

PEMBUATAN SPESIMEN UJI LELAH TIPE *CONTINUOUS RADIUS* MENGGUNAKAN MESIN BUBUT CNC¹⁾

Agus Suprihanto²⁾, Dwi Basuki Wibowo²⁾, IGN Wiratmaja Puja³⁾

Abstract

One of considerations of design are fatigue failures. The fatigue failures are related with fatigue strength of specimens. The fatigue strength of materials usually resulted by fatigue testing. The results of the testing are influenced by some factors ie. machining process of specimens.

The goal of this research is to give a proposed machining process of fatigue test specimens with CNC lathe machines. The proposed machining process can be eliminated the effects of machining from fatigue testing result.

One examples of CNC lathe programming have been successfully composed for fatigue test specimens type continuous radius. This specimen has 9,3mm minor diameter and 16mm major diameter. G and M code which used are G00, G~1, G02, M92, M99 and M30.

Key word : CNC lathe machine, fatigue test specimens type continuous radius.

PENDAHULUAN

Salah satu pertimbangan disain adalah kegagalan terhadap lelah. Sebagai dasar untuk perhitungan keamanan disain terhadap kegagalan lelah adalah kekuatan lelah material. Kekuatan lelah material ini biasanya diperoleh lewat pengujian lelah. Pengujian lelah dilakukan terhadap spesimen lelah yang dibuat dari material yang akan diuji.

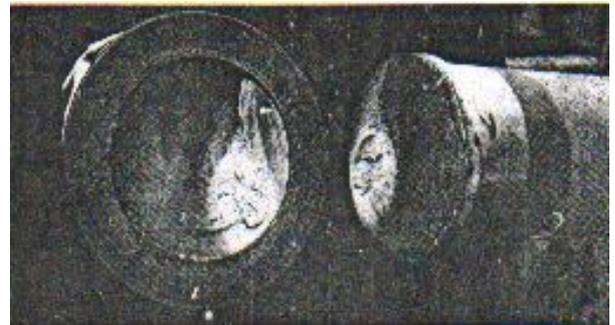
Agar hasil pengujian lelah ini berarti dalam disain, maka pelaksanaan pengujianya harus dilakukan secara hati-hati dan dalam kondisi yang tertentu. Data pengujian lelah umumnya berada dalam rentang yang sangat lebar. Banyak faktor yang mempengaruhi hasil tersebut. Cacat pada material, kondisi lingkungan yang berubah, permukaan spesimen uji, keseragaman sifat mekanik dll merupakan faktor-faktor yang menjadi penyebabnya. Oleh karena itu agar diperoleh hasil pengujian yang dapat dipertanggungjawabkan, maka sedikit mungkin faktor-faktor yang mempengaruhi tersebut dieliminasi.

Salah satu faktor yang dipandang mempengaruhi hasil pengujian lelah tersebut adalah proses pemesinan untuk membuat spesimen ujinya. Hal ini disebabkan oleh gaya-gaya pemotongan pada saat pemesinan telah menyebabkan sebagian dari spesimen uji terutama yang berada pada permukaan telah mengalami plastis. Seperti diketahui bahwa pada pengujian lelah ini jumlah spesimen yang digunakan sangat banyak. Oleh karena itu apabila proses pemesinan untuk tiap-tiap spesimen berbeda, maka hal tersebut akan mempengaruhi hasil pengujian.

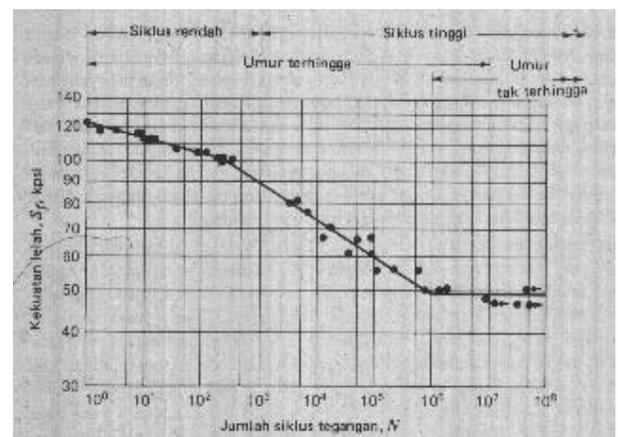
TINJAUAN PUSTAKA

Pembebanan yang terjadi pada suatu komponen mesin / struktur tidak hanya berupa beban statis saja,

tetapi dapat pula berupa beban yang berfluktuatif terhadap waktu. Beban tersebut akan menyebabkan kegagalan pada periode waktu tertentu meskipun tegangan yang terjadi masih dibawah tegangan luluhnya. Kegagalan seperti disebut dengan kegagalan lelah. Suatu elemen mesin/struktur terbuat dari bahan liat yang gagal karena lelah pada permukaan patahnya memperlihatkan daerah perambatan retak dan daerah penampakan patah getas. Gambar 1 memperlihatkan sebuah poros yang gagal karena lelah.



Gambar 1. Poros yang patah akibat lelah



Gambar 2. Diagram tegangan vs jumlah siklus

Kegagalan lelah tersebut membutuhkan suatu pengujian tersendiri. Pengujian tersebut dimaksudkan untuk mengetahui perilaku bahan apabila diberi beban

1) Didanai oleh Program Penelitian Hibah PEKERTI tahun 2003 No : 311/P4T/DPPM/PHP/IV/2003

2) Staf pengajar Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP

3) Staf pengajar Jurusan Teknik Mesin FTI-ITB

yang berfluktuasi terhadap waktu. Prinsip pengujiannya adalah dengan menerapkan beban berfluktuasi terhadap waktu yang tertentu pada suatu spesimen uji, kemudian jumlah perulangan beban/siklus yang menyebabkan spesimen tersebut rusak dicatat. Menurut jumlah siklusnya pengujian lelah ini dibedakan menjadi 2 yaitu pengujian siklus rendah dan siklus tinggi.

Hasil pengujian lelah siklus rendah dan tinggi dapat direpresentasikan dalam grafik tegangan vs jumlah siklus. Gambar 2 menunjukkan hasil pengujian yang dimaksud untuk baja UNS G41300 yang dinormalkan. Pada gambar tersebut terlihat pengujian lelah siklus rendah dilakukan sampai jumlah siklus 10^3 dan pengujian lelah siklus tinggi dari 10^3 sampai dengan 10^6 . Dari gambar tersebut diperoleh pula daerah umur terhingga dan tak terhingga. Maksud dari daerah umur terhingga adalah bahwa pada jumlah siklus pembebanan tertentu elemen mesin/struktur tersebut akan rusak.

Beberapa istilah yang perlu dipahami adalah kekuatan lelah (*fatigue strength*) dan batas ketahanan (*endurance strength*). Kekuatan lelah harus adalah suatu pernyataan seberapa besar tegangan yang menyebabkan bahan akan patah setelah jumlah siklus tertentu. Ketahanan lelah adalah suatu pernyataan yang menyebutkan batas tegangan maksimum tertinggi yang tidak akan menyebabkan bahan akan gagal karena lelah.

Pengujian lelah siklus rendah dilakukan dengan memberikan beban pada spesimen uji yang diberi beban bolak-balik sampai kira-kira 10^3 siklus. Kelelahan siklus rendah ini lazimnya terjadi pada bagian elemen mesin/struktur yang mengalami regangan plastis yang tinggi yang berulang-ulang. Pengetahuan ketahanan lelah pada daerah ini diperlukan untuk perencanaan alat-alat yang berumur pendek misalnya seperti peluru dan elemen mesin/struktur yang berkemungkinan menerima beban yang lebih besar selama umurnya.

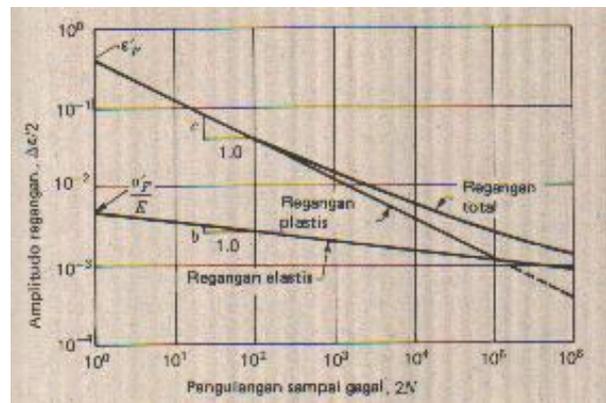
Karena melibatkan regangan plastis yang berulang-ulang, maka pengujian lelah siklus rendah tidak cocok apabila menggunakan beban lentur yang berulang-ulang. Hal ini disebabkan karena sangat sulit mengukur regangan plastis yang terjadi. Oleh karena itu pada pengujian lelah siklus rendah ini dilakukan dengan memberikan beban aksial bolak-balik pada spesimen uji. Regangan yang terjadi akibat pembebanan tersebut dapat diukur dengan transduser listrik misalnya *strain gauge*. Transducer ini mampu membangkitkan sinyal yang berbanding lurus dengan regangan dan tegangan. Hasil pengujian lelah siklus rendah ini lazimnya direpresentasikan dalam grafik antara amplitudo regangan vs jumlah siklus.

Ide pengujian lelah yang didasarkan pada amplitudo regangan tersebut dapat juga digunakan untuk pengujian lelah siklus tinggi. Meskipun demikian karena jumlah siklus untuk pengujian lelah siklus tinggi sangat besar sehingga memakan waktu yang sangat lama, pengujian yang didasarkan pada

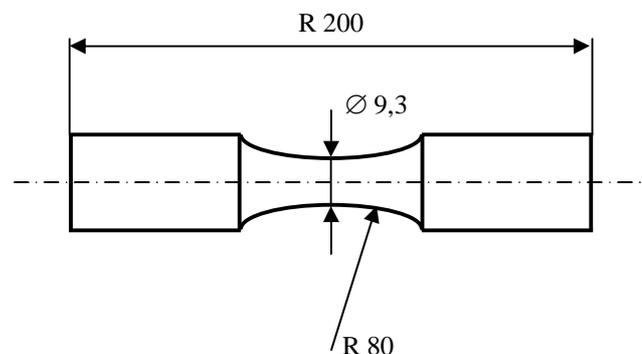
amplitudo regangan jarang dilakukan. Alasan lainnya adalah pada saat penerapannya untuk disain terdapat kesulitan untuk mencari besarnya regangan terutama pada bagian-bagian elemen mesin/struktur yang terdapat ketidakmulusan geometri. Ide ini cocok untuk pengujian lelah siklus rendah. Gambar 3 berikut menunjukkan hasil pengujian lelah yang didasarkan pada amplitudo regangan untuk baja SAE 1020 yang dirol panas.

Pada pengujiannya, regangan yang dapat diterapkan pada spesimen uji adalah regangan total. Regangan total tersebut merupakan penjumlahan dari regangan elastis dan plastis. Oleh karena itu dalam grafik hasil ujiannya besarnya kontribusi kedua regangan tersebut ditampilkan pula. Seperti terlihat dalam grafik, semakin besar regangan plastis yang terjadi semakin kecil umur kelelahan bahan.

Pengujian lelah siklus tinggi dilakukan dengan cara memberikan beban bolak-balik pada spesimen uji sehingga akan rusak pada jumlah siklus diatas 10^3 . Alat pengujian lelah yang banyak dipergunakan adalah mesin gelagar berputar pada kecepatan tinggi dari RR Moore. Alat ini memberikan beban lentur murni pada spesimen uji. Selanjutnya dengan memutar spesimen uji ini, maka pada spesimen uji akan bekerja tegangan tarik dan tekan berganti-ganti. Mesin ini sering disebut pula dengan *rotating bending machine*. Contoh bentuk spesimen uji lelah yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Hasil pengujian lelah yang didasarkan pada amplitudo regangan



Gambar 4. Contoh bentuk spesimen uji lelah RR Moore (dimensi dalam mm)

Prinsip pengujiannya adalah memberikan beban tertentu dimana beban tersebut akan menyebabkan tegangan yang tertentu, kemudian jumlah siklus yang menyebabkan spesimen patah dicatat. Dalam penentuan beban yang digunakan direncanakan sedemikian rupa sehingga mampu memberikan rentang jumlah siklus dari 10^3 sampai 10^6 atau 10^7 . Data yang diperoleh berupa tegangan dan jumlah siklus. Umumnya meskipun beban yang diberikan sama, spesimen uji dapat patah pada jumlah siklus yang berbeda dan seringkali perbedaan tersebut sangat besar. Karena alasan ini maka dalam pengujian untuk beban yang sama dibutuhkan beberapa spesimen uji. Hal ini disebut dengan replikasi yaitu seberapa besar persentase pengulangan beban diterapkan.

Terdapat suatu panduan di dalam menentukan jumlah minimum spesimen uji yaitu tergantung dari tujuan pengujian. Tabel 1 berikut merupakan rekomendasi penentuan jumlah minimum spesimen dan replikasinya untuk berbagai tujuan pengujian lelah menurut standar ASTM E739.

Data yang diperoleh, kemudian dapat direpresentasikan dalam tegangan vs logaritma siklus (S vs $\log N$). Selanjutnya dilakukan analisa regresi untuk memperoleh hubungan antara S dengan $\log N$. Hal ini diperlukan karena untuk dapat mengestimasi besarnya siklus untuk suatu tegangan yang tidak sama dengan tegangan yang diberikan pada pengujian. Upaya estimasi ini hanya diperbolehkan untuk data yang masih berada pada rentang pengujian. Dengan demikian tidak diperkenankan untuk dilakukan ekstrapolasi. Dengan menggunakan metode statistik diterapkan suatu tingkat kepercayaan. Lazimnya tingkat kepercayaan yang digunakan adalah 95%. Artinya dalam rentang hasil pengujian dapat diharapkan bahwa dari 100 kali perhitungan yang dilakukan akan mendapatkan 95 kali hasil yang benar.

Seperti telah dibahas diatas, pengujian lelah tidak sesederhana pengujian tarik. Seringkali ditemui data pengujian lelah suatu material belum ada. Upaya untuk mengestimasi batas ketahanan lelah material tersebut memungkinkan diperoleh dari data kekuatan tariknya. Dari beberapa data pengujian yang telah diperoleh untuk baja karbon, baja paduan dan besi tempa, batas ketahanan lelahnya berkisar antara 0,35 sampai 0,5 kekuatan tariknya. Gambar 5 menunjukkan hubungan antara batas ketahanan lelah dengan kekuatan tarik baja karbon, baja paduan dan besi tempa.

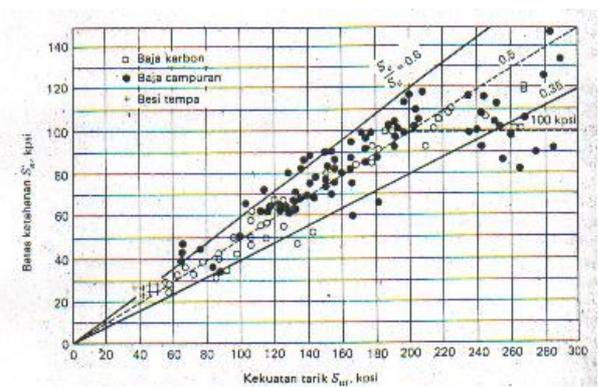
Dalam kaitannya dengan disain suatu elemen mesin/struktur data pengujian lelah tersebut perlu dimodifikasi dengan mempertimbangkan beberapa kondisi. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa pengujian lelah yang dilakukan dipersiapkan secara hati-hati dan dalam kondisi pengujian yang ketat dan diawasi. Dari penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya ditemukan beberapa kondisi yang mempengaruhi batas ketahanan lelah material. Beberapa kondisi tersebut adalah bahan – misal komposisi kimia dan kehomogenan bahan–,

pembuatan –misalnya proses pengerjaan, perlakuan panas, kondisi permukaan–, lingkungan kerja –misal temperatur, korosi, keadaan tegangan, waktu kerja–dan perencanaan –misalnya ukuran, bentuk, umur, pemusatan tegangan. Dengan demikian batas ketahanan lelah suatu bahan yang akan dipergunakan untuk pembuatan suatu elemen mesin/struktur perlu memperhatikan kondisi-kondisi tersebut.

Dalam disain seringkali diperlukan untuk mencari kekuatan dari bagian yang berkaitan dengan keadaan tegangan yang berbeda dengan pembalikan penuh. Tegangan-tegangan tersebut haruslah diuraikan dalam komponen-komponennya seperti tegangan minimum, tegangan rata-rata, tegangan maksimum, amplitudo tegangan, daerah batas tegangan dan tegangan statis. Tegangan statis tidak sama dengan tegangan rata-rata. Dalam kenyataannya tegangan ini mempunyai harga berapa saja antara tegangan minimum dan maksimum. Tegangan statis ini timbul karena suatu beban tetap atau beban pendahuluan yang diberikan pada bagian elemen mesin/struktur dan biasanya tidak tergantung dari bagian yang berubah-ubah.

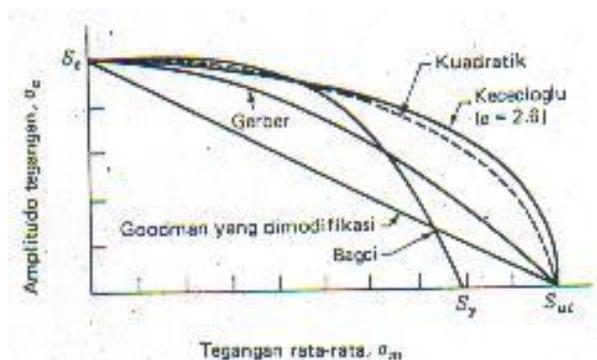
Tabel 1. Jumlah spesimen minimum dan replikasi

Tipe pengujian	Jumlah spesimen minimum	Persentase replikasi minimum
Preliminary and Exploratory (Exploratory research and development test)	6 to 12	17 to 33
Research and Development Testing of Components and Specimens	6 to 12	33 to 50
Design Allowables Data	12 to 24	50 to 75
Reliability Data	12 to 24	75 to 88



Gambar 5. Batas ketahanan lelah dengan kekuatan tarik.

Karena data yang tersedia lazimnya dihasilkan dari pengujian tegangan bolak-balik penuh, maka diperlukan suatu usaha untuk mengetahui keamanan terhadap kelelahan dari disain suatu elemen mesin/struktur. Seperti halnya kriteria kegagalan terhadap pendekatan disain yang didasarkan pada tegangan statis, dalam pendekatan disain lelah ini telah dikemukakan beberapa hal yang sama. Gambar 6 menunjukkan beberapa kriteria kegagalan lelah yang pernah diusulkan.



Gambar 6. Beberapa diagram kriteria lelah

Seperti terlihat pada gambar 6, yang menjadi dasar adalah tegangan rata-rata dan amplitudo tegangan. Letak suatu keadaan tegangan pada suatu elemen mesin/struktur apabila masih berada di dalam lingkup garis, maka elemen mesin tersebut akan aman terhadap kemungkinan gagal akibat lelah.

Dalam ASTM E466-82 disebutkan jenis spesimen yang dapat digunakan untuk pengujian lelah adalah pelat dan poros. Bentuk spesimen pelat dan poros ada yang mirip dengan bentuk spesimen uji tarik ada pula yang berbentuk tipe continuous radius. Untuk silindris contoh spesimen tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.

PROSEDUR PENELITIAN

Dalam penelitian ini ditetapkan terlebih dahulu tipe spesimen berikut dimensinya. Tipe spesimen yang digunakan adalah tipe *continuous radius* dengan diameter terkecil 9,3mm dan diameter terbesar 16mm. Gambar spesimen yang digunakan sebagai dasar penyusunan program CNC bubut ini seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Langkah berikutnya adalah penyusunan lintasan pahatnya dengan menggunakan code-code pemrograman CNC. Selanjutnya ditentukan parameter-parameter proses pemesinannya. Adapun yang dimaksud dengan parameter proses pemesinan tersebut adalah kecepatan pemakanan (*feeding speed*), kedalaman pemotongan (*depth of cut*) dan kecepatan spindel. Setelah selesai dilakukan percobaan pada dengan memplot lintasan pahat pada sebuah kertas. Apabila berhasil kemudian baru digunakan untuk proses pemesinan untuk membuat spesimen uji lelah.

Mesin CNC yang digunakan dalam penelitian ini adalah mesin bubut CNC TU2A buatan EMCO Maeir Austria. Mesin ini sebenarnya hanya digunakan untuk keperluan praktikum dan demonstrasi saja. Karena spesimen uji lelah yang akan dibuat berasal dari besi cor kelabu, maka pengaturan kedalaman pemotongan, kecepatan pemotongan dan kecepatan spindel dibuat rendah. Spesimen uji lelah ini akan digunakan dalam penelitian untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur paduan kromium dan tembaga terhadap kekuatan lelah besi cor kelabu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan bentuk dan dimensi spesimen uji seperti ditunjukkan pada gambar 4, maka disusun tahapan proses pemotongan sebagai berikut. Pemotongan awal dimaksudkan untuk membuat tirus dari samping kanan dan kiri ketengah spesimen. Selanjutnya setelah bagian tengah spesimen memiliki diameter mendekati 9,3mm baru dilanjutkan dengan pemotongan membentuk radius. Pembuatan tirus dilakukan dengan menggunakan kode G00 dan G01. Kode ini merupakan gerak interpolasi linier. Pada pembuatan radius digunakan kode G02 dan M99. Kode G02 adalah perintah untuk gerak interpolasi melingkar 90°, tetapi karena radiusnya kurang dari 90°, maka digunakan kode M99 yang menunjukkan awal dan akhir radius yang akan dibuat. Secara lengkap kode program yang telah dibuat disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Kode CNC untuk spesimen uji lelah

NO.	G/M	X	Z	F	H
00	92	2000	-8000		
01	M03				
02	00	1700	-7709		
03	01	1600	-7709	35	
04	01	1500	-10000	35	
05	01	1600	-12291	35	
06	01	1400	-10000	35	
07	01	1600	-7709	35	
08	01	1300	-10000	35	
09	01	1600	-12291	35	
10	01	1200	-10000	35	
11	01	1600	-7709	35	
12	01	1100	-10000	35	
13	01	1600	-12291	35	
14	01	1000	-10000	35	
15	01	1600	-7709	35	
16	01	950	-10000	35	
17	01	1600	-12291	35	
18	00	1700	-12991		
19	00	1700	-7548		
20	02	030	-10000	20	
21	M99	I 7615	K 2452		
22	02	1700	-12452	20	
23	M99	I 8000	K 00		
24	00	2000	-8000		
25	M30				

Kolom No menunjukkan nomor baris program. Kolom G/M menunjukkan kode program. Kolom X menunjukkan sumbu radial dan kolom Z menunjukkan sumbu memanjangnya. Dimensi pada kolom X dan Z adalah dalam 0,01mm. Kolom F menunjukkan

kecepatan pemakanan dalam satuan mm/menit. Kode M92 digunakan karena referensi yang digunakan adalah absolut.

No baris 00 menunjukkan posisi awal pahat. Untuk melakukan *setting* tersebut ubah ke dalam mode pelayanan manual. Selanjutnya pahat disentuhkan pada permukaan benda kerja. Hal ini untuk mengeset posisi X = 0 mesin. Selanjutnya pahat disentuhkan pada ujung benda kerja. Hal ini untuk mengeset posisi Z = 0 mesin. Selanjutnya geser pahat pada sumbu X sejauh 200 point. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan letak pahat pada posisi X = 2000 point (sama dengan 10mm dari sumbu benda kerja). Selanjutnya pahat digeser ke posisi -8000 point (sama dengan 80mm dari ujung pahat). Setelah selesai kemudian ganti pelayanan ke mode CNC. Apabila benda kerja dirasa telah cukup kuat terpasang pada *chuck*, tombol *start* untuk menggerakkan pahat sesuai dengan kode CNC yang telah disusun.

Dalam pemesinan ini waktu yang diperlukan adalah 20 menit. Lamanya waktu ini dapat dipersingkat dengan mengatur kecepatan dan kedalaman pemotongan yang lebih besar. Tetapi hal ini tidak dapat dilakukan pada mesin bubut CNC TU2A karena mesin ini daya motor penggeraknya kecil. Setelah pemesinan selesai, pahat akan kembali ke posisi semula dan spindle akan berhenti dengan sendirinya. Benda uji berikutnya siap untuk dimesin.

KESIMPULANDANSARAN

Dengan pemesinan CNC ini, pengaruh gaya-gaya pemotongan terhadap hasil pengujian lelah dapat diminimalisasi. Hal ini disebabkan karena untuk semua spesimen mengalami proses pemesinan dengan parameter proses pemesinan yang seragam. Penggunaan mesin CNC ini dapat meniadakan kelalaian operator di dalam pembuatan spesimen. Dengan demikian cacat yang disebabkan oleh kelalaian tersebut dapat dihindari.

Khusus untuk spesimen uji dari besi cor kelabu, karena keberadaan grafit yang dipandang sebagai sumber retak awal, kondisi permukaannya tidak memerlukan perlakuan khusus lagi. Kondisi permukaan spesimen uji dari besi cor kelabu ini (*as-machining*) dapat langsung digunakan.

Untuk mempercepat proses pembuatan spesimen uji lelah ini, dapat dilakukan dengan memperbesar kecepatan pemakanan dan kedalaman pemotongannya. Hal ini hanya bisa diterapkan untuk mesin CNC yang besar. Tentunya dengan perubahan kedalaman pemotongan tersebut kode program yang disajikan pada Tabel 1 harus diganti.

DAFTAR PUSTAKA

1. ASTM E206 – 72, Standard Definitions of Terms Relating to Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data
2. ASTM E466 – 82, Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials
3. ASTM E467 – 76, Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamics Loads in An Axial Load Fatigue Testing Machine.
4. ASTM E647 –83, Standard Test Methode for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-8} m/Cycle
5. ASTM E739 – 80, Standard Practice for Statistical Analysis of Liniear or Linierized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data.
6. ASTM E8 – 83, Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials
7. ASTM E912 – 83a, Standard Definitions of Terms Relating to Fatigue Loading
8. Wibowo, DB, 1998, Modul Pelatihan Penggunaan Mesin Bubut CNC TU2A, Jurusan Teknik Mesin UNDIP
9. EMCO, Manual Pengoperasian Mesin Bubut CNC TU2A.