

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Analisis Kegagalan

Penjelasan tentang analisis kegagalan adalah suatu metode yang dilakukan untuk menemukan serta mengungkapkan kenapa dan bagaimana jika ada komponen yang mengalami kegagalan (Port dan Herro, 1991). Analisis kegagalan mengacu pada pengamatan komponen yang rusak. Analisis kegagalan didefinisikan sebagai penyelidikan atau pengujian komponen yang gagal dan kondisi yang mengarah pada kegagalan untuk mengidentifikasi atau menentukan penyebab kegagalan. Oleh karena itu, tujuan dilakukan analisis kegagalan adalah untuk mengidentifikasi atau mencari tahu metode kegagalan dan memberikan solusi yang dapat mengatasi kegagalan tersebut. Pengecekan bentuk fraktur yang rusak merupakan kunci dari keseluruhan proses analisis kegagalan, sehingga pemeriksaan makro dan mikro harus dilakukan secara bertahap. Tidak hanya itu saja, pengujian mekanis juga diperlukan, karena biasanya kegagalan dipengaruhi oleh gaya yang ditimbulkan pada area kerja komponen (Kurniawan, 2017).

Berikut ini aspek pemicu kegagalan yang sering terjadi di dunia industri bisa disebabkan antara lain:

1. Aspek Kesalahan Pemilihan Material yang Akan Digunakan

Hasil riset mengenai penyebab kegagalan material yaitu karena kesalahan dalam memilih material yang akan digunakan dijelaskan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Kesalahan Dalam Kegagalan Komponen Mesin

Permasalahan	%
Salah dalam memilih material	38
Produksi yang mengalami cacat	15
Perlakuan panas yang salah	15
Desain yang salah	11
Keadaan operasi yang ekstrem	8
keadaan lingkungan tak terkontrol	6

Permasalahan	%
Pemeriksaan tidak jelas	5
Material yang kurang bagus	2

*) Brooks dan Choudhury, (2002)

2. *Maintenance* Kurang Baik Pada Komponen

Kurang baiknya *maintenance* komponen tercantum sebagai pemicu kegagalan. Tabel 2.2 merupakan informasi perihal kegagalan material.

Tabel 2. 2 Kegagalan Material Karena Maintenance

Permasalahan	%
Perawatan yang tidak jelas	44
Fabrikasi yang menyebabkan rusak	17
Ukuran spesimen	16
Penerapan yang tidak tepat	10
Rusak material	7
Pemicu yang terjadi kurang jelas	6

*) Brooks dan Choudhury, (2002)

3. Perancangan komponen yang salah

Berikut ini faktor proses perancangan yang mengalami kesalahan:

- Kegagalan ulet karena beban melebihi *yield* material.
- Kegagalan *brittle* karena beban *impact*.
- Kegagalan pemuluran (temperatur tinggi).
- *Static delay fracture*.
- Konsentrasi tegangan seperti takikan saat proses perancangan,
- Terjadi kegagalan akibat *overload* karena analisis tegangan komponen yang kurang detail.
- Kesalahan hitungan dalam menentukan material.

4. Keadaan kerja yang ekstrim

Berikut ini akibat dari kondisi kerja mesin yang ekstrim sehingga menimbulkan permasalahan yang spesifik pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Pemicu Kegagalan Dalam komponen Mesin

Penyebab kegagalan	%
Berkarat	29
<i>Fatigue</i>	25
Patah getas	16
Beban yang berlebih	11
Temperature tinggi menyebabkan korosi	7
Korosi retak tegang, korosi lelah, penggetasan hidrogen	6
Pemuluran (<i>creep</i>)	3
Abrasi, Erosi	3

*) Brooks dan Choudhury, (2002)

2.2 Tata Cara Dalam Menganalisis Kegagalan

Saat berlangsung suatu kerusakan atau kegagalan, perlu dicoba aksi buat menghindari terjadinya kerusakan dengan memeriksa serta menganalisa kegagalan yang berlangsung:

1. Material yang dipakai
 - a. Keterangan produksi : peleburan, penggulangan, pembentukan, pengecoran, perlakuan panas dan proses permesinan.
 - b. Analisis kimia : uji X – Ray, komposisi unsur.
 - c. Sifat Material : tarik, pembengkokan, kekerasan, beban kejut, dan tes kelelahan.
 - d. Pola metalurgi : struktur makro serta mikro.
 - e. Kerusakan permukaan.
2. *Design* tegangan dan peran *maintenance*
 - a. Kekuatan luar : pengulangan.
 - b. Kondisi lingkungan
3. Uji eksperimen
 - a. Uji lab : analisa *stress* (kekerasan patahan, kekuatan material, metode elemen hingga, kekuatan *fatigue*)
 - b. pengujian lapangan : ukuran tegangan, uji produksi.

4. Hasil uji seluruhnya.

www.itk.ac.id

(Nishida, 1992)

2.3 Penanggulangan Kegagalan

Berikut ini cara untuk penanggulangan kegagalan yang dapat dilakukan sehingga dapat mencegah kerusakan yang fatal yaitu sebagai berikut:

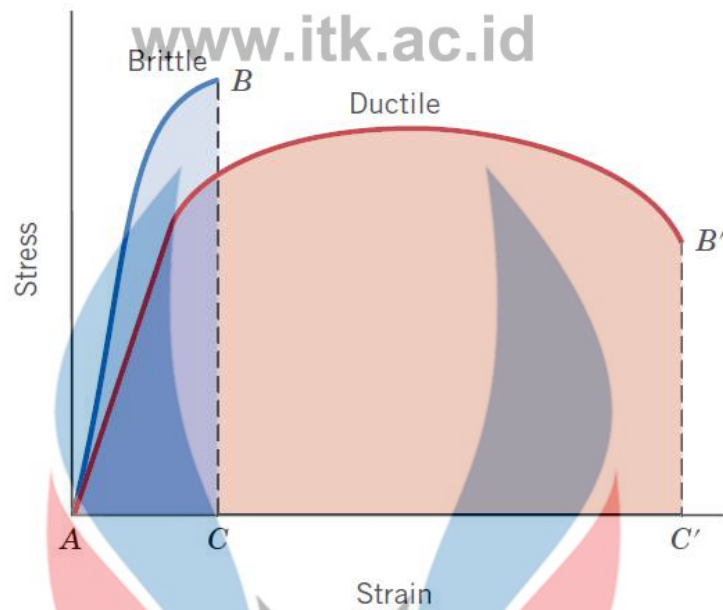
1. Menurunkan tegangan dengan perbaikan desain meliputi:
 - a. Geometri, bentuk, ukuran atau dimensi.
 - b. Perakitan, Susunan.
2. Menaikkan ketahanan material:
 - a. Memilih material tepat .
 - b. *Maintenance* proses manufaktur, *heat treatment* dan pabrikan atau perakitan
 - c. *Maintenance surface treatment* (lapisan pelindung permukaan).
3. Mengendalikan lingkungan seperti:
 - a. Temperatur yang berlangsung.
 - b. Tegangan yang berlangsung.
 - c. Kontaminasi.
 - d. Konsentrasi keadaan korosif.
 - e. Kecepatan aliran fluida.

(Syofyan dan Adnyana, 2018)

2.4 Patah *Brittle* dan Patah *Ductile*

Patahan mengacu pada spesimen yang terbagi dua karena beban statik. Tegangan pada material dapat berupa tegangan tarik, tegangan tekan, tegangan geser atau torsi. Terdapat dua model patahan, yaitu patah *ductile* dan patah *brittle*. Jenis model patahan didasarkan pada kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis. Material *ductile* memiliki kemampuan deformasi plastis cukup besar namun deformasi plastis pada material getas kecil. Gambar 2.1 menunjukkan diagram *stress* dan *strain* untuk patahan *ductile* dan *brittle* (Kurniawan R.T, 2017).

www.itk.ac.id



Gambar 2. 1 Diagram *stress – strain* Patah *ductile* dan *brittle* (Callister, 2007)

Patah *brittle* dan *ductile* pada material bergantung terhadap beban yang terjadi. Mekanisme pembentukan patahan terdapat dua tahap yaitu pembentukan retakan dan perambatan yang merupakan respons terhadap *stress* yang terjadi di material (Kurniawan R.T, 2017).

2.5 Proses Patah *Fatigue*

Patah lelah dibagi menjadi 3 tahapan, pertama terjadi retak awal (*crack initiation*), kemudian perambatan retak, dan terakhir patah statis. Setelah retak lelah terjadi, pembebanan akan ditopang pada bagian-bagian komponen yang masih ada, hingga akhirnya komponen akan patah (kegagalan akhir) (Kurniawan R.T, 2017). Sifat kelelahan logam dapat dibedakan menjadi sifat makroskopik dan sifat mikroskopis. Ciri makroskopis salah satu bentuk kelelahan yang bisa dilihat dengan mata, sedangkan ciri mikroskopis hanya dapat diamati dengan mikroskop (Akuan, 2007).

2.5.1 Proses Retak Awal (*Crack Initiation*)

Asal usul retakan dapat berlangsung di area permukaan, yang disebabkan permukaan menanggung *load* yang sangat besar serta konsentrasi tegangan

kemungkinan besar dikarenakan perubahan geometri permukaan. Cacat komponen dapat mengakibatkan konsentrasi tegangan (Kurniawan, 2017).

2.5.2 Proses Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Ketika tegangan maksimum di ujung retakan melebihi kekuatan material, terjadi perambatan retak pada komponen, sehingga terjadi peningkatan *stress concentration* di area ujung-ujung retakan. Titik pertama retak, awalnya menyebar dalam beberapa butir pada bidang slip pada kecepatan penyebaran sangatlah pelan. Penglihatan makro tidak dapat menunjukkan perambatan retak sehingga kondisi ini dikatakan sebagai *crack propagation* fase 1. Kemudian perambatan retak fase 2 memiliki striasi. Pada fase kedua, perambatan retakan akan tegak lurus terhadap tegangan tarik maksimum, sehingga retak yang terjadi terlihat jelas dengan pengamatan makro (Kurniawan, 2017).

2.5.3 Patah Akhir (*Final Fracture*)

Patah akhir merupakan mekanisme terakhir kegagalan struktur pada saat dibebani. Saat menemui permukaan yang retak, permukaan tersebut akan berkurang. Kondisi ini yang menyebabkan permukaan komponen tidak dapat menahan pembebanan (Mustaqim, 2017). Pada mekanisme ini, patahan dapat berupa patahan ulet atau patahan getas, tergantung dari sifat mekanik dan ukuran material (Totten, 2008).

2.6 *Fatigue*

Kelelahan merupakan salah satu faktor kegagalan pada suatu komponen dikarenakan adanya beban dinamis (Jokosisworo dan Sebastian, 2011). Retakan *fatigue* kadang dimulai dari permukaan komponen yang mengalami beban terkonsentrasi. *Beach marks* merupakan karakteristik unik yang diterapkan di banyak permasalahan *fatigue* serta dengan adanya *beach marks* sangat membantu untuk mengenali fraktur kelelahan (Aji dan Nugroho, 2014). Logam yang mengalami tegangan berulang akan pecah, atau bahkan rusak bila terjadi tegangan yang berlangsung di bawah titik leleh materialnya. Kebanyakan kegagalan pada komponen mesin disebabkan oleh kelelahan. Ketika tegangan diterapkan, retakan

akan merambat, dan akibatnya, penampang yang tersisa tidak lagi dapat menahan atau menahan tegangan kerja dan putus. Dalam hal ini patah tidak memiliki karakteristik, sehingga timbul kelelahan yang sering kali berbahaya (Marta, 2016). Secara universal umur kelelahan dibagi jadi 2, yaitu : *cyclic* kelelahan rendah serta *cyclic* kelelahan tinggi. Pada : *cyclic* kelelahan rendah berlangsung kurang $10^4 - 10^5$ *cyclic*. Sedangkan *cyclic* kelelahan tinggi berlangsung lebih 10^5 *cyclic* hingga mengalami *fracture* (Callister, 2007).

2.7 Stress Concentration

Diskontinuitas dalam komponen misalnya lubang ataupun takik, bakal menyebabkan distribusi *stress* tidak menyeluruh di sekitar area diskontinuitas, tegangan akan menjadi lebih besar daripada tegangan rata-rata yang jauh posisinya dari area diskontinuitas (Nusyirwan, 2010). Pada komponen yang mempunyai bentuk penampang rumit, distribusi tegangan yang terjadi menjadi tidak teratur. Ketidakteraturan dalam distribusi tegangan yang disebabkan oleh perubahan bentuk penampang tiba-tiba disebut tegangan konsentrasi. Besarnya faktor tegangan konsentrasi tergantung pada jenis material dan bentuk geometri dari komponen (Faizin, 2015). Konsentrasi tegangan dapat terjadi dimana saja terutama geometri dengan jari – jari kecil, seperti lubang, *fillet*. secara umum, semakin kecil jari-jarinya maka semakin tinggi tegangannya. Misalnya retakan, memiliki konsentrasi tegangan yang sangat tinggi di ujungnya yang dapat melebihi kekuatan tarik material (Dupen, 2016).

2.8 Struktur Material

Pemilihan material sering berhubungan pada pemilihan operasi yang mesti dipadati oleh sifat material. Secara filosofis, sekarang aktivitas desain material itu ialah menerapkan desain terhadap struktur material. Sehingga transformasi pada struktur material tentu terdapat implikasinya pada sifat material. Tabel 2.4 diperlihatkan rangkuman bermacam kejadian yang menukar struktur material, baik yang terencana, maupun tidak terencana. Tidak hanya itu cacat material kerap terlihat sehingga dapat mempengaruhi sifat materialnya (Suripto, 2014).

Tabel 2. 4 Mekanisme dalam Mengubah Struktur Material

No	Kondisi	Sifat material
1	Ukuran butir terlalu besar	Menjadi <i>brittle</i>
2	Dekarburasi	Meningkatkan kekuatan
3	Difusi	Perubahan sifat di permukaan
4	Sensitisasi (pada stainless steel)	Mudah terserang korosi batas butir
5	<i>Dezincification</i> (pada kuningan)	Terjadi korosi selektif
6	Presipitasi	Mengubah kekuatan, keuletan, ketahanan lelah dan <i>fracture toughness</i>
7	<i>Quench</i> dan temper	Terlalu keras atau terlalu lunak

*) Suripto, (2014)

2.9 Metode Elemen Hingga

Finite Element Method (FEM) merupakan metode numerik untuk menyelesaikan masalah fisika *engineering* dan matematika. Permasalahan yang biasanya dapat diselesaikan menggunakan FEM meliputi analisis struktur, perpindahan panas, aliran fluida, perpindahan massa, dan potensi elektromagnetik. Untuk menyelesaikan masalah yang menyangkut geometri kompleks, pembebanan, serta karakteristik material, hampir tidak mungkin dapat diselesaikan melalui solusi matematika analitik. Oleh karena itu, diperlukan yang namanya metode numerik seperti FEM untuk mendapatkan solusi yang dapat diterima. FEM menyelesaikan masalah menggunakan persamaan aljabar sistematis secara bersamaan, bukan penggunaan persamaan diferensial (Logan, 2007). Metode elemen hingga dapat digunakan untuk penerapan mencari solusi dari masalah teknik seperti regangan, analisis getaran, tegangan dan kekuatan (Djumhariyanto, 2016).

Matriks yang digunakan dalam FEM, komponen gaya (F_{1x} ; F_{1y} ; F_{2x} ; F_{2y} ; . . . ; F_{nx} ; F_{ny}) bekerja pada berbagai *node* atau titik (1; 2; . . . ; n) pada struktur dan himpunan *displacement* pada *node* yang sesuai (d_{1x} ; d_{1y} ; d_{2x} ; d_{2y} ; . . . ; d_{nx} ; d_{ny}). Keduanya dapat dinyatakan sebagai matriks berikut:

$$\{F\} = \underline{F} = \begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{2x} \\ F_{1y} \\ F_{2y} \\ \vdots \\ F_x \\ F_y \end{Bmatrix} \quad \{d\} = \underline{d} = \begin{Bmatrix} d_{1x} \\ d_{2x} \\ d_{1y} \\ d_{2y} \\ \vdots \\ d_x \\ d_y \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

(Logan, 2007)

Subskrip di sebelah kanan F dan d masing-masing mengidentifikasi *node* dan arah gaya atau *displacement*. Misalnya, F_{1x} menunjukkan gaya pada *node* 1 yang diterapkan dalam arah x. Bentuk yang lebih umum dari matriks yang diketahui biasanya ditunjukkan dengan menggunakan notasi *bracket* []. Misalnya, matriks *element stiffness* dan *global structure* [k] dan [K], masing-masing diwakili oleh matriks persegi sebagai berikut:

$$[k] = \underline{k} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$[K] = \underline{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

(Logan, 2007)

Beban *node* global \underline{F} dan *node displacement* global \underline{d} terhubung melalui *stiffness matrix* global \underline{K} melalui persamaan berikut:

$$\underline{F} = \underline{K} \underline{d} \quad (2.4)$$

Persamaan tersebut dinamakan dengan *global stiffness equation* dan merepresentasikan sejumlah persamaan simultan. Hal tersebut merupakan persamaan dasar yang digunakan dalam *stiffness* dan *displacement method* dalam FEM (Logan, 2007).

2.10 XFEM (Extended Finite Element Method)

XFEM atau *extended finite element* merupakan perkembangan metode elemen hingga atau FEM dimana dengan menggunakan XFEM dapat mensimulasikan kerusakan (Duarte dkk, 2017). XFEM tidak memerlukan *re-*

meshing pada setiap analisis yang membuatnya lebih unggul dari FEM (Fathi dkk, 2021). Dengan teknik XFEM, diskontinuitas seperti retakan dapat disimulasikan (Stuparu dkk, 2016). XFEM dapat memprediksi mekanisme atau metode *Crack* pada suatu komponen, XFEM dapat menganalisa tipe crack seperti *crack growth*, *cracking propagation* (Abaqus, 2011).

2.11 Tegangan

Mempertimbangkan gaya luar pada suatu struktur yang berasal dari pada benda yang akan menyebabkan struktur rangka akan mengalami suatu tegangan. Tegangan merupakan satuan gaya per satuan luas penampang dan dilambangkan dengan σ (Walker, 2018).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad 2.5$$

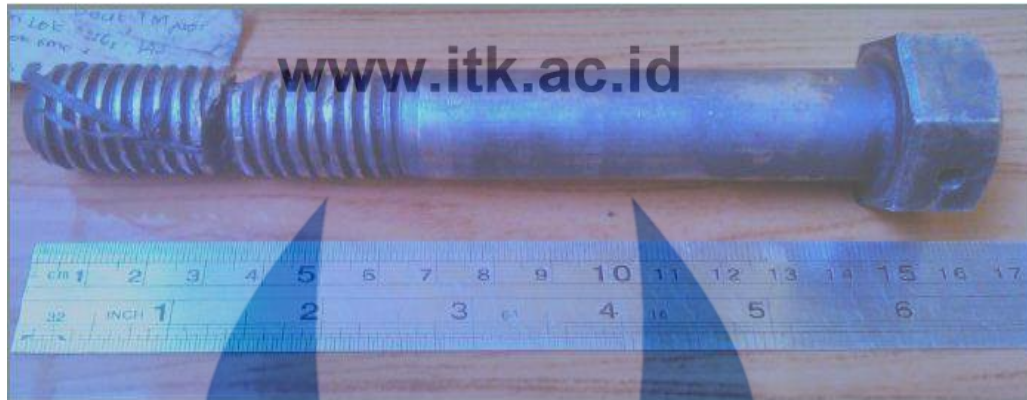
2.12 Safety Factor

Pada suatu elemen atau komponen yang akan dirancang, gagalnya suatu struktur rangka dapat diatasi dengan nilai safety factor yang baik. Beban yang ditahan oleh struktur harus lebih besar dari beban yang terjadi, kemampuan struktur menahan beban disebut kekuatan (Gere, 2004).

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma} \quad 2.6$$

2.13 Penelitian Terdahulu

Pada pelaksanaan penelitian perlu dilakukan pengkajian terhadap penelitian yang dilakukan sebelumnya, bertujuan untuk mendapatkan materi dan referensi yang sesuai. Contoh penelitian terdahulu dengan judul Analisis Kegagalan Baut Pengikat Gearbox Pada Lokomotif Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE). Pada penelitian yang dilakukan komponen yang mengalami kegagalan yaitu baut pengikat traksi pada lokomotif diesel dengan jenis baja SAE J429. Dapat dilihat pada Gambar 2.2 merupakan komponen baut yang mengalami kegagalan patahan.



Gambar 2. 2 Baut yang Mengalami Patah (Aji dan Nugroho, 2014)

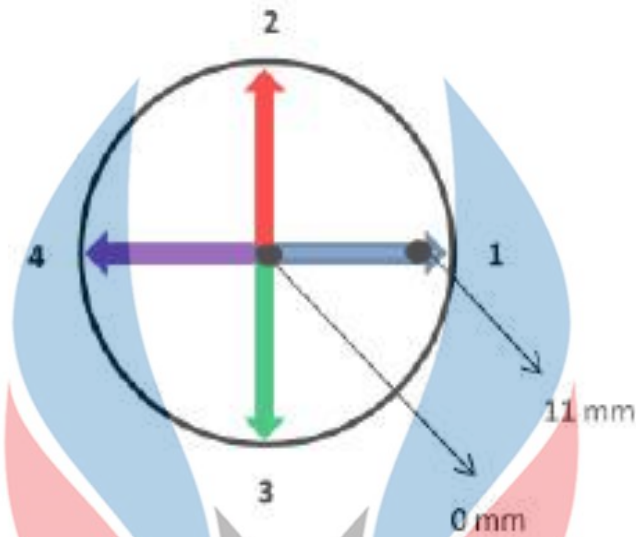
Dalam analisis kegagalan ada beberapa metode penelitian yang dilakukan yaitu analisa, uji komposisi kimia, uji metalografi dan uji kekerasan. Hasil yang didapatkan saat melakukan analisa berupa analisa tegangan, didapatkan bahwa analisa tegangan menyatakan *safety factor* sebesar 3,5 sehingga tegangan yang terjadi pada baut sesuai dengan rancangan dan tegangan dapat diizinkan. Berikutnya analisa visual terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Permukaan Baut yang Patah (Aji dan Nugroho, 2014)

Didapatkan analisa visual bahwa terdapat *root* atau retakan berakar dan adanya *beach marks*, *beach marks* merupakan fitur atau penanda yang sering terjadi pada kegagalan *fatigue*. Selanjutnya hasil pengujian komposisi kimia yang dilakukan dengan membandingkan standar *General Elektrik* (GE) yaitu SAE J429 *Grade 5* didapatkan bahwa baut mempunyai 4 unsur kimia yang utama, Fe, C, P, S. Berikutnya hasil pengujian kekerasan dengan menggunakan mesin *Rockwell*

Hardness Tester tipe HR-150A skala C dengan beban mayor 150kg. Dapat dilihat pada Gambar 2.4 pembagian posisi pengujian.



Gambar 2. 4 Posisi Pengujian Kekerasan (Aji dan Nugroho, 2014)

Diketahui bahwa nilai kekerasan pada posisi 3 mengalami perbedaan kekerasan dengan posisi yang lainnya, kemudian adanya perbedaan kekerasan pada bagian luar baut dengan permukaan baut. Keadaan ini bisa terjadi karena proses manufaktur yang kurang sempurna, seperti proses *quench* dan *temper*. Perbedaan dan hasil uji kekerasan dapat dilihat pada Tabel 2.5

Tabel 2. 5 Hasil Uji Kekerasan

Jarak dari pusat diameter baut	Nilai kekerasan				rata-rata	SAE J429
	posisi 1	posisi 2	posisi 3	posisi 4		
0 mm	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	Bagian dalam 25-34 HRC
3 mm	25	22,4	25,5	24	24,63	
6 mm	25,5	28	31	27	27,88	Bagian luar Max 54 HRC
9 mm	28	29	27,5	28	28,13	
11 mm	29,5	30	26	30	28,88	

*) Aji dan Nugroho, (2014)

Kemudian hasil pengujian metalografi didapatkan bahwa dengan proses manufaktur yang kurang sempurna sehingga fasa yang dihasilkan bukan *martensit* melainkan *ferrite* dan *pearlite*.

Rangkuman penelitian terdahulu yang dapat dijadikan referensi dalam penelitian analisis kegagalan dapat dilihat Pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Rangkuman Penelitian Terdahulu

No	Nama Penulis dan Tahun Publikasi	Hasil
1	(Aji dkk, 2014)	<p>Metode : Analisis, uji komposisi kimia, uji metalografi, uji kekerasan.</p> <p>Hasil : pengujian menyatakan metode kegagalan baut <i>gearbox</i> dikarenakan beban yang berfluktuasi dibawah kemampuan luluhnya 96,71 MPa berlangsung pada waktu lama dan berulang-ulang sehingga mengalami patah lelah dan dengan adanya <i>beach mark</i> yang tampak pada permukaan patahan.</p>
2	(Suripto, 2014)	<p>Metode : Uji Komposisi unsur, uji tarik dan kekerasan, analisa mikroskopis dan makroskopis uji SEM-EDS</p> <p>Hasil : Dari hasil pengujian, analisa makro permukaan pipa ulir sudah terjadi karat. Uji komposisi menunjukkan baja karbon medium. Uji pemeriksaan makro pada ujung ulir terdapat penipisan ketebalan oleh (<i>crevice corrosion</i>), uji mikrostruktur terdapat fasa ferit dan perlit tanpa perlakuan, uji SEM dan EDS memperlihatkan adanya unsur korosif seperti CL- dan S-2 sehingga dapat terjadinya serangan korosi sumuran, terjadinya slek pada ujung ulir disebabkan oleh lapisan pasivasi Fe_2O_3 yang sifatnya mengabsorpsi anion-anion agresif seperti CL- dan S-2.</p>
3	(Malau & Rochiem, 2013)	<p>Metode : Uji SEM-EDX, uji kekerasan, uji metalografi, uji komposisi dengan XRF, analisa macro.</p>

Hasil : penyebab kegagalan komponen *fuel intake manifold* pesawat terbang Boeing 737-500 yaitu

No	Nama Penulis dan Tahun Publikasi	Hasil
3	(Malau & Rochiem, 2013)	Hasil : kegagalan <i>fatigue</i> . Mekanisme kegagalan <i>fuel intake manifold</i> karena proses <i>maintenance</i> pesawat terbang saat membuka dan menutup <i>fueling shut off valve</i> yang mengalami tegangan yang berlebihan. tiap mengalami tegangan retak akan merambat, sehingga akhirnya tidak mampu menerima beban. Awal pembentukan retak terjadi di permukaan <i>fuel intake manifold</i> dan perambatannya ke bagian dalam <i>fuel intake manifold</i> .



www.itk.ac.id