

ANALISIS PENGARUH WAKTU PENDINGINAN TERHADAP FAKTOR KEAMANAN PADA SAMBUNGAN LAS THERMIT REL R.54 DI JALUR HILIR ANTARA STASIUN PASAR MINGGU - STASIUN MANGGARAI

Sigit Yulianto

*Program Studi Teknik Mesin, FTI, Institut Teknologi Budi Utomo Jakarta
yuliantosigit9@gmail.com*

Abstrak

Penelitian ini mengkaji pengaruh waktu pendinginan terhadap faktor keselamatan pada sambungan las *thermit* pada rel R.54 di jalur yang secara rutin dilalui oleh KRL antara stasiun Pasar Minggu dan stasiun Manggarai. Waktu pendinginan dipilih pada rentang waktu 0, 15, 30, 45, 60, 90 dan 120 menit. Temperatur yang tercapai pada masing-masing waktu pendinginan tersebut dicatat, sehingga didapatkan beda temperatur antara saat pengelasan dan saat waktu pendinginan tersebut, yang menjadi dasar untuk perhitungan regangan dan tegangan sisa (*residual/thermal stress*). Kemudian, faktor keamanan sambungan las dihitung sebagai perbandingan antara kekuatan tarik rel dan tegangan sisa akibat pengelasan dan tegangan aksial akibat beban kereta terhadap rel. Adapun pengelasan dilakukan pada 2 lebar celah sambungan yaitu 24 mm dan 25 mm. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu pendinginan, tegangan sisa semakin kecil, sedangkan tegangan aksial akibat beban kereta pada rel bersifat tetap. Pada lebar celah 24 mm dan 25 mm, masing-masing didapatkan faktor keamanan terkecil pada pendinginan 0 detik yaitu sebesar 1,064 dan 1,131 dan faktor keamanan tertinggi pada waktu pendinginan 120 detik sebesar 1,878 dan 1,907. Dengan menggunakan batas aman faktor keamanan 1,8, maka direkomendasikan minimum waktu pendinginan adalah 90 menit, namun demikian waktu pendinginan ini masih harus dikaji berkaitan dengan umur kelelahan sambungan las akibat beban berulang dari kereta yang melewatinya. .

Kata kunci : las *thermit*, waktu pendinginan, tegangan *thermal*, tegangan aksial, faktor keamanan,

1. PENDAHULUAN

Jalan rel merupakan salah satu infrastruktur fundamental pada transportasi di Indonesia yang memiliki peran penting dalam mendukung terwujudnya kelancaran mobilitas angkutan penumpang dan barang yang pada ujungnya memperlancar kegiatan perekonomian. Dalam sistem perkeretaapian, sambungan rel menjadi aspek krusial yang mempengaruhi keamanan, kenyamanan, serta efisiensi operasi kereta api. Sambungan rel diperlukan untuk mengakomodasi perubahan panjang rel akibat pemuaian dan penyusutan *termal*. Namun, jika sambungan rel ini tidak diperhitungkan dengan baik, dapat menimbulkan berbagai permasalahan seperti deformasi rel, ketidakseimbangan penyaluran beban, hingga risiko kecelakaan.

Salah satu tantangan utama dalam perancangan sambungan rel adalah mengupayakan sambungan yang ideal agar dapat meminimalkan risiko deformasi akibat perubahan suhu dan beban lintas yang dapat menyebabkan kondisi *buckling* statis dan retak hingga patah (Esveld, 2015). *Buckling*

terjadi karena adanya pemuaian panjang dari rel akibat adanya kenaikan temperatur (FT Industri, 2019). Selain itu, apabila sambungan tidak diperhatikan dengan baik, dapat menyebabkan keausan lebih cepat, meningkatkan risiko kegagalan sambungan yang berpotensi menimbulkan kecelakaan kereta api. Sambungan yang ideal berperan penting dalam menjaga distribusi beban yang merata pada konstruksi jalan rel, mempertahankan umur pemakaian rel, mencegah konsentrasi tegangan yang berlebihan, dan menjaga stabilitas perjalanan kereta api.

Berdasarkan laporan Investigasi Kecelakaan Kereta Api pada anjlokkan KA 17 (Argo Semeru) di petak jalan Sentolo - Wates, Daop 6 Yogyakarta pada 17 Oktober 2023, diketahui bahwa kecelakaan anjlokkan KA 17 Argo Semeru di KM. 520 + 420 jalur hilir petak jalan antara Stasiun Sentolo - Stasiun Wates, diakibatkan oleh terjadinya *buckling* pada jalan rel. Terjadinya *buckling* disebabkan oleh pemuaian yang terjadi pada material logam rel. Pemuaian ini dipengaruhi oleh

adanya perbedaan atau selisih temperatur (ΔT) yang tinggi di dalam struktur logam rel antara temperatur rel di saat pertama kali rel dipasang dan temperatur rel di saat kondisi cuaca panas (KNKT, 2024). Selain itu, ketidaksesuaian dalam perencanaan, pemasangan, dan perawatan sambungan rel juga dapat meningkatkan risiko retak hingga sambungan rel patah. Seperti halnya pada kejadian di KM 57+0/1 Jalur Hulu antara Dopleng - Randublatung pada 6 Oktober 2023, terjadi patahan rel tepat di titik sambungan pengelasan, yang menunjukkan adanya kegagalan struktural pada sambungan rel (Kementerian perhubungan direktorat jenderal perkeretaapian, 2024).

Salah satu metode penyambungan rel yang kerap digunakan adalah penyambungan rel adalah metode las *thermit*. Proses ini memanfaatkan reaksi kimia antara serbuk aluminium dan oksida besi untuk menghasilkan logam cair, yang kemudian menyambungkan dua ujung rel. Setelah reaksi selesai, sambungan harus didinginkan dengan hati-hati agar kekuatan dan ketahanannya optimal. Waktu pendinginan hasil las *thermit* pada rel kereta api idealnya sekitar 1-2 jam, bergantung pada kondisi lingkungan dan ketebalan rel. Proses pendinginan ini menjadi krusial karena pendinginan terlalu cepat dapat menyebabkan tegangan internal dan retak dan pendinginan terlalu lambat dapat mengakibatkan deformasi struktural. Beberapa faktor yang mempengaruhi waktu pendinginan antara lain suhu lingkungan, ketebalan rel, jenis material, dan kondisi cuaca saat pemasangan. Pada proses pendinginan, terdapat tiga tahapan utama yaitu pendinginan awal (perlahan agar menghindari kerusakan struktur internal), pendinginan lanjutan (mungkin dipercepat dengan kontrol seperti angin atau air), dan pendinginan akhir (stabilisasi ke suhu ruang).

Dalam operasional kereta api, proses pengelasan *thermit* umumnya dilakukan saat *window time*, yaitu waktu di luar jam operasi aktif kereta api. Hal ini karena saat operasi berlangsung, *headway* antar kereta sangat padat dan singkat, sehingga pelaksanaan pengelasan saat *window time* dapat mengurangi risiko kecelakaan kerja dan memastikan kualitas pekerjaan yang lebih maksimal. Pada lintas Pasar Minggu - Manggarai, *window time* dimulai pada pukul

00.00 s.d. 04.05 WIB. Dengan keterbatasan waktu *window time* ini, harus dimanfaatkan semaksimal mungkin, guna memberikan hasil pengelasan yang optimal. Kondisi ini mempengaruhi waktu pendinginan, sehingga pekerja harus memiliki manajemen waktu yang baik agar waktu pendinginan cukup, sehingga sambungan tidak langsung menerima beban sebelum mencapai kestabilan yang cukup. Apabila sambungan las mendapatkan beban kerja langsung dan stabilisasi pada waktu pendinginan yang tidak ideal, dapat menyebabkan masalah serius seperti cacat las, distorsi, tegangan tidak merata, bahkan retak pada sambungan. Tegangan ini, jika tidak dikendalikan sejak awal, dapat mempercepat kerusakan dan mengurangi masa pakai sambungan secara drastis.

Melalui penelitian Analisa Kinerja Sambungan Las *Thermit* Rel R.54 Di Jalur Hilir Antara Stasiun Pasar Minggu - Stasiun Manggarai, diharapkan dapat mengetahui waktu pendinginan yang optimal untuk mendapatkan faktor keamanan sambungan las *thermit* yang pada ujungnya menjamin keselamatan operasional kereta api..

2. METODOLOGI

Penelitian ini merupakan penelitian yang bersifat eksperimen untuk mendapatkan data primer dan perhitungan teoritis dengan menggunakan data primer dan data sekunder. Tahapan penelitian yang dilakukan meliputi:

2.1 Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan informasi berupa teori, standar dan peraturan yang terkait dengan sambungan las *thermit* pada rel kereta api serta data sekunder yang dibutuhkan untuk melakukan perhitungan dan analisis.

2.2 Eksperimen dan pengukuran

Pada tahapan ini dilakukan proses penyambungan las *thermit* sesuai dengan *welding procedure specification* yang sudah divalidasi. Pengukuran dilakukan untuk mendapatkan data lebar celah pengelasan, waktu pendinginan dan temperatur

pendinginan. Lebar celah diatur pada 2 parameter yaitu 24 mm dan 25 mm, sedangkan waktu pendinginan dibuat dengan durasi masing-masing 0, 15, 30, 60, 90 dan 120 menit, dengan pendinginn normal, yaitu mengikuti kondisi temperatur alam yang sesungguhnya, dan temperature pada setiap akhir waktu pendinginan diukur. Perbedaan temperatur saat awal dan akhir pendinginan dicatat sebagai perbedaan temperatur atau ΔT .

2.3 Perhitungan-perhitungan

Perhitungan-perhitungan yang dilakukan untuk mendukung penelitian ini meliputi:

- Tegangan akibat pengelasan (*thermal stress/residual stress*);
- Tegangan akibat beban aksial pada rel akibat beban dari kereta;
- Tegangan total aksial yang diterima rel; dan
- Faktor keamanan sambungan las *thermit*

2.4 Analisa dan pembahasan

Analisa dan pembahasan dilakukan berdasarkan hasil perhitungan.

2.5 Kesimpulan

Kesimpulan ditarik berdasarkan hasil analisa dan pembahasan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tentang Rel R.54

Rel kereta api merupakan komponen utama dalam sistem perkeretaapian yang berfungsi sebagai jalur lintasan roda kereta. Rel dibuat dari material logam berkekuatan tinggi, umumnya baja mangan atau baja karbon tinggi, yang memiliki sifat mekanis unggul seperti ketahanan terhadap beban berat, keausan akibat gesekan, dan perubahan suhu. Baja mangan dikenal memiliki ketahanan aus yang sangat baik karena efek pengerasan akibat kerja (*work hardening*), sedangkan baja karbon tinggi memberikan kekuatan tarik dan ketangguhan yang diperlukan untuk menahan beban kereta api. Komposisi kimia dari baja rel kereta api yang menjadi obyek penelitian ditunjukkan pada tabel 2.1 dibawah ini, yang merupakan baja

karbon tinggi dengan kandungan mangan yang tinggi. Pengertian rel R.54 adalah rel yang mempunyai berat sekitar 54 kg untuk setiap meter panjangnya.

Tabel 1 Komposisi kimia baja rel

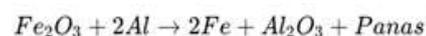
Unsur	Komposisi (%)
C	0,6 – 0,8
Si	0,15 – 0,35
Mn	0,9 – 1,1
P	Max 0,035
S	Max 0,025

Sumber : Data penelitian mandiri

3.2 Sambungan Las *thermit*

Pengelasan rel merupakan salah satu proses penting dalam penyambungan jalan rel, di mana dua batang rel disatukan sehingga membentuk lintasan yang kontinu dan stabil. Tujuan utama dari penyambungan ini adalah untuk menghilangkan sambungan mekanis seperti *fishplate* yang cenderung menimbulkan gangguan getaran, keausan, serta kebisingan saat kereta melintas, penyambungan ini dilakukan dengan berbagai cara, yang umum digunakan yaitu metode *thermit*.

Aluminothermic welding, atau lebih dikenal sebagai pengelasan *thermit* adalah suatu proses penyambungan rel yang memanfaatkan reaksi kimia eksotermik antara serbuk aluminium (Al) dan oksida logam, khususnya besi oksida (Fe_2O_3), untuk menghasilkan besi cair. Besi cair yang dihasilkan dari reaksi ini memiliki suhu sekitar $2500^\circ C$ dan digunakan untuk mengisi celah antar dua ujung rel. Setelah dituangkan, logam cair akan mengisi rongga sambungan dan membeku menjadi sambungan monolitik yang memiliki sifat mekanis mendekati atau setara dengan rel aslinya. Prinsip kerja proses ini bekerja berdasarkan Reaksi Kimia:



Dimana besi oksida (Fe_2O_3) bereaksi dengan aluminium (Al), menghasilkan besi cair (Fe) yang digunakan untuk mengisi celah antara dua rel yang disambung. Setelah reaksi selesai, logam cair dituangkan ke dalam cetakan pasir khusus yang menutupi sambungan, dan setelah pembekuan, bagian atas sambungan akan digerinda hingga profilnya sejajar dan sesuai dengan kontur rel.

Lebar celah rel sebelum dilakukan pengelasan ditunjukkan pada gambar 1 dan setelah dilakukan pengelasan ditunjukkan pada gambar 2. Pada penelitian ini lebar celah rel dibuat untuk 24 mm dan 25 mm.



Gambar 1: Lebar celah rel
Sumber : Data penelitian mandiri



Gambar 2: Hasil las *thermit*
Sumber : Data penelitian mandiri

3.3 Hasil pengukuran temperatur rel

Temperatur rel diukur dan dicatat pada setiap waktu pendinginan, dan ditampilkan pada tabel 2 berikut ini.

Tabel 2 Hasil pengukuran temperatur

Celah (mm)	Waktu (menit)	T1 (°C)	T2 (°C)	ΔT (°C)
25	0	352	175	177
	15	135	95	39,5
	30	112	77	33,5
	60	68	51	16,5
	90	50	40	4,5
	120	38	36	2,0
24	0	340	136	204
	15	230	105	125
	30	185	86	99
	60	105	58	47
	90	70	42	32
	120	44	38	6

Sumber : Data penelitian mandiri

T1 adalah pengukuran temperatur pada titik tengah sambungan las, dan T2 adalah rata-rata pengukuran temperatur pada titik sebelah kanan dan kiri sambungan las. Perbedaan temperatur antara T1 dan T2 adalah ΔT. Terlihat bahwa semakin lama waktu pendinginan, temperatur rel semakin menurun, demikian pula semakin lama waktu pendinginan, ΔT juga semakin menurun.

3.4 Tegangan sisa pada sambungan las

Tegangan sisa pada pengelasan terbentuk karena perubahan panas selama proses pengelasan dan pendinginan, dimana pada penelitian ini disimbolkan sebagai ΔT. Perubahan panas mengakibatkan pemuaihan rel (regangan/*strain*) dan akibat adanya regangan maka tegangan sisa σ, atau tegangan panas (*thermal stress*) dapat dihitung dengan menggabungkan persamaan hukum *hook* dan persamaan pemuaihan, sehingga didapatkan:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

E = modulus elastisitas baja, $2,1 \times 10^5$ MPa

A = koefisien muai baja, $11,5 \times 10^{-6}$ mm/°C

Tabel 3 berikut ini menampilkan tegangan sisa dan gaya *thermal* yang bekerja pada sambungan las *thermit* pada waktu pendinginan yang berbeda-beda, untuk lebar celah 24 mm dan 25 mm.

Tabel 3 Tegangan sisa dan gaya *thermal*

Lebar celah (mm)	Waktu (menit)	σ (MPa)	F (N)
24	0	492,660	3.416.104,44
	15	301,875	2.093.201,25
	30	237,878	1.649.442,58
	60	112,298	778.670,86
	90	66,412	460.504,28
	120	14,490	100.473,66
25	0	427,455	2.963.972,97
	15	95,392	661.451,60
	30	80,902	560.977,94
	60	39,848	276.302,56
	90	10,868	75.355,24
	120	4,830	33.491,22

Sumber : Data penelitian mandiri

3.4 Tegangan mekanis

Diketahui bahwa 1 rangkaian Kereta Rel Listrik terdiri dari 12 kereta yang masing – masing gandar 18 ton. Maka diperoleh informasi tegangan mekanis dalam satu rangkaian Kereta Rel Listrik sebagai berikut :

- Beban per roda: $9 \text{ ton} = 9000 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 88,29 \text{ kN}$
- Jumlah roda per sisi rel 48 roda
- $F \text{ total} = 48 \times 88,29 \text{ kN} = 4237,92 \text{ kN}$
- Nilai Tegangan Mekanis :
- $\sigma_m = 4237,92 \text{ kN} / 6934 \text{ mm} = 611,2 \text{ N/mm}^2$ atau $611,2 \text{ MPa}$.

3.4 Tegangan total dan faktor keamanan

Tegangan mekanis yang telah dihitung pada 3.4 menghasilkan tegangan aksial sepanjang jalur rel, termasuk pada sambungan las. Maka pada sambungan las, bekerja tegangan sisa (*residual/thermal stress*) dan tegangan aksial akibat beban kerata yang melewatinya. Tegangan aksial total dapat dihitung sebagai penjumlahan tegangan *thermal* dan tegangan mekanis dalam persamaan $\sigma_{Total} = \sigma_{Mekanik} + \sigma_{Termal}$, dan jika diketahui tegangan total, maka faktor keamanan dapat dihitung sebagai perbandingan kekuatan tarik maksimal dengan tegangan aksial total. Dengan menggunakan kekuatan tarik maksimal baja rel 1175 MPa, maka pada tabel 4 ditampilkan ringkasan hasil perhitungan untuk tegangan total dan faktor keamanan pada masing-masing waktu pendinginan.

Tabel 4 Tegangan total dan faktor keamanan

Lebar Celah (mm)	Waktu Pendinginan (menit)	Tegangan Aksial Total (Mpa)	Faktor Keamanan
25	0	1038,655	1,131
	15	706,592	1,663
	30	692,102	1,698
	60	651,048	1,805
	90	622,068	1,889
	120	616,030	1,907
24	0	1103,860	1,064
	15	913,075	1,287
	30	849,078	1,384
	60	723,498	1,624
	90	677,612	1,734
	120	625,690	1,878

Sumber : Data penelitian mandiri

3.5 Pembahasan

Sebagaimana ditunjukkan pada tabel 2, terjadi penurunan perbedaan temperatur pada waktu pendinginan yang makin lama. Hal ini terjadi karena perpindahan panas dari sambungan las ke udara di sekelilingnya, sehingga semakin lama waktu pendinginan, proses perpindahan panas akan semakin banyak dan berakibat pada penurunan perbedaan temperatur.

Tabel 3 menunjukkan bahwa semakin lama waktu pendinginan, tegangan sisa akan semakin berkurang, hal ini sejalan dengan persamaan (1) dimana tegangan sisa berbanding lurus dengan perbedaan temperatur, ΔT . Kemudian dikarenakan, tegangan aksial mekanis tetap, maka tegangan total aksial, perubahannya bergantung pada tegangan sisa. Konsekuensinya adalah bahwa faktor keamanan akan meningkat jika tegangan sisa makin kecil, atau pada penelitian ini jika perubahan temperatur makin kecil atau waktu pendinginan makin lama. Perlu dicatat bahwa, faktor keamanan dipengaruhi oleh lebar celah pengelasan, Dimana untuk lebar 25 mm, faktor keamanan sudah diatas 1,8 untuk pendinginan selama 60 menit, sedangkan untuk lebar celah 24 mm, faktor keamanan baru mencapai diatas 1,8 pada waktu pendinginan 90 menit. Hal ini sekaligus menunjukkan bahwa lebar celah harus dikontrol dengan ketat selama proses pengelasan.

Meskipun semakin lama waktu pendinginan menghasilkan faktor keamanan yang makin tinggi, namun demikian karena waktu pendinginan dibatasi oleh window time, maka yang dicari adalah waktu pendinginan optimal, dalam hal ini waktu pendinginan diatas 90 menit menghasilkan faktor kewanaman lebih dari 1,8, baik untuk lebar celah 25 mm maupun 24 mm.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- a) Semakin lama waktu pendinginan, tegangan sisa (*thermal stress*) yang terjadi pada sambungan las *thermit* makin tinggi.

- b) Semakin lama waktu pendinginan, faktor keamanan sambungan las *thermit* semakin tinggi,
- c) Faktor keamanan mencapai diatas 1, 8 untuk waktu pendinginan 90 menit baik untuk lebar celah 25 mm dan 24 mm.
- d) Waktu pendinginan ini (90 menit) masih perlu dikaji dalam kiatannya dengan umur kelelahan yang dialami oleh sambungan las karena beban berulang dari kereta yang melewatinya.

DAFTAR PUSTAKA

- Esveld, C., *Modern Railway Track*. MRT-Productions, Zaltbommel, Netherlands. 2015.
- F. T. Industri, *Analisa numerik tegangan dinamik pada rel kereta api akibat beban impak dengan kenaikan suhu*, Jakarta, 2019.
- KNKT, *Laporan Investigasi Kecelakaan Perkeretaapian Anjlok KA 17 (Argo Semeru)* Di Petak Jalan Sentolo-Wates, Daop 6 Yogyakarta 17 Oktober 2023, Jakarta, 2024.
- Kementerian perhubungan direktorat jenderal perkeretaapian, *Peraturan Menteri Perhubungan*, vol. II, no. 8, pp. 1–38, 2024
- PT KAI, *Perencanaan Kontruksi Jalan Rel*, PD 10 TAHUN 1986, Jakarta, 1986.
- Sidney H Avner, *Introduction to Physical Metallurgy*, Mc Graw Hill Book Company, Singapore, 2010.