



Prototipe Portabel Berbasis pH dan Turbiditas untuk Estimasi Cepat Asam Lemak Bebas pada Minyak Sawit Mentah

Portable pH–Turbidity-Based Prototype for Rapid Estimation of Free Fatty Acids in Crude Palm Oil

Akhmad Asrho Berlian Abimanyu¹, Febryan Kusuma Wisnu^{1*}, Mareli Telaumbanua¹, Warji¹, Sandi Asmara¹, I Gede Krishna Wijaya¹

¹Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung

*Corresponding Author: febryankusumawisnu@gmail.com

Abstract. Free fatty acid (FFA) content is an important quality attribute in crude palm oil (CPO), particularly because it reflects changes associated with fruit damage, delayed processing, and hydrolytic reactions during postharvest handling. Conventional FFA determination is commonly performed using acid-base titration, which requires reagents, sample preparation, and laboratory procedures. This study developed a portable prototype for rapid FFA estimation in CPO using pH and turbidity parameters combined with an artificial neural network model. Oil samples were prepared from oil palm fruitlets grouped based on physical damage levels. Reference FFA values were obtained using acid-base titration, while pH and turbidity were used as predictor variables. The prototype was developed using an Arduino-based system to display the estimated FFA value from the trained model. The results showed that pH and turbidity provided different predictive contributions, with coefficients of determination of 0.3516 and 0.7636, respectively. The best artificial neural network model was obtained using the tansig-logsig-logsig activation function, producing an R^2 of 0.9501 and RMSE of 0.6390 during calibration. Model testing produced an R^2 of 0.8061 and RMSE of 1.9222. These results indicate that the combination of pH, turbidity, and artificial neural network modeling can be used as a basis for rapid empirical estimation of FFA content in CPO.

Keywords: Artificial Neural Network, Crude Palm Oil, Free Fatty Acid, pH, Turbidity.

1. Pendahuluan

Mutu *Crude Palm Oil* (CPO) sangat ditentukan oleh kondisi tandan buah segar sebelum pengolahan, terutama tingkat kematangan, kerusakan mekanis, lama penundaan proses, serta kebersihan penanganan pascapanen. Kerusakan jaringan buah sawit dapat mempercepat kontak antara minyak, air, enzim lipase, dan mikroorganisme, sehingga reaksi hidrolisis trigliserida berlangsung lebih intensif dan meningkatkan kadar Asam Lemak Bebas (ALB) atau *Free Fatty Acid* (FFA) (Azeman et al., 2015a; Tan et al., 2009). Kenaikan ALB menunjukkan penurunan mutu bahan baku dan dapat berdampak pada efisiensi pemurnian, stabilitas minyak, serta nilai ekonomis CPO.

Penentuan kadar ALB pada CPO umumnya dilakukan melalui titrasi asam-basa menggunakan pelarut alkohol, indikator fenolftalein, dan larutan basa standar. Metode ini masih relevan sebagai acuan laboratorium karena prosedurnya relatif sederhana dan hasilnya dapat digunakan sebagai nilai referensi. Namun, titrasi memiliki keterbatasan untuk pemeriksaan cepat karena membutuhkan bahan kimia, preparasi sampel, ketelitian pembacaan titik akhir, dan operator yang terlatih (Azeman et al., 2015a; Azeman et al., 2015b). Dalam pengendalian mutu lapangan, keterbatasan tersebut membuat titrasi kurang praktis sebagai metode skrining awal terhadap sampel dalam jumlah banyak.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mempercepat estimasi ALB, antara lain *near-infrared spectroscopy* (NIR), *Fourier-transform infrared spectroscopy* (FTIR), metode elektrokimia, dan sistem berbasis sensor. NIR dan FTIR terbukti mampu menduga kadar ALB pada minyak sawit secara cepat, tetapi kebutuhan instrumen khusus dan biaya pengadaan yang relatif tinggi membatasi penerapannya pada skala sederhana atau penggunaan lapangan (Che Man & Moh, 1998; Che Man & Setiowaty, 1999; Che Man et al., 1999). Dalam konteks tersebut, pH dan *turbidity* dapat dipakai sebagai variabel empiris yang lebih sederhana, dengan catatan bahwa pH pada matriks minyak diposisikan sebagai parameter operasional, sedangkan *turbidity* merepresentasikan perubahan sifat optik akibat partikel tersuspensi, komponen terdispersi, atau pengotor yang muncul seiring penurunan mutu minyak.

Hubungan antara pH, *turbidity*, dan ALB tidak selalu bersifat linear, sehingga diperlukan pendekatan pemodelan yang mampu menangkap pola hubungan antarvariabel. Jaringan Saraf Tiruan (JST) dapat digunakan untuk membangun model prediksi ketika hubungan antara variabel input dan output bersifat kompleks atau tidak cukup dijelaskan dengan regresi linear sederhana. Dalam penelitian ini, pH dan *turbidity* digunakan sebagai variabel masukan, sedangkan kadar ALB hasil titrasi digunakan sebagai nilai referensi. Model JST kemudian diintegrasikan ke dalam prototipe portabel berbasis Arduino untuk menampilkan estimasi kadar ALB secara cepat.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan prototipe portabel untuk estimasi kadar ALB pada CPO menggunakan parameter pH, *turbidity*, dan model JST. Fokus penelitian bukan menggantikan metode titrasi standar, melainkan menguji potensi kombinasi parameter sederhana sebagai dasar skrining awal mutu CPO. Dengan posisi tersebut, prototipe yang dikembangkan diharapkan menjadi tahap awal menuju sistem estimasi ALB yang lebih cepat, murah, dan mudah digunakan pada kondisi lapangan.

2. Metode Penelitian

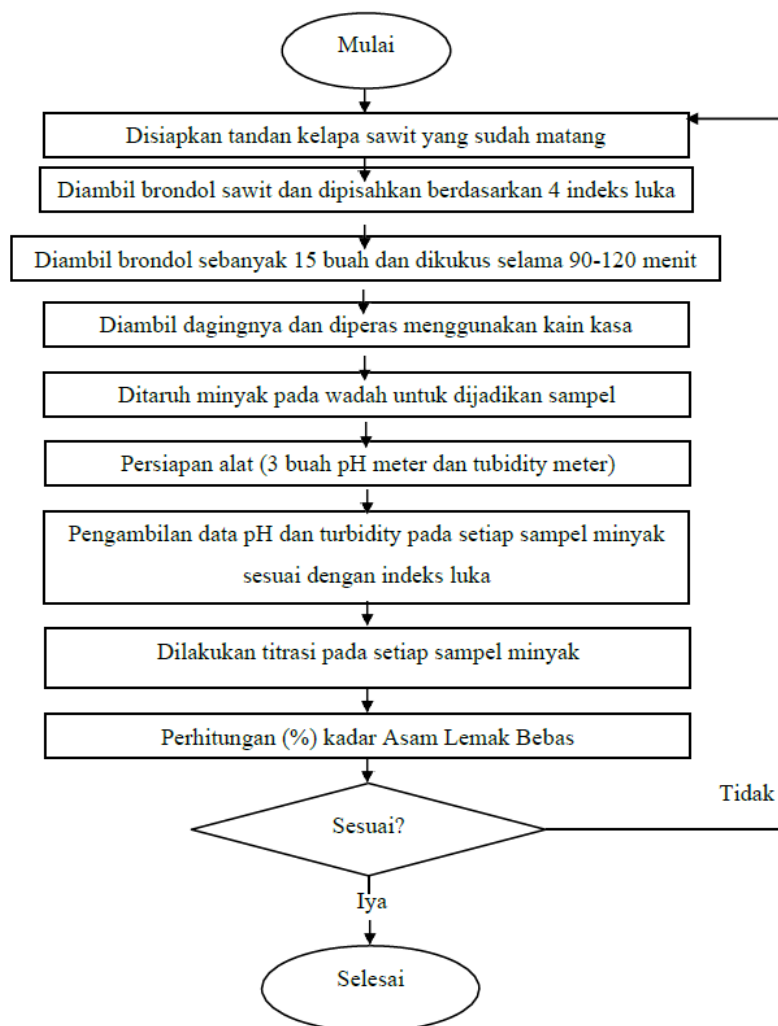
Penelitian dilaksanakan pada bulan Agustus sampai November 2023 di Laboratorium Rekayasa Sumber Daya Air dan Lahan, Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Bahan utama yang digunakan adalah brondol kelapa sawit yang diproses menjadi sampel minyak CPO. Bahan kimia yang digunakan untuk analisis ALB meliputi isopropil alkohol, indikator fenolftalein, larutan NaOH 0,1 N, dan akuades. Alat laboratorium yang digunakan meliputi timbangan analitik, erlenmeyer, gelas ukur, pipet tetes, buret, hotplate stirrer, kain kasa, cawan, pH meter, dan turbidity meter.

Perangkat prototipe terdiri atas Arduino Uno, LCD 16×2, modul I2C, potensiometer, kabel jumper, breadboard, kabel USB, power bank, dan kotak rangkaian. Prototipe dirancang sebagai unit portabel untuk menampilkan hasil estimasi ALB berdasarkan input parameter pH dan turbidity.

2.1 Persiapan Sampel Minyak

Brondol kelapa sawit dipisahkan dari tandan, kemudian dikelompokkan berdasarkan tingkat kerusakan fisik. Pengelompokan dilakukan menjadi empat indeks luka, yaitu brondol tanpa luka, luka ringan kurang dari 1 cm, luka sedang 1–2 cm, dan luka berat lebih dari 2 cm. Pengelompokan berdasarkan indeks luka digunakan untuk menghasilkan variasi kadar ALB pada sampel minyak.

Brondol yang telah dikelompokkan dikukus selama 90–120 menit, kemudian daging buah dipisahkan dan diperas menggunakan kain kasa untuk memperoleh minyak. Sampel minyak yang diperoleh digunakan untuk pengukuran pH, turbidity, dan kadar ALB referensi. Prosedur asli penelitian memang menggunakan pengelompokan empat indeks luka, pengukusan brondol, pemerasan minyak, pengukuran pH-turbidity, lalu titrasi ALB.



Gambar 1. Diagram alir pengambilan data sampel minyak CPO berdasarkan indeks luka brondol sawit

2.2 Pengukuran pH dan Turbidity

Pengukuran pH dilakukan menggunakan pH meter dengan cara mencelupkan probe ke dalam sampel minyak selama dua menit, kemudian nilai yang terbaca dicatat. Pengukuran turbidity dilakukan

dengan mengambil 10 mL sampel minyak, memasukkannya ke dalam botol sampel turbidity meter, kemudian membaca nilai kekeruhan setelah alat stabil. Prosedur pengukuran ini mengikuti rancangan awal penelitian, yaitu pH diukur langsung pada sampel minyak dan turbidity diukur menggunakan sampel 10 mL.

2.3 Analisis Kadar Asam Lemak Bebas Referensi

Kadar ALB referensi ditentukan menggunakan metode titrasi asam-basa. Sebanyak 5 g sampel minyak dimasukkan ke dalam erlenmeyer, kemudian ditambahkan 50 mL isopropil alkohol dan lima tetes indikator fenolftalein. Campuran dipanaskan dan diaduk menggunakan hotplate stirrer, kemudian dititrasi menggunakan NaOH 0,1 N hingga terjadi perubahan warna. Kadar ALB dihitung berdasarkan volume NaOH, normalitas NaOH, dan massa sampel.

Rumus perhitungan kadar ALB:

$$ALB(\%) = \frac{25,6 \times V_{NaOH} \times N_{NaOH}}{m} \quad (1)$$

dimana V_{NaOH} adalah volume NaOH yang digunakan, N_{NaOH} adalah normalitas NaOH, m adalah massa sampel minyak.

Metode titrasi digunakan sebagai nilai referensi karena metode ini masih menjadi dasar pengujian konvensional kadar ALB, meskipun memiliki keterbatasan dari sisi kecepatan, penggunaan bahan kimia, dan ketergantungan pada operator (Azeman et al., 2015a; Azeman et al., 2015b).

2.4 Pengembangan Model Jaringan Saraf Tiruan

Model JST dikembangkan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Variabel input yang digunakan adalah pH dan turbidity, sedangkan variabel target adalah kadar ALB hasil titrasi. Arsitektur model menggunakan dua hidden layer dengan struktur 2-2-1, learning rate 0,001, algoritma pelatihan trainlm, dan jumlah epoch 1000. Fungsi aktivasi yang dievaluasi meliputi kombinasi logsig, tansig, dan purelin. Skripsi asli memang mengevaluasi 27 variasi fungsi aktivasi, tetapi dalam artikel ini hanya dilaporkan performa model terbaik agar naskah tidak menjadi laporan teknis mentah.

2.5 Perancangan Prototipe

Prototipe dikembangkan menggunakan Arduino Uno sebagai unit kendali, LCD 16×2 sebagai penampil hasil, modul I2C untuk komunikasi LCD, serta potensiometer sebagai media input nilai pH dan turbidity ke dalam sistem. Komponen ditempatkan dalam kotak plastik berukuran sekitar 18,5 cm × 11,5 cm × 6,5 cm sehingga mudah dipindahkan dan digunakan sebagai perangkat portabel. Hasil estimasi ALB ditampilkan pada LCD berdasarkan perhitungan model yang diinput ke mikrokontroler. Rancangan alat asli menggunakan kotak portabel dan menampilkan komponen pH, turbidity, dan LCD pada bagian atas alat.

2.6 Analisis Data

Hubungan antara pH dan ALB serta antara turbidity dan ALB dianalisis menggunakan regresi linear sederhana. Kinerja model JST dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R^2) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Model dengan R^2 lebih tinggi dan RMSE lebih rendah dianggap memiliki kemampuan prediksi yang lebih baik.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Prototipe Portabel

Hasil penelitian menghasilkan prototipe portabel berbasis Arduino yang dapat menampilkan estimasi kadar ALB pada layar LCD. Prototipe menggunakan kotak plastik ringan sehingga lebih mudah dipindahkan dibandingkan perangkat laboratorium. Komponen utama yang digunakan meliputi Arduino Uno, LCD 16×2, I2C, potensiometer, kabel jumper, dan sumber daya portabel.



Gambar 2. Prototipe alat portabel estimasi kadar ALB pada CPO berbasis Arduino

Rancangan portabel memberikan kemudahan penggunaan, ukuran alat, dan fleksibilitas pengujian. Nilai pH dan turbiditas digunakan sebagai masukan model, kemudian hasil estimasi ALB ditampilkan pada layar LCD. Pendekatan ini memperlihatkan bahwa model prediksi kadar ALB dapat diintegrasikan ke dalam sistem mikrokontroler sederhana sehingga berpotensi digunakan untuk pemeriksaan cepat pada tahap awal pengendalian mutu CPO.

3.2 Kadar ALB Berdasarkan Indeks Luka Brondol

Pengelompokan brondol berdasarkan tingkat luka menghasilkan variasi kadar ALB yang cukup lebar. Pada data validasi, kadar ALB berkisar dari 0,505% sampai 8,920%. Sampel dengan indeks luka lebih tinggi cenderung menunjukkan kadar ALB lebih besar dibandingkan sampel tanpa luka atau luka ringan. Nilai ALB pada indeks III dan IV umumnya berada pada kisaran yang lebih tinggi, sedangkan indeks I dan II cenderung lebih rendah.

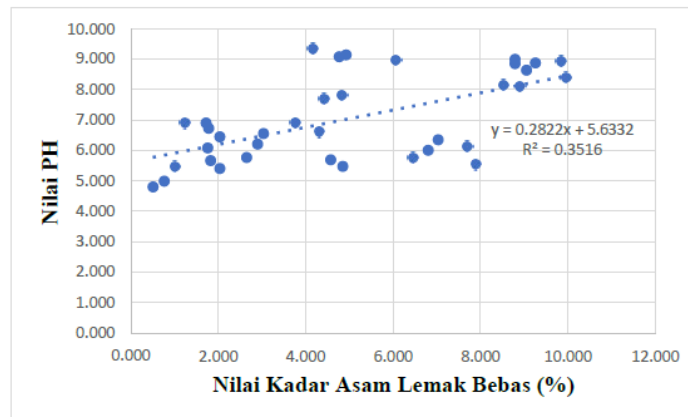
Tabel 1. Ringkasan kadar ALB pada data validasi

Indeks luka	Keterangan	Rentang ALB validasi (%)
I	Tanpa luka	0,505–2,036
II	Luka < 1 cm	1,723–2,898
III	Luka 1–2 cm	3,769–6,803
IV	Luka > 2 cm	8,533–8,920

Pola tersebut menunjukkan bahwa kerusakan fisik brondol berkaitan dengan peningkatan kadar ALB. Kerusakan jaringan buah dapat memperbesar kontak antara minyak, air, enzim lipase, dan mikroorganisme sehingga reaksi hidrolisis trigliserida menjadi lebih mudah terjadi. Mekanisme ini sejalan dengan Azeman et al. (2015b), yang menjelaskan bahwa peningkatan FFA pada minyak sawit dapat dipicu oleh kerusakan sel buah, penanganan pascapanen, reaksi minyak dengan air, serta penyimpanan yang terlalu lama. Oleh karena itu, variasi indeks luka dapat digunakan sebagai dasar pembentukan variasi sampel dalam pengembangan model estimasi ALB.

3.3 Hubungan pH dengan Kadar ALB

Hasil regresi linear menunjukkan bahwa hubungan pH dengan kadar ALB memiliki koefisien determinasi sebesar 0,3516. Nilai ini menunjukkan bahwa pH hanya mampu menjelaskan sekitar 35,16% variasi kadar ALB. Dengan demikian, pH tidak cukup kuat jika digunakan sebagai prediktor tunggal kadar ALB pada CPO.

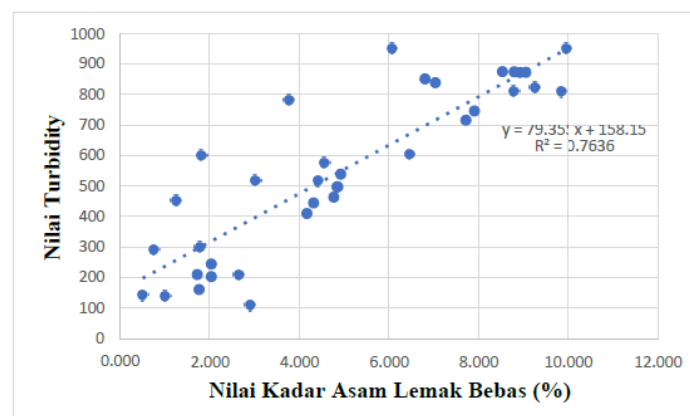


Gambar 3. Hubungan pH dengan kadar ALB pada sampel minyak CPO

Perubahan nilai pH dapat menunjukkan perubahan karakter kimia sampel yang terjadi selama penurunan mutu bahan. Pada CPO, perubahan tersebut tidak berdiri sendiri, tetapi berkaitan dengan kondisi bahan, tingkat kerusakan buah, serta proses hidrolisis yang menghasilkan asam lemak bebas. Oleh karena itu, pH dapat digunakan sebagai salah satu variabel input dalam model prediksi. Nilai R^2 sebesar 0,3516 menunjukkan bahwa pH diposisikan sebagai variabel pendukung dalam estimasi ALB, bukan sebagai parameter tunggal.

3.4 Hubungan Turbidity dengan Kadar ALB

Turbiditas menunjukkan hubungan yang lebih kuat terhadap kadar ALB dibandingkan pH. Hasil regresi linear menghasilkan koefisien determinasi sebesar 0,7636. Nilai ini menunjukkan bahwa perubahan turbiditas memiliki keterkaitan yang cukup besar dengan variasi kadar ALB pada sampel yang diuji.



Gambar 4. Hubungan turbidity dengan kadar ALB pada sampel minyak CPO

Peningkatan turbiditas berkaitan dengan keberadaan partikel tersuspensi, komponen terdispersi, air, pengotor, serta perubahan fisik minyak akibat kerusakan bahan baku. Pada sampel dengan tingkat kerusakan lebih tinggi, perubahan tersebut cenderung lebih besar sehingga nilai

turbiditas meningkat bersama kenaikan ALB. Hasil ini menunjukkan bahwa turbiditas merupakan variabel prediktor yang lebih kuat dalam sistem estimasi cepat kadar ALB pada CPO.

3.5 Kinerja Model Jaringan Saraf Tiruan

Penggunaan JST meningkatkan kemampuan estimasi dibandingkan regresi linear sederhana. Model terbaik diperoleh pada kombinasi fungsi aktivasi tansig-logsig-logsig. Pada tahap kalibrasi, model menghasilkan R^2 sebesar 0,9501 dan RMSE sebesar 0,6390. Pada tahap pengujian model, nilai R^2 menurun menjadi 0,8061 dengan RMSE sebesar 1,9222.

Tabel 2. Ringkasan performa model terbaik

Tahap pengujian	Fungsi aktivasi terbaik	R^2	RMSE
Kalibrasi	tansig-logsig-logsig	0,9501	0,6390
Uji	tansig-logsig-logsig	0,8061	1,9222

Pada tahap kalibrasi, model menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9501 dan RMSE sebesar 0,6390. Nilai ini menunjukkan bahwa model mampu mempelajari hubungan antara pH, turbiditas, dan kadar ALB dengan tingkat kesesuaian yang tinggi. Pada tahap uji kalibrasi, model menghasilkan R^2 sebesar 0,8061 dan RMSE sebesar 1,9222. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model tetap mampu mempertahankan kemampuan prediksi pada data pengujian.

Performa model JST lebih baik dibandingkan hubungan linear tunggal antara pH–ALB maupun turbiditas–ALB. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi dua variabel input dan pendekatan nonlinier dapat meningkatkan kemampuan estimasi kadar ALB. Dengan demikian, pemodelan JST menjadi bagian penting dalam pengembangan sistem estimasi cepat berbasis pH dan turbiditas.

Model terbaik kemudian diintegrasikan ke dalam sistem berbasis Arduino untuk menampilkan nilai estimasi ALB pada layar LCD. Integrasi ini menunjukkan bahwa hasil pemodelan tidak hanya berhenti pada analisis data, tetapi juga dapat diterapkan dalam bentuk prototipe portabel. Sistem tersebut memungkinkan proses estimasi dilakukan secara lebih praktis karena nilai pH dan turbiditas dapat digunakan sebagai masukan untuk menghasilkan estimasi ALB secara langsung.

Dari sisi aplikasi, prototipe ini berpotensi digunakan sebagai alat bantu skrining awal mutu CPO sebelum pengujian laboratorium dilakukan. Keunggulan pendekatan ini terletak pada portabilitas, kemudahan penggunaan, dan kebutuhan perangkat yang relatif sederhana. Dibandingkan pendekatan spektroskopi seperti NIR dan FTIR, sistem berbasis pH, turbiditas, dan mikrokontroler memiliki peluang lebih besar untuk dikembangkan sebagai alat skrining lapangan berbiaya rendah, meskipun metode spektroskopi tetap memiliki keunggulan dari sisi ketelitian analitik (Che Man & Moh, 1998; Che Man & Setiowaty, 1999; Che Man et al., 1999).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi parameter pH, turbiditas, dan model JST dapat digunakan sebagai dasar pengembangan prototipe estimasi cepat kadar ALB pada CPO. Pengembangan berikutnya dapat diarahkan pada perluasan jumlah sampel, variasi sumber bahan, serta penyempurnaan sistem akuisisi data agar model semakin konsisten pada kondisi penggunaan yang lebih beragam.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan prototipe portabel berbasis Arduino untuk estimasi cepat kadar ALB pada CPO menggunakan parameter pH, turbiditas, dan model Jaringan Saraf Tiruan. Hasil regresi menunjukkan bahwa pH dan turbiditas memiliki kontribusi berbeda terhadap variasi kadar ALB, dengan nilai R^2 masing-masing sebesar 0,3516 dan 0,7636. Turbiditas menunjukkan hubungan yang lebih kuat terhadap kadar ALB, sedangkan pH berperan sebagai variabel pendukung dalam sistem prediksi.

Model Jaringan Saraf Tiruan terbaik diperoleh pada kombinasi fungsi aktivasi tansig-logsig-logsig. Model tersebut menghasilkan R^2 sebesar 0,9501 dan RMSE sebesar 0,6390 pada tahap kalibrasi, serta R^2 sebesar 0,8061 dan RMSE sebesar 1,9222 pada tahap uji kalibrasi. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi pH, turbiditas, dan JST dapat digunakan sebagai dasar estimasi empiris cepat kadar ALB pada CPO.

Prototipe yang dikembangkan berpotensi digunakan sebagai alat bantu skrining awal mutu CPO karena bersifat portabel, sederhana, dan mampu menampilkan hasil estimasi secara langsung. Pengembangan berikutnya dapat diarahkan pada peningkatan jumlah sampel, variasi sumber bahan, serta penyempurnaan sistem akuisisi data untuk memperkuat konsistensi model pada kondisi penggunaan yang lebih luas.

Daftar Pustaka

- Azeman, N. H., Yusof, N. A., & Othman, A. I. (2015a). Detection of free fatty acid in crude palm oil: A review. *Asian Journal of Chemistry*, 27, 1569–1573. https://asianpubs.org/index.php/ajchem/article/view/27_5_1
- Azeman, N. H., Yusof, N. A., Abdullah, J., Yunus, R., Hamidon, M. N., & Hajian, R. (2015b). Study on the spectrophotometric detection of free fatty acids in palm oil utilizing enzymatic reactions. *Molecules*, 20(7), 12328–12340. <https://doi.org/10.3390/molecules200712328>
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2023*. Badan Pusat Statistik.
- Che Man, Y. B., & Moh, M. H. (1998). Determination of free fatty acids in palm oil by near-infrared reflectance spectroscopy. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75, 557–562. <https://doi.org/10.1007/s11746-998-0065-0>
- Che Man, Y. B., & Setiowaty, G. (1999). Application of Fourier transform infrared spectroscopy to determine free fatty acid contents in palm olein. *Food Chemistry*, 66(1), 109–111. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00254-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00254-4)
- Che Man, Y. B., Moh, M. H., & van de Voort, F. R. (1999). Determination of free fatty acids in crude palm oil and refined-bleached-deodorized palm olein using Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(4), 485–490. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0029-z>
- Direktorat Jenderal Perkebunan. (2025). *Buku Statistik Perkebunan 2023–2025 Jilid I*. Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Jayaprabakar, J., Dawn, S. S., Anish, M., Giri, J., Sudhakar, K., Alarfaj, A. A., & Guru, A. (2024). Development of free fatty acid (FFA) monitoring device for evaluation of oil samples used for biodiesel production. *Heliyon*, 10, e37118. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37118>
- Tan, C. H., Ghazali, H. M., Kuntom, A., Tan, C. P., & Ariffin, A. A. (2009). Extraction and physicochemical properties of low free fatty acid crude palm oil. *Food Chemistry*, 113(2), 645–650. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.052>