

KAPASITAS GARDU TRAKSI MENGURANGI *HEADWAY* OPERASIONAL KRL JALUR YOGYAKARTA LINTAS SOLO–KLATEN

¹*Leni Devera Asrar*, ²*Farauq Adhari*

¹*Program Studi Teknik Elektro, FTI, Institut Teknologi Budi Utomo Jakarta
leniasrar@gmail.com*

²*Program Studi Teknik Elektro, FTI, Institut Teknologi Budi Utomo Jakarta*

Abstrak

Jumlah penumpang layanan Kereta Rel Listrik (KRL) lintas Yogyakarta -Solo semakin meningkat dan untuk menampung tingginya minat dan antusias masyarakat yang menggunakan KRL sebagai transportasi utama atau hanya sekedar berwisata, solusi yang diberikan adalah menambah jumlah kereta dalam stamformasi dan menambah jumlah perjalanan KRL. Transportasi KRL yang menggunakan listrik sebagai tenaga utamanya membutuhkan daya listrik yang cukup besar dalam pengoperasiannya. Dalam rangka menambah jumlah perjalanan KRL untuk mengurangi *headway*, kapasitas daya gardu traksi yang terbangun harus mencukupi hal tersebut. Penelitian ini bertujuan mengetahui kapasitas daya dari gardu traksi yang terbangun serta kebutuhan tenaga listrik KRL pada pengoperasian KRL di jalur Yogyakarta khususnya di lintas Solo – Klaten. Dengan metode kuantitatif, perhitungan kapasitas daya pada gardu traksi yang melibatkan jumlah kereta per rangkaian sebagai data primer dan spesifikasi gardu traksi serta KRL sebagai data sekunder diperoleh *headway* yang sesuai dengan kapasitas gardu traksi dan kebutuhan operasional. Dari hasil perhitungan, jika menggunakan formasi 4 kereta dengan *headway* kurang dari 25 menit diperoleh daya maksimum sebesar 2224 kW, sementara sudah terpasang daya untuk traksi 4000 kW sehingga tidak perlu penambahan daya pada seluruh gardu traksi yang terbangun. Namun, jika menggunakan formasi 8 kereta dengan *headway* di bawah 25 menit, maka daya maksimum yang harus disediakan berturut turut adalah Gardu Traksi Klaten sebesar 6.995,41 kW, Gardu Traksi Ceper sebesar 9.236,74 kW, Gardu Traksi Gawok sebesar 8.076,67 kW dan Gardu Traksi Purwosari sebesar 5.472 kW. Besaran nilai daya yang melebihi kapasitas yang terpasang ini disebabkan oleh jarak suplai yang cukup jauh. Kata Kunci: kapasitas, gardu, traksi, *headway*, formasi kereta

1. PENDAHULUAN

Layanan Kereta Rel Listrik (KRL) di Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) hingga Kota Solo sudah memasuki satu tahun masa pengoperasiannya. Tercatat sepanjang 2021 jumlah penumpangnya mencapai 1.739.454 orang dengan rata-rata 5.325 penumpang orang per hari (Yuniati, 2022). Solusi yang dapat diberikan adalah menambah jumlah kereta dalam stamformasi, serta menambah jumlah perjalanan KRL, terutama di lintas Solo – Klaten. Penambahan stamformasi kereta dan pengurangan *headway* (penambahan perjalanan kereta) operasional perlu dikaji terutama pada sisi ketenagalistrikkannya yang disuplai oleh Gardu-Gardu traksi yang terbangun di sepanjang lintasan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ava Rizkinda Putri mengenai Analisa Daya Dukung Gardu Traksi Kranji pada Pengoperasian Kereta Bandara Soekarno-Hatta (Wicaksono et al., 2018), dalam keadaan normal dan keadaan darurat, gardu traksi kranji dapat menyuplai hingga

headway kereta tersempit yaitu 3 menit. Selain itu, Hario Utama Amri melalui penelitiannya mengenai Analisis Kapasitas Daya Gardu Traksi Terhadap Kebutuhan KRL Jalur Pasar Minggu – Lenteng Agung (Eri & Hario Utama, 2019) menyarankan agar kapasitas daya gardu traksi Pasar Minggu dan Lenteng Agung untuk ditambah untuk menyuplai motor traksi pada lintas tersebut secara kontinyu. Berdasarkan hal-hal di atas, maka studi terkait kapasitas gardu traksi ini dilakukan untuk memastikan kebutuhan penambahan operasional KRL yang direncanakan masih dalam kapasitas yang tersedia/terbangun.

Adapun Permasalahan dan Identifikasi Masalah adalah apakah kapasitas daya pada gardu telah mencukupi untuk kebutuhan pengurangan *headway* operasional KRL? Dan Faktor apa saja yang perlu dihitung dalam perencanaan pengurangan *headway* operasional KRL terhadap Gardu Traksi?. Analisa ini terbatas pada Gardu Traksi yang terbangun di lintas Solo – Klaten termasuk

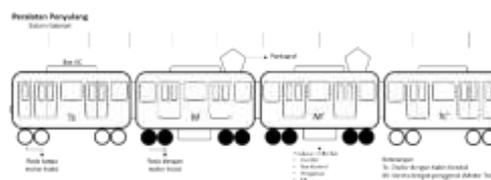
didalamnya Faktor-faktor yang dihitung hanya faktor tenaga listrik dari gardu traksi pada operasional KRL Yogyakarta di lintas Solo – Klaten. Rumusan Masalah adalah Menentukan kapasitas daya sesuai rencana pengurangan *headway* operasional KRL lintas Solo – Klaten. Faktor-faktor dalam menambah perjalanan KRL untuk mengurangi *headway* ditilik dari sisi ketenagalistrikan. Adapun Tujuan Penelitian a) Menganalisa dan mengetahui kapasitas daya pada gardu traksi di lintas Solo – Klaten dalam rangka menambah jumlah perjalanan kereta atau mengurangi *headway* antar kereta untuk memenuhi tingginya minat masyarakat untuk menggunakan KR dan b) Mengetahui kebutuhan tenaga listrik pada pengoperasian KRL di jalur Yogyakarta – Solo, khususnya di lintas Solo – Klaten.

Kereta Rel Listrik (KRL)

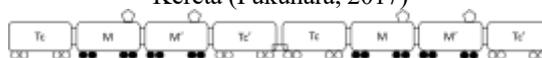
KRL merupakan istilah umum dari sarana kereta api berpengerak listrik dan menurut Permenhub Nomor 13 tahun 2011 tentang Standar, Tata Cara Pengujian dan Sertifikasi Kelaikan Kereta dengan Penggerak Sendiri (Standar, Tata Cara Pengujian Dan Sertifikasi Kelaikan Kereta Dengan Penggerak Sendiri, 2011). Tenaga listrik yang disalurkan dan diubah di Gardu Traksi, disalurkan melalui jaringan transmisi listrik yang dapat berupa sistem katenari dan sistem rel ketiga (*third rail*), lalu diterima oleh KRL melalui perangkat penerima arus (*current collector device*). Dari perangkat penerima arus, tenaga listrik disalurkan kembali menuju sistem propulsi kemudian diteruskan ke penggerak berupa motor traksi elektrik yang terpasang pada setiap as roda melalui *gearbox* (Wicaksono et al., 2018). Perangkat penerima arus pada KRL terdapat dua jenis sesuai dengan peralatan transmisi listrik yang digunakan pada sisi prasarana kereta api. Pada KRL yang menggunakan jaringan rel ketiga seperti *Light Rail Transit* (LRT) Jakarta, LRT Jabodebek dan LRT Sumatera Selatan, perangkat penerima arus berupa *current collector device shoe* yang terletak pada bogie. Sementara itu pada sistem yang menggunakan jaringan katenari/listrik aliran atas (LAA) seperti di lintas Jabodetabek dan lintas Yogyakarta – Solo, perangkat yang digunakan adalah pantograf. Pantograf ini terinstal pada atap KRL dan akan menempel pada *contact wire* jaringan katenari LAA untuk menerima

daya listrik lalu meneruskannya menuju sistem kelistrikan dan sistem propulsi pada KRL.

Di Indonesia, motor traksi yang digunakan adalah motor arus searah (DC) atau motor arus bolak-balik (AC). KRL yang menggunakan motor traksi DC, sistem propulsi yang digunakan dapat berupa sistem Rheostatik dengan Eksitasi atau menggunakan sistem DC Chopper. Sementara itu, KRL dengan motor traksi AC umumnya menggunakan sistem propulsi berbasis *Variable Voltage Variable Frequency* (VVVF). Sistem propulsi VVVF yang umum digunakan pada KRL yang ada di Indonesia saat ini adalah tipe *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT). Pada rangkaian KRL, diberlakukan kodifikasi yang berbeda pada kereta yang bergantung pada terpasangnya motor traksi. Setiap kereta dengan motor traksi masuk ke klasifikasi “M” yang berarti kereta dengan motor penggerak, selain M juga terdapat kereta T yang berarti *Trailer* atau kereta tanpa penggerak. Kereta M dan T ini akan disusun menjadi suatu formasi kereta yang disusun sesuai dengan kebutuhan operasional. Satu susunan formasi kereta dapat berisi 4-12 kereta dengan susunan M dan T yang berbeda, contohnya pada formasi kereta yang berjalan di lintas Yogyakarta-Solo menggunakan formasi 4 kereta dengan susunan 2M2T, dan/atau formasi 8 kereta dengan susunan 4M4T. Pada rangkaian dengan formasi 8 kereta (Gambar 2) di lintas Yogyakarta-Solo, umumnya merupakan dua rangkaian formasi 4 kereta (Gambar 1) digabungkan menjadi satu dengan kendali tetap dari kedua ujung rangkaian sementara kabin yang berada di tengah tidak dapat digunakan.



Gambar 1. Rangkaian KRL Dengan Formasi 4 Kereta (Fukuhara, 2017)



Gambar 2. Rangkaian KRL Dengan Formasi 8 Kereta (Fukuhara, 2017)

Adapun sarana yang beroperasi di lintas Solo – Klaten adalah KRL seri 205 eks-Japan Railway (Fukuhara, 2017) yang diimpor dari jalur Musashino, Jepang. Di jalur Musashino, KRL ini berjalan dengan formasi 8 kereta tiap rangkaianannya. KRL buatan tahun 1985-1986 oleh Kawasaki Heavy Industries dan Tokyu Car Corporation ini menggunakan motor traksi dengan daya 120 kW dan menggunakan sistem propulsi VVVF-IGBT buatan Toyo Denki. Pada kereta dengan motor traksi, *refurbishment* telah dilakukan pada tahun 2001 dengan mengganti motor traksi serta sistem propulsi yang awalnya menggunakan rheostatik dengan eksitasi, diganti menggunakan sistem propulsi VVVF-IGBT. Keunikan dari KRL seri 205 ini adalah susunan keretanya yang dapat diubah-ubah sesuai dengan kebutuhan, namun tetap mengikuti persyaratan yang telah ditetapkan. KRL seri 205 ini merupakan jenis KRL yang paling banyak beroperasi di Indonesia.

Dengan menggunakan data dari spesifikasi teknis, besaran daya yang digunakan oleh satu rangkaian KRL untuk beroperasi dapat diketahui melalui rumus berikut (Wicaksono et al., 2018):

$$\sum P = \sum \text{Daya Traksi} + \sum \text{Daya Auxiliary} \dots (1)$$

Di mana:

$\sum \text{Daya Traksi}$: Total daya motor traksi yang digunakan pada satu rangkaian kereta

$\sum \text{Daya Auxiliary}$: Total daya *auxiliary* dari motor generator untuk suplai daya komponen kontrol, penerangan, dan pendingin ruangan pada KRL



Gambar 3. KRL seri 205 Eks-Japan Railway Yang Beroperasi Di Lintas Jogja
Sumber : Data Primer

Sistem Elektrifikasi pada Operasional KRL

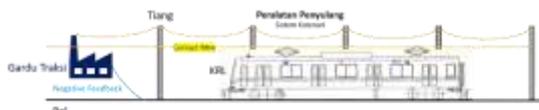
Persyaratan pada sistem elektrifikasi ini diatur dalam peraturan menteri. Berdasarkan Permenhub nomor 50 tahun 2018 tentang Persyaratan Teknis Instalasi Listrik Kereta

Api (Persyaratan Teknis Instalasi Listrik Perkeretaapian, 2018), Instalasi Listrik Perkeretaapian terdiri atas catu daya listrik dan peralatan transmisi tenaga listrik. Catu daya listrik dan peralatan transmisi tenaga listrik juga terbagi menjadi beberapa klasifikasi. Sistem elektrifikasi pada KRL dapat diklasifikasikan berdasarkan tiga parameter (EN50163, 2005), yakni besar tegangan yang digunakan, jenis arus yang dipakai, dan sistem kontak pada distribusinya. Di Indonesia, sistem elektrifikasi yang digunakan dan dioperasikan hingga saat ini berupa sistem arus searah/*direct current* (DC) dengan klasifikasi a) 750 V DC dengan sistem kontak rel ketiga (*third rail*) atau Listrik Aliran Bawah (LAB) dan b) 1500 V DC dengan sistem kontak katenari atau yang biasa dikenal dengan Listrik Aliran Atas (LAA). Untuk klasifikasi tegangan 1500 V DC di Indonesia menggunakan sistem kontak katenari LAA. Sistem elektrifikasi ini digunakan pada jalur KRL *Commuter Line* Jabodetabek, MRT Jakarta, serta lintas Yogyakarta – Solo. Dalam operasional KRL yang menggunakan catu daya arus searah, catu daya utama disuplai oleh Gardu Induk dengan tegangan menengah (20 kV AC) tiga fasa menuju gardu traksi, lalu diturunkan tegangannya menggunakan transformator sesuai dengan tegangan kerja yang diinginkan kemudian disearahkan dengan *rectifier* (Yoshifumi, 2016).



Gambar 4. Transmisi Daya Menuju KRL Pada Bentangan Daya PLN
Sumber: Yoshifumi, 2016

Di Indonesia, catu daya utama disuplai oleh Gardu Induk milik PLN dengan tegangan 20 kV AC disalurkan menuju gardu traksi yang di dalamnya terdapat transformator *step down* untuk menurunkan tegangan dari 20 kV AC menjadi 1200 V AC yang kemudian disearahkan dengan menggunakan *rectifier*. Dari proses konversi ini didapatkan tegangan 1500 V DC. Listrik dengan tegangan 1500 V DC ini kemudian disalurkan lagi menuju rangkaian KRL melalui sistem jaringan katenari/LAA di sepanjang jalur kereta.



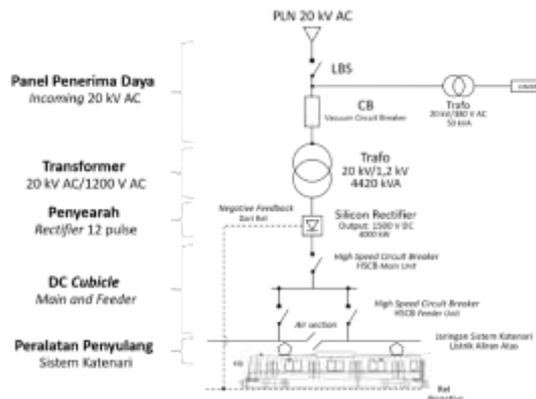
Gambar 5. Ilustrasi Distribusi Tenaga Listrik Dari Gardu Traksi Menuju KRL
Sumber : Data Sekunder

Gardu Traksi

Berdasarkan pengertian pada Permenhub nomor 50 tahun 2018 tentang Persyaratan Teknis Instalasi Listrik Kereta Api (Persyaratan Teknis Instalasi Listrik Perkeretaapian, 2018), catu daya listrik berfungsi mensuplai tenaga listrik untuk prasarana dan sarana berpengerak tenaga listrik. Gardu traksi inilah yang menyalurkan tenaga listrik dari sumber listrik seperti yang disuplai dari PT PLN (Persero), menuju KRL dan juga prasarana fasilitas operasi perkeretaapian lainnya seperti sistem persinyalan dan telekomunikasi yang umumnya dapat ditemukan di gardu traksi pada wilayah kerja PT Kereta Api Indonesia (Persero) area Jabodetabek. Sesuai dengan klasifikasi, sistem instalasi listrik yang digunakan di lintas operasi KRL Yogyakarta – Solo menggunakan klasifikasi tegangan 1500 V DC. Gardu traksi di lintas Yogyakarta – Solo menggunakan gardu traksi/catu daya arus searah. Pada sistem instalasi gardu traksi arus searah, peralatan-peralatan dalam gardu dibagi menjadi 6 bagian yaitu:

1. Peralatan Penerima Daya (*Incoming Cubicle*)
2. Transformator (trafo) yang digunakan pada gardu berupa trafo Instrumen atau trafo ukur digunakan untuk keperluan pengukuran arus (*Current Transformator/CT*) dan juga tegangan (*Potential Transformator/PT*).
3. Peralatan Penyearah. Penyearah ini harus memiliki daya yang cukup untuk memikul beban sesuai dengan kapasitas yang direncanakan. Selain itu, peralatan penyearah harus dapat bekerja dengan fluktuasi tegangan masukan minimum $\pm 10\%$ dari tegangan nominal.
4. Peralatan DC (*DC Cubicle*)
5. Peralatan tegangan rendah AC dan DC (*Low Voltage Main Distribution Panel/LVMDP*)
6. Peralatan Penyulang adalah adalah kabel *outgoing* dari gardu traksi menuju/dari jaringan transmisi listrik untuk KRL. Secara sederhana, alur distribusi tenaga listrik dari

sumber listrik (PLN) menuju ke rangkaian KRL dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 1. Single Line Diagram Distribusi Listrik KRL
Sumber : Data Sekunder

Menurut Clifford F. Bonnet pada buku *Practical Railway Engineering* (Bonnett, 2005), Sistem distribusi listrik tegangan searah antara gardu traksi dengan rel konduktor (katenari) harus didesain untuk memenuhi kriteria dasar sebagai berikut:

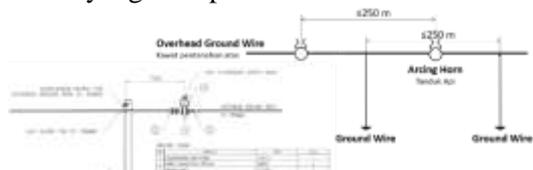
1. Dapat memungkinkan kereta untuk mencapai arus akselerasi puncak di lokasi manapun
2. Untuk menyediakan tegangan rata-rata pada setiap kereta yang sesuai dengan perencanaan
3. Dapat memungkinkan dilakukannya perawatan dalam kondisi tidak bertegangan tanpa harus mengganggu jadwal operasi kereta
4. Dapat mengizinkan kelanjutan operasional layanan kereta dalam kondisi kegagalan pada peralatan.

Kapasitas Daya Gardu Traksi

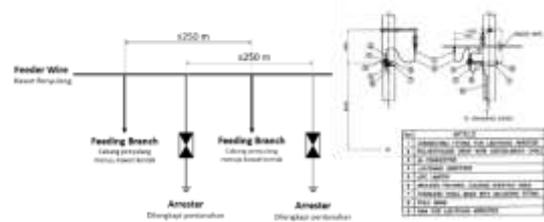
Untuk pengoperasian KRL, gardu traksi harus memenuhi sejumlah persyaratan, salah satunya adalah kapasitas daya pada gardu traksi harus cukup menanggung beban KRL yang direncanakan. Oleh karena itu, perhitungan kapasitas daya masuk ke dalam perhitungan perencanaan operasional KRL. Perhitungan kapasitas daya listrik pada gardu traksi KRL yang dibutuhkan untuk menyuplai operasional KRL dilakukan dengan menggunakan pendekatan empiris (Dwiatmoko, 2016). Untuk mencari kapasitas daya gardu traksi digunakan rumus sebagai berikut:

1. Beban maksimum (kW)

membahayakan operasional KRL itu sendiri. Salah satunya adalah proteksi pada gardu traksi terbagi menjadi dua sesuai dengan jenis arusnya yaitu proteksi pada peralatan arus AC dan peralatan arus DC. Pada jaringan katenari, peralatan proteksi yang terpasang meliputi sistem Pentanahan/*Grounding System* dan kawat Pentanahan Atas/*Overhead Ground Wire* (OHGW), lightning arrester dimana peralatan ini terpasang pada jarak interval 500 m dan dilengkapi dengan sistem pentanahan di lokasi yang terdapat *arrester*.



Gambar 9. Kawat Pentanahan Atas
Sumber : Data Sekunder



Gambar 10. *Lightning Arrester* Pada Jaringan LAA
Sumber :Data Sekunder

Headway

Definisi *headway* pada layanan kereta api adalah interval waktu minimal yang dapat dijalankan antar kereta (Bonnett, 2005). Satuan yang umumnya digunakan dalam pengukuran *headway* adalah menit per kereta atau lebih sering disebut menit saja. *Headway* dihitung dari saat satu kereta melewati atau tiba di satu titik (stasiun) sampai dengan kereta berikutnya melewati atau tiba di titik yang sama.

2. METODOLOGI

Penelitian ini difokuskan untuk perhitungan kapasitas daya gardu traksi gardu traksi di lintas Solo - Klaten. Jenis penelitian menggunakan metode kuantitatif untuk mendapat hasil analisa yang akurat. Penelitian ini juga dilakukan dalam beberapa tahap penelitian seperti digambarkan dalam flowchart pada Gambar 11.

Pengambilan data primer dilakukan berdasarkan perhitungan mengenai jarak pengisian antar gardu, massa total KRL, dan konsumsi daya kereta. Dan untuk

pengambilan data sekunder dilakukan dengan melakukan kunjungan ke Satuan Kerja Pengembangan Perkeretaapian Jawa Tengah Area III, Balai Teknik Perkeretaapian Kelas I Jawa Bagian Tengah selaku pemilik prasarana perkeretaapian untuk mendapatkan data berupa spesifikasi teknis gardu traksi dan KRL, jarak antar gardu traksi, dan lain-lain.



Gambar 11. Diagram Alir

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan berupa data teknis mengenai sarana KRL yang dioperasikan, prasarana Gardu Traksi yang terpasang di lintas Solo - Klaten, serta jadwal operasi KRL terkait *headway* yang digunakan pada lintas tersebut. Berdasarkan data jadwal perjalanan KRL Yogyakarta-Solo, ada 10 KRL yang melintas dari Solo ke Klaten mulai jam 05.05 sampai dengan jam 18.05. Dari arah Klaten menuju Solo, terdapat 10 KRL yang melintas mulai jam 05.53 sampai dengan jam 19.04. Seperti yang telah dijelaskan pada bagian teori bahwa rangkaian KRL yang dioperasikan pada lintas Yogyakarta-Solo adalah KRL seri 205 eks-East Japan Railway Company yang diimpor dari Jepang dan dioperasikan dengan formasi 4 kereta dan 8 kereta. Adapun spesifikasi teknis KRL secara singkat adalah bahwa tegangan 1500 VDC dan 1100 VAC; kecepatan maksimum 100 km/jam; tempat duduk 136-144; massa 25,4 – 31.1 Ton; daya bantu 440 VAC dan 190 kVA.

Data Gardu Traksi

Pada lintas Yogyakarta-Solo terdapat 8 unit gardu traksi yang terbangun, 4 unit di antaranya terletak di lintas Solo - Klaten. Tabel berikut adalah data spesifikasi teknis gardu traksi yang terbangun di lintas Klaten-Solo:

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Gardu Traksi Lintas Klaten-Solo

		Gardu Traksi			
		Klaten	Ceper	Gawok	Purwosari
Jarak	Titik Kilometer	138+400	129+150	117+300	110+700
Gardu	Jarak (km)	9,25	11,85	6,6	2,95
	Tegangan Input (V)	20kV AC			
	Tegangan Output (V)	1500V DC (1200 – 1800VDC)			
	Daya Input PLN (kVA)	5540			
	Kapasitas (kVA)	4420			
	Tipe Pendingin	ONAN			
Trafo	V Out Nominal (V)	1200V AC			
Utama	Frek. (Hz)	50			
	Coupling	Yy0 Yd11			
	Kapasitas (kW)	4000			
Silicon Rectifier	V Out Nominal (V)	1500V DC			
	I Out Nominal (A)	2600 (atau sesuai dengan kapasitas)			
	Kapasitas (kVA)	50			
	Tipe Pendingin	ONAN			
Trafo	Output (V)	380V/220V			
Auxiliary	Frek. (Hz)	50			
	Coupling	Yzn11			

Sumber : Data Sekunder

Berdasarkan keterangan persyaratan seperti yang tertulis, pada gardu traksi lintas Solo – Klaten, kedua peralatan ini harus mampu bekerja pada kondisi beban 100% secara kontinyu atau terus menerus, 150% selama 2 jam, 200% selama 5 menit, dan 300% selama 1 menit. Hal ini untuk menunjang beban puncak sesaat yang dapat terjadi ketika proses *start* motor traksi pada rangkaian KRL. Adapun jarak suplai gardu traksi Klaten mencakup hingga area antara Klaten-Srowot (arah Barat) di mana jarak Klaten – Srowot arah 6,73 km dan terdapat gardu traksi di stasiun Srowot sehingga jarak suplai sesuai dengan rumus. Pada gardu traksi Purwosari terdapat pengecualian, suplai ke arah timur mencakup stasiun Solobalapan (Solo) sejauh 2,95 km sehingga pada rumus dimasukkan jarak penuh antara dari Purwosari ke arah Solobalapan.

Headway dan Kebutuhan Daya Operasional KRL

Pada lintas Klaten-Solo, terdapat lima stasiun pemberhentian yakni Klaten (KT), Ceper (CE), Gawok (GW), Purwosari (PWS), dan Solobalapan (SLO). *Headway* yang digunakan pada lintas Klaten-Solo berkisar antara 1 – 2 jam (60-120 menit) per perjalanan kereta, baik perjalanan dari Solo menuju Klaten maupun sebaliknya. Adapun data jadwal perjalanan KRL Solo - Klaten tahun

2021 dapat diringkas demikian bahwa KRL Solobalapan-Klaten mulai jam 05.05 dan KRL terakhir jam 18.05 dan satu kali perjalanan sekitar 25 menit. Sebaliknya dari Klaten-Solobalapan KRL mulai berangkat jam 18.53 dan terakhir jam 19.04. Dari data yang ada, telah dilakukan perhitungan terkait massa total KRL dan total konsumsi daya listrik pada KRL untuk memenuhi rumus terkait perhitungan kapasitas daya gardu traksi dan diperoleh rangkaian KRL menggunakan motor traksi (MT) dengan daya 120 kW yang terpasang tiap as roda, dan motor generator (MG) dengan daya 190 kVA (dengan asumsi nilai $\cos \phi = 0.8$) yang terpasang pada kereta M'. Dengan menggunakan rumus berikut $\sum P_4 \text{ kereta} = \sum \text{Daya Traksi} + \sum \text{Daya Auxiliary}$, dan data sebelumnya maka daya 1112 kW. Dari total daya, arus maksimum dapat dihitung dengan cara membagi total daya dengan tegangan nominal, maka diperoleh arus 741.33 A. Dengan rumus yang sama, total daya serta arus maksimum pada formasi 8 kereta dapat dihitung dan diperoleh Arus maksimum 1482.66 A dan daya total 2224 kW.

Perhitungan Massa Total KRL dan Daya Traksi yang Diperlukan

Dengan menggunakan rumus (4) dan asumsi massa penumpang adalah 60 kg/orang maka didapatkan hasil perhitungan massa total KRL diperoleh $W_4 \text{ kereta}$ adalah 182.4 Ton. Dengan menggunakan rumus yang sama, maka massa total pada formasi 8 kereta dapat diketahui sebesar 364.8 ton. Berikutnya, perhitungan *headway* pada lintas Solo – Klaten yang mencapai 86 menit, dalam waktu yang bersamaan pada lintas ini hanya terdapat satu rangkaian KRL yang berjalan di lintas tersebut sehingga kebutuhan daya diambil sebesar daya maksimum KRL. Daya maksimum KRL adalah total daya yang dibutuhkan oleh KRL formasi 4 kereta saat beroperasi dan untuk menghitung beban puncak sesaat menggunakan rumus (6) berdasarkan arus maksimum sesuai dengan ketentuan yang ada pada rumus (7) yang menyebutkan bahwa bila $Z1 < Z2$ maka dalam perhitungan akan digunakan nilai dari Z2, maka diperoleh $Z = 2.046,07$ kW. Maka kapasitas daya yang dibutuhkan (Z_n) dapat dihitung menggunakan rumus (7), diperoleh $Z_n = 818.428 \approx 818.43$ kW.

Kebutuhan Daya Gardu Traksi dengan Penambahan Formasi Kereta

Dengan menggunakan *headway* eksisting yang saat ini diterapkan yakni 86 menit, hanya ada satu rangkaian kereta yang berjalan pada lintas Solo – Klaten. Maka perhitungan kebutuhan daya dengan penambahan formasi kereta yang beroperasi adalah $Z = 4.092,14$ kW. Maka kapasitas daya yang dibutuhkan (Zn) dihitung dengan rumus (7) dan diperoleh $Zn = 1.636,856 \approx 1636,86$ kW. Selanjutnya, apabila dilakukan penambahan formasi kereta sekaligus melakukan pengurangan *headway* pada lintas Solo – Klaten, maka penggunaan beban pada gardu traksi akan bertambah. Bila *headway* yang saat ini diterapkan adalah 86 menit, dengan waktu tempuh antara Solo – Klaten adalah 25 menit. Apabila dilakukan pengurangan *headway* kurang dari waktu tempuh, maka dalam waktu yang sama akan terdapat 2 rangkaian KRL yang berjalan pada lintas Solo – Klaten. Sehingga daya yang dibutuhkan menjadi lebih dari 2 kali lipat. Tabel di bawah ini adalah perhitungan beban gardu traksi dengan pengurangan *headway* menjadi 20 menit menggunakan rumus (2) dan beban puncak sesaat menggunakan rumus (5). Untuk Gardu Traksi Klaten dan menggunakan rumus-rumus sebelumnya diperoleh Beban maksimum $Y = 6.995,41$ kW, Beban puncak sesaat berdasarkan *Headway* $Z = 12.471,32$ kW. Akhirnya daya yang diperlukan (Zn) adalah $Zn = 4.988,528 \approx 4.988,53$ kW. Untuk Gardu Traksi Ceper, dengan cara yang sama, diperoleh Beban maksimum $Y = 9.236,74$ kW dan Beban puncak sesaat berdasarkan *Headway* $Z = 15.528,93$ kW dan Daya yang diperlukan $Zn = 6.211,57$ kW. Dengan perhitungan menggunakan rumus yang sama, beban maksimum, beban puncak sesaat, dan daya yang diperlukan untuk gardu traksi Gawok dan Purwosari dapat diketahui. Hasil perhitungan disajikan pada tabel berikut ini:

Tabel 2. Perhitungan Daya Formasi 8 Kereta Pada Kondisi *Headway* 20 Menit

	Gardu Traksi			
	Klaten	Ceper	Gawok	Purwosari
Jarak Suplai (km)	7,99	10,55	9,225	6,25
Beban Maksimum (Y) (kW)	6.995,41	9.236,74	8.076,67	5.472
Beban Puncak Sesaat (Z) (kW)	12.471,32	15.528,93	13.960,45	10.314,82
Daya yang diperlukan (Zn)	4.988,53	6.211,57	5.584,18	4.125,92

Sumber : Data Penelitian

Tabel di bawah ini adalah hasil perhitungan berdasarkan beban daya yang digunakan pada KRL seri 205 dan beban

puncak sesaat dengan menggunakan rumus (6) saat 2 rangkaian KRL berada pada lintas yang sama* (*headway* di bawah 25 menit). Dengan rumus yang sama dan data yang tersedia maka hasil lengkap dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Daya Formasi 8 Kereta seri 205 pada Kondisi Pengurangan *Headway*

	Gardu Traksi			
	Klaten	Ceper	Gawok	Purwosari
Jarak Suplai (km)	7,99	10,55	9,225	6,25
Beban Maksimum (Y) (kW)	4.448	4.448	4.448	4.448
Beban Puncak Sesaat (Z) (kW)	8.184,31	8.184,31	8.184,31	8.184,31
Daya yang diperlukan (Zn)	3.273,72	3.273,72	3.273,72	3.273,72

Sumber : Data Penelitian

3.2 Pembahasan

Pada formasi kereta eksisting yakni formasi 4 kereta per rangkaiannya, kebutuhan daya satu rangkaian keretanya sebesar 1112 kW pada *headway* 86 menit berdasarkan jadwal yang diaplikasikan pada saat ini. Bila dibandingkan dengan kapasitas *Silicon Rectifier* dari gardu traksi yang terpasang saat ini sebesar 4000 kW maka kapasitas daya gardu traksi sangat mencukupi untuk melayani kebutuhan operasional KRL saat ini. Begitu juga bila dilakukan pengurangan *headway* menjadi kurang dari 25 menit, di mana dalam lintas Solo – Klaten akan terdapat 2 rangkaian KRL dengan formasi 4 kereta yang beroperasi sehingga jumlah daya yang digunakan menjadi dua kali lipat yakni sebesar 2224 kW bila berjalan pada suplai gardu yang sama, sehingga tidak diperlukan penambahan daya pada peralatan gardu traksi.

Berdasarkan *headway* yang ada pada saat ini dan menggunakan formasi kereta yang ditambah menjadi 8 kereta dalam satu rangkaiannya seperti yang ada pada gambar 2, maka daya yang digunakan adalah sebesar 2224 kW. Bila *headway* dikurangi menjadi lebih kecil dari waktu tempuh antara lintas Solo – Klaten yakni kurang dari 25 menit, maka dalam satu lintas akan terdapat 2 rangkaian KRL yang beroperasi dengan kemungkinan berjalan pada suplai gardu yang sama sehingga jumlah daya yang digunakan menjadi lebih dari dua kali lipat. Berdasarkan tabel 7 untuk gardu traksi Klaten membutuhkan kapasitas daya sebesar 4.998,52 kW, gardu traksi Ceper sebesar 6.211,57 kW, gardu traksi Gawok sebesar 5.584,18 kW, dan gardu traksi Purwosari sebesar 4.125,92 kW. Besarnya nilai perhitungan kapasitas daya yang dibutuhkan

ini merupakan efek dari jarak suplai gardu yang cukup jauh antara satu sama lain yang melebihi 6 km.

Dengan kapasitas *Silicon Rectifier* yang terpasang saat ini sebesar 4000 kW, maka daya operasional KRL melebihi kapasitas gardu traksi yang terpasang dan hanya memungkinkan menahan beban lebih dari 100% dalam waktu tertentu. Terlebih, jarak suplai tiap gardu traksi dapat dikatakan cukup jauh dengan rata-rata memiliki jarak suplai sejauh 8.5 km tiap gardunya yang dapat memicu drop pada suplai daya listrik. Oleh karena itu, rehabilitasi yang dapat dilakukan adalah a) Penambahan kapasitas *silicon rectifier* dari 4000 kW menjadi 5000kW, b) Penambahan kapasitas transformator utama dari 4420 kVA menjadi 5600 kVA dan Penambahan daya tersambung PLN. Akhirnya, penambahan unit gardu traksi pada lintas Solo – Klaten untuk mengatasi kemungkinan KRL yang beroperasi di satu waktu pada suplai gardu yang sama dan mengatasi drop pada suplai daya listrik akibat jarak suplai yang jauh (> 6 km).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari seluruh hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa Gardu traksi Klaten, Ceper, Gawok, dan Purwosari memiliki kapasitas daya yang sama yakni 4.000 kW untuk daya traksi dan 5.540 kVA untuk daya masukan PLN. Selanjutnya, pada rencana pengurangan *headway* perjalanan KRL pada lintas Solo – Klaten, faktor jarak suplai gardu traksi menjadi hal utama yang harus diperhatikan. Berdasarkan perhitungan, jika menggunakan formasi eksisting (4 kereta) dengan beban maksimum sebesar 1.112 kW untuk *headway* di atas 25 menit dan 2.224 kW dengan *headway* di bawah 25 menit maka kapasitas daya pada gardu traksi yang terbangun masih cukup untuk melayani operasional KRL lintas Solo – Klaten. Namun, bila rencana pengurangan *headway* bersamaan dengan penambahan kereta pada formasi rangkaian kereta menjadi rangkaian dengan formasi 8 kereta maka kapasitas daya gardu traksi yang terpasang saat ini tidak mencukupi karena beban maksimum berdasarkan perhitungan melebihi kapasitas daya yang terpasang saat ini yakni dengan beban maksimum pada Gardu Traksi Klaten sebesar 6.995,41 kW, Gardu Traksi Ceper sebesar 9.236,74 kW, Gardu Traksi Gawok sebesar

8.076,67 kW dan Gardu Traksi Purwosari sebesar 5.472 kW. Besarnya nilai tersebut dipengaruhi oleh faktor-faktor yang telah disebutkan sebelumnya. Adapun saran yang perlu disampaikan bahwa *Headway* operasional KRL yang ada pada saat ini (86 menit) dapat diperkecil kembali hingga 25-30 menit untuk mencegah kepadatan penumpang di stasiun dan kereta. Agar operasional KRL dengan formasi 8 kereta bisa menggunakan *headway* di bawah 25 menit diperlukan penambahan kapasitas daya gardu traksi (trafo dan *silicon rectifier*) atau bila memungkinkan melakukan penambahan gardu traksi untuk mengurangi jarak suplai gardu yang saat ini terbangun cukup jauh satu dan lainnya.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Standar, Tata Cara Pengujian dan Sertifikasi Kelaikan Kereta dengan Penggerak Sendiri, (2011). https://jdih.dephub.go.id/assets/uudocs/permen/2011/pm_no_13_tahun_2011.pdf
- Persyaratan Teknis Instalasi Listrik Perkeretaapian, (2018). <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/102591/permenhub-no-50-tahun-2018>
- Bonnett, C. F. (2005). *Practical railway engineering*. Imperial College Press.
- Dwiatmoko, H. (2016). Pengujian fasilitas operasi kereta api. *Jakarta: Kencana*.
- EN50163, B. S. (2005). *Railway applications - supply voltages of traction systems*. BSI.
- Eri, S., & Hario Utama, A. (2019). Analisis Kapasitas Daya Gardu Traksi Terhadap Kebutuhan Krl Jalur Pasar Minggu-Lenteng Agung. *Jurnal Sains & Teknologi Fakultas Teknik*, 9(1), 44–50.
- Fukuhara, S. (2017). 国鉄201-203・205-207系電車の軌跡～電機子チョッパと新・三種の神器を開発した匠たち～. *Laporan Akhir Elektrifikasi Lintas Yogyakarta - Solo*. (2012).
- Modul II.2.9. (2014). *Teknik Operasional Pengoperasian Fasilitas Operasi (Teknik Listrik Aliran Atas – LAA)*.
- Wicaksono, C., Putri, A. R., & others. (2018). Analisa Daya Dukung Gardu Traksi Kranji Pada Pengoperasian Kereta Bandara Soekarno--Hatta. *J. Perkeretaapi. Indones.*, 2(1), 76–82.
- Yoshifumi, M. (2016). *Electric Railway Section - DC/AC Power Supply and*

ISSN 2406-9841

Classification. *Tokyo: Ebisu Kosho.*
Yuniati, I. (2022). *Pengguna KRL Solo-Jogja
Melonjak pada Desember, Capai
9000/Hari.* 4 Januari.