

## 5. ANALISA DATA

### 5.1. ANALISA PENGUJIAN KEKUATAN TARIK.

Dari pengujian tarik BTN yang telah mengalami austempering dengan berbagai macam variasi diperoleh kekuatan tarik yang lebih tinggi daripada kondisi as-cast. Pada kondisi as-cast kekuatan tariknya  $554.56 \text{ N/mm}^2$  dan setelah mengalami austempering meningkat menjadi  $698.07 - 851.01 \text{ N/mm}^2$  namun setelah as-cast tersebut di annealing justru terjadi penurunan kekuatan tarik menjadi  $412.06 \text{ N/mm}^2$ .

Dari hasil pengujian kekuatan tarik jika dihubungkan dengan nilai kekerasannya diperoleh suatu hubungan yaitu kekuatan tarik dan nilai kekerasan mempunyai hubungan lurus. Jika kekerasannya naik maka kekuatan tariknya akan meningkat, demikian sebaliknya.

#### 5.1.1. Analisa kekuatan tarik dengan variasi austempering :

Dari data pengujian kekuatan tarik diperoleh grafik kekuatan tarik yang ditampilkan pada data - data

Dari grafik terlihat kekuatan tarik terbesar diperoleh dari temperatur austenitisasi  $900^{\circ}\text{C}$  dengan variasi temperatur temper  $240^{\circ}\text{C}$  Setelah proses austempering diperoleh kekuatan tarik yang meningkat dari kondisi as-cast, hal ini diduga karena :

- ☑ Temperatur austenitisasi pada diagram fase besi-graphite mempunyai suhu dengan range antara  $730^{\circ}\text{C}$  sampai  $1135^{\circ}\text{C}$  , dengan semakin tinggi temperatur austenitisasi dan semakin lama holding time ,maka akan semakin banyak prosentase kadar karbon dalam austenit . Hal ini pada proses austempering akhirnya akan menyebabkan adanya austenit sisa pada saat waktu temper yang kurang. Walaupun keberadaan austenit sisa tidak dapat terlihat pada hasil foto mikro, tetapi dari literatur dapat diketahui bahwa dengan adanya

austenit sisa dapat mengurangi kekuatan tarik. Jumlah austenit sisa pada akhir proses austempering tergantung pada kadar karbon di dalam austenit. Jika kadar karbon itu terlalu tinggi maka austenit sisanya akan semakin banyak. Pada temperatur austenitisasi  $900^{\circ}\text{C}$  dengan temperatur temper menjadi variasi, maka temperatur temper yang lebih rendah (bainit bawah) austenit sisanya lebih sedikit daripada temperatur temper yang lebih tinggi (bainit atas) sehingga kekuatannya akan lebih tinggi. Dengan waktu tahan yang lebih lama maka jumlah austenit sisa yang bertransformasi menjadi bainit akan bertambah, sehingga pada hasil akhir kekuatannya semakin tinggi karena jumlah austenit sisa lebih sedikit.

- ☑ Setelah austempering jumlah fasa relatifnya akan tampak berubah dibandingkan kondisi as-cast. Pada kondisi as-cast jumlah ferit lebih banyak daripada kondisi austempering, selain itu jumlah bainit pada kondisi austempering akan semakin banyak. Jumlah ferit yang lebih sedikit dan bainit yang lebih banyak menyebabkan kekuatan tarik pada kondisi austempering lebih tinggi daripada as-cast. Jika kita membandingkan temperatur temper  $540^{\circ}\text{C}$  dengan temperatur  $240^{\circ}\text{C}$  (Gambar 4.3 – 4.6 nomor genap, as-etched) tampak pada variasi temperatur temper  $240^{\circ}\text{C}$  jumlah bainitnya lebih banyak dan jumlah ferit lebih sedikit dibandingkan temperatur  $540^{\circ}\text{C}$  sehingga diperoleh kekuatan tarik yang lebih tinggi.
- ☑ Dengan semakin besarnya perbedaan antara temperatur austenitisasi dengan temperatur temper maka driving force-nya akan semakin besar pula sehingga gerakan atom semakin cepat. Gerakan atom yang semakin cepat membuat jarak atom-atom semakin rapat sehingga untuk memisahkannya dibutuhkan gaya yang lebih besar dan dapat dikatakan membutuhkan kekuatan tarik yang lebih tinggi.

## 5.2. ANALISA PENGUJIAN KEKERASAN.

Dari pengujian kekerasan yang telah dilakukan, diketahui austempering dapat meningkatkan nilai kekerasannya. Hal ini terlihat dari nilai kekerasan as-cast (144 BHN) meningkat setelah mengalami austempering (204-245 BHN). Hal ini berlaku untuk semua jenis variasi suhu temper, namun setelah mengalami proses annealing sifat kekerasan semakin berkurang (138 BHN) dibanding as cast.

### 5.2.1. Analisa Nilai Kekerasan Pada Variasi Austempering.

Hasil pengujian kekerasan ditunjukkan oleh grafik 4.3 pada Bab 4 data percobaan. Temperatur austenitisasi  $900^{\circ}\text{C}$  untuk perlakuan austempering BTN adalah dengan temperatur temper  $240^{\circ}\text{C}$  mempunyai kekerasan yang lebih tinggi daripada  $540^{\circ}\text{C}$ . Nilai kekerasan yang bervariasi ini disebabkan hal-hal antara lain :

- ☑ Teori mengatakan bahwa pada setiap perlakuan panas kemungkinan besar dihasilkan austenit yang tidak bertransformasi dikenal sebagai austenit sisa. Meskipun austenit sisa tidak dapat dilihat pada hasil foto mikro pada percobaan kali ini namun diyakini Adanya austenit sisa ini dapat mengurangi nilai kekerasan. Jumlah austenit yang tersisa pada proses austempering ini juga tergantung pada kadar karbon dari austenit pada waktu tahap austenitisasi. Temperatur austenitisasi yang lebih tinggi mempunyai kadar karbon yang lebih tinggi sehingga pada waktu pendinginan cepat dihasilkan bainit yang lebih banyak, tetapi jika kadar karbon itu terlalu tinggi maka pada waktu pendinginan cepat selesai akan dihasilkan austenit sisa yang lebih banyak sehingga kekerasannya pun menurun.
- ☑ Dari jumlah fasa relatifnya (Gambar 4.4 dan 4.6) dapat diketahui bahwa temperatur temper  $240^{\circ}\text{C}$  mempunyai jumlah bainit yang lebih banyak dibandingkan temperatur

**Tugas Akhir**

76 KTL

540<sup>0</sup>C. Temperatur temper yang lebih tinggi (bainit atas) akan menghasilkan kecepatan pendinginan yang lebih lambat, dan hal ini akan menghasilkan ferit yang lebih banyak. Sedangkan kecepatan pendinginan yang lebih cepat diperoleh pada temperatur temper yang lebih tinggi dan ini dapat membentuk bainit yang lebih banyak<sup>(6)</sup>. Jadi dapat disimpulkan bahwa dengan makin banyaknya jumlah bainit dan semakin sedikitnya ferit maka kekerasannya akan semakin tinggi.

- ☑ Perbedaan temperatur austenitisasi dengan temperatur temper, maka akan menimbulkan pergeseran atom - atom yang disebabkan oleh adanya driving force. Dengan semakin besarnya perbedaan antara temperatur austenitisasi dan temperatur temper maka driving force akan semakin besar sehingga pergeseran atom akan semakin cepat sehingga pada hasil akhir diperoleh struktur yang lebih rapat. Sehingga antara temperatur temper 240<sup>0</sup>C dan temperatur temper 540<sup>0</sup>C. Maka pada temperatur temper 240<sup>0</sup>C yang merupakan temperatur yang rendah hampir mendekati temperatur terbentuknya martensit, akan didapatkan struktur bainit yang lebih rapat. Dan akan menjadikan spesimen tersebut menjadi lebih keras.

**5.2.2. Analisa Nilai Kekerasan Pada Proses Annealing**

Hasil dari proses annealing ini akan menurunkan sifat dari kekerasan materialnya dibandingkan dengan as cast yaitu sebesar 4,60%, hal ini sesuai dengan tujuan yaitu menjadikan material yang lunak dengan struktur yang sebagian besar ferit dan grafit, sedangkan telah kita ketahui bahwa sifat dari ferit adalah lunak. Hal inilah yang menyebabkan sifat dari kekerasannya menurun. Struktur ini diperoleh karena pendinginan yang digunakan adalah full annealing (dalam tungku) sehingga pendinginannya lambat yang memungkinkan karbon dalam austenit yang ada seluruhnya bertransformasi menjadi ferit.

### 5.3. ANALISA PENGAMATAN FOTO STRUKTUR MIKRO

Semua foto mikro diletakkan pada data bab 4 hasil percobaan

#### 5.3.1. Spesimen As-Cast.

Pada Gambar 4.1. (as-polished) memperlihatkan BTN yang menjadi spesimen uji mempunyai grafit bulat. Pada foto mikro tersebut dapat dilihat ukuran grafit nodule yang bervariasi, ada beberapa grafit yang besar dan ada beberapa yang kecil .

Pada Gambar 4.2. memperlihatkan foto mikro dengan etsa, hal yang dapat dilihat adalah BTN as-cast mempunyai struktur bull's eye. Terdapat ferit di sekeliling grafit dan selebihnya adalah perlit. Untuk FCD-40 yang menjadi spesimen uji seharusnya bermatrik feritik tetapi dari hasil pengecoran ternyata matrik yang didapat adalah ferit perlit. Hal ini diduga karena pada saat pembekuan kecepatan pendinginannya tidak cukup rendah. Walaupun ini merupakan suatu kelemahan, tetapi diharapkan tidak terlalu menyimpang dari tujuan sebenarnya dari penelitian ini.

Grafit pada BTN as-cast berbentuk nodule berwarna hitam. Grafit nodule ini terbentuk sesaat sebelum pembekuan karena adanya penambahan unsur pembulat (Mg), dan untuk lebih meningkatkan jumlah grafit ditambahkan inoculan (FeSi). Pada waktu pembekuan jika laju pendinginannya tidak cukup tinggi maka karbon yang ada di sekitar inti grafit akan keluar dari austenit berkumpul dengan grafit, sedangkan austenit yang kehilangan karbon tadi selanjutnya akan membentuk ferit. Untuk austenit yang jauh dari grafit, dengan temperatur yang makin rendah maka kemampuan melarutkan karbon dari austenit akan semakin rendah karena itu harus ada beberapa karbon yang keluar. Karbon tadi keluar dan tumbuh sebagai sementit di batas butir austenit. Struktur akhir yang diperoleh adalah bull's eye.

### 5.3.2. Spesimen Annealing dan Austempering dengan variasi tempering

Hasil austempering & annealing dibandingkan dengan kondisi as-cast, perbedaan yang teramati adalah :

- ☑ Spesimen yang telah mengalami austempering tampak ukuran grafitnya lebih kecil dan beda ukurannya berkurang. Hal ini terlihat pada Gambar 4.3. sampai 4.6 nomor ganjil (as-polished), sedangkan grafit BTN kondisi as-cast (Gambar B.1) berukuran lebih besar daripada kondisi BTN austempering dan perbedaan ukuran grafit juga berkurang. Hal ini dapat dijelaskan dengan pelarutan karbon dari grafit ke dalam austenit. Pada waktu proses pemanasan (austenitisasi) dengan semakin tingginya temperatur, kemampuan karbon untuk melarutkan karbon akan bertambah. Karbon dalam grafit kemudian mengalami difusi menuju austenit sehingga besar grafit akan berkurang. Dengan semakin besar beda temperatur antara temperatur austenitisasi ( $900^{\circ}\text{C}$ ) dengan temperatur tempering ( $524^{\circ}\text{C}$  dan  $240^{\circ}\text{C}$ ) akan semakin memperkecil besar butir grafit walaupun perbedaan itu hanya sedikit. Sedangkan pada proses annealing ukuran grafitnya lebih besar daripada setelah diberi laku panas austempering, namun grafit yang terbentuk tidak nodule dan memiliki batas butir kristal yang besar pula serta terdapat banyak takik dan tidak terdapat bull eyes sehingga perambatan retak akan mudah terjadi sehingga ketahanan terhadap kelelahan akan banyak berkurang. Hal ini disebabkan karena hampir semua yang mengelilingi grafit adalah matriks ferit yang tidak kuat akan pemberian beban serta bentuk takik menyebabkan pemustan - pemusatan tegangan, banyaknya matriks ferit karena pada saat austenitisasi akan terjadi difusi atom karbon (C) dari perlit ke sekitar grafit dan hampir seluruh austenit juga bertransformasi menjadi ferit. <sup>(7)</sup>

- ☑ Dengan memberikan proses austempering maka jumlah fasa relatifnya akan berubah dibandingkan kondisi as-cast. Jumlah fasa relatif untuk kondisi as-cast dapat dilihat pada Gambar 4.2, sedangkan kondisi austempering Gambar 4.4 dan 4.6 (as-etched). Pada kondisi as-cast jumlah feritnya lebih banyak daripada jumlah ferit pada kondisi austempering. Pada waktu austenitisasi, ferit pada as-cast akan mengalami geseran menjadi austenit dan saat pendinginan cepat tidak semua ferit ini kembali menjadi ferit seperti semula tetapi ada yang bertransformasi menjadi bainit, sehingga pada hasil akhir dengan kondisi austempering diperoleh jumlah ferit yang semakin sedikit. Temperatur temper mempunyai pengaruh terhadap jumlah ferit-bainit yang terbentuk. Temperatur temper untuk proses austempering BTN adalah  $230^{\circ}\text{C}$ - $540^{\circ}\text{C}$ . Dalam teori disebutkan bahwa dengan semakin berkurangnya temperatur temper maka jumlah ferit akan berkurang. Temperatur temper yang lebih tinggi (bainit atas) akan menghasilkan kecepatan pendinginan yang lebih lambat, dan hal ini akan menghasilkan ferit yang lebih banyak. Sedangkan kecepatan pendinginan yang lebih cepat diperoleh pada temperatur temper yang lebih tinggi dan ini dapat membentuk bainit yang lebih banyak<sup>(6)</sup>. Dari hasil foto mikro, untuk temperatur temper  $540^{\circ}\text{C}$  (Gambar 4.3 dan 4.4) jika dibandingkan temperatur temper  $240^{\circ}\text{C}$  (Gambar 4.5 dan 4.6) maka dapat dilihat perbedaannya. Temperatur temper  $240^{\circ}\text{C}$  mempunyai jumlah bainit yang lebih banyak dan jumlah ferit yang lebih sedikit dibandingkan temperatur temper  $540^{\circ}\text{C}$ . Selain temperatur temper, waktu tahan temper juga mempunyai pengaruh terhadap jumlah fasa relatif. Pada penelitian ini waktu tahan temper yang digunakan 3 jam. Dengan waktu tahan yang lebih panjang pada daerah transformasi bainit maka transformasi austenit menjadi bainit menjadi lebih banyak.

#### 5.4. ANALISA PENGUJIAN KEKUATAN LELAH

Dengan adanya perlakuan panas ini diharapkan dapat meningkatkan sifat ketahanan terhadap kelelahan. Namun, pada pengujian kelelahan dengan menggunakan mesin rotary bending ternyata proses perlakuan panas austemper dan annealing justru memperburuk sifat ketahanan terhadap kelelahan jika dibandingkan relatif terhadap as-cast, hal ini diakibatkan karena struktur mikro hasil proses perlakuan panas austemper justru semakin memperkecil nodule grafit dan bentuknya sudah tidak bulat lagi sehingga struktur mudah mengalami retak dan patah.

Sedangkan pada proses annealing ukuran grafitnya lebih besar dibandingkan setelah diberi laku panas austempering atau as cast, namun grafit yang terbentuk dari proses annealing sudah tidak nodule dan memiliki batas butir kristal yang besar pula serta terdapat banyak takik dan tidak terdapat bull's eye sehingga perambatan retak akan mudah terjadi dan menyebabkan ketahanan terhadap kelelahan akan banyak berkurang. Hal ini disebabkan karena hampir semua yang mengelilingi grafit adalah matriks ferit, sedangkan dari teori yang ada sifat ferit adalah lunak namun tidak kuat menerima pemberian beban yang besar. Banyaknya matriks ferit antara lain disebabkan karena pada saat austenitisasi akan terjadi difusi atom karbon (C) dari perlit ke sekitar grafit dan hampir seluruh austenit juga bertransformasi menjadi ferit<sup>(7)</sup>. Begitu juga dengan bentuk grafit yang diperoleh dari proses annealing tersebut banyak mempunyai banyak takik, sehingga tidak berbentuk nodule lagi. Hal ini menyebabkan terjadinya pemusatan tegangan dan akan mengakibatkan timbulnya beberapa awal perambatan retak, sehingga akan spesimen akan cepat mengalami patah.

### 5.4.1. Analisa Kekuatan Lelah Secara Teoritis

Setelah hasil dari kekuatan tarik material diketahui, maka kita dapat memprediksi perkiraan umur lelah material dengan membuat kurva S-N teoritis, sehingga kita dengan cepat mempunyai gambaran tentang kekuatan material tersebut terhadap kelelahannya. Langkah pertama adalah menentukan tegangan minimum sesuai dengan standart R.R. Mohr adalah 0,5 dari tegangan luluhnya untuk material ulet dan dari tegangan tariknya untuk material getas (besi tuang), yang dapat dianggap masih mempunyai batas aman dari kelelahan material spesimen besi tuang yaitu dapat melebihi umur lelah pada  $10^6$  siklus, sedangkan untuk tegangan yang dianggap telah mempunyai pengaruh terhadap kelelahan sesuai dengan standart R.R. Mohr (0,9 dari tegangan tarik) yaitu masih mempunyai umur lelah pada  $10^3$  siklus. Hal tersebut diatas diprediksi dengan menggunakan persamaan :

$$S_n = S_n' \times C_L \times C_D \times C_S$$

Dimana :

$$S_n = \text{Kekuatan lelah teoritis pada } N = 10^6 \text{ atau } 10^3$$

$$S_n' = \text{Kekuatan lelah standar R.R. Mohr, untuk besi tuang} = 0,5 S_u \text{ atau } 0,9 S_u$$

$$C_L = \text{Faktor jenis beban untuk bending } C_L = 1$$

$$C_D = \text{Faktor Dimensi spesimen, untuk } D \leq 0,4 \text{ inchi, maka } C_D = 1$$

$$C_S = \text{Faktor kondisi permukaan, dipoles biasa } C_S = 0,9$$

Dengan demikian untuk kondisi material As Cast ( $\sigma_u = 80.403 \text{ Psi}$ ), didapatkan perhitungan

$$S_{n1} = (0,5 \times 80.403) \text{ Psi} \times 1 \times 1 \times 0,9 = 65,127 \text{ Psi} \text{----> Pada } n = 10^6$$

$$S_{n1} = (0,9 \times 80.403) \text{ Psi} \times 1 \times 1 \times 0,9 = 36,182 \text{ Psi} \text{----> Pada } n = 10^3$$

Untuk kondisi material setelah austemper  $524^\circ\text{C}$  ( $\sigma_u = 96.091 \text{ Psi}$ ), didapatkan perhitungan

$$S_{n2} = (0,5 \times 96.091) \text{ Psi} \times 1 \times 1 \times 0,9 = 77,834 \text{ Psi} \text{----> Pada } n = 10^6$$

$$S_{n2} = (0,9 \times 96.091) \text{ Psi} \times 1 \times 1 \times 0,9 = 43,241 \text{ Psi} \text{----> Pada } n = 10^3$$

Untuk kondisi material setelah austemper 240°C ( $\sigma_u = 86.690$  Psi), didapatkan perhitungan

$$S_{n_3} = (0,5 \times 86.690) \text{ Psi} \times 1 \times 1 \times 0,9 = 70.219 \text{ Psi} \text{ ----> Pada } n = 10^6$$

$$S_{n_3} = (0,9 \times 86.690) \text{ Psi} \times 1 \times 1 \times 0,9 = 39.011 \text{ Psi} \text{ ----> Pada } n = 10^3$$

Untuk kondisi material setelah full annealing ( $\sigma_u = 59.743$  Psi), didapatkan perhitungan

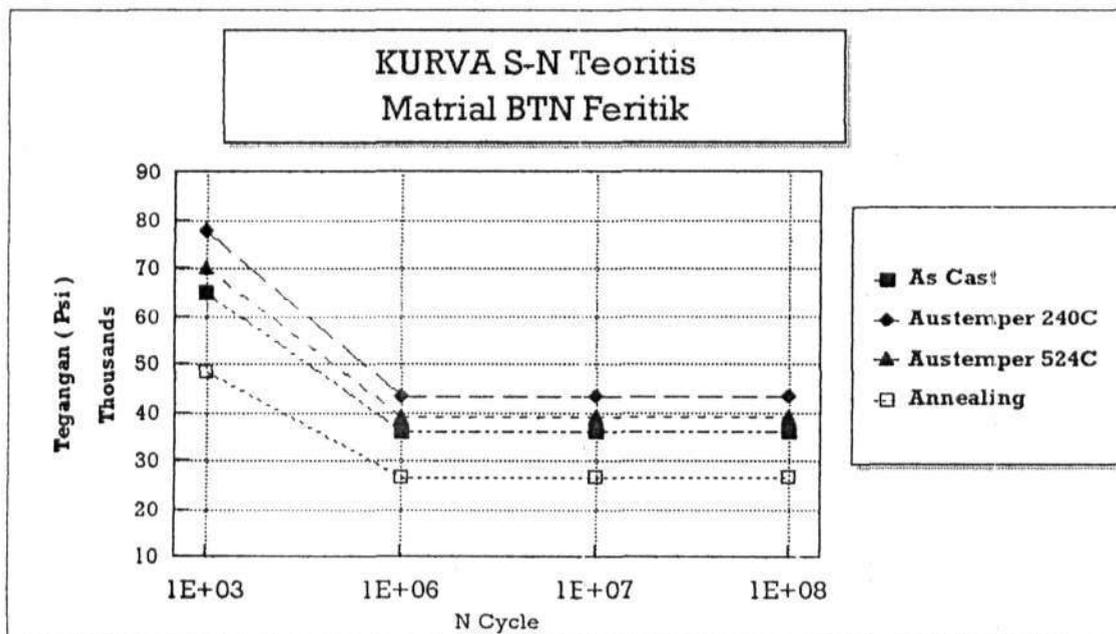
$$S_{n_4} = (0,5 \times 59.743) \text{ Psi} \times 1 \times 1 \times 0,9 = 48.391 \text{ Psi} \text{ ----> Pada } n = 10^6$$

$$S_{n_4} = (0,9 \times 59.743) \text{ Psi} \times 1 \times 1 \times 0,9 = 26.884 \text{ Psi} \text{ ----> Pada } n = 10^3$$

**Tabel 5.1**

**Hasil perhitungan teoritis umur lelah material besi tuang nodular**

Ket \ Cycle	Teg. tarik (Psi)	( $10^3$ ) (Psi)	( $10^6$ ) (Psi)	( $10^7$ ) (Psi)	( $10^8$ ) (Psi)
As Cast	80.403	65.126	36.181	36.181	36.181
Austemper 524C	96.091	77.834	43.241	43.241	43.241
Austemper 240C	86.690	70.219	39.010	39.010	39.010
Annealing	59.743	48.391	26.884	26.884	26.884



**Gambar 5.1**

**Grafik Kurva S-N teoritis material Besi Tuang Nodular**

Dari hasil perhitungan teoritis yang diplot pada grafik (Gambar 5.1) terlihat bahwa dengan perlakuan panas maka akan mempunyai umur lelah yang dicapai akan lebih tinggi, namun dari kenyataan hasil uji kelalahan dengan mesin rotary bending ternyata semua percobaan perlakuan panas yang diberikan tetap tidak dapat melampaui hasil yang telah dicapai oleh as cast. Data inipun juga ditunjang dengan adanya foto mikro pada pengamatan melalui mikroskop optik yaitu grafit yang dihasilkan lebih kecil dibanding as cast, meskipun ada yang grafit yang lebih besar dari as cast yaitu pada annealing namun grafitnya tidak bulat dan banyak terdapat takik sehingga banyak menimbulkan konsentrasi tegangan yang mengakibatkan umur lelah menjadi pendek. Selain dari hasil foto mikro juga dapat disimpulkan dari hasil permukaan patahan spesimen uji, yaitu pada permukaan patah yang banyak terdapat daerah patah statis, membuktikan bahwa material tersebut mempunyai ketahanan lelah yang rendah hal ini dapat diamati pada hasil perlakuan panas yang mempunyai sifat lebih getas dibanding dengan as cast.

Dengan perhitungan secara teoritis untuk material as cast, memang mempunyai data yang hampir mirip dengan pengujian, sehingga kita cepat dapat memprediksi seberapa jauh kemampuan dari material tersebut terhadap umur lelah. Namun hal ini harus tetap diwaspadai tentang segala faktor yang ada, untuk itu disarankan agar tetap mengadakan pengujian kelelahan material supaya hasil yang diperoleh lebih akurat.