

Simulasi Perubahan Prilaku Regangan Geser Material Rel Pada Perubahan Suhu Permukaan Kontak Akibat Beban Gelinding/Gesek

I Made Widiyarta

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Udayana

email:

Abstraksi

Beban oleh roda kereta api pada rel dapat mengakibatkan material rel di permukaan kontak mengalami regangan geser plastis cukup besar. Bila akumulasi regangan geser plastis tersebut melampaui batas kritis regangan geser material, maka kegagalan material seperti keausan (*ratcheting wear*) dan retak lelah (*fatigue*) dapat terjadi. Pada saat roda kereta api menggelinding diatas rel, panas dapat timbul pada permukaan kontak karena gesekan dan juga dapat menimbulkan tegangan termal. Bila peningkatan suhu tersebut cukup tinggi maka dapat menurunkan kekuatan material rel.

Simulasi komputer dibuat untuk mempelajari perilaku regangan geser pada material rel karena peningkatan suhu permukaan kontak akibat gesekan saat terjadinya kontak gelinding/gesek antara roda dan rel kereta. Dari hasil simulasi diketahui bahwa penurunan kekuatan material rel oleh pengaruh suhu dan timbulnya tegangan termal dapat mempercepat akumulasi regangan geser yang tentunya dapat mempercepat terjadinya kegagalan material.

Kata kunci : kontak gelinding/gesek, panas gesekan, pelunakkan, tegangan termal, regangan geser.

Abstract

Repeated wheel load over rail can cause rail material at the contact surface to accumulate severe plastic deformation. The material fails after accumulating a critical shear strain and produce wear debris and fatigue cracks. During rolling/sliding contact between railway rails and wheel, temperature will raise at the contact surface due to frictional heating and thermal stress will develop. If the generation of heat is high enough the rail material may soften.

In this work, a simulation based on ratchetting failure is used to study shear strain behaviour of rail material with frictional heating in rolling/sliding contact between wheel and railway rail. The simulation results show the material softening and thermal stress increase the rate of shear strain accumulation by ratchetting leading to fail material more quickly.

Keywords: rolling/sliding contact, frictional heating, softening, thermal stress, shear strain.

1. PENDAHULUAN

Material dengan sifat mekanis ulet seperti baja karbon sedang atau baja *perlite* (material rel kereta api) bila menerima beban *rolling/sliding contact* berulang-ulang dapat mengakibatkan material dipermukaan dan dibawah permukaan kontak mengalami regangan geser dan dapat terakumulasi cukup besar. Bila akumulasi regangan geser tersebut mencapai batas kritis regangan geser material, maka kegagalan material dapat terjadi, seperti keausan (*ratcheting wear*) dan kegagalan akibat lelah (*fatigue*). Menurut Kapoor [1], material yang ulet bila menerima beban berulang-ulang dapat mengalami kegagalan material karena kegagalan akibat beban berulang yang tidak besar (*low cycle fatigue, LCF*) atau kegagalan oleh akumulasi regangan (*ratcheting failure*) yang mana tergantung dari mekanisme mana yang dicapai terlebih dahulu.

Saat terjadinya kontak gelinding/gesek antara roda dan rel kereta, panas dapat timbul di permukaan kontak akibat gesekan dan juga dapat mengakibatkan terjadinya tegangan termal. Umumnya material yang menerima panas yang cukup tinggi dapat menurunkan kekuatan material (dapat menurunkan ketahanan material terhadap terjadinya regangan) dan juga dapat mempengaruhi struktur mikro material. Bagaimana suhu permukaan kontak meningkat akibat gesekan antara roda dan rel kereta api telah banyak dipelajari [2, 3, 4]. Pada kondisi tertentu, suhu permukaan kontak pada rel kereta dapat mencapai 600°C dan dengan adanya tekanan (*hydrostatic pressure*) yang cukup besar, perubahan fase pada material rel dapat terjadi [5]. Meskipun peningkatan suhu tidak mencapai suhu fase transformasi, namun bila suhu cukup tinggi, panas yang ditimbulkan dapat melunakkan material rel kereta (*softening*) dan mungkin dapat mempengaruhi struktur mikro material rel. Sedangkan tegangan termal dapat

memperbesar deformasi/regangan plastis yang terjadi. Bohmer dan rekan-rekan [4] telah melakukan investigasi panas yang timbul akibat gesekan antara roda dan rel kereta api dan diketahui bahwa gesekan yang terjadi dapat menimbulkan panas dan tegangan termal yang cukup tinggi. Gosima dan rekan-rekan [6-9] telah mempelajari pengaruh tegangan termal pada perilaku perambatan retak lelah dan umur lelah akibat beban kontak gelinding/gesek. Mereka menemukan bahwa panas yang timbul akibat gesekan oleh beban kontak gelinding/gesek mempercepat perambatan retak lelah dan juga mengurangi umur material akibat kegagalan lelah dengan meningkatnya tegangan termal.

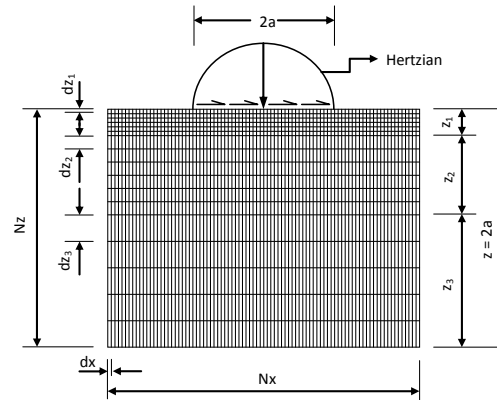
Simulasi berkenaan dengan kegagalan material seperti keausan dan retak akibat proses akumulasi regangan karena beban kontak gelinding/luncur telah banyak dikembangkan [10-12], namun keseluruhan simulasi komputer yang dikembangkan tersebut masih terbatas pada beban/tegangan mekanik tanpa mempertimbangkan pengaruh suhu dan tegangan termal. Seperti diketahui bahwa dalam proses pembebanan kontak gelinding/gesek akan timbul panas akibat gesekan dan juga mengakibatkan terjadinya tegangan termal. Pada artikel ini, perilaku regangan geser material dibawah permukaan kontak akibat beban gelinding/gesek antara roda dan rel kereta akan dipelajari melalui simulasi komputer dengan mempertimbangkan pengaruh panas dan tegangan termal akibat gesekan.

2. MODEL SIMULASI

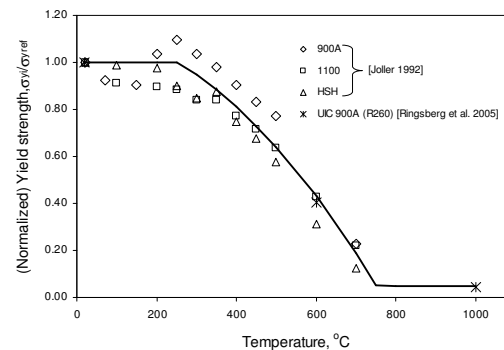
Kontak gelinding/gesek disimulasikan sebagai kontak garis dengan 100% slip, koefisien gesek dan kecepatan konstan. Material dibawah permukaan kontak dibuat 2 dimensi seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Bagian paling atas dibagi atas elemen-elemen sangat kecil dan selanjutnya pada bagian kedua dan ketiga dibagi menjadi elemen-elemen yang lebih besar. Lebar elemen ditentukan sebesar 1% dari ukuran setengah lebar kontak dengan jumlah 100 elemen sesuai yang digunakan pada model yang dikembangkan oleh Franklin dan rekan-rekan [11]. Total tebal material adalah sebesar $2a$ dimana a adalah ukuran setengah lebar kontak. Setiap elemen memiliki sifat mekanis yaitu kekuatan luluh (σ_y) dan regangan geser kritis (γ_c) yang bervariasi yang distribusinya ditentukan dengan acak menggunakan distribusi normal gauss dengan standard deviasi 5%.

Panas yang timbul di permukaan kontak rel saat gesekan terjadi antara roda dan rel kereta dianalisa dengan menggunakan persamaan yang telah dikembangkan oleh Ertz dan Knothe [2], sedangkan tegangan termal yang terjadi dianalisa dengan memanfaatkan formula yang telah dikembangkan oleh Goshima dan Keer [7]. Sifat mekanik material pada suhu tertentu mengacu pada

sifat mekanik material rel yang telah diteliti oleh Joller [13] dan Ringsberg dan rekan-rekan [14]. Untuk mengetahui perubahan kekuatan luluh material rel oleh perubahan suhu, Perubahan kekuatan luluh dari ketiga tipe material rel tersebut dinormalisasikan terhadap kekuatan luluh pada suhu normal seperti ditunjukkan pada Grafik 1.



Gambar 1. Model 2 dimensi



Grafik 1 Perubahan kekuatan luluh beberapa material rel akibat perubahan suhu.

Hubungan antara suhu dan penurunan kekuatan tarik material (*softening*) dievaluasi dalam tiga bagian. Suhu 250°C ditentukan sebagai suhu transisi dimana material rel mengalami penurunan kekuatan tarik bila suhu tersebut dilampaui dan tidak mengalami penurunan kekuatan tarik atau rasio penurunan kekuatan tarik material (*softening*) terhadap peningkatan suhu diasumsikan konstan (*the softening ratio*, $\sigma_{yi}/\sigma_{yref} = 1$) bila suhu permukaan kontak tidak melampaui 250°C. Rasio penurunan kekuatan tarik pada suhu antara 250°C dan 750°C dievaluasi dengan *quadratic polynomial* dan bila melampaui 750°C maka rasio penurunan kekuatan tarik material diasumsikan konstan pada nilai 0.05. Ketiga bagian rasio penurunan kekuatan tarik material terhadap peningkatan suhu ditunjukkan sebagai berikut :

$$\frac{\sigma_{yi}}{\sigma_{yref}} = \begin{cases} 1.0, & T_i \leq T_{ref1} \\ 1.0 - 0.741 \left(\frac{T_i - T_{ref1}}{T_{ref2}} \right) - 1.026 \left(\frac{T_i - T_{ref1}}{T_{ref2}} \right)^2, & T_{ref1} < T_i < T_{ref2} \\ 0.05, & T_i \geq T_{ref2} \end{cases}$$

dimana T_i adalah peningkatan suhu permukaan, $T_{ref1} = 250^\circ\text{C}$, $T_{ref2} = 750^\circ\text{C}$, σ_{yref} adalah kekuatan luluh material pada suhu kamar/normal dan σ_{yi} adalah kekuatan luluh material rel pada suhu tertentu.

Setiap sekali pembebanan, penambahan regangan geser plastis pada setiap elemen dihitung sesuai persamaan berikut [15]:

$$\Delta\gamma^{ij} = \begin{cases} C(\tau_{zx(max)}^j / k_{eff}^{ij} - 1) & \tau_{zx(max)}^j > k_{eff}^{ij} \\ 0 & \tau_{zx(max)}^j \leq k_{eff}^{ij} \end{cases}$$

Dimana $\tau_{zx(max)}^j$ adalah tegangan geser maksimum yang terjadi disetiap kedalaman dan C adalah konstanta yang sama dengan 0.00237 untuk material rel BS 11 [15]. Bila tegangan geser maksimum oleh beban kontak lebih kecil dari kekuatan geser luluh material rel maka material tidak mengalami deformasi plastis atau hanya mengalami deformasi elastis yang artinya tidak terjadi proses akumulasi regangan geser. Akumulasi regangan geser terjadi bila tegangan geser maksimum yang terjadi melampaui kekuatan geser luluh efektif dari material (k_{eff}) dan pada kondisi ini material mungkin mengalami pengerasan (*work hardening*). Bila material tidak mengalami pengerasan maka kekuatan geser luluh efektif material akan konstan, $k_{eff} = k_0 = \sigma_y / \sqrt{3}$.

Untuk material yang mengalami pengerasan, maka kekuatan geser luluh efektif material (k_{eff}) setiap mengalami pembebanan akan ditentukan oleh persamaan Voce sebagai berikut :

$$k_{eff}^{ij} = k_0^{ij} \max \left\{ 1, \beta \sqrt{1 - e^{-\alpha\gamma^{ij}}} \right\}$$

Dimana α adalah konstanta yang menentukan seberapa cepat material mengalami pengerasan dan β adalah konstanta yang menentukan berapa besar pengerasan yang terjadi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi ini belum cukup representatif untuk dapat mewakili perilaku material akibat beban gelinding/gesek kondisi sebenarnya, karena pada kondisi sebenarnya begitu rumit dan begitu banyak faktor yang ada dan berpengaruh dalam proses interaksi antara roda dan rel kereta, seperti kekasaran permukaan, material ketiga yang terperangkap didalam permukaan kontak, hubungan antara hardening dan softening, perubahan sifat thermal material terhadap perubahan suhu akibat gesekan, dan lain-lain. Simulasi ini masih berupa studi awal dan masih perlu begitu banyak pengembangan, namun demikian simulasi ini diharapkan dapat memberikan gambaran sederhana terhadap perilaku regangan geser material akibat beban gelinding/gesek dengan mempertimbangan tegangan thermal dan perubahan kekuatan material (*softening*).

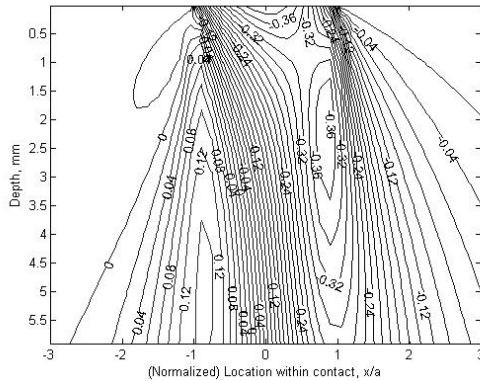
Sebelum simulasi komputer dioperasikan terlebih dahulu sifat mekanis dari pada material rel dan besar beban yang diterima rel ditentukan. Adapun sifat mekanis material rel yang digunakan dalam simulasi ini adalah seperti ditunjukkan pada tabel berikut :

Table 1 Sifat mekanis material rel (BS11 rail steel) [2, 12]

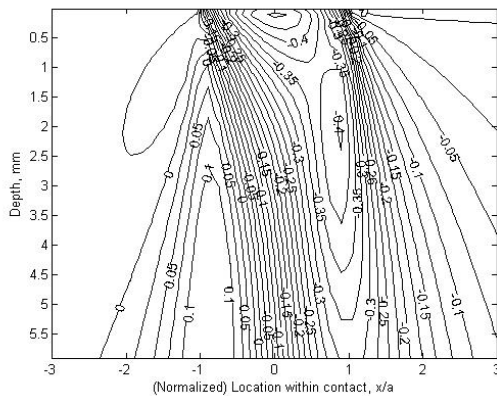
Sifat mekanis	Nilai
¹ Young's modulus (E), Gpa	209
¹ Poisson's ratio	0.3
¹ Tensile yield strength (σ_y), MPa	406
¹ How quickly material harden, α	25
¹ Strain hardening, β	1.88
¹ Constant C	0.00237
¹ Critical shear strain for failure, γ_c	11.5
² Thermal conductivity (K_t), W/Km	50
² Coefficient of thermal expansion (α_t), K^{-1}	$1.2e^{-5}$
² Thermal diffusivity (κ), m^2/s	$1.42e^{-6}$

Ket. : ¹ dari daftar pustaka [12] dan ² dari [2]

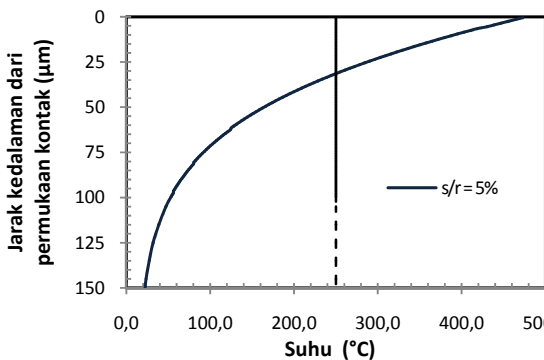
Simulasi dioperasikan dengan tekanan maksimum roda kereta pada rel sebesar 1500MPa, kecepatan kereta 30 km/jam, koefisien gesek 0.4, rasio *slip/roll* sebesar 5% dan disimulasikan dalam 3000 iterasi (*cycles*).



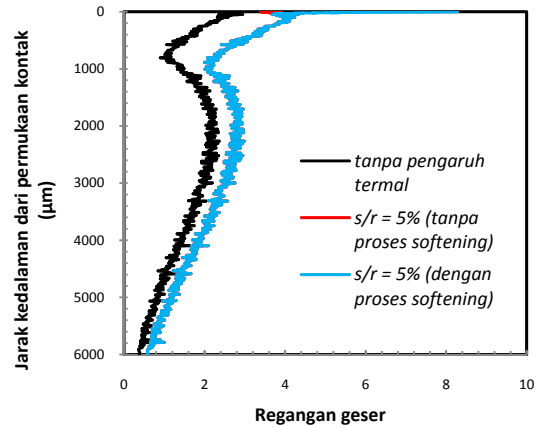
Grafik 2. Distribusi tegangan geser ($x P_0$) dibawah permukaan kontak dengan koefisien gesek sebesar 0.4 tanpa adanya pengaruh thermal



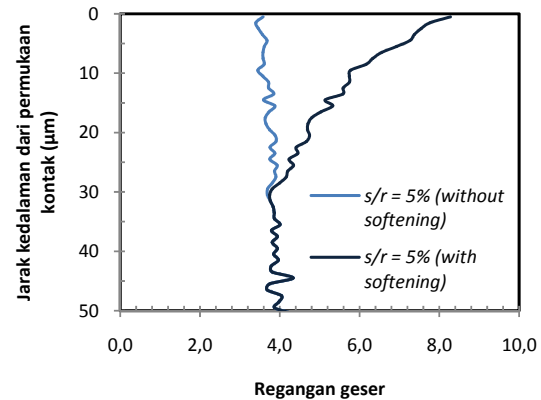
Grafik 3. Distribusi tegangan geser ($x P_0$) dibawah permukaan kontak dengan koefisien gesek sebesar 0.4 dengan adanya pengaruh thermal dengan rasio roll/slip $s/r = 5\%$.



Grafik 4. Distribusi suhu dibawah permukaan kontak dengan rasio slip-roll 5%



Grafik 5. Regangan geser dibawah permukaan kontak setelah 3000 kali pembebanan.



Grafik 6. Regangan geser dibawah permukaan kontak dengan kondisi tanpa terjadi *softening* dan dengan kondisi terjadi *softening* setelah 3000 kali pembebanan.

Koefisien gesek 0.4 mengakibatkan tegangan geser maksimum terjadi di permukaan kontak, tegangan geser maksimum dapat mencapai kira-kira $0.4P_0$ (600MPa) untuk kondisi tanpa adanya pengaruh thermal (Grafik 1a) dan meningkat mencapai kira-kira $0.44P_0$ (660MPa) akibat adanya tegangan thermal dengan rasio slip/roll sebesar 5% (Grafik 1b). Ini mengakibatkan regangan geser maksimum terjadi dekat permukaan kontak (Grafik 5). Tegangan geser yang terjadi tersebut jauh lebih besar dari kekuatan geser efektif awal material yang berkisar 234MPa dan juga lebih besar dari kekuatan geser efektif maksimum yang dapat dicapai akibat *work hardening* yang besarnya kira-kira 420MPa. Hal ini tentunya dapat mengakibatkan terjadinya deformasi regangan geser pada material rel setiap kali menerima beban dan dengan pembebanan

hingga ribuan kali, material rel dapat mengalami akumulasi regangan geser yang cukup besar sehingga dapat mengakibatkan kegagalan pada material berupa keausan atau retak bila akumulasi regangan geser tersebut mencapai kekuatan geser kritis material. Untuk 3000 kali pembebanan, regangan geser dekat permukaan akibat tegangan geser tanpa adanya pengaruh thermal dapat mencapai 2,7 dan tegangan thermal dapat memperbesar akumulasi regangan geser di permukaan kontak tersebut menjadi kira-kira 3,6. Hal ini menunjukkan tegangan thermal oleh panas yang ditimbulkan akibat gesekan antara roda dan rel kereta dapat meningkatkan regangan geser yang terjadi dan mempercepat akumulasi regangan geser untuk mencapai/melebihi kekuatan kritis regangan geser material, sehingga dapat mempercepat terjadinya kegagalan pada rel material.

Selain tegangan thermal, suhu permukaan kontak oleh beban gesekan antara roda dan rel kereta dapat mencapai suhu yang cukup tinggi bahkan dapat mencapai suhu transformasi dan suhu yang cukup besar tersebut dapat terdistribusi sampai pada kedalaman 80 μm [5]. Besarnya suhu permukaan dan dibawah permukaan kontak yang diakibatkan oleh beban gesek tersebut tentunya dapat mempengaruhi sifat mekanis material bila suhu dihasilkan cukup besar (lebih dari 250°C). Hal ini juga dapat memberi kontribusi terhadap percepatan terjadinya kegagalan pada material rel. Untuk koefisien gesek 0,4, rasio slip/roll 5% dan tekanan maksimum 1500 MPa yang digunakan dalam simulasi ini, besar suhu dipermukaan kontak dapat mencapai kira-kira 470°C. Suhu dibawah permukaan yang dapat mempengaruhi sifat mekanis material dapat mencapai kedalaman kira-kira 30 μm dengan besar suhu kira-kira 260°C (Grafik 4). Dari Grafik 4 terlihat regangan geser yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan material (*softening*) mengalami peningkatan cukup besar dan peningkatan regangan geser tersebut hanya terjadi sampai pada kedalaman kira-kira 30 μm . Dipermukaan kontak regangan geser dapat mencapai kira-kira 8,3 dan peningkatan besar regangan geser mengalami penurunan terhadap jarak dari permukaan kontak. Walaupun pengaruh suhu tidak terlalu dalam namun besarnya peningkatan akumulasi regangan geser yang terjadi akibat suhu yang dihasilkan oleh beban gesekan antara roda dan rel kereta tentunya akan dapat mempercepat terjadinya kegagalan material rel di permukaan kontak.

KESIMPULAN

Dari hasil dan bahasan tersebut diatas dapat disimpulkan bahwa tegangan thermal dan peningkatan suhu dipermukaan kontak akibat beban gesek antara roda dan rel kereta dapat meningkatkan besar regangan geser. Kondisi

tersebut tentunya akan memberi kontribusi dalam mempercepat terjadinya kegagalan material rel di permukaan baik berupa keausan maupun retak permukaan.

DAFTAR PUSTAKA

1. A. Kapoor, 1994, *A re-evaluation of the life to rupture of ductile metals by cyclic plastic strain*, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 17, 201-219.
2. M. Ertz, and K. Knothe, 2002, *A comparison of analytical and numerical methods for the calculation of temperatures in wheel/rail contact*, Wear, 253, 498-508.
3. F.D. Fischer, E.A. Werner and W.Y. Yan, 1997, *Thermal stresses for frictional contact in wheel-rail systems*, Wear, 221, 156-163.
4. A. Bohmer, M. Ertz and K. Knothe, 2003, *Shakedown limit of rail surfaces including material hardening and thermal stresses*, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 26, 985-998.
5. G. Baumann, H.J. Fecht and S. Liebelt, 1996, *Formation of white-etching layers on rail treads*, Wear, 191, 133-140.
6. T. Goshima, S. Ishihara, and M. Shimizu, 2002, *The influence of crack-face fluid pressure on the fatigue crack propagation due to rolling contact with frictional heat*, Journal of Thermal Stress, 25: p. 373 – 388.
7. T. Goshima and L.M. Keer, 1990, *Stress intensity factors of a surface crack in semi infinite body due to rolling-sliding contact and frictional heating*, Trans JSME.
8. T. Goshima, S. Ishihara, M. Shimizu, and T. Soda, 2001, *Mutual interference of two subsurface cracks in a semi-infinite body due to rolling contact with frictional heating*, JMSE International Journal, 44(4): p. 542 – 549.
9. T. Goshima, S. Ishihara, M. Shimizu, H. Yoshida, and Y. Tsuchida, *Surface crack growth path and fatigue life prediction due to repeated rolling/sliding contact*, JSME International Journal, 2003, 46 A(4): p. 582 – 589.
10. F.J. Franklin, I. Widiyarta, and A. Kapoor, 2001, *Computer simulation of wear and rolling contact fatigue*, Wear, 251, 949-955.
11. F.J. Franklin, T. Chung and A. Kapoor, 2003, *Ratchetting and fatigue-led wear in rail-wheel contact*, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 26, 949-955.
12. D.I. Fletcher, F.J. Franklin and A. Kapoor, 2003, *Image analysis to reveal crack development using a computer simulation of wear and rolling contact fatigue*, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 26, 957-967.
13. Joller, 1992, *Influence of temperature on the material properties of rail material*, Voest-Alpine Stahl Donawitz.

14. J.W. Ringsberg, A. Skyttebol, and B.L. Josefson, 2005, *Investigation of the rolling contact fatigue resistance of laser cladded twin-disc specimens: FE simulation of laser cladding, grinding and a twin-disc test*, International Journal of Fatigue, 27: p. 702 - 714.
15. W.R. Tyfour, J.H. Beynon, and A. Kapoor, 1995, *The steady state wear behaviour of pearlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions*, Wear, 180: p. 79 - 89.