

# jTEP

## JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

P-ISSN No. 2407-0475 E-ISSN No. 2338-8439

Vol. 5, No. 1, April 2017



Publikasi Resmi  
**Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia**  
(Indonesian Society of Agricultural Engineering)  
bekerjasama dengan  
**Departemen Teknik Mesin dan Biosistem - FATETA**  
Institut Pertanian Bogor



Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP) terakreditasi berdasarkan SK Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset dan Teknologi Nomor I/E/KPT/2015 tanggal 21 September 2015. Selain itu, JTEP juga telah terdaftar pada Crossref dan telah memiliki Digital Object Identifier (DOI) dan telah terindeks pada ISJD, IPI, Google Scholar dan DOAJ. JTEP terbit tiga kali setahun yaitu pada bulan April, Agustus dan Desember berisi 12 naskah untuk setiap monuron baik dalam edisi cetak maupun edisi online. Jurnal berkala ilmiah ini berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota **PERTETA** tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain: teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya pertanian, lingkungan dan bangunan pertanian, energi alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika pertanian, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi pertanian. Makalah dikelompokkan dalam *invited paper* yang menyajikan isu aktual nasional dan internasional, *review* perkembangan penelitian, atau penerapan ilmu dan teknologi, *technical paper* hasil penelitian, penerapan, atau diseminasi, serta *research methodology* berkaitan pengembangan modul, metode, prosedur, program aplikasi, dan lain sebagainya. Penulisan naskah harus mengikuti panduan penulisan seperti tercantum pada website dan naskah dikirim secara elektronik (*online submission*) melalui <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>.

**Penanggungjawab:**

Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia  
Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

**Dewan Redaksi:**

Ketua : Wawan Hermawan (Scopus ID: 6602716827, Institut Pertanian Bogor)  
Anggota : Asep Sapei (Institut Pertanian Bogor)  
Kudang Boro Seminar (Scopus ID: 54897890200, Institut Pertanian Bogor)  
Daniel Saputra (Scopus ID: 6507392012, Universitas Sriwijaya - Palembang)  
Bambang Purwantana (Universitas Gadjah Mada - Yogyakarta)  
Yohanes Aris Purwanto (Scopus ID: 6506369700, Institut Pertanian Bogor)  
Muhammad Faiz Syuaib (Scopus ID: 55368844900, Institut Pertanian Bogor)  
Salengke (Scopus ID: 6507093353, Universitas Hasanuddin - Makassar)  
I Made Anom Sutrisna Wijaya (Scopus ID: 56530783200, Universitas Udayana - Bali)

**Redaksi Pelaksana:**

Ketua : Rokhani Hasbullah (Scopus ID: 55782905900, Institut Pertanian Bogor)  
Sekretaris : Lenny Saulia (Scopus ID: 16744818700, Institut Pertanian Bogor)  
Bendahara : Hanim Zuhrotul Amanah (Universitas Gadjah Mada - Yogyakarta)  
Anggota : Dyah Wulandani (Scopus ID: 1883926600, Institut Pertanian Bogor)  
Usman Ahmad (Scopus ID: 55947981500, Institut Pertanian Bogor)  
Satyanto Krido Saptomo (Scopus ID: 6507219391, Institut Pertanian Bogor)  
Slamet Widodo (Scopus ID: 22636442900, Institut Pertanian Bogor)  
Liyantono (Scopus ID: 54906200300, Institut Pertanian Bogor)  
Administrasi : Diana Nursolehat (Institut Pertanian Bogor)

**Penerbit:** Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) bekerjasama dengan Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

**Alamat:** Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem,  
Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus Institut Pertanian Bogor, Darmaga, Bogor 16680.  
Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026,  
E-mail: [jtep@ipb.ac.id](mailto:jtep@ipb.ac.id) atau [jurnaltep@yahoo.com](mailto:jurnaltep@yahoo.com)  
Website: [web.ipb.ac.id/~jtep](http://web.ipb.ac.id/~jtep) atau <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>

**Rekening:** BRI, KCP-IPB, No.0595-01-003461-50-9 a/n: Jurnal Keteknikan Pertanian

**Percetakan:** PT. Binakerta Makmur Saputra, Jakarta

---

## Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bebestari yang telah menelaan (me-review) Naskah pada penerbitan Vol. 5 No. 1 April 2017. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Dr.Ir. Lady Corrie Ch. Emma Lengkey, M.Si (Fakultas Pertanian, Universitas Sam Ratulangi), Dr.Ir. Andasuryani, S.TP, M.Si (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas), Dr. Rudiati Evi Masithoh, STP, M.Dev.Tech (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Prof. Dr.Ir. Bambang Purwantana, MS (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Prof.Ir. I Made Supartha Utama, MS., Ph.D (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana), Prof.Dr.Ir. Sutrisno, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor), Dr. Sri Rahayoe, STP., MP (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Dr. Joko Nugroho Wahyu Karyadi. M.Eng (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Prof.Dr.Ir. Lilik Sutiarto, M.Eng (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. Abdul Rozaq, DAA (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. I Wayan Budiastara, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor), Dr. Diding Suhandy, STP.,M.Agr (Fakultas Pertanian, Universitas Lampung), Ir. Moh. Agita Tjandra, M.Sc, Ph.D (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas), Dr. Ir. Sitti Nur Faridah, MP (Jurusan Teknologi Pertanian, Universitas Hasanuddin), Prof.Dr.Ir. Budi Indra Setiawan, M.Agr (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor), Dr. Suhardi, STP., MP (Jurusan Teknologi Pertanian, Universitas Hasanuddin), Dr.Ir. Hadi K. Purwadaria, M.Sc (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor).

---

*Technical Paper*

## **Pemanfaatan TKKS Sebagai Pengisi Komposit Epoxy Untuk Struktur Bergerak Mesin CNC Perkayuan**

### *Utilization of EFB Fiber as Epoxy-Based Composite Filler for Moving Structure of CNC Woodworking Machinery*

Farkhan, Program Studi S3 Ilmu Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor, Email: [farkhan@cncindonesia.com](mailto:farkhan@cncindonesia.com)

Yohanes Aris Purwanto, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor, Email: [arispurwanto@gmail.com](mailto:arispurwanto@gmail.com)

Erizal Hambali, Departemen Teknik Industri Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Email: [eriza.h@gmail.com](mailto:eriza.h@gmail.com)

Wawan Hermawan, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor, Email: [wawanfateta@yahoo.com](mailto:wawanfateta@yahoo.com)

#### **Abstract**

*CNC machinery is widely used at various kind of industrial sector to manufacture of art products up to satellite products. Instead of its massive utilization in automotive and electronic industry which mostly use metallic component, wood working industry has been using it to produces furniture's, merchandises, and other house ware products which apply light weight non-metallic low density material. High removal rate in wood machining process needs high speed application due to its low density material; however most of wood working CNC machine is built on heavy steel structure for both its supporting structure and moving structure. In fact, the raw material is much lighter than the carrier itself. Its wasteful dynamic movement causes energy loses and vibrations that effect on machining accuracy, live of cutting tool, and productivity. This research applied new light weight composite material base on renewable resource of oil palm empty fruit bunch (EFB) natural fiber as filler material combine with polymer epoxy as it's matrix to be constructed as moving mechanical structure of high speed 3D CNC woodworking machine to improve its dynamic performance. Comparative analysis showed that it has better dynamic performance on high speed machining process compared with traditional cast iron material.*

**Keywords:** *efb, composite, cnc woodworking machine, epoxy-based composite filler*

#### **Abstrak**

Mesin Perkakas CNC (*Computerized Numerical Control*) digunakan luas oleh industri untuk memproduksi mulai dari benda-benda seni kerajinan hingga untuk membuat satelit. Selain pemanfaatannya secara besar-besaran di industri otomotif dan elektronika yang umumnya menggunakan komponen logam, industri perkayuan telah banyak menggunakannya untuk memproduksi mebel, barang kerajinan, dan peralatan rumah tangga lainnya dengan mengaplikasikan bahan bukan logam seperti kayu yang berberat jenis rendah dan ringan. Tingkat pemotongan yang tinggi pada proses permesinan kayu membutuhkan permesinan cepat akibat berat jenis bahannya yang rendah tersebut, namun mesin CNC perkayuan umumnya dibangun dengan struktur logam yang berat, baik untuk struktur penopang maupun struktur bergeraknya. Kenyataannya, bahan baku kayunya sendiri jauh lebih ringan ketimbang struktur yang menggerakkannya. Dinamika gerakan pada struktur bergerak yang berat ini menyebabkan pemborosan daya dan getaran berlebih yang mempengaruhi ketelitian, keawetan pahat potong, dan produktivitas. Penelitian ini mengembangkan bahan komposit ringan baru dengan memanfaatkan sumber terbarukan dari limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai bahan pengisinya dengan matriks polimer epoxy untuk dibangun sebagai struktur bergerak mesin CNC perkayuan metode permesinan cepat 3 dimensi, untuk meningkatkan unjuk kerja dinamikanya. Analisa perbandingan menunjukkan bahan ini memiliki unjuk kerja dinamik lebih baik pada proses permesinan cepat ketimbang menggunakan besi tuang sebagai bahan tradisional.

**Kata kunci:** *tkks, komposit, mesin CNC perkayuan, pengisi komposit epoxy*

*Diterima: 21 April 2016; Disetujui: 15 Juni 2016*

## Pendahuluan

Indonesia adalah negara penghasil minyak kelapa sawit mentah (CPO) terbesar di dunia dengan pertumbuhan luas areal selama 2004-2014 sebesar 7.6% dan memproyeksikan memproduksi 40 juta ton pada tahun 2020. Saat ini dari area 10.9 juta hektar lahan diproduksi 29.3 juta ton CPO yang diproduksi oleh 608 unit pabrik kelapa sawit yang tersebar tidak merata di seluruh pulau besar di Indonesia, dan terkonsentrasi di Pulau Sumatera (Kementan 2015). Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang merupakan 21%-24% bagian dari total keseluruhan tandan buah segar (TBS) masih belum dimanfaatkan secara optimal. Pabrik kelapa sawit (PKS) umumnya mengembalikan TKKS tersebut ke lahan perkebunan untuk dijadikan pupuk, Namun karena jumlahnya yang besar, dan biaya transportasinya yang mahal, serta tidak sebanding dengan kebutuhan pupuknya itu sendiri, maka akhirnya PKS menumpuk begitu saja TKKS ini di lahan terbuka. Penumpukan TKKS ini berpotensi menghasilkan gas metana yang terlepas ke udara menyebabkan kerusakan lapisan ozon.

TKKS adalah bahan yang keras dan kuat dan hampir memiliki kesamaan morfologis dengan sabut kelapa (Sreekala *et al.* 1997). Citra SEM (*scanning microscopic electron*) dari serat TKKS menunjukkan terdapatnya kekosongan pada bagian tengah yang dikelilingi struktur tubular berpori (Sreekala *et al.* 1997) dengan diameter rata-rata 0.7 mm dan morfologi permukaan berpori ini berguna menghasilkan ikatan mekanis yang lebih baik dengan bahan matriks *epoxy* dalam pembentukan komposit (Sreekala *et al.* 2004). Kompatibilitas dapat ditingkatkan dengan memberikan perlakuan alkali terhadap serat alam (Sgriccia *et al.* 2008) untuk menghilangkan lignin dan pemberian *coupling agent* untuk mendapatkan ikatan kimia antara serat dan matriks (Klason 1984).

Komposit serat alam yang bersifat terbarukan berpeluang menggantikan komposit berpenguat serat buatan yang tidak terbarukan dan lebih mahal. Serat TKKS mampu meningkatkan kekuatan tarik bahan *thermoplastic* PP (*polypropylene*) hingga 58% dengan fraksi berat serat 30% dalam ukuran 25  $\mu\text{m}$  dan penggunaan *coupling agent* MAPP (Khalid *et al.* 2008), dan mampu meningkatkan 35% kekuatan tarik bahan *thermosetting epoxy* dengan fraksi berat serat 12% dan ukuran serat nano (Abu Bakar *et al.* 2007). Namun, sejauh ini penggunaannya masih dalam skala penelitian karena kendala ekonomi dalam pengecilan ukuran serat TKKS itu sendiri. Untuk itu penelitian menghasilkan bahan komposit serat alam dengan proses pengecilan yang sederhana dan ekonomis perlu dilakukan agar layak secara ekonomi.

Densitas serat TKKS yang rendah sebagaimana ciri umum sifat fisik serat alam yang lain akan mempengaruhi berat massa bahan jadi

kompositnya, dan melalui keunggulan teknis inilah, penggunaan serat TKKS untuk struktur bergerak mesin CNC perkayuan dipertimbangkan. Kekuatan superior seperti penggunaan bahan besi tuang kelabu (*grey cast iron*) untuk struktur bergerak mesin CNC perkayuan adalah sebuah pemborosan, sekaligus merugikan *dynamic performance* proses permesinan cepat yang umum digunakan pada aplikasi permesinan kayu. Bahkan penurunan berat 34% pada struktur bergerak vertical dan 26% pada horizontal melalui penggunaan bahan hibrida *carbon reinforced epoxy* dengan struktur besi bertulang mampu meningkatkan kemampuan peredaman hingga 5.7 kali (Suh *et al.* 2008) dalam aplikasi permesinan cepat bahan baja karbon medium berdensitas 7.8  $\text{g/cm}^3$ . Permesinan kayu dengan bahan yang dipotong hanya berdensitas 0.6 – 0.8  $\text{g/cm}^3$  tentunya tidak membutuhkan bahan struktur bergerak yang superior seperti ilustrasi di atas, dan secara teori membutuhkan permesinan cepat karena bahan yang dipotong jauh lebih lunak dibandingkan bahan berbasis metal.

## Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan mengembangkan bahan komposit berpenguat serat alam dari TKKS yang akan menggantikan bahan tradisional *cast iron* untuk aplikasi struktur bergerak mesin CNC perkayuan melalui sifat fisiknya yang ringan, dan kekuatan spesifik yang tinggi.

## Bahan dan Metode

### Tahap Penelitian

Penelitian ini dibagi menjadi 3 tahap yang saling terkait, yakni sebagai berikut:

1. Pemilihan bagian serat alam TKKS yang memiliki kekuatan mekanis terbaik melalui analisa uji tarik untuk penguat bahan komposit.
2. Efek jumlah fraksi serat batang buah TKKS pada sifat fisik dan mekanik komposit berbasis *epoxy*.
3. Analisa unjuk kerja dinamis penggantian bahan struktur bergerak dari bahan *cast iron* menjadi *epoxy* berpengisi serat TKKS pada mesin CNC perkayuan.

### Tempat dan Waktu Penelitian

1. Penelitian tahap pertama dilaksanakan pada Maret 2014 hingga September 2014. Pengambilan sampel TKKS dilakukan di PKS milik Perkebunan Nusantara VIII Unit bisnis 1 kebun Cikasungka – Kabupaten Bogor. Pengolahan dan pemilahan serat dilaksanakan di PT CNC Controller Indonesia - Bekasi, sedangkan pengujian serat dilaksanakan di Laboratorium Bio Material LIPI – Cibinong, Kabupaten Bogor.

2. Penelitian tahap kedua dilaksanakan pada Oktober 2014 hingga Februari 2015. Proses fabrikasi komposit dilakukan di Workshop PT CNC Controller Indonesia – Bekasi. Pengujian sifat fisik dan mekanik bahan komposit dilaksanakan di Pusat Teknologi Material – BPPT – Puspitek – Serpong dan pengujian morfologi bahan komposit dilaksanakan di Laboratorium Batan – Puspitek – Serpong.
  3. Penelitian tahap ketiga dilaksanakan pada Maret 2015 hingga September 2015. Proses fabrikasi dan permesinan bahan komposit menjadi struktur bergerak mesin dilaksanakan di Workshop PT CNC Controller Indonesia, sedangkan pengujian struktur bergerak mesin CNC perkayuan berbahan komposit dilaksanakan di Laboratorium Mekatronika, Teknik Mesin – Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) – Surabaya.
- X.
3. Penelitian tahap ketiga menggunakan bahan yang sama dengan tahap kedua, hanya cetakkannya lebih besar mengikuti kebutuhan. Alat yang digunakan berupa mesin *milling* CNC merek Toshiba Shibaura tipe JRV-40 untuk membentuk geometri *X axis table unit* sebagai spesimen uji. Mesin uji berupa CNC *milling* mini dengan dimensi meja 185 x 140 mm, dan langkah kerja (X/Y/Z) 200 x 140 x 100 mm, dan putaran spindel 5000 RPM, buatan PT CNC Controller Indonesia, berikut mekanisme pencekaman benda kerja pengujian dan pahat potong berupa *ball endmill* berdiameter 3 mm. Alat pengujian berupa *accelerometer* 3 axis yang tertanam dalam modul National Instrument myRIO-1900 dengan *software* LabVIEW dan Lutron VB-8200 Vibration Meter. Pendataan sekaligus analisa *positioning error*, *percentage load*, dan *current* menggunakan *software* Delta ASDA Soft Dynamic Servo Analysis.

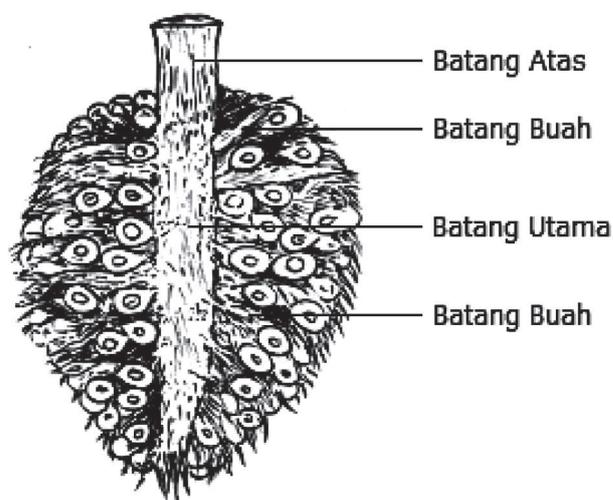
### Bahan dan Alat

1. Penelitian tahap pertama menggunakan bahan baku serat TKKS yang diambil setelah proses perebusan untuk menghindari kontaminasi. Bahan baku serat batang atas TBS sawit diambil dari perkebunan kelapa sawit tidak lama setelah pemanenan, juga untuk menghindari kontaminasi. Serat diolah dengan menggunakan alat-alat konvensional seperti pisau, dan rol penggiling manual yang terbuat dari pipa besi, kemudian serat diuntai secara manual dengan tangan. Untaian serat yang telah diklasifikasi kemudian diukur diameternya dengan menggunakan Mikroskop Optik jenis Zeiss Axio Imager dengan pembesaran 50× sebelum diuji tarik dengan menggunakan alat UTM (*universal testing machine*) Shimadzu AG-IS 1 kN, dan *software* Trapezium X; 2003 dengan kekuatan tarik maksimal 1 kN. Sebagian sampel serat juga diuji fisik dan kimia dengan basis kering.
2. Penelitian tahap kedua menggunakan bahan baku serat hasil pengolahan pada tahap pertama. Bahan *epoxy resin* berjenis *bisphenol-A* dan *hardener* berjenis *polyaminoamide* dari PT Justus Kimia Raya. Bahan *silane organo functional coupling agent* berjenis *glycidoxypropyltrimethoxysilane* berasal dari Wacker – Jerman tipe Geniosil GF 80. Bahan NaOH didapatkan dari toko kimia umum. Alat yang digunakan adalah mesin pengecil serat modifikasi dari alat *blender* yang dinaikkan putarannya, *mixer* dan *agitator*, *oven* dengan pengatur suhu, cetakan terbuat dari bahan plat besi, *compress air chamber* 5 bar hasil buatan sendiri, kompresor angin merek Hitachi, dan mesin *milling* CNC merek Toshiba Shibaura tipe JRV-40 untuk permesinan membentuk geometri spesimen uji tarik. Alat uji tarik menggunakan alat UTM (*universal testing machine*) Shimadzu AG – X plus, 250 kN, dengan *software* Trapezium

### Metode Seleksi Bagian Serat Alam TKKS

Proses pemilahan TKKS untuk memisahkan antara batang utama (BU) dan batang buah (BB) adalah dengan proses penyayatan menggunakan pisau secara konvensional. Gambar 1 menunjukkan morfologi serat TKKS yang mengklasifikasi serat berdasarkan susunan tubuh dan fungsi. Selain BU dan BB, sampel TKKS lainnya yang diuji adalah batang atas (BA) yang berdiameter paling besar dan mampu menopang beban tandan buah yang beratnya bisa mencapai 50 kg, namun tertinggal di lahan.

Ketiga jenis sampel (BA, BU, dan BB) diukur kadar airnya dengan basis kering, dan setelah itu sampel diambil secara acak masing-masing 50 buah, dan diukur diameternya. Pengukuran ini dimaksudkan untuk menghasilkan nilai luasan penampang A, saat akan merumuskan nilai kekuatan tarik berdasarkan persamaan 1 berikut.



Gambar 1. Klasifikasi serat TKKS berdasarkan susunan tubuh dan fungsi.

$$\sigma_{UT} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$\sigma_{UT}$  = kekuatan tarik *ultimate* (N/mm<sup>2</sup>),  
 F = gaya tarik puncak saat serat terputus (N),  
 A = luas penampang serat (mm<sup>2</sup>).

Pembuatan spesimen serat yang diuji menggunakan standar ASTM 3822-01. Serat terlebih dahulu dikeringkan hingga kadar air <40%. Spesimen yang disiapkan berjumlah 50 buah per bagian serat, sehingga total menjadi 150 buah spesimen. Setiap satu buah spesimen serat dibutuhkan dua lembar kertas karton ukuran 200 gram dan dibentuk dengan menggunakan pemotong kertas. Serat kemudian dilekatkan dengan menggunakan lem *epoxy* untuk menghasilkan cengkraman yang baik.

### Metode Menentukan Jumlah Fraksi Serat Batang Buah TKKS

Metode homogenisasi digunakan untuk menentukan sifat kontinum (*continuum properties*) secara makro dari sifat dalam skala mikro. Sifat-sifat makro diperoleh dengan cara menganalisa representasi elemen volume (RVE: *representative volume element*) pada komposit secara mikro. Sifat-sifat makroskopik dari komposit seperti densitas, kekakuan, *thermal*, dan *hygro expansion*, dan lain-lain ditentukan oleh sifat-sifat ekuivalen dari serat dan bahan matriks. Salah satu parameter dalam pemodelan mekanik adalah volume dari fraksi serat dan matriks. Volume fraksi adalah  $V_f$  dan  $V_m$  untuk masing-masing serat dan matriks.  $V_f$  dan  $V_m$  didefinisikan sebagai:

$$V_f + V_m = 1 \quad (2)$$

Hubungan tersebut di atas valid jika komposit berbentuk solid, seperti tidak mengandung pori-pori, dan dengan mengasumsikan bahwa tegangan dalam RVE adalah homogen. Kekakuan dari komposit dapat diprediksi dengan formulasi berikut (Aboudi, 1991):

$$D_c = V_f D_f + V_m D_m \quad (3)$$

$D_c$ ,  $D_f$  dan  $D_m$  adalah *stiffness* matriks dari komposit, serat dan matriks masing-masing.  $V_f$  adalah volume fraksi dari serat dan  $V_m$  adalah volume fraksi dari matriks. Persamaan (3) disebut sebagai Pendekatan Voigt, aturan pencampuran (ROM: *rule of mixture*) atau model penyambungan paralel (*parallel coupling model*). Pendekatan ini akan lebih dikenal dalam bentuk satu dimensinya:

$$E_c = V_f E_f + V_m E_m \quad (4)$$

$E_c$ ,  $E_f$  dan  $E_m$  adalah E-modulus dari masing-masing komposit, serat dan matriks. Jika *stress field*

diasumsikan homogen, matriks penuh (*compliance matrix*) dapat didekati dan bergantung pada (Aboudi 1991):

$$C_c = V_f C_f + V_m C_m \quad (5)$$

Format satu dimensinya seperti persamaan (6), yang disebut sebagai pendekatan Reuss atau Model *Coupling Series*.

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (6)$$

Berdasarkan penjelasan di atas, dapat diketahui bahwa kekakuan bahan komposit dalam menerima beban-beban mekanis dapat ditingkatkan dengan penggunaan bahan penguat serat yang memiliki kekuatan dan kekakuan tinggi, dan meningkatkan *wettability* yaitu dengan meningkatkan ikatan antar muka resin-serat. Dalam penelitian ini secara mekanis *wettability* juga ditingkatkan dengan pencucian serat menggunakan solusi NaOH 5% dan air destilasi selama 1 jam pada suhu 80°C dan setelah itu dikeringkan kadar airnya di dalam oven bersuhu 100°C selama 3 jam. Sementara itu secara kimia untuk meningkatkan kompatibilitas antara serat TKKS dan matriks *epoxy*, digunakan bahan *silane coupling agent* dengan komposisi 3% berat.

Campuran *epoxy resin* dan *hardener* menggunakan perbandingan 2:1 sesuai anjuran dalam *data sheet* bahan. Proses pencampuran dimulai dengan membasahi serat dengan bahan *coupling agent*, dilanjutkan dengan penambahan *epoxy resin*, dan diaduk dengan *mixer* dengan putaran 300 RPM selama 3 menit, kemudian ditambahkan *hardener* dan diaduk kembali dengan *mixer* berputaran 300 RPM selama 1 menit. Reaksi *crosslinking* antara bahan *Bysphenol A* dengan *Polyaminoamide* pada fase pembentukan *thermoset* diharapkan diikuti oleh ikatan secara mekanis serat dengan matriks *thermoset* dan secara kimia melalui *hydrogen bonding*. Dalam penelitian ini, untuk mempercepat hilangnya gelembung udara yang bisa menyebabkan *porosity* pada bahan komposit nantinya, dilakukan perlakuan tekanan dalam *chamber* bertekanan 3 – 4 bar selama 2 jam. Pengetesan bahan komposit yang dihasilkan menggunakan standar ASTM D638 yang dikhususkan untuk pengetesan kekuatan bahan polimer atau komposit.

### Metode Analisa Unjuk Kerja Dinamis Struktur Bergerak Mesin CNC Perkayuan

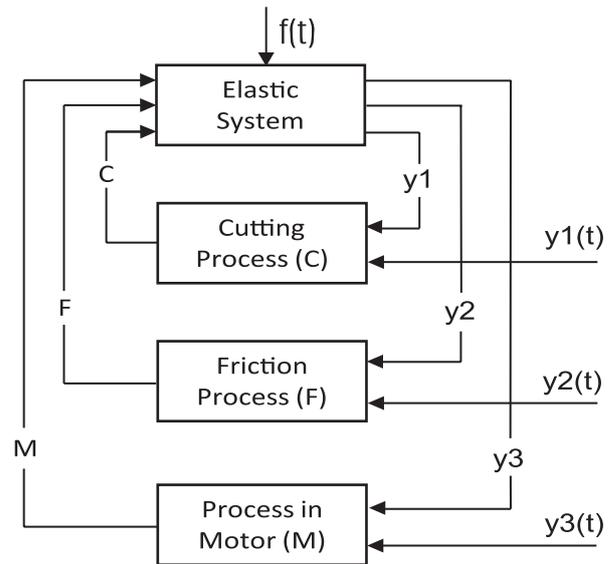
Mesin perkakas CNC (*computerized numerical control machine tool*) adalah sebuah elemen lup tertutup (*closed loop*) yang berinteraksi dengan proses pemotongan dan dapat direpresentasikan oleh masing-masing fungsi transfernya sebagai sistem tertutup (Gambar 2), dan setiap elemen tersebut mendapatkan gaya yang dinamis.

Perilaku dinamis dari mesin ini dipengaruhi oleh pergerakan alat pemotong atau benda kerja dan gaya pemotongan yang diterapkan di dalam koordinat arah tertentu yang menyebabkan perpindahan di ketiga arah koordinat tersebut, yang kemudian menimbulkan getaran. Namun, mempertimbangkan sulitnya menganalisis lingkaran tertutup berganda (*multiple closed loop system*) seperti diilustrasikan pada Gambar 2(a) sebagai sebuah sistem, maka pada penelitian ini metode analisa perilaku dinamis disederhanakan menjadi lingkaran tertutup tunggal, yang pada akhirnya menjadikannya 3 sistem proses, yakni proses pemotongan (*cutting process/CP*), proses gesekan (*friction process/FP*) dan proses pada motor sebagai penggerak utama (*motor process/MP*).

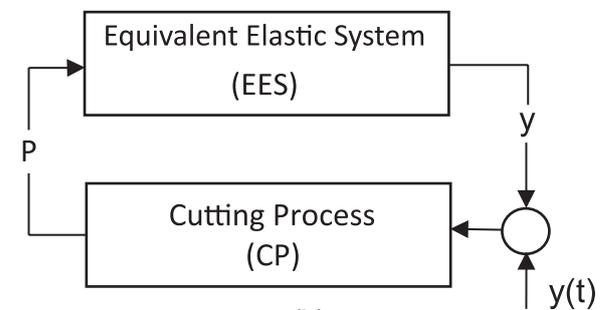
Sistem-sistem tunggal tersebut dianggap sebagai *equivalent elastic system* (EES). Jika misalnya EES dianggap sebagai sebuah elemen, unit-unit dari elemen tersebut adalah sebagai fungsi transfer ( $W_{EES}$ ) dalam mm/kgf, demikian pula unit-unit dalam fungsi transfer proses pemotongan ( $W_{CP}$ ), proses gesekan ( $W_{FP}$ ), dan proses di motor ( $W_{MP}$ ) adalah juga kgf/mm. Jika sinyal-sinyal gangguan-gangguan pada  $y(t)$  beraksi dalam proses pemotongan seperti diilustrasikan pada Gambar 2(b) dan  $f(t) = 0$ , maka operator diferensial  $d/dt$  digantikan oleh operator aljabar  $p$  dalam karakteristik dinamis, sehingga:

$$y = P \cdot W_{EES}(p) = [y(t) - y] W_{CP}(p) W_{EES}(p)$$

$$y[1 + W_{CP}(p) \cdot W_{EES}(p)] = y t W_{CP}(p) W_{EES}(p) \quad (7)$$

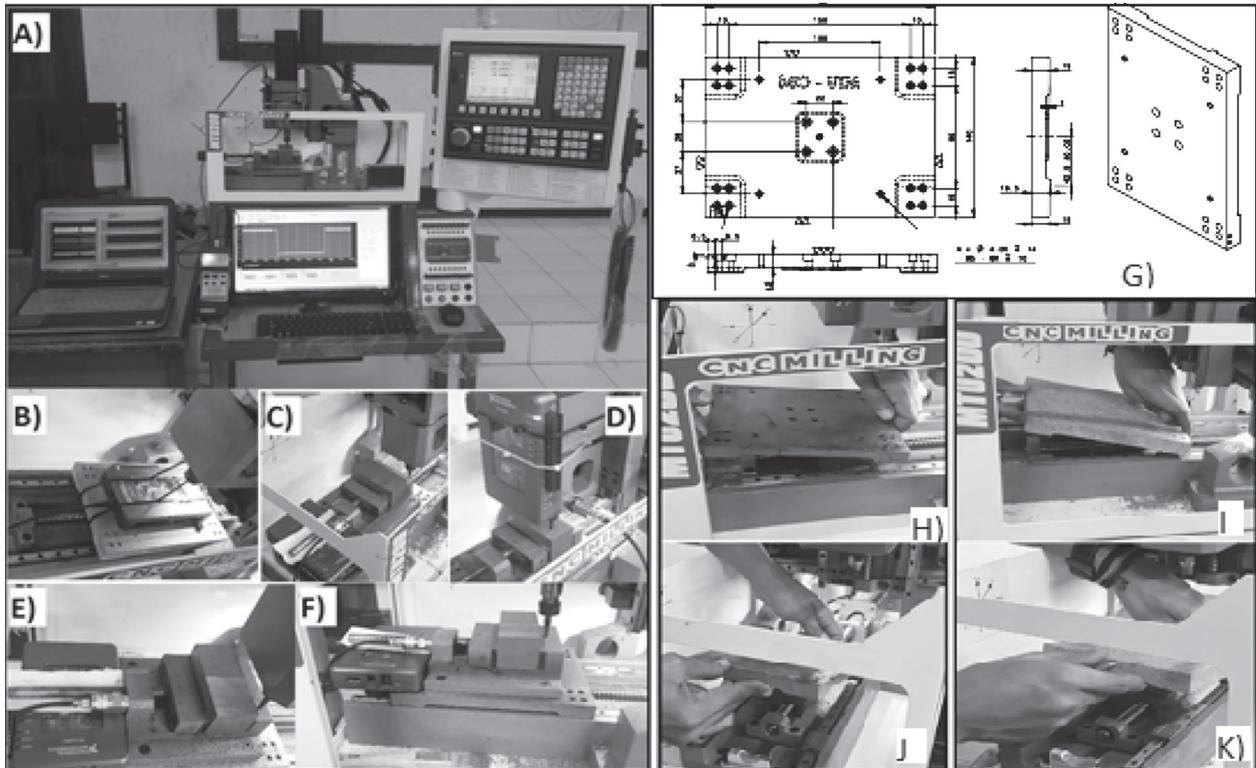


(a)



(b)

Gambar 2. (a). Sistem tertutup proses permesinan (b) Blok diagram EES.



Gambar 3. (A – F). Metode pemasangan accelerometer; (G) gambar kerja X axis table unit, (H – K) metode penggantian dan pemasangan struktur bergerak.

Tabel 1. Hasil pengujian sifat kimia tandan kosong kelapa sawit (TKKS).

No	Pengujian	Batang Buah		Batang Atas		Batang Utama		Standar Uji
		Hasil (%) <i>Dry Base</i>	SD (s)	Hasil (%) <i>Dry Base</i>	SD (s)	Hasil (%) <i>Dry Base</i>	SD (s)	
1	Water Content	10.910	0.099	5.983	0.064	7.173	0.037	TAPPI TM T412 OM94
2	Ethanol-Benzene Extractive content	2.696	0.007	3.007	0.035	2.956	0.014	TAPPI TM T204 OS76
3	Klason Lignin	13.533	0.047	19.801	0.231	17.258	0.248	TAPPI TM T222 OM88
4	Holo-Cellulose	49.495	0.385	62.066	0.465	60.148	0.145	TAPPI TM T203 OM93
5	$\alpha$ -Cellulose	30.282	0.669	38.220	0.408	36.143	0.107	TAPPI TM T429 CM01
6	Hemicellulose	19.485	0.669	23.517	0.408	24.107	0.107	By difference

Tabel 2. Hasil pengujian sifat fisik tandan kosong kelapa sawit (TKKS).

No	Sampel	Kadar Air (%)	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )
1	Batang Atas (BA)	19.03 +3.68	1.07+0.04
2	Batang Utama (BU)	19.01 $\pm$ 7.35	1.03+0.03
3	Batang Buah (BB)	16.00.+ 4.14	1.02+0.03

Tabel 3. Hasil pengujian sifat mekanik tandan kosong kelapa sawit (TKKS).

No	Sampel	$\sigma$ T.S (N/mm <sup>2</sup> )	SD
1	Batang Atas (BA)	108.29	23.07
2	Batang Utama (BU)	125.13	33.80
3	Batang Buah (BB)	152.85	33.53

Persamaan 7 secara pendekatan menyatakan bahwa gaya getaran disebabkan oleh aksi-aksi gangguan pada EES dan proses pemotongan (CP) (Mehta 1996). Getaran tersebut mempengaruhi keakuratan permesinan, produktifitas, dan masa pakai alat pemotong (*cutting tool*). Biasanya, amplitudo kecepatan getaran (*velocity*) dan spektrum getaran yang lebih tinggi akan terjadi pada frekuensi eksitasi yang dominan dan harmonik-harmoniknya, dan akan lebih tinggi lagi bila terjadi pada frekuensi alami (*natural frequency*) dari elemen-elemen EES tersebut.

Dalam penelitian ini, eksperimen penggantian struktur bergerak mesin dilakukan pada bagian *X axis table unit* yang merupakan bagian terdepan yang menerima gangguan gaya potong (CP), beban massa bahan yang dipotong (FP), sekaligus bergerak berpindah posisi (*displacement*) secara menerus melalui penggerak motor (MP). Gambar 3 menunjukkan pemasangan sensor getaran (*accelerometer*), gambar kerja *X axis table unit* dan metode penggantian dan pemasangan struktur bergerak. Kondisi pengujian dibagi menjadi dua bagian besar yakni; kondisi saat pemotongan (*cutting condition*) untuk merepresentasikan dan kondisi aktual ketika terjadi gaya potong, dan kondisi saat pemotongan kering (*dry run condition*) untuk merepresentasikan gerakan cepat struktur bergerak.

## Hasil dan Pembahasan

### Sifat Kimia, Fisik dan Mekanik Serat TKKS

Berdasarkan pengujian-pengujian yang

dilaksanakan, maka didapatkan hasil dari proses pemilahan serat TKKS melalui klasifikasi BA (batang atas), BU (batang utama) dan BB (batang buah) disajikan pada Tabel 1-3.

### Efek Jumlah Fraksi Serat Batang Buah TKKS pada Sifat Fisik dan Mekanik

Melalui pengujian fisik dan mekanik terhadap spesimen uji bahan komposit berpengisi TKKS, didapatkan data yang menunjukkan komposisi bahan serat dan matriks terbaik untuk aplikasi sebagai bahan struktur penggerak mesin CNC perkayuan. Pengujian diklasifikasi menjadi 5 bagian, yakni dengan komposisi fraksi berat massa serat 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%, dan hasil uji densitas ( $\rho$ ) adalah berturut turut: 1.07, 1.05, 1.02, 0.99, 0.96 g/cm<sup>3</sup>. Sedangkan hasil pengujian mekanik disajikan dalam Tabel 4.

### Unjuk Kerja Dinamis Struktur Bergerak X Axis Table Unit Berbahan Komposit

Melalui beberapa teknik pengujian, unjuk kerja dinamis struktur bergerak mesin CNC perkayuan yang menggunakan komposit (EFB FRE) diuji. Pengujian yang sama juga dilakukan dengan penggunaan bahan aslinya, yakni *cast iron*. Pengujian unjuk kerja dinamis untuk mendapatkan respon frekuensi bahan terhadap beberapa parameter gangguan, yakni CP, FP, dan MP, dan selanjutnya disajikan pada grafik-grafik berikut (Gambar 4-6).

### Pembahasan Umum

Hasil pengujian mekanis menunjukkan bahwa batang buah (BB) TKKS memiliki kekuatan tarik

Tabel 4. Hasil pengujian mekanik berupa uji tarik ( $\sigma_{T.S}$ ) dalam N/mm<sup>2</sup> bahan komposit.

Deskripsi	Fraksi Berat Serat					Metode
	0%	5%	10%	15%	20%	
Mean $\sigma_{T.S}$ N/mm <sup>2</sup>	41.01	27.43	31.72	26.6	21.71	ASTM D638
Sd (s)	3.73	2.74	1.52	2.85	1.33	

Tabel 5. Perbandingan sifat fisik-mekanik *cast iron* dan komposit 10wt% serat TKKS

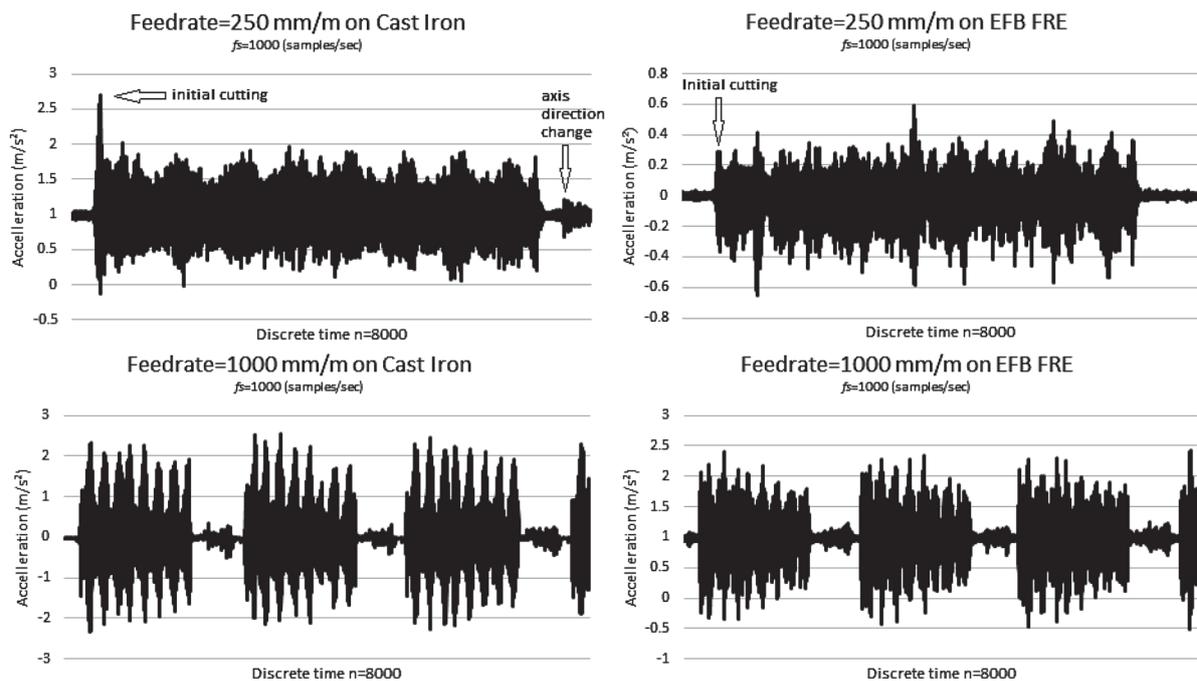
Spesifikasi teknis	<i>gray cast iron</i>	Komposit 10wt% serat
Volume (m <sup>3</sup> )	362.34	362.34
Berat (g)	2567	369
Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	7.08	1.02
Kekuatan tarik (N/mm <sup>2</sup> )	276	31.72
Kekuatan tarik spesifik (kN.m/kg)	38.9	31.1

terbaik, yakni 152.85 N/mm<sup>2</sup>. Batang buah memiliki densitas ( $\rho$ ) yang paling rendah dibanding dua bagian serat TKKS lainnya, yakni 1.02+0.03 g/cm<sup>3</sup>. Kadar Lignin yang terkandung dalam serat batang buah TKKS juga ternyata paling rendah dibanding serat yang lain, yakni 13.53%. Rendahnya kandungan lignin akan mempermudah proses penghilangannya dengan larutan.

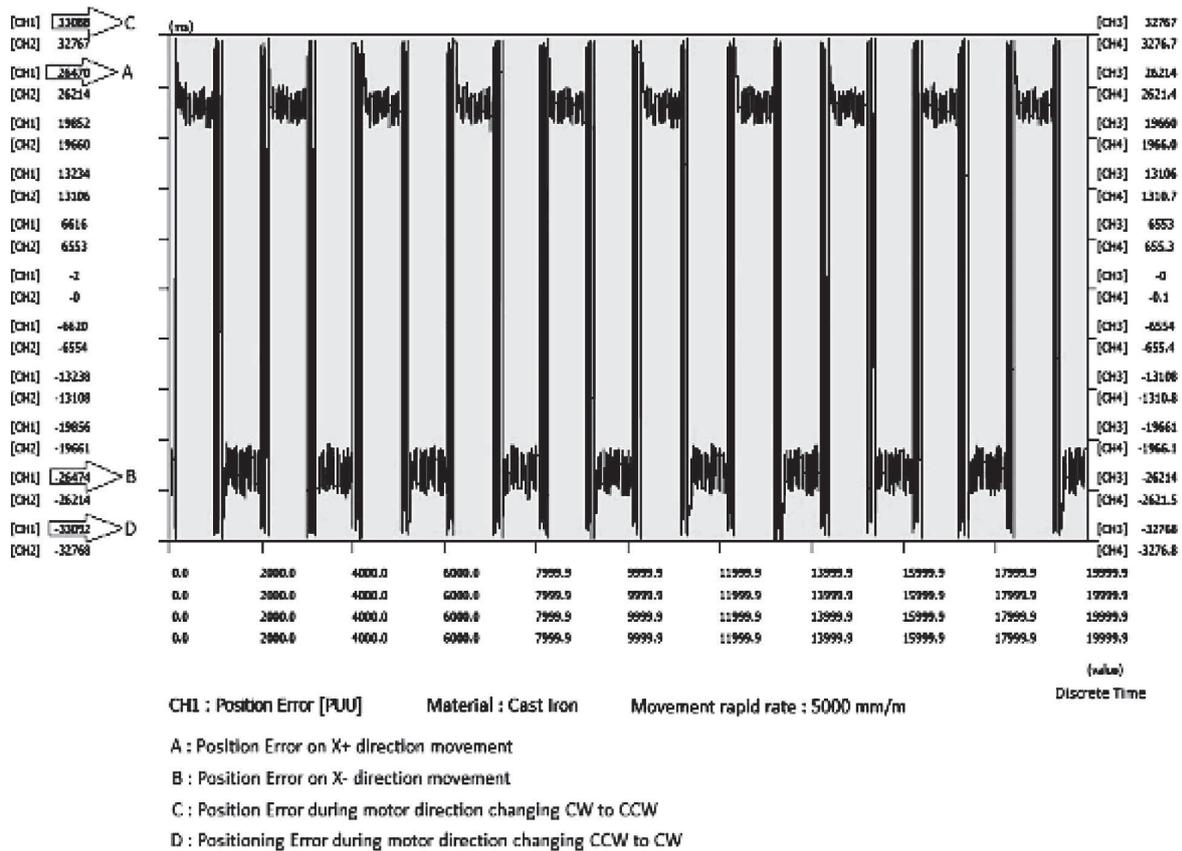
Berdasarkan hasil penelitian tahap pertama, maka diputuskan untuk menggunakan serat BB kelapa sawit untuk difabrikasi menjadi komposit berbasis epoxy. Hasil positif ditunjukkan pada hasil

pengujian fisik densitas komposit yang menunjukkan bahwa densitas bahan komposit berkurang seiring penambahan fraksi berat serat pada bahan komposit yang dibuat, dan menghasilkan titik optimum di fraksi 10% berat serat, dengan kekuatan tarik sebesar 31.72 N/mm<sup>2</sup>. Merujuk pada pengujian fisik, maka penggunaan serat batang buah TKKS dalam fabrikasi komposit untuk pembuatan bahan struktur bergerak mesin CNC perkayuan tetap layak dilakukan karena berdasarkan hasil analisa perbandingan bahan yang disajikan pada Tabel 5, kekuatan spesifik bahan komposit mendekati bahan pembandingnya yang berkekuatan tarik jauh lebih kuat.

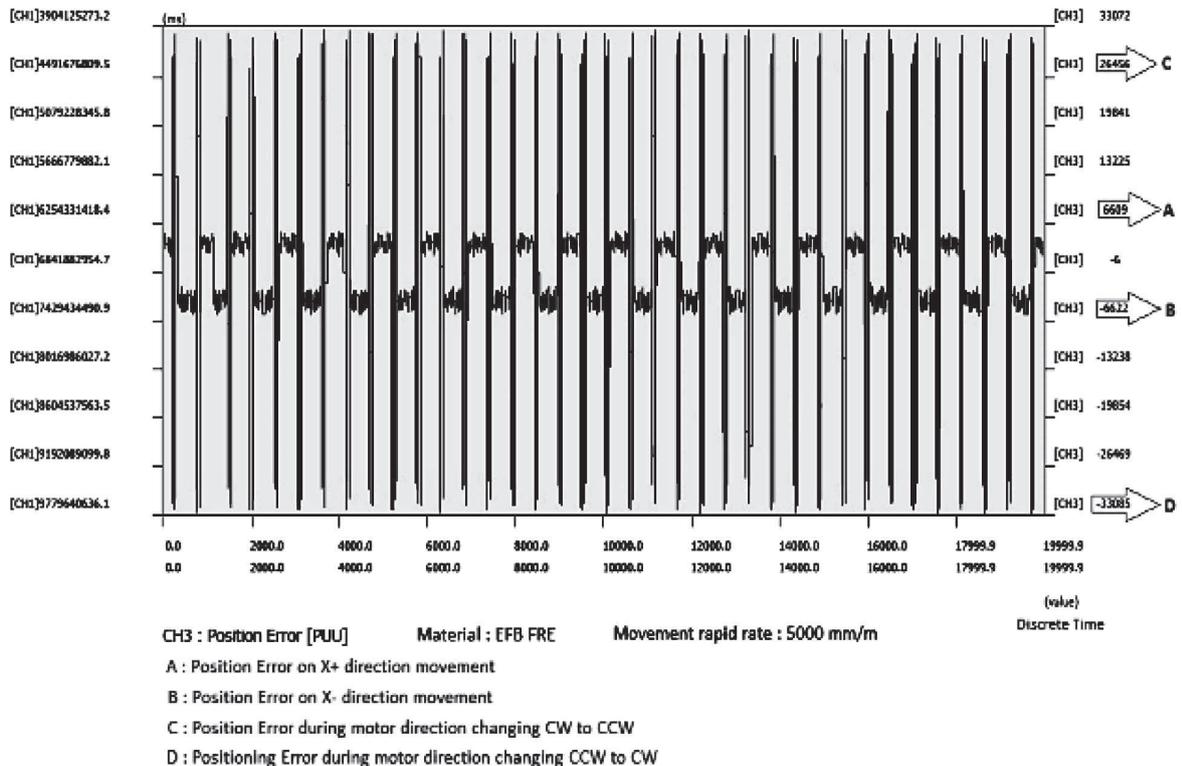
Hasil pengujian getaran (Gambar 4) pada proses pemotongan (CP) dengan kecepatan 250 mm/m dan 1000 mm/m menunjukkan bahwa penggunaan bahan komposit epoxy berpengisi serat batang buah TKKS berkontribusi positif terhadap penurunan rambatan amplitudo getaran yang muncul saat proses pemotongan, yakni berada di rentang -0.5 ~ 3 m/s<sup>2</sup> pada bahan *cast iron*, dan rentang; -0.8 ~ 0.8 m/s<sup>2</sup> pada bahan komposit dengan kecepatan pemakanan 250 mm/m, serta berada di rentang; -3 ~ 3 m/s<sup>2</sup> pada bahan *cast iron*, dan rentang; -1 ~ 3 m/s<sup>2</sup> pada bahan komposit dengan kecepatan



Gambar 4. Grafik perbandingan amplitudo getaran saat proses pemotongan (CP) pada material dan kecepatan yang berbeda



(a)



(b)

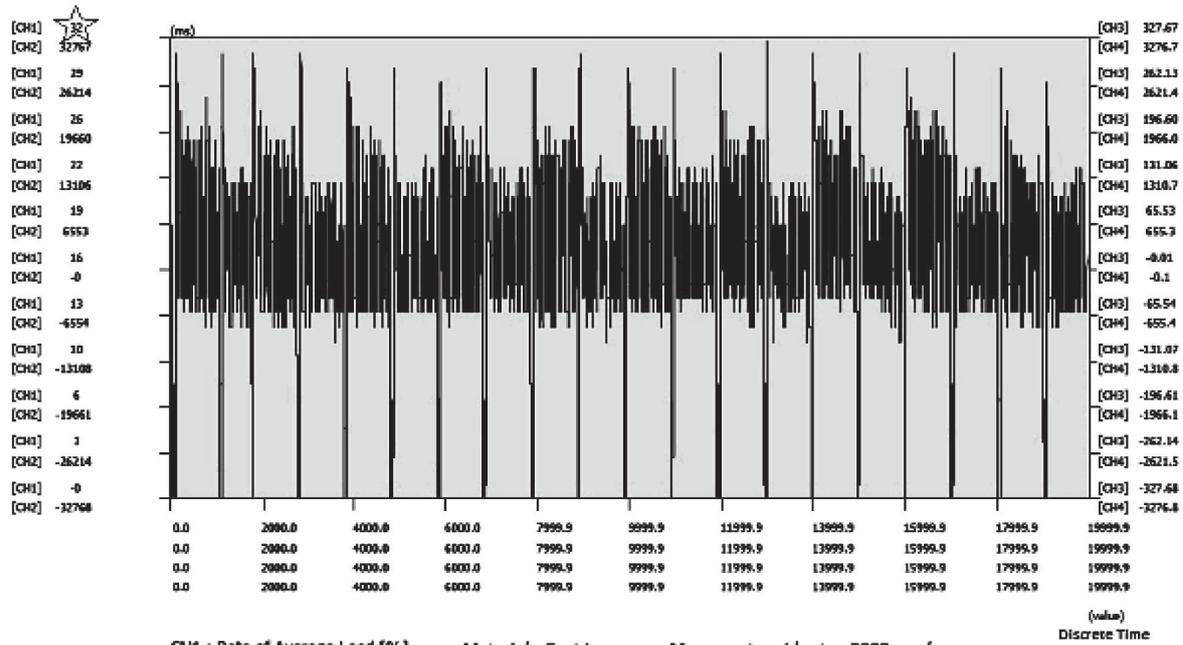
Gambar 5. Perbandingan *positioning error* yang merepresentasikan proses gesekan (FP) antara penggunaan material *cast iron* (a) dengan komposit TKKS (b)

pemakanan 1000 mm/m. Hal ini menunjukkan bahwa dalam penelitian ini, bahan komposit mampu meredam getaran lebih baik dibandingkan bahan *cast iron*.

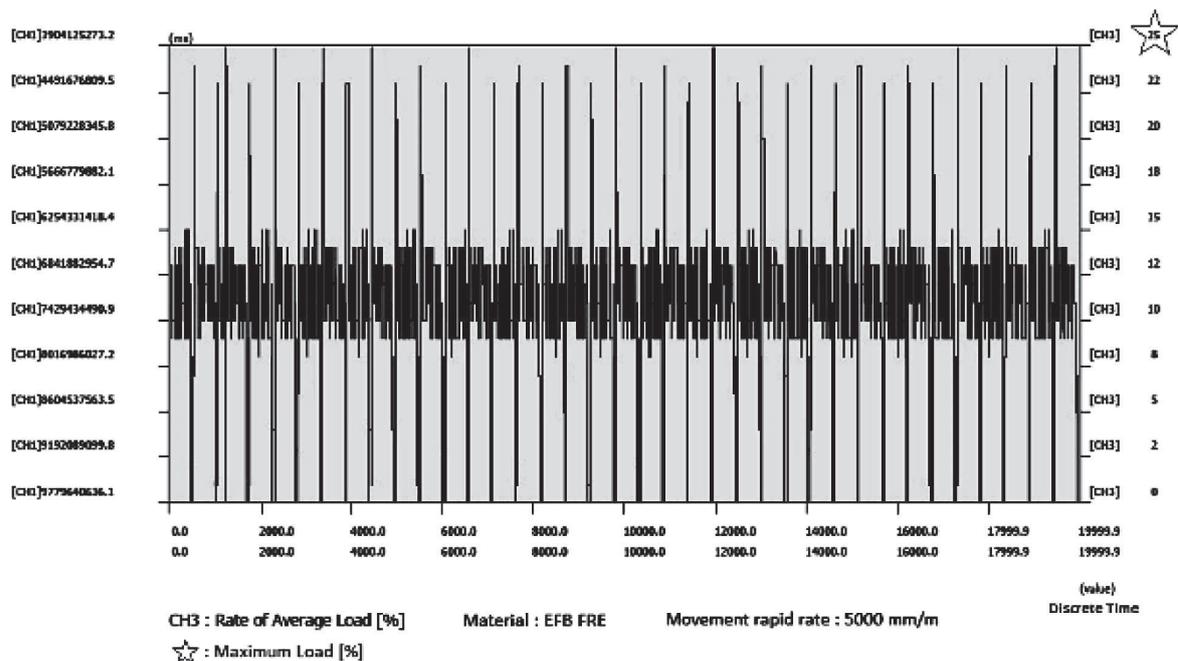
Pengujian *positioning error* untuk mendapatkan informasi besar gesekan yang muncul saat *dry run condition* (FP) dilakukan dengan kecepatan variatif 5000, 1000, 15000, dan 20000 mm/m yang hasilnya menunjukkan seberapa besar kontribusi berat bahan struktur bergerak terhadap friksi pada komponen-komponen bantalannya. Hasil pengujian pada kecepatan 5000 mm/m (Gambar 5) menunjukkan

bahwa penggunaan bahan komposit menghasilkan gesekan yang lebih kecil, yakni berada pada rentang galat -6622 pulsa pada putaran motor CCW (berlawanan arah jarum jam) dan galat 6609 pulsa pada putaran motor CW (searah jarum jam). Hasil ini cukup positif jika dibandingkan dengan penggunaan bahan aslinya yang menghasilkan gesekan lebih besar yakni melalui indikasi galat -26.474 pulsa (CW) dan 26.470 pulsa (CCW).

Untuk membuktikan seberapa besar kontribusi berat bahan struktur bergerak mesin CNC perkayuan terhadap beban kerja motor penggerakannya, maka



(a)



(b)

Gambar 6. Perbandingan persentase beban motor yang merepresentasikan (MP) antara penggunaan material *cast iron* (a) dengan komposit TKKS (b)

dengan parameter pengujian yang sama dengan pengujian gesekan (FP), didapatkan hasil bahwa penggunaan bahan komposit dengan berat yang secara signifikan turun terbukti menurunkan beban kerja dinamis motor penggerakannya, yakni perbandingan 25% dengan 32% pada kecepatan 5000 mm/m (Gambar 6). Angka persentase beban ini secara eksponensial naik ketika kecepatan dinaikkan bertahap, bahkan pada kecepatan 20000 mm/m dengan bahan aslinya *cast iron* terpaksa pengujian tidak dapat menghasilkan data persentase beban, dikarenakan terjadi kelebihan beban (*overload*) akibat bekerjanya sistem proteksi pada alat kendali CNC, namun hal ini tidak terjadi pada saat penggunaan bahan komposit. Hasil positif ditunjukkan pada penggunaan bahan komposit yang memang lebih ringan, yakni nilai kecepatan dan akselerasi yang lebih tinggi, namun dengan penggunaan energi yang justru lebih rendah.

### Simpulan

Melalui hasil seleksi dan pengujian, serat batang buah TKKS adalah serat yang memiliki kualifikasi terbaik untuk aplikasi komposit berbahan matriks polimer, baik berjenis *thermoplastic* maupun *thermoset*. Fraksi berat serat optimal saat proses fabrikasi komposit berbasis *epoxy* dengan pengisi serat batang buah TKKS berdasarkan hasil pengujian fisik dan mekanik adalah 10%, yakni tercapainya titik optimum antara kekuatan dan berat jenis bahan. Berdasarkan hasil pengujian dinamis, bahan komposit yang dihasilkan mampu berfungsi sebagaimana bahan tradisional *cast iron* yang jauh lebih berat dan kuat, dan cocok untuk diaplikasikan sebagai bahan struktur penguat mesin CNC perkayuan yang membutuhkan unjuk kerja dinamis yang tinggi.

### Saran

Pada penelitian bahan komposit berbasis *epoxy* dengan bahan pengisi serat batang buah TKKS berbentuk makro belum meningkatkan kekuatan mekanik, maka disarankan serat ini terlebih dahulu dipersiapkan melalui proses penganyaman agar serat terikat satu sama lain secara mekanis.

### Daftar Pustaka

- Abu-Bakar A., Hassan, A., Yusof, A.F.M. 2006. The effect of oil extraction of the oil palm empty fruit bunch on the processability, impact, and flexural properties of PVC-U composites. *Int. J. Polym. Mater.* 55:627–641.
- Abu-Bakar, M.A., Natarajan, V.D., Kalam, A. 2007. Mechanical properties of oil palm fibre reinforced epoxy for building short pan bridge. *Proceeding of 13<sup>th</sup> Experimental Mechanics: Experimental Analysis of Nano and Engineering Material and Structure*, Alexandroupolis, Greece, Berlin (DE), 2007. Springer, p 97-98.
- Aboudi, J. 1991. *Mechanics of Composite Materials*. Amsterdam: Elsevier.
- Khalid, M., Salmiaton, A., Chuah, T.G., Ratnam, C.T., Choong, S.Y.T. 2008. Effect of MAPP and TMPTA as compatibilizer on the mechanical properties of cellulose and oil palm fiber empty fruit bunch–polypropylene biocomposites. *Compos. Interfaces.* 15: 251–262.
- [Kementan] Ditjenbun Kementerian Pertanian. 2015. Luas Areal, Produksi dan Produktivitas Perkebunan di Indonesia [internet]. [diacu 2016 April 6]. Tersedia dari: <http://ditjenbun.pertanian.go.id/tinymcpuk/gambar/file/statistik/2015/SAWIT%202013%20-2015.pdf>.
- Klason, C., Kubát, J., Strömvall, H.E. 1984. The efficiency of cellulosic filler in common thermoplastic. Part I. Filling without processing aids or coupling agents. *Intern. J. Polymeric.* 10:159-187.
- Mehta, N.K. 1996. *Machine Tool Design and Numerical Control*, Second Edition. New Delhi (IN): Tata McGraw-Hill Publishing Company.
- Sreekala, M.S., Kumaran, M.G., Thomas, S. 1997. Oil palm fibers: morphology, chemical composition, surface modification, and mechanical properties. *J. Appl. Polym.Sci.* 66:821–835.
- Sreekala, M.S., Thomas, S., 2004. Effect of fibre surface modification on watersorption characteristics of oil palm fibres. *Compos. Sci. Technol.* 63, 861–869.
- Suh, J.D., Lee, D.G. 2008. Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine. *J. Mechanical Material Design.* 4:113-121.