

Beton Geopolimer Hibrid Abu Terbang untuk Kolam Penampungan Limbah Cair Kelapa Sawit

Azzahra Aqilla¹, Salsabilla Rahmadia Khoiri¹, Taufik Hatta Arrasyid¹,
Muhamad Irsyad¹, Annesya Fabyola Delthayanti¹, Gunawan Wibisono¹,
Monita Olivia^{1*}

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau,
Jl. HR. Soebrantas Km. 12,5 Panam, Pekanbaru

*Penulis korespondensi, e-mail: *monita.olivia@lecturer.unri.ac.id

Abstrak

Limbah cair kelapa sawit (*Palm Oil Mill Effluent - POME*) adalah limbah agroindustri yang memiliki pH rendah dan konsentrasi tinggi polutan organik seperti COD dan BOD, sehingga berbahaya bagi lingkungan jika tidak diolah. Penelitian ini mengkaji penggunaan beton geopolimer hibrid berbasis abu terbang dengan kemampuan self-healing sebagai material berkelanjutan untuk kolam stabilisasi POME. Campuran beton terdiri dari abu terbang (75%), PCC (15%), 10% silika fume, larutan NaOH dengan konsentrasi 10M dan 14M, serta rasio modulus silikat 2,5 dan 3. Spesimen beton berbentuk silinder dengan ukuran 150x210 mm direndam dalam POME selama 7, 14, dan 28 hari. Pengujian meliputi kuat tekan, porositas, UPV, dan inspeksi visual. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton dengan 14M NaOH, modulus silikat 3, dan 10% silica fume memiliki kuat tekan optimal (12,5 MPa), porositas rendah (9,2%), dan durabilitas tinggi setelah 28 hari perendaman. Temuan ini menunjukkan bahwa beton geopolimer hibrid dapat menjadi alternatif ramah lingkungan untuk alternatif kolam konvensional, meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan kimia agresif seperti POME. Penelitian lebih lanjut direkomendasikan untuk mengeksplorasi kinerja jangka panjang dan aplikasi lapangan dari material ini.

Kata kunci: Geopolimer Hibrid, Limbah Cair Kelapa Sawit, Kolam Stabilisasi, Silika Fume.

Abstract

Palm Oil Mill Effluent (POME) is an agro-industrial waste characterized by a low pH and high concentrations of organic pollutants, including COD and BOD, making it hazardous to the environment if untreated. This study investigates the application of fly ash-based self-healing hybrid geopolymer concrete as a sustainable material for POME stabilization ponds. The concrete mix included fly ash (75%), PCC (15%), 10% silica fume, NaOH solutions of 10M and 14M, and silicate modulus ratios of 2.5 and 3. Cylindrical concrete specimens measuring 150x210 mm were immersed in POME for 7, 14, and 28 days. Tests included compressive strength, porosity, UPV, and visual inspections. Results revealed that concrete with 14M NaOH, a silicate modulus of 3, and 10% silica fume exhibited optimal compressive strength (12.5 MPa), low porosity (9.2%), and high durability after 28 days of immersion. These findings suggest that hybrid geopolymer concrete can serve as an environmentally friendly alternative to conventional pond linings, enhancing resistance to the aggressive chemical environment of POME. Further research is recommended to explore long-term performance and field applications of this material.

Keywords: Geopolymer, Palm Oil Mill Effluent, Silica Fume, Stabilization Pond.

1. PENDAHULUAN

Produksi semen telah menghasilkan sekitar 7-10% dari total emisi karbon dioksida (CO_2) secara global. Menurut Al Bakri et al., (2013), ditemukan bahwa satu ton Semen yang dihasilkan dari proses kalsinasi batu kapur melepaskan satu ton CO_2 ke atmosfer (Castaño et al., 2021). Dengan peningkatan produksi Semen Portland untuk memasok permintaan beton yang sangat banyak untuk proyek konstruksi, dampak yang signifikan terhadap lingkungan tidak bisa dihindari. Tingkat emisi karbon yang tinggi berkontribusi terhadap pemanasan global dan perubahan iklim. Salah satu solusi untuk mengurangi penggunaan Semen Portland adalah dengan mengganti sebagian atau seluruh semen dalam campuran beton untuk menangani masalah lingkungan, yaitu dengan menggunakan beton geopolimer yang dipopulerkan oleh Davidovits pada tahun 1998. Beton geopolimer dibuat tanpa semen dari limbah agroindustri kaya silika dan alumina dan diaktivasi menggunakan larutan aktivator kombinasi NaOH dan natrium silikat pada suhu tinggi (Olivia et al., 2017). Mulanya, geopolimer menggunakan metakaolin sebagai material pembentuk beton geopolimer. Metakaolin memiliki sifat mekanik yang baik dan memiliki durabilitas tinggi terhadap api dan lingkungan agresif seperti asam dan air laut (Ashfaq et al., 2024; Olivia, 2011; Palomo et al., 1999). Namun, material tersebut memiliki harga yang sangat tinggi dan ketersediaan terbatas. Oleh sebab itu, digunakan material alternatif dengan memanfaatkan limbah abu terbang dan *slag* yang kaya akan SiO_2 dan Al_2O_3 yang diaktifkan dengan alkali aktivator (Wijaya et al., 2019; Ganesh et al., 2024; Roy, 1999). Beton geopolimer memiliki beberapa keuntungan sebagai material konstruksi pengganti beton konvensional. Beton geopolimer berkontribusi dalam pengurangan jejak karbon, menambah efektivitas pemanfaatan limbah, dan memiliki ketahanan terhadap lingkungan agresif karena kandungan kalsiumnya yang rendah (Olivia, 2011).

Proses pembuatan beton geopolimer yang menggunakan metode *heat curing* mencegah pengaplikasian beton karena tidak dapat diawetkan dengan kondisi ambien. Supaya dapat meningkatkan geopolimerisasi pada suhu kamar, peneliti memasukkan zat aditif seperti OPC sebagai bahan tambah dalam beton geopolimer sehingga dinamakan beton geopolimer hibrid atau geopolimer OPC (Huo et al., 2021). Semen memiliki sifat mengikat yang cepat. Ketika ditambahkan kedalam campuran geopolimer, semen dapat mempercepat reaksi awal geopolimerisasi. Hal ini menjadi nilai lebih ketika ingin mendapatkan kekuatan awal yang lebih tinggi apabila dirawat dalam suhu ruang (Long et al., 2024).

Limbah cair pabrik kelapa sawit atau *Palm Oil Mill Effluent* (POME) adalah limbah residu proses pengolahan tandan buah segar (TBS) kelapa sawit yang berupa air, minyak, dan zat organik untuk memproduksi *Crude Palm Oil* (CPO) (Hansamali et al., 2024). Berdasarkan data Statistik Perkebunan Indonesia Komoditas Kelapa Sawit (2023), dihasilkan lebih dari 46,82 juta ton limbah cair kelapa sawit tiap tahunnya. POME memiliki bau menyengat dan terdiri dari residu minyak yang tidak beracun, namun memiliki tingkat pencemaran yang tinggi terhadap lingkungan karena kandungan COD (*Chemical Oxygen Demand*) antara 45.000-65.000 mg/L dan kandungan BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) antara 18.000-48.000 serta memiliki pH rendah di antara 3-4 (Yap et al., 2021). Kolam stabilisasi merupakan metode yang disarankan untuk pengolahan limbah domestik karena murah, biaya perawatan rendah, efisien, dan memanfaatkan energi dari panas matahari sehingga tidak memerlukan peralatan elektromekanis dan menghemat pengeluaran listrik dan pengoperasian (Mohammad et al., 2021; Ho et al., 2017). Menurut EAWAG (*Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology*), kolam stabilisasi merupakan kolam besar yang dapat mengolah limbah sehingga aman apabila dilepas ke

lingkungan (Mara, 1997). Kolam stabilisasi biasanya dihubungkan dalam tiga rangkaian yaitu dari kolam anaerobik ke kolam fakultatif, dan selanjutnya ke kolam aerobik. Kolam anaerobik dan fakultatif dirancang untuk menghilangkan COD dan BOD, sedangkan kolam aerobik dirancang untuk menghilangkan bakteri patogen. Kolam aerobik biasanya disebut sebagai kolam maturasi, *polishing*, atau *finishing* karena kolam ini merupakan langkah terakhir dari sistem rangkaian kolam stabilisasi (Alexiou & Mara, 2003).

Badan Lingkungan Hidup menyatakan bahwa standar BOD dan COD yang diperbolehkan untuk dilepas ke perairan adalah sekitar 100 mg/L dan 350mg/L serta memiliki pH 6,5-8. Untuk menurunkan kadar COD, BOD, dan juga menaikkan pH limbah cair, POME diolah di pabrik kelapa sawit dengan sistem kolam penampungan yang terdiri dari fat pit, kolam pendinginan, kolam pengasaman, kolam anaerobik, kolam fakultatif, dan kolam aerobik (Zahrim et al., 2014). Sistem kolam adalah metode paling konvensional untuk mengolah limbah cair kelapa sawit. Menurut Ludin et al, (2014) pengolahan POME dengan kolam anaerob merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengurangi dampak lingkungan dari limbah cair yang dihasilkan oleh pabrik pengolahan minyak kelapa sawit. Kolam anaerob adalah sistem pengolahan adalah sistem pengolahan limbah biologi yang menggunakan proses anaerobik, di mana mikroorganisme bekerja dalam kondisi tanpa oksigen untuk menguraikan senyawa organik dalam POME (Wajdi & Muda, 2023). Sebelum dialirkan ke kolam anaerob, POME terlebih dahulu disaring untuk menghilangkan padatan kasar dari limbah kelapa sawit. Selama proses anaerobik, mikroorganisme dalam kolam akan mengurai senyawa organik dalam POME, menghasilkan metana dan karbon dioksida sebagai produk sampingan (Igwe & Onyegbado, 2007). Setelah POME melewati kolam anaerob, air limbah yang dihasilkan masih dapat mengandung senyawa organik yang perlu dihilangkan. Oleh karena itu, diperlukan langkah pengolahan lanjutan seperti pengolahan aerobik atau pengendapan kimia (Patthanaissaranukool & Polprasert, 2011). Biogas yang dihasilkan selama proses anaerobik dapat digunakan sebagai sumber energi untuk pabrik atau diubah menjadi listrik (Ng et al., 2012). Setelah pengolahan, air limbah yang telah diolah dapat disimpan dalam kolam penyimpanan sementara atau dibuang ke lingkungan dengan izin dan pemantauan yang ketat. Pengolahan POME dengan kolam anaerobik memiliki beberapa keuntungan, termasuk pengurangan emisi gas rumah kaca, pengurangan polusi air, dan potensi untuk memanfaatkan biogas sebagai sumber energi (Rahim et al., 2011). Kolam penampungan POME sebaiknya terbuat dari beton untuk menghindari kontak langsung dengan lingkungan karena kandungannya yang berbahaya. Namun, hal tersebut membuat beton rentan mengalami keretakan karena material berbahaya yang terkandung dalam POME dapat masuk ke pori-pori beton sehingga mengakibatkan korosi pada beton (Yusof et al., 2023).

POME mengandung berbagai macam asam organik seperti asam asetat, asam propionat, dan asam butirat. Asam-asam ini dapat menurunkan pH air sehingga lingkungan beton menjadi lebih asam (Igwe & Onyegbado, 2007). Selain itu, minyak dan bahan organik dalam POME dapat menutupi permukaan beton, dan menghalangi ikatan antara pasta semen dan agregat sehingga dapat melemahkan struktur beton (*Portland Cement Association*, 2002). Berdasarkan penelitian Wijaya et al., (2019), beton geopolimer hibrid dari kombinasi PCC dan OPC dapat mengonversikan abu terbang berkualitas rendah menjadi beton multiguna dengan melemahkan logam berat dalam abu terbang. Dilaporkan bahwa geopolimer abu terbang memiliki ketahanan tinggi di beberapa lingkungan korosif seperti asam, sulfat, dan api. Kandungan kalsium geopolimer yang rendah merupakan salah satu alasan geopolimer memiliki durabilitas yang tinggi mengingat beton OPC sangat rentan terhadap lingkungan korosif (Olivia, 2011). Namun, penelitian mengenai beton geopolimer hibrid abu terbang sebagai kolam penampungan limbah

cair kelapa sawit belum banyak diteliti dan belum menjadi alternatif material di lapangan. Oleh karena itu, beton geopolimer hibrid abu terbang berpotensi untuk diaplikasikan menjadi kolam penampungan limbah cair kelapa sawit dan mengatasi permasalahan dalam porositas, permeabilitas, juga masa layan kolam penampungan limbah cair kelapa sawit sebelumnya.

Karakteristik campuran geopolimer untuk kolam limbah cair seperti POME memerlukan ketahanan khusus terhadap lingkungan agresif. Untuk kolam limbah, yang menjadi prioritas adalah durabilitas kimiawi seperti resistensi korosi terhadap asam, *self healing* untuk retakan mikro, dan porositas yang rendah. Dibandingkan dengan geopolimer untuk struktur bangunan, campuran ini memiliki tingkat urgensi yang tinggi karena industri sawit di Indonesia menghasilkan >46 juta ton POME/tahun, dan kolam konvensional dengan terpal/geomembran sering gagal karena kebocoran sehingga menyebabkan kontaminasi tanah dan air.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji komposisi optimum silica fume pada beton geopolimer hibrid sebagai kolam stabilisasi limbah cair kelapa sawit. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji tentang durabilitas beton setelah terendam limbah cair kelapa sawit (*durability*), kuat tekan (*compression strength*), UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*), dan porositas. Inovasi penelitian ini diharapkan dapat menggantikan kolam limbah cair kelapa sawit sebelumnya yang masih menggunakan terpal atau geomembran sehingga tidak terkontrollnya muka air. Selain itu, pabrik kelapa sawit di luar negeri seperti Malaysia sudah menerapkan kolam beton sebagai penampung POME (Jumadi et al., 2020). Namun, karena banyaknya zat-zat berbahaya pada POME menyebabkan beton mengalami keropos, retak, bahkan meningkatkan resiko hancurnya kolam. Oleh karena itu, beton geopolimer hibrid abu terbang menggunakan silika fume dapat dijadikan solusi sebagai kolam penampungan limbah cair kelapa sawit yang ramah lingkungan karena menggunakan produk samping berupa abu terbang. Selain itu, penambahan PCC menjadikan beton tersebut memiliki kuat tekan yang tinggi, porositas dan permeabilitas rendah, serta durabilitas terhadap lingkungan agresif karena silika fume yang ditambahkan pada campuran dapat menyembuhkan beton setelah mengalami keretakan dengan mengisi ruang antar partikel beton yang mengalami retak karena POME.

2. METODE PENELITIAN

Pelaksanaan penelitian beton geopolimer hibrid abu terbang untuk saluran penampungan limbah cair kelapa sawit dilakukan di Laboratorium Teknologi Bahan Fakultas Teknik Universitas Riau. Persiapan material berupa peralatan dan bahan yang dibutuhkan dilakukan pada tahap awal penelitian. Prosedur penelitian yang dilakukan yakni, pengujian karakteristik material meliputi uji properties agregat, komposisi kimia abu terbang, PCC, larutan aktivator, dan limbah cair kelapa sawit. Kemudian, melakukan trial mix dengan variasi abu terbang dan variasi aktivator (NaOH dan Na₂SiO₃). Dilanjutkan dengan pembuatan benda uji berdasarkan *trial mix* yang akan menghasilkan kuat tekan optimum beton geopolimer hibrid abu terbang. Lalu dilakukan pengujian *setting time*, *slump*, *density*, *water content*, dan perendaman benda uji selama 28 hari pada suhu ruang serta 28 hari pada kondisi lingkungan limbah cair kelapa sawit. Selanjutnya dilakukan pengujian kinerja lingkungan terhadap beton geopolimer hibrid abu terbang yang terdiri dari pengujian sifat fisik beton (pengujian kuat dan pengujian permeabilitas) dan pengujian durabilitas beton (perendaman sampel beton dengan limbah cair kelapa sawit selama 7, 14, dan 28 hari). Adapun parameter pengujian adalah kehilangan berat, porositas, dan retak halus pada beton.

Beton geopolimer hybrid dibuat dalam bentuk silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm (rasio 1:2 sesuai SNI 03-2847-2019). Setiap variasi dibuat dalam tiga replikasi, sehingga total spesimen sebanyak 36 silinder. Variasi yang diteliti meliputi molaritas NaOH (10 M dan 14 M), rasio modulus silikat ($Ms = Na_2SiO_3/NaOH = 2,5$ dan $3,0$), serta kandungan silika fume (0% dan 10% terhadap berat abu terbang), sedangkan kandungan semen Portland Composite (PCC) tetap 15% dari berat abu terbang pada semua variasi. Pemilihan rentang molaritas 10-14 M dan Ms 2,5-3,0 didasarkan pada literatur yang menunjukkan bahwa kombinasi ini memberikan keseimbangan optimal antara *workability* dan kekuatan geopolimer berbasis abu terbang kelas F pada kondisi *curing* ambien (Chen et al., 2021; Polusani et al., 2022). Sementara silika fume 10% dipilih karena terbukti efektif sebagai *partial replacement* sekaligus *self healing* di lingkungan asam organik (Tan et al., 2021). Kuat tekan rencana ditargetkan minimal 8 MPa untuk aplikasi non-struktural kolam stabilisasi. Beton kontrol adalah variasi tanpa silika fume (GP4). Notasi GP pada benda uji merujuk pada “Geopolimer” dengan rincian sebagai berikut: GP1 (10 M NaOH, Ms 2,5, silika fume 10 %), GP2 (10 M NaOH, Ms 3, silika fume 10 %), GP3 (14 M NaOH, Ms 3, silika fume 10 %), dan GP4 (14 M NaOH, Ms 3, silika fume 0 % – kontrol). Material penyusun terdiri dari abu terbang, PCC, silika fume, agregat halus, agregat kasar, alkali activator (NaOH + $Na_2 SiO_3$), dan *superplasticizer*. Setelah proses pencetakan, spesimen menjalani rest period dan perawatan pada suhu ruang (27–31 °C) selama 28 hari, kemudian direndam penuh dalam limbah cair POME (pH 4,2–4,4; COD 91.000–94.000 mg/L; suhu 29 ± 2 °C) selama 7, 14, dan 28 hari. Variasi campuran dan komposisi bahan secara lengkap disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Mix Variasi Beton Geopolimer Hibrid

	Mixes	NaOH (M)	Ms	PCC (%)	Alkali/FABA	SF (%)
GP1	10M_2.5Ms_10SF	10	2.5	15	0.65	10
GP2	14M_2.5Ms_10SF	14	2.5	15	0.65	10
GP3	14M_3Ms_10SF	14	3	15	0.65	10
GP4	14M_3Ms_0SF	14	2.5	15	0.65	0

Tabel 2. Komposisi Beton Geopolimer Hibrid

Komposisi Beton		
Abu Terbang	509,1	kg/m ³
Agregat Kasar	1014,0	kg/m ³
Agregat Halus	546,0	kg/m ³
Semen	76,36	kg/m ³
<i>Sodium Hydroxide</i>	94,5	kg/m ³
<i>Sodium Silicate</i>	236,4	kg/m ³
Air	117,1	kg/m ³
<i>Superplasticizer</i>	7,6	kg/m ³

Variabel terikat pada penelitian ini yaitu karakteristik beton geopolimer hibrid normal setelah perawatan selama 28 hari pada suhu ruang dan kondisi lingkungan asam dari limbah cair pabrik kelapa sawit. Sedangkan variabel bebas yaitu beton geopolimer hibrid abu terbang yang dirawat pada suhu ruang dan kondisi lingkungan asam dari limbah cair pabrik kelapa sawit. Bahan penyusun beton meliputi agregat kasar, agregat halus, semen PCC, silika fume, abu terbang, dan alkali aktivator.

Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus dan agregat kasar sesuai dengan beberapa parameter penting yang digunakan dalam pengujian material untuk konstruksi. Hasil pemeriksaan mencakup kadar lumpur, berat jenis, kadar air, modulus kekehulusan, berat volume, ketahanan aus, dan kadar organik pada kedua jenis agregat tersebut. Pada parameter kadar lumpur, agregat halus memiliki nilai sebesar 2,07%. Untuk berat jenis, agregat halus tercatat sebesar 2,56 gr/cm³, sedangkan agregat kasar memiliki nilai 2,65 gr/cm³. Parameter kadar air menunjukkan agregat halus memiliki kadar air sebesar 1,32%, sedangkan agregat kasar 0,20%. Dalam hal modulus kehalusan, agregat halus memperoleh nilai 2,64, sedangkan agregat kasar 7,33. Untuk berat volume, pada kondisi gembur, agregat halus memiliki nilai 1,62 gr/cm³, sementara agregat kasar 1,63 gr/cm³. Pada kondisi padat, agregat halus tercatat 1,69 gr/cm³, sedangkan agregat kasar sedikit lebih tinggi dengan nilai 1,71 gr/cm³. Hasil pengujian ketahanan aus menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki nilai 38,40%, dan untuk kadar organik, agregat halus tercatat 2%. Berdasarkan hasil pengujian, agregat kasar dan halus sudah memenuhi spesifikasi dan cocok digunakan sebagai bahan penyusun beton untuk penelitian ini.

Karakteristik abu terbang dan silika fume dapat dilihat pada Tabel 3. Abu terbang yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari PLTU Tenayan, Pekanbaru dan silika fume yang digunakan berasal dari PT Sika. Komposisi kimia abu terbang dan silika fume diperoleh dari pengujian langsung menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) di laboratorium Universitas Negeri Padang. Tabel 3 menunjukkan bahwa kandungan terbesar yang dimiliki oleh silika fume adalah SiO₂ yaitu sebesar 91,5%. Senyawa lain yang terdapat dalam silika fume antara lain P₂O₅ sebesar 3,6% dan CaO sebesar 2,8%. Kandungan senyawa tersebut dapat membantu meningkatkan reaksi semen dengan air untuk memaksimalkan pembentukan senyawa kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) sebagai senyawa pengikat antar material beton. Pengujian abu terbang menunjukkan bahwa abu terbang digolongkan kedalam kelas F (kalsium rendah) karena kandungan CaO lebih dari 10% dan kandungan SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ lebih dari 70%. Abu terbang kelas F sering digunakan dalam pembuatan geopolimer karena abu terbang dengan kalsium tinggi memiliki sifat yang kurang stabil dalam proses geopolimerisasi. Hal ini disebabkan karena tingginya kalsium, laju reaksi geopolimerisasi menjadi meningkat dan menyebabkan pembentukan gel CSH yang terlalu cepat sehingga menyebabkan pengurangan nilai kuat tekan beton (Olivia, 2011; Zafirovski et al., 2023).

Tabel 3. Hasil Pengujian Karakteristik Silika Fume dan Abu Terbang

Parameter Uji	Silika Fume (%)	Abu Terbang (%)
CaO	2,83	1,71
SiO ₂	91,46	60,48
Al ₂ O ₃	0,27	28,15
Fe ₂ O ₃	0,14	4,25
MgO	-	0,47
K ₂ O	1,06	1,41
Na ₂ O	-	0,14
LOI	-	1,59
P ₂ O ₅	3,63	-

Hasil pengujian Limbah Cair Kelapa Sawit (POME) dari cooling pond dan buffer tank yang dilampirkan pada Tabel 5 menunjukkan bahwa kedua jenis limbah ini memiliki karakteristik lingkungan yang sangat asam dengan nilai pH masing-masing sebesar 4,30 dan 4,25. Kandungan

total solid (TS) cukup tinggi, yaitu 57.627 mg/L pada *cooling pond* dan 56.216 mg/L pada *buffer tank*, sementara *total suspended solid* (TSS) masing-masing mencapai 32.435 mg/L dan 27.025 mg/L. Tingginya kadar *chemical oxygen demand* (COD) yang mencapai 94.167 mg/L pada *cooling pond* dan 91.750 mg/L pada *buffer tank* menandakan bahwa limbah ini memiliki kandungan bahan organik yang signifikan, yang dapat menyebabkan dampak lingkungan serius jika tidak diolah dengan baik. *Volatile fatty acids* (VFA) pada limbah menunjukkan nilai 2.127 mg/L pada *cooling pond* dan 1.532 mg/L pada *buffer tank*, yang memperlihatkan kontribusi terhadap tingkat keasaman yang tinggi, sementara *volatile suspended solid* (VSS) masing-masing mencapai 26.610 mg/L dan 25.560 mg/L. Hasil ini mendukung temuan bahwa POME adalah limbah yang kaya akan senyawa organik yang berpotensi merusak lingkungan jika dikelola dengan cara yang tidak tepat, terutama pada sistem kolam stabilisasi (*waste stabilization ponds*), yang masih menjadi teknologi umum dalam pengolahan limbah ini. Pengolahan POME dengan teknologi lanjutan seperti *anaerobic digestion* atau filtrasi membran telah dibuktikan dapat meningkatkan efisiensi penurunan COD dan TSS, sehingga dapat memenuhi standar pembuangan limbah (Tan et al., 2021).

Tabel 4. Hasil Pengujian Karakteristik Limbah Cair Kelapa Sawit (POME)

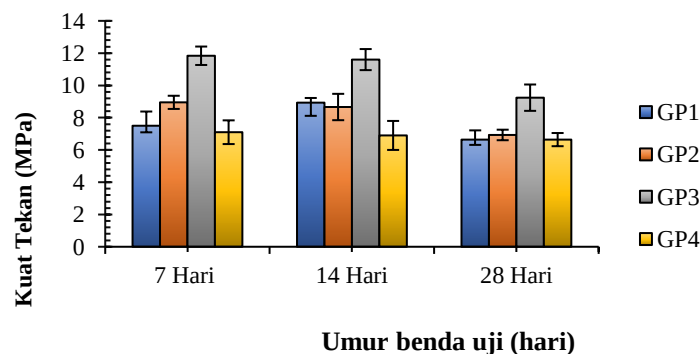
Parameter	Unit	Hasil Analisa	
		<i>Cooling Pond</i>	<i>Buffer Tank</i>
pH	-	4.30	4.25
TS	mg/L	57627	56216
TSS	mg/L	32435	27025
COD	mg/L	94167	91750
VFA	mg/L	2127	1532
VSS	mg/L	26610	25560
VS	mg/L	46331	45626
TDS	mg/L	ad	ad

Sumber: PT. Ivo Mas Tunggal, 2021.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Uji Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan beton setelah direndam dalam limbah cair kelapa sawit pada umur 7, 14, dan 28 hari dapat dilihat pada Gambar 1.

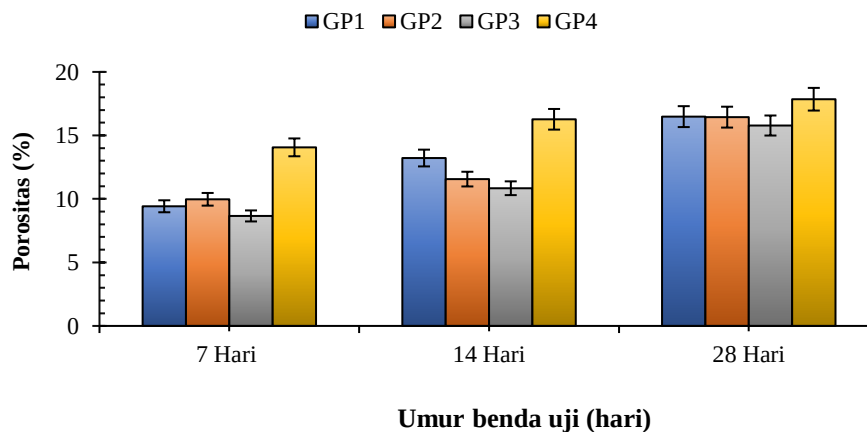


Gambar 1. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Kuat tekan tertinggi diperoleh pada beton GP3 dengan 14M NaOH, modulus silikat 3, dan 10% silika fume. Hal tersebut terjadi karena molaritas NaOH yang tinggi sehingga partikel-partikel pozzolan terikat sempurna dan membentuk jaringan tahan air (Chen et al., 2021). Tingkat konsentrasi NaOH dalam larutan alkali aktivator dapat memengaruhi sifat beton geopolimer termasuk durabilitasnya. Konsentrasi NaOH yang lebih tinggi dapat meningkatkan laju reaksi dan meningkatkan durabilitas terhadap serangan asam. Selain itu, modulus silikat yang ada pada larutan aktivator dapat meningkatkan kuat tekan karena menghasilkan banyak ikatan kovalen Si-O-Si dalam struktur geopolimer (Polusani et al., 2022). Pemakaian silika fume pada variasi beton 1, 2, dan 3 dapat mengisi pori yang ada pada beton sehingga beton lebih kedap dan meningkatkan kuat tekan. Apabila terkena paparan asam dari limbah cair kelapa sawit, silika fume akan berperan sebagai *buffer* karena memiliki partikel halus dan reaktivitas yang tinggi. Apabila terpapar asam, partikel ini dapat bereaksi dengan mengonsumsi asam dari limbah cair kelapa sawit dan mengubahnya menjadi senyawa yang lebih *inert* atau stabil (Tan et al., 2021). Kuat tekan terendah diperoleh pada beton GP4 yang tidak menggunakan silika fume pada campurannya. Hal ini terjadi karena tidak adanya silika fume pada campuran beton mengakibatkan beton memiliki banyak pori sehingga material organik dan senyawa berbahaya yang ada pada limbah kelapa sawit akan masuk ke dalam struktur beton dan menyerang beton dari luar dan dalam. Beton yang terpapar serangan asam cenderung memiliki kuat tekan yang rendah dan ketahanan beton terhadap sulfat yang rendah.

3. 2 Hasil Uji Porositas

Hasil pengujian porositas beton geopolimer hibrid setelah direndam limbah cair kelapa sawit dapat dilihat pada Gambar 2.



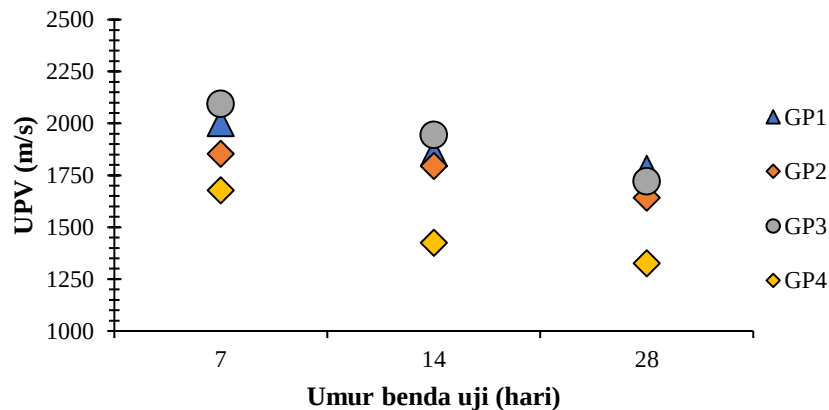
Gambar 2. Hasil Pengujian Porositas Beton

Berdasarkan hasil pengujian di atas menunjukkan beton GP3 dengan umur beton 7 hari memiliki persentase pori yang lebih rendah dari variasi lain. Sama seperti kuat tekan, hasil persentase porositas akan meningkat seiring bertambahnya umur beton yang berarti semakin bertambah umur beton maka beton tersebut akan memiliki persentase pori yang besar. Limbah cair kelapa sawit memiliki senyawa berbahaya yang dapat merusak struktur beton geopolimer dan mengakibatkan kompresi pori dalam beton dan meningkatkan porositas beton karena pembentukan lubang-lubang atau pori akibat serangan asam dari limbah cair kelapa sawit seperti pada beton GP4. Beton GP 1, 2, dan 3 yang mengandung silika fume dalam campurannya memiliki nilai porositas yang cenderung rendah karena silika fume dapat berperan dalam mengisi

pori-pori dalam beton geopolimer hibrid dengan cara partikel dari silika fume masuk ke dalam pori-pori beton dan berfungsi sebagai filler sehingga beton menjadi lebih kedap dan memiliki nilai porositas yang lebih kecil.

3. 3 Hasil Uji Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) merupakan metode non-destruktif yang digunakan untuk mengukur kecepatan perambatan gelombang ultrasonik melalui benda uji berupa beton. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur cepat rambat gelombang elektronik longitudinal melalui media beton. Hasil pengujian UPV beton dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 3. Hasil Pengujian UPV Beton

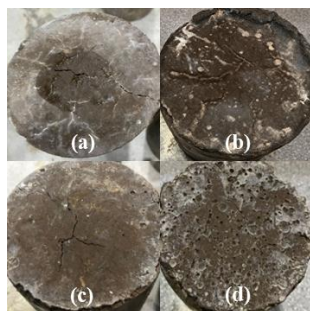
Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa beton variasi 3 memiliki nilai cepat rambat yang tinggi sedangkan variasi 4 memiliki nilai cepat rambat yang rendah. Hasil pengujian UPV berbanding lurus dengan nilai kuat tekan beton. Semakin tinggi nilai cepat rambat maka nilai kuat tekan beton juga semakin tinggi. Beton variasi 3 memiliki nilai cepat rambat yang tinggi karena silika fume pada campuran beton mengisi celah antara pori yang ada pada matriks beton sehingga kecilnya celah atau pori-pori dalam beton memungkinkan gelombang ultrasonik lebih jauh merambat daripada dipantulkan oleh celah atau pori di dalamnya. Pada beton yang kurang padat seperti pada GP4, gelombang cenderung dipantulkan sehingga menghasilkan nilai UPV yang rendah. Beton GP 1 dan 2 memiliki nilai cepat rambat yang tidak jauh berbeda dari beton GP3. Hal ini karena perbedaan dari tiap variasi ada pada molaritas NaOH dan modulus silikat. Modulus silikat yang ada pada beton geopolimer dapat menyebabkan beton menjadi lebih padat. Hal ini dapat diketahui dari nilai cepat rambat beton GP3 yang lebih tinggi pada 7 hari pertama perendaman beton pada limbah cair kelapa sawit (Tabassum et al., 2015). Konsentrasi NaOH dalam larutan alkali aktivator yang digunakan dalam pembuatan beton geopolimer dapat mempengaruhi kecepatan pengerasan beton. Penambahan konsentrasi NaOH yang tepat dapat mempercepat reaksi kimia antara pozzolan dan larutan alkali sehingga dapat mempengaruhi tingkat keretakan beton (Yanuari et al., 2020).

Peningkatan molaritas NaOH dari 10 M menjadi 14 M secara signifikan meningkatkan kelarutan ion aluminat $[Al(OH)_4^-]$ dan silikat dari abu terbang, sehingga mempercepat reaksi geopolimerisasi dan pembentukan gel natrium-alumino-silikat-hidrat (N-A-S-H) yang lebih padat dan kohesif (Chen et al., 2021). Konsentrasi OH^- yang lebih tinggi pada 14 M juga meningkatkan derajat disolusi fase amorf SiO_2 dan Al_2O_3 , menghasilkan rasio Si/Al yang lebih optimal dalam matriks geopolimer, yang terbukti dari porositas terendah dan nilai UPV tertinggi pada variasi

GP3. Kombinasi dengan rasio modulus silikat 3,0 menyediakan lebih banyak spesies silikat reaktif ($\text{Si}(\text{OH})_4$ dan $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$), yang mengisi pori-pori dan membentuk jaringan tiga dimensi Si–O–Si dan Si–O–Al yang lebih kuat dan kedap. Partikel ultra-halus silika fume (10 %) berperan sebagai mikro-filler dan sumber silika tambahan, sehingga memperkuat densifikasi mikrostruktur dan meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi asam organik dari POME (Tan et al., 2021). Mekanisme ini menjelaskan mengapa variasi GP3 menunjukkan performa mekanis dan durabilitas terbaik dibandingkan variasi lainnya.

3. 4 Hasil Pengujian Visual

Setelah beton direndam dengan limbah cair kelapa sawit selama 28 hari, terlihat beberapa keretakan pada beton yang disebabkan oleh lingkungan asam dan terjadi pelepasan partikel sehingga beton menjadi keropos. Pada beton GP4, mulai terlihat keretakan sejak hari pertama. Hal ini disebabkan karena tidak adanya silika fume pada variasi beton. Fungsi silika fume sebagai material pozzolan akan mempererat ikatan antar partikel beton, dan juga partikel halus yang ada pada silika fume akan masuk ke dalam matriks beton yang mengalami keretakan, sehingga silika fume disini juga berfungsi sebagai healing agent (Depaa & Kala, 2020). Selain itu, dibantu dengan alkali aktivator, maka kinerja dari silika fume juga akan meningkat. Visual benda uji setelah terpapar limbah cair kelapa sawit dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Visual Beton Setelah Direndam POME Selama 28 Hari

Berdasarkan Gambar 4, terlihat perubahan warna pada beton setelah terpapar limbah cair kelapa sawit pada umur 28 hari. Gambar 4(a) menunjukkan beton GP1, gambar 4(b) menunjukkan beton GP2, gambar 4(c) menunjukkan beton GP3, dan gambar 4(d) menunjukkan beton GP4. Ke-empat beton memiliki perubahan warna dari coklat menjadi coklat kehitaman. Hal ini terjadi karena limbah cair kelapa sawit memiliki pigmen organik salah satunya *tannin* sehingga mengakibatkan perubahan warna beton menjadi lebih coklat dan gelap (Rahardjo, 2009). Dibandingkan beton GP 1, 2, dan 3, beton GP4 memiliki tekstur yang lebih kasar dan memiliki pori yang besar dan banyak. Hal ini bisa terjadi karena limbah cair kelapa sawit mengandung lemak dan minyak yang dapat meresap ke dalam beton. Beton GP 1, 2, dan 3 terlihat tidak memiliki pori dan bertekstur kasar seperti beton GP4. Kehadiran silika fume terbukti berperan penting sebagai filler yang mengurangi porositas beton dan meningkatkan densitas matriks, yang membuatnya lebih tahan terhadap serangan senyawa asam organik dalam POME (Igwe & Onyegbado, 2007). Beton yang bersifat kedap membuat senyawa asam yang ada pada limbah cair kelapa sawit tidak dapat menembus beton dan dapat berfungsi sebagai healing agent apabila beton terpapar limbah cair kelapa sawit.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa beton geopolimer hibrid abu terbang menunjukkan potensi besar sebagai solusi material konstruksi ramah lingkungan untuk kolam stabilisasi limbah cair kelapa sawit (POME). Penggunaan material ini dapat menjadi alternatif dalam mengurangi dampak lingkungan dari limbah cair yang dihasilkan oleh industri kelapa sawit. Pada umur perendaman 28 hari, variasi beton GP3 menunjukkan kuat tekan tertinggi, yaitu 9,24 MPa dan porositas terendah sebesar 15,78%. Hasil ini mengindikasikan bahwa kombinasi ini menghasilkan matriks beton yang lebih padat dan tahan terhadap lingkungan agresif seperti POME. Sebaliknya, beton GP4 tanpa silika fume menunjukkan performa yang lebih rendah, dengan kuat tekan 6,64 MPa dan porositas mencapai 17,85%.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa silika fume tidak hanya berperan sebagai filler untuk meningkatkan densitas beton, tetapi juga sebagai self-healing agent, yang mampu menutup retakan mikro yang terbentuk akibat paparan lingkungan asam. Mekanisme ini dapat memperpanjang masa layan kolam stabilisasi berbasis beton geopolimer hibrid. Namun, penerapan beton geopolimer hibrid sebagai material konstruksi kolam stabilisasi masih memerlukan kajian lebih lanjut, khususnya optimasi bahan penyusun dan performa jangka panjang dalam kondisi lapangan. Secara keseluruhan, beton geopolimer hibrid dengan silika fume menawarkan solusi inovatif untuk meningkatkan keberlanjutan dalam pengolahan limbah cair kelapa sawit. Dengan peningkatan formulasi dan dukungan teknologi pengolahan tambahan, material ini dapat membantu industri sawit mencapai standar lingkungan yang lebih baik dan memperkuat kontribusi terhadap pembangunan berkelanjutan. Potensi pengembangan campuran geopolimer untuk aplikasi lapangan mencakup integrasi dengan lapisan pelindung tambahan pada kolam berukuran besar, terutama untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan serangan kimia. Dengan formulasi yang tepat, umur layanan jangka panjang dapat dicapai melalui pemantauan berkala. Pendekatan ini berpotensi menurunkan biaya pemeliharaan serta meminimalkan risiko kebocoran polutan dari struktur penampungan limbah.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd Rahim, S., Mohd Ramdhan, K., & Mohd Solah, D. (2011). Innovation and technologies for oil palm mechanization. *Further Advances in Oil Reserach (2000-2010)*, April, 570–597.
- Al Bakri, A. M. M., Kamarudin, H., Binhussain, M., Nizar, I. K., Rafiza, A. R., & Zarina, Y. (2013). Comparison of geopolymers fly ash and ordinary portland cement to the strength of concrete. *Advanced Science Letters*, 19(12), 3592–3595. <https://doi.org/10.1166/asl.2013.5187>
- Alexiou, G. E., & Mara, D. D. (2003). Anaerobic waste stabilization ponds: A low-cost contribution to a sustainable wastewater reuse cycle. *Applied Biochemistry and Biotechnology - Part A Enzyme Engineering and Biotechnology*, 109(1–3), 241–252. <https://doi.org/10.1385/ABAB:109:1-3:241>
- Ashfaq, M. H., Sharif, M. B., Irfan-ul-Hassan, M., Sahar, U. us, Akmal, U., & Mohamed, A. (2024). Up-scaling of fly ash-based geopolymers concrete to investigate the binary effect of locally available metakaolin with fly ash. *Heliyon*, 10(4), e26331. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26331>
- Castaño, J. C., Cornelio, A. C. S., & Giraldo, C. H. (2022). Production of eco-friendly concrete using crushed waste glass as replacement of fine aggregates. *International Journal of Concrete Structures and Materials*.
- Chen, K., Lin, W. T., & Liu, W. (2021). Effect of NaOH concentration on properties and microstructure of a novel reactive ultra-fine fly ash geopolymer. *Advanced Powder Technology*, 32(8), 2929–2939. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.06.008>
- Dr Depaa, & Kala T, D. F. (2020). Chemical Analysis of Silica Fume Infused Concrete.

- International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(6), 1430–1432.
<https://doi.org/10.35940/ijrte.f7720.038620>
- Felix Wijaya, M., Olivia*, M., & Saputra, E. (2019). Kuat Tekan Mortar Geopolimer Abu Terbang Hibrid menggunakan Semen Portland. *Jurnal Teknik*, 13(1), 60–68.
<https://doi.org/10.31849/teknik.v13i1.2914>
- Ganesh, A. C., Raju, H. P., Margret, L., & Jinendra, U. (2024). Rice Husk Ash based Sodium Silicate as the Alkali Activator in slag based Geopolymer Concrete. 04003, 1–9.
- Hansamali, P. S., Yang, E. C. Y., & Zakaria, S. (2024). A Short Review: Photocatalysis As An Alternative Method for POME Treatment. *Journal of Engineering Technology and Applied Physics*, 6(1), 32–39. <https://doi.org/10.33093/jetap.2024.6.1.5>
- Ho, L. T., Van Echelpoel, W., & Goethals, P. L. M. (2017). Design of waste stabilization pond systems: A review. *Water Research*, 123(June), 236–248.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.071>
- Huo, W., Zhu, Z., Zhang, J., Kang, Z., Pu, S., & Wan, Y. (2021). Utilization of OPC and FA to enhance reclaimed lime-fly ash macadam based geopolymers cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 303(August), 124378.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124378>
- Igwe, J. C., & Onyegbado, C. C. (2007). A Review of Palm Oil Mill Effluent (Pome) Water Treatment. 1(2), 54–62.
- Jumadi, J., Kamari, A., & Wong, S. T. S. (2020). Water quality assessment and a study of current palm oil mill effluent (POME) treatment by ponding system method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 980(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/980/1/012076>
- Long, Q., Zhao, Y., Zhang, B., Yang, H., Luo, Z., Li, Z., Zhang, G., & Liu, K. (2024). Interfacial Behavior of Slag, Fly Ash, and Red Mud-Based Geopolymer Mortar with Concrete Substrate: Mechanical Properties and Microstructure. *Buildings*, 14(3).
<https://doi.org/10.3390/buildings14030652>
- Ludin, N. A., Bakri, M. A. M., Kamaruddin, N., Sopian, K., Deraman, M. S., Hamid, N. H., Asim, N., & Othman, M. Y. (2014). Malaysian oil palm plantation sector: Exploiting renewable energy toward sustainability production. *Journal of Cleaner Production*, 65, 9–15.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.063>
- Mara, D. (1997). Design Manual for Waste Stabilization Ponds in India. *Civil Engineering*, January 1998, 1–135.
- Mohammad, S., Baidurah, S., Kobayashi, T., Ismail, N., & Leh, C. P. (2021). Palm oil mill effluent treatment processes—A review. *Processes*, 9(5), 1–22.
<https://doi.org/10.3390/pr9050739>
- Mohd Yusof, M. A. Bin, Chan, Y. J., Chong, C. H., & Chew, C. L. (2023). Effects of operational processes and equipment in palm oil mills on characteristics of raw Palm Oil Mill Effluent (POME): A comparative study of four mills. *Cleaner Waste Systems*, 5(September 2022), 100101. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100101>
- Ng, W. P. Q., Lam, H. L., Ng, F. Y., Kamal, M., & Lim, J. H. E. (2012). Waste-to-wealth: Green potential from palm biomass in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, 34(September 2011), 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.004>
- Olivia, M. (2011). PhD - Durability Related Properties of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Curtin University*, May, 229.
- Olivia, M., Mona Tambunan, L., & Saputra, E. (2017). Properties of Palm Oil Fuel Ash (POFA) Geopolymer Mortar Cured at Ambient Temperature. *MATEC Web of Conferences*, 97. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701006>
- Palomo, A., Blanco-Varela, M. T., Granizo, M. L., Puertas, F., Vazquez, T., & Grutzeck, M. W. (1999). Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin - Isothermal conduction calorimetry study. *Cement and Concrete Research*, 29, 997–1004.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00074-5)
- Patthanaisaranukool, W., & Polprasert, C. (2011). Carbon mobilization in oil palm plantation

- and milling based on a carbon-balanced model - a case study in thailand. *EnvironmentAsia*, 4(2), 17–26.
- Polusani, S., Vinayaka Ram, V., & Seshagiri Rao, M. V. (2022). Mechanical properties of GGBSFA Geopolymer concrete with varying Silica Modulus at different curing conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 982(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/982/1/012014>
- Portland Cement Association. (2002). Types and causes of concrete deterioration. *Portland Cement Association - Concrete Information*, 1–16.
- Rahardjo, P. N. (2009). *STUDI BANDING TEKNOLOGI PENGOLAHAN*. 10(1), 9–18.
- Roy D M. (1999). Alkali activated cements, opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 29, 249–254.
- Tabassum, S., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2015). An integrated method for palm oil mill effluent (POME) treatment for achieving zero liquid discharge - A pilot study. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 95). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.056>
- Tan, Y., Yu, H., Sun, S., Wu, C., & Ding, H. (2021). Properties and microstructure of basic magnesium sulfate cement: Influence of silica fume. *Construction and Building Materials*, 266, 121076. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121076>
- Vallejo Castaño, S., Callagon La Plante, E., Shimoda, S., Wang, B., Neithalath, N., Sant, G., & Pilon, L. (2021). Calcination-free production of calcium hydroxide at sub-boiling temperatures. *RSC Advances*, 11(3), 1762–1772. <https://doi.org/10.1039/d0ra08449b>
- Wajdi, M., & Muda, K. (2023). Anaerobic acetogenic treatment of palm oil mill effluent for COD removal. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1143(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1143/1/012003>
- Yanuari, R., Ikrammullah, M., Septari, D., Wijaya, M. F., & Olivia, M. (2020). Studi Parametrik Mortar Geopolimer Hibrid Abu Sawit (Palm Oil Fuel Ash/POFA). *Rekayasa Sipil*, 14(2), 83–90. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2020.014.02.1>
- Yap, C. C., Loh, S. K., Chan, Y. J., Supramaniam, C. V., Chong, M. F., Soh, A. C., Lim, L. K., & Loo, L. S. (2021). Synergistic effect of anaerobic co-digestion of palm oil mill effluent (POME) with *Moringa oleifera* extract. *Biomass and Bioenergy*, 144(April 2020), 105885. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105885>
- Zafirovski, Z., Markovski, M., Ognjenovic, S., Gacevski, V., Nedevska, I., & Ristov, R. (2023). Subbase stabilization with fly ash. *Facta Universitatis - Series: Architecture and Civil Engineering*, 00, 33–33. <https://doi.org/10.2298/fuace230630033z>
- Zahrim, A. Y., Nasimah, A., & Hilal, N. (2014). Pollutants analysis during conventional palm oil mill effluent (POME) ponding system and decolourisation of anaerobically treated POME via calcium lactate-polyacrylamide. *Journal of Water Process Engineering*, 4(C), 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.09.005>