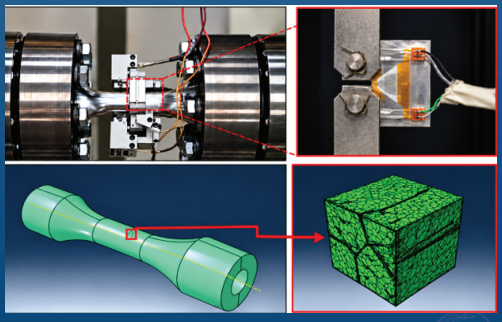
ISSN 3090-8485

BRIN
BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

PREDIKSI UMUR FATIK MATERIAL DAN STRUKTUR AKIBAT PEMBEBANAN DINAMIS

ORASI ILMIAH PROFESOR RISET
ILMU TEKNIK
BIDANG TEKNIK MATERIAL
KEPAKARAN FATIK DAN METALURGI FISIKA



OLEH:

H. AGUS SUHARTONO

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

ISSN 3090-8485

PREDIKSI UMUR FATIK MATERIAL DAN STRUKTUR AKIBAT PEMBEBANAN DINAMIS

Diterbitkan pertama pada 2026 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).
Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

ISSN 3090-8485

PREDIKSI UMUR FATIK MATERIAL DAN STRUKTUR AKIBAT PEMBEBANAN DINAMIS

ORASI ILMIAH PROFESOR RISET
ILMU TEKNIK
BIDANG TEKNIK MATERIAL
KEPAKARAN FATIK DAN METALURGI FISIKA

OLEH:

H. AGUS SUHARTONO

Penerbit BRIN

© 2024 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset Teknologi Kekuatan Struktur, Organisasi Riset Energi dan Material

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Prediksi Umur Fatik Material dan Struktur Akibat Pembebanan Dinamis/H. Agus Suhartono. Jakarta Penerbit BRIN, 2026

ix + 84 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-8485

1. Prediksi umur fatik
2. Pembebanan dinamis
3. Integritas struktur
4. Mekanika retakan

620.1126

Copy editor : Rahma Hilma Taslima
Proofreader : Hilda Yunita
Penata Isi : Rahma Hilma Taslima
Desainer Sampul : Rahma Hilma Taslima

Edisi pertama : November 2026

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR vii
DAFTAR TABEL ix
BIODATA RINGKAS 1
PRAKATA PENGUKUHAN 3

I. PENDAHULUAN 5
II. MEKANISME KERUSAKAN FATIK: DARI STRUKTUR MIKRO HINGGA INISIASI RETAK 9
III. PERAMBATAN RETAK FATIK, MEKANIKA RETAKAN, DAN VALIDASI STRUKTUR 17
A. Transisi dari Retak Pendek ke Retak Panjang 18
B. Faktor Intensitas Tegangan dan Perambatan Retak 19
C. Integrasi Umur Fatik dan *Damage Tolerance* 21
D. Pengaruh Tegangan Sisa dan Rekayasa Permukaan 23
E. Pengujian Perambatan Retak Fatik 25
F. Simulasi Numerik dan Pemetaan Kerusakan 27
G. Integrasi Mekanika Retakan dan Analisis Berbasis Data 29
H. CTOD dan Validasi Skala Penuh 32
I. Sintesis Ilmiah Perambatan Retak dan Evaluasi Integritas Struktur 36
IV. KONTRIBUSI ILMIAH DALAM PREDIKSI UMUR STRUKTUR 39
V. KONTRIBUSI UMUM BAGI KESELAMATAN DAN KEANDALAN STRUKTUR 43
VI. KESIMPULAN 47
VII. PENUTUP 49
VIII. UCAPAN TERIMA KASIH 51

DAFTAR PUSTAKA..... 55
DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI..... 65
DAFTAR RIWAYAT HIDUP..... 77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Contoh kegagalan fatik struktur pada berbagai sistem rekayasa 6
Gambar 2.1 Struktur dislokasi logam akibat beban siklik 9
Gambar 2.2 Citra SEM, inisiasi retak mikro dari lokasi partikel atau inklusi 10
Gambar 2.3 Model mikro pada pembebanan tarik (a) dan torsi (b) 12
Gambar 2.5 Evolusi retak mikro menuju retak pendek, ε_a = 0,6% , N = 600 siklus. 14
Gambar 2.6 Pengujian fatik multiaksial dan karakterisasi struktur mikro 15
Gambar 3.1 Tahapan evolusi kerusakan fatik dari skala mikro hingga integritas struktur. 18
Gambar 3.2 Kurva pertumbuhan retak fatik 20
Gambar 3.3 Diagram pembagian umur fatik 21
Gambar 3.4 Diagram konsep *damage tolerance design*..... *22*
Gambar 3.5 Distribusi tegangan sisa akibat *shot peening* dan implementasinya pada *CT specimen*. 24
Gambar 3.6 Sistem pengujian perambatan retak fatik..... 25
Gambar 3.7 Diagram jumlah siklus (N) versus panjang retak 26
Gambar 3.8 Kurva *versus ΔK* 27
Gambar 3.9 Hasil simulasi numerik distribusi temperatur dan medan tegangan. 28
Gambar 3.10 Hasil simulasi numerik dan foto tingkat kerusakan material. 29
Gambar 3.11 Akuisisi Data untuk Analisis Pertumbuhan Retak Fatik 30
Gambar 3.12 Diagram alir analisis pertumbuhan retak fatik berbasis pembelajaran mesin. 31
Gambar 3.13 Skema Pengujian CTOD pada Spesimen Single-Edge Notched Bend (SENB) 33
Gambar 3.14 Skema instalasi jalur pipa baja di lapangan. 34

Gambar 3.15 Pengujian skala penuh *reeling–unreeling* pipa baja untuk laut dalam. 35
Gambar 4.1 Kerangka terpadu prediksi umur dan integritas struktur berbasis evolusi kerusakan. 40
Gambar 5.1 Peta kontribusi umum prediksi umur struktur 44

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Metrik evaluasi performa model machine learning untuk klasifikasi pertumbuhan retak fatik 32

BIODATA RINGKAS



Dr.-Ing. H. Agus Suhartono lahir di Juwiring, Kabupaten Klaten, tanggal 3 September 1967, adalah anak pertama dari Bapak H. Suharno, S.H. (alm.) dan Ibu Hj. dra. M. Suharno (almh.). Menikah dengan drg. Prita Dewi CP dan dikaruniai tiga orang anak, yaitu Nindya Ariyanti, S.T. MBA., Sabrina Karima Suhartono, S.T. dan Muhammad Ridwan Suhartono, S.T.Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 30/M Tahun 2011, tanggal 16 Februari 2011 dan Nomor 3/M Tahun 2022 tanggal angka bulan tahun yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama terhitung mulai 1 Oktober 2021.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional tentang Pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset Nomor 233/I/HK/2026, tanggal 5 Oktober 2026 yang bersangkutan melakukan orasi pengukuhan Profesor Riset.

Meneyelesaikan pendidikan dasar di SDN I Tanjung di Juwiring tahun 1979, SMPN 89 Jakarta 1982 dan SMPP 35 Jakarta 1985. Memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Universitas Indonesia 1991, persamaan gelar Dipl.-Ing. dari Technische Universitaet Clausthal, 1996, dan gelar Doktor bidang Betriebsfestigkeit (Structural Integrity) di Fakultas Teknik Mesin, Technische Universitaet Clausthal dari Technische Universitaet Clausthal, Jerman tahun 2000. Mengikuti pelatihan terkait bidang kompetensinya, antara lain: High Temperature Material Testing di Mitsubishi Heavy Industry Japan (1992),

Course Fatigue Life Time Calculation (1992), Ultrasonic Testing Level I & II di Serpong (2002), Lead Auditor ISO 9000: 2000 dan ISO 17025 di Jakarta (2003).

Pernah menduduki jabatan struktural sebagai Kepala Laboratorium Karakterisasi Material (tahun 2004-2007), Kepala Bidang Kajian Material (tahun 2007–2014).

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Peneliti Ahli Madya golongan IV/a tahun 2004. Peneliti Ahli Madya. golongan IV/c tahun 2007, Peneliti Ahli Utama golongan IV/d tahun 2010, dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama golongan IV/e bidang Fatik dan Metalurgi Fisika tahun 2013.

Menghasilkan 57 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal, dan prosiding. Sebanyak 20 KTI ditulis dalam bahasa Inggris dan 4 KTI dalam bahasa Jerman, dan 33 KTI dalam bahasa Indonesia. Scopus H-Index 5, Google Scholar H-Index 6.

Ikut serta pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional 4 peneliti di B2TKS, BPPT, 4 orang Perekayasa di PTKS, pembimbing 5 skripsi (S-1) pada Universitas Indonesia dan Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, 2 pembimbing tesis (S-2) Institut Teknologi dan Sains Nasional, dan 1 pembimbing disertasi (S-3) pada Universitas Indonesia.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai anggota PPI dan Himpenindo (2004- Sekarang).

Menerima tanda penghargaan nama Satyalancana Karya Satya X Tahun (tahun 2002), Satyalancana Karya Satya XX Tahun (tahun 2012), Satyalancana Karya Satya XXX Tahun (tahun 2022) dari Presiden RI.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional yang mulia, serta hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama kami panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya, sehingga pada kesempatan yang berbahagia ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama menghadiri acara orasi ilmiah dalam rangka pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal (tanggal/bulan/tahun) menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

" PREDIKSI UMUR FATIK MATERIAL DAN STRUKTUR AKIBAT PEMBEBANAN DINAMIS"

Pada orasi ini disampaikan state of the art perkembangan prediksi umur material dan integritas struktur, mulai dari mekanisme kerusakan pada skala struktur mikro, pertumbuhan retak pendek dan retak panjang, hingga penerapan mekanika retakan, simulasi numerik, validasi skala penuh, serta analisis berbasis AI/ML. Pendekatan ini memperlihatkan bahwa evaluasi

ketahanan struktur tidak lagi cukup didasarkan pada tegangan nominal, tetapi harus mengintegrasikan evolusi kerusakan, kondisi material, dan respons struktur pada kondisi operasi nyata.

Orasi ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih utuh mengenai keterkaitan antara struktur mikro, perilaku retak, pengujian, simulasi, dan validasi struktur. Dengan demikian, pendekatan rekayasa integritas struktur dapat mendukung prediksi umur yang lebih akurat, desain berbasis damage tolerance, strategi inspeksi dan pemeliharaan yang tepat, serta pengembangan teknologi rekayasa yang aman dan berkelanjutan

Wassalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

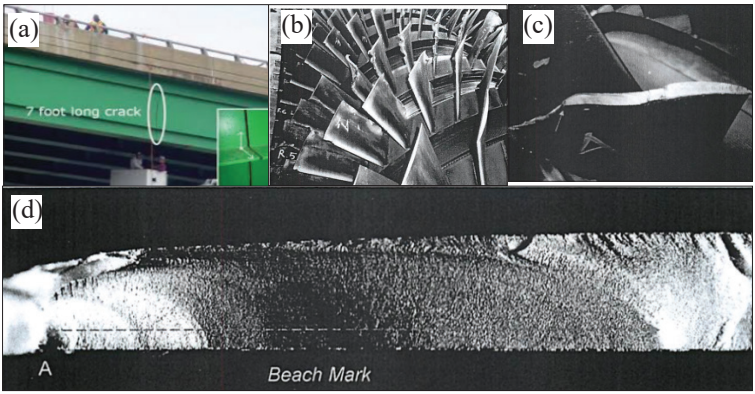
I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi menyebabkan material dan struktur bekerja dalam kondisi operasi yang semakin kompleks, meliputi pembebanan mekanis, dinamis, fluktuasi temperatur, serta lingkungan agresif dan korosif (De Jong et al., 2021; Muttaqie et al., 2024; Sunandrio et al., 2017; Febrianti et al., 2018; Suhartono, 2007b).

Pada sektor transportasi, energi, manufaktur, dan infrastruktur, keandalan serta keselamatan sistem sangat ditentukan oleh mutu material, ketersediaan data sifat mekanik, dan ketelitian pengujian serta inspeksi (Mottahedi et al., 2021; Stephens et al., 2001; Suhartono, 2002, 2004b, 2005, 2008b). Kajian mutu material dari berbagai produsen, pengembangan basis data sifat material, dan evaluasi ketidakpastian pengukuran telah menjadi bagian penting dalam menjamin keandalan hasil pengujian serta mendukung pengembangan teknologi material (Suhartono, 2007c, 2008a; Adnyana & Suhartono, 1992, 1993; Suhartono & Rustianto, 2022). Oleh karena itu, pengujian mekanik dan fatik, simulasi numerik, serta validasi integritas struktur menjadi penting dalam pengembangan sistem rekayasa yang aman dan berkelanjutan.

Kegagalan struktur akibat fatik umumnya tidak terjadi secara tiba-tiba, tetapi berkembang secara bertahap melalui akumulasi deformasi plastis lokal, inisiasi retak mikro, hingga propagasi retak menuju kondisi kritis (Kedir et al., 2023). Berbeda dengan kegagalan statis, fatik berkembang secara progresif dan sering kali tidak terdeteksi hingga mencapai tahap kegagalan akhir (Kaimkuriya, 2024; Schijve, 2009). Proses ini dipengaruhi oleh

berbagai faktor, seperti struktur mikro, kondisi permukaan, tegangan sisa, temperatur, dan pembebanan multiaksial selama operasi (Murakami, 2019; Socie & Marquis, 2000; Suhartono, 2005, 2007d). Oleh karena itu, evaluasi integritas struktur memerlukan pendekatan terpadu yang menghubungkan struktur mikro, pengujian mekanik, mekanika retakan, simulasi numerik, dan analisis berbasis data.



Ket.: (a) Retak panjang pada balok jembatan baja, (b) Retak pada rotor kompresor turbin gas, (c) Bentuk patahan pada sudu turbin, (d) Pola *beach mark* patahan fatik sudu turbin

Sumber: (Stephens et al., 2001; Hatta et al., 2012)

Gambar 1.1 Contoh kegagalan fatik struktur pada berbagai sistem rekayasa

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.1, retak fatik berkembang secara progresif mulai dari inisiasi retak, propagasi retak, hingga terbentuknya patahan akhir (*residual fracture*) (Manjunatha et al., 2026). Fenomena ini dijumpai pada berbagai sistem rekayasa, seperti jembatan baja, rotor turbin gas, dan sudu turbin (Stephens et al., 2001; Hatta et al., 2012). Pada tahap

propagasi, pola *beach mark* sering muncul sebagai indikasi pertumbuhan retak akibat pembebanan siklik berulang. Pada tingkat struktur mikro, pergerakan dislokasi, interaksi antar fasa, serta keberadaan inklusi dan batas butir memegang peranan penting dalam memicu deformasi plastis lokal dan perkembangan retak fatik (Jin et al., 2025; Mughrabi, 2015; Murakami, 2019). Pada temperatur tinggi dan pembebanan jangka panjang, mekanisme kerusakan bahkan dapat bertransisi menjadi retak antar butir menyerupai fenomena *creep* (perayapan) (Prawoto et al., 2018; Suhartono & Supriadi, 2021). Hal ini menunjukkan bahwa fatik merupakan fenomena kerusakan yang bersifat multiskala dan multifaktor.

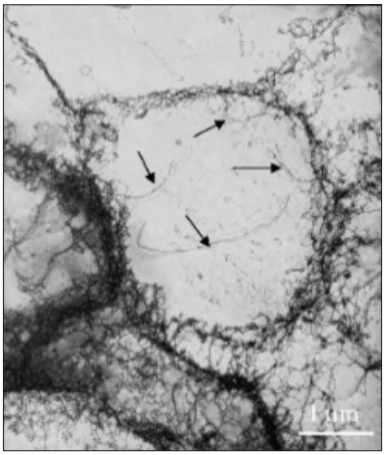
Dalam konteks tersebut, perjalanan penelitian selama lebih dari tiga dekade menunjukkan kesinambungan dalam memahami evolusi kerusakan material, mulai dari struktur mikro hingga integritas struktur pada skala komponen teknik. Kajian awal difokuskan pada pengaruh struktur mikro, ukuran butir, kualitas permukaan, dan tegangan sisa terhadap ketahanan fatik material (Suhartono, 1994, 2001, 2003a, 2005, 2006a, 2007d, 2009, 2015). Penelitian kemudian berkembang menuju analisis retak mikro, retak pendek, pembebanan multiaksial, integrasi mekanika retakan berbasis CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*), simulasi numerik, validasi skala penuh, hingga pemanfaatan pembelajaran mesin (*machine learning*) untuk analisis fatik dan integritas struktur (Suhartono et al., 2000, 2022, 2025; Zenner et al., 2001, 2002).

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pengembangan pendekatan terpadu berbasis rekayasa integritas struktur (*structural integrity engineering*) yang mengintegrasikan pengujian eksperimental, simulasi numerik, parameter mekanika retakan, dan analisis berbasis data dalam satu kerangka

multiskala untuk evaluasi integritas struktur. Pendekatan ini memperkuat keterkaitan antara fenomena struktur mikro, perilaku retak, validasi struktur skala besar, dan metode analisis modern sehingga evolusi kerusakan material dapat dipahami secara lebih komprehensif dan realistis. Integrasi *Artificial Intelligence/Machine Learning* (AI/ML) juga membuka peluang pengembangan pendekatan prediktif yang lebih adaptif terhadap kondisi operasi nyata (Gbagba et al., 2024; Suhartono et al., 2025). Namun demikian, estimasi umur fatik tetap memerlukan validasi melalui eksperimen, prototipe, uji skala penuh (*full-scale testing*), inspeksi aktual, dan data operasi lapangan (Gudehus & Zenner, 2000; Alexander & Greenstreet, 2025; Dowling & Flewitt, 2024). Dengan demikian, pendekatan berbasis rekayasa integritas struktur diharapkan dapat mendukung desain berbasis *damage tolerance*, meningkatkan keandalan struktur, dan memperkuat pengembangan teknologi nasional yang berkelanjutan

II. MEKANISME KERUSAKAN FATIK: DARI STRUKTUR MIKRO HINGGA INISIASI RETAK

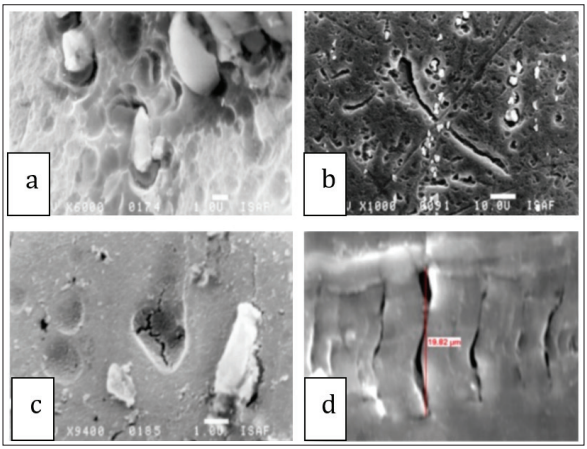
Perkembangan ilmu ketahanan struktur menunjukkan bahwa kegagalan akibat fatik tidak cukup dijelaskan hanya melalui kekuatan statis material. Banyak kegagalan pada pesawat, turbin, jembatan baja, dan struktur lepas pantai terjadi akibat akumulasi kerusakan selama pembebanan siklik berulang, meskipun tegangan kerja berada di bawah kekuatan luluh material (Stephens et al., 2001; Schijve, 2009). Oleh karena itu, pemahaman mekanisme fatik perlu diawali dari skala struktur mikro, karena pada tingkat inilah deformasi plastis lokal dan inisiasi retak pertama kali terjadi.



Sumber: Suresh, (2012)

Gambar 2.1 Struktur dislokasi logam akibat beban siklik

Pada skala mikro, material tidak dapat dipandang sebagai media homogen, melainkan sebagai sistem kristal yang mengalami deformasi melalui pergerakan dislokasi. Pembebanan siklik menyebabkan interaksi antardislokasi dan membentuk struktur seperti sel-sel dislokasi dan dinding-dinding dislokasi, yang mencerminkan akumulasi deformasi plastis lokal secara tidak homogen seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.1** (Liu et al., 2025; Suresh, 2012; Mughrabi, 2015; Sangid, 2013). Interaksi dislokasi dengan batas butir, presipitat, partikel keras, dan inklusi menyebabkan deformasi plastis terkonsentrasi pada lokasi tertentu, yang kemudian menjadi tahap awal evolusi kerusakan fatik.



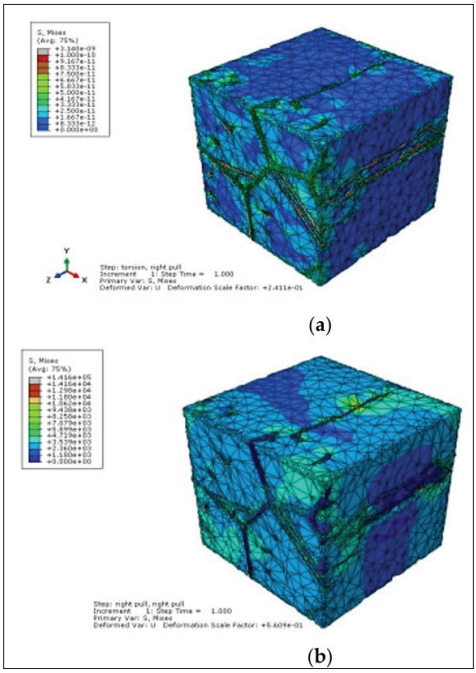
Ket.: (a) pembebanan tarik–tarik, inisiasi retak; (b) retak mikro; (c) pembebanan torsi, inisiasi retak; (d) retak akibat torsi.

Sumber: Suhartono et al., (2022)

Gambar 2.2 Citra SEM, inisiasi retak mikro dari lokasi partikel atau inklusi

Di bawah pembebanan berulang, lokalisasi deformasi plastis dapat membentuk *persistent slip bands* (PSB). PSB menyebabkan ekstrusi–intrusi pada permukaan dan menjadi lokasi awal terbentuknya retak mikro. Selain pada slip band, retak mikro juga dapat berawal dari partikel keras, inklusi, atau daerah konsentrasi tegangan lokal. Dengan demikian, tahap awal kerusakan fatik tidak terjadi secara acak, tetapi sangat dipengaruhi oleh kondisi mikrostruktur dan lokasi konsentrasi deformasi plastis (Murakami, 2002; Tanaka & Mura, 1981).

Pada tahap awal, retak yang terbentuk masih sangat kecil dan sering kali belum dapat dideteksi dengan metode inspeksi konvensional. Namun, retak terus berkembang akibat pembebanan siklik seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.2**. Interaksi antara ujung retak dan struktur mikro menyebabkan jalur perambatan retak menjadi tidak linier serta dipengaruhi oleh orientasi kristal, ukuran butir, distribusi fasa, dan keberadaan partikel keras (Davidson & Lankford, 1992; Mughrabi, 2015).

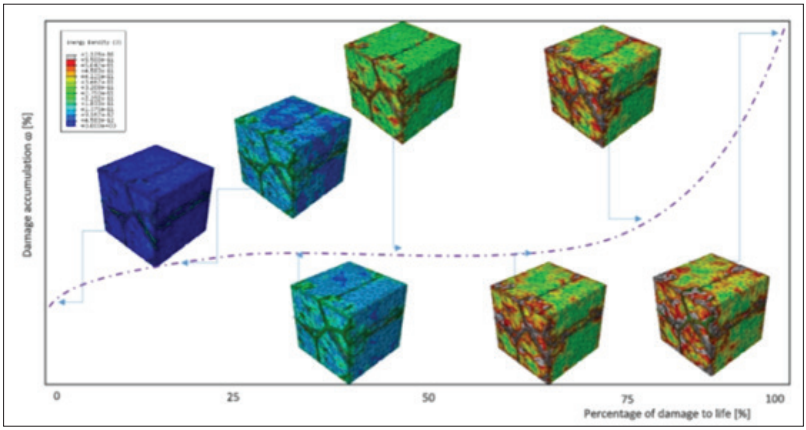


Sumber: Suhartono et al., (2022)

Gambar 2.3 Model mikro pada pembebanan tarik (a) dan torsi (b)

Peta kerusakan pada **Gambar 2.4** menunjukkan bahwa akumulasi kerusakan fatik tidak berlangsung secara linier terhadap umur material. Pada tahap awal, peningkatan kerusakan relatif lambat karena deformasi plastis lokal dan inisiasi retak masih terbatas pada lokasi-lokasi mikrostruktur tertentu. Seiring bertambahnya siklus pembebanan, kerusakan mulai terakumulasi lebih cepat akibat pertumbuhan dan koalesensi retak mikro. Menjelang akhir umur fatik, laju akumulasi kerusakan meningkat tajam, yang menunjukkan transisi menuju perambatan retak yang lebih dominan dan kondisi kritis sebelum

kegagalan. Dengan demikian, peta ini memperlihatkan bahwa evolusi kerusakan fatik merupakan proses bertahap yang semakin cepat ketika material mendekati akhir umur layannya

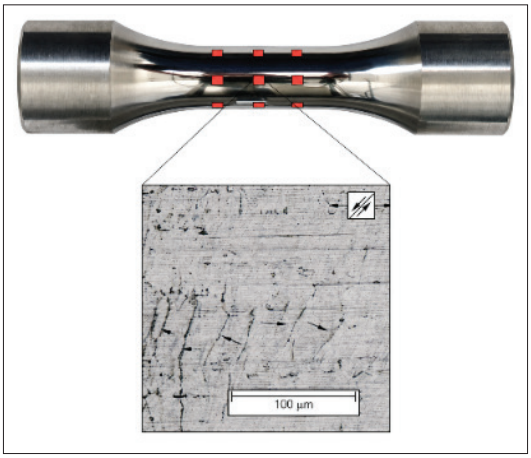


Gambar 2.4 Peta kerusakan akibat fatik

Seiring bertambahnya jumlah siklus, beberapa retak mikro dapat tumbuh dan berkoalesensi membentuk retak pendek (*short crack*), seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.5**. Tahap ini merupakan fase transisi penting karena perilaku retak masih dipengaruhi oleh struktur mikro, tetapi mulai menunjukkan kecenderungan propagasi yang lebih terarah.

Pada tahap retak pendek, perilaku retak belum dapat dijelaskan sepenuhnya dengan pendekatan mekanika retakan klasik. Retak pada fase ini termasuk dalam kategori *microstructurally small crack*, yaitu retak yang panjangnya masih sebanding dengan ukuran fitur struktur mikro. Oleh karena itu, batas butir, inklusi, partikel, dan orientasi kristal masih dapat berperan sebagai

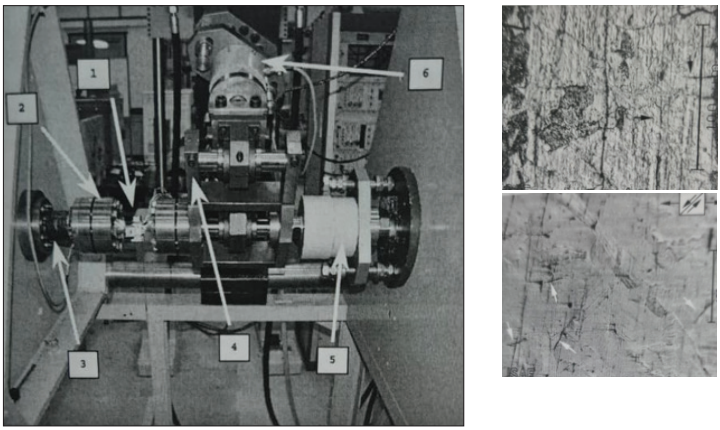
penghambat maupun pengarah perambatan retak (Socie, 1988; Miller, 1993; Cai et al., 2023).



Sumber: Suhartono et al., (2022)

Gambar 2.5 Evolusi retak mikro menuju retak pendek, ε_a = 0,6% , N = 600 siklus

Fenomena retak pendek juga menjelaskan mengapa urutan pembebanan dapat menghasilkan umur fatik yang berbeda, misalnya urutan beban torsi–tarik dan tarik–torsi, maupun pembebanan tinggi–rendah dan rendah–tinggi (Zenner et al., 2002b; Suhartono, 2006b). Selain itu, ukuran butir dan karakteristik mikrostruktur telah terbukti memengaruhi inisiasi serta pertumbuhan retak pendek, baik melalui eksperimen maupun simulasi numerik (Zenner et al., 2001; Suhartono, 2004d).



1. Sensor regangan–geser multi-sumbu
2. penjepit pegas cincin
3. Sensor torsi
4. Lengan tuas
5. Sensor langkah aksial
6. Sensor langkah torsi

Sumber: Suhartono et al., (2000)

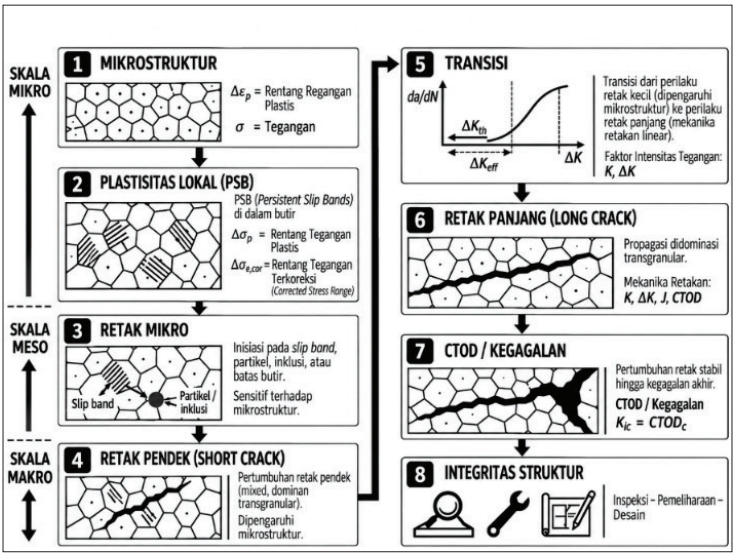
Gambar 2.6 Pengujian fatik multiaksial dan karakterisasi struktur mikro

Pengujian fatik multiaksial (**Gambar 2.6**) menjadi penting karena kondisi pembebanan aktual pada komponen teknik jarang bersifat uniaksial murni. Evaluasi perambatan retak mikro pada pembebanan tarik-tekan dan torsi menunjukkan bahwa arah pembebanan, kondisi tegangan, dan struktur mikro memengaruhi lokasi inisiasi serta arah pertumbuhan retak mikro (Suhartono, 2000; Pötter et al., 2000; Suhartono et al., 2000). Selain itu, ukuran butir dan karakteristik mikrostruktur juga berperan dalam menentukan ketahanan material terhadap inisiasi retak dan perkembangan retak pendek (Zenner et al., 2001; Suhartono, 2004d; Suhartono, 2005).

III. PERAMBATAN RETAK FATIK, MEKANIKA RETAKAN, DAN VALIDASI STRUKTUR

Setelah retak pendek terbentuk, persoalan utama dalam prediksi umur struktur bergeser dari mekanisme inisiasi menuju kemampuan retak untuk terus merambat di bawah pembebanan siklik. Pada tahap ini, perilaku retak mulai dikendalikan oleh gaya pendorong retak (*crack driving force*), ukuran retak, geometri komponen, rasio tegangan, riwayat pembebanan, serta kondisi tegangan di sekitar ujung retak. Oleh karena itu, pendekatan mekanika retakan diperlukan untuk menghubungkan panjang retak, medan tegangan lokal, laju perambatan retak, dan kondisi kritis kegagalan. Pendekatan ini memberikan dasar kuantitatif dalam menentukan umur sisa, toleransi cacat, interval inspeksi, dan evaluasi integritas struktur (Luksch et al., 2023).

Gambar 3.1 memperlihatkan tahapan evolusi kerusakan fatik secara menyeluruh, mulai dari respons mikrostruktur, plastisitas lokal melalui pembentukan *persistent slip bands* (PSB), inisiasi retak mikro, retak pendek, transisi menuju retak panjang, hingga kegagalan dan evaluasi integritas struktur. Gambar ini menjadi jembatan konseptual antara Bab II yang membahas mekanisme awal kerusakan pada tingkat mikrostruktur dan Bab III yang menitikberatkan pada perambatan retak, mekanika retakan, serta validasi struktur. Setelah retak berkembang melampaui skala mikrostruktur, perilakunya semakin dikendalikan oleh medan tegangan di sekitar ujung retak, sehingga diperlukan pendekatan mekanika retakan untuk menjelaskan laju perambatan retak, memprediksi umur sisa, dan menentukan kondisi kritis kegagalan.



Gambar 3.1 Tahapan evolusi kerusakan fatik dari skala mikro hingga integritas struktur.

A. Transisi dari Retak Pendek ke Retak Panjang

Transisi dari retak pendek menuju retak panjang merupakan tahap penting dalam analisis fatik karena menandai perubahan dari perilaku retak yang masih dipengaruhi fitur mikrostruktur menuju perilaku yang lebih dominan dikendalikan oleh medan tegangan di sekitar ujung retak. Pada daerah retak pendek, ambang pertumbuhan retak dapat lebih rendah dibandingkan retak panjang, sehingga retak kecil masih dapat merambat pada kondisi tegangan yang secara konvensional dianggap aman.

Fenomena tersebut dapat dijelaskan melalui diagram Kitagawa–Takahashi dan modifikasi El Haddad, yang

menghubungkan ukuran retak dengan batas fatik serta ambang pertumbuhan retak material (Kitagawa & Takahashi, 1976; El Haddad et al., 1979; Tanaka & Akiniwa, 2024). Pendekatan ini menunjukkan bahwa ketahanan fatik tidak hanya ditentukan oleh amplitudo tegangan, tetapi juga oleh keberadaan cacat awal dan ukuran retak. Dengan demikian, transisi dari retak pendek ke retak panjang menjadi dasar penting dalam pengembangan pendekatan *damage tolerance*.

Selain ukuran retak, riwayat pembebanan juga berpengaruh terhadap perilaku perambatan retak. Efek *crack-growth retardation* pada pembebanan amplitudo variabel telah dibahas oleh Habibie melalui model akumulasi kerusakan relatif untuk memprediksi pertumbuhan retak pada riwayat pembebanan sembarang (Habibie, 1971). Pengamatan pada paduan aluminium Al 2024, 7075, dan 7475 di bawah pembebanan tipe penerbangan juga menunjukkan bahwa laju perambatan retak sangat sensitif terhadap urutan dan amplitudo pembebanan (Sardjono & Suhartono, 1991). Hal ini menegaskan bahwa prediksi umur retak perlu mempertimbangkan riwayat beban aktual, bukan hanya besar tegangan maksimum.

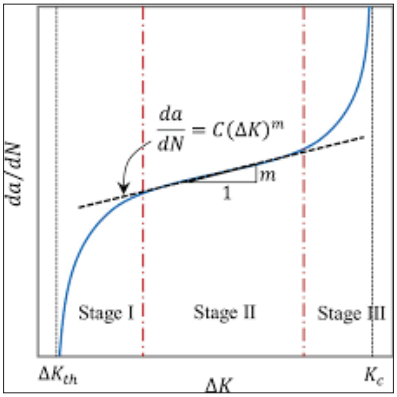
B. Faktor Intensitas Tegangan dan Perambatan Retak

Dalam mekanika retakan elastis linier, kondisi di sekitar ujung retak dinyatakan oleh faktor intensitas tegangan (*K*):

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad \text{.. (1)}$$

di mana σ adalah tegangan nominal, a panjang retak, dan Y faktor geometri (Anderson, 2017). Persamaan ini menunjukkan bahwa faktor intensitas tegangan dipengaruhi oleh tegangan kerja, panjang retak, dan geometri komponen.

Pada pembebanan siklik, perilaku perambatan retak fatik secara umum terbagi menjadi tiga wilayah, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.2, yaitu wilayah ambang batas (threshold) dengan laju pertumbuhan retak sangat rendah, wilayah Paris dengan pertumbuhan retak yang mengikuti hubungan pangkat terhadap rentang faktor intensitas tegangan, serta wilayah pertumbuhan retak cepat ketika kondisi mendekati kegagalan (Schijve, 2009).



Sumber: Schijve, (2009).

Gambar 3.2 Kurva pertumbuhan retak fatik

wilayah Paris, laju perambatan retak fatik dinyatakan melalui Hukum Paris:

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad \text{.....(2)}$$

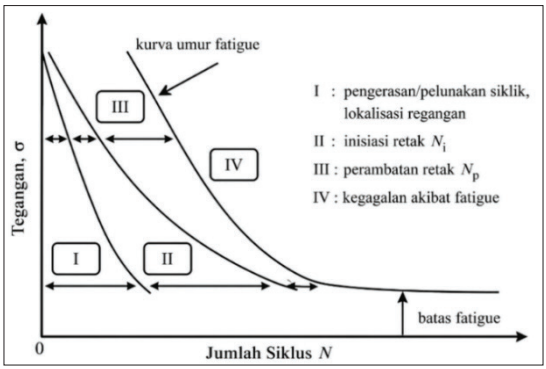
Persamaan tersebut menunjukkan bahwa laju pertumbuhan retak *da/dN* dikendalikan oleh rentang faktor intensitas tegangan *ΔK* dan konstanta material *C* dan *m* (Paris & Erdogan, 1963).

Parameter da/dN , ΔK , konstanta material C dan m serta ΔK_{th} menjadi dasar penting dalam prediksi umur retak. Namun, dalam kondisi nyata, laju perambatan retak juga dipengaruhi oleh rasio tegangan, tegangan sisa, kondisi permukaan, lingkungan, temperatur, proses manufaktur, dan riwayat pembebanan. Oleh karena itu, Hukum Paris perlu dipahami sebagai dasar analisis propagasi retak pada daerah stabil, yang kemudian dapat dikembangkan dengan pendekatan lain untuk mengakomodasi efek tegangan rata-rata, beban amplitudo variabel, dan kondisi mendekati kegagalan.

C. Integrasi Umur Fatik dan *Damage Tolerance*

Umur fatik secara konseptual terdiri atas dua komponen utama, yaitu umur inisiasi retak (N_i) dan umur propagasi retak (N_p), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.3. Hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$N_{total} = N_i + N_p \quad \text{.....(3)}$$

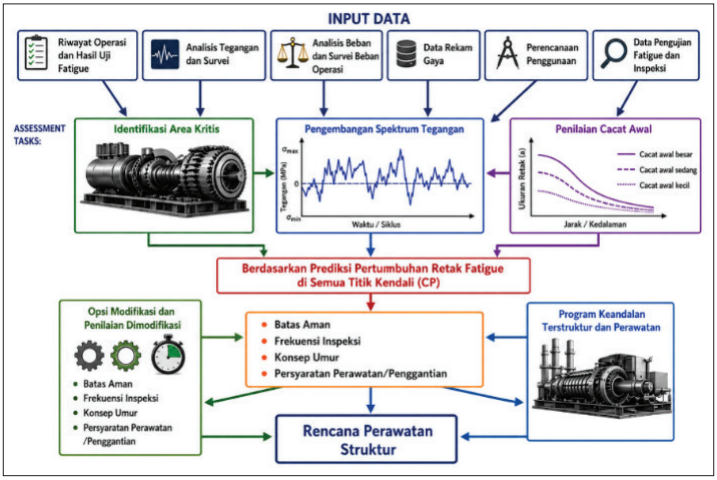


Sumber: Stephens et al., (2001); Anderson, (2017)

Gambar 3.3 Diagram pembagian umur fatik

Pada tahap awal, pendekatan berbasis kurva S–N dan konsep tegangan–regangan ekuivalen masih relevan karena kerusakan didominasi oleh deformasi plastis lokal, akumulasi kerusakan mikrostruktur, dan inisiasi retak. Pendekatan ini telah digunakan dalam evaluasi umur fatik siklus rendah dan pembebanan aksial–torsi pada material teknik (Suhartono, 2003b, 2007a, 2011a, 2011b).

Namun, pada kondisi ketika cacat awal telah hadir atau retak mulai terbentuk, tahap propagasi retak menjadi komponen penting dalam umur fatik. Fenomena retak pendek menunjukkan bahwa retak kecil dapat berkembang pada nilai ΔK yang masih berada di bawah ambang pertumbuhan retak panjang. Transisi ini dijelaskan melalui diagram Kitagawa–Takahashi dan pendekatan El Haddad, yang menghubungkan domain berbasis tegangan dengan domain mekanika retakan (Kitagawa & Takahashi, 1976; El Haddad et al., 1979).



Gambar 3.4 Diagram konsep *damage tolerance design*

Pada struktur teknik, keberadaan cacat awal tidak dapat sepenuhnya diabaikan. Oleh karena itu, desain berbasis *damage tolerance* mengasumsikan bahwa cacat awal dapat hadir, dan pertumbuhannya harus dikendalikan agar tidak mencapai ukuran kritis selama operasi. Pendekatan ini menjadi dasar penentuan umur sisa, ukuran cacat yang masih dapat diterima, interval inspeksi, batas aman operasi, dan strategi pemeliharaan berbasis kondisi. Pendekatan *damage tolerance* (**Gambar 3.4**) telah digunakan dalam standar modern seperti API 579-1/ASME FFS-1, BS 7910, dan DNV-RP-C203 (American Petroleum Institute [API], 2021; British Standards Institution [BSI], 2019; DNV, 2021).

D. Pengaruh Tegangan Sisa dan Rekayasa Permukaan

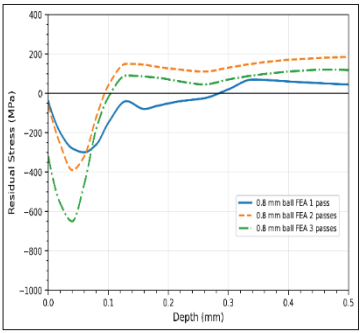
Tegangan sisa memiliki pengaruh penting terhadap laju perambatan retak fatik karena dapat mengubah faktor intensitas tegangan efektif di sekitar ujung retak. Tegangan sisa tekan menurunkan kecenderungan pembukaan retak, sedangkan tegangan sisa tarik dapat mempercepat propagasi retak. Pengaruh ini dapat dinyatakan secara konseptual melalui:

……(4)

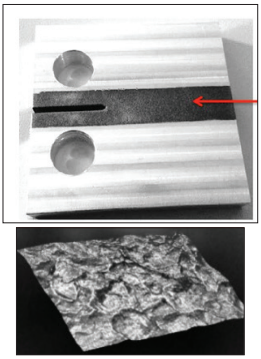
Karena K_{res} bernilai negatif pada kondisi tegangan tekan, maka $\Delta K_{\text{efektif}}$ menjadi lebih kecil. Akibatnya, pembukaan retak berkurang dan laju perambatan retak menjadi lebih lambat. Sebaliknya, tegangan sisa tarik dapat meningkatkan $\Delta K_{\text{efektif}}$, memperbesar gaya pendorong retak, dan mempercepat propagasi retak.

Perlakuan permukaan seperti *shot peening* dapat meningkatkan ketahanan fatik melalui pembentukan tegangan sisa tekan dan *strain hardening* ditunjukkan pada **Gambar 3.5**.

(Suhartono, 2001; Prawoto et al., 2020). Dengan demikian, rekayasa permukaan tidak hanya meningkatkan kondisi permukaan material, tetapi juga mengubah respons retak terhadap pembebanan siklik melalui penurunan faktor intensitas tegangan efektif.



a. Distribusi Tegangan sisa akibat Shot Peening



b. Implementasi pada CT Spesimen

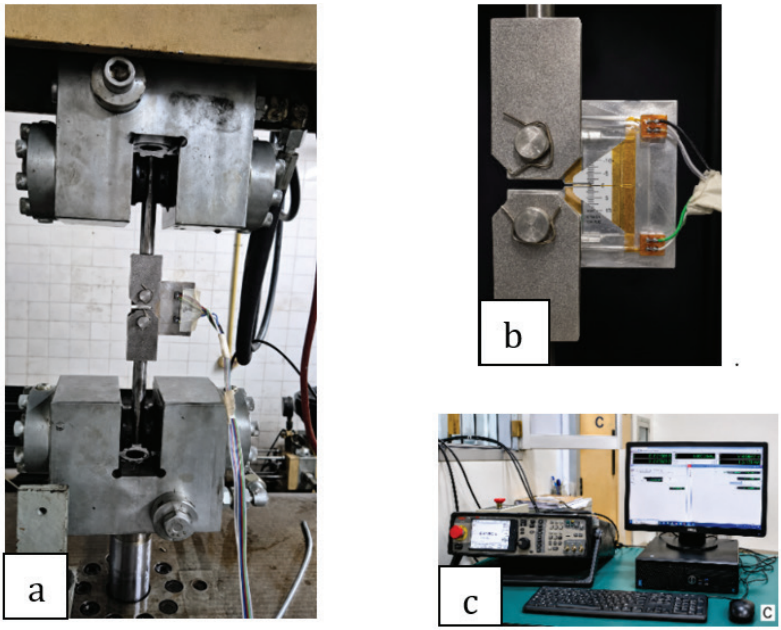
Sumber: Prawoto et al., (2020)

Gambar 3.5 Distribusi tegangan sisa akibat *shot peening* dan implementasinya pada *CT specimen*.

Selain tegangan sisa, kondisi permukaan juga berpengaruh terhadap ketahanan fatik. Kekasaran permukaan dapat menjadi lokasi konsentrasi tegangan dan memicu inisiasi retak, sedangkan perbaikan kondisi permukaan dapat meningkatkan ketahanan fatik material. Oleh karena itu, pengendalian kualitas permukaan, *shot peening*, dan perlakuan permukaan lainnya perlu dipandang sebagai bagian dari strategi peningkatan umur fatik (Suhartono, 2001, 2015; Prawoto et al., 2020).

E. Pengujian Perambatan Retak Fatik

Pengujian perambatan retak fatik merupakan validasi utama untuk menghubungkan konsep mekanika retakan dengan perilaku aktual material.



Ket.: (a) *Set up* pengujian, (b) *Specimen* penjalaran retak, (c) Instrumen kontrol & data akuisisi

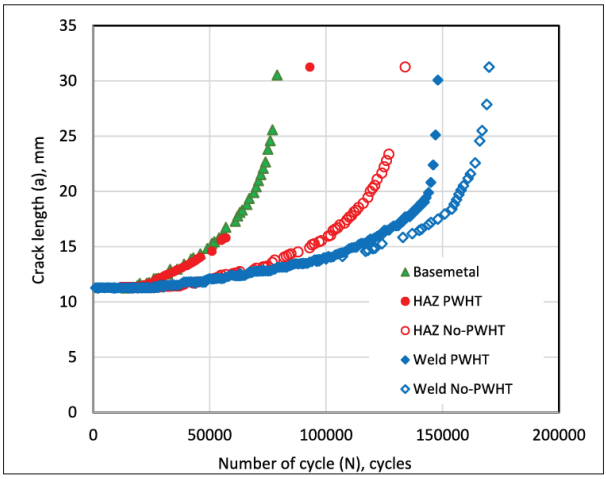
Sumber: Suhartono et al., (2025)

Gambar 3.6 Sistem pengujian perambatan retak fatik

Sistem pengujian pada **Gambar 3.6** digunakan untukmengevaluasi ketahanan fatik. Melalui pengujian ini, panjang retak (a) dan jumlah siklus (N) direkam secara kontinu,

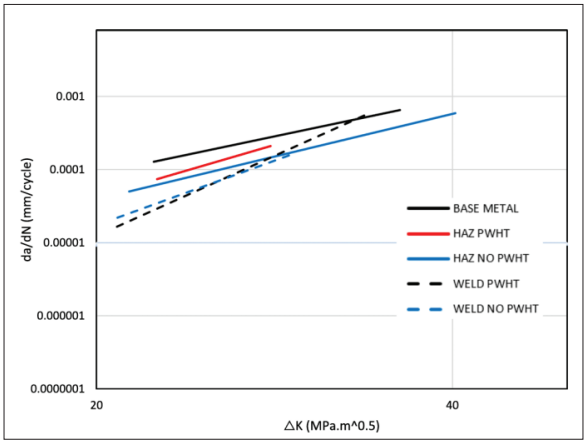
kemudian diolah menjadi kurva *a–N* dan kurva *da/dN–ΔK* dapat diperoleh secara eksperimental.

Gambar 3.7 dan **Gambar 3.8** menunjukkan bahwa *Weld Center non-Post Weld Heat Treatment* (WC non-PWHT) dan *Heat Affected Zone non-Post Weld Heat Treatment* (HAZ non-PWHT) memiliki laju retak lebih rendah akibat tegangan sisa tekan yang menurunkan (ΔK_{eff}).



Sumber: Suhartono et al. (2025)

Gambar 3.7 Diagram jumlah siklus (N) versus panjang retak



Sumber: Suhartono et al. (2025)

Gambar 3.8 Kurva *versus ΔK*

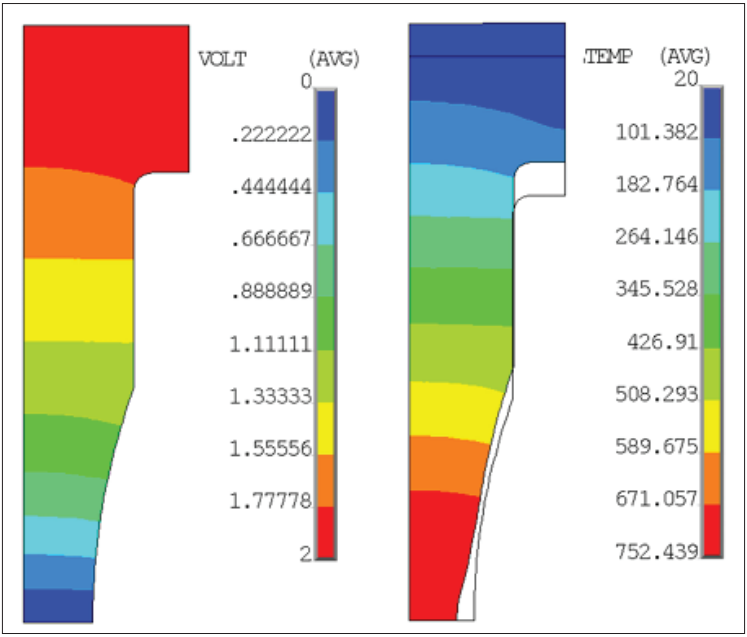
Sementara itu, *base metal* menunjukkan laju retak lebih tinggi karena tidak memiliki kontribusi tegangan sisa tekan akibat pengelasan. Perilaku ini menunjukkan bahwa ketahanan perambatan retak tidak hanya ditentukan oleh *(ΔK*), tetapi juga oleh tegangan sisa, kondisi mikrostruktur, dan riwayat termal material.

F. Simulasi Numerik dan Pemetaan Kerusakan

Simulasi numerik digunakan untuk mengevaluasi distribusi tegangan, regangan, zona plastis, dan parameter mekanika retakan pada kondisi geometri serta pembebanan kompleks. Melalui analisis elemen hingga (*finite element analysis*/FEA), fenomena termal–mekanik, konsentrasi tegangan, dan respons lokal struktur dapat dianalisis secara lebih komprehensif.

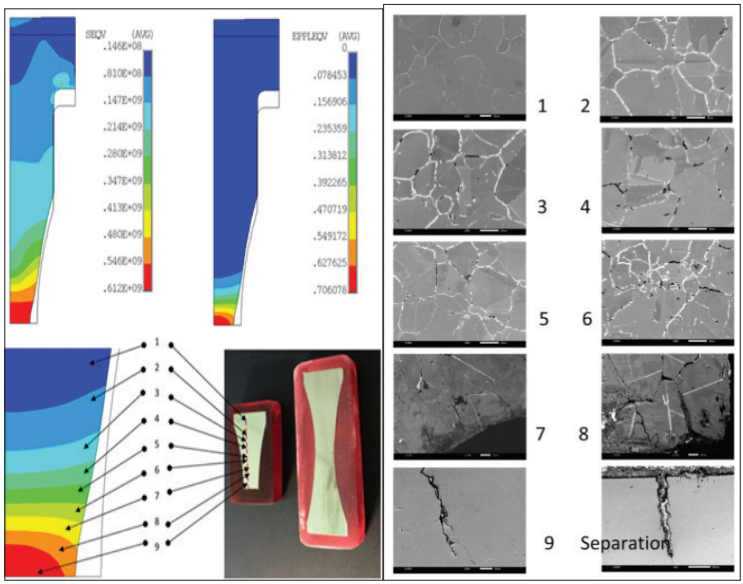
Distribusi temperatur yang tidak homogen menghasilkan gradien termal yang dapat memicu redistribusi tegangan dan

deformasi plastis lokal (**Gambar 3.9)**. Selain itu, simulasi numerik juga dikembangkan melalui pendekatan pemetaan kerusakan (*damage mapping*) yang menghubungkan distribusi tegangan dan regangan plastis dengan hasil metalograf yang ditunjukkan pada **Gambar 3.10**.



Sumber: Prawoto et al. (2018)

Gambar 3.9 Hasil simulasi numerik distribusi temperatur dan medan tegangan.



(a) (b)

Ket.: (a) Hasil simulasi numerik (b) metalografi hasil uji

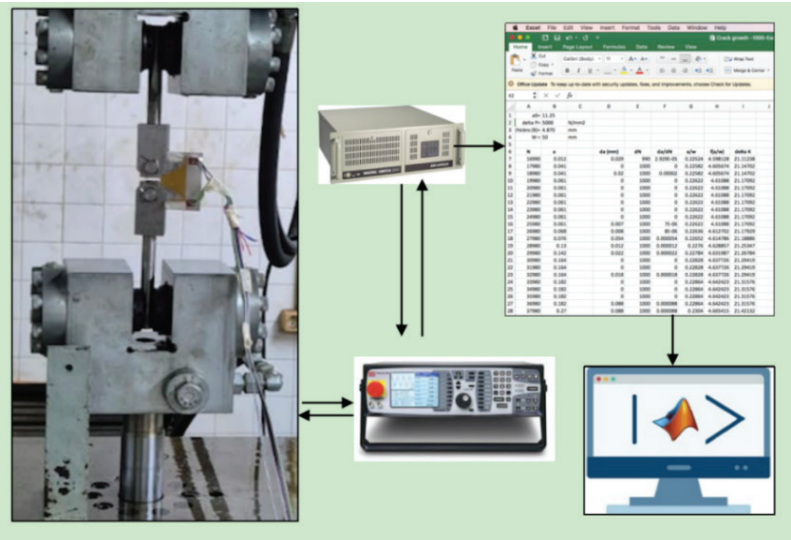
Gambar 3.10 Hasil simulasi numerik dan foto tingkat kerusakan material.

Pendekatan ini memungkinkan integrasi antara mekanika kontinu dan fenomena metalurgi sehingga perilaku kerusakan dapat dianalisis secara multiskala. Simulasi numerik juga memberikan dasar bagi pengembangan model prediktif berbasis kondisi aktual dalam rekayasa integritas struktur.

G. Integrasi Mekanika Retakan dan Analisis Berbasis Data

Variasi pertumbuhan retak pada sambungan las menunjukkan perlunya integrasi mekanika retakan dengan pembelajaran

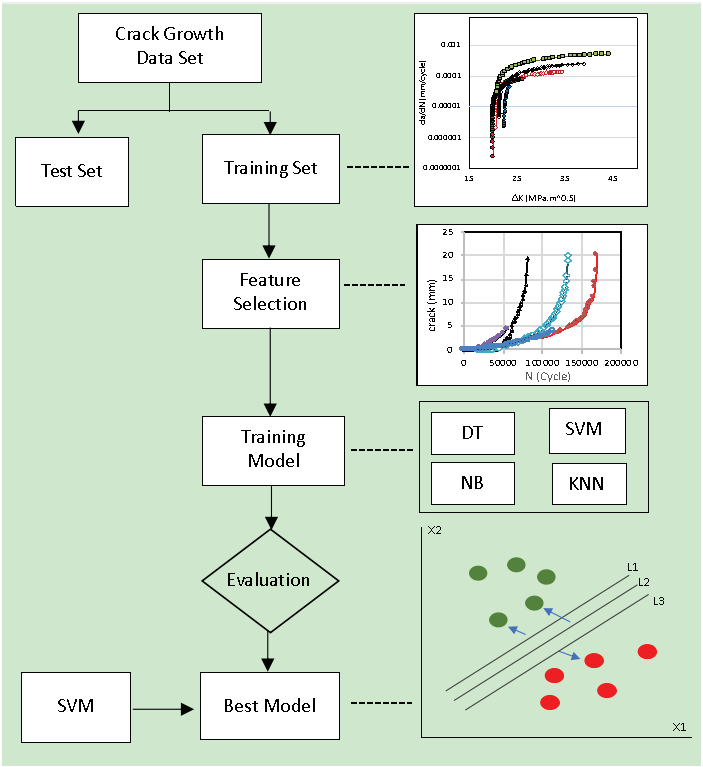
mesin (machine learning) untuk mengidentifikasi pola kerusakan fatik. **Gambar 3.11** menunjukkan sistem akuisisi data selama pengujian fatik, meliputi panjang retak, jumlah siklus, dan parameter mekanika retakan. Data tersebut digunakan sebagai dasar analisis pertumbuhan retak berbasis pembelajaran mesin.



Sumber: Suhartono et al. (2025)

Gambar 3.11 Akuisisi Data untuk Analisis Pertumbuhan Retak Fatik

Gambar 3.12 memperlihatkan tahapan pengolahan data, mulai dari pembersihan, normalisasi, hingga klasifikasi menggunakan empat algoritma, yaitu Decision Tree (DT), Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbors (KNN), dan Naïve Bayes (NB).



Sumber: Suhartono et al. (2025)

Gambar 3.12 Diagram alir analisis pertumbuhan retak fatik berbasis pembelajaran mesin.

Evaluasi model dilakukan menggunakan *accuracy*, *precision*, *recall*, dan *F1-score* (Agarwal et al., 2021). Hasil menunjukkan bahwa SVM memberikan performa paling stabil pada sebagian besar kondisi material, sedangkan KNN menunjukkan performa terbaik pada kondisi WC PWHT dengan akurasi 98,0% dan *F1-score* 99,0%.

Tabel 3.1 Metrik evaluasi performa model machine learning untuk klasifikasi pertumbuhan retak fatik

Kondisi Material	Model Terbaik	Akurasi (%)	Presisi (%)	Recall (%)	F1-score (%)
WC PWHT	*KNN*	98,0	100,0	98,0	99,0
WC Non-PWHT	*SVM*	85,2	83,9	97,9	90,3
HAZ PWHT	*SVM*	92,7	100,0	92,7	96,2
HAZ Non-PWHT	*SVM*	92,0	93,2	98,6	95,8
Logam induk	*SVM*	95,9	95,9	100,0	97,9

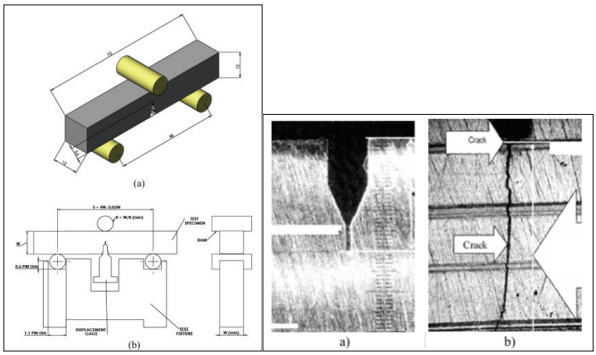
Hasil ini menunjukkan bahwa parameter mekanika retakan dapat digunakan sebagai fitur berbasis fisika dan statistik dalam pendekatan AI/ML. Integrasi mekanika retakan dan *machine learning* membuka peluang pengembangan *structural health monitoring* (SHM) secara waktu nyata untuk deteksi dini kerusakan struktur. Agar model AI/ML dapat diterapkan lebih luas, pengembangannya perlu mencakup variasi material, kondisi sambungan las, PWHT/non-PWHT, rasio tegangan, spektrum pembebanan, temperatur, lingkungan, dan mikrostruktur. Validitas model juga perlu diuji menggunakan data di luar pelatihan, misalnya melalui *leave-one-material-out* atau *leave-one-loading-condition -out*.

H. CTOD dan Validasi Skala Penuh

Pada struktur baja dan sambungan las, deformasi plastis di sekitar ujung retak perlu diperhitungkan melalui pendekatan mekanika retakan elastoplastik (Elastic-Plastic Fracture Mechanics, EPFM). Salah satu parameter yang digunakan adalah Crack

Tip Opening Displacement (CTOD), yang menggambarkan besarnya bukaan ujung retak akibat pembebanan.

Gambar 3.13 memperlihatkan skema pengujian CTOD menggunakan spesimen Single-Edge Notched Bend (SENB) dengan pembebanan lentur tiga titik. Pengujian ini digunakan untuk menentukan ketangguhan retak material berdasarkan respons deformasi di sekitar ujung retak. Nilai CTOD menunjukkan variasi antara logam induk, HAZ, dan logam las akibat heterogenitas mikrostruktur sambungan las. Daerah HAZ sering menjadi zona kritis karena mengalami perubahan mikrostruktur dan ketangguhan retak akibat siklus termal pengelasan. Integrasi EPFM dan CTOD menjadi dasar penting dalam pendekatan *damage tolerance design* serta telah diadopsi dalam standar seperti BS 7910 dan API 579-1/ASME FFS-1.



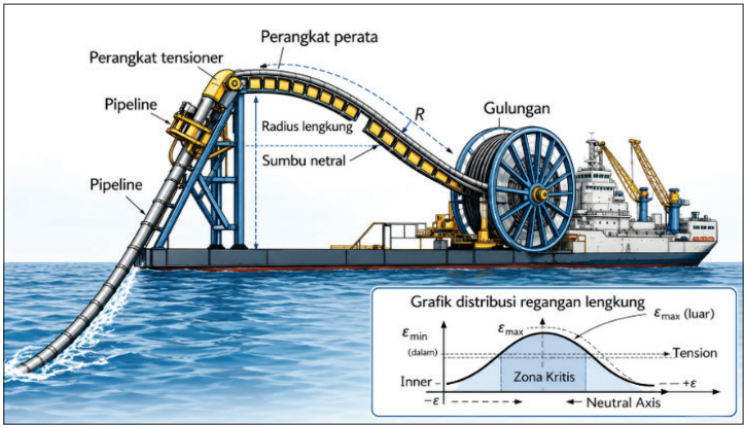
Sumber: Suhartono et al. (2023)

Gambar 3.13 Skema Pengujian CTOD pada Spesimen Single-Edge Notched Bend (SENB)

Validasi skala penuh merupakan tahap akhir untuk memastikan bahwa pendekatan analitis, eksperimental, dan numerik dapat

merepresentasikan kondisi operasional nyata, termasuk interaksi antara pembebanan, geometri, dan lingkungan.

Gambar 3.14 memperlihatkan skema instalasi pipa baja di lapangan melalui proses *reeling–unreeling*, yang menyebabkan pipa mengalami deformasi plastis akibat pelengkungan dan pelurusan berulang. Kondisi ini menjadi dasar pelaksanaan pengujian skala penuh untuk mengevaluasi respons mekanik pipa selama proses instalasi.



Gambar 3.14 Skema instalasi jalur pipa baja di lapangan.

Pengujian dirancang dengan mengacu pada DNV-ST-F101 dan DNV-RP-C203, serta kesepakatan teknis antara pengguna dan manufaktur untuk merepresentasikan kondisi operasi aktual. Pengujian menggunakan metode pelengkungan empat titik (four-point bending) dengan pembebanan siklik untuk mensimulasikan deformasi plastis selama proses reeling–unreeling.

Gambar 3.15 memperlihatkan pelaksanaan pengujian pipa baja skala penuh beserta sistem kontrol dan pemantauan

pembebanan. Sistem ini digunakan untuk merekam respons struktur secara kontinu selama pengujian.



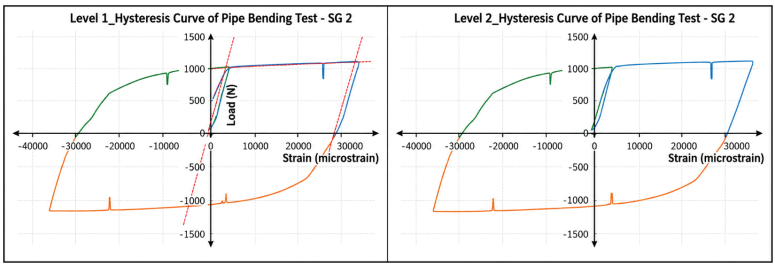


(a) Pengujian pipa baja untuk laut dalam skala penuh



(b) Kontrol dan monitor pengujian

Gambar 3.15 Pengujian skala penuh *reeling–unreeling* pipa baja untuk laut dalam.



Gambar 3.16 Kurva histeresis hasil uji.

Gambar 3.16 menunjukkan kurva histeresis hasil pengujian yang menggambarkan respons pembebanan dan pelepasan beban selama deformasi siklik. Luasan kurva histeresis merepresentasikan energi yang terdisipasi dalam satu siklus pembebanan.Setelah pengujian, dilakukan pemeriksaan retak dengan uji tak merusak, proses pelepasan tegangan (*stress relieving*), kemudian dilanjutkan dengan pengujian tarik, impak, dan CTOD untuk mengevaluasi perubahan ketangguhan. Dengan demikian, validasi skala penuh menjadi jembatan penting antara data laboratorium, mekanika retakan, simulasi numerik, dan performa struktur pada skala industri.

I. Sintesis Ilmiah Perambatan Retak dan Evaluasi Integritas Struktur

Berdasarkan uraian pada Bab III, prediksi umur struktur perlu dibangun melalui analisis perambatan retak yang terukur, tervalidasi, dan terhubung dengan kondisi operasi aktual. Setelah retak terbentuk, umur sisa struktur tidak lagi hanya ditentukan oleh kekuatan material awal, tetapi oleh interaksi antara gaya pendorong retak (*crack driving force*), ukuran retak, geometri komponen, rasio tegangan, tegangan sisa, ketangguhan retak, lingkungan, serta riwayat pembebanan. Oleh

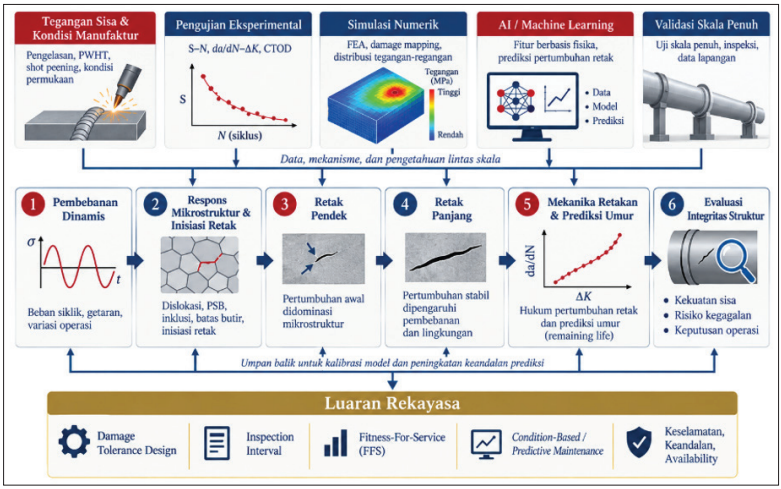
karena itu, mekanika retakan menjadi dasar kuantitatif untuk menghubungkan panjang retak, laju perambatan retak, kondisi kritis kegagalan, dan evaluasi integritas struktur.

Integrasi antara pengujian perambatan retak fatik, CTOD, simulasi numerik, analisis berbasis data, AI/ML, dan validasi skala penuh menunjukkan bahwa evaluasi integritas struktur harus dilakukan melalui pendekatan terpadu. Pendekatan ini memungkinkan prediksi umur sisa, penentuan ukuran cacat yang dapat diterima, penyusunan interval inspeksi, serta pengambilan keputusan rekayasa berbasis *damage tolerance*.

IV. KONTRIBUSI ILMIAH DALAM PREDIKSI UMUR STRUKTUR

Kontribusi ilmiah utama dari rangkaian riset ini adalah pengembangan kerangka terpadu prediksi umur material dan struktur berbasis evolusi kerusakan akibat pembebanan dinamis. Kerangka ini dibangun atas keyakinan ilmiah bahwa kegagalan struktur tidak terjadi secara tiba-tiba, melainkan merupakan hasil akumulasi kerusakan yang berkembang secara bertahap dari tingkat mikrostruktur, inisiasi retak mikro, retak pendek, retak panjang, hingga mencapai kondisi kritis. Oleh karena itu, prediksi umur struktur tidak cukup hanya didasarkan pada kekuatan material awal atau tegangan nominal, tetapi harus mempertimbangkan evolusi kerusakan sepanjang umur layan struktur (Suresh, 2012; Schijve, 2009; Anderson, 2017).

Kebaruan ilmiah dari pendekatan ini terletak pada integrasi antara struktur mikro, mekanika retakan, pengujian fatik, tegangan sisa, simulasi numerik, analisis berbasis data, dan validasi skala penuh dalam satu kerangka *Structural Integrity Engineering*. Pendekatan ini merupakan bentuk penyempurnaan, konvergensi, dan fusi dari beberapa konsep yang telah berkembang sebelumnya, yaitu pendekatan kurva S–N, mekanika retakan berbasis ΔK, pendekatan *damage tolerance*, CTOD, simulasi elemen hingga, serta *machine learning* untuk pengenalan pola pertumbuhan retak (Paris & Erdogan, 1963; Kitagawa & Takahashi, 1976; El Haddad et al., 1979; Anderson, 2017; Agarwal et al., 2021).



Gambar 4.1 Kerangka terpadu prediksi umur dan integritas struktur berbasis evolusi kerusakan.

Gambar 4.1 memperlihatkan kerangka terpadu prediksi umur dan integritas struktur berdasarkan evolusi kerusakan, mulai dari inisiasi retak pada tingkat mikrostruktur hingga propagasi retak dan kegagalan struktur. Kerangka ini menghubungkan konsentrasi tegangan, deformasi plastis, perkembangan retak mikro menjadi retak panjang, mekanika retakan, pengujian fatik dan CTOD, simulasi numerik, serta pembelajaran mesin (AI/ML). Validasi skala penuh menjadi tahap akhir untuk memastikan kesesuaian model dengan kondisi operasi nyata.

Kontribusi ilmiah kerangka ini terletak pada integrasi berbagai pendekatan yang sebelumnya dianalisis secara terpisah menjadi satu rangkaian evolusi kerusakan. Umur fatik dipandang sebagai gabungan umur inisiasi dan propagasi retak, sehingga prediksi tidak hanya menentukan umur layan, tetapi juga menjelaskan mekanisme dan lokasi perkembangan kerusakan.

Pada struktur dengan potensi cacat awal, seperti sambungan las, pipa laut dalam, dan struktur maritim, pendekatan damage tolerance digunakan untuk mengevaluasi ukuran cacat yang dapat diterima, umur sisa, serta interval inspeksi. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip penilaian integritas struktur dalam API 579-1/ASME FFS-1, BS 7910, dan DNV-RP-C203 (API, 2021; BSI, 2019; DNV, 2021).

Tegangan sisa dan kondisi manufaktur turut menentukan ketahanan fatik. Tegangan sisa tekan dapat memperlambat pertumbuhan retak melalui penurunan ΔKeff, sedangkan tegangan sisa tarik dapat mempercepatnya. Oleh karena itu, pengelasan, perlakuan panas, shot peening, dan kondisi permukaan perlu diperhitungkan dalam prediksi umur (Suhartono, 2001; Prawoto et al., 2020). Penelitian sambungan las GTAW SUS304–SA213T11 dan rotary friction welding AA5083-H112/AA7075-T6 juga menunjukkan pentingnya parameter pengelasan dan kondisi metalurgi terhadap sifat mekanik serta integritas sambungan (Hamdani et al., 2025; Sasmito et al., 2024).

Integrasi AI/ML tidak dimaksudkan menggantikan mekanika retakan, tetapi melengkapinya melalui analisis berbasis data. Parameter seperti ΔK, da/dN, panjang retak, jumlah siklus, kondisi material, dan tegangan sisa digunakan sebagai fitur berbasis fisika untuk mendukung prediksi kerusakan secara adaptif. Pendekatan ini membuka peluang pengembangan structural health monitoring dan predictive maintenance (Farrar & Worden, 2007; Jardine et al., 2006; Agarwal et al., 2021).

Validasi skala penuh memperkuat keterkaitan antara hasil eksperimen laboratorium, simulasi numerik, dan perilaku struktur pada kondisi operasional. Pengujian ini diperlukan untuk menilai keterwakilan model terhadap pengaruh geometri,

pembebanan, deformasi, dan kondisi lingkungan yang lebih kompleks.

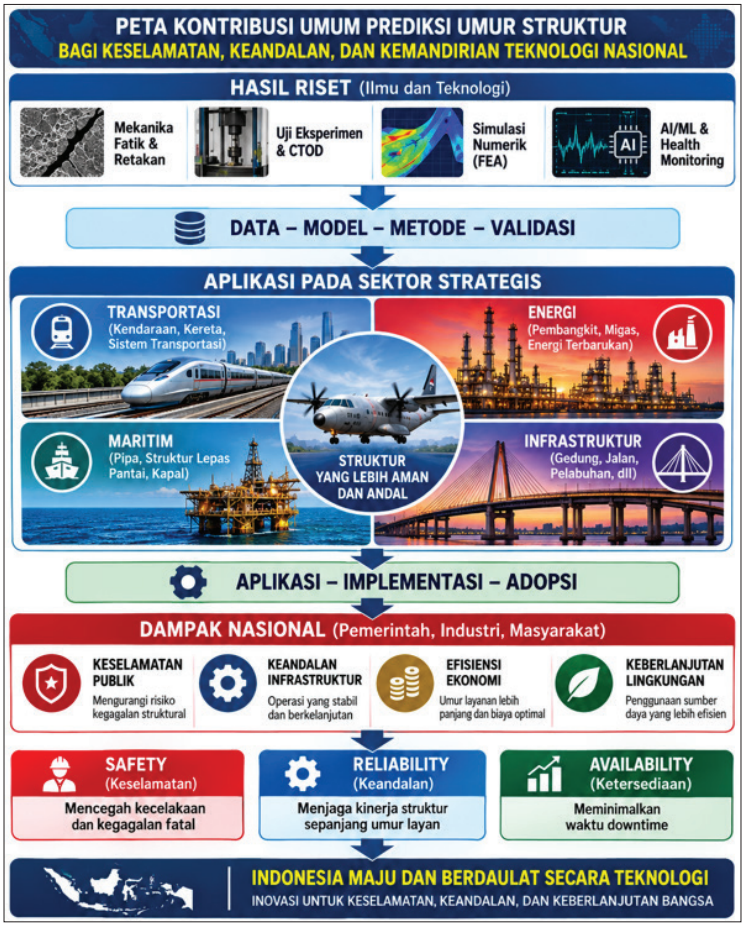
Dengan demikian, kontribusi ilmiah utama adalah pengembangan kerangka terpadu perhitungan dan prediksi umur material dan struktur berbasis evolusi kerusakan akibat pembebanan dinamis, yang mengintegrasikan mikrostruktur, mekanika retakan, fatik, CTOD, tegangan sisa, simulasi numerik, AI/ML, dan validasi skala penuh. Pendekatan ini mendukung evaluasi integritas struktur, perbaikan komponen, penyempurnaan desain, dan pengembangan produk yang lebih tahan terhadap kerusakan, guna meningkatkan keselamatan, keandalan, efisiensi, dan umur layan struktur dari skala mikro hingga industri.

V. KONTRIBUSI UMUM BAGI KESELAMATAN DAN KEANDALAN STRUKTUR

Kontribusi umum rangkaian penelitian ini adalah menyediakan dasar ilmiah untuk meningkatkan keselamatan, keandalan, dan keberlanjutan struktur teknik. Infrastruktur transportasi, energi, perpipaan, dan maritim menghadapi pembebanan dinamis, lingkungan korosif, serta umur operasi panjang yang berpotensi menimbulkan kerusakan fatik dan kegagalan struktur.

Di Indonesia, kondisi lingkungan tropis, variasi pembebanan, serta kualitas manufaktur dan pengelasan menuntut teknologi evaluasi umur struktur yang akurat dan sesuai dengan kondisi operasi nasional. Oleh karena itu, pendekatan berbasis evolusi kerusakan diperlukan untuk menentukan umur sisa, kelayakan operasi, dan strategi inspeksi yang tepat.

Gambar 5.1 memperlihatkan peta kontribusi prediksi umur struktur terhadap keselamatan, keandalan, efisiensi pemeliharaan, dan kemandirian teknologi nasional. Pendekatan ini menghubungkan hasil penelitian dengan kebutuhan industri dan pengambilan keputusan teknis berbasis risiko.



Gambar 5.1 Peta kontribusi umum prediksi umur struktur

Pemahaman terhadap pertumbuhan retak dan umur sisa memungkinkan penerapan risk-based inspection, fitness for service, condition-based maintenance, dan predictive maintenance. Dengan demikian, inspeksi dan pemeliharaan dapat ditentukan berdasarkan kondisi aktual serta risiko

kegagalan, bukan hanya jadwal tetap (API, 2021; American Petroleum Institute, 2023; Jardine et al., 2006).

Penerapan pendekatan ini mendukung pencegahan kegagalan mendadak, perpanjangan umur layan, dan pengelolaan aset yang lebih efisien. Keputusan perbaikan, penggantian, atau kelanjutan operasi dapat dilakukan berdasarkan data pengujian, inspeksi, dan evaluasi integritas struktur, sejalan dengan prinsip ISO 55000 dan ISO 31000.

Penguasaan teknologi pengujian fatik, CTOD, simulasi numerik, AI/ML, serta validasi skala penuh juga memperkuat kemandirian teknologi nasional. Keandalan hasil evaluasi perlu didukung oleh pengendalian mutu manufaktur, analisis kegagalan, dan kompetensi laboratorium pengujian (Suhartono, 2003a, 2004a, 2019).

Untuk memperluas penerapannya, diperlukan pengembangan basis data nasional mengenai sifat fatik, pertumbuhan retak, CTOD, dan tegangan sisa, disertai penyusunan protokol evaluasi integritas struktur berbasis damage tolerance, fitness for service, dan risk-based inspection. Penguatan fasilitas pengujian serta validasi skala penuh juga diperlukan untuk mendukung penilaian struktur kritis.

Integrasi AI/ML dengan structural health monitoring memungkinkan pemanfaatan data sensor, inspeksi, dan operasi untuk memperbarui prediksi umur secara berkelanjutan. Pendekatan ini mendukung peralihan dari pemeliharaan reaktif menuju pemeliharaan prediktif dan adaptif (Farrar & Worden, 2007; ISO 17359). Pengembangannya perlu didukung oleh peningkatan kompetensi sumber daya manusia, kolaborasi riset, dan kemitraan industri.

Dengan demikian, prediksi umur struktur berbasis evolusi kerusakan berkontribusi terhadap keselamatan publik, efisiensi pengelolaan aset, perbaikan komponen, penyempurnaan desain, dan pengembangan produk yang lebih andal, sekaligus memperkuat kemandirian teknologi nasional serta mendukung pembangunan infrastruktur yang aman dan berkelanjutan.

VI. KESIMPULAN

Prediksi umur fatik material dan struktur akibat pembebanan dinamis tidak cukup didasarkan pada kekuatan statis atau tegangan nominal. Kegagalan fatik berkembang bertahap dari deformasi plastis lokal, inisiasi retak mikro, retak pendek, retak panjang, hingga kegagalan struktur. Oleh karena itu, prediksi umur harus didasarkan pada evolusi kerusakan sepanjang umur layan.

Kerusakan fatik dipengaruhi oleh struktur mikro, ukuran butir, kondisi permukaan, tegangan sisa, serta riwayat pembebanan. Pada tahap retak pendek, perilaku retak masih dikendalikan oleh fitur mikrostruktur, sedangkan pada tahap retak panjang diperlukan pendekatan mekanika retakan, geometri komponen, dan kondisi pembebanan.

Kontribusi ilmiah utama orasi ini adalah pengembangan kerangka terpadu prediksi umur berbasis evolusi kerusakan, yang mengintegrasikan struktur mikro, mekanika retakan, pengujian fatik, CTOD, tegangan sisa, simulasi numerik, AI/ML, dan validasi skala penuh dalam pendekatan *Structural Integrity Engineering*.

Pendekatan ini menjadi dasar evaluasi damage tolerance, fitness for service, risk-based inspection, dan predictive maintenance, sekaligus mendukung perbaikan komponen, penyempurnaan desain, serta pengembangan produk yang lebih tahan terhadap kerusakan fatik. Dengan demikian, keselamatan, keandalan, efisiensi, dan kemandirian teknologi dapat terus ditingkatkan.

VII. PENUTUP

Perkembangan teknologi modern menuntut material dan struktur yang andal, aman, efisien, dan adaptif terhadap kondisi operasi yang kompleks. Oleh karena itu, ketahanan struktur perlu didukung oleh pemahaman evolusi kerusakan, prediksi umur layan, evaluasi integritas struktur, serta keputusan rekayasa berbasis data, mekanika retakan, dan validasi eksperimental.

Integrasi ilmu material, metalurgi fisika, mekanika retakan, pengujian fatik, simulasi numerik, sensor, AI/ML, dan validasi skala penuh menjadi dasar penting pengembangan *Structural Integrity Engineering*. Penguasaan bidang ini adalah langkah strategis untuk mendukung keselamatan publik, keandalan operasi, efisiensi ekonomi, dan kemandirian teknologi.

Orasi ilmiah ini menegaskan bahwa prediksi umur struktur bukan sekadar menghitung waktu kegagalan, tetapi merupakan upaya ilmiah untuk memahami, mengendalikan, dan memperpanjang umur layan struktur secara aman dan bertanggung jawab. Semoga pemikiran dan hasil riset ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu teknik material, rekayasa integritas struktur, serta kemajuan teknologi.

Demikian orasi ilmiah ini disampaikan. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan bimbingan dan keberkahan bagi setiap ikhtiar dalam mengembangkan ilmu pengetahuan, teknologi, dan inovasi untuk kemajuan bangsa.

Terima kasih.

VIII. UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagai penutup orasi ini, saya memanjatkan puji syukur ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga orasi ilmiah ini dapat disampaikan dengan baik.

Dengan penuh hormat, saya menyampaikan terima kasih kepada Presiden Republik Indonesia, Bapak Prabowo Subianto, atas amanat dan penugasan sebagai Peneliti Ahli Utama di BRIN.

Penghargaan dan terima kasih saya sampaikan kepada Kepala BRIN, Prof. Dr. Arif Satria, S.P., M.Si., dan Wakil Kepala BRIN, Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, M.Sc., DESD., ASEAN Eng., atas dukungan terhadap pengembangan riset dan para periset.

Terima kasih kepada Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset BRIN, Prof. Dr. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D., dan Sekretaris Majelis, Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, M.Sc., serta Tim Penelaah Naskah Orasi: Prof. Ir. Djoko W. Karmiadji, Ph.D.; Prof. Dr. Ir. D. N. Adnyana; Prof. Dr. Ir. Rizqon Fajar, M.Eng.; Prof. Dr. Drs. Fariduzaman, M.Sc., M.T.; dan Prof. Dr. Ir. I Nyoman Jujur, M.Eng., atas arahan dan masukan berharga dalam penyempurnaan naskah orasi ini.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Aries Suestiningtyas, S.IP., M.A.; Kepala BOSDM BRIN, Ratih Retno Wulandari, S.Sos., M.Si.; serta seluruh panitia pengukuhan atas dukungan dan penyelenggaraan acara ini.

Penghargaan saya sampaikan kepada Kepala BRIN periode 2021–2025, Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc., Kepala Organisasi

Riset Energi dan Manufaktur, Prof. Dr. Cuk Supriyadi Ali Nandar M.Eng., Kepala Pusat Riset Teknologi Kekuatan Struktur, Dr. Ir. Achmad Zaki Rahman, S.T., M.T. dan Kepala Pusat Riset Teknologi Manufaktur Mesin dan Produksi, Dr. Mahfudz Al Huda, M.Eng., atas dukungan selama perjalanan karier penelitian saya.

Kepada seluruh guru yang telah membimbing saya sejak awal pendidikan, para dosen Fakultas Teknik Universitas Indonesia, pembimbing S1 Ir. Sriati Djapri, M.Met., pembimbing doktoral saya Prof. Dr.-Ing. Harald Zenner dari Technische Universitaet Clausthal, Nieder Sachsen dan Dr.-Ing. Kurt Poetter dari BMW Group Muenchen, saya menyampaikan terima kasih atas bimbingan dan ilmu yang diberikan. Terima kasih Dr.-Ing. Tri Yus Widjayanto Zaenuri atas bantuan selama studi doktoral.

Terima kasih seluruh rekan di Pusat Riset Teknologi Kekuatan Struktur dan Laboratorium Mekanikal Material dan Struktur atas kerja sama dan kebersamaan dalam berbagai kegiatan penelitian, serta kepada seluruh undangan dan pihak yang telah memberikan dukungan.

Secara khusus, dengan penuh kasih dan hormat, saya mengenang kedua orang tua tercinta, almarhum Bapak H. Suharno, S.H., dan Ibu, Bapak Mertua, almarhum H. Sudarsono Djatiwalujo SH MBA dan Ibu Kepada istri tercinta, drg. Prita Dewi, serta anak-anak tersayang, Nindya Ariyanti DT MBA, Sabrina Suhartono ST dan M. Ridwan Suhartono ST, terima

kasih atas doa, cinta, kesabaran, dan dukungan yang senantiasa mengiringi perjalanan hidup dan pengabdian saya.

Semoga seluruh ilmu, kerja sama, dan pengabdian yang telah dilakukan memberikan manfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan, keselamatan masyarakat, dan bangsa Indonesia.

Wabillahi taufiq wal hidayah.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

DAFTAR PUSTAKA

Adnyana, D. N., & **Suhartono**, H. A. (1992). Development of a materials properties data bank at UPT LUK BPPT [Conference paper]. Tokyo, Japan.

Adnyana, D. N., & **Suhartono**, H. A. (1993). Improvement in science and technology base by education and R&D activities in Indonesia [Conference paper]. Fukuoka, Japan.

Agarwal, A., Sharma, P., Alshehri, M., Mohamed, A. A., & Alfarraj, O. (2021). Classification model for accuracy and intrusion detection using machine learning approach. PeerJ Computer Science, 7, e437.

Alexander, C., & Greenstreet, T. (2025, July). Use of full-scale destructive testing as a means for managing mechanical integrity. In Pressure Vessels and Piping Conference (Vol. 89107, p. V006T07A008). American Society of Mechanical Engineers.

American Petroleum Institute. (2021). API 579-1/ASME FFS-1: Fitness-for-service. American Petroleum Institute.

American Petroleum Institute. (2023). API RP 580: Elements of a risk-based inspection program (4th ed.). American Petroleum Institute.

Anderson, T. L. (2017). Fracture mechanics: Fundamentals and applications (4th ed.). CRC Press.

Bintoro, R., Putri, E. D. W. S., **Suhartono**, H. A., Muhayat, N., Badaruddin, M., Fauzun, F., & Triyono, T. (2024). Effect of welding environment on fatigue crack growth rate of aluminium alloy 1100. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 122(2), 49–60.

British Standards Institution. (2019). BS 7910: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. British Standards Institution.

Cai, L., Li, W., Mo, Z., Wang, P., Lashari, M. I., Hamid, U., & Zhang, Y. (2022). In situ experimental study on the fatigue crack propagation behavior of 7075-T6 and 2024-T3 aluminum alloys under variable amplitude loading and retardation model modification. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 119, 103372.

Davidson, D. L., & Lankford, J. (1992). Fatigue crack growth in metals and alloys: Mechanisms and micromechanics. International Materials Reviews, 37(1), 45–76.

De Jong, A., Jansen, M., Van Dijk, J., & Meyer, J. (2021). Analysis of innovative practices in advanced materials and structural engineering. Fusion of Multidisciplinary Research, 2(1), 178–188.

DNV. (2021). DNV-RP-C203: Fatigue design of offshore steel structures. DNV.

DNV. (2023). DNV-ST-F101: Submarine pipeline systems. DNV.

Dowling, A. R., & Flewitt, P. E. J. (2024). The development of structural integrity assessment methods: An overview. In Methods for the assessment of the structural integrity of components and structures (pp. 1–26).

El Haddad, M. H., Topper, T. H., & Smith, K. N. (1979). Prediction of nonpropagating cracks. Engineering Fracture Mechanics, 11(3), 573–584.

Farrar, C. R., & Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365(1851), 303–315. https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928

Febrianti, E., Gafar, A., & **Suhartono**, H. A. (2018). Analisa kegagalan track link excavator. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, 12(3), 181–190.

Firoozi, A. A., & Firoozi, A. A. (2024). Emerging trends in damage tolerance assessment: A review of smart materials and self-repairable structures. Structural Durability & Health Monitoring, 18(1).

Gbagba, S., Maccioni, L., & Concli, F. (2024). Advances in machine learning techniques used in fatigue life prediction of welded structures. Applied Sciences, 14(1), 398. https://doi.org/10.3390/app14010398

Gudehus, H., & Zenner, H. (2000). Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung: Empfehlung zur Lebensdauerabschätzung von Maschinenbauteilen (4th ed.). Stahleisen-Verlag.

Habibie, B. J. (1971). Eine Berechnungsmethode zum Voraussagen des Fortschritts von Rissen (Report No. UH-03-71). Messerschmitt-Bölkow-Blohm.

Hamdani, H., Akhyar, A., Rizwan, T., Sasmito, A., & **Suhartono**, H. A. (2025). Mechanical and metallurgical properties of GTAW dissimilar welds between SUS304 and SA213T11 using ER308 filler metal: Preliminary study. Advances in Science and Technology Research Journal, 19(8), 77–89. https://doi.org/10.12913/22998624/204768

Hatta, I., Sutarjo, & **Suhartono**, H. A. (2012, May 14). In-situ visual inspection compressor GT-21: PT PLN (Persero) Pembangkitan Belawan (Report No. 1026). Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur, BPPT.

International Organization for Standardization. (2018a). ISO 17359:2018: Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines. International Organization for Standardization.

International Organization for Standardization. (2018b). ISO 31000:2018: Risk management — Guidelines. International Organization for Standardization.

International Organization for Standardization. (2024). ISO 55000:2024: Asset management — Vocabulary, overview and principles. International Organization for Standardization.

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing, 20(7), 1483–1510. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012

Jin, J. W., Zhang, Z. J., Hou, J. P., Gong, B. S., Wang, H. W., Zhou, X. H., Purcek, G., Sheinerman, A. G., & Zhang, Z. F. (2025). Effects of microstructure on the fatigue crack initiation and propagation behavior of 7075 aluminum alloy. Materials Characterization, 220, Article 114682. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.114682

Kaimkuriya, A., Sethuraman, B., & Gupta, M. (2024). Effect of physical parameters on fatigue life of materials and alloys: A critical review. Technologies, 12(7), 100.

Kedir, Y. A., & Lemu, H. G. (2023). Prediction of fatigue crack initiation under variable amplitude loading: Literature review. Metals, 13(3), 487.

Kitagawa, H., & Takahashi, S. (1976). Applicability of fracture mechanics to very small cracks. In Proceedings of the Second International Conference on Mechanical Behavior of Materials (pp. 627–631).

Liu, Y., Sun, B., Guo, T., & Li, Z. (2025). Multiscale damage analysis of engineering structures. International Journal of Structural Integrity, 16(2), 275–310.

Luksch, J., Lambai, A., Mohanty, G., Schaefer, F., & Motz, C. (2023). Bridging macro to micro-scale fatigue crack growth by advanced

fracture mechanical testing on the meso-scale. Materials Science and Engineering: A, 884, 145452.

Miller, K. J. (1993). The two thresholds of fatigue behaviour. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 16(9), 931–939. https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1993.tb00129.x

Mottahedi, A., Sereshki, F., Ataei, M., Nouri Qaraihasanlou, A., & Barabadi, A. (2021). The resilience of critical infrastructure systems: A systematic literature review. Energies, 14(6), 1571.

Mughrabi, H. (2015). Microstructural mechanisms of cyclic deformation. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 373.

Murakami, Y. (2019). Metal fatigue: Effects of small defects and nonmetallic inclusions. Elsevier.

Muttaqie, T., Sasmito, C., **Suhartono**, H., Khoirudin, M., Hakim, B. A., Kurniawan, M., Firmandha, T., Do, Q., Park, S.-H., & Prabowo, A. (2024). Impact behavior characterizing of SUS 304 in cryogenic temperature scenarios for LNG tanks. Procedia Structural Integrity, 59, 222–229. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.032

Paris, P., & Erdogan, F. (1963). A critical analysis of crack propagation laws. Journal of Basic Engineering, 85(4), 528–533.

Pötter, K., **Suhartono**, H. A., Yousefi, F., Zenner, H., Düwel, V., & Schramm, A. (2000). Microcrack propagation under multiaxial loading: Experiment and simulation (pp. 115–135).

Prawoto, Y., Ahmad, Z., & **Suhartono**, H. A. (2020). Quantitative fracture mechanics approach to fatigue life improvement by shot peening application. International Journal of Metallurgy and Metal Physics, 5(2), Article 054. https://doi.org/10.35840/2631-5076/9254

Prawoto, Y., **Suhartono**, H. A., & Chernyavsky, A. (2018). Microstructural damage mapping on heat-resistant steel due

to high-temperature fatigue. Journal of Failure Analysis and Prevention, 18, 1616–1624.

Sangid, M. D. (2013). The physics of fatigue crack initiation. International Journal of Fatigue, 57, 58–72. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.10.009

Sardjono, K., & **Suhartono**, H. A. (1991). Pengaruh penyisipan beban simulasi flight type A terhadap perilaku perambatan retak Al 2024, 7075, dan 7475 [Makalah seminar]. Seminar Perkembangan Material Science, Universitas Indonesia.

Sasmito, A., Suhartono, H. A., & Sunyoto. (2024). Rotary friction welding properties of AA5083-H112/AA7075-T6 joints: Parameter and low-temperature effects. Materials Science and Technology, 1–9. https://doi.org/10.1177/02670836241234198

Schijve, J. (2009). Fatigue of structures and materials. Springer.

Socie, D. F., & Marquis, G. B. (2000). Multiaxial fatigue. SAE International.

Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2001). Metal fatigue in engineering. Wiley.

Suhartono, H. A. (1994). Pengaruh karburisasi terhadap ketahanan lelah baja karbon medium dengan takik V. Majalah BPPT, No. LIX.

Suhartono, H. A. (2000). Evaluasi perambatan retak mikro pada pembebanan tarik-tekan dan torsi. Jurnal Mikroskopi dan Mikro Analysis, 3(2). ISSN 1410-5594.

Suhartono, H. A. (2001). Pengaruh variabel intensitas shot peening terhadap ketahanan fatigue AISI 1045. Majalah Iptek ISTN, 5(2), 13–20. ISSN 0853-4519.

Suhartono, H. A. (2002). Analisis kerusakan mesin utama kapal tanker. Jurnal Mikroskopi dan Mikroanalisis, 5(1), 5–9.

Suhartono, H. A. (2003a). Analisis kegagalan operasi komponen pendingin oli transmisi radiator. Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia, 5(2). ISSN 1410-9409.

Suhartono, H. A. (2003b). Aplikasi tegangan–regangan ekuivalen pada perhitungan fatik siklus rendah. Material, Komponen dan Konstruksi, No. 5. ISSN 0852-4866.

Suhartono, H. A. (2003c). Pengaruh penghilangan proses annealing dari proses produksi komponen radiator tank body dan tank assembly. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, No. 21. ISSN 1410-3680.

Suhartono, H. A. (2003d). Penelitian karakterisasi bahan dan investigasi kerusakan pada saringan bahan bakar. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, No. 20. ISSN 1410-3680.

Suhartono, H. A. (2004a). Analisa kegagalan dan perbaikan desain pada fabrikasi penutup filter minyak pelumas. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, No. 22. ISSN 1410-3680.

Suhartono, H. A. (2004b). Analisa kehandalan mekanik kabel saluran udara tegangan ekstra tinggi. Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia, 6(2).

Suhartono, H. A. (2004c). Aplikasi SEM pada penelitian mekanisme kerusakan. Jurnal Mikroskopi dan Mikroanalisis, 7(1). ISSN 1410-5594.

Suhartono, H. A. (2004d). Pengaruh besar butir terhadap sifat mekanis baja. Majalah Ilmiah Material, Komponen dan Konstruksi, 4(6). ISSN 0852-4866.

Suhartono, H. A. (2005). Pengaruh besar butir terhadap kekuatan fatik: Eksperimen, perhitungan, dan simulasi. Jurnal Sains Materi Indonesia, 6(3).

Suhartono, H. A. (2006a). Bantalan aksial segmen pada mesin turbin pembangkit listrik. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri.

Suhartono, H. A. (2006b). Perambatan retak akibat pembebanan multiaksial. Jurnal Sains Materi Indonesia, 7(3).

Suhartono, H. A. (2007a). Aplikasi tegangan–regangan ekuivalen pada perhitungan umur fatik paduan Al 6063 untuk beban aksial dan torsi. MESIN, 9(1).

Suhartono, H. A. (2007b). Keandalan bejana tekan pada industri bahan baku plastik. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, 1(3).

Suhartono, H. A. (2007c). Pengaruh revisi SNI 07-2052-1990 menjadi SNI 07-2052-2002 terhadap klasifikasi mutu baja tulangan. Majalah Ilmiah Material, Komponen dan Konstruksi, 7(12).

Suhartono, H. A. (2007d). Uji statistik pengaruh perlakuan permukaan terhadap umur fatik dengan data terbatas. Jurnal Sains Materi Indonesia, 11(1).

Suhartono, H. A. (2008a). Kualitas baja tulangan sirip empat produsen baja di Indonesia. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, 2(3).

Suhartono, H. A. (2008b). Penelitian kualitas roda gigi penggerak rantai sepeda motor. Majalah Ilmiah Material, Komponen dan Konstruksi, 8(1).

Suhartono, H. A. (2011a). Karakterisasi sifat lelah siklus rendah uniaksial pada paduan aluminium ekstrusi. Jurnal Sains Materi Indonesia, 12(3), 230–233.

Suhartono, H. A. (2011b). Perhitungan umur lelah berdasarkan konsep tegangan nominal. Majalah Ilmiah Material, Komponen dan Konstruksi, 3(4).

Suhartono, H. A. (2015). Pengaruh penghilangan kekasaran permukaan terhadap kekuatan fatik. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, 9(3), 115–120.

Suhartono, H. A. (2019). Uji profisiensi antar laboratorium uji tarik baja tulangan sirip. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, 13(1).

Suhartono, H. A., & Padmadinata, U. H. (1993). Low cycle fatigue behaviour of 2¼Cr–1Mo steel [Conference paper]. ISBN 979-8263-02-2.

Suhartono, H. A., & Rustianto, B. (2022). Estimating measurement uncertainty of tensile strength testing for deformed steel bars for concrete reinforcement. AIP Conference Proceedings, 2664, Article 020006.

Suhartono, H. A., & Supriadi. (2021). Creep behavior of welded ferrite–pearlite 2¼Cr–1Mo steel. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri.

Suhartono, H. A., Heryana, Y., & Kusuma, G. C. (2023). Assessing toughness of pressurized fluid channel: Experiment using CTOD in spiral submerged arc welded pipes. EVERGREEN—Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy, 10(3), 2038–2046. https://doi.org/10.5109/6566993

Suhartono, H. A., Kirman, M., & Prawoto, Y. (2022). On the influence of the initial shear damage to the cyclic deformation and damage mechanism. Metals, 12(7), Article 1120. https://doi.org/10.3390/met12071120

Suhartono, H. A., Pötter, K., Schram, A., & Zenner, H. (2000). Modeling of short crack growth under biaxial fatigue: Comparison between simulation and experiment. In ASTM Special Technical Publication (Vol. 1387, pp. 323–339). ASTM International. https://doi.org/10.1520/STP13512S

Suhartono, H. A., Prawoto, Y., Kirman, M., Melky, F., Zenal, H., Irawadi, Y., Prasetyo, B., Afandi, Y., Atsari, E. D., & Triwinanto, P. (2025). Integration of fracture mechanics and artificial intelligence for crack growth analysis in 316L austenitic stainless steel weldments. Arabian Journal for Science and Engineering. https://doi.org/10.1007/s13369-025-10867-7

Sunandrio, H., **Suhartono**, H. A., & Prawoto, Y. (2017). Overheated pipe due to scale: Field failure investigation and finite element analysis. Case Studies in Engineering Failure Analysis.

Suresh, S. (2012). Fatigue of materials (2nd ed.). Cambridge University Press.

Tanaka, K., & Akiniwa, Y. (2024). Short fatigue-crack growth from crack-like defects under completely reversed loading predicted based on cyclic R-curve. Materials, 17(18), Article 4484. https://doi.org/10.3390/ma17184484

Tanaka, K., & Mura, T. (1981). A dislocation model for fatigue crack initiation. Journal of Applied Mechanics, 48(1), 97–103. https://doi.org/10.1115/1.3157599

Yousefi, F., Witt, K., Pötter, K., **Suhartono**, A., & Zenner, H. (1999). Lebensdauerrechnung bei zusammengesetzter Betriebsbeanspruchung. In DVM Bericht 126: Bauteillebensdauerrechnung oder Versuch (pp. 99–116).

Zenner, H., Pötter, K., Schram, A., & **Suhartono**, H. A. (2001). Simulation des Mikrorisswachstums unter Schwingbeanspruchung. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 32(11), 845–857. https://doi.org/10.1002/1521-4052(200111)32:11<845::AID-MAWE845>3.0.CO;2-3

Zenner, H., Pötter, K., Schram, A., & **Suhartono**, H. A. (2002). Simulation des Mikrorisswachstums unter Schwingbeanspruchung. Teil 2: Simulationsergebnisse – Einfluss des Spannungszustandes und Reihenfolgeeffekte. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 33(1), 33–44. https://doi.org/10.1002/1521-4052(200201)33:1<33::AID-MAWE33>3.0.CO;2-P

DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

Karya Tulis Ilmiah

1. Bagian dari Buku Internasional	1	buah
2. Jurnal Internasional	15	buah
3. Jurnal Nasional	32	buah
4. Prosiding Internasional	8	buah
5. Prosiding Nasional	1	buah

Kekayaan Intelektual

6. Paten Nasional		
a. Terdaftar	7	buah

DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

Bagian dari Buku Internasional

1. **Suhartono, H. A.**, Pötter, K., Schram, A., & Zenner, H. (2000). Modeling of short crack growth under biaxial fatigue: Comparison between simulation and experiment. In ASTM Special Technical Publication (Vol. 1387, pp. 323–339). ASTM International. https://doi.org/10.1520/STP13512S

Jurnal Internasional

2. Zulaida, Y. M., Anis, M., Al Huda, M., Kirman, & **Suhartono, H. A.** (2026). Effect of forging pressure and rotational speed on the quality of rotary friction welding of Al 6063 and copper joints. Mechanical Engineering for Society and Industry, 6(1), 9–20. https://doi.org/10.31603/mesi.14491
3. **Suhartono**, H. A., Afandi, Y., Kirman, K., Kusuma, G. C., Puspita, G., Yanto, R., Ismail, A. K., Sadguna, I. N., Silitonga, F. M., & Wibowo, S. A. (2025). Development and characterization of semisolid-formed Al–5%Cu–4%Mg/SiC composites for lightweight structural applications. *EVERGREEN—Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy, 12*(4), 2013–2023.
4. **Suhartono**, H. A., Prawoto, Y., Kirman, Melky, F., Zenal, H., Irawadi, Y., Prasetyo, B., Afandi, Y., Atsari, E. D., & Triwinanto, P. (2025). Integration of fracture mechanics and artificial intelligence for crack growth analysis in 316L austenitic stainless

steel weldments. *Arabian Journal for Science and Engineering*. https://doi.org/10.1007/s13369-025-10867-7

5. Hamdani, H., Akhyar, A., Rizwan, T., Sasmito, A., & **Suhartono,** H. A. (2025). Mechanical and metallurgical properties of GTAW dissimilar welds between SUS304 and SA213T11 using ER308 filler metal: Preliminary study. *Advances in Science and Technology Research Journal, 19*(8), 77–89. https://doi.org/10.12913/22998624/204768

6. Bintoro, R., Putri, E. D. W. S., **Suhartono**, H. A., Muhayat, N., Badaruddin, M., Fauzun, F., & Triyono, T. (2024). Effect of welding environment on fatigue crack growth rate of aluminium alloy 1100. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 122*(2), 49–60.

7. Kirman, **Suhartono**, H. A., Ivano, O., & Irawadi, Y. (2024). Enhancing aluminum alloys for high-strength electrical conductor with nanoparticle reinforcement. *EVERGREEN—Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy, 11*(3), 2720–2727. https://doi.org/10.5109/7236911

8. Sasmito, A., **Suhartono**, H. A., & Sunyoto. (2024). Rotary friction welding properties of AA5083-H112/AA7075-T6 joints: Parameter and low-temperature effects. *Materials Science and Technology*, 1–9. https://doi.org/10.1177/02670836241234198

9. **Suhartono**, H. A., Heryana, Y., & Kusuma, G. C. (2023). Assessing toughness of pressurized fluid channel: Experiment using CTOD in spiral submerged arc welded pipes. *EVERGREEN—Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy, 10*(3), 2038–2046. https://doi.org/10.5109/6566993

10. **Suhartono**, H. A., Kirman, M., & Prawoto, Y. (2022). On the influence of the initial shear damage to the cyclic deformation and damage mechanism. *Metals, 12*(7), 1120.

11. Prawoto, Y., Zaini, A., & **Suhartono**, H. A. (2020). Quantitative fracture mechanics approach to fatigue life improvement by shot

peening application. *International Journal of Metallurgy and Metal Physics, 5*(2), Article 054.

12. Prawoto, Y., **Suhartono**, H. A., & Chernyavsky, A. (2018). Microstructural damage mapping on heat-resistant steel due to high-temperature fatigue. *Journal of Failure Analysis and Prevention, 18*, 1616–1624. https://doi.org/10.1007/s11668-018-0560-z

13. Sunandrio, H., **Suhartono**, H. A., & Prawoto, Y. (2017). Overheated pipe due to scale: Field failure investigation and finite element analysis. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*.

14. Prawoto, Y., & **Suhartono**, H. A. (2019). The Archimedes' constant, π, seen by mechanical engineers. *Mathematical and Computational Applications*.

15. Zenner, H., Pötter, K., Schram, A., & **Suhartono**, H. A. (2001). Simulation des Mikrorisswachstums unter Schwingbeanspruchung. Teil 1: Modell und Simulationsergebnisse, Mikrorisswachstum, Streuung, Einfluss von Beanspruchungsart und -höhe, Risskeimdichte und Korngröße. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 32*(11), 845–857. https://doi.org/10.1002/1521-4052(200111)32:11<845::AID-MAWE845>3.0.CO;2-3

16. Zenner, H., Pötter, K., Schram, A., & **Suhartono**, H. A. (2002). Simulation des Mikrorisswachstums unter Schwingbeanspruchung. Teil 2: Simulationsergebnisse – Einfluss des Spannungszustandes und Reihenfolgeeffekte. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 33*(1), 33–44. https://doi.org/10.1002/1521-4052(200201)33:1<33::AID-MAWE33>3.0.CO;2-P

Jurnal Nasional

17. **Suhartono, H. A.** (1994). Evaluasi Sistem Pemanas untuk Pengujian Fatik pada Temperatur Tinggi. Majalah BPPT. ISSN 0216-994.

18. **Suhartono, H. A.** (1995). Pengaruh karburisasi terhadap ketahanan lelah baja karbon medium dengan takik circular V. Majalah BPPT. ISSN 0216-994.

19. **Suhartono, H. A.** (2000). Evaluasi perambatan retak mikro pada pembebanan tarik-tekan dan torsi. Jurnal Mikroskopi dan Mikro Analysis, 3(2). ISSN 1410-5594.

20. **Suhartono, H. A.** (2001). Pengaruh variabel intensitas shot peening terhadap ketahanan fatik AISI 1045. Majalah Iptek ISTN, 5(2), 13–20. ISSN: 0853-4519.

21. **Suhartono, H. A.** (2002). Analisis kerusakan mesin utama kapal tanker. Jurnal Mikroskopi dan Mikroanalisis, 5(1), 5–9. ISSN 1410-5594.

22. **Suhartono, H. A.** (2002). Permasalahan lelah pada komponen penambat kapal tanker. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, 7(1), 33–41. ISSN: 0852-4866.

23. **Suhartono, H. A.** (2003). Perhitungan umur lelah berdasarkan konsep tegangan nominal. Majalah Ilmiah Material, Komponen dan Konstruksi, 3(4). ISSN 0852-4866.

24. **Suhartono, H. A.** (2003). Analisis kegagalan operasi komponen pendingin oli transmisi radiator. Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia, 5(2). ISSN 1410-9409.

25. **Suhartono, H. A.** (2003). Pengaruh penghilangan proses annealing dari proses produksi komponen radiator tank body dan tank assembly. Pengkajian Industri. ISSN 1410-3680.

26. **Suhartono, H. A.** (2003). Aplikasi tegangan–regangan ekuivalen pada perhitungan fatik siklus rendah. Material, Komponen dan Konstruksi, No. 5. ISSN 0852-4866.

27. **Suhartono, H. A.** (2003). Penelitian karakterisasi bahan dan investigasi kerusakan pada saringan bahan bakar. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, No. 20. ISSN 1410-3680.

28. **Suhartono, H. A.** (2004). Pengaruh besar butir terhadap sifat mekanis baja. Majalah Ilmiah Material, Komponen dan Konstruksi, 4(6). ISSN 0852-4866.

29. **Suhartono, H. A.** (2004). Analisa kegagalan dan perbaikan desain pada fabrikasi penutup filter minyak pelumas. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, No. 22. ISSN 1410-3680.

30. **Suhartono, H. A.** (2004). Analisa kehandalan mekanik kabel saluran udara tegangan ekstra tinggi. Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia, 6(2). ISSN 1410-9409.

31. **Suhartono, H. A.** (2004). Aplikasi SEM pada penelitian mekanisme kerusakan. Jurnal Mikroskopi dan Mikroanalisis, 7(1). ISSN 1410-5594.

32. Kirman, M., **Suhartono, H. A. (2004). Pengaruh pengerasan berulang dan tempering pada material baja. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, No. 22. ISSN 1410-3680.**

33. Suhartono, H. A. (2005). Pengaruh besar butir terhadap kekuatan fatik: Eksperimen, perhitungan, dan simulasi. Jurnal Sains Materi Indonesia, 6(3). ISSN 1411-1098.

34. **Suhartono, H. A.** (2006). Perambatan retak akibat pembebanan multiaksial. Jurnal Sains Materi Indonesia, 7(3).

35. **Suhartono, H. A.** (2006) Bantalan aksial segmen pada mesin turbin pembangkit listrik. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri. ISSN 1410-3680.

36. **Suhartono, H. A.** (2007). Penelitian pembuatan pipa tahan temperatur tinggi. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, 7(1), 27–36. ISSN: 0852-4866.

37. S**uhartono, H. A.** (2007) Aplikasi Tegangan-Regangan Ekivalen pada Perhitungan Umur Fatik Paduan Al 6063 untuk Beban Aksial dan Torsi.MESIN, Vol. 9, No. 1.

38. **Suhartono, H. A.** (2007) Keandalan bejana tekan pada industri bahan baku plastik. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri. ISSN 1410-3680.

39. **Suhartono, H. A.** (2007). Uji statistik pengaruh perlakuan permukaan terhadap umur fatik dengan data terbatas. Jurnal Sains Materi Indonesia, 11(1).

40. **Suhartono, H. A.** (2007). Pengaruh revisi SNI 07-2052-1990 menjadi SNI 07-2052-2002 terhadap klasifikasi mutu baja tulangan. Majalah Ilmiah Material, Komponen dan Konstruksi. ISSN 0852-4866.

41. **Suhartono, H. A.** (2008) Penelitian kualitas roda gigi penggerak rantai sepeda motor. Majalah Ilmiah Material, Komponen dan Konstruksi. ISSN 0852-4866.

42. **Suhartono, H. A**. (2008). Kualitas baja tulangan sirip empat produsen baja di Indonesia. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri. ISSN 1410-3680.

43. **Suhartono, H. A.** (2009). Uji statistik pengaruh perlakuan permukaan terhadap umur fatik dengan data terbatas. Jurnal Sains Materi Indonesia, 11(1). ISSN 1411-1098.

44. **Suhartono, H. A.** (2011). Karakterisasi sifat lelah siklus rendah uniaksial pada paduan aluminium ekstrusi. Jurnal Sains Materi Indonesia, 12(3), 230–233.

45. **Suhartono, H. A.** (2015). Pengaruh penghilangan kekasaran permukaan terhadap kekuatan fatik. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, 9(3), 115–120.

46. **Suhartono, H. A.** (2019). Uji profisiensi antar laboratorium uji tarik baja tulangan sirip. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, 13(1).

47. Febrianti, E., Gafar, A., & **Suhartono, H. A**. (2018). Analisa kegagalan track link excavator. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, 12(3), 181–190.

48. **Suhartono, H. A**., & Supriadi. (2021). Creep behavior of welded ferrite–pearlite 2¼Cr–1Mo steel. Majalah Ilmiah Pengkajian Industri.

Prosiding Internasional

49. Zulaida, Y. M., Anis, M., Al Huda, M., Kirman, M., & **Suhartono**, H. A. (2026). Effect of friction temperature on deformation characteristics of dissimilar AA 6063/Cu in rotary friction welding. AIP Conference Proceedings, 3443, 030005. https://doi.org/10.1063/5.0338658

50. Adnyana, D. N., & **Suhartono, H. A.** (1992). Development of a materials properties data bank at UPT LUK BPPT [Conference paper]. Tokyo, Japan.

51. Adnyana, D. N., & **Suhartono, H. A.** (1993). Improvement in science and technology base through education and R&D activities in Indonesia [Conference paper]. Fukuoka, Japan.

52. **Suhartono, H. A.**, & Padmadinata, U. H. (1993). Low cycle fatigue behaviour of 2¼Cr–1Mo steel [Conference paper]. ISBN 979-8263-02-2.

53. Yousefi, F., Witt, K., Pötter, K., **Suhartono, A.**, & Zenner, H. (1999). Lebensdauerrechnung bei zusammengesetzter Betriebsbeanspruchung. In DVM Bericht 126: Bauteillebensdauerrechnung oder Versuch (pp. 99–116).

54. Pötter, K., **Suhartono, H. A.**, & Zenner, H. (2000). Mikrorissausbreitung bei mehrachsiger Beanspruchung: Experiment und Simulation. Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Bremen, Germany.

55. **Suhartono, H.A.**, & Rustianto, B. (2022). Estimating measurement uncertainty of tensile strength testing for deformed steel bars for concrete reinforcement. AIP Conference Proceedings, 2664, Article 020006.

56. Muttaqie, T., Sasmito, C., Suhartono, H., Khoirudin, M., Hakim, B. A., Kurniawan, M., Firmandha, T., Do, Q., Park, S.-H., & Prabowo, A. (2024). Impact behavior characterizing of SUS 304 in cryogenic temperature scenarios for LNG tanks. Procedia Structural Integrity, 59, 222–229. doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.032

Prosiding Nasional

57. Sardjono, K., **Suhartono, H. A.**, Pengaruh Penyisipan Beban Simulasi Flight Type A terhadap Perilaku Perambatan Retak Al 2024, 7075, dan 7475, Semitnar Perkembangan Material Science, UI 1991

Kekayaan Intelektual

Paten Nasional Terdaftar

58. Febriyanti, E., **Suhartono, H. A.**, Lestari,Y., Suhadi, A., Syahril, M., Hardinanto, A. A., Ningsih, M., Afandi, Y., Hamdani, Kusuma, G. C., Rahman, A., Z., (2026) Kom-Posisi Bahan Pelapisan Bertingkat Pada Pipa Baja Menggunakan High-Entropy Oxide(MgCoNiCuZn)O_5 Dengan Doping Logam Tanah Jarang Dan Lapisan Pengikat Nicraly. Direktorat Manajemen Kekayaan Intelektual, Badan Riset dan Inovasi Nasional.

59. **Suhartono, H. A.**, Puspita, G., Kirman M. Al Huda, M. Irawadi, Y., Afandi, Y., Prasetiyo, B., Zenal, H., Melky, F., Yanto, R., Ismail, A. K., Fitriana, B, Sadguna, I. N., Susanto, H. Aziz U.A., Mulyo Wardono, I H, Zulaida Y M, Wibowo, S A., (2026). Sistem Pengukuran Gaya Aksial Dan Puntir Berbasis Multi-Sensor Pada Sistem Berputar, Direktorat Manajemen Kekayaan Intelektual, Badan Riset dan Inovasi Nasional.

60. Melky, F., Rahman A.Z., **Suhartono H. A.**, Kirman M, Puspita G., Triwinanto, P, Sadguna I N, Yanto R., Fitriyana B., Sulistiyo, W., Susanto H., Salehah N. A., Aziz U. A., Atsari E., D., Lufti L., Setyawan, D. D. M., Setyawan A., Perkasa, M. (2026). Perangkat Perekam Data Multichannel Berbasis Servocontroller Dengan Sistem Hidrolik, Direktorat Manajemen Kekayaan Intelektual, Badan Riset dan Inovasi Nasional.

61. Sari, D. P., Rizal, N. Yuniati, Sasmito A., Machfudin A., Utina M.R., Suwarni E., Bisri A., Sasmito C., Muttaqi T., Iskendar, Harmadi, R., Arifin, Herbandono K., Faisal, **Suhartono, H. A.**, Kirman, M., Fitriyana, B., Tuswan (2025), TANGKI LNG 40 FEET DENGAN SEKAT KERUCUT, Direktorat Manajemen Kekayaan Intelektual, Badan Riset dan Inovasi Nasional, DJKI.

62. **Suhartono, H. A**., Kirman M., Al Huda, M., Irawadi, Y., Puspita, G., Afandi, Y., Ismail, A. K., Prasetiyo, B., Zenal, H., Melky, F., Wibowo, S.A.,, Yanto, R., Zulaida, Y. M., (2024), Alat Portabel Pengukur Beban Tekan Aksial Dan Beban Puntir Pada Batang Berputar, Direktorat Manajemen Kekayaan Intelektual, Badan Riset dan Inovasi Nasional, DJKI.

63. **Suhartono, H.A.**, Kirman M., Ivano, O.,Puspita, G., Afandi, Y., Ismail, A., Fitriyana B., Firdaus R ,Lestari.,(2023), Ekstensometer Pengukur Perpanjangan Benda, Direktorat Manajemen Kekayaan Intelektual, BRIN, , DJKI.

64. **Suhartono, H. A.**, Kirman M. Ivano, O. , Puspita, G., Afandi Y., Ismail A. K., Heryana Y., Fitriyana B.,

65. Yofatama R. M., Firdaus, R. K., (2023), Chamber Cryogenic Untuk Pengujian Tarik Suhu Rendah, Direktorat Manajemen Kekayaan Intelektual, Badan Riset dan Inovasi Nasional, DJKI.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. DATA PRIBADI

Nama lengkap	: Dr.-Ing. Hermawan Agus Suhartono
Tempat, Tanggal Lahir	: Klaten, 3 Sepember 1967
Anak ke	: 1 dari 3 bersaudara
Jenis Kelamin:	: Laki-laki
Nama Ayah Kandung	: Suharno SH
Nama Ibu Kandung	: dra. Marsiti
Nama Istri	: drg. Prita Dewi Candra Puri
Jumlah Anak	: 3 (Tiga)
Nama Anak	: 1. Nindya Ariyanti ST MBA 2. Sabrina K. Suhartono ST 3. M. Ridwan Suhartono ST
Nama Unit	: Pusat Riset Teknologi Kekuatan Struktur
Nama Organisasi	: Organisasi Riset Energi dan Manufaktur
Nama Instansi	: Badan Riset dan Inovasi Nasional
Judul Orasi	: Prediksi Umur Material Dan Struktur Berbasis Evolusi Kerusakan Akibat Pembebanan Dinamis
Ilmu	: Teknik
Bidang	: Teknik Material
Kepakaran	: Fatik dan Metalurgi Fisika
No. SK Pangkat terakhir	: Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 30/M Tahun 2011 Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 15/K Tahun 2023 tanggal 14 Juli 2023

No. SK Peneliti Ahli : Keputusan Presiden No. 3/M Tahun 2022 tanggal 19 Januari 2022

Tautan Scopus : https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603183309

Tautan Google Scholar : https://scholar.google.co.id/citations?user=Dss6WuAAAAAJ&hl=id

B. PENDIDIKAN FORMAL

No	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1.	SD	SD Tanjung	Juwiring, Klaten	1979
2.	SMP	SMP Negeri 89	Jakarta	1982
3.	SMA	SMPP 35	Jakarta	1985
4.	S1	Universitas Indonesia, Teknik Metalurgi	Depok	1991
5.	S2 Dipl.-Ing. Anerk.	Technische Universitaet Clausthal	Jerman	1996
6.	S3	Technische Universitaet Clausthal	Jerman	2000

C. PENDIDIKAN NON FORMAL

No	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1.	Course Fatigue II, Life Time Calculation	LUK, Serpong	1992
2.	High Temperature Material Testing Procedures (Creep and Low Cycle Fatigue)	Mitsubishi Heavy Industry Japan	1992
3.	Pelatihan ISO Guide 65	BSN, Jakarta	2001
4.	Ultrasonic Testing Level I dan II		2002
5.	Inspeksi Bejana Tekan dan Piranti Industri	LUK, Serpong	2002
6	ISO 9000: 2000 Series, Auditor /Lead Auditor ISO 9000: 2000 dan ISO 17025 Lab Auditing	IRCA Venue J	2003

D. JABATAN STRUKTURAL

No.	Jabatan	Nama Instansi	Tahun
1	Kepala Laboratorium Karakterisasi Material	B2TKS BPPT	2004-2009
2	Kepala Bidang Pengujian Material	B2TKS BPPT	2009-2016

E. JABATAN FUNGSIONAL

No	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1	Peneliti Ahli Madya, IV/a	2004-2007
2	Peneliti Ahli Madya, IV/c	2007-2010
3	Peneliti Ahli Utama, IV/d	2010-2013
4	Peneliti Ahli Utama, IV/e	sekarang

F. PENUGASAN KHUSUS NASIONAL/ INTERNASIONAL

No	Jenjang Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1	Kordinator pembentukan LSPRO B2TKS BPPT	Ka B2TKS	2004
2	Sebagai Ketua Panitia Teknis Perumusan SNI 19-02:Pengujian Mekanik	SK Ka BSN No:81/KEP/ BSN /09/2005	2005
3	Ketua Team Sertifikasi Pirelli Itali, dan Brazil, Metzeler Jerman	Kepala B2TKS	2010
3	Ketua team sertifikasi baja pratekan. PT Kingdom Indah, Surabaya	Kepala B2TKS	2014
4	Ketua Team Sertifikasi Sumitomo Rubber, New York USA	Kepala B2TKS	2017

G. KEIKUTSERTAAN DALAM KEGIATAN ILMIAH

No	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1	Symposium on Multiaxial Fatigue and Deformation Testing and Pred.	Penulis 1	Seattle, Washington USA	1999
2	ASCA Seminar on Materials DataBase Technology	Penulis 2	Tokyo, Japan	1992
4	Improvement in Science and Technology Base by Education and R &D Activities	Penulis 2	FukuokaJapan	1993
5	BPPT-MHI	Pemakalah	Serpong	1993
6	AIP Conference	Pemakalah	Jakarta	2022
7	ICSEEA 2023	Pemakalah	Serpong	2023
8	ICSEEA 2024	Pemakalah	Bali	2024
9	ICSEEA 2025	Pemakalah	Jogja	2025
10	Pertemuan Ilmiah Iptek Bahan	Pemakalah	Serpong	2004

H. KETERLIBATAN DALAM PENGELOLAAN JOURNAL ILMIAH

No	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1	Majalah Material Komponen Konstruksi	B2TKS BPPT	Redaksi	2001-2012
2	Majalah Ilmiah Pengkajian Industri	TIRBR BPPT	Mitra Bestari	2015-Sekarang

I. CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

1. Karya Tulis Ilmiah

a) Kualifikasi Karya

No.	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Buku Internasional	-
2.	Buku Nasional	-
3.	Buku Internasional (bagian buku)	1

b) Kualifikasi Penulis

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	27
2.	Bersama Penulis Lainnya	30
	Total	57

c) Kualifikasi Bahasa

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	33
2.	Bahasa Inggris	20
3.	Bahasa Jerman	4
	Total	57

2. Kekayaan Intelektual

No.	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Paten Internasional	-
	Terdaftar	-
	Tersertifikasi	-

No.	Kualifikasi Karya	Jumlah
2	Paten Nasional	-
	Terdaftar	7
	Tersertifikasi	-
	Total	7

3. Kerjasama bersama Mitra

No.	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Transaksi Lisensi	-

J. PEMBINAAN KADER ILMIAH

Pejabat Fungsional Peneliti

No	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1	Supriadi	BPPT	bimbingan teknis	2001
2	Kirman	BPPT	bimbingan teknis	1993–1994
3	M Khotib	BPPT	bimbingan teknis	2000–2014

Mahasiswa

No	Nama	PT/Univ.	Peran/Tugas	Tahun
1	Teuku Darmawan	Universitas Indonesia	Membimbing S1	1993
2	Sekean	Universitas Indonesia	Membimbing S1	1994
3	Fateh Naseh	Untirta	Membimbing S1	2001
4	Sandi Pratama	Untirta	Membimbing S1	2024
5	Haziemil Akbar	Untirta	Membimbing S1	2024

4	Daryono	ISTN	Membimbing S2	2002
5	Yeni Naida	Universitas Indonesia	Membimbing S3	2023
6	Eka Febrianti	Universitas Indonesia	Membimbing S3	2026
7	Nailul Rahman	ISTN	Membimbing S2	2026

K. ORGANISASI ILMIAH

No	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1	Anggota	Himpenindo	1999–Sekarang
2	Anggota	Forum Peneliti BPPT	2020–Sekarang

L. TANDA PENGHARGAAN

No	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden	2002
2	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden	2012
3	Satyalancana Karya Satya XXX Tahun	Presiden	2022

Kegagalan fatik merupakan proses evolusi kerusakan yang berkembang secara bertahap, mulai dari deformasi plastis lokal, inisiasi retak mikro, pertumbuhan retak pendek, hingga perambatan retak panjang menuju kegagalan struktur. Prediksi umur fatik tidak cukup didasarkan pada kekuatan statis material, tetapi memerlukan pemahaman terhadap pengaruh mikrostruktur, tegangan sisa, kondisi manufaktur, dan riwayat pembebanan. Orasi ilmiah ini menyajikan sintesis hasil penelitian mengenai pengembangan kerangka terpadu prediksi umur material dan struktur berbasis evolusi kerusakan. Pendekatan yang dikembangkan mengintegrasikan karakterisasi mikrostruktur, pengujian fatik uniaksial dan multiaksial, mekanika retakan, pengujian Crack Tip Opening Displacement (CTOD), simulasi numerik, pembelajaran mesin (AI/ML), serta validasi skala penuh dalam kerangka Structural Integrity Engineering. Integrasi tersebut menghubungkan mekanisme kerusakan dari skala mikro hingga respons struktur pada kondisi operasi nyata, sekaligus mendukung evaluasi umur sisa dan toleransi cacat. Kontribusi ilmiah utama terletak pada penyatuan pendekatan eksperimental, analitis, numerik, dan berbasis data untuk mendukung evaluasi integritas struktur secara lebih komprehensif dan adaptif. Penerapannya memberikan dasar ilmiah bagi inspeksi berbasis risiko, pemeliharaan prediktif, perbaikan komponen, penyempurnaan desain, dan pengembangan produk yang lebih tahan terhadap kerusakan fatik. Dengan demikian, pendekatan ini diharapkan meningkatkan keselamatan, keandalan, efisiensi, umur layan struktur, serta mendukung kemandirian teknologi nasional.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,
Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kota Jakarta Pusat 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.3917

ISSN 3090-8485