

PENGEMBANGAN ALAT UJI FATIK *ROTARY BEANDING* DENGAN PENDEKATAN MENGGUNAKAN PERSAMAAN JOSEP MARIN

¹Anang Prasetyo, ²Efi Afrizal, ³Nazaruddin

^{1,2,3}Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau
E-mail: anang.prasetyo1759@grad.unri.ac.id, pati.bungsu@gmail.com

ABSTRACT

A rotary bending fatigue tester has been designed and manufactured as a fatigue tester for metal materials, especially steel. The control system uses Arduino Uno to calculate time, rotation, and the control side automatically stops when the test object breaks. In the world of fabrication, knowledge of materials science is closely related to the process of designing products that will be produced. JIS S45C steel used as a material for ship propeller shafts. it is necessary to analyze the fatigue strength of JIS S45C steel using Joseph Marin's equation and compare it with experimental testing, the test was carried out using a rotating bending type fatigue testing machine, the dimensions of the test specimens were made based on ASTM E 466, with a diameter of 6 mm, with a loading of 50%, 70%, 90%, 110% and 130% of the yield values of the JIS S45C material until the specimens experience fatigue failure. The test result data is displayed in the form of an S-N curve, . The results of the fatigue test showed that JIS S45C steel had a high cycle fatigue with 22,144,683 cycles, namely at a load of 90% of the yield stress or at a working stress of 458.69 MPa. The test results were approximated by manual calculations using Josep Marin's merchandise. The results showed that the overall fatigue strength of JIS S45C steel is adjacent to each other both experimentally and using Joseph Marin's equations, whereas in the infinite - life region it is known that the fatigue strength based on the Joseph Marin agreement is lower than experimental testing so that from this condition it can be stated that if JIS S45C steel receives a large enough load repeatedly it will fail more quickly.

Keywords : *Development of a rotary beanding fatigue test tool, fatigue life of JIS S45C steel, fatigue life approach with Josep Marin's equation, mechanical properties of JIS S45C steel, S-N chart of JIS S45C steel.*

ABSTRAK

Alat uji *fatigue rotary bending* telah dirancang dan dibuat sebagai alat uji fatik pada material logam khususnya baja. Sistem kendali menggunakan arduino uno untuk menghitung waktu, putaran dan sisitem kendali otomatis berhenti pada saat benda uji mengalami patah. Dalam dunia fabrikasi pengetahuan ilmu bahan sangat erat kaitannya dalam proses mendesain produk yang nantinya diproduksi. Baja JIS S45C yang digunakan sebagai bahan poros baling-baling kapal. maka perlu dilakukan analisis kekuatan lelah baja JIS S45C menggunakan persamaan josep marin dan membandingkan dengan pengujian eksperimen, pengujian dilakukan dengan menggunakan mesin uji lelah *tipe rotating bending*, dimensi spesimen uji dibuat berdasar ASTM E 466, dengan diameter 6 mm, dengan pembebanan sebesar 50%, 70%, 90%,110% dan 130% dari nilai *yield* bahan JIS S45C hingga spesimen tersebut mengalami kegagalan lelah. Data hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk kurva S-N, . Hasil pengujian fatik menunjukkan baja JIS S45C memiliki umur fatik tinggi (high cycle fatigue) dengan siklus 22.144.683 yaitu pada pemberian beban 90% dari tegangan *yield* atau pada tegangan kerja 458,69 MPa. Hasil pengujian didekati dengan kalkulasi manual menggunakan persamaan Josep Marin. Hasil penelitian menunjukkan kekuatan lelah baja JIS S45C pada keseluruhan saling berdekatan baik eksperimen maupun menggunakan persamaan josep marin, sedangkan pada daerah umur tak – terhingga (*infinite – life region*) diketahui bahwa kekuatan lelah berdasarkan persamaan josep marin lebih rendah dari pengujian eksperimen sehingga dari kondisi ini dapat dinyatakan bahwa baja JIS S45C apabila menerima pembebanan yang cukup besar secara berulang akan mengalami kegagalan lebih cepat.

Kata Kunci: Pengembangan alat uji fatigue rotary beanding, umur fatik baja JIS S45C, pendekatan umur fatik dengan persamaan Josep Marin, sifat mekanik baja JIS S45C, grafik S-N baja JIS S45C.

PENDAHULUAN

Dalam dunia fabrikasi pengetahuan ilmu bahan sangat erat kaitannya dalam proses mendesain produk yang nantinya diproduksi. Proses penciptaan produk baru akan diawali dengan mendesain produk, yang dapat dijual oleh perusahaan kepada konsumen. Dalam proses produksi, peranan utama dimiliki oleh perancang sebagai generasi ide, pengembangan konsep, pengujian dan pelaksanaan manufaktur objek fisik atau jasa. Perancang dapat menentukan dimensi serta jenis material yang digunakan. Sehingga, mempermudah proses pembuatan, meminimalisir resiko kesalahan dan pengerjaan berulang (Hisyam, et al. 2017).

Baja memiliki sifat mekanik sehingga membuat baja memiliki peran yang sangat penting yang mampu diaplikasikan untuk penggunaan di lapangan sesuai dengan pemakaian yang efektifitas dan efisiensi (Wijaya 2018, Syukur and Carles 2021). Sebagian besar baja mengalami pembebanan dengan tegangan yang dinamis dan berulang dalam waktu yang lama, sehingga timbul tegangan lengkung yang besarnya bervariasi secara kontinu dari harga maksimum tekan ke harga tarik maksimum. Kondisi tarik tekan ini berlangsung terus menerus sampai bahan lelah dan berakhir dengan patahan atau mengalami kegagalan lelah. Suatu bahan porous dari baja yang digunakan biasanya memiliki kekerasan dan keuletan yang tinggi. Tetapi jenis patahan yang terjadi pada material yang mengalami kegagalan fatik adalah patahan getas. Kegagalan fatik terjadi berdasarkan batas ketahanan *endurance limits* suatu material. Permasalahan fatik merupakan masalah yang sering timbul dan sulit diperkirakan, tidak ada tanda-tanda terjadinya patah fatik yang dapat dilihat secara kasat mata pada saat pengerjaan dilapangan oleh para teknisi di setiap bidang (Pratowo, et al. 2019(Siregar, 2000 #22).

Beberapa material dapat mengalami tegangan berulang-ulang atau mengalami fluktuasi yang dapat membuat terjadinya kerusakan jauh di bawah tegangan yang dibutuhkan untuk patah lelah, dengan pembebanan dinamis, mengakibatkan keretakan yang dapat merambat terus menerus yang mengakibatkan kekuatan dan keuletan suatu struktur dapat mengalami penurunan yang lebih rendah dari beban yang harus didukung. Akibatnya struktur tidak mampu menahan beban sehingga terjadi kegagalan (Bahtiar 1997, Suhartono 2007, Hendrawan 2010, Amiruddin and Lubis 2018, Fitri 2020).

Spesifikasi baja yang ditinjau dari pembebanan dinamis yang banyak beredar di Provinsi Riau dan digunakan oleh masyarakat tidak menginformasikan spesifikasi yang berhubungan dengan pembebanan dinamis. Sehingga, perlu penelitian lebih lanjut khususnya kelelahan fatik. Penggunaan spesimen baja di Provinsi Riau akan sangat berbeda dibandingkan daerah lain, karena sebagian besar daerah di Provinsi Riau dikelilingi oleh gambut, maka perlu diperhatikan kekuatan dari baja tersebut (Dalil and Fatra 2011).

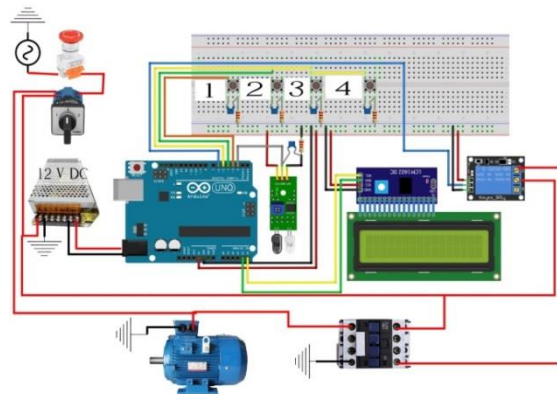
Berdasarkan uraian diatas butuh penyelidikan tentang sifat-sifat suatu material, dengan melakukan pengujian menggunakan alat uji fatik. Namun, dikarenakan keterbatasan akurasi dari alat uji fatik yang ada berupa sistem pembebanan yang secara langsung, tidak diiringi dengan alat ukur beban dan ketidak akurasi hasil siklus karena sistem berhenti secara manual serta permukaan hasil patahan saling bergesekan (Kennedy 2010). Sehingga, penulis memperoleh gagasan melakukan pengembangan alat uji *fatigue rotary bending*. Beberapa perbaikan yang akan dilakukan diantaranya adalah merubah

komponen manual ke digital berupa alat ukur putaran motor (rpm), waktu (menit), sistem pemberian beban lengan, alat penghitung beban, dan sistem berhenti secara otomatis agar dapat dipastikan permukaan patah pada benda uji tidak saling bergesekan. Sehingga, dapat dianalisis bentuk patahan yang terjadi. Hasil uji kelelahan akan ditampilkan dalam bentuk diagram S–N (kelelahan). Data hasil ditampilkan lebih proporsional menarik dan memudahkan perancang struktur. Selain itu, alat uji *fatigue rotary bending* ini dapat diaplikasikan untuk pengujian material lain seperti: aluminium, tembaga, komposit dan lain-lain.

METODOLOGI

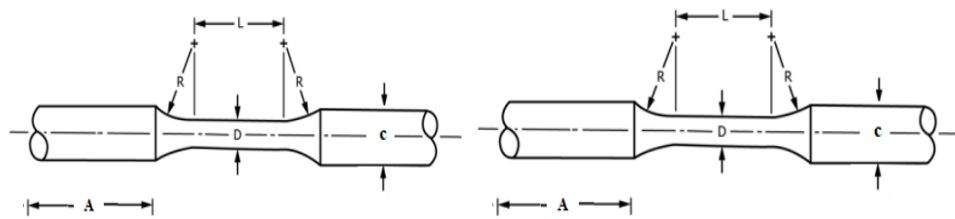
Perancangan ulang ini dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu pada tahap pertama adalah dibuat sketsa rancangan ulang alat uji fatik, selanjutnya pada tahap kedua dimulai perbaikan, kemudian pada tahap ketiga dilakukan pengujian pada alat uji fatik, jika hasil sesuai dengan tujuan penelitian, maka dibuat laporan dan SOP (Standar Operasional Prosedur) pada alat uji fatik tipe *rotary bending*. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat uji fatigue rotary bending. Alat uji ini masih menggunakan peralatan manual dan akan didigitalisasi dengan penambahan alat ardiouno sebagai alat ukur putaran, waktu dan *automatis shutdown* untuk memudahkan membaca data-data yang dihasilkan untuk pengujian kelelahan ditampilkan dalam layar LCD.

Sistem kontrol yang di gunakan adalah Arduino uno merupakan papan elektronik yang mengandung mikrokontroler atmega 328, yang berfungsi sebagai komputer yang dimanfaatkan untuk mewujudkan rangkaian elektronik yang digunakan mengontrol pengoperasian alat uji *fatigue rotary bending*. Berupa penghitungan jumlah putaran, penghitungan waktu, on, off, restart, dan menghentikan otomatis saat benda uji putus.



Gambar 1. Rangkaian ardiouno

Menurut (Astika 2009, Budiyanto, et al. 2018) fatik atau kelelahan merupakan bentuk kegagalan struktur dikarenakan beban dinamik yang berfluktuasi di bawah *yield strength* yang terjadi dalam waktu yang cukup lama dan berulang-ulang. Pengujian fatik dilakukan dengan spesimen baja jiz S45C dengan melakukan pengujian tarik untuk mendapatkan nilai *yield strength* yang digunakan untuk memvariasikan beban 50%, 70%, 90%, 110% dan 130%, didapat beban yang diberikan pada alat uji fatik berikut ukuran spesimen uji tarik standar ASTM E-8 dan fatik:



Keterangan gambar:

A = 60 D = 9
L = 45 R = 45
C = 15

Keterangan gambar:

D = 6 mm C = 14 mm
L = 18 mm A = 24 mm
R = 48 mm.

Gambar 2. Ukuran spesien uji Tarik (ASTM-E8 2016) dan ukuran spesien uji Fatik (ASTM-E466 2020)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Baja struktur yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja yang paling banyak digunakan oleh masyarakat untuk poros yaitu baja JIS S45C.

Tahapan proses perancangan dan pembuatan alat uji *fatigue rotary bending*, terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan alat sebelumnya dan melakukan perancangan ulang alat uji *fatigue rotary bending*, meliputi perancangan konstruksi, poros, bantalan, kopling, rangkaian listrik dan kendali menggunakan program Arduino uno.

Dari perancangan dan pembuatan konstruksi yang telah dilaksanakan menyajikan konfigurasi hasil sebuah alat uji *fatik Rotating bending* seperti ditunjukkan pada gambar berikut:



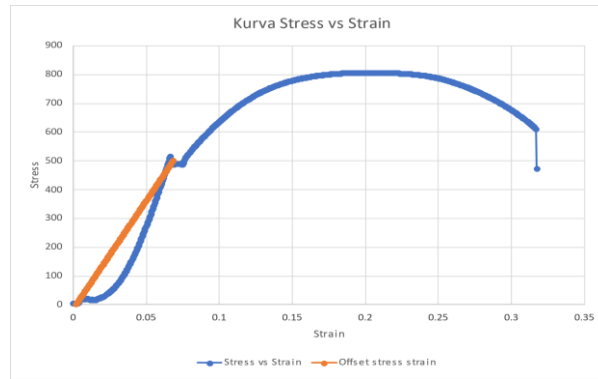
Gambar 3. Alat uji fatigue rotary beanding.

a. Pengujian Fatik

Dari hasil pengujian tarik di Laboratorium Teknik mesin Fakultas Teknik Universitas Riau diketahui baja JIS S45C memiliki Ultimate Tensile Strength sebesar 806,39 Mpa dan yield 500,86 Mpa.

Tabel 1. Hasil pengujian tarik baja JIS S45C

No	Hasil	Nilai
1	<i>yield strength</i>	500,86 MPa
2	<i>Ultimate Tensile Strength</i>	806,39 MPa
3	ϵ (%)	7,5133
4	σ_f	610,069 Mpa



Gambar 4. Kurva stress vs strain

Pengujian fatik dilakukan dengan material baja JIS S45C didapat nilai *yield strength* sebesar (500, 86 MPa). Pengujian baja JIS S45C dengan memvariasikan beban 50%, 70%, 90%, 110% dan 130% dari kekuatan *yield* didapat pembebanan pada setiap spesimen menggunakan persamaan berikut serta di peroleh hasil sebagaimana ditunjukkan pada tabel 3.2 :

Perhitungan beban pada pengujian dari 50% *Yield Strength*

$$\sigma_{yield} = \frac{w.l/2}{\pi/32.d^3}$$

$$\frac{w.100}{2} = (500,86 \times 50\%).(\pi/32.(6^3))$$

$$\frac{w.100}{2} = 5.307,97$$

$$w.100 = 5.307,97 \times 2$$

$$w = \frac{10.615,9}{100}$$

$$w = 106,16N$$

$$w = 10,9 \text{ kg}$$

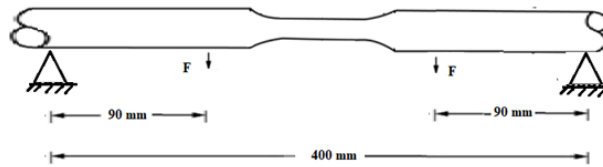
maka beban yang diberikan di setiap spesimen sebagai berikut.

Tabel 2. Besar pembebanan di setiap spesimen

No	Data Spesimen	Persentase %	Beban (kg)
1	Spesimen 1	50	10,9
2	Spesimen 2	70	15,9
3	Spesimen 3	90	19,9
4	Spesimen 4	110	23,9
5	Spesimen 5	130	28,9

b. Tegangan lentur setiap spesimen

Tegangan lentur yang terjadi disetiap spesimen pada alat uji *fatik rotary beanding*



Data: diameter spesimen : 6 mm
 Jenis bahan : S45C
 Gravitasi (g) : 9,81 m/dt²

1. Spesimen 1 dengan beban 10,9 kg

$$\begin{aligned} \text{Gaya (F)} &= \text{Massa} \times \text{gravitasi} \\ &= 5,45 \times 9,81 \text{ m/dt}^2 \\ &= 53,464 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{F \cdot l \cdot \frac{1}{2} \cdot d}{\frac{\pi \cdot d^4}{64}}$$

$$\sigma \text{ lentur} = \frac{4,812 \cdot 0,003}{\pi \cdot d^4 / 64} = \frac{0,014}{3,14 \cdot 0,006^4 / 64} = \frac{0,0014}{6,3 \times 10^{-11}} \text{ N/m}^2$$

$$\sigma \text{ lentur} = 2,2 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma \text{ lentur} = 227,03 \text{ Mpa}$$

c. Tegangan geser

Tegangan geser pada spesimen dapat diperoleh dengan Persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{geser}} &= \frac{T \cdot r}{I_p} \\ \tau_{\text{geser}} &= \frac{6,03 \cdot 0,003}{\frac{3,14 \cdot 0,006^4}{32}} \\ \tau_{\text{geser}} &= \frac{0,018110345}{1,3 \times 10^{-10}} \end{aligned}$$

$$\tau_{\text{geser}} = 142.410.512,1 \text{ PA} = 142,41 \text{ Mpa}$$

No	Beba % yield	Beban spesimen	σ lentur (Mpa)	Tegangan geser (Mpa)
1	50%	10,9	227,03	142,41
2	70%	15,9	331,17	142,41
3	90%	19,9	414,48	142,41
4	110%	23,9	497,79	142,41
5	130%	28,9	606,10	142,41

Tegangan lentur dan geser yang bekerja di setiap spesimen

d. Pengujian fatik

Pengujian lelah terhadap baja JIS S45C menggunakan alat uji fatigue Rotating Bending. Hasil kekuatan lelah baja JIS S45C dengan persamaan S-N fatik

$$N = t \times n$$

Keterangan: N: Siklus

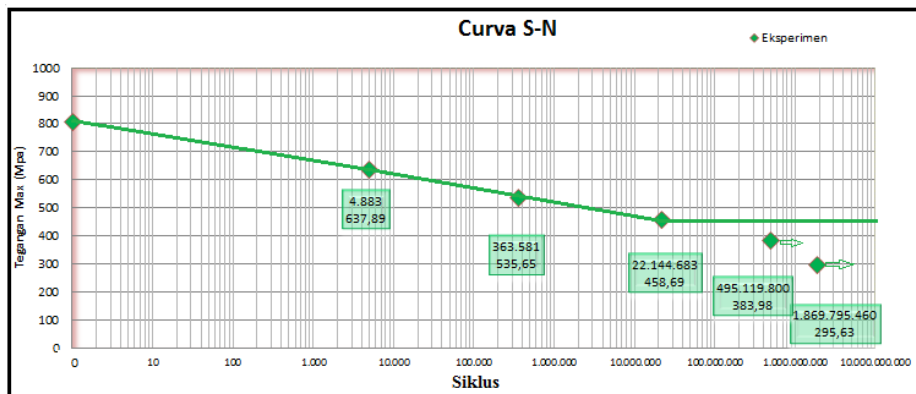
T: Waktu (menit).

n: Putaran motor (*rpm*).

Maka diperoleh hasil sebagaimana ditampilkan pada tabel 3.4 dan gambar berikut:

Tabel 4. Hasil pengujian fatik disetiap spesimen

Data Spesimen	Tegangan max (Mpa)	Beban% yield	Siklus (N)
Spesimen 1	295,63	50%	1.869.795.460
Spesimen 2	383,98	70%	495.119.800
Spesimen 3	458,69	90%	22.144.683
Spesimen 4	535,65	110%	363.581
Spesimen 5	637,89	130%	4.883



Gambar 5. Hasil kurva S-N pengujian eksperimen

e. Pendekatan menggunakan Josep Marin

Joseph Marin merupakan salah satu pelopor dalam pengumpulan, pengembangan, dan penyebaran materi tentang kegagalan elemen teknik sejak 1952. Kegagalan fatik disebabkan oleh pembentukan dan perambatan retak. Retak lelah biasanya akan dimulai pada diskontinuitas pada material dimana tegangan siklik maksimum, dalam pendekatan Josep Marin terlebih dahulu menentukan Fraksi kekuatan lelah f , dari S_{ut} .

Untuk komponen mekanis aktual direduksi menjadi S_e yang kurang dari 0,5 S_{ut} serta merekomendasikan penggunaan nilai f yang ditemukan dari

fraksi kekuatan. Persamaan (a) dan (b), untuk komponen mekanik aktual, dapat dituliskan dalam bentuk sebagai berikut:

$$a = \frac{(F_{s_{ut}})^2}{S_e}$$

$$b = 1/3 \log\left(\frac{F_{s_{ut}}}{S_e}\right)$$

Dimana N adalah siklus menuju kegagalan dan konstanta a dan b ditentukan oleh titik 10^3 , dan 10^6 , jumlah siklus ke kegagalan dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_{af} \geq sf = {}_a N^b = N \left(\frac{\sigma_{rev}}{a}\right)^{1/b}$$

1. Spesimen 1.

Dengan persamaan Marin (2.17), (2.18), dan (2.19) dengan tegangan 295,63 Mpa. baja jis S45c maka di peroleh siklus sebagai berikut:

$$\sigma_{ur} \geq S_e$$

$$F_{s_{ut}} = 0,82 \times 806,39 \text{ Mpa}$$

$$F_{s_{ut}} = 661,23 \text{ Mpa}$$

$$a = \frac{(F_{s_{ut}})^2}{S_e} = \frac{(661,23)^2}{403,2} = 1084,3 \text{ Mpa}$$

$$b = 1/3 \log\left(\frac{F_{s_{ut}}}{S_e}\right) = 1/3 \log\frac{661,23}{403,2} = -0,07161 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{af} \geq sf = {}_a N^b = N \left(\frac{\sigma_{rev}}{a}\right)^{1/b}$$

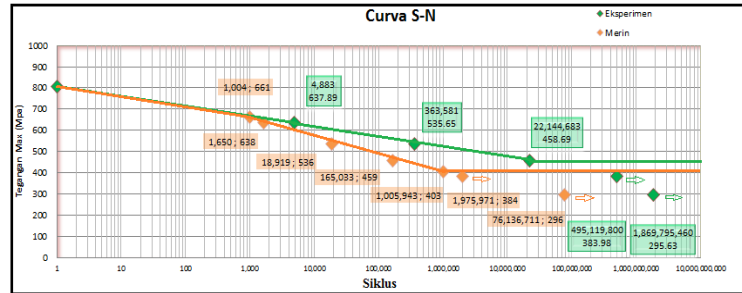
$$= N \left(\frac{295,63}{1084,3}\right)^{1/-0,07161}$$

$$N = 76.136.711 \text{ siklus}$$

Tabel 5. Hasil kalkulasi manual persamaan Merrin.

No	Tegangan	Siklus
1	295,63	76.136.711
2	383,98	1.975.971
3	403	1.005.943
4	458,69	165.033
5	535,65	18.919
6	637,89	1.650
7	661	1.004

Serta diperoleh grafik S-N sebagaimana yang di tampilkan pada gambar berikut:



Gambar 6.1 Grafik S-N eksperimen dengan persamaan Merrin.

Dari hasil pendekatan menggunakan persamaan Josep Marin, menunjukkan semakin besar beban yang bekerja dispesimen akan mempercepat umur fatik dan semakin kecil tegangan yang bekerja pada spesimen maka akan membuat semakin tinggi umur fatik. Diperoleh hasil sebagaimana ditampilkan pada Table 3.4 pada spesimen 1 dengan tegangan 295,63 MPa dengan 76.136.711 Siklus serta pada tegangan 637,89 Mpa menunjukkan hasil 4.883 siklus sdangkan pada *endurance limits* dengan siklus 1.005.943 diperoleh pada tegangan 403 MPa. hal ini juga didukung dengan hasil pengujian secara eksperimen, diperoleh hasil pengujian menunjukkan tegangan pada spesimen 1 sebesar 295,63 Mpa memperoleh hasil 1.869.795.460 siklus sedangkan pada spesimen 5 dengan tegangan yang bekerja pada spesimen tersebut sebesar 637,89 Mpa menunjukkan hasil 4.883 siklus serta di peroleh *endurance limits* pada tegangan 458,69 Mpa dengan siklus 22.144.683. hal ini menunjukkan hasil *endurance limits* baik pada pendekatan menggunakan persamaan marin dan eksperimen berada dibawah nilai *yield strength* baja JIS S45C. Penggambaran data hasil pengujian dalam bentuk kurva S-N menggunakan program Excel dengan memplot data putaran masing masing spesimen pada sumbu x dalam skala logaritma, dan pada sumbu y diplot data tegangan yang dialami spesimen uji akibat pembebanan yang diberikan.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diberikan penulis berdasarkan yang penulis lakukan selama penyusunan tugas akhir, sebagai berikut:

1. Berdasarkan perbaikan yang penulis lakukan dengan melakukan penambahan digitalisasi alat dengan merubah komponen manual ke digital berupa alat ukur putaran motor (rpm), waktu (menit), sistem pemberian beban lengan, alat penghitung beban, dan sistem berhenti secara *otomatis shutdown*, alat uji *fatigue rotary bending* ini dapat dipergunakan dengan baik.
2. Berdasarkan proses pembuatan, prangkat ardio uno tidak mampu menahan lonjakan arus dari motor listrik, hal ini mengharuskan penambahan komponen elektronik yaitu resistor, dan kapasitor sebagai penghambat dan menyimpan muatan listrik pada setiap *switch*. Serta dioda yang digunakan untuk menyearahkan arus listrik yang diposisikan pada *input relay*.
3. Penambahan Poros *fleksible slink* dapat bekerja dengan baik, dengan meneruskan putaran motor ke spesimen dengan mengikuti tegangan lentur yang bekerja pada setiap spesimen.

4. Baja JIS S45C dengan *yield strength* 500,86 MPa dan *Ultimate Tensile Strength* sebesar 806,39 Mpa digunakan sebagai spesimen uji untuk pembuktian kinerja dari alat uji fatik *rotari bending*.
5. Hasil pengujian fatik menunjukkan ternyata baja JIS S45C memiliki umur fatik tinggi (high cycle fatigue) dengan siklus 22.144.683 yaitu pada pemberian beban 90% dari tegangan *yield* atau pada tegangan kerja 458,69 Mpa.
6. Dari hasil pengujian dan perhitungan uji lelah spesimen JIS S45C menunjukkan ternyata pada tegangan yang semakin kecil, menghasilkan batas lelah yang semakin besar dan akhirnya spesimen pengujian akan patah. Begitu juga sebaliknya pada tegangan yang semakin besar menghasilkan batas lelah yang semakin kecil.
7. Pada Gambar 3.6 Kurva S-N baja JIS S45C pada keseluruhan saling berdekatan baik eksperimen maupun menggunakan persamaan Josep Marin.
8. Sedangkan pada daerah umur tak – terhingga (*infinite – life region*) diketahui bahwa kekuatan lelah berdasarkan persamaan Marin lebih rendah dari pengujian eksperimen sehingga dari kondisi ini dapat dinyatakan bahwa baja JIS S45C apabila menerima pembebanan yang cukup besar secara berulang akan mengalami kegagalan lebih cepat.
9. Pendekatan kalkulasi manual dengan menggunakan persamaan Josep Marin kita dapat memperoleh hasil baik pada siklus rendah serta *endurance limits*.

DAFTAR PUSTAKA

- Amiruddin, A. and d. F. A. Lubis (2018). "Analisa pengujian lelah material tembaga dengan menggunakan rotary bending fatigue machine." Jurnal Ilmiah Teknik Mesin ITM.
- Astika, I. M. (2009). "Karakteristik Lelah Chopped Strand Mat/Polyester Composite." Jurnal Ilmiah Teknik Mesin.(online) 9(03): 150.
- ASTM-E8 (2016). "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials." Journal of Testing and Evaluation 45(6): 2294-2298.
- ASTM-E466 (2020). "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials."
- Bahtiar, D. (1997). Pengaruh Heat Input Pada Pengelasan Saw Baja Kekuatan Tinggi Terhadap Perambatan Retak Dan Umur Lelah Daerah HAZ, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Budiyanto, E. N. , E. Zainudin and Agus (2018). "Uji ketahanan fatik aluminium scrap hasil remelting piston bekas menggunakan alat uji fatik tipe rotary bending." Jurnal Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Metro 7(1).
- Dalil, M. and W. Fatra (2011). "pengaruh air gambut terhadap kekuatan lelah baja struktur." Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin X Tahun 2011 Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
- Fitri, M. (2020). "Pengaruh Beban Lentur Pada Poros Stainless Steel Terhadap Siklus Kegagalan Fatik." Jurnal Teknik Mesin Universitas Mercu Buana 9(3): 149.
- Hendrawan, B. (2010). "Pengaruh perbandingan tegangan (stress ratio) terhadap laju perambatan retak fatik panel komposit berpenguat kombinasi serat kenaf anyam dan kontinyu." Jurusan teknik mesin fakultas teknik universitas sebelas maret surakarta.

- Hisyam, , K. M. Hamid and Abdul (2017). "Menganalisa pengaruh besar beban lentur terhadap kekuatan fatik poros tembaga." Zona Mesin: Program Studi Teknik Mesin Universitas Batam **8**(2).
- Kennedy, J. (2010). "Perancangan dan pembuatan alat uji fatik rotating pure bending." Jurusan teknik mesin, fakultas teknik, universitas riau
- Pratowo, B., , I. Surya and Witoni (2019). "Analisis kekuatan fatik baja karbon rendah sc10 dengan tipe rotary bending." Jurnal teknik mesin Program Studi Teknik Mesin, Universitas Bandar Lampung (UBL) **7**(1)
- Suhartono, H. A. (2007). "Aplikasi tegangan-regangan ekuivalen pada perhitungan umur fatik paduan al 6063 untuk beban aksial dan torsi." Mesin Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur, UPT LUK BPPT **9**(1).
- Syukur, M. A. and H. Carles (2021). "Penentuan parameter parameter input proses pemesinan milling dan gurdi untuk pembuatan pencekam spesimen alat uji lelah dengan kekuatan maksimum 370 mpa." AME (Aplikasi Mekanika dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Universitas Mercu Buana Jakarta **7**(2): 67-73.
- Wijaya, S. (2018). Perencanaan Mesin Uji Lelah Rotating Bending Untuk Baja Aisi 1045, Unimed.