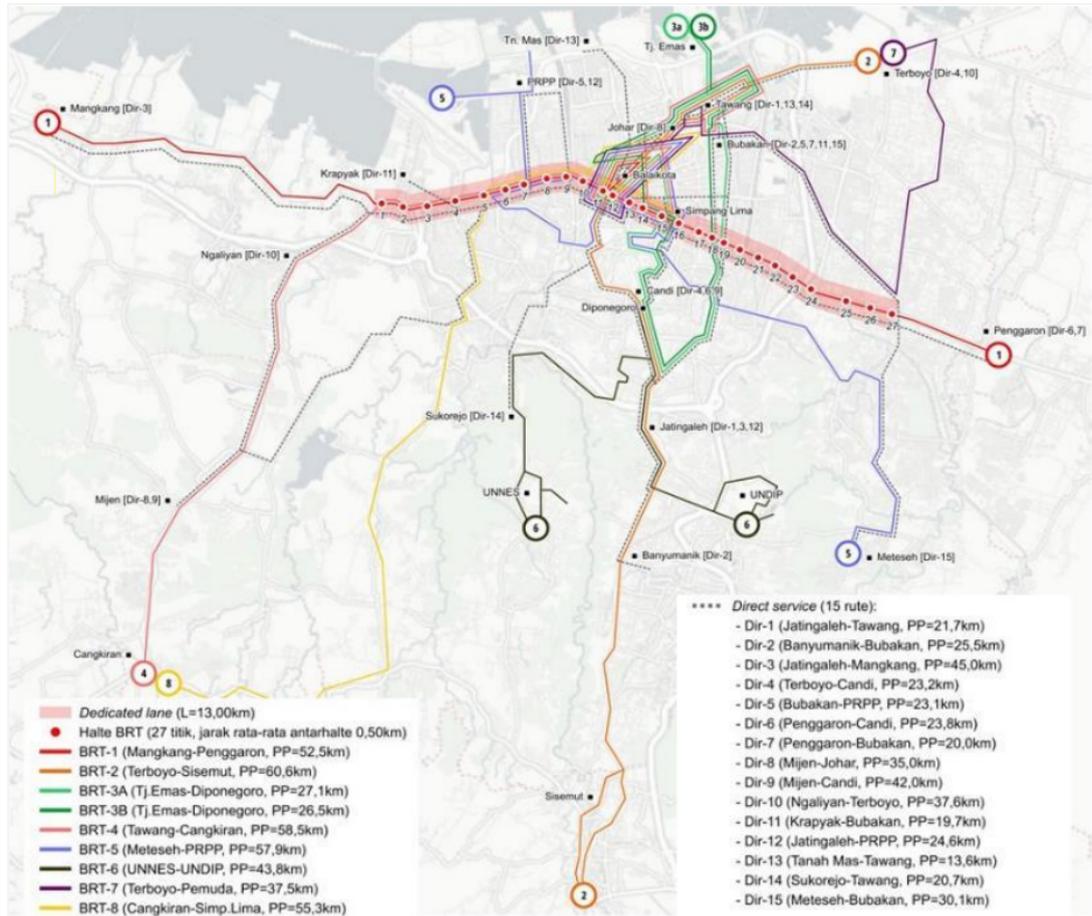


Gambar 7. Lokasi Stasiun BRT Rencana Hasil Studi PT SMI²³

Untuk rute *direct service*, direncanakan terdapat 23 rute bus yang akan beroperasi. Rute tersebut terdiri dari 8 rute eksisting Trans Semarang dan 15 rute *direct service* baru. Sebagian rute baru yang diusulkan sudah dilayani oleh angkutan umum non-BRT. Rute baru tersebut akan melintasi lajur khusus koridor BRT dan juga jalan luar koridor. Berikut merupakan daftar rute yang diusulkan (lihat Gambar 8).

Dalam studi tersebut, disebutkan total prakiraan permintaan penumpang BRT per hari mencapai 195.694 penumpang pada tahun 2023. Untuk melayani penumpang tersebut, direncanakan terdapat 515 armada, dengan rincian bus besar ukuran 12 m sejumlah 60 armada dan bus sedang ukuran 9 m sejumlah 455 armada. Rincian kebutuhan armada pada masing-masing rute disajikan dalam Tabel 3 berikut.

²³ PT Mitra Pembangunan Jaya. 2020. *Laporan Akhir Studi Kelayakan Bus Rapid Transit Semarang*.



Gambar 8. Usulan Rute BRT Hasil Studi PT SMI²⁴

Tabel 3. Rencana Kebutuhan Armada untuk Rute Hasil Studi PT SMI²⁵

Rute	Asal-Tujuan (OD)	Total Panjang Rute (km)	Estimasi Jumlah Bus
BRT-1	Mangkang - Penggaron	52.5	32
BRT-2	Terboyo - Sisemut	60.6	37
BRT-3	Tj. Emas - Diponegoro	53.6	19
BRT-4	Tawang - Cangkiran	58.5	35
BRT-5	Meteseh - PRPP	57.9	35
BRT-6	UNNES - UNDIP	43.8	28
BRT-7	Terboyo - Pemuda	37.5	24
BRT-8	Cangkiran - Simpang Lima	55.3	34
Dir-1	Jatingaleh - Tawang	21.7	15

²⁴ PT Mitra Pembangunan Jaya. 2020. *Laporan Akhir Studi Kelayakan Bus Rapid Transit Semarang*.

²⁵ Ibid.

Rute	Asal-Tujuan (OD)	Total Panjang Rute (km)	Estimasi Jumlah Bus
Dir-2	Banyumanik - Bubakan	25.5	18
Dir-3	Jatingaleh - Mangkang	45	28
Dir-4	Terboyo - Candi	23.2	17
Dir-5	Bubakan - PRPP	23.1	15
Dir-6	Penggaron - Candi	23.8	15
Dir-7	Penggaron - Bubakan	20	15
Dir-8	Mijen - Johar	35	22
Dir-9	Mijen - Candi	42	26
Dir-10	Ngaliyan - Terboyo	37.6	23
Dir-11	Krapyak - Bubakan	19.7	14
Dir-12	Jatingaleh - PRPP	24.6	17
Dir-13	Tanah Mas - Tawang	13.6	12
Dir-14	Sukorejo - Tawang	20.7	14
Dir-15	Meteseh - Bubakan	30.1	20

2.2.3 Perbandingan Hasil Studi ITDP Indonesia dengan PT SMI

Berdasarkan hasil studi yang telah dijelaskan sebelumnya, ditemukan beberapa perbedaan antara hasil *pre-feasibility study* dari ITDP Indonesia dengan hasil *feasibility study* PT SMI terkait perencanaan BRT Semarang. Pertama, terdapat perbedaan pada jalur khusus BRT yang direncanakan. Meskipun kedua studi ini mengusulkan koridor BRT yang melintang dari timur ke barat, dimulai dari Jarakah atau Simpang Ngaliyan dan berakhir di Simpang Pedurungan yang berada di ujung Jalan Soekarno-Hatta, akan tetapi titik stasiun BRT yang diusulkan berbeda. Selain itu, pada hasil studi ITDP Indonesia terdapat koridor yang melintang dari utara ke selatan, yaitu dari Stasiun Tawang hingga ke Tugu Muda Semarang (persimpangan antara koridor timur-barat dan koridor utara-selatan), namun koridor utara-selatan tidak dipilih pada studi PT SMI dengan pertimbangan sebagian ruas jalan pada koridor utara-selatan merupakan jalan satu arah sehingga layanan perlu mengakomodasi transfer.²⁶ Perbedaan pemilihan koridor ini juga berdampak pada perbedaan rute *direct service* yang dipilih untuk BRT Semarang, dan juga estimasi permintaan penumpang. Perbandingan antara hasil studi ITDP Indonesia dengan hasil studi PT SMI ditampilkan pada Tabel 4.

²⁶ PT Mitra Pembangunan Jaya. 2020. *Laporan Akhir Studi Kelayakan Bus Rapid Transit Semarang*.

Tabel 4. Perbandingan Hasil Studi ITDP Indonesia dengan Hasil Studi PT SMI

Parameter	Studi ITDP Indonesia	Studi PT SMI
Panjang Koridor (km)	18,14	12,83
Jumlah Rute Layanan Langsung (<i>Direct Service</i>)	19	23
Jumlah Halte	27	27
Estimasi Jumlah Penumpang per Hari	277.645	195.694
Estimasi Jumlah Bus	429 (66 bus besar, 363 bus sedang)	515 (60 bus besar, 455 bus sedang)

Dari kedua dokumen ini, seluruh rute Trans Semarang akan diadopsi ke dalam sistem BRT Semarang. Sehingga studi ini akan berfokus untuk menganalisis rute Trans Semarang yang telah beroperasi hingga saat ini untuk dapat dijadikan pertimbangan sebagai rute pilot bus listrik, jika terdapat rencana untuk mengadopsi sistem bus listrik ke dalam sistem Trans Semarang ataupun ke dalam sistem BRT Semarang yang akan dibangun nanti.

3 Teknologi Bus Listrik dan Infrastruktur Pengisian Daya

Berdasarkan Perpres No 55 Tahun 2019, Pemerintah Indonesia secara spesifik telah berkomitmen untuk berfokus pada percepatan adopsi kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (KBLBB). Bab ini akan membahas terkait teknologi bus listrik, baterai, dan infrastruktur pengisian daya, beserta dengan analisis pasarnya.

3.1 Bus Listrik

Bus listrik berbasis baterai merupakan jenis bus yang menggunakan energi yang tersimpan dalam baterai pada kendaraan untuk menggerakkan pengoperasian sepenuhnya dan tidak menghasilkan emisi gas buang. Berdasarkan analisis pasar bus listrik yang dilakukan, sebagian besar bus listrik dijual bersama dengan baterainya, sehingga harga jualnya cukup mahal jika dibandingkan dengan bus diesel. Saat ini, harga bus listrik berkisar sebesar 2.5-3 kali dari harga bus diesel, di mana 40% dari harga jual bus listrik tersebut berasal dari harga baterai.

Hasil analisis terkait dengan produsen bus listrik di Indonesia, dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu dari pemasok lokal dan pemasok luar negeri. Analisis pasar pada studi ini dilakukan berdasarkan pada pasar lokal dan pasar internasional, dan disesuaikan dengan rencana operasional BRT Semarang, di mana terdapat dua tipe bus, yaitu bus besar 12 meter dan bus sedang 9 meter. Tabel 5 dan Tabel 6 berikut ini menampilkan hasil analisis pasar untuk bus besar dan bus sedang dengan beberapa pilihan kapasitas baterai yang paling banyak tersedia di pasar. Harga yang ditampilkan pada tabel tersebut merupakan harga *on-the-road* (OTR) dari bus listrik, yang termasuk pajak, dan harga baterai, serta bea/pajak impor untuk pemasok dari luar negeri.

Tabel 5. Hasil Analisis Pasar Bus Besar Listrik (Ukuran 12 m)²⁷

Merek dan Model Bus Listrik	Harga On the Road (Miliar IDR)	Power (kW)	Kapasitas Baterai (kWh)	Estimasi Jarak Max (km)	Beban Max (kg)	Tipe Bus	Pemasok	Tampilan Bus
BYD K9	5.3	300	324	176,1	18,000	Bus Besar	Pasar lokal	
Tata Urban 9/12	5.6	186	188	160	19,500	Bus Besar	Pasar luar negeri (India)	

²⁷ The World Bank. (2022). *E-mobility Adoption Road Map For The Indonesian Mass Transit Program*.

Merek dan Model Bus Listrik	Harga On the Road (Miliar IDR)	Power (kW)	Kapasitas Baterai (kWh)	Estimasi Jarak Max (km)	Beban Max (kg)	Tipe Bus	Pemasok	Tampilan Bus
Zhong Tong LCK6125E V	5.3	280	350	150	19,500	Bus Besar	Pasar luar negeri (Tiongkok)	
Yutong 350 kWh	3.1	-	350	-	-	Bus Besar	Pasar luar negeri (Tiongkok)	
Yutong 324 kWh	2.6	215	324.4	219,7	17,000	Bus Besar	Pasar luar negeri (Tiongkok)	

Selain hasil analisis pasar di atas, studi UK PACT (2022) menunjukkan bahwa, terdapat dua jenis bus yang dikategorikan berdasarkan standar komponen bus untuk standar Eropa dan standar Tiongkok. Ketentuan ini menyebabkan adanya perbedaan harga, di mana harga bus besar berukuran 12 meter dengan standar Eropa adalah sekitar Rp6,6 miliar-Rp7,5 miliar tergantung pada spesifikasi kendaraan. Sedangkan, harga bus besar standar Tiongkok lebih murah sekitar Rp1,8 miliar-Rp2,8 miliar daripada bus standar Eropa.

Tabel 6. Hasil Analisis Pasar Bus Sedang Listrik (Ukuran 9 m)²⁸

Merek dan Model Bus Listrik	Harga On the Road (Miliar IDR)	Power (kW)	Kapasitas Baterai (kWh)	Estimasi Jarak Max (km)	Beban Max (kg)	Tipe Bus	Pemasok	Tampilan Bus
BYD K7	3.1	180	180	221		Bus Sedang	Pasar Lokal	
Tata Ultra 9/9 AC Electric Bus	2.4	245	124	150	17,800	Bus Sedang	Pasar luar negeri (India)	
Main New Energy Co. Ltd RHD/LHD 8.5 m	2.5	-	174.7	200	13,500	Bus Sedang	Pasar luar negeri (Tiongkok)	
ZEV CDL 689OURB EV	1.8	-	162.3	207	16,500	Bus Sedang	Pasar luar negeri (Tiongkok)	

²⁸ The World Bank. (2022). *E-mobility Adoption Road Map For The Indonesian Mass Transit Program*.

Merek dan Model Bus Listrik	Harga On the Road (Miliar IDR)	Power (kW)	Kapasitas Baterai (kWh)	Estimasi Jarak Max (km)	Beban Max (kg)	Tipe Bus	Pemasok	Tampilan Bus
Shenzhen BAK LSK6105G EV1	2.0	165	175	200	17.000	Bus Sedang	Pasar luar negeri (India)	

Selain hasil analisis pasar di atas, studi dari World Resources Institute (WRI) di India menyimpulkan bahwa rata-rata harga bus sedang listrik (9 meter) di India adalah sebesar Rp3,2 miliar.²⁹ Sedangkan untuk bus sedang dengan standar Eropa, rata-rata harga bus sedang berukuran 8-9 m berada di kisaran Rp4,7 miliar-Rp5,7 miliar.

3.2 Teknologi Baterai

Baterai merupakan komponen utama dari bus listrik, dan berpengaruh besar (40%) dari biaya modal untuk bus listrik. Harga baterai diperkirakan akan terus turun dan diproyeksikan akan mencapai USD 100/kWh pada tahun 2023.³⁰ Penurunan harga baterai ini tentunya akan mempengaruhi harga bus listrik secara keseluruhan. Dalam membahas spesifikasi teknologi baterai, terdapat beberapa istilah yang sering dipakai, yaitu sebagai berikut:

1. Kapasitas baterai (dalam kWh): Jumlah energi yang dapat disimpan oleh baterai dalam pengisian penuh.
2. Kekuatan baterai (dalam kW): Jumlah energi yang dapat dilepaskan atau diserap oleh baterai dalam periode tertentu.
3. *Depth of discharge/DoD* (dalam %): Persentase kapasitas baterai yang telah digunakan dari kapasitas baterai yang terisi penuh. Umumnya maksimum DoD yang digunakan untuk satu kali pengisian daya baterai adalah 80%.
4. *State of Charge/SoC* (dalam %): Persentase sisa kapasitas baterai, kebalikan dari DoD.
5. *State of Health/SoH* atau degradasi baterai (dalam %): Kondisi baterai dibandingkan terhadap kondisi idealnya, biasanya dihitung dengan memeriksa peningkatan resistansi internal atau penurunan kapasitas. Umur siklus baterai berkaitan dengan SoH baterai.
6. Siklus Hidup: Jumlah siklus penggunaan/pengisian daya yang dapat dialami baterai sebelum gagal memenuhi kriteria kinerja tertentu. DoD yang lebih tinggi akan menghasilkan siklus hidup yang lebih rendah. Jumlah siklus hidup juga dipengaruhi oleh kelembaban dan suhu udara.

²⁹ World Resources Institute India. (2021). *Procurement of Electric Bus: Insights from Total Cost of Ownership (TCO) Analysis*.

³⁰ O'Donovan A., James Frith, and Colin McKerracher. (2018). *Electric Bus in Cities*. Bloomberg Energy Finance. <https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/2018/05/Electric-Buses-in-Cities-Report-BNEF-C40-Citi.pdf>

7. Tingkat pengisian/*Charge rate* (C-rate): Tingkat pengisian atau penggunaan baterai dalam satu jam, relatif terhadap kapasitas maksimum.
8. Kepadatan energi (dalam Wh/kg): Jumlah energi yang dapat disimpan dalam baterai per satuan massa. Kepadatan energi baterai terkait dengan bahan kimia dan kemasan baterai.
9. Sistem manajemen baterai (BMS): Sistem yang berfungsi untuk memonitor dan mengatur kinerja baterai (tegangan, suhu, arus, serta faktor lainnya) untuk memastikan kondisi pengoperasian baterai yang optimal.

Teknologi baterai berkaitan dengan sifat kimia baterai. Dalam dua dekade terakhir, telah terdapat beberapa jenis baterai berdasarkan bahan kimianya, yaitu baterai *lithium-ion* jenis *lithium iron phosphate* (LFP), *lithium titanate oxide* (LTO), dan *lithium nikel mangan kobalt oksida* (NMC), yang merupakan jenis baterai paling umum digunakan untuk bus listrik. Hal ini disebabkan karena NMC memiliki umur pakai yang panjang, daya spesifik yang tinggi, kepadatan energi yang tinggi, serta kinerja termal dan keamanan yang tinggi.³¹ Selain baterai jenis NMC, baterai jenis LFP juga menjadi jenis baterai yang paling dikenal di pasaran saat ini.³²

Selain bahan kimia baterai, hal penting lainnya yang berkaitan dengan baterai adalah sistem manajemen baterai (BMS), yang merupakan prosesor baterai dengan fungsi utama untuk perlindungan sel baterai. Sel baterai *lithium-ion* dapat mengalami kerusakan apabila diisi ulang melebihi batas (*overcharged*) atau dibiarkan di bawah ambang batas. Dua faktor ini memiliki dampak yang berbeda, di mana *overcharging* akan mengakibatkan *overheating* sebagai pemicu gejala *thermal runaway* yang berujung kepada risiko ledakan maupun kebakaran. Sementara itu, baterai yang dibiarkan di bawah ambang batas berdampak pada reduksi usia pakai dan daya tampung baterai secara permanen. BMS mencegah kedua situasi tersebut terjadi dengan memastikan ambang batas pengisian baterai sembari melakukan manajemen energi secara efektif. Manajemen energi ini diukur oleh BMS dari energi tersisa yang dikenal sebagai *State of Charge* (SoC). BMS memastikan pengoperasian kendaraan listrik yang aman dan dapat diandalkan melalui fungsi-fungsi sebagai berikut.

- Mengevaluasi kondisi dan kinerja bahan kimia baterai termasuk pengukuran masing-masing sel dan tegangan baterai keseluruhan.
- Mengukur besar arus saat proses pengisian daya dan pemakaian.
- Mengukur suhu sel-sel dalam baterai.
- Menyeimbangkan taraf dan laju pengisian daya antar sel dalam baterai.
- Memperkirakan SoC, *State of Function* (SoF), dan *State of Health* (SoH) dari baterai.

³¹ European Bank for Reconstruction and Development. (2021). *Going Electric: A Pathway to Zero-Emission Bus*. Policy Paper, EBRD, London.

³² UK PACT. (2021). *Building Capacity and Action Plan to Scale-Up Transjakarta E-Bus: Task 2.1. Transjakarta's E-Bus Operational Plan and Charging Strategy*.

- Mengelola aliran arus listrik dan daya ke motor traksi berdasarkan kebutuhan beban saat kecepatan rendah dan kecepatan operasional bus listrik.
- Memberi sinyal peringatan apabila terdapat malfungsi subsistem atau komponen dalam rantai aliran energi.

3.3 Teknologi Pengisian Daya

Aspek penting lainnya dari pengoperasian bus listrik pada sistem transportasi publik adalah teknologi pengisian daya yang digunakan. Secara umum, teknologi pengisian daya dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu pengisi daya konduktif dan induktif. Pengelompokan ini didasarkan pada persyaratan koneksi fisik antara kendaraan dan stasiun pengisian. Pengisi daya konduktif dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu pengisi daya AC (arus bolak-balik) atau DC (arus searah). Pengisi daya AC menggunakan antarmuka *plug-in* dan biasanya digunakan untuk pengisian lambat, sedangkan pengisi daya DC dapat menggunakan antarmuka *plug-in* atau *pantograph* dan lebih cocok untuk strategi pengisian cepat.

3.3.1 Pengisian Daya Konduktif

1. *Plug-in charger*

Plug-in charging atau pengisian daya *plug-in* merupakan teknologi pengisian daya dengan pemasangan konektor dari stasiun pengisian daya ke kendaraan. Dalam implementasinya saat ini, konektor masih dipasang secara manual oleh petugas.



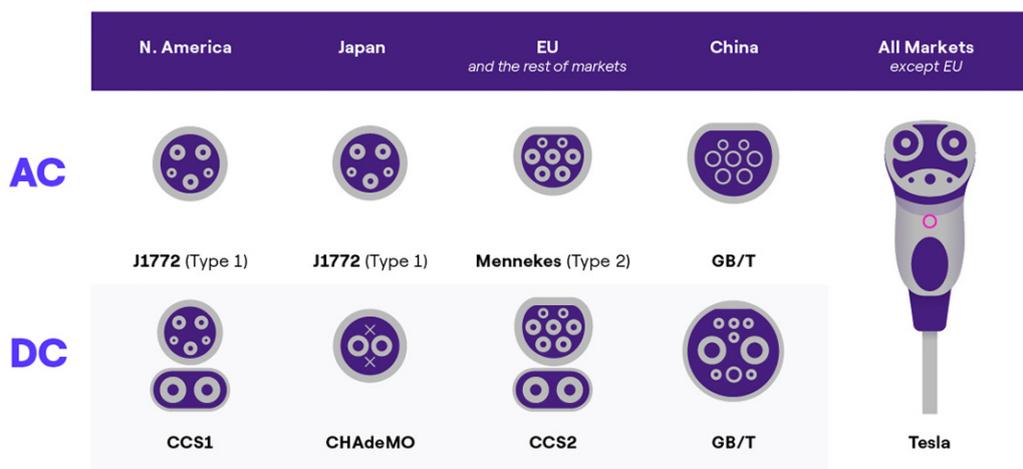
Gambar 9. Penggunaan Plug-in Charger di Transjakarta (Sumber: ITDP Indonesia, 2022)

Dalam implementasi saat ini, pengisian konduktif dengan jenis *plug-in* merupakan jenis pengisian daya yang paling banyak digunakan karena harga yang relatif lebih murah dan dapat memenuhi kebutuhan operasional di lapangan dibandingkan dengan pengisian daya lainnya.

Alat pengisian daya *plug-in* ini dibedakan lebih lanjut berdasarkan soket keluaran, steker yang digunakan, serta berapa daya yang dapat disediakan oleh jenis pengisi daya tertentu. Standar dan regulasi terkait soket yang digunakan secara global bervariasi, dikarenakan kebijakan dari masing-masing *original equipment manufacturer* (OEM) dan beberapa badan internasional yang bervariasi pula. Secara umum, jenis pengisi daya *plug-in* dikelompokkan ke dalam tiga kategori berdasarkan tingkat daya antara lain:

- Level 1 memiliki keluaran daya < 3.3 kW;
- Level 2 memiliki keluaran daya antara 3.3 dan 22 kW; dan
- Level 3 memiliki keluaran daya > 22 kW.

Saat ini, terdapat berbagai jenis konektor pengisi daya *plug-in* yang telah digunakan di berbagai negara, yang ditampilkan pada Gambar 10. Di Indonesia, standar konektor *plug-in* yang diperbolehkan untuk stasiun pengisian umum telah diatur dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) No. 1/2023. Berdasarkan peraturan tersebut, seluruh alat pengisian daya harus mengikuti konektor standar nasional: Tipe 2 AC Charging, CHadeMO, dan CCS2 yang harus terdaftar agar memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI).



Gambar 10. Tipe Konektor *Plug-in*³³

2. Pantograph charger

Alat pengisian daya konduktif lainnya adalah sistem pengisian daya *pantograph*, di mana proses pengisian daya terjadi melalui kontak antara bus dan infrastruktur pengisian daya

³³ Enel X Way USA, LLC. (2019, April 20). *The different EV charging connector types*. <https://www.enelxway.com/us/en/resources/blog/ev-charging-connector-types>

secara otomatis. Saat ini, terdapat dua cara pengisian daya *pantograph*, yang dikenal dengan *pantograph up* dan *pantograph down*.

Pada sistem *pantograph up*, alat pengisian daya dipasang di atas atap bus listrik dan akan terangkat hingga terhubung dengan tiang pengisi daya saat pengisian daya diperlukan. Sedangkan pada sistem *pantograph down*, *pantograph* dipasang pada infrastruktur pengisian daya dan diturunkan ke bawah untuk terhubung dengan bus. Sistem *pantograph down* lebih optimal untuk digunakan karena membutuhkan lebih sedikit *pantograph* untuk rute bus tertentu dan membuat bobot bus listrik lebih ringan.³⁴

Waktu pengisian daya menggunakan *pantograph* pada siang hari adalah sekitar 5 hingga 7 menit menggunakan daya 150 kW hingga 400 kW, sedangkan waktu pengisian kilat siang hari atau “*flash*” *opportunity charging* adalah selama 15 hingga 20 detik menggunakan daya 600 kW.³⁵ Walaupun lama waktu pengisian daya menggunakan *pantograph* lebih cepat dibandingkan dengan *plug in*, harga alat pengisian daya *pantograph* lebih mahal.



Gambar 11. Penggunaan *pantograph up* di Bandar Udara Schiphol Amsterdam (kiri) dan penggunaan *pantograph down* di Hamburg, Jerman (kanan)

3. *In-motion charger*

In-motion charger adalah teknologi pengisian daya konduktif di mana pengisian daya baterai dilakukan saat bus sedang bergerak. Pemindahan daya dilakukan melalui kabel bus listrik *overhead* melalui tiang yang dipasang di atap.³⁶ Pengisian daya ini umumnya dilakukan pada bus trolley.

³⁴ Verbrugge, B.; Hasan, M.M.; Rasool, H.; Geury, T.; El Baghdadi, M.; Hegazy, O. (2021). *Smart Integration of Electric Buses in Cities: A Technological Review*. <https://doi.org/10.3390/su13212189>

³⁵ The World Bank. (2022). *E-mobility Adoption Road Map For The Indonesian Mass Transit Program*.

³⁶ The World Bank and The International Association of Public Transport (UITP). (2018). *Electric Mobility & Development*. Engagement Paper, World Bank and UITP



Gambar 12. Penggunaan *In-motion charging* untuk bus troli di Gdynia, Polandia

3.3.2 Pengisian Daya Induktif



Gambar 13. Contoh *wireless charging* di Washington, Amerika Serikat

Pengisian daya induktif merupakan teknologi yang memungkinkan pengisian daya tanpa menggunakan kabel atau disebut nirkabel. Dalam sistem ini, teknologi pengisian daya dipasang pada struktur jalan dan akan mentransfer daya ke sistem penerima daya yang dipasang di

bagian bawah bus secara nirkabel. Daya yang disediakan oleh sistem pengisian dapat bervariasi antara 50 kW hingga 250 kW.³⁷ Pengisian daya ini dapat dilakukan saat bus parkir atau bergerak. Waktu tunggu pengisian daya induktif selama di terminal adalah sekitar 5-15 menit.

Tabel 7 menunjukkan rangkuman teknologi pengisian daya yang digunakan pada umumnya.

Tabel 7. Rangkuman Teknologi Pengisian Daya

	Plug in	Pantograph	In-Motion
Keberadaan Standar di Indonesia	Sudah ada standardisasi	Belum ada standardisasi	Belum ada standardisasi
Keumuman Penggunaan	Merupakan jenis pengisian daya yang paling banyak digunakan	Tidak banyak digunakan	Tidak banyak digunakan
Harga	Harga relatif lebih murah	Harga lebih mahal	Harga lebih mahal, dan instalasinya lebih kompleks karena dipasang pada lapisan jalan
Kecepatan Pengisian	Cukup lama karena keluaran daya yang digunakan lebih kecil (umumnya di bawah 150 kW)	Sangat cepat, karena keluaran daya alat pengisian daya lebih besar (>150 kW)	Pengisian daya secara menerus sepanjang jalur pengisian daya

3.4 Strategi Pengisian Daya

Selain alat pengisian daya, strategi pengisian daya juga merupakan hal yang penting untuk direncanakan dalam elektrifikasi armada bus. Strategi pengisian daya berkaitan erat dengan kapasitas baterai dan jarak tempuh harian yang diperlukan. Penentuan strategi pengisian daya akan memengaruhi spesifikasi alat pengisian daya, termasuk jenis dan jumlah alat yang diperlukan. Berdasarkan pada kebutuhan pengisian daya, terdapat dua strategi pengisian daya, yaitu pengisian daya malam hari (*overnight charging*) dan pengisian daya siang hari (*opportunity charging*). Pengisian daya pada malam hari biasanya dilakukan di depo, sedangkan untuk pengisian daya pada siang hari saat jam operasional, dapat dilakukan di depo, terminal, atau lokasi pengisian daya yang telah ditentukan. Masing-masing strategi pengisian daya ini akan berdampak langsung pada kebutuhan listrik serta pembaharuan yang diperlukan pada infrastruktur listrik. Berikut merupakan penjabaran dari kedua strategi pengisian daya tersebut.

3.4.1 Pengisian Daya di Malam Hari (*overnight charging/depot charging*)

³⁷ Masquelier, M. (2017). *Wireless Charging Infrastructure for Battery Electric Bus in Public Transportation*. Presented at APTA Sustainability conference. Minneapolis, August 7-9

Pengisian daya di malam hari dilakukan di luar jam operasional bus, sehingga waktu yang tersedia juga cenderung panjang. Pada strategi pengisian daya ini, daya bus diisi melalui kabel di depo bus khusus menggunakan arus AC atau DC. Meskipun dilakukan pada malam hari, masih dibutuhkan staf yang bertanggung jawab atas pengisian daya yang bertugas untuk mencolok dan mencabut kabel secara manual. Pada malam hari, persentase kapasitas baterai yang telah digunakan cenderung lebih besar dan membutuhkan pengisian daya hingga penuh untuk pengoperasian sepanjang hari. Namun, karena waktu pengisian yang cukup panjang di depo, maka alat pengisian daya yang digunakan umumnya memiliki keluaran daya (*output*) yang lebih rendah. Pengisian daya membutuhkan waktu lebih lama tetapi memiliki biaya unit fasilitas pengisian daya yang lebih rendah.

3.4.2 Pengisian Daya di Siang Hari (*Opportunity charging/fast charging*)

Pengisian daya di siang hari merupakan pengisian daya tambahan ketika jarak tempuh maksimum dari kapasitas baterai yang digunakan tidak dapat memenuhi jarak tempuh harian yang diperlukan. Strategi ini dibutuhkan karena kapasitas baterai yang terbatas serta pemasangan baterai yang lebih besar tidak mungkin dilakukan karena kendala berat maksimum atau kapasitas penumpang. Strategi pengisian daya ini dilakukan pada jam operasional, dan dapat dilakukan saat proses transit atau penggantian pengemudi di terminal, saat parkir pada waktu tidak sibuk di lokasi *layover*, ataupun saat proses turun-naik penumpang di halte bus.

Lama waktu pengisian daya akan berbeda tergantung pada lokasi dan keluaran dari alat pengisian daya yang digunakan. Pengisian daya saat proses turun-naik penumpang di halte bus biasanya membutuhkan waktu yang sangat cepat sehingga membutuhkan alat pengisian daya dengan keluaran daya yang cukup besar (*flash charger*) dengan harga yang relatif lebih mahal dibandingkan pengisian daya yang digunakan di depo.

3.4.3 Penukaran Baterai (*Battery Swap*)

Penukaran baterai atau *battery swap* merupakan strategi pengisian daya di mana baterai yang habis akan ditukar dengan baterai yang terisi penuh di stasiun penukaran baterai. Dibandingkan dengan strategi pengisian daya lainnya, sistem penukaran baterai membutuhkan investasi tambahan untuk penyediaan stasiun pengisian baterai beserta dengan baterai ekstra yang diperlukan, dan resiko terkait kerusakan baterai saat proses penukaran.

Pemilihan strategi yang sesuai untuk diimplementasikan di tiap daerah akan berbeda tergantung pada karakteristik sistem operasional bus di daerah tersebut. Selain itu faktor ekonomi juga menjadi penentu dalam pemilihan strategi pengisian daya yang sesuai.

Tabel 8 menunjukkan rangkuman dari strategi pengisian daya yang umumnya digunakan untuk pengisian daya kendaraan bermotor listrik berbasis baterai.

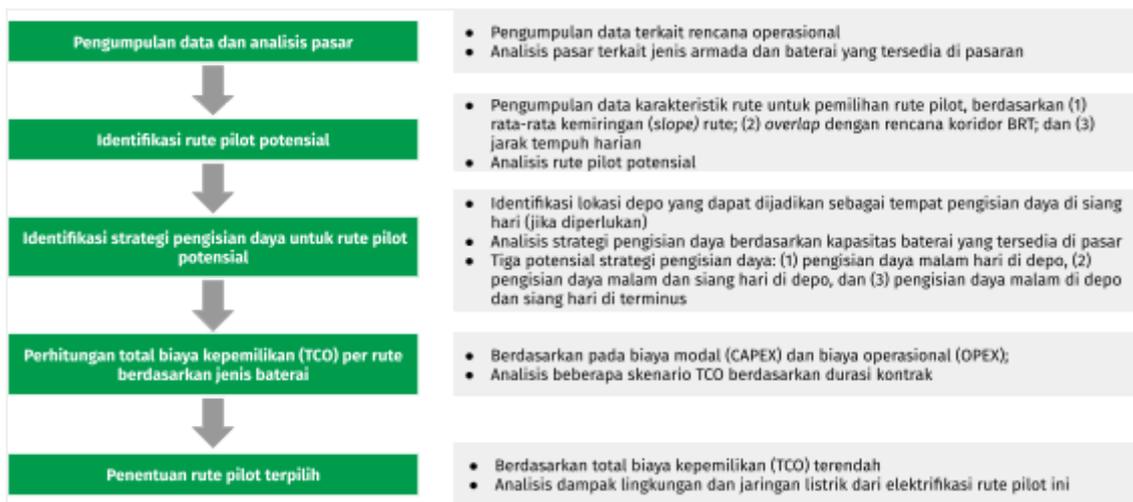
Tabel 8. Rangkuman terkait Strategi Pengisian Daya Baterai

	Pengisian Daya di Malam Hari	Pengisian Daya di Siang Hari	Penukaran Baterai
Lokasi Pengisian Daya	Depo Bus	Terminus, Halte, ataupun Lokasi Pengendapan (<i>layover</i>)	Di Lokasi yang Telah Ditentukan
Waktu Pengisian Daya	<ul style="list-style-type: none"> Malam Hari (biasanya setelah jam 19.00); Durasi pengisian daya lebih panjang (1,5-3 jam per bus) 	<ul style="list-style-type: none"> Jam Tidak Sibuk (biasanya dari Pukul 09.00 - 15.00) Durasi pengisian daya lebih cepat (kurang dari 1 jam) 	<ul style="list-style-type: none"> Waktu pengisian daya lebih fleksibel Durasi pengisian daya sangat cepat Banyak digunakan untuk kendaraan listrik roda 2
Opsi Jenis Pengisian Daya	<ul style="list-style-type: none"> AC Plug-in: < 80 kW DC Plug-in: 50-150 kW DC Pantograph: 150-200 kW 	<ul style="list-style-type: none"> DC Plug-in: 150-300 kW Induktif: 50-250 kW DC Pantograph: 50-600 kW 	Tidak Berlaku

4 Metodologi dan Analisis Rute Pilot Bus Trans Semarang

4.1 Metodologi Pemilihan Rute Pilot Bus Listrik

Metode pemilihan rute pilot untuk Trans Semarang terbagi menjadi lima (5) tahap yang dijabarkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Metodologi Pemilihan Rute Pilot Bus Listrik

4.2 Analisis Elektrifikasi Rute Pilot Bus Listrik untuk Trans Semarang

4.2.1 Pengumpulan Data dan Analisis Pasar

Seperti yang telah ditampilkan pada Gambar 14, tahap awal dalam proses elektrifikasi bus listrik adalah pengumpulan data dan analisis pasar. Pengumpulan data ini berfokus pada data operasional transportasi publik, seperti jarak tempuh harian, jenis dan jumlah armada, topologi rute, jumlah perjalanan yang dilakukan (ritase), dan waktu siklus (termasuk waktu pengendapan). Selain itu juga diperlukan karakteristik operasional, seperti waktu awal dan akhir operasional, jam sibuk dan tidak sibuk, serta rencana operasional pada jam sibuk dan tidak sibuk.

Berdasarkan perencanaan untuk BRT Semarang yang telah dilakukan oleh PT SMI, usulan armada yang akan digunakan adalah bus besar 12 meter dan bus sedang 9 meter. Selain itu, dengan adanya jalur khusus BRT yang akan dibangun di Kota Semarang maka akan terdapat

penghematan waktu tempuh dan *headway* antar bus yang berdampak pada perubahan operasional. Usulan perubahan waktu operasional pada sistem BRT juga akan berdampak pada kebutuhan armada yang diperlukan.

Dengan mempertimbangkan aspek-aspek ini, sistem Trans Semarang yang seluruh rute busnya akan diadopsi ke dalam sistem BRT Semarang, akan dianalisis untuk pemilihan rute pilot sistem BRT ini. Dengan mempertimbangkan rencana implementasi BRT, hasil survei, dan pre-FS BRT Semarang yang dilakukan tim ITDP pada tahun 2017, maka terdapat usulan penambahan jumlah armada untuk masing-masing rute Trans Semarang yang didasarkan pada estimasi proyeksi jumlah penumpang serta *headway* yang harus dipenuhi.

Penambahan jumlah armada yang diusulkan pada Tabel 9, diusulkan agar sistem pengoperasian pada Trans Semarang untuk menggunakan sistem split, di mana tidak semua armada akan beroperasi pada jam tidak sibuk. *Benchmarking* dari Transjakarta menunjukkan bahwa hanya 60% dari jumlah armada siap operasi (SO) yang akan dioperasikan pada jam tidak sibuk. Terkait waktu operasional yang digunakan dalam studi ini adalah selama 13 jam, dimulai dari pukul 5:30-18:30. Di mana Jam sibuk di Trans Semarang berkisar antara 6.00-7.30 saat pagi hari dan 15.00-17.00 di sore hari. Sedangkan untuk *headway* berkisar antara 4-9 menit pada jam sibuk.

Tabel 9. Rekomendasi Rencana Operasional Trans Semarang³⁸

Rute	Asal - Tujuan (OD)	Tipe Bus	Panjang Rute (km)	Jumlah Trip per Hari	Total km Tempuh Harian* per Bus	Jumlah Bus Eksisting	Jumlah Bus SO Eksisting	Jumlah Bus Usulan	Jumlah Bus SO (Jam Sibuk)	Jumlah Bus SO (Jam Tidak Sibuk)
Kor 1	Mangkang - Penggaron	Besar	29	8	232,00	25	22	40	36	22
Kor 2	Terboyo - Sisemut	Sedang	30	8	240,00	26	24	44	40	24
Kor 3	Tanjung Mas - AKPOL	Sedang	30	8	240,00	18	16	24	22	14
Kor 4	Cangkiran - Stasiun Tawang	Sedang	30	8	240,00	26	24	50	45	27
Kor 5	Meteseh - PRPP	Sedang	32	8	256,00	16	14	36	33	20
Kor 6	UNDIP - UNNES	Sedang	25	10	250,00	16	14	18	17	11
Kor 7**	Terboyo - Pemuda	Sedang	42	6	252,00	15	14	25	23	14
Kor 8**	Cangkiran - Simpang Lima	Sedang	59	5	295,00	18	16	30	27	17

* = Belum termasuk km tempuh kosong (dari dan ke depo)

** = Estimasi di luar studi sebelumnya

Selain pengumpulan data operasional yang ditunjukkan pada Tabel 8, analisis pasar juga dilakukan untuk mengetahui harga, jenis armada listrik, serta kapasitas baterai yang terdapat

³⁸ PT Mitra Pembangunan Jaya. (2020). *Studi Kelayakan Bus Rapid Transit Semarang: Laporan Akhir*.

di pasar. Rencana operasional BRT Semarang akan menggunakan dua jenis bus, yaitu bus besar 12 m dan bus sedang 9 m. Hasil analisis pasar bus listrik ini dapat dilihat pada sub-bab 3.1. Berdasarkan hasil analisis pasar tersebut, maka armada bus listrik yang dipilih untuk bus besar (12 meter) adalah bus dengan kapasitas baterai yang banyak tersedia di pasar, yaitu 324 kWh dan 350 kWh, sedangkan untuk bus sedang (9 meter), kapasitas baterai yang digunakan untuk analisis adalah 180 kWh.

4.2.2 Identifikasi Rute Potensial Pilot Bus Listrik

Terkait dengan rute pilot bus listrik, Studi Kelayakan BRT Semarang³⁹ di tahun 2020 mengusulkan Koridor 1 sebagai rute pilot, yang didasarkan pada:

- Rute ini memiliki tingkat kelandaian yang relatif datar dibandingkan rute-rute lainnya;
- Rute Koridor 1 (Mangkang-Penggaron) merupakan rute dengan tingkat *overlap* dengan rencana Koridor BRT Semarang tertinggi (hampir 50%). Sehingga diharapkan hambatan lalu lintas yang terjadi terhadap operasional bus listrik akan lebih rendah dibandingkan rute-rute lain karena beroperasi pada jalur khusus BRT. Dengan hambatan lalu lintas yang rendah, maka tingkat kemacetan akan berkurang sehingga tidak banyak terjadi *stop and go* yang mempengaruhi konsumsi energi pada baterai.

Idealnya rute pilot dapat diimplementasikan pada lebih dari satu (1) rute agar dapat membandingkan performa dan menganalisis pengaruh aspek lainnya terhadap konsumsi energi baterai. Sehingga seluruh rute bus Trans Semarang akan dianalisis dengan menggunakan parameter yang sama yaitu kemiringan (*slope*) dari masing-masing rute, *overlap* dengan koridor BRT, dan kilometer tempuh harian untuk menentukan rute potensial pilot bus listrik.

Rata-rata kemiringan (*slope*) rute untuk implementasi bus listrik dibatasi sebesar maksimum 5%, agar tidak terlalu banyak mengkonsumsi energi pada baterai.⁴⁰ Sedangkan untuk parameter *overlap* antara rute dan koridor BRT, semakin besar *overlap* dengan koridor BRT akan semakin baik. Pada BRT Planning Guide, *overlap* rute dan koridor BRT yang disarankan adalah di atas 20%, namun dalam beberapa kasus, rute dengan frekuensi tinggi dengan *overlap* 10%-15% dapat juga dimasukkan ke dalam sistem BRT.⁴¹ Hal ini agar mendapatkan manfaat yang optimal dari biaya pembangunan dan manfaat penghematan waktu tempuh. Angka ini juga akan digunakan sebagai kriteria dalam pemilihan rute pilot bus listrik. Aspek terakhir adalah kilometer tempuh harian untuk setiap rute. Disarankan untuk rute pilot agar tidak diimplementasikan pada kilometer tempuh harian yang panjang. Hal ini dikarenakan jarak tempuh harian yang panjang akan membutuhkan strategi pengisian daya yang lebih kompleks dibandingkan dengan rute dengan kilometer tempuh harian yang lebih pendek.

Tabel 10 menunjukkan data karakteristik rute Trans Semarang meliputi data kemiringan (*slope*) rute dan *overlap* dengan koridor BRT.

³⁹ PT Mitra Pembangunan Jaya. (2020). *Studi Kelayakan Bus Rapid Transit Semarang: Laporan Akhir*.

⁴⁰ Institute for Transportation and Development Policy. (2023). *E-Buses: On the Road to Lowering Emissions and Improving Public Transport*.

<https://www.itdp.org/2023/11/29/e-buses-on-the-road-to-lowering-emissions-and-improving-public-transport/>

⁴¹ Institute for Transportation and Development Policy. (2018). *Determining Which Routes to Include Inside BRT Infrastructure*.

<https://brtguide.itdp.org/branch/master/guide/service-planning/determining-which-routes-to-include-inside-brt-infrastructure/#overlap-with-the-brt-corridor>

Tabel 10. Karakteristik Rute Trans Semarang untuk Pemilihan Rute Pilot Bus Listrik

Rute	Asal - Tujuan (OD)	Tipe Bus	Total km Tempuh Harian* per Bus	Rata-rata Rentang Kemiringan (slope)		Maksimum Kemiringan (Slope)		Overlap dengan Koridor Rencana BRT
Kor 1	Mangkang - Penggaron	Besar	232.00	0.80%	-1.00%	4.60%	-8.30%	49.00%
Kor 2	Terboyo - Sisemut	Sedang	240.00	2.60%	-1.40%	13.80%	-9.80%	8.00%
Kor 3	Tanjung Mas - AKPOL	Sedang	240.00	1.60%	-1.80%	17.50%	-10.80%	5.00%
Kor 4	Cangkiran - Stasiun Tawang	Sedang	240.00	1.10%	-2.30%	10.80%	-12.90%	25.00%
Kor 5	Meteseh - PRPP	Sedang	256.00	1.00%	-1.30%	8.10%	-12.40%	12.00%
Kor 6	UNDIP - UNNES	Sedang	250.00	3.90%	-4.00%	15.90%	-16.80%	0.00%
Kor 7	Terboyo - Pemuda	Sedang	252.00	0.30%	-0.30%	1.40%	-1.90%	5.48%
Kor 8	Cangkiran - Simpang Lima	Sedang	295.00	3.10%	-3.10%	14%	-14.30%	16.81%

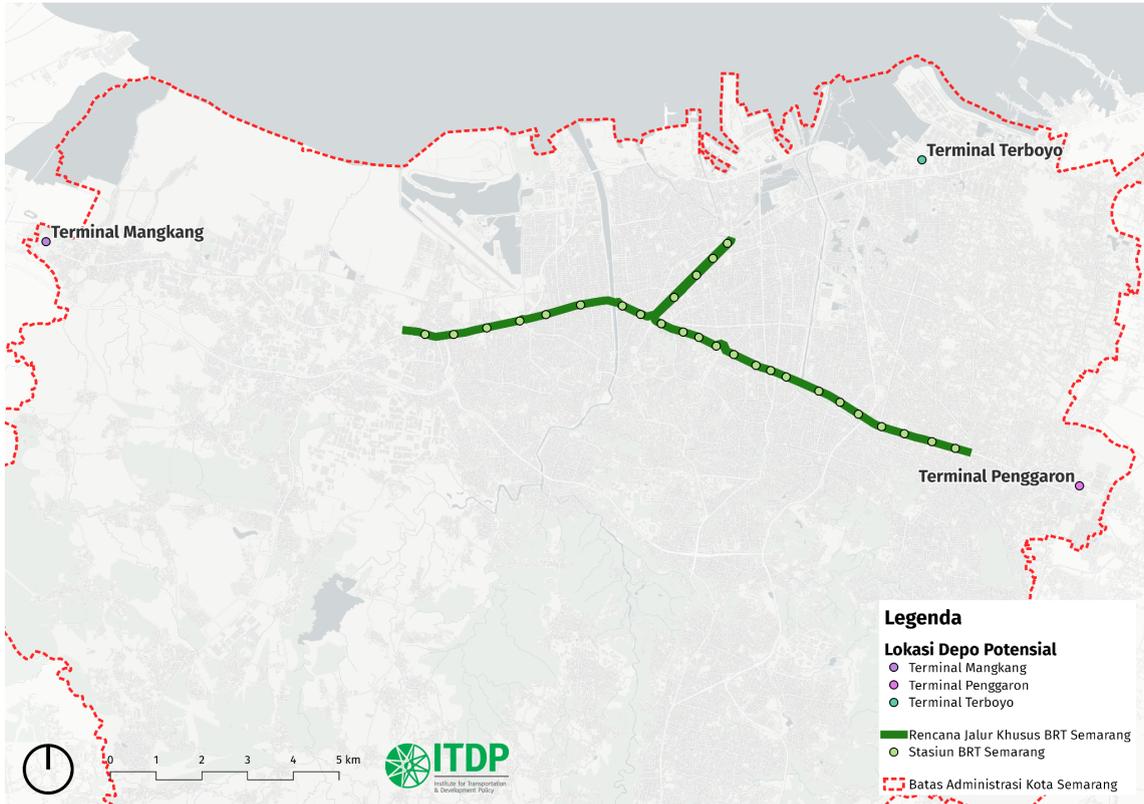
Jika dilihat dari data karakteristik rute Trans Semarang, tingkat kemiringan seluruh rute rata-rata di bawah 5%, sehingga berdasarkan parameter tersebut, seluruh rute dapat menggunakan bus listrik. Terkait *overlap* dengan koridor BRT, rute dengan *overlap* di atas 10% akan menjadi rute potensial untuk pilot bus listrik. Sedangkan jika dilihat dari kilometer tempuh maka Koridor 8 memiliki km tempuh harian yang cukup panjang sehingga tidak dimasukkan ke dalam potensial rute pilot bus listrik Trans Semarang. Sehingga berdasarkan parameter-parameter tersebut, maka rute Koridor 1, Koridor 4, dan Koridor 5 akan dianalisis lebih lanjut untuk menentukan rute pilot bus listrik dari sistem Trans Semarang.

4.2.3 Identifikasi Strategi Pengisian Daya untuk Rute Potensial Pilot Bus Listrik

4.2.3.1 Identifikasi Lokasi Depo/Tempat Pengisian Daya Potensial

Langkah selanjutnya setelah menentukan rute pilot potensial adalah menganalisis strategi pengisian daya dari masing-masing rute tersebut. Sebelum melakukan analisis strategi pengisian daya, diperlukan identifikasi lokasi depo yang juga dapat digunakan sebagai tempat pengisian daya di siang hari jika memerlukan pengisian daya tambahan. Hal ini perlu dilakukan untuk meminimalisir pembangunan dan instalasi pengisian daya tambahan di lokasi lainnya. Pemilihan lokasi depo dan alokasi rute harus direncanakan sedemikian rupa agar meminimalisir kilometer tempuh kosong ke depo.

Berdasarkan rencana koridor BRT Semarang dan rute eksisting Trans Semarang saat ini, maka terdapat tiga opsi lokasi depo yang dapat diusulkan yaitu: (1) Terminal Mangkang; (2) Terminal Penggaron; dan (3) Terminal Terboyo.



Gambar 15. Potensi Lokasi Pengisian Daya untuk Elektrifikasi Trans Semarang berdasarkan Rencana Koridor BRT Semarang

Masing-masing rute Trans Semarang kemudian dianalisis berdasarkan jarak dari salah satu terminus (merupakan halte akhir dari masing-masing rute) ke potensi lokasi depo. Hasil estimasi jarak dari salah satu terminus masing-masing koridor Trans Semarang ke masing-masing potensi depo ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Estimasi Jarak Terdekat dari Terminus Rute Trans Semarang ke Depo Potensial

Koridor	Rute	Jarak Terdekat dari Salah Satu Terminus ke Lokasi Depo (km)		
		Mangkang	Penggaron	Terboyo
1	Mangkang - Penggaron	0	0	13.1
2	Terboyo - Sisemut	25.6	15	0
3	Tanjung Mas - AKPOL	21.2	11.7	5.4
4	Cangkiran - Stasiun Tawang	18.1	12.2	6

Koridor	Rute	Jarak Terdekat dari Salah Satu Terminus ke Lokasi Depo (km)		
		Mangkang	Penggaron	Terboyo
5	Meteseh - PRPP	22.6	11	18.2
6	UNDIP - UNNES	28.8	19.2	20.7
7	Terboyo - Pemuda	15.7	11.6	0
8	Cangkiran - Simpang Lima	19.3	8.8	10
Rata-rata Jarak ke Depo untuk Seluruh Rute		18.9	11.2	9.2
Rata-rata Jarak ke Depo untuk Rute Pilot Potensial		13.57	7.73	12.4

Berdasarkan hasil estimasi tersebut, secara keseluruhan Terminal Terboyo merupakan lokasi ideal untuk depo dan juga tempat pengisian daya rute Trans Semarang karena memberikan rata-rata kilometer tempuh kosong yang lebih kecil dibandingkan dengan opsi Terminal Mangkang dan Terminal Penggaron. Namun, jika hanya memperhitungkan empat rute potensial pilot bus listrik, maka Terminal Penggaron merupakan lokasi yang ideal untuk dijadikan depo dan lokasi pengisian daya saat siang hari (jika diperlukan) untuk rute pilot bus listrik Trans Semarang.

4.2.3.2 Analisis Strategi Pengisian Daya

Setelah pengumpulan data, analisis pasar, penentuan lokasi depo, dan alokasi rute ke masing-masing depo, maka dapat dilakukan analisis strategi pengisian daya terhadap rute potensial pilot bus listrik Trans Semarang, yaitu Koridor 1, Koridor 4, dan Koridor 5. Dari keempat rute tersebut, sesuai dengan perencanaan operasional seperti yang ditunjukkan di Tabel 8, hanya Koridor 1 yang menggunakan bus besar, dan kedua rute lainnya menggunakan bus sedang. Selanjutnya sesuai dengan analisis pasar, maka baterai yang akan digunakan untuk analisis strategi pengisian daya bus besar adalah 324 kWh dan 350 kWh, sedangkan untuk bus sedang akan menggunakan baterai 180 kWh.

Kapasitas baterai yang telah dipilih ini kemudian dihitung estimasi jarak tempuh masing-masing berdasarkan beberapa faktor. Dalam implementasinya, baterai akan mengalami penurunan performa setiap tahunnya. Meskipun tidak linear, namun berdasarkan studi-studi sebelumnya, diperkirakan penurunan kapasitas baterai di tahun ke 8 adalah sebesar 20% sehingga perlu dilakukan penggantian baterai. Selain itu, untuk menjaga performa baterai juga diperlukan rasio cadangan sebesar 20%, artinya dalam operasionalnya, ketersediaan baterai tidak boleh kurang dari 20%. Tabel 12 menunjukkan estimasi jarak tempuh dari pilihan baterai yang digunakan di tahun awal operasi, dan estimasi di tahun ke-8.

Tabel 12. Estimasi Jarak Terdekat dari Terminus Rute Trans Semarang ke Depo Potensial

Tipe Bus	Bus Besar (12 m)		Bus Sedang (9 m)
	A	B	A
Pilihan	A	B	A
Kapasitas Baterai (kWh)	324	350	180
Batas berat maksimum* yang diterapkan di Indonesia (kg)	16.000		8.000
Asumsi			
Konsumsi energi (kWh/km)	1,2		1,0
Degradasi baterai dari waktu ke waktu (pada tahun ke-8)	20%		20%
Rasio cadangan (SoC)	20%		20%
Kapasitas baterai pada tahun awal operasi (tanpa degradasi baterai) (kWh)	259.2	280	144
Kapasitas baterai pada tahun ke-8 (kWh)	213.8	231	118.8
Estimasi jarak tempuh di tahun awal operasi (km)	216	233.3	120
Estimasi jarak tempuh di tahun ke-8 (km)	178.2	192.5	99

* = berat maksimum ini berlaku untuk kendaraan konvensional, untuk kendaraan listrik terdapat penyesuaian.

Untuk menentukan strategi pengisian daya, terdapat beberapa opsi pengisian daya yang dianalisis pada studi ini. Penentuan opsi pengisian daya akan memengaruhi spesifikasi alat pengisian daya, termasuk jenis dan jumlah alat yang diperlukan. Secara umum, terdapat dua strategi pengisian daya, yaitu pengisian daya malam hari (*overnight charging*) dan pengisian daya siang hari (*opportunity charging*). Pengisian daya pada malam hari biasanya dilakukan di depo, sedangkan untuk pengisian daya pada siang hari saat jam operasional, dapat dilakukan di depo, terminus, atau lokasi pengisian daya lainnya yang telah ditentukan. Masing-masing strategi pengisian daya ini akan berdampak langsung pada kebutuhan listrik serta pembaharuan yang diperlukan pada infrastruktur listrik. Berikut merupakan penjabaran terkait langkah dalam menentukan strategi pengisian daya yang akan digunakan dalam studi ini.

1. **Membandingkan jarak tempuh harian per bus per rute dengan estimasi jarak tempuh bus listrik yang dipilih.** Jika jarak tempuh harian lebih kecil dibandingkan dengan jarak tempuh bus listrik, maka hanya diperlukan sistem pengisian daya malam hari di depo. Pengisian daya ini dilakukan di luar jam operasional. Dengan menggunakan asumsi waktu bus di depo adalah selama 10 jam, dan waktu pengisian daya sampai penuh dapat dilakukan selama dua hingga tiga jam, dan dibutuhkan penjadwalan untuk mengakomodasi seluruh busnya. Dengan menggunakan tolok ukur jadwal kedatangan bus di depo (setelah beroperasi) dari Transjakarta, jadwal pengisian bus di depo dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu, kelompok pertama sebanyak 30%, kelompok kedua 50%, dan kelompok terakhir 20%.
2. Untuk rute dengan kilometer tempuh harian yang lebih tinggi dibandingkan dengan estimasi jarak tempuh bus listrik dalam sekali pengisian daya, maka **analisis lebih lanjut**

akan dilakukan untuk menentukan opsi pengisian daya tambahan di siang hari. Pengisian daya tambahan di siang hari dapat dilakukan di depo ataupun di halte ujung (terminus) dari masing-masing rute.

a. **Pemilihan pengisian daya di siang hari di depo dapat dipilih jika jarak antar salah satu halte terakhir (terminus) ke depo tidak melebihi 5 km.** Asumsi ini didasarkan pada batasan kilometer kosong yang dapat ditempuh saat ini yang ditetapkan di Transjakarta, yaitu 20 km per hari. Sehingga jarak tempuh kosong saat pengisian daya di siang hari masih sesuai dengan batasan ini. Aspek lainnya yang harus dipertimbangkan adalah terkait status dari *state of charge* (SoC) terakhir sebelum jadwal pengisian siang hari tidak boleh lebih rendah dari 20%.

b. Pengisian daya di siang hari di terminus

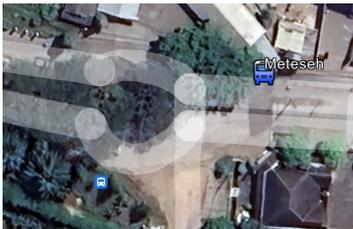
Untuk rute dengan jarak antar terminus dan depo lebih dari 5 km, maka pengisian daya dapat dilakukan di terminus (lokasi akhir pemberhentian bus) pada masing-masing rute. Faktor-faktor yang digunakan dalam memperkirakan jumlah alat pengisian daya yang diperlukan adalah sebagai berikut:

- **Jumlah sesi pengisian daya akan dibatasi menjadi dua kali per hari;**
- **Ketersediaan lahan di masing-masing terminus** untuk parkir bus dan instalasi alat pengisian daya;
- **Kebutuhan energi** di masing-masing rute berdasarkan jadwal pengisian daya; dan
- **Durasi waktu yang tersedia** untuk pengisian daya tambahan berdasarkan waktu siklus, *headway*, dan jam tidak sibuk.

Agar tidak mengganggu operasional Trans Semarang, pengisian daya di siang hari harus dilakukan di luar jam sibuk. Karena pada jam tidak sibuk, armada yang beroperasi direkomendasikan hanya 60% dari total armada di tiap rute yang dioperasikan, sehingga 40% sisanya dapat melakukan pengisian daya tambahan di depo ataupun di tempat pengisian daya tambahan, seperti terminus. Bus yang sudah terisi penuh akan bergantian untuk beroperasi hingga seluruh bus dapat melakukan pengisian daya pada jam tidak sibuk untuk memenuhi kebutuhan operasionalnya. Dalam analisis ini waktu tidak sibuk ditetapkan di antara pukul 07.30 hingga jam 15.00.

Tabel 13 menunjukkan ketersediaan lahan di terminus dari masing-masing rute potensial untuk pilot bus listrik pada sistem Trans Semarang.

Tabel 13. Analisis Ketersediaan Lahan untuk Pengisian Daya di Siang Hari (Jika Diperlukan)

Rute	Terminus	Tampak Atas (Google Earth)	Keterangan
Koridor 1	Mangkang		Terminal Tipe A, terdapat lahan untuk parkir bus dan memungkinkan untuk lokasi pengisian daya
	Penggaron		Terminal Tipe B, terdapat lahan untuk parkir bus dan memungkinkan untuk lokasi pengisian daya
Koridor 4	Cangkiran		Terminal Tipe B, terdapat lahan untuk parkir bus dan memungkinkan untuk lokasi pengisian daya
	Stasiun Tawang		Terminus berupa halte pinggir, sehingga tidak memungkinkan untuk tempat parkir bus dan pengisian daya
Koridor 5	Meteseh		Terminus berupa halte pinggir, sehingga tidak memungkinkan untuk tempat parkir bus dan pengisian daya

Rute	Terminus	Tampak Atas (Google Earth)	Keterangan
	PRPP		Terminus berupa halte pinggir, sehingga tidak memungkinkan untuk tempat parkir bus dan pengisian daya

Dari hasil identifikasi terminus dari ketiga rute ini, maka dapat disimpulkan bahwa jika dibutuhkan pengisian daya tambahan di siang hari, maka Koridor 1 dan Koridor 4 dapat menggunakan terminus berupa terminal sebagai lokasi pengisian daya. Namun, untuk Koridor 5, karena lokasi terminus berada di sisi jalan, maka tidak memungkinkan untuk menjadi lokasi pengisian daya di siang hari.

Tabel 14 menunjukkan rangkuman identifikasi strategi pengisian daya untuk rute potensial pilot bus listrik berdasarkan jarak terminus ke depo dan ketersediaan lahan di terminus. Jika membandingkan kilometer tempuh harian ketiga rute tersebut dengan estimasi jarak tempuh dari masing-masing kapasitas baterai, maka seluruh rute akan membutuhkan pengisian daya tambahan di siang hari, kecuali untuk rute Koridor 1 jika menggunakan baterai 350 kWh.

Tabel 14. Analisis Strategi Pengisian Daya berdasarkan Ketersediaan Lahan untuk Pengisian Daya di Siang Hari

Rute	Asal - Tujuan	Jenis Bus	Jumlah Bus yang Beroperasi (SO)	Jarak Tempuh Harian (km)	Estimasi Jangkauan Baterai di Awal Operasi	Jarak dari Terminus ke Depo kurang dari 5 km	Terdapat lahan kosong untuk pengisian daya di Terminus
Kor 1	Mangkang - Penggaron	Bus Besar	40	232.00	324 kWh = 216 km	Ya	Ya (Kedua Terminus)
					350 kWh = 233 km		
Kor 4	Cangkiran - Stasiun Tawang	Bus Sedang	50	240.00	120 km	Tidak	Ya (Terminal Cangkiran)
Kor 5	Meteseh - PRPP	Bus Sedang	36	256.00	120 km	Tidak	Tidak

Koridor 5 tidak dianjurkan sebagai rute pilot bus listrik, karena jarak dari terminus yang jauh dari depo rencana (Terminal Penggaron) dan tidak terdapatnya lahan untuk parkir bus dan instalasi alat pengisian daya di siang hari, maka hanya rute Koridor 1 dan Koridor 4 yang disarankan sebagai rute pilot bus listrik dari sistem Trans Semarang.

Langkah selanjutnya adalah menentukan strategi pengisian daya serta jumlah alat pengisian daya yang dibutuhkan untuk melakukan pengisian daya di malam dan siang hari.

Kebutuhan alat pengisian daya ini bergantung pada lama waktu yang tersedia untuk proses pengisian daya dan keluaran daya dari alat pengisian daya yang digunakan.

Untuk pengisian daya di malam hari di depo, terdapat rentang waktu sekitar 10 jam di depo yang dapat digunakan untuk kegiatan pemeliharaan dan juga pengisian daya (akan dijelaskan lebih lanjut di sub-bab 4.3). Sedangkan untuk pengisian daya di siang hari akan dilakukan di jam tidak sibuk Trans Semarang. Secara umum, estimasi waktu pengisian daya untuk satu bus, dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Estimasi waktu pengisian daya/bus} = \frac{\text{Energi yang Dibutuhkan (kWh)}}{\text{Keluaran alat pengisian daya (kW)} \times \text{Efisiensi alat pengisian daya}}$$

$$\text{Jumlah alat pengisian daya} = \frac{\text{Lama waktu yang tersedia untuk pengisian daya}}{\text{Estimasi waktu pengisian daya/bus} \times \text{Jumlah bus per pengisian daya}}$$

Dengan menggunakan metode tersebut, maka kebutuhan alat pengisian daya untuk masing-masing tipe bus dan kapasitas baterainya dapat dihitung (lihat Tabel 15).

Tabel 15. Strategi Pengisian Daya untuk Rute Pilot Bus Listrik Trans Semarang

Rute	Asal-Tujuan	Jenis Bus dan Kapasitas Baterai	Strategi Pengisian Daya	Kebutuhan Alat Pengisian Daya (150 kW) di Depo	Kebutuhan Alat Pengisian Daya (150 kW) di Siang Hari
Kor 1	Mangkang - Penggaron	Bus Besar 324 kWh	Pengisian Daya Malam dan Siang Hari di Depo	14	10*
		Bus Besar 350 kWh	Pengisian Daya Malam Hari di Depo		-
Kor 4	Cangkiran - Stasiun Tawang	Bus Sedang 180 kWh	Pengisian Daya Malam Hari di Depo dan Pengisian Daya Siang Hari di Terminus	9	12

* = menggunakan alat pengisian daya yang sama dengan pengisian daya malam hari di depo

4.2.4 Analisis Total Biaya Kepemilikan

Setelah menganalisis strategi pengisian daya untuk masing-masing jenis bus dan kapasitas baterai yang ada, maka untuk menentukan kapasitas baterai dari bus yang dipilih, juga diperlukan analisis total biaya kepemilikan atau yang dikenal dengan *total cost of ownership* (TCO). Analisis ini mempertimbangkan semua biaya, baik biaya langsung maupun tidak langsung selama masa pakai produk atau ketika sebuah sistem (proyek) telah selesai. Terkait penggunaannya dalam analisis bus listrik, analisis TCO bertujuan untuk mengidentifikasi teknologi bus dan rencana operasional dengan total biaya kepemilikan yang paling rendah.

Pada studi ini, analisis TCO ini juga digunakan untuk membandingkan TCO jika menggunakan bus diesel dan menggunakan bus listrik. Untuk meniadakan pengaruh perbedaan usia pakai antara bus diesel dan bus listrik, nilai TCO dihitung dengan membagi total biaya dengan total kilometer yang ditempuh selama usia pakai bus untuk menghasilkan nilai TCO per km. Nilai

TCO per km inilah yang menjadi dasar perbandingan total biaya kepemilikan antara bus listrik dan bus diesel dengan usia pakai yang berbeda.

Secara garis besar, analisis diawali dengan pengembangan model perhitungan TCO yang mencakup modal dan biaya operasional selama usia pakai yaitu 10 tahun untuk bus diesel dan bus listrik dengan mengacu pada kontrak yang berlaku saat ini di Transjakarta. Kontrak Transjakarta ini didasarkan pada Peraturan Daerah yang ada. Namun, dalam implementasinya, untuk operasional bus listrik karena penggantian baterai dilakukan pada tahun ke-8, maka kontrak bus listrik dapat dibuat lebih panjang, yaitu hingga 15 tahun. Sehingga dilakukan analisis TCO dengan durasi kontrak bus listrik selama 10 tahun dan 15 tahun, sedangkan untuk kontrak bus diesel akan menggunakan masa kontrak 10 tahun.

Langkah-langkah analisisnya adalah sebagai berikut.

1. Menginventarisir infrastruktur pengisian daya tambahan yang dibutuhkan berdasarkan hasil analisis strategi pengisian daya. Analisis ini dimulai dari jenis bus dengan kapasitas baterai paling rendah untuk memenuhi kebutuhan operasional yang ada. Apabila pengisian daya di depo tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan operasional harian bus, infrastruktur pengisian daya tambahan perlu disediakan dengan penambahan biaya yang dihitung ke dalam TCO.
2. Menghitung TCO per kilometer. TCO per km untuk bus listrik ini dihitung untuk masing-masing jenis bus dan kapasitas baterai yang digunakan. Selain itu, TCO per kilometer untuk bus diesel juga akan dihitung sebagai pembandingan.

Untuk menghitung TCO, beberapa aspek yang dipertimbangkan adalah sebagai berikut:

Total biaya kepemilikan bus (TCO) = biaya modal + biaya operasional + biaya pemeliharaan + biaya polusi

- Biaya Modal

Biaya modal termasuk di dalamnya biaya pengadaan armada, penggantian baterai, pembelian alat pengisi daya dan instalasi, asuransi, hukum, dan pajak. Nilai residu bus di akhir masa pakai juga dipertimbangkan dalam perhitungan biaya modal. Lampiran A1 menunjukkan komponen biaya modal, nilai, dan asumsi yang digunakan di dalam perhitungan aspek ini.

- Biaya Operasional Bus

Biaya operasional termasuk di antaranya biaya untuk upah pegawai, biaya *overhead*, serta biaya energi bus listrik dan diesel. Nilai dan asumsi dari setiap komponennya dapat dilihat pada Lampiran A2.

- Biaya Pemeliharaan Bus

Biaya pemeliharaan terdiri dari biaya perawatan bus dan infrastruktur pengisian daya dengan komponen sesuai Lampiran A3.

- Parameter Ekonomi

Selain parameter biaya, terdapat parameter ekonomi yang digunakan pada perhitungan TCO. Di antaranya adalah taraf diskon, taraf pinjaman, durasi angsuran, nilai tukar USD terhadap IDR, tingkat inflasi, jumlah hari kerja dalam satu tahun, dan tahun kontrak. Lampiran A4 menunjukkan komponen parameter ekonomi yang digunakan dalam perhitungan aspek ini.

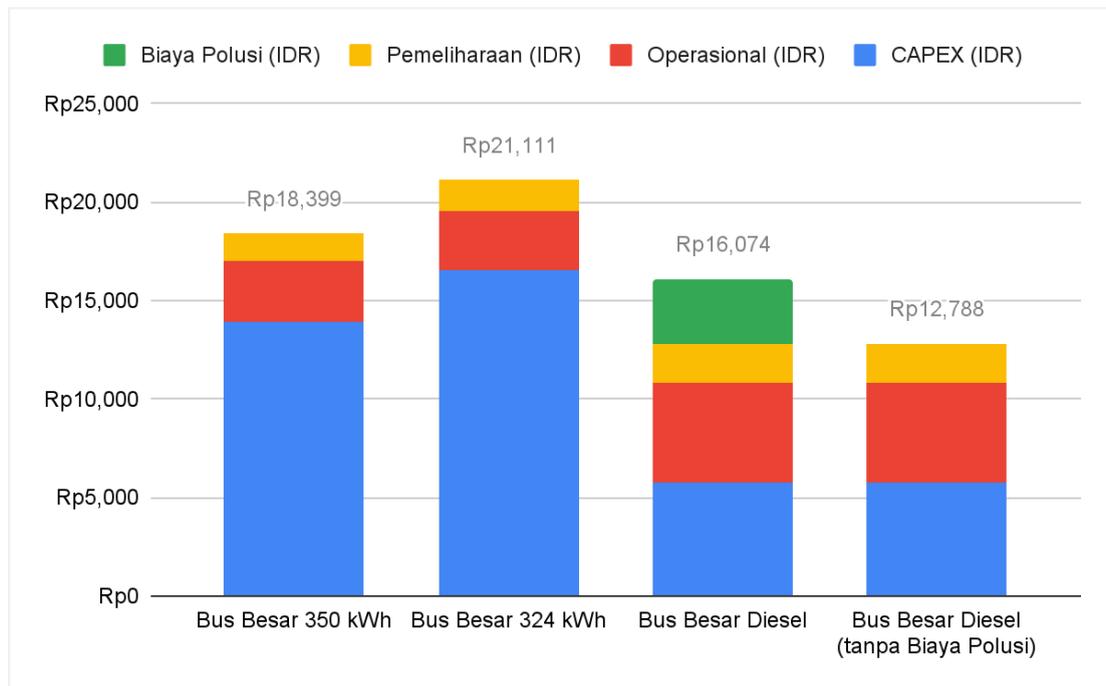
- Biaya Polusi

Biaya polusi adalah biaya yang dihasilkan dari emisi kendaraan. Emisi kendaraan yang dipertimbangkan dalam analisis ini termasuk partikel PM2.5, NOx, SO2, dan gas rumah kaca (CO2 ataupun polutan setara GRK lainnya). Lampiran A5 menunjukkan biaya polusi yang didapat dari penyesuaian nilai biaya polusi studi 2014 dengan harga 2023 menggunakan tingkat inflasi rata-rata di Indonesia (3.03% YoY). Biaya emisi per bus kemudian dihitung berdasarkan jumlah emisi dalam gram/km yang dihasilkan oleh setiap kendaraan.

Pemilihan teknologi bus akan dipilih berdasarkan kebutuhan biaya yang paling rendah yang dapat dilihat pada besaran TCO per km. Dalam studi ini, nilai TCO per km dihitung dengan menggunakan durasi kontrak yang berbeda yaitu 10 tahun dan 15 tahun. Hasil analisis TCO ini belum memperhitungkan biaya kilometer tempuh kosong harian.

4.2.4.1 Hasil Analisis TCO Durasi Kontrak 10 Tahun

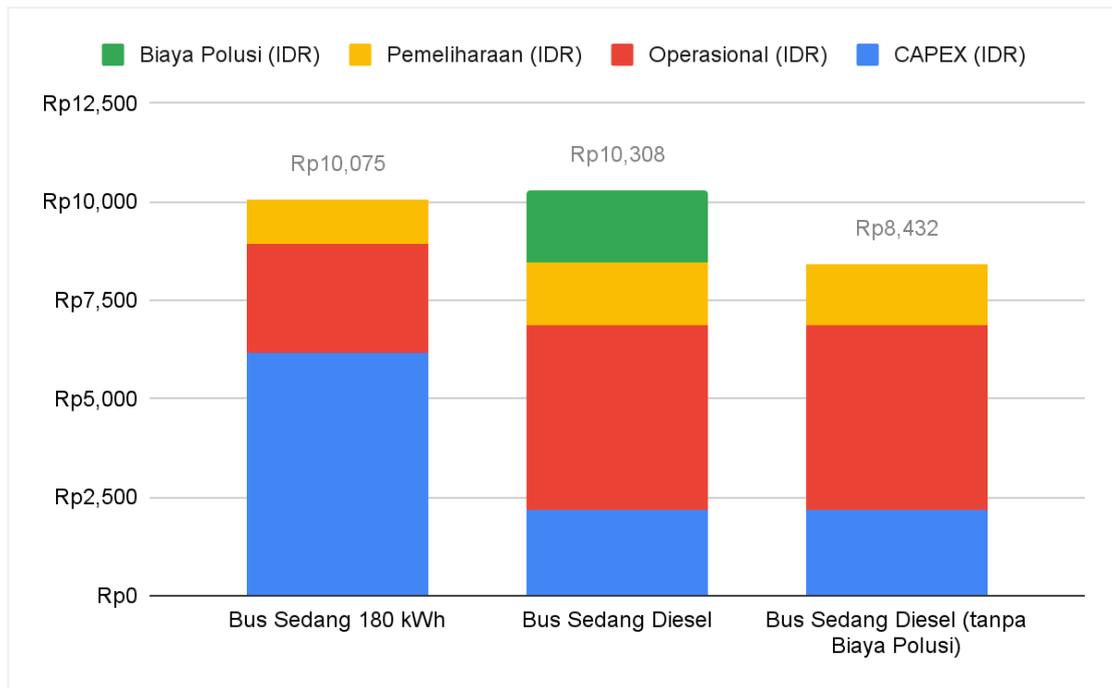
Dalam analisis ini, bus listrik dan bus diesel diasumsikan memiliki lama masa kontrak yang sama yaitu 10 tahun. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa TCO per km untuk bus diesel (tanpa memperhitungkan biaya polusi) memberikan nilai paling murah, sekitar Rp 12.788,00. Jika memperhitungkan biaya polusi yang berasal dari emisi gas buang kendaraan diesel, nilai TCO untuk bus diesel masih lebih rendah (sekitar Rp 16.074,00) dibandingkan dengan bus listrik dengan kapasitas baterai 324 kWh maupun 350 kWh yang nilainya adalah Rp 21.111,00 dan Rp. 18.399,00.



Gambar 16. Hasil Analisis TCO/km untuk Rute Koridor 1 Trans Semarang (Durasi Kontrak 10 Tahun)

Berbeda dengan Koridor 1, untuk Koridor 4 bus yang digunakan adalah bus sedang dengan kapasitas baterai 180 kWh. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa TCO per km untuk bus sedang

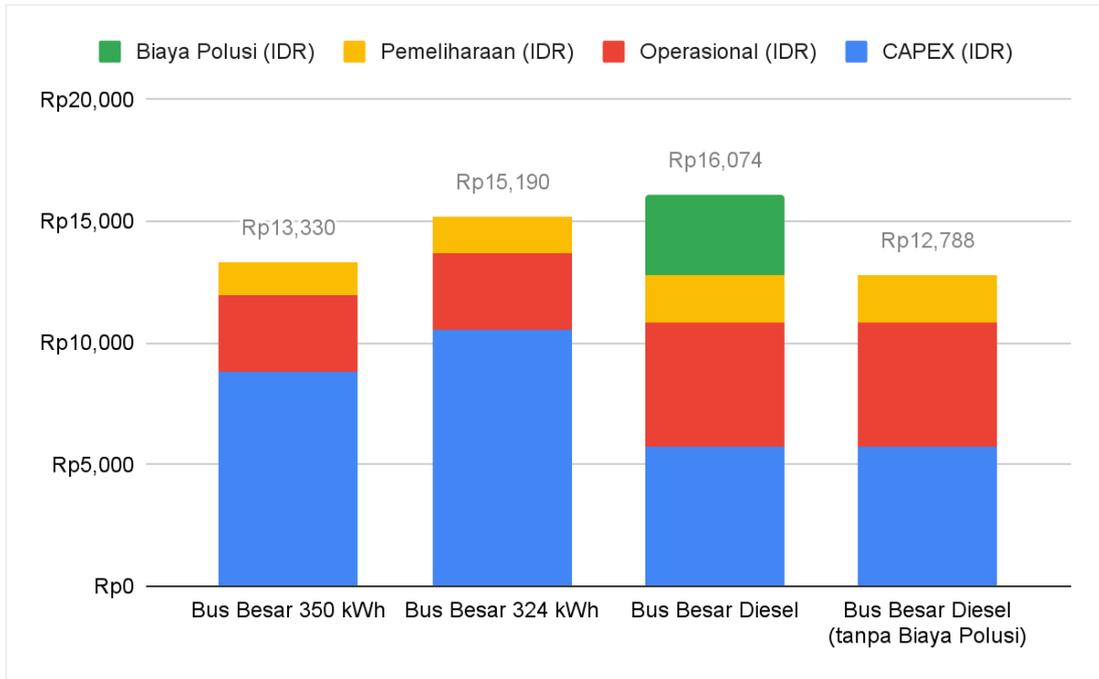
listrik masih lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan bus diesel tanpa memperhitungkan biaya polusi. Namun, jika memperhitungkan biaya polusi, maka TCO per km dari bus sedang listrik untuk Koridor 4 akan lebih rendah yaitu Rp. 10.075,00 atau 2.3% lebih dibandingkan dengan TCO bus diesel dengan biaya polusi.



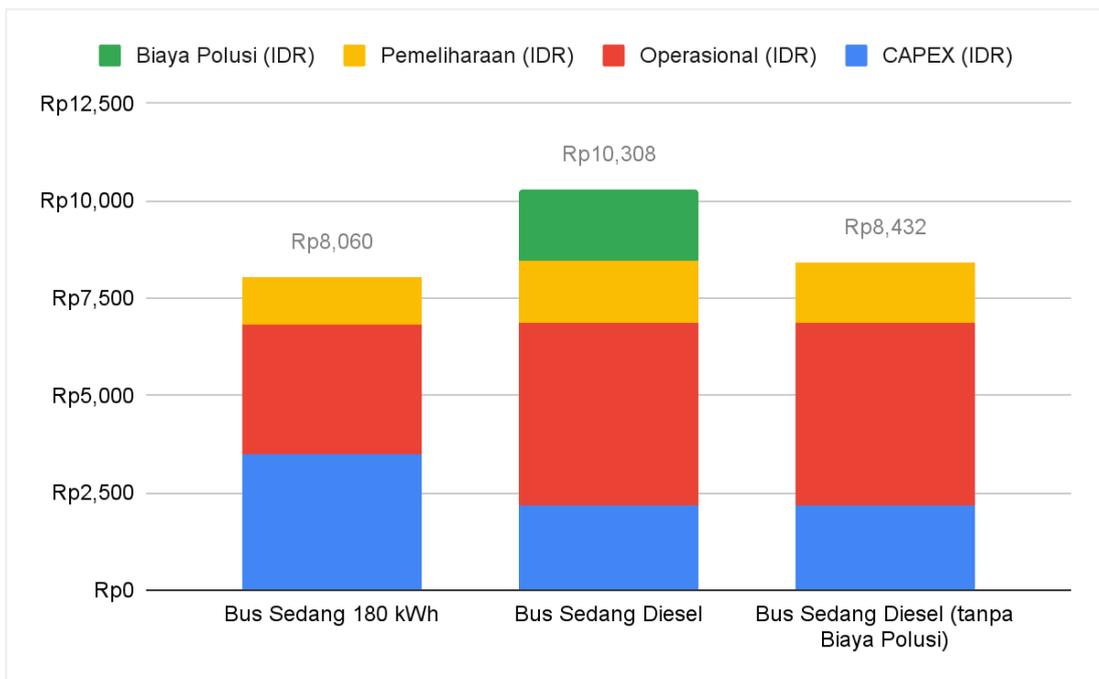
Gambar 17. Hasil Analisis TCO/km untuk Rute Koridor 4 Trans Semarang (Kontrak 10 Tahun)

4.2.4.2 Hasil Analisis TCO Durasi Kontrak 15 Tahun untuk Bus Listrik

Berbeda dengan durasi kontrak 10 tahun, hasil analisis jika bus listrik yang digunakan di Koridor 1 dan Koridor 4 digunakan selama 15 tahun. Nilai TCO bus besar listrik untuk baterai kapasitas 324 kWh dan 350 kWh lebih rendah dibandingkan dengan nilai TCO bus diesel dengan bus diesel dengan biaya polusi (lihat Gambar 18).



Gambar 18. Hasil Analisis TCO/km untuk Rute Koridor 1 Trans Semarang (Kontrak 15 Tahun)



Gambar 19. Hasil Analisis TCO/km untuk Rute Koridor 4 Trans Semarang (Kontrak 15 Tahun)

Sedangkan untuk bus sedang listrik dengan kapasitas baterai 180 kWh nilai TCOnya akan lebih rendah dibandingkan dengan TCO per km bus diesel (dengan ataupun tanpa memperhitungkan biaya polusi) yaitu Rp 8.060,00. Hal ini menunjukkan bahwa untuk mendapatkan keuntungan yang optimal dari operasional bus listrik, maka masa kontrak bus listrik harus lebih panjang dari masa kontrak yang saat ini digunakan untuk bus diesel.

4.2.4.3 Pemilihan Teknologi Bus Listrik

Berdasarkan hasil analisis TCO per km untuk masa kontrak 10 tahun dan 15 tahun, maka dapat disimpulkan bahwa untuk Koridor 1, biaya TCO per km bus besar listrik dengan baterai 350 kWh TCO lebih rendah dibandingkan dengan bus besar listrik 324 kWh. Hal ini dikarenakan jika menggunakan baterai berkapasitas 350 kWh, maka tidak akan memerlukan pengisian daya tambahan di siang hari, sehingga mempengaruhi nilai TCO per km. Untuk rute Koridor 4, bus sedang dengan kapasitas baterai 180 kWh dapat digunakan. Untuk mendapatkan manfaat optimal dari bus listrik, maka disarankan agar masa kontrak kendaraan listrik dapat dioperasikan hingga 15 tahun.

4.2.5 Analisis Dampak Lingkungan

Analisis dampak lingkungan penting untuk dilakukan untuk menganalisis dampak penggunaan operasional bus listrik pada emisi gas buang dan emisi gas rumah kaca (GRK). Analisis ini dilakukan dengan menggunakan model inventarisasi emisi kendaraan untuk mengetahui penurunan emisi gas buang dan emisi GRK. Metode ini memperkirakan emisi berdasarkan aktivitas bus selama setahun, efisiensi bahan bakar, dan emisi faktor. Faktor emisi yang digunakan untuk analisis dampak lingkungan ini dapat dilihat pada Lampiran B.

Perhitungan emisi gas buang dihitung melalui persamaan berikut.

$$E_{emiss} = \sum_{(b,e,f)} EF_{(emiss, b, e)} \times VKT_{(b,e,f)} \times 10^{(-6)}$$

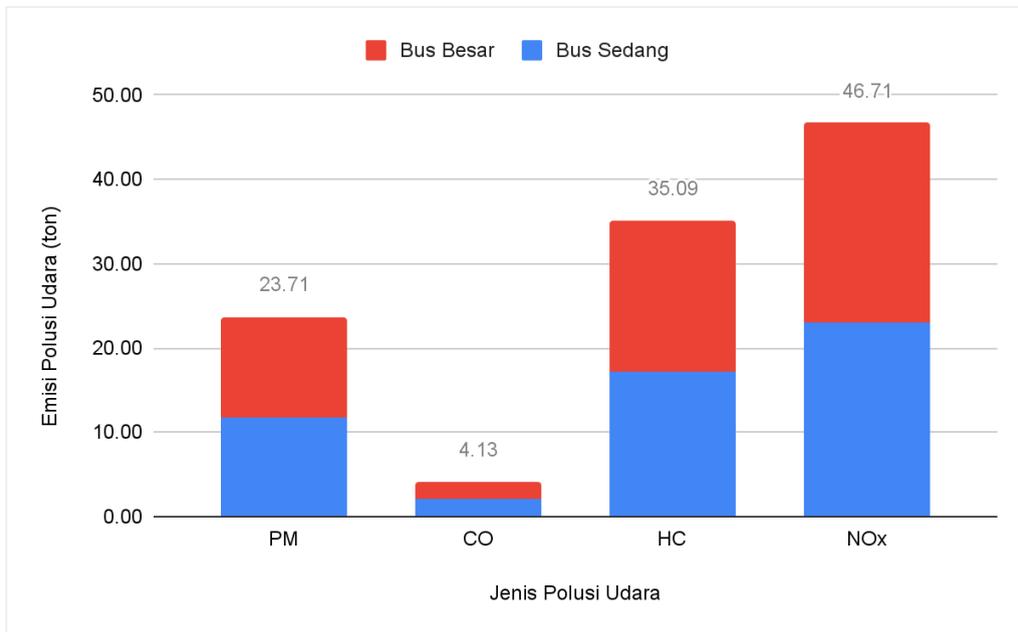
Di mana:

b, e, f = jenis bus, teknologi mesin, dan jenis bahan bakar masing-masing

$EF_{emiss,b,e}$ = faktor emisi untuk jenis bus (gr/km)

$VKT_{b,e,f}$ = kilometer tempuh kendaraan per tahun

Dalam studi ini emisi polusi udara dilakukan terhadap empat jenis polutan yang berasal dari emisi gas buang kendaraan seperti partikulat (PM), karbon monoksida (CO), hidro karbon (HC) dan nitrogen oksida (NOx). Penggunaan kendaraan bus listrik tidak akan menghasilkan emisi gas buang, sehingga dampak dari penggunaan bus listrik dalam untuk rute pilot di Trans Semarang per tahunnya ditunjukkan pada Gambar 20. Diasumsikan bahwa seluruh bus listrik akan dioperasikan di Koridor 1 dan Koridor 4, di mana akan terdapat 40 bus besar listrik dan 50 bus sedang listrik yang beroperasi. Dengan dioperasikannya bus tersebut, maka manfaat lingkungan yang akan diperoleh adalah terdapat penurunan emisi PM sebesar 23,7 ton, emisi CO sebesar 4,1 ton, emisi HC sebesar 35,1 ton, dan penurunan emisi NOx sebesar 46,7 ton ketika menggunakan bus listrik di Koridor 1 dan Koridor 4. Penurunan polusi udara ini terjadi karena bus listrik tidak menghasilkan emisi gas buang seperti yang dihasilkan oleh bus diesel.



Gambar 20. Estimasi Penurunan Polusi Udara dari Implementasi Rute Pilot Bus Listrik di Koridor 1 dan Koridor 4 Trans Semarang

Sedangkan untuk emisi GRK dihitung dengan menggunakan dua cara yaitu emisi langsung dari pembakaran bahan bakar di mesin pembakaran internal (*tank-to-wheel*, TTW) dan emisi hulu yang terkait dengan produksi bahan bakar dan listrik (*well-to-tank*, WTT). Penjumlahan dari keduanya menghasilkan siklus hidup atau emisi *well-to-wheel* (WTW). Untuk menghitung emisi dari WTT menggunakan faktor emisi grid yaitu 0,877 tCO₂/kWh.⁴² Model evaluasi GRK ini dapat membandingkan penurunan emisi GRK antara penggunaan bus diesel dan bus listrik. Persamaan yang digunakan untuk menghitung emisi ini adalah sebagai berikut:

$$E_{GHG} = \sum_{(b,e,f)} EC_{(b,e)} \times EF_f \times VKT_{(b,e,f)} \times 10^{(-12)}$$

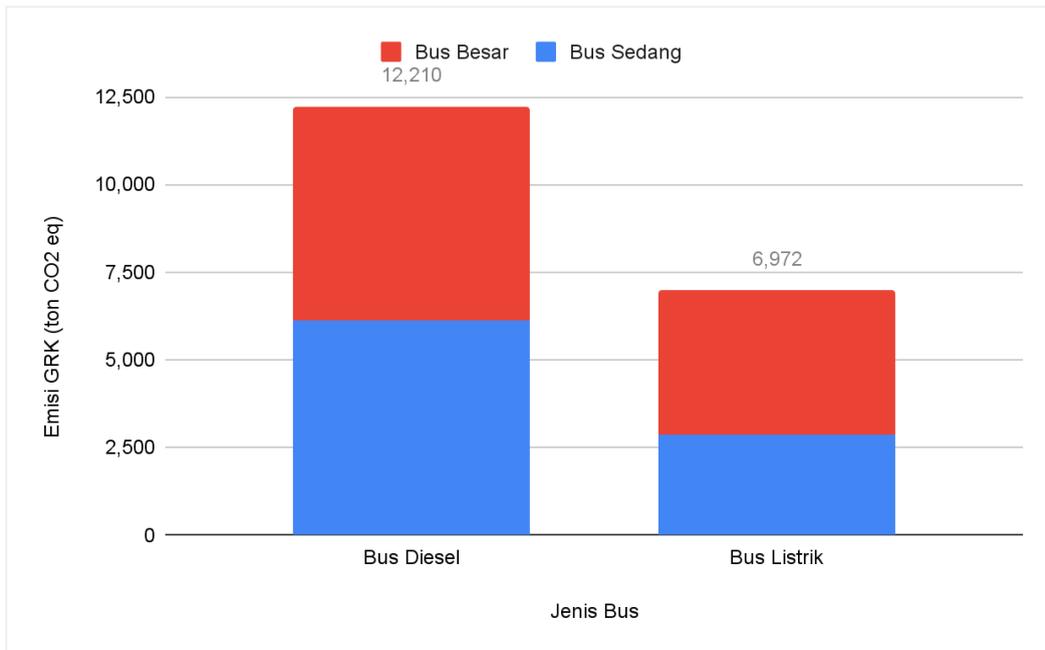
Di mana:

- b, e, f = jenis bus, teknologi mesin, dan jenis bahan bakar masing-masing
- EC_{b,e} = konsumsi energi dan teknologi mesin jenis bus tertentu (kWh/km)
- EF_f = faktor emisi gas buang untuk jenis bahan bakar tertentu (g/kWh)

Hasil estimasi penurunan GRK karena adanya implementasi rute pilot di Koridor 1 dan Koridor 4 Trans Semarang yang ditunjukkan pada Gambar 21 menunjukkan bahwa jika kedua koridor ini menggunakan bus listrik, maka akan terdapat penurunan emisi GRK. Penurunan GRK ini dihitung dengan membandingkan emisi CO₂ yang disebabkan oleh implementasi bus diesel di Koridor 1 dan Koridor 4 sebagai *business-as-usual*. Hasil ini kemudian dibandingkan jika armada yang digunakan di kedua koridor ini semuanya diganti menggunakan bus listrik.

⁴² PT Mitra Pembangunan Jaya. 2020. *Laporan Akhir Studi Kelayakan Bus Rapid Transit Semarang*.

Hasil analisis dari studi ini menunjukkan bahwa akan terdapat pengurangan emisi GRK sebesar 42,9% dari 12,210 ton CO₂ eq ke 6,972 ton CO₂ eq jika Koridor 1 dan Koridor 4 Trans Semarang dioperasikan menggunakan bus listrik.



Gambar 21. Estimasi Penurunan Emisi GRK dari Implementasi Rute Pilot Bus Listrik di Koridor 1 dan Koridor 4 Trans Semarang

4.3 Perencanaan Infrastruktur untuk Rute Pilot Bus Listrik

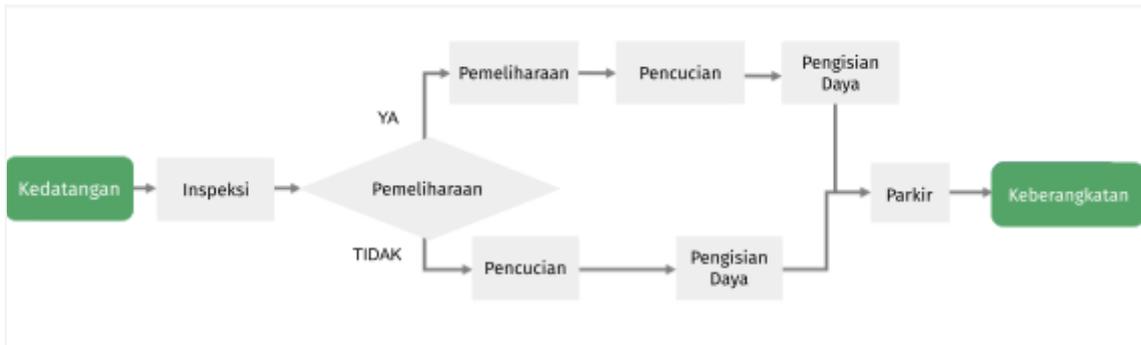
4.3.1 Konseptual Desain untuk Tipikal Depo Bus Listrik

Depo merupakan infrastruktur yang penting yang diperlukan untuk implementasi sistem transportasi publik. Dalam penentuan lokasi depo, lokasinya harus dekat dengan koridor dan rute BRT untuk meminimalkan kilometer tempuh kosong. Selain itu adanya kebutuhan pengisian daya di depo juga membutuhkan koordinasi lebih lanjut dengan Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai penyedia listrik untuk menghubungkan depo dengan jaringan listrik PLN. Lokasi depo penting untuk ditentukan agar dapat meminimalisir kilometer kosong yang lebih tinggi yang akan mengakibatkan penambahan biaya dan berkurangnya efisiensi operasional.

Umumnya sebuah depo BRT juga harus memiliki:

- Area yang luas untuk parkir kendaraan;
- Kualitas perkerasan yang baik;
- Ruang yang cukup untuk manuver bus;
- Infrastruktur pengisian daya (untuk bus listrik);
- Fasilitas pembersihan dan pencucian armada;
- Area perawatan dan perbaikan (*workshop*);
- Kantor administrasi untuk operator dan fasilitas karyawan.

Untuk merencanakan dan merancang infrastruktur depo, penting untuk memahami kegiatan utama di depo. Terkait dengan rencana pilot bus listrik ini, maka perlu disiapkan depo yang dapat digunakan untuk bus listrik. Pada depo bus listrik, terdapat lima kegiatan utama, yaitu mulai dari proses pemeriksaan hingga perawatan (tidak semua bus akan melalui kegiatan ini), pencucian, pengisian, dan parkir. Gambar 22 menunjukkan urutan kegiatan di depo bus listrik.



Gambar 22. Urutan kegiatan di depo bus listrik⁴³

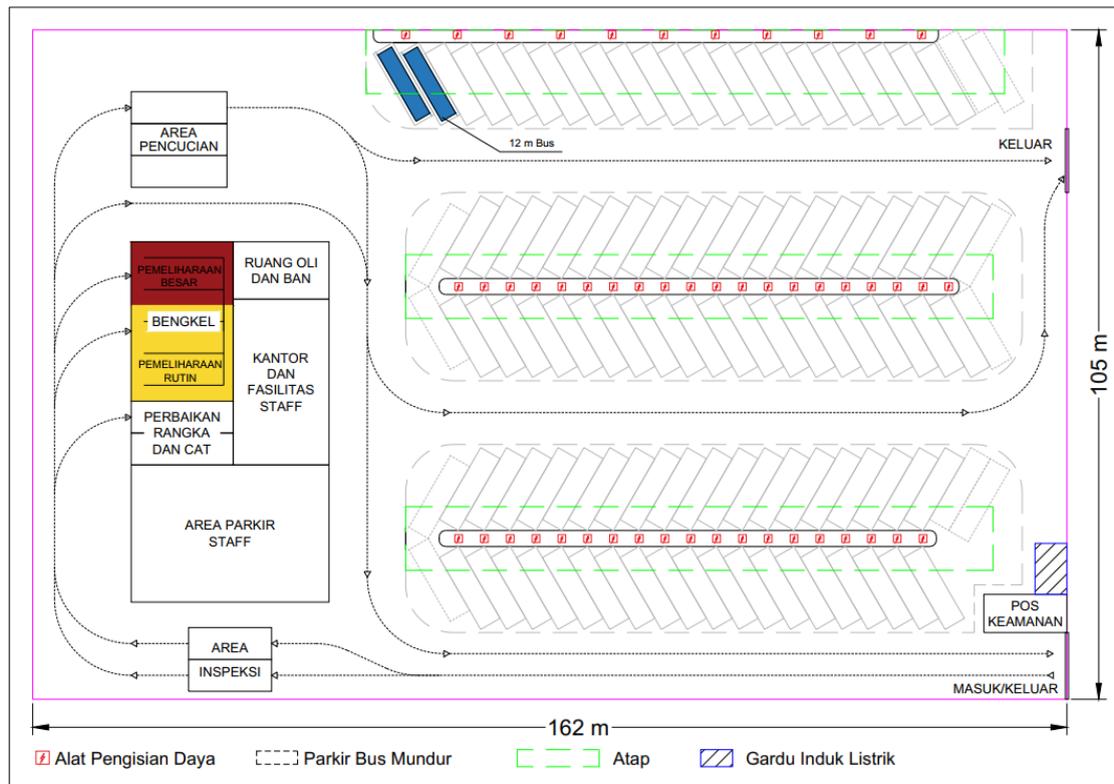
Desain tipikal depo yang direkomendasikan ITDP untuk depo bus listrik untuk mengakomodasi 110 bus listrik besar 12 m termasuk 10% armada cadangan (10 bus listrik). Meskipun untuk rute pilot bus listrik ini hanya dua rute yang akan menggunakan bus listrik, namun kebutuhan jumlah armadanya adalah sekitar 90 bus (40 bus besar dan 50 bus sedang), sehingga tipikal depo ini dapat digunakan. Beberapa asumsi yang digunakan untuk tipikal desain depo ini adalah sebagai berikut:

- Karakteristik bus: bus besar listrik 12 m dengan kapasitas baterai 324 kWh;
- Jenis parkir: Parkir di ketinggian dengan sudut 60 derajat;
- Kapasitas depo: 110 bus listrik (100 bus operasional dan 10 bus cadangan);
- Tipe alat pengisi daya: *Double gun plug-in* 150 kW;
- Jumlah alat pengisi daya: 50 pengisi daya plug-in;
- Estimasi Jumlah staf: 163 staf (sopir dan kru depo)⁴⁴; dan
- Estimasi Luas Depo: 105 m x 162 m ~17.000 m².

⁴³ The World Bank. (2022). *E-mobility Adoption Road Map for The Indonesian Mass Transit Program*.

⁴⁴ SGArchitects. (2017). *Bus Depot Design Guidelines*.

<https://shaktifoundation.in/wp-content/uploads/2017/11/Bus-Depot-Design-Guidelines.pdf>



Gambar 23. Desain Tipikal untuk Depo Bus Listrik⁴⁵

Pada desain tipikal depo bus listrik yang ditunjukkan pada Gambar 23, elemen utama infrastruktur depo bus listrik adalah area inspeksi, area parkir bus, area parkir staf, area fasilitas kantor dan staf, area bengkel, ruang oli dan ban, area perawatan, area cuci, area gardu listrik, dan tempat pengisian. Dengan mempertimbangkan kelancaran sirkulasi bus dan mengoptimalkan ruang di depo, maka tempat parkir untuk bus cadangan ditempatkan di tepi setiap baris di area parkir bus agar tidak memerlukan ruang untuk tempat pengisian. Tempat pengisian daya terletak di tengah antara dua bus yang saling membelakangi untuk memungkinkan pengisi daya secara bersama untuk dua bus dengan alat pengisian daya yang sama. Pada desain ini, dengan mempertimbangkan keluaran (*output*) alat pengisian daya, dan kapasitas baterai, maka estimasi alat pengisian daya yang akan dipasang adalah 50 alat pengisian daya di depo ini, dengan perbandingan satu pengisi daya untuk mengisi daya dua bus listrik secara bersamaan. Untuk rute pilot bus listrik Trans Semarang, jumlah alat pengisian daya dapat disesuaikan dengan hasil perhitungan, di mana hanya dibutuhkan 26 alat pengisian daya untuk di depo Penggaron untuk digunakan oleh Koridor 1 dan Koridor 4.

Berbeda dengan depo untuk bus diesel, depo bus listrik harus terdapat bangunan gardu listrik untuk menampung seluruh kubikel listrik yang dibutuhkan untuk menyalurkan tenaga listrik di area depo, termasuk trafo, genset, panel *microgrid*, dan papan distribusi menengah dan rendah. Terkait hal tersebut, Perusahaan Listrik Negara (PLN) telah mengatur standar dimensi

⁴⁵ The World Bank. (2022). *E-mobility Adoption Road Map for The Indonesian Mass Transit Program*.

untuk bangunan gardu induk yang harus memiliki ukuran minimal 4mx5mx4m dan biasanya terletak di dekat jalan sehingga memiliki akses yang lebih baik dari sumber listrik eksisting. Alokasi ruang untuk setiap fasilitas ditunjukkan pada Tabel 16.

Tabel 16. Alokasi ruang tiap fasilitas untuk depo bus listrik khusus⁴⁶

Estimasi ukuran depo		Luas (m ²)	Jumlah	Total Luas (m ²)
Masuk/keluar	Pos penjaga	78	1	78
Inspeksi	Zona inspeksi	65	2	130
Pengisian daya	Tempat pengisian daya	10	50	500
Pencucian	Tempat cuci	75	3	225
Workshop	Perbaikan dan pemeliharaan	82,5	5	412,5
	Zona Body Shop	80	2	160
Parkir bus	Bus 12 m	45,5	110	5.005
Bangunan	Kantor	390	1	390
	Fasilitas pegawai	390	1	390
Parkir pegawai	Parkir kendaraan	500	1	500
Kelistrikan	Gardu listrik	20	1	20

Berdasarkan alokasi ruang untuk setiap fasilitas dan pertimbangan sirkulasi kendaraan di depo, maka luas depo untuk menampung bus besar listrik sebanyak 110 armada adalah minimal 17.000 m² atau 1,7 ha.

Selain luas depo, alokasi jumlah alat pengisian daya harus direncanakan berdasarkan dengan lama waktu di depo. Pada desain ini, karena menggunakan *double gun plug in* sebagai alat pengisi daya di depo, maka satu alat pengisian daya dapat digunakan oleh dua bus. Dalam memperhitungkan jumlah ini, asumsi pertama yang digunakan dalam perancangan ini adalah jumlah bus listrik yang tiba di depo. Dengan menggunakan tolok ukur dari Transjakarta, maka estimasi waktu kedatangan bus di depo diasumsikan sebagai berikut: 30% bus operasional (30 bus, dari total 100 bus) akan tiba di kelompok pertama, diikuti oleh 50 bus di kelompok kedua, dan bus yang tersisa di kelompok terakhir (lihat Tabel 17).

Tabel 17. Estimasi Kedatangan Bus Listrik pada Depo untuk Rute Pilot Trans Semarang⁴⁷

Aktivitas	Waktu Kedatangan (PM)	Persentase Kedatangan
Kedatangan pertama (Kelompok 1)	6	30%
Kedatangan kedua (Kelompok 2)	7	50%
Kedatangan ketiga (Kelompok 3)	8	20%

Kelompok pertama bus listrik akan melalui proses inspeksi, pemeliharaan, pencucian, dan pengisian secara berurutan saat tiba di depo. Selama inspeksi, staf mekanik akan memeriksa setiap bus, dan pengemudi bus akan memberikan informasi mengenai kondisi bus. Berdasarkan kondisi bus, maka akan ditentukan apakah bus akan melalui proses perawatan atau tidak. Dalam studi ini, diasumsikan bahwa 10% dari bus listrik yang beroperasi setiap hari akan melakukan perawatan terjadwal dan 40% dari bus listrik dapat langsung ke proses

⁴⁶ The World Bank. (2022). *E-mobility Adoption Road Map for The Indonesian Mass Transit Program*.

⁴⁷ Ibid.

pencucian. Setelah proses pemeriksaan selesai, armada lainnya akan langsung menuju area pengisian daya. Berdasarkan asumsi waktu kedatangan pertama pada pukul 6 sore, dan waktu keberangkatan paling awal dari depo adalah pukul 04.00 pagi, maka seluruh kegiatan di depo untuk semua bus yang akan beroperasi harus diselesaikan dalam rentang waktu 10 jam.

4.3.2 Dampak Implementasi Rute Pilot Bus Listrik pada Jaringan Listrik

Implementasi bus listrik skala besar beserta stasiun pengisiannya akan menciptakan beban tambahan pada jaringan listrik, oleh karena itu sangat penting untuk mempertimbangkan jaringan transportasi dan jaringan listrik saat merencanakan infrastruktur pengisian daya untuk bus listrik. Lokasi gardu induk terdekat ke depo atau stasiun pengisian perlu diidentifikasi. Perkiraan permintaan daya listrik tambahan akibat elektrifikasi harus dianalisis dan dikomunikasikan dengan Perusahaan Listrik Negara (PLN). Penting untuk mengidentifikasi pemangku kepentingan mana yang akan mendirikan, memiliki, dan mengelola infrastruktur pendukung operasional bus listrik. Saat ini Terminal Penggaron yang diusulkan sebagai lokasi depo merupakan Terminal Tipe B dan dimiliki oleh Pemerintah Provinsi Jawa Tengah. Idealnya, lahan untuk depo ini harus dimiliki oleh Pemerintah beserta dengan aset tidak bergerak lainnya. Hal ini untuk memudahkan proses jika terdapat pergantian operator.

Berdasarkan hasil analisis strategi pengisian daya yang telah dilakukan, maka terdapat dua strategi pengisian daya yang akan dilakukan untuk rute pilot di dua lokasi yaitu:

A. Pengisian Daya di Malam Hari di Depo Penggaron

Pengisian daya di malam hari akan dilakukan di Terminal Penggaron yang akan dijadikan sebagai Depo Koridor 1 dan Koridor 4 yang dipilih sebagai rute pilot bus listrik Trans Semarang. Berdasarkan estimasi kedatangan bus listrik di depo yang ditunjukkan pada Tabel 18, dan ketersediaan alat pengisian daya yang ada yaitu sebanyak 26 *plug-in charger* 150 kW, maka estimasi kebutuhan daya yang diperlukan untuk rute pilot ini adalah 18,4 MWh per harinya atau setara dengan 6.219,2 MWh per tahun (dengan menggunakan hari kerja penuh adalah 338 hari).

Tabel 18. Estimasi Konsumsi Energi untuk Pengisian Daya Malam Hari di Depo

Lokasi	Jumlah Bus	Konsumsi Energi Harian	Konsumsi Energi Tahunan
Terminal Penggaron	Bus Sedang 180 kWh = 50 bus	18,4 MWh	6.219,2 MWh
	Bus Besar 350 kWh = 40 bus		

B. Pengisian Daya di Siang Hari di Terminal Cangkiran

Berdasarkan hasil analisis strategi pengisian daya, rute Koridor 4 yang menggunakan bus memerlukan pengisian daya tambahan di siang hari untuk memenuhi kilometer tempuh hariannya. Lokasi pengisian daya di siang hari yang disarankan adalah pada Terminal Cangkiran yang merupakan terminus dari Koridor 4 ini. Untuk memenuhi energi yang dibutuhkan dan disesuaikan dengan jam tidak sibuk, rencana pengisian daya untuk Koridor 4 akan dilakukan sebanyak dua kali yaitu pada pukul 9:00-11:10 dan pukul 12:30-14:40. Di mana setiap pengisian

daya, akan dibagi menjadi tiga kelompok pengisian. Dengan total 15 *plug-in charger* 150 kW yang akan digunakan di Terminal Cangkiran, maka estimasi energi listrik harian yang diperlukan untuk pengisian daya di siang hari adalah sebesar 14,4 kWh per harinya atau setara dengan 4.867,2 MWh per tahun.

Tabel 19. Estimasi Konsumsi Energi untuk Pengisian Daya Malam Hari di Depo

Lokasi	Jumlah Bus	Konsumsi Energi Harian	Konsumsi Energi Tahunan
Terminal Cangkiran	Bus Sedang 180 kWh	14,4 kWh	4.867,2 MWh

Analisis lebih lanjut dan koordinasi dengan PLN sebagai penyedia listrik diperlukan. Perlu dilihat dampak kebutuhan listrik dari implementasi rute pilot bus listrik ini terhadap jaringan listrik eksisting di gardu induk terdekat PLN dengan lokasi depo maupun terminus yang diusulkan sebagai lokasi pengisian daya.

5 Penutup

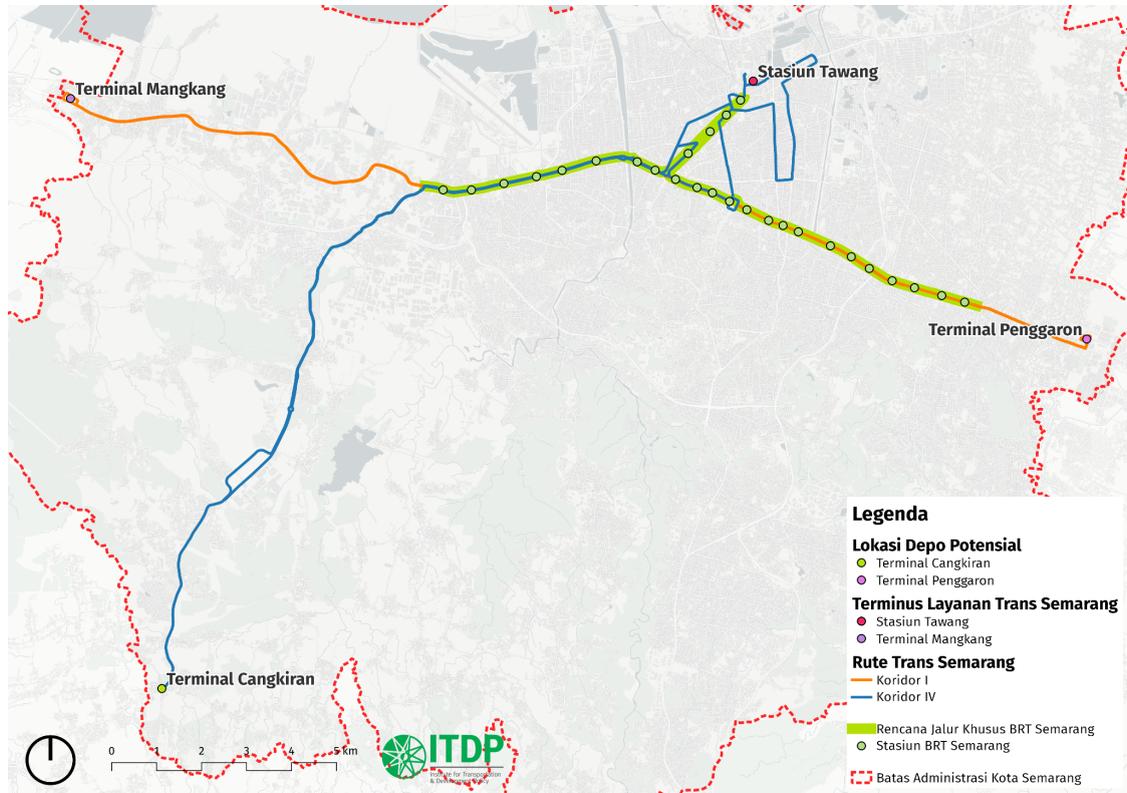
Untuk mendukung program Pemerintah Indonesia dalam mempercepat adopsi kendaraan bermotor listrik berbasis baterai pada sektor transportasi jalan, maka elektrifikasi transportasi publik merupakan hal yang penting untuk dilakukan. Trans Semarang merupakan salah satu sistem transportasi publik di Indonesia yang telah melayani mobilitas masyarakat perkotaan selama hampir 15 tahun beroperasi. Saat ini terdapat rencana pembangunan jalur khusus bus di Kota Semarang, dan terkait dengan hal ini terdapat rencana untuk mengadopsi bus listrik dalam sistem BRT yang akan dibangun. Rute bus Trans Semarang yang telah beroperasi saat ini dapat dijadikan sebagai rute pilot bus listrik dalam sistem BRT Semarang ini

Studi ini menganalisis delapan rute bus Trans Semarang yang telah beroperasi saat ini. Untuk menentukan rute pilot bus listrik, masing-masing rute bus Trans Semarang dianalisis berdasarkan topologi rute, rencana operasional masing-masing rute, lokasi terminus dan ketersediaan lahan untuk pengisian daya bus listrik.

Hasil dari studi ini merekomendasikan dua rute, yaitu rute Koridor 1 (Mangkang - Penggaron) dan rute Koridor 4 (Cangkiran - Stasiun Tawang) sebagai rute pilot bus listrik di Trans Semarang yang didasarkan pada aspek-aspek yang telah dijelaskan sebelumnya. Studi ini juga merekomendasikan agar Terminal Penggaron yang merupakan Terminal Tipe B, dapat digunakan sebagai lokasi depo untuk rute pilot bus listrik. Tabel 20 menunjukkan rangkuman analisis adopsi bus listrik pada Koridor 1 dan Koridor 4 Trans Semarang.

Tabel 20. Rangkuman Analisis Rute Pilot Bus Listrik Trans Semarang

Rute	Koridor 1	Koridor 4
Teknologi Bus	Bus Besar Listrik 350 kWh	Bus Sedang Listrik 180 kWh
Jumlah Bus	40	50
Strategi Pengisian Daya	Pengisian Daya Malam Hari di Depo	Pengisian Daya Malam Hari di Depo dan Siang Hari di Terminus
Lokasi Pengisian Daya	Depo Penggaron	Depo Penggaron dan Terminal Cangkiran
Kebutuhan Alat Pengisian Daya (Plug-in 150 kW)	14 charger di depo	12 charger di depo dan 15 charger di terminus
Estimasi TCO per km per bus (Durasi Kontrak 10 Tahun)	Rp 18,399 per km per bus	Rp 10,075 per km per bus
Estimasi TCO per km (Durasi Kontrak 15 tahun)	Rp 13,330 per km per bus	Rp 8,060 per km per bus



Gambar 24. Rekomendasi Rute Pilot Bus Listrik Trans Semarang dan Lokasi Pengisian Daya

Implementasi rute pilot bus listrik ini akan menghasilkan manfaat lingkungan berupa penurunan polusi udara dan emisi GRK. Hasil studi ini menunjukkan bahwa implementasi rute pilot dengan beroperasinya 40 bus besar listrik di Koridor 1 dan 50 bus sedang listrik di Koridor 4 akan memberikan estimasi penurunan emisi PM sebesar 23,7 ton, emisi CO sebesar 4,1 ton, emisi HC sebesar 35,1 ton, dan penurunan emisi NOx sebesar 46,7 ton per tahunnya. Jika dibandingkan dengan BaU yang menggunakan bus diesel, implementasi rute pilot bus listrik ini juga akan memberikan manfaat penurunan emisi GRK sebesar 42,9% yaitu dari 12,210 ton CO₂ eq ke 6,972 ton CO₂ eq akibat adanya implementasi bus listrik dalam sistem Trans Semarang.

Untuk mendapatkan hasil yang maksimal dari adopsi bus listrik pada sistem Trans Semarang maupun sistem BRT Semarang nantinya, maka perlu adanya dukungan dengan kebijakan, pendanaan, maupun peningkatan kapasitas dari pemerintah pusat maupun pemerintah daerah untuk mempercepat adopsi bus listrik di daerah.

6 Daftar Pustaka

- Badan Pusat Statistik Kota Semarang. (2023). *Kota Semarang Dalam Angka 2023*.
- BLU UPTD Trans Semarang. (2023). *Daftar Operator dan Jumlah Armada BRT Semarang Tahun 2023*.
- BLU UPTD Trans Semarang. (2023). *Rata-Rata Konsumsi Pemakaian Bahan Bakar Solar*.
- Climate Transparency. (2021). *Climate Transparency Report: Comparing G20 Climate Action Towards Net Zero*. <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2021/10/CT2021Indonesia.pdf>.
- Enel X Way USA, LLC. (2019, April 20). *The different EV charging connector types*. <https://www.enelxway.com/us/en/resources/blog/ev-charging-connector-types>
- European Bank for Reconstruction and Development. (2021). *Going Electric: A Pathway to Zero-Emission Bus*. Policy Paper, EBRD, London.
- Gubernur Daerah Khusus Ibukota Jakarta. (2022). *Keputusan Gubernur Nomor 1053 Tahun 2022 tentang Pedoman Percepatan Program Penggunaan Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai Dalam Layanan Angkutan Transjakarta*.
- ITDP Indonesia. (2017). *Menuju Mobilitas Semarang yang Setara dan Berkelanjutan: Rekomendasi Peningkatan Mobilitas di Kota Semarang*.
- Institute for Transportation and Development Policy. (2018). *Determining Which Routes to Include Inside BRT Infrastructure*. <https://brtguide.itdp.org/branch/master/guide/service-planning/determining-which-routes-to-include-in-side-brt-infrastructure#overlap-with-the-brt-corridor>
- Institute for Transportation and Development Policy. (2023). *E-Buses: On the Road to Lowering Emissions and Improving Public Transport*. <https://www.itdp.org/2023/11/29/e-buses-on-the-road-to-lowering-emissions-and-improving-public-transport/>
- IQAir. (2022). *Laporan Kualitas Udara Dunia Peringkat PM 2.5 Region dan Kota*. <https://www.iqair.com/id/world-air-quality-report>.
- Kompas.com. (2023). *Jumlah Kendaraan Listrik di Indonesia diklaim Terus Meningkat*. <https://otomotif.kompas.com/read/2023/03/08/141200115/jumlah-kendaraan-listrik-di-indonesia-diklaim-terus-meningkat#:~:text=%E2%80%9CBerdasarkan%20jumlah%20sertifikat%20registrasi%20uji%20439%20unit%2C%E2%80%9D%20ucap%20Inten>. (diakses pada 28 April 2023, Pukul 16.05).
- Menteri Perhubungan. (2019). *Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 15 Tahun 2019 Tentang Penyelenggaraan Angkutan Orang Dengan Kendaraan Bermotor Umum Dalam Trayek*.
- O'Donovan A., James Frith, and Colin McKerracher. (2018). *Electric Bus in Cities*. Bloomberg Energy Finance. <https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/2018/05/Electric-Buses-in-Cities-Report-BNEF-C40-Citi.pdf>
- Presiden Republik Indonesia. (2020). *Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional 2020-2024*.
- PT Mitra Pembangunan Jaya. (2020). *Studi Kelayakan Bus Rapid Transit Semarang: Laporan Akhir*.
- SGArchitects. (2017). *Bus Depot Design Guidelines*. <https://shaktifoundation.in/wp-content/uploads/2017/11/Bus-Depot-Design-Guidelines.pdf>

The World Bank and The International Association of Public Transport (UITP). (2018). *Electric Mobility & Development*. Engagement Paper, World Bank and UITP

The World Bank. (2022). *E-mobility Adoption Road Map For The Indonesian Mass Transit Program*.

UK PACT. (2021). *Building Capacity and Action Plan to Scale-Up Transjakarta E-Bus: Task 2.1. Transjakarta's E-Bus Operational Plan and Charging Strategy*.

Verbrugge, B.; Hasan, M.M.; Rasool, H.; Geury, T.; El Baghdadi, M.; Hegazy, O. (2021). *Smart Integration of Electric Buses in Cities: A Technological Review*. <https://doi.org/10.3390/su132112189>

Wali Kota Semarang. (2021). *Peraturan Daerah Kota Semarang Nomor 6 Tahun 2021 Tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Tahun 2021-2026*.

World Resources Institute India. (2021). *Procurement of Electric Bus: Insights from Total Cost of Ownership (TCO) Analysis*.

7 Lampiran

Lampiran A. Komponen Biaya untuk Analisis Total Biaya Kepemilikan (TCO)

A1. Komponen Biaya Modal

Komponen Biaya	Data untuk Perhitungan TCO	Asumsi
Armada bus diesel	<ul style="list-style-type: none"> Bus besar: USD 150.000 Bus sedang: USD 100.000 	Estimasi harga bus diesel di Indonesia (termasuk pajak) ⁴⁸ .
Armada bus listrik	<ol style="list-style-type: none"> Bus besar 350 kWh: USD 287.083 Bus besar 324 kWh: USD 269.487 Bus sedang 180 kWh: USD 172.042 	Biaya armada bus listrik rata-rata berdasarkan analisis pasar, harga sudah termasuk pajak.
Alat Pengisian Daya	Di depo dan terminus menggunakan ABB Sakti Industri 150 kW DC Hitachi dengan harga USD 58.175.	Harga sudah termasuk pajak.
Pajak	<ul style="list-style-type: none"> Pemasok lokal: 0% Pemasok dari Cina: 25% Pemasok dari negara lain: 40% 	Berdasarkan pajak MFN (<i>Most Favoured Nation</i>) 5%, PPN (Pajak Pertambahan Nilai) 10%, dan PPh Impor 7,5%. Kemudian, berdasarkan semua pajak, telah dihitung bahwa pajak rata-rata untuk bus Cina akan menjadi 25%. Namun, jika bus diimpor dari negara selain Cina, tarif pajak diasumsikan 40%, dengan perbedaan pajak MFN, sekitar 20%.
Biaya Penggantian Baterai	<ul style="list-style-type: none"> Harga baterai 40% harga bus Tahun 2021 harga baterai USD 100 per kWh, akan menjadi USD 80 per kWh Masa pakai baterai bus adalah 8 tahun 	Persentase harga baterai berdasarkan tolok ukur internasional, dengan perkiraan harga baterai tahun 2030 didasarkan pada studi tahun 2020. Masa pakai baterai didasarkan pada asumsi studi sebelumnya di Jakarta dan wawancara dengan beberapa OEM di Indonesia. ^{49,50}
Nilai Sisa	<ul style="list-style-type: none"> Bus diesel: 10%, masa pakai 10 tahun Bus listrik: 10%, masa pakai 15 tahun Baterai: 40% 	Nilai sisa bus diesel didasarkan pada riset pasar pada beberapa bus diesel baru dan bekas. Bus listrik diasumsikan memiliki siklus hidup yang lebih lama daripada bus diesel, dengan sekitar 15 tahun.

⁴⁸ GFA. (2020). Financial Feasibility Study. Berlin: GIZ.

⁴⁹ Henze, Veronika. (2020). Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh. December 16. <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/#:~:text=Battery%20Pack%20Prices%20Cited%20Below%20Sits%20at%20%24137%2FkWh%20%7C%20BloombergNEF>

⁵⁰ Grutter Consulting. (2019). Bus listrik for BRT Corridors 1 and 6 of Transjakarta. Leysin: Grutter Consulting.

Komponen Biaya	Data untuk Perhitungan TCO	Asumsi
Biaya Pemasangan Alat Pengisian Daya Bus Listrik	10% dari seluruh biaya pengisi daya bus listrik	Berdasarkan studi kelayakan keuangan Transjakarta ⁵¹
Asuransi dan Biaya Hukum	1,5% dari biaya armada bus	Kep. Dirjen Hubdat No 271/1996

A2. Komponen Biaya Operasional

Komponen Biaya	Data untuk Perhitungan TCO	Asumsi
Staf dan Biaya Overhead	<ul style="list-style-type: none"> Rp 1.958 per km untuk bus besar Rp 2.193 per km untuk bus sedang Biaya staf meningkat 7,35% tiap tahun 	Biaya staf dan <i>overhead</i> disesuaikan dengan studi ITDP di tahun 2018 terkait Biaya Operasional Kendaraan (BOK) Trans Semarang, dan diproyeksikan ke tahun 2022 menyesuaikan dengan kenaikan upah minimum tahunan.
Biaya Energi	<ul style="list-style-type: none"> Bahan bakar diesel: Rp 6.800 Listrik: IDR 707 Energi untuk bus diesel besar: Rp 3.091 per km Energi untuk bus sedang diesel: Rp 2.321 per km Energi untuk bus besar listrik: Rp 848 per km Energi untuk bus sedang listrik: Rp 707 per km 	Biaya energi dihitung berdasarkan efisiensi harga bus dan listrik per km operasi. Harga listrik per kWh menurut PLN untuk operasional bus listrik Rp. 707 per km. Efisiensi energi bus besar listrik adalah 0,8 km per kWh, dan bus sedang adalah 1,0 km per kWh. Sementara itu, efisiensi energi 2,2 km per liter untuk bus besar diesel dan 2,93 km per liter untuk bus sedang dari data operasional Trans Semarang.

A3. Komponen Biaya Pemeliharaan

Komponen Biaya	Data untuk Perhitungan TCO	Asumsi
Biaya Perawatan Bus Listrik	<ul style="list-style-type: none"> Rp 1.335 per km untuk bus besar Rp 1.097 per km untuk bus sedang 	Perhitungan ITDP ⁵²
Biaya Perawatan Bus Diesel	<ul style="list-style-type: none"> Rp 2.059 per km untuk bus besar Rp 1.692 per km untuk bus sedang 	Perhitungan ITDP ⁵³
Biaya Pemeliharaan Infrastruktur	2,50% dari total biaya infrastruktur	Biaya untuk menjaga pengisi daya bus listrik ⁵⁴

⁵¹ GFA. (2020). Financial Feasibility Study. Berlin: GIZ.

⁵² GFA. (2020). Financial Feasibility Study. Berlin: GIZ

⁵³ GFA. (2020). Financial Feasibility Study. Berlin: GIZ

⁵⁴ GFA. (2020). Financial Feasibility Study. Berlin: GIZ

A4. Parameter Input Ekonomi

Komponen Biaya	Data untuk Perhitungan TCO	Asumsi
Harga Diskon	4,78%	Perhitungan biaya modal rata-rata terimbang (WACC) dari tingkat inflasi 3.07%, uang muka 0%, tingkat pinjaman 3,8%, dan biaya ekuitas 15%.
Tingkat Pinjaman	3,8%	Pembiayaan khusus untuk bus listrik yang diberikan oleh Bank Rakyat Indonesia (BRI) ⁵⁵
Tahun EMI	6 tahun	Pembiayaan khusus untuk bus listrik yang diberikan oleh Bank Rakyat Indonesia (BRI) ⁵⁶
Nilai Tukar USD hingga IDR	USD 1 = 15.500	Nilai tukar antara USD dan IDR ⁵⁷
Tingkat Inflasi	3,07% per tahun	Tingkat inflasi rata-rata di Indonesia lebih dari 10 tahun
Hari Berjalan Tahunan	338 hari per tahun	Tim Konsultan
Masa pakai bus	10 tahun untuk bus diesel, 15 tahun untuk bus listrik	Nilai sisa bus diesel didasarkan pada hasil riset pasar dan praktik umum. Sementara itu, bus listrik diasumsikan memiliki siklus hidup yang lebih lama daripada bus diesel, sekitar 15 tahun.

A5. Biaya untuk Setiap Jenis Polusi Udara (USD per ton)⁵⁸

Sumber	Unit	Referensi IMF	Disesuaikan dengan 2023
Tahun	Tahun	2010	2023
Harga PM _{2.5} per ton	USD per ton	60.669,00	89.884,83
Harga NO _x per ton	USD per ton	449,00	665,22
Harga SO ₂ per ton	USD per ton	2.159,00	3.198,69
Harga GHG (CO ₂ e) per ton	USD per ton	35,00	51,85

B6. Biaya untuk Setiap Gram Polusi yang Dihasilkan oleh Bus Besar dan Bus sedang⁵⁹

⁵⁵ Bank BRI. (2021). Bank BRI. Retrieved from BRI: <https://bri.co.id/>

⁵⁶ Bank BRI. (2021). Bank BRI. Retrieved from BRI: <https://bri.co.id/>

⁵⁷ Kementerian Keuangan. (2021). Informasi APBN 2021. Jakarta: Kementerian Keuangan.

⁵⁸ Parry, Ian W.H. (2014). Getting Energy Prices Right. Washington D.C.: International Monetary Fund.

⁵⁹ Calculation by ICCT

Emisi	Unit	Emisi Bus Besar	Emisi Bus Sedang
PM2.5	g/km	0,630	0,051
NO _x	g/km	14,000	7,999
SO ₂	g/km	0,005	0,004
GRK (CO ₂ e)	g/km	4.172,000	2.383,651
Biaya polusi	USD/km	0,282	0,134

Lampiran B. Faktor Emisi

Parameter	Bus Diesel		Bus Listrik		Sumber
	Bus Besar Diesel Euro 2	Bus Sedang Diesel Euro 2	Bus Sedang 180 kWh	Bus Besar 350 kWh	
WTW CO2 Emissions Factor (kg CO ₂ eq/vkm)	1.94	1.51	0.877	1.052	COPERT Model Berdasarkan intensitas karbon grid di Semarang dan dikalikan dengan konsumsi energi
PM (g/km)	3.8367	2.8785	0	0	RS+EU data
CO (g/km)	0.67	0.5	0	0	RS+EU data
HC (g/km)	5.68	4.26	0	0	RS+EU data
NO _x (g/km)	7.56	5.67	0	0	RS+EU data