



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



PERAN ILMU DAN TEKNIK MATERIAL DALAM MENDUKUNG INDUSTRI DI INDONESIA

Profesor Husaini Ardy
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung

**Aula Barat ITB
11 Februari 2023**

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**PERAN ILMU DAN TEKNIK MATERIAL
DALAM MENDUKUNG INDUSTRI
DI INDONESIA**

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

PERAN ILMU DAN TEKNIK MATERIAL DALAM MENDUKUNG INDUSTRI DI INDONESIA

Profesor Husaini Ardy

11 Februari 2023
Aula Barat ITB



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

ITB  **PRESS**

Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

**PERAN ILMU DAN TEKNIK MATERIAL DALAM MENDUKUNG INDUSTRI
DI INDONESIA**

Penulis : Profesor Husaini Ardy
Editor Bahasa : Rina Lestari
Layout : Ripky
Cetakan I : 2023
ISBN : 978-623-297-274-2



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Swt. Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, bahwasanya atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini. Penghargaan dan rasa hormat serta terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, atas perkenannya saya menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar.

Sebagaimana diamanatkan dalam PP 155/2000, Majelis Guru Besar (MGB) adalah unsur ITB yang berfungsi melakukan pembinaan kehidupan akademik dan integritas moral serta etika dalam lingkungan *civitas academica* ITB. Sehubungan dengan itu, MGB mengemban tanggung jawab atas tegaknya integritas moral dan etika professional sivitas akademika Institut dan atas kukuhnya keserjanaan di lingkungan Institut.

Semoga tulisan ini dapat memberikan wawasan, dan inspirasi yang bermanfaat bagi para pembaca.

Bandung, 11 Februari 2023

Prof. Husaini Ardy

SINOPSIS

Bidang Keahlian Ilmu dan Teknik Material yang berada dalam lingkungan Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara dibentuk dengan visi untuk bekerja sama dan mendukung perkembangan industri di Indonesia terutama terkait dengan penggunaan material dalam proses menghasilkan produk atau sebagai komponen pendukung dalam peralatan pabrik.

Orasi ilmiah ini memberi dua contoh studi kasus terkait peranan bidang keahlian ilmu dan teknik material dalam membantu industri di Indonesia dalam mengatasi masalah yang mereka hadapi dan bersumber dari penggunaan material.

Studi kasus pertama adalah tentang kegagalan berulang pipa uap pada industri pembangkit listrik yang telah mengakibatkan kerugian besar karena terjadi tiga kali pemadaman berturut-turut dalam interval waktu satu bulan. Analisis yang rinci menemukan bahwa kegagalan yang terjadi disebabkan oleh kesalahan dalam proses pemotongan dan penyambungan pipa-pipa uap.

Studi kasus kedua adalah tentang pembuatan model dan pengembangan metode perhitungan umur sisa pipa penyalur minyak mentah. Studi kasus ini melibatkan tiga bidang keahlian, yaitu Ilmu dan Teknik Material, Perancangan, dan Statistik. Model dan metode dikembangkan karena belum ada metode baku yang ada untuk menghitung umur sisa berdasarkan data inspeksi tebal pipa. Tim kerja telah berhasil membuat model dan metode perhitungan serta menerapkannya dalam perhitungan umur sisa pipa penyalur.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
1. PENDAHULUAN	1
2. ANALISIS KEGAGALAN PIPA UAP [1].....	2
3. KAJIAN UMUR TEKNIS PIPA PENYALUR [3]	10
4. PENUTUP	24
5. UCAPAN TERIMA KASIH	25
DAFTAR PUSTAKA	26
CURRICULUM VITAE	27

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Potongan pipa uap yang gagal (a) pecah (rupture) dan (b) menggelembung (bulging).....	3
Gambar 2.	Struktur mikro pipa yang tidak pecah. P = Perlit, F = Ferit	5
Gambar 3.	Struktur mikro dinding luar pipa uap yang gagal pecah dan (b) menggelembung.....	5
Gambar 4.	Variasi kekuatan tarik (garis hijau) dan batas luluh (garis hitam) terhadap temperatur material pipa.....	8
Gambar 5.	Pemotongan pipa yang gagal menggunakan torch	9
Gambar 6.	Pipa penyalur minyak	10
Gambar 7.	Model kegagalan pipa penyalur	13
Gambar 8.	Peluang kegagalan (<i>probability of failure</i>) akibat interaksi antara distribusi beban dan distribusi tahanan	13
Gambar 9.	Plot kurva peluang kegagalan per tahun terhadap waktu operasi	19
Gambar 10.	Kurva peluang terjadinya kegagalan per tahun terhadap tahun operasi dengan tekanan operasi 205 psi	22
Gambar 11.	Kurva peluang terjadinya kegagalan per tahun terhadap tahun operasi dengan tekanan operasi 300 psi	22
Gambar 12.	Penentuan umur sisa pipa penyalur dengan tekanan operasi 205 psi	23
Gambar 13.	Penentuan umur sisa pipa penyalur dengan tekanan operasi 300 psi	23
Gambar 14.	Ilustrasi perbandingan peluang terjadinya kegagalan per tahun sebelum dan sesudah <i>repair</i>	24

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Komposisi kimia material pipa uap (% berat).....	3
Tabel 2.	Hasil uji tarik material pipa uap	4
Tabel 3.	Hasil uji kekerasan pipa	7
Tabel 4.	Tabel target peluang kegagalan per tahun berdasarkan DnV- RP-F101 tahun 2010	18
Tabel 5.	Data-data pipa penyalur 30”	19
Tabel 6.	Hasil Analisis Data Parameter Pipa Penyalur	20
Tabel 7.	Peluang terjadinya kegagalan pipa penyalur	21

1. PENDAHULUAN

Kelompok Keahlian Ilmu dan Teknik Material berakar di Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara yang sebelumnya dikenal sebagai Departemen Teknik Mesin. Sesuai dengan fitrahnya, maka keberadaan Teknik Mesin ITB tidak dapat dipisahkan dari perkembangan industri di Indonesia, salah satunya adalah keberadaan Kelompok Bidang Keahlian Teknik Produksi yang terbagi atas dua subkelompok, yaitu Teknik Produksi Pemesinan dan Teknik Produksi Pembentukan. Keahlian Teknik Material merupakan bagian dari Teknik Produksi Pembentukan yang menitik beratkan pada material logam.

Bidang keahlian Teknik Material ini dirintis oleh almarhum Prof. Ir. Tata Surdia yang mempunyai visi untuk mendampingi industri di Indonesia dalam memproduksi produk berbasis logam karena selalu ada masalah dalam proses pembuatan produk. Proses produksi yang menjadi perhatian utama adalah terkait dengan pembentukan (*forming*), pengecoran (*casting*), dan pengelasan (*welding*).

Dalam perjalanan waktu, bidang Teknik material juga dituntut untuk mendampingi industri pengguna material yang terkait dengan industri petrokimia, minyak dan gas, serta pertambangan karena banyak juga ditemukan masalah kegagalan material akibat kondisi operasi dan pengaruh lingkungan kerja. Untuk menjawab tantangan ini, maka almarhum Prof. Dr. Ir. Mardjono Siswosuwarno mulai merintis bidang keahlian Analisa Kegagalan Material yang merupakan ilmu forensik material dalam mencari penyebab kegagalan suatu komponen atau peralatan produksi.

Pembangunan industri di Indonesia juga terkait dengan ilmu dan teknik material terutama dalam hal pemilihan material yang tepat sesuai dengan kondisi kerja dan lingkungan operasinya, sehingga keandalan pabrik menjadi tinggi dan biaya pemeliharaan dapat dikurangi. Keahlian dalam pemilihan material ini telah banyak dimanfaatkan dalam pembangunan industri petrokimia dan minyak & gas di Indonesia.

Material yang digunakan pada kondisi operasi temperatur tinggi seperti pipa-pipa uap pada ketel (*boiler*), sudu turbin uap, ruang bakar dan komponen lain yang terpapar temperatur tinggi memerlukan material khusus yang memang telah diproduksi untuk keperluan tersebut. Umumnya material temperatur tinggi ini bekerja dengan beban mekanik yang besar juga,

sehingga kegagalan material akibat beban temperatur dan beban mekanik sering terjadi, serta memerlukan keahlian khusus untuk menganalisis penyebab kegagalannya.

Uraian singkat di atas dapat memberikan gambaran tentang bidang keahlian ilmu dan teknik material, khususnya material logam dalam bekerja sama dengan industri untuk membantu pihak industri dalam mengatasi masalah yang mereka hadapi.

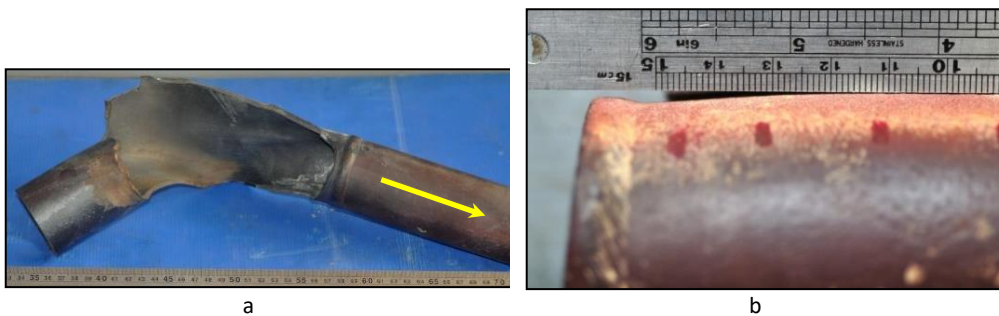
Dua kasus yang terkait dengan penerapan Ilmu dan Teknik Material dalam kerja sama industri akan disampaikan dalam orasi ilmiah ini sehingga hadirin dapat memperoleh gambaran tentang peranan keahlian bidang ilmu dan teknik material dalam mendukung industri di Indonesia.

Kasus pertama yang dibahas adalah tentang kegagalan berulang pada pipa uap dalam *boiler* turbin uap suatu perusahaan pembangkit listrik. Kasus ini menjadi menarik karena terjadi berulang kali dan disebabkan oleh kesalahan prosedur kerja pada waktu pemeliharaan.

Kasus kedua terkait dengan perkiraan umur sisa pipa penyalur minyak pada salah satu perusahaan minyak dan gas. Kasus ini merupakan salah satu bentuk kerja sama industri dan juga kerja sama antara kelompok keahlian Ilmu dan Teknik Material, Kelompok Keahlian Perancangan FTMD, dan Kelompok Keahlian Statistik FMIPA.

2. ANALISIS KEGAGALAN PIPA UAP [1]

Pipa uap yang mengalami kegagalan disebut sebagai *low temperature superheater tube* dengan diameter 60 mm, tebal 5.6 mm, temperatur sekitar 410 °C, dan tekanan sekitar 11 MPa. Pipa uap ini telah digunakan selama tujuh tahun. Kegagalan pada tahun 2014 terjadi berulang kali dengan interval sekitar satu bulan, yaitu 17 Maret, 06 April, dan 13 Mei. Kegagalan selalu terjadi di sekitar sambungan las (Gambar 1). Perusahaan melakukan studi untuk mengetahui penyebab kegagalan tersebut karena pemadaman (*shutdown*) setiap satu bulan selama satu minggu sangat membebani perusahaan. Kami diminta untuk melakukan studi tersebut untuk menggali penyebab kegagalan yang terjadi.



Gambar 1. Potongan pipa uap yang gagal (a) pecah (rupture) dan (b) menggelembung (bulging)

Tahap pertama pekerjaan ini adalah melakukan karakterisasi material dan membandingkannya dengan spesifikasi yang dicantumkan dalam perancangan pipa uap. Karakterisasi dilakukan dengan menguji komposisi kimia, kekuatan, dan struktur mikro material.

Komposisi kimia material pipa uap diuji dengan alat *optical emission spectroscopy* (OES). Pengujian dilakukan terhadap pipa yang bagus, pipa yang pecah, dan pipa yang menggelembung untuk mengetahui jika ada perbedaan komposisi kimianya. Hasil uji dan perbandingannya dengan spesifikasi ASME SA213 Grade T12 dapat dilihat dalam Tabel 1. Hasil uji komposisi kimia menunjukkan bahwa ketiga jenis material pipa uap terbuat dari material yang sama, yaitu ASME SA 213 Grade T-12 yang setara dengan GB 8162 Grade 12Cr1MoV (standar RRC), dan sesuai dengan spesifikasi perancangan.

Tabel 1. Komposisi kimia material pipa uap (% berat)

Unsur	Hasil uji			Spesifikasi	
	Pipa Bagus	Pipa Pecah	Pipa Gelembung	ASME SA213 T12 Spesifikasi	GB 8162 12Cr1MoV Spesifikasi
C	0.057	0.123	0.142	0.05 – 0.15	0.08 – 0.15
Si	0.268	0.198	0.190	≤0.50	0.17 - 0.37
P	0.013	0.014	0.013	≤0.025	≤0.035
S	0.004	0.006	0.006	≤0.025	≤0.035
Mn	0.563	0.579	0.566	0.30 - 0.61	0.40 - 0.70
Cr	0.918	0.940	0.976	0.80 - 1.25	0.90 - 1.20
Mo	0.250	0.262	0.257	0.44 - 0.65	0.25 - 0.35
V	0.209	0.190	0.191	----	0.15 - 0.30
Ni	0.034	0.048	0.047	----	≤0.30
Fe	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance

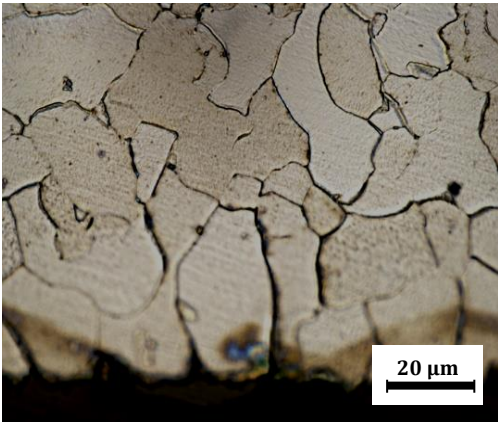
Sifat mekanik material pipa diuji tarik menggunakan mesin uji tarik universal untuk mendapatkan sifat mekanik seperti kekuatan tarik, batas luluh, dan elongasi. Sampel uji tarik diambil dari arah memanjang pipa yang

bagus dan pipa yang menggelembung. Hasil uji tarik ditunjukkan dalam Tabel 2. Pipa yang bagus dan pipa yang menggelembung terbuat dari material yang sama yang memenuhi persyaratan spesifikasi ASME SA 213 Grade T-12. Pipa yang menggelembung mempunyai kekuatan tarik dan batas luluh yang lebih rendah dari pipa yang bagus karena terjadinya perubahan struktur mikro akibat pemanasan.

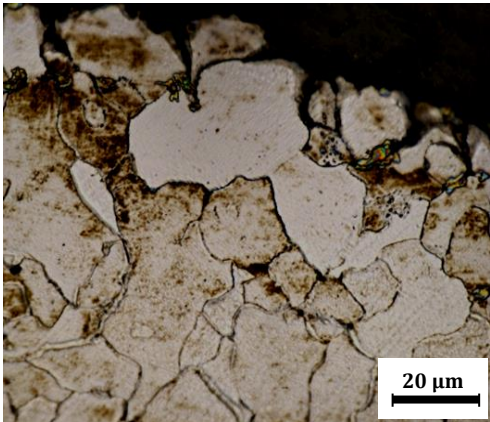
Tabel 2. Hasil uji tarik material pipa uap

Sifat Mekanik	Hasil Uji		Spesifikasi	
	Pipa Bagus	Pipa Gelembung	ASME SA213 T12	GB 8162 12Cr1MoV
Kekuatan tarik, MPa	588	462	≥ 415	470 - 640
Batas luluh, MPa	427	275	≥ 205	≥ 255
Elongasi, %	22	33	≥ 30	≥ 21

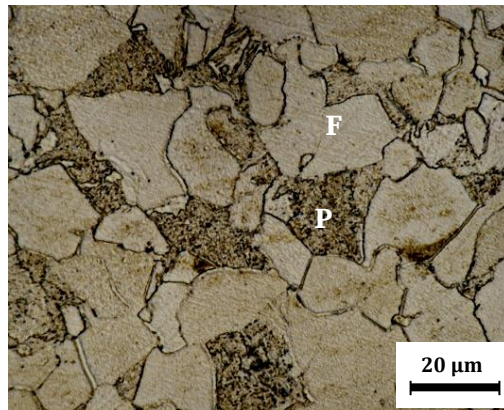
Struktur mikro material pipa yang bagus diperoleh dengan mengambil sampel dalam penampang longitudinal. Sampel untuk pengamatan disiapkan dengan mesin ampelas, mesin poles, dan direaksikan dengan larutan Nital agar struktur mikro dapat diamati dan difoto menggunakan mikroskop optik. Struktur mikro pipa yang bagus dapat dilihat dalam Gambar 2. Struktur mikro di permukaan dalam dan luar telah mengalami perubahan karena koloni perlitnya telah hilang akibat terjadinya dekarburasi selama beroperasi. Struktur mikro pada lokasi ½ tebal menunjukkan struktur mikro baja karbaon rendah yang mengalami proses normalisasi. Struktur mikro pada lokasi ½ tebal ini mewakili struktur mikro pipa baru yang terdiri dari fasa ferit (warna terang) dan perlit (warna gelap).



a. Permukaan dalam



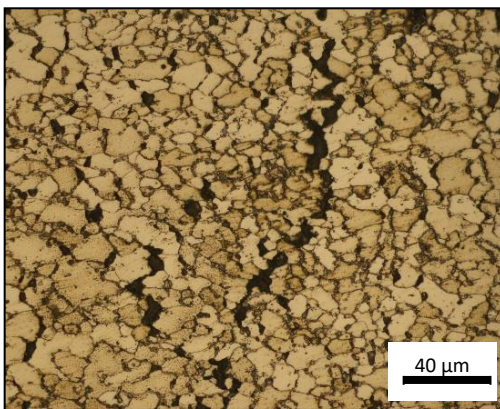
b. Permukaan luar



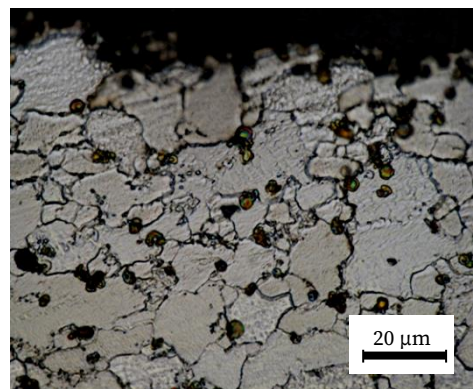
c. Posisi ½ tebal

Gambar 2. Struktur mikro pipa yang tidak pecah. P = Perlit, F = Ferit

Tahap selanjutnya adalah melakukan pemeriksaan struktur mikro pipa uap yang pecah dan yang menggelembung (Gambar 3). Struktur mikro pipa uap yang pecah maupun yang menggelembung terdiri dari fasa ferit (warna terang) dan grafit bulat (warna gelap). Adanya grafit bulat dalam struktur mikro mengindikasikan bahwa dinding luar pipa telah terpapar temperatur tinggi dalam waktu lama sehingga sementit (Fe_3C) dalam material terurai menjadi ferit (Fe) dan grafit (C), mengikuti reaksi kimia $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe}$ (ferit) + C (grafit).



a



Gambar 3. Struktur mikro dinding luar pipa uap yang gagal pecah dan (b) menggelembung

Struktur mikro pipa yang pecah juga menunjukkan adanya retakan antarbutir (*intergranular crack*) yang mengindikasikan terjadinya mulur (*creep*). Fenomena *creep* ini seharusnya tidak terjadi karena temperatur kerja hanya 410 °C dan umur pipa baru 7 tahun (sekitar 70.000 jam).

Retakan antarbutir itu terjadi karena grafitisasi, sehingga grafit yang ada di batas butir akan melemahkan batas butir, menyebabkan *grain boundary sliding* akibat adanya tegangan tangensial (*hoop stress*). Pipa yang menggelembung merupakan akibat dari proses grafitisasi yang menurunkan kekuatan material serta meningkatkan volume karena terbentuknya grafit berbentuk bulat (*spherical graphite*).

Dalam material baja karbon, sementit (Fe_3C) adalah fasa yang tidak stabil dan dapat mengurai menjadi ferit dan grafit (karbon bebas). Sementit pada temperatur tinggi dapat mengalami dua jenis transformasi, yaitu sferoidisasi (perubahan bentuk dari bentuk pelat menjadi bola), dan perubahan sementit menjadi ferit dan grafit (grafitisasi).

Sferoidisasi dan grafitisasi merupakan dua proses yang saling berkompetisi. Pada temperatur rendah, grafitisasi terjadi sebelum koloni perlit membulat dan menghilang. Pada temperatur tinggi, sferoidisasi terjadi sebelum grafitisasi.

Grafitisasi pada baja karbon biasanya terjadi pada selang temperatur 425 sampai 550 °C, sehingga terjadinya grafitisasi pada pipa uap yang beroperasi pada 410 °C perlu dipertanyakan. Untuk memverifikasi proses grafitisasi ini, maka digunakan model yang diusulkan oleh Viswanathan [2] sehingga dapat diketahui bahwa grafitisasi pada 409 °C hanya akan terjadi setelah 100.000 jam operasi, padahal pipa uap yang gagal baru beroperasi 70.000 jam. Grafitisasi setelah 70.000 jam baru akan terjadi jika temperatur kerjanya adalah 460 °C. Hal ini tidak mungkin terjadi karena hanya empat pipa yang gagal dan semuanya terletak dalam *row* yang sama.

Struktur mikro pipa yang pecah dan yang menggelembung terdiri dari ferit dan grafit, di mana populasi grafit pada dinding luar lebih besar daripada dinding dalam. Hal ini dapat dikaitkan dengan kemungkinan terjadinya difusi karbon dari lingkungan bahan bakar batubara, tetapi hal ini tidak mungkin terjadi juga karena hanya empat pipa yang bermasalah.

Kekerasan pipa telah diuji menggunakan alat uji keras mikro Vickers dengan beban 500 gram. Pengujian dilakukan pada tiga pipa, yaitu pipa yang bagus, pipa yang pecah, dan pipa yang menggelembung. Hasil pengujian ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Hasil uji kekerasan pipa

Lokasi	Pengukuran (VHN)	Rerata (VHN)
Pipa bagus		
½-tebal	175, 202, 205, 198, 178	192
Pipa gelembung		
Permukaan dalam	132, 132, 137, 137, 137	135
½-tebal	142, 142, 137, 137, 137	139
Permukaan luar	142, 142, 148, 154, 148	147
Pipa pecah		
A-1 (Ujung retakan)	132, 139, 144, 148, 165	146
180° dari ujung retakan	165, 160, 165, 178, 176	169

Kekerasan rata-rata pipa yang bagus adalah 192 VHN. Terpaparnya pipa ke temperatur tinggi memengaruhi nilai kekerasan, semakin lama waktu terpapar, maka semakin rendah kekerasan, seperti ditunjukkan oleh lebih rendahnya kekerasan pipa yang menggelembung dibandingkan pipa yang bagus dan pipa yang pecah. Penurunan kekerasan juga mengindikasikan penurunan kekuatan material pipa dan naiknya keuletan.

Kekuatan material pipa pada temperatur tinggi perlu juga dikaji untuk memastikan bahwa material pipa aman beroperasi pada temperatur kerjanya dengan tekanan operasi yang dipakai.

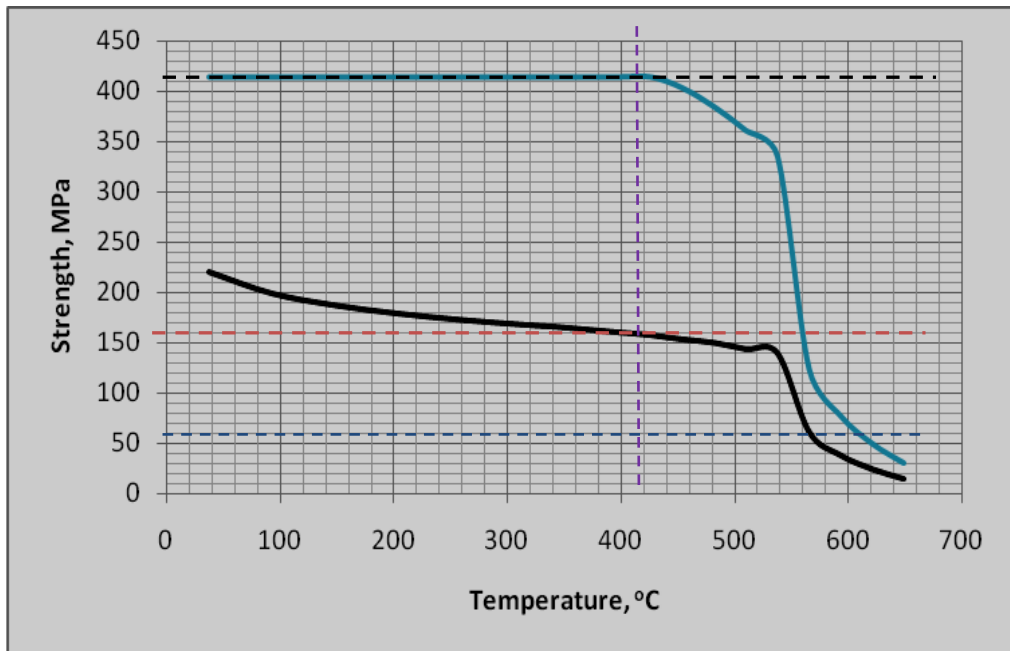
Tegangan tangensial pada dinding pipa akibat tekanan kerja dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\sigma_{hoop} = \frac{p(d - t)}{2t} \tag{2.1}$$

Di mana σ_{hoop} adalah tegangan tangensial pada dinding pipa pada tekanan kerja, p adalah tekanan kerja (11 MPa), d adalah diameter luar pipa (60 mm), dan t adalah tebal dinding pipa (5,6 mm). Setelah memasukkan nilai-nilai variabel ke dalam persamaan di atas, maka diperoleh tegangan tangensial pada dinding pipa sebesar 53 MPa.

Material pipa (SA 213 T12) adalah pipa baja karbon tanpa lasan (*seamless carbon steel*) untuk temperatur tinggi. Material pipa disuplai dalam kondisi anil atau normalisasi, selanjutnya ditemper pada temperatur 650-730 °C. Sifat mekanik standar (batas luluh dan kekuatan tarik) untuk material ini pada temperatur tinggi dapat diperoleh dari buku standar ASME *Section II*. Data kekuatan tersebut dapat disusun dalam suatu grafik, sehingga diperoleh

kecendrungan kekuatan dengan perubahan temperatur. Gambar 4 menunjukkan pengaruh temperatur terhadap kekuatan material pipa.



Gambar 4. Variasi kekuatan tarik (garis hijau) dan batas luluh (garis hitam) terhadap temperatur material pipa

Dapat dilihat dalam Gambar 4 bahwa batas luluh material pada temperatur 409 °C adalah 160 MPa (garis merah putus-putus) dan kekuatan tariknya adalah 410 MPa (garis hitam putus-putus). Dengan menggunakan data dalam Gambar 4, maka luluhnya material pipa dengan tegangan tangensial 53 MPa akan terjadi pada temperatur 555 °C (garis biru putus-putus). Dengan menggunakan data dalam Gambar 4 dapat juga ditentukan bahwa luluh pada temperature 409 °C akan terjadi jika tegangan tangensialnya 160 MPa atau ketika tekanan kerja menjadi 33 MPa (tiga kali tekanan kerja sekarang). Dari analisis kekuatan ini jelaslah bahwa material pipa aman dipakai pada tekanan 11 MPa dan temperature 410 °C. Perlu diingat bahwa kajian tegangan ini hanya mempertimbangkan pengaruh temperatur terhadap kekuatan, sedangkan perubahan (kerusakan) struktur mikro karena paparan ke temperatur tinggi tidak menjadi pertimbangan.

Tahapan selanjutnya adalah mencari sumber temperatur tinggi yang menyebabkan terjadi *creep* dan *bulging* pada pipa-pipa uap tersebut. *Local overheating* pada pipa-pipa uap dapat disebabkan oleh proses pemotongan

pipa yang gagal dengan *torch* kemudian disambung kembali dengan pipa baru. Untuk mengetahui hal tersebut, maka dilakukan penelusuran dokumentasi pada waktu pemotongan pipa-pipa uap (Gambar 5). Dapat dilihat bahwa risiko terjadinya pemanasan lokal pipa-pipa yang berdekatan sangat tinggi, sehingga hal inilah yang dicurigai menjadi penyebab kegagalan pipa-pipa uap yang lokasinya berdekatan.

Struktur mikro pada permukaan retakan menunjukkan adanya lapisan oksida, tetapi material baja paduan rendah (*low alloy steel*) baru mulai teroksidasi pada 552 °C sedangkan temperatur operasinya hanya 409 °C, karena itu, lapisan oksida itu dapat terjadi ketika proses pemotongan pipa menggunakan lasan (*torch*), dimana nyala api berkontak dengan permukaan pipa yang retak.

Tindakan preventif telah dilakukan perusahaan dengan melakukan perbaikan proses pemotongan dan pengelasan sehingga tidak mengakibatkan efek pemanasan pada pipa-pipa uap yang berdekatan.

Hasil kajian yang ditampilkan menunjukkan bahwa kegagalan suatu komponen harus dikaji dengan teliti dan melihat segala kemungkinan yang dapat menjadi penyebab kegagalan. Melalui pengujian material dan analisis data, maka penyebab kegagalan dapat ditentukan dengan lebih akurat sehingga masalah yang timbul dapat diatasi dengan lebih cermat dan tepat sasaran.



a



b

Gambar 5. Pemotongan pipa yang gagal menggunakan torch

3. KAJIAN UMUR TEKNIS PIPA PENYALUR [3]

Pipa penyalur (*shipping lines*) adalah pipa yang mengalirkan minyak (Gambar 6) setelah mengalami perlakuan tertentu sehingga minyak dan pengotornya terpisah. Kajian umur teknis pipa penyalur ini merupakan pekerjaan yang melibatkan kelompok keahlian dari dua fakultas, yaitu FTMD (Ilmu dan Teknik Material, Perancangan), dan FMIPA (Statistik). Tim Ilmu dan Teknik Material memfokuskan diri dalam analisis hasil pengujian tebal dinding pipa dan mengidentifikasi jenis degradasi yang terjadi. Tim dari kelompok perancangan melakukan analisis tegangan untuk menentukan distribusi tegangan dan daerah kritis pada sistem pemipaan. Tim dari kelompok statistik akan melakukan pengembangan model matematika yang dapat digunakan sebagai cara menghitung umur sisa pipa penyalur tersebut.



Gambar 6. Pipa penyalur minyak

Tim perlu membuat model dan metode yang tepat untuk menentukan umur teknis pipa penyalur karena metode baku belum ada. Perhitungan umur teknis akan mengacu kepada data inspeksi tebal pipa yang jumlahnya sangat banyak, karena pipa telah beroperasi selama 43 tahun. Berdasarkan data hasil inspeksi yang dilakukan perusahaan, terdapat beberapa daerah kritis pada pipa akibat korosi seragam, lokal, atau sumuran, serta adanya beban pada pipa (internal dan eksternal).

Sebagian dari pipa telah mengalami *repair* setelah dilakukan inspeksi, sehingga tim juga harus mempertimbangkan proses *repair* tersebut dalam menentukan umur sisanya. *Repair* tersebut pastilah akan memperpanjang umur sisa.

Secara garis besarnya perhitungan umur teknis ini dilakukan atas beberapa tahapan:

- a. Pengumpulan data
- b. Penentuan segmen pipa berdasarkan kesamaan jenis material pipa, diameter pipa, serta kecepatan dan komposisi fluida di dalam pipa. Dalam contoh yang ditampilkan ini akan dibahas kajian umur sisa pada pipa penyalur yang terbuat dari baja karbon API 5L Grade B dengan diameter 30" sepanjang 75.231 meter dan berisi *crude oil*.
- c. Identifikasi kerusakan, berdasarkan API RP 571 *Second Edition*, API 579/ASME FFS-1 *Second Edition*, dan API RP 580, pipa penyalur dapat mengalami mekanisme kerusakan seperti:
 - Penipisan seragam (*general metal loss*)
 - Penipisan lokal (*local metal loss*)
 - Korosi sumuran (*pitting corrosion*)
 - Goretan (*scratch*)
 - Penyok (*dent*)
 - Laminasi (*lamination*)
- d. Analisis tegangan segmen pipa menggunakan Caesar II dan Manual. Analisis tegangan bertujuan untuk mendapatkan distribusi tegangan sepanjang jalur pipa. Dalam analisis integritas pipa, semua beban yang bekerja harus dipertimbangkan dalam analisis. Dalam pengoperasiannya, material pipa dikenai beban internal dan eksternal. Beban internal adalah akibat dari tekanan operasi, sedangkan beban eksternal adalah akibat berat pipa, beban tanah, tumpuan (*support*), *lowering*, *natural bending*, belokan, dan beban akibat *road crossing*.

Analisis menggunakan metode numerik seperti metode elemen hingga umumnya digunakan untuk memperoleh distribusi tegangan sepanjang dinding pipa. Analisis ini memperhitungkan hubungan antara ketebalan pipa, fleksibilitas, dan tegangan yang dihasilkan. Analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak khusus yang ditujukan untuk analisis tegangan pada sistem pemipaan yaitu CAESAR II. Perangkat lunak tersebut sudah mengakomodasi penggunaan *code* yang berkaitan dengan pemipaan, material pipa, sambungan, dan parameter-parameter lainnya yang umumnya digunakan dalam analisis sistem pemipaan. Tipe elemen garis (*line type element*) biasanya digunakan pada perangkat lunak tersebut, dengan

mendefinisikan diameter pipa, ketebalan pipa, material, pembebanan, dan kondisi batas.

Perangkat lunak CAESAR II akan menghitung besarnya intensitas tegangan maksimum (*maximum stress intensity*) akibat beban tekanan, *bending*, dan puntir. CAESAR II tidak dapat menghitung beban akibat *natural bending*, sehingga harus dihitung secara manual. Tegangan *longitudinal* total juga dihitung manual dengan cara memodifikasi hasil perhitungan CAESAR II. Hasil-hasil perhitungan tersebut akan memberikan distribusi tegangan sepanjang pipa.

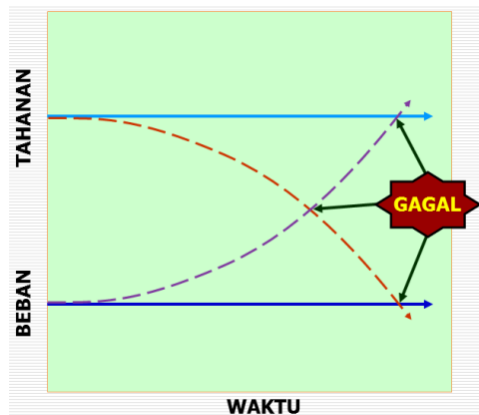
Sumber data yang digunakan untuk perhitungan tegangan adalah:

- Spesifikasi pipa
- *Pipeline alignment sheet*
- Data hasil inspeksi (*walkthrough*)
- Densitas fluida
- Standar ASME B31.4

Dalam analisis tegangan pada pipa, digunakan asumsi berikut:

- Pipa dianggap *laydown*, kecuali disebutkan khusus
 - Tanah mempunyai karakteristik *dense sand*
 - Belokan (*vertical/horizontal*) dimodelkan sebagai *natural bend*
 - Gaya akibat *road crossing* adalah 14 N/cm
- a. Data variabel statistik segmen pipa (dimensi, kekuatan, beban, dimensi cacat, laju korosi)
 - b. Distribusi statistik dan model probabilistik segmen pipa menggunakan software MatLab, XLStat
 - c. Penentuan umur sisa segmen pipa berdasarkan *safety class* DNV
 - d. Inspeksi, monitoring, pemeliharaan, dan perbaikan
 - e. Penilaian ulang dan pembaharuan kajian umur sisa
 - f. Dokumentasi

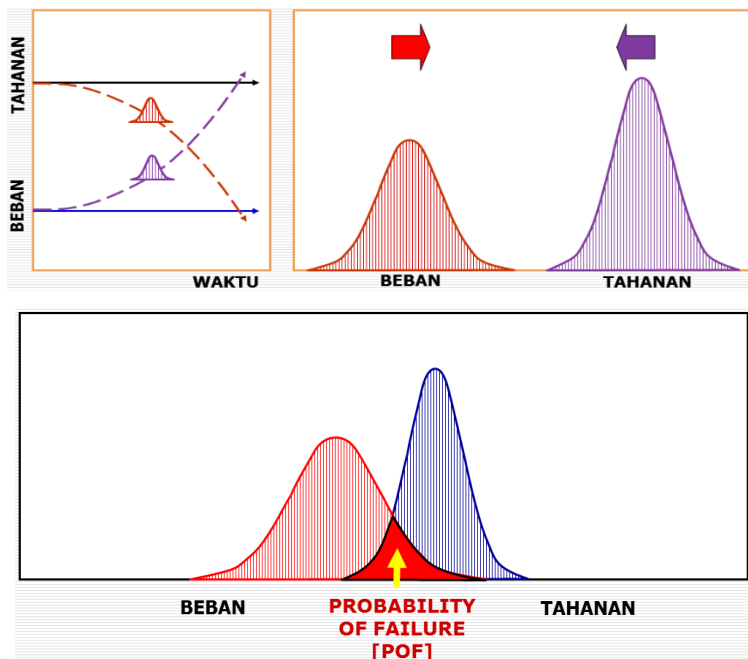
Kegagalan pada pipa penyalur akan terjadi akibat interaksi dari nilai tahanan yang berkurang serta nilai beban yang semakin meningkat



Gambar 7. Model kegagalan pipa penyalur

Selama operasi (Gambar 8), tahanan dan beban akan memiliki distribusi nilai sehingga kegagalan yang terjadi pada pipa penyalur merupakan suatu peluang kegagalan (*probability of failure*) yang berupa irisan antara distribusi tahanan (D_c) serta distribusi beban pada suatu waktu ($D(t)$), di mana:

- **Distribusi tahanan (D_c)**, di mana untuk kasus kerusakan korosi adalah distribusi kedalaman korosi yang diperbolehkan (*allowable maximum corrosion depth*).



Gambar 8. Peluang kegagalan (*probability of failure*) akibat interaksi antara distribusi beban dan distribusi tahanan

- **Distribusi beban pada suatu waktu ($D(t)$)**, di mana untuk kasus kerusakan korosi adalah suatu nilai distribusi yang dapat diperoleh dari salah satu dari metoda berikut:
 - Kedalaman kerusakan/serangan korosi pada suatu waktu (t) yang diperoleh dari perhitungan hasil inspeksi.
 - Tebal awal dikurangi sisa ketebalan pada suatu waktu (t), *nominal thickness - remaining thickness at time (t)*
 - Laju korosi dikalikan waktu ($A \times t$), metode ini diperoleh berdasarkan distribusi tebal awal, distribusi tebal hasil inspeksi, umur saat inspeksi dilakukan serta umur saat distribusi beban dihitung. Metode ini yang digunakan untuk menentukan ($D(t)$) dalam mengkaji umur pipa penyalur.

Kondisi kegagalan pipa penyalur pada suatu waktu ($Z(t)$) dipengaruhi oleh berbagai komponen. Misalkan (X_j) adalah komponen yang mempengaruhi kondisi kegagalan pipa. Dalam hal ini, (X_j) dapat berupa kekuatan dari material, kedalaman korosi, *operating pressure*, dan lain-lain. Model kondisi batas keamanan suatu pipa penyalur merupakan suatu fungsi yang akan bergantung pada komponen tersebut, yaitu:

$$Z(t) = G(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3.1)$$

Kegagalan akan terjadi bila $Z(t) \leq 0$ sehingga peluang kegagalan pipa penyalur dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P(Z(t) \leq 0) \quad (3.2)$$

Untuk memodelkan $Z(t)$ digunakan hubungan antara distribusi tahanan (D_c) serta distribusi beban pada t tahun ($D(t)$), sehingga:

$$Z(t) = D_c - D(t) \quad (3.3)$$

Keterangan:

$Z(t)$: Kondisi kegagalan pada suatu tahun t
 D_c : Distribusi tahanan
 $D(t)$: Distribusi beban pada suatu waktu (t)

Melalui hasil inspeksi dengan metode ILI ditemukan tipe kerusakan korosi (internal, eksternal, *seragam*, *localized*, dan *pitting*) yang terjadi di

sepanjang pipa penyalur. Pemodelan kondisi kegagalan pipa penyalur dalam suatu waktu ($Z(t)$) untuk hasil inspeksi ILI sebagai berikut:

$$Z(t)_{korosi} = D_{c,korosi} - D(t) \quad (3.4)$$

Keterangan:

$Z(t)_{korosi}$: Kondisi kegagalan pada suatu tahun t akibat korosi

$D_{c,korosi}$: Distribusi kedalaman korosi yang diperbolehkan pada daerah korosi

$D(t)$: Kedalaman korosi pada waktu tertentu sebelum *repair* (t)

Pemodelan peluang kegagalan dalam suatu waktu dilakukan untuk data sebelum ($Z(t)$) dan setelah ($Z'(t)$) perbaikan terhadap beberapa lokasi kerusakan pada pipa penyalur. Hal ini bertujuan untuk meninjau pengaruh perbaikan pipa penyalur di beberapa lokasi kerusakan terhadap nilai peluang kegagalan dan penentuan umur sisa pipa penyalur.

$$Z'(t)_{korosi} = D_{c,korosi} - D'(t) \quad (3.5)$$

Keterangan:

$Z'(t)_{korosi}$: Kondisi kegagalan pada suatu tahun t akibat korosi setelah *repair*

$D_{c,korosi}$: Distribusi kedalaman korosi yang diperbolehkan pada daerah korosi

$D'(t)$: Kedalaman korosi pada waktu tertentu setelah *repair* (t)

Perhitungan ($D_{c,korosi}$) menggunakan persamaan ASME B-1.G *basic burst stress*, sehingga:

$$D_{c,korosi} = \frac{t_o}{0.85} \times \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{op}}{\sigma_y}\right)}{\left(1 - \frac{\sigma_{op}}{\sigma_y M_{korosi}}\right)} \quad (3.6)$$

Dengan:

$$M_{korosi} = 0.01936 \lambda_{korosi}^2 + 3.3 \quad \text{untuk } \lambda > 9.1 \quad (3.7)$$

$$M_{korosi} = \left(1 + 0.3797 \lambda_{korosi}^2 - 0.001236 \lambda_{korosi}^4\right)^{0.5} \quad \text{untuk } \lambda \leq 9.1 \quad (3.8)$$

$$\lambda_{korosi} = \frac{1.818 L_{t,korosi}}{\sqrt{\frac{D}{2} t_0}} \quad (3.9)$$

Keterangan:

- $D_{c,korosi}$: Distribusi kedalaman korosi yang diperbolehkan pada daerah korosi
 t_0 : Tebal awal pipa (mm); tebal pada waktu $t = 0$ diasumsikan = tebal nominal
 σ_{op} : Tegangan operasi (MPa)
 σ_y : Kekuatan luluh material (MPa)
 M_{korosi} : Faktor Folias untuk korosi
 λ_{korosi} : *Flaw parameter* untuk korosi
 $L_{t,korosi}$: Panjang cacat pada waktu t untuk korosi (mm)
 D : Diameter pipa (mm)

Perhitungan ($D(t)$) untuk data sebelum perbaikan di beberapa lokasi kerusakan menggunakan persamaan berikut:

$$D(t) = A_{korosi} T \quad (3.10)$$

$$A_{korosi} = \frac{t_0 - t_{t,korosi}}{T_t - T_0} \quad (3.11)$$

Keterangan:

- $D(t)$: Kedalaman korosi pada waktu tertentu sebelum *repair* (t)
 A_{korosi} : Laju korosi (mm/tahun); penurunan ketebalan dari data tebal sebelum *repair* akibat korosi
 T : Waktu operasi sampai waktu t tertentu (tahun)
 t_0 : Tebal awal pipa (mm); tebal pada waktu $t = 0$ diasumsikan = tebal nominal
 $t_{t,korosi}$: Tebal pipa pada tahun ke t untuk korosi sebelum *repair* (mm)
 T_t : Operasi tahun ke t
 T_0 : Tahun instalasi

Perhitungan ($D'(t)$) untuk data setelah perbaikan di beberapa lokasi kerusakan menggunakan persamaan berikut:

$$D'(t) = A'_{korosi} T \quad (3.12)$$

$$A'_{korosi} = \frac{t_0 - t'_{t,korosi}}{T_t - T_0} \quad (3.13)$$

Keterangan:

- $D'(t)$: Kedalaman korosi pada waktu tertentu setelah *repair* (t)
 A'_{korosi} : Laju korosi (mm/tahun); penurunan ketebalan dari data tebal setelah *repair* akibat korosi
 T : Waktu operasi sampai waktu t tertentu (tahun)
 t_0 : Tebal awal pipa (mm); tebal pada waktu $t = 0$ diasumsikan = tebal nominal
 $t'_{t,\text{korosi}}$: Tebal pipa pada tahun ke t untuk korosi setelah *repair* (mm)
 T_t : Operasi tahun ke t
 T_0 : Tahun instalasi

Kemungkinan terjadinya kegagalan atau *probability of failure* (PoF) terjadi pada kondisi:

$$0 < \text{PoF} < 1 \quad (3.14)$$

dengan 0 = gagal dan 1 = hidup.

Sehingga kaitan antara $(Z(t))$ dengan wilayah kemungkinan terjadinya kegagalan (PoF) dapat digambarkan sebagai berikut:

$$P_{f,t} = \text{Probability } (Z(t) \leq 0) \quad (3.15)$$

Untuk hasil inspeksi metode ILI kerusakan korosi:

$$P_{f,t} = \int \dots \int_{t_0, \sigma_{op}, \sigma_y, L_{t,\text{korosi}}, D, A_{\text{korosi}} \dots \leq 0} f(t_0, \sigma_{op}, \sigma_y, L_{t,\text{korosi}}, D, A_{\text{korosi}} \dots) dt_0 d\sigma_{op} d\sigma_y dL_{t,\text{korosi}} dD dA_{\text{korosi}} \dots \quad (3.16)$$

Setelah diperoleh nilai $(P_{f,t})$, perhitungan peluang kegagalan per tahun dapat dilakukan dengan rumus sebagai berikut:

$$P_f/\text{tahun} = \frac{P_{f,t} - P_{f,t-1}}{1 - P_{f,t-1}} \quad (3.17)$$

Keterangan:

- P_f/tahun : Peluang kegagalan per tahun
 $P_{f,t}$: Peluang kegagalan pada tahun t
 $P_{f,t-1}$: Peluang kegagalan pada tahun t-1

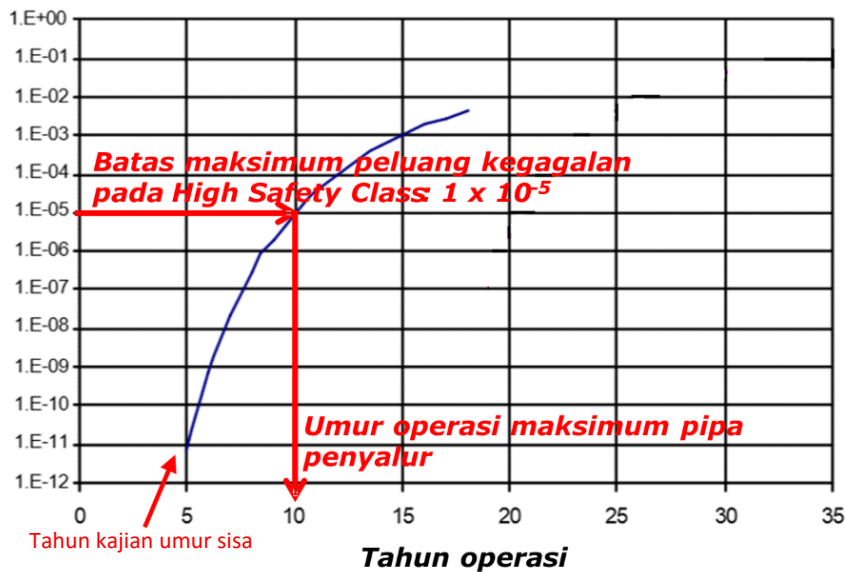
Faktor yang harus dipertimbangkan dalam menetapkan umur sisa pipa penyalur adalah batas maksimum peluang kegagalan per tahun yang dapat diterima. Berdasarkan kriteria standar DnV-RP-F101 tahun 2010 maka pipa penyalur termasuk dalam kategori safety class HIGH dengan batas peluang kegagalan pertahun $< 10^{-5}$ (Tabel 4).

Umur pipa penyalur diperoleh dengan cara menghubungkan nilai batas maksimum peluang kegagalan pada *safety class HIGH* pada kurva peluang kegagalan pertahun pipa penyalur untuk mencari umur operasi maksimum dari pipa (Gambar 9). Umur sisa pipa penyalur diperoleh dengan cara mengurangi tahun operasi maksimum pipa dengan tahun kajian umur sisa.

Tabel 4. Tabel target peluang kegagalan per tahun berdasarkan DnV-RP-F101 tahun 2010

Safety Class	Annual Target Probability of Failure	Keterangan
High	$< 10^{-5}$	- Kegagalan saat operasi mengakibatkan resiko tinggi berupa kecelakaan yang membahayakan manusia, polusi lingkungan, ekonomi, dan atau politik. - Untuk pipa yang melewati area dengan aktivitas penduduk yang tinggi.
Normal	$< 10^{-4}$	- Kegagalan saat kondisi sementara (setelah commissioning, sebelum operasi penuh) yang mengakibatkan resiko berupa kecelakaan yang membahayakan manusia, polusi lingkungan, ekonomi, dan atau politik. - Untuk pipa yang melewati area dengan aktivitas penduduk yang tidak begitu tinggi.
Low	$< 10^{-3}$	- Kegagalan mengakibatkan resiko rendah berupa kecelakaan yang membahayakan manusia, polusi lingkungan, dan ekonomi. - Untuk pipa yang melewati area dengan aktivitas penduduk yang sangat rendah atau saat instalasi.

Kajian umur sisa diperoleh dari hasil perhitungan untuk dua jenis tekanan pada pipa penyalur yaitu: tekanan operasi maksimum saat musim kemarau sebesar 205 psi dan tekanan operasi maksimum saat musim hujan sebesar 300 psi.



Gambar 9. Plot kurva peluang kegagalan per tahun terhadap waktu operasi

Data-data terkait pipa penyalur dapat dilihat dalam Tabel 5. Berdasarkan data-data yang terkumpul, dilakukan *fitting* distribusi dan analisis terhadap setiap parameter data. Analisis distribusi dari parameter-parameter pada pipa penyalur dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 5. Data-data pipa penyalur 30"

Data		Sumber Data/Referensi
Kategori	Trunk line	Dokumen Inspeksi ILI
Jenis servis	Crude	
Panjang pipa	75.231 m	
Tahun commisioning	1972	
Tahun inspeksi	2012	
Jenis material pipa	API 5L Grade B	Dokumen spesifikasi pipa dan API 5L Edisi ke-43
Tebal nominal pipa	7.14 mm Data distribusi	
Diameter pipa	30 in Data distribusi	
Kekuatan luluh pipa	Data distribusi	Dokumen spesifikasi pipa dan data <i>mill sheet</i> pipa
Tekanan operasi maksimum saat musim kemarau	205 psi	Komunikasi dengan PT.CPI 27 Oktober 2015
Tekanan operasi maksimum saat musim hujan	300 psi	
Dimensi cacat	Data distribusi	Data Inspeksi ILI
Lokasi repair	Data distribusi	Dokumen repair
Kondisi <i>burial</i> pipa	Data distribusi	Dokumen <i>walkthrough, pipeline alignment sheet</i>
Data <i>lowering</i> pipa	Data distribusi	

Tabel 6. Hasil Analisis Data Parameter Pipa Penyalur

Parameter	Hasil Analisis Distribusi		Sumber Data
	Jenis	Nilai	
Tebal nominal pipa, $t_{0,}$, mm	Normal	Mean ($\hat{\mu}$) = 7,14 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 1,25	Dokumen spesifikasi pipa dan API 5L edisi ke-43
Diameter pipa, D, mm	Normal	Mean ($\hat{\mu}$) = 762,00 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 5,80	Dokumen spesifikasi pipa dan API 5L edisi ke-43
Kekuatan luluh pipa, σ_y , MPa	Normal	Mean ($\hat{\mu}$) = 301,25 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 20,88	Dokumen spesifikasi pipa dan data mill sheet pipa
Tegangan operasi untuk 205 psi, $\sigma_{op,205}$, MPa	Empirik	Mean ($\hat{\mu}$) = 84,37 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 14,01	Hasil perhitungan numerik dengan menggunakan aplikasi CAESAR II dan manual serta dokumen <i>walk-through</i>
Tegangan operasi untuk 300 psi, $\sigma_{op,300}$, MPa	Empirik	Mean ($\hat{\mu}$) = 112,29 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 4,83	Hasil perhitungan numerik dengan menggunakan aplikasi CAESAR II dan manual serta dokumen <i>walk-through</i>
Panjang korosi tahun 2005, $L_{korosi,2005}$, mm	Generalized Extreme Value	Mean ($\hat{\mu}$) = 18,96 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 8,04 Shape par. ($\hat{k}$) = 0,44	Dokumen inspeksi ILI ($\pm$ 94.100 data)
Panjang korosi tahun 2012, $L_{korosi,2012}$, mm	Generalized Extreme Value	Mean ($\hat{\mu}$) = 28,42 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 13,87 Shape par. ($\hat{k}$) = 0,26	Dokumen inspeksi ILI ($\pm$ 78.100 data)
Panjang korosi tahun 2012 setelah repair, $L'_{korosi,2012}$, mm	Generalized Extreme Value	Mean ($\hat{\mu}$) = 26,32 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 18,80 Shape par. ($\hat{k}$) = 0,04	Dokumen inspeksi ILI ($\pm$ 72.900 data)
Kedalaman korosi tahun 2005, $d_{korosi,2005}$, mm	Generalized Extreme Value	Mean ($\hat{\mu}$) = 1,12 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 0,37 Shape par. ($\hat{k}$) = 0,19	Dokumen inspeksi ILI ($\pm$ 94.100 data)
Kedalaman korosi tahun 2012, $d_{korosi,2012}$, mm	Generalized Extreme Value	Mean ($\hat{\mu}$) = 1,40 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 0,30 Shape par. ($\hat{k}$) = 0,21	Dokumen inspeksi ILI ($\pm$ 78.100 data)
Kedalaman korosi tahun 2012 setelah repair, $d'_{korosi,2012}$, mm	Generalized Extreme Value	Mean ($\hat{\mu}$) = 1,21 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 0,68 Shape par. ($\hat{k}$) = 0,001	Dokumen inspeksi ILI ($\pm$ 72.900 data)
Laju korosi tahun 2005, $A_{korosi,2005}$, mm/tahun	Generalized Extreme Value	Mean ($\hat{\mu}$) = 0,03 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 0,01 Shape par. ($\hat{k}$) = 0,19	Dokumen inspeksi ILI ($\pm$ 94.100 data)
Laju korosi tahun 2012, $A_{korosi,2012}$, mm/tahun	Generalized Extreme Value	Mean ($\hat{\mu}$) = 0,04 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 0,01 Shape par. ($\hat{k}$) = 0,21	Dokumen inspeksi ILI ($\pm$ 172.200 data)
Laju korosi tahun 2012 setelah repair, $A'_{korosi,2012}$, mm/tahun	Generalized Extreme Value	Mean ($\hat{\mu}$) = 0,03 Stdev ($\hat{\sigma}$) = 0,01 Shape par. ($\hat{k}$) = 0,001	Dokumen inspeksi ILI ($\pm$ 167.000 data)

Peluang kegagalan dan kajian umur sisa pipa penyalur diperoleh berdasarkan hasil analisis distribusi untuk setiap data parameter dengan metode seperti dijelaskan sebelumnya. Kajian umur sisa diperoleh dari hasil perhitungan untuk dua jenis tekanan pada pipa penyalur yaitu: tekanan operasi maksimum saat musim kemarau sebesar 205 psi dan tekanan operasi maksimum saat musim hujan sebesar 300 psi.

Tabel 7 memperlihatkan nilai peluang kegagalan pipa penyalur untuk. Peluang kegagalan dihitung setelah dilakukan inspeksi dan setelah dilakukan *repair* di tahun 2005 dan 2012. Dapat dilihat bahwa semakin tinggi tekanan operasi mengakibatkan peningkatan peluang terjadinya kegagalan pada pipa penyalur. Adanya inspeksi dan *repair* pada pipa penyalur berhasil menurunkan peluang terjadinya kegagalan pipa penyalur.

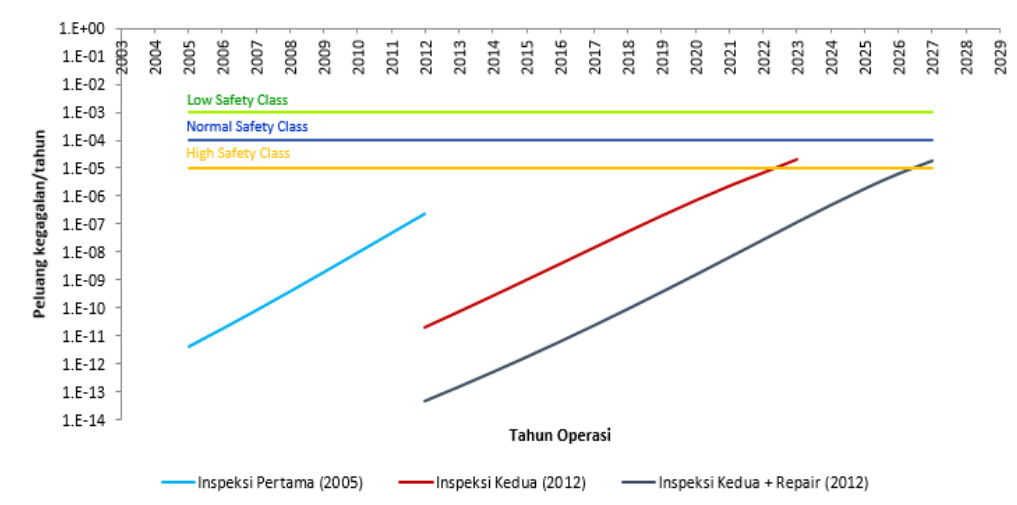
Tabel 7. Peluang terjadinya kegagalan pipa penyalur

Tekanan Operasi (psi)	Tahun Inspeksi dan Repair	Waktu Operasi (Tahun)	Peluang Terjadinya Kegagalan	
			Sebelum Repair	Setelah Repair
205	2005	33	$2,54 \times 10^{-9}$	N/A
	2012	40	$8,60 \times 10^{-11}$	$7,45 \times 10^{-14}$
300	2005	33	$1,05 \times 10^{-6}$	N/A
	2012	40	$7,32 \times 10^{-8}$	$3,72 \times 10^{-12}$

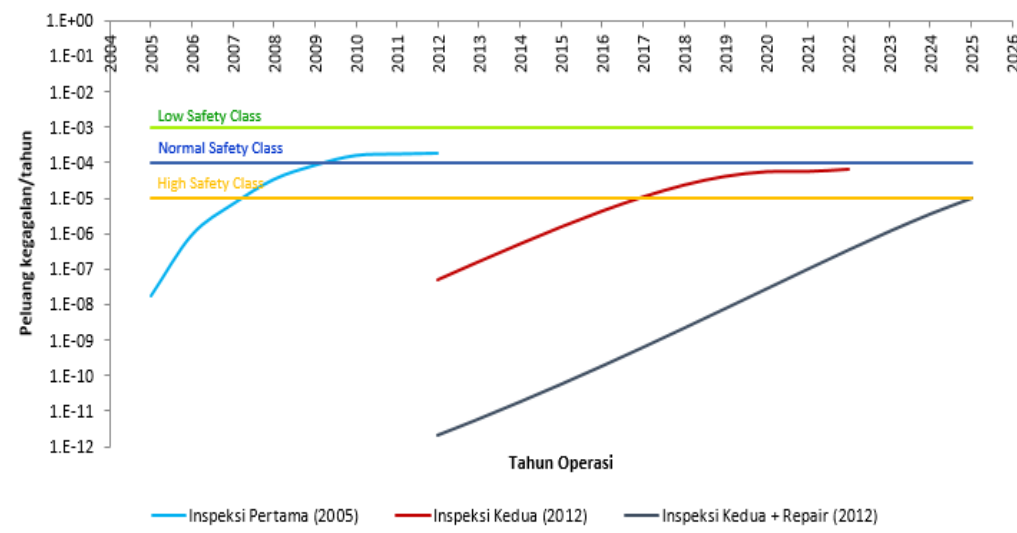
Kurva peluang kegagalan pertahun pipa penyalur dengan tekanan operasi 205 psi dan 300 psi ditunjukkan pada Gambar 10 dan 11. Kurva peluang kegagalan per tahun diperoleh berdasarkan data peluang terjadinya kegagalan pipa penyalur serta data distribusi laju korosi sebelum dan sesudah *repair*. Dapat dilihat bahwa semakin lama umur pipa penyalur, maka nilai peluang kegagalan per tahun semakin tinggi. Namun, jika dilakukan inspeksi dan/atau *repair* pada pipa penyalur, maka nilai peluang kegagalan per tahun akan turun

Batas umur maksimum pipa penyalur diperoleh dari perpotongan kurva peluang kegagalan per tahun untuk pipa penyalur setelah inspeksi dan *repair* tahun 2012 dengan batas maksimum peluang kegagalan kategori HIGH safety class yaitu 1×10^{-5} . Penentuan umur sisa pipa penyalur pada tekanan 205 psi dan 300 psi dapat dilihat pada Gambar 12 dan 13. Pada tahun 2015, pipa penyalur yang dioperasikan pada tekanan 205 dan 300 psi masih memiliki nilai peluang kegagalan di bawah batas kategori *High safety class*. Pipa penyalur yang dioperasikan pada tekanan 205 psi memiliki umur sisa 11 tahun yaitu

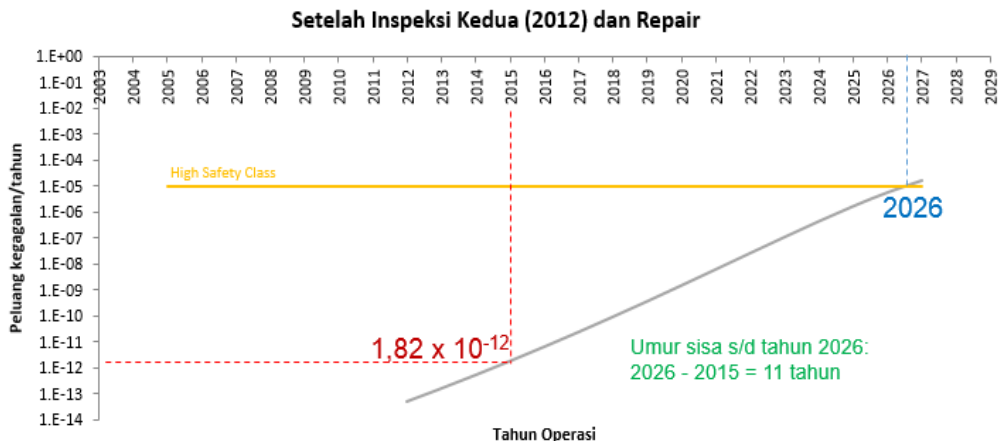
hingga tahun 2026, sedangkan yang dioperasikan pada tekanan 300 psi memiliki umur sisa 10 tahun yaitu hingga tahun 2025.



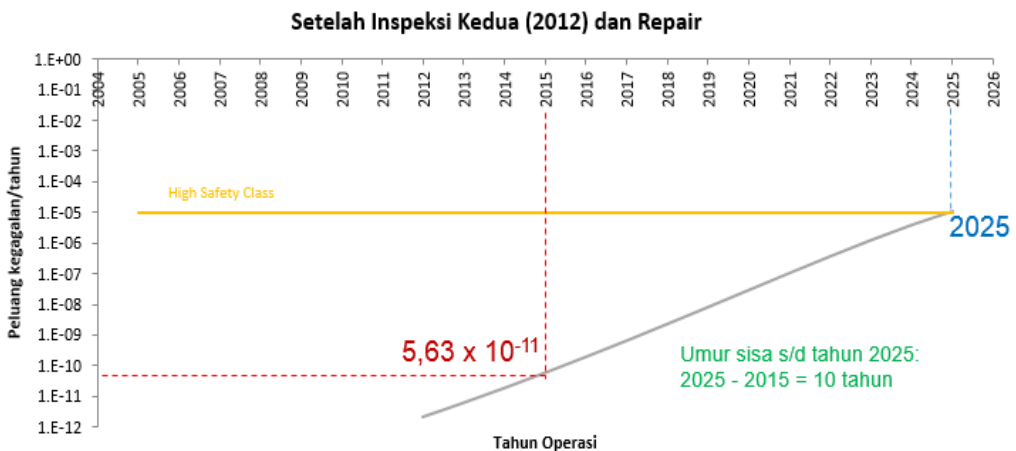
Gambar 10. Kurva peluang terjadinya kegagalan per tahun terhadap tahun operasi dengan tekanan operasi 205 psi



Gambar 11. Kurva peluang terjadinya kegagalan per tahun terhadap tahun operasi dengan tekanan operasi 300 psi



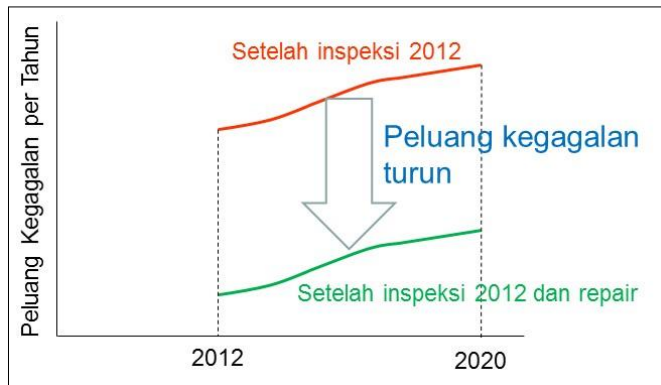
Gambar 12. Penentuan umur sisa pipa penyalur dengan tekanan operasi 205 psi



Gambar 13. Penentuan umur sisa pipa penyalur dengan tekanan operasi 300 psi

Dari hasil kajian umur sisa pipa penyalur di atas, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Pipa penyalur aman digunakan karena memiliki nilai peluang kegagalan per tahun pada tahun 2015 yang lebih kecil dari nilai kriteria peluang kegagalan dengan *safety class HIGH* (maksimum 1×10^{-5} kegagalan per tahun).
2. *Repair* yang dilakukan setelah inspeksi di tahun 2012 telah berhasil menurunkan secara signifikan kemungkinan terjadinya kegagalan per tahun dan memperpanjang umur operasi pipa penyalur. Hal ini diilustrasikan seperti pada Gambar 14.



Gambar 14. Ilustrasi perbandingan peluang terjadinya kegagalan per tahun sebelum dan sesudah *repair*

3. Hasil kajian umur sisa pipa penyalur baik pada tekanan operasi maksimum saat musim kemarau (205 psi) maupun tekanan operasi maksimum saat musim hujan (300 psi) menunjukkan bahwa pipa penyalur setelah *repair* masih aman digunakan dan memiliki umur sisa 11 tahun untuk tekanan operasi 205 psi dan 10 tahun untuk tekanan operasi 300 psi.

Berdasarkan hasil kajian umur sisa pipa penyalur, maka ada dua hal yang disarankan kepada perusahaan, yaitu:

1. Berdasarkan standar DnV-RP-F101 tahun 2010, pipa penyalur dikategorikan dalam *safety class HIGH* sehingga peluang kegagalan per tahun tidak boleh lebih besar dari 1×10^{-5} . Perusahaan harus melakukan inspeksi jika peluang kegagalan per tahun segmen pipa penyalur telah mendekati nilai batas dari *safety class HIGH*.
2. Untuk menjaga kesinambungan data dan pemanfaatan hasil analisis statistik, maka perusahaan dianjurkan untuk menjaga agar hasil inspeksi berikutnya mempunyai korelasi dengan inspeksi sebelumnya, sehingga data inspeksi tersebut saling berkaitan.

4. PENUTUP

Bidang keahlian Ilmu dan Teknik Material merupakan bidang ilmu yang masih baru di Indonesia sehingga belum semua industri lokal dapat mengenali kemampuan apa saja yang dapat disumbangkan. Dua studi kasus yang disampaikan dalam orasi ilmiah ini merupakan contoh kegiatan yang

terkait dengan Ilmu dan Teknik Material berhubungan dengan kerja sama industri di Indonesia. Pengalaman kami selama bekerja sama dengan banyak industri di Indonesia menunjukkan bahwa pemahaman tentang karakteristik material yang dipakai masih sangat kurang sehingga seringkali mengalami masalah dalam pemakaiannya. Adanya beberapa program studi Teknik Material atau Teknik Metalurgi di beberapa perguruan tinggi merupakan usaha bertahap untuk memasyarakatkan ilmu dan teknik material dalam menunjang industri di Indonesia.

Pekerjaan analisis material sangat bergantung kepada alat karakterisasi fisik dan mekanik yang tersedia. Sampai sejauh ini, alat karakterisasi fisik yang tersedia di ITB seperti mikroskop optik, mikroskop electron, spektroskop, FTIR, UV-Vis, Difraksi sinar-X, dan lain-lain dapat diakses melalui kerja sama antarlaboratorium. FTMD juga berusaha melengkapi alat karakterisasi material, misalnya mesin uji tarik untuk material komposit, alat uji keras makro dan mikro digital, serta peralatan pendukung lainnya.

Kerja sama lintas bidang keahlian merupakan suatu keharusan bagi bidang keahlian ilmu dan teknik material karena pada dasarnya bidang ini merupakan bidang pendukung dan harus bekerjasama dengan bidang pendukung lainnya.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam kesempatan yang berbahagia ini saya ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada Rektor dan Pimpinan ITB, Pimpinan dan seluruh anggota Forum Guru Besar ITB, Pimpinan dan anggota senat akademik ITB atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menyampaikan pidato ilmiah di hadapan hadirin yang saya hormati. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada rekan-rekan di Kelompok Keahlian Ilmu dan Teknik Material yang telah banyak membantu dalam pelaksanaan kerja sama industri dan penelitian laboratorium sehingga hasil karya bersama tersebut bermanfaat bagi masyarakat industri.

DAFTAR PUSTAKA

1. Husaini Ardy dan Deri Andika Bangun 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **547** 012035 DOI 10.1088/1757-899X/547/1/012035
2. Foulds, J. R., Viswanathan, R., **Graphitization of Steels at Elevated-Temperature Service**, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 10, No. 4, August 2001
3. LAPI-ITB, **Remaining Life Assessment of the Shipping Line**, Internal Report, Project No. 15-6876, May 2016.

CURRICULUM VITAE



Nama	: Husaini Ardy
Tempat/tgl lahir	: Kerinci, 02 Maret 1958
Kel. Keahlian	: Ilmu dan Teknik Material
Alamat Kantor	: Jalan Ganesha 10 Bandung
Nama Istri	: Atira Cinta Mangatta

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Doctor of Philosophy (Ph.D.), bidang Materials Engineering, Illinois Institute of Technology, USA, 1994
- Master of Science (MS), bidang Teknik Mesin, ITB, 1987
- Sarjana Teknik Mesin (Ir), Institut Teknologi Bandung (ITB), 1984

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

- Staf Pengajar Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB, 1985-Sekarang
- Ketua Program Studi Sarjana Teknik Material, 2012-2013
- Ketua Sub Program Profesi Insinyur Teknik Material, 2020-2022

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/A, 1985
- Penata Muda, III/A, 1986
- Penata Muda TK 1, III/B, 1995
- Penata, III/C, 1998
- Penata Tk. I, III/D, 2014
- Pembina, IVa, 2016
- Pembina Tk. I, IV/B, 2018
- Pembina Utama Muda, IV/C, 2022

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 1 Desember 1986
- Asisten Ahli, 1 September 1995

- Lektor Muda. 1 Mei 1998
- Lektor, 1 Januari 2001
- Lektor Kepala, 1 Juni 2014
- Profesor/Guru Besar, 1 April 2022

V. KEGIATAN PENELITIAN

Sebagai Ketua Tim

1. Pemodelan Kinetika Transformasi Fasa Sigma dalam Material Cast Stainless Steel memakai Analisis Statistika dengan Variabel Waktu, Temperatur, dan Komposisi Kimia, Riset Unggulan ITB, 2022.
2. Pengembangan nanokomposit antibakteri untuk bahan restorasi gigi, P3MI ITB, 2018

Sebagai Anggota Tim

1. Radius and packing optimization of the discretization process on stainless steels corrosion analysis, P2MI ITB, 2022
2. Pengembangan Katalis dari Limbah untuk Degradasi Palm Oil Mill Effluent (POME) berbasis Advanced Oxidation Processes (AOPs), P2MI ITB, 2022
3. Pengembangan Teknologi Produksi Propelan Merah Putih, LPDP, 2022
4. Hidrogel penutup luka berbasis polivinil alkohol terstabilisasi, P2MI, 2021
5. Pengembangan Range Extender untuk Bus Listrik, Pendanaan Riset Inovatif Produktif (RISPRO), LPDP, 2020.
6. Pemanfaatan Karet Alam Sebagai Material Blunt Trauma Pad Baju Anti Peluru, P2MI, 2020

VI. PUBLIKASI

1. **Husaini Ardy**, Asep Nurimam, Mohammad Hamdani, Deny Firmansyah, Dominico Michael Aditya, Asep Ridwan Setiawan, Arie Wibowo, *Failure Analysis of Bank-Wall Side Boiler Tube in a Petrochemical Plant*, Metals, Vol. 12, Issue. 12, December 2022, ISSN: 2075-4701, MDPI, <https://doi.org/10.3390/met12122064>
2. Lia Amelia Tresna Wulan Asri, Athiya Anindya, Yuni Eva Kartika, Dita Puspitasari, Untung Triadhi, **Husaini Ardy**, *Polyvinyl Alcohol-Cellulose Nanocrystal Hydrogel Containing Anti-inflammatory Agent*, Indonesian Journal of Chemistry, Vol 22, Issue 5, pp. 1293-1303, 2022.
3. Arie Wibowo, Agus Jatmiko, M. Bagas Ananda, Systi Adi Rachmawati, **Husaini Ardy**, Akfany Hasdi Aimon, Ferry Iskandar, *Facile Fabrication of*

Polyelectrolyte Complex Nanoparticles Based on Chitosan – Poly-2-Acrylamido-2-Methylpropane Sulfonic Acid as a Potential Drug Carrier Material, International Journal of Technology, ISSN 2086-9614, Vol.12, Issue 3, Pages 561-570, 2021, DOI: <https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i3.4193>

4. Arie Wibowo, Gusti U. N. Tajalla, Maradhana A. Marsudi, Glen Cooper, Lia Amelia Tresna Wulan Asri, Fengyuan Liu, **Husaini Ardy**, Paulo J.D.S. Bartolo, *Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Extract of Cilembu Sweet Potatoes (Ipomoea batatas L var. Rancing) as Potential Filler for 3D Printed Electroactive and Anti-Infection Scaffolds*, *Molecules*. Volume: 26, Issue 7, Article number: 2042, 2021. ISSN: 1420-3049. DOI: 10.3390/molecules 26072042.
5. **Husaini Ardy**, Asep Nurimam, Mohammad Hamdani, Try Hutomo Abednego, Rizky Kurnia Helmy, Deri Andika Bangun, Asep Ridwan Setiawan, Arie Wibowo, Afriyanti Sumboja, *Failure analysis of admiralty brass tubes in a surface condenser: a case study at the petrochemical industry*, *Materials at High Temperatures*, ISSN: 09603409, <https://doi.org/10.1080/09603409.2021.1897944>,
6. **Husaini Ardy**, Yudhistira Perdana P, Adimas Dwi Anggoro, Arie Wibowo, *Failure analysis of primary waste heat boiler tube in ammonia plant*, *Heliyon* 7 (2021) e06151, ISSN: 24058440, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06151>, , 2021
7. Arie Wibowo, Maradhana Agung Mars, Muhamad I Amaal, Muhammad B Ananda, Ruth Stephanie, **Husaini Ardy**, *ZnO nanostructured materials for emerging solar cell applications*, *RSC Advances* Volume 10, Issue 70, 24 November 2020, Pages 42838-42859, ISSN: 20462069, DOI: 10.1039/d0ra07689a.
8. Arie Wibowo, RF Indrawan, U Triadhi, AH Aimon, F Iskandar, **H Ardy**, *Simple preparation of Fenton catalyst@ bacterial cellulose for wastewater treatment*, *Materials Research Express* 5 (2), 024005, 2018.

VII. PENGHARGAAN

- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian 35 Tahun ITB, 2020
- Tanda Kehormatan Satyalancana Karya Satya Pengabdian 30 tahun dari Presiden RI, 2018
- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian 25 Tahun ITB, 2011

- Tanda Kehormatan Satyalancana Karya Satya Pengabdian 10 tahun dari Presiden RI, 2002

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikat P4, 1986, Menteri Pendidikan dan kebudayaan
- Sertifikasi Dosen, 2010. Kementerian Pendidikan Nasional



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532
🌐 fgb.itb.ac.id 📘 FgbItb 🐦 FGB_ITB
📺 @fgbibtb_1920 📺 Forum Guru Besar ITB

ISBN 978-623-297-274-2

