

**PERKEMBANGAN MUTAKHIR MATERIAL
KOMPOSIT, PELUANG, DAN TANTANGANNYA
DALAM APLIKASI DI BIDANG OTOMOTIF**



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

Oleh :

**Prof. Ir. Heru Santoso Budi Rochardjo, M. Eng. Ph.D.,
IPM., ASEAN Eng.**

Bismillaahirrahmanirrahiim

Assalamualaikum Warohmatullahi Wabarokatuh

Salam sejahtera untuk kita semua,

Yang terhormat,

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Majelis Wali Amanat,

Rektor, Wakil Rektor, dan seluruh jajarannya;

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Senat Akademik;

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Dewan Guru Besar;

Para Pimpinan Fakultas, Pusat studi dan Lembaga di Lingkungan UGM;

Segenap Civitas Akademika Universitas Gadjah Mada; Para hadirin, tamu undangan, dan kerabat terkasih.

Pengantar

Perkenankan saya memulai pidato ini dengan mengucapkan rasa syukur kehadirat Allah Swt. Tuhan yang maha kuasa, yang telah mengizinkan kita semua hadir secara langsung di ruangan bersejarah ini, Balai Senat Universitas Gadjah Mada, maupun hadir dalam ruang virtual lewat gawai di tempat masing-masing. Hari ini, 24 Oktober 2023 saya diperkenankan untuk menyampaikan informasi dan gagasan sebagai Guru Besar bidang Ilmu Teknik Mesin melalui pidato pengukuhan yang berjudul :

“Perkembangan Mutakhir Material Komposit, peluang dan tantangannya dalam aplikasi di bidang otomotif”,

Pidato ini merupakan fase penting dari perjalanan karier akademik saya, sekaligus upaya kontribusi pada keilmuan, dan kelembagaan yang saya banggakan.

Lewat judul ini, saya ingin menunjukkan dan mengajak hadirin sekalian untuk menyelami dengan singkat kondisi paling akhir yang menggambarkan perkembangan penelitian dan perkembangan aplikasi material komposit dalam bidang otomotif.

Apa yang ingin saya sampaikan akan diawali dengan meninjau dan memperkenalkan apa itu material komposit, sejarahnya, bagaimana ide komposit ini dimulai, dan berbagai komponen yang ikut serta dalam pengembangan dan aplikasi material ini. Bagian selanjutnya adalah penekanan pada pengembangan, baik dari sisi perkembangan komponen pembentuknya, perkembangan metode manufakturnya, maupun perluasan aplikasinya dalam berbagai bidang, terutama dalam bidang otomotif, yang akan saya selaraskan dengan perjalanan penelitian saya sejak lebih dari tiga dekade lalu sampai sekarang.

Hadirin Rapat Terbuka Dewan Guru Besar yang saya hormati,

Baru-baru ini, Jakarta telah diangkat sebagai jawara kota dengan polusi tertinggi di dunia. Langkah pemda untuk menguranginya adalah dengan mengurangi jumlah kendaraan di jalan. Ini langkah yang paling mudah yang bisa diterima karena menurut EPA, peran kendaraan bermotor dalam menyumbang emisi *greenhouse gas* pada tahun 2020 adalah sekitar 22% (EPA 2020). Ini disebabkan karena pembakaran 1 galon bensin menghasilkan 8.887 gram CO₂ (EPA 2023), sehingga efisiensi pemakaian bahan bakar sangat diperlukan.

Untuk mengurangi emisi polusi tersebut, perlu ditingkatkan efisiensi pemakaian bahan bakar mobil dengan tetap menjaga keamanan dan kinerjanya. Ini dapat dilakukan dengan berbagai cara. Salah satunya adalah dengan mengurangi bobot total kendaraan. Pengurangan berat kendaraan sebesar 10% dapat menghasilkan peningkatan efisiensi bahan bakar sebesar 6%-8%. (Energy.gov, 2023), karena diperlukan energi yang lebih rendah untuk mengakselerasi kendaraan yang lebih ringan.

Penggunaan konstruksi ringan ini, sangat penting khususnya untuk kendaraan hybrid, dan kendaraan listrik. Penggunaan struktur ringan

dalam kendaraan-kendaraan ini dapat mengimbangi bobot komponen yang berat seperti baterai dan motor listrik, sehingga dapat meningkatkan efisiensi, dan meningkatkan jarak jangkauannya (...).

Pengurangan berat struktur, bisa dilakukan dengan tiga cara. Cara pertama adalah optimasi desain secara modeling dan komputasional, sehingga didapat struktur kendaraan yang kuat, kaku dan ringan. Cara inilah yang dilakukan oleh Honda dengan rangka eSAF nya, yang diklaim 8% lebih ringan, lebih kuat dan lebih kaku (Kompas.com 2019). Cara kedua adalah dengan meningkatkan sifat-sifat mekanis material yang sudah ada seperti kekuatan dan kekakuannya sehingga kebutuhan material bisa berkurang, misalnya peningkatan sifat mekanis baja dengan cara *alloying*, *heat treatment*, dan perlakuan permukaan. Cara ketiga adalah dengan mengembangkan dan memanfaatkan material baru yang ringan, tetapi kuat. Ada dua kelompok material ringan yang bisa dipakai, yaitu material ringan yang 'konvensional' yang sudah biasa dipakai pada pesawat yaitu Aluminium dan Magnesium, dan material yang bisa didesain sifatnya yang relatif lebih baru, yaitu material komposit. Pada pidato ini, saya akan memfokuskan pada kelompok terakhir, yaitu material komposit.

Definisi komposit

Manusia adalah makhluk pembelajar. Ini adalah sunatullah, sesuai firmanNya : “Dia mengajarkan kepada manusia apa-apa yang tidak diketahuinya” (QS 96:5). Bagaimana Tuhan mengajari manusia? Untuk masalah akherat, di mana manusia tidak bisa membuktikan sendiri kebenarannya, maka diperlukan beberapa orang Nabi dan Rosul untuk memberi informasi dan mengajari manusia hal-hal yang berhubungan dengan akherat. Sedangkan untuk masalah dunia, dimana manusia bisa membuktikan sendiri kebenarannya, Tuhan mengajari manusia dengan berbagai contoh-contoh yang Dia berikan di alam. Dari contoh-contoh yang dilihat, manusia mampu memunculkan ide baru, meniru, memodifikasi apa yang ada di alam dan menciptakan inovasi baru karena manusia dianugerahi Allah akal, yang tidak diberikan kepada makhluk Allah yang lain. Burung

yang bisa terbang, telah menjadi inspirasi dan ide bagi manusia untuk menciptakan pesawat terbang. Bentuk sayap burung telah melahirkan bentuk *airfoil*, yaitu bentuk melengkung yang menyebabkan perbedaan kecepatan aliran udara di atas dan dibawah sayap, yang menyebabkan perbedaan tekanan, sehingga ada gaya ke atas (lift) yang menahan pesawat tidak jatuh. Manusia tahu cara mengubur jenazah juga dicontohkan oleh burung, yaitu ketika Qabil kebingungan dengan jenazah saudaranya yang dibunuhnya. Banyak hukum-hukum fisika diturunkan dari melihat contoh di alam. Bagaimana Newton mempertanyakan mengapa apel jatuh ke bawah, telah melahirkan teori gravitasi. Bagaimana Archimedes menemukan cara mengetahui keaslian mahkota emas setelah melihat air tumpah dari bak mandinya ketika dia masuk ke bak, yang akhirnya melahirkan hukum archimides. Demikian juga, banyak teknologi dikembangkan dari fenomena-fenomena yang ada di alam. Demikian juga dengan material komposit.

Ide pembuatan material komposit muncul karena contoh komposit di alam seperti kayu, kulit kayu, bambu, bungkus buah, jerami, dan berbagai material komposit alam yang lain, yaitu material yang terdiri dari pengikat (lignin) dan penguat (serat selulosa). Hal ini terlihat jelas saat kayu dipatahkan, akan terlihat serat kayu dan pengikatnya. Material komposit buatan adalah material yang meniru material komposit yang ada di alam, yaitu material yang tersusun dari dua atau lebih material yang berbeda, yang menghasilkan material baru yang sifatnya lebih baik dari material pembentuknya. Salah satu material penyusun berfungsi sebagai pengikat (matriks), sedang yang lain berperan sebagai penguat, yaitu komponen yang bertugas sebagai pendukung utama beban.

Sejarah komposit

Perdefinisi, ide komposit ini telah ada sejak 1500 tahun sebelum kelahiran Nabi Isa a.s, di mana bangsa Mesir kuno menggunakan

jerami untuk memperkuat lumpur atau tanah yang digunakan untuk membuat rumah. Material komposit modern dimulai sejak tahun 1935, ketika Owens-Corning memperkenalkan cara pembuatan serat gelas secara massal (Tecom 2022). Ternyata gelas yang lemah, kekuatannya bisa meningkat tajam jika ukurannya kecil. Gelas yang kekuatannya 170 MPa pada saat berbentuk balok, bisa meningkat mencapai 3448 MPa (Gibson 2012) atau hampir 40 kalinya pada saat berbentuk serat berdiameter 10 mikron. Dengan menambahkan material ini sebagai penguat pada bahan plastik yang sudah ditemukan sebelumnya, yaitu sejak tahun 1900an, maka dimulailah era komposit.

Jenis-jenis dan sifat komposit

Komposit modern yang pertama dibuat adalah plastik yang diperkuat dengan serat gelas. Komposit ini disebut *Glass Fiber Reinforced Plastics* (GFRP). Komposit ini, dengan kandungan serat 45%, kekuatan tariknya bisa mencapai 1100 MPa, dengan berat jenisnya sekitar $1,9 \text{ g/cm}^3$. Kekuatan tariknya sepadan dengan baja struktur 4340 dengan berat jenis sekitar $1/4$ nya. Selanjutnya bermunculanlah serat-serat baru, seperti karbon, boron, kevlar dan sebagainya. Selain itu juga muncul berbagai jenis matriks baru dengan sifat-sifat fisis, mekanis dan kimia yang bervariasi.

Pada dasarnya material komposit dipilih karena komposit mempunyai kekuatan dan kekakuan yang tinggi, tetapi ringan. Dalam istilah komposit, kedua sifat ini digabungkan menjadi satu istilah, yaitu kekuatan spesifik, yaitu kekuatan dibagi berat jenis, dan kekakuan spesifik, yaitu kekakuan dibagi berat jenis. Di era sekarang ini, di mana pemakaian energi harus dihemat, emisi karbon harus dikurangi, pemanasan global harus dikontrol, maka material yang ringan tapi kuat dan kaku, atau yang mempunyai kekuatan dan kekakuan spesifik yang tinggi, akan menjadi pilihan. Sifat tersebut bisa diberikan oleh material komposit.

Perkembangan komposit

a. Perkembangan serat

Hadirin Rapat Terbuka Dewan Guru Besar yang saya hormati,

Kekuatan komposit terutama ditentukan oleh kekuatan serat. Dalam upaya meningkatkan performa material ini, usaha-usaha telah dilakukan dengan berbagai cara untuk menemukan serat baru dan mengolah material yang sudah ada menjadi serat yang unggul, dengan berbagai kelebihan dibanding material “konvensional”. Serat-serat yang membentuk komposit lanjut (*advanced composite*), yaitu serat karbon, kevlar dan serat boron, telah banyak diterapkan dalam berbagai bidang seperti penerbangan, antariksa, dan alat-alat olahraga, sejak lebih dari lima dasa warsa terakhir. Serat-serat ini kekuatannya bisa mencapai 5 sampai 6 kali kekuatan baja, sedang berat jenisnya sekitar seper lima nya berat jenis baja. Dari ketiga serat tersebut, serat karbon adalah yang paling tinggi kekuatan dan kekakuannya, yaitu sekitar 10 kali nya kekuatan baja dengan berat seperlamanya, dan karena itu paling banyak dipakai dalam *advanced application*. Karena kekuatannya yang tinggi, komposit dengan serat ini, pengujiannya memerlukan bentuk spesimen tertentu supaya hasilnya valid (Rochardjo et al. 1995), Hal ini dikarenakan pada komposit serat searah, saat pengujian tarik searah seart, terjadi kerusakan pada arah tegak lurus serat terutama pada fraksi volume serat tinggi (Rochardjo et al. 1997) (Rochardjo 2007). Perusahaan yang banyak mengembangkan serat karbon adalah Toray, dengan produk Torayca® nya, mulai dari T300 sampai produk terakhir T1100G. Serat terakhir ini diameternya 5 mikron dan diklim mempunyai kekuatan tarik 7000 MPa, dengan berat jenis 1,79g/cm³. Setelah dibuat komposit dengan epoxy dan fraksi volume 60%, kekuatannya mencapai 3460 MPa (Toraycma 2023), atau 3 kalinya kekuatan baja.

Serat *advanced* yang lain, diantaranya serat boron (Specialty Materials), adalah serat yang digunakan untuk aplikasi terbatas,

sedangkan serat aramid (Kevlar®, DuPont), karena mempunyai ketangguhan tertinggi, banyak dipakai pada baju anti peluru. Akhir-akhir ini, pengembangan pemakaian Kevlar® mengarah ke *personal protective wear* yang lebih umum, seperti baju tahan api dan *protective glove* karena sifat *flame resistant* dan *wear resistant* nya yang tinggi (DuPont 2023).

Serat gelas adalah serat yang paling banyak dipakai pada struktur umum karena lebih murah dan lebih fleksibel. Pemakaian serat gelas telah merambah ke berbagai bidang mulai dari pemakaian *advanced*, sampai pemakaian umum seperti kendaraan, dan alat rumah tangga.

Selain serat-serat tersebut, serat-serat polimer banyak dikembangkan misalnya serat yang dibuat dari *ultra high molecular weight polyethylene* (UHMWPE), yang dibuat oleh Honeywell dengan nama komersial Spectra®, diklaim mempunyai kekuatan 15 kali kekuatan baja dengan berat jenis 1/8 nya (Honeywell 2023). Demikian pula serat yang lebih baru seperti poly p-phenylene-2,6-benzobisoxazole (PBO), yang dibuat oleh Toyobo dengan merk Zylon®, adalah serat yang tahan temperatur tinggi. *Polymer based fiber* ini terus dikembangkan oleh perusahaan-perusahaan serat seperti Du Pont, Honeywell, Teijin dan Toyobo yang mengarah kepada serat dengan kekuatan tinggi dan berat jenis rendah. Selanjutnya, serat Quartz, yang lebih *durable* dengan koefisien muai hampir nol, serat keramik, yang tahan temperatur tinggi, dan serat basalt, yang lebih murah, juga banyak dipakai pada pemakaian tertentu (Composite World 2022).

Perkembangan di bidang serat ini, semakin lengkap dengan penemuan baru dari salah satu allotrope carbon, yaitu carbon nano fiber, yang mempunyai kuat tarik 2,7 sampai 7 GPa, dan Carbon Nano Tube (CNT), yang kekuatannya bisa mencapai 52 GPa, dengan berat jenis hanya 1,4 g/cm³, atau kekuatan spesifiknya sebesar 37000. Bandingkan dengan baja yang mempunyai kekuatan sebesar 1030 MPa, dengan densitas 7,83 g/cm³, sehingga kekuatan spesifik hanya 131 (Gibson 2012).

Walaupun serat-serat di atas mempunyai rasio kekuatan dan berat yang tinggi, tetapi serat-serat tersebut adalah serat buatan yang tidak terurai di alam, sehingga sampahnya bisa mengganggu lingkungan, dan tidak bisa diperbaharui karena dihasilkan dari bahan tambang yang bisa habis. Karena itu dikembangkanlah komposit dengan serat alam, di antaranya serat ramie (Marsyahyo et al. 2008), serat Agave (Yudhanto et al. 2021), bacterial cellulose (Rochardjo et al. 2015), serat pelepah salak (Darmanto et al. 2017), cellulose sheet dari Agave Cantala (Rochardjo, 2019) dan serat-serat alam lain yang banyak terdapat di Indonesia. Walaupun kekuatannya tidak setinggi serat buatan, tetapi serat alam ini mempunyai beberapa keunggulan, seperti harga murah, lebih ringan, dan ramah lingkungan karena bisa terurai di alam (*biodegradable*) dan bisa diperbaharui (*renewable*). Untuk meningkatkan efisiensi pemakaiannya, serat alam ini kemudian dibuat serat berukuran makro dan nano dalam bentuk makro cellulose dan nanocellulose (Yudhanto et.al 2018), yang memberikan kekuatan lebih tinggi jika dalam bentuk cellulose nano crystal (Fatkhurrohman et al. 2020). Selanjutnya, serat komposit, yaitu polymer yang diperkuat cellulose, terbukti bisa dibuat dengan metode *electro spinning* untuk pembuatan membran nano filter (Rochardjo et al. 2021).

Akhir-akhir ini telah ditemukan serat gelas yang *biodegradeable*. Serat ini dikembangkan oleh perusahaan ABM Composite yang diberi nama komersial ArcBiox X4. Serat ini mempunyai sifat seperti serat gelas, tetapi *biodegradable*, atau bisa hancur di alam (ABMComposite 2023)

Penguat partikel, yaitu penguat yang tidak berbentuk serat, juga memberikan kontribusi kemampuan material yang significant. Pada umumnya, sifat yang ditingkatkan dengan pemakaian penguat partikel adalah kemampuan material dalam menahan retak(..). Akhir-akhir ini penguat berbentuk partikel banyak bersangkutan dengan partikel berukuran nano, seperti graphene, dan borophene. Walaupun bentuk sebenarnya adalah lembaran 2D, tetapi dengan mata telanjang, material graphene berbentuk partikel (serbuk). Dua jenis partikel ini

dikenal sebagai partikel yang terkuat di dunia saat ini. Kekuatannya bisa mencapai 130 GPa, atau lebih dari 100 kalinya kekuatan baja (Cao et al. 2020). Di samping itu, graphene yang merupakan dasar pembentuk allothrope karbon yang lain, juga mampu meneruskan arus listrik sampai 10 kalinya tembaga (Xin et al. 2015), material yang saat ini dipakai pada kabel listrik.

Perlu diingat, bahwa serat-serat yang kekuatan tariknya tinggi tadi tidak bisa dipakai sebagai bahan struktur. Serat-serat ini harus digabung dan dilekatkan dengan komponen lain, yaitu komponen pengikat yang disebut matriks, untuk menjadi material komposit. Jika kandungan serat atau fraksi volume serat sama dengan fraksi volume matriks, maka kekuatan tarik serat yang bisa dipakai hanya setengahnya. Jika serat tersusun dalam susunan cross-ply, atau serat teranyam, maka kuat tarik akan berkurang lagi menjadi seperempatnya. Jika arah seratnya acak, maka akan berkurang lagi tinggal 1/6 nya (Gibson 2012).

Perkembangan matriks

Hadirin Rapat Terbuka Dewan Guru Besar yang saya hormati,

Bahan pembentuk komposit berikutnya adalah matriks. Bahan matriks bertugas menyatukan serat dan partikel dan membuat komposit mempunyai “bentuk”. Di samping memberi bentuk, material ini harus mampu meneruskan beban yang diterima oleh satu komponen penguat ke komponen penguat yang lain melalui gaya geser. Karena itu, matriks harus mampu masuk ke sela-sela serat dan melekat ke serat atau partikel dengan kuat, yang sering disebut ‘membasahi’ seluruh permukaan serat/partikel, di samping harus mempunyai kekuatan geser tinggi. Tidak kalah pentingnya adalah syarat dimana matriks tidak bereaksi dengan seratnya dan menghasilkan reaktan yang memberi dampak buruk ke sifat komposit. Semua polimer, keramik dan logam, bisa digunakan sebagai matriks asal memenuhi syarat tersebut, sehingga bisa

membentuk komposit matriks polimer (PMC), komposit matriks keramik (CMC), dan komposit matriks logam (MMC).

Bahan matriks yang paling banyak dipakai saat ini adalah polimer atau plastik sehingga membentuk komposit *Fiber Reinforced Plastics* (FRP). Mereka diproduksi dalam jumlah terbesar, karena sifat-sifatnya yang baik pada suhu kamar, kemudahan pembuatan, dan harga rendah. Bahan ini sering disebut juga sebagai resin. Bahan matriks pada FRP terdiri dari dua kelompok besar, yaitu resin termoset dan resin termoplastik.

Termoset pada awalnya berbentuk cairan kental. Setelah ditambahkan hardener atau dipanaskan, akan terjadi *cross-linking* membentuk padatan stabil yang tidak bisa dibalik menjadi cairan lagi (irreversible). Karena itu, dari sisi pembuatan komposit, matriks ini lebih mudah dipakai karena dibuat pada temperatur kamar, dan bisa mengalir ke sela-sela serat dengan mudah, sehingga memberi penguatan yang baik pada komposit. Setelah mengeras, termoset mempunyai stabilitas bentuk yang baik, tahan korosi kimia, dan mempunyai sifat termis dan mekanis yang baik. Termasuk matriks jenis ini adalah resin umum seperti *unsaturated polyester*, *vinyl ester epoxy*, *phenolic* dan resin khusus untuk suhu tinggi seperti *polyimide*, *bismaleimide*, *benzoxazine*, *cyanate ester*, dan *phthalonitrile*.

Resin termoset sering digunakan dalam pembuatan FRP untuk beberapa industri, seperti konstruksi, mobil, ruang angkasa, kelautan, turbin angin, olah raga, dan sebagainya yang mencerminkan potensinya untuk pengembangan produk berkinerja tinggi.

Dengan alasan yang sama dengan pemakaian serat alam, telah dikembangkan pula resin termoset dari bahan alami. Sebagai contoh, penelitian mutakhir menunjukkan bahwa monomer bisa dibuat dari lignocellulosic biomass, yang diubah menjadi fructosa, yang setelah berbentuk 5-hydroxymethylfurfural, kemudian membentuk monomer 2,5-furandicarboxylic acid, yang selanjutnya bisa dijadikan bahan utama pembuatan *Unsaturated Polyester Resin* (UPR). Selain itu monomer bisa juga dibuat dari starch jagung, kacang-kacangan, dan ampas tebu (Hofmann et al. 2022). Karena terbuat dari material

alami, resin ini bisa hancur di tanah, sehingga bisa disebut sebagai resin yang ramah lingkungan.

Setelah menjadi sampah, komposit termoset tidak bisa didaur ulang (*recycle*), tetapi hanya bisa dipakai ulang (*re-use*) dengan menghancurkannya sehingga berbentuk partikel untuk digunakan pada aplikasi yang ‘lebih rendah’ seperti paving, landfilling, particulate komposit, dan sebagainya.

Termoplastik, di sisi lain, adalah material yang dalam temperatur ruang berbentuk padat. Untuk bisa digabungkan dengan serat atau partikel, plastik ini harus dipanaskan sampai mencair pada viskositas tertentu sedemikian sehingga bisa masuk ke sela-sela serat. Karena itu diperlukan alat khusus untuk mencairkan, dan mencampurkannya dengan bahan penguat pada suhu tinggi.

Dibandingkan dengan resin termoset, ada dua keunggulan utama termoplastik dalam komposit, yaitu ketahanan kejut yang lebih tinggi, dan kemampuannya untuk diubah bentuk dan didaur ulang. Kelemahannya, temperatur kerja pada umumnya lebih rendah dari termoset.

Termoplastik bisa dikelompokkan ke dalam Acetal resins, Polyamide resins, Polystyrene resins, dan Acrylic resins. Di pasaran, dikenal dengan singkatan nama, misalnya PP, PE, PET, PBT, PC, ABS, nylon, dan banyak lagi. PEEK (polyetheretherketone), PEK (polyether ketone), PAI, PAS, PEI, PES, PPS, dan LCP (liquid crystal polymer) adalah thermoplastic resins berkinerja tinggi yang bisa beroperasi pada suhu tinggi (Johnson 2018).

Pengembangan terbaru resin termoplastik meliputi resin termoplastik dengan viskositas rendah, sehingga bisa diterapkan pada metode resin infusioin seperti pada resin termoset. Beberapa di antaranya adalah matriks polyacrylate dengan merk dagang Elium® (Arkema), polyamides dengan nama Bruggolen® (Brüeggemann Chemical), dan polybutylene terephthalates, dengan merk dagang Cyclics CBT® (Cyclics Corporation) (Ageyeva, Sibikin, and Kovács 2019)

Akhir-akhir ini, pengembangan *bio-based thermoplastics* banyak dilakukan, karena alasan lingkungan. *Biobased polymers*, khususnya *aliphatic polyesters*, misalnya *polylactic acid* (PLA), poly(3-hydroxyalkanoate)s, dan poly(butylene succinate), berhasil dikomersialisasikan, menjadikannya sebagai resin alternatif pengganti *petroleum-based polymers* (Kang et al. 2021).

Perkembangan lanjut thermoplastic, adalah dengan ditemukannya *thermoplastic polyether elastomer* (TPEE), yaitu elastomer atau karet yang mudah diproses seperti termoplastik, tetapi mempunyai elastisitas seperti elastomer, memberikan sifat yang diperlukan di bidang otomotif, elektronik dan biomedik. Material ini telah berhasil dibuat dari biomasa (Qiu et al. 2018). Resin termoplastik dari sekresi kutu albasia juga telah dikembangkan untuk komposit serat rami dengan hasil yang baik (Mujiyono et al. 2010) menghasilkan komposit serat alam yang sepenuhnya bisa terurai di alam.

Setelah menjadi sampah, matriks termoplastik bisa didaur ulang, yaitu dicairkan lagi. Selain itu, komponen komposit dengan termoplastik bisa direparasi jika terjadi kerusakan, yaitu dilas, atau ditambal, sehingga bisa memperpanjang umur pakai (Li and Palardy 2023).

Selain polimer, bahan matriks lain adalah logam dan keramik. Komposit dengan matriks logam dan keramik biasanya menggunakan penguat berbentuk partikel dengan memanaskan logam sampai suhu cair, atau menggunakan teknologi serbuk dengan proses sintering. Komposit dengan matriks logam dipakai untuk komposit dengan suhu operasi tinggi.

Hadirin yang kami hormati,

Perkembangan metode manufaktur

Untuk menjadi komposit yang memberikan sifat lebih baik dari sifat material pembentuknya, maka matriks dan serat penguat harus dicampur. Tantangannya adalah, bagaimana caranya agar serat dan matriks bisa bercampur dengan baik sehingga menghasilkan komposit dengan fraksi volume serat atau kandungan serat yang tinggi, dan tidak mengandung void atau kekosongan. Fraksi volume ideal adalah sekitar 60%. Fraksi volume lebih tinggi akan mudah terbentuk void, sedangkan jika lebih rendah akan menghasilkan kekuatan komposit yang rendah. Pengelompokan metode pembuatan komposit bisa didasarkan pada cara mencampur penguat dan matriks.

Metode pertama, pencampuran matriks dan serat dilakukan sebelum dibentuk menjadi komponen komposit. Termasuk dalam metode ini, adalah metode prepregs, dan sheet moulding compound (SMC). Dengan metode ini, komposit tidak langsung dibuat di cetakan, tetapi diperlakukan sebagai bahan baku pembuatan komponen, seperti plat pada industri baja. Pemakaiannya adalah dengan meletakkan secara manual atau secara otomatis ke dalam cetakan, kemudian diberi tekanan dan dipanaskan. Bisa pula disertai dengan *vacuum bagging* dan *autoclave*. Metode ini bisa memberikan fraksi volume serat yang tinggi dan merata, karena material disiapkan sebelum dilakukan pencetakan. Metode ini banyak diterapkan pada industri pesawat terbang. Kelemahannya adalah bentuk komponen terbatas pada bentuk-bentuk yang sederhana. Kelompok metode manufaktur kedua, matriks dicampurkan bersama-sama dengan seratnya dalam cetakan, seperti pada *Bulk Moulding Compound* (BMC), *spray moulding*, *filament winding* dan *injection moulding*. Pada komposit berlapis, pencampuran serat dengan matriks juga bisa dilakukan dengan cara lapis demi lapis, di mana resin dimasukkan di antara lapisan serat. Termasuk metode ini adalah metode *hand layup*, dengan peletakan serat secara manual dan metode RFI (*resin film infusion*), di mana film termoplastik resin diletakkan di antara lapisan serat di dalam cetakan, kemudian ditekan dan dipanaskan. Metode manufaktur berikutnya adalah metode *resin infusion*, di mana beberapa lapis serat kering (tanpa resin) dibentuk dahulu (*preform*) di

dalam cetakan, kemudian resin diinjeksikan ke dalam preform serat tersebut sampai mengisi rongga-rongga di antara serat. Resin bisa dipompakan ke dalam preform, seperti pada *resin transfer moulding* (RTM) atau masuk ke sela-sela preform serat karena vakum yang disebut *vacuum assisted resin infusion* (VARI).

Dalam pembuatan komposit dengan termoplastik, permasalahan utamanya adalah sulitnya matriks masuk ke sela-sela serat, karena, walaupun dipanaskan, viskositasnya masih cukup tinggi. Meskipun komposit termoset masih mendominasi sektor otomotif, kedirgantaraan, transportasi, dan konstruksi, akan tetapi aplikasi baru yang melibatkan produksi komposit termoplastik terus dikembangkan, menawarkan pendekatan baru untuk pemecahan masalah ini. Karena itu, metode pembuatan komposit dengan matriks termoplastik, kebanyakan melibatkan metode *injection molding*, karena metode ini bisa mencairkan butiran resin sekaligus mencampur serat.

Akhir-akhir ini berkembang metode *additive manufacturing* (AM) untuk pembuatan komponen komposit termoplastik. Metode ini bisa menghasilkan produk dengan bentuk yang lebih rumit dibanding *injection molding*. Dalam proses ini, bahan ditambahkan secara lapis demi lapis untuk membuat komponen tiga dimensi langsung dari model CAD (*computer aided design*). Banyak metode untuk proses ini, tetapi metode *fuse deposition modelling* (FDM) merupakan teknologi yang mendominasi dengan pangsa pasar saat ini sebesar 44%. Proses ini menggunakan filament PVA atau ABS yang telah dicampur serat penguat, dicairkan di ujung nozel, yang kemudian di 'print' di *print bed*, sehingga sering disebut *3D Printing*. Untuk proses ini diperlukan serat pendek sehingga bisa menggunakan serat nano seperti *carbon nano tube* (Zhang et al. 2016), atau *graphene* (Morgan et.al, 2021).

Dengan *injection molding* dan AM, berbagai macam bentuk komponen bisa dibuat, namun hanya bisa menggunakan serat pendek dengan fraksi volume serat rendah, dan arah serat yang acak.

Untuk serat panjang dengan termoplastik, bisa dilakukan dengan metode ekstrusi dalam bentuk balok profil seperti C, W, T, I, dan L. Selain itu, telah berhasil dikembangkan mesin untuk menggabungkan metode ekstrusi pada injection moulding dengan metode pultrusi sehingga berhasil dibuat komposit thermoplastic serat panjang dengan fraksi volume relatif tinggi (Cahyo, et.al. 2020, dan Cahyo, et.al. 2021]. Selain itu, dengan metode *overmoulding* menggunakan mesin yang sama bisa pula dibuat komposit termoplastik polyamide 6 hybrid serat pendek dan serat panjang (Rochardjo and Budiyanoro 2021).

Pengembangan metode yang lain adalah pengembangan dua teknik proses baru untuk memproduksi komponen komposit termoplastik dengan fraksi volume serat yang tinggi, yaitu metode pemrosesan reaktif dan metode peleburan atau pelelehan. Pemrosesan reaktif berfokus pada polimerisasi *in-situ*, dimulai dari monomer dengan viskositas rendah sehingga bisa masuk ke sela-sela serat, kemudian diteruskan dengan reaksi polimerisasi, yang dipicu oleh kenaikan suhu (Sattar et al. 2022). Proses kedua, yaitu pelelehan matriks, melibatkan pelelehan matriks thermoplastic yang berada di antara serat dengan penekanan pada suhu tinggi. Ada Empat teknologi utama pada proses ini, yaitu laminasi film-serat, impregnasi serbuk, kain hibrida, dan benang hibrida, yang masing-masing mempunyai kekurangan dan keunggulannya sendiri-sendiri (Valente et al. 2022).

Otomasi dalam pembuatan komposit semakin diperlukan untuk menjaga kualitas dan kecepatan produksi. Walaupun ada berbagai cara pembuatan komposit, tidak semua cocok untuk dibuat dengan proses otomasi. Misalnya, hand layup berguna pada pembuatan komponen dengan jumlah sedikit, sehingga otomasi tidak efektif. Injection molding sesuai untuk jumlah banyak, tetapi mahal di cetakan. Proses AM adalah proses otomasi sejak awal, karena melibatkan mesin yang dikontrol komputer. Saat ini ada beberapa metode pembuatan yang mirip dengan AM dalam memproduksi komposit, yaitu *Automated Tape Laying* (ATL), *Automated Fiber*

Placement, (AFP), *Filament Winding*, FW., *automated dry fiber placement* (ADFP), *out-of-autoclave technology*, *automated composite draping*, dan sebagainya. Metode-metode ini bekerja berdasarkan model CAD yang sudah disiapkan. Dengan bantuan robot dan mesin CNC, proses produksi bisa dilakukan dengan lebih teliti dan lebih cepat (Jayasekara et al. 2022).

Perkembangan pemakaian

Hadirin Rapat Terbuka Dewan Guru Besar yang saya hormati,

Pemakaian komposit saat awal dikembangkan, banyak diterapkan pada konstruksi yang peka berat seperti pada pesawat terbang, roket, dan alat-alat olahraga. Saat ini, perkembangan pemakaian komposit telah meluas pada berbagai bidang, seperti transportasi darat dan laut, konstruksi bangunan gedung, konstruksi jembatan, bidang kesehatan, dan berbagai bidang lain. Dalam bidang kesehatan, misalnya, telah diterapkan material komposit untuk restorasi gigi (Cho et al. 2022). Penguatan beton telah menggunakan serat karbon dan CNT untuk structural health monitoring (Siahkouhi et al. 2021), nano cellulose dan graphene dipakai untuk komponen elektronik karena keunggulan di konduktifitasnya (Yang et al. 2023), dan lain sebagainya yang tidak terbatas.

Perkembangan struktur komposit

Komponen yang dibuat dari bahan komposit, bisa berbentuk plat komposit berlapis dengan berbagai arah serat. Struktur komposit yang memberikan kekakuan lengkung tinggi dan bobot rendah, bisa diberikan oleh struktur sandwich. Struktur ini biasa dipakai pada pesawat terbang dengan *core* (lapisan tengah) dari *honeycomb* aluminium. *Core* ini bisa pula dibuat dengan material ringan seperti kayu albasia (Rochardjo, HSB., et. al., 2008)..

Kelemahan struktur sandwich adalah, semakin tinggi kekakuan yang diinginkan, maka diperlukan struktur yang semakin tebal. Untuk mengatasi hal ini, telah dikembangkan struktur komposit yang ringan untuk komposit ber dinding tipis, yaitu struktur *isogrid*. Tergantung pada konfigurasi, struktur komposit Isogrid tidak hanya merupakan solusi teknik terkuat, tetapi komposit Isogrid serat karbon juga dapat memiliki berat hingga setengah dari berat aluminium, dan 30% lebih kuat (Isogridcomposite.com, 2023). Terlebih, karena material komposit tidak mudah rusak dalam kondisi basah, maka struktur isogrid ini sangat ideal diterapkan di semua aspek transportasi di mana bobot ringan dan kekuatan tinggi merupakan suatu keharusan.

Peluang material komposit di bidang otomotif

Ada kriteria tertentu agar suatu material bisa dipakai di sebuah kendaraan modern. Kriteria tersebut meliputi aturan lingkungan dan keamanan dan kenyamanan penumpang. Seperti bisa disela dari uraian di atas, material komposit memberikan peluang cukup besar untuk diaplikasikan di kendaraan dalam perannya mengurangi polusi dari sisi pengurangan berat kendaraan, harga dan proses manufaktur. Beberapa eksperimen telah dilakukan untuk menerapkannya, pada beberapa elemen mobil misalnya brake pad dengan komposit phenolic (Nawang Sari et al. 2020), pegas daun dengan CFRP (Airale et al. 2017), crash box dengan komposit bambu (Saputra, Jamasri, and Rochardjo 2018), panel interior dengan komposit polypropylene diperkuat sabut kelapa (Ayrilmis, et.al, 2011), lengan suspensi (Carello and Airale 2014), bahkan sampai *rack and pinion* (Chopane et al. 2018), dan piston mesin dengan *metal matrix composite* (Falsafi et al. 2017).

Keuntungan pemakaian komposit pada otomotif, di antaranya adalah tahan dampak sehingga aman bagi penumpang, tahan terhadap fatik dan korosi sehingga umur panjang, kekuatan spesifik tinggi, sehingga mengurangi berat, arah serat bisa didesain sesuai arah

tegangan yang dialami komponen, sehingga bisa hemat bahan, dan masih banyak lagi

Tantangan

Di sisi lain, secara umum, komposit lebih getas dari logam. Kondisi ini memerlukan pemikiran desain struktur, sehingga komponen komposit tidak mudah rusak, misalnya menggunakan serat yang lebih tangguh, atau diperlukan desain struktur yang bersifat *fail safe design*. Kelemahan yang lain adalah matriks lebih mudah terdegradasi oleh lingkungan, karena itu diperlukan perlindungan yang baik, atau diaplikasikan untuk struktur interior. Selain itu, komposit serat searah lemah pada arah tegak lurus serat. Ini bisa diatasi dengan desain material sedemikian sehingga mempunyai kekuatan yang cukup ke arah beban, misalnya dengan serat anyam, atau arah serat random. Hal terakhir adalah biaya material dan manufaktur yang mahal. Ini tentunya memerlukan inovasi, ide dan pengembangan agar harga material semakin rendah. Selain itu diperlukan metode-metode pembuatan yang inovatif sehingga proses manufaktur menjadi lebih cepat, baik dan biaya rendah.

Kesimpulan

Sebagai kesimpulan, material komposit, adalah material yang menjanjikan sebagai material yang bisa digunakan untuk mengurangi berat kendaraan, dengan masih tetap menjaga fungsional dan keamanannya, Tetapi, bahan ini masih ada banyak tantangan dalam pemakaian, pembuatan, dan pengembangan material itu sendiri, yang variasinya banyak sekali, yang hanya dibatasi oleh kemampuan inovasi manusia.

Di penghujung pidato ini, izinkan saya secara khusus mengucapkan terima kasih pada semua pihak yang telah berperan luar biasa dalam perjalanan hidup saya hingga sampai pada titik penting ini.

Ucapan dan penghargaan tertinggi saya sampaikan kepada pemerintah Republik Indonesia yang telah memberikan amanah jabatan guru besar dalam bidang Ilmu Teknik Mesin. Ucapan terima kasih dan rasa bangga yang besar saya dedikasikan pada Universitas Gadjah Mada, Pimpinan Universitas, Rektor dan jajaran Wakil Rektor, Dewan Guru Besar, Senat Universitas Gadjah Mada, dan Majelis Wali Amanah..

Ucapan terima kasih saya sampaikan untuk bapak-bapak dan ibu-ibu guru saya di SD Kebakkramat III, SMPN Kebakkramat, dan SMAN 3 Yogyakarta yang telah memberikan landasan yang luar biasa dalam mematri jiwa dan dasar-dasar akademik yang kuat untuk pendidikan yang lebih lanjut. Rasa terima kasih yang tak terhingga saya haturkan untuk semua dosen-dosen saya di Teknik Mesin UGM atas bekal keilmuan yang lengkap, dan semangat studi yang luar biasa. Terima kasih juga kami haturkan untuk para promotor dan penguji Program S2 dan S3 Universitas Keio, Jepang, terutama Prof Masao Shimizu, Prof Jun Komotori dan Prof. Yasushi Miyano, atas bimbingan dan pengajaran dalam memelihara dan mengembangkan keingin-tahuan.

Selanjutnya, terima kasih yang tulus saya sampaikan pula pada jajaran pimpinan dan Dekan, Wakil Dekan, dan anggota senat Fakultas Teknik yang memberi dukungan penuh sejak dari awal proses pengajuan dan penilaian sampai tahapan promosi ini. Tanpa dukungan tersebut mustahil saya ada di sini.

Selanjutnya, saya persembahkan capaian ini untuk semua sahabat di Departemen Teknik Mesin dan Industri, semoga dengan capaian ini bisa memberikan sumbangsih dalam perkembangan keilmuan dan kelembagan DTMI. Untuk para dosen saya di Teknik Mesin, Alm Bpk Dharmawan Tjipto Harijono, Alm Bpk Tjahyono Adi, Alm Bpk Samsudin, Alm Bpk Sudaryono, Alm. Bp. Subagio, Alm. Bp Sunardjo, Alm. Bp. Subarmono, Almh. Ibu Endang Rukmini, Alm. Bp. Sutrisno, Bp Sugijarto PS, Bp. Greg. Haryanto, Bp. Arief Dharmawan, Bp. I Made Suardjaya, Bp. Hermawan, Bp. Prajitno, Bp. Soekrisno, Bp. Mujijana, dan Bp. Janu Pardadi, terima

kasih telah membuka jalan bagi saya untuk menimba ilmu dan mengabdikan di departemen ini. Untuk para “mentor” saya, terutama Prof. Indarto yang telah menyemangati saya terus menerus dalam pencapaian ini, para “senior”, Prof Samsul Kamal, Prof Harwin, Prof. Jamasri, Prof Alva, Prof Deendarlianto, dan Prof Budi Hartono, Terima kasih atas dorongannya. Juga untuk para “junior”, Prof Bertha, Prof. Kusmono dan Prof Gesang, terima kasih untuk semangatnya. Juga untuk seluruh teman dosen dan tendik di DTMI, terima kasih atas kerjasama yang baik selama ini dan seterusnya.

Rekan-rekan M-77, Teknik Mesin UGM angkatan 1977 yang selalu kompak sejak mahasiswa sampai sekarang, telah mewarnai hari-hari saya dalam berbakti di kampus ini. Juga rekan-rekan penerima beasiswa Hitachi yang selalu supportif dan hangat.

Terima kasih dan penghargaan yang tinggi saya sampaikan juga kepada Belmawa Dikti, Puspresnas, dan teman-teman juri Kontes Robot Indonesia, yang sudah sejak tahun 2006 bersama-sama membangun, membina dan memajukan keilmuan robot khususnya di bidang kontes robot.

Selanjutnya, terima kasih juga saya sampaikan untuk sahabat-sahabat Pad’s 76, para ustadz dan jamaah masjid Al marhahamah dan warga lingkungan RW 66 PCGP yang banyak memberi warna warni kehidupan, bermasyarakat dan beragama.

Tidak kalah penting, adalah untuk para mahasiswa-mahasiswi kebanggaan saya pada berbagai program studi di DTMI UGM, baik yang sedang menempuh studi S-1, S-2, dan S-3, ataupun yang telah menjadi alumni di mana saja berada. Terima kasih untuk diskusi-diskusi cerdasnya.

Selanjutnya, Terima kasih yang tulus dan tak bertepi, saya persembahkan pada orang-orang terkasih yang jasanya tak akan bisa saya balas, almarhum ayahanda dan almarhumah ibunda tercinta Bapak dan Ibu Sunarto Hadiharsoyo. Banyak kenangan sebagai ungkapan kasih yang tertoreh di hati yang tak kan terlupakan. Kakak pertama Almarhum Mas Bud, Mas Sunayoko Budi Rochadi dan keluarga yang telah mengajarkan dan memberi contoh semangat dan

usaha tak kenal lelah, juga kakak kedua, almarhumah mbak Rum, Siti Rumini, yang mengajarkan kesabaran, pengorbanan dan ketulusan, kakak ketiga almarhum mas Cuk, Imam Subroto yang selalu memberi kehangatan dalam persaudaraan. Bagi kelima-limanya, semoga Allah menyayangi mereka dan memberikan surga terbaik-Nya. Terima kasih juga saya sampaikan semua kakak, mbak Wati, mbak Pailah, dan adik-adik saya, Wid, Edi, Tin dan Antyo dan keluarganya, yang telah memberi warna dalam kehidupan berkeluarga bersama yang saat ini bisa hadir maupun yang tidak bisa hadir menemani dalam momen bahagia ini.

Selanjutnya, persembahkan spesial tentunya untuk keluarga kecil saya yang menemani dalam pencapaian ini, isteri saya, Dra. Siti Mahmudah MPd., serta dua putra kami Fistyan Ikhsan Wibowo, S Kom, M.Eng, dengan keluarga kecilnya, dan Ahmad Miftah Firdausi. Terima kasih untuk doa dan waktu yang kalian ikhlaskan untuk mendukung Bapak dalam perjalanan yang tak mudah dan tak jarang terjal ini. Mudah-mudahan momen ini melengkapi rasa cinta Bapak dan menginspirasi langkah kalian berdua untuk kesuksesan di masa-masa mendatang.

Juga tak lupa matur sembah nuwun untuk bapak dan ibu mertua, almarhum Bapak Ibu Tamam Notosiswoyo serta keluarga besar Bani Tamam, terima kasih atas doa dan kasih, serta suasana kekeluargaan yang terbangun selama ini. Saya juga tidak akan melupakan pula ucapan segala doa kasih keluarga besar Trah Sastroharsayan dan Trah Poncoharsayan, serta Trah Prawiro Sawego dan semua saudara-saudara dan keluarga besar yang hari ini hadir ataupun yang tak bisa hadir di sini.

Pada akhirnya, terima kasih kepada semua hadirin yang sudah meluangkan waktu untuk datang dan bersabar mendengarkan pidato ini hingga tuntas. Semoga Allah selalu memberikan kesehatan dan mendampingi kita dalam upaya inovasi, berjuang, dan berkarya untuk membangun masyarakat yang lebih baik.

Demikianlah pidato yang saya sampaikan, mohon maaf atas segala kekurangan.

Terima kasih

Wassalamualaikum Warrahmatullohi Wabarokatuh

DAFTAR PUSTAKA

- ABMComposite. 2023. "ArxBioX, The Sustainable Material Solution."
- Ageyeva, T, I Sibikin, and JG Kovács. 2019. "A Review of Thermoplastic Resin Transfer Molding: Process Modeling and Simulation." *Polymer* 11(155).
- Airale, Andrea et al. 2017. "Function Integration Concept Design Applied on CFRP Cross Leaf Spring Suspension." *International Journal of Automotive Composites* 3(2/3/4): 276.
- Cao, Ke et al. 2020. "Elastic Straining of Free-Standing Monolayer Graphene." *Nature Communications* 2020 11:1 11(1): 1–7. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-14130-0> (September 21, 2023).
- Carello, Massimiliana, and Andrea Giancarlo Airale. 2014. "Composite Suspension Arm Optimization for the City Vehicle XAM 2.0." *Advanced Structured Materials* 54: 257–72.
- Cho, Kiho et al. 2022. "Dental Resin Composites: A Review on Materials to Product Realizations." *Composites Part B: Engineering* 230: 109495.
- Chopane, Ashwin et al. 2018. "Design and Analysis of Plastic Gears in Rack and Pinion Steering System for Formula Supra Car." *Materials Today: Proceedings* 5(2): 5154–64.
- Composite World. 2022. "Materials & Processes: Fibers for Composites."
- Darmanto, S., **HSB Rochardjo**, Jamasri, and R Widyorini. 2017. "Effects of Steaming and Steam Explosion on Mechanical Properties of Snake Fruit (Salacca) Fiber." *International Journal of Engineering and Technology* 9(1): 150–57.
- DuPont. 2023. "Kevlar for PPE." <https://www.dupont.com/personal-protection/kevlar-for-ppe.html>, diakses 24 Sept 2023)
- EPA, US Environmental Protection Agency. 2020. "GHGRP 2020: Reported Data." *Greenhouse Gas Reporting Program (GHGRP)*. <https://www.epa.gov/ghgreporting/ghgrp-2020-reported-data>, diakses 24 September 2023.
- EPA, US Environmental Protection Agency. 2023. "Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle." *Green Vehicle*

- Guide*, <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>, diakses 24 September 2023.
- Energy.gov, 2023, *Lightweight Materials for Cars and Trucks, Vehicle Technologies Office*, <https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks#:~:text=Because%20it%20takes%20less%20energy%20to%20accelerate%20a,can%20result%20in%20a%206%25-8%25%20fuel%20economy%20improvement>. Diakses 24 Sep 2023.
- Falsafi, Javad, Malgorzata Rosochowska, Prashant Jadhav, and David Tricker. 2017. "Lower Cost Automotive Piston from 2124/SiC/25p Metal-Matrix Composite." *SAE International Journal of Engines* 10(4): 1984–92. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2017-01-1048/> (September 21, 2023).
- Fatkurrohman, **HSB Rochardjo**, Ahmad Kusumaatmaja, and Ferry Yudhanto. 2020. "Extraction and Effect of Vibration Duration in Ultrasonic Process of Cellulose Nanocrystal (CNC) from Ramie Fiber." In *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc.
- Gibson, Ronald F. 2012. *Principles of Composite Material Mechanics*. CRC Press.
- Hofmann, Mateus A. et al. 2022. "Biobased Thermosetting Polyester Resin for High-Performance Applications." *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 10(11): 3442–54. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acssuschemeng.1c06969> (September 21, 2023).
- Honeywell. 2023. "Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber." <https://industrial.honeywell.com/us/en/products/high-strength-fibers/ultra-high-molecular-weight-polyethylene-fiber> (September 24, 2023).
- Isogridcomposites.com, 2023, *Isogrid Composite Solutions The Super Strength Light Weighting Answer*, <http://isogridcomposites.com>, Diakses 25 Sept 2023.
- Jayasekara, D et al. 2022. "Level of Automation (LOA) in Aerospace Composite Manufacturing: Present Status and Future Directions towards Industry 4.0." *Journal of Manufacturing*

- Systems* 62: 44–61.
- Johnson, T., 2018, "High Temperature Thermoplastics." ThoughtCo, thoughtco.com/high-temperature-thermoplastics-820349, diakses 24 September 2023
- Kang, Hailan et al. 2021. "Synthesis and Characterization of Biobased Thermoplastic Polyester Elastomers Containing Poly(Butylene 2,5-Furandicarboxylate)." *RSC Advances* 11(25): 14932–40..
- Kompas.com. 2019. "4 Kelebihan Rangka ESAF Pada Motor Honda." <https://otomotif.kompas.com/read/2019/09/11/094200415/4-kelebihan-rangka-esaf-pada-motor-honda> (September 21, 2023), diakses 24 September 2023.
- Li, Wencai, and G Palardy. 2023. "Engineering Investigation of Welding Repair Methods for Thermoplastic Composite Joints." *Composites Part B : Engineering* 264.
- Marsyahyo, Eko, Soekrisno, **HSB Rochardjo**, and Jamasri. 2008. "Identification of Ramie Single Fiber Surface Topography Influenced by Solvent-Based Treatment." *Journal of Industrial Textiles* 38(2): 127–37. <http://jit.sagepub.com> (September 22, 2023).
- Mujiyono, M, J. Jamasri, **HSB Rochardjo**, and JP Gentur Sutapa. 2010. "Mechanical Properties of Ramie Fibers Reinforced Biobased Material Alternative as Natural Matrix Biocomposite." *International Journal of Materials Science* 5(6): 811–24. <http://www.ripublication.com/ijoms.htm> (September 21, 2023).
- Nawang Sari, P, **HSB Rochardjo**, Jamasri, and AT Waskito. 2020. "Optimization of the Ternary Combinations of Rockwool-PAN-Cellulose Fibers for the Best Fade-Recovery Performance in Nonasbestos Organic Brake Pad Composite." *International Journal of Automotive Engineering* 11(2).
- Qiu, Yang et al. 2018. "Thermoplastic Polyester Elastomer Composites Containing Two Types of Filler Particles with Different Dimensions: Structure Design and Mechanical Property Control." *Composite Structures* 197: 21–27.
- Rochardjo, HSB**. 2007. "Ragam Patah Spesimen Tarik Bertakik Busur Lingkaran Pada Bahan CFRP Serat Searah : Pengaruh Rasio Ketebalan (Kedalaman Takik)." *Forum Teknik* 21(255–

264).

- Rochardjo, HSB,** and Cahyo Budiyanoro. 2021. “Manufacturing and Analysis of Overmolded Hybrid Fiber Polyamide 6 Composite.” *Polymers 2021, Vol. 13, Page 3820* 13(21): 3820. <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/21/3820/html> (September 21, 2023).
- Rochardjo, HSB,** Fathkhurrohman, A Kusumaatmaja, and F Yudhanto. 2021. “Fabrication of Nanofiltration Membrane Based on Polyvinyl Alcohol Nanofibers Reinforced with Cellulose Nanocrystal Using Electrospinning Techniques.” *International Journal of Technology (IJTech)* 12(2).
- Rochardjo, HSB,** J Komotori, M Shimizu, and Y Miyano. 1997. “Effects of the Fiber Content on the Longitudinal Tensile Fracture Behavior of Uni-Directional Carbon/Epoxy Composites.” *Journal of Materials Processing Technology* 67(1–3): 89–93.
- Rochardjo, HSB,** DC Mutiara, S Soekrisno, and K Kusmono. 2015. “Effects of Alkali Treatment of Nata De Cassava on Tensile Strength and Morphology of Bacterial Cellulose Sheet.” *International Journal of Applied Engineering Research* 10(7): 16393–98.
- Rochardjo, HSB,** M Shimizu, J Komotori, and Y Miyano. 1995. “Effects of Specimen Configuration on Tensile Fracture Mechanism of Unidirectional CFRP.” *Japan Society of Mechanical Engineers Series A* 61(582): 313–18.
- Rochardjo, HSB,** Fathkhurrohman, A Kusumaatmaja, and F Yudhanto. 2021. “Fabrication of Nanofiltration Membrane Based on Polyvinyl Alcohol Nanofibers Reinforced with Cellulose Nanocrystal Using Electrospinning Techniques.” *International Journal of Technology (IJTech)* 12(2).
- Rochardjo, HSB.,** Jamasri, Yudhanto, F., 2019, “Extraction of Natural Fibers by High-Speed Blender to Produce Cellulose Sheet Composite”, *International Review of Mechanical Engineering*, Volume 13, No. 12
- Rochardjo, HSB,** Jamasri, Soekrisno, Diharjo, K, 2007, “Impact Properties of Kenaf-Albizzia Sandwich.Composite Panel”, *Proceeding Internatinal Workshop Green Composite (IWGC 5)*, Japan Society of Materials Science (JSMS), Committee of Composite Materials, Fukushima, Japan, August 8-9, 2008

- Saputra, H, Jamasri, and **HSB Rochardjo**. 2018. "The Crushing Behaviour of Bamboo Fibres Reinforced Epoxy Matrix Composite Tube under Quasi-Static Compression Loading." In *AIP Conf. Proc.*,
- Sattar, Siavash et al. 2022. "Mechanical Behavior of Long Discontinuous Glass Fiber Nylon Composite Produced by In-Situ Polymerization." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 154: 106779.
- Siahkouhi, M et al. 2021. "Utilization of Carbon Nanotubes (CNTs) in Concrete for Structural Health Monitoring (SHM) Purposes: A Review." *Construction and Building Materials* 309(22).
- Tencom. 2022. "The History of Glass Fiber." <https://www.tencom.com/blog/the-history-of-fiberglass> (September 24, 2023).
- Toraycma. 2023. "T1100G Technical Data Sheet-1." <https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/T1100G-Technical-Data-Sheet-1.pdf.pdf> (September 24, 2023).
- Valente, Marco, Ilaria Rossitti, Ilario Biblioteca, and Matteo Sambucci. 2022. "Thermoplastic Composite Materials Approach for More Circular Components: From Monomer to In Situ Polymerization, a Review." *Journal of Composites Science* 2022, Vol. 6, Page 132 6(5): 132.
- Xin, Guoqing et al. 2015. "Highly Thermally Conductive and Mechanically Strong Graphene Fibers." *Science (New York, N.Y.)* 349(6252): 1083–87.
- Yang, Hongbin et al. 2023. "Nanocellulose-Graphene Composites: Preparation and Applications in Flexible Electronics." *International Journal of Biological Macromolecules* 253: 126903.
- Yudhanto, F, Jamasri, **HSB Rochardjo**, and A Kusumaatmaja. 2021. "Experimental Study of Polyvinyl Alcohol Nanocomposite Film Reinforced by Cellulose Nanofibers from Agave Cantala Document Type : Original Article Authors F. Yudhanto 1 J. Jamasri 2 H. S.B. Rochardjo 2 A. Kusumaatmaja 3." *International Journal of Engineering* 34(4): 987–98.
- Yudhanto, Ferriawan, J Jamasri, and **Heru S.B. Rochardjo**. 2018. "Physical and Thermal Properties of Cellulose Nanofibers (CNF) Extracted from Agave Cantala Fibers Using Chemical-Ultrasonic Treatment." *International Review of Mechanical*

Engineering 12(7): 597–603.

Zhang, Meng et al. 2016. “Carbon Nanotube Reinforced Fused Deposition Modeling Using Microwave Irradiation.” *ASME 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Blacksburg, Virginia, USA

BIODATA



- Nama Lengkap : Prof. Ir. Heru Santoso Budi Rocharjjo,
M. Eng. Ph.D. IPM, ASEAN Eng.
- Tempat, Tgl lahir : Surakarta, 14 Juli 1958
- NIP : 19580714031003
- Pangkat/Golongan : Pembina Utama Muda/IV-C, 1 Oktober 2022
- Jabatan : Guru Besar, 1 Juli 2022
- Alamat kantor : Departemen Teknik Mesin dan Industri FT UGM
Jln. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281
- Email : heru-sbr@ugm.ac.id
- Keluarga : 1. Dra. Siti Mahmudah, MPd. (isteri)
2. Fistyana Ikhsan Wibowo S.Kom, MEng. (anak)
3. Indah Paramytha Putri, ST. (menantu)
4. Ahmad Miftah Firdausi (anak)
5. Kazuya Raqilla Evren (cucu)
- Alamat rumah : Perumahan Candi Gebang Permai Blok I No. 11,
Yogyakarta

Riwayat Pendidikan

SD	: SD Negeri Kebakkramat III, Kebak, Kebakkramat, Karanganyar, Jawa Tengah (1970)
SMP	: SMP Negeri Kebakkramat, Karanganyar (1973)
SMA	: SMA Negeri III Yogyakarta (1976)
S-1	: Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada (1985)
S-2	: Mechanical Engineering Department, Faculty of Science and Technology, Keio University, Tokyo, Japan, 1991)
S-3	: Faculty of Science and Technology, Keio University, Tokyo, Japan (1995)
Profesional Training	: Intellectual Property Right, JIII, Tokyo, Japan (1997)
Profesional Training	: NDT Technology, NEWI, UK (1998)
Profesional Training	: Training Program in Technology Education, Korea, (2001)
Profesional Training	: Spring Technology, Tokyo, Japan

Piagam Penghargaan

2012	: Penghargaan Kesetiaan 25 tahun (FT UGM)
2017	: Satyalancana Karya Satya XXX (Pemerintah Rep Indonesia)

Riwayat Pekerjaan

1986 – sekarang	: Dosen Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
1996 – 2000	: Pembantu Pengurus Jurusan Bidang I
2000 – 2006	: Pengelola S2 Teknik Mesin
2006 – 2016	: Kepala Lab Simulasi DTMI
2016 – 2022	: Kepala Lab CNC DTMI
5 – 6 Agustus 2010	: Dosen tamu di Summer School, The University of Tokushima , Japan.
2006 – sekarang	: Juri Kontes Robot Indonesia
2010 – 2012..	: Juri Kompetisi Desain Kincir Angin Tingkat Nasional
2011 – 2014	: Juri Kontes Muatan Roket Indonesia

2022 – sekarang : Ketua Kelompok Bidang Keahlian Manufaktur dan Desain Terintegrasi , DTMI UGM.

Publikasi Ilmiah 5 tahun terakhir.

Sinta ID : 30034.
Scopus h-index : 9
Google scholar i10-index : 10
Sinta score overall : 1.264

1. **Rochardjo, HSB**, Budiyantoro, C., Utomo, RSB, Yudhanto, F., 2023, *Manufacturing and Analysis of Mechanical Properties of Overmolded Hybrid Carbon Fiber Reinforced Polypropylene – Glass Fiber Reinforced Polyamide 6*, International Review of Mechanical Engineering (IREME) 17(5):226
2. Wahyudi N, **Rochardjo, HSB**, Waluyo, J, 2022, *Karakterisasi Permeabilitas Serabut Kelapa Sebagai Bahan Media Filtrasi*, Journal of Mechanical Design and Testing, Volume 4, No. 1
3. Atmaja; GPST, Budiman; K., Norchayo R.; **Rochardjo, HSB**; Puja, IGK; Muflikhun, MA., 2021, *Geometrical effect of SPCC bar by twisting test using graded load*, AIP Conf. Proc. 2338, 020001 (2021)
4. Hermawn S, **Rochardjo, HSB**, 2022, *Preliminary Design of Electric Linear Actuator for Hospital Bed Domestic Product*, Journal of Mechanical Design and Testing, Volume 4, No. 1
5. Budiyantoro C, **Rochardjo, HSB**, Nugroho, N, 2021, *Design, Manufacture, and Performance Testing of Extrusion-Pultrusion Machine for Fiber-Reinforced Thermoplastic Pellet Production*, Machines 2021, 9(2), 42, Volume 9, No. 42
6. **Rochardjo HSB**, Fatkhurohman, Yudhanto F, Kusumaatmaja, A., 2021, *Fabrication of Nanofiltration Membrane Based on Polyvinyl Alcohol Nanofibers Reinforced with Cellulose Nanocrystal Using Electrospinning Techniques*, International Journal of Technology, Volume 12, No. 2
7. Yudhanto, F, Jamasri, **Rochardjo, HSB**, Kusumaatmaja, A., 2021, *Experimental Study of Polyvinyl Alcohol Nanocomposite Film Reinforced by Cellulose Nanofibers from Agave Cantala*, International Journal of Engineering Transactions A: Basics, Volume Vol. 34, No. 4
8. Jamasri, **Rochardjo, HSB**., Nawangsari P., Waskito, AT., 2021, *Friction Modifiers Optimization on Tribological Properties of Non-asbestos*

- Organic (NAO) Brake Pad by DoE-Taguchi Method*, Tribology in Industry, Volume 43, No. 2.
9. **Rocharldjo, HSB.**, Budiyanoro C., 2021, *Manufacturing and Analysis of Overmolded Hybrid Fiber Polyamide 6 Composite*, Polymers, Volume 13, No. 21
 10. Budiyanoro, C., **Rocharldjo, HSB.**; Nugroho, G., 2021, *Overmolding of Hybrid Long and Short Carbon Fiber Polypropylene Composite: Optimizing Processing Parameters*, Journal of Manufacturing and Material Processing, Volume 5, No. 4
 11. Yudhanto F., Jamasri, **Rocharldjo, HSB.**, 2020, *Physical and Mechanical Characterization of Polyvinyl Alcohol Nanocomposite Made from Cellulose Nanofibers*, Materials Science Forum Submitted, Volume 988, No. 65
 12. Nawangsari P., Jamasri, **Rocharldjo, HSB.**, Waskito, AT., 2020, *Optimization of the ternary combinations of rockwool-PAN-cellulose fibers for the best fade-recovery performance in nonasbestos organic brake pad composite*, International Journal of Automotive Engineering, Volume 11, No. 2
 13. Budiyanoro, C., **Rocharldjo, HSB.**, Nugroho, N., 2020, *Effects of Processing Variables of Extrusionâ€“Pultrusion Method on the Impregnation Quality of Thermoplastic Composite Filaments*, Polymers, Volume 12, No. 12
 14. Sukmawan R, Saputr, LH.; Rochmadi, **Rocharldjo, HSB.**, 2019, *The effects of the blending condition on the morphology, Crystallinity, and thermal stability of cellulose microfibers obtained from Bagasse*, Indonesian Journal of Chemistry, Volume 19, No. 1
 15. Wiranata, A., Arief, A., **Rocharldjo, HSB.**, 2019, *Evaluasi Frame Sepeda saat Tabrakan Dengan Metode Ekplisit Elemen Hingga*, METAL: Jurnal Sistem Mekanik dan Termal, Volume Vol 3, No. 1
 16. **Rocharldjo, HSB.**, Ridlo, M., 2019, *Effects of Fiber Contents on Wear Resistance of Salacca zalacca Frond Fiber Reinforced Phenolic*, Materials Science Forum, Volume Vol 948.
 17. Sukmawan, R., Wildan, MW.; Saputri, LH., Rochmadi, **Rocharldjo, HSB.**, 2019, *Microfibrillated Cellulose Extraction from Bagasse Using a Modified Kitchen Blender*, Materials Science Forum, Volume Vol 948.
 18. Nawangsari P., Jamasri, **Rocharldjo, HSB.**, Waskito, AT., 2019, *BaSO₄-Friction Dust Filler Improves Friction Characteristic in Non-Asbestos*

Brake Pad Composite, International Review of Mechanical Engineering (IREME), Volume Vol 13, No. 9

19. **Rochardjo, HSB.**, Jamasri, Yudhanto, F., 2019, *Extraction of Natural Fibers by High-Speed Blender to Produce Cellulose Sheet Composite*, International Review of Mechanical Engineering, Volume 13, No. 12
20. Wiranata, A., Arief, A., **Rochardjo, HSB.**, 2019, *Studi Pengaruh Perubahan Sudut Head Tube dan Top Tube Pada Rangka Sepeda Balap terhadap Defleksi pada Fork dengan Metode Explicit Dynamics Elemen Hingga*, Journal of Mechanical Design and Testing, Volume Vol 1, No. 1
21. Yudhanto, F., Jamasri., **Rochardjo, HSB.**, 2018, *Physical and thermal properties of cellulose nanofibers (CNF) extracted from agave cantala fibers using chemical-ultrasonic treatment*, International Review of Mechanical Engineering, Volume Volume 12, No. 7

