



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



LIMBAH PADAT ANORGANIK
Jalur-Jalur Pengolahan sebagai Peran Rekayasa
Produk Kimia dalam Meredam Dampak Lingkungan

Profesor Tjokorde Walmiki Samadhi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB
18 November 2023

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**LIMBAH PADAT ANORGANIK:
JALUR-JALUR PENGOLAHAN SEBAGAI
PERAN REKAYASA PRODUK KIMIA DALAM
MEREDAM DAMPAK LINGKUNGAN**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**LIMBAH PADAT ANORGANIK:
JALUR-JALUR PENGOLAHAN SEBAGAI
PERAN REKAYASA PRODUK KIMIA DALAM
MEREDAM DAMPAK LINGKUNGAN**

Prof. Tjokorde Walmiki Samadhi

18 November 2023
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

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

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

Limbah Padat Anorganik: Jalur-Jalur Pengolahan sebagai Peran Rekayasa Produk Kimia dalam Meredam Dampak Lingkungan

Penulis : Prof. Tjokorde Walmiki Samadhi

Reviewer : Prof. Tjandra Setiadi

Editor bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2023

ISBN : 978-623-297-348-0

ITB PRESS

© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132

+62 22 20469057

www.itbpress.id

office@itbpress.id

Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa, karena atas perkenan-Nya semata buku Orasi Ilmiah Guru Besar ITB dengan judul **Limbah Padat Anorganik: Jalur-jalur Pengolahan Sebagai Peran Rekayasa Produk Kimia dalam Meredam Dampak Lingkungan** ini dapat terselesaikan.

Buku Orasi Ilmiah ini merupakan gambaran ringkas hasil kajian-kajian yang kami selenggarakan di Laboratorium Teknologi Mineral dan Bahan Anorganik FTI-ITB dalam kurun sekira 15 tahun terakhir, dikemas dalam bentuk suatu jelajah literatur. Minat terhadap pengolahan limbah anorganik ini terinspirasi dari sejumlah penelitian yang menerapkan konsep-konsep kimia dan/atau rekayasa berkelanjutan di Kelompok Keahlian Perancangan dan Pengembangan Produk Teknik Kimia.

Ucapan terima kasih setulusnya disampaikan oleh Penulis kepada Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung atas kesempatan untuk menyampaikan Orasi Ilmiah dan mendiseminasikan hasil-hasil kajian ini. Kami mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Rektor dan jajaran Pimpinan Institut Teknologi Bandung, Dekanat Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Bandung, para rekan sejawat Dosen di Komunitas Teknik Kimia ITB, serta para mahasiswa sarjana maupun pascasarjana di Teknik Kimia ITB, terutama yang telah menjalankan tugas akhir dan disertasi mereka di laboratorium kami.

Terima kasih setulusnya kepada istri, Luh Indi Baramuni atas dorongan dan dukungan bagi pencapaian gelar akademik tertinggi ini, serta kepada orang tua dan saudara-saudara Penulis.

Semoga buku ringkas ini dapat bermanfaat bagi para peneliti dan peminat bidang pengolahan bahan anorganik maupun sains dan rekayasa bahan secara umum, serta bagi khasanah ilmu dan teknologi bangsa kita.

Bandung, 18 November 2023

Prof. Dr. Ir. Tjokorde Walmiki Samadhi, S.T., M.T.

SINOPSIS

Buku ringkas ini menyajikan jelajah rekam jejak penelitian serta kajian dari sumber-sumber literatur lain secara cukup meluas tentang jalur-jalur pengolahan yang digagaskan untuk meredam dampak lingkungan limbah padatan anorganik, khususnya yang tergolong dalam senyawa-senyawa aluminosilikat. Buku ini terbagi dalam tiga bab, yakni Pendahuluan yang memberikan tinjauan kilas tentang masalah akumulasi beberapa jenis limbah aluminosilikat dari beberapa industri yang sangat menonjol di Indonesia, yakni pembangkit listrik, pengolahan feronikel, dan pengolahan sawit. Bab ini juga memaparkan secara sangat ringkas konsep-konsep kimia hijau (*green chemistry*) dan kimia berkelanjutan (*sustainable chemistry*) dalam konteks pemanfaatan ulang limbah aluminosilikat. Bab berikutnya membahas tentang pengolahan konsolidatif limbah-limbah tersebut untuk memproduksi geopolimer, yakni bahan alkali-aluminosilikat yang digagaskan sebagai pengganti semen Portland dengan dampak lingkungan yang lebih lunak. Bab terakhir membahas tentang pengolahan esktraktif limbah aluminosilikat, yakni perolehan kembali senyawa-senyawa kalium dari limbah biomassa untuk penerapan konsep ekonomi melingkar di industri sawit. Bab penutup memberikan komentar singkat tentang harapan Penulis tentang meluasnya penerapan prinsip-prinsip dan metodologi kimia berkelanjutan dalam pengolahan berbagai limbah padatan anorganik.

DAFTAR ISI

PRAKATA	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
1. PENDAHULUAN	1
2. JENIS-JENIS UTAMA LIMBAH ALUMINOSILIKAT	6
2.1 Abu Batubara	6
2.2 Terak Metalurgi.....	10
2.3 Abu Biomassa	15
3. PENGOLAHAN KONSOLIDATIF MENJADI GEOPOLIMER	19
3.1 Apakah Geopolimer Itu?	19
3.2 Proses Geopolimerisasi	21
3.3 Sifat-sifat Geopolimer Sebagai Bahan Konstruksi	25
3.4 Isu Emisi Karbon Geopolimer	29
3.5 Tantangan dan Peluang Pengembangan Geopolimer.....	31
4. PENGOLAHAN EKSTRAKTIF ABU BIOMASSA	37
4.1 Karakteristik Abu Biomassa	37
4.2 Ragam Proses dan Produk Ekstraksi Abu Biomassa	40
4.3 Ekstraksi Kalium dari Abu Biomassa	41
4.4 Tantangan Bagi Produksi Kalium dari Abu Sawit	49
5. PENUTUP	51
6. UCAPAN TERIMA KASIH	52
DAFTAR PUSTAKA	55
CURRICULUM VITAE	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Konsep struktur bahan padatan kristalin dibandingkan amorf atau non-kristalin.....	4
Gambar 1.2	Keberlimpahan unsur-unsur di lapisan kerak dan mantel bumi.	5
Gambar 2.1	Bauran energi nasional untuk pembangkitan listrik menurut RUPTL PT PLN 2021-2030.....	7
Gambar 2.2	Konsumsi final batubara untuk produksi energi di Indonesia dalam kurun 2012-2022 (Kementerian ESDM RI, 2022).	7
Gambar 2.3	Diagram skematik proses pembakaran batubara di PLTU (Wikimedia Commons).....	8
Gambar 2.4	Tampilan visual makroskopik dan bentuk partikel tipikal abu terbang batubara.	9
Gambar 2.5	Lava dari letusan gunung berapi sebagai contoh terak alami (Wikimedia Commons).....	11
Gambar 2.6	Diagram alir sederhana proses produksi feronikel dengan teknologi RKEF (Wikimedia Commons).	12
Gambar 2.7	Pemindahan terak feronikel ke area penimbunan pabrik peleburan feronikel di Maluku Utara.	12
Gambar 2.8	Tampilan visual beberapa jenis terak metalurgi: (a) terak tanur tiup (blast furnace) produksi baja (b) terak peleburan bijih tembaga (c) terak tanur busur listrik produksi feronikel.	13
Gambar 2.9	Inspeksi timbunan serpihan kayu (<i>wood chip</i>) untuk proses pembakaran bersama batubara di PLTU Pulang Pisau, Kalimantan Timur (www.swarakaltim.com).	15
Gambar 2.10	Tampilan visual tiga jenis biomassa padat dari pengolahan CPO: (a) tandan kosong sawit (b) serat mesokarp (c) cangkang inti sawit.	16
Gambar 2.11	Produksi tahunan biomassa padat sawit di Indonesia dalam kurun 2002-2015 (digambar berdasarkan data dari Hambali dan Rivai (2017)).....	17
Gambar 2.12	Peninjauan tim peneliti Program Grant Riset Sawit 2018 Institut Teknologi Bandung dan Universitas Mulawarman ke penimbunan abu biomassa di pabrik CPO di Kalimantan Timur.	18
Gambar 3.1	Diagram skematik proses geopolimerisasi bahan baku aluminosilikat (disusun ulang berdasarkan Duxson dkk. (2007) dan van Deventer dkk. (2007)).	22

Gambar 3.2	Pengukuran waktu ikat mortar geopolimer dari abu bambu dan metakaolin hasil pembakaran bersama yang diaktivasi oleh campuran larutan KOH 10.0 N dan Na ₂ SiO ₃ (digambar ulang dari data dalam Purbasari dan Samadhi, 2019).	24
Gambar 3.3	Spektrum serapan inframerah transformasi Fourier (FTIR) spesimen geopolimer yang dibuat dari 60% abu terbang batubara dan 40% terak feronikel dan dikenai pematangan termal pada 60 °C selama 36 jam.....	24
Gambar 3.4	Contoh visual spesimen pasta dan mortar geopolimer.	26
Gambar 3.5	Tampilan visual mortar geopolimer berbasis abu bambu dan metakaolin (a) sebelum dan (b) sesudah perendaman, serta mortar OPC (c) sebelum dan (d) sesudah perendaman dalam larutan 5% asam sulfat selama 6 minggu (Purbasari dkk., 2018).	29
Gambar 3.6	Peristiwa efloresensi setelah pemaparan spesimen geopolimer berbasis terak feronikel – abu terbang batubara terhadap atmosfer selama 3 hari (atas) dan 28 hari (bawah).	32
Gambar 4.1	Tampilan visual tumbuhan dewasa bambu apus (<i>G. apus</i> , kiri) dan bambu hitam (<i>G. atroviolacea</i> , kanan).	40
Gambar 4.2	Dokumen United States Patent pertama dalam sejarah, yang mengklaim suatu teknologi baru dalam produksi <i>potash</i> dari abu biomassa.	42
Gambar 4.3	Nilai total impor pupuk-pupuk kalium ke Indonesia dalam kurun 2012-2021 (Kementerian Perindustrian RI, 2016).	43
Gambar 4.4	Morfologi partikel abu tandan kosong sawit (TKKS) yang dihasilkan melalui pembakaran pada temperatur 250 °C (kiri) dan 550 °C (kanan).	44
Gambar 4.5	Unit ekstraktor abu dengan air panas berskala pilot.	45
Gambar 4.6	Tampilan visual larutan ekstrak mentah abu biomassa sawit yang diperoleh dengan ekstraktor berskala pilot di Lab TMBA, Fakultas Teknologi Industri ITB.	46
Gambar 4.7	Tampilan visual serbuk garam kasar hasil penguapan dan kristalisasi ekstrak mentah dari abu TKKS, PKS, dan MF.	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Rentang umum komposisi kimiawi abu terbang batubara dinyatakan sebagai %-massa komponen oksida untuk peringkat batubara sub-bituminous dan lignit (US FHWA, 2016)	9
Tabel 3.1	Variabel-variabel kunci dalam sintesis geopolimer dan dampaknya terhadap produk akhir.....	23
Tabel 3.2	Kuat tekan mortar geopolimer dari abu biomassa setelah 7 hari.....	27
Tabel 4.1	Komposisi oksida sejumlah spesimen abu biomassa di Indonesia (Purbasari dkk., 2016; Samadhi dkk., 2017; Samadhi dkk., 2019; Putra dkk., 2023).....	39

1. PENDAHULUAN

Dalam hampir semua matakuliah yang diajarkan oleh Penulis, sesi kuliah perdana di awal semester dibuka dengan pengingat bahwa kewajiban moral dan profesional seorang Insinyur Kimia adalah merancang dan mengoperasikan proses-proses industrial untuk mengubah sifat-sifat fisik dan kimiawi bahan baku menjadi produk, dengan memenuhi syarat-syarat berikut:

- a. Di atas segalanya, proses tersebut harus mampu dioperasikan secara selamat (*safety first*).
- b. Proses tersebut harus berdampak lingkungan yang mampu dikelola (bukan tanpa dampak lingkungan, tetapi berdampak yang *manageable*)
- c. Proses tersebut harus mampu memberikan keuntungan bagi badan usaha atau siapapun yang membangun dan menjalankannya.

Butir kedua terkait sangat erat dengan materi yang dibahas dalam buku ringkas ini. Proses-proses fisika-kimiawi apapun yang bertujuan mengolah atau memanfaatkan ulang bahan limbah menjadi sesuatu yang lebih bermanfaat – atau minimal mengurangi risiko dampak lingkungan yang negatif dari limbah-limbah tersebut – dapat dipandang sebagai upaya umat manusia untuk menunaikan salah satu kewajiban moralnya, yakni melaksanakan perbaikan guna mewariskan dunia yang lebih baik bagi generasi mendatang.

Dalam beberapa dekade terakhir telah berkembang wacana kimia hijau (*green chemistry*) dan kimia berkelanjutan (*sustainable chemistry*) sebagai wujud kerangka berpikir dan bertindak para ilmuwan dan praktisi di bidang riset dan industri kimia untuk mengupayakan kelestarian lingkungan di tengah-tengah perkembangan ilmu, teknologi, industri, dan taraf hidup manusia secara global yang semakin membebani ekosistem kita. Lalu apakah yang dimaksud dengan kimia hijau dan kimia berkelanjutan tersebut? Apakah makna kedua wacana ini setara, dapat saling dipertukarkan, atau bertumpang tindih secara parsial? Seperti halnya wacana apapun yang bersifat abstrak, sejumlah versi definisi kimia hijau dan kimia berkelanjutan dapat kita temukan di literatur ranah publik. Berikut adalah jelajah singkat tentang sejumlah definisi kedua istilah di atas.

American Chemical Society (ACS) mendefinisikan baik kimia hijau maupun kimia berkelanjutan secara sederhana sebagai himpunan prinsip-prinsip dalam perancangan, pengembangan dan implementasi produk dan proses kimia yang memungkinkan para ilmuwan dan insinyur untuk melindungi dan memberikan manfaat bagi ekonomi, masyarakat, dan bumi. Prinsip-prinsip ini mendasari upaya-upaya penemuan cara-cara yang kreatif dan inovatif untuk mengurangi limbah, menghemat energi, serta menemukan pengganti bagi zat-zat yang dianggap berbahaya. Pengertian ini bermakna bahwa lingkup kajian kimia hijau/kimia berkelanjutan melebihi pengelolaan bahaya yang disebabkan oleh zat-zat kimia, namun juga mencakup penghematan energi, pengurangan emisi, dan pertimbangan kelestarian daur ulang produk. Aspek terakhir ini dapat diwujudkan misalnya melalui penggunaan bahan-bahan baku yang lebih berkelanjutan atau terbarukan, serta mempertimbangkan penanganan di akhir masa hidup dari suatu produk (American Chemical Society, 2023).

Wacana kimia hijau muncul pada dekade 1980-an sebagai tanggapan terhadap isu pencemaran global yang disebabkan oleh sejumlah kasus polusi dan identitas polutan yang terdefiniskan secara gamblang. Ini mencakup kasus-kasus kontaminasi oleh DDT dan dioksin, emisi gas rumah kaca (GRK), penipisan lapisan ozon di atmosfer bumi, perubahan iklim global, polusi oleh bahan mikroplastik dan nanoplastik, dan isu-isu lainnya. Karena dipicu oleh kasus-kasus pencemaran yang spesifik, pola pikir kimia hijau cenderung berorientasi secara lebih spesifik untuk menggeser pendekatan penanganan pencemaran menjadi pencegahan pencemaran. Horvath (2018) berpendapat bahwa pendekatan kimia hijau boleh jadi melibatkan aspek-aspek yang tidak sepenuhnya berkelanjutan. Dengan demikian, konsep kimia berkelanjutan (*sustainable chemistry*) yang digagaskan untuk mengembangkan lebih lanjut kimia hijau berlandaskan pada penggunaan sumber-sumber daya (termasuk energi) pada laju eksploitasi yang memungkinkan pemulihan sumber-sumber daya tersebut secara alami. Di sisi lain, laju penimbunan limbah tidak boleh melebihi laju proses remediasi atau penanganan limbah tersebut. Karena proses-proses kimia tidak mungkin sepenuhnya hijau, maka pemilihan zat-zat kimia, jalur-jalur reaksi kimia dan proses-proses pengolahan yang bersifat hijau dan sekaligus berkelanjutan selayaknya menjadi prioritas utama dalam mengembangkan produk dan proses kimia berskala industrial.

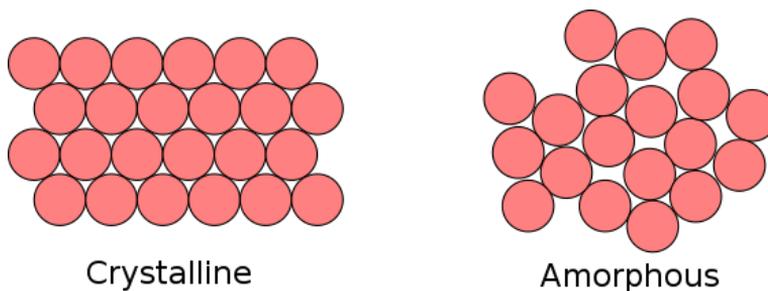
IUPAC (2023) mendefinisikan material ramah lingkungan, material langgeng atau material berkelanjutan (*sustainable materials*) – atau sering disebut pula dengan istilah populer ‘material hijau’ – sebagai berbagai produk yang dihasilkan melalui proses-proses maupun metodologi yang mengurangi konsumsi energi, dihasilkan dari sumberdaya yang berlanjutan, dan/atau dengan tapak karbon yang lebih rendah.

Bagi kalangan luas, material berkelanjutan sering diidentikkan dengan material organik seperti polimer yang mampu terurai secara biologik, material hayati yang diolah secara minimal seperti kayu, serat alami, dan lain-lain. Istilah yang dekat dengan material berkelanjutan, yakni kimia berkelanjutan atau kimia hijau, mengacu pada penggunaan teknologi proses kimiawi yang tidak membahayakan kesehatan, berdampak lingkungan minimum, dan mengurangi produksi limbah (Anastas dan Zimmerman, 2003) umumnya juga diidentikkan dengan aplikasi ilmu kimia organik, misalnya dalam pemilihan agen pereaksi yang tidak beracun atau diperoleh secara berkelanjutan (Sheldon, 1992).

Aplikasi kimia berkelanjutan dalam pengembangan dan produksi material anorganik (sehingga menghasilkan material anorganik berkelanjutan) sesungguhnya sangatlah luas. Praktik pemanfaatan ulang pecahan kaca (*cullet*) untuk menurunkan titik lebur campuran bahan baku pembuatan gelas silikat dan menghemat energi produksi – yang mungkin sudah lebih dari seabad dikenal secara luas di industri gelas – memanfaatkan sifat alami gelas yang dapat didaur ulang secara tak terbatas. Sebagai contoh lain adalah berbagai teknologi lebih ramah lingkungan (dengan memanfaatkan biomassa, menurunkan konsumsi energi, meminimisasi limbah, dan sebagainya) dalam ekstraksi unsur-unsur logam yang berperan kritis dalam sistem energi terbarukan. Logam-logam kritis ini mencakup unsur tanah jarang (Dy, Nd, Pr) untuk magnet turbin angin, Li dan Co untuk baterai Li-ion, Si dalam sel surya, Pt dan Ir untuk sistem sel bahan bakar, dan sebagainya (Titirici et al., 2022). Pengembangan material berkelanjutan di bidang konstruksi bangunan juga telah berjalan relatif ekstensif. Karakteristik ideal umum bagi material konstruksi berkelanjutan mencakup kemampuan mereduksi konsumsi energi dan emisi (dalam produksi material maupun penggunaan bangunan terkait), menghemat sumberdaya, serta mampu didaur ulang (Hu et al., 2021).

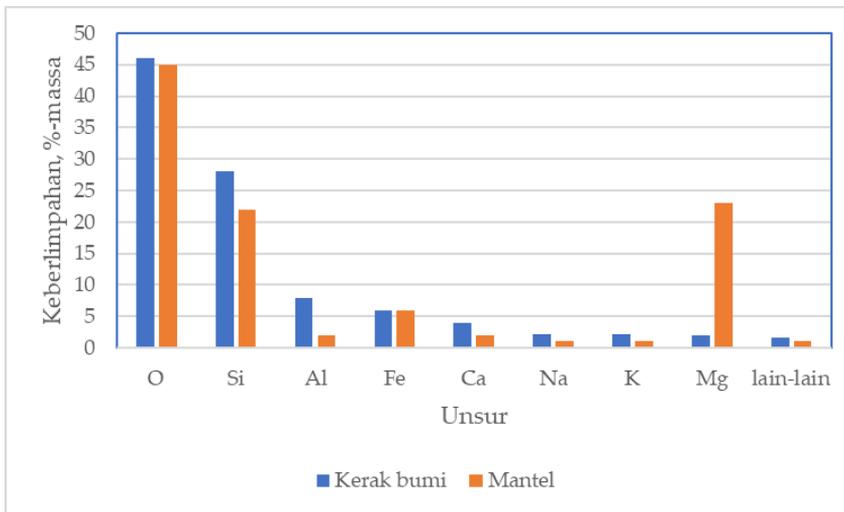
Dengan cakupan yang luar biasa luas yang dimungkinkan oleh versi-versi definisi di atas, dan dengan keterbatasan spektrum rekam jejak riset Penulis, maka diskusi tentang aplikasi kimia hijau/kimia berkelanjutan ini dibatasi dalam konteks upaya mitigasi dampak negatif dan peningkatan nilai tambah suatu kategori umum bahan limbah, yakni limbah padat anorganik yang tergolong dalam zat-zat aluminosilikat.

Bahan aluminosilikat adalah istilah umum untuk berbagai macam senyawa yang tersusun dari oksida unsur silikon dan aluminium yang tertata dalam berbagai macam struktur dalam ruang tiga dimensi. Jika tatanan atom-atom silikon, aluminium, oksigen, magnesium, kalsium, besi, natrium, kalium, dan lain-lain dalam ruang 3D ini bersifat teratur dalam jarak jauh (istilah ‘jauh’ di sini bermakna jarak sejauh sejumlah besar lapisan atom dari titik acuan dalam ruang) maka bahan padatan aluminosilikat termaksud disebut sebagai bahan kristalin. Sebaliknya, jika keteraturan tatanan atom-atom tadi hanya ada pada jarak ‘atom tetangga terdekat’ dari titik acuan dalam ruang, maka bahan aluminosilikat tersebut disebut sebagai bahan amorf, non-kristalin, atau gelas (*glassy materials*). Gambar 1.1 mengilustrasikan konsep perbedaan antara struktur kristalin dan amorf secara sangat sederhana.



Gambar 1.1 Konsep struktur bahan padatan kristalin dibandingkan amorf atau non-kristalin.

Aluminosilikat termasuk golongan bahan padat yang paling berlimpah di permukaan bumi, karena baik atom Al maupun Si merupakan unsur-unsur yang paling berlimpah dalam lapisan kerak bumi (seperti yang ditampilkan dalam Gambar 1.2). Namun demikian, bahasan dalam buku ini difokuskan pada bahan-bahan aluminosilikat yang dipandang sebagai limbah padat yang dihasilkan oleh aktivitas manusia.



Gambar 1.2 Keberlimpahan unsur-unsur di lapisan kerak dan mantel bumi.

Pendekatan kimia berkelanjutan sangat relevan dalam upaya penanganan masalah akumulasi limbah padat anorganik di Indonesia. Beberapa jenis limbah padat anorganik yang penting di Indonesia adalah abu sisa pembakaran batubara (yang diklasifikasikan sebagai abu terbang atau fly ash / FA, dan abu bawah atau *bottom ash* / BA bergantung pada orientasi emisinya dari sistem tungku pembakaran yang mengkonsumsi batubara sebagai bahan bakar), abu biomassa (terutama yang berasal dari industri pengolahan sawit), serta terak metalurgi (terutama yang berasal dari industri feronikel). Kepentingan dari ketiga jenis limbah ini diakibatkan oleh volume kapasitas industri penghasilnya yang sangat besar di Indonesia, serta posisi strategis industri-industri terkait tersebut bagi pembangunan bangsa.

2. JENIS-JENIS UTAMA LIMBAH ALUMINOSILIKAT

Berikut adalah ulasan tentang asal mula, karakteristik fisika-kimiawi, kepentingannya di Indonesia, serta potensi dampak lingkungan dari ketiga jenis limbah aluminosilikat tersebut.

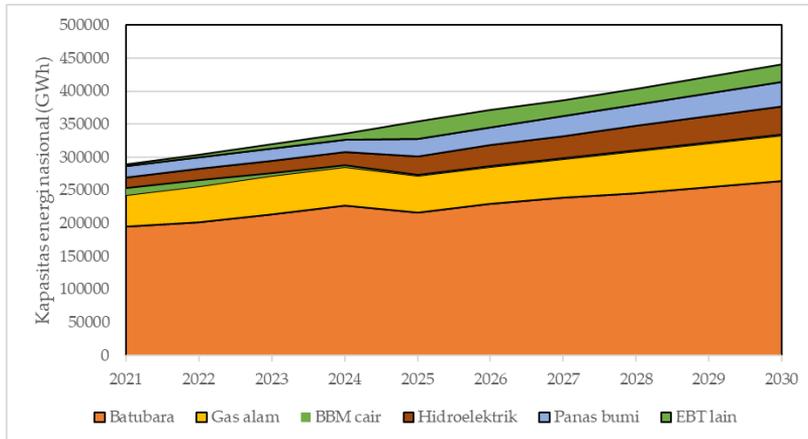
2.1 Abu Batubara

Praktis semua jenis bahan bakar cair dan padat mengandung senyawa-senyawa mineral yang tersusun dari unsur-unsur selain karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur. Sebagai contoh, batubara pada umumnya mengandung unsur-unsur minor yang mencakup natrium, magnesium, aluminium, silikon, fosfor, kalium, kalsium, titanium, mangan, dan besi. Sebagai contoh lain, bahan bakar minyak diesel umumnya mengandung unsur-unsur minor silikon, nikel, titanium, kalium, strontium, dan molibdenum (Viskup dkk., 2020).

Dalam proses pembakaran bahan bakar, unsur-unsur C, H, N, dan S akan mengalami oksidasi oleh gas oksigen yang diumpankan ke tungku pembakaran. Keempat unsur ini pada saat mengalami oksidasi di dalam tungku akan melepaskan energi panas yang besar sembari berubah menjadi senyawa-senyawa gas (CO , CO_2 , H_2O , NO , NO_2 , SO_2 , SO_3 dan lain-lain) yang dibuang ke atmosfer. Energi panas yang dihasilkan kemudian diubah menjadi berbagai bentuk energi yang lain untuk menggerakkan generator pembangkit listrik, untuk memanaskan reaktor kimia, untuk mendidihkan air menjadi uap dalam boiler industrial, dan berbagai keperluan lainnya. Unsur-unsur minor dalam bahan bakar juga akan mengalami oksidasi dalam tungku pembakaran. Namun demikian, kebanyakan dari unsur-unsur minor ini berubah menjadi senyawa oksida dengan titik didih yang tinggi, sehingga cenderung berada dalam keadaan padat di dalam tungku. Padatan oksida inilah yang diistilahkan secara umum sebagai abu.

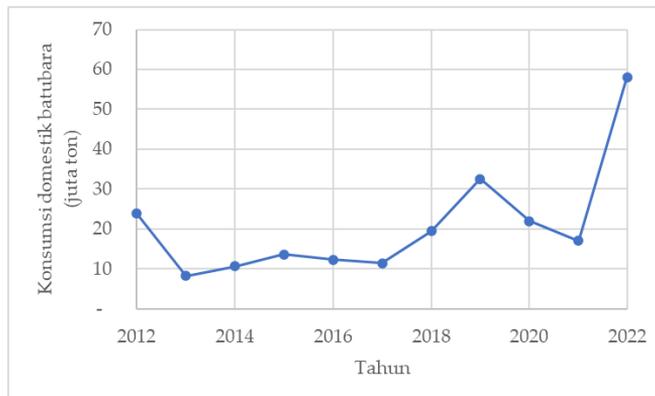
Konsumen terbesar batubara di Indonesia adalah industri pembangkitan listrik. Posisi strategis batubara dalam skema penyediaan energi nasional nampak jelas dalam dokumen kebijakan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) yang dicanangkan PT PLN untuk periode 2021-2030. Hingga tahun 2030, batubara masih diproyeksikan sebagai sumber energi utama dalam bauran energi nasional yang digunakan untuk membangkitkan energi

listrik bagi segenap masyarakat Indonesia, seperti yang ditampilkan dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Bauran energi nasional untuk pembangkitan listrik menurut RUPTL PT PLN 2021-2030.

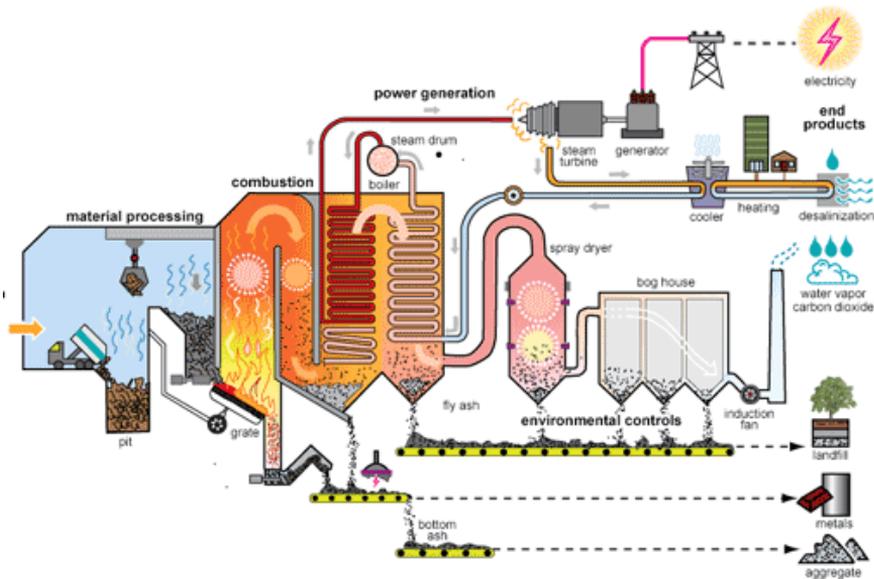
Data statistik konsumsi final batubara untuk pembangkitan energi domestik yang dirangkum oleh Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral RI dalam kurun 2012-2022 ditampilkan di Gambar 2.2. Data ini menunjukkan konsumsi yang meningkat tajam dalam 2 tahun terakhir, dari 17 juta ton pada tahun 2021 menjadi 58 juta ton pada tahun 2022 (Ministry of Energy and Mineral Resources, 2022).



Gambar 2.2 Konsumsi final batubara untuk produksi energi di Indonesia dalam kurun 2012-2022 (Kementerian ESDM RI, 2022).

Batubara dimanfaatkan untuk mentenagai fasilitas-fasilitas Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Gambar 2.3 menampilkan secara skematik proses yang terjadi terhadap batubara dalam suatu PLTU. Bergantung pada rancangan ruang pembakaran yang dipilih, batubara dapat diumpankan

dalam bentuk bongkahan kasar yang dipindahkan oleh alat berbentuk rantai atau ulir yang berputar secara sinambung, atau berupa serbuk halus yang disemburkan menggunakan udara tekan.



Gambar 2.3 Diagram skematik proses pembakaran batubara di PLTU (Wikimedia Commons).

Di dalam ruang pembakaran, abu yang dihasilkan oleh reaksi oksidasi unsur-unsur minor yang berasal dari batubara, serta bercampur dengan padatan yang dihasilkan oleh injeksi serbuk kapur tohor (CaO) ke ruang pembakaran untuk menangkap sulfur oksida dalam gas buang sebagai serbuk gipsum (CaSO_4), terpecah menjadi dua aliran. Aliran yang terlebih dahulu keluar dari dasar ruang pembakaran karena memiliki berat jenis yang relatif tinggi dinamakan abu bawah (*bottom ash*, yang sering pula disingkat sebagai BA). Abu bawah ini sering masih mengandung sisa karbon yang belum terbakar pada kadar yang agak tinggi. Aliran abu yang kedua terbawa oleh gas buang memasuki ruang yang berisi rangkaian perpipaan untuk mendidihkan air umpan boiler. Porsi abu ini dapat terbawa oleh gas buang karena memiliki berat jenis yang lebih rendah daripada abu bawah, sehingga dinamakan abu terbang (*fly ash*, yang sering disingkat sebagai FA). Abu terbang umumnya dipisahkan dari gas buang dengan menggunakan sistem penapis atau filter, sehingga tidak terlepas ke atmosfer melalui cerobong.

Dengan mengasumsikan kadar abu rata-rata sebesar 5.5% (Hariana dkk., 2021), maka berdasarkan data pada Gambar 2.2 dapat diperkirakan secara

kasar bahwa volume produksi abu batubara pada tahun 2022 adalah sekitar 3.2 juta ton per tahun di seluruh Indonesia. Ini adalah orde besaran yang sangat berarti. Sekedar sebagai pembandingan, untuk membangun 1 km jalan tol kira-kira diperlukan 1.200 ton semen Portland. Dengan demikian, berat total abu batubara yang dihasilkan oleh fasilitas-fasilitas PLTU di Indonesia pada tahun 2022 tersebut setara dengan kebutuhan berat semen Portland untuk membangun jalan tol sepanjang sekitar 2.600 kilometer.

Abu terbang batubara menunjukkan tampilan visual sebagai serbuk halus berwarna kelabu pucat kecokelatan atau sedikit berwarna kuning, bergantung pada komposisi oksida batubara asalnya. Partikel abu terbang umumnya berbentuk bulat dengan permukaan halus seperti ditampilkan dalam Gambar 2.4. Berat jenis curah abu terbang ada di kisaran 2.1-3.0 g/cm³, dengan ukuran partikel kurang dari 0.075 mm dan luas permukaan spesifik di kisaran 170-1000 m²/kg. Komposisi umum oksida abu terbang batubara yang umum digunakan untuk pembangkitan listrik dirangkum dalam Tabel 2.1 (US FHWA, 2016).



Gambar 2.4 Tampilan visual makroskopik dan bentuk partikel tipikal abu terbang batubara.

Tabel 2.1 Rentang umum komposisi kimiawi abu terbang batubara dinyatakan sebagai %-massa komponen oksida untuk peringkat batubara sub-bituminous dan lignite (US FHWA, 2016)

Komponen oksida	Sub-bituminous	Lignite
SiO ₂	40-60	15-45
Al ₂ O ₃	20-30	10-25
Fe ₂ O ₃	4-10	4-15
CaO	5-30	15-40
MgO	1-6	3-10
SO ₃	0-2	0-10
Na ₂ O	0-2	0-6
K ₂ O	0-4	0-4
Hilang pijar	0-3	0-5

Berbahaya atau tidaknya abu terbang bagi kesehatan masyarakat sangat bergantung pada komposisi kimiawinya, terutama terkait dengan kadar logam-logam berat yang mungkin terkandung di dalamnya seperti merkuri, timbal, arsenik, kadmium, dan krom. Secara umum, abu terbang batubara yang ada di Indonesia tidak mengandung logam-logam berat tersebut dalam kadar yang membahayakan. Hal inilah yang mendorong Pemerintah untuk mengubah status abu terbang batubara menjadi limbah bukan bahan berbahaya dan beracun (non-B3) yang tetap perlu dikelola dengan baik menurut Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021. Meskipun demikian, risiko lingkungan yang berasal dari penimbunan abu terbang dalam volume masif tentu masih ada. Risiko-risiko ini mencakup kematian biota perairan, penurunan biodiversitas organisme, serta peningkatan resiko penyakit terutama pada anak-anak (Petrovic dan Fiket, 2022).

Pemanfaatan abu batubara dari PLTU ini masih relatif rendah di Indonesia, yakni sekitar 10-12 % dari total produksi abu batubara nasional pada tahun 2019 (Ekaputri dan Al-Bari, 2020), dengan pemanfaat terbesar abu batubara adalah industri semen Portland. Rendahnya tingkat pemanfaatan ini berimplikasi pada akumulasi abu batubara pada situs-situs penimbunan di sekitar PLTU di Indonesia.

2.2 Terak Metalurgi

Terak atau disebut sebagai *slag* dalam bahasa Inggris adalah istilah umum untuk bahan campuran oksida dan garam logam tanpa komposisi kimiawi yang tertentu, yang terbentuk melalui peleburan dan pendinginan secara relatif cepat. Terak dapat dihasilkan oleh proses pemurnian dan peleburan bijih logam menjadi produk logam dasar (sehingga diistilahkan sebagai terak metalurgi), atau oleh proses pembakaran bahan bakar dengan kadar abu tinggi dalam tungku pembakaran boiler (sehingga disebut sebagai terak boiler). Meskipun sama-sama berupa campuran oksida dan garam logam, perbedaan mendasar antara abu dan terak adalah bahwa terak mengalami peleburan dalam proses pembentukannya. Contoh bahan alami yang sesungguhnya menyerupai terak adalah lava gunung berapi. Seperti ditampilkan dalam Gambar 2.5, lava disebarkan dari dapur magma dalam bentuk leburan oksida logam, dan didinginkan secara cepat di permukaan tanah. Komponen-komponen oksida dalam terak metalurgi secara umum

memiliki nilai ekonomi yang rendah atau dapat diabaikan. Ini yang menyebabkan terak dianggap sebagai limbah dari sudut pandang industri logam.



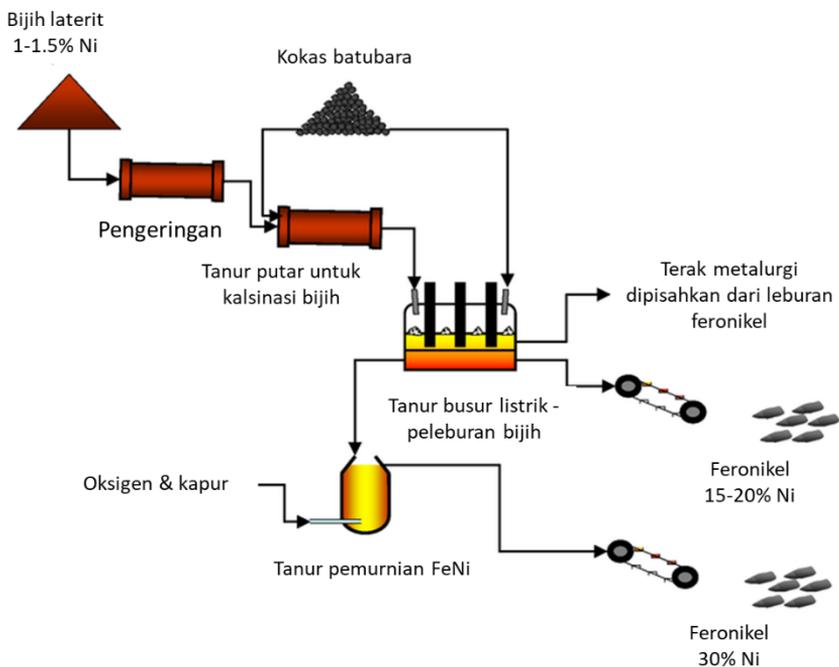
Gambar 2.5 Lava dari letusan gunung berapi sebagai contoh terak alami (Wikimedia Commons).

Pemerintah RI telah memposisikan industri nikel sebagai salah satu penggerak utama pembangunan nasional. Indonesia adalah salah satu negara dengan cadangan nikel terbesar di dunia, yang diperkirakan sebesar 21 juta ton. Produksi nikel tertinggi di Indonesia tercatat di tahun 2021, yakni sebesar 1 juta ton per tahun (USGS, 2022). Pembangunan industri nikel di Indonesia kini diarahkan untuk mengembangkan ekosistem industri baterai kendaraan listrik yang lengkap.

Gambar 2.6 mengilustrasikan diagram alir disederhanakan proses pengolahan dan peleburan bijih laterit menjadi produk feronikel sebagai produk antara yang kritis bagi industri nikel dengan teknologi RKEF (*rotary kiln–electric arc furnace*). Teknologi ini banyak diterapkan di dunia, termasuk di Indonesia.

Bijih logam mula-mula digiling dan dikeringkan, kemudian diumpankan ke tanur putar (*rotary kiln*) bersama kokas batubara, di mana komponen-komponen mineral bijih mengalami kalsinasi yang melibatkan penguraian akibat panas dan reduksi oleh kokas. Hasil kalsinasi ini kemudian diumpankan ke tanur busur listrik (*electric arc furnace*), yang melebur umpan pada temperatur sangat tinggi. Dalam tanur listrik ini terak akan memisah dan mengapung pada permukaan leburan feronikel karena memiliki berat jenis yang lebih ringan. Terak ini kemudian secara berkala dituang keluar tanur dan didinginkan secara cepat dengan semburan air menjadi gumpalan-

gumpalan kasar. Terak yang telah cukup dingin kemudian diangkut dan ditimbun secara terbuka di area penimbunan akhir yang umumnya berdekatan dengan pabrik feronikel. Gambar 2.7 menampilkan contoh penimbunan terak feronikel di Provinsi Maluku Utara yang didokumentasikan oleh Penulis sendiri.



Gambar 2.6 Diagram alir sederhana proses produksi feronikel dengan teknologi RKEF (Wikimedia Commons).



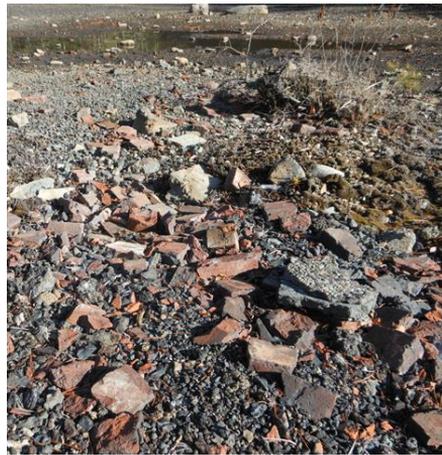
Gambar 2.7 Pemindahan terak feronikel ke area penimbunan pabrik peleburan feronikel di Maluku Utara.

Terak metalurgi secara luas menunjukkan karakteristik fisik dan penampilan visual yang sangat bervariasi, seperti dicontohkan dalam Gambar 2.8. Terak feronikel sendiri umumnya mengandung oksida-oksida utama berupa SiO_2 (35-70 %-massa), MgO (15-45 %-massa), dan Fe_2O_3 (5-35 %-massa) (Sagadin dkk., 2016). Dampak lingkungan terak metalurgi terutama terkait dengan laju pelarutan logam-logam berat yang terkandung di dalam timbunan terak ke dalam air permukaan maupun air tanah sebagai kation, dan bahaya-bahaya yang terkait dengan paparan manusia terhadap kation-kation tersebut, dari manapun asalnya.

Piatak dkk. (2015) menuliskan makalah telaahan literatur tentang perilaku terak di lingkungan. Berikut adalah butir-butir kunci dalam tulisan tersebut:



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.8 Tampilan visual beberapa jenis terak metalurgi: (a) terak tanur tiup (blast furnace) produksi baja (b) terak peleburan bijih tembaga (c) terak tanur busur listrik produksi feronikel.

- Kuantitas logam-logam berbahaya yang terlepas ke lingkungan tidak selalu berbanding lurus dengan kadarnya di dalam terak; perlu dilakukan uji pelindian (*leaching test*, yakni perendaman spesimen terak dalam larutan yang dibuat menyerupai air tanah yang secara berkala dianalisis untuk mengukur konsentrasi ion-ion logam yang terlarut dari padatan terak) untuk memastikan kecenderungan pelarutan logam oleh air tanah.
- Jenis-jenis logam dalam terak dapat digolongkan berdasarkan proses yang menghasilkan terak tersebut, menjadi terak logam besi dan terak logam non-besi.
- Terak logam besi terutama mengandung unsur-unsur Ca, Si, Fe, Mg, dan Al, terutama dalam bentuk senyawa-senyawa silikat dan oksida.
- Terak logam non-besi (misalnya dari proses peleburan bijih aluminium, tembaga, dan lain-lain) terutama mengandung unsur-unsur Fe, Si, Al, dan Ca dalam bentuk senyawa-senyawa silikat, spinel, oksida amorf, serta kuarsa. Dalam sebagian kasus terak logam non-besi juga mengandung senyawa sulfida dalam kadar lebih rendah.
- Masing-masing golongan terak mengandung sehimpunan logam yang perilaku pelindiannya ke perairan permukaan atau tanah beresiko mengakibatkan pencemaran. Namun demikian, secara umum dinilai bahwa terak golongan non-besi memiliki resiko dampak lingkungan yang relatif lebih tinggi.
- Karena perilaku di atas, terak logam besi cenderung lebih aman digunakan untuk bahan konstruksi bangunan dan jalan serta untuk aplikasi-aplikasi yang terpapar secara intensif dengan lingkungan. Di sisi lain, terak logam non-besi lebih sesuai diolah ulang untuk memperoleh logam-logam sekunder.

Industri feronikel dapat dijadikan sebagai tolok ukur besarnya laju produksi terak metalurgi di Indonesia. Volume nasional produksi terak feronikel tercermin dari perkiraan bahwa pada tahun 2019 industri nikel di Indonesia menghasilkan 4 juta ton terak feronikel per tahun (Edwin dkk., 2019). Orde besaran volume limbah terak ini sebanding dengan abu terbang batubara yang dihasilkan oleh fasilitas-fasilitas PLTU di Indonesia. Seiring dengan program pengembangan dan hilirisasi industri nikel yang dicanangkan Pemerintah RI, laju produksi terak feronikel dapat dipastikan akan meningkat dalam jangka pendek hingga menengah. Jelaslah bahwa

pengembangan jalur-jalur pemanfaatan terak metalurgi yang handal merupakan kebutuhan yang mendesak bagi Indonesia.

2.3 Abu Biomassa

Kategori lain limbah padat aluminosilikat yang kian mengemuka di Indonesia adalah abu biomassa. Seperti yang ditampilkan dalam Gambar 2.1, Pemerintah telah mencanangkan peningkatan kontribusi energi baru dan terbarukan (EBT) bagi penyediaan energi listrik nasional. Kapasitas pembangkitan untuk memasok ke jaringan listrik nasional dengan bahan bakar biomassa pada pertengahan tahun 2023 telah mencapai sekitar 3.1 GW. Kapasitas ini diimplementasikan dengan cara pembakaran bersama biomassa dan batubara (*coal and biomass co-firing*) di 37 unit PLTU yang sebelumnya beroperasi dengan bahan bakar batubara sepenuhnya. (Tam, 2023). Sebagai contoh, Gambar 2.9 menampilkan penerapan pembakaran bersama di PLTU Pulang Pisau di Kalimantan Timur, yang mencampurkan hingga 20% serpihan kayu dengan batubara (Swara Kaltim, 2022). Penerapan teknologi pembakaran bersama ini relatif mudah, karena tidak memerlukan modifikasi yang signifikan terhadap proses dalam pabrik PLTU yang telah ada. Karena biomassa yang dikonsumsi oleh PLTU yang dikelola PT PLN ini mensubstitusi batubara secara parsial saja, maka abu yang dihasilkan pun merupakan campuran abu biomassa dan batubara.



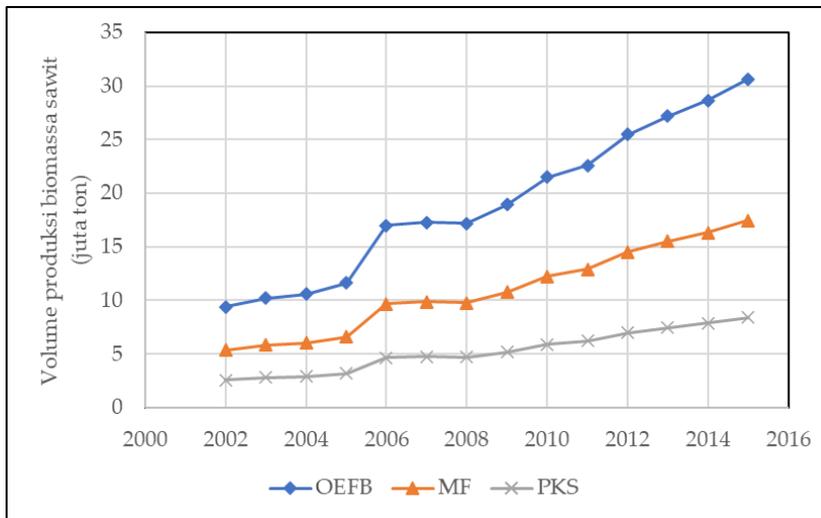
Gambar 2.9 Inspeksi timbunan serpihan kayu (*wood chip*) untuk proses pembakaran bersama batubara di PLTU Pulang Pisau, Kalimantan Timur (www.swarakaltim.com).

Selain pembakaran bersama di PLTU, pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar banyak dipraktikkan oleh pabrik minyak sawit mentah (*crude palm oil* atau CPO) di Indonesia. Bahan yang berupa limbah biomassa padat mencakup tandan kosong sawit (TKS, atau dalam bahasa Inggris diistilahkan sebagai *oil palm empty fruit bunch* atau OEFB), serat mesokarp atau serabut sawit (*mesocarp fiber* atau MF), dan cangkang inti buah sawit (*palm kernel shell* atau PKS). Tampilan visual ketiga jenis biomassa padat dari industri CPO yang didokumentasikan oleh tim pelaksana Grant Riset Sawit 2018 ditampilkan di Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Tampilan visual tiga jenis biomassa padat dari pengolahan CPO: (a) tandan kosong sawit (b) serat mesokarp (c) cangkang inti sawit.

Untuk setiap ton minyak sawit mentah (CPO) yang diproduksi, rata-rata akan dihasilkan limbah biomassa padat sebesar 0.875 ton tandan kosong sawit (TKKS), 0.6 ton serat mesokarp (*mesocarp fiber* atau MF), dan 0.27 ton cangkang inti sawit (*palm kernel shell* atau PKS). Gambar 2.11 menampilkan produksi biomassa sawit nasional dalam kurun 2002-2015 yang disusun berdasarkan tabulasi perhitungan neraca massa produksi sawit oleh Hambali dan Rivai (2017).



Gambar 2.11 Produksi tahunan biomassa padat sawit di Indonesia dalam kurun 2002-2015 (digambar berdasarkan data dari Hambali dan Rivai (2017)).

Data laju produksi abu biomassa di Indonesia praktis tidak tersedia. Dengan mengasumsikan kadar abu sekira 5% dalam OEFB (Samadhi dkk, 2020), 5% dalam MF (Simão dkk., 2018), dan 8 % dalam PKS (Ikubanni dkk., 2020) dapat diperkirakan secara kasar bahwa potensi volume produksi abu sawit pada tahun 2015 di Indonesia mencapai 1.5, 0.9, dan 0.7 juta ton masing-masing untuk OEFB, MF, dan PKS, jika semua biomassa tersebut dibakar di dalam negeri. Namun demikian, pengamatan secara langsung di lapangan mengungkapkan bahwa pabrik-pabrik CPO hanya membakar sebagian dari MF dan PKS saja untuk pembangkitan uap air dan listrik untuk keperluan sendiri. Data literatur yang tersedia adalah dari Malaysia, yang pada tahun 2014 memproduksi sekitar 4 juta abu sawit per tahun (Ooi dkk., 2014). Mengingat bahwa kapasitas produksi CPO Indonesia lebih besar daripada Malaysia, boleh jadi volume produksi abu sawit Indonesia pun melebihi Malaysia.

Sebagai cerminan visual potensi volume abu sawit, Gambar 2.12 menampilkan dokumentasi tim pelaksana Grant Riset Sawit 2018 dari Fakultas Teknologi Industri ITB dan Departemen Teknik Kimia Universitas Mulawarman, pada saat melaksanakan tinjauan lapangan dan mengambil cuplikan limbah abu biomassa dari sebuah pabrik CPO di wilayah Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur.



Gambar 2.12 Peninjauan tim peneliti Program Grant Riset Sawit 2018 Institut Teknologi Bandung dan Universitas Mulawarman ke penimbunan abu biomassa di pabrik CPO di Kalimantan Timur.

Bab-bab selanjutnya menyoroti secara khusus penerapan kimia berkelanjutan terhadap pengelolaan limbah pada aluminosilikat. Dua pendekatan yang dibahas adalah pengolahan konsolidatif limbah padat aluminosilikat serta pengolahan ekstraktif untuk memperoleh logam alkali berharga dari limbah aluminosilikat. Pengolahan konsolidatif dimaknai sebagai jalur proses yang menggabungkan unsur-unsur dan fasa-fasa padatan dalam bahan limbah padat menjadi suatu massa yang koheren dengan kekuatan mekanik yang memampukannya berperan sebagai bahan konstruksi. Sementara itu, pengolahan ekstraktif mengacu pada pemisahan atau pemulihan komponen-komponen dalam jumlah relatif lebih kecil namun dengan nilai tambah ekonomi lebih besar dari suatu bahan atau campuran bahan limbah anorganik.

3. PENGOLAHAN KONSOLIDATIF MENJADI GEOPOLIMER

3.1 Apakah Geopolimer Itu?

Geopolimer merupakan istilah yang semula dipopulerkan oleh Davidovits pada awal tahun 1990-an bagi bahan-bahan alkali-aluminosilikat menyerupai semen yang dibentuk melalui serangkaian reaksi kimia yang kompleks antara padatan yang kaya dengan gugus-gugus alumina dan silika (padatan aluminosilikat) dengan larutan aktivator yang berupa basa (umumnya berupa larutan alkali hidroksida dan alkali silikat) pekat (Davidovits, 1991). Definisi geopolimer yang lebih luas diusulkan oleh Provis dan van Deventer sebagai suatu golongan material padatan aluminosilikat yang stabil, yang dibentuk melalui aktivasi bahan prekursor oleh larutan alkali hidroksida dan/atau alkali silikat (Provis dan van Deventer, 2009). Dalam pengertian yang lebih luas sebagai material yang diaktivasi oleh alkali (AAM atau *alkali-activated materials*) ini, pengembangan geopolimer sesungguhnya telah dirintis beberapa dekade sebelum Davidovits mengemukakan istilah geopolimer pada awal dekade 1990-an tersebut.

Upaya pengembangan AAM pertama kali dipublikasikan oleh Purdon pada dekade 1940-an, yang menemukan bahwa reaksi kimia antara terak tanur tiup (*blast furnace slag*) dengan kadar kalsium tinggi dengan larutan alkali dapat menghasilkan suatu bahan konstruksi bangunan. Pada dekade 1950-an, kemajuan penting dalam rekayasa AAM dicapai oleh para peneliti di Uni Soviet, yang berupaya merekayasa bahan perekat konstruksi melalui reaksi antara bahan aluminosilikat alami (lempung atau tanah liat) berkadar kalsium rendah dengan larutan alkali (Glukhovsky, 1959). Penelitian-penelitian yang lebih mendalam untuk memahami proses geopolimerisasi dan dampaknya terhadap struktur molekuler serta struktur mikro geopolimer mulai meningkat pada akhir dekade 1990-an (van Jaarsveld dan van Deventer, 1999; Duxson dkk., 2005)

Dewasa ini, geopolimer mencakup bidang-bidang aplikasi yang jauh lebih luas dari semata-mata sebagai pengganti semen Portland biasa (*ordinary Portland cement* atau dikenal secara luas dengan singkatan OPC). Daya tahan geopolimer yang tinggi terhadap lingkungan asam memungkinkan aplikasinya

untuk konstruksi bangunan pantai, serta sebagai bahan untuk restorasi bangunan kuno yang rusak akibat hujan asam (Purbasari dkk., 2018; Giacobello dkk., 2022; Zaidi dkk., 2019). Struktur molekuler geopolimer yang cenderung tak beraturan atau amorf juga membuatnya memiliki ketahanan temperatur tinggi, misalnya dalam kejadian kebakaran. Ini memungkinkan geopolimer untuk memberikan tingkat keselamatan yang lebih tinggi pada struktur beton daripada semen Portland (Lahoti dkk., 2019).

Dalam konteks keramahan lingkungan, geopolimer menawarkan dua keunggulan dibandingkan OPC. Sebagai keunggulan pertama adalah potensi emisi karbon yang lebih rendah. Proses geopolimerisasi yang mengubah bahan baku aluminosilikat menjadi semen atau beton geopolimer dapat berlangsung pada temperatur ambien atau sedikit di atas ambien (Samadhi dkk., 2017). Temperatur ini jauh lebih rendah daripada temperatur pembentukan clinker semen dalam produksi OPC yang berada pada kisaran 1450 °C.

Proses geopolimerisasi tidak terlalu selektif terhadap bahan baku; berbagai bahan aluminosilikat dapat diolah menjadi geopolimer, asalkan memiliki nisbah molar Si/Al yang memadai (sekitar 3.0-5.0), serta memiliki reaktivitas yang tinggi terhadap larutan aktivator alkali yang pada umumnya diindikasikan oleh amorfosititas struktur bahan aluminosilikat termaksud. Ini berarti bahwa bahan-bahan limbah aluminosilikat dapat dimanfaatkan ulang untuk memproduksi geopolimer. Sesungguhnya, abu terbang batubara justru merupakan salah satu bahan aluminosilikat yang paling dini dipelajari penggunaannya untuk sintesis geopolimer (van Jaarsveld dan van Deventer, 1999). Selain abu terbang batubara, jenis-jenis limbah anorganik lain yang telah dipelajari dalam sintesis geopolimer mencakup terak tanur peleburan baja (Panagiotopoulou dkk., 2010), terak feronikel (Samadhi dkk., 2017), lumpur merah atau *red mud* yang dihasilkan oleh proses produksi alumina (Mudgal dkk., 2021), abu biomassa seperti sekam padi, bambu, limbah sawit dan lain-lain (Purbasari dkk., 2017; Hwang dan Huynh, 2015), hingga puing atau limbah demolisi bangunan (Alhawat dkk., 2022; Ozcelikci dkk., 2023). Keberagaman bahan baku ini jelas menunjukkan fleksibilitas geopolimer sebagai suatu jalur alternatif pemanfaatan ulang limbah padat anorganik yang tidak memerlukan energi pemrosesan yang besar.

3.2 Proses Geopolimerisasi

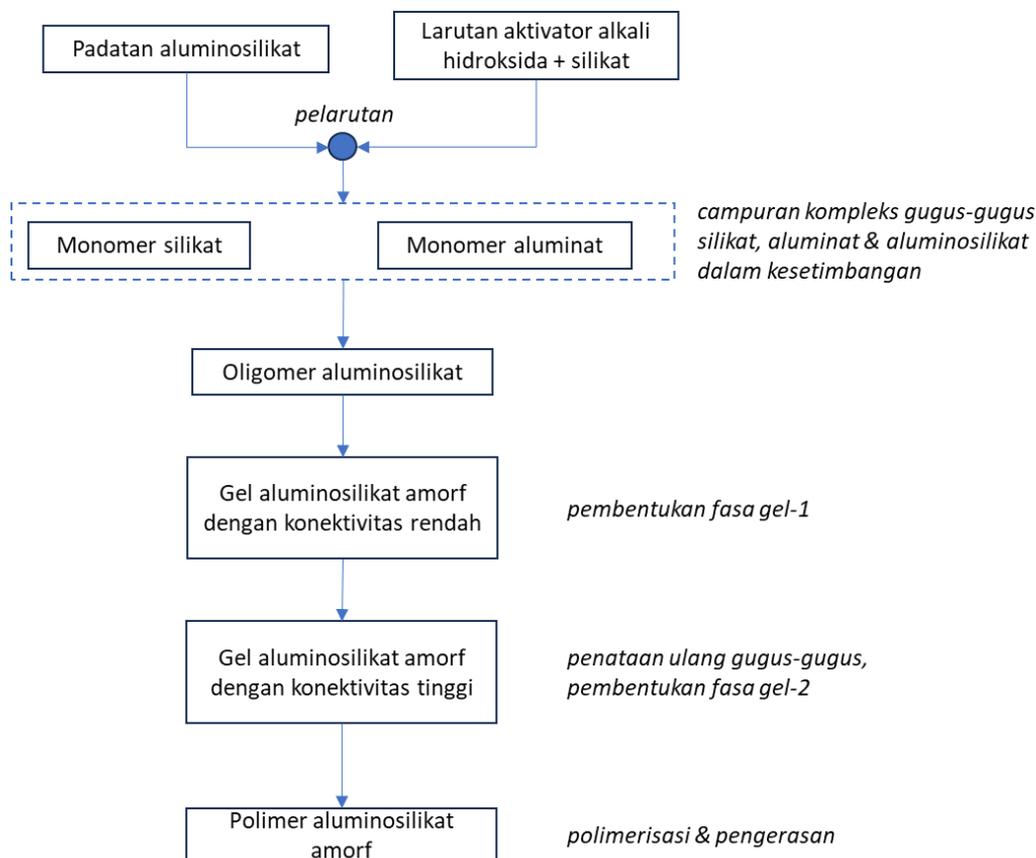
Gambar 3.1 menampilkan secara skematik proses pembentukan geopolimer melalui reaksi antara padatan aluminosilikat dengan larutan aktivator alkali. Proses pembentukan geopolimer dari padatan aluminosilikat dimulai dengan serangan kimiawi (pada dasarnya tahap ini dapat dipandang sebagai proses korosi terhadap padatan aluminosilikat oleh larutan alkali) struktur silikat dalam partikel bahan baku aluminosilikat oleh larutan alkali. Peluruhan struktur silikat ini memungkinkan pelarutan dan difusi gugus-gugus kompleks yang mengandung atom aluminium dan silikon ke dalam rongga-rongga antar partikel. Gugus-gugus kompleks ini kemudian bereaksi dengan alkali silikat yang disediakan oleh larutan aktivator, membentuk fasa gel amorf yang berisikan rantai-rantai silikat yang berorientasi acak dalam tiga dimensi. Fasa gel ini disimbolkan dengan notasi Na-S-H (natrium aluminosilikat hidrat) atau Ca-S-H (kalsium aluminosilikat hidrat), bergantung pada spesi kationik yang dominan dalam campuran bahan baku (Wang dkk., 2022). Struktur gel amorf aluminosilikat ini memiliki muatan elektrostatis netto negatif akibat keberadaan kation-kation Al^{3+} yang terkoordinasi secara tetrahedral (berikatan dengan empat atom lain yang terdekat). Muatan negatif fasa gel ini kemudian dinetralkan oleh kation-kation alkali yang disediakan oleh larutan aktivator (Provis dan van Deventer, 2009).

Seiring dengan waktu (dan dapat dipercepat dengan pemanasan lunak), fasa gel geopolimer mengalami pengerasan melalui reaksi-reaksi kondensasi dan pengikatan silang (*crosslinking*) antarrantai aluminosilikat dalam gel. Hasil akhir dari proses geopolimerisasi ini berupa fasa pengikat yang padat dan kuat, menyerupai semen dalam sifat-sifat mekaniknya, dan tahan terhadap pelarutan oleh air (Komnitsas dan Zaharaki, 2007).

Seperti halnya reaksi-reaksi kimia yang secara umum melibatkan padatan, geopolimerisasi dapat dipermudah dengan sejumlah faktor berikut:

- Struktur kristalin padatan aluminosilikat: padatan amorf cenderung memiliki energi permukaan yang lebih tinggi, sehingga lebih reaktif terhadap serangan kimiawi oleh alkali di tahap-tahap awal geopolimerisasi.
- Ukuran partikel: Semakin halus partikel aluminosilikat, maka semakin besar pula luas permukaan spesifiknya sehingga reaktivitasnya terhadap larutan alkali pun meningkat.

- Temperatur pengerasan: pemanasan yang relatif lunak (di kisaran 40-60 °C) dalam tahap pengerasan, yang lazim diistilahkan sebagai perlakuan *heat curing*, mampu mempercepat proses geopolimerisasi sehingga menghasilkan produk yang lebih keras.
- Selain kelakuan yang bersifat umum di atas, sejumlah variabel proses sintesis yang khas dalam literatur tentang pengembangan bahan geopolimer telah diidentifikasi pula. Tabel 3.1 merangkum variabel-variabel tersebut, beserta dampaknya terhadap struktur maupun sifat-sifat fisik produk geopolimer.



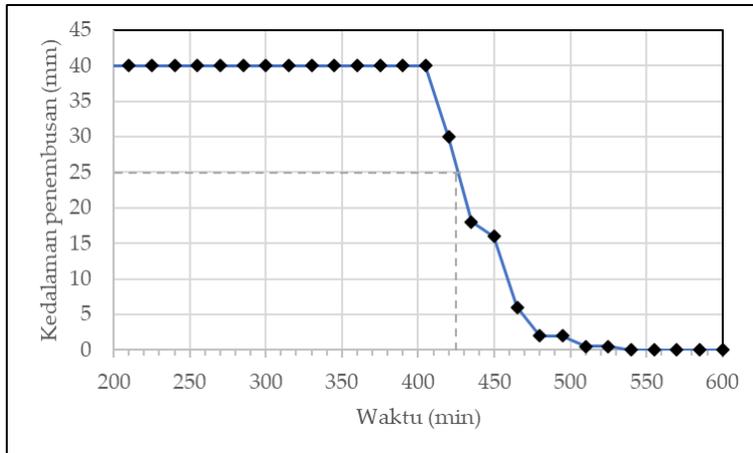
Gambar 3.1 Diagram skematik proses geopolimerisasi bahan baku aluminosilikat (disusun ulang berdasarkan Duxson dkk. (2007) dan van Deventer dkk. (2007)).

Berdasarkan sifatnya sebagai bahan perekat menyerupai semen, cara termudah untuk mengamati perubahan struktur bahan akibat proses geopolimerisasi adalah dengan mengukur peningkatan kekuatan mekaniknya terhadap waktu. Ini menjadi dasar pengukuran waktu ikat yang lazim

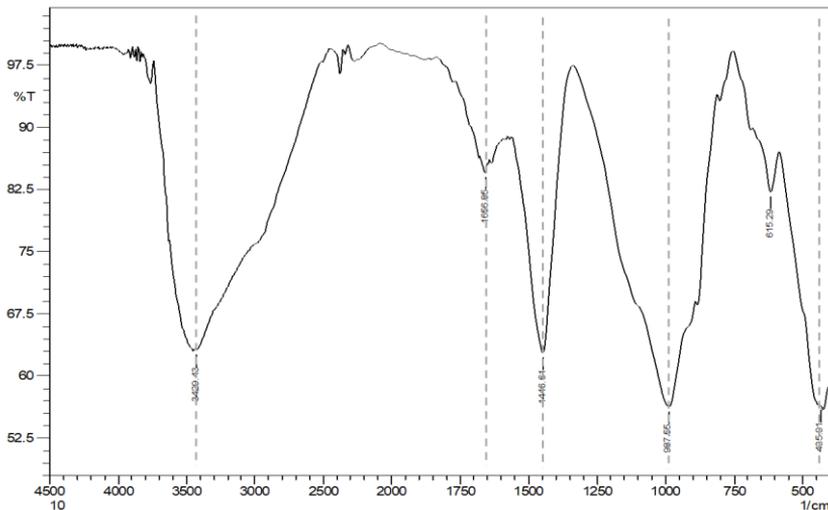
diterapkan dalam rekayasa struktur beton konvensional. Secara konseptual, pengukuran waktu ikat didasarkan pada kedalaman penembusan spesimen mortar atau beton segar oleh jarum pengukur standar sebagai fungsi waktu. Dengan berjalannya proses *crosslinking* dan pengerasan geopolimer, kedalaman penembusan jarum ini tentu semakin lama akan semakin dangkal. Waktu yang diperlukan untuk mengurangi kedalaman penembusan hingga nilai tertentu (25 mm untuk waktu ikat awal) disebut sebagai waktu ikat. Gambar 3.2 menampilkan contoh hasil pengukuran waktu ikat terhadap spesimen mortar geopolimer yang dibuat dari hasil pembakaran bersama biomassa batang bambu dan kaolin. Dalam contoh ini, waktu ikat awal yang terukur adalah 425 menit.

Tabel 3.1 Variabel-variabel kunci dalam sintesis geopolimer dan dampaknya terhadap produk akhir

No.	Variabel	Catatan dan dampak	Referensi
1	Nisbah molar Si/Al campuran reaksi	Salah satu variabel yang paling banyak dikaji; diatur dengan formulasi aluminosilikat dan/atau larutan aktivator. Kuat tekan optimum pada Si/Al sekitar 1.75-2.25	Duxson dkk. (2005), Duxson dkk. (2007), Zhang dkk. (2019), Lahoti dkk. (2017)
2	Jenis aktivator alkali	KOH menghasilkan kuat tekan lebih tinggi daripada NaOH; alkali silikat (Na_2SiO_3 , K_2SiO_3) meningkatkan kuat tekan	Gharzouni dkk. (2015), Nematollahi dan Sanjayan (2014), Purbasari dkk. (2018)
3	Konsentrasi aktivator	Peningkatan konsentrasi alkali meningkatkan kuat tekan karena tahap pelarutan aluminosilikat yang lebih tuntas; tidak ada titik optimum, batasan konsentrasi maksimum ditentukan oleh aspek-aspek praktis.	Samadhi dkk. (2020), Budh dan Warhade (2014), Oyebisi dkk. (2018)
4	Ca dalam bahan baku aluminosilikat	Sering ditemukan dalam bahan aluminosilikat, (misalnya sebagai residu desulfurisasi gas buang pembakaran). Ca meningkatkan kuat tekan, titik optimum pada 10-20% massa dalam bahan aluminosilikat.	Yip dkk. (2008), Tian dkk. (2020), Pacheco-Torgal dkk. (2009)
5	Temperatur pematangan	Pematangan dapat dilakukan pada temperatur ambien. Pemanasan mortar / beton geopolimer pada secara singkat pada 80-90 °C (proses pematangan termal atau <i>heat curing</i>) meningkatkan kuat tekan.	Hardjito dkk. (2005), Kong dkk. (2008), Ahmari dkk. (2012), Tian dkk. (2020)



Gambar 3.2 Pengukuran waktu ikat mortar geopolimer dari abu bambu dan metakaolin hasil pembakaran bersama yang diaktivasi oleh campuran larutan KOH 10.0 N dan Na₂SiO₃ (digambar ulang dari data dalam Purbasari dan Samadhi, 2019).



Gambar 3.3 Spektrum serapan inframerah transformasi Fourier (FTIR) spesimen geopolimer yang dibuat dari 60% abu terbang batubara dan 40% terak feronikel dan dikenai pematangan termal pada 60 °C selama 36 jam.

Selain itu, perubahan struktural selama proses geopolimerisasi dapat dipantau berdasarkan perubahan gugus-gugus aktif dengan teknik spektrometri inframerah (FTIR). Proses pembentukan fasa gel amorf dalam geopolimerisasi dicirikan dengan peningkatan kehadiran gugus-gugus Si-O-Si dan Si-O-Al yang masing-masing muncul pada rentang angka gelombang (kebalikan dari frekuensi) 950-1250 cm⁻¹ dan 420-500 cm⁻¹ dalam spektrum serapan inframerah (Purbasari dkk., 2018). Gambar 3.3 menampilkan contoh spektrum serapan FTIR sebuah spesimen geopolimer yang dibuat dari

campuran abu terbang batubara dan terak feronikel (pada nisbah 60/40 %-massa) dan dikenai perlakuan pematangan termal pada temperatur 60 °C selama 36 jam. Keberadaan pita-pita serapan radiasi inframerah oleh gugus-gugus Si-O-Si dan Si-O-Al nampak jelas dalam gambar tersebut. Peningkatan intensitas pita-pita serapan tersebut terhadap waktu setidaknya dapat menjadi indikator kualitatif keberlangsungan proses geopolimerisasi. Keterbatasan karakterisasi kualitatif ini disebabkan oleh kuantifikasi spektra FTIR yang relatif sulit.

3.3 Sifat-sifat Geopolimer Sebagai Bahan Konstruksi

Dari segi karakterisasi fasa kristalin, tidak terlalu banyak hal yang dapat diidentifikasi dari spesimen gel geopolimer. Selain bahan-bahan baku aluminosilikat yang disukai pada umumnya bersifat amorf atau kristalin lemah, fasa gel geopolimer pun tersusun dari struktur jaringan alkali-aluminosilikat dengan tatanan spasial atom-atom yang bersifat acak. Kehadiran fasa-fasa kristalin dalam suatu spesimen produk geopolimer (untuk membedakan dengan pemaknaan fasa gel geopolimer yang lebih sempit; 'produk geopolimer' dapat mencakup material atau barang jadi yang terbuat dari mortar maupun adukan beton berbasis geopolimer) umumnya mengindikasikan hal-hal berikut:

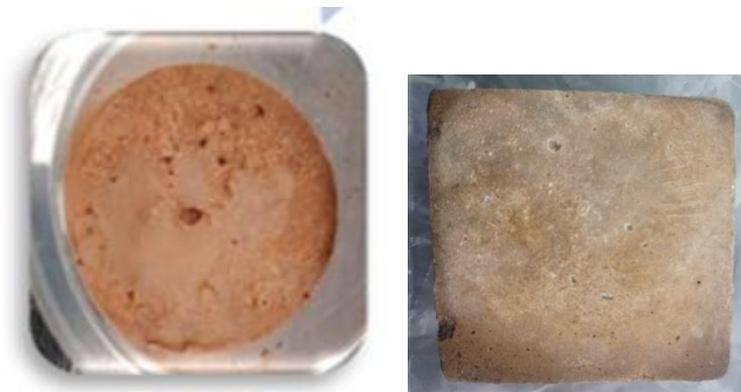
- Keberadaan sisa-sisa prekursor aluminosilikat padat yang tidak bereaksi
- Keberadaan material inert atau pengisi dalam produk, seperti pasir, agregat, serat penguat (*reinforcing fiber*), dan sebagainya.
- Terjadinya perubahan kimiawi akibat pematangan panas yang berlebihan atau pemaparan produk akhir terhadap temperatur tinggi.

Berikut adalah ulasan ringkas tentang sejumlah sifat fisikakimiawi geopolimer yang penting secara praktis. Sebagaimana layaknya material teknik apapun, kelakuan fisikakimiawi geopolimer ini merupakan hasil interaksi antara proses pembuatan (termasuk karakteristik bahan-bahan bakunya) dan struktur bahan (dari level atomik, molekuler, supramolekuler, struktur mikro, hingga struktur makro).

Sesuai dengan sasaran historik pengembangan material geopolimer sebagai bahan perekat konstruksi pengganti semen Portland, sifat fisik yang dianggap terpenting adalah kekuatan mekanik. Dan, sebagaimana layaknya bahan konstruksi yang tergolongkan sebagai material keramik oksida,

geopolimer cenderung lebih unggul dalam hal kuat tekan (*compressive strength*) ketimbang kuat tarik (*tensile strength*) maupun kuat lengkung (*flexural strength*).

Pengukuran kuat tekan geopolimer di literatur umumnya dilakukan terhadap dua jenis spesimen, yakni mortar (yang mencakup bahan prekursor aluminosilikat, larutan aktivator, dan agregat halus atau pasir) atau beton (yang merupakan campuran mortar dengan agregat kasar dan lebih banyak air). Mengingat posisi geopolimer sebagai bahan konstruksi yang relatif baru, praktis belum ada standar industrial khusus untuk formulasi mortar atau beton yang menggunakan geopolimer sebagai bahan pengganti parsial atau total bagi semen Portland. Dengan demikian, formulasi mortar maupun beton geopolimer di literatur pada umumnya menggunakan patokan standar industrial untuk mortar atau beton berbasis OPC. Gambar 3.4 menampilkan contoh-contoh spesimen geopolimer dalam bentuk pasta (tanpa tambahan agregat apapun) dan mortar berukuran standar 5×5×5 cm yang digunakan untuk uji kuat tekan.



Gambar 3.4 Contoh visual spesimen pasta dan mortar geopolimer.

Dalam bentuk mortar, kuat tekan geopolimer yang berasal dari abu terbang batubara setelah masa pematangan selama 7 hari berkisar pada 10-15 MPa, sementara spesimen yang berasal dari terak metalurgi mencapai 2-2.5 MPa (Samadhi dkk., 2016; Samadhi dkk., 2017). Hasil-hasil terakhir yang diperoleh di Kelompok Keahlian Perancangan dan Pengembangan Produk Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri ITB dari bahan baku campuran abu terbang batubara dan terak feronikel menunjukkan kuat tekan awal pada kisaran 2-25 MPa. Sebagian dari formulasi mortar geopolimer yang diuji

tersebut telah melampaui standar SNI 15-2049-2004 atau ASTM C1329-05 untuk semen Portland.

Potensi kegunaan geopolimer untuk mengubah limbah anorganik dari biomassa menjadi bahan konstruksi tercermin dari serangkaian penelitian awal yang telah dilaksanakan oleh Kelompok Keahlian Penulis sebagai upaya pengembangan konsep ekonomi melingkar berdasar pada biomassa yang berlimpah di Indonesia. Tabel 3.2 merangkum kisaran kuat tekan yang diperoleh dalam penelitian-penelitian ini. Secara umum, aktivasi berbagai jenis abu biomassa oleh larutan NaOH-Na₂SiO₃ menghasilkan mortar dengan kuat tekan 7 hari pada kisaran 3.0-7.5 MPa. Namun demikian, penelitian-penelitian ini juga membuktikan bahwa formulasi prekursor geopolimer dengan abu biomassa harus tetap mencakup abu terbang batubara dan/atau metakaolin (kaolin yang dikalsinasi pada kisaran temperatur 500-700 °C untuk menghilangkan gugus-gugus hidroksil dan menurunkan kristalinitasnya) untuk dapat menghasilkan kuat tekan yang layak.

Tabel 3.2 Kuat tekan mortar geopolimer dari abu biomassa setelah 7 hari

Jenis prekursor	Kuat tekan setelah 7 hari (MPa)	Keterangan	Referensi
abu sekam padi	3.0-7.0	pencampuran dengan metakaolin atau abu terbang batubara	Samadhi dkk. (2017)
abu batang bambu	3.0-5.0	pencampuran dengan metakaolin	Purbasari dkk. (2018)
abu batok kelapa	3.0-7.5	nilai lebih tinggi didapat pada pencampuran dengan abu terbang batubara	Samadhi dkk. (2017a), Samadhi dkk. (2018)
abu tongkol jagung	8.0	setelah 14 hari	Samadhi dkk. (2018)
abu bagas tebu	10.3	setelah 14 hari	Samadhi dkk. (2018)

Dalam bentuk beton, geopolimer secara umum menunjukkan daya saing yang baik terhadap OPC. Kajian data sekunder dengan metode *machine learning* yang dilaporkan oleh Emarah (2022) mendapatkan 860 titik data dari sejumlah besar literatur untuk hasil pengukuran kuat tekan beton geopolimer abu terbang batubara setelah 28 hari pada kisaran 15-60 MPa, dengan rerata sekitar 25 MPa. Kajian serupa dilakukan oleh Oyebeisi dan Olemayri (2023) terhadap beton geopolimer berbasis terak metalurgi. Pengolahan terhadap

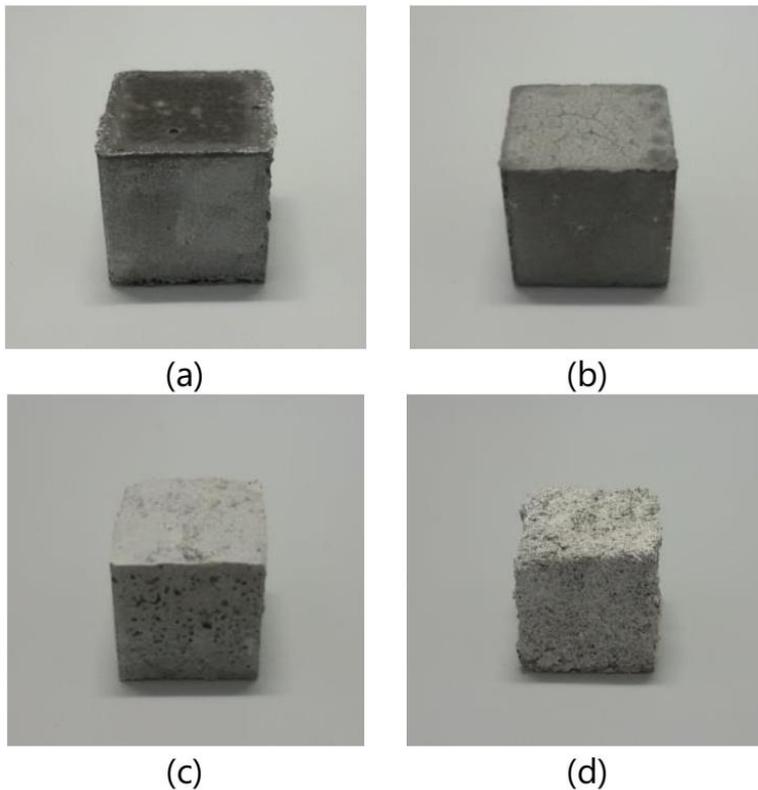
sejumlah lebih dari 180 set data yang dipublikasikan di literatur menunjukkan kisaran kuat tekan 28 hari pada 30-40 MPa, dan rerata sebesar 36 MPa. Dibandingkan dengan spesifikasi kuat tekan beton struktural yang lazim dipraktikkan di dunia konstruksi, yakni 200-500 kgf/cm² atau sekitar 19.6-49.0 MPa, dapat disimpulkan bahwa geopolimer mampu menghasilkan beton dengan kekuatan yang memenuhi syarat industri.

Durabilitas geopolimer terhadap panas, yang dimaknai sebagai perubahan kekuatan mekanik sebagai fungsi temperatur atau setelah pemaparan terhadap perlakuan panas tertentu, merupakan salah satu keunggulan dibandingkan dengan OPC. Jiang dkk. (2020) mengukur kuat tekan geopolimer dari abu terbang batubara tipe ASTM Class F dan Class C yang dikenai pemanasan hingga 1200 °C. Geopolimer dari abu terbang Class F menunjukkan kinerja mekanik yang lebih baik pada temperatur di bawah 500 °C, sementara Class C menunjukkan durabilitas yang lebih baik pada temperatur di atas 800 °C. Spesimen pembandingan yang dibuat dari OPC menunjukkan durabilitas termal di antara kedua kelas abu terbang tersebut.

Giannopoulou dkk. (2023) menguji durabilitas termal serangkaian spesimen geopolimer dari bahan limbah konstruksi dan demolisi bangunan (*construction and demolition waste* atau CDW) yang berupa limbah pecahan batubata dan ubin keramik, yang dipaparkan terhadap pemanasan pada rentang 600-1050 °C selama 2 jam. Spesimen-spesimen mortar geopolimer tersebut secara umum menunjukkan integritas geometri yang baik pada pemanasan. Kuat tekan geopolimer berkurang dari nilai awal sebesar 33 MPa menjadi 13 MPa setelah dipanaskan pada 800 °C. Nilai-nilai yang dilaporkan dalam literatur ini mengisyaratkan potensi geopolimer untuk diterapkan sebagai bahan bangunan tahan api.

Selain panas, geopolimer juga menunjukkan keunggulan dalam durabilitas terhadap korosi dalam lingkungan asam dan halogen. Bai dkk. (2023) melaporkan ketahanan geopolimer berbahan baku abu dari insinerator limbah perkotaan (*municipal solid waste incinerator* atau MSWI) yang lebih tinggi daripada OPC dalam percobaan perendaman dalam lingkungan asam sulfat selama 112 hari, di mana geopolimer tersebut hanya mengalami penurunan kuat tekan sebesar 20% akibat serangan larutan asam. Purbasari dkk. (2018a) melakukan pengukuran dampak pemaparan terhadap larutan 5% asam sulfat terhadap tampilan visual dan kuat tekan mortar geopolimer dari

abu batang bambu yang di bakar bersama dengan kaolin. Setelah perendaman selama 6 minggu, kuat tekan geopolimer hanya berkurang sekitar 4.5% dari nilai awal, sementara kuat tekan mortar OPC pada kondisi pemaparan yang sama berkurang sebesar 24%. Perbandingan tampilan visual spesimen mortar OPC dengan geopolimer setelah perendaman selama 6 minggu jelas menunjukkan bahwa durabilitas geopolimer jauh lebih baik, seperti yang ditampilkan dalam Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Tampilan visual mortar geopolimer berbasis abu bambu dan metakaolin (a) sebelum dan (b) sesudah perendaman, serta mortar OPC (c) sebelum dan (d) sesudah perendaman dalam larutan 5% asam sulfat selama 6 minggu (Purbasari dkk., 2018).

3.4 Isu Emisi Karbon Geopolimer

Daya tarik geopolimer dalam hal dampak lingkungan terutama bersumber pada rendahnya temperatur yang diperlukan untuk mengubah bahan-bahan baku yang tidak memiliki daya ikat menjadi produk akhir dengan integritas mekanik yang memadai (dalam bentuk mortar atau beton). Reaksi geopolimerisasi yang mengubah bahan padatan aluminosilikat menjadi

geopolimer yang keras dan kuat praktis dapat berlangsung pada temperatur ambien. Sementara itu, proses pengubahan mineral-mineral bahan baku semen Portland (lempung, batu kapur, pasir silika, pasir besi, serat bahan-bahan tambahan lainnya) menjadi *clinker* semen yang siap digiling menjadi serbuk semen memerlukan pembakaran pada temperatur sekitar 1450 °C. Carreño-Gallardo dkk. (2018) melaporkan potensi reduksi emisi karbon global yang melebihi 1400 juta ton ekivalen CO₂ akibat penggantian OPC dengan geopolimer campuran kering (*dry-mix geopolymer*) yang diproduksi dari pasir yang kaya silika dan natrium karbonat.

Namun demikian, perbandingan emisi karbon dan konsumsi energi secara lebih rinci antara semen Portland dan geopolimer masih menyisakan kontroversi, terutama pada besaran pengurangan emisi yang dapat diperoleh melalui substitusi OPC oleh geopolimer. Estimasi pengurangan emisi karbon (atau gas rumah kaca secara umum) sangat bergantung pada lingkup sistem yang dicakup dalam perhitungan, serta faktor-faktor emisi yang diterapkan pada setiap elemen di dalam lingkup sistem tersebut. Secara lebih spesifik, analisis emisi karbon geopolimer selayaknya mempertimbangkan faktor-faktor berikut (Turner dan Collins, 2013):

- Pencakupan konsumsi energi dan emisi karbon oleh kegiatan-kegiatan penambangan, pengolahan, serta transportasi bahan-bahan baku padatan aluminosilikat.
- Pencakupan konsumsi energi untuk pembuatan senyawa aktivator alkali.

Besaran pengurangan emisi karbon geopolimer relatif terhadap OPC yang dilaporkan di literatur bervariasi dalam kisaran yang cukup lebar. Estimasi yang diklaim Duxson dkk. (2007) berdasarkan pengolahan data sekunder adalah bahwa substitusi OPC oleh geopolimer berbasis metakaolin mampu mengurangi emisi karbon hingga sekitar 80%. Dengan mengabaikan emisi karbon yang terkait dengan demolisi dan daurulang struktur beton yang telah habis usia pakainya, McLellan dkk. (2011) mendapatkan potensi pengurangan emisi karbon oleh geopolimer yang dibuat dari bahan-bahan yang tersedia secara lokal di Australia sebesar 44-64% dibandingkan beton OPC. Nilai estimasi pengurangan emisi yang serupa dilaporkan pula oleh Gomes dkk. (2019).

Analisis daur hidup beton geopolimer dan beton OPC dilakukan oleh Habert dkk. (2011) dengan pendekatan “*cradle to grave*” yang mencakup proses

produksi bahan-bahan baku termasuk aktivator alkali, produksi material semen, transportasi material produk semen ke lokasi pekerjaan, serta produksi dan demolisi struktur yang dibangun dengan semen tersebut. Pengolahan data sekunder untuk beton geopolimer dan beton OPC pada kekuatan mekanik setara menunjukkan potensi pengurangan emisi karbon oleh geopolimer hingga 45%. Meski demikian, para penulis ini juga mencatat bahwa penurunan emisi pada orde tersebut dapat pula diupayakan dengan menerapkan teknologi-teknologi proses produksi semen Portland konvensional terbaru yang lebih hemat energi. Dengan mencakup konsumsi energi untuk proses pematangan termal produk struktur geopolimer dan memperbaiki perkiraan emisi yang terlibat dalam transportasi sistem rantai pasok dalam pendekatan analisis *cradle to grave*, Turner dan Collins (2013) memperkirakan emisi karbon spesifik sebesar 320 kg CO₂-e/m³ beton untuk geopolimer, dibandingkan dengan 354 kg CO₂-e/m³ beton untuk OPC. Pengurangan emisi yang hanya sebesar sekitar 9% ini jauh lebih rendah daripada angka-angka yang dilaporkan di tulisan-tulisan ilmiah sebelumnya.

Meskipun besaran penurunan emisi karbon oleh penggunaan geopolimer masih belum dapat diperhitungkan secara definitif, angka-angka dalam literatur di atas setidaknya mengisyaratkan potensi manfaat lingkungan geopolimer yang cukup menjanjikan.

3.5 Tantangan dan Peluang Pengembangan Geopolimer

Meskipun memiliki berbagai keunggulan kunci dibandingkan dengan OPC, terutama terkait dengan potensinya sebagai solusi pengembangan ekonomi berkelanjutan, geopolimer masih menunjukkan sejumlah kelemahan yang terkait dengan sifat-sifat fisika-kimiawinya, yang berpotensi menghambat implementasinya dalam skala besar.

Salah satu kelemahan dalam kelakuan kimiawi geopolimer adalah kecenderungan mengalami eflorisiensi (*efflorescence*), yakni penumpukan zat berwujud serbuk putih pada permukaan luar produk geopolimer. Zat ini adalah senyawa alkali karbonat, yang terbentuk melalui reaksi lambat antara eksese kation alkali yang bermigrasi keluar ke permukaan geopolimer melalui perantara fasa larutan cair dalam pori-pori eksternal dengan gas karbon dioksida di atmosfer sekitar: $\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3(\text{s})$. Pergerakan kation

alkali dari dalam ke permukaan luar geopolimer dimungkinkan oleh konsentrasi alkali yang tinggi, kekuatan ikatan terhadap Na^+ yang relatif lemah, serta mikrostruktur produk yang relatif terbuka (Tang dkk., 2021). Peristiwa efluoresensi pada umumnya lebih parah dalam lingkungan atmosfer lembab, atau jika geopolimer berkontak secara langsung dengan air. Gambar 3.6 menampilkan contoh spesimen mortar geopolimer yang mengalami efluoresensi parah setelah pemaparan terhadap atmosfer pada perendaman parsial dalam air selama 28 hari.



Gambar 3.6 Peristiwa efluoresensi setelah pemaparan spesimen geopolimer berbasis terak feronikel – abu terbang batubara terhadap atmosfer selama 3 hari (atas) dan 28 hari (bawah).

Fenomena efluoresensi pada mortar atau beton OPC pada umumnya dianggap hanya mengurangi estetika produk dan tidak mengurangi kekuatan mekanik. Namun demikian, efluoresensi pada geopolimer ternyata mengubah mikrostruktur produk yang berdampak negatif pada integritas mekaniknya. Lapisan garam yang nampak di permukaan sebagai produk efluoresensi sering menyembunyikan penumpukan garam serupa di dalam pori-pori internal geopolimer. Keberadaan timbunan garam di dalam pori ini dapat menimbulkan retakan-retakan internal, sehingga mengurangi kekuatan mekanik geopolimer secara cukup berarti (Zhang dkk., 2018). Sebagai contoh, Longhi dkk. (2022) melaporkan penurunan kuat tekan sebesar 45% akibat efluoresensi pada geopolimer dari bahan metakaolin yang direndam secara parsial dalam air dan terpapar ke atmosfer sekitar.

Sejumlah pendekatan telah dicoba untuk mengurangi – atau setidaknya menunda – proses efloresensi. Metode-metode mitigasi efloresensi ini mencakup hal-hal berikut:

- Peningkatan kadar Ca dalam campuran bahan baku, baik dengan meningkatkan proporsi bahan baku yang sejak awal telah mengandung Ca pada kadar relatif tinggi, atau dengan menambahkan Ca hidroksida ke dalam campuran bahan baku. Kalsium dapat mengurangi efloresensi dengan cara mengurangi kapilaritas pori-pori yang menurunkan laju penyerapan air oleh geopolimer, dan dengan meningkatkan kekuatan ikatan Na^+ melalui pembentukan gel C-A-S-H (calcium aluminosilicate hydrate) (Tang dkk., 2021).
- Sifat hidrofilik permukaan geopolimer dapat dibalik menjadi hidrofobik dengan melapisi permukaan eksternal dengan cairan monomer silane. Setelah kering, monomer silane akan terikat secara kimiawi dengan geopolimer. Sifat hidrofobik permukaan geopolimer menghambat penyerapan air, yang selanjutnya akan mengurangi laju perpindahan kation Na^+ ke permukaan geopolimer (Xue dkk., 2018).
- Migrasi kation Na^+ juga dapat dihambat dengan menambahkan larutan Caltite ke dalam campuran reaksi geopolimer. Caltite merupakan senyawa organik agen penyubut pori yang bersifat hidrofobik. Di dalam jaringan pori geopolimer, gugus-gugus stearat dalam caltite berikatan dengan kation Na^+ . Hasil ikatan ini membentuk membran yang menghambat difusi kation Na^+ di dalam interior geopolimer (Wu dkk., 2022).

Jika geopolimer hendak diaplikasikan pada skala besar untuk menggantikan semen Portland, maka harus dipastikan bahwa produk-produk struktur geopolimer memiliki durabilitas yang setidaknya setara dengan OPC dalam spektrum lingkungan aplikasi yang setara pula. Meskipun upaya-upaya di atas telah dibuktikan efektivitasnya untuk mengurangi efloresensi geopolimer dalam skala laboratorium, kelayakan penerapannya dalam skala besar masih memerlukan kajian lebih lanjut.

Dengan berbagai keunggulan dalam konteks pengurangan emisi karbon, kemampuan memanfaatkan ulang limbah padat anorganik, serta daya tahan terhadap lingkungan asam dan panas, pemanfaatan geopolimer dalam skala besar masih menghadapi beberapa kendala utama selain fenomena efloresensi yang dijelaskan sebelumnya. Dibandingkan dengan OPC yang hanya memerlukan pencampuran dengan agregat dan air di titik penggunaan

dan reaksi hidrasinya mampu menyediakan sendiri panas yang diperlukan untuk pematangan, geopolimer memerlukan penyediaan larutan alkali pekat yang korosif dan pemanasan terhadap hasil pencetakan yang tentunya tidak mudah dilaksanakan di lapangan jika struktur termaksud berukuran besar. Beton geopolimer ideal yang berkelakuan ramah pengguna (*user friendly*) digagaskan sebagai suatu material konstruksi yang memanfaatkan bahan-bahan baku yang berkelanjutan, dapat diproduksi di lokasi konstruksi secara aman dengan penggunaan zat-zat kimia yang lebih sedikit, serta pengerasannya tidak memerlukan sumber pemanasan eksternal tambahan (Rahman dan Al-Ameri, 2013). Variasi dalam komposisi kimiawi dan karakteristik fisik bahan baku geopolimer, terutama yang berupa limbah aluminosilikat seperti abu terbang batubara, juga berdampak pada permasalahan praktis seperti variasi warna dan kebutuhan untuk menyesuaikan formulasi larutan aktivator serta perlakuan panas secara kasus per kasus. Secara umum, kendala-kendala ini menyebabkan biaya produksi dan implementasi beton geopolimer dalam konstruksi masih berada pada kisaran 2-3x beton OPC (Tempest dkk., 2015).

Sebagai bahan konstruksi yang relatif baru dan diarahkan untuk mensubstitusi semen Portland dengan teknologi formulasi dan produksi yang telah berkembang sejak akhir abad ke-19, wajarlah jika geopolimer masih menunjukkan sejumlah kendala teknis maupun komersial yang signifikan. Berbagai peluang pengembangan geopolimer dapat diidentifikasi dari literatur, baik yang berorientasi pada kajian bahan-bahan baku alternatif maupun pengembangan proses geopolimerisasi.

Pengembangan geopolimer dari limbah konstruksi atau demolisi bangunan (*construction and demolition waste* atau CDW) merupakan upaya untuk semakin mendekatkan rantai pasok geopolimer dengan titik penggunaan. Hasil-hasil yang dipublikasikan di literatur terbuka mengindikasikan bahwa bahan CDW mampu dikonversi menjadi beton geopolimer dengan kekuatan mekanik final yang sebanding dengan beton OPC, terutama jika memanfaatkan limbah jenis batu bata dan ubin keramik (Komnitsas dkk., 2015).

Salah satu tantangan utama dalam konversi CDW menjadi geopolimer adalah variasi komposisi oksida yang relatif lebar antarkategori jenis CDW, terutama terkait dengan unsur-unsur yang berkontribusi pada pembentukan

sifat pozolanik atau menyerupai semen, yakni Si, Al, Ca, Fe, dan Mg. Tantangan dan peluang pengembangan terkait masalah variasi komposisi oksida bahan CDW ini terutama mengarah pada metodologi adaptasi komposisi secara cepat dan fleksibel di lapangan, baik melalui penyesuaian bauran bahan antarkategori CDW, maupun dengan penambahan berbagai bahan pelengkap pengikat bersemen (*supplementary cementitious materials* atau SCM) dengan komposisi kimiawi yang relatif terkendali dengan baik seperti OPC, terak giling tanur putar (GGBS), abu terbang batubara, dan lain-lain (Alhawati dkk., 2022).

Selain variabilitas dan konsistensi komposisi oksida, masalah distribusi ukuran partikel juga merupakan kendala tersendiri dalam geopolimerisasi CDW. Sebagaimana umumnya dalam permasalahan reaksi kimiawi yang melibatkan padatan, kehalusan ukuran partikel diperlukan untuk mendapatkan luas permukaan padatan yang besar, yang berlanjut pada pencapaian kecepatan reaksi yang memadai. Sejumlah literatur melaporkan bahwa ukuran partikel CDW harus lebih halus dari 125-150 μm untuk memungkinkan reaksi geopolimerisasi dengan baik (Komnitsas dkk., 2015; Huo dkk., 2017). Kebutuhan untuk mengolah CDW sedekat mungkin dengan situs konstruksi dan karakteristik fisik CDW yang sangat heterogen menuntut pemahaman yang lebih mendalam tentang perekrayasaan ukuran partikel CDW yang efisien; tidak terpatok sebatas pengecilan ukuran hingga sehalus mungkin untuk bahan baku geopolimer, namun juga pada peluang penggunaan sebagian CDW sebagai agregat beton.

Kebutuhan untuk menyediakan larutan alkali pekat yang korosif dan beracun di lokasi konstruksi dengan bahan geopolimer merupakan masalah keselamatan kerja yang tidak dapat diabaikan. Salah satu upaya yang berkembang dalam 10-15 tahun terakhir untuk memitigasi kendala ini adalah merekrayasa formulasi '*one-part geopolymer*' atau '*ready-mix geopolymer*'. Geopolimer konvensional – di mana bahan padatan aluminosilikat (baik berupa komponen tunggal maupun campuran kering sejumlah padatan yang berbeda) dan larutan aktivator bermula sebagai dua bagian yang terpisah – diistilahkan pula sebagai '*two-part geopolymer*'. Reaksi geopolimerisasi dimulai ketika kedua reaktan ini dicampurkan. Di sisi lain, dalam *one-part geopolymer* baik komponen padatan aluminosilikat maupun fasa aktivator alkali berada dalam satu campuran kering non-reaktif yang dapat ditransportasikan secara mudah ke lokasi konstruksi. Setelah mencapai lokasi, reaksi geopolimerisasi dapat dilangsungkan dengan menambahkan air seperti

halnya proses hidrasi semen Portland (Duxson dan Provis, 2008). Campuran kering aluminosilikat dan alkali aktivator dalam *one-part geopolimer* umumnya memerlukan kalsinasi pada rentang 350-1000 °C untuk meningkatkan reaktivitasnya (Luukkonen dkk., 2018). Karena perbedaan proses produksi ini, *one-part geopolimer* dinilai lebih sesuai untuk pembuatan struktur besar secara langsung di lokasi konstruksi (van Deventer dkk., 2012).

Bahan-bahan baku padatan aluminosilikat serta bahan pelengkap silika maupun alumina yang dapat digunakan untuk *one-part geopolimer* pada dasarnya identik dengan *two-part geopolimer*, seperti abu terbang batubara, terak tanur sembur, metakaolin, dan sebagainya. Bahan-bahan alkali aktivator padat mencakup natrium hidroksida, berbagai garam natrium seperti natrium silikat, natrium karbonat, natrium aluminat, dan sebagainya. Selain itu, sejumlah jenis bahan limbah dengan kadar alkali dan/atau alkali tanah relatif cukup tinggi juga telah dicoba sebagai komponen aktivator; ini mencakup lumpur merah (*red mud*) yang merupakan limbah dari proses produksi alumina dengan proses Bayer, serta abu biomassa (Luukkonen dkk., 2018).

Secara umum, *one-part geopolimer* menunjukkan kekuatan mekanik dan durabilitas termal yang setara dengan geopolimer konvensional. Fenomena eflouresensi tidak separah geopolimer konvensional, yang ditengarai karena kuantitas alkali total dalam campuran reaksi tidak sebesar geopolimer konvensional demi mencegah pelepasan panas yang berlebihan pada saat pengecoran akibat proses pelarutan aktivator alkali oleh air yang berlangsung secara eksotermik (Mataalkah dkk., 2017). Kajian-kajian LCA terhadap kedua golongan besar geopolimer ini cenderung mengindikasikan bahwa *one-part geopolimer* mampu menawarkan emisi karbon yang tidak lebih dari 50% dari emisi geopolimer konvensional. Hal ini disebabkan oleh penggunaan senyawa aktivator alkali hidroksida dan alkali silikat yang lebih sedikit, di mana senyawa-senyawa aktivator itu sendiri menyumbang emisi karbon yang sangat berarti bagi produk akhir geopolimer (Luukkonen dkk. 2018). Prospek keramahan lingkungan, kemudahan prosedur produksi struktur, serta variasi aktivator alkali fasa padat dibandingkan dengan geopolimer konvensional mengisyaratkan masih terbuka lebarnya peluang untuk berinovasi dengan formulasi bahan baku maupun proses preparasi campuran *ready mix geopolimer* atau *one-part geopolimer* ini.

4. PENGOLAHAN EKSTRAKTIF ABU BIOMASSA

4.1 Karakteristik Abu Biomassa

Kadar abu dalam biomassa bervariasi dalam rentang yang sangat lebar. Meskipun secara sangat umum kandungan abu dalam biomassa cenderung lebih rendah daripada batubara dengan nilai kalor yang sepadan, akumulasi abu biomassa akan menjadi masalah yang kian mendesak seiring dengan peningkatan proporsi biomassa dalam kebijakan bauran energi nasional Indonesia. Bab sebelumnya telah menjelaskan rute valorisasi abu biomassa secara konsolidatif, dengan mengubahnya menjadi geopolimer sebagai bahan konstruksi yang dapat menggantikan semen Portland. Dalam bab ini dibahas rute valorisasi yang samasekali berbeda, yakni ekstraksi bahan-bahan yang memiliki nilai ekonomis dari abu biomassa.

Abu biomassa merupakan istilah generik bagi campuran senyawa-senyawa oksida dan garam logam (baik logam alkali, alkali tanah, logam ringan, hingga logam berat) yang tidak terkonversi dalam proses pembakaran atau konversi termal biomassa, dan tertinggal sebagai residu padat. Dalam konteks biomassa nabati, abu yang diperoleh sebagai residu padat di akhir proses pembakaran berasal dari tiga sumber sebagai berikut (Vassilev dkk., 2013):

- a. Abu primer, yang terbentuk dari proses-proses biokimia alami selama pertumbuhan dan setelah kematian tumbuhan sumber biomassa dan tidak mengalami perubahan fasa selama proses pembakaran.
- b. Abu sekunder, yang terbentuk secara antropogenik (istilah yang bermakna akibat tindakan manusia) melalui berbagai jalur reaksi kimia dan perubahan yang kompleks dalam fasa gas, cair dan padat selama proses pembakaran. Aksi-aksi antropogenik ini juga mencakup penambahan aditif untuk pengendalian proses pembakaran seperti gipsum untuk menangkap senyawa sulfur dari gas cerobong, penambahan tanah liat untuk menaikkan titik lebur abu, dan lain-lain. Perubahan-perubahan fisika-kimiawi selama pembakaran ini mencakup karbonisasi, dekarbonasi, dekomposisi, dehidrasi, dehidroksilasi, perengkahan molekuler, rekristalisasi, dan sebagainya.
- c. Abu tersier, yang terbentuk dalam transportasi dan penimbunan abu biomassa setelah proses pembakaran tuntas, terutama sebagai produk

interaksi antara timbunan abu dengan lingkungan sekitarnya (atmosfer, tanah, air hujan, dan air tanah).

Salah satu karakteristik terpenting dari abu biomassa bagi pengolahan ekstraktif tentunya adalah komposisi kimiawi, karena menjadi kriteria pertama kelayakan pemisahan satu atau sejumlah bahan tertentu secara ekonomis dari abu tersebut. Biomassa cenderung mengandung abu dalam kadar yang lebih sedikit daripada batubara. Unsur-unsur logam yang dalam abu biomassa lebih banyak daripada dalam abu batubara mencakup mangan, kalium, fosfor, kalsium, magnesium, dan natrium. Sebaliknya, abu biomassa lebih miskin dalam kandungan aluminium, besi, silikon, dan titanium dibandingkan abu batubara (Vassilev dkk., 2010).

Tabel 4.1 merangkum komposisi kimiawi dari sejumlah spesimen abu biomassa yang pernah dikaji di Kelompok Keahlian Perancangan dan Pengembangan Produk Teknik Kimia FTI-ITB. Spesimen-spesimen ini mewakili jenis-jenis biomassa yang tidak saja berlimpah di Indonesia, tetapi juga cenderung terakumulasi pada luasan geografi yang relatif sempit sehingga memudahkan pengumpulan dan pemanfaatannya pada skala industrial. Pengamatan terhadap komposisi sejumlah jenis abu biomassa di Tabel 4.1 menunjukkan bahwa sebagian abu biomassa mengandung kalium dalam kadar tinggi, dan sebagian mengandung silika dalam kadar tinggi (bahkan sangat tinggi untuk abu sekam padi). Sebagai informasi tambahan, Gambar 4.1 menyajikan tampilan visual tumbuhan bambu apus dan bambu hitam bagi para Pembaca yang mungkin belum mengenal spesies-spesies bambu yang cukup penting sebagai material perancah (*scaffold*) konstruksi bangunan dan untuk pembuatan produk-produk kerajinan tradisional di Indonesia.

Sesuai praktik lazim dalam pengolahan padatan, kandungan komponen-komponen dalam abu dinyatakan sebagai ekuivalen oksida sederhana, sehingga belum tentu mencerminkan identitas fasa-fasa termodinamik yang sesungguhnya. Secara mineralogik, abu biomassa dicirikan dengan kehadiran fasa-fasa padatan kristalin dengan keragaman yang sangat luas. Identifikasi fasa-fasa kristalin ini umumnya dilakukan dengan metode difraksi sinar X (X-ray diffraction atau XRD). Vassilev dkk. (2013) mencatat keberadaan lebih dari seratus senyawa padatan kristalin dari penelaahan literatur. Dari berbagai senyawa kristalin ini, yang paling sering dijumpai dalam abu biomassa

mencakup calcite (CaCO_3), sylvite (KCl), arcanite (K_2SO_4), apatite, anhydrite (CaSO_4), periclase (MgO), hematite (Fe_2O_3), serta karbon yang belum terbakar (Smolka-Danielowska dan Jablonska, 2021). Pengetahuan tentang identitas fasa-fasa kristalin yang terkandung dalam abu biomassa ini cukup penting dalam merancang proses ekstraksi yang tepat, karena adanya variasi tingkat kelarutan dan/atau reaktivitas fasa-fasa tersebut terhadap pelarut yang dipilih untuk menyelenggarakan proses ekstraksi.

Tabel 4.1 Komposisi oksida sejumlah spesimen abu biomassa di Indonesia (Purbasari dkk., 2016; Samadhi dkk., 2017; Samadhi dkk., 2019; Putra dkk., 2023)

Komponen oksida	Kadar dalam abu (%-massa)					
	batang ambu apus (G. apus)	batang bambu hitam (G. atroviolacea)	Tongkol jagung	Tandan kosong sawit	Batok kelapa	Sekam padi
SiO_2	58.6	49.5	25.58	33.85	66.58	94.55
Al_2O_3	0.73	0.20	14.26	1.61	7.65	0.34
Fe_2O_3	0.51	0.24	15.48	5.44	4.44	0.70
CaO	2.68	2.88	9.35	7.28	1.63	0.64
MgO	2.82	2.15	2.78	5.01	4.32	0.33
K_2O	26.43	33.46	16.69	32.58	8.88	2.36
Na_2O	0.51	0.85	4.33	0.40	<0.001	<0.001
MnO	0.048	0.051	n/a	0.09	n/a	n/a
TiO_2	0.90	0.86	0.67	0.08	0.06	0.035
P_2O_5	3.37	6.24	3.52	4.23	4.44	0.54
SO_3	3.40	3.57	n/a	2.03	n/a	0.33

Selain fasa kristalin, abu yang terpapar pada temperatur tinggi hingga setidaknya melebur secara parsial mengandung pula fasa-fasa padatan amorf jika kemudian mendingin secara relatif cepat. Karakteristik ini misalnya sering teramati dalam abu terbang yang dihasilkan pada zona pembakaran bertemperatur tinggi, dan mengalami pendinginan cepat dalam pergerakannya mengalir bersama gas buang di sepanjang cerobong tungku pembakaran. Sebagai gambaran, kandungan total fasa-fasa amorf pada abu terbang batubara tipe ASTM Class F dapat melebihi 50%-massa. Kandungan fasa amorf ini pada umumnya tidak terukur dalam prosedur karakterisasi komposisi oksida abu, yang tidak mampu membedakan fasa asal mula dari masing-masing unsur logam (Chancey dkk., 2010). Secara umum, fenomena peleburan parsial yang dialami abu biomassa dalam proses pembakaran

menyebabkan penurunan luas permukaan partikel abu. Penurunan luas permukaan ini pada gilirannya menghambat difusi zat-zat terlarut ke permukaan partikel abu akibat kontak dengan pelarut, sehingga mengurangi perolehan zat terlarut dalam ekstraksi.



Gambar 4.1 Tampilan visual tumbuhan dewasa bambu apus (*G. apus*, kiri) dan bambu hitam (*G. atroviolacea*, kanan).

4.2 Ragam Proses dan Produk Ekstraksi Abu Biomassa

Kajian tentang valorisasi abu biomassa melalui pendekatan proses ekstraktif relatif cukup beragam. Filosofi dasar ekstraksi menggunakan pelarut berfasa cair ini secara umum mencakup dua arah: (1) penjumlahan zat-zat berharga dari abu biomassa, atau sebaliknya (2) penyisihan zat-zat yang kurang berharga dari abu, menyisakan residu yang lebih berharga. Pendekatan yang pertama cenderung dilakukan untuk mendapatkan produk yang berupa senyawa-senyawa logam alkali, alkali tanah, maupun fosfor, sementara pendekatan kedua digunakan misalnya untuk memulihkan fasa silika atau alumina dalam bentuk nanopartikel.

Fosfor dapat diperoleh dari abu biomassa residu dari proses pencernaan limbah makanan menjadi biogas (*food waste biogas digestate ash* atau FDS) melalui proses ekstraksi dengan larutan asam diikuti dengan diafiltrasi, atau dengan proses elektrodialisis. Metode penjumlahan ini menghasilkan fosfor dalam bentuk asam fosfat dengan perolehan sekitar 90% (Huang dkk., 2022).

Sarmah dkk. (2021) mengulas penggunaan larutan ekstrak abu biomassa oleh pelarut air yang diberi istilah generik *ash water extract* (AWE) sebagai suatu kategori pelarut ramah lingkungan untuk menyelenggarakan berbagai sintesis organik. Ma dkk. (2023) melaporkan ekstraksi kalium dari abu biomassa campuran yang dihasilkan oleh pembangkit listrik skala industrial di RRC. Ekstraksi tersebut menggunakan air dengan variasi temperatur (pada rentang 20-60 °C). Garam yang dihasilkan dari ekstrak didominasi oleh kalium klorida, dengan sedikit kalium sulfat.

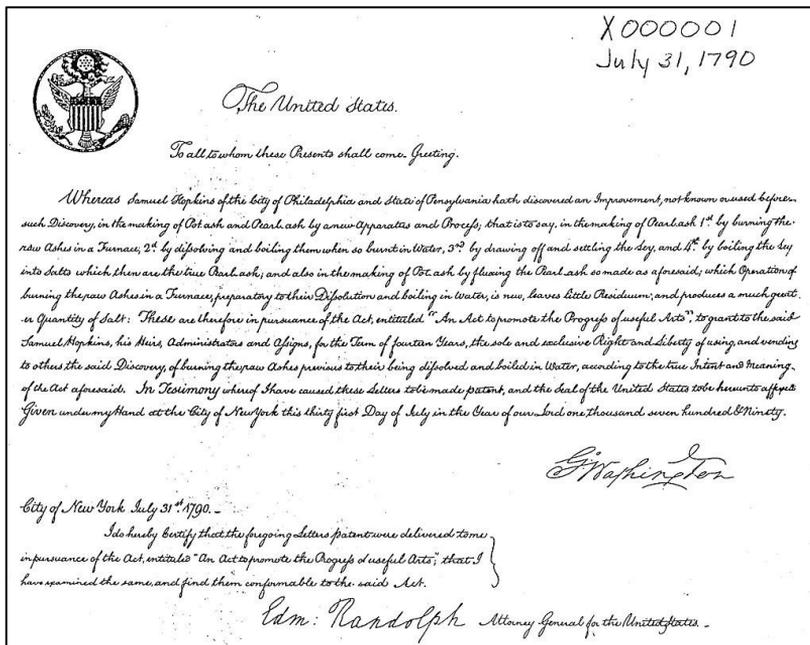
Oleszek dkk. (2022) memaparkan keberhasilan ekstraksi kalium dan mangan dari abu biomassa daun dan akar jahe. Kalium diekstraksi dengan pelarut air panas, sementara mangan diekstraksi dengan larutan asam nitrat dan asam sitrat. Temperatur pengabuan merupakan variabel yang sangat memengaruhi perolehan ekstraksi, dengan kondisi optimum diperoleh pada 300 °C. Perolehan ekstraksi yang dilaporkan para penulis ini sangat tinggi, yakni tidak kurang dari 90%. Prospek ekstraksi kalium dari abu biomassa ini akan dibahas lebih lanjut dalam sub-bab berikutnya, yang berorientasi pada upaya pemanfaatan ulang kalium dari ekstrak abu biomassa sebagai komponen pupuk untuk didaurulangkan ke perkebunan sawit.

Sebagai contoh ekstraksi abu biomassa yang bertujuan memurnikan residu padatan tak terlarut adalah ekstraksi biosilika dari abu biomassa dari perkebunan kurma yang dilaporkan oleh Elanthikkal dkk. (2023). Prosedur yang dijalankan mencakup pemisahan komponen-komponen ketakmurnian logam dari abu melalui ekstraksi oleh larutan asam, diikuti dengan pembilasan dengan air bebas mineral. Residu silika yang tersisa dalam abu yang telah dikenai perlakuan oleh larutan asam tersebut kemudian direaksikan dengan larutan basa NaOH menjadi natrium silikat yang larut dalam air. Larutan natrium silikat ini kemudian dicampuri dengan larutan HCl secara tetes demi tetes sehingga endapan padatan yang dinamai biosilika, yang dapat dimanfaatkan untuk pembuatan katalis, komponen elektronik dan baterai, pengolahan air, dan sebagainya.

4.3 Ekstraksi Kalium dari Abu Biomassa

Valorisasi abu biomassa dengan cara ekstraksi bahan-bahan mineral yang bernilai ekonomis sesungguhnya bukanlah merupakan teknologi baru. Sebaliknya, ekstraksi abu sangat boleh jadi adalah salah satu penemuan

proses fisika-kimiawi tertua dalam sejarah peradaban manusia. Istilah kuno bagi garam-garam kalium yang diperoleh dari abu kayu adalah “*potash*”. Secara harfiah istilah ini bermakna mineral yang diperoleh dari perendaman abu dalam air di dalam bejana berbentuk mangkok (“*pot*” dalam bahasa Inggris) yang dilanjutkan dengan penguapan air oleh pemanasan. Produk yang diperoleh dengan cara ekstraksi primitif ini berupa campuran garam dengan komponen-komponen utama kalium karbonat, kalium klorida, dan/atau kalium nitrat. Sebagai gambaran betapa mapannya gagasan ekstraksi abu ini, paten pertama yang diterbitkan oleh Amerika Serikat (dengan nomor US Patent 000001, tertanggal 31 Juli 1790 dan ditandatangani oleh Presiden pertama Amerika Serikat) mengklaim suatu penemuan perbaikan proses produksi dan rancangan peralatan untuk pembuatan produk potash tersebut (Gambar 4.2).

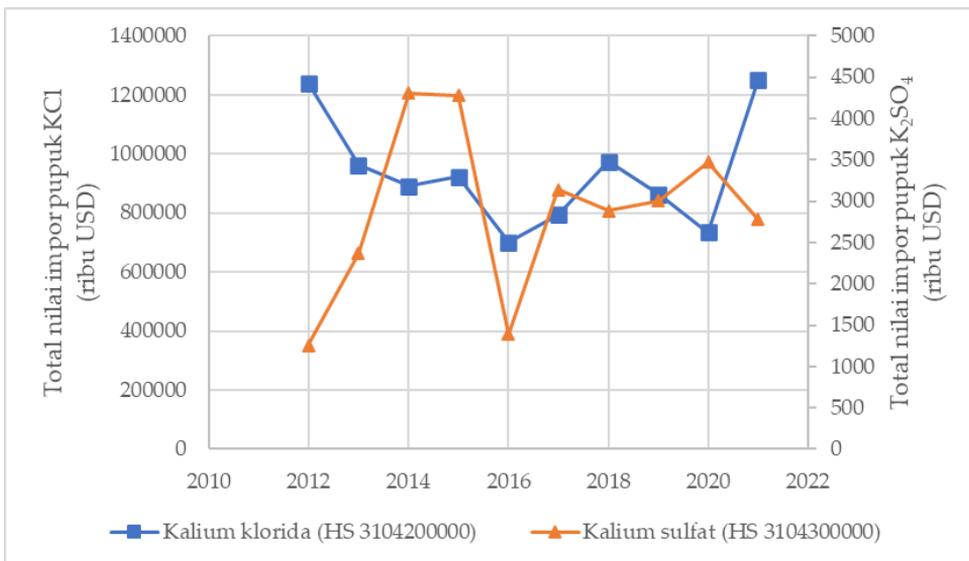


Gambar 4.2 Dokumen United States Patent pertama dalam sejarah, yang mengklaim suatu teknologi baru dalam produksi *potash* dari abu biomassa.

Kelompok Keahlian Perancangan dan Pengembangan Produk Teknik Kimia di Fakultas Teknologi Industri ITB melalui Laboratorium Teknologi Mineral dan Bahan Anorganik (Lab TMBA) melanjutkan topik kajian yang sangat klasik di atas dalam konteks yang relevan dengan kondisi Indonesia. Secara lebih khusus, Lab TMBA telah mengkaji tentang ekstraksi kalium dari beberapa jenis abu biomassa yang tersedia secara relatif berlimpah di

Indonesia. Penelitian yang dilakukan di Lab TMBA difokuskan pada penggunaan air sebagai pelarut yang termurah, paling mudah diperoleh dan paling aman untuk digunakan dalam skala laboratorium maupun skala besar dalam konteks pengembangan proses berdasarkan kimia berkelanjutan.

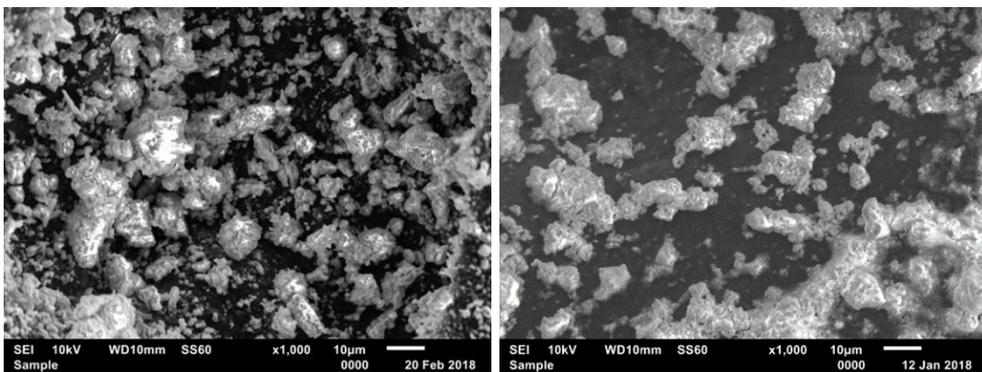
Ekstraksi kalium dari abu biomassa sawit merupakan topik kajian yang sangat penting, mengingat posisi Indonesia sebagai produsen sawit terbesar di dunia, serta volume impor pupuk kalium yang masih relatif besar. Gambar 4.3 menampilkan nilai total impor tahunan dua jenis pupuk kalium ke Indonesia, yakni kalium klorida (KCl, nomor HS 310420) dan kalium sulfat (K_2SO_4 , nomor HS 310430) dalam kurun 2012 hingga 2021.



Gambar 4.3 Nilai total impor pupuk-pupuk kalium ke Indonesia dalam kurun 2012-2021 (Kementerian Perindustrian RI, 2016).

Penelitian yang dilaporkan Samadhi dkk. (2020b) merupakan kajian awal yang berupaya mencari kondisi proses pembakaran abu tandan kosong sawit (TKKS) yang menghasilkan perolehan ekstraksi kalium terbaik, menggunakan perangkat ekstraksi berupa kontaktor partaian sederhana berskala laboratorium. Selain temperatur pengabuan TKKS yang divariasikan pada rentang 250-550 °C, variabel proses lain yang dikaji adalah perbandingan massa umpan abu kering terhadap pelarut air (1:4–1:6) dalam proses ekstraksi. Perolehan terbaik sebesar sedikit di bawah 50% didapatkan pada temperatur pengabuan 400 °C dan perbandingan massa abu : air sebesar 1:6.

Pengabuan pada temperatur sekitar 550 °C menyebabkan peleburan parsial abu yang menurunkan perolehan kalium. Fenomena peleburan abu ini nampak jelas pada Gambar 4.4 yang memperbandingkan tampilan visual mikroskopik abu TKKS yang dibakar pada temperatur 250 dan 550 °C. Partikel-partikel abu hasil pembakaran pada temperatur yang lebih tinggi menunjukkan penggumpalan antara partikel-partikel individual akibat pelelehan. Senyawa-senyawa garam kalium yang teridentifikasi dalam garam kasar hasil kristalisasi produk ekstrak tanpa pemurnian mencakup kalium karbonat, sylvite (bentuk mineral dari KCl), dan arcanite (bentuk mineral dari K₂SO₄).



Gambar 4.4 Morfologi partikel abu tandan kosong sawit (TKKS) yang dihasilkan melalui pembakaran pada temperatur 250 °C (kiri) dan 550 °C (kanan).

Data percobaan yang diperoleh pada penelitian di atas kemudian digunakan untuk penelitian lanjutan, yang menggunakan peralatan berskala pilot. Penelitian ini diselenggarakan dengan bekerja sama dengan Departemen Teknik Kimia Universitas Mulawarman dalam program Grant Riset Sawit periode 2018-2019. Gambar 4.5 menampilkan rancangan alat ekstraktor berskala pilot termaksud. Selain abu TKKS, penelitian ini juga menguji perolehan ekstraksi dari jenis-jenis abu biomassa sawit lainnya, yakni abu cangkang inti sawit (*palm kernel shell* atau PKS) dan abu serabut mesokarp (mesocarp fiber atau MF). Bahan-bahan biomassa sawit dalam penelitian ini diperoleh dari sebuah pabrik CPO di wilayah Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur.



Gambar 4.5 Unit ekstraktor abu dengan air panas berskala pilot.

Ekstraksi menggunakan 3 tahap kontak, dengan pola aliran bahan padatan dan larutan berupa aliran silang (*cross current*). Dalam pola aliran silang, residu padatan lembab (atau lebih tepatnya diistilahkan sebagai lumpur) yang dipisahkan dari fasa larutan jernih (*supernatan*) dalam suatu tahap kesetimbangan kemudian dibilas kembali dengan pelarut segar yang tidak mengandung zat terlarut yang diekstraksi. Setelah kontak tahap kedua ini selesai, lumpur abu dibiarkan mengendap atau difiltrasi. Lumpur yang terpisahkan kemudian dikontakkan kembali dengan pelarut segar hingga tahap ketiga. Larutan ekstrak jernih dari ketiga tahap kontak itu sendiri dicampur sebagai satu larutan ekstrak mentah (Gambar 4.6). Pemisahan garam-garam padat dari larutan ekstrak mentah dilakukan dengan menguapkan pelarut hingga terjadi kristalisasi garam-garam.



(cangkang)



(TKKS)



(Abu boiler)



(Serabut)

Gambar 4.6 Tampilan visual larutan ekstrak mentah abu biomassa sawit yang diperoleh dengan ekstraktor berskala pilot di Lab TMBA, Fakultas Teknologi Industri ITB.

Dengan temperatur pengabuan pada 400 °C, ekstraksi menggunakan 3 tahap kontak kesetimbangan, dan perbandingan massa abu terhadap pelarut sebesar 1:2, didapat perolehan garam-garam kalium sebesar 36.6 , 2.94, dan 3.96 %-massa relatif terhadap massa abu kering masing-masing untuk TKKS, MF, dan PKS. Gambar 4.7 menyajikan tampilan visual produk garam kasar hasil penguapan dan kristalisasi dari ekstrak mentah. Produk garam yang masing-masing merupakan campuran dari beberapa senyawa individual tersebut berwarna putih, kecuali produk yang didapat dari abu cangkang inti sawit yang menunjukkan diskolorasi berwarna kekuningan. Identifikasi fasa kristalin menggunakan XRD menunjukkan keberadaan senyawa-senyawa kalium fosfat, kalium sulfat, kalium karbonat, serta kalium klorida dalam spesimen-spesimen garam kasar (yang secara historik diistilahkan sebagai *potash*) tersebut.



Gambar 4.7 Tampilan visual serbuk garam kasar hasil penguapan dan kristalisasi ekstrak mentah dari abu TKKS, PKS, dan MF.

Meskipun secara teknis kuantitas perolehan garam nampak cukup menjanjikan, perhitungan keekonomian awal berdasarkan biaya pembangunan unit ekstraktor, biaya pengadaan bahan-bahan baku serta kebutuhan utilitas (terutama air dan listrik) sementara ini menghasilkan margin laba kotor (*gross profit margin* atau GPM yang dihitung sebagai selisih antara nilai jual dan biaya produksi secara kasar) yang masih bernilai negatif. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut untuk mencari kondisi operasi yang lebih ekonomis, serta mengidentifikasi proses pemurnian produk garam kasar untuk meningkatkan nilai jualnya.

Selain biomassa sawit, beberapa biomassa alternatif juga telah menjalani kajian awal ekstraksi kalium di Lab TMBA Fakultas Teknologi ITB. Hasil-hasil kajian awal ekstraksi kalium dari abu batang bambu telah dilaporkan oleh Samadhi dkk. (2018b). Penelitian tersebut menggunakan abu dari batang bambu hitam (*Gigantochloa atriviolacea*) yang dibakar di udara pada temperatur 500 °C. Ekstraksi dilakukan secara partaian dengan kontaktor sederhana dua tahap, yang dioperasikan dengan konfigurasi arus silang dan arus berlawanan (*counter current*). Sebagai pelarut digunakan air demineralisasi pada temperatur ekstraksi 78 °C dan perbandingan massa abu terhadap pelarut sebesar 1:5 – 1:7.5 di tiap tahap kontak. Proses ekstraksi ini berhasil mendapatkan larutan ekstrak dengan kadar K_2O dalam kisaran 0.25 – 0.58 %-massa. Dibandingkan dengan produk pupuk cair komersial yang dicuplik secara acak di pedagang di wilayah Kota Bandung, ekstrak abu bambu hitam ini memiliki kadar K_2O yang kompetitif.

Metodologi serupa dengan penelitian di atas telah diterapkan pula untuk abu dari biomassa tongkol jagung dan kulit pisang oleh Samadhi dkk. (2019).

Tongkol jagung dan kulit pisang yang telah dikeringkan dan dicacah kemudian diabukan masing-masing pada temperatur 550 dan 450 °C. Abu yang diperoleh mengandung garam-garam kalium dalam bentuk kalium klorida, kalium iodida, dan kalium karbonat. Abu kemudian diekstraksi dengan air demineralisasi pada temperatur 80 °C dengan satu tahap kontak saja pada perbandingan massa padatan abu terhadap air sebesar 1:4 – 1:8. Ekstrak mentah yang diperoleh mengandung kalium (dinyatakan sebagai K₂O) pada kadar sekitar 3.8 %-massa untuk abu kulit pisang, dan sekitar 3.2 %-massa untuk abu tongkol jagung. Nilai-nilai kadar ini memenuhi persyaratan teknis minimal sesuai Keputusan Menteri Pertanian RI Nomor 261 Tahun 2019 untuk kadar zat hara makro minimum dalam pupuk organik cair.

Cukup menarik untuk membandingkan hasil penelitian awal tentang ekstraksi abu-abu biomassa non-sawit di atas dengan penelitian berskala pilot untuk ekstraksi abu sawit yang diarahkan untuk pengembangan proses berskala komersial dengan produk akhir garam-garam padat kalium yang idealnya telah dimurnikan. Nampaknya, proses ekstraksi kalium dari abu lebih layak untuk memproduksi pupuk cair dengan kadar alkali yang relatif rendah. Pupuk tipe demikian tentu akan lebih sesuai dipasarkan untuk konsumen eceran atau digunakan di lokasi yang berdekatan dengan fasilitas proses ekstraksi, karena memerlukan biaya rantai pasok yang jauh lebih besar daripada garam kalium yang berbentuk padatan kering.

Metodologi serupa dengan penelitian di atas telah diterapkan pula untuk abu dari biomassa tongkol jagung dan kulit pisang oleh Samadhi dkk. (2019). Tongkol jagung dan kulit pisang yang telah dikeringkan dan dicacah kemudian diabukan masing-masing pada temperatur 550 dan 450 °C. Abu yang diperoleh mengandung garam-garam kalium dalam bentuk kalium klorida, kalium iodida, dan kalium karbonat. Abu kemudian diekstraksi dengan air demineralisasi pada temperatur 80 °C dengan satu tahap kontak saja pada perbandingan massa padatan abu terhadap air sebesar 1:4–1:8. Ekstrak mentah yang diperoleh mengandung kalium (dinyatakan sebagai K₂O) pada kadar sekitar 3.8 %-massa untuk abu kulit pisang, dan sekitar 3.2 %-massa untuk abu tongkol jagung. Nilai-nilai ini memenuhi persyaratan teknis minimal sesuai Keputusan Menteri Pertanian RI Nomor 261 Tahun 2019 untuk kadar zat hara makro minimum dalam pupuk organik cair.

Cukup menarik untuk membandingkan hasil penelitian awal tentang ekstraksi abu-abu biomassa non-sawit di atas dengan penelitian berskala pilot untuk ekstraksi abu sawit yang diarahkan untuk pengembangan proses berskala komersial dengan produk akhir garam-garam padat kalium yang idealnya telah dimurnikan. Nampaknya proses ekstraksi kalium dari abu lebih layak untuk memproduksi pupuk cair dengan kadar alkali yang relatif rendah. Pupuk tipe demikian tentu akan lebih sesuai dipasarkan untuk konsumen eceran atau digunakan di lokasi yang berdekatan dengan fasilitas proses ekstraksi, karena memerlukan biaya rantai pasok yang jauh lebih besar daripada garam kalium yang berbentuk padatan kering.

4.4 Tantangan Bagi Produksi Kalium dari Abu Sawit

Dengan potensi kandungan kalium yang tinggi dan proses ekstraksi yang relatif mudah dari abu biomassa sawit, seharusnya penerapan kimia berkelanjutan untuk membangun ekonomi melingkar berbasis kandungan mineral dalam biomassa dapat dikembangkan dengan mudah dan cepat. Namun demikian, kenyataan membuktikan bahwa hingga kini belum ada satupun industri pemulihan kalium (maupun zat-zat berharga lainnya) dari biomassa yang beroperasi secara komersial di Indonesia. Jenis biomassa sawit dengan kadar kalium tertinggi, yakni tandan kosong sawit (TKKS) justru tidak dibakar di pabrik-pabrik CPO maupun di PLTU melalui pembakaran bersama batubara. Mengapakah demikian?

Permasalahan teknis terbesar yang menghambat upaya pembakaran TKKS pada skala industrial justru bersumber pada kadar kaliumnya yang relatif tinggi. Di dalam proses pembakaran, senyawa-senyawa yang mengandung kalium dalam abu mulai melebur pada temperatur sekitar 700 °C, dan mulai menguap pada temperatur yang relatif rendah yakni 800-900 °C (Samadhi dkk., 2016; Misra, dkk., 1993). Peleburan senyawa kalium pada temperatur yang relatif rendah tersebut akan meningkatkan kecenderungan pembentukan terak di tungku pembakaran yang berisiko menyulitkan pengeluaran abu dari tungku. Selain itu, senyawa-senyawa kalium yang menguap berisiko untuk terbawa bersama gas buang dan menempel di bagian-bagian tungku yang lebih dingin membentuk lapisan kerak. Jika terakumulasi dalam jumlah yang cukup banyak, lapisan kerak ini akan

menurunkan kinerja perpindahan panas tungku dan bahkan mungkin mempercepat korosi komponen-komponen internal tungku.

Kelakuan kalium dalam tungku pembakaran telah lama diketahui para operator boiler. Inilah yang menjadi penyebab keengganan mereka untuk membakar TKKS. Untuk memampukan proses ekstraksi kalium secara efektif, diperlukan kajian-kajian lanjutan tentang batasan pembauran TKKS dalam suatu proses pembakaran bersama. Jika didukung dengan pemahaman yang lebih sistemik tentang ekonomi melingkar, maka diharapkan kajian-kajian demikian dapat memotivasi industri di Indonesia untuk mulai memanfaatkan TKKS sebagai bahan bakar yang murah dan memampukan pendaurulangan kalium sebagai pupuk untuk kepentingan industri tersebut.

5. PENUTUP

Kerangka berpikir maupun metodologi teknis yang ditawarkan oleh kimia hijau atau kimia berkelanjutan memiliki peran yang penting dalam membuka dan mengembangkan jalur-jalur pengolahan limbah padatan aluminosilikat di Indonesia. Meskipun dampak negatif limbah aluminosilikat ini terhadap lingkungan belum dinilai demikian parah, tetap diperlukan penyegeraan upaya-upaya penanganannya. Penelitian-penelitian mengenai valorisasi atau peningkatan nilai limbah aluminosilikat melalui pengolahan konsolidatif maupun ekstraktif dapat mengidentifikasi arahan pengembangan produk yang digagaskan untuk pada akhirnya mampu mendekati solusi praktis pada skala besar. Buku ini diharapkan dapat menjadi catatan ringkas tentang peluang-peluang dan tantangan-tantangan dalam penanganan masalah limbah aluminosilikat di Indonesia, yang menurut penilaian ilmiah Penulis akan menjadi signifikan dalam 10-15 tahun mendatang.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur dipanjatkan oleh Penulis kepada Tuhan Yang Maha Kuasa, karena hanya atas perkenan-Nya sematalah buku ini dapat diselesaikan dengan segala keterbatasan waktu, daya-upaya dan pengetahuan Penulis. Terima kasih sebesar-besarnya juga disampaikan Penulis kepada Rektor dan jajaran Pimpinan Institut Teknologi Bandung, serta Pimpinan dan para Anggota Forum Guru Besar ITB yang telah memberikan kesempatan untuk menyampaikan Orasi Ilmiah ini. Penulis menyampaikan apresiasi setinggi-tingginya bagi motivasi dan dukungan kelembagaan yang diberikan oleh Dekanat Fakultas Teknologi Industri ITB dalam seluruh proses pengembangan karir dan kenaikan jabatan Penulis, yang berujung pada kegurubesaran ini. Secara lebih khusus Penulis mengucapkan terima kasih kepada para pemberi rekomendasi dalam pengajuan jabatan Guru Besar: Prof. Brian Yulianto (FTI-ITB), Prof. Zaki Mubarok (FTTM-ITB), Prof. Alexis G. Clare (Alfred University), dan Prof. Mukund V. Karwe (Rutgers University).

Terima kasih kepada istri dan sahabat Penulis, Luh Indi Baramuni, sebagai pendorong dan pendamping Penulis sejak bangku kuliah hingga pencapaian gelar akademik tertinggi ini. Terima kasih kepada segenap jajaran dosen di Komunitas Teknik Kimia ITB dalam periode 1989-1997 yang telah mendidik selama Penulis menjalani program studi Sarjana dan Magister, serta menginspirasi Penulis untuk turut meniti karier sebagai dosen. Secara lebih khusus, Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dwiwahju Sasongko yang menginspirasi untuk berkuliah di ITB, Dr. Tatang H. Soerawidjaja dan Prof. Lienda Handoyo yang secara langsung maupun tak langsung memotivasi untuk menjadi dosen ITB, Dr. Linda Jones (Alfred University) yang mendidik sebagai peneliti, Prof. Danu Ariono dan Prof. Herri Susanto yang menginspirasi sebagai pendidik, dan Prof. Tjandra Setiadi yang mendorong Penulis untuk tidak melupakan pengembangan karier sebagai dosen PNS. Penulis mengucapkan terima kasih bagi para dosen kolaborator dalam penelitian maupun *teaching team*: Dr. Winny Wulandari, Dr. Vita Wonoputri, Dr. Helen Julian, Dr. Hary Devianto, Dr. Ardiyan Harimawan, Dr. Jenny Rizkiana, Dr. Pri J. Gusmawan, Dr. Graecia Lugito, Dr. Haryo P. Winoto, Dr. Khoiruddin, Dr. Anggit Raksajati, Dr. Dianika Lestari, Dr. Antonius Indarto, dan Dr. Aqsha. Terima kasih pula kepada rekan-rekan anggota Kelompok Keahlian Perancangan dan Pengembangan Produk Teknik Kimia FTI-ITB

(yang akan segera berganti nama), dan Ir. F. Parikesit Partoputro (Alm.) selaku Kepala Laboratorium Teknologi Keramik terdahulu yang membina Penulis sebagai dosen muda di ITB.

Di luar aktivitas inti sebagai dosen ITB, Penulis mengucapkan terima kasih kepada para anggota senior Indonesian Accreditation Board for Engineering Education atas keakraban dalam kekeluargaan dan *shared passion* dalam penjaminan mutu pendidikan tinggi: Prof. Misri Gozan, Prof. M. Romli, Berlian Kushari, Dr. Rachmawan Budiarto, Prof. Leni S. Heliani, Prof. Nasruddin, Dr. Ayu Purwarianti, Dr. Benno Rahardian, Dr. Arief S. Rochman, Dr. FX Nugroho Soelami, dan tentu saja Dr. TMA Ari Samadhi (Alm.). Dalam tugas dan jabatan Penulis di luar ITB, yakni sebagai Sekretaris Dewan Eksekutif BAN-PT, ucapan terima kasih diberikan untuk semangat kebersamaan dan pertemanan dalam penjaminan mutu kepada Prof. Ari Purbayanto selaku Direktur Dewan Eksekutif BAN-PT, serta para anggota Dewan Eksekutif BAN-PT: Prof. Johni Najwan, Prof. Agus S. Muntohar, dan Prof. Slamet Wahyudi.

Penulis mengucapkan terima kasih pula kepada para mahasiswa Teknik Kimia ITB khususnya yang sedang maupun telah menyelesaikan kajian penelitian tugas akhir / tesis / disertasi di bawah pembimbingan saya di Laboratorium TMBA FTI-ITB. Secara lebih khusus Penulis mengucapkan terima kasih bagi para mahasiswa yang telah menjadi ko-penulis dalam publikasi-publikasi ilmiah Penulis.

Penulis memohon maaf sebesar-besarnya jika ada nama-nama yang terlewatkan, yang semata-mata disebabkan oleh keterbatasan ingatan dan waktu dalam menuliskan naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmari, S., Zhang, L., Zhang, J., **2012**, Effects of activator type/concentration and curing temperature on alkali-activated binder based on copper mine tailings, *J. Mater. Sci.*, 47, 5933-5945
- Alhawati, M., Ashour, A., Yildirim, G., Aldemir, A., Sahmaran, M., Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: a review, *Journal of Building Engineering*, **2022**, 50, 104014. DOI: 10.1016/j.job.2022.104104
- American Chemical Society, 2023, What Is Green Chemistry?, <https://www.acs.org/greenchemistry/what-is-green-chemistry.html>, diakses pada: 9 Oktober 2023
- Anastas, P.T, Zimmerman, J.B. Peer reviewed: Through the 12 principles of green engineering. *Environ. Sci. Technol.*, **2003**, 37, 94A-101A, DOI: 10.1021/es032373g
- Bai, Y., Guo, W., Zhao, Q., Zhang, N., Xue, C., Wang, S., Song, Y., **2023**, Performance deterioration of municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer under sulfuric acid attack, *Construction and Building Materials*, 391, 131847. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131847
- Budh, C.D., Warhade, N.R., 2014, Effect of molarity on compressive strength of geopolymer mortar, *Int. J. Civ. Eng. Res.*, 5, 2278-3652
- Carreño-Gallardo, C., Tejeda-Ochoa, A., Perez-Ordóñez, O.I., Ledezma-Sillas, J.E., Lardizabal-Gutierrez, D., Prieto-Gomez, C., Valenzuela-Grado, J.A., Robles-Hernandez, F.C., Herrera-Ramirez, J.M., 2018, In the CO₂ emission remediation by means of alternative geopolymers as substitutes for cements, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 4878-4884
- Chancey, R.T., Stutzman, P., Juenger, MCG., Fowler, D.W., 2010, Comprehensive phase characterization of crystalline and amorphous phases of a class F fly ash, *Cement and Concrete Research*, 40, 146-156
- Davidovits, J., Geopolymers: Inorganic polymeric new materials, *J. Therm. Anal.*, **1991**, 37, 1633-1656
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., Kriven, W.M., van Deventer, JSJ., Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties, *Coll. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, **2005**, 269, 47-58

- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., van Deventer, J.S.J., **2007**, Geopolymer technology: the current state of the art, *J. Mater. Sci.*, 42, 2917-2933. DOI: 10.1007/s10853-006-0637-z
- Duxson, P., Provis J.L., Lukey, G.C., van Deventer, JSJ, 2007a, The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete', *Cement and Concrete Research*, 37, 1590-1597
- Duxson, P., Provis, J.L., 2008, Designing precursors for geopolymer cements, *J. Am. Ceram. Soc.*, 91, 3864-3869. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02787.x
- Elanthikkal, S., Mohamed, H.H., Alomair, N.A., 2023, Extraction of biosilica from date palm biomass ash and its application in photocatalysis, *Arabian Journal of Chemistry*, 16, 104522
- Emarah, D.A., Compressive strength analysis of fly ash-based geopolymer concrete using machine learning approaches, *Results in Materials*, 16, 100347. DOI: 10.1016/j.rinma.2022.100347
- Giacobello, F., Ielo, I., Belhamdi, H., Plutino, M.R., Geopolymers and functionalization strategies for the development of sustainable materials in construction industry and cultural heritage applications: a review, **2022**, *Materials*, 15, 1725
- Glukhovskiy, V.D., **1959**, Soil Silicates (Gruntosilikaty), Gosstroyizdat Publishing, Kiev, Ukraine
- Gharzouni, A., Joussein, E., Samet, B., Baklouti, S., Rossignol, S., 2015, Effect of the reactivity of alkaline solution and metakaolin on geopolymer formation, *J. Non Cryst. Solids*, 410, 127-134
- Giannapoulou, I., Robert, P.M., Sakkas, K.M., Petrou, M.F., Nicolaidis, D., **2023**, High temperature performance of geopolymers based on construction and demolition waste, *Journal of Building Engineering*, 72, 106575. DOI: 10.1016/j.job.2023.106575
- Gomes, K.C., Carvalho, M., Diniz, D.P., Abrantes, RCC, Branco, M.A., Carvalho, PRO, 2019, Carbon emissions associated with two types of foundations: CP-II Portland cement-based composite vs. geopolymer concrete, *Revista Materia*, 24, 12525. DOI: 10.1590/S1517-707620190004.0850
- Habert, G., de Lacaillerie, JBE, Roussel, N., 2011, An environmental evaluation of geopolymer based concrete productio: reviewing current research trends, *Journal of Cleaner Production*, 19, 1229-1238
- Hambali, E., Rivai, M., 2017, The potential of palm oil waste biomass in Indonesia in 2020 and 2030, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 65, 012050. DOI: 10.1088/1755-1315/65/1/012050

- Hardjito, D., Rangan, B.V., *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*, Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2005
- Hariana, Prismantoko, A., Ahmadi, G.A., Darmawan, A. Ash evaluation of Indonesian coal blending for pulverized coal-fired boilers. *J. Combustion*, **2021**, 2021, 8478739, DOI: 10.1155/2021/8478739
- Herwani, Pane, I., Imran, I., Budiono, B., Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with a variable of sodium hydroxide (NaOH) solution molarity, **2018**, MATEC Web of Conferences, 147, 01004
- Horvath, I.T., 2018, Introduction: sustainable chemistry, *Chemical Reviews*, 118, 369-371
- Hu, Y., Wang, J., Wang, X. Application of green building materials in the field of construction and sustainable development, *E3S Web of Conference*, **2021**, 308, 01001, DOI: 10.1051/e3scof/202130801001
- Huang, M., Zhai, Y., Liu, X., Liu, X., Wang, Z., Zhou, Y., Xu, M., 2022, Efficient extraction of phosphorus from food waste biogas digestate ash through two-component electro dialysis cell, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10, 108701
- Hwang, C., Huynh, T., Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers, *Constr. Build. Mat.*, **2015**, 101, 1-9. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.025
- International Union of Pure and Applied Chemistry, 2023, Green materials, <https://iupac.org/materialschemistryedu/environmental/green-materials/>, diakses pada: 2 Oktober 2023
- Ikubanni, P.P., Oki, M., Adeleke, A.A., Adediran, A.A., Adesina, O.S., 2020, Influence of temperature on the chemical compositions and microstructural changes of ash formed from palm kernel shell, *Results in Engineering*, 8, 100171. DOI: 10.1016/j.rineng.2020.100173
- Jiang, X., Zhang, Y., Xiao, R., Polaczyk, P., Zhang, M., Hu, W., Bai, Y., Huang, B., **2020**, *Journal of Cleaner Production*, 270, 122500. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122500
- Kementerian Perindustrian RI, 2016, Perkembangan impor kelompok pupuk, <https://www.kemenperin.go.id/statistik/barang.php?ekspor=&kode=202020004> (diakses pada: 8 Oktober 2023)
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Geopolymerization: a review and prospects for the minerals industry, *Minerals Engineering*, **2007**, 20, 1261-1277. DOI: 10.1016/j.mineng.2007.07.011

- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., Galetakis, M., 2015, Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers, *Advanced Powder Technology*, 26, 368-376
- Kong, D., Sanjayan, J., Sagoe-Crentsil, K., **2008**, Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures, *J. Mater. Sci.*, 43, 824-831
- Lahoti, M., Narang, P., Tan, K.H., Yang, E.H., Mix design factors and strength prediction of metakaolin-based geopolymer, **2017**, *Ceramics International*, 43, 11433-11441
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M., 2018, One-part alkali activated materials: a review, *Cement and Concrete Research*, 103, 21-34
- Ma, D., Sun, J., Zhang, Y., Sun, Z., Wang, X., Zi, J., Stojiljkovic, D., Manic, N., Tan, H., Rahman, Z., Vujanovic, M., 2023, Evaluation of ash / slag heavy metal characteristics and potassium recovery of four biomass boilers, *Biomass and Bioenergy*, 173, 106770
- Matakkah, F., Xu, I., Wu, W., Soroushian, P., 2017, Mechanochemical synthesis of one-part alkali aluminosilicate hydraulic cement, *Mater. Struct.*, 50, 97
- McLellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J., van Riessen, A., Corder, G.D., Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to Ordinary Portland Cement, *J. Cleaner Production*, **2011**, 19, 1080-1090. DOI: 10.1016/j.clepro.2011.02.010
- Ministry of Energy and Mineral Resources of the Republic of Indonesia, Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2022, Jakarta, 2023
- Mudgal, M., Singh, A., Chouhan, R.K., Acharya, A., Srivastava, A.K., Fly ash red mud geopolymer with improved mechanical strength, *Cleaner Engineering and Technology*, **2021**, 4, 100215. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100215
- Nematollahi, B., Sanjayan, J., 2014, Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer, *Mater. Des.*, 57, 667-672
- Ooi, Z.X., Ismail, H., Bakar, A.A., Teoh, Y.P., 2014, A review on recycling ash derived from *Elaeis guineensis* by-product, *BioResources*, 9, 7926-7940
- Oyebisi, S., Ede, A., Ofutayan, O., Oluwafemi, J., Olutoge, F., 2018, Modeling of hydrogen potential and compressive strength of geopolymer concrete, *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, 9, 671-679
- Oyebisi, S., Alomayri, T., Artificial intelligence-based prediction of strengths of slag-ash-based geopolymer concrete using deep neural networks, **2023**, *Construction and Building Materials*, 400, 132606. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132606

- Ozcelikli, E., Kul, A., Gunal, M.F., Ozel, B.F., Yildirim, G., Ashour, A., Sahmaran, M., **2023**, A comprehensive study on the compressive strength, durability-related parameters and microstructure of geopolymer mortars based on mixed construction and demolition waste, *Journal of Cleaner Production*, 396, 136522. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136522
- Panagiotopoulou, C., Kakali, G., Tsvilis, S., Perraki, T., Perraki, M., Synthesis and characterization of slag based geopolymers, *Materials Science Forum*, **2010**, 636-637, 155-160. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.155
- Petrovic, M, Fiket, Z. Environmental damage caused by coal combustion residue disposal: A critical review of risk assessment methodologies. *Chemosphere*, **2022**, 299, 134410, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134410
- Piatak, N.M, Parsons, M.B., Seal, R.R., 2015, Characteristics and environmental aspects of slag: a review, *Applied Geochemistry*, 57, 236-266
- Provis, J.L., van Deventer, J.S.J., 2009. Introduction to Geopolymers, in Geopolymers: structure, processing, and industrial applications, Provis, J.L. and van Deventer, J.S.J. (eds.), CRC Press, Boca Raton, USA, 2009.
- Purbasari, A., Samadhi, T.W., Bindar, Y., **2018**, The effect of alkaline activator types on strength and microstructural properties of geopolymer from co-combustion residuals of bamboo and kaolin, *Indones. J. Chem.*, 18, 397-402. DOI: 10.22146/ijc.26534
- Purbasari, A., Samadhi, T.W., Bindar, Y., **2018**, Sulfuric acid resistance of geopolymer mortars from co-combustion residuals of bamboo and kaolin, *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 18, 22-30.
- Purbasari, A., Samadhi, T.W., 2019, Sintesis geopolimer dari metakaolin dan abu bambu untuk aplikasi semen: kajian waktu ikat dan mikrostruktur, *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 4, 17-21
- Rahman, S.K., Al-Ameri, R., The need for a user friendly geopolymer concrete – ongoing research, *Concrete 2013: 26th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia*, Gold Coast, Australia, 16-18 October 2013
- Sagadin, C., Luidold, S., Wagner, C., Wenzl, C., 2016, Melting behaviour of ferronickel slags, *JOM*, 68, 3022-3028
- Samadhi, T.W., Wibowo, N.T., Athaya, H., Reuse of aluminosilicate waste materials to synthesize geopolymer, *Mater. Res. Exp.*, **2017a**, 4, 084001. DOI: 10.1088/2053-1591/aa8157
- Samadhi, T.W., Wulandari, W., Prasetyo, M.I., Fernando, M.R., Purbasari, A., **2017b**, Synthesis of geopolymer from biomass-coal ash blends, *AIP Conference Proceedings*, 1887, 020031. DOI: 10.1063/1.5003514

- Samadhi, T.W., Wulandari, W., Suroto, A., Agung, D.S., **2018a**, Synthesis of geopolymer from blends of tropical biomass, *IOP Conf Series: Material Science and Engineering*, 622, 012034. DOI: 10.1088/1757-899X/622/I/012034
- Samadhi, T.W., Narcia, F., Amril, H., 2018b, Preliminary evaluation of potassium extraction from bamboo ash, *MATEC Web of Conference*, 156, 03027
- Samadhi, T.W., Wulandari, W., Amalia, R.A., Khairunnisah, R., 2019, Potassium recovery from tropical biomass ash, *AIP Conference Proceedings*, 2085, 020003. DOI: 10.1063/1.5094981
- Samadhi, T.W., Purbasari, A., Wulandari, W., 2020a, Geopolymer preparation from bamboo ash containing kaolin as ash fusion control agent, *Materials Research Forum*, 982, 189-194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.982.189
- Samadhi, T.W., Wulandari, W., Tirtabudi, K.R., 2020b, Oil palm empty fruit bunch ash valorization through potassium extraction, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 823, 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/823/1/012035
- Sarmah, D., Borah, K.K., Bora, U., 2021, Aqueous extracts of biomass ash as an alternative class of green solvents for organic transformations: a review update, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 24, 100551
- Sheldon, R.A. Organic synthesis: past, present, and future. *Chem. Ind.-London*, **1992**, 903-906
- Simão, J.A., Marconcini, J.M., Mattoso, LHC, Sanadi, A.R., 2018, Effect of SEBS-MA and MAPP as coupling agent on the thermal and mechanical properties in highly filled composites of oil palm fiber / PP, *Composites Interfaces*, 26, 699-709. DOI: 10.1080/09276440.2018.1530916
- Smolka-Danielowska, D., Jablonska, M., 2021, Chemical and mineral composition of ashes from wood biomass combustion in domestic wood-fired furnaces, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 5359-5372
- Swara Kaltim, 2022, PLN Uji Coba Tingkatkan Porsi EBT Hingga 20 Persen dalam Program Co-firing PLTU, <https://swarakaltim.com/2022/08/10/pln-uji-coba-tingkatkan-porsi-ebt-hingga-20-persen-dalam-program-co-firing-pltu/>, diakses pada: 10 Oktober 2023
- Tam, S., 2023, Indonesia's PLN increases biomass co-firing uptake, Argus Media News, <https://www.argusmedia.com/en/news/2472435-indonesias-pln-increases-biomass-cofiring-uptake>, diakses pada: 10 Oktober 2023
- Tang, D., Yang, C., Li, X., Zhu, X., Yang, K., Yu, L., 2021, Mitigation of efflorescence of alkali-activated slag mortars by incorporating calcium hydroxide, *Construction and Building Materials*, 298, 123873. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123873

- Tempest, B., Snell, C., Gentry, T., Trejo, M., Isherwood, K., 2015, Manufacture of full-scale geopolymers cement concrete components: a case study to highlight opportunities and challenges, *PCI Journal*, November-December 2015, 39-50
- Tian, X., Xu, W., Song, S., Rao, F., Xia, L., **2020**, Effects of curing temperature on the compressive strength and microstructure of copper tailing-based geopolymers, *Chemosphere*, 253, 126754
- Titirici M. et al., The sustainable materials roadmap, *J. Phys. Mater.*, **2022**, 5, 032001, DOI: 10.1088/2515-7639/ac4ee5
- US FHWA (Federal Highway Administration), 2016, User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/cfa51.cfm>; diakses pada: 10 Oktober 2023
- Van Deventer, JSJ, Provis, J.L., Duxson, P., Lukey, G.C., **2007**, Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products, *Journal of Hazardous Materials*, A139, 506-513. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.02.044
- Van Deventer, JSJ, Provis, J.L., Duxson, P., 2012, Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement, *Miner. Eng.* 29, 89-104
- Van Jaarsveld, JGS, van Deventer, JSJ, The effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymers. *Cement Conc. Res.*, **1999**, 29, 1189-1200
- Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., 2010, An overview of the chemical composition of biomass, *Fuel*, 89, 913-933
- Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., 2013, An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification, *Fuel*, 105, 40-76
- Viskup, R., Wolf, C., Baumgartner, W., 2020, Quantification of minor chemical elements in particulate matter collected from in-use diesel engine passenger vehicles by laser-induced breakdown spectroscopy, *Energies*, 13, 6113
- Wang, H., Zhao, X., Wang, T., Su, L., Zhou, B., Lin, Y., Determination of gel products in alkali-activated fly ash-based composites incorporating inorganic calcium additives, *Advances in Materials Science and Engineering*, **2022**, 2022, 7476671. DOI: 10.1155/2022/7476671
- Wu, B., Ma, X., Deng, H., Li, Y., Xiang, Y., Zhu, Y., 2022, An efficient approach for mitigation of efflorescence in fly ash-based geopolymer mortars under high-low humidity cycles, *Construction and Building Materials*, 317, 126159. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126159

- Xue, X., Liu, Y., Dai, J., Poon, C., Zhang, W., Zhang, P., 2018, Inhibiting efflorescence formation on fly ash-based geopolymer via silane surface modification, *Cement and Concrete Composites*, 94, 43-52
- Zhang, H., Li, L., Sarker, P.K., Long, T., Shi, X., Wang, Q., Cai, G., **2019**, Investigating various factors affecting the long-term compressive strength of heat-cured fly ash geopolymer concrete and the use of orthogonal experimental design method, *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, 13, 63

CURRICULUM VITAE



Nama : Tjokorde Walmiki Samadhi
Tempat/tgl lahir : Malang, 15 September 1971
Kel. Keahlian : Perancangan & Pengembangan Produk Teknik Kimia
Alamat Kantor : Gedung Labtek X, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132
Nama Istri :
Nama Anak : Luh Indi Baramuni

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. Doktor di bidang Ceramic Science (2003), Alfred University, USA
2. Magister Teknik Kimia (1997), Institut Teknologi Bandung
3. Sarjana Teknik Kimia (1994), Institut Teknologi Bandung
4. Insinyur (2021), Program Studi Program Profesi Insinyur, Institut Teknologi Bandung

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

- Dosen tetap PNS bidang Teknik Kimia di Fakultas Teknologi Industri (1995-sekarang)
- Sekretaris tim persiapan akreditasi ABET untuk Program Studi Sarjana Teknik Kimia ITB (2011-2012)
- Ketua Program Studi Sarjana Teknik Kimia ITB (2012-2014)
- Wakil Dekan Bidang Akademik Fakultas Teknologi Industri ITB (2015-2020)
- Ketua Program Studi Magister dan Doktor Teknik Kimia ITB (2021)
- Ketua Gugus Tugas Merdeka Belajar – Kampus Merdeka (MBKM) ITB (2021)
- Anggota Komisi Mutu, Satuan Penjaminan Mutu ITB (2020)

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1. Calon Pegawai Negeri Sipil, Golongan III/a (TMT: 1 Maret 1995)
2. Penata Muda Tk.1, Golongan III/a (TMT: 1 November 1996)
3. Penata, Golongan III/c (TMT: 1 April 2009)

4. Penata Tingkat 1, Golongan III/d (TMT: 1 Oktober 2012)
5. Pembina, Golongan IV/a (TMT: 1 Oktober 2019)

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Asisten Ahli Madya (TMT: 1 Oktober 1997)
2. Asisten Ahli (TMT: 1 Januari 2001)
3. Lektor Kepala (loncat jabatan, TMT 1 Oktober 2008)
4. Guru Besar (TMT 12 Desember 2022)

V. KEGIATAN PENELITIAN

- Anggota Peneliti, Program Grant Riset Sawit 2022-2023 dengan topik pengolahan rosin ester dari getah pohon pinus
- Anggota Peneliti, Program Grant Riset Sawit 2018-2019 bersama Universitas Mulawarman dengan topik ekstraksi kalium dari abu biomassa sawit
- Peneliti Utama, program riset kerjasama FTI-ITB dengan PT Paragon Technology & Innovation 2020 dengan topik karakterisasi nanopartikel ZnO untuk produk tabir surya
- Peneliti Utama, riset P3MI ITB 2023 dengan topik biosintesis nanopartikel oksida menggunakan ekstrak tumbuhan
- Peneliti Utama, riset P3MI ITB 2020 dengan topik biosintesis nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak tumbuhan
- Peneliti Utama, Osaka Gas Foundation Research Grant 2019-2020 dengan topik pemanfaatan serat alami untuk penanganan tumpahan minyak di perairan
- Peneliti Utama, riset P3MI ITB 2018 dan 2019 dengan topik sintesis geopolimer dari limbah mineral
- Peneliti Utama, riset P3MI ITB 2017 dengan topik karakteristik mineralisasi biomassa Indonesia
- Peneliti Utama, riset Program Penelitian Unggulan Pendidikan Tinggi (PUPT) 2017 dengan topik kajian lanjut valorisasi abu biomassa melalui sintesis geopolimer
- Peneliti Utama, Riset Institut Teknologi Bandung 2016 dengan topik valorisasi campuran abu batubara-biomassa melalui sintesis geopolimer
- Peneliti Utama, Asahi Glass Foundation Research Grant 2014-2015 dengan topik pemanfaatan limbah amorf untuk sintesis geopolimer

VI. PUBLIKASI

- **T.W. Samadhi**, L.E. Jones, A.V. Kropachev, & A.G. Clare, "Fourier-Transform Infrared Spectrometry Measurement of Emissions Concentration from Glass Manufacturing", *Journal of the American Ceramic Society* **87** [7] 1210-1215 (2004)
- Purbasari, **T.W. Samadhi**, & A. Muslim, "Development of Porous Ceramic Products on a Laboratory Scale Extruder", *Indonesian Chemical Engineering Journal* **4** [2] 227-233 (2005)
- **T.W. Samadhi**, H. Adidharma, & S.P. Tan, "Purely Predictive Application of Statistical Associating Fluid Theory for Enhanced Oil Recovery by Miscible Gas Flooding", *Proceedings of the 2009 Regional Symposium on Chemical Engineering*, University of Santo Tomas, Philippines, November 2009
- **T.W. Samadhi**, IDG Arsa Putrawan, Bambang E. Prabowo & Alinda Dwitawidi, "Statistical Evaluation of Non-Agglomerating Coating for Granulated Natural Asphalt", *ITB Journal of Engineering Science*, Vol.43 No.1, April 2011, pp. 41-56.
- **T.W. Samadhi**, Subagjo, Kevin R. Lismana & Khasin Fuadi, "Synthesis of γ - Al_2O_3 Catalyst Support from Kaolin of Indonesian Origin", *ITB Journal of Engineering Science*, Vol.43 No.2, July 2011, pp. 113-126.
- **T.W. Samadhi**, Utjok W.R. Siagian & Angga P. Budiono, "Simulation of Miscibility Development Between Oil and Flare Gas for Enhanced Oil Recovery", *Proceedings of the 2011 Regional Symposium on Chemical Engineering*, Ho Chi Minh University of Technology, Ho Chi Minh City, Vietnam, 27-28 October 2011.
- **T. W. Samadhi**, U.W.R. Siagian, & A.P Budiono, "Miscibility Development Computation in Enhanced Oil Recovery by Flare Gas Flooding", *ITB Journal of Engineering Science*, Vol.44 No.3, 2012, 270-286
- E.S. Rahayu, **T.W. Samadhi**, Subagjo, & M.L. Gunawan, "Development of Hydrocracking Catalyst Support from Kaolin of Indonesian Origin", *Advanced Materials Research*, Vol. 896, 2014, 532-536
- **T.W. Samadhi**, P.P. Pratama, & N. Muan, "Development of Geopolymer Utilizing Inorganic Waste Materials", *Advanced Materials Research*, Vol. 896, 2014, 553-556
- **T.W. Samadhi** & N. Muan, "Development of Geopolymer from Fly Ash and Metallurgical Slag", *Advanced Materials Research*, Vol. 1123, 2015, 127-130

- Subagio, E.S. Rahayu, **T.W. Samadhi**, & M.L. Gunawan, “Synthesis of NaY zeolite using mixed calcined kaolins”, *Journal of Engineering & Technological Sciences*, Vol.47 No.6, 2015, 633-639
- **T.W. Samadhi**, M. Jatiningrum, & G. Arisiani, “Effect of Fly Ash Calcination in Geopolymer Synthesis”, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1699, 2016, 060015
- Purbasari, **T.W. Samadhi**, & Y. Bindar, “Thermal and ash characterization of Indonesian bamboo and its potential for solid fuel & waste valorization”, *International Journal of Renewable Energy Development*, Vol. 5 No.2, 2016, 95-100
- **T.W. Samadhi**, W. Wulandari, F.G. Gumilar, & K.F. Ramadani, “Thermomechanical Characterization of Blended Biomass-Coal Ash Waste Materials”, *Key Engineering Materials*, Vol. 709, 2016, 38-41
- **T.W. Samadhi**, N.T. Wibowo, & H. Athaya, “Reuse of aluminosilicate waste materials to synthesize geopolymer”, *Materials Research Express*, Vol. 4 No.8, 2017
- Purbasari, **T.W. Samadhi**, & Y. Bindar, “Synthesis & characterization of bamboo ash – based geopolymer cement”, *Advanced Science Letters*, Vol. 23 No.6, 2017, 5723-5725
- **T.W. Samadhi**, T. Hirotsu, & S. Goto, “Measurement of antioxidant effects on the auto-oxidation kinetics of methyl oleate – methyl laurate blend as a surrogate biodiesel system”, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, Vol.12 No.2, 2017, 157-166
- **T.W. Samadhi**, “Thermochemical analysis of laterite ore alkali roasting: Comparison of sodium carbonate, sodium sulfate, and sodium hydroxide”, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1805, 040008, 2017
- **T.W. Samadhi**, W. Wulandari, M.I. Prasetyo, M.R. Fernando, & A. Purbasari, “Synthesis of geopolymer from biomass-coal ash blends”, *AIP Conference Proceedings*, Vol.1887, 020031, 2017
- R.J. Manullang, **T.W. Samadhi**, & A. Purbasari, “Formulation of portland composite cement using waste glass as a supplementary cementitious material”, *AIP Conference Proceedings*, Vol.1887, 020040, 2017
- **T.W. Samadhi**, W. Wulandari, M.I. Prasetyo, & M.R. Fernando, “Reuse of Coconut Shell, Rice Husk, and Coal Ash Blends in Geopolymer Synthesis”, *IOP Conference Series: Materials Science & Engineering*, Vol. 248, 012008, 2017

- **T.W. Samadhi**, F. Narcia, H. Amril, “Preliminary Evaluation of Potassium Extraction from Bamboo Ash”, MATEC Web of Conferences, 156, 03027, 2018
- Purbasari, **T.W. Samadhi**, Y. Bindar, “The Effect of Alkaline Activator Types on Strength & Microstructural Properties of Geopolymer from Co-combustion Residuals of Bamboo and Kaolin”, Indonesian Journal of Chemistry, Vol.18, No.3, 2018, 397-402
- Purbasari, **T.W. Samadhi**, Y. Bindar, “Sulfuric Acid Resistance of Geopolymer Mortars from Co-combustion Residuals of Bamboo and Kaolin”, ASEAN Journal of Chemical Engineering, Vol.18, No.2, 2018, 22-30
- **T.W. Samadhi**, A. Purbasari, W. Wulandari, “Geopolymer Preparation from Bamboo Ash Containing Kaolin as Ash Fusion Control Agent”, Materials Research Forum, Vol. 982, 2020, 189-194
- W. Wulandari, M.M. Kinda, R. Murida, **T.W. Samadhi**, “The Effect of Alkali Roasting Pretreatment on Nickel Extraction from Limonite Ore by Using Dissolved SO₂-Air”, Minerals, Vol. 10, 2020, 701
- S. Khairunnisa, V. Wonoputri, **T.W. Samadhi**, “Effective Deagglomeration in Biosynthesized Nanoparticles: A Mini Review, IOP Conference Series: Materials Science & Engineering, 1143-0120, 2021
- D. Shofinita, Y. Bindar, **T.W. Samadhi**, N.S. Choliq, A.A. Jaelawijaya, “Increasing the Yield of Powder and Bioactive Materials during Extraction and Spray Drying of Dragon Fruit Skin Extracts”, Journal of Engineering & Technological Sciences, Vol.53, 6, 210612, 2021
- G. Lugito, **T.W. Samadhi**, T. Prakoso, M. Lauda, V.L. Tanujaya, “Techno-economic and Environmental Analyses on Reduced Graphene Oxide Modified Kapok Fiber as Oil Absorbent”, IOP Conference Series, Vol.1143, 012008, 2021
- V. Wonoputri, J. Wijaya, V.A. Primayudha, S. Khairunnisa, **T.W. Samadhi**, “Performance of Antimicrobial ZnO Nanoparticle Synthesized by Biological Method: Literature Review”, AIP Conference Proceedings, Vol. 2667, 050007, 2023

VII. PENGHARGAAN

- November 2009: **Visiting Lecturer** untuk matakuliah rancangan percobaan statistik di Chemical Engineering Department, University of Borås, Swedia
- November - Desember 2010: **Visiting Researcher** di National Institute of Advanced Industrial Science & Technology (AIST), Tsukuba, Jepang melalui 2010 Japan National Energy Foundation (NEF) Biomass Researcher Invitation Program
- **Juara III Ketua Program Studi Berprestasi Nasional 2013**, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan RI, atas kepemimpinan dalam implementasi awal akreditasi internasional ABET (USA) untuk Prodi Sarjana Teknik Kimia ITB
- **Hibah Internasionalisasi Prodi Institut Teknologi Bandung 2014-2015**. Hibah kompetitif untuk mengembangkan Kelas Internasional Prodi Sarjana Teknik Kimia ITB
- **ITB World Class University Visiting Professor Scholarship 2017**. Hibah kompetitif untuk mengundang Dosen dari universitas bereputasi mancanegara untuk mengajar dan mengembangkan kurikulum
- **ITB World Class University Summer School Scholarship 2018**. Hibah kompetitif untuk menyelenggarakan summer short course bersama mitra universitas mancanegara
- **Invited Plenary Speaker, Regional Symposium on Chemical Engineering 2019**. Faculty of Engineering, University of Malaya, 2019.
- **Invited Plenary Speaker, International Symposium on Quality Assurance in Engineering Education through Accreditation-II (IEB-BAETE Symposium)**. Bangladesh Board of Accreditation for Engineering and Technical Education (BAETE), 2020.
- **Invited Plenary Speaker, International Symposium of Indonesian Chemical Engineering 2021**. Asosiasi Pendidikan Tinggi Teknik Kimia Indonesia, 2021.

VIII. SERTIFIKASI

Sertifikat Pendidik, Kementerian Pendidikan Nasional Republik Indonesia, 5 Juli 2010

ITB PRESS

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

**Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id  [FgbItb](https://www.facebook.com/FgbItb)  [FGB_ITB](https://twitter.com/FGB_ITB)
 [@fgbitb_1920](https://www.instagram.com/fgbitb_1920)  [Forum Guru Besar ITB](https://www.youtube.com/ForumGuruBesarITB)

ISBN 978-623-297-348-0

