

**TRANSFORMASI INDUSTRI KIMIA MENUJU
PEMANFAATAN MATERIAL SECARA
BERKELANJUTAN**



**Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar
pada Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada**

**Disampaikan di depan Rapat Senat Terbuka
Universitas Gadjah Mada
pada Tanggal 10 Oktober 2023
di Yogyakarta**

oleh:

**Prof. Ir. Chandra Wahyu Purnomo, S.T., M.E.,
M.Eng., D.Eng., IPM**

Bismillahirrohmanirrohim

Yang terhormat:

*Ketua, Sekretaris, dan Anggota Majelis Wali Amanat Universitas
Gadjah Mada,*

*Ketua, Sekretaris, dan Anggota Dewan Guru Besar Universitas
Gadjah Mada,*

*Ketua, Sekretaris, dan Anggota Senat Akademik Universitas Gadjah
Mada,*

Rektor dan Wakil Rektor Universitas Gadjah Mada

Para Guru Besar Universitas Gadjah Mada

*Dekan dan Wakil Dekan, Ketua dan Sekretaris Senat Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada*

*Rekan-rekan Dosen dan Seluruh Sivitas Akademika Universitas
Gadjah Mada*

*Para tamu undangan, keluarga yang saya cintai, serta hadirin
sekalian yang saya hormati.*

Assalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

*Selamat pagi, salam sejahtera bagi kita semuanya, shalom, om
swastiastu, namo buddhaya, dan salam kebajikan.*

Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan semesta alam yang telah melimpahkan rahmat, karunia dan hidayah-Nya sehingga hari ini kita berada di Balai Senat Universitas Gadjah Mada dalam kondisi sehat walafiat untuk mengikuti acara Pengukuhan Guru Besar. Sungguh merupakan kehormatan bagi saya mendapat kesempatan menyampaikan pidato pengukuhan Guru Besar dalam bidang *Functional Materials* di hadapan majelis yang sangat terhormat ini sebagai salah satu tradisi akademik di lingkungan Universitas Gadjah Mada. Ucapan terima kasih kepada Bapak/Ibu semua, yang telah berkenan hadir baik luring maupun daring pada pidato pengukuhan saya sebagai Guru Besar dengan judul:

***Transformasi Industri Kimia Menuju Pemanfaatan Material secara
Berkelanjutan***



Bapak/Ibu yang saya muliakan, izinkan saya dalam kesempatan ini menjelaskan mengapa topik ini penting untuk diangkat.

1. Latar Belakang

Manusia menjadi spesies paling dominan di bumi ini yang mampu mengubah bentang alam secara signifikan. Wajah Bumi pada abad ke-21 telah diubah dengan cara yang belum pernah terjadi sebelumnya oleh aktivitas manusia serta akumulasi benda buatan manusia. Peradaban kita telah memiliki dampak yang substansial sejak 3.000 tahun yang lalu yaitu sejak revolusi pertanian bergulir, manusia telah mengurangi hampir separuh total massa tumbuhan, dari sekitar dua Tt (Terraton = 10^{12} ton; berat kering) menjadi sekitar 1 Tt [1]. Meskipun pertanian modern memanfaatkan luas lahan yang semakin besar untuk bercocok tanam, namun total massa tanaman budidaya hanya sekitar 0,01 Tt, jauh lebih rendah dibandingkan dengan hilangnya massa tumbuhan akibat penebangan dan pengelolaan hutan, serta perubahan penggunaan lahan lainnya.

Selama 100 tahun terakhir, massa antropogenik telah meningkat dengan cepat menjadi dua kali lipat dalam kurun waktu setiap 20 tahun. Massa antropogenik didefinisikan sebagai massa yang terkandung dalam objek padat tak bernyawa yang dibuat oleh manusia yang masih terpakai seperti beton, agregat, bata, aspal, logam dan komponen lain seperti kayu, gelas dan plastik. Sementara itu, benda yang sudah dihancurkan atau dibuang disebut dengan limbah antropogenik atau cukup disebut limbah [2].

Pada permulaan abad ke-20, massa antropogenik hanya mencapai sekitar 3% dari total massa organisme hidup (biomassa) di seluruh dunia. Sekitar 120 tahun kemudian, yaitu pada tahun 2020, massa hasil aktivitas manusia sudah melebihi total biomassa di dunia. Waktu persis ketika massa antropogenik melebihi biomassa hidup adalah pada tahun 2020 ± 6 berdasarkan berat kering, sedangkan jika massa antropogenik ditambah dengan massa limbah maka titik irisan dengan total biomassa terjadi lebih awal yaitu pada tahun 2013 ± 5 [2].

Pertumbuhan drastis massa antropogenik yang mencapai puncaknya lebih dari 5% per tahun, terjadi setelah Perang Dunia II.

Periode ini, sering disebut sebagai 'Akselerasi Besar', ditandai oleh peningkatan konsumsi dan pembangunan perkotaan yang pesat. Apabila kecenderungan saat ini terus berlanjut, diprediksi massa antropogenik total termasuk limbah akan melebihi 3 Tt pada tahun 2040 — hampir tiga kali lipat dari biomassa kering yang ada di Bumi [3].

Hal lain yang menarik dicermati dari pertumbuhan massa antropogenik adalah jumlah dan proporsi limbah yang semakin lama semakin membesar. Menurut Bank Dunia dalam laporannya berjudul *What a Waste 2.0*, manusia di dunia rata-rata menghasilkan sampah (*Municipal Solid Waste*) sebesar 0,74 kg sehari, dengan variasi antar negara cukup lebar antara 0,11 sampai 4,54 kg/org/hari [4]. Disamping sampah, limbah padat lain yang dihasilkan rata-rata perorang adalah sebagai berikut: limbah industri 12,73 kg/hr, limbah pertanian 3,35 kg/hr, limbah bongkaran bangunan 1,68 kg/hr dan limbah lainnya (B3 dan *e-waste*) sebesar 0,62 kg/hr. Jika semua limbah ditotal dan dibagi dengan jumlah manusia maka per orang tiap hari menghasilkan rata-rata 19,12 kg sampah dan limbah padat.

Menjadi keprihatinan juga dari sekian banyak limbah tersebut, limbah makanan (*Food Loss and Waste/FLW*) terproduksi sebesar 1,3 milyar ton per tahun atau sebesar 30% dari total makanan yang dihasilkan dunia [5]. Untuk kasus Indonesia, FLW jika dinominalkan menurut studi litbang Kompas dilaporkan tidak kurang dari 330 Trilyun rupiah per tahun atau dengan kata lain tiap penduduk Indonesia membuang makanan senilai 2,1 juta rupiah setiap tahunnya [6]. FLW adalah representasi dari pemborosan sumber daya, termasuk tanah, air, tenaga kerja, dan energi yang digunakan untuk menghasilkan makanan. Hal ini secara signifikan berkontribusi terhadap perubahan iklim karena gas rumah kaca yang terlepas selama aktivitas produksi dan distribusi makanan, dan metanadilepaskan selama pembusukan makanan yang terbangun di lokasi penimbunan. FLW juga mempengaruhi rantai pasokan makanan dengan menurunkan pendapatan bagi produsen makanan, meningkatkan pengeluaran bagi konsumen, dan mengurangi akses terhadap makanan.

Pertanyaan besar yang muncul: Apakah bumi kita masih mampu mencukupi kebutuhan sumber daya alam yang dibutuhkan

guna memproduksi terus-menerus massa antropogenik sekaligus menetralkan limbah yang dibuang dengan kecepatan pertumbuhan seperti data di atas, ataukah sebenarnya daya dukung bumi kita untuk bisa menopang kehidupan di atasnya secara berkelanjutan sudah terlewat atau yang dikenal dengan istilah *overshoot*?

2. Melampaui batas ekologis (*ecological overshoot*)

Isu yang krusial dalam konteks lingkungan dan pembangunan berkelanjutan adalah *ecological overshoot* atau melampaui batas ekologis. *Ecological overshoot* terjadi ketika manusia mengonsumsi sumber daya alam lebih cepat daripada bumi bisa mengembalikannya atau memproduksinya kembali. Ini menciptakan defisit sumber daya alam dan meningkatkan tekanan pada lingkungan. Hal ini tercermin dalam penurunan stok ikan laut, deforestasi hutan hujan, dan perubahan iklim. Beberapa konsep yang memprediksi kondisi batas bumi dikomparasikan dengan tingkat kemajuan peradaban manusia antara lain *Limit to Growth (LTG)*, *Ecological Footprint (EF)* dan *Planetary Boundaries (PB)*.

LTG adalah konsep yang menyoroti keterbatasan bumi dalam menyediakan sumber daya alam yang tak terbatas. Pada tahun 1972, sebuah studi yang dipimpin oleh Meadows dan timnya menghasilkan buku berjudul "*The Limits to Growth*." Mereka menggunakan model komputer yang kompleks untuk menganalisis dampak pertumbuhan populasi, ekonomi, dan konsumsi sumber daya terhadap masa depan bumi. Temuan mereka mengindikasikan bahwa jika kita terus menerus meningkatkan konsumsi sumber daya, pertumbuhan penduduk, peningkatan output industri dan peningkatan sektor pangan dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan pertumbuhan periode 1900 sampai dengan 1970, maka kita akan mencapai titik di mana bumi tidak lagi mampu mendukung pertumbuhan ekonomi dan manusia. Jika titik ini terlampaui maka akan terjadi kemerosotan besar populasi manusia akibat dari kerusakan alam, turunnya produktivitas dan habisnya sumberdaya yang diprediksikan oleh model LTG akan terjadi mulai sekitar tahun 2040-an [7].

Sebenarnya harapan dari para peneliti LTG di atas dalam melaporkan temuan yang kontroversial ini agar umat manusia sadar dan melakukan perbaikan sehingga batas maksimum daya dukung

bumi ini jangan sampai terlampaui. Namun harapan mereka sepertinya belum dapat terwujud, dan 30 tahun sejak terbitnya laporan LTG pertama kali, para peneliti melakukan pembaharuan model dengan data yang mengindikasikan jika batasan sudah terlampaui dan umat manusia harus bersiap untuk menanggung konsekuensinya [8].

Disisi lain, EF adalah konsep batasan ekologis sejenis yang relevan. Konsep ini mengukur total luas lahan dan air dalam satuan hektar yang diperlukan untuk memenuhi konsumsi manusia serta menyerap limbah yang dihasilkan atau disebut jejak ekologis. Jika jejak ekologis kita melebihi lahan dan air yang tersedia atau disebut biokapasitas, maka kita berada dalam kondisi yang disebut dengan istilah defisit. Dengan perkembangan manusia modern saat ini kecenderungannya jejak ekologis kita semakin meningkat, sebaliknya karena kerusakan lingkungan dan perubahan tata guna lahan maka biokapasitas bumi semakin lama semakin menurun.

Menurut *Global Footprint Network* biokapasitas bumi telah mengalami penurunan dari 3,2 gha (global hektar) per orang pada tahun 1960 menjadi separuhnya yaitu 1,6 gha pada tahun 2018. Sementara itu secara global jejak ekologis perorang naik dari sekitar 2,3 gha menjadi 2,8 gha dengan titik perpotongan (*overshoot*) antara jejak ekologis dan biokapasitas pada sekitar tahun 1970-an [8]. Cara representasi lain dari EF adalah menentukan tanggal pasti ketika konsumsi manusia secara global melebihi kemampuan bumi untuk memperbarui sumber daya alami dalam kurun satu tahun yang disebut dengan *Earth Overshoot Day* (EOD). Pada tahun 2022, umat manusia telah melewati EOD pada tanggal 28 Juli [9]. Dengan demikian, setelah melewati tanggal tersebut, kita secara efektif mulai mengonsumsi sumber daya bumi yang seharusnya hanya tersedia untuk tahun berikutnya. Ini menunjukkan bahwa kita secara kolektif mengalami defisit sumber daya alam pada tahun tersebut. Atau dengan kata lain, kita saat ini memakai sumber daya bumi yang seharusnya menjadi hak generasi mendatang.

Konsep berikutnya yang lebih terperinci mengenai batas kapasitas bumi adalah *Planetary Boundary* (PB). Konsep ini mengidentifikasi sembilan komponen utama atau batasan-batasan planet yang harus diperhatikan untuk menjaga keberlanjutan lingkungan Bumi. Kesembilan komponen tersebut adalah Perubahan

Iklim (*Climate Change*), Kerusakan Lapisan Ozon (*Stratospheric Ozon Depletion*), Keanekaragaman Hayati dan Kepunahan (*Biospher Integrity*), Penggunaan Air Tawar (*Freshwater Use*); Alih Fungsi Lahan (*Land System Change*); Pengasaman Lautan (*Ocean Acidification*); Aliran Biokimia (*Nitrogen and Phosphorus Flows to the Biosphere*); Emisi Aerosol ke Atmosfer (*Athmospheric Aerosol Loading*); dan Polusi dan Emisi Bahan Kimia Baru (*Pollution and Novel Entities Emission*)[10].

Baru-baru ini sebuah studi yang diterbitkan di jurnal *Nature* pada bulan Mei 2023 yang ditulis oleh lebih dari 50 ahli dari berbagai negara memaparkan bahwa umat manusia telah melewati tujuh batasan planet ini. Mereka mengatakan sistem sosial dan ekonomi yang didasarkan pada ekstraksi dan konsumsi sumber daya yang tidak berkelanjutan menyebabkan perubahan cepat yang merusak sistem- sistem ini sambil mendorong bumi menuju destabilisasi yang tidak dapat kembali lagi ke kondisi semula (*tipping point*) [11].

Dalam publikasi karyanya tersebut, para ilmuwan menganalisis iklim, biodiversitas, air tawar, dan berbagai jenis polusi udara, tanah, dan air. Hanya dalam kategori polutan aerosol batasan planet belum dilanggar. Para ilmuwan yang bekerja di bawah *Earth Commission* mengatakan bahwa dampak sosial yang signifikan sudah terasa, dengan puluhan juta orang sudah terdampak perubahan iklim yang sedang terjadi.

Hadirin yang terhormat,

3. Prinsip transformasi industri kimia

Dihadapkan oleh kondisi dan situasi diatas, industri kimia kini berada pada persimpangan jalan. Sebagai penyuplai bahan baku utama pada lebih dari 96% produksi barang manufaktur [12], industri ini sangat penting untuk mencapai pembangunan berkelanjutan dan kualitas hidup yang tinggi bagi populasi global. Namun, industri ini juga merupakan penyumbang terhadap krisis iklim, polusi, dan limbah plastik yang kini mengancam kesehatan manusia dan kelestarian alam. Ketergantungannya pada bahan baku berbasis minyak bumi, berfokus pada sedikit bahan kimia dasar, ekonomi skala besar yang masif, proses industri yang tidak fleksibel, dan inovasi yang terbatas menjadikannya kurang berkelanjutan [13].

Sejak tahun 2015, pertumbuhan permintaan bahan kimia dasar seperti etilena, propilena, metanol, bensena, paraksilena dan klorin rata-rata sebesar 19,6 juta metrik ton per tahun dengan tingkat pertumbuhan tahunan lebih dari 3%. Besarnya kebutuhan ini didorong oleh ekonomi global yang berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Total permintaan bahan kimia dasar pada tahun 2018 sebesar 515 juta metrik ton, 20 juta metrik ton lebih besar dibandingkan dengan total permintaan pada tahun sebelumnya [14].

Perubahan sektor industri skala besar seperti ini harus diarahkan oleh prinsip-prinsip yang jelas. Diperlukan perencanaan tahap demi tahap yang matang dan pelaksanaan tindakan-tindakan jangka pendek, menengah, dan panjang yang saling melengkapi serta melindungi transformasi industri ini dari kemungkinan gangguan seperti perubahan kebijakan politik dan kondisi investasi. Transisi ini juga harus mengatasi kendala-kendala yang ada dalam struktur industri saat ini tanpa menciptakan masalah sosial atau lingkungan di masa mendatang. Transisi menuju keberlanjutan bagi industri kimia ini harus diarahkan oleh seperangkat prinsip yang mencakup [13]:

Keselamatan dan keberlanjutan: Dari tahap ekstraksi bahan mentah, kemudian penggunaan, dan pemanfaatan kembali, hingga pembuangan akhir, produk kimia harus meminimalkan dampak buruk terhadap manusia baik pekerja, masyarakat, sampai konsumen dan sekaligus ekosistem. Proses dan produk kimia perlu diupayakan untuk menghindari penggunaan molekul berbahaya, persisten, atau yang terakumulasi di lingkungan; mengurangi pembentukan limbah; mendukung netralitas karbon dan ekonomi sirkular; serta menggunakan bahan baku atau sumber daya yang diperoleh secara berkelanjutan dan dapat diperbaharui dengan tingkat yang selaras dengan daya dukung bumi.

Keadilan dan inklusi: Pembuatan, penggunaan, dan pembuangan bahan kimia seharusnya tidak berdampak pada masyarakat rentan atau komunitas ekonomi rendah, juga tidak seharusnya menciptakan masalah bagi generasi mendatang. Ketidaksetaraan dan dampak negatif dari industri sebelumnya harus diperbaiki, dan komunitas yang terdampak harus dilibatkan sebagai pemangku kepentingan dalam pengambilan keputusan.

Peningkatan bertahap sekaligus lompatan: Transisi ini tidak dapat terjadi secara instan, namun harus berjalan dalam tahapan,

dengan memanfaatkan platform produksi kimia, infrastruktur, dan rantai pasokan kimia yang sudah ada. Beberapa bahan kimia dan sistem pemrosesan yang sudah ada bersifat transisional, dan beberapa fasilitas eksisting dapat ditingkatkan, tetapi juga akan ada kebutuhan infrastruktur yang sepenuhnya baru dan juga tenaga kerja baru yang terlatih. Dalam beberapa kasus, inovasi baru dalam produk kimia dan manufaktur akan menghasilkan perubahan lompatan yang multidimensional. Waktu dan kecepatan akan menjadi dua faktor penting. Bergerak terlalu cepat tanpa mekanisme transisi yang memadai dapat menyebabkan gangguan finansial, tenaga kerja, dan ekonomi global yang signifikan, sementara bergerak terlalu lambat dapat menyebabkan sasaran yang terlewat dan momentum yang hilang.

Inovasi dan kelayakan ekonomi: Inovasi dalam bahan baku, molekul, proses manufaktur, dan model bisnis akan menjadi kebutuhan. Membuat inovasi-inovasi ini menjadi layak secara ekonomi akan memerlukan investasi riset dan pengembangan, subsidi pemerintah, dan kebijakan nasional lain yang mendukung.

Variatif, adaptif, dan distributif: Ketergantungan pada bahan baku tunggal, teknologi infrastruktur terpusat dan padat modal harus dihindari untuk meminimalkan ketergantungan teknologi dan dampak negatif yang terkonsentrasi dan kumulatif. Produksi masa depan harus didistribusikan untuk memungkinkan pemakaian bahan baku lokal yang dapat diperbaharui. Produksi dalam skala besar bahan kimia dan material dapat dicapai melalui pasokan beragam produsen skala kecil yang menggunakan berbagai bahan baku dan proses produksi. Industri kimia yang lebih terhubung dan berkolaborasi serta rantai pasokan yang beragam akan lebih lentur dan lebih siap dalam mengadopsi inovasi dengan cepat dan merespons gangguan, perubahan kondisi pasar, dan pengetahuan baru tentang dampak negatif yang tidak diinginkan.

Didorong oleh data: Transisi industri harus diarahkan oleh indikator-indikator yang dapat diukur untuk memastikan bahwa tujuan-tujuan tercapai dan bahwa transparansi dan akuntabilitas dapat dijamin. Penelitian dan data yang signifikan akan diperlukan pada isu-isu kritis, seperti pengaruh harga bahan baku terhadap pasokan dan spesifikasi produk; potensi infrastruktur yang sudah ada; kecenderungan pasar; dampak bahan kimia dan material pada ekosistem dan kesehatan manusia sepanjang siklus hidupnya; dan efek

lembaga keuangan dan regulator terhadap industri. Penelitian semacam ini akan memungkinkan pemahaman yang lebih baik tentang hambatan dalam menyusun strategi transisi industri.

Perlu ditekankan pula pengumpulan data mulai dari sifat-sifat dan mekanika bahan sampai pada kegagalan bahan, yang kesemua data tersebut diperlukan untuk mengembangkan produk dan aplikasinya untuk mendukung masyarakat yang lebih berkelanjutan dengan perspektif daur hidup total dari suatu material [15].

4. Strategi Transformasi Industri Kimia

Untuk mengimplementasikan enam prinsip di atas diperlukan strategi yang tepat yang dapat dijalankan oleh industri kimia guna memastikan pemakaian sumber daya dan material secara berkelanjutan. Paling tidak ada lima strategi transformasi utama yang perlu diambil untuk mencapai perubahan dalam skala yang diperlukan.

4.1. Strategi Konversi Bahan Baku

Pemilihan material sebagai bahan baku menjadi titik awal yang krusial dalam mewujudkan pemakaian material yang berkelanjutan karena akan menentukan kemudahan daur ulang dan sirkularitasnya serta minimasi dampaknya ke lingkungan [16]. Industri harus secara signifikan mengurangi penggunaan bahan konvensional (minyak bumi) sebagai bahan baku dalam produksi bahan kimia, sambil membangun rantai pasok dari bahan baku berkelanjutan dan terbarukan.

Produksi bahan kimia organik dan material turunannya telah mengkonsumsi 450 juta ton karbon setiap tahun, yang sebagian besar masih bersumber dari minyak bumi. Angka tersebut diprediksi meningkat menjadi 1.000 juta ton per tahun pada tahun 2050 [17]. Di sisi lain, beberapa sumber karbon terbarukan yang lebih berkelanjutan, termasuk biomassa, bahan daur ulang, dan CO₂, menawarkan alternatif yang lebih baik.

Bahan baku berbasis biomassa

Menggunakan biomassa yang terbarukan sebagai bahan baku untuk memproduksi bahan kimia dalam siklus karbon tertutup dapat secara signifikan mengurangi emisi karbon dari industri. Manfaat tambahan lainnya meliputi diversifikasi pasar pertanian, penyerapan surplus komoditas pertanian, pengembangan ekonomi pedesaan, pengurangan

kebutuhan transportasi, serta peningkatan ketahanan nasional akan produksi bahan kimia, material turunan, dan barang manufaktur.

Biomassa telah lama menjadi sumber bahan kimia organik. Sebelum lahirnya industri petrokimia, bahan kimia seperti asam asetat, etanol, metanol, dan kamfer yang digunakan dalam pewarna, pigmen, dan pelapis dibuat melalui pengolahan bahan tanaman. Pada tahun 1930-an, Henry Ford membangun pabrik pengolahan kedelai untuk memproduksi pelapis dan polimer yang digunakan dalam produksi kendaraannya. Produksi kimia dan material berbasis alam berlanjut hingga saat ini. Oleokimia, senyawa yang mengandung asam lemak yang digunakan dalam kosmetik, pelumas, cat, deterjen, surfaktan, dan sabun diperoleh dari minyak tumbuhan. Jutaan ton minyak nabati yang berasal dari kedelai, kelapa sawit, kanola, dan bunga matahari diproduksi untuk digunakan dalam produk-produk tersebut dan juga biofuel [18].

Namun perlu diperhatikan bahwa penggunaan biomassa sebagai bahan baku secara masif dapat menimbulkan risiko lingkungan dan sosial. Produksi bahan bakar nabati adalah contoh yang paling dikenal tentang konsekuensi dari peralihan dari bahan fosil ke biomassa. Permintaan akan minyak kelapa sawit telah menyebabkan deforestasi dan kehilangan keragaman hayati di Asia Tenggara, dan kemudian di beberapa bagian Afrika dan Amerika Latin. Di Brasil, ekspansi produksi kedelai untuk minyak nabati menghadapi tantangan serupa. Meskipun budidaya tanaman yang direncanakan dan dikelola dengan hati-hati dapat menghindari deforestasi, memulihkan tanah yang rusak, dan bahkan menyimpan karbon, tingginya permintaan global akan bahan kimia dan bahan bakar berbasis alam masih akan memiliki dampak yang signifikan terhadap penggunaan lahan. Konversi hutan alami menjadi pertanian industri lebih lanjut mengurangi habitat satwa liar dan keragaman hayati, mengalihkan aliran air untuk irigasi, dan sering kali disertai dengan peningkatan penggunaan bahan agrokimia. Potensi persaingan antara produk tanaman untuk digunakan dalam industri versus untuk bahan makanan dan juga persaingan dagang yang kental akan nuansa politis antara sesama produk pertanian seperti minyak sawit dengan minyak tumbuhan lain masih menjadi hambatan yang nyata.

Oleh karena itu, para peneliti dan penggiat biomassa semakin fokus pada material tumbuhan dan hewan non-pangan. Sumber yang

paling melimpah adalah lignoselulosa, yang banyak dijumpai pada bahan tumbuhan seperti kayu dan bambu, yang mengandung polimer selulosa dan hemiselulosa serta polimer aromatik lignin. Meskipun komersialisasi biomassa lignoselulosa memiliki tantangan karena umumnya memerlukan bahan kimia berbahaya dan kondisi operasi ekstrim untuk memecah rantai polimer yang kuat, perkembangan teknologi perengkahan, reduksi dan oksidasi lignin menunjukkan potensi serat karbon, perekat, resin, dan bahan kimia spesifik lainnya yang dapat diproduksi dari lignin yang lebih ramah lingkungan. Sekitar 50 juta ton lignin diproduksi setiap tahun di seluruh dunia sebagai produk sampingan industri kertas. Potensi ini menjadi peluang penting untuk pemanfaatan limbah yang dapat terus dikembangkan melalui penelitian yang berkelanjutan [19].

Di samping itu, banyak sumber terbarukan yang tidak mempengaruhi intensitas penggunaan lahan pertanian meliputi alga; kitin dari cangkang udang, kepiting, dan serangga; dan *biocrude* dari berbagai jenis limbah padat dan sampah [20].

Bahan baku daur ulang

Sebagian besar limbah kota saat ini memiliki proporsi yang semakin besar dari bahan plastik yang sebenarnya kaya akan karbon. Keragaman plastik menyebabkan kompleksitas dalam pengumpulan, pemisahan, dan pemrosesan, tetapi peningkatan yang stabil dalam penggunaan plastik akan menjadi sumber karbon yang melimpah. Salah satu bentuk daur ulang kimia adalah dengan memecah polimer seperti PET (polietilen tereftalat) dan PS (polistirena) plastik yang umum di dunia, kembali ke monomer aslinya, sementara proses daur ulang kimia lainnya dapat mengubah berbagai jenis plastik menjadi bahan dasar senyawa hidrokarbon sederhana [21].

Namun daur ulang kimia saat ini menghadapi tantangan ekonomi akibat harga bahan baku konvensional yang lebih rendah dibandingkan dengan biaya pengumpulan, pemilahan, dan pemrosesan yang melibatkan suhu dan tekanan tinggi. Masih ada kekhawatiran terkait kesehatan dan keselamatan terkait dengan toksisitas proses yang dipakai, emisi dari fasilitas pemrosesan, dan potensi penyebaran aditif beracun dan kontaminan seperti senyawa organik volatil, logam berat, dan dioksin ke dalam produk dari bahan daur ulang. Di sisi lain, meningkatkan daur ulang kimia tidak serta-merta mengurangi

permintaan bahan dasar plastik. Hal ini tergantung pada keseimbangan pasokan dan permintaan secara keseluruhan, regulasi, dan kecepatan transisi menuju siklus bahan baku yang lebih berkelanjutan.

Meskipun menjadi kunci keberlanjutan, upaya daur ulang yang semakin meningkat belum akan dapat mengatasi pertumbuhan permintaan plastik yang diprediksi hingga tahun 2050. Oleh karena itu, mencapai keberlanjutan bahan plastik memerlukan perubahan mendasar dalam metode produksi dan penggunaan bahan tersebut. Meningkatkan teknologi daur ulang dan proporsi daur ulang hingga setidaknya 75%, dengan tambahan pemanfaatan biomassa dan CO₂ dalam proses produksi plastik, dapat mengarah pada skenario dengan dampak lingkungan minimal [22].

Daur ulang karbon yang sangat potensial salah satunya adalah dari gas metana, suatu gas rumah kaca yang melimpah. Sumber metana banyak tersedia dari limbah industri pertanian, tempat pembuangan sampah, dan hasil samping ekstraksi gas alam. Tahun 2014, para ilmuwan memberikan gambaran jika kita bisa mengolah sumber karbon ini yang berjumlah lebih dari 100 milyar m³ berupa gas alami yang hanya dibiarkan terbuang atau dibakar, maka kita akan dapat mencukupi kebutuhan tujuh bahan kimia dasar secara global [21,22].

Daur ulang lain yang perlu terus dikembangkan adalah daur ulang bahan anorganik seperti logam-logam berharga namun terbatas seperti litium dan nikel yang umumnya terkonsentrasi dalam limbah elektronik (*e-waste*) [23, 24].

CO₂ dan CO sebagai bahan baku

Gas karbon dioksida dan karbon monoksida juga dapat digunakan sebagai bahan baku untuk sintesis kimia organik. Manfaat iklim dari menangkap CO₂, kelimpahannya, dan produksi yang terjamin menjadikan CO₂ sebagai bahan baku yang sangat menarik. Namun, mengaktifkan molekul karbon sederhana yang inert ini menjadi tantangan utama, karena membutuhkan proses reduksi melalui penambahan elektron. Sumber elektron berkelanjutan yang potensial termasuk hidrogen "hijau", yang dihasilkan dari elektrolisis air yang ditenagai energi baru terbarukan. Memproses CO₂ dengan katalis dapat menghasilkan urea, poliuretan, dan polikarbonat, sedangkan CO₂ ditambah hidrogen dapat menghasilkan metana, metanol, asam format, etilena, dan alkohol. Bahan kimia dasar serba guna yaitu nafta, kerosin,

dan lilin berantai panjang juga memungkinkan untuk diproduksi dari bahan baku ini [13].

4.2. Strategi Molekuler

Selanjutnya industri kimia harus mengembangkan platform inovatif baru dan molekul kimia yang dapat disesuaikan berdasarkan prinsip-prinsip kimia dan rekayasa hijau (*Green Chemistry and Engineering*).

Molekul-molekul masa depan harus dirancang agar aman dan berkelanjutan serta memiliki kinerja yang tinggi dan biaya yang efisien. Prinsip-prinsip dasar kimia hijau dalam perancangan molekul dan prinsip-prinsip proses paralel dari rekayasa hijau, berupaya untuk mencapai efisiensi yang lebih besar, toksisitas yang lebih kecil, intensitas karbon yang lebih rendah, dan limbah yang lebih sedikit, memberikan seperangkat kriteria yang jelas untuk memandu strategi perancangan molekul baru.

Industri petrokimia saat ini didasarkan pada hidrokarbon sederhana yang berasal dari minyak bumi. Dari molekul dasar itulah molekul yang lebih kompleks dibuat dengan proses yang panjang pada suhu dan tekanan tinggi. Sementara itu, molekul-molekul dari bahan baku alami umumnya sudah mengandung atom oksigen dan lebih kompleks, hal ini dapat memunculkan kandidat bahan kimia dasar baru. Studi Departemen Energi AS pada tahun 2004 menyarankan beberapa sumber potensial dari bahan kimia dasar berbasis biomassa antara lain asam suksinat, asam fumarat, dan asam malat, yang dapat dipakai untuk bahan dasar bagi banyak bahan kimia bernilai tinggi termasuk anhidrida ftalat, asam adipat, dan anhidrida maleat. Asam fumarat saat ini digunakan dalam produksi cat, pelapis, dan kertas. Asam hidroksipropionat dapat diubah menjadi asam akrilat untuk bahan baku cat, perekat, popok, dan deterjen [27].

Penelitian yang terinspirasi oleh proses kimia dan rekayasa hijau, yang digabungkan dengan inovasi dalam bioproses, memberikan peluang untuk menciptakan senyawa kimia baru dengan energi lebih sedikit, memiliki tingkat toksisitas dan resistensi yang lebih rendah di lingkungan. Contohnya, rekayasa bioteknologi dapat menciptakan mikroba terfungsionalisasi sebagai reaktan atau katalis yang dapat mengubah sumber karbon dari sumber alami terbarukan seperti jagung, tebu, atau selulosa menjadi bahan kimia kompleks [28].

Oleh karena itu, merancang molekul dari awal yang memiliki

fungsional yang diinginkan, dengan mempertimbangkan baik sifat kimiawi maupun biologis, merupakan langkah awal menuju industri kimia yang lebih berkelanjutan [29].

4.3. Strategi Perancangan Ulang Produk dan Proses Produksi

Faktor pendorong kinerja industri kimia untuk menuju keberlanjutan adalah kemajuan teknologi dan peningkatan efisiensi [30]. Sektor industri ini harus berinvestasi dalam teknologi yang mendukung operasi yang lebih efisien secara energi dan proses yang lebih hijau dalam produksi bahan kimia.

Perancangan Ulang Produk

Diperlukan perubahan dalam desain dan fitur produk agar lebih berkelanjutan, menggunakan bahan kimia yang lebih aman, dan memiliki dampak negatif yang lebih kecil sepanjang masa penggunaannya. Transformasi industri kimia tidak akan berhasil tanpa perubahan sistem dalam proses pembuatan, penggunaan, dan pembuangan produk di bagian hilir. Pihak industri, bersama dengan konsumen dari berbagai latar belakang, akan memainkan peran penting dalam mengubah penawaran produk industri, yang seharusnya didasarkan pada konsep fungsionalitas dan sirkularitas menuju polakonsumsi yang berkelanjutan.

Fungsionalitas dicapai dengan mengetahui fitur esensial dan kebutuhan untuk suatu bahan kimia, material, atau produk adalah pondasi dari desain produk yang berkelanjutan. Fungsi yang diberikan oleh suatu bahan kimia tertentu dapat digantikan secara fungsional oleh bahan kimia yang lebih aman melalui perubahan pada tingkat produk, proses, atau sistem. Sementara itu sirkularitas dapat diartikan menjaga material dalam lingkaran tertutup dari ekonomi material yang bersifat siklik akan mengurangi permintaan terhadap sumber daya alam dan mengurangi jumlah bahan bakar konvensional yang diperlukan.

Perancangan Ulang Proses Produksi

Industri kimia adalah konsumen energi terbesar ketiga di dunia dan salah satu dari yang paling tidak efisien [31]. Oleh karena itu, peluang untuk mengurangi konsumsi energi sangat besar, dengan potensi untuk pengurangan emisi karbon yang signifikan. Dalam

operasi petrokimia, proses-proses seperti distilasi, kristalisasi, dan pengeringan secara khusus mengonsumsi energi yang signifikan, dan pada saat yang sama menyebabkan kerugian termal yang berarti. Integrasi proses secara efisien dan peningkatan teknologi termal yang ada dapat mengurangi konsumsi energi dengan jumlah yang signifikan.

Rekayasa hijau, yang juga dikenal sebagai sintesis hijau adalah strategi yang mendasarkan sintesis kimia pada prinsip-prinsip yang tidak berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Ini melibatkan penggunaan reaktan yang lebih aman, pelarut yang lebih ramah lingkungan, katalis yang efisien, dan kondisi reaksi yang lebih ringan. Prinsip-prinsip ini membantu mengurangi produksi limbah yang tidak diinginkan dan mengurangi bahaya bagi operator. Proses hijau mempertimbangkan aspek-aspek seperti konversi atom yang tinggi, pengurangan jumlah reaktan dan pelarut yang digunakan, serta pengurangan jumlah langkah reaksi yang diperlukan. Meskipun proses hijau adalah tujuan yang diinginkan dalam sintesis kimia, implementasinya sering kali menghadapi tantangan teknis dan ekonomi. Namun, dengan dorongan menuju keberlanjutan yang semakin kuat, industri harus menginvestasikan upaya dalam penelitian dan pengembangan untuk mengatasi hambatan ini dan mendorong perubahan menuju proses yang lebih hijau dan efisien secara energi.

Sejalan dengan konsep Industri Hijau yang termaktub dalam Undang-Undang Republik Indonesia No. 3 Tahun 2014 tentang Perindustrian. Pengertian Industri Hijau dalam UU ini adalah industri yang dalam proses produksinya mengutamakan upaya efisiensi dan efektivitas penggunaan sumber daya secara berkelanjutan sehingga mampu menyelaraskan pembangunan industri dengan kelestarian fungsi lingkungan hidup serta dapat memberikan manfaat bagi masyarakat. Prinsip Utama Industri Hijau bertujuan untuk mengintegrasikan prinsip-prinsip keberlanjutan dalam seluruh aspek kegiatan industri. Hal ini mencakup penggunaan sumber daya yang efisien, pengelolaan limbah yang baik, pelestarian lingkungan, dan pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan.

4.4. Strategi Kebijakan, Ekonomi dan Sosial

Transisi dari industri kimia berbasis fosil ke industri kimia berkelanjutan akan memerlukan kerangka kerja kebijakan yang mendukung dan mendorong inovasi, investasi, dan pengembangan

teknologi baru. Pemerintah dan lembaga internasional perlu bekerja sama untuk mengembangkan regulasi yang memfasilitasi perubahan ini, seperti mengenai penggunaan biomassa, bahan daur ulang, dan bahan baku berkelanjutan lainnya. Dalam beberapa kasus, insentif ekonomi seperti subsidi untuk bahan baku berkelanjutan atau pembebasan pajak untuk teknologi berkelanjutan juga dapat mendorong industri untuk berinvestasi dalam transisi menuju ekonomi yang lebih berkelanjutan.

Pembatasan terhadap bahan kimia berbahaya dan pemantauannya yang lebih ketat terhadap limbah dan emisi juga perlu diimplementasikan. Keamanan dan kesehatan operator serta dampak lingkungan harus menjadi pertimbangan utama dalam pengembangan regulasi ini. Dalam beberapa kasus, peraturan yang ketat mungkin mendorong penggantian bahan kimia yang berbahaya dengan alternatif yang lebih aman. Selain itu, kolaborasi antara pemerintah, industri, lembaga riset, dan masyarakat sipil juga sangat penting. Forum dialog publik dan swasta dapat membantu mengidentifikasi tantangan dan peluang dalam transisi ke industri kimia yang lebih berkelanjutan dan memastikan bahwa berbagai perspektif diakomodasi dalam pembuatan kebijakan.

Seiring dengan upaya teknis di atas, sangat perlu juga dilakukan rekayasa sosial dan ekonomi berupa mendefinisikan ulang konsep kemakmuran, reorganisasi ekonomi dan transformasi sosial. Pendekatan konsep "Kemakmuran Baru" dalam ekonomi berkelanjutan tidak hanya memisahkan (*decoupling*) penggunaan sumber daya dari pertumbuhan ekonomi tapi juga perlu definisi baru akan konsep kemakmuran dari sekedar akumulasi material dan kekayaan menuju definisi yang lebih dalam dan bermakna. Pendekatan "Reorganisasi Ekonomi" bertujuan untuk mentransfer prinsip sirkularitas kekuasaan dan sumber daya, dengan menekankan bahwa kekayaan, pengetahuan, teknologi, dan sarana produksi harus didistribusikan atau disirkulasikan secara lebih adil. Pendekatan "Transformasi Sosial" bertujuan untuk membentuk pola konsumsi dan produksi yang berdasarkan partisipasi, kebersamaan, dan solidaritas, menekankan pentingnya inovasi sosial dari bawah ke atas dan gerakan konsumen yang emansipatif dalam merubah sistem produksi dan konsumsi ke arah penciptaan nilai yang lebih regional dan partisipatif [32].

Satu ungkapan penutup: **“Apalah artinya menimbun materi dan harta, jika anak cucu kita sengsara karena bumi yang tak terpelihara.”** Semoga generasi ini menjadi salah satu generasi yang berkontribusi dalam melakukan perbaikan, Amiin. Dengan ini, sampailah saya di penghujung pidato pengukuhan ini.

Bapak/Ibu yang saya muliakan,

Capaian saya sebagai Guru Besar bidang *Functional Materials* di Universitas Gadjah Mada tidak akan dapat saya raih tanpa izin dari Allah, *Rabb* semesta alam. Pada bagian akhir pidato pengukuhan ini, perkenankan saya mengucapkan terimakasih kepada:

Pemerintah Republik Indonesia melalui Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi dan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi yang telah memberikan kepercayaan sebagai Guru Besar dalam bidang *Functional Materials*.

Rektor dan Senat Akademik Universitas Gadjah Mada, Dewan Guru Besar UGM, Dekan dan Senat Akademik Fakultas Teknik, dan Ketua Departemen beserta Bapak-ibu Dosen Departemen Teknik Kimia FT UGM, yang telah memproses, menyetujui dan mengusulkan kenaikan jabatan saya ke Pemerintah Republik Indonesia. Semoga amanah sebagai seorang Guru Besar dalam bidang *Functional Materials* dapat saya laksanakan dengan setulus hati dan sebaik-baiknya sebagai bentuk ketaatan kepada Allah dan darma bakti kepada Republik Indonesia melalui Universitas Gadjah Mada yang saya banggakan.

Salam takdzim saya sampaikan kepada segenap guru-guru saya yang penuh dedikasi dan kasih sayang di TK ABA Rejowinangun Kotagede Yogyakarta, SDN Gedong Kuning III Yogyakarta, SMP Negeri 5 Yogyakarta, dan SMA Taruna Nusantara, Magelang, Jawa Tengah.

Salam hormat dan ucapan terimakasih saya haturkan kepada Prof. Ir. I Made Bendiyasa, M.Sc., Ph.D. sebagai dosen pembimbing akademik dan Prof. Ir. Panut Mulyono, M.Eng., D.Eng. IPU, ASEAN Eng., sebagai dosen pembimbing penelitian dan Ir. Agus Prasetya, M.Eng.Sc., Ph.D sebagai dosen pembimbing Tugas Akhir yang selama kuliah sarjana di Teknik Kimia UGM dengan sabar membimbing dan memberikan ilmunya. Ucapan terimakasih juga sayahaturkan khusus kepada Prof. Dr. Ir. Sarto, M.Sc., IPU. dan Prof.

Dr.Eng. Ir. Arief Budiman, M.S., IPU. atas review dan masukan yang berharga pada naskah pidato ini.

Terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Max Lu dan Prof. Suresh Bhatia sebagai pembimbing *research projects* program S2 saya di *The University of Queensland*, Australia, kemudian Prof. Hirofumi Hinode sebagai dosen pembimbing program *Integrated Doctoral Degree* saya di *Department of International Development Engineering, Tokyo Institute of Technology*, Jepang. Tak lupa ucapan terimakasih saya juga saya tujukan kepada para asisten Hinode lab. Dr. Chris Salim dan Dr. Winarto Kurniawan yang telah banyak membantu saya selama penelitian di Tokodai, Jepang.

Rasa hormat dan terima kasih saya sampaikan kepada bapak ibu dosen yang telah purna tugas, terima kasih atas ilmu dan nilai hidup yang telah dibagikan selama saya menjalani pendidikan dan berkarir di Departemen Teknik Kimia Universitas Gadjah Mada. Kepada para Guru Besar, dosen senior, rekan sejawat, dan para dosen muda, terimakasih saya sampaikan atas kebersamaan selama ini, yang telah sangat mendukung karya dan pengabdian saya di Departemen Teknik Kimia sampai saat ini. Terimakasih juga disampaikan kepada seluruh karyawan Departemen Teknik Kimia dan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Saya tidak bisa menyelesaikan tugas dan karya tanpa bantuan bapak dan ibu sekalian.

Tidak lupa saya ucapan terima kasih kepada rekan sejawat dan peneliti di CoE *Green Advanced Materials* FT UGM, KBK *Advance Materials and Sustainable Mineral Processing* DTK, dan Laboratorium Keramik dan Komposit DTK. Kemudian tidak lupa ucapan terima kasih kepada rekan pemerhati persampahan yang tergabung dalam *Indonesian Solid Waste Forum* (ISWF), Bapak Ketua, Sekretaris dan Anggota Majelis Lingkungan Hidup Muhammadiyah Sleman, Bapak Ibu penggiat dan pengajar Yayasan dan Sekolah Ekoliterasi Hangrukti Bumi Lestari di Bromonilan, Kalasan, Bapak-Ibu pimpinan dan staf di PIAT UGM dan khususnya staf di Rumah Inovasi Daur Ulang PIAT yang tentunya tanpa bantuan dari rekan-rekan semua karya dan pemikiran saya di bidang material berkelanjutan dan kelestarian lingkungan tidak akan terwujud.

Kepada ayahanda dan ibunda saya tercinta, Bapak Sudarsono (Alm) dan Ibu Titik Wahyuningsih yang telah membesarkan, mengasuh dan mendidik saya dalam segala kondisi, terima kasih yang

tak terhingga saya ucapkan sembari selalu memohon kepada Allah SWT untuk senantiasa mencurahkan rahmat-Nya kepada bapak dan ibu. Terima kasih juga kepada mertua bapak Fajri Masri (Alm) dan ibu Rosita yang sudah memberikan dukungan doa dan pendampingan kepada kami dalam berkeluarga. Kepada kakak Kandung saya Dr. Andi Sudiarso dan dr. Betty Dwi Lestari saya ucapkan banyak terimakasih karena telah menjadi panutan saya selama ini, dan kepada Adik Kandung saya tercinta Dita Puspita Sari yang telah memberi saya kesempatan untuk menjadi seorang kakak setelah 12 tahun menjadi anak bungsu. Ucapan terimakasih juga kepada kakak-kakak ipar saya yang inspiratif Mas Rahmat Ali Hakim dan Mbak Hanung Puspitawati R. dan adik-adik ipar saya Rini dan Novera, Andi dan Eni dan Sani, tentunya tanpa kalian semua perjalanan hidup ini menjadi kurang bermakna. Tak lupa kepada Keluarga Besar Dharmowihardjo, Lendah, Kulon Progo, dan Keluarga Besar H. Margono Kepuh, serta Keluarga Besar Pasaman, Sumatra Barat, Pakdhe, Budhe, Om dan Tante sekeluarga terima kasih atas kehadiran, doa serta dukungannya.

Akhirnya, terima kasih yang tak terhingga saya sampaikan kepada istri saya tercinta Elviyesti Rosefa atas dukungan dan kebersamaannya selama lebih dari 15 tahun mengarungi biduk pernikahan ini, serta telah menjadi teman dan penguat hidup saya. Juga terima kasih saya ucapkan kepada anak-anakku yang shalih dan shalihah Nayyara Shakila Purnomo, Kenzo Aulia Purnomo dan Hiroki Abdurrahman Purnomo yang selalu memberikan semangat untuk berkarya dan penyejuk hati dikala lelah mendera. Kalianlah alasan perjuangan *daddy* dan *mommy* selama ini, doakan kami agar bisa menjadi orang tua yang bijak yang bisa mengantarkan kalian menapaki jalan hidup yang utama.

Kepada Bapak/Ibu hadirin sekalian yang telah meluangkan waktu dengan sabar mendengarkan pidato pengukuhan ini, baik yang berada di ruang Balai Senat Universitas Gadjah Mada, maupun yang mengikuti secara daring dimanapun berada. Kami ucapkan terimakasih dan apresiasi sedalam-dalamnya serta memohon maaf atas segala kesalahan. Semoga Allah SWT memberkahi kita semua. *Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wa Barakaatuh.*

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Erb K H *et al.*, 2018 Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass *Nature* **553**, 7686 p. 73–76.
- [2] Elhacham E Ben-Uri L Grozovski J Bar-On Y M and Milo R, 2020 Global human-made mass exceeds all living biomass *Nature* **588**, 7838 p. 442–444.
- [3] Steffen W Broadgate W Deutsch L Gaffney O and Ludwig C, 2015 The trajectory of the anthropocene: The great acceleration *Anthr. Rev.* **2**, 1 p. 81–98.
- [4] Kaza S Yao L Bhada-Tata P and Van Woerden F, 2018 *What a Waste 2.0* Washington, DC: The World Bank.
- [5] FAO, 2015, Global Initiative on Food Loss and Waste Reduction What IS food.
- [6] Wisangeni S P Rosalina M P and Krisna A, 2022, Sampah Makanan Indonesia Mencapai Rp 330 Triliun. [Online]. Available: <https://www.kompas.id/baca/ekonomi/2022/05/18/sampah-makanan-capai-lebih-rp-330-triliun>.
- [7] Meadows D H Meadows D L Randers J and Behrens III W W, 1972 *The Limits to Growth* New York: Universe Books.
- [8] Meadows D Randers J and Meadows D, 2005 *Limits to Growth The 30 Years Update* London: Earthscan.
- [9] Lin D Wambersie L and Wackernagel M, 2021 Nowcasting the World's Footprint & Biocapacity for 2021: May 2021 | Global Footprint Network Estimating the Date of Earth Overshoot Day 2021 Outline Overview: Earth Overshoot Day Calculation The Need for Nowcasting May p. 1–8.
- [10] Steffen W *et al.*, 2015 Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet *Science* (80-.). **347**, 6223.
- [11] Rockström J *et al.*, 2023 Safe and just Earth system boundaries *Nature* **619**, July.
- [12] American Chemistry Council (ACC), 2020 Guide to the business of Chemistry 2020 p. 100.
- [13] Tickner J A Geiser K and Baima S, 2022 Transitioning the Chemical Industry: Elements of a Roadmap Toward Sustainable Chemicals and Materials *Environment* **64**, 2 p. 22–36.
- [14] Eramo M, 2019, Global basic chemicals outlook. [Online]. Available: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/research-analysis/global-basic-chemicals-outlook.html>.
- [15] Yagi K and Halada K, 2001 Materials development for a sustainable society *Mater. Des.* **22**, 2 p. 143–146.

- [16] Pollini B and Rognoli V, 2021 Early-stage material selection based on life cycle approach: tools, obstacles and opportunities for design *Sustain. Prod. Consum.* **28** p. 1130–1139.
- [17] Berg C and Kähler F, 2021 Turning off the Tap for Fossil Carbon Future Prospects for a Global Chemical and Derived Authors April.
- [18] Ros J Olivier J Notenboom J Croezen H and Bergsma G, 2012 Sustainability of biomass in a bio-based economy *Netherlands Environ. Assess. Agency* February p. 1–22.
- [19] Irmer J, 2017 Lignin – a natural resource with huge potential *BIOPRO Baden-württemb. GmbH* p. 1–6.
- [20] Purnomo C W Kurniawan W and Aziz M, 2021 Technological review on thermochemical conversion of COVID-19-related medical wastes *Resour. Conserv. Recycl.* **167**, December 2020.
- [21] Pramudia B D Rochmadi and Purnomo C W, 2020 Styrene recovery from the pyrolysis of polystyrene waste using bentonite and natural zeolite catalyst *Key Eng. Mater.* **849 KEM** p. 84–89.
- [22] Bachmann M *et al.*, 2023 Towards circular plastics within planetary boundaries *Nat. Sustain.* **6**, 5 p. 599–610.
- [23] Purnomo C W el Mawaddah M and Bayonita S, 2021 The Simulation and Experimental Study of COD Removal from Rubber Industrial Wastewater using Anaerobic Fixed Bed Reactors *Int. J. Technol.* **12**, 2 p. 320–328.
- [24] Purnomo C W Mellyanawaty M and Budhijanto W, 2017 Simulation and Experimental Study on Iron Impregnated Microbial Immobilization in Zeolite for Production of Biogas *Waste and Biomass Valorization* **8**, 7 p. 2413–2421.
- [25] Purnomo C W Kesuma E P Perdana I and Aziz M, 2018 Lithium recovery from spent Li-ion batteries using coconut shell activated carbon *Waste Manag.* **79** p. 454–461.
- [26] Prasongko C . Ariyanto T and Purnomo C W, 2019 Uji Kinerja Adsorpsi Ion Nikel Dengan Karbon Berpori Dari Serbuk Gergaji Kayu Mlanding (Petai Cina) Yang Telah Dioksidasi Dengan Hidrogen *J. Konversi* **8**, 2 p. 15–24.
- [27] Werpy T and Petersen G, 2004, Top value added chemicals from biomass Volume I—Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas energy efficiency and renewable energy, *US. Department of Energy*. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35523.pdf>.
- [28] Zimmerman J B Anastas P T Erythropel H C and Leitner W, 2020 Designing for a green chemistry future *Science (80-.)*. **367**, 6476 p. 397–400.
- [29] Chubukov V Mukhopadhyay A Petzold C J Keasling J D and Martín H

- G, 2018 Synthetic and systems biology for microbial production of commodity chemicals *npj Syst. Biol. Appl.* **2**, December 2015 p. 1–11.
- [30] Yang J *et al.*, 2022 Sustainability performance of global chemical industry based on green total factor productivity *Sci. Total Environ.* **830** p. 154787.
- [31] Ausfelder F *et al.*, 2013 Technology Roadmap Energy and GHG Reductions in the Chemical Industry via Catalytic Processes.
- [32] Jaeger-Erben M Jensen C Hofmann F and Zwiers J, 2021 There is no sustainable circular economy without a circular society *Resour. Conserv. Recycl.* **168**, February p. 105476.

BIODATA

Nama : Chandra Wahyu Purnomo
NIP : 198003292003121001
Tempat dan Tanggal Lahir : Kulon Progo, 29 Maret 1980
E-mail : chandra.purnomo@ugm.ac.id
Alamat Kantor : Departemen Teknik Kimia FT UGM,
JI Grafika no 2 Yogyakarta
Keluarga : Elviyesti Rosefa (Istri)
Nayyara Shakila Purnomo (anak)
Kenzo Aulia Purnomo (anak)
Hiroki Abdurrahman Purnomo (anak)
Alamat Rumah : Perum Green Hills no 362 Ngaglik
Sleman Yogyakarta

Riwayat Pendidikan

1998-2003 : Departemen Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada
2005 – 2006 : Environmental Engineering, University of Queensland,
Australia
2008-2012 : International Development Engineering, Tokyo
Institute of Technology, Japan

Penghargaan

- 2017 : Satya Lencana X tahun 2017 Presiden RI
 2019 : Dosen Berprestasi SAINTEK peringkat III UGM
 2021 : Penghargaan publikasi dengan sitasi tertinggi bid. Teknik

Pengalaman Penelitian (5 tahun terakhir sebagai ketua)

- 2019 : Pengembangan teknologi moderen pengolah Sampah kapasitas 10 ton/hari
 2019 : Pengolahan limbah RPA dengan Fitoremediasi
 2019 : Pengolahan limbah organik dengan metode Black Fly Soldier Maggots
 2019 : Feasibility Studi PLTSa Pembangkit Listrik Tenaga Sampah
 2020 : Pengembangan pupuk silika cerdas berbasis limbah padat
 2020 : Pengembangan reaktor biogas terintegrasi mengolah sampah kampus dan kantin
 2020 : Bilik Rapid Test Portable untuk pemeriksaan COVID-19 secara masive
 2021 : DUMask (Dropbox Used-Mask) sebagai Solusi Pengelolaan Limbah APD Pandemi COVID-19 di Masyarakat
 2021 : Pengembangan alat pirolisis pengolah limbah medis
 2022 : Pengembangan teaching factory pemrosesan larva maggot BSF menjadi tepung dan minyak kualitas tinggi untuk mendukung kemandirian pakan nasional
 2023 : Pengembangan Biofilm Nano Kitosan-Melanin Kompleks Sebagai Bahan Pembuatan Green Food Packaging
 2023 : Peningkatan Pendapatan Ekonomi Masyarakat Berbasis Teknologi Pengolahan Sampah

Asosiasi Profesional:

2018 – Sekarang : BKK PII

Riwayat Kerja dan Jabatan:

2003 – sekarang : Dosen Teknik Kimia FT UGM

2015 – 2018 : Kepala Bidang Energi dan Pengelolaan Limbah
PIAT UGM

2019 – 2022 : Sekretaris PIAT UGM

2023 – sekarang : Kepala Lab. Keramik dan Komposit DTK FT
UGM

Publikasi Ilmiah (5 tahun terakhir terindeks Scopus dengan H-indeks: 14)

S Supriyono, RAS Lestari, **CW Purnomo**, (2023) Household waste bioadsorbent for removing heavy metals and textile dyes: A review AIP Conference Proceedings 2720 (1)

RAS Lestari, S Supriyono, **CW Purnomo**, (2023) Synthesis of natural zeolite adsorbent for CO₂ adsorption. AIP Conference Proceedings 2720 (1)

L.T.N. Maleiva, **CW Purnomo**, PW Nugraheni, E. Kusumawardhani, L.S.A. Putra, (2023) Zeolite Effect on Solid Product Characteristics in Hydrothermal Treatment of Household Waste, ASEAN Journal of Chemical Engineering, 23 (1), pp.52-61

S Indarti, T Taryono, **CW Purnomo**, AS Wulandari, R Maharani, (2023), Abundance and diversity of plant parasitic nematodes associated with vegetable cultivation on various types of organic fertilizers, Biodiversitas Journal of Biological Diversity 24 (2)

IAP Pratiwi, H Saptoadi, TA Rohmat, **CW Purnomo**, (2023) Heating of aseptic packaging (Tetrapak) using microwave oven in the nitrogen atmosphere to determine the yield characteristics, AIP Conference Proceedings 2654 (1)

I Pruwita, A Prasetya, **CW Purnomo**, (2022) The effects of feedstock on the bioconversion of organic solid waste with black soldier fly

larvae, AIP Conference Proceedings 2578 (1)

DK Agustika, I Mercuriani, **CW Purnomo**, S Hartono, K Triyana, DD Iliescu, (2022) Fourier transform infrared spectrum pre-processing technique selection for detecting PYLCV-infected chilli plants, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 278, 121339

CW Purnomo, LTN Maleiva, OA Sandra, AH Soeriyadi, (2022) Application of Wheat Bran/Straw-Based Biomaterials in Textile Wastewater Treatment: Sustainable Bio-nano Materials

RR Badu, **CW Purnomo**, B Kamulyan (2022) Plastic Waste Recycle into Pellet: Economic Analysis and Processing Temperature Effects, *Key Engineering Materials* 920, 129-136

DASA Hamid, **CW Purnomo**, JSM Ahmad (2022) Feasibility Study and Processing Temperature Effect on Recycling of Aluminium- Plastic Package into Solid Fuel, *Key Engineering Materials* 920, 74-80

CW Purnomo, F Ramdani, (2022) Constructed Wetlands in Dye Removal, *Biological Approaches in Dye-Containing Wastewater: Volume 1*, 273-286

IS Cahyani, A Prasetya, **CW Purnomo**, (2022) Nanosilica from geothermal sludge using sol-gel method with addition of CTAB surfactants, AIP Conference Proceedings 2391 (1)

D Prihandoko, **CW Purnomo**, PK Widyaputra, N Nasirudin, (2022) Application of Refuse-Derived Fuel (RDF) Plant in Piyungan Landfill Municipal Solid Waste Management, *ASEAN Journal of Chemical Engineering* 22 (2), 296-305

CW Purnomo, P Noviyani, S Indarti, GT Schriefer, (2022) Synthesis and pot trial of organic fertilizer from solid waste, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 963 (1), 012052

IAP Pratiwi, H Saptoadi, J Sentanuhady, **CW Purnomo**, TA Rohmat, (2021) The Influence of Microwave Oven Output Power and Catalytic Temperature on Products Yields of Aseptic Packaging Waste Pyrolysis, *International Journal of Renewable Energy Research(IJRER)* 11 (4), 1871-1879

K Khanthong, **CW Purnomo**, W Daosud, (2021) Microbial diversity of marine shrimp pond sediment and its variability due to the effect of

immobilized media in biohydrogen and biohythane production Journal of Environmental Chemical Engineering 9 (5), 106166

P Khumairoh, HTBM Petrus, **CW Purnomo**, (2021) Production of biochar from Bitter Melon Seeds Waste by Pyrolysis Method, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 830 (1), 012019

N Widyastuti, M Hidayat, **CW Purnomo**, (2021) Enhanced Biogas Production from Sugarcane Vinasse using Electro-Fenton as Pre-treatment Method, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 830 (1), 012079

DK Agustika, IS Mercuriani, NA Ariyanti, **CW Purnomo**, K Triyana (2021) Gas chromatography-mass spectrometry analysis of compounds emitted by pepper yellow leaf curl virus-infected chili plants: A preliminary study, Separations 8 (9), 136

MM Azis, J Kristanto, **CW Purnomo**, (2021) A Techno-Economic Evaluation of Municipal Solid Waste (MSW) Conversion to Energy in Indonesia, Sustainability 13 (13), 7232

D Amalia, I Perdana, **CW Purnomo**, (2021) Adsorption of lithium and calcium using cationic resin for separation application, AIP Conference Proceedings 2349 (1)

RP Ningtyas, SK Wirawan, **CW Purnomo**, (2021) Lithium purification from spent li-ion batteries leachate using ion exchange resin, AIP Conference Proceedings 2342 (1)

CW Purnomo, W Kurniawan, M Aziz, (2021) Technological review on thermochemical conversion of COVID-19-related medical wastes, Resources, Conservation and Recycling 167, 105429

CW Purnomo, M el Mawaddah, S Bayonita, (2021) The Simulation and Experimental Study of COD Removal from Rubber Industrial Wastewater using Anaerobic Fixed Bed Reactors. International Journal of Technology 12 (2)

CW Purnomo, H Saputra, (2021) Manufacturing of slow and controlled release fertilizer, Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture, 95-110

SI Damayanti, S Bayonita, W Budhijanto, Sarto, IW Mustika, **CW Purnomo** (2020) The study of immobilized media and ni ion addition effects on COD removal of POME using anaerobic filter reactor,

Waste and Biomass Valorization 11, 7045-7051

LTN Maleiva, **CW Purnomo** (2020) Solid waste co-conversion by hydrothermal treatment using natural zeolite, *Makara Journal of Science* 24 (3), 3

PB Dewangga, R Rochmadi, **CW Purnomo** (2020) Styrene Recovery from the Pyrolysis of Polystyrene Waste Using Bentonite and Natural Zeolite Catalyst, *Key Engineering Materials* 849, 84-89

H Pampang, **CW Purnomo**, RB Cahyono, (2020) Enhancement of Biogas Production in Anaerobic Digestion from Sludge of Dairy Waste with Fixed Bed Reactor by Using Natural Zeolite, *Key Engineering Materials* 849, 27-33

D Kurniasari, AT Yuliansyah, **CW Purnomo**, (2020) The effect of process water recycle on hydrothermal treatment of yard long bean (*Vigna unguiculata* ssp. *sesquipedalis*) and water spinach (*Ipomoea reptans*) seeds, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 857 (1), 012004

S Sreyvich, HTBM Petrus, **CW Purnomo**, (2020) Nutrient recovery from slaughterhouse wastewater, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 778 (1), 012136

CW Purnomo, A Widyadhana (2020) Lithium and Calcium recovery by activated carbon from coconut shell char, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 823 (1), 012032

F Ramdani, A Prasetya, **CW Purnomo** (2019) Removal of pollutants from chicken slaughterhouse wastewater using constructed wetland system, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 399 (1), 012085

PB Dewangga, Rochmadi, **CW Purnomo** (2019) Pyrolysis of polystyrene plastic waste using bentonite catalyst, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 399 (1), 012110

IZ Pradipta, **CW Purnomo**, (2019) High Grade Liquid Fuel from Plastic Waste Pyrolysis Oil by Column Distillation, *IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 240-244

AT Wijayanta, T Oda, **CW Purnomo**, T Kashiwagi, M Aziz (2019) Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: Comparison review, *International Journal of*

Hydrogen Energy 44 (29), 15026-15044

CW Purnomo, SK Wirawan, H Hinode (2019) The utilization of bagasse fly ash for mesoporous silica synthesis, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 543 (1), 012040

CW Purnomo, RB Cahyono, A Setiawan, N Amin (2019) Water and power consumption reduction by gas conditioning tower system modification in cement industry, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 543 (1), 012051

Y Kusumastuti, A Istiani, **CW Purnomo** (2019) Chitosan-based polyion multilayer coating on NPK fertilizer as controlled released fertilizer, Advances in Materials Science and Engineering 2019

W Hanifah, **CW Purnomo**, S Purwono, (2019) Slow release NPK fertilizer preparation from natural resources, Materials Science Forum 948, 43-48

CW Purnomo, DP Sari, Y Laoong-u-thai, RT Swasono (2019) Preliminary Study of Anaerobic Digestion Improvement by Bacterial Immobilization Media from Activated Carbon and Natural Zeolite, International Journal of Chemical Engineering and Applications 10(2), 46-49

CW Purnomo, YN Marpaung, S Sreyvich, I Fadlilah, HTBM Petrus (2019) Struvite precipitation using continuous flow reactor, AIP Conference Proceedings 2085 (1) (2019)

A Rahmada, **CW Purnomo**, RB Cahyono, T Ariyanto (2019) In campus municipal solid waste generation and characterization, case study: Universitas Gadjah Mada, Indonesia, AIP Conference Proceedings 2085 (1)

ME Mawaddah, **CW Purnomo**, AT Yuliansyah, (2019) The effect of packing media addition on biogas production from rubber industrial wastewater, AIP Conference Proceedings 2085 (1)

S Bayonita, **CW Purnomo**, RB Cahyono, (2019) Performance of anaerobic reactor with media support and Ni addition for palm oil mill effluent treatment, AIP Conference Proceedings 2085 (1)

Perolehan KI

- 2018 : Paten Alat pengolah sampah plastik menjadi adonan batako
- 2019 : Paten Alat pemurnian minyak plastik
- 2019 : Paten Alat pengurai limbah palm oil mill effluent (pome) dua tahap yang bekerja Secara anaerobik dengan media imobilisasi terfluidisasi
- 2020 : Paten Proses Pengambilan Senyawa Litium Karbonat dari Limbah Baterai Ion Litium Kobal Oksida
- 2020 : Hak Cipta Buku Solusi Pengelolaan Sampah Kota
- 2021 : Paten Alat Reaktor kontainer penghasil biogas



Lampiran: Histori alur persetujuan

No	Jabatan	Nama	Jenis	Tanggal Disetujui
1	Ketua Departemen Teknik Kimia	Ir. Ahmad Tawfiequrrahman Yuliansyah, S.T., M.T., D.Eng., IPM.	Paraf	Kamis, 14 September 2023 09:07
2	Kepala Kantor Administrasi	Doni Agus Wijayanto, S.E., M.M.	Paraf	Kamis, 14 September 2023 10:34
3	Wakil Dekan Bidang Keuangan, Aset, dan SDM	Prof. Ir. Muslihin Hidayat, S.T., M.T., Ph.D., IPU.	Tanda Tangan	Kamis, 14 September 2023 13:34

Diajukan oleh Wulaningrum,S.E.



*Dokumen ini telah melalui proses approval secara daring sebelum QR Code dibubuhkan.
Scan QR Code yang ada di setiap halaman dokumen ini untuk verifikasi.*