

Studi Aspek K3 Pemilihan Material Untuk Rancang Bangun Reaktor Ozonolisis Skala Laboratorium

¹Fatimah Az Zahra Sarip Hidayat, ²Sri Ainun Nur Fadillah,

³Mohammad Ilman Abdul Patah, ⁴Choerudin

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Nasional Bandung, Jl. Khp Hasan Mustopa No.23, Néglasari, Kec. Cibeunying Kaler, Kota Bandung, Jawa Barat 40124
e-mail: choerudin@itenas.ac.id

Abstrak

Ozonolisis merupakan proses kimia yang melibatkan pemecahan ikatan rangkap senyawa organik dengan ozon (O₃), menghasilkan produk seperti aldehida, keton, atau asam karboksilat. Namun, sifat ozon yang sangat reaktif dan toksik menimbulkan tantangan dalam pemilihan material dan penerapan protokol keselamatan. Kajian ini bertujuan memastikan pemilihan material reaktor yang kompatibel dan penerapan keselamatan kerja dalam pengembangan reaktor ozonolisis skala laboratorium. Metode yang digunakan adalah studi pustaka dengan pendekatan Hazard Identification and Risk Assessment (HIRA) mengacu pada AS/NZS 4360:1999, dengan fokus pada ketahanan enam material (stainless steel 304, polyurethane, polyethylene, silikon, nilon, dan PVC) terhadap paparan ozon, pelarut, suhu, dan tekanan operasi. Hasil kajian menunjukkan bahwa kontak material dengan ozon serta dengan larutan asam-basa merupakan sumber risiko dengan kategori sangat tinggi, khususnya pada stainless steel 304 dan polyethylene, sementara sebagian besar variabel operasi lain berada pada kategori risiko yang dapat diterima. Kajian ini menyimpulkan bahwa pemilihan material reaktor perlu mempertimbangkan kompatibilitas spesifik terhadap ozon dan kondisi asam-basa untuk meminimalkan risiko kecelakaan kerja, sekaligus mendukung rancangan reaktor yang aman dan sesuai standar keselamatan serta regulasi lingkungan.

Kata Kunci: Ozon, Material reaktor, Risiko Kecelakaan, Keselamatan Kerja

Abstract

Ozonolysis is a chemical process that cleaves the double bonds of organic compounds using ozone (O₃), producing products such as aldehydes, ketones, or carboxylic acids. However, the highly reactive and toxic nature of ozone poses challenges in material selection and the implementation of safety protocols. This study aims to ensure the selection of compatible reactor materials and the implementation of occupational safety in developing a laboratory-scale ozonolysis reactor. The method used was a literature-based Hazard Identification and Risk Assessment (HIRA) referring to AS/NZS 4360:1999, focusing on the resistance of six materials (stainless steel 304, polyurethane, polyethylene, silicone, nylon, and PVC) to ozone exposure, solvents, temperature, and operating pressure. The results show that material contact with ozone and with acid-base solutions were the main sources of very-high-category risk, particularly for stainless steel 304 and polyethylene, while most other operating variables fell within an acceptable risk category. This study concludes that reactor material selection must specifically consider compatibility with ozone and acid-base conditions to minimize the risk of workplace accidents, while supporting a reactor design that is safe and compliant with safety standards and environmental regulations.

Keywords: Ozone, Reactor Material, Accident Risk, Occupational Safety

PENDAHULUAN

Pemanfaatan minyak sawit sebagai bahan bakar untuk mengurangi penggunaan sumber daya alam tak terbarukan terus dikembangkan. Sebelumnya telah digunakan biodiesel dari CPO (Crude Palm Oil) yang dicampurkan pada solar sebanyak 30%. Pada 18-19 September 2024, maskapai Virgin Australia Airlines berhasil terbang dari Bali ke Australia menggunakan bahan

bakar Sustainable Aviation Fuel (SAF) buatan Indonesia. Maskapai tersebut bekerja sama dengan PT Pertamina selaku produsen dan distributor SAF yang terdiri dari 38,43% bioavtur yang ditambahkan ke dalam avtur (The Jakarta Globe, 2023). Hal ini merupakan kelanjutan dari keberhasilan bioavtur yang sebelumnya diuji coba pada pesawat CN-235 Flying Test Bed milik PT Dirgantara Indonesia dengan penambahan 2,4% bioavtur ke dalam avtur berbahan bakar fosil (Institut Teknologi Bandung, 2021).

Bioavtur, atau dikenal sebagai green avtur, diproduksi dari minyak inti sawit menggunakan katalis merah putih hasil kerja sama RTI Pertamina dengan ITB. Pembuatan bioavtur juga dapat berasal dari minyak jelantah, yaitu RBDPO (Refined, Bleached and Deodorized Palm Oil) yang telah terkena panas berulang kali sehingga memiliki kandungan asam lemak jenuh yang tinggi. Minyak jelantah berpotensi menjadi bioavtur dalam bentuk metil ester. Sebagian besar minyak sawit tersusun dari beberapa asam lemak, seperti asam palmitat (44%), asam oleat (39,2%), asam linoleat (10,1%), dan asam stearat (4,5%), dengan rincian kandungan asam lemak lainnya ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan Asam Lemak dalam Minyak Sawit (Hariyadi, 2010)

Asam Lemak	Kisaran (% Asam Lemak Total)	Rata-rata (%)
C12:0 (asam laurat)	0,1 - 1,0	0,2
C14:0 (asam miristat)	0,9 - 1,5	1,1
C16:0 (asam palmitat)	41,8 - 45,8	44
C16:1 (asam palmitoleat)	0,1 - 0,3	0,1
C18:0 (asam stearat)	4,2 - 5,1	4,5
C18:1 (asam oleat)	37,3 - 40,8	39,2
C18:2 (asam linoleat)	9,1 - 11,0	10,1
C18:3 (asam linolenat)	0,0 - 0,6	0,4
C20:0 (asam arakidat)	0,2 - 0,7	0,4

Struktur rantai karbon sedang metil ester serupa dengan bioavtur, sehingga apabila ikatan karbon pada metil ester rantai panjang dipecah dan digantikan oleh ikatan rangkap anoksigen, dapat terbentuk bioavtur. Hal ini sejalan dengan penelitian Bismo (2005), yang menggunakan minyak goreng bekas melalui proses esterifikasi yang dilanjutkan dengan ozonolisis. Proses esterifikasi mengubah trigliserida dan metanol menjadi metil ester dan gliserol (Universitas Diponegoro, 2024). Proses ozonolisis dalam bentuk nano gelembung bertujuan mempercepat transfer massa; selama proses ini, gelembung kecil membesar dan akhirnya pecah (kavitasi), yang dapat dilakukan melalui kavitasi hidrodinamik, kavitasi partikel, sonikasi, kavitasi elektrokimia, maupun agitasi mekanik.

Pemilihan material reaktor merupakan aspek kritis dalam pengembangan proses ini karena ozon dapat menyebabkan degradasi atau kerusakan pada material tertentu, terutama logam atau polimer yang tidak tahan terhadap oksidasi. Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi aspek keselamatan dan kesehatan kerja (K3) dari enam material yang umum dipertimbangkan dalam pemilihan material reaktor ozonolisis skala laboratorium, yaitu stainless steel 304, polyurethane (PU), polyethylene (PE), gasket silikon, nilon, dan PVC (polyvinyl chloride).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini bersifat kualitatif dengan pendekatan analisis risiko K3 proses dalam pemilihan material alat terhadap bahan yang berkontak dengannya, melalui tahap studi pustaka yang mengandalkan pengumpulan dan analisis data dari berbagai literatur, seperti jurnal ilmiah, laporan penelitian, dan sumber tertulis lainnya. Analisis risiko menggunakan metode Hazard

Identification and Risk Assessment (HIRA) mengacu pada AS/NZS 4360:1999 Risk Management Guideline (Joint Technical Committee OB/7, 1999), dimulai dari identifikasi bahaya kontak bahan dan material alat, analisis risiko dari dampak yang mungkin timbul, hingga pengendalian risiko untuk meminimalkan kerusakan alat. Pendekatan ini merujuk pula pada prinsip integritas aset dan keandalan pemilihan material konstruksi sebagaimana diuraikan dalam pedoman keteknikan keselamatan proses (CCPS, 2012).

Studi kompatibilitas bahan difokuskan pada peralatan skala laboratorium, mengingat data ketahanan material untuk skala tersebut relatif lebih sulit ditemukan dibandingkan skala industri. Proses ozonolisis yang dikaji melibatkan sistem pneumatik dan reverse osmosis; material yang umum digunakan pada sistem pneumatik adalah polyurethane dan nilon, sedangkan pada sistem reverse osmosis adalah polypropylene. Reaktor nanobubble tempat proses berlangsung dirancang dengan parameter operasi meliputi laju alir volumetrik ozon 60 L/menit, komposisi udara sekitar 1600 ± 50 ppm, konsentrasi larutan pelarut KOH:Metanol = 1:3, volume kerja vessel 400-600 mL, suhu operasi 60-70°C, waktu reaksi 12 jam, dan tekanan operasi 2 bar. Sebagai pembanding, nilai ambang batas paparan ozon di lingkungan kerja jauh lebih rendah dari kondisi operasional tersebut, yaitu sekitar 0,1 ppm untuk rata-rata 8 jam kerja (NIOSH, 2019; OSHA, 1994), sehingga sistem ventilasi dan pemantauan gas menjadi bagian penting dari pengendalian risiko K3 pada reaktor ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancang bangun reaktor ozonolisis skala laboratorium ini tersusun atas reaktor utama berbahan gelas, sistem pembangkit ozon, dan sistem resirkulasi cairan. Minyak jelantah bereaksi dengan KOH dan metanol membentuk metil ester, namun reaksi yang tidak berjalan sempurna berpotensi menyisakan kandungan bahan baku maupun produk yang telah terbentuk, sehingga aspek keselamatan proses perlu diperhatikan sejak tahap pemilihan material, sebagaimana diamanatkan dalam Undang-Undang Keselamatan Kerja yang berlaku di Indonesia (Pemerintah Republik Indonesia, 1970). Kompatibilitas bahan digunakan untuk mengetahui reaktivitas antara dua material apabila berkontak, yang dapat berupa kesesuaian atau menimbulkan efek lain seperti korosi maupun perubahan warna pada salah satu material (AIChE, 2021).

Hasil identifikasi dan penilaian risiko terhadap enam material pada delapan variabel operasi (KOH, metanol, ozon, efek suhu, efek tekanan, asam-basa, gliserin, dan asam lemak bebas) disajikan pada Tabel 2. Secara umum, stainless steel 304 tahan terhadap sebagian besar variabel operasi, namun menunjukkan kategori risiko sangat tinggi saat kontak dengan ozon serta dengan larutan asam dan basa. Polyethylene juga menunjukkan kategori risiko sangat tinggi ketika kontak dengan ozon pada suhu 50°C. Material lain, yaitu polyurethane, silikon, nilon, dan PVC, secara umum berada pada kategori risiko yang dapat diterima di seluruh variabel operasi yang dikaji, meskipun beberapa di antaranya mengalami degradasi pada kondisi ekstrem seperti suhu atau tekanan yang melebihi batas operasi normalnya.

Tabel 2. Kompatibilitas Material dan Penilaian Risiko terhadap Variabel Operasi Reaktor Ozonolisis

No	Material	Var.	Variabel/Kondisi	Dampak/Risiko	S	P	K	TR	Kategori
1	Stainless steel (304)	1.1	KOH (>50 g/L)	Korosi retak-stres (<100°C), laju korosi meningkat	25	0.5	0.1	1.25	Diterima
		1.2	Metanol	Tidak berdampak; ketahanan korosi meningkat	1	6	6	36	Prioritas 3
		1.3	Ozon (20-30°C,	Korosif terhadap	15	6	6	540	Sangat

No	Material	Var.	Variabel/Kondisi	Dampak/Risiko	S	P	K	TR	Kategori
2	Polyurethane		1000 kPa, O ₃ 9,5%)	semua jenis stainless steel					Tinggi
		1.4	Suhu tinggi (425-860°C, kontinu)	Oksidasi permukaan	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		1.5	Tekanan berlebih (>2.570 psi)	Retak mikro dan goresan permukaan	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		1.6	Asam dan basa	Korosi pitting pada pH asam maupun basa	15	6	6	540	Sangat Tinggi
		1.7	Gliserin	Tidak berdampak	1	6	6	36	Prioritas 3
		1.8	Asam lemak bebas	Bervariasi; oleat baik, stearat/miristat lebih korosif	1	6	6	36	Prioritas 3
		2.1	KOH (<10%, 70°F)	Degradasi minor-sedang (hidrolisis gugus C=O)	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		2.2	Metanol	Tidak berdampak	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		2.3	Ozon	Ketahanan baik	1	6	10	60	Prioritas 3
		2.4	Suhu 160-300°C, tekanan ≤15 MPa	Metanolisis, dekomposisi >90%	25	0.5	0.1	1.25	Diterima
		2.5	Tekanan >0,8 MPa	Metanolisis lanjut	25	0.5	0.1	1.25	Diterima
		2.6	Asam dan basa	Hidrolisis pada kondisi asam; tidak berdampak pada basa	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		2.7	Gliserin	Tidak berdampak	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		2.8	Asam lemak bebas	Tidak dianjurkan (pembengkakan, degradasi)	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		3.1	KOH	Tidak berdampak	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
3	Polyethylene (LDPE/HDPE)	3.2	Metanol	Tidak berdampak	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		3.3	Ozon (kontak 50°C)	Rusak langsung, tidak disarankan	15	6	6	540	Sangat Tinggi
		3.4	Suhu >80°C	Melunak, mengeras kembali saat dingin	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		3.5	Tekanan >32 bar	Kebocoran atau	15	0.5	0.1	0.75	Diterima

No	Material	Var.	Variabel/Kondisi	Dampak/Risiko	S	P	K	TR	Kategori
4	Silikon (gasket)			kerusakan lain					
		3.6	Asam dan basa	Tidak berdampak; resistensi kimia baik	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		3.7	Gliserin	Tidak berdampak	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		3.8	Asam lemak bebas	Palmitat menyerang agresif; asam lemak bebas lain tidak berdampak	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		4.1	KOH	Efek sedang hingga berat	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		4.2	Metanol (>65°C)	Pembengkakan, deformasi, kebocoran	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		4.3	Ozon	Tidak berdampak; tahan ozon	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		4.4	Suhu >220°C	Leleh, elastisitas menurun	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		4.5	Tekanan >16 bar	Deformasi dan kebocoran	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		4.6	Asam/basa kuat (>5%)	Kerusakan silikon	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
5	Nilon	4.7	Gliserin	Tidak berdampak	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		4.8	Asam lemak bebas	Sedang-berat (pembengkakan, degradasi, perubahan warna)	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		5.1	KOH	Tidak sesuai, tidak diizinkan	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		5.2	Metanol	Tidak berdampak	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		5.3	Ozon	Retak dan oksidasi	25	0.5	0.1	1.25	Diterima
		5.4	Suhu >229°C (nilon 6,6) / >149°C (nilon 6)	Melunak dan meleleh	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		5.5	Tekanan >800 psi	Deformasi dan kebocoran	15	0.5	0.1	0.75	Diterima
		5.6	Asam dan basa (asam kuat >5%)	Tahan asam ringan, rusak oleh asam kuat; tahan basa	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		5.7	Gliserin	Tidak berdampak	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		5.8	Asam lemak	Tidak berdampak	1	0.5	0.1	0.05	Diterima

No	Material	Var.	Variabel/Kondisi	Dampak/Risiko	S	P	K	TR	Kategori
			bebas						
6	PVC (Polyvinyl Chloride)	6.1	KOH ($\leq 22^{\circ}\text{C}$)	Tidak berdampak	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		6.2	Metanol ($\leq 22^{\circ}\text{C}$)	Tidak berdampak	1	0.5	0.1	0.05	Diterima
		6.3	Ozon	Korosi/perubahan warna ringan	5	1	1	5	Diterima
		6.4	Suhu $> 60^{\circ}\text{C}$	Melunak, mendekati titik leleh ($\sim 100^{\circ}\text{C}$)	25	0.5	0.5	6.25	Diterima
		6.5	Tekanan (skedul pipa)	Cracking pada tekanan berlebih	25	0.5	0.5	6.25	Diterima
		6.6	Asam dan basa	Tidak berdampak	1	1	1	1	Diterima
		6.7	Gliserin	Tidak berdampak	1	1	1	1	Diterima
		6.8	Asam lemak bebas	Tidak berdampak	1	1	1	1	Diterima

Keterangan: S = Tingkat Keparahan, P = Paparan, K = Kemungkinan Terjadi, TR = Tingkat Risiko ($S \times P \times K$).

Penyusunan prioritas dari seluruh potensi bahaya yang teridentifikasi menunjukkan bahwa sub-aspek kontak material dengan ozon merupakan potensi bahaya dengan prioritas utama untuk ditangani, mengingat tiga dari empat kondisi berkategori risiko sangat tinggi (stainless steel 304-ozon, stainless steel 304-asam/basa, dan polyethylene-ozon pada 50°C) melibatkan ozon secara langsung maupun kondisi asam-basa yang menyertai proses saponifikasi dalam reaksi esterifikasi-ozonolisis.

Temuan bahwa kontak dengan ozon menjadi sumber risiko dominan sejalan dengan sifat dasar ozon sebagai oksidator kuat yang mudah merusak ikatan rangkap maupun struktur permukaan material, khususnya logam dan polimer yang tidak dirancang tahan oksidasi. Kondisi ini konsisten dengan laporan bahwa stainless steel tetap dapat mengalami korosi signifikan pada kandungan ozon tinggi meskipun tergolong material dengan ketahanan korosi baik pada kondisi umum (Haraldsen & Leth-Olsen, 2014; Quanying Yan, 2021), serta dengan hasil pengujian standar ketahanan ozon yang menunjukkan bahwa perubahan warna dan retak dapat terjadi meski pada intensitas rendah (ASTM International, 2018).

Risiko sangat tinggi pada kontak stainless steel 304 dengan larutan asam dan basa juga sejalan dengan mekanisme korosi pitting yang telah banyak dilaporkan pada kondisi pH ekstrem, karena lapisan pasif oksida kromium pada permukaan stainless steel rentan terganggu oleh ion agresif dalam larutan tersebut. Sementara itu, kerentanan polyethylene terhadap ozon pada suhu 50°C memperkuat temuan bahwa ketahanan polimer terhadap oksidasi bersifat sangat bergantung suhu, sebagaimana juga tercermin pada perilaku degradasi polyurethane yang mengalami metanolisis signifikan pada suhu dan tekanan tinggi (Shogo Y, dkk., 2020).

Dibandingkan dengan kelima material lainnya, PVC menunjukkan profil risiko paling stabil di seluruh variabel operasi yang dikaji, termasuk terhadap ozon, sehingga secara umum kompatibel untuk komponen yang tidak mengalami tekanan atau suhu ekstrem. Namun demikian, pemilihan material akhir tetap perlu mempertimbangkan fungsi spesifik komponen di dalam rangkaian reaktor, karena material dengan ketahanan kimia baik tidak selalu memenuhi persyaratan mekanis seperti fleksibilitas (pada sistem pneumatik) atau permeabilitas selektif (pada sistem reverse osmosis). Hasil ini menegaskan pentingnya pendekatan HIRA yang mempertimbangkan kombinasi antara kompatibilitas kimia dan kebutuhan fungsional

komponen, bukan hanya ketahanan material secara umum, dalam merancang reaktor ozonolisis yang aman digunakan di skala laboratorium.

KESIMPULAN

Kajian aspek K3 dalam pemilihan material untuk rancang bangun reaktor ozonolisis skala laboratorium ini menunjukkan bahwa keenam material yang dikaji, yaitu stainless steel 304, polyurethane, polyethylene, silikon, nilon, dan PVC, memiliki profil ketahanan yang berbeda terhadap variabel operasi reaktor. Stainless steel 304 tahan terhadap sebagian besar variabel operasi namun berisiko sangat tinggi saat kontak dengan ozon dan larutan asam-basa; polyurethane secara umum tahan namun terdegradasi pada kontak berkelanjutan dengan KOH pekat; polyethylene tahan pada berbagai variabel operasi namun berisiko sangat tinggi saat kontak ozon pada suhu 50°C; silikon dan nilon tahan terhadap sebagian besar variabel namun tidak dianjurkan pada kontak berkelanjutan dengan metanol bersuhu tinggi maupun larutan basa kuat; dan PVC menunjukkan ketahanan sangat baik pada hampir seluruh variabel meskipun berpotensi mengalami perubahan warna ringan akibat ozon. Dengan demikian, pemilihan material reaktor perlu diprioritaskan pada kesesuaian terhadap paparan ozon dan kondisi asam-basa, disertai penerapan sistem ventilasi dan pemantauan gas yang memadai, guna mendukung rancangan reaktor ozonolisis yang optimal, aman, dan sesuai dengan standar keselamatan kerja serta regulasi lingkungan yang berlaku.

SARAN

Berdasarkan hasil kajian, pemilihan material reaktor ozonolisis perlu dilakukan secara lebih selektif dengan mempertimbangkan tidak hanya ketahanan terhadap bahan kimia, tetapi juga kondisi operasi dan fungsi masing-masing komponen. Material yang menunjukkan risiko sangat tinggi, khususnya stainless steel 304 terhadap ozon dan larutan asam-basa serta polyethylene terhadap ozon pada suhu 50°C, sebaiknya dievaluasi kembali sebelum digunakan pada bagian yang kontak langsung dengan bahan tersebut.

Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian material secara langsung pada kondisi operasi reaktor, sehingga ketahanan dan potensi degradasi material dapat diketahui secara lebih nyata. Selain itu, penerapan ventilasi, pemantauan konsentrasi ozon, serta pemeriksaan berkala terhadap material dan sambungan reaktor perlu menjadi bagian dari desain K3 sejak awal. Dengan demikian, reaktor tidak hanya mampu bekerja secara optimal, tetapi juga dapat digunakan secara aman dan andal oleh operator laboratorium.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung penelitian ini. Semoga hasil penelitian ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam aspek pemilihan material yang aman dan efektif untuk rancangan reaktor ozonolisis skala laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- AICHE (American Institute of Chemical Engineers). SACHe® Certificate Program Level 2, Course 3: Chemical Reactivity Hazards Unit 3 - Identifying Incompatibilities and Providing Controls and Safeguards. 2021. Available from: https://education.aiche.org/topclass/media/7aebb970-b6b7-40eb-a97b-78b5f2930cee/story_content/external_files/Level%202_Course%203_Unit%203_Slides.pdf [Accessed 10 November 2024].
- ASTM International. ASTM D1149-18: Standard Test Methods for Rubber Deterioration-Cracking in an Ozone Controlled Environment. West Conshohocken: ASTM International; 2018.
- Bismo S. Sintesis Biodiesel dengan Teknik Ozonasi: Ozonolisis Etil-Ester Minyak Sawit Sebagai Suatu Bahan Bakar Mesin Diesel Alternatif. Depok: Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia; 2005.
- CCPS (Center for Chemical Process Safety). Guidelines for Engineering Design for Process Safety. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2012.
- Haraldsen K, Leth-Olsen H. Stress Corrosion Cracking of Stainless Steel in High Pressure Alkaline Electrolysis. Hydrogen Tools; 2014.
- Hariyadi P. Sepuluh Karakter Unggul Minyak Sawit. 2010. Available from: http://seafast.ipb.ac.id/article/sepuluh_karakter_minyak_sawit.pdf [Accessed 10 November 2024].
- Institut Teknologi Bandung. Uji Terbang Pesawat CN235-220 dengan Bahan Bakar Bioavtur J2.4 Karya FTMD ITB dan PT Pertamina. 2021. Available from: <https://ftmd.itb.ac.id/id/uij-terbang-pesawat-cn235-220-dengan-bahan-bakar-bioavtur-j2-4-karya-ftmd-itb-dan-pt-pertamina/> [Accessed 10 November 2024].
- Joint Technical Committee OB/7 - Risk Management. AS/NZS 4360:1999: Risk Management. 1999. Available from: <https://docslib.org/doc/7700639/as-nzs-4360-1999-risk-management> [Accessed 10 November 2024].
- Lixia Wang. Corrosion Behaviour of Austenitic Stainless Steel as a Function of Methanol Concentration for Direct Methanol Fuel Cell Bipolar Plate. 2013. Available from: www.sciencedirect.com.
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards: Ozone. 2019. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0476.html> [Accessed 10 November 2024].
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration). Standard Interpretation: OSHA Regulations for Ozone (29 CFR 1910.1000). 1994. Available from: <https://www.osha.gov/laws-regs/standardinterpretations/1994-09-29-0> [Accessed 10 November 2024].
- Pemerintah Republik Indonesia. Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja. Jakarta: Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 1970 Nomor 1; 1970.
- Quanying Yan. Study of the Corrosion of Stainless Steel with Fatty Acid/Paraffin/Graphite Composite Phase Change Materials. 2021. Available from: www.researchgate.net.
- Shogo Y, dkk. Solvent-Induced Degradation of Polyurethane Studied by Two-Dimensional (2D) Infrared (IR) Correlation Spectroscopy. 2020. Available from: www.sciencedirect.com.
- The Jakarta Globe. Pertamina, Garuda Hold Successful Trial for Sustainable Aviation Fuel. 2023. Available from: <https://jakartaglobe.id/tech/pertamina-garuda-hold-successful-trial-for-sustainable-aviation-fuel> [Accessed 10 November 2024].
- Universitas Diponegoro. Inovatif! Dosen Muda SV UNDIP Pemilik 11 Paten Granted, Kembangkan Bahan Bakar Pesawat dari Jelantah. 2024. Available from: <https://www.undip.ac.id/post/36434/inovatif-dosen-muda-sv-undip-pemilik-11-paten->

[granted-kembangkan-bahan-bakar-pesawat-dari-jelantah.html](#) [Accessed 10 November 2024].