

Available online at: <http://reactor.poltekainpdg.ac.id/>**REACTOR****Journal of Research on Chemistry and Engineering**

| ISSN Online 2746-0401 |



Rancang Bangun Mesin Digesting Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Bahan Baku *Brown Paper*

Fauzatu Arabica Yatasya Hasibuan ¹, Sari Farah Dina ¹, Krissandarta Tarigan ¹, Lies Indriati ²

¹ Politeknik Teknologi Kimia Industri, Jl. Medan Tenggara VII-Medan, 20228, Indonesia

² Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. Sangkuriang-Bandung, 40135, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: May 14, 2023

Revised: June 27, 2024

Accepted: June 29, 2024

KEYWORDS

Brown Paper, Digesting, Pulp

CORRESPONDENCE

Name: Sari Farah Dina

E-mail: sfdina1@kemenperin.go.id

ABSTRACT

Indonesia's pulp and paper production capacity was 5.5% of global production capacity in 2021. As an effort to support the development of the pulp and paper industry in Indonesia, pulp from empty oil palm fruit bunches (EFB) waste which are currently abundant is being tried to develop as raw material for brown paper. To simplify the process of developing pulp quality from EFB, the authors tried to design a rotary digester on a laboratory scale as a EFB digesting machine. The steps used in this research are assembling digester, making pulp, and finally analyzing the data. The digester machine was successfully designed to carry out the pulping process with operating conditions at a pressure of 7 bar, a temperature of 160°C, and a stirrer speed of 80 rpm with a maximum capacity of 1.3 L. The designed rotary digester is capable of producing pulp with an optimal yield level (43%) under reaction conditions, a temperature of 100°C and a NaOH concentration of 5%.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan pasar yang pesat mendorong perkembangan industri kelapa sawit di Indonesia [1], [2]. Berdasarkan data dari Direktorat Jenderal Perkebunan Kementan RI, Indonesia memproduksi minyak kelapa sawit sebanyak 48,24 juta ton pada tahun 2022. Industri kelapa sawit tidak hanya menghasilkan crude palm oil (CPO) dan palm kernel oil (PKO) tetapi juga menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah yang besar, khususnya limbah yang berasal dari aktivitas penggilingan kelapa sawit [3], [4]. Secara umum, satu ton tandan buah segar (TBS) akan menghasilkan 230 kg tandan kosong kelapa sawit (TKKS), 130 kg serabut, dan 60 kg cangkang kelapa sawit [5], [6]. Limbah-limbah tersebut telah banyak diidentifikasi dan dikembangkan sebagai bahan bakar untuk sumber daya energi yang terbarukan (*renewable*) [7], [8]. Dengan besarnya minat untuk terus mengembangkan industri yang berkelanjutan, limbah harus diutilisasi secara efisien, misalnya sebagai bahan baku untuk membuat produk yang lebih ekonomis [9], [10].

Salah satu alternatif pengolahan biomassa TKKS adalah pembuatan pulp sebagai bahan baku *brown paper* [11], [12]. Pemanfaatan TKKS sebagai bahan baku serat pengganti bahan baku kayu diharapkan dapat mengembangkan teknologi pembuatan kertas di Indonesia yang memenuhi 5,5% kapasitas produksi global pada tahun 2021 [13]. Unit operasi utama pembuatan pulp melibatkan pemasakan, yang berlangsung dalam *digester* kontinyu atau *batch*. Tujuan pemasakan adalah untuk memisahkan serat selulosa dari matriks lignin kayu [14], [15], [16]. Untuk mempermudah proses pengembangan kualitas *pulp* dari TKKS maka penulis mencoba merancang *digester* dalam skala laboratorium sebagai mesin *digesting* TKKS.

Proses *digesting* TKKS harus stabil dan efisien, tetapi untuk mencapai tujuan tersebut, *digester* kontinyu bersifat cenderung kompleks karena mengacu pada masalah operasional yang disebabkan oleh waktu tinggal yang tinggi, pergerakan kolom yang tidak stabil, kurangnya variabel pengukuran proses perantara yang mencerminkan efisiensi proses, interferensi dari gangguan dinamis di area lain pabrik, dan perubahan

stokastik pada sifat bahan baku [17]. Oleh karena itu, perlu dikembangkan *batch digester* yang lebih fleksibel dan dapat digunakan untuk volume campuran reaksi yang lebih kecil.

Sekitar 40% dari 188 juta ton *kraft pulp* per tahun yang diproduksi di dunia menggunakan *batch digester*. Pada reaktor kimia ini, suatu bahan baku (biasanya kayu) dididignifikasi menggunakan larutan NaOH dan Na₂S (yang disebut juga sebagai *white liquor*) pada temperatur 160-175°C selama sekitar 2 jam. Veselnya biasanya berbentuk silinder dengan volume pada rentang 70-400 m³, diameter 2,5-5 m, dan tinggi 8,5-19 m [18]. *Pulp* yang diproduksi dari operasi *batch digester* biasanya tidak seragam di mana koefisien variasi bilangan kappa berada pada rentang 5-16% [19]. Variabilitas ini disebabkan oleh ketidakseragaman kontak antara larutan dan padatan dalam vesel. Sementara, keseragaman proses *pulping* selama operasi *batch* penting untuk optimisasi kinerja *digester*, yaitu penghematan waktu pemasakan, peningkatan kestabilan dan kontrol proses, penghematan penggunaan *bleaching* pada tahap selanjutnya (ramah lingkungan), dan peningkatan kekuatan *pulp* [20].

Meskipun *batch digester* banyak digunakan untuk memproduksi *pulp*, sebagian besar *digester* tersebut berbentuk tangki berpengaduk yang memungkinkan ketidakseragaman kualitas *pulp* dalam vesel. Masih sedikit literatur yang berfokus pada peningkatan homogenitas *pulp* yang diproduksi selama proses *batch*. Untuk mencapai keseragaman proses *pulping*, maka dalam penelitian ini *batch digester* dengan tipe *rotary* yang memungkinkan tangki dapat berputar 360° didesain agar memungkinkan campuran reaksi memiliki distribusi waktu tinggal yang seragam, sehingga proses *pulping* lebih merata.

Rotary digester yang digunakan untuk membuat *pulp* dalam penelitian ini menggunakan heater yang terhubung dengan sumber listrik dan ditambahkan *glasswool* sebagai *jacket heater*. *Digester* ini dirancang dalam skala laboratorium dengan kondisi operasi maksimal, yaitu tekanan 7 bar dan temperatur heater 160°C. Penelitian ini berfokus pada keberhasilan proses pemasakan TKKS menggunakan *rotary digester* pada dua suhu berbeda (100°C dan 160°C) dan tiga konsentrasi basa berbeda (5%, 10%, dan 15%). Keberhasilan proses tersebut diukur dari persentase rendemen (perolehan) *pulp* yang dihasilkan.

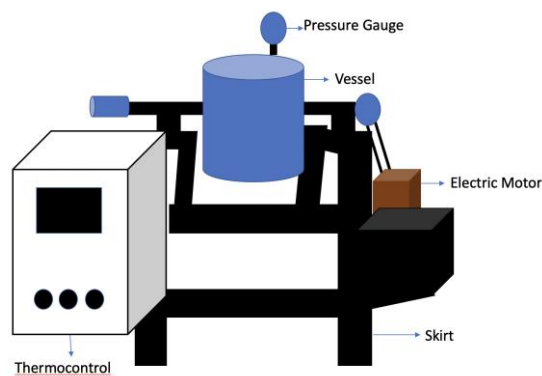
METODOLOGI

Perangkaian Digester

Pembuatan alat *digester* dilakukan selama 5 bulan di PTKI Medan. Beberapa komponen dasar dari *rotary digester* yang dirancang pada penelitian ini, yakni: Tangki, berfungsi sebagai tempat proses *pulping* (pemasakan) bahan baku. *Heater*, berfungsi untuk *supply* panas. Motor listrik, berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, sehingga dapat digunakan untuk proses pengadukan selama pemasakan. *Thermocontrol*, berfungsi untuk mengatur temperatur di dalam *digester* di mana energi panas ke dalam dan keluar ruang disesuaikan untuk mencapai suhu yang diinginkan. *Pressure gauge*, digunakan untuk mengukur tekanan proses.

Pembuatan Pulp

Bahan baku TKKS ditimbang sebanyak 200 gr dan dicampur dengan 800 mL larutan NaOH. Campuran TKKS dan larutan pemasak dimasukkan ke dalam *rotary digester* kemudian ditutup rapat. Soket kontak panel kontrol dihubungkan ke sumber listrik. Panel kontrol dihidupkan kemudian ditentukan temperatur pemasakan yang optimal dan temperatur tersebut diatur pada *temperature controller*. Pembacaan temperatur digital pada kontrol panel dihidupkan dan alat dijalankan. Skema desain *digester* disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain *Digester*

Pada proses *pulping*, NaOH digunakan untuk melarutkan lignin dan pengotor lain yang terdapat pada *fiber*. Namun, NaOH dapat merusak material seperti kertas karena NaOH merupakan basa kuat dan bersifat korosif. Oleh karena itu, konsentrasi penggunaannya harus dipertimbangkan. Selain itu, dengan derajat polimerisasi yang rendah, hemiselulosa pada bahan non-kayu seperti TKKS mudah terdegradasi dan larut selama proses pemasakan mulai temperatur sekitar 100°C. Pada penelitian ini, temperatur divariasikan pada 100°C dan 160°C seperti tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi kondisi operasi *pulping*

Temperatur (°C)	Konsentrasi Basa (NaOH) (%-m)
100	5
	10
	15
160	5
	10
	15

Analisis Hasil

Rendemen produk dianalisa dengan menimbang bahan baku (TKKS) dan produk akhir (*pulp* kering). Persentase rendemen

merupakan rasio antara massa *pulp* kering dan massa TKKS awal seperti disajikan pada persamaan berikut.

$$\%Rendemen = \frac{\text{Massa pulp kering (g)}}{\text{Massa TKKS awal (g)}} \times 100\% \quad (1)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi Alat Digester

Berdasarkan rancang bangun yang dilakukan, telah dihasilkan *digester* yang merupakan alat yang esensial untuk proses delignifikasi, yaitu proses pemutusan ikatan antara makromolekul lignoselulosa selama pemasakan *pulp*. Proses ini bertujuan untuk mengurangi kadar lignin pada hasil *pulping* dari bahan baku TKKS [21].

Tabel 2. Datasheet Digester

No.	Operating/Mechanical Parameter	Quantity	Unit
1	Fluid		
	Quantity	1313	cm ³
	Density	913.8	kg/m ³
2	Operating temperature	170	°C
3	Operating pressure	7.14	kg/cm ² .g
4	Design temperature	200	°C
5	Design pressure	10	kg/cm ² .g
6	Nominal volume	1876	cm ³
7	Working volume	1313	cm ³
8	Dimension		
	Shell ID	12	cm
	Shell Height	18	cm
	Shell Thickness	8	mm
9	Head Type	Torispherical Flanged and Dished Head	
	Head thickness	3,65	mm
	Head height	30	mm
10	Configuration	Vertical	
11	Corrosion allowance	3,18	mm
12	Material		
	Shell	SS-304	
	Head	SS-304	
13	Externals		
	Shaft		
	Material	Mild Steel UNP 6	
	Rotary		
	Speed	80	rpm
	Power	187	Watt
	Heating element plate		
	Plate diameter	12	
	Insulation jacket		
	Material	Glass wool	
	Jacket length	15	cm

Kecepatan pengaduk pada *digester* berkisar pada 80 rpm. *Digester* ini memiliki alat pengontrol temperatur yaitu *thermocontrol* yang dapat di-setting pada kontrol panel.

Energi panas yang diinput untuk alat *digester* ini berasal dari energi listrik yang dikonversi melalui plat elemen pemanas. *Digester* ini juga dilengkapi dengan *pressure*

gauge untuk mengukur tekanan dalam *digester*. Luas permukaan *digester* ini adalah 20,35 cm², sehingga kapasitas maksimal materialnya sebesar 1,3 L. Tangki *digester* ini dibuat dengan material SS 304. Sementara, *shaft* penghubung terbuat dari *mild steel* UNP 6. *Digester* ini juga dilengkapi dengan motor listrik ½ HP dan gearbox 1:10 Type 40 AMW. Motor ini digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi mekanis sedangkan *gear box*-nya berfungsi untuk menggerakkan tangki *digester* sehingga dapat berputar 360°. *Datasheet* peralatan *digester* ditunjukkan pada Tabel 2.

Alat *digester* yang dirancang memiliki dua silinder, yaitu silinder dalam dan silinder luar. Silinder dalam berisi bahan baku TKKS dan larutan NaOH. Ruang di antara silinder dalam dan silinder luar berisi *glasswool* sebagai *isolator*. Silinder dalam memiliki diameter sebesar 12 cm dengan ketebalan dinding sebesar 8 mm dan tinggi silinder dalam sebesar 18 cm. Sementara, silinder luar memiliki diameter sebesar 34 cm dan tinggi sebesar 21,5 cm. Kedua silinder tersebut dipasang pada sebuah *shaft* yang dihubungkan pada bearing 1.5". Skema alat *digester* yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. *Digester* untuk Proses *Pulping*

Kalibrasi Temperatur

Sensor suhu terpasang pada penutup reaktor, sehingga terdapat *gap* temperatur antara temperatur fluida sebenarnya dengan temperatur yang ditampilkan pada kontrol panel. Kami mencoba melakukan kalibrasi suhu pada *digester*, sehingga dapat diketahui temperatur fluida sebenarnya. Peristiwa perpindahan kalor yang terjadi dalam *digester* diilustrasikan pada Gambar 3.

Kalor (*Q*) yang dikonversi dari energi listrik diinput melalui elemen pemanas yang dilekatkan di bawah silinder dalam *digester*. Kalor tersebut digunakan untuk memanaskan fluida yang berada di dalam *digester*. Kalor dari fluida berpindah menuju penutup reaktor secara konveksi dan konduksi. *Gap* antara temperatur fluida

dan temperatur yang terbaca oleh sensor diuraikan melalui Persamaan 2.

$$Q = U_{overall} \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

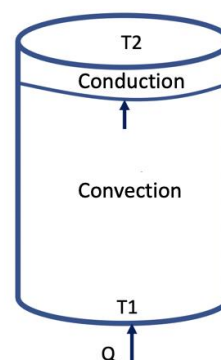
Keterangan:

Q = Kalor (Watt)

U_{overall} = Koefisien perpindahan panas *overall* (W/m². °C)

A = Luas penampang (m²)

ΔT = Perbedaan temperatur (°C).



Gambar 3. Peristiwa Perpindahan Panas dalam *Digester*

Panas yang dibutuhkan untuk memanaskan campuran tandan kosong kelapa sawit dengan larutan NaOH hingga 160°C adalah 110,7 Watt (dihitung melalui jumlah panas laten dan panas sensibel yang dibutuhkan). Penampang *digester* sebagai media penghantar panas memiliki luas sekitar 0,096 m². Selanjutnya, koefisien perpindahan panas secara *overall* dihitung melalui Persamaan 3.

$$U_{overall} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x}{k A}} \quad (3)$$

Keterangan:

U_{overall} = Koefisien perpindahan panas *overall* (W/m². °C)

h_i = Koefisien perpindahan panas secara konveksi (W/m². °C)

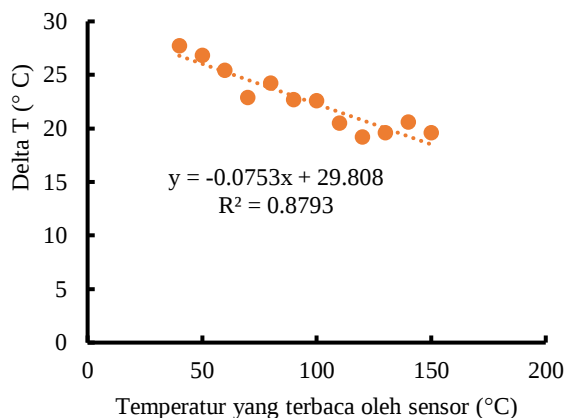
Δx = Ketebalan plat (m)

k = Koefisien perpindahan panas secara konduksi (W/m. °C)

A = Luas penampang plat (m²).

Berdasarkan literatur, koefisien perpindahan panas secara konveksi untuk *steam* berada sekitar 3000 W/m². °C. Sementara, koefisien perpindahan panas secara konduksi untuk SS 304 adalah 15,67 W/m. °C [22], [23]. Jika dikalkulasi dengan memasukkan semua nilai variabel yang telah dipaparkan maka diperoleh nilai koefisien perpindahan panas *overall* sebesar 39,83 W/(m². °C). Selanjutnya, diperoleh perbedaan temperatur antara temperatur fluida dan temperatur yang terbaca oleh sensor adalah 28,9°C.

Selain melalui perhitungan secara teoritis, perbedaan temperatur antara temperatur fluida dan temperatur yang terbaca oleh sensor juga dikalibrasi melalui *pressure gauge*. Kalibrasi ini menggunakan asumsi bahwa tekanan yang ditunjukkan oleh *pressure gauge* berasal dari uap jenuh. Hasil kalibrasi ditunjukkan pada Gambar 4.



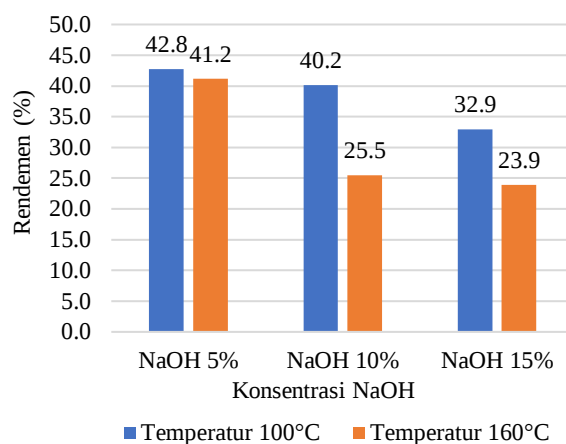
Gambar 4. Kalibrasi Temperatur *Digester*

Uji Kinerja *Digester*

Rotary digester yang didesain pada penelitian ini diuji untuk menentukan apakah *digester* dapat menghasilkan produk yang diinginkan secara efektif dengan mengevaluasi kadar hasil dari proses delignifikasi. *Pulp* dianalisa menggunakan rasio TKKS dan pelarut 1:4, kecepatan pengaduk 80 rpm, dan waktu pemasakan 120 menit. Temperatur divariasikan pada 100°C & 160°C dan konsentrasi basa (NaOH) divariasikan pada 5-15%-m. Pengaruh temperatur dan konsentrasi NaOH dapat dilihat pada Gambar 5. Rendemen tertinggi diperoleh pada temperatur pemasakan 100°C dan konsentrasi NaOH 10% yaitu sebesar 42,9%. Sementara rendemen terendah diperoleh didapat pada temperatur pemasakan 160°C dan konsentrasi NaOH 15% yaitu sebesar 23,9%. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa *rotary digester* yang didesain mampu menghasilkan *pulp* dengan tingkat rendemen yang optimal pada kondisi reaksi temperatur 100°C dan konsentrasi NaOH 5%.

Berdasarkan Gambar 5, semakin tinggi temperatur reaksi, rendemen produk yang dihasilkan semakin rendah. Hal ini disebabkan karena rendahnya massa *pulp* yang dihasilkan. Semakin tinggi temperatur reaksi menyebabkan semakin banyak selulosa yang akan terlepas dari lignin dan semakin banyak senyawa lignoselulosa yang terlarut dalam larutan pemasak [20]. Selanjutnya, berdasarkan Gambar 5, semakin besar konsentrasi NaOH yang digunakan, semakin rendah rendemen *pulp* yang diperoleh. Tingkat delignifikasi yang tinggi terjadi pada konsentrasi NaOH yang besar karena semakin banyaknya jumlah NaOH yang mengikat lignin. Namun demikian, jumlah *pulp* TKKS yang dihasilkan pada kondisi konsentrasi 15% lebih sedikit

dibandingkan konsentrasi 5% dan 10%. Hal ini disebabkan karena semakin halusya ukuran partikel *pulp* yang menyebabkan semakin banyak *pulp* yang lolos saring saat pencucian [22]. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang lainnya [23].



Gambar 5. Pengaruh Temperatur Reaksi dan Konsentrasi NaOH terhadap Rendemen *Pulp*

KESIMPULAN

Rotary digester telah berhasil dibuat untuk mengoperasikan proses *pulping* pada kondisi operasi tekanan 7 bar, suhu 160°C, dan kecepatan pengaduk 80 rpm dengan kapasitas maksimal 1,3 L. Proses perpindahan panas secara konveksi dan konduksi terjadi di dalam *digester*. Berdasarkan kalibrasi suhu, selisih suhu antara suhu fluida dan suhu sensor berada pada rentang 28,9-29,8°C. *Rotary digester* yang dirancang mampu menghasilkan *pulp* dengan rendemen optimal (43%) pada kondisi reaksi 100°C dan konsentrasi NaOH 5%. Sementara, temperatur dan konsentrasi yang lebih tinggi, yaitu pada temperatur 160°C dan konsentrasi NaOH 15% menghasilkan rendemen terendah sebesar 23,9%.

ACKNOWLEDGEMENT

Terimakasih kepada Politeknik Teknologi Kimia Industri Medan yang telah mendukung penelitian ini, terutama dukungan finansial melalui Pendanaan Penelitian yang dibebankan pada DIPA Politeknik Teknologi Kimia Industri Medan Tahun Anggaran 2023.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Junaedi, "Indonesia is the biggest grant of oil palm crude palm oil (CPO) in the world but facing the problem of oil scarcity surprise cooking oil prices," *International Journal of Social Science*, vol. 2, no. 4, pp. 1779–1790, Dec. 2022, doi: 10.53625/ijss.v2i4.4137.

- [2] K. Akli, Y. Aprila, A. Akbar, and M. I. Senjawati, "Pengaruh pemasangan fine bubble diffuser terhadap nilai COD dan BOD limbah cair palm oil mill effluent," *REACTOR: Journal of Research on Chemistry and Engineering*, vol. 3, no. 1, p. 36, Jun. 2022, doi: 10.52759/reactor.v3i1.55.
- [3] E. Hambali and M. Rivai, "The potential of palm oil waste biomass in Indonesia in 2020 and 2030," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2017. doi: 10.1088/1755-1315/65/1/012050.
- [4] N. Z. Zahari, P. M. Tuah, N. H. C. Zulkifli, and F. N. Cleophas, "Composting of oil palm empty fruit bunches by microbial inoculant," *International Journal of Technology*, vol. 14, no. 5, pp. 1081–1092, 2023, doi: 10.14716/ijtech.v14i5.5907.
- [5] A. B. Nasrin et al., "Briquetting of empty fruit bunch fibre and palm shell as a renewable energy fuel," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 6, no. 6, pp. 446–451, 2011, doi: 10.3923/jeasci.2011.446.451.
- [6] N. Abdullah and F. Sulaim, "The oil palm wastes in Malaysia," in *Biomass Now - Sustainable Growth and Use*, InTech, 2013. doi: 10.5772/55302.
- [7] T. M. I. Mahlia, N. Ismail, N. Hossain, A. S. Silitonga, and A. H. Shamsuddin, "Palm oil and its wastes as bioenergy sources: a comprehensive review," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 15. Springer, pp. 14849–14866, May 01, 2019. doi: 10.1007/s11356-019-04563-x.
- [8] M. Takano and K. Hoshino, "Production of biofuel from waste lignocellulosic biomass materials based on energy saving viewpoint," *Int J Mod Phys Conf Ser*, vol. 06, pp. 715–720, Jan. 2012, doi: 10.1142/s2010194512004035.
- [9] R. Nabila et al., "Oil palm biomass in Indonesia: Thermochemical upgrading and its utilization," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 176. Elsevier Ltd, Apr. 01, 2023. doi: 10.1016/j.rser.2023.113193.
- [10] D. F. Nury, M. Z. Luthfi, and S. Zullaikah, "Pengaruh kondisi temperatur pirolisis tandan kosong kelapa sawit terhadap komposisi produk tar," *REACTOR: Journal of Research on Chemistry and Engineering*, vol. 3, no. 1, p. 22, Jun. 2022, doi: 10.52759/reactor.v3i1.47.
- [11] L. Indriati, N. Elyani, and S. F. Dina, "Empty fruit bunches, potential fiber source for Indonesian pulp and paper industry," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/980/1/012045.
- [12] A. Ferrer, A. Vega, P. Ligero, and A. Rodríguez, "Pulping of empty fruit bunches (EFB) from the palm oil industry by formic acid," *BioResources*, vol. 6, pp. 4282–4301, Nov. 2011, doi: 10.15376/biores.6.4.4282-4301.
- [13] Statista, "Global pulp for paper production," [Online]. Available: www.statista.com
- [14] P. W. Hart, "Production of high yield bleached hardwood kraft pulp: breaking the kraft pulp yield barrier," *Tappi J*, vol. 10, no. 9, pp. 37–41, 2011, doi: 10.32964/tj10.9.37.
- [15] A. A. Ogunwusi and H. D. Ibrahim, "Advances in pulp and paper technology and the implication for the paper industry in Nigeria," vol. 4, no. 10, 2014, [Online]. Available: www.iiste.org
- [16] M. Putri and S. Poeni, "Perbandingan kandungan selulosa dan lignin dari kayu *Acacia crassiparva* dan *Acacia mangium*," *REACTOR: Journal of Research on Chemistry and Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 12–14, 2020, doi: 10.52759/reactor.v1i1.3
- [17] S. Larraín, L. Pradenas, I. Pulkkinen, and F. Santander, "Multiobjective optimization of a continuous kraft pulp digester using SPEA2," *Comput Chem Eng*, vol. 143, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.compchemeng.2020.107086.
- [18] Q. F. Lee and C. P. J. Bennington, "Liquor flow in a model kraft batch digester," *Chemical Engineering Journal*, vol. 158, no. 1, pp. 51–60, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.cej.2008.08.042.
- [19] J. M. MacLeod, "Basket case: kraft pulp strength variability within a batch digester," *Tappi J*, vol. 73, pp. 185–190, Apr. 1990.
- [20] N. F. Atindu, M. Yerizam, and E. Dewi, "Rancang bangun digester untuk proses pulping dari campuran tandan kosong kelapa sawit dan pelepah pisang dengan pelarut NaOH," *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, vol. 1, no. 9, pp. 365–374, Sep. 2021, doi: 10.52436/1.jpti.88.
- [21] B. Davidsdottir, "Forest products and energy," in *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, 2013. doi: 10.1016/b978-0-12-409548-9.01454-8.
- [22] H. R. Permatasari, F. Gulo, and B. Lesmini, "Pengaruh konsentrasi H₂SO₄ dan NaOH terhadap delignifikasi serbuk bambu (*Gigantochloa apus*)," Universitas Sriwijaya, 2014.
- [23] S. Bahri, "Pembuatan pulp dari batang pisang," *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, vol. 4, pp. 36–50, Nov. 2015, doi: 10.29103/jtku.v4i2.72.