

**ESTIMASI UMUR FATIK MENGGUNAKAN
PEMBEBANAN *ROTATING BENDING* PADA MATERIAL SS 304**

Oleh

Alim Mardhi dan Roziq Himawan

Pusat Teknologi Reaktor Dan Keselamatan Nuklir – BATAN

ABSTRAK

ESTIMASI UMUR FATIK MENGGUNAKAN PEMBEBANAN *ROTATING BENDING* PADA MATERIAL SS 304 Pencegahan kerusakan fatik yang kerusakan tersebut terjadi secara tiba-tiba pada komponen penyusun reaktor nuklir yang berbahan SS 304 merupakan salah satu alasan perlunya estimasi umur fatik pada proses perancangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan fatik dan estimasi umur fatik komponen dengan tipe pembebanan *rotating bending*. Metoda yang digunakan adalah metoda kurva S-N. Kurva S-N diperoleh dari hasil pengujian fatik tipe *rotating bending* dan kemudian dilakukan pendekatan pola kurva menggunakan persamaan Basquin. Dari pendekatan pola kurva didapat deviasi maksimum sebesar 14,8 % dari nilai kurva S-N hasil pengujian. Nilai deviasi ini dapat diterapkan sebagai batas aman dalam menggunakan kurva S-N untuk penentuan estimasi umur fatik komponen berbahan SS 304 dalam perhitungan perencanaan.

Kata kunci : Umur Fatik, SS 304, Kurva S-N, Rotating Bending.

ABSTRACT

FATIGUE LIFE ESTIMATION USING LOADING of ROTATING BENDING for MATERIAL SS 304. Preventing fatigue damage which the damage suddenly occurs in SS 304 material nuclear reactor components is one of the necessities to estimate the fatigue life in design process. The objective of this research is to get the fatigue strength value of SS 304. The material is subjected to rotating bending load. The analysis is done using S-N curves method. An S-N curve is achieved by applying rotating bending fatigue test and then making the curves trend using Basquin equation. From the S-N curves, the maximum deviation value was 14,8%. This deviation value able to be applied as the safety factor of the S-N curves on the determination of fatigue life in component design with SS 304 as the base material.

Key word: Fatigue Life, SS 304, S-N Curves, Rotating Bending.

PENDAHULUAN

Fatik adalah salah satu modus kegagalan material^[1]. Telah umum diketahui dalam dunia perindustrian, fatik merupakan penyebab utama kegagalan pada struktur. Kegagalan material ditandai dengan kerusakan yang terjadi secara tiba-tiba pada tingkat tegangan dibawah tegangan luluh. Penelitian tentang kekuatan fatik diperlukan untuk dapat mengestimasi umur fatik suatu komponen sehingga dapat mencegah terjadinya *un-scheduled shutdown* dan mitigasi kecelakaan pada instalasi yang beroperasi.

Pada komponen penyusun reaktor nuklir, fenomena fatik dapat terjadi pada beberapa sistem, misalnya fenomena fatik siklus rendah (*low cycles*) yang dapat terjadi pada komponen bejana

tekan reaktor, pipa pendingin primer, *pressurizer*, *main steam isolation valve* dan pompa resirkulasi reaktor, sedangkan pada fatik siklus tinggi (*high cycles*), fatik dapat terjadi pada komponen pompa pendingin reaktor dan *tube* penukar panas^[2].

Didalam memprediksi umur fatik, terdapat tiga pendekatan yaitu pendekatan tegangan (*stress approach*), pendekatan regangan (*strain approach*), dan pendekatan mekanika patahan (*fracture mechanics*). Pendekatan tegangan biasanya menggunakan metoda kurva S-N dan pendekatan regangan menggunakan metoda umur regangan (*strain-life method*).

Keunggulan pendekatan tegangan adalah sederhana, mudah diaplikasikan dan dapat langsung dipakai untuk perhitungan perencanaan.

Pendekatan ini efektif untuk kondisi pembebanan elastis, mampu menunjukkan batas rentang pakai yang aman (*safe life*) bahkan tak hingga (*infinite life*), namun metoda ini tidak dapat menghitung pengaruh tegangan-regangan sebenarnya pada saat terjadi deformasi peluluhan lokal. Keunggulan pendekatan regangan adalah mampu mengestimasi umur fatik pada siklus rendah dan dapat menghitung pengaruh tegangan regangan sebenarnya pada saat terjadi deformasi peluluhan lokal. Keunggulan pendekatan mekanika patahan (*fracture mechanics*) adalah dapat mengukur dan mengamati proses terjadinya kerusakan fatik skala mikro dan estimasi yang dihasilkan paling akurat dibandingkan kedua metoda yang lain namun perhitungannya rumit dan membutuhkan waktu yang lama^[3].

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui tingkat kekuatan fatik komponen dan estimasi umur fatik dalam pembebanan *rotating bending* dengan menggunakan pendekatan tegangan atau metoda kurva S-N. Metoda pendekatan kurva S-N harus mengacu pada asumsi perhitungan mekanika benda padat bahwa komposisi material bersifat homogen, kontinyu, dan bebas cacat atau bebas retak.

TEORI

Fatik

Dalam perencanaan dan analisis untuk memprediksi waktu kegagalan fatik sebuah komponen yang mendapatkan pembebanan berulang, metoda umur-tegangan (*stress life method*), metoda umur-regangan (*strain-life method*) dan metoda mekanika patahan (*fracture mechanics*) dapat digunakan. Masing-masing metoda memiliki keunggulan, tergantung pada aplikasinya dalam memprediksi umur fatik.

Berdasarkan umur fatik (N), fatik dapat diklasifikasikan menjadi fatik siklus rendah (*low cycles fatigue*) untuk umur fatik $10^0 \leq N \leq 10^3$ dan fatik siklus tinggi (*high cycles fatigue*) untuk umur fatik $N \geq 10^3$.^[3]

Dua cara pendekatan yang pertama memiliki parameter yang sama yaitu mengolah parameter beban menjadi fungsi tegangan atau regangan terhadap siklus. Cara pendekatan yang terakhir menggunakan parameter perambatan retak (*crack propagation*) dengan memantau retak awal yang memiliki laju pertumbuhan panjang retak yang proporsional dengan intensitas tegangan yang diterapkan untuk mencapai patah.

Dalam merancang suatu komponen, untuk menentukan tegangan aman yang di izinkan, umumnya digunakan cara estimasi umur fatik dengan menggunakan pendekatan tegangan. Metoda ini merupakan cara yang paling simpel, mudah dilakukan untuk aplikasi perencanaan, sangat baik diterapkan pada kondisi pembebanan elastis, mampu menunjukkan batas rentang pakai yang aman (*safe life*) bahkan tak hingga (*infinite life*), serta sangat tepat untuk perencanaan komponen pada kondisi fatik siklus tinggi. Namun perlu diperhatikan bahwa metoda ini tidak cocok untuk kondisi fatik siklus rendah karena metoda ini tidak dapat menghitung pengaruh tegangan-regangan sebenarnya pada saat terjadi deformasi peluluhan lokal. Selain itu metoda ini hanya cocok diterapkan pada material logam terutama baja karena pada material tertentu tidak dapat menunjukkan respon data yang tepat bila menggunakan pendekatan ini.

Syarat utama untuk menggunakan metoda pendekatan tegangan mengacu pada asumsi perhitungan mekanika benda padat bahwa komposisi material idealnya homogen, kontinyu,

dan bebas cacat atau bebas retak. Tujuan utama menggunakan pendekatan ini pada perencanaan komponen adalah untuk mendapatkan umur pakai aman bahkan tak hingga.

Kurva S-N

Kurva S-N adalah kurva yang didapat dari hasil pengujian fatik yang merupakan grafik hubungan antara kekuatan fatik (S: *Strength*) dan jumlah siklus pembebanan (N: *Number of Stress Cycle*)^[3]. Kurva S-N memberikan banyak informasi sifat fatik karena pada saat pengujian, dimasukkan faktor geometri, perlakuan permukaan, kondisi pembebanan, temperatur dan proses perlakuan material. Kekurangan kurva S-N adalah tidak dapat memprediksi deformasi plastis lokal dan efek dari tegangan rata-rata^[4]. Contoh kurva S-N diperlihatkan pada Gambar 1.

Dari grafik diatas terdapat informasi mengenai karakteristik fatik dari material. Sumbu horizontal menunjukkan data jumlah siklus pembebanan dan sumbu vertikal menunjukkan kekuatan fatik. Pada rentang siklus 10^7 sampai 10^8 dapat diamati ada

tiga daerah spesimen yang diberi tanda panah. Tanda ini berarti bahwa spesimen belum patah pada saat pengujian dihentikan. Kondisi ini dinamakan batas ketahanan material dalam menerima beban fatik (*endurance limit*). Tingkat tegangannya dinamakan tegangan *endurance* (σ_e). Untuk merencanakan komponen yang memiliki umur pakai aman atau bahkan umur tak hingga maka tingkat tegangan yang diaplikasikan harus dibawah batas tegangan *endurance* komponen tersebut.

Metoda Pendekatan Statistik

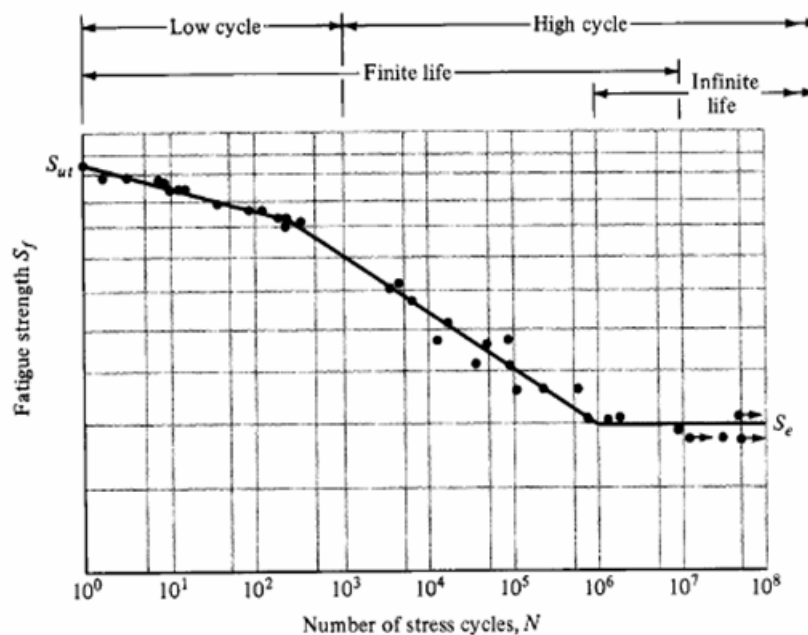
Metoda statistik menyediakan pendekatan rasional dalam memanfaatkan jumlah pengujian dan spesimen yang terbatas untuk mendapatkan informasi hasil pengujian yang bagus dan dapat dipercaya. Ada beberapa metoda pendekatan antara lain dengan menggunakan persamaan Langer^[4].

$$\varepsilon_a = B(N)^{-b} + A \quad (1)$$

dimana:

ε_a : amplitudo regangan; *strain amplitude* (%),

N : Jumlah Siklus; *life cycle*



Gambar 1. Grafik hasil pengujian fatik (*fatigue test*)^[3]

B : Parameter Pengujian

-b : Parameter Pengujian

A : Parameter Pengujian

Persamaan ini jarang dipergunakan dalam kegunaan praktis, karena menyertakan regangan plastis dalam persamaannya dimana pada kenyataannya di dalam analisa struktur umumnya regangan plastis dihitung dengan pendekatan solusi elastis linear.

Metoda lainnya yang lebih sederhana dan dapat langsung diaplikasikan adalah dengan menggunakan persamaan Basquin. Basquin^[5] (1910) menyatakan, bahwa dalam fatik antara umur pakai atau jumlah siklus sistem memiliki hubungan dengan amplitudo pembebanan dari luar sistem yang memenuhi sebuah persamaan kejangkatan dan dinyatakan dengan persamaan 2^[5],

$$N \sigma_f^a = C \quad (2)$$

dimana:

N : jumlah siklus atau umur fatik,

σ_f : kekuatan fatik ; *fatigue strength* (MPa),

a : koefisien Basquin yang menandakan kemiringan atau gradien dari grafik S-N,

C : koefisien yang menandakan harga σ_f untuk satu siklus.

Penggunaan estimasi ini efektif dalam mengestimasi umur fatik pada rentang siklus tinggi (*high cycles fatigue*) antara umur fatik 10^3 - 10^6 siklus, karena pada rentang siklus ini penyebaran data cenderung berpola logaritmik.

METODA PENELITIAN

Dalam penelitian ini metoda yang digunakan adalah metoda pengujian fatik dan pendekatan numerik menggunakan persamaan Basquin. Untuk pengujian digunakan spesimen dari material baja SS 304. Jenis material ini dipilih karena banyak digunakan pada komponen-komponen penyusun

reaktor nuklir. Sifat material ini yang khas yaitu kuat dan tahan karat khususnya dalam lingkungan yang berinteraksi dengan zat kimia dan air. Berdasarkan hasil uji material dengan menggunakan alat uji *Alloy Analyzer XMET 3000* dan dari hasil pengujian tarik diperoleh komposisi material SS 304 dan sifat mekanik seperti diperlihatkan pada Tabel 1 dan 2.

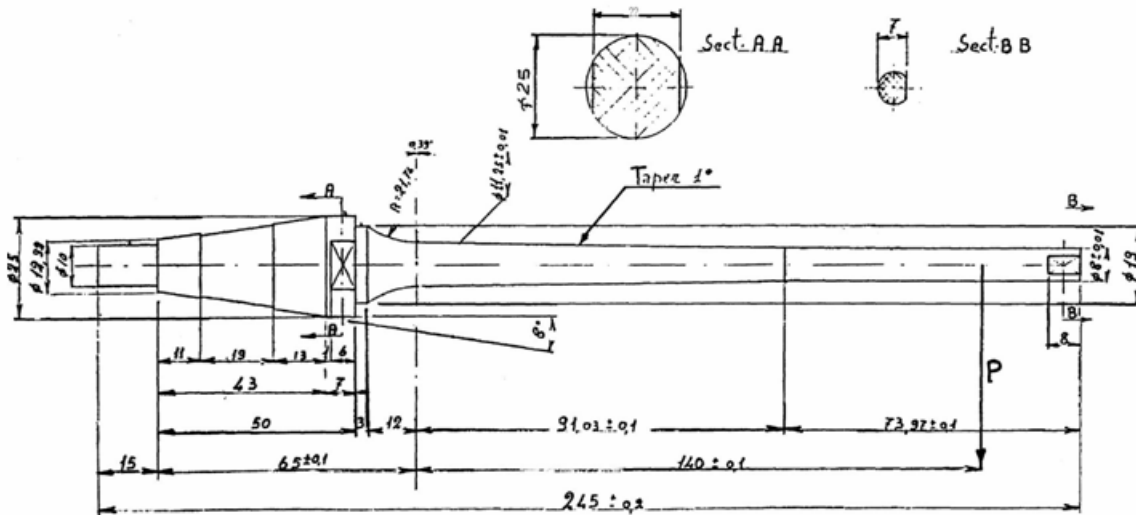
Tabel 1. Sifat mekanik material SS 304^[6]

Tegangan Patah (MPa)	586
Tegangan Luluh (MPa)	241
<i>Elongation</i> (%)	55

Tabel 2. Komposisi kimia material SS 304 (wt, %) Bentuk dan dimensi spesimen untuk pengujian

Unsur	Nilai
Cr	18,08
V	0,24
Mn	0,63
Fe	73,22
Co	0,1
Ni	7,63
Cu	0,53
Mo	0,312

fatik mengacu pada standar pengujian fatik ISO 1143^[7] dan ISO R375^[8] dan disesuaikan dengan spesifikasi mesin uji fatik yang digunakan. Pada pengujian ini digunakan jenis spesimen Toroidal sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 2. Jenis pembebanan untuk spesimen jenis ini adalah tipe *cantilever*^[8] yaitu dengan ujung yang digantung beban sebesar P pada jarak 155 mm dari titik tumpu kemudian diputar sehingga menjadi pembebanan bolak-balik yang merupakan jenis pembebanan dalam fenomena fatik.



Gambar 2. Spesimen Jenis Toroidal yang Digunakan dalam Pengujian [9]

Tabel 3. Spesifikasi mesin uji fatik [9]

<u>Nama Mesin</u>	<i>Rotating Bending Fatigue Machine</i>
<u>Merek</u>	ANSALDO
<u>Negara Pembuat</u>	Italia
<u>Jenis Spesimen</u>	<u>Toroidal</u>
<u>Kapasitas Beban</u>	1 Kg – 60 Kg ~ 10 Mpa – 600 Mpa
<u>Max Siklus Counter</u>	9x10 ⁶ Siklus
<u>Speed</u>	1000, 2000, 3000 (Rpm)
<u>Standar Pengujian</u>	ISO 1143; ISO R 373

Prinsip alat uji ini adalah setelah benda uji terpasang dan diberi beban dengan nilai beban tertentu kemudian diputar menggunakan motor listrik. Pada jumlah siklus tertentu benda uji akan mengalami patah. Nilai tegangan pada permukaan patah setara dengan beban yang diberikan per satuan luas permukaan yang patah (kg/mm^2)^[9].

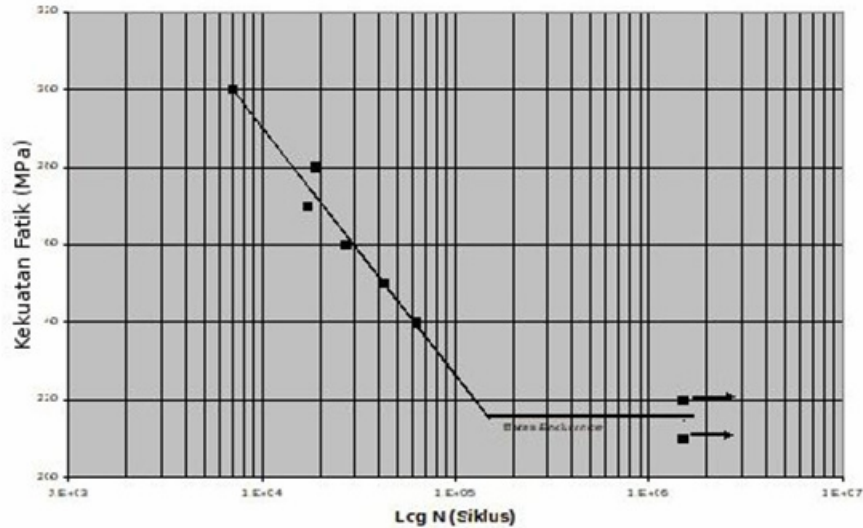
Pengujian fatik dengan spesimen material SS 304 dilakukan pada lingkungan temperatur suhu ruang. Untuk beban 22 sampai 30 kg menggunakan kecepatan putaran motor 1000 rpm dan untuk pengujian dengan beban 21 kg menggunakan

putaran motor 2000 rpm.

Dari data hasil pengujian dengan jumlah terbatas dapat dimanfaatkan untuk mendapatkan perkiraan pola kurva S-N yaitu dengan melakukan pendekatan numerik menggunakan aplikasi dari persamaan Basquin seperti pada persamaan 3,

$$\text{Log } C = \text{Log } N \times a \text{ Log } \sigma_f \quad (3)$$

Pada persamaan ini dimasukkan dua titik dari data hasil pengujian pada rentang siklus 10^3 - 10^6 , untuk mendapatkan nilai kemiringan (gradien) a dan konstanta C yang tepat.



Gambar 3. Grafik S-N hasil pengujian.

Tabel 4. Hasil uji *rotating bending* fatik material SS 304

No.	Tegangan (MPa)	Jumlah siklus (N)
1	300	7050
2	280	19000
3	270	17170
4	260	27200
5	250	42190
6	240	62720
7	220	1500000*
8	210	1500000*

Keterangan * : Spesimen tidak mengalami patah

Dari Tabel 4 terlihat bahwa pada tegangan 300 MPa sampai 240 MPa, sampel uji telah patah dengan variasi beberapa nilai siklus. Akan tetapi pada tingkat tegangan 220 MPa dan 210 MPa, pengujian, pengujian sudah mencapai 1500000 siklus dan belum tampak tanda-tanda akan mengalami patah sehingga pengujian dihentikan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa nilai ini (220 MPa dan 210 MPa) adalah batas ketahanan material dalam menerima beban fatik (*endurance limit*). Untuk tingkat keamanan yang lebih tinggi dipilih nilai tegangan yang paling rendah yaitu 210

MPa sebagai nilai tegangan *endurance* (σ_e) dalam pengujian ini.

Pendekatan Pola Kurva S-N

Pendekatan pola kurva S-N hasil pengujian dilakukan dengan melakukan perhitungan dari dua data pada Tabel 4 menggunakan persamaan 2 untuk mendapatkan nilai konstanta C dan a. Pada penelitian ini, pola kurva diarahkan untuk mendapatkan nilai deviasi maksimum terhadap pola kurva hasil pengujian.

Dari data hasil pengujian nomor 1 dan 3 dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai C dan a diperoleh masing-masing $5,971E+24$ dan $8,448$. sehingga diperoleh persamaan kurva nya seperti ditampilkan pada persamaan 3,

$$N = (5,971E+24) \times \sigma_f^{8,448} \quad (3)$$

Selanjutnya persamaan 3 dapat digunakan untuk mengestimasi jumlah siklus atau umur fatik (N) dengan memasukkan nilai tingkat tegangan yang diinginkan. Nilai hasil perhitungan ini dapat diplot sebagai sebuah pola kurva S-N yang baru yang memiliki gradien yang berbeda dari kurva

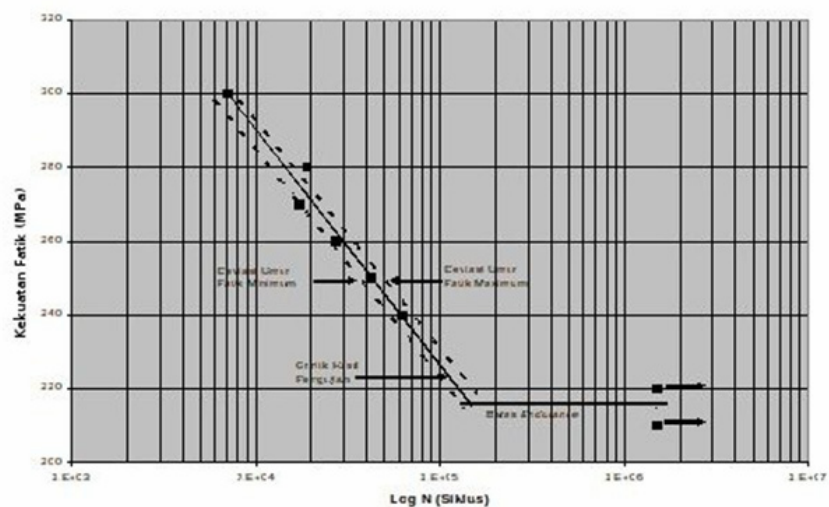
aslinya. Untuk mendapatkan variasi pola kurva yang beragam dilakukan perhitungan dengan tujuh variasi data seperti ditampilkan dalam Tabel 5.

Dari perbandingan nilai gradien hasil perhitungan dengan gradien hasil pengujian sebagai *fitting* nya diperoleh persentase deviasi. Dari deviasi gradien kurva ini diperoleh deviasi maksimum sebesar 14,8%. Nilai ini digunakan sebagai nilai maksimum umur fatik yang berfungsi sebagai batas aman dalam menggunakan kurva S-N secara langsung dalam perhitungan perencanaan. Gambar grafik S-N ditampilkan pada Gambar 4.

Untuk umur fatik tidak terbatas (*infinite life*), batas tegangan yang aman adalah pada daerah dibawah batas garis *endurancenya* yaitu sebesar 210 MPa. Pada perencanaan umur fatik terbatas

(*finite life*), yang kegagalan komponen dapat diprediksi dan dikontrol (*damage tolerant*) maka perencana harus menggunakan tingkat tegangan sedikit diatas tegangan operasi sebenarnya, kemudian ketika jumlah siklus pembebanan sudah mendekati batas umur yang ditentukan maka komponen harus dievaluasi untuk mengantisipasi kerusakan yang bakal terjadi.

Perhitungan estimasi fatik secara langsung dengan cara di atas dapat dilakukan dengan syarat asumsi komponen tidak ada cacat retak dan homogen. Pada komponen yang memiliki asumsi ada cacat retak maka perlu diperhitungkan dengan menggunakan pendekatan yang lebih akurat yaitu pendekatan mekanika retakan.



Gambar 4. Grafik S-N hasil pendekatan pola

Tabel 5. Hasil estimasi menggunakan persamaan Basquin

DATA	C	a	Gradien	Fitting Gradien	Deviasi (%)
1 dan 3	5,9717E+24	8,44847856	-31,808	-27,705	14,809
1 dan 4	1,6611E+27	9,43522988	-28,481	-27,705	2,801
1 dan 6	1,2917E+28	9,79482825	-27,436	-27,705	0,971
4 dan 5	2,907E+31	11,1922048	-24,01	-27,705	13,337
4 dan 6	4,3791E+29	10,4377204	-25,746	-27,705	7,071
5 dan 6	8,2413E+27	9,71283139	-27,667	-27,705	0,137
3 dan 6	9,5011E+30	10,9991791	-24,432	-27,705	11,814

KESIMPULAN

Metoda pendekatan tegangan atau kurva S-N dapat digunakan dalam perencanaan untuk mengestimasi umur fatik komponen secara langsung dengan syarat mengacu pada asumsi bahwa komponen tersebut adalah material logam, memiliki komposisi yang homogen, tidak memiliki cacat dan retak.

Kurva S-N diperoleh dari hasil pengujian fatik dengan tipe pembebanan *rotating bending*. Berkaitan data yang diperoleh terbatas maka dilakukan pendekatan menggunakan persamaan Basquin. Dari pola kurva hasil pendekatan dalam penelitian ini diperoleh nilai deviasi sebesar 14,8%. Nilai ini merupakan batas aman maksimum dalam penggunaan kurva untuk tujuan estimasi dan penentuan kekuatan fatik yang aman bagi komponen.

DAFTAR PUSTAKA

1. FUCHS, H.O dan RALPH, I, *Metal Fatigue in Engineering*, John Willey & Sons, New York, 1983
2. SHAH, V.N., *Aging And Life Extension Of Major Light Water Reactor Component*, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho, USA, 1993.
3. ASM INTERNATIONAL, *ASM Metal Handbook, Vol 19 Fatigue and Fracture*, 1996.
4. KEISLER J.M, CHOPRA O.K, SHACK W.J., "Statistical models for estimating fatigue strain-life behaviour of pressure boundary materials in light water reactor environments", *Nuclear Engineering and Design* 167 p.129-154, Elsevier, 1996.
5. SHIGLEY J.E. dan MISCHKE C.R., *Mechanical Engineering Design, 5th Ed.*, John Willey & Sons, 1991.
6. BISHOP NWM, dan SHERRATT F, *Finite Element Based Fatigue Calculations*, UK, 2000.
7. Roziq Himawan, dkk, "Studi Awal Monitoring Proses Creep Secara Tak Merusak Dengan metoda Ultrasonic", PTRKN BATAN.
8. -----, International Standard ISO 1143, 1975.
9. -----, International Standard ISO R 373, 1964.
10. Fatigue Bending Test Machines Operation and Maintenance Manual, Ansaldo ESL 35820I0003, Italy, 1989.