

# ANALISA FRACTURE PADA DISC BRAKE

Rubijanto Juni Pribadi<sup>\*)</sup>

## Abstrak

Dengan menggunakan bahan baja untuk ditempa, pengembangan piringan untuk sistem pengereman kendaraan bermotor dimulai. Namun kegagalan berupa patah pada piringan yang ditempa tetap terjadi pada uji ketahanan. Dan kemudian untuk meningkatkan sisi ketahanannya, diperlukan peningkatan ketahanan bahan terhadap *fracture* yang diakibatkan oleh akumulasi tegangan tensil residual. Untuk meningkatkan ketahanan ini, pembentukan saata penempaan merupakan titik berat peningkatan ketahanan terhadap *fracture*.

Kata kunci: *disc brake*, *brittle fracture*, *fracture toughness*, FEM, SEM, faktor intensitas tegangan

## PENDAHULUAN

*Disc brake* pada umumnya dibuat dari besi tuang. Alasan penggunaan besi tuang sebagai bahan pembuatan *disc brake* adalah nilai ekonomisnya, kemudahan dalam pembuatan, kekuatan, dan ketahanan terhadap suhu. Sedangkan kandungan kimia yang digunakan pada besi tuang adalah Ni, Cr, dan Mo. Kandungan kimia ini ditentukan sebelumnya melalui serangkaian riset dan studi.

Seiring dengan perkembangan teknologi, *disc brake* dengan kekuatan lebih tinggi dan ketahanan terhadap suhu menjadi suatu tuntutan yang baru. Selain kekuatan dan ketahanan terhadap suhu tersebut, berat dari *disc brake* itu sendiri juga merupakan suatu pertimbangan yang penting. Juga kemampuan masing-masing rem untuk menyerap energi persatuannya harus ditingkatkan. Ini tentu saja berdampak pada berat *disc* yang juga harus berat jika masih menggunakan bahan konvensional.

Untuk lebih meningkatkan ketahanan besi tuang terhadap retakan thermal, berbagai bahan telah diuji termasuk diantaranya adalah seperti morfologi berformasi karbon sferoid dengan komposisi kimia tambahan Ni, Cr, Mo, dan mikrostruktur dasar. Beberapa bahan baja juga ditambahkan. Diantara beberapa bahan besi tuang, besi tuang yang masih digunakan atau besi tuang konvensional menunjukkan ketahanan yang tinggi terhadap uji kejutan thermal. Namun, bahan konvensional tidak tahan terhadap penyerapan energi yang cukup besar dalam waktu yang singkat. Sehingga, bahan baja nampaknya akan memberikan ketahanan yang lebih baik daripada besi tuang. Sehingga sebaiknya digunakan baja sebagai bahan *disc brake* dengan pertimbangan tersebut.

Besi tempa yang hanya terdiri dari baja karbon digunakan untuk ketahanan terhadap gesekan dari kekuatannya. Selama dilakukan uji ketahanan, terjadi *fracture*. Setelah diteliti sebab *fracture*, pemilihan bahan kemudian dilakukan berdasarkan nilai ketahanan terhadap *fracture* dari besi tempa karbon tersebut, nilai tersebut digunakan sebagai nilai referensi bahan lain yang akan digunakan. Dengan bahan baru, peningkatan kekuatan baja bahan piringan dibuat dan diuji baik laboratorium dan uji lapangan. Pada kasus ini sirip pada sisi belakang permukaan yang mengalami sliding dianggap sisi yang penting sehingga dibau dengan jalan ditempa. Desain asli dari piringan yang mengalami *fracture* adalah jenis yang tidak menggunakan sirip. Berikut ini adalah tabel komposisi kimia dan properti mekanis piringan baja serta gambar *disc brake*.

## ANALISA FRACTURE

Spesimen untuk analisa terhadap uji *fracture* terbuat dari besi tempa dengan komposisi

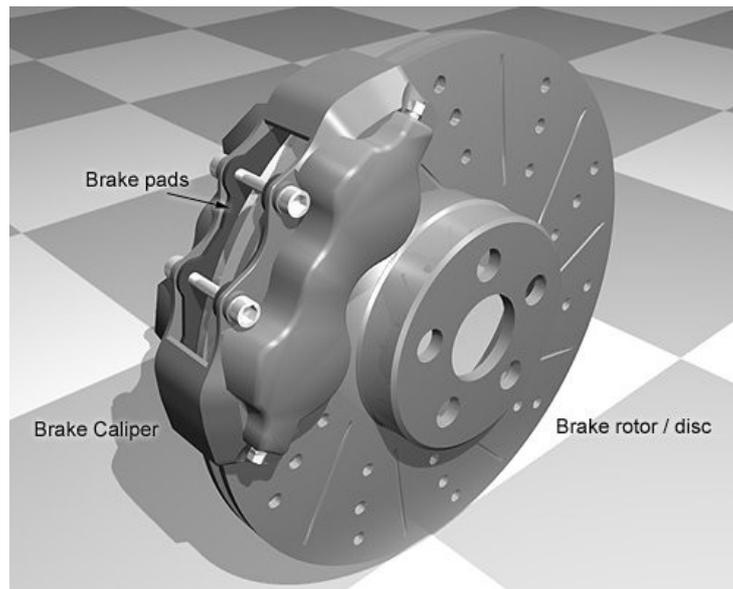
---

\*) Dosen Jurusan S-1 Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Semarang (UNIMUS)

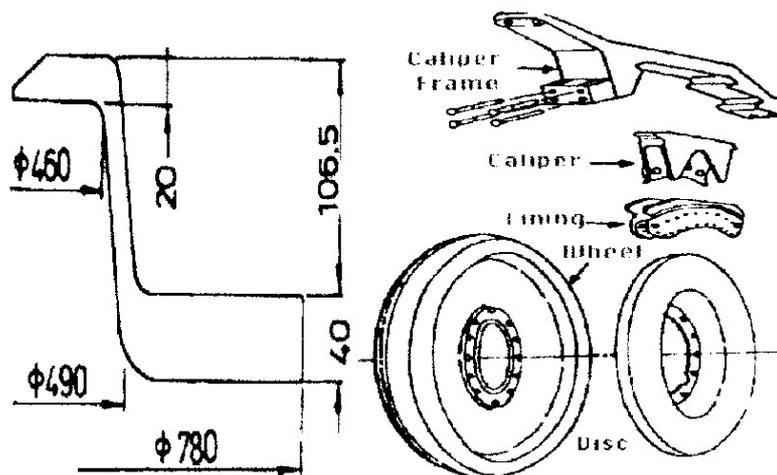
seperti ditunjukkan pada tabel 1, dan perlakuan panas dilakukan dengan *equalizing* dan *tempering* setelah penempaan. Material yang dipilih adalah AISI 1045, dipilih dengan pertimbangan ketahanan terhadap wear atau aus. Gambar 2 memperlihatkan konfigurasi piringan dan unit *disc brake* yang dipasangkan pada salah satu sisi roda.

Tabel 1. Komposisi kimia dan properti mekanis piringan baja

Komposisi Kimia	C	Si	Mn	P	S
	0.48	0.23	0.77	0.007	0.011
Properti Mekanis	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)	Reduction area (%)	Hardness (H <sub>0</sub> )
	360	648	26	40	174

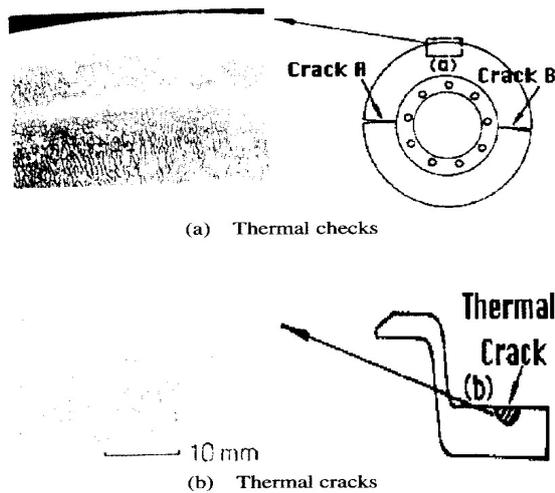


Gambar 1. Detail disc brake secara umum



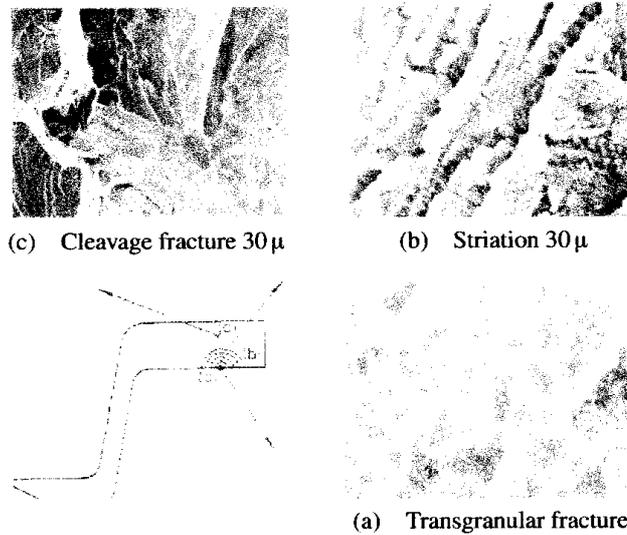
Gambar 2. Brake disc dan brake unit

Selama uji ketahanan piringan mengalami *fracture*. Asal *fracture* berupa dua retakan *thermal* seperti ditunjukkan pada gambar 3 dibawah ini:

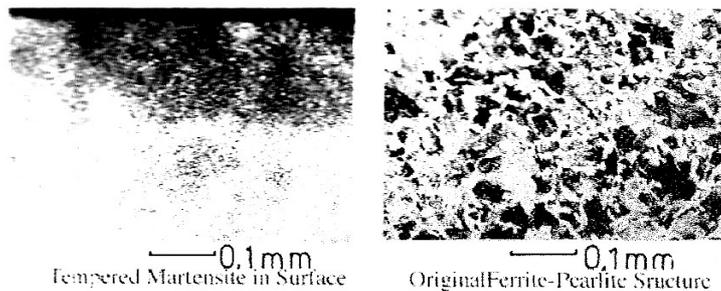


Gambar 3. *Fracture* pada piringan baja

Pada permukaan tempat terjadinya *sliding*, *thermal checks* ditunjukkan pada gambar 3. Perbandingan aspek pada retakan thermal semi eliptik adalah 0.38 dan 0.31. Observasi dengan menggunakan SEM pada retakan menunjukkan tiga tahapan proses *fracture*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4. Tahapan awal adalah transgranular fracture dengan kedalaman 0.5-06 mm dari permukaan. Sebagaimana ditunjukkan pada gambar 5 (a) pada permukaan yang dipanaskan, martensite yang ditemper yang berubah dari mikrostruktur awalnya (gambar 5(b)). Ini berakibat pada permukaan lapisan paling atas mengalami kenaikan temperatur.



Gambar 4. fraktur pada permukaan diobservasi dengan SEM



Gambar 5. Mikrostruktur piringan yang mengalami fraktur

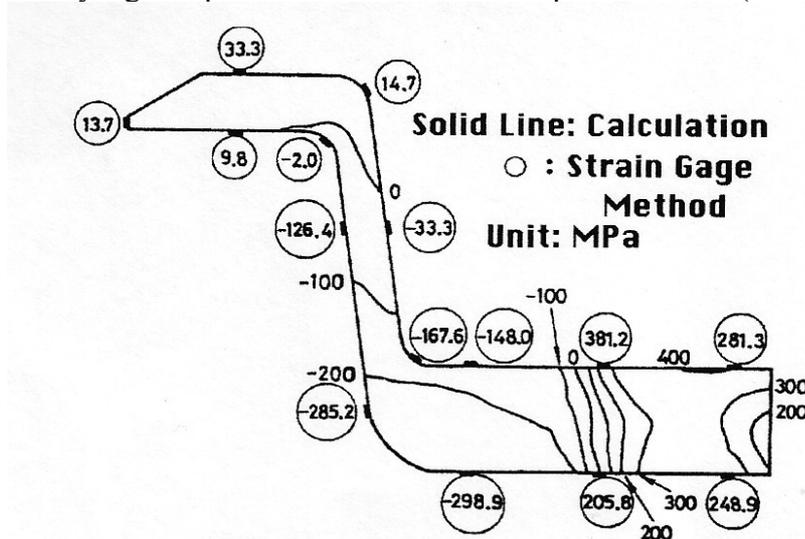
Pada tahapan kedua, pola yang ditunjukkan pada gambar 4 cukup jelas dan disebabkan oleh adanya beban siklus thermal. Tahapan ketiga atau tahapan akhir adalah *brittle fracture* yang berawal dari ujung retakan *thermal semi eliptik*.

### ANALISA TEGANGAN RESIDU

Penyebab dari fracture diperkirakan karena adanya tegangan tensile residu akibat beban thermal. Tegangan residu dianalisa dengan menggunakan komputasi FEM dan metode eksperimental dengan menggunakan strain gages.

Model yang digunakan untuk analisa FEM adalah axi simetris, dengan syarat perhitungan sebagai berikut: kecepatan awal rem adalah 58.3 m/s, beban roda  $8.39 \times 10^4$  N, durasi pengereman 70 s, dan temperatur atmosfer 20°C. Properti bahan yang diberi temperatur dan regangan incremental disertakan dalam kalkulasi, atau kondisi tergantung pada suhu.

Sebagai tambahan dalam kalkulasi FEM, analisis eksperimental diutamakan menggunakan strain gages. Diasumsikan bahwa piringan baja mempunyai kondisi tegangan yang sama ketika terjadi fracture. tegangan residu yang didapat pada arah keliling dibandingkan dengan hasil kalkulasi seperti yang ditunjukkan oleh gambar 6. Distribusinya, baik secara kalkulasi dan eksperimental menunjukkan hasil yang benar-benar sesuai, tapi nilai maksimum yang didapat untuk kedua kasus hampir mendekati (sesuai).



Gambar 6. Distribusi tegangan residu pada arah keliling piringan

### FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN

Tegangan residu yang didapat memungkinkan kalkulasi intensitas tegangan yang diaplikasikan pada retakan. Kalkulasi ini menggunakan gradien tegangan aksial yang diperoleh dengan menggunakan kalkulasi FEM. Tegangan dibagi menjadi dua komponen yaitu tensile dan bending dan digunakan pada persamaan berikut:

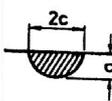
$$K_I = (M_e \sigma_e + M_b \sigma_b) \sqrt{\pi a / Q}$$

Dimana  $\sigma_e$  dan  $\sigma_b$  adalah komponen tegangan tensile dan bending.  $M_e$  dan  $M_b$  adalah faktor magnifikasi untuk tiap komponen tegangan.  $Q$  adalah faktor bentuk dan  $a$  adalah kedalaman retakan.

Hasil kalkulasi faktor intensitas tegangan ditunjukkan pada tabel 2 untuk bahan dengan ketebalan 25 mm (1 in) dan spesimen CT (compact tension). Dua buah spesimen diuji pada suhu 0°C dan 30°C dan nilai rata-rata 75.4 Mpa.  $m^{0.5}$  dan 67 Mpa.  $m^{0.5}$ , hasil ini menekati faktor intensitas tegangan untuk retakan seperti yang ditunjukkan oleh tabel 2.

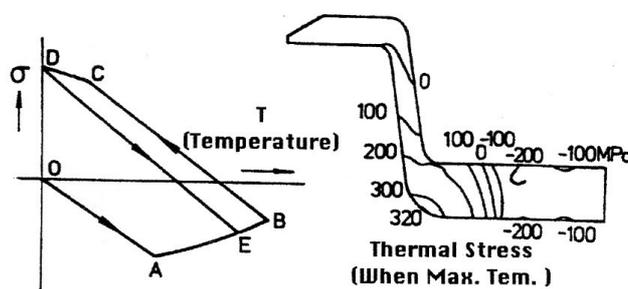
Tabel 2 Faktor Intensitas Tegangan

	$2c$ (mm)	$a$ (mm)	$K_I$ (MPa m <sup>1/2</sup> )
Crack A	40.0	15.2	70.4
Crack B	25.2	7.8	55.8



### PROPAGASI RETAKAN THERMAL

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4, yaitu pola permukaan retak. Ini diakibatkan oleh siklus pembebanan *thermal*. Tegangan *thermal* berulang dan bersirkulasi dari tegangan kompresif pada temperatur tinggi ke regangan residu pada suhu ruang seperti ditunjukkan pada gambar 7. Hubungan antara kedalaman retakan dan faktor intensitas tegangan ditunjukkan pada gambar 8. Pada gambar tersebut juga ditunjukkan distribusi  $\Delta K$  dan  $K_{I\max}$  yang serupa dengan tahapan awal propagasi retakan. Semakin dalam retakan, perbedaan antara kedua faktor tersebut akan semakin besar.



Gambar 7. Hubungan antara kedalaman retakan dan faktor intensitas tegangan

### ANALISA FRACTURE

Hasil analisa fraktur kegagalan disc brake, proses, dan karakteristiknya diringkas pada tabel 3.

Tabel 3. Proses fraktur dan karakteristik bahan yang dibutuhkan

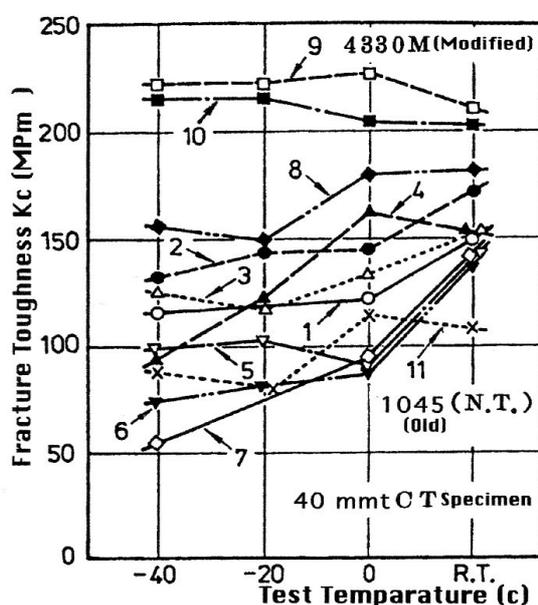
	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4
Observation	Thermal Check	Semi-Elliptical Crack	Residual Stress	Brittle Fracture
Cause	Thermal Cycle	Thermal Stress	Thermal Stress	Residual Stress
Characteristic	Intergranular Fracture	Striation Pattern	Large Tensile Stress	Cleavage Fracture
Measure	Material Improvement	Material Improvement	Design Change	Fracture Toughness

### FRACTURE TOUGHNESS BAHAN PIRINGAN

*Fracture toughness* atau ketangguhan material atau bahan terhadap *fracture* adalah hal yang sangat penting. Jadi untuk meningkatkan nilai ketangguhan terhadap *fracture* dari baja bahan piringan, perlu adanya eksaminasi beberapa macam baja. Ketangguhan yang dimaksud adalah ketangguhan terhadap fraktur pada proses pengereman. Untuk ketangguhan terhadap fraktur yang tinggi, penambahan vanadium, larutan aluminium, molybdenum, dan nikel dipertimbangkan, dan nikel digunakan untuk menambah ketahanan terhadap wear atau aus. Eksaminasi terhadap perbandingan pengerjaan panas juga diperlukan. Pemilihan juga harus mempertimbangkan ketahanan terhadap retakan thermal. Untuk melakukan uji ketahanan thermal digunakan screening menggunakan thermal shock tester. Hasil screening dengan thermal shock tester dapat dilihat pada tabel 4. Hasil dari ketangguhan terhadap *fracture* dapat dilihat pada gambar 8. Dari hasil tersebut diatas, bahan AISI 4330 dapat digunakan untuk meningkatkan ketangguhan pada piringan.

Tabel 4. Bahan yang diuji dengan uji ketangguhan faktor

No.	Chemical Compositions ( % )									Heat Treatment
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	B	V	Sol Al	
1	0.44	0.26	0.79	0.02	-	-	-	-	-	QT
2	0.46	0.24	0.66	0.05	-	-	-	0.25	-	"
3	0.43	0.33	0.70	0.02	-	-	-	-	0.049	"
4	0.33	0.29	0.73	0.02	-	-	-	0.20	-	"
5	0.34	0.31	0.62	0.03	0.96	0.46	-	0.21	-	"
6	0.29	0.70	0.70	0.03	1.14	0.46	-	0.21	-	"
7	0.33	2.59	0.69	0.02	1.07	0.45	-	0.22	0.024	"
8	0.34	0.32	0.60	1.71	0.99	0.49	-	0.22	-	"
9	0.32	0.39	0.67	1.73	1.00	0.45	-	-	0.077	"
10	0.26	0.54	1.57	0.03	0.29	0.32	0.0021	-	0.093	"
11	0.44	0.21	0.76	0.03	-	-	-	-	-	NT



Gambar 8. Hasil Uji *Fracture Toughness*

### INISIASI DAN PROPAGASI RETAK THERMAL

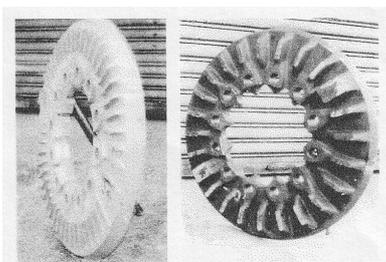
Uji pengereman dilakukan pada siklus dengan kondisi kecepatan pengereman 130 km/h dan 260 km/h. jumlah siklus adalah 1000 untuk 130 km/h dan 50 siklus untuk 260 km/h. Gambar 10 menunjukkan asal retakan thermal pada tahapan awal, dan piringan yang ditempa hanya menunjukkan goresan dengan kedalaman (1-2) mm pada lapisan permukaan. Retakan thermal pada piringan besi tuang berpenetrasi sampai permukaan belakang sampai akhir pengujian.

### KETAHANAN TERHADAP *FRACTURE*

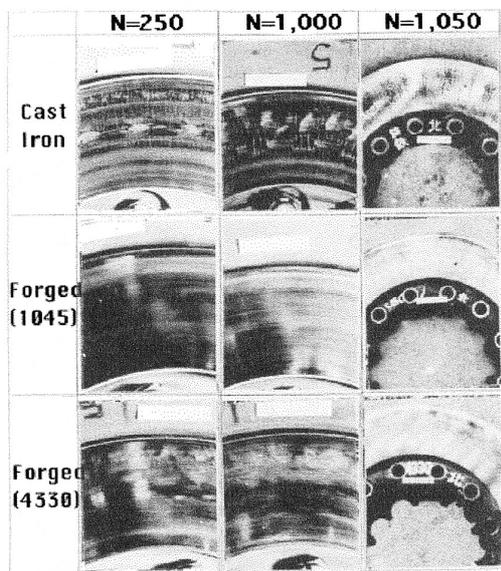
Piringan tempa menghasilkan tegangan residu setelah pengereman dan akan mengalami pendinginan yang memungkinkan adanya pembentukan awal tegangan residu yang berkaitan dengan analisa fraktur. Pada piringan besi tuang tegangan residu tidak begitu tinggi sehingga pengurangan atau pelepasan tegangan tidak berakibat terlalu signifikan pada terjadinya propagasi retakan thermal. Jika tegangan tensile residual masih ada, sebagaimana pada piringan besi tempa, terjadinya kemungkinan fraktur tergantung pada ketangguhan terhadap fraktur, ukuran retakan, dan jumlah tegangan sisa (residu). Hubungan antara kedalaman retakan dengan faktor intensitas tegangan dapat dilihat pada gambar 12.

Tabel 5. Hasil uji disc brake dan lining

	Brake Disc			Brake Lining
	Material	Mass	Disc Thickness Fin Number	
1	Forged (4330M)	61 kg	20 mm 22	Al-4490
2	Forged (1045)			
3	Cast Iron Disc	76 kg	34 mm 42	

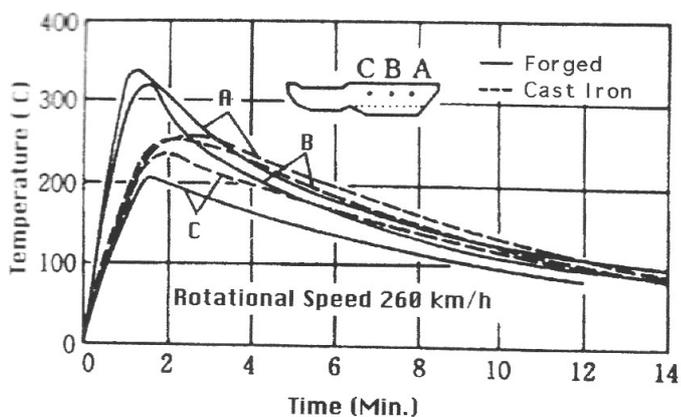


Gambar 9. Disc Brake pada umumnya

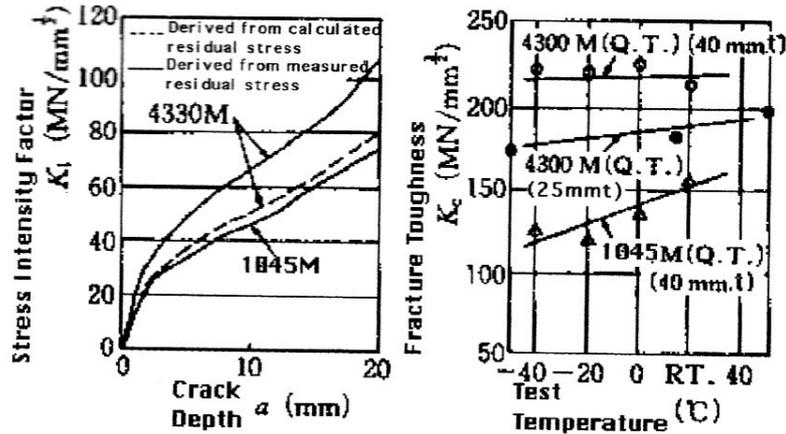


N=1-1,000...V=130km/h  
N=1,000-1,050...V=260km/h

Gambar 10. Inisiasi dan propagasi retakan



Gambar 11. Pola kenaikan dan pendinginan suhu



(a) Stress intensity factor (b) Fracture toughness

Gambar 12. Faktor intensitas tegangan dan ketangguhan terhadap fraktur

### INSIASI DAN PROPAGASI RETAKAN PADA *DISC BRAKE*

Menurut Spera dan Cox <sup>(9)</sup>, thermal fatigue didefinisikan sebagai fatigue dalam kondisi dimana temperatur yang selalu berubah. Terdapat berbagai metode uji untuk mengidentifikasi adanya inisiasi dan propagasi retakan. Kondisi yang menginisiasikan terjadinya perilaku retakan dan propagasinya sangat penting untuk dievaluasi, terutama dari sisi bahan yang akan dievaluasi. Properti yang berpengaruh pada terjadinya retakan diantaranya adalah tegangan regangan, kenaikan temperatur, dan fraktur atau morfologinya. Namun seperti ditunjukkan pada gambar 10, hasilnya menunjukkan bahwa karakteristik bahan tidak banyak berpengaruh pada inisiasi retakan. Ini diantaranya juga karena tidak memungkinkan untuk mengukur regangan tegangan thermal sehingga pengukuran semacam itu masih harus diperiksa lebih lanjut.

### PENCEGAHAN *FRACTURE*

Dari analisis yang telah dilakukan, ketangguhan terhadap fraktur suatu bahan sangat menentukan dalam pencegahan terjadinya fraktur. Ini karena inisiasi retak thermal dan propagasinya tidak dapat dihindari jika terjadi suatu siklus thermal akibat adanya aksi pengereman. Pertimbangan faktor keamanan perlu diambil dalam prioritas pemilihan bahan sesuai dengan penggunaannya disesuaikan dengan ketangguhan terhadap fraktur yang paling tinggi.

### KESIMPULAN

Pemilihan *disc brake* untuk aplikasi tertentu sebaiknya berdasarkan pada eksperimental dan studi analitis terhadap kemungkinan terjadinya fraktur dan inisiasi dan propagasi retak terhadap *disc brake*. Untuk kecepatan tinggi dan ketangguhan terhadap fraktur yang baik adalah AISI 4330, ini dikarenakan terjadinya fraktur tidak mungkin dihindari.

### DAFTAR PUSTAKA

- Bradbury, F.J. and Schmidt, E., *Disc Brakes for Motor Vehicles*, Glasers Annalen, Vol.83, No.4 (1959), pp. 108-114.
- Sauthoff, R and Schmidt, E., *Die Scheibenbremse, fur Schienenfahrzeuge and ihre Bremsbelage*, Glaswers Annalen, Vol.83, No.4 (1959), pp. 108-114.
- Munkow, H, *Die Schsbremssscheibe and Ihre Problems*, OET Eisenbahn Technik, Vol.24, No.S (1976), pp.217220.

- Tompkin, J.B., *Development of the Disc Brakes with Particular Reference to British Railway Application*, K. of the Institute of Loco. Engi., (1969), pp.84-129.
- Bates, R.C., et al., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 513 (1972), p.3.
- Shah, R.C. and Kobayashi, A.S., *Stress Intensity Factor for an Elliptical Crack Approaching the Surface of a Plate in Bending*, ASTM Spec. Tech. Publ., 513 (1972), PP•3-21.
- Irwin, G.R., *Analysis of Stress and Strain Near the End of a Crack Traversing a Plate*, Trans. ASME, J. Appl. Mech., Vol.4 (1957), pp.361-364.
- Sakamoto, H., *Heat Convection and Design of Brake Discs*, Journal of Rail and Transit, I Mech E, PART F (2004), pp.203-212.
- Spera, D.A. and Cox, E.C., *Description of a Computerized Method for Predicting Thermal Fatigue Life of Metals. Thermal Fatigue of Materials and Components*, ASTM, Spec. Tech. Publ., 612 (1976), pp.69-85.
- Coffin, I.F., Jr., *A Study of the Effects of Cycle Thermal Stresses in a Ductile Metal*, Trans. ASME, Vol .76. No.6 (1954), pp.931-939.
- Manson, S.S. and Smith, R. W., *Quantitative Evaluation of Thermal-Shock Resistance*, Trans. ASME, April(1956), pp.533-544.
- Northcott, L. and Baron, H.G., *The Craze-Cracking of Metals*, JISI, Dec. (1956), pp.385-409.
- Blauel, J.G., Kalhoff, J.F. and Stahn, B., *Model Experiments for Thermal Shock Fracture Behavior*, Trans. ASME, Ser. E, Oct. (1974), pp.299-308.
- Taira S., *Relation between Thermal Fatigue and Low Cycle Fatigue at Elevated Temperature. Fatigue at Elevated Temperature*, ASTM Spec. Tech. Publ., 520 (1973), PP.80-101