

## Karakterisasi dan Analisis Sifat Mekanik Selulosa Ester dari Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Bahan Alternatif Filamen 3D Printing

### *Characterization and Mechanical Properties Analysis of Cellulose Ester Derived From Oil Palm Empty Fruit Bunch for 3D Printing Alternative Materials*

Fadlin Qisthi Nasution, Meta Rivani, Muhammad Ansori Nasution, Tjahjono Herawan,  
dan Halimahtuddahlia<sup>1</sup>

**Abstrak** *3D printing* adalah teknologi yang berkembang pesat belakangan ini. Selulosa Ester, salah satu turunan dari selulosa dapat digunakan sebagai kandidat bahan alternatif filamen untuk *3D printing*. Salah satu sumber selulosa yang dapat dimanfaatkan untuk sintesis selulosa ester adalah tandan kosong dari kelapa sawit. Agar selulosa ester dari tandan kosong dapat digunakan sebagai bahan filamen alternatif, dibutuhkan pengamatan pada sifat mekanik pada selulosa ester dan produk turunannya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat mekanik dan karakterisasi selulosa ester dan produk turunannya sebagai bahan alternatif 3D printing. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa dari hasil karakterisasi menggunakan metode *Thermogravimetry Analysis* diketahui bahwa titik leleh selulosa ester yang dihasilkan berada diantara filamen konvensional yang sering digunakan, yaitu *polylactic acid* dan *acrylonitrile butadiene styrene* sehingga selulosa ester yang dihasilkan dari tandan kosong kelapa sawit berpotensi untuk menggantikan filamen yang sudah ada. Dari hasil pengujian mekanik, pada percobaan ini, dapat disimpulkan untuk mendapatkan kekuatan mekanik yang optimal dari hasil *3D printing* menggunakan tinta dari selulosa ester, *infill density* dari produk berkisar pada 100% - 80%. Sedangkan untuk mendapatkan filamen 3D yang baik, komposisi

campuran selulosa ester:*polylactic acid* dari produk adalah 20%:80%. Pengujian mekanik juga menunjukkan bahwa terdapat perbedaan nilai *Tensile Strength* dan *Modulus of Elasticity*. Nilai *Tensile Strength* lebih tinggi pada proses estrifikasi pada temperatur yang lebih tinggi, namun nilai *Modulus of Elasticity* lebih tinggi pada temperatur yang lebih rendah. Sedangkan untuk temperatur proses yang sama, tidak terdapat perbedaan nilai *Modulus of Elasticity* yang signifikan.

**Kata kunci:** Filamen, 3D printing, Selulosa Ester, Sifat Mekanik, Karakterisasi

**Abstract** *3D printing* is a technology that is developing rapidly in recent times. Cellulose Esters, one of the derivatives of cellulose, can be used as alternative filament candidates for 3D printing. One source of cellulose that can be used for the synthesis of cellulose esters is oil palm empty fruit bunches (OPEFB). In order for cellulose ester from OPEFB to be used as an alternative filament material, it is necessary to observe the mechanical properties of cellulose ester and its derivative products. This study aims to determine the mechanical properties and characterization of cellulose ester and its derivative products as an alternative material for 3D printing. The results of this study indicate that from the results of the characterization using the *Thermogravimetry Analysis* method, it is known that the melting point of the cellulose ester produced is between the conventional filaments that are often used, namely *polylactic acid* and *acrylonitrile butadiene styrene* so that the cellulose ester produced from OPEFB has the potential to replace already

---

*Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit*

Meta Rivani (✉)  
Pusat Penelitian Kelapa Sawit  
Jl. Brigjen Katamso No. 51 Medan 20158  
Email: metarivani@gmail.com

<sup>1</sup>Teknik Kimia, Universitas Sumatera Utara



available filaments. From the results of mechanical testing, in this experiment, it can be concluded that to obtain optimal mechanical strength from 3D printing using cellulose ester ink, the infill density of the product ranges from 100% - 80%. Meanwhile, to get a good 3D filament, the composition of the cellulose ester: polylactic acid mixture of the product is 20%:80%. Mechanical testing also shows that there are differences in the values of Tensile Strength and Modulus of Elasticity. The value of Tensile Strength is higher in the estrification process at a higher temperature, but the value of the Modulus of Elasticity is higher at a lower temperature. Meanwhile, for the same processing temperature, there is no significant difference in the value of the Modulus of Elasticity.

**Keywords:** Filament, 3D printing, Cellulose Ester, Mechanical Properties, Characterization

## PENDAHULUAN

3D printing atau dikenal *additive manufacturing* (AM) adalah teknologi yang berkembang pesat belakangan ini (Lipson & Kurman, 2013). Mesin cetak 3D menghasilkan objek dalam bentuk 3 dimensi yang kompleks dengan menggunakan beberapa teknik cetak yang berbeda, yaitu FDM (*fused deposition modeling*), *stereolithography* dan *selective laser sintering* (SLS) (Redwood *et al.*, 2017). Namun, teknik FDM terus berkembang sejak tahun 1991 dengan bahan pencetak berupa cairan (*direct ink writing DIW*) dan filamen (*microextrusion 3D printing*). Awalnya, penggunaan mesin cetak 3D sebagai *rapid prototyping* (RP), namun sekarang penggunaannya meluas untuk berbagai produk *custom-made* (Dai *et al.*, 2019; Noorani, 2017; Wang *et al.*, 2018).

Saat ini, bahan pencetak yang umum dipakai pada teknik FDM adalah filamen PLA (*polylactic acid*), ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*), PC (*polycarbonate*), PE (*polyethylene*), PU (*polyurethane*) dan PVA (*polyvinyl alcohol*) (Kristiawan *et al.*, 2021). Dibandingkan beberapa polimer tersebut, PLA termasuk biopolimer yang mudah terurai karena berasal dari fermentasi gula, namun PLA memiliki kelemahan tidak tahan panas dan rapuh (Dai *et al.*, 2019; Noorani, 2017; Wang *et al.*, 2018).

Selulosa Ester, salah satu turunan dari selulosa dapat digunakan sebagai kandidat bahan alternatif filamen dan tinta untuk 3D printing (Li *et al.*, 2018; Xiaoyun & Shuwen, 2013). Produk bioplastik selulosa

ester berbentuk transparan, tidak larut air, tahan panas, dan memiliki kekuatan tarik yang cukup baik (Herawan *et al.*, 2016). Meskipun selulosa ester lebih mahal dibandingkan PLA, namun penggunaannya sebagai bahan pencetak 3D tidak membutuhkan ekstruder dan menghasilkan produk cetak yang tahan panas, tidak larut air, dan sifat mekanis yang baik (Pattinson & Hart, 2017).

Salah satu sumber selulosa yang dapat dimanfaatkan untuk sintesis selulosa ester adalah tandan kosong (tankos) dari kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) dengan komposisi 23% dari bobot tandan kelapa sawit (Herawan & Rivani, 2015). Selama ini, sebagian limbah tankos dijadikan sebagai tambahan unsur hara tanaman kelapa sawit, namun dibutuhkan biaya operasional yang cukup tinggi dengan harga jual yang cukup rendah (Tao *et al.*, 2018). Oleh karena itu, teknologi pemanfaatan tankos menjadi produk bernilai jual sangat membantu pabrik kelapa sawit untuk menurunkan biaya operasional sekaligus memperoleh pendapatan dari penjualan tankos.

Agar selulosa ester yang berasal dari tankos kelapa sawit dapat digunakan sebagai bahan pengganti filamen dan tinta konvensional, dibutuhkan pengamatan secara teliti terhadap karakteristik dan sifat mekanik dari filamen, tinta dan film bioplastik yang terbuat dari selulosa ester. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat mekanik dan karakterisasi filamen selulosa ester sebagai bahan alternatif 3D printing. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diketahui apakah filamen dan tinta yang terbuat dari selulosa ester dapat menjadi bahan alternatif yang baik sebagai pengganti filamen 3D printing konvensional.

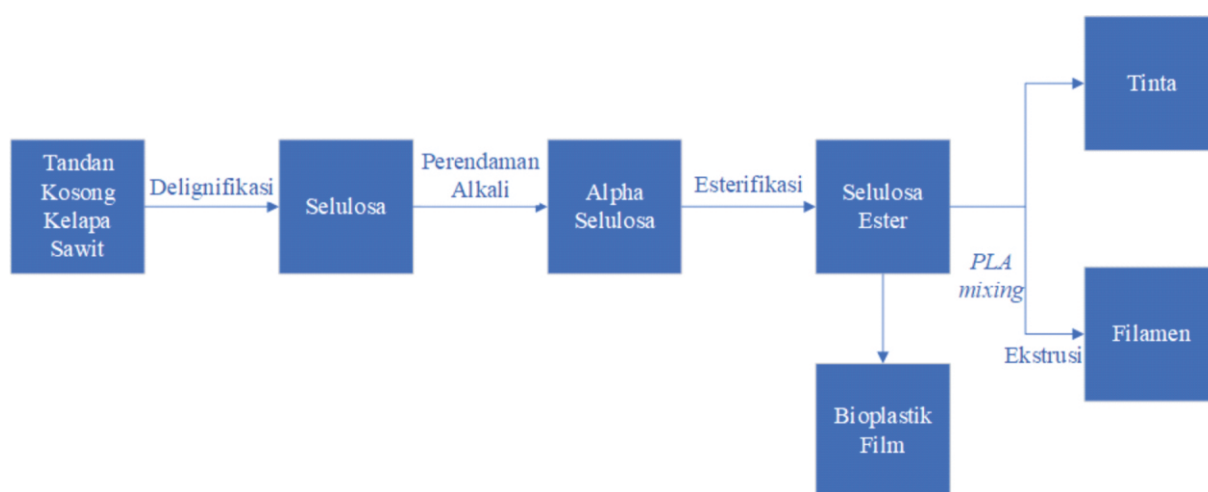
## BAHAN DAN METODE

### Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan pada penelitian ini mencakup tandan kosong kelapa sawit (tankos), larutan KOH 4%, larutan sodium hipoklorit 2,5%, larutan NaOH 17,5%, larutan NaOH 8,3%, aquades, kloroform dan PLA. Larutan N,N-dimethylacetamide/lithium klorida (DMAc/LiCl) dan larutan *acyl chloride* dan larutan etanol dibutuhkan untuk proses estrifikasi. Alat-alat yang digunakan adalah alat-alat laboratorium yang dibutuhkan

untuk proses refluks, ekstraksi dan soxhlet. Ekstruder digunakan untuk menghasilkan filamen 3D, *Beaker glass*, *glass plate* dan pengaduk digunakan untuk menghasilkan tinta 3D dan film bioplastik. Mesin printer 3D digunakan untuk mencetak tinta 3D menjadi sampel *dogbone*. *Universal Testing Machine* (UTM) digunakan untuk melakukan pengujian tarik terhadap sampel

*dogbone*, filamen 3D dan film bioplastik. Karakterisasi dari selulosa dan selulosa ester digunakan menggunakan alat *Thermogravimetry analysis* (TGA) dan *Fourrier Transform InfraRed* (FTIR) *Spectroscopy*. Setiap pengujian mekanik dan karakterisasi dilakukan sebanyak dua kali. Data yang ditampilkan merupakan rerata dari hasil pengujian.



Gambar 1. Jalur Sintesis Selulosa Ester dan Produk Turunannya  
Figure 1. Synthesis Pathway of Cellulose Ester and Its derivatives

Pada penelitian ini, digunakan selulosa ester yang dihasilkan dari proses ekstraksi yang berasal dari tandan kosong kelapa sawit. Proses dimulai dari ekstraksi selulosa yang ada di dalam tandan kosong kelapa sawit yang dilakukan dengan melakukan proses pengeringan, pencacahan, delignifikasi dengan larutan KOH 4% dan pengeringan untuk mendapatkan selulosa serta perendaman dengan larutan larutan sodium hipoklorit 2,5%.

Dari selulosa yang telah didapat, alpha selulosa diisolasi dengan melakukan perendaman alkali dengan menggunakan NaOH 17,5%, pencucian residu dengan NaOH 8,3% dan aquades, dan pengeringan terhadap selulosa yang ada. Kemudian, dilakukan proses esterifikasi, yang diikuti dengan pencucian dengan larutan etanol dan pengeringan, untuk mendapatkan selulosa ester. Proses esterifikasi dilakukan dengan pencampuran *cellulose anhydroglucose unit* (AGU), yang pada percobaan ini berupa alpha selulosa, yang dilarutkan didalam acyl

chloride (FA-Cl) dengan larutan DMAc/LiCl (Willberg-Keyriläinen & Ropponen, 2019).

Kemudian, selulosa ester dilarutkan didalam kloroform untuk mendapatkan tinta 3D. Campuran selulosa ester dan PLA yang optimal kemudian diekstrusi untuk mendapatkan filamen 3D. Film Bioplastik juga dihasilkan dengan cara melarutkan selulosa ester didalam kloroform lalu dicetak di atas *glass plate* untuk menghasilkan lembaran bioplastik.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakterisasi Selulosa dan Selulosa Ester

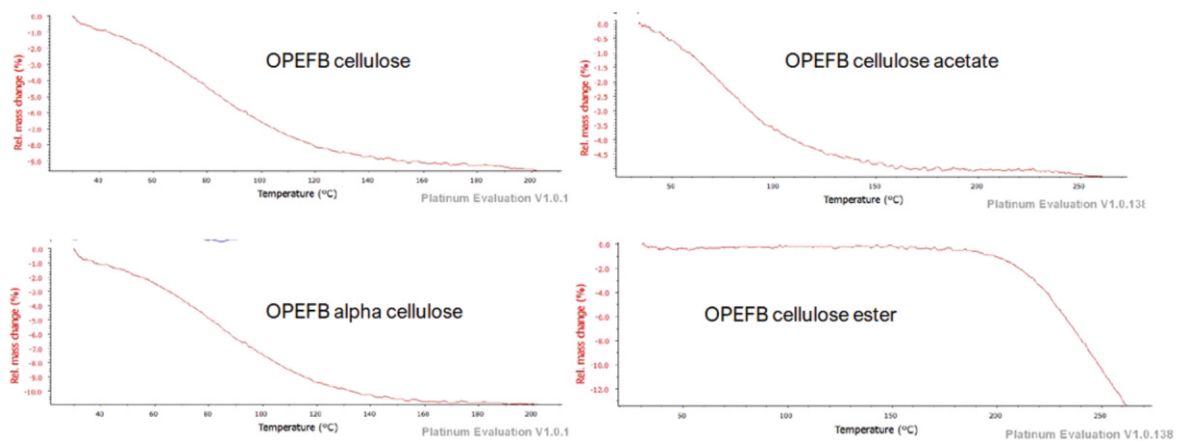
Untuk mendapatkan produk yang optimal, maka perlu dilakukan karakterisasi terhadap selulosa yang dihasilkan dari tandan kosong kelapa sawit. Karakterisasi dilakukan pada setiap tahapan dari jalur sintesis selulosa ester. Adapun jenis karakterisasi yang dilakukan adalah *Thermogravimetry Analysis*

(TGA) dan *Fourier Transformation InfraRed* (FTIR) Spectroscopy.

### Thermogravimetry Analysis (TGA)

Dari gambar 2 dapat dilihat hasil dari *Thermogravimetry Analysis* (TGA) dari Selulosa, Alpha Selulosa, Selulosa Asetat dan Selulosa Ester yang berasal dari tankos. Hasil pengujian menunjukkan bahwa titik leleh dari Selulosa dan Alpha Selulosa kurang lebih sama, dengan nilai <math><40^{\circ}\text{C}</math>. Namun, terjadi kenaikan titik leleh setelah proses esterifikasi menjadi selulosa asetat dan selulosa ester. Selulosa asetat

meleleh pada temperatur <math><50^{\circ}\text{C}</math>. Namun, terjadi perubahan titik leleh yang cukup signifikan pada selulosa ester. Selulosa ester meleleh pada temperatur  $\pm 200^{\circ}\text{C}$ , lebih tinggi bila dibandingkan dengan PLA yang meleleh pada temperatur  $160^{\circ}\text{--}180^{\circ}\text{C}$ . Namun, bila dibandingkan dengan material lain yang umum digunakan sebagai bahan utama untuk filamen dan tinta *3D printing*, seperti ABS dengan titik leleh  $220^{\circ}\text{C}$ , selulosa ester yang didapat dari tankos memiliki titik leleh yang lebih rendah. Oleh karena itu, berdasarkan titik lelehnya, selulosa ester yang dihasilkan dari tankos berpotensi untuk menggantikan filamen yang sudah ada pada mesin *3D printing* konvensional.



Gambar 2. Hasil Thermogravimetry Analysis (TGA)  
Figure 2. Results of Thermogravimetry Analysis (TGA)

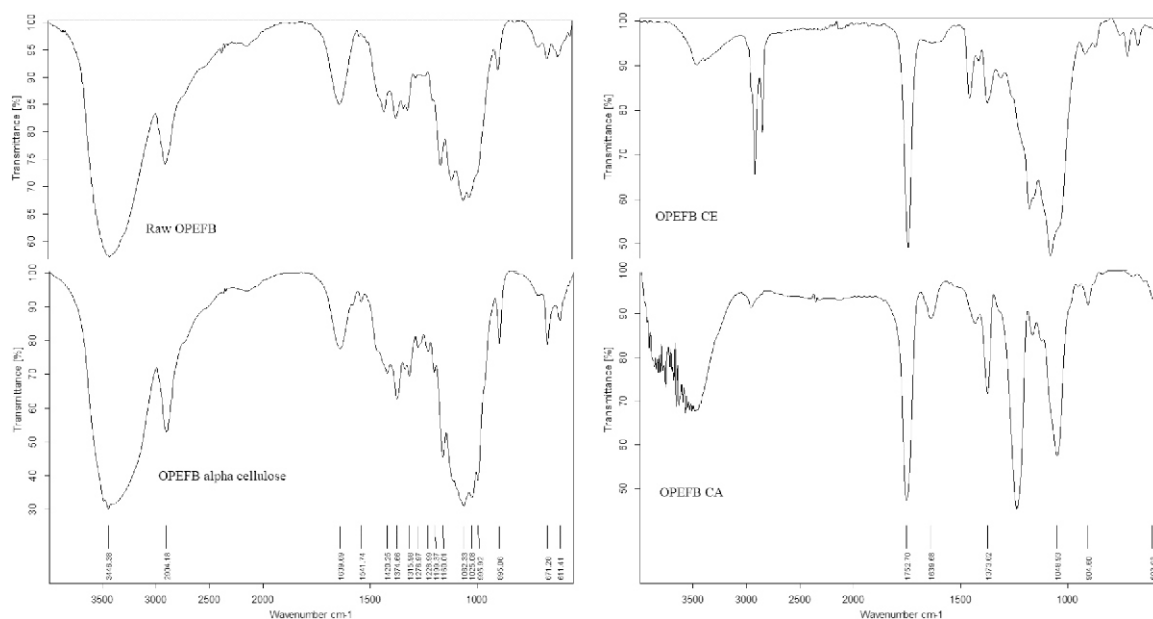
### Fourier Transformation InfraRed (FTIR).

Pada Gambar 3 dapat dilihat perubahan spektrum FTIR dari tankos hingga selulosa ester tankos. Pada tankos dan alfa selulosa tankos, puncak gugus hidroksil pada spektrum  $3500\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$  sangat jelas terlihat dengan nilai transmitansi yang tinggi, sebaliknya lembah tersebut tidak jelas pada selulosa ester dan selulosa asetat. Hal ini menunjukkan bahwa gugus hidroksi telah tersubstitusi oleh asam lemak dari asil klorida. Untuk membuktikannya, terdapat lembah dominan pada band  $1750\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$  yang menunjukkan adanya gugus karbonil ester yang dicirikan dengan peregangan  $\text{C}=\text{O}$ . Berubahnya absorbansi hidroksi dan ester berhubungan dengan nilai derajat substitusi.

Tipikal spektra selulosa adalah puncak pada panjang gelombang  $1650\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ . Panjang gelombang  $1650\text{ cm}^{-1}$  dan lebih besar berhubungan dengan gugus molekul air dalam selulosa. Absorbansi pada spektra  $1400\text{--}900\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus air yang terdapat dalam pori material. Panjang gelombang pada  $1420\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya peregangan dan getaran gugus  $-\text{CH}_2$  dan  $-\text{CH}_2\text{--OH}$ , dan  $\text{CO}$ . Panjang gelombang pada spektra  $1420\text{--}1440\text{ cm}^{-1}$  berhubungan dengan komposisi bagian kristalin.

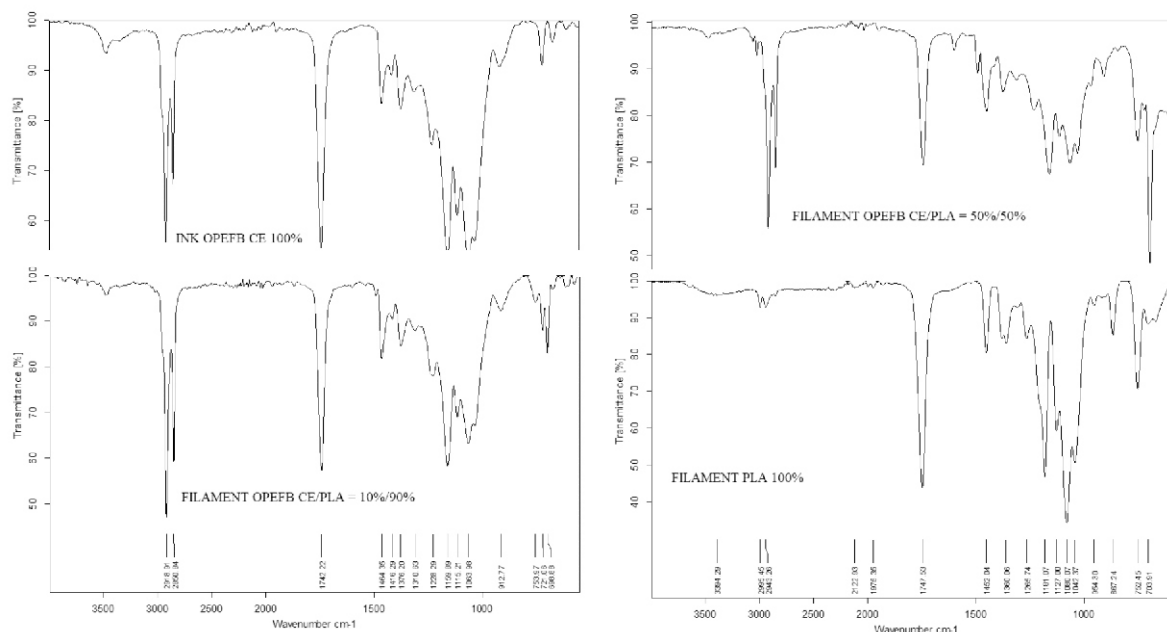
Pada Gambar 4 terlihat sedikit sekali pergeseran spektra filamen dan tinta tankos. Perubahan spektrum terjadi pada saat komposisi equal antara tankos selulosa dan PLA. Dibandingkan dengan spektra 100% PLA, tidak terdapat lembah pada panjang gelombang hidroksi.





Gambar 3. Hasil *Fourier Transformation InfraRed (FTIR) Spectroscopy* dari Tankos, Alpha Selulosa, Selulosa Ester dan Selulosa Asetat.

Figure 3. Results of Transformation InfraRed (FTIR) Spectroscopy of Empty Fruit Bunch, Alpha Cellulose, and Cellulose Acetate.



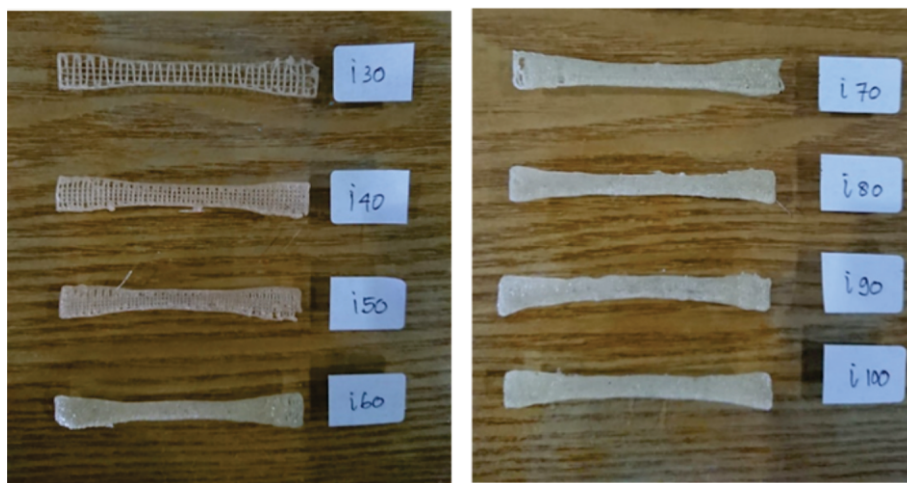
Gambar 4. Hasil *Fourier Transformation InfraRed (FTIR) Spectroscopy* dari Tinta Selulosa Ester 100%, Filamen Selulosa Ester/PLA 10%/90%, Filamen Selulosa Ester/PLA 50%/50% dan Filamen PLA 100%.

Figure 4. Results of Fourier Transformation InfraRed (FTIR) Spectroscopy of Cellulose Ester 100% Ink, Cellulose/Ester 10%/90% Filament, Cellulose/Ester 50%/50% Filament, and PLA Filament 100%.

### Analisis Sifat Mekanik Tinta 3D dari Selulosa Ester

Analisis sifat mekanik pada tinta 3D dilakukan dengan melakukan pengujian tarik menggunakan *Universal Testing Machine* pada spesimen berbentuk *dogbone* dari hasil cetakan tinta 3D dengan variabel *Infill density*, seperti yang dapat dilihat pada gambar 5. Pengujian dilakukan sesuai dengan standar *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 1.

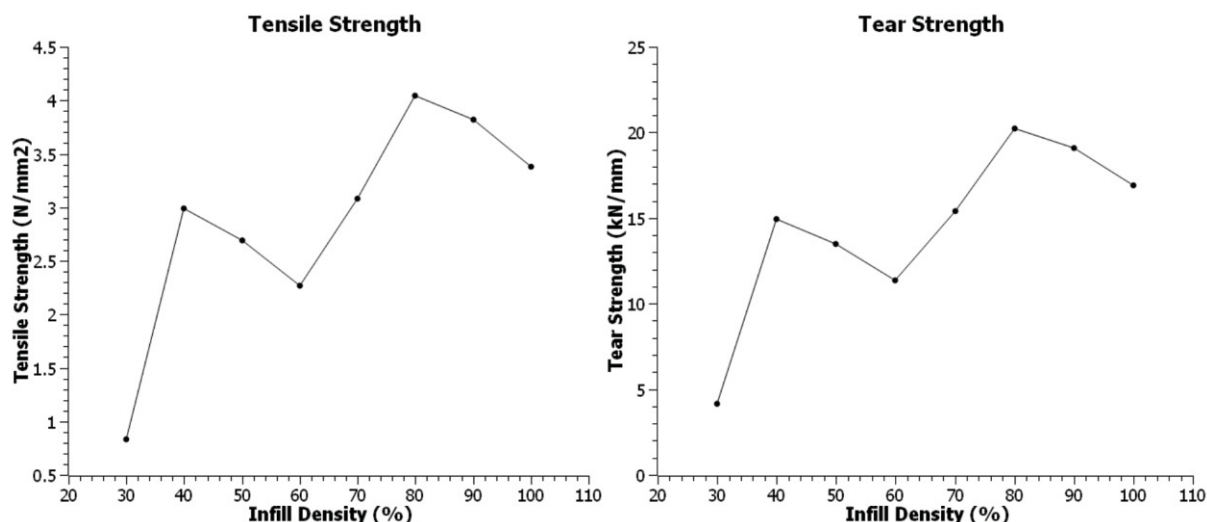
Dari Tabel 1 dan gambar 6, dapat dilihat bahwa terdapat pola yang sama pada *tear strength* dan *tensile strength* pada spesimen tinta 3D berdasarkan kenaikan persentase *infill density*. Dapat dilihat bahwa pada *tear strength* dan *tensile strength* terjadi kenaikan dan penurunan seiring dengan bertambahnya persentase *infill density*. Terdapat dua maksima dan satu minima, dimana titik maksima berada pada *infill density* sebesar 40% dan 80% serta titik minima berada pada *infill density* sebesar 60%.



Gambar 5. Spesimen Dogbone hasil cetak tinta 3D  
 Figure 5. Dogbone Specimens made from 3D Ink

Tabel 1. Sifat Mekanik dari Tinta 3D  
 Table 1. Mechanical Properties of 3D Ink

<i>Infill density (%)</i>	Ketebalan (mm)	<i>Tensile strength (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Tear strength (kN/mm)</i>
30	0.790	0.831	4.155
40	1.010	2.990	14.949
50	0.525	2.694	13.472
60	1.135	2.269	11.346
70	1.725	3.085	15.427
80	0.940	4.043	20.213
90	0.955	3.820	19.100
100	1.300	3.379	16.893

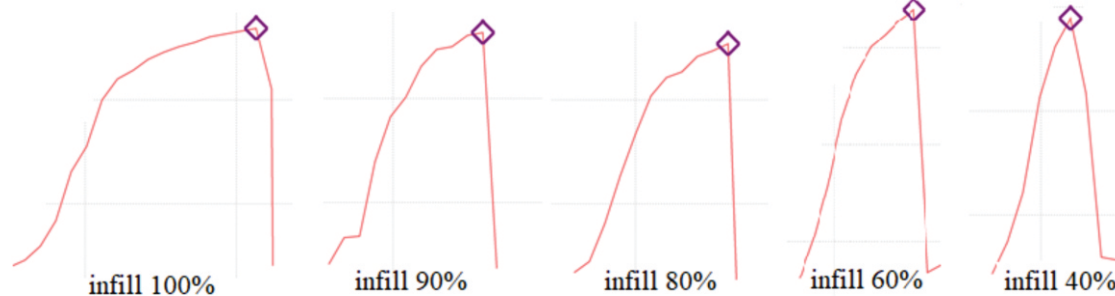


Gambar 6. *Tensile Strength* dan *Tear Strength* dari Spesimen Tinta 3D berdasarkan *infill density*  
 Figure 6. *Tensile Strength* and *Tear Strength* of 3D Ink Specimens based on *infill density*

Gambar 7 memperlihatkan grafik uji tarik dari Spesimen Tinta 3D. Dari gambar, dapat dilihat bahwa kenaikan *infill density* berbanding lurus dengan kenaikan sifat elastisitas dari spesimen.

Berdasarkan dari hasil pengujian tarik, dapat

disimpulkan untuk mendapatkan kekuatan mekanik yang optimal dari hasil 3D printing menggunakan tinta berbahan dasar selulosa ester dari tandan kelapa sawit, *infill density* dari produk berkisar pada 100% - 80%.



Gambar 7. Grafik Uji Tarik dari Spesimen Tinta 3D berdasarkan *infill density*  
 Figure 7. *Tensile Test Graph* of 3D Ink Specimens based on *Infill Density*

### Analisis Sifat Mekanik Filamen 3D dari Selulosa Ester

Analisis sifat mekanik pada Filamen 3D dilakukan dengan melakukan pengujian tarik menggunakan *Universal Testing Machine* pada spesimen campuran Selulosa Ester dan PLA yang telah diekstrusi menjadi filamen, seperti yang dapat

dilihat pada Gambar 8. Pengujian dilakukan sesuai dengan standar *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.

Dari Tabel 2 dan gambar 9, dapat dilihat bahwa terjadi penurunan *tear strength* dan *tensile strength* seiring dengan bertambahnya persentase komposisi

CE. Secara visual, dapat dilihat bahwa warna dari filamen bertambah gelap dengan bertambahnya komposisi CE di dalam filamen.

Gambar 10 menunjukkan bahwa secara kualitatif dapat dilihat bahwa elastisitas dari filamen 3D berbahan campuran CE dan PLA memiliki nilai yang optimal pada rentang komposisi CE:PLA = 20%:80% dan CE:PLA =

30%:70%.

Berdasarkan dari hasil analisis uji mekanik, dapat disimpulkan untuk mendapatkan kekuatan mekanik yang optimal dari hasil 3D printing menggunakan filamen berbahan dasar selulosa ester dari tankos kelapa sawit, komposisi campuran CE:PLA dari produk adalah 20%:80%.



Gambar 8. Filamen Selulosa Ester dengan Rasio yang berbeda dari Selulosa Ester dan PLA  
 Figure 8. Cellulose Ester Filament with Diifferent Ratio of Cellulose Ester and PLA

Tabel 2 . Sifat Mekanik dari Filamen 3D Selulosa Ester (CE)  
 Table 2. Mechanical Properties of 3D Filament made from Cellulose Ester (CE)

Rasio CE/PLA	Ketebalan (mm)	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tear strength (kN/m)
5/95	4.97	9.013	61.291
10/90	3.59	5.859	39.844
15/85	3.66	6.002	40.812
20/80	3.67	5.946	40.431
25/75	5.28	4.901	33.330
30/70	4.38	4.482	30.477
35/65	4.47	4.029	27.394
40/60	4.77	2.828	19.230
50/50	4.34	2.107	14.328

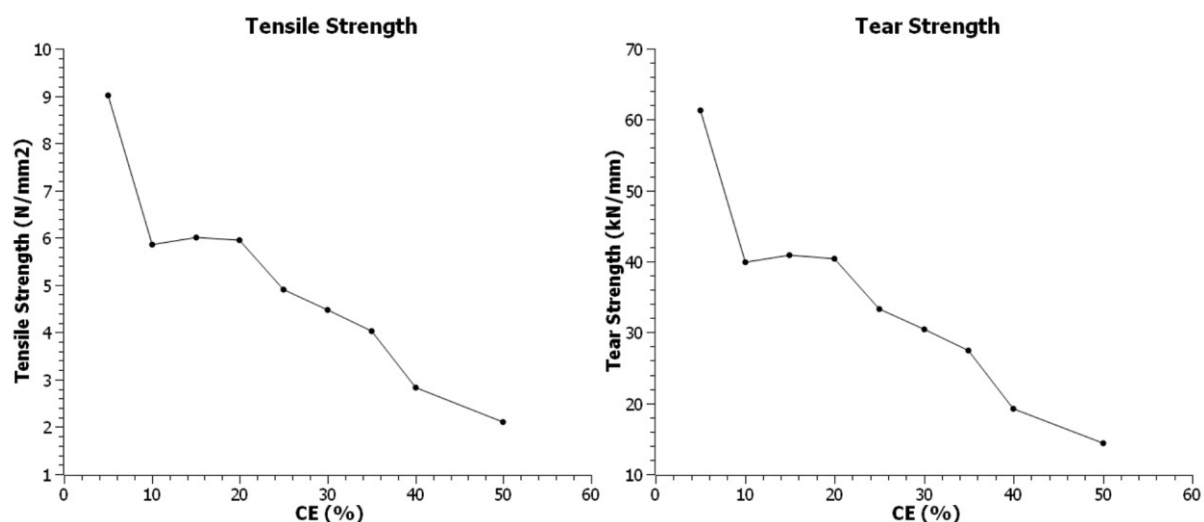
**Analisis Sifat Mekanik Film Bioplastik dari Selulosa Ester**

Analisis uji mekanik dari film bioplastik dilakukan berdasarkan rasio AGU:FA-Cl dan DMAc/LiCl dan temperatur esterifikasi, seperti yang terlihat pada

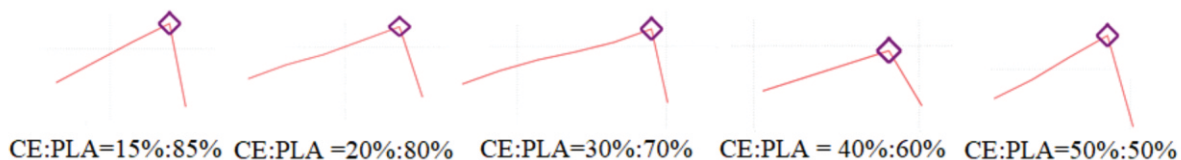
Tabel 3. Dari Tabel 3, dapat dilihat bahwa pada komposisi rasio AGU:FA-Cl dan DMAc/LiCl yang sama namun pada temperatur esterifikasi yang berbeda, yaitu 75<sup>o</sup> dan 85<sup>o</sup> C, terdapat perbedaan nilai *Tensile Strength* dan *Modulus of Elasticity*. Nilai *Tensile Strength* lebih tinggi pada proses

estriifikasi pada temperatur yang lebih tinggi, namun nilai *Modulus of Elasticity* lebih tinggi pada temperatur yang lebih rendah. Sedangkan untuk

temperatur proses yang sama, tidak terdapat perbedaan nilai *Modulus of Elasticity* yang signifikan.



Gambar 9. *Tensile Strength* dan *Tear Strength* dari Spesimen Tinta 3D berdasarkan *infill density*  
 Figure 9. *Tensile Strength* and *Tear Strength* of 3D Ink Specimens based on *infill density*



Gambar 10. Grafik Uji Tarik dari Filamen 3D pada rasio CE:PLA yang berbeda  
 Figure 10. Graphical tensile strength change of printed FISELOS in different CE:PLA ratio

Tabel 3. Sifat Mekanik Film Bioplastik Selulosa Ester

Table 3. Mechanical Properties of Bioplastic Film Made from Cellulose Ester

AGU:FA-Cl Molar	LiCl/DMAc %w/v	Temperatur °C	<i>Tensile Strength</i> (N/mm <sup>2</sup> )	<i>Modulus of Elasticity</i> (MPa)
7	8.25	75	8.35	27.19
7	8.25	85	9.2	21.26
7	9.25	75	13.45	27.67
7	9.25	85	8.75	23.78



## KESIMPULAN

Dari hasil karakterisasi menggunakan metode TGA, diketahui bahwa titik lelehnya berada diantara filamen konvensional yang sering digunakan, yaitu PLA dan ABS, sehingga selulosa ester yang dihasilkan dari tankos kelapa sawit berpotensi untuk menggantikan filamen yang sudah ada pada mesin *3D printing* konvensional. Dari hasil pengujian mekanik, dapat disimpulkan untuk mendapatkan kekuatan mekanik yang optimal dari hasil *3D printing* menggunakan tinta berbahan dasar selulosa ester dari tankos kelapa sawit, *infill density* dari produk berkisar pada 100% - 80%. Sedangkan untuk mendapatkan filamen 3D yang baik, komposisi campuran CE:PLA dari produk adalah 20%:80%. Pengujian mekanik juga menunjukkan bahwa terdapat perbedaan nilai *Tensile Strength* dan *Modulus of Elasticity*. Nilai *Tensile Strength* lebih tinggi pada proses estrifikasi pada temperatur yang lebih tinggi, namun nilai *Modulus of Elasticity* lebih tinggi pada temperatur yang lebih rendah. Sedangkan untuk temperatur proses yang sama, tidak terdapat perbedaan nilai *Modulus of Elasticity* yang signifikan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah membiayai penelitian ini melalui dana RISPRO LPDP.

## DAFTAR PUSTAKA

- Dai, L., Cheng, T., Duan, C., Zhao, W., Zhang, W., Zou, X., Aspler, J., & Ni, Y. (2019). 3D printing using plant-derived cellulose and its derivatives: A review. *Carbohydrate Polymers*, 203, 71–86.
- Herawan, T., & Rivani, M. (2015). Synthesis of biodegradable plastic films from oil palm empty fruit bunch cellulose. *Advanced Materials Research*, 1123, 173–176.
- Herawan, T., Rivani, M., Irawan, S., & Halimatuddahlia. (2016). *Pengembangan Bioplastik Berbasis Minyak dan Biomassa Sawit*.
- Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639–649.
- Li, Y.-Y., Wang, B., Ma, M.-G., & Wang, B. (2018). Review of recent development on preparation, properties, and applications of cellulose-based functional materials. *International Journal of Polymer Science*, 2018.
- Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.
- Noorani, R. (2017). *3D printing: technology, applications, and selection*. CRC Press.
- Pattinson, S. W., & Hart, A. J. (2017). Additive manufacturing of cellulosic materials with robust mechanics and antimicrobial functionality. *Advanced Materials Technologies*, 2(4), 1600084.
- Redwood, B., Schöffner, F., & Garret, B. (2017). *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. 3D Hubs.
- Tao, H.-H., Snaddon, J. L., Slade, E. M., Henneron, L., Caliman, J.-P., & Willis, K. J. (2018). Application of oil palm empty fruit bunch effects on soil biota and functions: a case study in Sumatra, Indonesia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 256, 105–113.
- Wang, Q., Sun, J., Yao, Q., Ji, C., Liu, J., & Zhu, Q. (2018). 3D printing with cellulose materials. *Cellulose*, 25(8), 4275–4301.
- Willberg-Keyriläinen, P., & Ropponen, J. (2019). Evaluation of esterification routes for long chain cellulose esters. *Heliyon*, 5(11), e02898. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02898>
- Xiaoyun, Q., & Shuwen, H. (2013). “Smart” Materials Based on Cellulose: A Review of the Preparations, Properties, and Applications. *Materials*, 6, 738–781. <https://doi.org/10.3390/ma6030738>