



TUGAS AKHIR - TL141584

**Analisa Kegagalan Komponen Superbolt
pada Girth-Gear Mesin Kiln Pabrik Tuban 3
PT. Semen Indonesia**

Achmad Iqbal Fathoni
NRP. 2712 100 054

DosenPembimbing :
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016

(halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

Failure Analysis Of Component Superbolt In Kiln Machine Girth-Gear At PT. Semen Indonesia Plant Tuban 3

Achmad Iqbal Fathoni
NRP. 2712 100 054

Advisor Lecturer :

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.

**DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICALS
ENGINEERING**

Faculty of Industrial Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2016

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISA KEGAGALAN KOMPONEN SUPERBOLT
PADA GIRTH-GEAR MESIN KILN PABRIK TUBAN 3
PT. SEMEN INDONESIA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik Material dan Metalurgi (ST)
pada
Bidang Studi Korosi dan Kegagalan Material
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknik Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ACHMAD IQBAL FATHONI
NRP. 2712 100 054

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc (Pembimbing 1)

Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 2)



(halaman ini sengaja dikosongkan)

Analisa Kegagalan Komponen Superbolt pada Girth-Gear Mesin Kiln Pabrik Tuban 3 PT. Semen Indonesia

Nama : Achmad Iqbal Fathoni
NRP : 2712 100 054
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M. Sc
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Abstrak

Pada januari 2016 terjadi kegagalan pada komponen superbolt yang patah menjadi 2 bagian pada batang baut yang berulir. Komponen tersebut mengalami kegagalan setelah beroperasi selama 3 bulan yang seharusnya memiliki umur pakai 1 tahun. Sehingga dilakukan penelitian untuk mengetahui penyebab dan mekanisme kegagalan. Berdasarkan uji komposisi, komponen superbolt sesuai dengan standar ASTM A320 L43 yang menggunakan bahan baja AISI 4340 yaitu baja paduan nikel krom molybdenum. Hasil uji kekerasan menunjukkan terjadinya kenaikan nilai kekerasan sebesar 10,4 HRC pada daerah patahan. Berdasarkan analisa titik kritis didapatkan lokasi titik kritis terjadi pada daerah patahan yaitu pada batang baut yang berulir yang kontak dengan mur bagian atas. Hasil analisa tegangan sisa menunjukkan pada daerah patahan besarnya nilai tegangan sisa lebih besar dari yang jauh dari patahan. Adanya pemusatan tegangan yang menyebabkan penggetasan dan kenaikan nilai kekerasan tersebut dapat menyebabkan terjadinya inisiasi retakan yang selanjutnya menyebabkan patah. Berdasarkan analisa fraktografi yang menunjukkan patahan terbagi menjadi daerah *initial crack*, *crack propagation*, dan *final crack* merupakan ciri-ciri dari mekanisme patah lelah (*fatigue*).

Kata kunci: Superbolt, ASTM A320, AISI 4340, fraktografi, *fatigue*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**Failure Analysis Of Component Superbolt In Kiln Machine
Girth-Gear At PT. Semen Indonesia Plant Tuban 3**

Name : Achmad Iqbal Fathoni
NRP : 2712 100 054
Department : *Materials and Metallurgical Engineering, ITS*
Supervisor : Ir. Rochman Rochiem, M. Sc

Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstract

In January 2016, a failure of a component superbolt broken into two parts on the threaded rod bolt. The component failure after operating for three months should have a life time of 1 year. So as to investigate the causes and mechanisms of failure. Based on chemical composition test, components superbolt accordance with ASTM A320 L43 materials using AISI 4340 steel is nickel chrome molybdenum alloy steel. The hardness test results showed an increase in hardness of 10.4 HRC hardness value on the fracture area. Based on the analysis of critical points showed that critical point occurs at the location of the fracture area that is on threaded rod bolt that is in contact with the top of the nut. Results of residual stress analysis showed on the fracture area, the value of the residual voltage is higher than that away from the fracture area. The concentration of stress cause embrittlement and increase in value of hardness can lead to the initiation of cracks which in turn causes the fracture. Based on an fractography analysis that showed fracture divided into initial crack, crack propagation, and final crack regions are the characteristic of a mechanism of fatigue fracture.

Keywords: Superbolt, ASTM A320, AISI 4340, fraktografi, *fatigue*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah atas limpahan rahmat dan karunia Allah SWT, sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir serta menyusun Laporan Tugas Akhir yang berjudul: **Analisa Kegagalan Komponen Superbolt Pada Girth-Gear Mesin Kiln Pabrik Tuban 3 PT. Semen Indonesia.**

Pada kesempatan kali ini penyusun mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua Bapak Achmad Widjaya dan Ibu Nurul Azizah atas semua dukungan moril dan materiil yang selalu dicurahkan.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST, M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
3. Bapak Ir. Rochman Rochiem M.Sc dan Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bekal yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Dr. Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng dan Bapak Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc selaku dosen penguji tugas akhir.
5. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Seluruh karyawan Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
7. Bapak Fredy Agung Prabowo, S.T., Bapak Didik Isdamardi dan Bapak Soni Heri Wicaksono, S.T. selaku pembimbing di PT. Semen Indonesia serta semua pihak dari PT. Semen Indonesia.
8. Pihak-pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu

Penyusun menyadari adanya keterbatasan di dalam penyusunan laporan ini. Besar harapan penyusun akan saran, dan kritik yang sifatnya membangun. Selanjutnya semoga tulisan ini dapat selalu bermanfaat. Aamiin.

Surabaya, Juni 2016

Penyusun

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL.....	i
TITLE	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1 Rotary Kiln	3
2.1.1 Prinsip Kerja Rotary Kiln	4
2.1.2 Komponen pada Rotary Kiln.....	5
2.1.3 Komponen Girth-Gear.....	6
2.2 Baut	7
2.2.1 Superbolt.....	10
2.3 Baja Paduan	13
2.3.1 Pengaruh Unsur Paduan	15
2.3.2 Sifat dan Pemakaian Baja Paduan	16
2.4 Baja Paduan Nikel Kromium Molibdenum	17
2.4.1 Baja AISI 4340.....	18
2.5 Perlakuan Panas.....	21
2.5.1 Hardening	21
2.5.2 Tempering.....	23
2.5.3 Austempering.....	24
2.5.4 Martempering	24

2.6	Analisa Kegagalan	25
2.7	Prosedur Dalam Analisa Kegagalan	27
2.8	Karakteristik Patahan	28
2.8.1	Patah Lelah (<i>Fatigue</i>)	28
2.8.2	Patah Merangkak (<i>Creep</i>)	30
2.8.3	Patah Getas	31
2.8.4	Patah Ulet	33
2.9	Tinjauan Penelitian	37
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		41
3.1	Diagram Alir Penelitian	41
3.2	Metode Penelitian	42
3.3	Alat-alat Penelitian	42
3.4	Bahan Penelitian	44
3.5	Tahapan Penelitian	44
3.5.1	Pengambilan data dan Persiapan Spesimen	44
3.5.2	Pengamatan Visual	44
3.5.3	Uji Komposisi	45
3.5.4	Pengamatan Struktur Mikro (Metalografi)	45
3.5.5	Uji Kekerasan	46
3.5.6	Pengamatan Fraktografi	47
3.5.7	Uji Traik	48
3.5.8	Uji XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>)	49
3.5.9	Proses Austempering	50
3.6	Rancangan Penelitian	51
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		53
4.1	Analisa Data	53
4.1.1	Record Superbolt	53
4.1.2	Hasil OES (<i>Optical Emission Spectroscopy</i>)	54
4.1.3	Analisa Titik Kritis	55
4.1.4	Hasil Perhitungan Analisa Tegangan	56
4.1.5	Hasil Fraktografi	57
4.1.6	Hasil Pengujian Metalografi	64
4.1.7	Hasil Pengujian Kekerasan	67
4.1.8	Hasil Pengujian XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>)	68

4.1.9 Evaluasi Hasil Perlakuan Panas	69
4.2 Pembahasan	72
4.2.1 Faktor-faktor Penyebab Terjadinya Kegagalan	72
4.2.2 Mekanisme Terjadinya Kegagalan	75
4.2.3 Mengatasi Kegagalan	77
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	81
5.1 Kesimpulan	81
5.2 Saran	81
DAFTAR PUSTAKA	xxiii
LAMPIRAN	xxvii

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bagian-bagian pada rotary kiln.....	4
Gambar 2.2 Komponen <i>girth-gear</i> pada kiln.....	7
Gambar 2.3 Bagian-bagian dimensi pada baut	8
Gambar 2.4 Bagian-bagian baut secara umum	8
Gambar 2.5 Kerusakan pada baut (a) putus karena tarikan, (b) putus karena puntiran, (c) tergeser, (d) ulir lumur/dol	9
Gambar 2.6 Jenis-jenis baut penjepit (a) baut tembus, (b) baut tap, (c) baut tanam.....	9
Gambar 2.7 Komponen utama superbolt: <i>washer</i> (1), <i>nut</i> (2) <i>body</i> , <i>jackbolts</i> (3).....	11
Gambar 2.8 Prinsip kerja superbolt.....	12
Gambar 2.9 Diagram fasa terner paduan kromium molibdenum nikel.....	18
Gambar 2.10 Diagram TTT (<i>Time Temperature Transformation</i>) baja AISI 4340	20
Gambar 2.11 Diagram CCT (<i>Continuous Cooling Transformation</i>) baja AISI 4340	21
Gambar 2.12 Temperatur pemanasan pada proses hardening untuk baja	22
Gambar 2.13 Fase-fase kegagalan lelah (<i>fatigue</i>)	29
Gambar 2.14 Foto SEM yang menunjukkan beachmarks dan striasi secara mikro	30
Gambar 2.15 Diagram tegangan-regangan pada material ulet dan getas.....	31
Gambar 2.16 Retakan dengan pola rambatan (a) Transgranular (b) Intergranular	32
Gambar 2.17 Skema perambatan retak yang melewati butir (transgranular) (a). Hasil SEM dari patah secara transgranular (b).....	33

Gambar 2.18 Skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir (intergranular) (a). Hasil SEM dari patah secara intergranular (b).....	33
Gambar 2.19 a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi <i>necking</i> , (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis.....	34
Gambar 2.20 Tahap patahan cup dan cone (a) awal <i>necking</i> ,(b) terbentuknya cavity kecil, (c) pengumpulan <i>cavity</i> hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan	35
Gambar 2.21 Patah ulet (cup and cone) pada aluminium (a). Patah getas pada mild steel (b).....	36
Gambar 2.22 SEM yang menunjukkan <i>spherical dimple</i> karakteristik, patahan hasil beban tarik <i>unixial</i> , 3300x (a). SEM yang menunjukkan <i>spherical dimple</i> karakteristik hasil beban geser, 5000x (b).....	36
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	41
Gambar 3.2 Bagian komponen superbolt yang patah.....	44
Gambar 3.3 Alat untuk pengamatan visual: kamera merk Canon tipe DSLR (a) dan Mikroskop stereo (b).....	45
Gambar 3.4 Mikroskop optik <i>Olympus BX51M-RF</i>	46
Gambar 3.5 Alat uji kekerasan	47
Gambar 3.6 Mesin SEM –EDAX FEI type Inspect S-50	48
Gambar 3.7 Standar spesimen uji tarik (ASTM E8M)	49
Gambar 3.8 PAN analytical.....	50
Gambar 3.9 Proses pemanasan di dalam <i>muffle furnace</i>	51
Gambar 3.10 Proses pendinginan di dalam <i>salt bath</i> pada temperatur 350°C	51
Gambar 4.1 Gambar desain bagian-bagian komponen superbolt: batang baut (a), <i>nut</i> bagian bawah (b), <i>nut</i> bagian atas (c)	53
Gambar 4.2 Gambar modeling komponen superbolt.....	55

Gambar 4.3 Hasil simulasi pembebanan pada komponen modeling: tampak samping (a), dan tampak atas (b)	56
Gambar 4.4 Pembagian daerah: retak awal (a), rambatan retak (b), retak akhir (c)	58
Gambar 4.5 Daerah <i>initial crack</i> diambil dengan <i>stereomicroscope</i> perbesaran 20x	59
Gambar 4.6 Hasil SEM daerah <i>initial crack</i> dengan perbesaran 100x (a) dan perbesaran 1000x (b).....	59
Gambar 4.7 Daerah <i>crack propagation</i> diambil dengan <i>stereomicroscope</i> perbesaran 20x	60
Gambar 4.8 Hasil SEM pada daerah <i>propagation crack</i> perbesaran 500x (a) dan perbesaran 1000x (b) ..	61
Gambar 4.9 Hasil SEM pada daerah <i>propagation crack</i> (a) dan final crack (b) dengan perbesaran 100x	61
Gambar 4.10 Daerah <i>final crack</i> diambil dengan <i>stereomicroscope</i> perbesaran 20x	62
Gambar 4.11 Hasil SEM pada daerah <i>final crack</i> perbesaran 500x (a) dan perbesaran 1000x (b).....	63
Gambar 4.12 Hasil SEM pada permukaan striasi perbesaran 100x (a) dan perbesaran 1000x (b).....	64
Gambar 4.13 Struktur mikro daerah dekat patahan. Dietsa dengan nital. Perbesaran 500x	65
Gambar 4.14 Struktur mikro daerah dekat patahan. Dietsa dengan nital. Perbesaran 1000x	65
Gambar 4.15 Struktur mikro daerah jauh dari patahan. Dietsa dengan nital. Perbesaran 500x.....	66
Gambar 4.16 Struktur mikro daerah jauh dari patahan. Dietsa dengan nital. Perbesaran 1000x.....	66
Gambar 4.17 Pembagian daerah indentasi pada pengujian kekerasan.....	67
Gambar 4.18 Grafik distribusi kekerasan pada komponen superbolt.....	68

Gambar 4.19 Gambar struktur mikro pada baja AISI 4340 hasil Austempering. Dietsa dengan nital. Perbesaran 500x	72
Gambar 4.20 Gambar struktur mikro pada baja AISI 4340 hasil Austempering. Dietsa dengan nital. Perbesaran 1000x.....	72
Gambar 4.21 Grafik distribusi kekerasan pada baja hasil austempering dan komponen superbolt yang patah	78

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi baja paduan rendah	14
Tabel 2.2	Komposisi kimia material AISI 4340	19
Tabel 2.3	Sifat mekanik material AISI 4340	19
Tabel 3.1	Dimensi spesimen uji tarik (ASTM E8M).....	49
Tabel 3.2	Rancangan penelitian	52
Tabel 4.1	Data histori kegagalan pada superbolt	54
Tabel 4.2	Hasil komparasi komposisi kimia	54
Tabel 4.3	Data hasil pengujian kekerasan	67
Tabel 4.4	Data hasil output program rietica	69
Tabel 4.5	Data hasil pengujian tarik.....	70
Tabel 4.6	Data hasil pengujian kekerasan pada baja AISI 4340 yang telah diaustempering	71

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk (dahulu PT. Semen Gresik (Persero) Tbk) merupakan produsen semen yang terbesar di Indonesia dan kapasitasnya terbesar di Asia Tenggara. Semen Indonesia memiliki anak perusahaan PT. Semen Gresik, PT. Semen Padang, PT. Semen Tonasa dan Thang Long Cement. Saat ini kapasitas Semen Indonesia sebesar 31,8 juta ton semen per tahun, dan menguasai sekitar 42% pangsa semen domestik. PT. Semen Indonesia memiliki 4 pabrik utama yaitu Pabrik Tuban 1, Pabrik Tuban 2, Pabrik Tuban 3, dan Pabrik Tuban 4. Dalam menunjang proses produksi semen di PT. Semen Indonesia menggunakan beberapa mesin utama seperti *crusher*, *raw mill*, *rotary kiln*, *cooler*, *coal mill*, dan *packer*. Salah satu mesin yang penting dalam menunjang kinerja pabrik dalam proses produksi semen yaitu *rotary kiln*, dimana mesin ini dianggap sebagai jantung pembuatan semen pada pabrik semen. *Rotary kiln* merupakan suatu tanur berbentuk silinder memanjang horizontal yang digunakan untuk mengkonversi bahan baku menjadi klinker. Apabila terdapat gangguan yang terjadi dalam sistem yang ada dalam unit *kiln* tersebut maka akan menyebabkan terganggu atau bahkan terhentinya proses produksi semen.

Pada Januari 2016 salah satu komponen mesin *kiln* yaitu superbolt yang berfungsi sebagai baut penyambung dua bagian *girth-gear* penggerak *rotary kiln* mengalami patah menjadi 2 bagian pada bagian pada bagian batang baut yang berulir. Kerusakan pada komponen superbolt tersebut mengakibatkan terganggunya kerja mesin *rotary kiln* Pabrik Tuban 3 sehingga menghambat proses produksi semen di PT. Semen Indonesia. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian mengenai analisa kegagalan pada komponen superbolt tersebut agar tidak terjadi lagi kegagalan yang sama.



1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Faktor apa yang menyebabkan kegagalan pada komponen superbolt?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan pada komponen superbolt?
3. Bagaimana mengatasi kegagalan yang terjadi pada komponen superbolt?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisa permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan, yaitu:

1. Pengaruh lingkungan diabaikan.
2. Parameter lain yang tidak diamati dianggap konstan dan sesuai standar operasional.
3. Material komponen stud superbolt bersifat homogen dan dalam keadaan tanpa cacat.
4. Data yang didapatkan sesuai dengan kondisi operasi.

1.4 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan permasalahan yang telah disebutkan, maka tujuan penelitian ini antara lain:

1. Menganalisa faktor penyebab terjadinya kegagalan pada komponen superbolt .
2. Menganalisa mekanisme kegagalan komponen superbolt.
3. Memberikan solusi dari kegagalan yang terjadi pada komponen superbolt.

1.5 Manfaat Penelitian

Pada penelitian ini diharapkan dapat mengetahui penyebab kegagalan dan menjadi acuan pencegahan terjadinya kembali kegagalan yang sama dikemudian hari dan juga menentukan penanganan yang tepat dalam penanggulangan kegagalan pada komponen superbolt.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Rotary Kiln

Rotary kiln atau tanur putar merupakan suatu alat yang berbentuk silinder dan memanjang dengan arah horizontal yang sengaja diletakkan dengan kemiringan tertentu. *Kiln* sangat luas pemakaiannya pada pabrik semen karena merupakan jantung dari proses pembuatan semen untuk mengkonversi bahan baku menjadi klinker. Pada *kiln* terdapat empat bagian daerah yaitu:

1. Daerah kalsinasi (*calcination zone*), dimana pada proses ini bahan baku yang baru masuk kedalam kiln pada ujung bagian *kiln* (*inlet*), material tersebut akan terkalsinasi pada temperatur 1100-1200°C yang mengakibatkan material akan berubah bentuk yang awalnya berupa serbuk-serbuk padat menjadi serbuk-serbuk yang meleleh
2. Daerah transisi (*transision zone*), dimana pada proses ini bahan material yang masuk tadi mendapatkan pemanasan yang lebih tinggi lagi yaitu pada temperatur antara 1200-1300°C yang mengakibatkan bentuk material tadi menjadi hampir cair
3. Daerah pembakaran (*burning zone*), dimana pada proses ini bahan baku material mendapatkan pemanasan secara penuh yang mencapai temperatur 1400-1500°C hingga material tadi benar-benar mencair
4. Daerah pendinginan (*cooling zone*), merupakan proses terakhir pada *kiln* dimana material yang masuk didinginkan agar klinker yang terbentuk tidak lengket

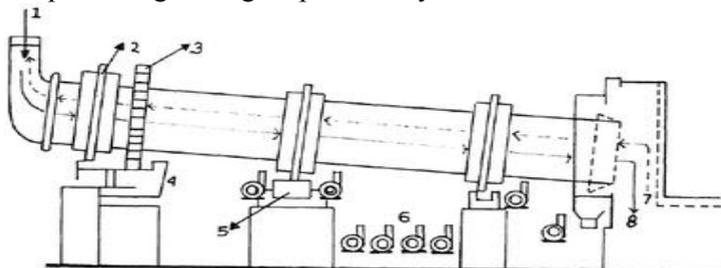
Bahan baku material yang masuk mengalami pembakaran dari temperatur yang lebih rendah menuju temperatur yang lebih tinggi. Proses pembakaran pada *kiln* dilengkapi dengan *gas analyzer* yang berfungsi mengendalikan kadar O₂, CO, dan NO_x pada gas buang jika terjadi kelebihan atau kekurangan, maka jumlah bahan bakar dan udara akan disesuaikan. *Kiln* memiliki tiga penyangga atau *support* yang berfungsi untuk menahan berat



kiln tersebut, diantaranya terdapat di ujung sebelah kanan dan kiri dan juga ditengah, ketiga penyangga ini sangat berperan penting untuk menahan tanur kiln agar tidak jatuh dan di salah satu *support* tersebut terdapat satu motor yang berfungsi untuk memutar *kiln* saat beroperasi. (Firdaus, 2007)

2.1.1 Prinsip Kerja Rotary Kiln

Material bahan baku (*raw material*) masuk kedalam *kiln* melalui *inlet chamber* yang berada diujung *kiln*. Putaran *kiln* berasal dari tenaga gerak yang dihasilkan dari motor melalui *main gear*. Putaran kiln diatur oleh *girth gear* yang berfungsi sebagai pengaman dan mengurangi beban main gear. *Raw material* yang masuk kedalam kiln akan bergerak perlahan di sepanjang kiln karena pengaruh kemiringan dan gaya putar kiln. Pada sisi lain kiln terdapat *burner* yang menghembuskan gas panas hasil pembakaran batu bara, sehingga terjadi kontak panas dan perpindahan panas antara umpan kiln dengan gas panas. Dengan terjadinya kontak panas tersebut maka akan mengakibatkan terjadinya suatu reaksi untuk membentuk komponen semen. Proses pembakaran yang terjadi di dalam kiln berlangsung sampai *raw material* tadi berubah menjadi klinker dan akan keluar menuju *clinker cooler*. Pada proses pembakaran yang terjadi di dalam kiln, material akan melewati empat daerah dengan temperature yang berbeda-beda sehingga akan terjadi reaksi kimia pembentukan senyawa penyusun semen. Pada gambar 2.1 berikut merupakan bagian-bagian pada rotary kiln secara umum:



Gambar 2.1 Bagian-bagian pada rotary kiln (Murdiyati, 2010)



Keterangan gambar:

- | | |
|-------------------------|------------------------------|
| a. <i>Inlet chamber</i> | 5. <i>Speed reducer</i> |
| b. <i>Nose ring</i> | 6. <i>Blower</i> |
| c. <i>Girth gear</i> | 7. Aliran gas |
| d. <i>Main gear</i> | 8. Aliran material ke cooler |

2.1.2 Komponen pada Rotary Kiln

Rotary kiln yang terdapat pada pabrik semen pada umumnya didukung oleh komponen-komponen penunjang sebagai berikut:

1. *Tyre/Live Ring*, merupakan alat yang dipasang pada *shell kiln* dan berputar bersama dengan *kiln*
2. *Supporting Roller* berfungsi untuk menumpu dan sebagai penahan *kiln*, selain itu *supporting roller* juga berfungsi untuk mempermudah *kiln* berputar.
3. *Trust Roller* berfungsi untuk menahan sekaligus untuk mendorong *kiln* yang sedang berputar tidak turun dari posisinya
4. *Fan* digunakan untuk menarik gas panas yang bercampur dengan material.
5. *Burner* merupakan salah satu system pembakaran yang dilakukan didalam *kiln*, cara kerjanya adalah dengan sistem penyemprotan batu bara berbentuk tepung dan disemprotkan menggunakan rotari *blower* ke ruang pembakaran.
6. *Grate Cooler* merupakan tempat pendinginan klinker yang keluar dari kiln dan sekaligus sebagai alat transportasi klinker menuju ke *rooller crusher*.
7. *Girth-gear* merupakan penggerak utama kiln. Cara kerjanya adalah dengan menggunakan sistem roda gigi. Roda gigi tersebut dipasang pada *shell kiln* dan berfungsi sebagai penggerak dari kiln. Arus listrik yang memutar motor penggerak diteruskan ke transmisi roda gigi dan terus memutar roda gigi pinion yang berhubungan langsung dengan *girth-gear kiln*.



2.1.3 Komponen Girth-Gear

Girth-gear merupakan salah satu komponen yang berfungsi untuk menggerakkan alat yang menggunakan sistem rotating dalam ukuran yang besar, seperti *rotary kiln*, *dryer*, dan *horizontal mill*. Pada *kiln*, *girth-gear* dipasang pada bagian luar mengelilingi *shell kiln* dan mentransfer gaya torsi yang diterima dari motor gear menuju *rotary kiln*.

Konstruksi *girth-gear* terdiri dari dua bagian setengah lingkaran yang dihubungkan membentuk lingkaran dengan menggunakan baut dan pin seperti pada gambar 2.2. Tiap sisi dari masing-masing ujung setengah lingkaran *girth-gear* dikunci oleh tiga buah baut dan satu buah dowel. Dengan demikian, seluruh perangkat pengunci komponen *girth-gear* ini terdiri dari 12 buah baut dengan 4 buah dowel. Apabila terdapat salahsatu baut maupun dowel yang mengalami kerusakan maka fungsi *girth-gear* akan terganggu bahkan dapat menyebabkan gangguan pada sistem *kiln*. *Girth gear* terbagi menjadi beberapa segmen yang bentuknya identik sama dengan tujuan bagian komponen tersebut mudah untuk dipasang. Rotasi *kiln* dapat terjadi karena terinduksi dari putaran pinion melalui *girth gear* yang sumber tenaganya berasal dari motor. (Chandra, 2010)

Berikut merupakan data teknis *girth gear* secara umum:

- Diameter *pitch girth gear* sekitar 16 m
- Lebar maksimal 600 mm
- Daya maksimum 4000 kW per pinion
- Kecepatan maksimum *pitch* 6 m/s
- Ketebalan *girth gear* 20, 25, 30, dan 40 mm



Gambar 2.2 Komponen *girth-gear* pada kiln (Sew-Eurodrive)

2.2 Baut

Baut dan mur merupakan salah satu metode sambungan yang banyak digunakan pada berbagai komponen mesin. Jenis sambungan baut dan mur adalah sambungan yang tidak tetap karena dapat dibongkar pasang dengan mudah. Kekurangan dari sambungan baut dan mur adalah pada baut terdapat bagian yang berulir sehingga sering terjadi konsentrasi tegangan pada bagian yang berulir tersebut yang dapat menyebabkan deformasi pada baut. Beberapa keuntungan dalam penggunaan sambungan baut dan mur yaitu (Irawan, 2009):

1. Mempunyai kemampuan yang tinggi dalam menerima beban
2. Kemudahan dalam pemasangan
3. Dapat digunakan untuk berbagai kondisi operasi
4. Efisiensi tinggi dalam proses manufaktur
5. Dibuat dalam standarisasi

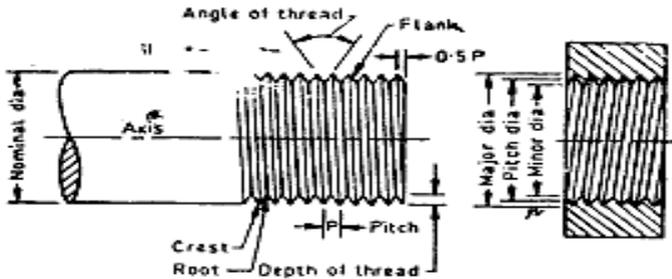
Berikut adalah tata nama yang menunjukkan dimensi pada bagian-bagian baut secara umum yang ditunjukkan pada gambar 2.3 dan gambar 2.4

1. Diameter mayor (d_o) adalah diameter luar baik untuk ulir luar maupun dalam.
2. Diameter minor (d_i) adalah diameter ulir terkecil atau bagian dalam dari ulir.

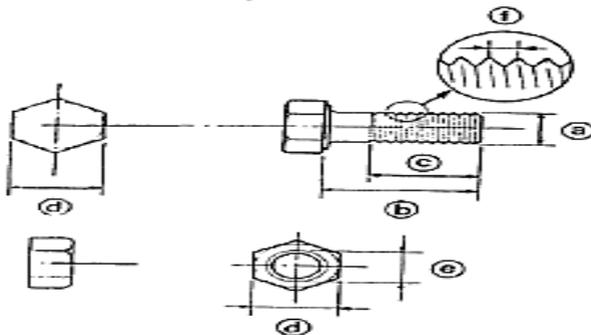


3. Diameter *pitch* (d_p) adalah diameter dari lingkaran imajiner atau diameter efektif dari baut
4. *Pitch* adalah jarak yang diambil dari satu titik pada ulir ke titik berikutnya dengan posisi yang sama.

$$\text{Pitch} = \frac{1}{\text{jumlah ulir per panjang baut}} \quad (2.1)$$
5. *Lead* adalah jarak antara dua titik pada kemiringan yang sama atau jarak lilitan.



Gambar 2.3 Bagian-bagian dimensi pada baut (Irawan, 2009)



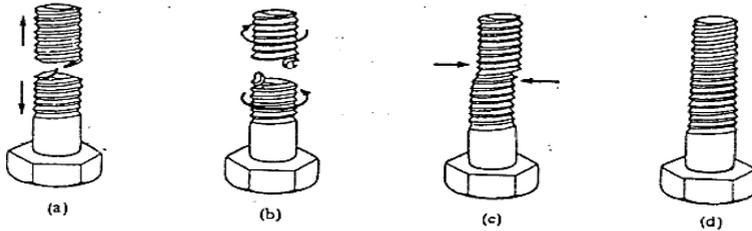
Gambar 2.4 Bagian-bagian baut secara umum (Irawan, 2009)

Keterangan gambar:

- | | |
|-------------------|------------------|
| a. Diameter Baut | d. Lebar kunci |
| b. Panjang Baut | e. Diameter baut |
| c. Daerah Berulir | f. Jarak ulir |



Konsentrasi tegangan pada bagian ulir baut menyebabkan kerusakan pada batang baut. Berikut jenis-jenis kerusakan pada baut yang ditunjukkan pada Gambar 2.5

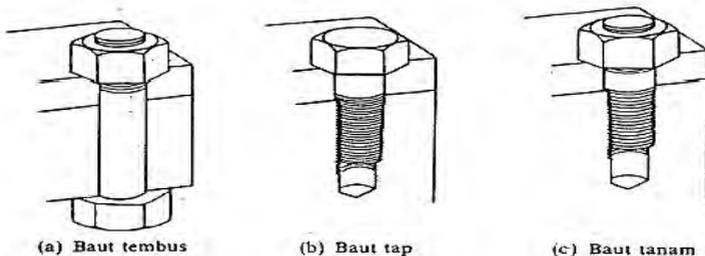


Gambar 2.5 Kerusakan pada baut (a) putus karena tarikan, (b) putus karena puntiran, (c) tergeser, (d) ulir lumur/dol (Handra, 2012)

Sambungan baut dan mur dapat dikelompokkan menurut penggunaannya sebagai berikut:

1. Baut penjepit

- Baut Tembus, untuk menjepit dua bagian melalui lubang dimana jepitan diketatkan dengan sebuah mur.
- Baut Tap, untuk menjepit dua bagian dimana jepitan diketatkan dengan ulir yang di-tap kan pada salah satu bagian.
- Baut Tanam, merupakan baut tanpa kepala dan diberi ulir pada kedua ujungnya untuk dapat menjepit dua bagian yang mempunyai lobang berulir dan jepitan diketatkan dengan sebuah mur.



Gambar 2.6 Jenis-jenis baut penjepit: (a) baut tembus, (b) baut tap, (c) baut tanam (Handra, 2012)

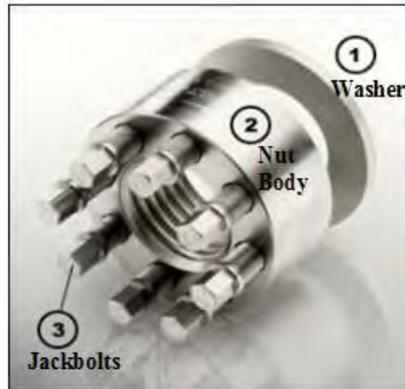


2. Baut untuk pemakaian khusus
 - Baut Pondasi, untuk memasang mesin-mesin atau bangunan pada pondasinya baut ini ditanam pada pondasi beton dan jepitan pada bagian mesin atau bangunan diketatkan dengan mur.
 - Baut Penahan, untuk menahan dua bagian dalam jarak yang tidak tetap.
 - Baut Mata atau Baut Kait, dipasangkan pada benda mesin sebagai kaitan untuk alat pengangkat.
 - Baut T, untuk mengikat benda kerja atau alat pada meja atau dasar yang mempunyai alur T, sehingga letak dapat diatur.
 - Baut Kereta, banyak dipakai pada badan kendaraan bagian persegi dibawah kepala dimasukkan ke dalam lubang persegi yang pas sehingga baut tidak ikut berputar pada waktu mur diketatkan atau dilepaskan.

2.2.1 Superbolt

Superbolt atau *Multi-Jackbolt Tensioner* merupakan komponen dengan fungsi baut dan mur jenis baut penjepit yang menembus dua bagian benda yang disambung. Superbolt merupakan suatu sistem berfungsi sebagai mur yang diputar pada batang baut utama dan akan mengencangkan sambungan pada baut. *Multi-Jackbolt Tensioner* banyak digunakan pada peralatan-peralatan yang penting pada suatu industri, meskipun konsepnya yang sederhana namun memiliki banyak keuntungan pada penggunaannya. (Steinbock, 2005)

Superbolt terdiri dari tiga komponen utama seperti yang terlihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Komponen utama superbolt: *washer* (1), *nut* (2) *body*, *jackbolts* (3) (Nord Lock, 2012)

1. *Ring (washer)*, berbentuk cincin pipih sebagai penghubung antara dua komponen untuk meminimalkan kekendoran pada baut atau mur
2. Badan mur (*nut body*), merupakan silinder berongga yang memiliki alur pada diameter bagian dalam dan berputar di sepanjang batang baut
3. *Jackbolts*, yang terpasang diatas badan mur dan digunakan untuk mengencangkan ikatan sambungan baut dengan mur

Sistem Superbolt tergantung pada hubungan antara beban dengan torsi yang bekerja pada *jackbolt*. Faktor gesekan yang kecil umumnya dibutuhkan untuk mendapatkan kekuatan yang besar dari torsi yang kecil. Rumus umum untuk menghitung torsi untuk menentukan jumlah gaya pada *jackbolts* yaitu:

$$T = F \left[\mu \left(\frac{R}{\cos \beta} + r \right) + \frac{P}{2\pi} \right] \quad (2.2)$$

Dimana:

F = beban (lb)

T = torsi (lb-in)

Superbolt multi-jackbolt tensioner (MJT) membutuhkan gaya beban yang tidak terlalu besar pada diameter baut yang besar dan



membaginya menjadi torsi melalui *jackbolt* yang terpasang pada badan mur (*nut body*). Gambar 2.8 menunjukkan prinsip kerja dari superbolt yang terdiri dari langkah-langkah berikut:



Gambar 2.8 Prinsip kerja superbolt (Nord Lock, 2012)

Keterangan gambar 2.8 sebagai berikut:

1. Dengan menyetatkan *jackbolt* maka akan dihasilkan gaya dorong aksial yang kuat. Gaya dorong ini berlawanan dengan ring (*washer*). Sehingga *jackbolt* memiliki sedikit gesekan dan menciptakan gaya dorong yang kuat dengan torsi yang relatif kecil
2. Beban tersebut akan diteruskan melalui badan mur (*nut body*)
3. *Ring (washer)* digunakan untuk meneruskan beban dan juga melindungi permukaan flens
4. Gaya dorong aksial dari sejumlah *jackbolt* dan gaya reaksi yang berlawanan dari kepala baut membuat gaya penjepit yang kuat pada flens
5. Gaya dorong aksial dari *jackbolt* yang menciptakan gaya reaksi yang kuat pada baut utama



2.3 Baja Paduan

Pada dasarnya baja merupakan paduan yang terdiri dari besi dan karbon dengan kadar karbon yang kurang dari 2%. Baja pada umumnya juga mengandung unsur-unsur lain seperti pengotor pada bijih besi yaitu belerang dan fosfor yang kadarnya ditekan serendah mungkin, dan juga unsur-unsur lain yang digunakan pada proses pembuatan besi/baja seperti silicon dan mangan. Baja dapat dikelompokkan berdasarkan komposisi kimianya yaitu baja karbon dan baja paduan. Baja karbon selain terdiri dari besi dan karbon, juga mengandung mangan kurang dari 0,8%, silicon kurang dari 0,5%, dan unsur lain dengan kadar yang sangat sedikit. Sedangkan baja paduan merupakan baja karbon yang ditambahkan unsur-unsur tertentu dengan tujuan mendapatkan sifat mekanik yang diinginkan. (Avner, 1974)

Unsur paduan sengaja ditambahkan untuk memperoleh suatu sifat tertentu yang diinginkan. Tujuan ditambahkannya unsur paduan adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan hardenability
2. Memperbaiki kekuatan pada temperature biasa
3. Memperbaiki sifat mekanik pada temperature rendah dan tinggi
4. Memperbaiki ketangguhan pada tingkat kekerasan tertentu
5. Menaikkan sifat tahan aus
6. Menaikkan sifat tahan korosi
7. Memperbaiki sifat kemagnitan

Menurut unsur paduannya, baja paduan dapat dibagi menjadi 2 yaitu baja paduan rendah (*low alloy steel*) dan baja paduan tinggi (*high alloy steel*). Baja paduan rendah (*low alloy steel*) adalah baja yang mengandung unsur paduan kurang dari 10%, memiliki kekuatan, ketangguhan, dan keuletan lebih tinggi dibandingkan dengan baja karbon yang memiliki kadar karbon yang sama. Memiliki hardenability dan sifat tahan korosi pada umumnya lebih baik. Aplikasi baja paduan rendah banyak digunakan untuk konstruksi mesin. Baja paduan tinggi (*high alloy steel*) adalah baja yang mengandung unsur paduan sangat tinggi



dan memiliki sifat khusus tertentu misalnya baja tahan karat (*stainless steel*), baja perkakas (*tool steel*), dan baja tahan panas (*heat resisting steel*). (Suherman, 1999)

Menurut AISI/SAE, baja paduan dapat dikelompokkan dengan menggunakan 4 digit dengan 2 digit pertama menunjukkan unsur paduan utama dan 2 digit terakhir menunjukkan kandungan karbon. Pada sistem SAE/AISI, baja paduan rendah diklasifikasikan sebagai berikut:

Tabel 2.1 Klasifikasi baja paduan rendah

Tipe	SAE/AISI
Baja mangan	SAE/AISI 13xx.
Baja nickel	SAE/AISI 23xx dan 25xx.
Baja nickel-chromium	SAE/AISI 31xx, 32xx, 33xx, dan 34xx.
Baja molybdenum	SAE/AISI 40xx dan 44xx.
Baja chromium-molybdenum	SAE/AISI 41xx.
Baja nickel-chromium-molybdenum	SAE/AISI 43xx, 47xx, 81xx, 86xx, 87xx, 88xx, 93xx, 94xx, 97xx, dan 98xx.
Baja nickel-molybdenum	SAE/AISI 46xx dan 48xx.
Baja chromium	SAE/AISI 50xx, 51xx, 50xxx, 51xxx, dan 52xxx.
Baja chromium-vanadium	SAE/AISI 61xx.
Baja tungsten-chromium	SAE/AISI 71xx dan 72xx.
Baja silicon-manganese	SAE/AISI 92xx.
Baja boron	SAE/AISI xxBxx.
Baja timah	SAE/AISI xxLxx.
Baja vanadium	SAE/AISI xxVxx.



2.3.1 Pengaruh Unsur Paduan

Pengaruh unsur paduan yang ditambahkan kedalam baja tergantung pada cara penyebaran unsur paduan tersebut di dalam baja. Umumnya unsur paduan yang terdapat di dalam baja dapat larut di dalam ferrit, dan austenit pada umumnya dapat melarutkan unsur paduan dalam kadar yang lebih tinggi. Selain larut dalam ferrit maupun austenit, unsur paduan juga dapat membentuk senyawa karbida, baik yang kecenderungannya tinggi maupun yang kecenderungannya rendah, bahkan ada yang tidak pernah dijumpai sebagai karbida. Unsur-unsur yang cenderung kuat larut dalam ferrit pada umumnya tidak membentuk karbida dan sebaliknya unsur yang mempunyai kecenderungan kuat untuk membentuk karbida, kelarutan dalam ferrit terbatas.

Selain mempunyai kecenderungan membentuk karbida dan larut dalam ferrit maupun austenite, unsur paduan juga dapat membentuk senyawa nitrida. Unsur paduan selain dapat membentuk suatu fase juga dapat berperan sebagai penstabil fase. Menurut fungsinya unsur paduan dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Pembentuk/penstabil ferrit, yaitu unsur paduan yang cenderung membuat fase ferrit menjadi lebih stabil sampai pada temperatur yang lebih tinggi. Biasanya fase ferrit akan bertransformasi menjadi austenite pada suatu temperature tertentu, dengan ditambahkan unsur paduan penstabil ferrit maka akan menaikkan temperatur transformasi, bahkan bila jumlah unsur itu cukup banyak ferrit tetap stabil sampai mulai terjadinya pencairan. Sebenarnya hampir semua unsur paduan mempunyai sifat ini, kecuali Nikel dan Mangan. Yang terpenting pada kelompok ini adalah Cr, Si, Mo, W, Al.
2. Pembentuk/penstabil austenite, yaitu unsur paduan yang membuat fase austenit menjadi lebih stabil sampai pada temperatur yang lebih rendah. Biasanya fase austenite akan mulai bertransformasi bila didinginkan sampai pada temperature tertentu, dengan ditambahkan unsur paduan



ini temperatur transformasi ini menjadi lebih rendah, bahkan bisa mencapai temperatur kamar. Unsur pada kelompok ini adalah Ni dan Mn.

3. Pembentuk karbida, yaitu unsur paduan yang di dalam baja dapat membentuk senyawa karbida. Unsur-unsur pada kelompok ini (diurut mulai dari yang mempunyai affinity terhadap karbon rendah) adalah Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, Ta, dan Zr. Adanya karbida akan meningkatkan sifat tahan aus, biasanya *alloy tool steel* mengandung unsur pembentuk karbida dengan kadar yang cukup tinggi.
4. Penstabil karbida, yaitu unsur paduan yang membuat senyawa karbida menjadi lebih stabil, tidak mudah terurai dan larut ke dalam suatu fase. Unsur-unsur dalam kelompok ini (diurut dari yang lemah ke kuat) yaitu Co, Ni, W, Mo, Mn, Cr, V, Ti, Nb dan Ta.
5. Pembentuk Nitrida, yaitu unsur yang dapat membentuk senyawa nitrida. Pada dasarnya semua unsur pembentuk karbida adalah pembentuk nitrida bila dilakukan nitriding. Aluminium juga merupakan pembentuk nitride yang cukup kuat. Senyawa nitrida ini dapat menaikkan kekerasan baja karena nitride merupakan senyawa yang keras. (Thelning, 1984)

2.3.2 Sifat dan Pemakaian Baja Paduan

1. Paduan Nikel-Kromium

Paduan yang terdiri dari 20%Cr dan 80%Ni dinamakan nikhrom dan sejak lama telah dipergunakan untuk kawat pemanas listrik. Satu seri dari paduan tahan panas dinamakan nimonik, inkonel. Nikel memperbaiki keuletan dan ketangguhan dikombinasi dengan naiknya hardenability dan sifat tahan aus yang diberikan oleh krom. Dengan kadar karbon rendah baja ini banyak digunakan untuk dicarburising. Krom memberikan sifat tahan aus pada permukaan sedang nikel memberikan ketangguhan pada bagian dalam



2. Paduan Molybdenum

Molybden unsur paduan yang larut dalam austenit maupun ferrit sangat terbatas, pembentuk karbida yang kuat. Meningkatkan hardenability, menaikkan kekuatan dan kekerasan di temperature tinggi. Juga mencegah terjadinya temper brittleness. Baja nikel krom molybden (seri 43xx) memiliki kelebihanannya baja nikel krom ditambah dengan hardenability yang diberikan oleh molybden

3. Paduan Nikel-Tembaga

Paduan Ni-Cu mengandung kira-kira 67%Ni dinamakan logam monel, yang didapat dari pemurnian langsung dari bijih, yaitu suatu paduan alamiah. Kedua paduan tersebut mempunyai kekuatan dan ketahanan korosi yang baik yang dipergunakan untuk komponen-komponen khusus dari kondensor, komponen-komponen pompa, motor, dsb. Paduan Cu-Ni yang mengandung 45%Ni mempunyai tahanan listrik yang tinggi dan koefisien pemuaian yang rendah, paduan itu dinamakan konstantan, dipergunakan sebagai kabel tahanan dan termokopel. (Tata Surdia, 1999)

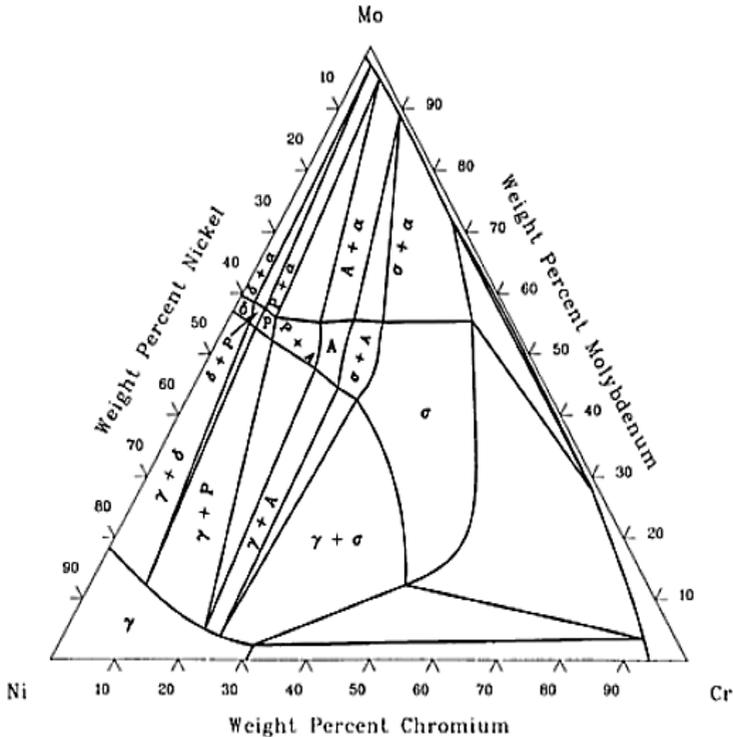
2.4 Baja Paduan Nikel Kromium Molibdenum

Baja paduan rendah (*low alloy steels*) merupakan jenis baja paduan dengan kandungan unsur pemuad yang rendah yaitu kurang dari 10%. Masing-masing unsur pemuad memberikan pengaruh yang kuat pada sifat-sifat bahan baja. Baja paduan ini umumnya mengandung 1,8 %Ni, 0,5-0,8 %Cr dan 0,20 %Mo yang termasuk paduan seri 43xx. Unsur paduan kromium molybdenum nikel menghasilkan diagram fasa terner seperti pada Gambar 2.9

Unsur nikel dan krom akan menghasilkan baja dengan batas elastis tinggi, hardenability yang tinggi disertai dengan ketangguhan dan ketahanan leleh yang baik. Penambahan unsur paduan molybdenum dapat meningkatkan sifat hardenabiliti dan mengurangi resiko penggetasan saat tempering. Kombinasi nikel kromium molybdenum berpengaruh terhadap transformasi dari



austenit ke perlit menjadi terhambat sehingga transformasi terjadi dalam waktu yang cukup lama. Struktur mikro yang terbentuk pada pendinginan udara dari suhu austenit akan menghasilkan struktur mikro berupa bainit karena adanya keterlambatan transformasi.



Gambar 2.9 Diagram fasa terner paduan kromium molibdenum nikel (Gupta, 1990)

2.4.1 Baja AISI 4340

Salah satu baja paduan nikel kromium molybdenum seri 43xx yang sangat umum yaitu baja seri AISI 4340. Baja AISI 4340 banyak digunakan sebagai baja paduan rendah martensitik yang



memiliki kelebihan dari sifat kekuatan, keuletan, dan ketangguhan untuk aplikasi komponen-komponen mesin, namun juga rentan terhadap kegetasan selama proses tempering dalam kisaran suhu tertentu.

Baja paduan rendah AISI 4340 berdasarkan komposisi kimia tergolong dalam jenis baja nikel kromium molibdenum merupakan jenis baja yang banyak digunakan sebagai bahan teknik antara lain sebagai bahan komponen mesin. Baja paduan ini dapat ditingkatkan atau diatur sifat-sifatnya dengan perlakuan panas. Menurut standar, komposisi kimia dan sifat mekanik baja AISI 4340 dalam kondisi normal ditunjukkan pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 berikut: (Anthonius, 2006)

Tabel 2.2 Komposisi kimia material AISI 4340

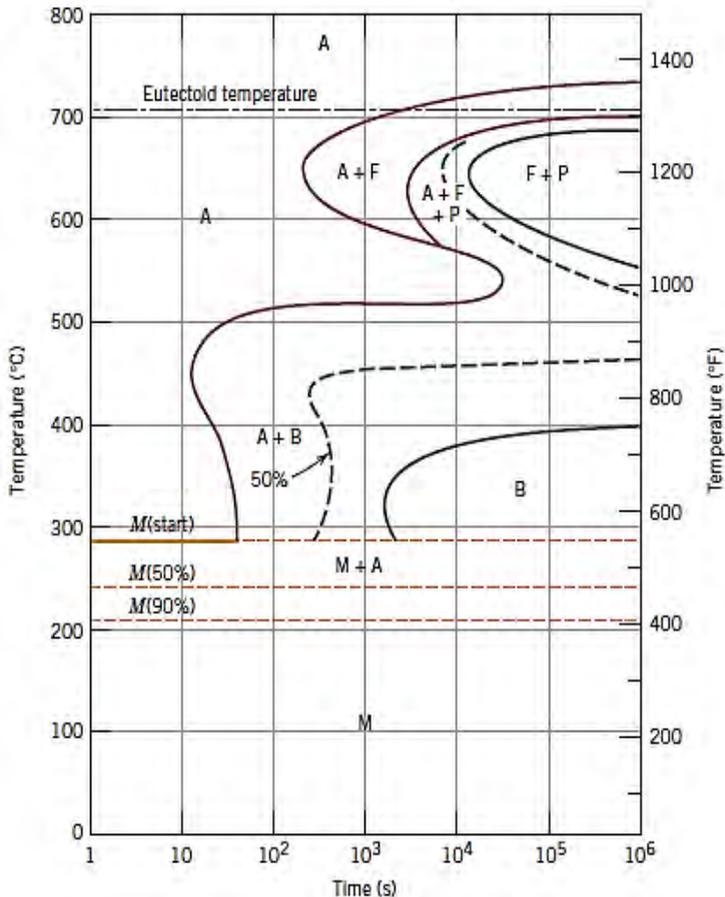
Komposisi kimia	Presentase (%)
C	0.38-0.43
Mn	0.75-1.00
Si	0.15-0.35
Cr	0.70-0.90
Mo	0.20-0.30
P	≤ 0.035
S	≤ 0.04
Ni	1.65-2.00

Tabel 2.3 Sifat mekanik material AISI 4340

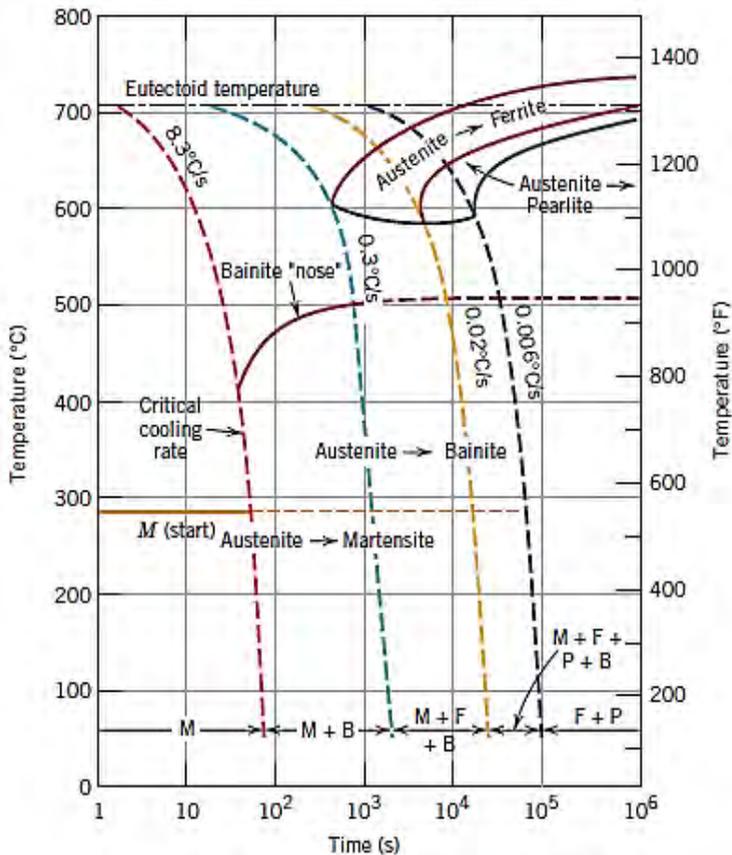
Properties	Metric
Tensile Strength	745.0 MPa (108000 psi)
Yield Strength	470.0 MPa (68200 psi)
Elastic Modulus	190-210 GPa (27557-30458 ksi)
Poisson's Ratio	0.27-0.30
Density	7.85 x 1000 kg/m ³
Hardness	217 HB, 228 HV, 17 HRC
Elongation	22%



Diagram transformasi (diagram TTT dan CCT) yang digunakan sebagai acuan pada rekayasa proses perlakuan baja AISI 4340 seperti pada Gambar 2.10 dan Gambar 2.11. Pada diagram CCT tersebut dapat diketahui laju pendinginan yang diperlukan untuk menghasilkan suatu struktur mikro dan sifat mekanik (kekerasan) tertentu.



Gambar 2.10 Diagram TTT (*Time Temperature Transformation*) baja AISI 4340 (Callister, 2007)



Gambar 2.11 Diagram CCT (*Continuous Cooling Transformation*) baja AISI 4340 (Callister, 2007)

2.5 Perlakuan Panas

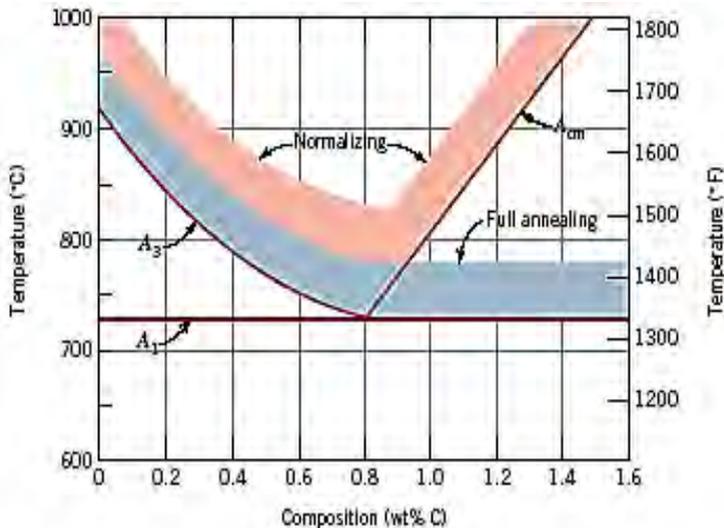
2.5.1 Hardening

Hardening atau pengerasan dilakukan untuk memperoleh sifat tahan aus yang tinggi, kekuatan dan *fatigue limit* yang lebih baik. Pengerasan dilakukan dengan memanaskan baja ke daerah



austenit lalu mendinginkan dengan cepat. Dengan pendinginan yang cepat ini maka akan terbentuk fase martensit yang keras. Temperatur pemanasan, lamanya *holding time*, dan laju pendinginan tergantung pada komposisi kimia dari baja. Dan kekerasan hasil pengerasan tergantung pada tiga parameter tersebut. Tebalnya bagian penampang yang menjadi keras tergantung pada hardenabiliti dan juga laju pendinginan yang terjadi.

Untuk dapat memperoleh martensit yang keras maka pada saat pemanasan harus dicapai struktur austenit, karena hanya austenit yang dapat bertransformasi menjadi martensit. Untuk baja karbon temperatur austenisasi biasanya sama dengan temperatur pemanasan untuk *full annealing* yaitu 30-50°C di atas temperatur kritis A_3 untuk baja hypoeutektoid dan 30-50°C di atas temperatur kritis A_1 untuk baja hypereutektoid. Dengan temperatur pemanasan ini diharapkan kekerasan maksimum dapat tercapai dan butir kristal cukup halus, tidak mengakibatkan getas.



Gambar 2.12 Temperatur pemanasan pada proses hardening untuk baja (Thelning, 1984)



Kekerasan setelah *quenching* tergantung pada besarnya kadar karbon dan unsur paduan dalam austenit, besar butir austenit dan laju pendinginan dari austenit. Besarnya kadar karbon dan unsur paduan dalam austenit akan tergantung pada banyaknya karbida yang larut dalam austenit. Pada saat tercapai temperatur kritis memang struktur sudah seluruhnya austenit, tetapi pada saat itu butir austenit masih halus dan kadar karbon dan unsur paduannya masih rendah dan belum homogen. Untuk itu baja perlu ditahan pada temperatur pengerasan ini beberapa saat. Lamanya *holding time* tergantung pada tingkat kelarutan karbida dan ukuran butir yang diinginkan. Laju pemanasan juga berpengaruh terhadap lamanya *holding time* yang harus diberikan. Dengan pemanasan yang sangat lambat, baja hypoeutektoid sudah mencapai struktur austenit yang homogen sesaat setelah mencapai temperatur kritis atasnya, sehingga tidak diperlukan lagi *holding time* dan dapat langsung diquench karena selama waktu pemanasan mendekati temperatur austenisasi sudah terjadi kelarutan karbida kedalam austenit dan difusi karbon dan unsur paduannya. Apabila laju pendinginan makin tinggi perlu diberi *holding time* yang lebih panjang atau temperatur austenisasinya dinaikkan.

Untuk mencapai struktur martensit maka austenit yang terjadi harus didinginkan cukup cepat, setidaknya mencapai laju pendinginan kritis dari baja tersebut. Untuk itu baja harus didinginkan pada suatu media pendingin. Ada sejumlah media pendingin yang biasa digunakan yaitu air, minyak, udara, dan garam cair. (Thelning, 1984)

2.5.2 Tempering

Baja yang dikeraskan dengan *quenching* menjadi martensit akan sangat keras tetapi juga getas. Dengan memanaskan kembali martensit ini akan bertransformasi menjadi berbagai produk transformasi yang lebih ulet/tangguh. *Tempering* harus segera dilakukan, biasanya sebelum baja mencapai temperature kamar, sekitar 50-75°C. *Tempering* dilakukan dengan memanaskan kembali martensit ke suatu temperatur dan membiarkan beberapa



saat lalu didinginkan kembali. Tingginya temperatur pemanasan dan lamanya *holding time* sangat menentukan kekerasan yang terjadi setelah *tempering*.

Kekerasan sesudah tempering tidak hanya dipengaruhi oleh temperatur, tetapi juga waktu tempering. Kekerasan yang sama akan diperoleh bila *tempering* dilakukan dengan *tempering* parameter yang sama. Dalam memilih temperatur tempering juga perlu diingat kemungkinan terjadinya penurunan ketangguhan akibat *tempering* pada suatu temperatur tertentu. (Thelning, 1984)

2.5.3 Austempering

Austempering ini adalah proses perlakuan panas yang dikembangkan dari *isothermal transformation* diagram untuk mendapatkan struktur yaitu 100 persen bainit. Keuntungan yang didapatkan dari proses austempering yaitu dapat meningkatkan keuletan, ketangguhan, kekuatan dan dapat mengurangi distorsi akibat proses *machining*. Austempering dilakukan dengan pemanasan awal dengan temperatur austenisasi yang diikuti dengan pendinginan cepat dalam *salt bath*. Adapun jenis *salt-bath* yang digunakan adalah yang memiliki kandungan *sodium* ($NaNO_3$), *barium* ataupun *potassium nitrate* (KNO_3) dibentuk dengan range bainit (antara 400°F dan 800°F) dan ditahan pada temperatur ini selama selang waktu antara 30 menit hingga 3 jam, kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginan pada temperatur kamar. (Lubis, 2009)

2.5.4 Martempering

Martempering merupakan proses perlakuan panas dengan celup terputus yang diikuti dengan proses agar terbentuk martensit temper. Dalam proses ini baja yang telah diaustenisasi dicelup dengan cepat kedalam lelehan garam atau minyak yang memiliki temperatur sekitar 200-400°C. Pendinginan cepat terjadi tanpa memotong hidung kurva transformasi. Hal ini dilakukan untuk menghindari terbentuknya ferit dan sementit. Temperatur ditahan sedikit diatas temperature pembentukan



martensit, temperature mulai terbentuknya fasa martensit untuk beberapa lama agar diperoleh distribusi temperature yang seragam pada seluruh bagian benda kerja. Kondisi ini memungkinkan transformasi berlangsung dengan serempak, sehingga retak karena celup cepat dapat dihindari. Selanjutnya pendinginan diteruskan dengan lebih lambat menggunakan udara dingin sampai temperatur ruang untuk mencapai transformasi martensit. Dekomposisi fasa yang terjadi selama celup cepat adalah austenite menjadi martensit. Proses selanjutnya adalah temper dengan memanaskan baja sampai temperature tertentu sesuai dengan sifat baja yang diinginkan. Kemudian didinginkan dengan udara mencapai temperature ruang. Dekomposisi fasa yang terjadi selama penemperan yaitu martensit berubah menjadi martensit temper. (Thelning, 1984)

2.6 Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan adalah suatu proses yang dilakukan untuk menganalisa suatu sistem atau suatu komponen yang telah mengalami kegagalan dan mencari penyebab terjadinya kegagalan tersebut agar dapat ditanggulangi kegagalan yang telah terjadi serta mencegah kegagalan yang dapat terjadi berikutnya. Dalam melakukan analisa kegagalan ini dibutuhkan pemahaman tentang berbagai aspek seperti fungsi dari komponen pada mesin, kondisi operasi yang terjadi di lapangan, dan gejala yang terjadi menjelang terjadinya kegagalan. Untuk mengetahui penyebab kegagalan dilakukan pengumpulan data dari komponen yang mengalami kegagalan. Sampel yang diambil sebaiknya dapat memberikan gambaran mengenai kegagalan yang terjadi.

Kegagalan pada suatu komponen mesin dapat terjadi dalam berbagai bentuk seperti misalnya yielding, retak, patah, pitting, korosi, aus, dan lain-lain. Penyebab kegagalan juga bermacam-macam seperti misalnya salah design, beban operasional, kesalahan maintenance, cacat material, temperatur, lingkungan, waktu, dan lain-lain. Beban mekanis juga dapat mengakibatkan kegagalan yaitu beban dalam bentuk gaya, momen, tekanan, dan



beban mekanis lainnya. Kegagalan akibat beban mekanis adalah berhubungan dengan jenis tegangan yang terjadi pada komponen mesin seperti tegangan tarik, tegangan tekan, atau tegangan geser.

Suatu komponen dapat dikatakan mengalami kegagalan apabila mengalami hal-hal sebagai berikut:

1. Komponen tersebut sudah tidak berfungsi sama sekali.
2. Telah memenuhi umur pakainya
3. Masih berfungsi tetapi membahayakan.
4. Masih berfungsi tetapi tidak optimal (prestasi peralatan tidak sebagaimana mestinya atau bila komponen tersebut tidak dapat berfungsi seperti yang dirancang).
5. Masih berfungsi tetapi umunya sudah terbatas (terdapat retakan atau cacat permukaan lainnya).

Menurut standar ANSI/API 689 penyebab kegagalan suatu komponen dapat disebabkan oleh salah satu atau lebih dari aspek dibawah ini:

1. Aspek desain, seperti kekurangan peralatan pada saat perancangan, kekurangan dimensi/kapasitas, dan kesalahan pemilihan material. Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin misalnya analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat *overload*, kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi hitungan yang dilakukan, perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
2. Aspek fabrikasi atau pemasangan (instalasi), seperti kegagalan pada proses produksi dan kesalahan pada saat pemasangan. Aspek operasi atau perawatan, kegagalan berhubungan pada saat operasi atau saat perawatan peralatan, kondisi pemakaian yang tidak cocok seperti tekanan melebihi batas ketentuan. Kondisi kerja yang tidak tepat biasanya terjadi seperti pemakaian produk yang tidak tepat, penggunaan produk yang melebihi masa penggunaan, kondisi operasi yang tidak stabil.



3. Aspek manajemen, kegagalan berhubungan dengan pada prosedur, spesifikasi, gambar, laporan, dan lain-lain . Kesalahan manajemen juga terjadi pada perencanaan organisasi yang buruk.

Analisa kegagalan dilakukan untuk menentukan faktor-faktor penyebab yang telah menyebabkan kerugian yang tidak diinginkan dari suatu fungsi. Untuk jangka pendek diharapkan dapat memperbaiki desain dan memperbaiki proses serta metode fabrikasi, sedangkan untuk jangka panjangnya dapat dipakai pengembangan material dan sebagai metode untuk evaluasi dan memprediksi performansi material serta untuk memperbaiki sistem pemeliharaan. Ada banyak jenis cacat yang dapat terjadi, seperti kesalahan desain, material yang buruk, atau kesalahan dalam proses produksi.

Analisa kegagalan dapat dilakukan dengan penelitian pada komponen-komponen yang telah mengalami kegagalan. Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci pada proses analisa kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makrokopis dan mikrokopis harus dilaksanakan secara bertahap. Selain itu pengujian mekanik juga diperlukan karena secara umum kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen. (Akuan, 2008)

2.7 Prosedur Dalam Analisa Kegagalan

Dalam melakukan analisa suatu kegagalan terdapat tahapan-tahapan yang biasanya dilakukan agar analisa yang dilakukan berhasil dan akurat. Langkah awal yang dilakukan dalam analisa yaitu mengumpulkan informasi seperti desain, komponen, jenis material, fungsi komponen dan juga memilih sampel yang akan diuji. Setelah melakukan langkah awal tersebut kemudian dapat diikuti dengan penilaian kerusakan dan kondisi yang menyebabkan kegagalan lalu dilakukan langkah-langkah sebagai berikut (Mumford, 1992):



1. Memilih, mengidentifikasi, membersihkan, dan mempersiapkan benda uji atau sampel yang akan digunakan untuk dilakukan pengujian selanjutnya
2. Pemeriksaan makroskopis dan menganalisa permukaan patahan
3. Pemeriksaan secara mikroskopis yaitu dengan mengamati struktur mikronya
4. Menganalisa tegangan yang bekerja pada objek penelitian
5. Menganalisa mekanika terjadinya patahan
6. Pengujian sifat-sifat mekanik material, biasanya dengan pengujian kekerasan sudah cukup untuk mengetahui sifat-sifat mekanik material
7. Menentukan mode kegagalan yang mungkin terjadi pada objek analisa

2.8 Karakteristik Patahan

Patahan dapat diklasifikasikan berdasarkan proses patah yang ditinjau dari penyebab dari patahan yaitu patah ulet, patah getas, patah lelah (*fatigue*), dan patah merangkak (*creep*). Jenis-jenis patahan tersebut memiliki karakteristik tersendiri. Berikut adalah karakteristik dasar untuk membedakan jenis patah lelah, patah merangkak, jenis patah getas, dan patah ulet pada skala makro maupun mikro (*ASM Handbook Committee Volume 12, 1992*):

2.8.1 Patah Lelah (*fatigue*)

Kelelahan (*fatigue*) adalah salah satu jenis kegagalan (patah) pada komponen akibat beban dinamis (beban yang berulang-ulang). Mekanisme patah lelah terdiri atas 3 tahap kejadian yaitu:

1. Tahap awal terjadinya retakan (*crack inisiation*)
2. Tahap penjalaran retak (*crack propagation*)
3. Tahap akhir (*final fracture*)

Karakteristik makroskopis dari kelelahan logam adalah tidak adanya deformasi plastis secara makro dan terdapat garis-garis pantai (*beach marks*) pada permukaan patahnya. Tanda *beach marks* yang merupakan tanda penjalaran retakan, mengarah tegak



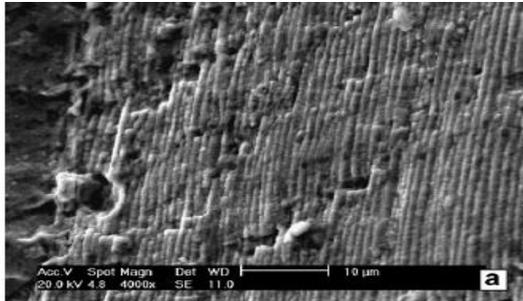
lurus dengan tegangan tarik dan setelah menjalar sedemikian hingga penampang yang tersisa tidak mampu lagi menahan beban yang bekerja, maka akhirnya terjadilah patah akhir atau patah statik. Karakteristik mikroskopis dari kelelahan logam yaitu pada permukaan patahan terdapat striasi (*striations*) apabila diamati dengan mikroskop electron dan permukaan patahan memperlihatkan jenis patah transgranular (memotong butir).

Kelelahan logam diawali dengan pembentukan awal retak dan dilanjutkan dengan penjalaran retakan hingga komponen mengalami patah. Lokasi awal retak pada komponen atau logam yang mengalami pembebanan dinamis atau siklik adalah pada titik daerah dimana memiliki kekuatan yang paling minimum atau pada titik daerah dimana mengalami tegangan yang paling maksimum. Tahapan pembentukan awal retak dan penjalaran retakan dalam mekanisme kelelahan logam, membutuhkan waktu hingga umur lelah dari komponen atau logam. Fase-fase yang terjadi selama kejadian kelelahan logam dapat dilihat seperti pada gambar 2.13 berikut (Akuan, 2008):



Gambar 2.13 Fase-fase kegagalan lelah (*fatigue*)

Beachmarks pada patah lelah dapat diketahui melalui pengamatan secara makro menggunakan *stereomicroscope*, dan tanda striasi hanya dapat dilihat dengan alat *SEM fractography* (Gambar 2.14). Tanda *beachmarks* dan striasi ini dapat terjadi akibat dari beban fluktuasi yang bekerja pada benda.



Gambar 2.14 Foto SEM yang menunjukkan beachmarks dan striasi secara mikro (Poursaedi, 2005)

2.8.2 Patah Merangkak (*creep*)

Creep atau bahasa lainnya merambat atau merangkak, merupakan kecenderungan suatu logam untuk mengalami deformasi plastis yang besarnya berubah sesuai dengan fungsi waktu, pada saat bahan atau komponen tersebut tadi menerima beban yang besarnya relatif tetap. *Creep* merupakan deformasi yang menyebabkan bertambahnya regangan secara plastis. Sehingga patah *creep* (mulur) adalah deformasi permanen pada material fungsi terhadap waktu jika material tersebut diberikan beban (tegangan) konstan.

Mulur terjadi sebagai akibat adanya deformasi lambat dari suatu material/logam/komponen yang bekerja dengan kondisi beban (*load*) dan atau suhu tinggi yang konstan. Mulur dapat terjadi pada berbagai suhu, namun mulur ideal terjadi pada suhu antara 0,4 sampai 0,6 dari titik lebur materialnya. Dengan kata lain bila suatu komponen beroperasi dengan beban dan atau suhu tinggi yang konstan, maka komponen tersebut akan mengalami mulur. Ini disebabkan komponen tersebut secara bertahap mengalami deformasi plastis. Apabila batas regangan maksimum terlampaui, komponen akan patah/putus.

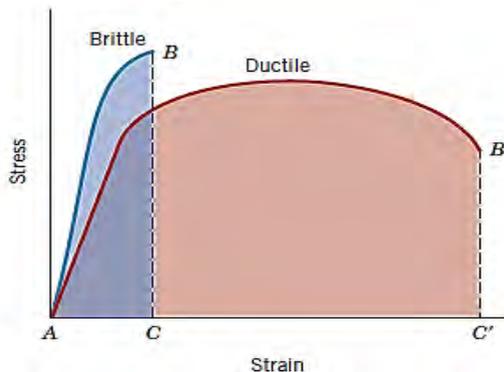
Ada 2 macam pengujian sifat mulur yaitu pengujian mulur sampai putus (*creep rupture test*), dimaksudkan untuk mengetahui ketahanan logam terhadap beban dan atau suhu tinggi



yang konstan dengan cara mengetahui sifat mulur logam (komponen) serta mengetahui mekanisme yang terjadi pada saat logam (komponen) tersebut putus. Sedangkan stress rupture selain disertai oleh deformasi plastis juga ditandai oleh adanya retak intergranular yang banyak ditemui di sekitar patahan. Kemudian pengujian mulur (*creep test*) tidak sampai putus, dimaksudkan untuk mengetahui ketahanan logam terhadap beban dan atau suhu tinggi yang konstan, ditinjau dari laju mulurnya. (Nitiswati, 1999)

2.8.3 Patah Getas

Patah getas terjadi pada baja yang memiliki kekerasan tinggi karena tidak mampu menahan beban dan dengan keelastisitasan yang rendah maka baja tersebut akan mengalami patah tanpa melakukan elastisitas terlebih dahulu karena elastisitas diabaikan dan langsung patah pada kondisi plastis pada tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh material tersebut seperti yang ditunjukkan kurva tegangan-regangan pada material getas pada gambar 2.15.

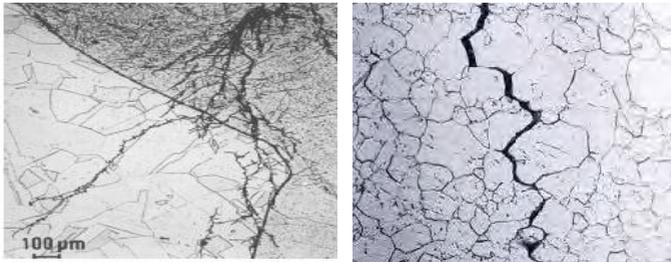


Gambar 2.15 Diagram tegangan-regangan pada material ulet dan getas (Callister, 2007)



Material getas mempunyai kemampuan berdeformasi plastis yang rendah atau bahkan sama sekali tidak berdeformasi secara plastis. Proses patahan material getas ditandai dengan tegangan lokal yang meningkat pada ujung retak sehingga retak menjalar dengan sangat cepat. Karakteristik patah getas memiliki ciri-ciri permukaan patahan yang datar dan tegak lurus terhadap arah beban, serta tidak adanya deformasi plastis sebelum benda mengalami patah. Secara mikro patah getas menunjukkan karakteristik sebagai berikut berikut:

- a. Patah transgranular yaitu patah yang rambatan retaknya melintasi butiran, dikenal dengan nama *cleavage*, ditunjukkan pada gambar 2.16 (a)
- b. Patah intergranular yaitu patahan yang rambatan retaknya melewati batas butir, dikenal dengan nama *intergranular embrittlement*, ditunjukkan pada Gambar 2.16 (b)

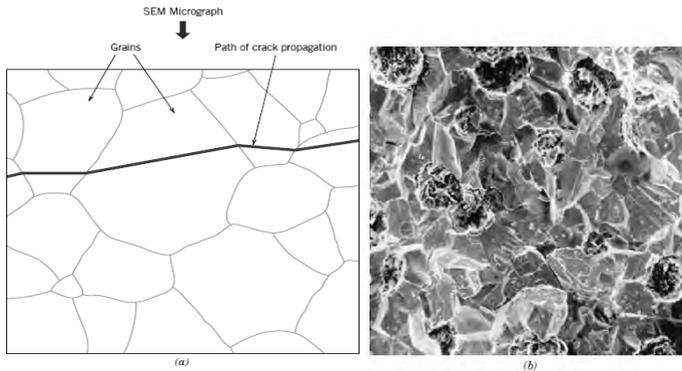


Gambar 2.16 Retakan dengan pola rambatan (a) Transgranular (b) Intergranular (Colangelo, 1989)

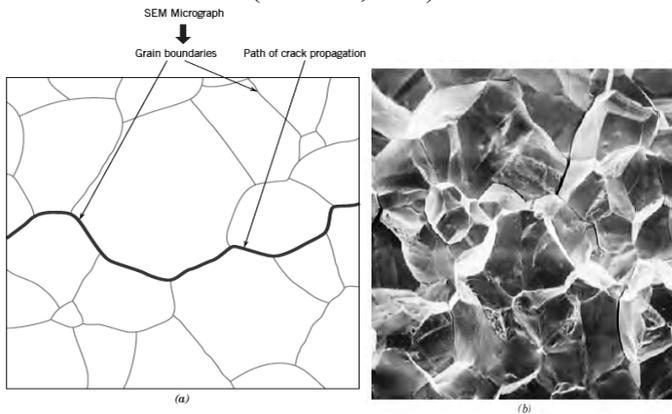
Karakteristik patah getas yaitu permukaan patahnya datar dan tegak lurus terhadap permukaan benda. Struktur patahan berbentuk granular atau kristalin dan merefleksikan cahaya sehingga terlihat mengkilap. Pertumbuhan retak menjalar dengan cepat. Retak/ patahan merambat sepanjang bidang-bidang kristalin yang membelah atom-atom material (*transgranular*). Untuk hasil pengamatan menggunakan SEM, dapat terlihat jelas untuk retak yang melewati batas butir (*transgranular*) dan retak



yang terjadi sepanjang batas butir (*intergranular*) pada gambar 2.17 dan 2.18.



Gambar 2.17 Skema perambatan retak yang melewati butir (transgranular) (a). Hasil SEM dari patah secara transgranular (b) (Callister,2007)



Gambar 2.18 Skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir (intergranular) (a). Hasil SEM dari patah secara intergranular (b) (Callister,2007)

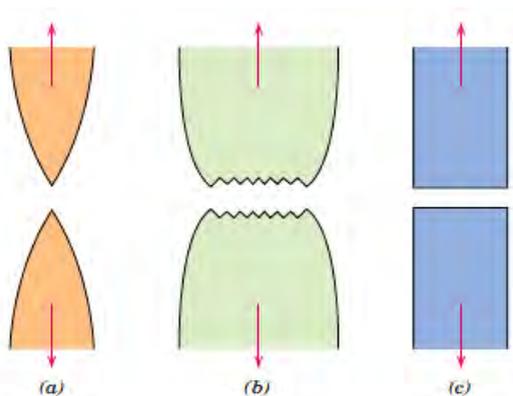
2.8.4 Patah Ulet

Logam ulet biasanya menunjukkan patahan dengan deformasi plastik yang besar dengan penyerapan energi yang tinggi sebelum



patah. Secara umum patah ulet terjadi dengan deformasi plastis yang cukup besar seperti yang ditunjukkan diagram tegangan-regangan pada gambar 2.15. Proses patahannya ditandai dengan pembentukan small cavity diujung retak, serta retak memanjang atau menjalar bertahap.

Permukaan patah ulet memiliki ciri khas pada tingkat makroskopik dan mikroskopik. Pada gambar 2.19 menunjukkan karakteristik profil patahan ulet secara makro. Karakteristik patahan yang ditunjukkan oleh gambar 2.19 (a) bentuk patahan pada material lunak seperti emas, metal, polimer dan inorganik gelas pada temperature yang relatif tinggi. Gambar 2.19(b) menunjukkan profil patahan pada material ulet akibat tegangan tarik dimana patahan didahului oleh adanya necking.

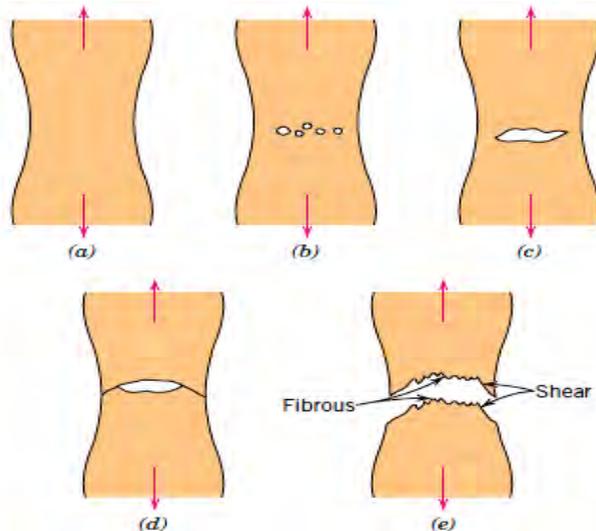


Gambar 2.19 a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi *necking*, (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis (Callister,2007)

Proses patahan ulet dari material terjadi dalam beberapa tahap. Pertama, setelah terjadi pengecilan luasan setempat (*necking*), *cavities* kecil atau *microvoid* terbentuk di dalam struktur material. Dengan bertambahnya deformasi akibat tegangan maka *microvoid* membesar dan berkumpul menjadi satu yang kemudian *coalesce* membentuk retak secara elips yang



memiliki panjang tegak lurus dari arah pembebanan. Retak kemudian tumbuh sejajar dengan arah pembebanan, akhirnya patahan terbentuk oleh perambatan retak yang cepat disekitar area *necking* seperti gambar 2.20 oleh deformasi geser pada sudut disekitar arah tegangan tarik dimana sudut ini merupakan tegangan geser tertinggi.



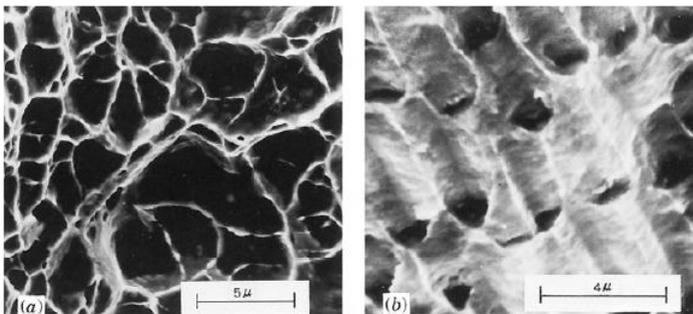
Gambar 2.20 Tahap patahan cup and cone (a) awal *necking*, (b) terbentuknya cavity kecil, (c) pengumpulan *cavity* hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan (Callister,2007)

Terkadang sebuah patahan mempunyai karakteristik kontur seperti *cup* dan *cone* karena salah satu permukaan patahan menyerupai *cone*. Spesimen yang mempunyai bentuk patahan seperti ini berbentuk fibrous yang tidak teratur dimana hal ini menandakan deformasi plastis. Gambar 2.21 menunjukkan patahan *cup* dan *cone* dan perbedaan patah getas pada *mild steel*.



Gambar 2.21 Patah ulet (*cup and cone*) pada aluminium (a). Patah getas pada mild steel (b) (Wulpi,1999)

Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjalaran retakan mikro (*microvoids coalescence*) pada gambar 2.22.



Gambar 2.22 SEM yang menunjukkan *spherical dimple* karakteristik, patahan hasil beban tarik *uniaxial*, 3300x (a). SEM yang menunjukkan *spherical dimple* karakteristik hasil beban geser, 5000x (b) (Callister,2007)



2.10 Tinjauan Penelitian

Penelitian yang dilakukan, berlandaskan beberapa kajian penelitian sebelumnya yang juga membahas mengenai kegagalan yang terjadi pada baut. Trisna Putra (2012) melakukan penelitian mengenai perambatan retak (*crack propagation*) pada TAP Bolt UNC – Oil Coated ASTM 325 dengan metode makrofraktografi, mikrofraktografi, dan metalografi pada penampang melintang dan permukaan patahan baut. Pada gambaran patahan makrofraktografi memperlihatkan kontur permukaan patahan memiliki alur ketidakteraturan (*beach mark*). Pada pengamatan mikrostruktur terlihat fasa martensit temper. Dan disimpulkan bahwa kegagalan terjadi dari sisi terluar ulir dimana cacat pada lapisan karbida sisi yang penjalaran retaknya merambat ke daerah lokalisasi batang ulir. Penumpukan kandungan phosphor sebesar 9,7% dan daerah kandungan unsur aluminium sebesar 13%, memicu degradasi kekuatan baut hingga menurunkan interaksi tarikan sesama batas butir atom. Secara makroskopik dapat diprediksi awal penjalaran retak dengan mencermati kontur permukaan patahan baut (*beach mark*), namun secara mikroskopik dimana titik awal penjalaran retak lebih jelas dan terungkap dengan nyata (*initial crack propagation*).

Alfredo Ibrahim (2013) melakukan penelitian analisa kegagalan pada baut pengunci pada kompartemen *rawmill* pabrik PT. Semen Padang. Metode analisa yang dilakukan yaitu uji komposisi, uji kekerasan, pengamatan makro dan mikro. Dari hasil analisa dapat disimpulkan bahwa kekerasan yang tinggi pada batang permukaan baut menyebabkan baut menjadi getas sehingga menimbulkan crack dan retakan akibat beban impact, retakan ini menyebabkan material baut tidak sanggup menahan beban cyclic sehingga akhirnya mengalami kegagalan leleh. Jadi factor yang menyebabkan terjadinya kegagalan material baut tersebut adalah fatigue fracture.

Sh. Molaei (2015) dalam penelitiannya yang berjudul “A Failure Analysis Study on the Fractured Connecting Bolts of a Filter Press” meneliti penyebab utama dari kegagalan yang terjadi



pada baut dari system piston silinder. Tegangan yang diterima baut selama beroperasi dianalisa dan penyebab kegagalan ditentukan dari analisa fraktografi. Permukaan baut menunjukkan karakteristik patah leleh dan penyebab patahan yaitu perambatan retak leleh yang progresif. Hal tersebut disebabkan kemungkinan pengetatan yang lemah pada baut untuk penyambungan. Menurut hasil analisa dapat disimpulkan bahwa baut yang patah disebabkan oleh mekanisme fatigue.

Ilham Khoirul Ibad (2014) melakukan penelitian analisa kegagalan pada baut piston Vvcp gas kompresor untuk mengetahui penyebab kegagalan tersebut dengan metode pengamatan makro, uji SEM, uji tarik, uji hardness, uji komposisi, dan metalografi. Lalu dilakukan juga perhitungan tegangan yang diterima baut. Dari pengamatan makro terlihat indikasi retak, daerah perambatan retak dan daerah patah akhir. Dalam uji komposisi terdapat beberapa unsur yang seharusnya tidak ada dalam baut. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa baut mempunyai kekuatan tarik yang tinggi melebihi spesifikasi yang seharusnya begitupun dari hasil uji hardness nilai kekerasannya juga lebih tinggi dari yang seharusnya. Hasil metalography menunjukkan bahwa struktur mikro yang terbentuk yaitu temper martensit hal ini sesuai dengan standardnya sedangkan hasil uji SEM menunjukkan di daerah perambatan retak terdapat striasi dan di daerah patah akhir morfologinya terlihat kasar. Dalam perhitungan analisa tegangan menunjukkan baut masih aman terhadap kriteria kegagalan fatigue akibat beban kompresi tetapi dalam perhitungan teori buckling baut tidak sesuai. Dari hasil investigasi baut mengalami kegagalan dengan tipe patahan unidirectional bending, disebabkan tidak mempunya baut menerima beban kompresi sehingga terjadi buckling dan menyebabkan baut mengalami kegagalan.

Ilham Hatta (2000) dalam penelitiannya menganalisa kerusakan baut pengikat meja putar pada system transportasi alat angkat. Analisa dilakukan dengan uji komposisi kimia, hasil uji tarik, kekerasan, permukaan patahan dan struktur mikro. Hasil



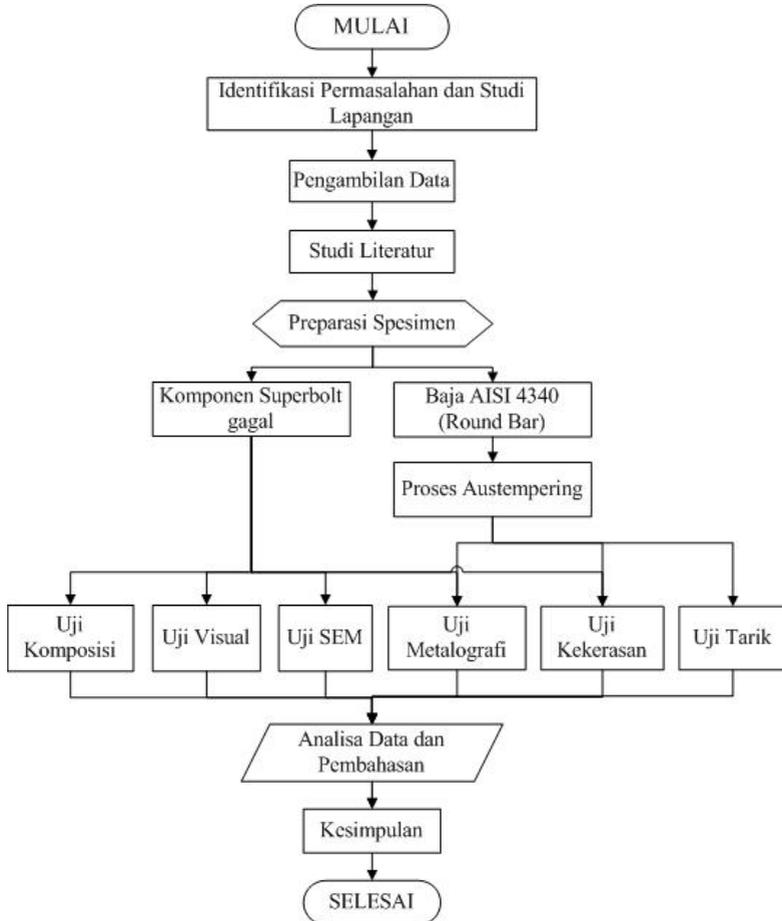
analisis kerusakan menunjukkan bahwa Kerusakan pada dasarnya disebabkan oleh kelelahan (fatigue) dari material baut akibat beban dinamis. Jenis kelelahan (fatigue) yang terjadi tersebut adalah jenis low cycle fatigue yaitu jenis kelelahan yang diakibatkan kelelahan yang disebabkan oleh tegangan yang besar. Hal ini ditunjukkan oleh bentuk permukaan patahan baut yang menunjukkan kondisi patah overload yaitu suatu kondisi dimana perambatan retak terjadi dalam waktu yang singkat dan akhirnya dengan cepat diikuti oleh patah getas. Disamping itu penurunan kekuatan baut juga dipengaruhi oleh oksidasi dan dekarburisasi ketika dilakukan proses perlakuan panas, sehingga menimbulkan perubahan struktur mikro dari martensit temper menjadi ferit yang kasar dengan kekuatan yang rendah.



halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



3.2 Metode Penelitian

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi lapangan, pengujian dan studi literature. Adapun hal-hal yang mencakup penelitian antara lain:

1. Studi lapangan
Metode studi lapangan dilakukan dengan cara terjun langsung ke lapangan yaitu Pabrik Tuban PT. Semen Indonesia, berdiskusi dengan pihak PT. Semen Indonesia yang ahli di bidang penelitian ini dan dosen pembimbing. Melakukan pencarian informasi mengenai kegagalan yang terjadi pada objek penelitian dan mengumpulkan data-data yang dibutuhkan.
2. Studi Literatur
Metode ini mengacu pada literatur yang berhubungan dengan analisa kegagalan pada superbolt yaitu berupa jurnal-jurnal penelitian, buku-buku, dan situs industri yang membahas tentang topik penelitian ini.
3. Pengujian
Metode ini dilakukan untuk mendukung dalam proses analisa dengan pengujian secara langsung pada komponen superbolt yang mengalami kegagalan sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam penelitian ini yaitu pengamatan bentuk permukaan patahan secara visual dengan mikroskop stereo, pengamatan morfologi permukaan patahan dengan menggunakan SEM, pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik, uji komposisi dengan menggunakan spektrometer, uji XRD, uji kekerasan dan uji tarik untuk mengetahui sifat mekanik dari superbolt.

3.3 Alat-alat Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain :

1. Penggaris dan Jangka Sorong
Digunakan untuk mengukur spesimen.
2. Alat pemotong



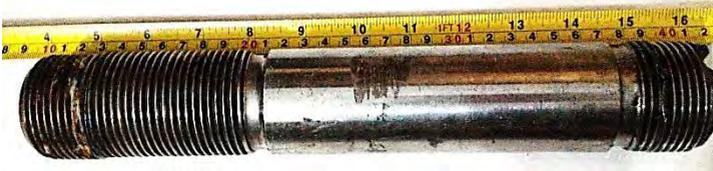
- Seperti gerinda dan gergaji digunakan untuk memotong spesimen.
3. Kamera Digital
Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan secara makro.
 4. Mikroskop Stereo
Mikroskop stereo yang digunakan adalah mikroskop stereo merk *Carl Zeiss Stemi DV 4*.
 5. Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*)
Digunakan untuk mengetahui komposisi material uji.
 6. Mesin Uji Kekerasan
Mesin uji kekerasan yang digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material uji.
 7. Mesin Uji Tarik
Mesin uji tarik yang digunakan untuk mengetahui nilai kekuatan tarik dan nilai *yield strength*
 8. Mikroskop Optik
Mikroskop optic yang digunakan adalah mikroskop optic *Olympus* seri *BX51M-RF* digunakan untuk mengamati struktur mikro
 9. Amplas grade 80 hingga 2000
Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik.
 10. Mesin Polish
Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik.
 11. Mesin SEM –EDX
Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan secara topografi permukaan
 12. Mesin XRD
Digunakan untuk mendapatkan data senyawa yang terkandung pada bahan uji dan data tegangan sisa
 13. Muffle furnace
Digunakan untuk memanaskan bahan uji dalam proses perlakuan panas
-



3.4 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Sampel superbolt yang mengalami kegagalan



Gambar 3.2 Bagian komponen superbolt yang patah

2. Baja AISI 4340 (*round bar*)
3. Larutan etsa Nital (HNO_3 dan methanol)
4. Larutan garam (Potassium nitrat + Sodium nitrat)

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Pengambilan Data dan Persiapan Spesimen

Data mengenai objek penelitian dan sampel dari *superbolt* yang mengalami kegagalan diambil langsung di PT. Semen Indonesia, Pabrik Tuban, Tuban, Jawa Timur. Data yang didapatkan yaitu desain komponen *girth gear* dan *superbolt*, data operasi mesin kiln, sejarah kerusakan, dan kapasitas kerja dari *superbolt*.

Spesimen diambil langsung dari Pabrik Tuban pada saat *overhaul*. Spesimen sudah mengalami patah menjadi dua bagian sehingga persiapan spesimen yang dilakukan yaitu dengan membersihkan permukaan patahan spesimen dari kotoran-kotoran yang menempel dan pemotongan menjadi bagian yang lebih kecil dengan menggunakan alat pemotong.

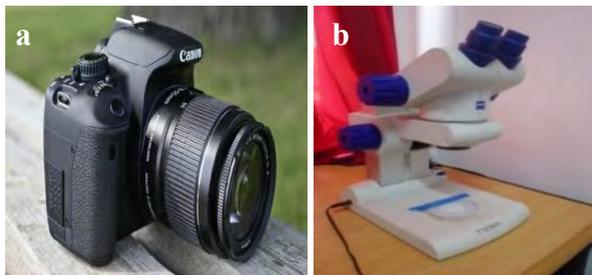
3.5.2 Pengamatan Visual

Pengamatan visual merupakan pengamatan secara makroskopik untuk mengetahui bentuk, tampilan, dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara kasat mata. Pengamatan ini dilakukan dengan dua bantuan alat, yaitu kamera digital dan mikroskop *Stemi DV4*.



Pengamatan visual yang dilakukan pada sampel adalah sebagai berikut:

1. Melakukan fotografi dengan kamera digital terhadap permukaan komponen yang mengalami patahan untuk mendapatkan informasi bentuk tampilan dari kegagalan secara makro
2. Pengamatan melalui mikroskop stereo terhadap sampel material dengan beberapa kali perbesaran untuk mendapatkan profil makronya



Gambar 3.3 Alat untuk pengamatan visual: kamera merk Canon tipe DSLR (a) dan Mikroskop stereo (b)

3.5.3 Uji Komposisi

Pengujian komposisi kimia bertujuan untuk mengetahui kuantitas komposisi kimia yang terkandung pada komponen yang mengalami kegagalan. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan komposisi kimia spesimen sesuai dengan standar yang ada. Pada identifikasi komposisi kimia menggunakan alat *Optical Emission Spectroscopy (OES)* untuk mengetahui komposisi kimia yang terkandung pada komponen superbolt.

3.5.4 Pengamatan Struktur Mikro (Metalografi)

Pengamatan struktur mikro (Metalografi) digunakan untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk agar dapat dianalisa dan dapat diketahui sifat mekaniknya. Sebelum dilakukan metalografi dibutuhkan preparasi specimen sesuai dengan standar



ASTM E3 (*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*). Bagian spesimen yang digunakan untuk pengujian metalografi adalah bagian yang dekat dan jauh dengan permukaan patahan. Langkah-langkah pengujian metalografi adalah sebagai berikut:

1. Spesimen dipotong menjadi bagian yang lebih kecil
2. Permukaan spesimen digosok dengan kertas gosok mulai dari grid 80 sampai 2000
3. Permukaan spesimen yang telah selesai digosok dengan kertas gosok lalu dipoles dengan menggunakan mesin polish
4. Mengambil spesimen kemudian melakukan etsa dengan larutan etsa nital selama beberapa detik
5. Melakukan pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik dengan beberapa kali perbesaran



Gambar 3.4 Mikroskop optik *Olympus BX51M-RF*

3.5.5 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada benda uji dengan menggunakan metode Rockwell dengan indenter intan. Beban yang diberikan sebesar 150 kg. Pengujian dilakukan pada sampel komponen superbolt yang jauh dan dekat dengan kegagalan dan baja AISI 4340 hasil austempering. Indentasi dilakukan pada 5 titik berbeda pada setiap sampel dan nilai kekerasan dirata-rata.



Gambar 3.5 Alat uji kekerasan

Berikut langkah-langkah dalam melakukan pengujian kekerasan:

1. Permukaan spesimen dibersihkan dan diratakan
2. Memasang indenter intan
3. Menempatkan pemegang dan beban pada mesin
4. Menaikkan meja spesimen dengan memutar *wheel* sehingga indenter melakukan penetrasi pada spesimen
5. Melepaskan beban sehingga kondisi pembebanan mayor hingga beberapa saat
6. Pada saat pembebanan sudah berhenti, angka yang tertera pada mesin terbaca dengan besaran hardness Rockwell C number (HRC).

3.5.6 Pengamatan Fraktografi

Pada pengamatan fraktografi secara mikroskopik dilakukan dengan menggunakan alat SEM (*Scanning Elektron Microscope*). SEM adalah sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk menganalisa permukaan dari objek solid secara langsung.



Fraktografi dilakukan untuk mengetahui profil permukaan patahan dan perambatan retak secara mikro.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam menggunakan SEM adalah sebagai berikut :

1. Spesimen yang telah dipotong dibersihkan untuk menghilangkan debu dan pengotor lainnya.
2. Spesimen diletakkan diatas holder yang sebelumnya telah dilekatkan dengan *carbon tape*. *Carbon tape* berfungsi untuk melekatkan *holder* dengan sampel
3. Spesimen yang telah berisi *holder* dimasukkan kedalam mesin SEM seperti pada Gambar 3.6 dan siap dilakukan proses pengamatan.
4. Pada layar komputer akan tampak permukaan spesimen dengan berbagai perbesaran yang bisa diatur sesuai keinginan.



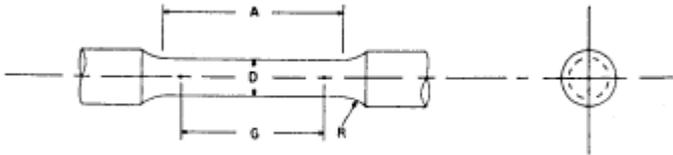
Gambar 3.6 Mesin SEM –EDAX FEI type Inspect S-50

3.5.7 Uji Tarik

Pada uji tarik menggunakan benda uji yang sesuai dengan ASTM E8M (*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*). Spesifikasi benda uji yang digunakan untuk pengujian tarik ditunjukkan pada Gambar 3.7 dan Tabel 3.1. Pengujian tarik dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai sifat mekanik dari spesimen. Sifat mekanik yang dapat



diketahui yaitu kekuatan luluh, kekuatan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Strength*), elongasi, dan reduksi area.



Gambar 3.7 Standar spesimen uji tarik (ASTM E8M)

Tabel 3.1 Dimensi spesimen uji tarik (ASTM E8M)

Bagian	Ukuran (mm)
G - <i>Gage length</i>	$50,0 \pm 0,1$
D - <i>Diameter</i>	$12,5 \pm 0,2$
R - <i>Radius of fillet</i>	10
A - <i>Length of reduced section, min</i>	56

Langkah-langkah dalam melakukan pengujian tarik adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan 1 buah spesimen yang telah sesuai standar
2. Membersihkan specimen dari pengotor yang menempel dengan kertas gosok
3. Melakukan pengujian tarik pada specimen
4. Menganalisa hasil kurva P- Δ
5. Mengukur panjang akhir patahan untuk menentukan elongasi
6. Menghitung luas akhir penampang patahan, untuk menentukan reduksi area

3.5.8 Uji XRD (*X-Ray Diffraction*)

X-ray diffraction (XRD) merupakan salah satu alat pengujian material yang biasanya digunakan untuk identifikasi unsur/senyawa (analisis kualitatif) dan penentuan komposisi (analisis kuantitatif). Pada penelitian ini dilakukan untuk menghitung tegangan sisa (*residual stress*) pada bagian



permukaan benda uji dengan menggunakan analisa Rietveld. Analisis Rietveld adalah sebuah metode pencocokan tak linier kurva pola difraksi terhitung (model) dengan pola difraksi terukur yang didasarkan pada data struktur kristal dengan menggunakan metode kuadrat terkecil (*least squares*). XRD dilakukan dengan menggunakan PAN Analytical. Sebelumnya spesimen dipotong hingga berukuran 1 x 1 x 0,5 cm, karena jika terlalu tebal dan tinggi dapat mengganggu analisa.



Gambar 3.8 PAN analytical

3.5.9 Proses Austempering

Proses perlakuan panas austempering dilakukan pada baja AISI 4340 yang memiliki komposisi kimia sama seperti komponen superbolt. Proses austempering bertujuan untuk mendapatkan sifat mekanik yang lebih baik dan lebih cocok digunakan sesuai dengan fungsi kerjanya.

Proses Austempering dilakukan dengan melakukan pemanasan sampai temperatur 950°C pada *muffle furnace* dan ditahan selama 60 menit lalu dilakukan pendinginan cepat kedalam *salt bath* dengan temperatur 350° secara *isothermal* selama 60 menit. *Salt bath* yang digunakan sebagai media pendingin yaitu campuran potassium nitrat (KNO_3) 40% dan sodium nitrat (NaNO_3) 60%. Setelah itu material dikeluarkan dari *salt bath* dan didinginkan di udara pada temperatur kamar.



Gambar 3.9 Proses pemanasan di dalam *muffle furnace*



Gambar 3.10 Proses pendinginan di dalam *salt bath* pada temperatur $\pm 350^{\circ}\text{C}$

3.6 Rancangan Penelitian

Untuk memudahkan penelitian selama percobaan disusun rancangan percobaan yang dilakukan berupa tabel. Berikut tabel rancangan penelitian yang dilakukan.

**Tabel 3.2** Rancangan penelitian

Variabel	Pengujian					
	Uji Visual	Uji Tarik	Metalografi	Uji Hardness	SEM	OES
Sampel baut dekat patahan	√	-	√	√	√	√
Sampel baut jauh dari patahan	-	-	√	√	-	-
Baja AISI 4340 (Austempered)	-	√	√	√	-	-



Menurut sejarah kegagalan yang sebelumnya pernah terjadi memang cukup sering superbolt ini mengalami patah. Berikut data histori kegagalan pada komponen superbolt pada *girth-gear* mesin kiln:

Tabel 4.1 Data histori kegagalan pada superbolt

Tanggal	Deskripsi	Jumlah Penggantian
25.07.2015	Superbolt putus	3 set
05.08.2015	Superbolt putus	1 set
28.10.2015	Superbolt putus	1 set
24.11.2015	Superbolt putus	3 set

4.1.2 Hasil OES (*Optical Emission Spectroscopy*)

Uji Komposisi kimia menggunakan OES (*Optical Emission Spectroscopy*) pada komponen superbolt dilakukan untuk mengetahui kandungan komposisi kimia, agar dapat diketahui apakah komposisi dari material ini sudah sesuai dengan standar yang ada. Hasil pengujian komposisi kimia dari sampel superbolt yang mengalami patah dibandingkan dengan standar ASTM A320 ditunjukkan pada Tabel 4.2

Tabel 4.2 Hasil komparasi komposisi kimia

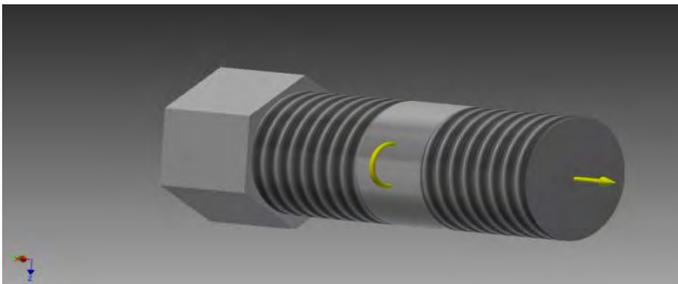
Unsur (%)	Sampel (patah)	ASTM A320 (AISI 4340)
C	0.434	0.38-0.43
Cr	0.802	0.70-0.90
Mo	0.197	0.20-0.30
Ni	1.73	1.65-2.00
Mn	0.674	0.60-0.85
Si	0.233	1.00 max
P	0.0082	0.035 max
S	0.0087	0.040 max
Cu	0.161	-
Fe	Balance	Balance



Tabel 4.2 menunjukkan komposisi kimia pada sampel komponen superbolt. Berdasarkan hasil pengujian komposisi diatas, menunjukkan komposisi yang sesuai dengan standar ASTM A320 L43 yang menggunakan bahan AISI 4340 yaitu baja paduan kromium molibdenum nikel.

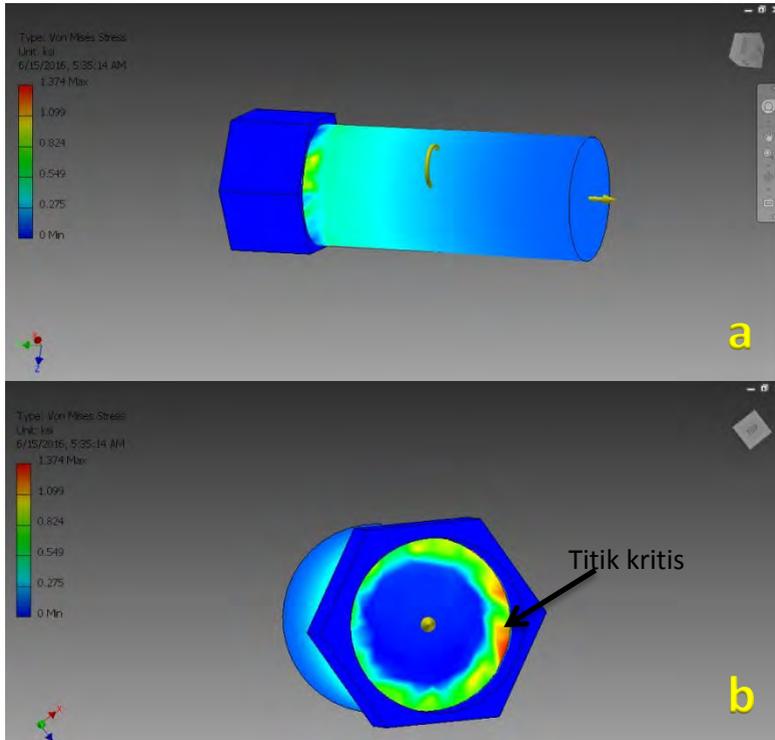
4.1.3 Analisa Titik Kritis

Analisa titik kritis dilakukan untuk mengetahui lokasi terjadinya pemusatan tegangan pada komponen superbolt yang mengalami kegagalan. Untuk itu dilakukan simulasi menggunakan software inventor. Pada inventor dilakukan modeling dengan membuat bentuk komponen superbolt seperti pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Gambar modeling komponen superbolt

Pembebanan yang diberikan pada komponen modeling sama seperti dengan komponen superbolt yang sebenarnya, yaitu pembebanan berupa tegangan tarik dan gaya momen. Dari hasil simulasi pembebanan yang diberikan maka didapatkan hasil seperti pada gambar 4.3 yang menunjukkan pembebanan terpusat pada bagian batang baut yang berulir yang kontak dengan mur bagian atas. Sehingga pada daerah yang menjadi pusat tegangan tersebut berwarna hijau yang menunjukkan pada daerah tersebut terjadi tegangan yang lebih besar dari daerah lainnya. Oleh karena itu pada bagian tersebut merupakan titik kritis dimana terjadi awal retakan yang mengakibatkan kegagalan.



Gambar 4.3 Hasil simulasi pembebanan pada komponen modeling: tampak samping (a), dan tampak atas (b)

4.1.4 Hasil Perhitungan Analisa Tegangan

Dari data-data operasi yang didapatkan maka dapat dilakukan analisa tegangan yang bekerja pada komponen superbolt. Gaya-gaya yang bekerja pada komponen superbolt terdiri dari *direct force* (F_d) yang merupakan gaya luar per jumlah baut yang menahan dan *momen force* (F_i) yaitu gaya akibat adanya momen pada jarak tempat gaya bekerja terhadap titik pusat dan kemudian gaya-gaya tersebut dijumlahkan menjadi *resultant force* (F_r). Dengan menghitung *resultant force* (F_r) per



satuan luas penampang superbolt lalu dikalikan dengan *safety factor* (S_f) maka didapatkan besarnya tegangan yang bekerja (σ_1) pada komponen superbolt yang mengalami kegagalan.

Dari hasil perhitungan tersebut diketahui tegangan yang bekerja pada komponen superbolt yang mengalami kegagalan ini sebesar 497,5 MPa yang masih jauh bila dibandingkan dengan tegangan standart (σ_u) yaitu sebesar 860 MPa. Dan diketahui momen torsi untuk pengencangan baut sebesar 100 Nm. Sehingga tegangan yang bekerja pada kopling fluida ini masih berada pada batas standart yang diizinkan.

$$\sigma_1 < \sigma_u \quad (4.1)$$

$$497,5 \text{ MPa} < 860 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

4.1.5 Hasil Fraktografi

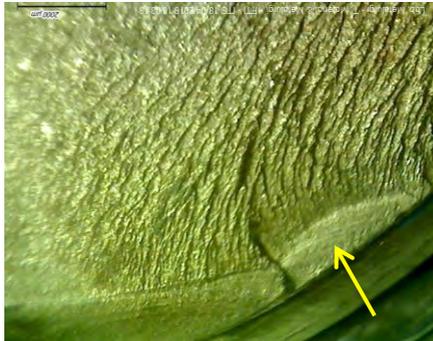
Pengamatan permukaan patahan secara makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan, dan lokasi kegagalan yang terjadi pada sampel superbolt yang mengalami kegagalan. Dari hasil pengamatan visual secara makro menggunakan kamera DSLR dan menggunakan mikroskop stereo pada daerah permukaan patahan. Untuk pengamatan morfologi permukaan patahan secara mikro menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*).

Pada permukaan patahan superbolt yang diambil dengan kamera DSLR dapat diamati daerah patahan dibagi menjadi 3 daerah yaitu retak awal (*initial crack*), rambatan retak (*crack propagation*), dan retak akhir (*final crack*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4

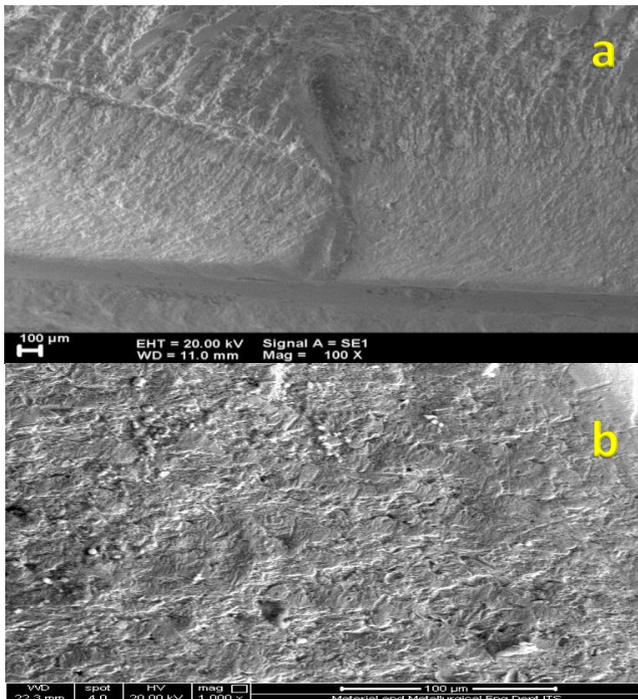


Gambar 4.4 Pembagian daerah: retak awal (a), rambatan retak (b), retak akhir (c)

Pada gambar 4.5 menunjukkan daerah retak awal hasil pengamatan menggunakan *stereomicroscope* perbesaran 20x terdapat bagian kecil pada pinggir atau tepi baut yang ditunjukkan pada tanda panah berwarna kuning terlihat permukaan yang terang dan halus dibandingkan dengan permukaan sekitarnya. Ciri-ciri tersebut merupakan tanda dari *initiation crack*. Apabila diamati menggunakan SEM dengan perbesaran 100x dan 1000x seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6 menunjukkan permukaan yang lebih halus.



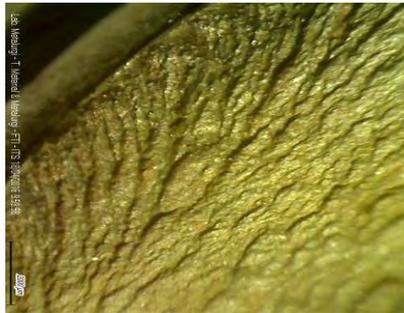
Gambar 4.5 Daerah *initial crack* diambil dengan *stereomicroscope* perbesaran 20x



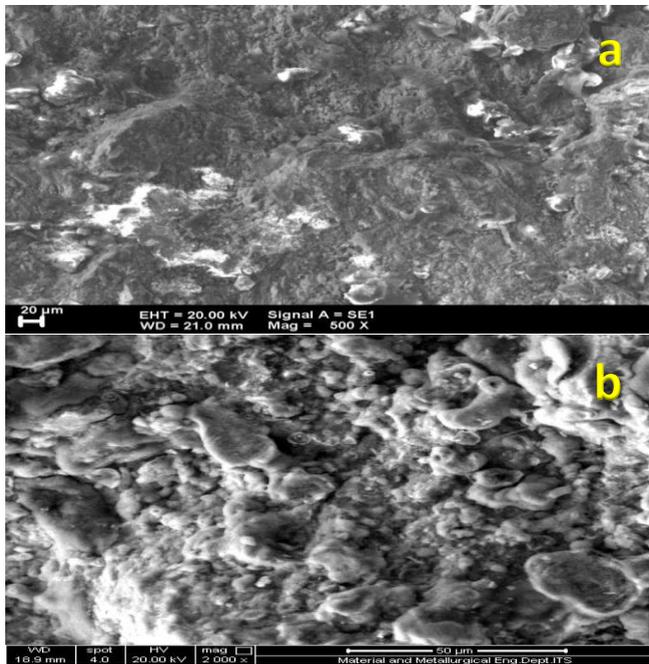
Gambar 4.6 Hasil SEM daerah *initial crack* dengan perbesaran 100x (a) dan perbesaran 1000x (b)



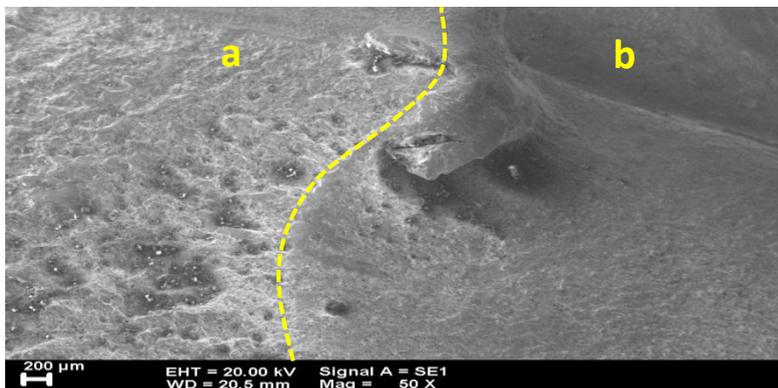
Gambar 4.7 merupakan hasil pengamatan daerah rambatan retak menggunakan *stereomicroscope* perbesaran 20x menunjukkan permukaan yang lebih kasar dengan pola arah rambatan pada bagian tepi kanan dan kiri permukaan patahan baut seperti yang ditunjukkan pada tanda panah warna kuning pada Gambar 4.4. Pada gambar 4.8 merupakan hasil pengamatan daerah *crack propagation* menggunakan SEM dengan perbesaran 500x dan 1000x menunjukkan adanya butiran-butiran kasar dan berwarna gelap.



Gambar 4.7 Daerah *crack propagation* diambil dengan *stereomicroscope* perbesaran 20x



Gambar 4.8 Hasil SEM pada daerah *propagation crack* perbesaran 500x (a) dan perbesaran 1000x (b)

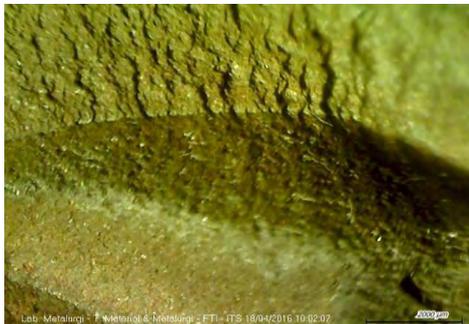


Gambar 4.9 Hasil SEM pada daerah *propagation crack* (a) dan *final crack* (b) dengan perbesaran 100x

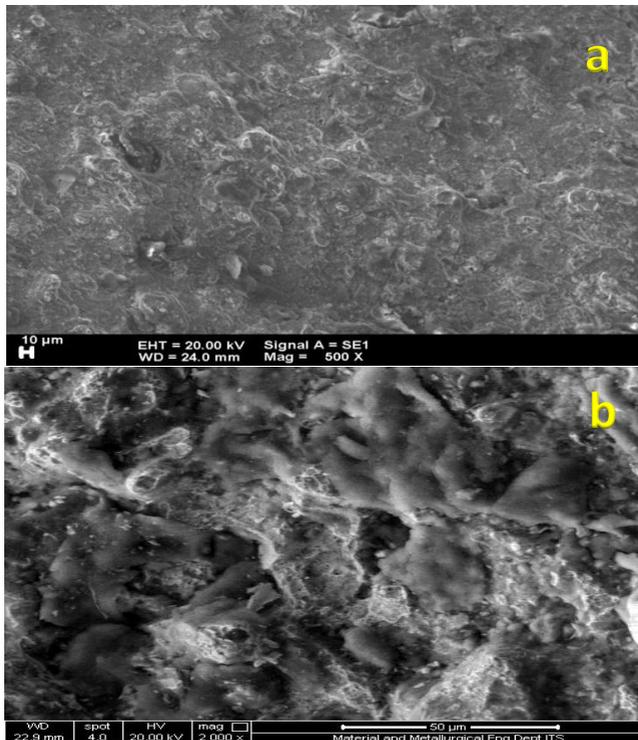


Pada gambar 4.9 menunjukkan daerah perbatasan antara *crack propagation* dan *final crack* hasil pengamatan menggunakan SEM perbesaran 500x, terlihat pada bagian kiri merupakan daerah *crack propagation* dan bagian kanan yaitu daerah *final crack*.

Retakan terus menjalar sampai daerah *final crack* yang merupakan daerah akhir patahan dengan permukaan yang lebih gelap dan ketinggian yang berbeda membentuk cekungan yang ditunjukkan pada gambar 4.10 hasil pengamatan *stereomicroscope* perbesaran 20x. Adanya cekungan menunjukkan bahwa baut sudah tidak bisa menahan beban lagi dan terjadi patah statik pada daerah tersebut. Hasil pengamatan SEM pada daerah *final crack* menunjukkan morfologi berupa butiran-butiran yang lebih halus dan lebih gelap dibandingkan dengan daerah *crack propagation* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.11



Gambar 4.10 Daerah *final crack* diambil dengan *stereomicroscope* perbesaran 20x



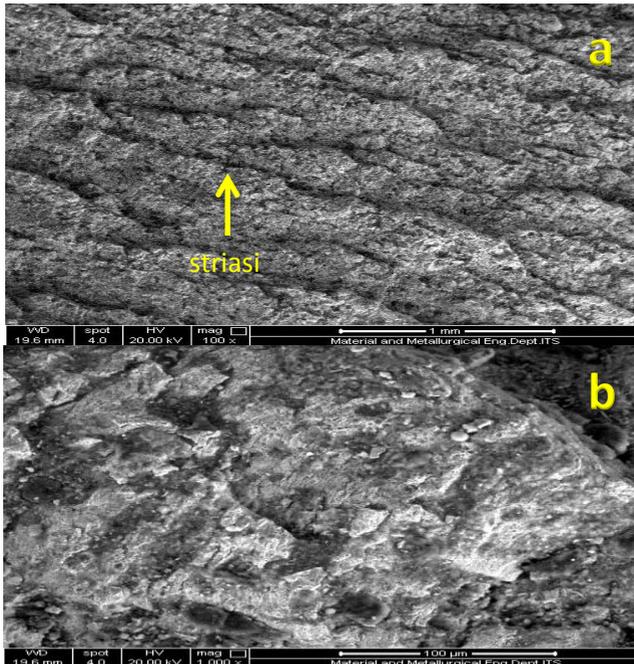
Gambar 4.11 Hasil SEM pada daerah *final crack* perbesaran 500x (a) dan perbesaran 1000x (b)

Pada pengamatan permukaan patahan menggunakan SEM dapat terlihat pada daerah *crack propagation* terdapat garis-garis striasi yang merupakan karakteristik patahan akibat beban dinamis yang berulang-ulang (*cyclic*). Striasi menunjukkan arah penjalaran retak yang menjalar dari *initial crack* sampai *final crack*. Garis-garis striasi berakhir sampai pada daerah *final crack* yang menunjukkan komponen tersebut sudah tidak dapat menerima beban siklik lagi dan akhirnya mengalami patah statik.

Pada gambar 4.12 menunjukkan permukaan striasi dengan pengamatan menggunakan SEM, pada perbesaran 100x dapat terlihat garis-garis yang mewakili setiap siklus pembebanan. Pada



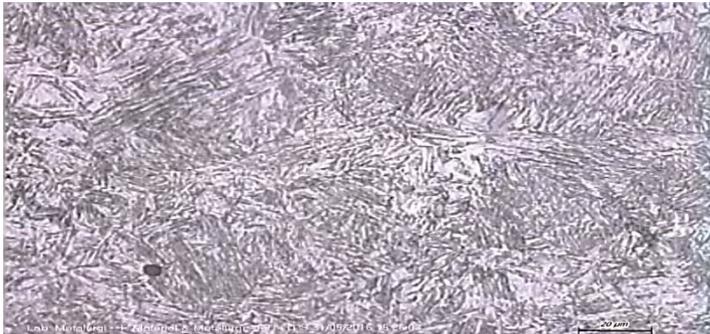
perbesaran 1000x menunjukkan morfologi pada daerah striasi yang sangat kasar dan terdapat banyak perbedaan ketinggian.



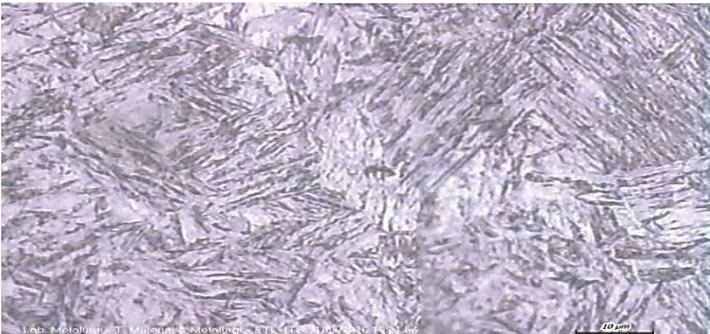
Gambar 4.12 Hasil SEM pada permukaan striasi perbesaran 100x (a) dan perbesaran 1000x (b)

4.1.6 Hasil Pengujian Metalografi

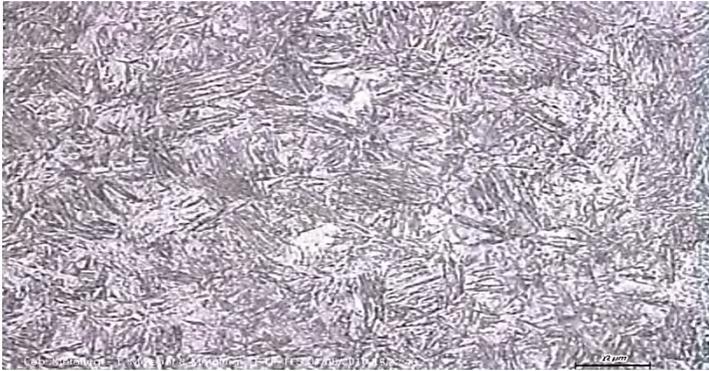
Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terjadi pada sampel superbolt yang mengalami patah. Pengujian dilakukan pada dua daerah yaitu daerah yang dekat dengan patahan dan daerah yang jauh dari patahan, untuk melihat perbedaan yang terdapat pada kedua daerah tersebut. Sampel yang telah digrinding lalu dipolish dan dietsa dengan nital lalu dilihat struktur mikronya dibawah mikroskop optik. Dari pengujian metalografi didapatkan foto mikrostruktur sebagai berikut:



Gambar 4.13 Struktur mikro daerah dekat patahan. Dietsa dengan nital. Perbesaran 500x



Gambar 4.14 Struktur mikro daerah dekat patahan. Dietsa dengan nital. Perbesaran 1000x



Gambar 4.15 Struktur mikro daerah jauh dari patahan. Dietsa dengan nital. Perbesaran 500x



Gambar 4.16 Struktur mikro daerah jauh dari patahan. Dietsa dengan nital. Perbesaran 1000x

Dari gambar struktur mikro diatas menunjukkan struktur yang terjadi pada komponen superbolt pada daerah yang jauh maupun yang dekat dengan kegagalan memiliki struktur martensit temper. Struktur martensit temper ini didapatkan karena komponen superbolt sebelumnya diberikan perlakuan quenching dan tempering. Struktur mikro temper martensit tersebut mirip dengan spheroidit namun partikel sementit lebih banyak dan lebih kecil.



Bagian yang berwarna gelap menunjukkan fasa martensit yang tersebar pada matriks ferit.

4.1.7 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada komponen superbolt yang mengalami kegagalan. Pengujian dilakukan pada 2 daerah yaitu daerah yang dekat dengan patahan dan yang berada jauh dari patahan. Pengujian ini menggunakan metode Rockwell C dan indentasi sebanyak 5 titik dengan beban sebesar 150kgf. Pembagian daerah indentasi dapat dilihat pada gambar 4.17



Gambar 4.17 Pembagian daerah indentasi pada pengujian kekerasan

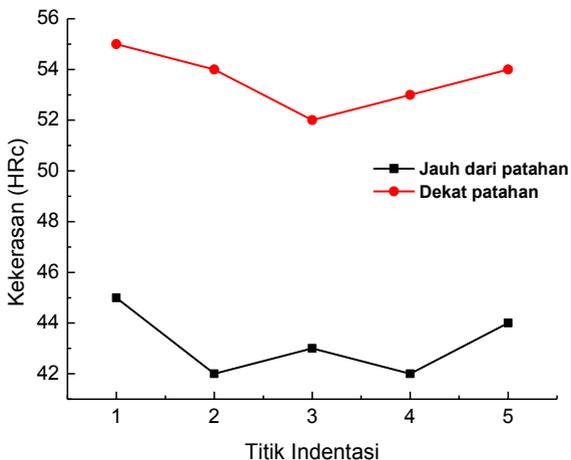
Pada tabel 4.3 merupakan nilai kekerasan hasil pengujian yang dilakukan pada permukaan daerah dekat patahan dan yang jauh dari patahan, serta grafik distribusi kekerasan hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 4.18

Tabel 4.3 Data hasil pengujian kekerasan

Daerah Indentasi	Nilai Kekerasan (HRC)	
	Jauh dari Patahan	Dekat Patahan
1	45	55
2	42	54
3	43	52
4	42	53
5	44	54
<i>Average</i>	43,2	53,6



Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa nilai kekerasan di daerah yang jauh dari patahan memiliki rata rata sebesar 43,2 HRC, sedangkan yang dekat dengan patahan memiliki nilai rata rata sebesar 53,6 HRC. Sehingga komponen ini mengalami kenaikan kekerasan pada daerah yang mengalami patahan bila dibandingkan dengan daerah yang berada jauh dari patahan. Dari data ini didapatkan bahwa kekerasan mengalami kenaikan sebesar 10,4 HRC pada daerah yang dekat dengan patahan dibandingkan dengan yang jauh dari patahan.



Gambar 4.18 Grafik distribusi kekerasan pada komponen superbolt

4.1.8 Hasil Pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*)

Analisa tegangan sisa bertujuan untuk menganalisa sisa tegangan maupun regangan pada komponen yang mengalami kegagalan dengan menggunakan metode Rietveld. Komponen yang mengalami kegagalan dilakukan pengujian difraksi sinar-X pada daerah yang dekat dan jauh dari kegagalan sehingga dapat dibandingkan tegangan sisa pada dua daerah tersebut. Dari hasil



pengujian difraksi sinar-X didapatkan hasil berupa peak-peak dan ukuran Kristal, dan dari data tersebut dapat dilakukan perhitungan menggunakan program Rietica. Pada tabel 4.4 berikut merupakan output dari program Rietica dan hasil perhitungan regangan dan tegangan sisa. Pada hasil perhitungan menunjukkan nilai tegangan dan regangan sisa semakin meningkat pada daerah yang dekat dengan kegagalan.

Tabel 4.4 Data hasil output program rietica

Parameter	Sampel jauh	Sampel dekat
Rp	22,94	24,67
Rwp	31,82	33,99
X^2	1,46	1,55
Parameter U	0,115788	0,208061
ϵ	0,0719	0,0966
σ (MPa)	15,099	20,286

4.1.9 Evaluasi Hasil Perlakuan Panas

Proses perlakuan panas dilakukan untuk mendapatkan sifat mekanik yang lebih baik dari kondisi awal komponen superbolt yang mengalami kegagalan. Komponen superbolt merupakan baut yang sesuai dengan standar ASTM A320 L43 yang menggunakan bahan baja AISI 4340 yang telah diberi perlakuan panas *quenching* dan *tempering*. Sesuai dengan kondisi kerja dari komponen superbolt ini yang mengalami pembebanan berupa tegangan tarik maka sifat mekanik yang ditingkatkan yaitu ketangguhan dan kekuatan tarik. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan modifikasi perlakuan panas yang dapat meningkatkan sifat mekanik yang dibutuhkan sesuai dengan kondisi kerja dari komponen superbolt.

Pada penelitian ini digunakan material baja AISI 4340 yang memiliki komposisi kimia yang sama dengan komponen superbolt lalu dilakukan perlakuan panas Austempering. Proses Austempering dilakukan dengan melakukan pemanasan sampai temperature 950°C pada *muffle furnace* dan ditahan selama 60



menit lalu dilakukan pendinginan cepat kedalam *salt bath* dengan temperatur 350° secara *isothermal* selama 60 menit. *Salt bath* yang digunakan sebagai media pendingin yaitu campuran potassium nitrat (KNO_3) 40% dan sodium nitrat (NaNO_3) 60%. Setelah itu material dikeluarkan dari *salt bath* dan didinginkan di udara pada temperatur kamar.

Dari hasil austempering pada material AISI 4340 dilakukan pengujian tarik sesuai dengan standar ASTM E8 sehingga didapatkan nilai *Ultimate Tensile Strength* dan *Yield Strength* dan dapat dibandingkan dengan kondisi komponen superbolt yang mengalami kegagalan. Berikut merupakan hasil pengujian tarik baja AISI 4340 yang telah diaustempering dibandingkan dengan sifat mekanik komponen superbolt yang mengalami kegagalan ditunjukkan pada tabel 4.5

Tabel 4.5 Data hasil pengujian tarik

	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
AISI 4340 hasil austemper	1169,24	1434,19	7,28	21,02
Komponen gagal	860	725	16	50

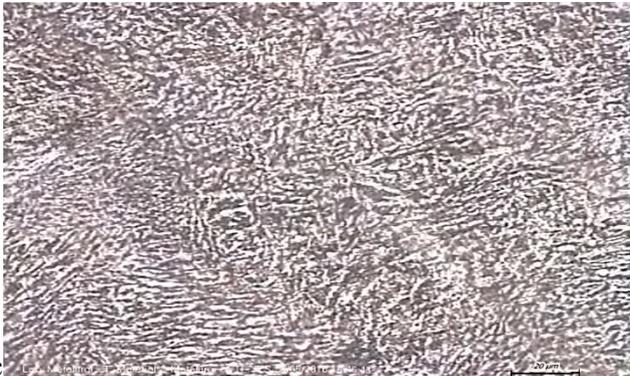
Pengujian kekerasan juga dilakukan pada material hasil perlakuan austempering agar dapat dibandingkan nilai kekerasan antara komponen yang gagal dengan yang sudah diberi perlakuan Austempering. Pengujian kekerasan menggunakan metode Rockwell C dan dilakukan indentasi pada 5 titik berbeda. Tabel 4.6 menunjukkan nilai kekerasan baja AISI 4340 yang telah diaustempering.



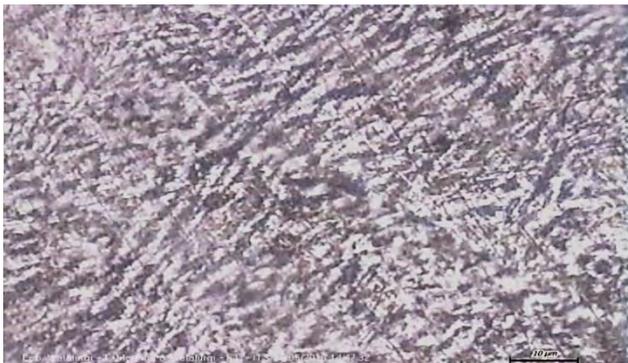
Tabel 4.6 Data hasil pengujian kekerasan pada baja AISI 4340 yang telah diaustempering

Daerah Indentasi	Nilai Kekerasan Baja hasil austempering (HRC)
1	43
2	40
3	39
4	40
5	43
Average	41

Selain dilakukan pengujian sifat mekanik juga dilakukan pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro yang terjadi pada hasil perlakuan austempering. Sampel yang telah digrinding lalu dipolish dan dietsa dengan nital lalu dilihat struktur mikronya dibawah mikroskop optik. Dari pengujian metalografi didapatkan struktur mikro seperti pada gambar 4.19 dan gambar 4.20 yang menunjukkan bahwa pada baja AISI 4340 yang telah dilakukan austempering didapatkan struktur mikro berupa fasa bainit. Struktur bainit merupakan perubahan dari struktur austenit yang didinginkan pada *salt bath* secara isothermal pada temperature diatas temperatur pembentukan martensit. Sifatnya lebih keras dari perlit namun lebih lunak daripada martensit.



Gambar 4.19 Gambar struktur mikro pada baja AISI 4340 hasil Austempering. Dietsa dengan nital. Perbesaran 500x



Gambar 4.20 Gambar struktur mikro pada baja AISI 4340 hasil Austempering. Dietsa dengan nital. Perbesaran 1000x

4.2 Pembahasan

4.2.1 Faktor-faktor Penyebab Terjadinya Kegagalan

Komponen superbolt pada *girth-gear* mesin kiln sudah sering mengalami kegagalan yang belum sampai umur pakainya. Pada penelitian ini dilakukan analisa penyebab dan mekanisme terjadinya kegagalan pada komponen superbolt yang telah mengalami kegagalan. Pada Januari 2016 telah terjadi kegagalan pada komponen superbolt yang patah menjadi 2 bagian pada



batang baut yang berulir. Komponen tersebut mengalami kegagalan setelah beroperasi selama 3 bulan yang seharusnya memiliki umur pakai 1 tahun. Oleh karena itu dilakukan beberapa pengujian untuk mengetahui penyebab dan mekanisme kegagalan. Pengujian yang dilakukan yaitu uji komposisi kimia, analisa titik kritis, analisa tegangan, uji fraktografi, uji sifat mekanik, uji metalografi, dan uji XRD untuk menganalisa tegangan sisa dan analisa senyawa inklusi.

Berdasarkan uji komposisi menggunakan OES (*Optical Emission Spectroscopy*), komposisi komponen superbolt yang mengalami kegagalan sesuai dengan standar ASTM A320 L43 yang menggunakan bahan baja AISI 4340 yaitu baja paduan nikel krom molybdenum. Paduan unsur nikel dan kromium memberikan sifat ketangguhan dan ketahanan lelah yang baik. Sedangkan paduan molybdenum dapat meningkatkan hardenability dan mengurangi resiko pengetasan saat proses tempering. Sehingga pemilihan material pada komponen superbolt ini sudah sesuai dengan penggunaan komponen tersebut. Menurut Anthonius (2006) baja paduan rendah AISI 4340 merupakan jenis baja yang banyak digunakan sebagai bahan teknik antara lain sebagai bahan komponen mesin. Bahan ini sangat cocok untuk ditingkatkan atau diatur sifat-sifatnya dengan perlakuan panas.

Pada uji kekerasan menggunakan metode Rockwell C, pengujian dilakukan pada daerah yang dekat dan jauh dari patahan. Pada daerah yang jauh patahan dilakukan indentasi pada 5 titik berbeda dengan nilai 45, 42, 43, 42, 44 dan nilai rata-ratanya yaitu 43,2 HRC. Sedangkan pada daerah yang dekat dengan patahan juga dilakukan indentasi pada 5 titik berbeda dengan nilai 55, 54, 52, 53, 54 dan nilai rata-ratanya yaitu 53,6 HRC. Sehingga terjadi kenaikan nilai kekerasan sebesar 10,4 HRC pada daerah yang dekat dengan patahan. Kenaikan nilai kekerasan ini dapat terjadi karena adanya pemusatan tegangan pada daerah titik kritis dan menyebabkan tegangan sisa yang cukup tinggi pada daerah yang dekat dengan patahan.



Berdasarkan analisa titik kritis dengan modeling yang menggunakan program inventor dan dilakukan simulasi pembebanan yang sesuai dengan kondisi operasi dari komponen superbolt maka didapatkan lokasi titik kritis terjadi pada daerah patahan yaitu pada batang baut yang berulir yang kontak dengan mur bagian atas. Pada analisa tegangan sisa hasil pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) menggunakan program Rietica didapatkan hasil pada daerah yang jauh dari patahan tegangan sisa sebesar 15,099 MPa sedangkan pada daerah yang dekat dengan patahan sebesar 20,286 MPa. Sehingga pada daerah yang dekat dengan patahan mengalami tegangan sisa yang lebih besar. Menurut Gusti (2015) meningkatnya nilai regangan sisa dan tegangan sisa meningkatkan *yield strength*, memicu laju regangan *crack* dan pertumbuhan *crack* yang lebih besar.

Tegangan sisa berasal dari gaya yang bekerja pada komponen. Gaya yang bekerja pada suatu benda akan diterima juga oleh kristal, akan mendorong barisan atom dalam kristal, yang dapat memutuskan ikatan antar atom dari barisan atom. Dengan gaya yang bekerja lebih lanjut menyebabkan ikatan antar atom putus dan terjadi dislokasi. Dislokasi akan bergeser terus sehingga akhirnya dislokasi sampai ke ujung kristal dan terjadi *slip*. Deformasi yang cukup berarti dapat terjadi karena terjadinya *slip* pada sejumlah besar bidang *slip*, dan pada setiap bidang *slip* tersisa banyak dislokasi. Di sekitar dislokasi selalu merupakan daerah yang tegang, karena susunan atom di daerah itu mengalami distorsi, karenanya deformasi akan menyebabkan logam menjadi lebih kuat dan keras. Peristiwa ini dinamakan *strain hardening* (penguatan regang)

Sehingga dari hasil analisa tegangan sisa, analisa titik kritis dan pengujian kekerasan dapat dikaitkan bahwa pada daerah yang dekat dengan patahan merupakan lokasi titik kritis dimana beban yang bekerja terpusat pada daerah tersebut sehingga menyebabkan tegangan sisa yang cukup tinggi. Dari nilai kekerasan juga menunjukkan kenaikan sebesar 10,4 HRC.



Adanya pemusatan tegangan dan kenaikan nilai kekerasan tersebut dapat menyebabkan terjadinya inisiasi retakan.

4.2.2 Mekanisme Terjadinya Kegagalan

Analisa fraktografi dilakukan untuk mengetahui mekanisme kegagalan yang terjadi dengan mengamati pola patahan pada bagian permukaan yang mengalami patahan. Pengamatan permukaan patahan dengan hasil foto kamera SLR, mikroskop stereo, dan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Pengamatan hasil foto kamera SLR dapat menunjukkan pola patahan yang terbagi menjadi 3 daerah yaitu daerah *initial crack*, *crack propagation*, dan *final crack*. Pada pengamatan menggunakan mikroskop stereo dengan perbesaran 20x dapat terlihat daerah *initial crack* yang terang dan halus, pada daerah *crack propagation* permukaannya lebih kasar dan menunjukkan pola arah rambatan, dan pada daerah *final crack* permukaannya lebih gelap dan membentuk cekungan yang menunjukkan bahwa pada daerah tersebut baut sudah tidak bisa menahan beban siklik lagi dan akhirnya terjadi patah statik.

Pada pengamatan menggunakan SEM pada bagian *initial crack* dengan perbesaran 100x dan 1000x menunjukkan morfologi permukaan yang halus dan terang. Menurut Genki (2015) *initial crack*, merupakan retak awal yang ditandai dengan permukaan yang terlihat terang dan halus. Pada bagian *crack propagation* dengan perbesaran 500x dan 1000x menunjukkan morfologi permukaan berupa butiran-butiran yang kasar dan gelap. Dan pada daerah *final crack* dengan perbesaran 500x dan 1000x menunjukkan morfologi permukaan berupa butiran-butiran yang lebih gelap namun lebih halus daripada pada daerah *crack propagation*. Pada pengamatan menggunakan SEM juga ditemukan garis-garis striasi yang menunjukkan arah penjalaran retak yang menjalar dari daerah *initial crack* sampai pada daerah patah akhir.

Pada analisa tegangan dengan menghitung jumlah tegangan yang bekerja pada komponen superbolt, yaitu *direct force* (F_d)



dan *momen force* (F_i) maka didapatkan *resultant force* (F_r). Jumlah gaya tersebut dibagi luas penampang superbolt dan dikalikan dengan *safety factor* maka didapatkan besarnya tegangan yang bekerja (σ_1) pada komponen superbolt yang mengalami kegagalan yaitu sebesar 497,5 MPa. Sedangkan beban maksimum yang dapat diterima komponen superbolt yaitu sebesar 860 MPa. Sehingga beban yang bekerja masih aman dari standar yang diizinkan. Menurut Chandra (2012) apabila tegangan hasil perhitungan jauh lebih kecil dari tegangan yield bahan, maka tidak mungkin terjadi gagal statik sehingga kegagalan yang terjadi adalah karena lelah (patah fatigue) akibat beban siklik.

Menurut Abrianto Akuan (2007) mekanisme patah lelah terjadi atas 3 tahap kejadian yaitu tahap awal retakan, tahap penjalaran retak, dan tahap akhir. Luas daerah antara tahap penjalaran retak dan tahap akhir secara kuantitatif dapat menunjukkan besarnya tegangan yang bekerja, jika luas daerah tahap penjalaran retak lebih besar daripada luas daerah patah akhir maka tegangan yang bekerja relatif rendah, begitu juga sebaliknya. Karakteristik mikroskopis dari kelelahan logam adalah sebagai berikut:

1. Pada permukaan patahan terdapat striasi (*striations*)
2. Pada permukaan patahan memperlihatkan jenis patah transgranular (memotong butir) tidak seperti jenis patah intergranular seperti yang terjadi pada kasus *stress corrosion cracking* atau mulur (*creep*)

Berdasarkan analisa fraktografi yang menunjukkan patahan terbagi menjadi daerah *initial crack*, *crack propagation*, dan *final crack* merupakan ciri-ciri dari mekanisme patah lelah (*fatigue*). Pada permukaan patahan dapat terlihat daerah penjalaran retak lebih besar daripada daerah patah akhir yang berarti beban yang bekerja relatif rendah dan hal tersebut terbukti pada hasil perhitungan analisa tegangan. Sedangkan pada pengamatan menggunakan SEM pada daerah penjalaran retak menunjukkan morfologi butir-butir yang kasar dan retakan seperti merambat sepanjang bidang-bidang kristalin yang membelah atom-atom



material (transgranular). Selain itu juga terdapat garis-garis striasi pada daerah penjalaran retak yang merupakan karakteristik dari jenis patah lelah.

4.2.3 Mengatasi Kegagalan

Pada kasus kegagalan komponen superbolt ini terjadi karena pengetasan dan pemusatan tegangan pada daerah titik kritis. Sedangkan beban yang bekerja pada komponen tersebut masih aman dari standar yang diizinkan. Sehingga kegagalan yang terjadi yaitu patah lelah karena beban siklik. Oleh karena itu bahan dari komponen superbolt ini membutuhkan sifat yang memiliki kekuatan siklik yang baik. Pada penelitian ini dilakukan perlakuan panas Austempering untuk mendapatkan sifat ketangguhan yang lebih baik. Dari proses austempering tersebut diharapkan dapat memiliki kekuatan tarik yang lebih baik dari sebelumnya.

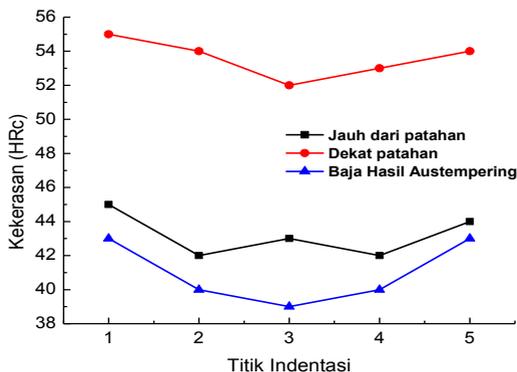
Menurut Lubis (2009) austempering adalah proses perlakuan panas yang di kembangkan dari *isothermal transformation* diagram untuk mendapatkan struktur yaitu 100 persen bainit. Austempering dilakukan dengan pemanasan awal pada temperatur austenisasi yang diikuti dengan pendinginan cepat dalam *salt bath*. Bahan yang digunakan untuk proses austempering menggunakan baja AISI 4340 yang memiliki komposisi kimia sama seperti komponen superbolt. Proses austempering dilakukan dengan pemanasan pada temperatur 950°C didalam *muffle furnace* selama 1 jam, setelah itu dilanjutkan dengan pendinginan dengan mencelupkan benda uji kedalam *salt bath* pada temperatur 350°C dan ditahan selama 1 jam lalu didinginkan di udara sampai pada temperatur kamar. Dari hasil austempering dilakukan uji metalografi, uji tarik, dan uji kekerasan.

Hasil uji metalografi pada baja hasil austempering didapatkan struktur mikro seluruhnya berupa bainit. Sedangkan pada komponen superbolt yang mengalami kegagalan memiliki struktur martensit temper. Sehingga apabila komponen superbolt diberikan perlakuan panas austempering maka strukturnya berupa bainit yang sifatnya lebih ulet dan tangguh namun ketahanan



terhadap beban statik lebih tinggi. Menurut Abrianto (2007) struktur mikro merupakan salah satu faktor yang sangat menentukan kekuatan logam, baik kekuatan statik maupun sikliknya. Sebagai contoh baja yang memiliki struktur martensit akan memiliki kekuatan statik yang relatif tinggi akan tetapi keuletannya lebih rendah (karena bersifat getas) dibandingkan dengan baja yang memiliki struktur bainit yang memiliki batas leleh yang lebih tinggi.

Uji kekerasan yang dilakukan pada baja hasil austempering yaitu 43, 40, 39, 40, 43 dengan nilai rata-ratanya yaitu 41 HRC. Pada gambar 4.21 berikut menunjukkan grafik distribusi kekerasan pada komponen superbolt yang mengalami kegagalan dan pada baja hasil austempering.



Gambar 4.21 Grafik distribusi kekerasan pada baja hasil austempering dan komponen superbolt yang patah

Dari grafik distribusi kekerasan tersebut menunjukkan bahwa nilai kekerasan pada hasil austempering mengalami sedikit penurunan dari nilai kekerasan pada komponen superbolt yang jauh dari daerah kegagalan. Sehingga proses austempering dapat meningkatkan sifat keuletan dari komponen superbolt.



Pada uji tarik hasil austempering didapatkan nilai *Yield Strength* sebesar 1169,24 MPa dan nilai UTS (*Ultimate Tensile Strength*) sebesar 1434,19 MPa. Nilai tersebut meningkat dari nilai pada komponen superbolt yang mengalami kegagalan. Sehingga proses austempering pada komponen superbolt dapat meningkatkan nilai UTS dan *Yield Strength*. Hal tersebut sangat dibutuhkan oleh komponen superbolt yang menerima pembebanan berupa beban tarik. Oleh karena itu untuk mengatasi kegagalan komponen superbolt yang mengalami patah lelah ini dapat dilakukan perlakuan panas austempering untuk meningkatkan kekuatan tariknya dan meningkatkan kekuatan terhadap beban siklik.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



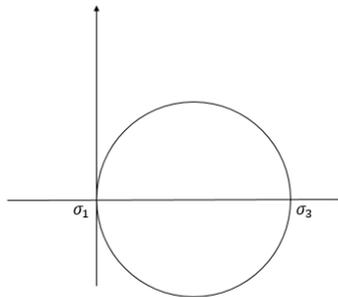
LAMPIRAN

A. Perhitungan Tegangan

- Diketahui :
 - Daya motor (P) = 600 kw
 - Kecepatan putar kiln = 2,64 rpm
 - Jumlah baut = 16
 - Kecepatan tangensial (v) = 0,4 m/s
 - Diameter girth-gear (D) = 7891 mm
 - Jarak titik pusat ke baut 1 (r_1) = 3540 mm
 - Jarak titik pusat ke baut 2 (r_2) = 3715 mm
 - Diameter superbolt (d) = 45 mm

- Ditanya : Tegangan yang bekerja pada komponen superbolt yang mengalami kegagalan

- Dijawab :
 - Metode Tresca



$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Dimana, $2 \tau = \sigma_y$

$$\sigma_y = \sigma_1 - \sigma_3$$



Karena pembebanan secara uniaxial, maka dapat disimpulkan bahwa :

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= 0 \\ \text{Sehingga,} \quad \sigma_\gamma &= \sigma_1 - 0 \\ \sigma_\gamma &= \sigma_1 \end{aligned}$$

Sehingga,

$$\sigma_1 = \frac{F}{A}$$

Dimana, F = Gaya (N) ; A= Luas Penampang (m²)

- Mencari Direct Force (F_d)

$$\begin{aligned} F_t &= \frac{\text{Daya}}{v} \\ F_t &= \frac{2 \times 600}{0,4} \\ F_t &= 3000 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= \frac{F}{\text{jumlah baut}} \\ F &= \frac{3000}{16} \\ \mathbf{F} &= \mathbf{187,5 \text{ kN}} \end{aligned}$$

- Mencari Momen Force (F_i)

$$\begin{aligned} F \times \frac{D}{2} &= C \{(r_1)^2 + (r_2)^2\} \\ 3000 \times \frac{7891}{2} &= C \{(3540)^2 + (3715)^2\} \end{aligned}$$



$$11.838.000 = C \{100.252.800 + 110.409.800\}$$

$$11.838.000 = C \{210.662.600\}$$

$$C = \frac{11.838.000}{210.662.600}$$

$$C = 0,056 \text{ kN/mm}$$

$$F_i = C \times \text{Jarak baut yang patah}$$

$$F_i = 0,056 \times 3715$$

$$F_i = \mathbf{208,04 \text{ kN}}$$

- Resultant Force (F_r)

$$F_r = F_d + F_i$$

$$F_r = 187,5 + 208,04$$

$$F_r = \mathbf{395,54 \text{ kN}}$$

- Mencari tegangan yang bekerja pada superbolt

$$\sigma_1 = \frac{F_r}{A}$$

$$\sigma_1 = \frac{395,54}{0,00159}$$

$$\sigma_1 = \mathbf{248.767 \text{ kN/m}^2 \text{ (Pa)}}$$

$$\sigma_1 = \mathbf{248,767 \text{ MPa}}$$

- Safety Factor

$$S_f = \sigma_1 \times 2$$

$$S_f = \mathbf{497,5 \text{ MPa}}$$

- Perbandingan tegangan maksimal pada material dengan standart

$$\sigma_1 < \sigma_\gamma$$

$$\mathbf{497,5 \text{ MPa} < 860 \text{ MPa}}$$



3. Hasil Perhitungan Regangan dan Tegangan Sisa Trunion jauh dari kegagalan.

$$U_0 = 0,000992$$

$$E = 210$$

$$\langle e^2_{hkl} \rangle = \frac{U - U_0}{32 \ln 2}$$

$$\langle e^2_{hkl} \rangle = \frac{0,115788 - 0,000992}{32 \ln 2}$$

$$\langle e^2_{hkl} \rangle = \frac{0,114796}{22,1807098}$$

$$\langle e_{hkl} \rangle = \sqrt{0,005175}$$

$$\langle e_{hkl} \rangle = 0,0719$$

$$E = \sigma / \varepsilon$$

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

$$\sigma = 210 \times 0,0719$$

$$\sigma = 15,099 \text{ Mpa}$$



4. Hasil perhitungan regangan dan tegangan sisa Trunnion yang mengalami kegagalan

$$U_0 = 0,000992$$

$$E = 210$$

$$\langle e^2_{hkl} \rangle = \frac{U - U_0}{32 \ln 2}$$

$$\langle e^2_{hkl} \rangle = \frac{0,208061 - 0,000992}{32 \ln 2}$$

$$\langle e^2_{hkl} \rangle = \frac{0,207069}{22,1807098}$$

$$\langle e_{hkl} \rangle = \sqrt{0,009335}$$

$$\langle e_{hkl} \rangle = 0,0966$$

$$E = \sigma / \varepsilon$$

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

$$\sigma = 210 \times 0,0966$$

$$\sigma = 20,286 \text{ Mpa}$$



C. Standar ASTM A320

1. Mechanical Properties

ASTM A 320/A 320M

TABLE 1 Mechanical Requirements

Class and Grade, Diameter, in [mm]	Heat Treatment	Tensile Strength, min, ksi [MPa]	Yield Strength, min, ksi [MPa] (0.2 % offset)	Elongation in 2 in. or 50 mm min, %	Reduction of Area, min, %	Hardness max
Ferritic Steels						
L7, L7A, L7B, L7C, L70, L71, L72, L73 2½ [65] and under ^A	quenched and tempered	125 [860]	105 [725]	16	50	...
L43 4 [100] and under ^A	quenched and tempered	125 [860]	105 [725]	16	50	...
L7M 2½ [65] and under ^A	quenched and tempered at 1150°F [620°C], min	100 [690]	80 [550]	18	50	235 HB ^B or 99 HRB
L1 1 [25] and under ^A	quenched and tempered	125 [860]	105 [725]	16	50	...
Austenitic Steels^C						
Class 1: B8, B8C, B8M, B8P, B8F, B8T, B8LN, B8MLN, all diameters	carbide solution treated	75 [515]	30 [205]	30	50	223 HB ^D or 96 HRB
Class 1A: B8A, B8CA, B8MA, B8PA, B8FA, B8TA, B8LNA, B8MLNA, all diameters	carbide solution treated in the finished condition	75 [515]	30 [205]	30	50	192 HB or 90 HRB
Class 2: B8, B8C, B8P, B8F, B8T.	carbide solution treated and strain hardened					
¾ [20] and under		125 [860]	100 [690]	12	35	321 HB or 35 HRC
over ¾ to 1 [20 to 25], incl		115 [795]	80 [550]	15	30	321 HB or 35 HRC
over 1 to 1¼ [25 to 32], incl		105 [725]	65 [450]	20	35	321 HB or 35 HRC
over 1¼ to 1½ [32 to 40], incl ^A		100 [690]	50 [345]	28	45	321 HB or 35 HRC
Class 2: B8M.	carbide solution treated and strain hardened					
¾ [20] and under		110 [760]	95 [655]	15	45	321 HB or 35 HRC
over ¾ to 1 [20 to 25], incl		100 [690]	80 [550]	20	45	321 HB or 35 HRC
over 1 to 1¼ [25 to 32], incl		95 [655]	65 [450]	25	45	321 HB or 35 HRC
over 1¼ to 1½ [32 to 40], incl ^A		90 [620]	50 [345]	30	45	321 HB or 35 HRC



2. Chemical Composition

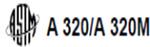


TABLE 4 Chemical Requirements (Composition, %)^A

Type	Ferritic Steels											
Grade	L7, L7M, L70		L7A, L71		L7B, L72		L7C, L73		L43		L1	
Description	Chromium-Molybdenum ^B		Carbon-Molybdenum (AISI 4037)		Chromium-Molybdenum (AISI 4137)		Nickel-Chromium-Molybdenum (AISI 8740)		Nickel-Chromium-Molybdenum (AISI 4340)		Low-Carbon Boron	
	Range, %	Product Variation, % Over or Under	Range, %	Product Variation, % Over or Under	Range, %	Product Variation, % Over or Under	Range, %	Product Variation, % Over or Under	Range, %	Product Variation, % Over or Under	Range, %	Product Variation, % Over or Under
Carbon	0.38–0.48 ^C	0.02	0.35–0.40	0.02	0.35–0.40	0.02	0.38–0.43	0.02	0.38–0.43	0.02	0.17–0.24	0.01
Manganese	0.75–1.00	0.04	0.70–0.90	0.03	0.70–0.90	0.03	0.75–1.00	0.04	0.60–0.85	0.03	0.70–1.40	0.04
Phosphorus max	0.035	0.005 over	0.035	0.005 over	0.035	0.005 over	0.035	0.005 over	0.035	0.005 over	0.035	0.005 over
Sulfur, max	0.040	0.005 over	0.040	0.005 over	0.040	0.005 over	0.040	0.005 over	0.040	0.005 over	0.050	0.005 over
Silicon	0.15–0.35	0.02	0.15–0.35	0.02	0.15–0.35	0.02	0.15–0.35	0.02	0.15–0.35	0.02	0.15–0.30	0.02
Nickel	...	...	...	...	...	...	0.40–0.70	0.03	1.65–2.00	0.05	...	...
Chromium	0.80–1.10	0.05	...	...	0.80–1.10	0.05	0.40–0.60	0.03	0.70–0.90	0.03	...	...
Molybdenum	0.15–0.25	0.02	0.20–0.30	0.02	0.15–0.25	0.02	0.20–0.30	0.02	0.20–0.30	0.02	...	...
Boron	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.001–0.003	...



E. Lampiran Uji Tarik

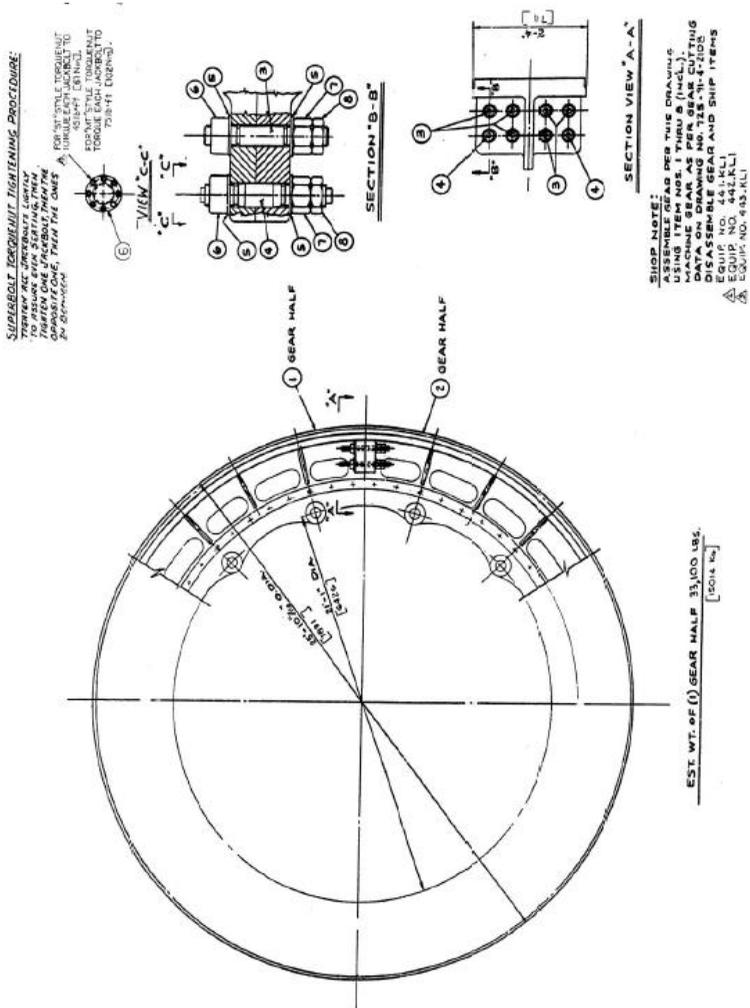
1. Standar Kalibrasi

KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN REPUBLIK INDONESIA		BADAN PENGAJIAN KEBIJAKAN, IKLIM DAN MUTU INDUSTRI BALAI BESAR BAHAN DAN BARANG TEKNIK Jl. Sangkurang No. 14 Bandung 40135 JAWA BARAT - INDONESIA Telp. 022 - 2504088, 2510682, 2504828, 2507626 Fax. 022 - 2502027 E-mail : bh@bdt.go.id Website : http://www.bdt.go.id		KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN DAFTAR PERUSAHAAN DAN USAHA KECIL DAN MENENCAH	
SERTIFIKAT KALIBRASI CALIBRATION CERTIFICATE					
Nomor : 3-09-15 - 0284 Number					
A L A T Equipment					
1. Nama Name	Mesin Uji Universal	2. Kapasitas Capacity	200 kN		
3. Tipe/Model Type/Model	UPD-20	4. Nomor Seri Serial Number	8877		
5. Merek/Buatan Manufacture	MFL System/ Germany	6. Ukuran Dalam Internal Dimension	-		
7. Pengontrol Suhu Temperature Control	-	8. Lain-lain Other	-		
P E M I L I K Owner					
1. Nama Name	LABORATORIUM KONSTRUKSI DAN KEKUATAN JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN ITS				
2. Alamat Address	Kampus ITS Keputih Sukolilo Surabaya				
S T A N D A R Standard					
1. Nama Name	Proving Ring No.Seri : 7368, Calibrating Box No.Seri : 2950				
2. Kelulusan Traceability	Hasil kalibrasi yang dilaporkan terlehas kesatuan pengukuran SI melalui Pusat KIM-LIPI, Serpong				
TANGGAL DITERIMA Date of acceptance	15 April 2015	TANGGAL KALIBRASI Date of Calibration	16 April 2015		
KONDISI LINGKUNGAN KALIBRASI Environment condition of Calibration	: Suhu udara : 29.2 - 29.4 °C				
LOKASI KALIBRASI Location of Calibration	: Lab Uji Konstruksi dan Kekuatan Kapal, Fakultas Teknologi Kelautan ITS Surabaya				
METODA KALIBRASI Calibration method	: PC-309-07				
ACUAN Reference	: BS EN ISO 7500 : 2004 : Metallic materials, verification of static uniaxial testing machines - Part 1: tension / compression testing machines.				
HASIL KALIBRASI DAN KETIDAKPASTIAN KALIBRASI (Terlampir) Result of Calibration and uncertainty of Calibration (Attached)					
DITERBITKAN TANGGAL : 27 April 2015					
Halaman 1 dari 5					
Keterangan : 1. Dilarang memproduksi sertifikat ini tanpa izin tertulis dari B4T kecuali secara keseluruhan 2. Hasil kalibrasi ini tidak untuk diumumkan dan hanya berlaku untuk alat yang bersangkutan.					



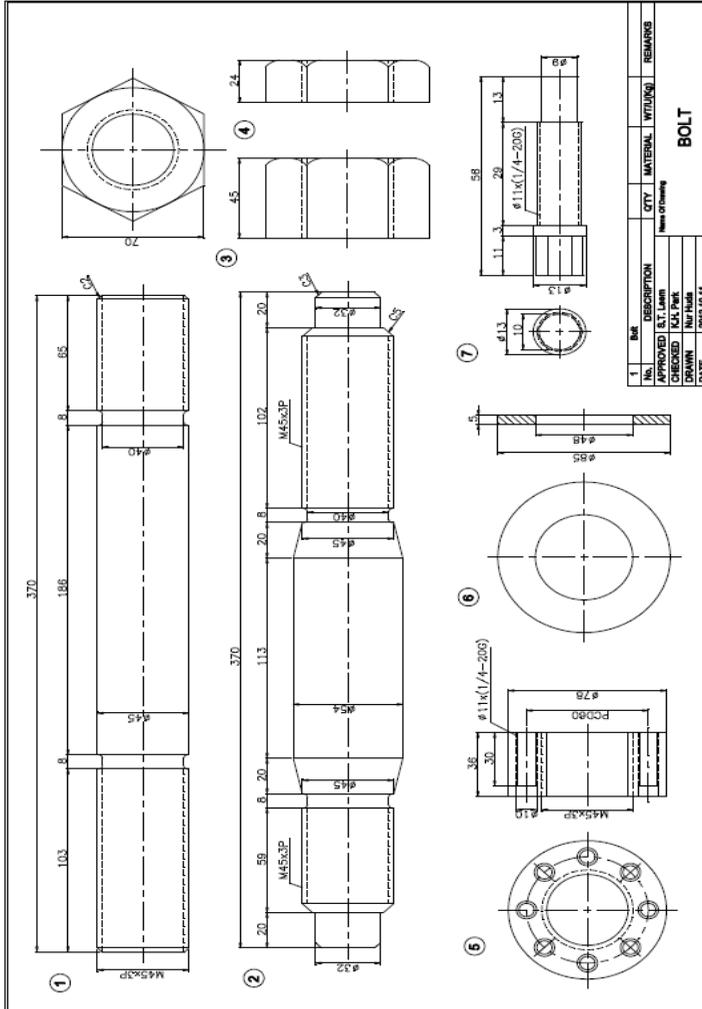
F. Lampiran Gambar Desain

1. Gambar Desain Girth-Gear





2. Gambar Desain Superbolt





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Faktor penyebab kegagalan pada komponen superbolt yaitu karena terjadi pembebanan siklik yang terpusat pada daerah titik kritis yang menyebabkan tegangan sisa sehingga terjadi inisiasi retakan yang selanjutnya menyebabkan patah.
2. Mekanisme kegagalan yang terjadi pada komponen superbolt yaitu mekanisme patah lelah, diawali dengan inisiasi retakan yang disebabkan faktor penyebab kegagalan dan retakan terus menjalar sampai akhirnya komponen superbolt tidak dapat menahan beban lagi dan akhirnya terjadi patah statik.
3. Untuk mengatasi kegagalan yaitu dengan memberikan perlakuan panas austempering pada komponen superbolt agar dapat meningkatkan ketahanan terhadap beban siklik dan meningkatkan kekuatan tarikannya.

5.2. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka berikut adalah beberapa saran yang dapat menjadi acuan apabila dilakukan penelitian selanjutnya:

1. Melengkapi kelengkapan data operasi maupun *data record* komponen superbolt baik sebelum dan sesudah komponen mengalami kegagalan
2. Perlu adanya variasi parameter dalam melakukan perlakuan panas agar dapat dibandingkan dan didapatkan hasil yang paling baik.
3. Bahan yang digunakan untuk proses austempering sebaiknya menggunakan sampel komponen superbolt yang sesuai dengan standar ASTM A320 L43.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR PUSTAKA

- _____, 1998. **ASM Handbook, Vol 03, Alloy Phase Diagrams**, ASM International, Materials Park
- _____, 1998. **ASM Handbook, Vol 09, Metallography and Microstructures 2004**, ASM International, Materials Park
- _____, 1998. **ASM Handbook, Vol 11, Failure Analysis and Prevention**, ASM International, Materials Park
- _____, 1998. **ASM Handbook, Vol 12, Fractography**, ASM International, Materials Park
- Akuan, Abrianto. 2008. **Analisa Kegagalan Logam**. Cimahi: Universitas Jendral Ahmad Yani
- Avner, Sidney H. 1974. **Introduction to Physical Metallurgy**. New York: Mc.Graw Hill Publishing Co. Inc.
- Callister, William. 2007. **Material Science and Engineering An Introduction**. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Chandra, Devi, Fadli, M., & Gunawarman. 2010. **Analisis Tegangan Baut Pengunci Girth Gear Kiln**. Padang: Universitas Andalas
- Colangelo, V.J. 1989. **Analysis of Metallurgical Failures Second Edition**. Singapore : John Wiley & Sons, Inc.
- Firdaus, Apriyadi & Tri Wibowo S. 2007. **Proses Pembuatan Semen pada PT. Holcim Indonesia tbk**. Banten: Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
- Handra, Nofriady & Brazi. 2012. **Pengaruh Posisi Baut Galvanis dan Stainless Steel Ditinjau dari Fracture**



Surface pada Sambungan Plat. Institut Teknologi Padang

- Hatta, Ilham. 2000. **Analisis Kerusakan Baut Pengikat Meja Putar Pada Sistem Transportasi Alat Angkat.**
Serpong: UPT-LUK, BPP Teknologi
- Ibad, Ilham Khoirul & Rochman Rochiem. 2014. **Analisa Kegagalan Baut Piston Vvcp Gas Kompresor Gemini Ds-504 Emp Malacca Strait Sa.** Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Ibrahim, Alfredo & Rochman Rochiem. 2013. **Analisa Kegagalan Baut Pengunci Tipe 3111020050 Pada Kompartmen-I Rawmill IIB Indarung IV PT. Semen Padang.** Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Lubis, Huda Istikha & Muchtar Karokaro. 2009. **Pengaruh Temperatur Austenisasi dan Holding Time pada Proses Austempering Terhadap Srukturmikro dan Sifat Mekanik Besi Tuang Nodulan Grade 500.**
Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Molaei, Sh, Alizadeh, M Attarian, & Y. Jaferian. 2015. **A Failure Analysis Study on The Fractured Connecting Bolts of A Filter Press.** Elsevier Ltd
- Murdiyati, Nur H., dkk. 2010. **Kiln pada Industri Semen.**
Surakarta: Universitas Sebelas Maret
- Priambadha, Genki R. & Rochman Rochiem. 2015. **Analisa Kegagalan Kopleng Fluida pada Mesin Pengering Pupuk.** Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember



Putra, Trisna. 2012. **Perambatan Retak Tap Bolt UNC – Oil Coated ASTM 325**. Padang: Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat

Samosir, Nusin, dkk. 2005. **Analisis Kegagalan Bodi Pompa Baja Nitriding**. Jogjakarta: Puslitbang Teknologi Maju

Sitompul, Anthonius, Sulistioso G.S., & Sumaryo. 2006. **Pengaruh Proses Nitridiasi Terhadap Sifat Mekanis Permukaan Baja Paduan Rendah AISI 4340**. Tangerang: Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir

Steinbock, Allan. 2005. **Cost Justification and Reliability Benefits of Multi-Jackbolt Tensioners**. Superbolt, Inc., Carnegie. PA

Suherman, Wahid. 1999. **Ilmu Logam I**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surdia, Tata & Shinroku Saito. 1999. **Pengetahuan Bahan Teknik**. Jakarta: Pradnya Paramita

Thelning, Karl E. 1984. **Steel and Its Heat Treatment Second Edition**. Delhi: Reed Educational and Professional Publisihing Ltd.

Wulpi Donald J. 1999. **Understanding How Components Fails**. Material Park. Ohio. USA. ASM International.



halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Achmad Iqbal Fathoni dilahirkan di Bontang pada tanggal 23 September 1994. Penulis merupakan anak kedua dari 4 bersaudara dari pasangan Achmad Widjaya dan Nurul Azizah, dan telah menempuh pendidikan formal yaitu SD 2 YPK Bontang, SMP YPK Bontang dan SMA YPK Bontang. Setelah lulus dari SMA, penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS dengan

nomor registrasi pokok 2712 100 054.

Semasa kuliah, penulis terdaftar aktif sebagai staff Badan Semi Otonom Kewirausahaan Himpunan Mahasiswa Teknik Material (BSO KWU HMMT) FTI-ITS periode 2013-2014 dan sebagai Direktur BSO KWU HMMT FTI-ITS periode 2014-2015. Pada tahun 2013-2014 penulis juga aktif di organisasi keagamaan JMMI ITS bidang Badan Pelayanan Umat (BPU).

Penulis melakukan kerja praktik di PT. Pupuk Kalimantan Timur dengan penelitian mengenai analisa kegagalan pada *tube intercooler heat exchanger*. Kemudian penulis melakukan penelitian di PT. Semen Indonesia tentang analisa kegagalan komponen superbolt pada girth-gear mesin kiln yang diangkat menjadi topik tugas akhir ini.

Selesainya tugas akhir ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi sepuluh Nopember Surabaya.

Email : fathoniiqbal@gmail.com