

ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

**SISTEM INSTRUMENTASI DAN KONTROL
PADA APLIKASI ULTRASONIK TERPADU
DENGAN PROSES OKSIDASI LANJUT DAN
GENERATOR GELEMBUNG NANO UNTUK
PENGOLAHAN AIR LIMBAH**

**ORASI ILMIAH PROFESOR RISET
ILMU TEKNIK FISIKA
BIDANG TEKNOLOGI INSTRUMENTASI
KEPAKARAN INSTRUMENTASI DAN KONTROL**



OLEH:

SUTRISNO SALOMO HUTAGALUNG

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

ISSN 3090-8485

**SISTEM INSTRUMENTASI DAN KONTROL PADA
APLIKASI ULTRASONIK TERPADU DENGAN
PROSES OKSIDASI LANJUT DAN GENERATOR
GELEMBUNG NANO UNTUK PENGOLAHAN
AIR LIMBAH**

Diterbitkan pertama pada 2025 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

ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

**SISTEM INSTRUMENTASI DAN KONTROL
PADA APLIKASI ULTRASONIK TERPADU
DENGAN PROSES OKSIDASI LANJUT DAN
GENERATOR GELEMBUNG NANO UNTUK
PENGOLAHAN AIR LIMBAH**

**ORASI ILMIAH PROFESOR RISET
ILMU TEKNIK FISIKA
BIDANG TEKNOLOGI INSTRUMENTASI
KEPAKARAN INSTRUMENTASI DAN KONTROL**

**OLEH:
SUTRISNO SALOMO HUTAGALUNG**

Penerbit BRIN

© 2025 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Sistem Instrumentasi Dan Kontrol Pada Aplikasi Ultrasonik Terpadu Dengan Proses Oksidasi Lanjut Dan Generator Gelembung Nano Untuk Pengolahan Air Limbah /Sutrisno Salomo Hutagalung. Jakarta – Penerbit BRIN, 2025.

x + 98 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-8485

- | | |
|-----------------------------|--------------------|
| 1. Aplikasi ultrasonik | 2. Oksidasi lanjut |
| 3. Generator gelembung nano | 4. Air Limbah |

628.34028

Copy editor : Martinus Helmiawan

Proofreader : Martinus Helmiawan

Penata Isi : Hilda Yunita

Desainer Sampul : Hilda Yunita

Edisi pertama : Desember 2025



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

 *bsite*: penerbit.brin.go.id

 PenerbitBRIN

 @Penerbit_BRIN

@penerbit.brin

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	ix
PROFIL SINGKAT	1
PRAKATA PENGUKUHAN	5
I. PENDAHULUAN	7
II. TEKNOLOGI INSTRUMENTASI DAN KONTROL	11
A. Pengembangan Performansi Teknik Instrumentasi dan Kontrol .	11
1. Tantangan Teknologi Masa Depan untuk Instrumentasi dan Kontrol	12
2. Permasalahan Instrumentasi dan kontrol di Industri 4.0	13
3. Solusi Teknologi Instrumentasi & Kontrol Untuk Masa Depan.....	14
4. Rencana Instrumentasi & Kontrol Untuk Masa Depan.....	15
B. Sistem Pengukuran dan Kontrol Proses.....	15
C. Sistem Pengolahan Air Gambut dan Air Limbah Tekstil.....	17
1. Pengolahan Air Gambut.....	17
2. Penerapan di Industri Tekstil	18
III. STUDI KASUS	21
A. Pengolahan Air Gambut.....	21
B. Pengolahan Tersier Air Limbah Tekstil.....	23
1. Sistem Pengolahan Tersier Teknologi Ultrasonik, Proses Oksidasi Lanjut, dan Generator Gelembung Nano.....	23
2. Pemodelan dan Simulasi Teknologi Ultrasonik, Tabung Venturi (TV), dan GGN dengan DFK.....	25
3. Nilai Fraksi Volume pada Variasi Frekuensi Ultrasonik	26
4. Nilai Densitas pada Variasi Frekuensi Ultrasonik	27
5. Simulasi DFK untuk proses dengan Teknologi Ultrasonik Terintegrasi dengan TV-GGN.	29
6. Hasil dan Pembahasan Analisa COD.....	33

7. Air Limbah dengan Teknologi Ultrasonik Terintegrasi dengan POL dan GGN.....	36
9. Air Limbah Tekstil Kode A-001(A) dan Kode A-002(B)	37
10. Hasil dan Analisis Nilai COD Sampel Kode A-001(A).....	38
11. Hasil dan Analisis Nilai COD Sampel Kode A-002(B).....	40
12. Penurunan COD Air Limbah Tekstil.....	43
IV. EFISIENSI PENGOLAHAN AIR LIMBAH	45
A. Analisis Tekono-Ekonomi Pengolahan Air Limbah	45
V. KESIMPULAN	51
VI. PENUTUP	53
VII. UCAPAN TERIMA KASIH.....	55
DAFTAR PUSTAKA.....	59
DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI.....	67
CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI.....	69
DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA.....	81
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Ilustrasi diagram blok sistem proses kombinasi teknologi proses oksidasi lanjut (POL), generator gelembung nano (GGN) dan ultrasonik (US).....	23
Gambar 3.2	Skema sistem pengolahan tersier teknologi ultrasonik terintegrasi dengan POL dan GGN.....	24
Gambar 3.3	Fraksi volume ozon pada penampang ultrasonik dengan frekuensi 20 kHz.....	26
Gambar 3.4	Kontur densitas pada penampang ultrasonik dengan frekuensi 20 kHz.....	28
Gambar 3.5	Kontur fraksi kecepatan kombinasi ultrasonik, TV dan GGN.....	30
Gambar 3.6	Kontur fraksi tekanan kombinasi ultrasonik, TV dan GGN.....	30
Gambar 3.7	Kontur fraksi volume kombinasi ultrasonik, TV dan GGN.....	30
Gambar 3.8	Gambar Pipa TV.....	31
Gambar 3.9	Saluran generator gelombang nano.....	31
Gambar 13.0	Saluran ultrasonik.....	31
Gambar 3.11	Pengolahan tersier air limbah tekstil kode A-001 dengan kombinasi teknologi POL dan GN.	33
Gambar 3.12	Grafik hasil analisa COD terhadap sampel.....	35
Gambar 3.13	Tampilan hasil perubahan warna air limbah tekstil artifisial.....	37
Gambar 3.14	Grafik hasil ultrasonik 26 kHz.....	40
Gambar 3.15	Grafik hasil ultrasonik 26 kHz.....	42
Gambar 3.16	Penurunan COD effluen menggunakan (a) amplitudo 50%, (b) amplitudo 75%, (c) amplitudo 100%, dan (d) Efektivitas ozonisasi dalam proses penurunan.....	43

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Nilai fraksi volume ozon pada frekuensi 20 kHz–200 kHz.....	27
Tabel 3.2 Nilai densitas dari cairan untuk variasi frekuensi ultrasonik 20 kHz–200 kHz.	28
Tabel 3.3 Hasil simulasi parameter menggunakan DFK.....	31
Tabel 3.4 Hasil metrik mesh.....	32

PROFIL SINGKAT



Sutrisno Salomo Hutagalung dilahirkan di Cimahi, Jawa Barat pada tanggal 08 Oktober 1960 adalah anak ketiga dari tujuh bersaudara dari Bapak Justin Hutagalung (alm) dan Ibu Rouli br. Tobing (alm). Menikah dengan Lili Rishandiari (alm) dan dikaruniai tiga orang anak Anna Christiana br. Hutagalung, Andrian Kristianto Hutagalung, dan Riyan Saputra Hutagalung serta delapan orang cucu.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 6/M Tahun 2025 tanggal 20 Januari 2025 diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama Badan Riset dan Inovasi Nasional terhitung mulai tanggal 03 Maret 2025.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional, Nomor 221/I/HK/2025, tanggal 11 November 2025 tentang Pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan orasi pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan sekolah dasar di SD No 1 Tagog tahun 1974, sekolah menengah pertama di SMP Pusdik Int Cimahi tahun 1976, dan sekolah teknik menengah atas Bandung tahun 1981 dengan jurusan Instrumentasi Industri. Memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) Statistika Terapan dari Universitas Terbuka, Indonesia, pada tahun 2000, meraih gelar Magister Teknik (MT) Program studi Instrumentasi dan Kontrol dari Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia, pada tahun 2002, dengan tesis berjudul “Pengukuran Multifase dan Multikomponen dengan Menggunakan Tomografi Ultrasonik” dan gelar Doktoral Program studi Teknik Fisika dari Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia, pada tahun 2024, dengan Desertasi berjudul “Aplikasi

Ultrasonik yang Terintegrasi dengan Proses Oksidasi Lanjut dan Generator Gelembung Nano untuk Pengolahan Tersier Air Limbah Tekstil”.

Berbagai pelatihan nonformal yang terkait dengan bidang kompetensinya, seperti *pelatihan*, Equivalent to Siemens Simatics S5, 07 - 11 Oktober 1991, Siement Ltd, di Yeronga College of Tafe - Brisbane– Australia. ; *Pelatihan*, DCS MicroXL Engineering, 11 - 19 November 1991, Yokogawa Australia Pty.LTD, di Brisbane – Australia. Program kerjasama, Instrumentasi dan Kontrol, 30 Oktober -10 November 1989, di Water Resource Bureau, di Brisbane- Australia. ; *Pelatihan The Refrigerator Energy Test in Japan for the IS-INOTEC/ JEMA 2016 Project for ASEAN Laboratories*, 26 September - 7 October 2016, Japan Qualiuty Assurance Organization Safety & EMC Center, Tokyo, Japan ; *Pelatihan Risk Management Evaluation IEC 60601-1 -2012 and Clause 201.11, 1201.12 and 201.15 - IEC 60601-2-19-2016*, 29-30 November 2018, TÜV SÜD PSB, Singapore.

Perjalanan karier yang pernah ditempuh adalah bergabung menjadi peneliti di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) mulai 1981 sampai 2018 dan berubah nama menjadi Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sampai sekarang.

Menghasilkan 74 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal, dan prosiding. Sebanyak 31 KTI ditulis dalam bahasa Inggris.

Selama menjadi peneliti, aktif dalam berbagai organisasi ilmiah, yaitu PPI KIM, AMTEQ, HIMII, APMP dan menjadi anggota di Persatuan Periset Indonesia (PPI) serta Linked internasional.

Memperoleh penghargaan sebagai salah satu “110 Karya Inovasi Indonesia Paling Prospektif” dari *Business Innovation Center (BIC)* berjudul Sistem pengolahan air gambut melalui proses oksidasi lanjut dan reverse osmosis-2018. Piagam tanda kehormatan Satyalencana

Karya Satpa dari Presiden Republik Indonesia (10 th , 20 th dan 30 th)

Memperoleh Perlindungan hak paten yang sudah granted untuk beberapa judul:

“Peat Water Treatment System Through Continuous Oxidation Process and Reverse Osmosis”, Paten No: P00201401818 (2014) dan telah mendapatkan Grand Patent (2021),

Alat dan metode ultrasonik dikombinasikan dengan Proses Oksidasi Lanjut (POL) terintegrasi bubble mill generator (BMG) untuk pengolahan limbah cair dan sedimen dengan Nomor Permohonan : P00202010064 dari 2024 untuk selama 20 (dua puluh) tahun.

Piranti uji aneroid sphygmomanometer dengan Nomor sertifikat : IDS000005778 dari 2023 untuk selama 10 (sepuluh) tahun.

Selanjutnya telah didaftarkan paten-paten baru dengan judul: *Patient Bed Testing System*, Paten No: P00201902701 (2019) .

PRAKATA PENGUKUHAN

Saya ingin berterima kasih kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas bimbingan-Nya, yang telah memungkinkan saya untuk menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini. Saya mengucapkan penghargaan, rasa hormat, dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pimpinan dan anggota Forum Profesor Riset atas dukungan dan bimbingan yang mereka berikan kepada peneliti untuk menulis naskah orasi ilmiah untuk sidang Terbuka Forum Profesor Riset.

Dapat dilihat bagaimana sistem yang dirancang dan dikembangkan telah mengubah peradaban dunia selama sejarah pencapaian umat manusia. Sejak awal perkembangan teknologi rekayasa hingga masa kini, kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi telah mendorong kita untuk terus berinovasi, menggali lebih dalam, dan memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang cara kita berinteraksi dengan alam semesta dan lingkungan kita. Naskah ini menantang pemahaman kita tentang pengolahan air limbah dengan sistem kontrol. Perjalanan menarik melintasi berbagai era dan disiplin ilmu pengetahuan dan teknologi, dari sistem yang sederhana hingga sistem yang kompleks.

Sistem pengolahan air limbah yang menggabungkan teknologi ultrasonik, Proses Oksidasi Lanjut (POL), dan Generator Gelembung Nano (GGN) meletakkan dasar untuk kemajuan baru dalam teknologi pengolahan air. Metode kontemporer telah membuka peluang baru untuk mengontrol biaya sistem yang semakin kompleks dan saling berhubungan. Naskah ini ditulis dengan cermat, membahas konsep penting dan kasus yang menunjukkan potensi besar sistem pengolahan air untuk memecahkan masalah terkini.

Saya ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada para penulis sebelumnya dan dedikasi mereka untuk menghasilkan karya-

karya yang menjadi dasar dari dari bagian naskah ini. Meskipun naskah ini jauh dari sempurna, semoga pembaca mendapatkan pengetahuan baru, inspirasi, dan manfaat.

I. PENDAHULUAN

Saat ini, permintaan terhadap teknologi instrumentasi semakin meningkat dengan cepat di berbagai sektor, terutama untuk meningkatkan kinerja dan kualitas sistem serta lingkungan. Teknologi instrumentasi secara khusus berperan sebagai kunci dalam mencapai standar kualitas yang berkaitan dengan keselamatan, kesehatan, dan pelestarian lingkungan (*Safety, Health, Environment, and Quality*). *Melalui sistem instrumentasi, kita dapat mengamati, memantau, mengidentifikasi, serta mengontrol dan mengoptimalkan kondisi, sistem, atau objek yang ada.*

Peran instrumentasi dan kontrol mencakup sekelompok keterampilan yang berkaitan dengan penelitian berkualitas dalam bidang instrumentasi dan kontrol untuk mendukung pendidikan, penelitian terapan, dan hasil industri. Otomatisasi memberikan manfaat yang luas pada sistem dan jaringan dengan menyederhanakan lingkungan operasional. Hal ini memungkinkan pengurangan jumlah intervensi manual yang diperlukan untuk mengelola sistem operasi, subsistem, program aplikasi, perangkat jaringan, dan berbagai produk lainnya. Terkait dengan tingkat otomatisasi, Sereda et al., 2016 menyatakan bahwa tingkat otomatisasi didefinisikan sebagai pembagian antara manusia dan mesin, dengan derajat keterlibatan manusia yang bervariasi. Sementara itu, Parasuraman et al., 2000 menyatakan bahwa tingkat otomatisasi merupakan rentang dari operasi manual hingga operasi otomatis sepenuhnya.

Tujuan utama otomatisasi adalah untuk meningkatkan kecepatan pemrosesan tugas-tugas yang beragam dan mengurangi waktu penyelesaian, sehingga menurunkan biaya serta durasi aktivitas operasional dan pada akhirnya meningkatkan efisiensi alur kerja. Dengan mengotomatiskan proses bisnis, perusahaan dapat mencapai

hasil yang lebih banyak dengan usaha yang lebih sedikit. Manfaat otomatisasi sering kali dikaitkan dengan peningkatan tingkat produksi dan produktivitas, penggunaan bahan yang lebih efisien, kualitas produk yang lebih baik, peningkatan keselamatan, waktu kerja yang lebih singkat bagi tenaga kerja, serta pengurangan waktu tunggu di pabrik. Dalam konteks ini, peran instrumentasi dan kontrol sangat signifikan dalam sistem otomatisasi.

Salah satu bidang vital yang sangat bergantung pada keandalan sistem otomasi dan instrumentasi adalah pengelolaan air bersih. Pentingnya kebutuhan akan air bersih menyebabkan air bersih mendapatkan prioritas yang tinggi karena menyangkut kehidupan orang banyak. Apabila terjadi pengurangan kuantitas maupun kualitas sumber daya air, maka hal ini akan memengaruhi kehidupan manusia secara bermakna. Untuk menjamin ketersediaan dan pengelolaan sumber daya air, pemerintah sebagai pemangku tanggung jawab kesejahteraan warga negaranya berkewajiban menetapkan kebijakan, seperti Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2004.

Namun, tantangan sesungguhnya tidak hanya terletak pada regulasi, tetapi juga pada laju permintaan yang terus meningkat. Oleh karena itu, perlu ada kemampuan untuk memprediksi kebutuhan air di masa depan dengan menganalisis data kebutuhan dan ketersediaan saat ini. Selain itu, berbagai inovasi baru juga dibutuhkan untuk penyediaan air bersih dan pengolahan air limbah industri dengan cara yang efektif dan efisien (Hutagalung, n.d., 2019)

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan air bersih, diperlukan inovasi yang efektif dan efisien, tidak hanya untuk penyediaan air bersih, tetapi juga untuk pengolahan air limbah industri. Di sinilah peran vital instrumentasi dan kontrol menjadi sangat relevan. Sistem pengolahan air limbah modern yang kompleks menuntut adanya sistem pengukuran, pemantauan, dan kontrol otomatis yang presisi untuk menjamin efektivitas proses, optimalisasi penggunaan sumber

daya, dan konsistensi kualitas hasil olahan. Tanpa instrumentasi yang akurat dan sistem kontrol yang andal, proses pengolahan yang canggih sekalipun tidak akan berjalan optimal.

Menjawab tantangan tersebut, orasi ini akan berfokus pada sebuah inovasi, yaitu Sistem Pengolahan Tersier Air Limbah Tekstil yang mengintegrasikan tiga teknologi utama yaitu Metoda Ultrasonik, Proses Oksidasi Lanjut (POL), dan Generator Gelembung Nano (GGN). Pentingnya sistem ini dapat dipahami melalui tiga fenomena fundamental yang mendasarinya.

Pertama, fenomena pada Metoda Ultrasonik, di mana iradiasi akustik pada air limbah dapat mempercepat proses pembersihan polutan. Medan akustik yang kuat akan memicu kavitasi pembentukan, pertumbuhan, dan osilasi gelembung secara intens yang berkontribusi pada pemecahan polutan.

Kedua, fenomena pada Metoda POL, yang merupakan proses oksidasi lanjut untuk mengurai kontaminan organik dalam air limbah. Teknologi ini umumnya menggunakan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) sebagai oksidan utama. Sebagai metode baru, POL sangat efektif untuk mempercepat proses oksidasi karena memiliki laju reaksi yang cepat dan kemampuan oksidasi yang kuat. Secara luas, proses ini adalah serangkaian prosedur kimia yang dirancang untuk menghilangkan bahan organik (dan terkadang anorganik) melalui reaksi oksidasi, di mana terjadi proses hilangnya elektron dari molekul, atom, atau ion.

Keuntungan POL dalam pengolahan tersier air limbah tekstil memiliki beberapa aspek. Salah satunya adalah kemampuannya untuk secara efektif menghilangkan senyawa organik dalam fase air, tanpa hanya mengumpulkan atau mentransfer polutan ke fase lain. Hal ini disebabkan oleh tingginya reaktivitas $\bullet\text{OH}$ yang dapat bereaksi dengan banyak polutan berair tanpa membedakan. Selain itu, POL juga memiliki keuntungan lain yaitu potensi untuk mengurangi toksisitas

senyawa organik dan mineralisasi organik. Mineralisasi organik adalah konversi senyawa organik menjadi garam dan CO₂ yang lebih aman.

Ketiga, fenomena pada Metoda GGN melengkapi sistem ini dengan kemampuan menghasilkan gelembung nano (GN). Teknologi ini diakui secara luas karena mampu meningkatkan efisiensi proses pengolahan melalui peningkatan disolusi oksigen dan pembentukan radikal bebas. Kedua mekanisme tersebut berperan penting dalam memaksimalkan efektivitas proses oksidasi di dalam sistem.

Fenomena pada Sistem Pengolahan Tersier Air Limbah Tekstil dengan Metoda GGN menghasilkan GN yang memiliki karakteristik fisik dan mekanik unik. Gelembung nano berbentuk bulat kecil dan memiliki sifat khas seperti ukuran yang sangat kecil, umur panjang, hilangnya daya apung secara virtual, serta tekanan internal tinggi dengan rasio permukaan terhadap volume yang besar. Karakteristik ini menjadikan GN berbeda dari gelembung makro konvensional.

Dalam buku ini dibahas sesuai alur bab, yaitu Bab 1 berisi tentang pendahuluan instrumentasi dan kontrol untuk pengolahan air. Bab 2 tentang teknik instrumentasi dan kontrol. Bab 3 membahas mengenai hasil pengolahan air. Bab 4 efisiensi. Bab 5 berisi kesimpulan, dan Bab 6 berisi penutup.

II. TEKNOLOGI INSTRUMENTASI DAN KONTROL

Teknologi instrumentasi dan kontrol memegang peran yang sangat penting dalam mendukung keberlangsungan proses industri modern. Perkembangan teknologi ini tidak hanya berfokus pada peningkatan efisiensi, tetapi juga pada aspek keselamatan, kualitas produk, serta penghematan biaya produksi. Dengan adanya sistem kontrol yang andal, proses industri dapat berjalan lebih stabil, aman, dan sesuai dengan standar yang ditetapkan.

A. Pengembangan Performansi Teknik Instrumentasi dan Kontrol

Performansi instrumentasi dan kontrol pada berbagai industri proses, sangat penting dalam rangka *process safety*, meningkatkan *product quality*, dan *cost optimization*. Jumlah *loop* kontrol cukup signifikan, sehingga memerlukan solusi inovatif untuk memenuhi performansi secara sistematis dan efisien. Pengembangan beberapa teknik penilaian secara kuantitatif dan perangkat untuk memenuhi performansi dari *loop* pengontrol yang terdapat di industri proses dan uji coba teknik-teknik penilaian, telah diterapkan pada berbagai industri proses. Metode ini dengan membandingkan kualitas kontrol terkini dengan standar-standar tertentu. Data yang dikumpulkan dari *loop* tertutup dimungkinkan menilai performansi dari pengontrol proses menggunakan *Maximum Variance Control (MVC)* sebagai *benchmark*.

Peningkatan performansi *loop* kontrol secara keseluruhan melibatkan beberapa tahapan penting. Langkah pertama adalah melakukan penalaan ulang (*re-tuning*) parameter PID untuk mengoptimalkan respons sistem. Tahapan selanjutnya adalah

mengevaluasi kembali arsitektur sistem kontrol yang ada, terutama pada *loop* yang performanya kurang memuaskan. Langkah-langkah ini menjadi krusial karena di lapangan, masih sering ditemukan penggunaan mode manual yang justru dapat menghasilkan respons sistem yang beresiliasi dan tidak stabil. *Loop* kontrol merupakan blok fundamental dari semua komponen fisik dan fungsi pengontrol yang secara otomatis menyesuaikan nilai variabel proses terukur agar sesuai dengan nilai *set-point* (SP). Komponen penting dalam *loop* kontrol proses dalam kontrol umpan balik banyak digunakan dalam sistem otomatis modern. Sistem kontrol umpan balik terdiri dari lima komponen dasar, yaitu proses, elemen umpan balik, komparator, pengontrol, aktuator.

1. Tantangan Teknologi Masa Depan untuk Instrumentasi dan Kontrol

Pesatnya perkembangan teknologi menghadirkan berbagai tantangan baru dalam bidang instrumentasi dan kontrol, terutama dalam upaya meningkatkan efisiensi, akurasi, dan kehandalan sistem di berbagai sektor industri. Seiring dengan meningkatnya kompleksitas proses industri dan kebutuhan akan data *real-time* yang presisi, sistem instrumentasi dan kontrol dituntut untuk mampu beradaptasi dengan integrasi teknologi cerdas seperti Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), dan otomatisasi tingkat tinggi. Selain itu, kebutuhan akan efisiensi energi, keamanan sistem, serta kemampuan prediktif dan adaptif menjadi aspek krusial yang harus dihadapi para insinyur dan peneliti dalam mengembangkan solusi instrumentasi dan kontrol yang lebih inovatif dan berkelanjutan di masa depan. Tantangan universal dalam teknologi termasuk aplikasi instrumentasi dan kontrol untuk masa depan seperti meningkatkan efisiensi dan produktivitas, mengurangi konsumsi energi dan biaya, meningkatkan kapasitas dan keandalan, meningkatkan kualitas dan konsistensi produk, mengurangi

cacat produk, serta meningkatkan responsivitas, keamanan, dan keselamatan proses.

Beberapa bidang aplikasi dimana penerapan ilmu instrumentasi dan kontrol masih memerlukan penelitian lebih lanjut, meliputi transportasi, manufaktur, pertahanan dan keamanan, industri proses, energi, pangan, biologi, ekonomi dan keuangan, sosial, medis, serta produk komersial. Sesuai dengan peta jalan untuk instrumentasi dan kontrol, pengembangan lebih lanjut dalam bidang ini diharapkan dapat meningkatkan peran dan penguasaan ilmu instrumentasi dan kontrol yang canggih, sehingga mampu menjawab kebutuhan masa depan dengan solusi yang lebih tepat.

2. Permasalahan Instrumentasi dan kontrol di Industri 4.0

Era Industri 4.0, yang ditandai oleh integrasi sistem siber-fisik, Internet of Things (IoT), dan big data, telah mengubah lanskap industri secara fundamental dan memunculkan serangkaian permasalahan baru yang spesifik bagi bidang instrumentasi dan kontrol. Jika sebelumnya industri berfokus pada efisiensi dasar, kini tantangannya menjadi jauh lebih kompleks. Permasalahan utama yang muncul adalah tantangan interoperabilitas, yaitu bagaimana mengintegrasikan ribuan sensor dan aktuator dari berbagai vendor dengan protokol komunikasi yang berbeda agar dapat bekerja sebagai satu sistem yang kohesif. Selain itu, sistem instrumentasi modern kini menghasilkan volume data yang masif dengan kecepatan sangat tinggi, sehingga menuntut sistem kontrol yang mampu mengolahnya secara real-time untuk pengambilan keputusan yang akurat. Dengan semakin terhubungnya semua perangkat ke jaringan, muncul pula risiko keamanan siber yang membuat sistem kontrol rentan terhadap serangan luar. Terakhir, Industri 4.0 mendorong pergeseran menuju kontrol yang terdesentralisasi, di mana setiap komponen memiliki “kecerdasan”

sendiri, sehingga mengelola dan mengoordinasikan keseluruhan sistem menjadi sebuah tantangan teknis yang signifikan. Kegagalan dalam mengatasi berbagai permasalahan ini akan menghambat kemampuan industri untuk bersaing secara efektif.

3. Solusi Teknologi Instrumentasi & Kontrol Untuk Masa Depan

Beberapa solusi yang ditawarkan merupakan solusi klasik yang dijelaskan sebagai berikut: sistem kontrol adaptif, seperti *gain scheduling*, kontrol langsung dan tidak langsung dengan berbasis model referensi, sistem kontrol prediktif, kontrol *robust* dan sistem kontrol model internal, sistem kontrol global yang melakukan linearisasi, kontrol proses statistik, kontroler berbasis jaringan saraf, kontrol *fuzzy*, dan kontrol *neuro-fuzzy* serta teknik optimasi seperti algoritma genetika, algoritma ekspektasi dan maksimisasi, identifikasi, dan estimasi buta.

Solusi teknologi saat ini disesuaikan dengan perkembangan dalam teknologi instrumentasi dan kontrol, termasuk: PLC, SCADA, DCS, dan instrumen pintar. Berdasarkan kemajuan dalam teknologi komputasi, komunikasi, dan penginderaan; sistem cerdas yang terintegrasi, otomatisasi total yang bergerak menuju otomatisasi optimal di seluruh perusahaan, serta nanoteknologi yang menghasilkan sistem baru, termasuk sensor dan aktuator, yang mensintesis banyak aplikasi generasi baru dengan kinerja yang jauh lebih baik.

Fakta dari aplikasi industri untuk sistem kontrol meliputi: *traditional/classical solutions* (batch, continuous), *single loop solution* (tuning & optimization), *PID controller*, *feedback*, *feedforward & ratio control*, *cascade control*, *selective control (override, auctioneering)*, *split-range control*, *sequential control solution (interlock system: time based, process based)*, smart/intelligent instrument (sensors, actuators), PLC, SCADA, DCS.

4. Rencana Instrumentasi & Kontrol Untuk Masa Depan

Tujuan dan tantangan universal dalam teknologi termasuk aplikasi instrumentasi dan kontrol untuk masa depan berguna untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas, mengurangi konsumsi energi dan biaya, meningkatkan kapasitas dan keandalan sistem, serta meningkatkan kualitas dan konsistensi produk. Selain itu, perlu dilakukan pengurangan waktu dalam penyampaian produk, peningkatan responsivitas, serta peningkatan keamanan dan keselamatan proses.

Rencana pengembangan sistem kontrol di masa depan mengarah pada desain yang bersifat terdistribusi, terintegrasi, dan terpasang mencakup sistem kompleks berskala besar. Jaringan sensor dan sistem kontrol jaringan, teknologi nirkabel yang mencakup manajemen komunikasi dalam jaringan aktuator sensor nirkabel, pemfilteran dan fusi sensor, serta protokol kontrol. Pemodelan juga mencakup penundaan waktu yang kompleks, fleksibilitas, redundansi, toleransi terhadap kesalahan, dan stabilitas; kontrol yang kuat sementara, kontrol aperiodik atau berbasis peristiwa, serta *jitter sampling*, *Input-Output Latency Jitter*, dan *kehilangan paket data komunikasi*.

B. Sistem Pengukuran dan Kontrol Proses

Programmable Logic Controllers (PLC) dapat dianggap istimewa pada kontrol jenis komputer, yang mampu memproses tinggi jumlah operasi yang sesuai dengan batasan waktu nyata. Siklus pemrosesan PLC tipikal diatur dalam tiga bagian berbeda di mana data masukan dibaca ke dalam memori, pemrosesan data dalam memori, dan penulisan data keluaran.

Ovatman et al., (2016) menjelaskan bahwa penggunaan PLC secara luas terbatas oleh waktu siklus yang ketat, di mana pemrosesan masukan dan produksi luaran yang harus diselesaikan dalam tenggat waktu

tertentu. PLC perlu diprogram untuk melayani tujuan yang berbeda di berbagai bidang penggunaan. Pemrograman PLC didasarkan pada bahasa pemrograman, antara lain *Instruction Lists (IL)*, *Structured Text (ST)*, *Diagram Blok Fungsi (DBF)*, dan *Ladder Diagram (LD)*. Secara fundamental, PLC adalah sistem kendali berbasis mikroprosesor yang dapat diprogram untuk mendeteksi, mengaktifkan, dan mengendalikan peralatan industri dengan mengintegrasikan berbagai terminal input dan output yang berinteraksi langsung dengan proses industri. Dalam konteks pengolahan air limbah tekstil, desain otomatisasi sistem kontrol menggunakan PLC memungkinkan pemantauan dan pengontrolan jalannya proses secara efisien (Hutagalung et al., 2021). Sistem ini juga melibatkan pengembangan antarmuka yang dapat memantau parameter dan kondisi lapangan tanpa harus berada di lapangan secara langsung. Pendekatan ini memberikan manfaat signifikan dengan mengotomatisasi proses pengolahan tersier air limbah tekstil, mengurangi kesalahan pencatatan data, memantau sistem secara *real-time* dan jarak jauh, serta memastikan bahwa air limbah tekstil yang dihasilkan sesuai dengan standar nasional/internasional.

Selanjutnya, Rao & Mishra (2014) menyatakan bahwa PLC berfungsi sebagai pengendali Proporsional, Integral, dan Derivatif (PID), yaitu mekanisme umpan balik *loop* kontrol generik yang banyak digunakan dalam sistem pengendali industri. Pengendali PID memperbaiki kesalahan antara nilai proses yang terukur dan set point melalui perhitungan dan pelaksanaan tindakan korektif yang sesuai (Hutagalung, 2019c). Nilai proporsional menentukan reaksi terhadap kesalahan saat itu, nilai integral menentukan reaksi berdasarkan jumlah kesalahan terakhir, dan nilai derivatif menentukan reaksi terhadap laju kesalahan tersebut yang telah berubah. Ketiga tindakan ini digunakan untuk menyesuaikan proses melalui elemen pengendali akhir (Ang et al., 2005). *Ziegler–Nichols* memperkenalkan beberapa metode penalaan, seperti metode osilasi dan *decay ratio* yang dilakukan dalam keadaan *loop* tertutup, sedangkan metode grafik reaksi proses

dilakukan dalam keadaan lup terbuka (Jun et al., 2005). Metode penalaan *Ziegler–Nichols* adalah metode heuristik dari penalaan parameter PID yang menghasilkan nilai-nilai yang terbaik untuk tiga parameter PID (Copeland, 2008). Meskipun terdapat sejumlah metode rekasi proses yang tersedia, metode *Ziegler–Nichols* dan *Cohen-cohen* adalah metode yang digunakan bertujuan untuk meredam hasil gelombang seperempat.

C. Sistem Pengolahan Air Gambut dan Air Limbah Tekstil

1. Pengolahan Air Gambut

Sumur di daerah bergambut atau rawa umumnya memiliki air berwarna coklat dengan kadar asam humus, zat organik, dan besi yang tinggi. Karakteristik air gambut ini sangat bervariasi dan dinamis, tergantung pada musim dan lokasi, sehingga menjadikannya tantangan yang signifikan untuk diolah menjadi air bersih secara konsisten. Untuk mengatasi kompleksitas ini, diperlukan sistem pengolahan yang tidak hanya efektif tetapi juga adaptif. Di sinilah peran sistem kontrol dan otomatisasi menjadi krusial. Sistem ini memungkinkan pemantauan parameter kunci seperti pH, warna, dan kadar zat organik secara *real-time*, serta mengatur dosis bahan kimia secara presisi dan otomatis. Dengan demikian, kualitas air olahan dapat dijaga secara konsisten sesuai standar, sekaligus meningkatkan efisiensi proses dan menekan biaya operasional.

Air gambut umumnya ditemukan di daerah rawa dengan karakteristik fisik dan kimia yang khas seperti warna coklat kemerahan dan kadar bahan organik tinggi, memiliki rasa asam, pH berkisar 3–5, serta tingkat kesadahan yang rendah. Di Provinsi Riau terdapat lahan rawa/gambut seluas $\pm 4,3$ juta Ha. Air gambut umumnya ditemukan di daerah rawa dengan karakteristik fisik dan kimia yang khas seperti warna coklat kemerahan dan kadar bahan organik tinggi. Kondisi ini

menjadikan air gambut memerlukan proses pengolahan khusus agar dapat dimanfaatkan sebagai sumber air bersih.

Kajian sumber bahan baku air gambut dilakukan sebagai dasar perancangan sistem pengolahan (Turnip et al., 2017). Survei lapangan menunjukkan terdapat tiga lokasi utama pengambilan sampel air gambut di Kabupaten Kampar, Provinsi Riau, yaitu Kecamatan Tapung Hilir, Kecamatan Kampar Kiri Hilir, dan Rimbo Panjang Kecamatan Tambang, yang mewakili karakteristik air gambut di wilayah tersebut.

2. Penerapan di Industri Tekstil

Industri tekstil merupakan sektor yang menggunakan pewarna sintetis dalam jumlah yang signifikan (Adegoke & Bello, 2015; Uddin et al., 2015). Menurut Chiu et al., (2019), sekitar 56% dari bahan baku yang digunakan dalam industri tekstil adalah pewarna sintetis. Selain itu, berbagai senyawa dan bahan kimia, baik organik maupun anorganik, seperti garam, asam, detergen, dan bahan pemutih, juga digunakan dalam proses produksi di industri ini (Kumar, 2017; Abinaya et al., 2018). Kondisi ini menyebabkan industri tekstil menghasilkan air limbah yang sulit terurai, sangat beracun, dan mengandung warna yang berbahaya bagi organisme hidup (Tavangar et al., 2019). Air limbah tekstil juga dapat menyebabkan tumor, kanker, dan berbagai alergi pada manusia (Antonopoulou et al., 2015). Dengan demikian, air limbah tekstil berpotensi membahayakan ekosistem lingkungan (Reddy Ramireddy et al., 2023; Yakout et al., 2019). Oleh karena itu, air limbah tekstil perlu diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan.

Berbagai teknologi pengolahan air limbah tekstil telah dikembangkan, termasuk teknologi berbasis filtrasi membran (Merouani et al., 2015), ultrasonik (Xu et al., 2019; Yao et al., 2020; Jawale & Gogate, 2018), elektrokimia (Ensano et al., 2017), ozon (Chen et al., 2025), dan gelembung (Atkinson et al., 2019). Beberapa peneliti

juga telah melakukan studi mengenai pengolahan air limbah tekstil dengan mengombinasikan beberapa teknologi tersebut. Contohnya, kombinasi teknologi ultrasonik dan membran (Sinha et al., 2018), proses oksidasi lanjut dan osmosis balik (Hutagalung et al., 2020; Gagol et al., 2018; Shalaby et al., 2018), ultrasonik dan (Al-Hashimi et al., 2015; Wang et al., 2015), ultrasonik dan Proses Oksidasi Lanjut (POL) (Mahvi, 2009; Kokkinos et al., 2021), ultrasonik dan gelembung nano (Mo et al., 2018; Nirmalkar et al., 2019), serta ultrasonik dan plasma (Dominguez et al., 2018).

Keberhasilan integrasi berbagai teknologi ini sangat bergantung pada peran vital sistem instrumentasi dan kontrol yang berfungsi sebagai ‘sistem saraf’ untuk mengoordinasikan setiap proses. Dalam kasus ini, *instrumentasi* menyediakan data *real-time* mengenai kondisi limbah. Data ini kemudian diolah oleh *sistem kontrol* yang bertindak sebagai ‘otak’ untuk mengambil keputusan seperti menyesuaikan daya ultrasonik, mengatur dosis ozon, atau mengubah tekanan pada sistem membran. Keputusan ini dieksekusi oleh *aktuator*, seperti katup kontrol dan pompa, yang memastikan setiap teknologi beroperasi pada parameter optimalnya untuk mencapai sinergi yang efisien.

Selain itu, beberapa penelitian juga mengombinasikan tiga teknologi sekaligus, yaitu ultrasonik, ozon, dan POL (Hübner et al., 2024), yang semakin menuntut kecanggihan sistem kontrol untuk dapat diimplementasikan.

Efektivitas teknologi pengolahan limbah air tekstil dapat dinilai berdasarkan kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan warna pada hasil pengolahan air limbah yang dihasilkan setelah melalui proses teknologi tersebut (Salomo Hutagalung et al., 2023). Kadar COD dan warna merupakan dua parameter baku mutu yang digunakan dalam standar nasional dan internasional untuk menilai kualitas air buangan.

Pada penelitian ini dilakukan kajian tentang distribusi aliran pada ultrasonik sebagai bagian dari perilaku hidrodinamika dengan

menggunakan Dinamika Fluida Komputasional (DFK) serta uji performa sistem ultrasonik dalam pengolahan tersier air limbah tekstil. Pada pemodelan Generator Gelembung Nano (GGN), metode eularian-PBM (*Population Balance Method*) digunakan dengan menggunakan model *honeycomb* untuk mendapatkan model simulasi GGN. Pendekatan PBM digunakan untuk mengetahui ukuran dan distribusi gelembung dalam sistem dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan dengan metode DPM (*Discrete Phase Model*). Sampel diambil setiap 30 menit selama periode waktu 300 menit masa percobaan penelitian. Hasil capaian COD disajikan dalam bentuk persentase penurunan nilai COD dan warna, serta parameter pendukung lainnya yang relevan.

III. STUDI KASUS

Studi kasus yang dilakukan oleh peneliti melakukan penelitian yang terfokus pada sistem pengolahan air gambut menjadi air bersih atau air minum yang dilakukan di Kampar Provinsi Riau dan sistem pengolahan air limbah tekstil menjadi air buang mengacu pada baku mutu nasional yang dilakukaan di Purwakarta, Jawa barat.

A. Pengolahan Air Gambut

Sebagai studi pembanding, dilakukan survei lanjutan ke PDAM Kabupaten Bengkalis pada 29 Oktober–2 November 2012, karena daerah ini memiliki karakteristik sumber air gambut yang serupa. Kegiatan di Bengkalis meliputi presentasi dan diskusi dengan manajemen PDAM serta Kepala Bappeda, dilanjutkan dengan survei lapangan ke beberapa instalasi, termasuk PDAM Pusat (Area A, B, dan C) dan PDAM Cabang Sungai Pakning beserta sumber air bakunya di Intake Sungai Dayang. Hasil survei di kedua kabupaten menunjukkan bahwa air gambut di lokasi penelitian memiliki karakteristik serupa, yang menjadi dasar penting bagi perancangan sistem pengolahan selanjutnya.

Survei dilakukan di Kabupaten Kampar dan Kabupaten Bengkalis, di mana ditemukan banyak sumber air gambut yang tersebar di berbagai titik. Setiap lokasi memiliki kondisi fisik dan lingkungan yang berbeda, namun keseluruhannya memperkuat hasil temuan mengenai keseragaman karakteristik air gambut di wilayah tersebut. Pada pengolahan air gambut, telah dihasilkan prototipe sistem yang dikembangkan berdasarkan teknologi alat dan metode ultrasonik dikombinasikan dengan Advanced Oxidation Process (AOP) terintegrasi Bubble Mill Generator (BMG) untuk pengolahan

limbah cair dan sedimen. Inovasi ini telah memperoleh perlindungan hukum melalui Sertifikat Paten Nomor IDP000092475, yang diberikan kepada Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) oleh Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia pada 8 Maret 2024.

Selanjutnya, penelitian mengenai sistem pengolahan air gambut terus dikembangkan dengan menerapkan teknologi Advanced Oxidation Process (AOP) / Proses Oksidasi Lanjut (POL) yang diintegrasikan dengan teknologi Bubble Mill Generator (BMG) sebagai inovasi dalam proses pengadukan dan pengolahan limbah cair maupun sedimen.

Kebaruan teknologi ini terletak pada kombinasi metode ultrasonik dengan AOP terintegrasi BMG, yang mampu meningkatkan efisiensi degradasi polutan dan mempercepat proses pemurnian air. Perolehan paten tersebut menandakan pengakuan resmi atas orisinalitas dan potensi inovasi ini dalam bidang teknologi pengolahan air. Paten ini juga memperkuat posisi LIPI sebagai lembaga riset nasional yang aktif mengembangkan solusi berbasis sains untuk kebutuhan masyarakat.

Puncak dari rangkaian penelitian ini menghasilkan inovasi sistem pengolahan air limbah yang memadukan teknologi ultrasonik dengan Advanced Oxidation Process (AOP) dan Bubble Mill Generator (BMG) sebagai pengganti sistem pengadukan konvensional. Kebaruan teknologi ini terletak pada integrasi simultan antara gelombang ultrasonik dan proses oksidasi lanjutan dalam satu sistem reaktor, yang mampu menghasilkan gelembung mikro dan nano secara berkelanjutan untuk meningkatkan transfer massa serta mempercepat degradasi senyawa organik dan polutan dalam limbah cair maupun sedimen. Pendekatan inovatif ini memungkinkan proses pengolahan berlangsung lebih efisien, hemat energi, dan ramah lingkungan dibandingkan metode konvensional seperti penggunaan pompa atau static mixer. Menurut Hutagalung (2016), inovasi ini berkontribusi

dalam pengembangan teknologi ramah lingkungan dan berkelanjutan, terutama dalam peningkatan kualitas air melalui metode inovatif yang telah diakui secara hukum.

B. Pengolahan Tersier Air Limbah Tekstil

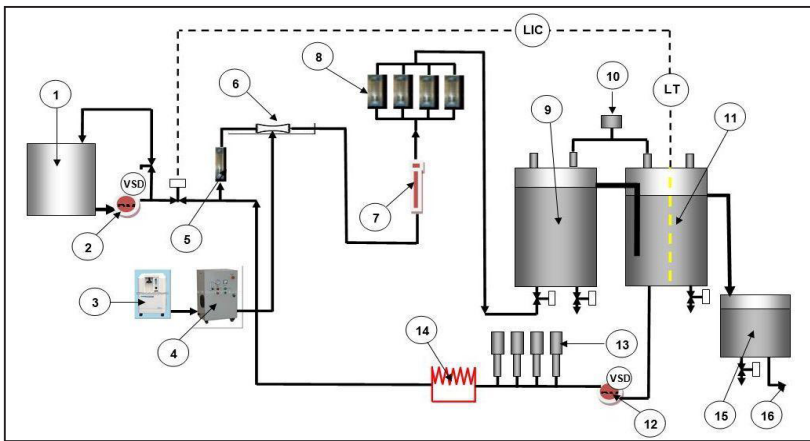
1. Sistem Pengolahan Tersier Teknologi Ultrasonik, Proses Oksidasi Lanjut, dan Generator Gelembung Nano

Secara umum, alur proses sistem pengolahan ini dimulai saat bahan baku air limbah tekstil dan ozon dimasukkan secara bersamaan ke dalam tabung venturi. Di dalam reaktor, kombinasi ozon dengan sinar ultraviolet (UV) akan menghasilkan radikal hidroksil, sehingga unit ini berfungsi sebagai reaktor Proses Oksidasi Lanjut (POL) (Hutagalung, 2019b). Air limbah yang telah diolah di unit POL kemudian dialirkan menuju Generator Gelembung Nano (GGN) yang terpasang secara paralel. Dari GGN, proses dilanjutkan ke tahap akhir, di mana air limbah dilewatkan melalui reaktor ultrasonik untuk degradasi polutan lebih lanjut (Hutagalung et al., 2023). Ilustrasi diagram blok sistem pengolahan tersier air limbah tekstil menggunakan teknologi ultrasonik yang dikombinasikan dengan POL dan GGN diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 3.1 Ilustrasi diagram blok sistem proses kombinasi teknologi proses oksidasi lanjut (POL), generator gelembung nano (GGN) dan ultrasonik (US).

Penelitian ini menggunakan sistem pengolahan tersier air limbah tekstil yang diuji dengan penerapan teknologi ultrasonik terintegrasi dengan Proses Oksidasi Lanjut (POL) dan Generator Gelembung Nano (GGN). Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan efektivitas degradasi senyawa organik dan warna pada limbah tekstil melalui kombinasi proses fisik dan kimia yang berlangsung secara simultan ditunjukkan pada gambar 2.



(1). bahan baku air limbah tekstil, (2). pompa 1, (3). generator oksigen, (4). generator ozon, (5). rotameter, (6). tabung venturi, (7). ultraviolet, (8) generator gelembung nano, (9). tangki proses 1, (10). penghancur ozon, (11). tangki proses 2, (12). pompa 2, (13). Ultrasonik (14). Pendingin air (15). tangki penampung, (16). luaran produk

Gambar 3.2 Skema sistem pengolahan tersier teknologi ultrasonik terintegrasi dengan POL dan GGN

2. Pemodelan dan Simulasi Teknologi Ultrasonik, Tabung Venturi (TV), dan GGN dengan DFK

Untuk menganalisis perilaku hidrodinamika sistem, pemodelan dan simulasi dilakukan menggunakan Dinamika Fluida Komputasional (DFK). Model geometri yang digunakan dalam simulasi ini adalah Tabung Venturi (TV) berlubang yang dirancang sesuai sistem pengolahan tersier, dengan fluida multifase yaitu air limbah dan ozon (Hutagalung, 2019b). Tujuannya adalah untuk memahami distribusi dan interaksi fraksi ultrasonik, TV, dan GGN terhadap fluida terlarut.

Pendekatan teoritis yang digunakan untuk pemodelan aliran dua fasa adalah model campuran berdasarkan pendekatan Euler-Euler. Sementara itu, turbulensi aliran dimodelkan menggunakan persamaan *Reynolds-Average Navier Stokes (RANS)* (Hutagalung, 2019a). Untuk pemodelan *Population Balance Method (PBM)*, dipilih model turbulensi RNG $k-\epsilon$, karena menurut studi oleh Babanezhad et al. (2021), model ini menghasilkan prediksi terbaik untuk tingkat kerusakan gelembung.

Penelitian ini menggunakan Tabung Venturi (TV) berlubang dengan fluida dua fase (ozon dan air limbah) untuk menganalisis kinerja sistem pengolahan tersier air limbah tekstil (Hutagalung, 2019b). Pemodelan dilakukan dengan pendekatan Euler–Euler menggunakan model campuran untuk mempelajari interaksi antar fase serta pengaruh geometri TV terhadap kualitas fraksi ultrasonik dan gelembung nano. Turbulensi aliran disimulasikan berdasarkan persamaan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)* (Hutagalung, 2019a). Menurut Babanezhad et al. (2021), model RNG $k-\epsilon$ memberikan hasil prediksi paling akurat terhadap tingkat kerusakan gelembung dalam pemodelan *Population Balance Model (PBM)*.

Simulasi DFK dilakukan untuk mengembangkan model sistem dengan menggabungkan teknologi ultrasonik, TV, dan GGN (Hutagalung et al., 2023). Hasil pemodelan menunjukkan bahwa

konfigurasi geometri dan domain simulasi yang dirancang mampu menghasilkan distribusi aliran dan pola turbulensi yang optimal di dalam sistem pengolahan. Kontur hasil simulasi memperlihatkan peningkatan efisiensi pencampuran antara fase ozon dan air limbah, yang berkontribusi pada pembentukan gelembung nano lebih merata serta peningkatan proses oksidasi dalam sistem.

3. Nilai Fraksi Volume pada Variasi Frekuensi Ultrasonik

Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi frekuensi ultrasonik berpengaruh signifikan terhadap pembentukan gelembung ozon dalam sistem pengolahan (Gambar 3). Warna biru pada Gambar 3 merepresentasikan air limbah tekstil, sedangkan biru muda menunjukkan distribusi ozon yang membentuk zona transisi antarfluida. Nilai fraksi volume ozon pada rentang frekuensi 20–200 kHz disajikan pada Tabel 1. Dari hasil analisis, frekuensi 20 kHz menghasilkan fraksi volume ozon terkecil (0,00349), yang menunjukkan pembentukan gelembung berukuran lebih kecil dan padat. Kondisi ini mengindikasikan efisiensi tinggi dalam pembentukan nanobubble (GN) serta peningkatan potensi oksidasi pada sistem seperti yang ditunjukkan pada gambar 3:



Gambar 3.3 Fraksi volume ozon pada penampang ultrasonik dengan frekuensi 20 kHz.

Tabel 3.1 Nilai fraksi volume ozon pada frekuensi 20 kHz–200 kHz.

Data Pengambilan	20 kHz	40 kHz	60 kHz	80 kHz	100 kHz
<i>Sampling 1</i>	0,00620	0,00386	0,00386	0,02744	0,01550
<i>Sampling 2</i>	0,00080	0,00517	0,00517	0,02763	0,00336
<i>Sampling 3</i>	0,00231	0,00353	0,00353	0,02696	0,01019
<i>Sampling 4</i>	0,00569	0,01287	0,01287	0,02815	0,00880
<i>Sampling 5</i>	0,00444	0,00120	0,00120	0,02956	0,01376
<i>Sampling 6</i>	0,00153	0,00653	0,00653	0,02886	0,01450
Rata-rata fraksi volume	0,00349	0,00552	0,00552	0,02810	0,01118

Data Pengambilan	120 kHz	140 kHz	160 kHz	180 kHz	200 kHz
<i>Sampling 1</i>	0,01547	0,01547	0,02744	0,01548	0,01547
<i>Sampling 2</i>	0,00336	0,00336	0,02763	0,00336	0,00336
<i>Sampling 3</i>	0,01019	0,01019	0,02697	0,01019	0,01019
<i>Sampling 4</i>	0,00880	0,00880	0,02815	0,00880	0,00880
<i>Sampling 5</i>	0,01376	0,01376	0,02956	0,01376	0,01376
<i>Sampling 6</i>	0,01450	0,01450	0,02886	0,01450	0,01450
Rata-rata fraksi volume	0,01118	0,01118	0,02810	0,01101	0,01101

4. Nilai Densitas pada Variasi Frekuensi Ultrasonik

Kontur densitas pada Gambar 4 memperlihatkan bahwa Generator Gelembung Nano (GGN) berhasil menghomogenkan ozon dan air limbah tekstil secara efektif. Densitas tertinggi diperoleh pada frekuensi 20 kHz dan 40 kHz, menandakan tingkat pencampuran yang optimal antara kedua fluida ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan hasil simulasi, frekuensi sekitar 26 kHz direkomendasikan sebagai

titik operasi ideal karena memberikan keseimbangan terbaik antara efisiensi energi dan homogenisasi fluida.



Gambar 3.4 Kontur densitas pada penampang ultrasonik dengan frekuensi 20 kHz.

Tabel 3.2 Nilai densitas dari cairan untuk variasi frekuensi ultrasonik 20 kHz – 200 kHz.

Data Pengambilan	20 kHz	40 kHz	60 kHz	80 kHz	100 kHz
Sampling 1	992,023	994,352	994,352	970,839	982,775
Sampling 2	997,399	993,049	993,049	970,652	994,854
Sampling 3	995,898	994,681	994,681	971,321	988,040
Sampling 4	992,528	985,376	985,376	970,133	989,426
Sampling 5	993,772	997,007	997,007	968,732	984,481
Sampling 6	996,679	991,690	991,690	969,431	983,742
Rata-rata fraksi volume	994,717	992,693	992,693	970,185	987,220

Data Pengambilan	120 kHz	140 kHz	160 kHz	180 kHz	200 kHz
Sampling 1	982,775	982,775	970,839	982,775	982,775
Sampling 2	994,854	994,854	970,652	994,854	994,854
Sampling 3	988,040	988,040	971,321	988,040	988,040
Sampling 4	989,426	989,426	970,133	989,426	989,426
Sampling 5	984,481	984,481	968,732	984,481	984,481

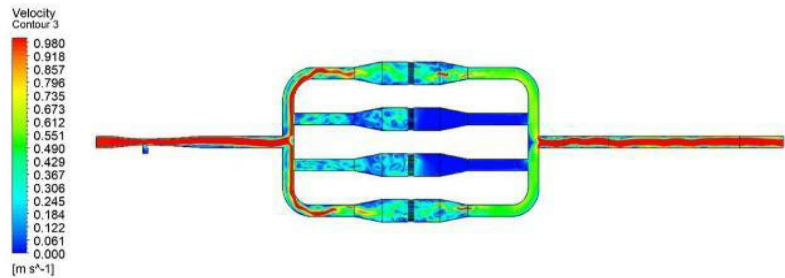
Data Pengambilan	20 kHz	40 kHz	60 kHz	80 kHz	100 kHz
Sampling 6	983,742	983,742	969,431	983,742	983,742
Rata-rata fraksi volume	987,220	987,220	970,185	987,220	987,220

5. Simulasi DFK untuk proses dengan Teknologi Ultrasonik Terintegrasi dengan TV-GGN.

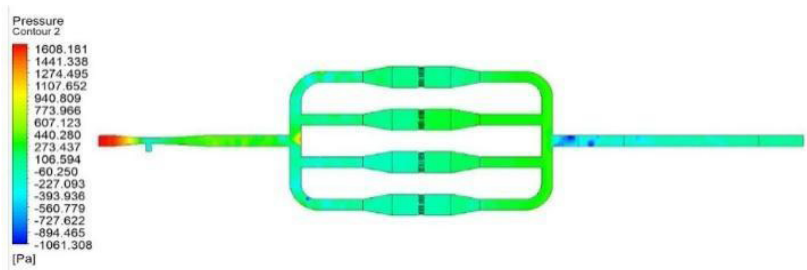
Simulasi gabungan sistem ultrasonik, Tabung Venturi (TV), dan GGN menunjukkan karakteristik hidrodinamik yang kompleks (Gambar 5–7). Gambar 5 memperlihatkan distribusi kecepatan fluida yang tidak merata, dengan kecepatan tertinggi berada pada saluran terluar GGN. Gambar 6 menunjukkan tekanan stabil sekitar 300 Pa di pipa GGN, dengan sedikit penurunan saat fluida keluar menuju sistem ultrasonik akibat efek getaran pada frekuensi 26 kHz.

Pada Gambar 7–9, terlihat bahwa proses pencampuran ozon dan air limbah belum sepenuhnya homogen di dalam pipa TV, namun meningkat signifikan setelah melewati saluran ultrasonik. Gambar 10 memperlihatkan sisa area di mana ozon belum sepenuhnya larut dalam aliran, mengindikasikan bahwa tahap homogenisasi utama terjadi pada zona ultrasonik.

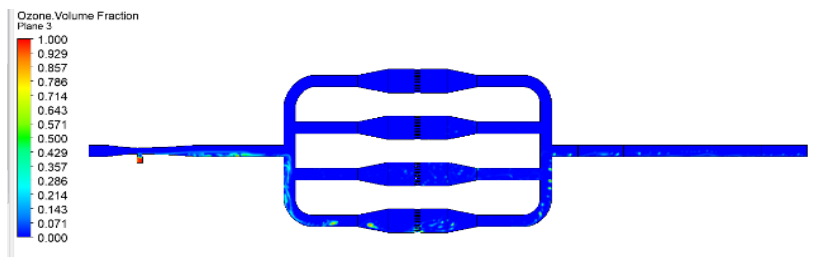
Berdasarkan parameter simulasi (Tabel 3), nilai Reynolds (Re) > 4000 menegaskan bahwa aliran bersifat turbulen, mendukung efisiensi pencampuran dan kestabilan sistem hidrodinamik secara keseluruhan.



Gambar 3.5 Kontur fraksi kecepatan kombinasi ultrasonik, TV dan GGN.



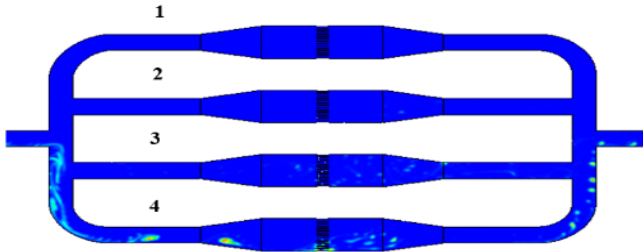
Gambar 3.6 Kontur fraksi tekanan kombinasi ultrasonik, TV dan GGN.



Gambar 3.7 Kontur fraksi volume kombinasi ultrasonik, TV dan GGN.



Gambar 3.8 Gambar Pipa TV.



Gambar 3.9 Saluran generator gelombang nano.



Gambar 3.10 Saluran ultrasonik.

Tabel 3. Hasil simulasi parameter menggunakan DFK.

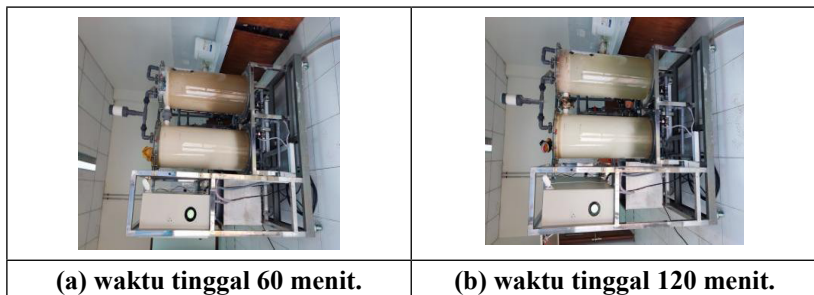
Parameter	Satuan	Parameter				
		Ozon	Masukan	TV	GGN	US
Ukuran pipa	m	0,0127	0,0254	0,0254	0,0508	0,0254
Kecepatan	m.s ⁻¹	0,0246	0,98	1,051	1,073	0,896
Densitas	Kg.m ⁻³	2,154	1060	988,50	993,40	984,97
Tekanan	Pa	101325,5	101325,5	100018,3	99363,5	99355,7
Re	-	69,40	24424,25	24433,87	25067,10	20760,70




Tabel 4. Hasil metrik *mesh*.

No	Item	Maksimum	Minimum	Rata-rata	Keterangan
1	Skewness	0,73204	0	0,05346	Terbaik
2	Kualitas Orthogonal	1	0,12106	0,9899	Terbaik

Air Limbah dengan Teknologi POL dan GGN

Gambar 11 menunjukkan hasil pengolahan tersier air limbah tekstil dengan sampel kode A-001, kode A-002, kode A-003, dan kode A-004 dengan volume L dan waktu proses 60-300 menit dengan rentang 60 menit. Pada proses kombinasi POL-GN, penghilangan warna pada air limbah tekstil diamati dengan jelas pada Gambar 13a. Perubahan kualitas air secara bertahap terlihat diutamakan pada tangki proses pertama yang berisi bahan baku dibandingkan dengan tangki proses kedua yang secara bertahap dipengaruhi oleh perlakuan. Dalam waktu pengolahan selama 120 menit, warna air berubah dari kecoklatan menjadi hijau pucat. Hal ini menunjukkan peningkatan kualitas air melalui perpanjangan waktu pengolahan dan sirkulasi terus menerus dari saluran air di sepanjang sistem air pemulihan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 11.b.



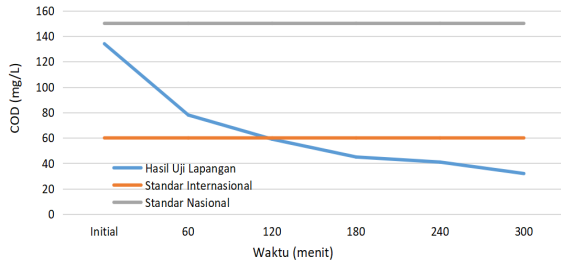
	
<p>(c) waktu tinggal 180 menit.</p>	<p>(d) waktu tinggal 240 menit.</p>
	
<p>(e) waktu tinggal 300 menit.</p>	

Gambar 3.11 Pengolahan tersier air limbah tekstil kode A-001 dengan kombinasi teknologi POL dan GN.

6. Hasil dan Pembahasan Analisa COD

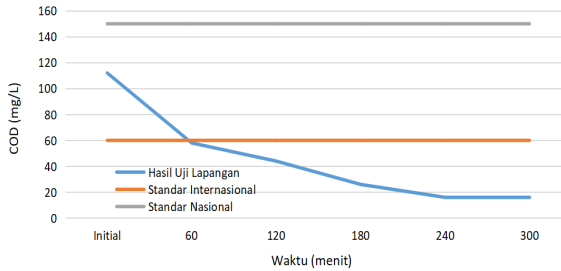
Analisis COD menunjukkan adanya penurunan kadar COD pada seluruh sampel uji (A-001 hingga A-004) dibandingkan sampel awal. Hasil ini mengindikasikan bahwa sistem pengolahan yang digunakan mampu menurunkan kandungan bahan organik dalam air limbah hingga mendekati batas aspiratif standar ZDHC sebesar 60 mg/L^{-1} . Hasil analisa COD terhadap sampel kode A-001 diperlihatkan pada Gambar 12a. Penurunan kadar COD dari air limbah pada point kode A-001 menunjukkan hasil positif penggunaan teknologi pada prototipe dengan penurunan mencapai 76,12 %. Hasil analisa COD terhadap sampel kode A-002 diperlihatkan pada Gambar 12b.

SCL 123



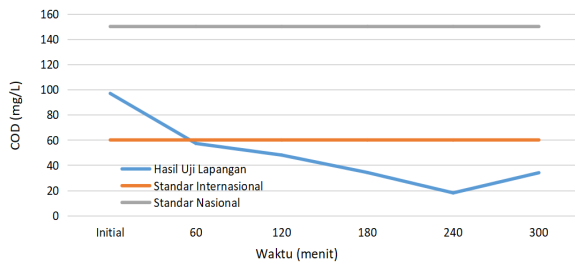
(a) Sampel kode A-001

SCL 4

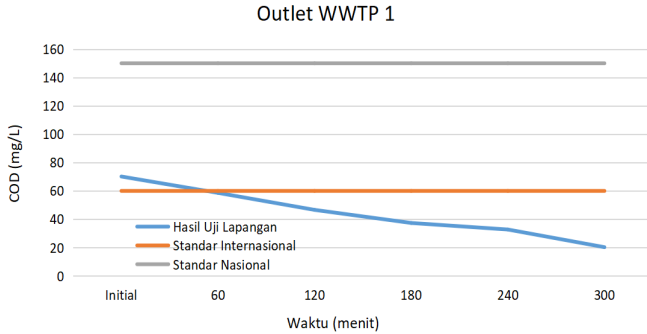


(b) Sampel kode A-002

SCL 56



(c) Sampel kode A-003



(d) Sampel kode A-004

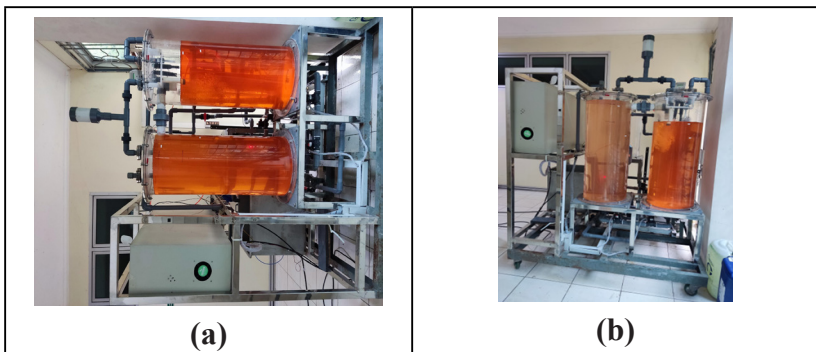
Gambar 3.12 Grafik hasil analisa COD terhadap sampel.

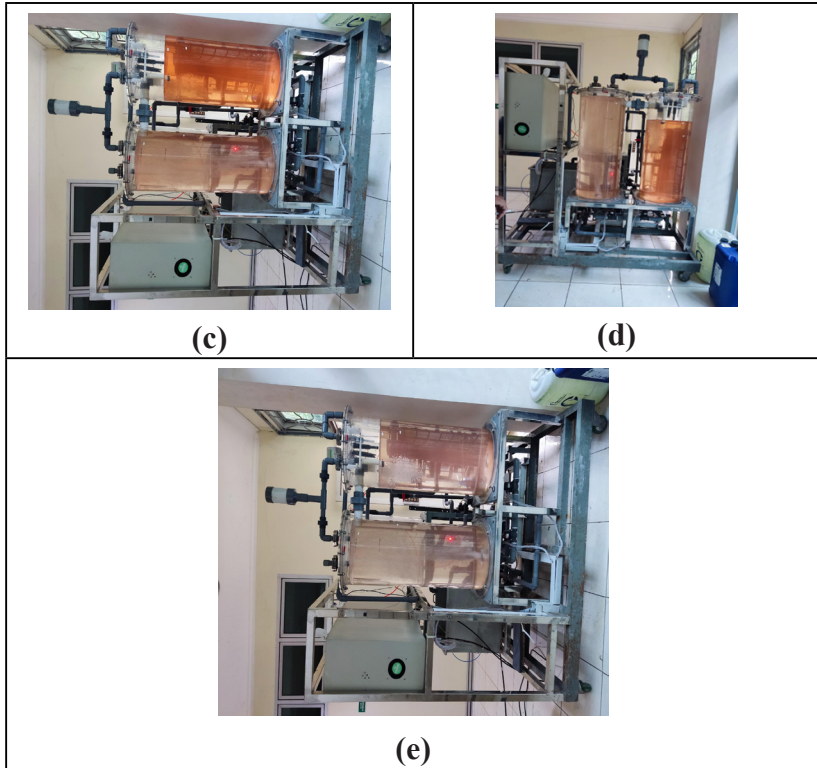
Penurunan kadar COD dari air limbah pada point kode A-002 menunjukkan hasil positif penggunaan teknologi pada prototipe dengan penurunan mencapai 85,71 %. Hasil analisa sampel kode A-003 diperlihatkan pada Gambar 12c. Penurunan kadar COD dari air limbah pada point kode A-003 menunjukkan hasil positif penggunaan teknologi pada prototipe dengan penurunan mencapai 64,92 %. Hasil analisa sampel kode A-004 diperlihatkan pada Gambar 12d. Penurunan kadar COD dari air limbah pada kode A-004 menunjukkan hasil positif penggunaan teknologi pada prototipe dengan penurunan mencapai 71,05 %. Mengacu pada Standar Internasional ZDHC, menetapkan batas maksimum kadar COD dalam sampel air limbah adalah 60 mg.L-1 (*aspirational limit*). Hasil analisa menunjukkan nilai memenuhi berkisar fungsi waktu sebesar 60 sampai 120 menit.

7. Air Limbah dengan Teknologi Ultrasonik Terintegrasi dengan POL dan GGN

Teknologi pengolahan air limbah berbasis ultrasonik yang terintegrasi dengan proses ozonasi (POL) dan Gelembung Gas Nano (GGN) terbukti efektif dalam menurunkan kadar pencemar pada limbah tekstil. Melalui kombinasi getaran ultrasonik, oksidasi ozon, dan pembentukan gelembung nano, sistem ini mampu mempercepat degradasi polutan dan meningkatkan kejernihan air secara signifikan. Hasil uji coba menunjukkan perubahan warna limbah dari pekat menjadi jernih, menandakan keberhasilan proses oksidasi lanjutan dalam menurunkan kadar COD hingga mendekati standar kualitas air yang ditetapkan.

Gambar 13 menunjukkan perubahan visual sampel air limbah tekstil (kode A-0005) selama proses uji coba menggunakan prototipe yang menggabungkan teknologi ultrasonik, POL, dan GGN. Pada gambar (a), air limbah tampak sangat pekat. Warna mulai memudar pada gambar (b), (c), dan (d) menunjukkan proses degradasi polutan. Gambar (e) menampilkan hasil akhir dengan warna yang jauh lebih jernih. Perubahan ini membuktikan bahwa integrasi teknologi berhasil menurunkan kadar pencemar secara signifikan.





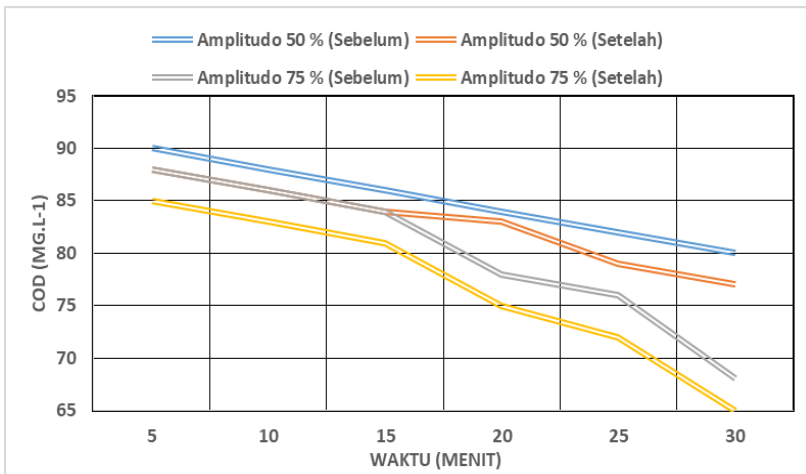
Gambar 3.13 Tampilan hasil perubahan warna air limbah tekstil artifisial

9. Air Limbah Tekstil Kode A-001(A) dan Kode A-002(B)

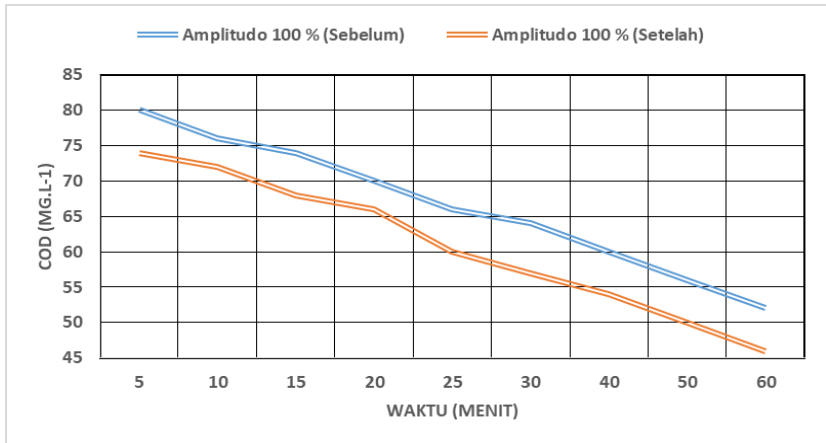
Sampel air limbah tekstil kode A-001(A) dan A-002(B) diolah menggunakan teknologi ultrasonik (26 kHz) dengan variasi amplitudo 50%, 75%, dan 100%, dikombinasikan dengan proses ozonasi ($0,0033 \text{ g} \cdot \text{detik}^{-1}$). Proses ini dirancang untuk mengevaluasi efektivitas kombinasi ultrasonik–ozon dalam menurunkan kandungan pencemar organik pada berbagai waktu kontak reaksi.

10. Hasil dan Analisis Nilai COD Sampel Kode A-001(A)

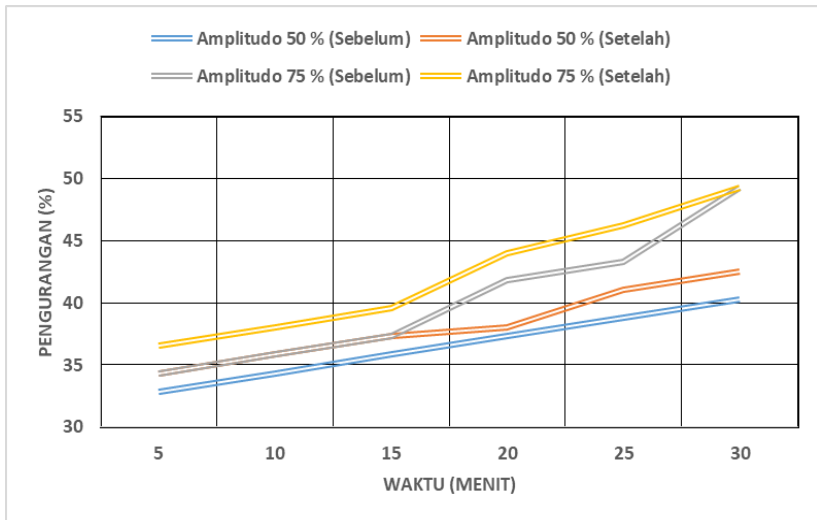
Hasil simulasi dan pengujian menunjukkan bahwa penggunaan ultrasonik amplitudo 100% dengan frekuensi 26 kHz mampu menurunkan nilai COD secara signifikan (Gambar 14). Kombinasi dengan ozonasi meningkatkan efisiensi pengolahan hingga 65,67%, menunjukkan bahwa interaksi antara gelombang ultrasonik dan oksidasi ozon menghasilkan reaksi degradasi organik yang lebih kuat. Nilai pH berkisar antara 7,42–7,76, tetap dalam batas aman sesuai baku mutu air limbah, sedangkan perubahan warna pada Gambar 14 memperlihatkan peningkatan kejernihan air hasil pengolahan akibat proses oksidasi ozon.



(a) Amplitudo 50% dan 75% , untuk parameter COD sampel kode A-001(A).

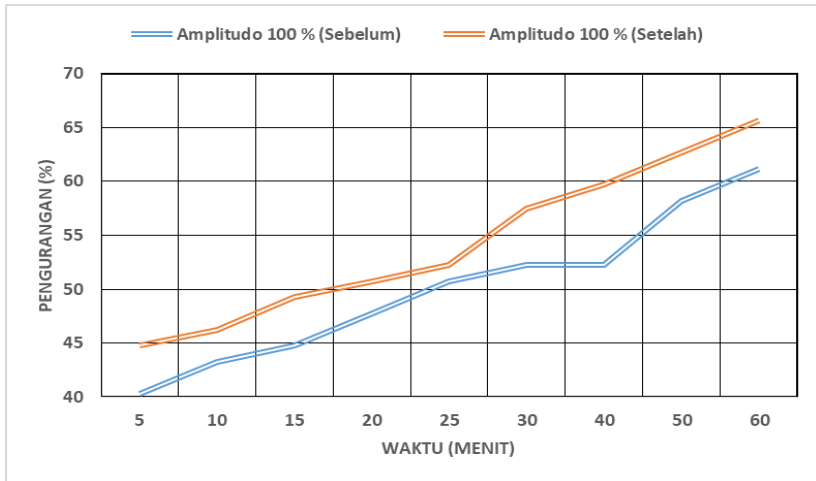


(b) Amplitudo 100%, untuk parameter COD setelah perlakuan ozon, sampel kode A-001(A).



(c) Amplitudo 50% dan 75%, untuk parameter COD, sebelum dan setelah perlakuan ozon, sampel kode A-001(A).

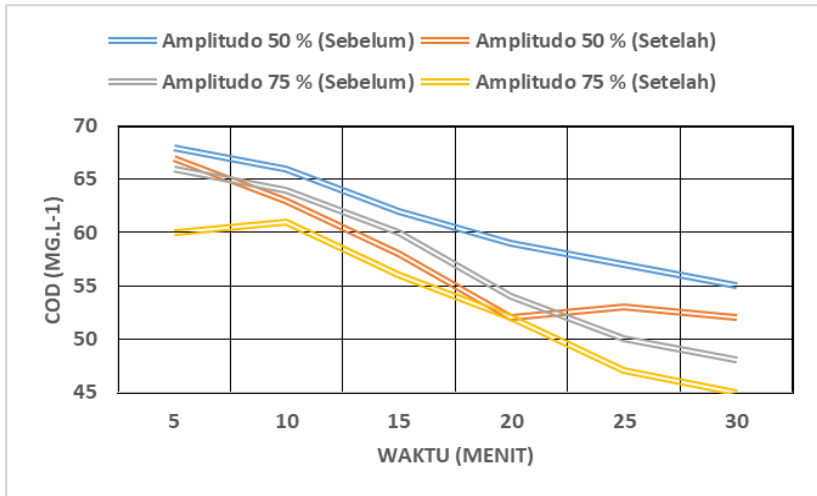
(d) Amplitudo 100%, untuk parameter COD, sebelum dan setelah perlakuan ozon, sampel kode A-001.



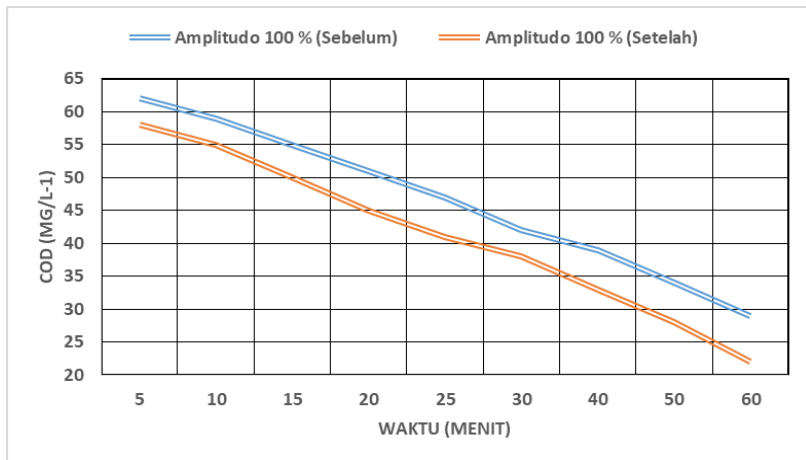
Gambar 3.14 Grafik hasil ultrasonik 26 kHz

11. Hasil dan Analisis Nilai COD Sampel Kode A-002(B)

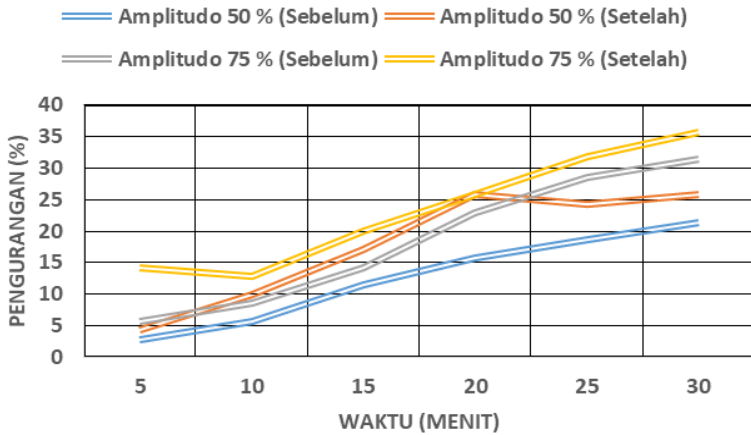
Perlakuan terhadap sampel A-002(B) menunjukkan pola yang serupa (Gambar 15). Penggunaan ultrasonik 26 kHz amplitudo 100% secara tunggal menurunkan COD sebesar 11,11%, sedangkan kombinasi dengan ozonasi meningkatkan efisiensi hingga 42,86%. Hasil ini menegaskan bahwa proses ozonasi memperkuat reaksi oksidatif melalui pembentukan radikal oksigen aktif (O^*), yang mempercepat degradasi senyawa organik pada air limbah tekstil.



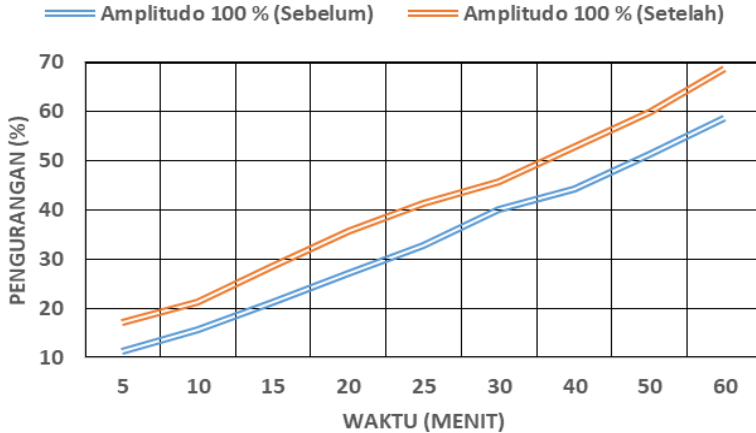
(a) Amplitudo 50% dan 75%, untuk parameter COD sampel kode A-002(B).



(b) Amplitudo 100%, untuk parameter COD setelah perlakuan ozon, sampel kode A-002(B)



(c) Amplitudo 50% dan 75%, untuk parameter COD, sebelum dan setelah perlakuan ozon, sampel kode A-001.



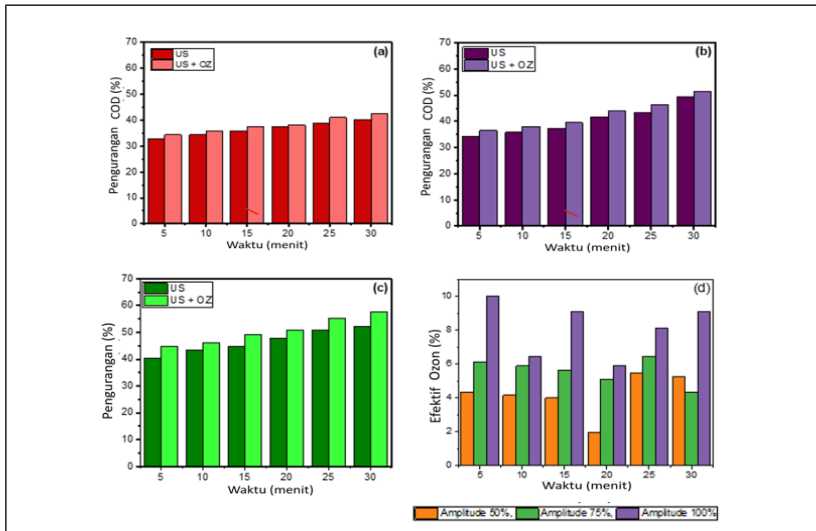
(d) amplitudo 100%, untuk parameter COD, sebelum dan setelah perlakuan ozon, sampel kode A-002.

Gambar 3.15 Grafik hasil ultrasonik 26 kHz.

12. Penurunan COD Air Limbah Tekstil

Peningkatan daya ultrasonik meningkatkan penghancuran polutan organik. Nilai COD tinggi berdampak buruk pada lingkungan dan kesehatan. Studi juga menghubungkan daya listrik dan amplitudo.

Penemuan ini mencapai batas aspirasional standar internasional ZDHC ($60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) hanya dalam waktu 25 menit. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kombinasi ultrasonik dan ozon memiliki potensi besar untuk diterapkan sebagai solusi pengolahan tersier yang efisien. Terlihat pada Gambar 16 (a), (b), dan (c) menunjukkan pengurangan COD seiring waktu dengan berbagai amplitudo. Efluen memiliki COD di bawah $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, tertinggi pada amplitudo 100%, penurunan 57,5% menjadi $57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ dalam 30 menit. Gambar 16 (c) dan (d) untuk pembentukan ion radikal dari pirolisis air oleh ozon.



Gambar 3.16 Penurunan COD efluen menggunakan (a) amplitudo 50%, (b) amplitudo 75%, (c) amplitudo 100%, dan (d) Efektivitas ozonisasi dalam proses penurunan.

IV. EFISIENSI PENGOLAHAN AIR LIMBAH

Efisiensi pengolahan air limbah dalam penelitian ini ditunjukkan melalui kemampuan sistem ultrasonik–Proses Oksidasi Lanjut (POL)–Generator Gelembung Nano (GGN) dalam menurunkan nilai Chemical Oxygen Demand (COD) secara signifikan hingga mencapai $< 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Nilai tersebut jauh di bawah baku mutu nasional untuk air limbah tekstil atau industri rayon berdasarkan Permen LHK No. P.16/2019 yang mensyaratkan $\text{COD} < 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, serta telah memenuhi standar internasional ZDHC MMCF Guidelines Version 1.0 (2020) baik untuk kategori progresif ($\text{COD} < 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) maupun aspirasional ($\text{COD} < 60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Efisiensi tinggi ini diperoleh melalui sinergi tiga mekanisme utama, yaitu gelombang ultrasonik yang mempercepat disintegrasi molekul organik dan memperluas area kontak reaksi, proses oksidasi lanjut (AOP) yang menghasilkan radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) berkekuatan oksidatif tinggi untuk menguraikan senyawa kompleks, serta Generator Gelembung Nano (GGN) yang meningkatkan kelarutan ozon dan memperbesar luas permukaan reaksi antar fase gas–cair. Kombinasi ketiga proses tersebut menghasilkan sistem pengolahan yang bekerja secara simultan, lebih cepat, stabil, dan efisien dalam menurunkan konsentrasi polutan dibandingkan metode konvensional.

A. Analisis Tekono-Ekonomi Pengolahan Air Limbah

Analisis tekno-ekonomi pengolahan limbah air gambut hanya menggunakan teknologi Proses Oksidasi Lanjut, dan reverse osmosis maupun pengolahan limbah air tekstil di PT. X menggunakan kombinasi Ultrasonik, Proses Oksidasi Lanjut, dan Generator Gelembung Nano menunjukkan efisiensi tinggi, terutama setelah

penerapan peraturan Kementerian No. 16 Tahun 2019 yang mewajibkan daur ulang. Kombinasi ini memungkinkan air olahan digunakan kembali sebagai air bersih, yang sulit dicapai dengan teknologi tunggal. Sistem otomatisasi dengan *Variable Speed Drive (VSD)* juga meningkatkan efisiensi dan menekan biaya operasional, mendukung pengolahan limbah yang ekonomis, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. PT. X membutuhkan sistem pengolahan ini untuk menangani kapasitas limbah sebesar 1.500 m³ per jam selama 24 jam operasi agar memenuhi standar nasional kualitas air limbah. Penerapan Proses Oksidasi Lanjut (POL), Generator Gelembung Nano (GGN) dinilai efisien karena mampu menurunkan beban pencemar secara signifikan dengan konsumsi energi dan bahan kimia yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Berdasarkan hasil kajian teknis dan perhitungan komparatif terhadap sistem konvensional, efisiensi energi pada teknologi ini diperkirakan meningkat hingga sekitar 30%, sedangkan kebutuhan bahan kimia penunjang berkurang lebih dari 40%. Estimasi tersebut diperoleh dari hasil simulasi operasi skala pilot dan referensi studi serupa pada sistem oksidasi lanjutan. Secara ekonomi, penghematan ini berdampak signifikan terhadap biaya operasional dengan perkiraan periode pengembalian investasi (payback period) sekitar 3–5 tahun, tergantung volume limbah yang diolah dan kondisi infrastruktur awal.

Implementasi

- a. Perencanaan pembangunan instalasi pengolahan air limbah berkapasitas 1.500 m³ per jam dirancang menggunakan kombinasi teknologi ultrasonik, ozonasi, dan gelembung nano yang efisien serta ramah lingkungan. Berdasarkan spesifikasi teknis, sistem ini diperkirakan membutuhkan investasi awal sekitar Rp8–10 miliar untuk pengadaan mesin utama, termasuk pompa 90–110 kW, generator ozon berkapasitas 4–5 kg O₃ per jam, serta unit ultrasonik dan nano bubble generator berkapasitas 30–40 L/menit. Dengan efisiensi energi dan pengurangan bahan kimia

yang signifikan, sistem ini diharapkan dapat mengembalikan modal dalam waktu 3–5 tahun, sambil tetap memenuhi standar kualitas air limbah industri secara berkelanjutan.

- b. **Pengadaan Peralatan dengan Teknologi Ultrasonik Terintegrasi POL dan GGN:** Perolehan peralatan menggunakan teknologi terbaru, yakni sistem penggunaan teknologi Ultrasonik yang terintegrasi dengan Proses Oksidasi Lanjut (POL) dan Generator Gelembung Nano (GGN) untuk pengolahan air limbah tekstil. Teknologi ini tidak melibatkan penggunaan bahan kimia, sehingga aman bagi lingkungan.
- c. **Uji Coba dan Pengoptimalan:** Pasca-pembangunan instalasi, dilakukan uji coba dan pengoptimalan sistem guna memastikan bahwa instalasi pengolahan air dapat beroperasi sesuai target.

Manfaat yang akan didapatkan:

- a. **Penghematan Biaya:** Hasil evaluasi teknis menunjukkan bahwa mesin dan sistem pengolahan yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat diterapkan pada skala industri dengan kapasitas hingga 1.500 m³ per jam. Penerapan sistem ini berpotensi menurunkan biaya pengolahan air per meter kubik melalui efisiensi energi, pengurangan penggunaan bahan kimia, serta optimalisasi proses oksidasi dan pencampuran. Dengan demikian, industri manufaktur dapat memperoleh penghematan biaya operasional secara signifikan.
- b. **Pemenuhan Kebutuhan Air:** Sistem yang dirancang memiliki fleksibilitas tinggi dan dapat disesuaikan dengan debit besar secara kontinu, sehingga mampu memastikan pasokan air olahan dengan kualitas sesuai standar nasional dan internasional. Hal

ini memungkinkan proses produksi industri berjalan stabil tanpa gangguan akibat keterbatasan pasokan atau penurunan mutu air.

- c. Pengelolaan Lingkungan: Penerapan sistem ultrasonik–Proses Oksidasi Lanjut (POL)–Generator Gelembung Nano (GGN) dalam kapasitas besar terbukti mengurangi beban pencemar secara signifikan, menurunkan nilai COD dan warna limbah di bawah ambang baku mutu, serta memperkecil dampak negatif terhadap ekosistem perairan. Dengan efisiensi tinggi dan jejak lingkungan yang lebih rendah, sistem ini berkontribusi langsung terhadap praktik industri berkelanjutan dan pengelolaan lingkungan yang lebih bertanggung jawab. Keputusan strategis CapEx membutuhkan pengambilan keputusan strategis yang matang karena jumlahnya yang besar dan dampak jangka panjangnya, sedangkan pengeluaran OpEx bersifat rutin dan tidak memerlukan keputusan strategis yang kompleks.
- d. Perhitungan untuk menentukan biaya per m^3 : Untuk memastikan kelayakan ekonomi dan efektivitas implementasi sistem pengolahan air limbah berkapasitas $1.500 m^3$ per jam, perlu disusun rencana bisnis (business plan) yang mencakup analisis biaya investasi, operasional, serta potensi penghematan jangka panjang. Berdasarkan data awal, PT. X mengoperasikan dua unit instalasi pengolahan, yaitu WWTP 1 ($1.100 m^3$ /jam) dan WWTP 2 ($400 m^3$ /jam) dengan biaya operasional sekitar USD 0,30 per m^3 atau setara dengan Rp 4.500 per m^3 (kurs Rp 15.000/USD). Penerapan teknologi Ultrasonik–Proses Oksidasi Lanjut (POL)–Generator Gelembung Nano (GGN) berpotensi menghilangkan biaya tetap penggunaan bahan kimia senilai sekitar Rp 29,56 miliar per tahun. Dengan total volume air yang diolah mencapai sekitar 13,14 juta m^3 per tahun, sistem ini berpotensi menghasilkan penghematan operasional sebesar \pm USD 0,15 per m^3 , atau sekitar 50% dari total biaya pengolahan eksisting. Untuk kapasitas tersebut, investasi awal yang dibutuhkan diperkirakan mencapai Rp8–10 miliar,

dengan periode pengembalian modal sekitar 3–5 tahun. Nilai ini menunjukkan bahwa penerapan sistem pengolahan berbasis teknologi ultrasonik dan oksidasi lanjut memiliki kelayakan ekonomi yang kuat serta efisiensi jangka panjang.

Hasil terbaik dari penelitian ini ditandai dengan:

1. Meminimalisir penggunaan bahan kimia
2. Pemeliharaan lebih mudah, karena menggunakan listrik
3. Baku mutu dapat mengacu standar Nasional dan Internasional

Teknologi pengolahan air gambut yang dikembangkan ini merupakan hasil inovasi berbasis penelitian sebelumnya, yang telah memperoleh perlindungan hukum melalui paten terdaftar. Inovasi tersebut kini diadaptasikan untuk meningkatkan kinerja sistem pengolahan limbah industri melalui integrasi teknologi ultrasonik, proses oksidasi lanjut, dan gelembung nano, sehingga memberikan solusi yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan bernilai ekonomi tinggi.

V. KESIMPULAN

Instrumentasi dan kontrol adalah kunci untuk masa depan industri yang efisien dan bertanggung jawab. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengembangan sistem dalam pengolahan air limbah tekstil, memberikan solusi yang kuat dan terukur.

Melalui integrasi teknologi ultrasonik dengan kontrol presisi (POL dan GGN), penelitian ini berhasil menciptakan sebuah sistem yang mampu memantau dan mengontrol proses secara real-time. Sistem ini memastikan proses pengolahan berjalan efisien, stabil, dan yang terpenting, aman.

Integrasi teknologi ini menawarkan solusi potensial bagi industri tekstil dalam upaya pengolahan dan pemanfaatan kembali air limbah menjadi air bersih yang memenuhi standar baku mutu nasional dan internasional. Namun, untuk memastikan implementasinya layak secara komersial, diperlukan kajian tekno-ekonomi yang komprehensif. Kajian tersebut perlu mencakup analisis investasi awal, biaya operasional, efisiensi energi, serta potensi penghematan dari substitusi bahan kimia dan pengurangan penggunaan air baku. Hasil kajian tekno-ekonomi akan menjadi dasar penting untuk menilai sejauh mana sistem ini efisien, berkelanjutan, dan memberikan nilai tambah ekonomi bagi industri, sekaligus memastikan bahwa penerapannya tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga feasible secara finansial.

VI. PENUTUP

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi terus mendorong transformasi besar dalam dunia industri, termasuk peningkatan tuntutan terhadap efisiensi, keandalan, dan keselamatan sistem. Persaingan global menuntut penerapan prinsip efisiensi tinggi dalam waktu, energi, dan sumber daya, sehingga bidang instrumentasi dan kontrol memegang peran strategis dalam mewujudkan industri yang tangguh dan berkelanjutan.

Sebagai bagian dari upaya tersebut, hasil penelitian ini diharapkan dapat terus dikembangkan agar mencapai tingkat kesempurnaan teknis dan ekonomis yang lebih tinggi. Dengan peningkatan akurasi sistem kontrol, optimalisasi proses ultrasonik, serta integrasi teknologi cerdas berbasis data dan otomasi, sistem ini berpotensi menjadi solusi riil dalam pengolahan air limbah industri di masa mendatang. Penerapannya diharapkan tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga memperkuat komitmen industri terhadap prinsip keberlanjutan dan ramah lingkungan, sejalan dengan arah pembangunan industri hijau nasional.

Terakhir, Saya ingin meyakinkan bahwa hasil riset kami ini memiliki dampak yang signifikan untuk memenuhi kebutuhan masyarakat dalam bidang penyediaan air melalui kolaborasi dan sinergisitas dengan berbagai pihak sekaligus meningkatkan kemandirian bangsa kita

VII. UCAPAN TERIMA KASIH

Pada akhir orasi pengukuhan Profesor Riset ini, izinkan saya mengucapkan terima kasih, penghargaan, dan diberikan kepada semua pihak yang telah membantu dan mendukung karier fungsional saya sebagai peneliti. Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Presiden Republik Indonesia, Bapak Prabowo Subiyanto, dan Presiden Republik Indonesia ke-7 Ir. H. Joko Widodo atas penetapan peneliti ahli utama saya dan Kepala BRIN Prof. Dr. Arif Satria, S.P., M.Si., dan Kepala BRIN periode 2021-2025 Dr. Laksana Tri Handoko atas penetapan saya sebagai Peneliti Ahli Utama, juga kepada Wakil Kepala BRIN, Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, ST., M.Si., DESD., IPU., ASEAN.Eng. Ucapan terima kasih dan diberikan juga saya sampaikan kepada Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset BRIN, Prof.Ir, Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE, Ph.D.; Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset BRIN, Prof.Dr.Ir. Zainal Arifin, M.Sc.; Tim Penelaah Naskah Orasi Prof.Dr. Andria Agusta, Prof.Dr.Ir. Ekowati Chasanah, M.Sc., dan Prof.Dr.Ir. Yuli Widiyastuti, M.Sc. yang telah memberikan saran dan masukan sehingga naskah orasi ini layak disampaikan pada sidang pengukuhan terbuka ini. Kepada Plt. Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Aries Suestiningtyas, S.IP., M.A.; Kepala BOSDM-BRIN, Ratih Retno Wulandari, S.Sos., M.Si; serta Panitia Pelaksana Orasi Pengukuhan Profesor Riset. Pada kesempatan ini saya menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih atas bantuan yang diberikan sampai dengan pengukuhan saya sebagai Profesor Riset pada hari ini Pada kesempatan ini, saya juga mengucapkan terima kasih terima kasih kepada Penelaah Naskah Orasi Prof.Dr. Ir. Bambang Prasetya M.Sc, Prof.Dr. Nurul Taufiqu Rohman, PhD, M.Eng, dan Prof.Dr. Aris Mukimin, S.Si., M.Si dan Prof.Dr. Deddy Kurniadi, M.Eng, Kepala Organisasi Riset Energi Manufaktur, Prof. Dr. Cuk Supriyadi Ali

Nandar, ST., M.Eng; Kepala Pusat Riset Tekonologi Lingkungan dan Teknologi Bersih Dr. Ario Betha Juanssilfero. M.SC; Kepala Pusat Riset Teknologi Pengujian dan Standar Himma Firdaus, S.T., M.T., Ph.D pada periode 2025 dan Dr. Teguh Muttaqie, S.T., M.Sc pada periode 2024-2025 yang telah mendorong untuk Orasi Pengukuhan Profesor Riset; Pembimbing Utama S-3 di ITB Prof. Dr. Deddy Kurniadi, M.Eng. Selanjutnya Pembimbing S-3 lainnya yaitu Prof. Dr. Nurul Taufiqu Rochman, M.Eng., Ir. V. Sri Harjati Suhardi, PhD, membimbing dan mengarahkan dalam penyusunan Disertasi; Para panelis penguji: Prof. Dr. Suprijanto, S.T., M.T.; Prof. Dr.-Ing. Ir. Priyono Soetikno; Prof. Ir Tjandra Setiadi, M.Eng., PhD; Dr. Rahmat Romadhon, S.T., M.T.; Dr. Suyatman.; Dr. Ir. Firdaus Ali, M. Sc.; selaku panelis pada program Doktor Teknik Fisika – ITB yang telah memberikan ilmu penunjang selama mengikuti ujian program sekolah Doktor; yang telah membimbing dan mengarahkan metode penelitian dalam penelitian ini; Para Dosen: Prof. Hermawan Kresno Dipojono, Ph.D.; Ir. F.X. Nugroho Soelami M. BEnv., Ph.D.; Dr. Endang Juliastuti, M.S., selaku dosen pada program Doktor Teknik Fisika – ITB yang telah memberikan ilmu penunjang selama mengikuti perkuliahan program sekolah Doktor.

Bapak Prof. Brian Yulianto, S.T., M.Eng., Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri - ITB periode 2020-2025 yang telah memberikan arahan di Program Studi Doktoral Teknik Fisika - Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Bandung (ITB). Ucapan terima kasih saya ucapkan kepada Retno Kustiah Widiati dan rekan alumni SMP Pusdik-int Cimahi serta ucapan terima kasih saya ucapkan kepada seluruh peneliti Pusat Riset Teknologi Pengujian dan Standar, yang telah memberikan dukungan selama ini sampai menjadi Profesor Riset di BRIN.

Terima kasih saya ucapkan kepada kedua orang tua Alm. Bapak Justin Hutagalung. dan, Alm. Ibu Rouli br. Tobing. yang telah mendidik dan membesarkan saya dengan segala jerih payah yang

mereka lalui; kepada kakak dan adik kandung saya (5 orang), Tina Tiurma br. Hutagalung dan Alm. suami; Budi Santoso Hutagalung dan istri; Tuti Herlinawati br. Hutagalung dan suami; Intan Sri Tiomina br. Hutagalung dan suami; serta David Binsar Hutagalung dan istri yang selama ini ini memberikan dukungan dan dorongan terhadap keinginan dan cita-cita saya. Terima kasih teruntuk istri saya, Alm. Lili Rishandiari dan ketiga anak kami, Anna Christiana dan Suami; Andrian Kristianto Hutagalung dan Istri; Riyan Saputra Hutagalung dan Istri beserta cucu-cucu (8 orang) Naura Salvina Rouli, Keisha Azzahra Rouli, Lathisa Rouli Almahira br. Hutagalung, Shanum Andrea Ronauli br. Hutagalung, Rayi Halomoan Hutagalung, Camilla Azzahra Rauli br. Hutagalung, Umar Justinandra Putra Hutagalung, dan Maryam Anara Rauli br. Hutagalung yang mendukung, membantu, dan mendampingi saya selama ini dalam keadaan suka dan duka. Akhir kata, terima kasih saya sampaikan kepada seluruh undangan yang hadir sehingga acara ini dapat berlangsung terselenggara dengan baik dan mendengarkan orasi ini dengan penuh kesabaran sampai akhir. Puji Tuhan, saya mengakhiri orasi ilmiah ini dan mohon maaf atas kekurangan dan kekhilafan dalam menyampaikan orasi ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abinaya, S., Saraswathi, R., Rajamohan, S., & Mohammed Siraj Ansari, M. (2018). Phyto-remediation of total dissolved solids (TDS) by *Eichhornia Crassipes*, *Pistia Stratiotes* and *Chrysopogon Zizanioides* from second stage RO-Brine solution. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 22(5), 36–41.
- Adegoke, K. A., & Bello, O. S. (2015). Dye sequestration using agricultural wastes as adsorbents. *Water Resources and Industry*, 12, 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2015.09.002>
- Al-Hashimi, A. M., Mason, T. J., & Joyce, E. M. (2015). Combined Effect of Ultrasound and Ozone on Bacteria in Water. *Environmental Science and Technology*, 49(19), 11697–11702. <https://doi.org/10.1021/es5045437>
- Ang, K. H., Chong, G., & Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559–576. <https://doi.org/10.1109/TCST.2005.847331>
- Antonopoulou, M., Vlastos, D., & Konstantinou, I. (2015). Photocatalytic degradation of pentachlorophenol by N-F-TiO₂: Identification of intermediates, mechanism involved, genotoxicity and ecotoxicity evaluation. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 14(3), 520–527. <https://doi.org/10.1039/c4pp00254g>
- Atkinson, A. J., Apul, O. G., Schneider, O., Garcia-Segura, S., & Westerhoff, P. (2019). Nanobubble Technologies Offer Opportunities to Improve Water Treatment. *Accounts of Chemical Research*, 52(5), 1196–1205. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00606>
- Babanezhad, M., Rezakazemi, M., Marjani, A., & Shirazian, S. (2021). Predicting Air Superficial Velocity of Two-Phase Reactors

- Using ANFIS and CFD. *ACS Omega*, 6(1), 239–252. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04386>
- Chen, Y., Jiang, X., Yang, M., & Wang, Z. (2025). Biotechnology revival: in situ sludge minimization in wastewater. *Frontiers in Microbiology*, 16(May), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1603215>
- Chiu, Y. H., Chang, T. F. M., Chen, C. Y., Sone, M., & Hsu, Y. J. (2019). Mechanistic insights into photodegradation of organic dyes using heterostructure photocatalysts. *Catalysts*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/catal9050430>
- Copeland, B. (2008). The Design of PID Controllers using Ziegler Nichols Tuning. Retrieved, March, March, 1–4. http://educyclopedia.karadimov.info/library/Ziegler_Nichols.pdf
- Dominguez, C. M., Oturan, N., Romero, A., Santos, A., & Oturan, M. A. (2018). Optimization of electro-Fenton process for effective degradation of organochlorine pesticide lindane. *Catalysis Today*, 313(August 2017), 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.10.028>
- Ensano, B. M. B., Borea, L., Naddeo, V., Belgiorno, V., de Luna, M. D. G., & Ballesteros, F. C. (2017). Removal of pharmaceuticals from wastewater by intermittent electrocoagulation. *Water (Switzerland)*, 9(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/w9020085>
- Gągol, M., Przyjazny, A., & Boczkaj, G. (2018). Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review. *Chemical Engineering Journal*, 338, 599–627. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>
- Hübner, U., Spahr, S., Lutze, H., Wieland, A., Rüting, S., Gernjak, W., & Wenk, J. (2024). Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – Guidance for systematic future research. *Heliyon*, 10(9), e30402. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30402>

- Hutagalung, S. S. (n.d.-a). BUKU SOLUSI KOMSUMSI AIR GAMBUT APLIKASI TEKNOLOGI SISTEM AOPRO 2019. pdf.
- Hutagalung, S. S. (n.d.-b). Z SISTEM PENGOLAHAN AIR GAMBUT 2015.pdf.
- Hutagalung, S. S. (2019a). Effect of Release Coefficient of Orifice Plate on Water Fluid Flow Systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 1230(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1230/1/012086>
- Hutagalung, S. S. (2019b). Estimation Optimal Value of Discharge Coefficient in a Venturi Tubes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1230(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1230/1/012087>
- Hutagalung, S. S. (2019c). Optimasi Penalaan Kontroler Pid Pada Instalasi Pengolahan Air Gambut. *Instrumentasi*, 42(1), 61. <https://doi.org/10.14203/instrumentasi.v42i1.98>
- Hutagalung, S. S., Kurniadi, D., Rochman, N. T., Suhardi, S. H., & Khotimah, K. (2021). Ultrasonic-Advanced Oxidation Process-Nanobubble System Design for Textile Wastewater Treatment using PLC. *Proceedings of the 2021 International Conference on Instrumentation, Control, and Automation, ICA 2021, June 2023*, 22–27. <https://doi.org/10.1109/ICA52848.2021.9625690>
- Hutagalung, S. S., Muchlis, I., & Khotimah, K. (2020). Textile Wastewater Treatment using Advanced Oxidation Process (AOP). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 722(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/722/1/012032>
- Hutagalung, S. S., Muchlis, I., Herlambang, B., & Turnip, A. (2014). Removal of chemical and biological contaminants on peat water by ozone-based advanced oxidation processes with reverse osmosis. *AIP Conference Proceedings*, 1589, 229–233. <https://doi.org/10.1063/1.4868780>

- Hutagalung, S. S., Muchlis, I., & Turnip, A. (Mei 2014). Development of Peat Water Treatment Technology based on Advanced Oxidation Processes with O₃-UV-H₂O₂. Prosiding ICRAMET 2014, Batam, Indonesia
- Hutagalung, S. S., Imamul Muchlis, Bambang Herlambang, & Arjon Turnip (2021). State of the Art: Ozone Plasma Technology for Water Purification. *Engineering Journal*, 25(1), 177–186. <https://doi.org/10.4186/ej.2021.25.1.177>
- Hutagalung, S. S., Turnip, A., Muchlis, I. (2015). Advanced Oxidation Processes with O₃-UV-H₂O₂ and Reverse Osmosis Controlled PLC for Water Purification. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 12(12), 3635–3638. <https://doi.org/10.1166/asl.2015.6547>
- Hutagalung, S. S., Rafryanto, A. F., Sun, W., Juliasih, N., Aditia, S., Jiang, J., Arramel, Dipojono, H. K., Suhardi, S. H., Rochman, N. T., & Kurniadi, D. (2023). Combination of ozone-based advanced oxidation process and nanobubbles generation toward textile wastewater recovery. *Frontiers in Environmental Science*, 11(March), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1154739>
- Hutagalung, S. S. (2020). Peat Water Treatment using oxidation and physical filtration system and its performance in reducing iron (Fe), turbidity, and color. *E3S Web of Conferences*, 148, 07011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014807011>
- Jawale, R. H., & Gogate, P. R. (2018). Combined treatment approaches based on ultrasound for removal of triazophos from wastewater. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.02.019>
- Jun, Y. W., Huh, Y. M., Choi, J. S., Lee, J. H., Song, H. T., Kim, S., Yoon, S., Kim, K. S., Shin, J. S., Suh, J. S., & Cheon, J. (2005). Nanoscale Size Effect of Magnetic Nanocrystals and Their Utilization for Cancer Diagnosis via Magnetic Resonance

- Imaging. *Journal of the American Chemical Society*, 127(16), 5732–5733. <https://doi.org/10.1021/ja0422155>
- Kokkinos, P., Venieri, D., & Mantzavinos, D. (2021). Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Viral Disinfection. A Systematic Review. *Food and Environmental Virology*, 13(3), 283–302. <https://doi.org/10.1007/s12560-021-09481-1>
- Kumar, A. (2017). A Review on the Factors Affecting the Photocatalytic Degradation of Hazardous Materials. *Material Science & Engineering International Journal*, 1(3), 106–114. <https://doi.org/10.15406/mseij.2017.01.00018>
- Mahvi, A. H. (2009). Application of ultrasonic technology for water and wastewater treatment. *Iranian Journal of Public Health*, 38(2), 1–17.
- Merouani, S., Ferkous, H., Hamdaoui, O., Rezgui, Y., & Guemini, M. (2015). A method for predicting the number of active bubbles in sonochemical reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.07.015>
- Mo, C. R., Wang, J., Fang, Z., Zhou, L. M., Zhang, L. J., & Hu, J. (2018). Formation and stability of ultrasonic generated bulk nanobubbles. *Chinese Physics B*, 27(11). <https://doi.org/10.1088/1674-1056/27/11/118104>
- Nirmalkar, N., Pacek, A. W., & Barigou, M. (2019). Bulk Nanobubbles from Acoustically Cavitated Aqueous Organic Solvent Mixtures. *Langmuir*, 35(6), 2188–2195. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b03113>
- Ovatman, T., Aral, A., Polat, D., & Ünver, A. O. (2016). An overview of model checking practices on verification of PLC software. *Software and Systems Modeling*, 15(4), 937–960. <https://doi.org/10.1007/s10270-014-0448-7>
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE*

Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans., 30(3), 286–297. <https://doi.org/10.1109/3468.844354>

Rao, K. S., & Mishra, R. (2014). Comparative study of P, PI and PID controller for speed control of VSI-fed induction motor. 2(2), 2740–2744. <http://www.ijedr.org/papers/IJEDR1402230.pdf>

Reddy Ramireddy, V. S., Kurakula, R., Velayudhaperumal Chellam, P., James, A., & van Hullebusch, E. D. (2023). Systematic computational toxicity analysis of the ozonolytic degraded compounds of azo dyes: Quantitative structure-activity relationship (QSAR) and adverse outcome pathway (AOP) based approach. *Environmental Research*, 231(P2), 116142. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116142>

Hutagalung, S. S., Khotimah, K., Fudja Rafryanto, A., Harjati Suhardi, S., & Tauqu Rochman, N. (2023). COD Removal in Organic Dyes Using Ultrasonication-Ozonation: Computational and Experimental Study. 1–15. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3348806/v1>

Sereda, E. N., Bronshtein, E. M., Rachev, S. T., Fabozzi, F. J., Sun, W., & Stoyanov, S. (n.d.). Distortion Risk Measures in Portfolio Optimization Professor in the Practice of Finance Yale School of Management. 1–27.

Shalaby, M. S., Naddeo, V., Borea, L., Abdallah, H., Shaban, A. M., Zarra, T., & Belgiorno, V. (2018). Development of highly flux antifouling polyethersulfone membranusing compacted woven support. *Desalination and Water Treatment*, 127(September 2017), 83–89. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22593>

Sinha, A., Mata Vaishno, S., Sharma, A., & Sinha, A. K. (2018). Ultrasonic Testing for Mechanical Engineering Domain: Present and Future Perspective. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 7(2), 243–253. <https://doi.org/10.22105/riej.2018.100730.1018>

- Tavangar, T., Jalali, K., Alaei Shahmirzadi, M. A., & Karimi, M. (2019). Toward real textile wastewater treatment: Membrane fouling control and effective fractionation of dyes/inorganic salts using a hybrid electrocoagulation – Nanofiltration process. *Separation and Purification Technology*, 216(January), 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.070>
- Turnip, A., Hutagalung, S. S., Muchlis, I., & Faizal Amri, M. (2017). Peat water treatment based wireless data acquisition system for flexible remote monitoring. *Internetworking Indonesia Journal*, 9(1), 27–32.
- Turnip, A., Soetraprawata, D., & Hutagalung, S. (2014). Integrated of advanced oxidation processes with reverse osmosis for water treatment.
- Turnip, A., & Hutagalung, S. (2014). Development of Programmable Logic-Controller for Peat Water Treatment based AOP+RO.
- Uddin, M. G., Islam, M. M., & Islam, M. R. (2015). Effects of reductive stripping of reactive dyes on the quality of cotton fabric. *Fashion and Textiles*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s40691-015-0032-y>
- Wang, Y., Liu, G., Hu, H., Li, T. Y., Johri, A. M., Li, X., & Wang, J. (2015). Stable Encapsulated Air Nanobubbles in Water. *Angewandte Chemie*, 127(48), 14499–14502. <https://doi.org/10.1002/ange.201505817>
- Xu, X., Cao, D., Wang, Z., Liu, J., Gao, J., Sanchuan, M., & Wang, Z. (2019). Study on ultrasonic treatment for municipal sludge. *Ultrasonics Sonochemistry*, 57(January), 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.008>
- Yakout, S. M., Hassan, M. R., El-Zaidy, M. E., Shair, O. H., & Salih, A. M. (2019). Kinetic study of methyl orange adsorption on activated carbon derived from pine (*Pinus strobus*) sawdust. *BioResources*, 14(2), 4560–4574. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.4560-4574>

Yao, Y., Pan, Y., & Liu, S. (2020). Power ultrasound and its applications: A state-of-the-art review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 62(June 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104722>

DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

Karya Tulis Ilmiah

- | | |
|----------------------------|---------|
| 1. Buku Nasional | 1 buah |
| 2. Jurnal Internasional | 8 buah |
| 3. Jurnal Nasional | 18 buah |
| 4. Prosiding Internasional | 13 buah |
| 5. Prosiding Nasional | 28 buah |

Kekayaan Intelektual

- | | |
|-------------------|--------|
| 6. Paten | |
| a. Terdaftar | 5 buah |
| b. Tersertifikasi | 5 buah |
| 7. Publikasi Lain | 6 buah |

CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

Buku Nasional

1. Hutagalung, S. S., “Solution for Peat Water Consumption: Application of Advanced Oxidation Process Technology, PT. Indonesian Writer Incubator, Prints July 1, 2019, ISBN 978-602-53911-8-7, Jakarta, Indonesia.

Jurnal Internasional

2. Rafryanto, A. F., Batrisya, A. L., Jiwanti, P. K., Mufti, N., Hutagalung, S. S., Arramel. (2025). Bottom ash waste conversion into nano-silica gel for high-performance adsorption of dye-pigment. *Next Research*. Accepted 11 April 2025. ISSN 3050-4759.
3. Hutagalung, S. S., Rafryanto, A. F., Sun, W., Juliasih, N., Jiang, J., Arramel, H. K. D., Suhardi, S. H., Rochman, N. T., Kurniadi, D. (2023). Combination of Ozone-based Advanced Oxidation Process and Nanobubbles Generation Toward Textile Wastewater Recovery. *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1154739>.
4. Subagyo, R., Yudhowijoyo, A., Sholeha, N. A., Hutagalung, S. S., Prasetyoko, D., Birowosuto, M. D., Arramel, J., Jiang, J., Kusumawati, Y. (2023). Recent advances of modification effect in Co₃O₄-based catalyst towards highly efficient photocatalysis.

Journal of Colloid and Interface Science, 650, 1550–1590. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.03.031>.

5. Hutagalung, S. S. (2018). Optimization tuning PID controller in peat water treatment plant. *Jurnal Instrumentasi*, 42(1), 61-70. ISSN 0125-9202, E-ISSN 2460-1462.
6. Turnip, A., Hutagalung, S. S., Muchlis, I., Amri, M. F. (2017). Peat Water Treatment Based Wireless Data Acquisition System For Flexible Remote Monitoring. *Interworking Indonesia Journal*, 9(1), 27-32.
7. Turnip, A., & Hutagalung, S. S. (2015). *Advanced Oxidation Processes with O3-UV-H2O2 and Reverse Osmosis Controlled PLC for Water Purification. Advanced Science Letters*, 21(12), 3635-3638. <https://doi.org/10.1166/asl.2015.6547>.
8. Turnip, A., Hutagalung, S. S., Pardede, J., and Soetraprawata, D., “P300 detection using multilayer neural networks based adaptive feature extraction method”, *International Journal of Brain and Cognitive Sciences*, vol. 2, no. 5, pp. 63–75, 2013. DOI: 10.5923/j.ijbcs.20130205.01.
9. Setiadji, T.S., Hutagalung, S. S., “Fluid Flow Image 3 Medium by Ultrasonic Tomography”, *Journal of CommIT BINUS*, May 2009, Vol. 3, No. 1, pp. 39–44.

Jurnal Nasional

10. Hutagalung, S. S., Herlambang, B., & Muchlis, I. (2014). Control System Design Study for Water Treatment Systems Peat with AOP method and RO. *Seminar Nasional Fisika*, ISSN: 2088-4176, 96-100.
11. Insani, A., and Hutagalung, S. S., “Remote SCADA System Design Using VPN 3G Service to Drive Pumps in Water Treatment System”, *Bulletin Posts and Telecommunications*, March 2013, ISSN: 1693-0991, Vol. 11 No. 1, pp. 67–76.

12. Hutagalung, S. S., and Hidayat, M., “Multiphase Flow Imaging Using Spline Interpolation Method”, *Instrumentasi Scientific Publication*, July–December 2011, Vol. 35 No. 2, pp. 83–92.
13. Hutagalung, S. S., Sugiarto, A.T., and Luvita, V., “Application of Advanced Oxidation Processes (AOP) Method for Liquid Resin Waste Treatment”, *Journal of Waste Management Technology*, Vol. 13, No. 2, Dec. 2010, pp. 18–25.
14. Hutagalung, S. S., and Santoso, H.H., “Failure Rate Data Control by Redundant Strategies”, *Journal of GIGA*, Vol. 12, No. 3, October 2009, pp. 221–228.
15. Hutagalung, S. S., “Implementation of Distributed Control System in Application”, *Journal of IPTEK METRIK*, October 2008, Vol. 8, No. 16, pp. 29–35.
16. Hutagalung, S. S., and Sudrajat, A., “The Flow Pattern Identification Based on Fuzzy Neural Network Using Sensor Capacitance”, *Journal of IPTEK METRIK*, October 2008, Vol. 8, No. 16, pp. 1–5.
17. Hutagalung, S. S., “Application Analysis Method in the Process Control”, *Journal of Scientific GIGA*, October 2008, Vol. 13, No. 30.
18. Hutagalung, S. S., “Study Performance of Control Loop Software”, *Journal of IPTEK METRIK*, April 2008, Vol. 8, No. 15, pp. 37–42.
19. Hutagalung, S. S., “Tuning Methods in System Folder Mode Control with PI”, *Jurnal Ilmiah GIGA*, February 2008, Vol. 12, No. 29.
20. Hutagalung, S. S., “Tomography Imaging Reconstruction A Three Phase Flow By Using Algebraic Reconstruction Technique Method”, *Journal of Scientific Instrumentation Himii*, July–December 2007, Vol. 31, No. 2, pp. 62–69.

21. Hutagalung, S. S., "Image Reconstruction of Matriks Parallel Geometry by FBP and ART Methods", *Scientific Journal GIGA*, February 2007, Vol. 10, No. 27, pp. 48–57.
22. Hutagalung, S. S., "Plantwide Control Systems by Tennessee Eastment Methods", *Journal of GIGA*, October 2006, Vol. 9, No. 26.
23. Hutagalung, S. S., "Approach Rytov to Reconstruct Image of an Object", *Widyariset LIPI*, Vol. 8, No. 1, 2005, pp. 238–245.
24. Hutagalung, S. S., "Effects Uncertainty of Discharge Coefficient in Orifice Plates Sensor", *Journal of GIGA*, June 2005, Vol. 8, No. 23.
25. Hutagalung, S. S., "Operation Plantwide Procedure Solution", *Journal of GIGA*, June 2005, Vol. 8, No. 22.
26. Hutagalung, S. S., "Modeling and Multivariable Control System Design using the Method Bristol", *Journal of GIGA*, Vol. 7, No. 19, June 2004.
27. Hutagalung, S. S., "Reconstructing Image Projection Algorithms for Fluid Flow Components Multi-Multi Phase", *Journal of Scientific GIGA*, Vol. 6, No. 17, 2003.

Prosiding Internasional

28. Hutagalung, S. S., Kurniadi, D., Rochman, N. T., Suhardi, S. H., & Khotimah, K. (2021). Ultrasonic-Advanced Oxidation Process-Nanobubble Design for wastewater treatment using PLC. *7th International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA)*, 22-27. <https://doi.org/10.1109/ICA52848.2021.9625690>.

29. Hutagalung, S. S., Muchlis, M., & Khotimah, K. (2019). Textile Wastewater Treatment using Advanced Oxidation Process (AOP). *International Conference on Engineering for Sustainable Development, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 722, 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/722/1/012032>.
30. Hutagalung, S. S. (2019). Effect of Release Coefficient Orifice Plate on Water Fluid Flow System. *International Conference on Mechanical, Electronics, Computer, and Industrial Technology (MECnIT), IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1230, 012086. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1230/1/012086>.
31. Hutagalung, S. S. (2019). Estimation Optimal Value of Discharge Coefficient in a Venturi Tubes. *MECnIT 2018, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1230, 012087. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1230/1/012087>.
32. Hutagalung, S. S., Hidayat, S. W., Kusumandari, D. E., Saragih, Y. V., & Turnip, A. (2019). Arrhythmia Classification of Electrocardiogram Recorded Data with Random Forest Method. *MECnIT 2018, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1230, 012036. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1230/1/012036>.
33. Turnip, A., & Hutagalung, S. S. (2014). Development of Programmable Logic-Controller for Peat Water Treatment based AOP+RO. *2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*, 113-120.
34. Hutagalung, S. S., Muchlis, I., Sebleku, P., Amri, M.F., Fakhurroja H., and Turnip, A., "Water Purification Technology based Advanced Oxidation Processes Emerging Ozone", *2nd Int. Conf. on Technology, Informatics, Management, Engineering &*

- Environment (TIME-E)*, 2014, ISBN: 978-1-4799-4805-5, pp. 292–295.
35. Hutagalung, S. S., Muchlis, I., Herlambang, B., and Turnip, A., “Removal of chemical and biological contaminants on peat water by ozone-based AOP with RO”, *2nd TIME-E*, 2014, ISBN: 978-1-4799-4805-5, pp. 288–291.
 36. Kusumandari, D.E., Fakhurroja, H., Turnip, A., Hutagalung, S. S., Kumbara, B., Simarmata, J., “Removal of EOG artifacts: Comparison of ICA Algorithm from EEG”, *2nd TIME-E*, 2014, ISBN: 978-1-4799-4805-5, pp. 335–339.
 37. Turnip, A., Soetraprawata, D., and Hutagalung, S. S., “Integrated of Advanced Oxidation Processes with RO for water treatment”, *Proc. 3rd Int. Conf. on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications (ICRAMET)*, 2014, ISSN: 1979-2921, pp. 173–176.
 38. Hutagalung, S. S., Muchlis, I., Turnip, A., and Soetraprawata, D., “Development of Peat Water Treatment Technology based AOP with O₃-UV-H₂O₂”, *Proc. 3rd ICRAMET*, 2014, ISSN: 1979-2921, pp. 177–180.
 39. Hutagalung, S. S., and Turnip, A., “P300 Detection Based on Extraction and Classification in Online BCI”, *3rd Int. Conf. on Instrumentation Control and Automation (ICA)*, 2013, IEEE, pp. 35–38.
 40. Hutagalung, S. S., Sugiarto, A.T., and Luvita, V., “Advanced Oxidation Processes (AOP) Method for Liquid Resin Waste Treatment”, *Proc. Nat. Seminar on Technology Management of Waste VIII, BATAN–RISTEK*, June 2010, Vol. 1, No. 1, pp. 57–64.

Prosiding Nasional

41. Herlambang, B., Hutagalung, S. S., & Muchlis, I. (2016). The design of Electrical Systems For Water Treatment Systems Peat with Method Using AOP and RO. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Dirgantara XX*, 96-105. ISBN: 978-602-71833-2-2.
42. Herlambang, B., Hutagalung, S. S., & Muchlis, I. (2016). Mechanical design of Peat Water Treatment System Using AHP Method and RO. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Dirgantara XX*, 180-193. ISBN: 978-602-71833-2-2.
43. Herlambang, B., Hutagalung, S. S., & Muchlis, I. (2016). Designing Applications Automatic Control at Peat Water Treatment System with Two Ozone Generator. *Annual Meeting on Testing and Quality (AMTeQ 2016)*, 565-577. ISSN 1907-7459.
44. Herlambang, B., Hutagalung, S. S., & Muchlis, I. (2016). Design of Control Systems Hardware Development Tools Water Treatment Peat. *PPI-KIM 2016*, 283–303. ISSN 0852-002X.
45. Hutagalung, S. S., Muchlis, I., Herlambang, B., & Turnip, A. (2014). Influence Depreciation and Development Pressure on Boiler Drum Level. *Seminar Nasional Inovasi dan Teknologi Informasi (SNITI)*, 644-650. ISBN: 979-458-757-5.
46. Hutagalung, S. S., & Hidayat, A. R. (2014). Uncertainty of Measurement Analysis on Flow Transmitter AOPRO Process. *Annual Meeting on Testing and Quality (AMTeQ)*, 22-33. ISSN: 1907-7459.
47. Luvita, V., and Hutagalung, S. S., “Process Water Treatment Peat using by AOP and RO”, *AMTeQ*, 2014, ISSN: 1907-7459, pp. 434–443.

48. Insani, A., and Hutagalung, S. S., “Research Study Ozone Generator with Electric Fields on Water Treatment Distribution”, *PPI-KIM* 2014, ISSN: 0852-002X, pp. 56–64.
49. Hutagalung, S. S., and Syukri, A. F., “Analysis of the Quality Management System ISO 9001:2008 in the Power Plant Control System “X””, *AMTeQ*, 2013, ISSN: 1907-7459, pp. 139–150.
50. Hutagalung, S. S., and Muchlis, I., “Design Control and Monitoring of AOP + RO for Peat Water Treatment”, *PPI-KIM*, 2013, ISSN: 0852-002X, Vol. 1, pp. 32–45.
51. Insani, A., and Hutagalung, S. S., “Design Systems SCADA for Water Treatment Methods Peat with AOP and RO”, *PPI-KIM*, 2013, ISSN: 0852-002X, Vol. 1, pp. 281–292.
52. Hutagalung, S. S., “Sticking Detection Model Control Valves in Flow Control”, *PPI-KIM*, 2013, ISSN: 0852-002X, Vol. 1, pp. 329–341.
53. Hutagalung, S. S., Sugiarto, A.T., and Luvita, V., “Peat Water to be Clean Water Treatment By AOP in Kampar, Riau”, *Proc. UGM Chemical*, May 2013, ISSN: 2338-2368, Vol. 1, No. 1, pp. 73–80.
54. Hutagalung, S. S., “Characteristics of Control Valve in Pressure Control system by PI Mode”, *SIPTEKGAN XIV*, 2010, pp. 468–475.
55. Hutagalung, S. S., “Effect Stiction Control Valve in Close Loop Level Control System”, *Proceeding of SIPTEKGAN XIII*, November 2009, ISBN 978-979-1458-30-6.
56. Hutagalung, S. S., “Numerical Technique in Analysis of a Discrete Step Response Data”, *Proceeding of SIPTEKGAN XIII*, November 2009, Vol. 9, No. 17, ISBN 978-979-1458-30-6.

57. Hutagalung, S. S., “Distributed Control Systems to Optimize Performance in the Presence of Time Delays”, *National Seminar on Aerospace Science and Technology XII*, November 2008, pp. 359–364.
58. Hutagalung, S. S., “Tuning Strategy of Fuzzy PID Controllers”, *Proceeding of SIPTEKGAN XII, National Seminar on Aerospace Science and Technology XII*, November 2008, pp. 345–350.
59. Hutagalung, S. S., “Correlation Calculate of Optimum Parameter in PI Control System by Map Method”, *Scientific Presentation & Meeting Calibration, Instrumentation, and Metrology (PPI-KIM)*, 2008, pp. 385–397.
60. Hutagalung, S. S., “Eliminated Control Valve Stiction On-line in Distributed Control System (DCS)”, *Scientific Presentation & Meeting Calibration, Instrumentation, and Metrology (PPI-KIM)*, 2008, pp. 376–384.
61. Hutagalung, S. S., “Effect Characteristics of Control Valve in Operation Level Control with PI Model”, *Scientific Presentation & Meeting Calibration, Instrumentation, and Metrology (PPI-KIM)*, 2007, pp. 362–373.
62. Hutagalung, S. S., “Simulation of Image Tomography by Filter Back Projection Algorithms”, *Proceeding of SIPTEKGAN IX*, 2005, Vol. 2, pp. 758–762.
63. Hutagalung, S. S., “Tuning Level Controller by Curve Reaction Processes Methods”, *Proceeding of SIPTEKGAN IX*, 2005, Vol. 2, pp. 492–496.
64. Hutagalung, S. S., “Identify Tomography Ultrasonic Model System in Fluid Flow by ARMAX Models”, *Proceeding of SIPTEKGAN VIII*, 2004, Vol. 1.
65. Hutagalung, S. S., “Design of Detector Magnetic by Circular Methods”, *Proceeding of SIPTEKGAN VII*, 2003, Vol. 1.

66. Hutagalung, S. S., “Multi Component Flow Imagery to Determine the Minimum Amount Used Tomography Ultrasonic Transducers”, *Proceeding of SIPTEKGAN VII*, 2003, Vol. 1.
67. Hutagalung, S. S., Asep, Djuhana, “Determination of Discharge Coefficient (Cd) of Fluid Flow Measurement Using Orifice Plates and Ventury Tube”, *Proceeding of SIPTEKGAN VII*, 2003, Vol. 1.
68. Hutagalung, S. S., Amoranto B., Deddy Kurniadi, Harry Aryadi, “Estimation Faction Composition of Fluid Flow of Multi Component - Multiphase Using Ultrasonic Tomography”, *Scientific Presentation & Meeting Calibration, Instrumentation, and Metrology (PPI-KIM)*, 2002.

Paten

69. Peat Water Treatment System Through Continuous Oxidation Process and Reverse Osmosis Patent No: P00201401818 (2014), Grand Patent, since April 5th 2021 for 20 years.
70. Bed Testing System, Patent submitted (2020Patent No: P00201902701 (2019)
71. Tools and Methods of Ultrasonic Combined with Advanced Oxidation Process (AOP) Integrated Bubble Mill Generator (BMG) for Treatment of Wastewater and Sediment Patent, Patent No: P00202010064. nomor HKI-3-KI.05.01.08-DP-P00202010064 March 8, 2024.
72. Patent submitted Portable Apparatus and ECG database conversion methods (2021), Patent No: P00202204324. Certificate of Head

of National Research and Innovation Agency, No: B-3295/I/ KI.01.00/12/2021, Dated: 24 December 2021.

73. Simple patent “Aneroid Sphygmomanometer Test Device”, Patent No: S00201911245, Certificate number: IDS000005778, 2019

DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA

1. Hutagalung, S. S., “Level Control System by Curve Reaction Processes Methods”, *Technical Report*, Research Center for Calibration, Instrumentation and Metrology – LIPI, 2001, pp. 1–6.
2. Hutagalung, S. S., “Calibration of Control Valve”, *Technical Report*, Research Center for Calibration, Instrumentation and Metrology – LIPI, 2000, pp. 1–5.
3. Hutagalung, S. S., “Application of DCS on Process Control Systems”, *Technical Report*, Research Center for Calibration, Instrumentation and Metrology – LIPI, 2000, pp. 1–6.
4. Hutagalung, S. S., “Measurement of Fluid Flow Using Flow Transmitter Electronic”, *Technical Report*, Research Center for Calibration, Instrumentation and Metrology – LIPI, 1999, pp. 1–6.
5. Hutagalung, S. S., “Measurement of Fluid Flow Using Orifice Plate and Ventury Tube”, *Technical Report*, Research Center for Calibration, Instrumentation and Metrology – LIPI, 1999, pp. 1–6.
6. Hutagalung, S. S., “Measurement of Temperature Using Thermocouple Sensor Type K”, *Technical Report*, Research Center for Calibration, Instrumentation and Metrology – LIPI, 1999, pp. 1–6.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. DATA PRIBADI

Nama : Dr. Sutrisno Salomo Hutagalung, S.Si.,
M.T.

Tempat, Tanggal
Lahir : Cimahi, 8 Oktober 1960

Anak ke : 3 dari 7 bersaudara

Jenis Kelamin : Laki-Laki

Nama Ayah Kandung : Justin Hutagalung

Nama Ibu Kandung : Rouli br. Tobing

Nama Istri/Suami : Lili Rishandiari

Jumlah Anak : 3 (Tiga)

Nama Anak : Anna Christiana br. Hutagalung, S.T.
: Ir. Andrian Kristianto Hutagalung, S.T.
: Riyan Saputra Hutagalung, S.Si.

Nama Unit : Pusat Riset Teknologi Pengujian dan
Standar

Nama Organisasi : Organisasi Riset Energi dan Manufaktur

Nama Instansi : BRIN

Judul Orasi : Sistem Instrumentasi dan Kontrol pada
Aplikasi Ultrasonik Terpadu dengan
Proses Oksidasi Lanjut dan Generator
Gelembung Nano untuk Pengolahan Air
Limbah

Ilmu : Teknik Fisika

Bidang : Teknologi Instrumentasi

Kepakaran : Instrumentasi dan Kontrol

- No. SK Pangkat Terakhir : Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 00176/KEP/AA/15001/24 Tanggal 26 April 2024
- No. SK Peneliti atau Perekayasa Ahli Utama : Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 6/M Tahun 2025 tanggal 20 Januari 2025
- Tautan Scopus : <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56104187800>
- Tautan Google Scholar : <https://scholar.google.com/citations?user=3LKd91kAAAAJ&hl=en>

PENDIDIKAN FORMAL

No	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1.	SD	SD No 1 Tagog	Bandung	1974
2.	SMP	SMP Pusdik int	Cimahi	1976
3.	SMA	Sekolah Teknik Menengah	Bandung	1981
4.	S1	Universitas Terbuka	Indonesia	2000
5.	S2	Institut Teknologi Bandung	Indonesia	2002
6.	S3	Institut Teknologi Bandung	Indonesia	2024

B. Pendidikan Nonformal

No	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1.	Equivalent to Siemens Simatics S5	Brisbane, Australia	1991
2.	DCS MicroXL Engineering	Brisbane, Australia	1991

No	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
3.	The Refrigerator Energy Test in Japan for the IS-INOTEC/JEMA 2016 Project for ASEAN Laboratories	Tokyo, Jepang	2016
4.	Risk Management Evaluation IEC 60601-1 -2012 and Clause 201.11, 1201.12 and 201.15 - IEC 60601-2-19-2016,	Singapore	2018

C. JABATAN STRUKTURAL

No	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1.	Koordinator Urusan Pelaksana Sarana Pendidikan dan Pelatihan	LIPI	1982-1985
2.	Koordinator Pengembangan, Pendidikan dan Pelatihan	LIPI	1986-1998
3.	Kepala Subbagian Kerja Sama Ilmu Pengetahuan dan Teknologi	LIPI	1998-2000
4.	Kepala Subbagian Kerja Sama Ilmu Pengetahuan dan Teknologi	LIPI	2004-2009

D. JABATAN FUNGSIONAL

No	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Peneliti Muda	01 Januari 2004
2.	Peneliti Madya	01 Desember 2005
3.	Peneliti Ahli Utama	20 Januari 2025

PENUGASAN KHUSUS NASIONAL/INTERNASIONAL

No	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1.	Supervisor, Kalibrasi & Perawatan Instrumen, Pemeriksaan Loop dan Penalaan	PT IGLAS, Surabaya	1983– 1992
2.	Supervisor, Kalibrasi & Pemeriksaan Loop Instrumen dan Kontrol	Pertamina, Balikpapan	1983
3.	Supervisor, Perbaikan dan Pemeliharaan Instrumen dan Sistem Kontrol	PT Tersana Baru, Cirebon	1989
4.	Supervisor, Pelatihan Instrumentasi dan Kontrol Grup I	PT TOTAL Indonesia, Senipah	1992
5.	Supervisor, Pelatihan Instrumentasi dan Kontrol Grup II	PT TOTAL Indonesia, Senipah	1992
6.	Supervisor, Pelatihan Instrumentasi dan Kontrol Grup II	PT TOTAL Indonesia, Senipah	1995
7.	Supervisor, Pelatihan Dasar Kelistrikan	PT VICO Indonesia, Muara Badak	1997
8.	Supervisor, Pelatihan Dasar Instrumentasi	PT VICO Indonesia, Muara Badak	1997
9.	Supervisor, Insinyur Instrumen (Proyek Zulu Turn Around)	BP Indonesia (Lepas Pantai, Jawa Barat)	1999
10.	Manajer Proyek, Pemandahan & Relokasi Ruang Kontrol	PT ARCO (Perusahaan Migas), Lepas Pantai Jakarta	1999– 2000
11.	Manajer Proyek, Pengujian Sistem Pengolahan Limbah	PDAM Cirebon	2004

No	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
12.	Manajer Proyek, Pengujian Sistem Pengolahan Limbah	PT Pupuk Pusri, Palembang	2005
13.	Manajer Proyek, Pengujian Sistem Pengolahan Limbah	PT Degussa Peroxide Indonesia, Cikarang	2005
14.	Manajer Proyek, Pengujian Sistem Pengolahan Limbah	PT Indonesia Synthetic Textile Mills, Tangerang	2005
15.	Manajer Proyek, Sistem Pengusir Burung Migrasi di Wilayah Lepas Pantai	PT Kondur Petroleum, Riau	2006
16.	Manajer Proyek, Pengujian Sistem Pengolahan Limbah	PT Petrosida, Gresik	2006–2007
17.	Manajer Proyek, Pengujian Sistem Pengolahan Limbah	RS Depok, Bengkulu	2007
18.	Manajer Proyek, Sistem Pengukuran dan Hidrologi	Dinas PU Bengkulu	2007
19.	Manajer Proyek, Pengujian Sistem Pengolahan Limbah	Bogor (instansi tidak disebutkan)	2007–2008
20.	Direktur	PT Hulam Calibration Center, Jakarta	2008
21.	Instruktur, Pneumatik & Hidrolik serta Pengukuran Aliran	Total Indonesia, Balikpapan	2008
22.	Instruktur, Instrumentasi Dasar	Total Indonesia, Balikpapan	2008
23.	Direktur Pemasaran	PT Instrumentasindo Power, BSD, Tangerang	2009
24.	Direktur Teknik	PT Artawin Jaya Mandiri, Kota Modern Tangerang	2010

No	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
25.	Asesor, Penilaian Sistem Kontrol Konvensional ke Yokogawa CS3000	PLN Indonesia Power, Suralaya	2010–2011
26.	Asesor, Penilaian Sistem Kontrol	PLN Indonesia Power, Tanjung Priok	2011
27.	Instruktur, Pengukuran Aliran Multiphase (Grup 1)	Chevron, Duri	2011
28.	Instruktur, Kontrol Proses Industri	PLN Suralaya, Bogor	2011
29.	Instruktur, Pengukuran Aliran Multiphase (Grup 2)	Chevron, Pekanbaru	2012
30.	Instruktur, Instrumentasi dan Katup Kontrol	Krakatau Engineering, Cilegon	2013
31.	Instruktur, Pengontrol Logika Terprogram (PLC)	Chevron, Duri	2013
32.	Peneliti Instrumentasi dan Kontrol	PT Indokarya Tirta Abadi, Serpong	2014
33.	Konsultan, Laboratorium Kalibrasi	PT Qualis, Tangerang	2016–sekarang
34.	Pelatihan, Pengujian Efisiensi Energi Lemari Es untuk Laboratorium ASEAN	JQA Jepang (JEMA Project)	2016
35.	Pelatihan, Evaluasi Manajemen Risiko IEC 60601-1 dan IEC 60601-2-19	TÜV SÜD PSB, Singapura	2018
36.	Instruktur, Pelatihan Daring QA/QC Sistem Instrumentasi dan Kontrol Daya	PJB – BRIN Serpong	2021

No	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
37.	Instruktur, Pelatihan Daring QA/QC Sistem Instrumentasi dan Kontrol Daya	PJB – BRIN Serpong	2023
38.	Instruktur, Pelatihan Daring Pentingnya Kalibrasi: Menjamin Akurasi dan Kepastian Hasil	BRIN Serpong	2025

E. KEIKUTSERTAAN DALAM KEGIATAN ILMIAH

No	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	Seminar Nasional Institusi Nasional Instrumentasi (LIN – LIPI)	Peserta	Hotel Panghegar, Bandung, Indonesia	1982
2.	Pertemuan Ilmiah PPI-KIM	Peserta	LIPI Pusat, Jakarta, Indonesia	1987
3.	Seminar Nasional Instrumentasi & Kalibrasi (PPI-KIM)	Peserta	Hotel Manggala Bhakti, Jakarta, Indonesia	1994
4.	Seminar Nasional Instrumentasi & Kalibrasi (PPI-KIM)	Peserta	Sarpedal, Serpong, Indonesia	1995
5.	Seminar Nasional Instrumentasi & Kalibrasi (PPI-KIM)	Peserta	Puspiptek, Serpong, Indonesia	1996

No	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
6.	Seminar Internasional: Dual System Vocational Education and Training	Peserta	Jakarta Convention Center, Indonesia	1999
7.	Seminar Nasional Instrumentasi & Kalibrasi (PPI-KIM)	Peserta	Puspiptek, Serpong, Indonesia	1999
8.	Seminar Nasional Otomasi & Instrumentasi Industri Kimia	Peserta	ITB, Bandung, Indonesia	2002
9.	Seminar Nasional Teknologi Dirgantara LAPAN VIII	Peserta	Puspiptek, Serpong, Indonesia	2004
10.	Seminar Nasional Teknologi Dirgantara LAPAN IX	Peserta	Puspiptek, Serpong, Indonesia	2005
11.	Seminar Nasional Instrumentasi & Kalibrasi (PPI-KIM)	Anggota	Puspiptek, Serpong, Indonesia	2005
12.	Seminar Nasional Instrumentasi & Kalibrasi (PPI-KIM)	Anggota	Puspiptek, Serpong, Indonesia	2006
13.	Seminar Nasional Instrumentasi & Kalibrasi (PPI-KIM)	Wakil Ketua	Puspiptek, Serpong, Indonesia	2007

No	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
14.	Seminar Nasional Teknologi Dirgantara LAPAN XII	Peserta	Jakarta, Indonesia	2008
15.	Seminar Nasional Instrumentasi & Kalibrasi (PPI- KIM)	Wakil Ketua	Mercure Convention Center, Jakarta, Indonesia	2008
16.	Program APMP (Asia Pacific Metrology Programme)	Anggota	Mercure Convention Center, Jakarta, Indonesia	2008
17.	Seminar Nasional Teknologi Limbah Radioaktif VIII – BATAN	Peserta	Puspiptek, Serpong, Indonesia	2010
18.	Workshop Etika Penelitian dan Plagiarisme	Peserta	Hotel Borobudur, Jakarta, Indonesia	2010
19.	Seminar Nasional Teknologi Dirgantara LAPAN XIV	Peserta	Puspiptek, Serpong, Indonesia	2010
20.	Seminar Nasional Instrumentasi & Kalibrasi (PPI- KIM)	Peserta	Puspiptek, Serpong, Indonesia	2011
21.	Seminar Nasional Instrumentasi & Kalibrasi (PPI- KIM)	Peserta	Puspiptek, Serpong, Indonesia	2012

No	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
22.	Seminar Internasional Instrumentation, Control & Automation (ICA)	Peserta	ITB, Kuta-Bali, Indonesia	2013
23.	Seminar Nasional Instrumentasi & Kalibrasi (PPI-KIM)	Peserta	Puspptek, Serpong, Indonesia	2013
24.	Konferensi Internasional ICRAMET 2014	Pemakalah	LIPI Batam, Indonesia	2014
25.	Seminar Nasional PPI-KIM	Pemakalah	Grand Sahid Jakarta, Indonesia	2014
26.	International Conference TIME-E 2014	Pemakalah	Bandung, Indonesia	2014
27.	Seminar Nasional AMTeQ 2014	Pemakalah	LIPI Surabaya, Indonesia	2014
28.	Seminar Nasional AMTeQ 2015	Pemakalah	LIPI Serpong, Indonesia	2015
29.	Seminar Nasional AMTeQ 2016	Pemakalah	LIPI Serpong, Indonesia	2016
30.	Seminar Nasional Teknologi Dirgantara LAPAN XX	Pemakalah	LIPI Serpong, Indonesia	2016
31.	Workshop EMC (Electromagnetic Compatibility)	Peserta	Puspptek Serpong (dengan Univ. Twente, Belanda)	2017

No	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
32.	Seminar AMTeQ 2017	Pemakalah	LIPI Serpong, Indonesia	2017
33.	Forum Fungsional Nasional: Penguatan Peran Inovasi	Pemateri / Panelis	Puspipstek, Serpong, Indonesia	2018
34.	Seminar Internasional: ICMEIT 2018 (Mechatronics & Industrial Tech)	Pemakalah	Universitas Prima Indonesia, Medan, Indonesia	2018
35.	Seminar Nasional: Aplikasi Pengolahan Limbah Cair dalam Mencegah Virus	Pemakalah	ITB Bandung (Webinar)	2020
36.	Seminar Internasional ICA ke-7	Pemakalah	ITB Bandung, Indonesia	2021
37.	Seminar Nasional HORIBA Scientific – Mikro-XRF & Raman	Peserta	Jakarta (Daring)	2021
38.	Webinar Nasional Nano Particle Tracking Analysis (NTA)	Peserta	Jakarta (Online)	2024

F. KETERLIBATAN DALAM PENGELOLAAN JURNAL ILMIAH

No	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1.	Jurnal Nasional Instrumentasi (HIMII)	Himpunan Masyarakat Instrumentasi Indonesia (HIMII)	Reviewer	2011–2012
2.	Prosiding Nasional Annual Meeting on Testing and Quality (AMTeQ)	Pusat Riset Sistem Mutu dan Teknologi Pengujian – LIPI (sekarang BRIN)	Reviewer	2017–2018

G. CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

1. Karya Tulis Ilmiah

a) Kualifikasi Karya

No	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Buku Internasional	
2.	Buku Nasional	1
3.	Bagian dari Buku Internasional	
4.	Bagian dari Buku Nasional	
5.	Jurnal Internasional	8
6.	Jurnal Nasional	18
7.	Prosiding Internasional	13
8.	Prosiding Nasional	29
9.	Paten Internasional	
	Terdaftar	5
	Tersertifikasi	

b) Kualifikasi Penulis

No	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	33
2.	Bersama Penulis Lainnya	41
	Total	74

c) Kualifikasi Bahasa

No	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	43
2.	Bahasa Inggris	31
3.	Bahasa Lainnya	0
	Total	74

H. PEMBINAAN KADER ILMIAH

Pejabat Fungsional Peneliti atau Perekayasa

No	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Dr. Bambang Hadiwiardjo	Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi, dan Metrologi – LIPI	Pembimbing Peneliti Muda	2000
2.	M. Arramel, Ph.D	Universitas Indonesia / BRIN	Pembina Peneliti	2017–2019
3.	Ande Fudja Rafryanto, M.Eng	ITB / BRIN	Pembina Peneliti Kolaboratif	2020–2023
4.	Dr. Nurochma Juliasih	BRIN / Kelompok Riset Instrumentasi Medis	Pembimbing Peneliti dalam Proyek	2021–2023

No	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
5.	Prastika Krisma Jiwanti, M.Si	Pusat Riset Teknologi Pengujian BRIN	Pembimbing Penulisan Artikel Ilmiah	2022– 2024

I. Mahasiswa

Fitri Dwi Rani	UI/BRIN	Pembimbing Penelitian	2020
Wedo Aru Yudhantoro	UI/BRIN	Pembimbing Penelitian	2020
Matt Busar	ITS/BRIN	Pembimbing Penelitian	2022
Matthew Immanuel	ITB/BRIN	Pembimbing Penelitian	2022
Isaak Bernadus	ITB/BRIN	Pembimbing Penelitian	2022
Rizky Ardi Riansyah	ITI/BRIN	Pembimbing Penelitian	2023
Rafif Ruqyana Arsand	ITI/BRIN	Pembimbing Penelitian	2023
Hamidah Fitriyah	UNHAN/BRIN	Pembimbing Penelitian	2025
Nurhaliza Syavika	UNHAN/BRIN	Pembimbing Penelitian	2025
Syalenda Rensapuan M. F.	UNHAN/BRIN	Pembimbing Penelitian	2025

Organisasi Profesi Ilmiah

No	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Himpunan Masyarakat Instrumentasi Indonesia (HIMII)	1996–sekarang
2.	Anggota	Migas Indonesia Online	2007–sekarang
3.	Anggota	Himpunan Peneliti Indonesia (HIMPENINDO)	2014–sekarang
4.	Anggota	LinkedIn International Research Groups	2010–sekarang

J. Tanda Penghargaan

No	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Surat Penghargaan Pengabdian 15 Tahun	Kepala Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi & Metrologi LIPI	1996
2.	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden RI B.J. Habibie	1999
3.	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden RI Megawati Soekarnoputri	2004
4.	Satyalancana Karya Satya XXX Tahun	Presiden RI Susilo Bambang Yudhoyono	2014
5.	Sertifikat 110 Karya Inovasi Indonesia Paling Prospektif (BIC Innovation Award)	Business Innovation Center (BIC) – Kemenristek	2018

Orasi ilmiah ini membahas tentang sistem yang dirancang dan dikembangkan telah mengubah peradaban dunia selama sejarah pencapaian umat manusia. Sejak awal perkembangan teknologi rekayasa hingga masa kini, kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi telah mendorong kita untuk terus berinovasi, menggali lebih dalam, dan memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang cara kita berinteraksi dengan alam semesta dan lingkungan kita. Naskah ini menantang pemahaman kita tentang pengolahan air limbah dengan sistem kontrol. Perjalanan menarik melintasi berbagai era dan disiplin ilmu pengetahuan dan teknologi, dari sistem yang sederhana hingga sistem yang kompleks. Sistem pengolahan air limbah yang menggabungkan teknologi ultrasonik, Proses Oksidasi Lanjut (POL), dan Generator Gelembung Nano (GGN) meletakkan dasar untuk kemajuan baru dalam teknologi pengolahan air. Metode kontemporer telah membuka peluang baru untuk mengontrol biaya sistem yang semakin kompleks dan saling berhubungan. Naskah ini ditulis dengan cermat, membahas konsep penting dan kasus yang menunjukkan potensi besar sistem pengolahan air untuk memecahkan masalah terkini.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

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

DOI: 10.55981/brin.2371



ISSN 3090-8485



9 773090 848005