

PENGEMBANGAN METODE KLASIFIKASI KEMATANGAN DAN PREDIKSI MUTU KIMIA BUAH KELAPA SAWIT SECARA NONDESTRUKTIF BERBASIS SPEKTROMETER PORTABEL

YUNISA TRI SUCI



**PROGRAM DOKTOR ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Pengembangan Metode Klasifikasi Kematangan dan Prediksi Mutu Kimia Buah Kelapa Sawit Secara Nondestruktif berbasis Spektrometer Portabel” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal dari atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka pada bagian akhir disertasi ini. Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, September 2026

Yunisa Tri Suci
F1603222013

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RINGKASAN

YUNISA TRI SUCI. Pengembangan Metode Klasifikasi Kematangan dan Prediksi Mutu Kimia Buah Kelapa Sawit secara Nondestruktif Berbasis Spektrometer Portabel. Dibimbing oleh I WAYAN BUDIASTRA, Y ARIS PURWANTO dan SLAMET WIDODO.

Penentuan tingkat kematangan dan mutu kimia buah kelapa sawit penting dalam pengelolaan bahan baku karena berkaitan dengan keputusan panen, penerimaan tandan buah segar, rendemen, dan mutu minyak sawit. Penilaian kematangan di lapangan masih mengandalkan warna buah dan jumlah berondolan yang dipengaruhi pengalaman pengamat serta kondisi lingkungan, sehingga berpotensi menghasilkan keputusan tidak konsisten. Penentuan kandungan minyak, kadar air, dan asam lemak bebas (ALB) melalui analisis laboratorium memerlukan preparasi sampel, waktu, biaya, instrumen khusus, dan umumnya bersifat destruktif. Penelitian ini bertujuan mengembangkan metode klasifikasi kematangan dan prediksi mutu kimia buah kelapa sawit secara nondestruktif menggunakan spektrometer *near infrared* (NIR) portabel dan sensor *multichannel ultraviolet-visible-near infrared* (UV-Vis-NIR) yang dipadukan dengan analisis multivariat dan *machine learning*.

Penelitian dilaksanakan dalam tiga tahap menggunakan instrumen dengan karakteristik spektral berbeda. Tahap pertama menggunakan spektrometer *long-wave near infrared* (LW-NIR) NeoSpectra pada rentang 1350–2500 nm untuk prediksi kandungan minyak, kadar air, dan ALB melalui eksplorasi spektrum, seleksi panjang gelombang berbasis *principal component analysis* (PCA), serta pemodelan *partial least squares regression* (PLSR) dan *multiple linear regression* (MLR). Tahap kedua menggunakan spektrometer *short-wave near infrared* (SW-NIR) SCiO pada rentang 740–1070 nm dengan beberapa metode *pre-processing*, PLSR, dan regresi vektor dukungan (SVR). Tahap ketiga mengembangkan sistem deteksi portabel berbasis sensor *multichannel AS7265x ultraviolet-visible-near infrared* (UV-Vis-NIR) yang terintegrasi dengan ESP8266 untuk akuisisi spektrum secara *real-time*, klasifikasi kematangan, dan prediksi mutu kimia.

Pada tahap LW-NIR, sebanyak 372 sampel digunakan untuk memperoleh spektrum dan data referensi kadar air, kandungan minyak, dan ALB. Kombinasi *multiplicative scatter correction* (MSC) dan PLSR menghasilkan kinerja terbaik, dengan R^2 dan RPD sebesar 0,94 dan 4,38 untuk kadar air serta 0,94 dan 4,49 untuk kandungan minyak. Prediksi ALB menghasilkan R^2 0,70 dan RPD 1,87. Hasil ini menunjukkan bahwa LW-NIR mampu menyediakan informasi kuat untuk menduga kadar air dan kandungan minyak. Seleksi panjang gelombang menunjukkan bahwa informasi spektral dapat disederhanakan tanpa menghilangkan informasi penting bagi prediksi, sehingga berpotensi mendukung pengembangan metode efisien pada instrumen portabel.

Pada tahap SW-NIR, sebanyak 408 sampel diukur pada rentang 740–1070 nm dan diproses menggunakan *Savitzky-Golay smoothing*, *detrending*, *normalization*, *standard normal variate* (SNV), serta kombinasinya. Prediksi kadar air menggunakan *normalisasi* menghasilkan R^2 0,99 dan RPD 6,72, sedangkan prediksi kandungan minyak menggunakan SNV menghasilkan R^2 0,92 dan RPD 3,12. Prediksi ALB menggunakan PLSR menghasilkan R^2 0,51–0,52 dan RPD 1,42

sehingga masih terbatas. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rentang spektral lebih sempit tetap mampu menghasilkan prediksi sangat baik untuk parameter tertentu. Perbedaan kinerja antarparameter menunjukkan bahwa pemilihan *pre-processing* dan algoritma perlu disesuaikan dengan karakteristik respons spektral dan kompleksitas hubungan antara spektrum dan parameter mutu kimia.

Tahap ketiga menghasilkan sistem deteksi portabel berbasis sensor *multichannel AS7265x ultraviolet-visible-near infrared (UV-Vis-NIR)* yang terintegrasi dengan ESP8266 dan perangkat lunak akuisisi data. Sistem menggunakan 24 kanal spektral dan 270 sampel pada berbagai tingkat kematangan dengan rentang pengukuran 410–710 nm. MSC memberikan kinerja *cross-validation* terbaik, sedangkan kombinasi MSC dan SVM menghasilkan akurasi klasifikasi kematangan sebesar 80,00%. Untuk prediksi mutu kimia, kombinasi *first derivative* dan *random forest* (RF) menghasilkan model terbaik. Kadar air menghasilkan R^2 0,94, RPD 3,31, dan RMSE 6,64; kandungan minyak menghasilkan R^2 0,93, RPD 3,02, dan RMSE 4,51; sedangkan ALB menghasilkan R^2 0,93, RPD 3,01, dan RMSE 0,42.

Temuan lintas instrumen menunjukkan bahwa ketiga instrumen memiliki keunggulan berbeda. LW-NIR NeoSpectra unggul pada rentang spektral lebih luas serta prediksi kadar air dan kandungan minyak. SW-NIR SCiO menunjukkan kinerja prediksi tertinggi untuk kadar air dan baik untuk kandungan minyak meskipun menggunakan rentang spektral lebih sempit. AS7265x menghasilkan prediksi konsisten untuk kadar air, kandungan minyak, dan ALB serta mampu mengintegrasikan klasifikasi kematangan dengan prediksi mutu kimia. Pemilihan instrumen karena itu perlu mempertimbangkan tujuan pengukuran, parameter yang dianalisis, karakteristik respons spektral, kebutuhan portabilitas, dan strategi pemodelan.

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil mengembangkan metode klasifikasi kematangan dan prediksi mutu kimia buah kelapa sawit secara nondestruktif menggunakan spektroskopi NIR portabel dan sensor *multichannel UV-Vis-NIR*. Kebaruan penelitian terletak pada evaluasi tiga instrumen dengan karakteristik spektral berbeda serta penyesuaian *pre-processing* dan algoritma terhadap parameter yang diprediksi. Hasil penelitian memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan sistem evaluasi mutu yang cepat, objektif, portabel, dan berpotensi diterapkan secara *on-site* untuk mendukung keputusan panen, sortasi, penerimaan bahan baku, dan pengendalian mutu.

Penerapan lebih luas memerlukan pengujian pada varietas, umur tanaman, lokasi kebun, kondisi lingkungan, dan tingkat kematangan yang lebih beragam. Kajian stabilitas panjang gelombang, kalibrasi lintas instrumen, optimasi klasifikasi, dan peningkatan sensitivitas terhadap ALB diperlukan untuk memperkuat *robustness* dan generalisasi metode. Integrasi sistem dengan pengelolaan mutu tandan buah segar pada tingkat kebun dan industri menjadi arah pengembangan selanjutnya menuju penerapan teknologi sensor dan *machine learning* dalam pertanian presisi.

Kata kunci: kelapa sawit; spektroskopi NIR portabel; sensor *multichannel UV-Vis-NIR*; *machine learning*; prediksi nondestruktif



SUMMARY

YUNISA TRI SUCI. Development Of A Method For Non-Destructive Classification Of Oil Palm Fruit Maturity and Prediction of Chemical Quality Using A Portable Spectrometer. Supervised by I WAYAN BUDIASTRA, Y ARIS PURWANTO, SLAMET WIDODO.

Determining the maturity level and chemical quality of oil palm fruit is important in raw material management because it affects harvesting decisions, fresh fruit bunch acceptance, oil yield, and palm oil quality. Field maturity assessment still relies on fruit color and loose fruitlet numbers, which are influenced by observer experience and environmental conditions, potentially resulting in inconsistent decisions. Determining oil content, moisture content, and free fatty acids (FFA) through laboratory analysis requires sample preparation, time, cost, specialized instruments, and is generally destructive. This study aimed to develop a nondestructive method for classifying maturity levels and predicting the chemical quality of oil palm fruit using portable *near infrared* (NIR) spectrometers and a *multichannel ultraviolet-visible-near infrared* (UV-Vis-NIR) sensor combined with multivariate analysis and *machine learning*.

The study was conducted in three stages using instruments with different spectral characteristics. The first stage used a NeoSpectra *long-wave near infrared* (LW-NIR) spectrometer at 1350–2500 nm to predict oil content, moisture content, and FFA through spectral exploration, wavelength selection based on *principal component analysis* (PCA), and modeling using *partial least squares regression* (PLSR) and *multiple linear regression* (MLR). The second stage used an SCiO *short-wave near infrared* (SW-NIR) spectrometer at 740–1070 nm with several *pre-processing* methods, PLSR, and support vector regression (SVR). The third stage developed a portable detection system based on the AS7265x *multichannel ultraviolet-visible-near infrared* (UV-Vis-NIR) sensor integrated with an ESP8266 for *real-time* spectral acquisition, maturity classification, and chemical quality prediction.

In the LW-NIR stage, 372 samples were used to obtain spectra and reference data for moisture content, oil content, and FFA. The combination of *multiplicative scatter correction* (MSC) and PLSR produced the best performance, with R^2 and RPD values of 0.94 and 4.38 for moisture content and 0.94 and 4.49 for oil content. FFA prediction resulted in R^2 of 0.70 and RPD of 1.87. These results indicate that LW-NIR provides strong information for estimating moisture and oil content. Wavelength selection also showed that spectral information could be simplified without losing important predictive information, potentially supporting more efficient methods for portable instruments.

In the SW-NIR stage, 408 samples were measured at 740–1070 nm and processed using *Savitzky-Golay smoothing*, *detrending*, *normalization*, *standard normal variate* (SNV), and their combinations. Moisture prediction using *normalization* achieved R^2 of 0.99 and RPD of 6.72, whereas oil content prediction using SNV achieved R^2 of 0.92 and RPD of 3.12. FFA prediction using PLSR resulted in R^2 of 0.51–0.52 and RPD of 1.42, indicating limited performance. These results demonstrate that a narrower spectral range can still provide highly accurate predictions for certain parameters. Differences in performance among parameters



indicate that the selection of *pre-processing* methods and algorithms should be adapted to spectral response characteristics and the complexity of relationships between spectra and chemical quality parameters.

The third stage produced a portable detection system based on the AS7265x *multichannel ultraviolet-visible-near infrared* (UV-Vis-NIR) sensor integrated with an ESP8266 and data acquisition software. The system used 24 spectral channels and 270 samples representing different maturity levels within a measurement range of 410–710 nm. MSC provided the best *cross-validation* performance, while the combination of MSC and SVM achieved 80.00% maturity classification accuracy. For chemical quality prediction, the combination of *first derivative* and *random forest* (RF) produced the best models. Moisture content achieved R^2 of 0.94, RPD of 3.31, and RMSE of 6.64; oil content achieved R^2 of 0.93, RPD of 3.02, and RMSE of 4.51; and FFA achieved R^2 of 0.93, RPD of 3.01, and RMSE of 0.42.

Comparison across instruments showed that each instrument had distinct advantages. LW-NIR NeoSpectra provided a wider spectral range and strong prediction of moisture and oil content. SW-NIR SCiO achieved the highest prediction performance for moisture and good performance for oil content despite its narrower spectral range. AS7265x provided consistent predictions for moisture, oil content, and FFA, while offering a functional advantage by integrating maturity classification with chemical quality prediction. Instrument selection therefore needs to consider measurement objectives, target parameters, spectral response characteristics, portability requirements, and modeling strategies.

Overall, this study successfully developed nondestructive methods for maturity classification and chemical quality prediction of oil palm fruit using portable NIR spectroscopy and a *multichannel UV-Vis-NIR* sensor. The novelty lies in evaluating three instruments with different spectral characteristics and adapting *pre-processing* methods and algorithms to the predicted parameters. The results provide a scientific basis for developing rapid, objective, portable, and potentially *on-site* quality evaluation systems to support harvesting decisions, sorting, raw material acceptance, and quality control.

Broader application requires testing across more diverse varieties, plant ages, plantation locations, environmental conditions, and maturity levels. Further investigation of wavelength stability, cross-instrument calibration, classification optimization, and improved sensitivity to FFA is needed to strengthen method robustness and generalizability. Integration of the system with fresh fruit bunch quality management at plantation and industrial levels represents a future direction toward applying sensor and *machine learning* technologies in precision agriculture.

Keywords: oil palm; portable NIR spectroscopy; multichannel UV-Vis-NIR sensor; *machine learning*; nondestructive prediction

PENGEMBANGAN METODE KLASIFIKASI KEMATANGAN DAN PREDIKSI MUTU KIMIA BUAH KELAPA SAWIT SECARA NONDESTRUKTIF BERBASIS SPEKTROMETER PORTABEL

YUNISA TRI SUCI

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian

**PROGRAM STUDI ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Ir. Sutrisno, M. Agr
- 2 Dr. Dwi Setyaningsih, S.TP, M. Si

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Dwi Setyaningsih, S.TP, M. Si
- 2 Dr. Idha Widi Arsanti, SP, M.P.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Judul Disertasi : Pengembangan Metode Klasifikasi Kematangan dan Prediksi Mutu Kimia Buah Kelapa Sawit secara Nondestruktif berbasis Spektrometer Portabel

Nama : Yunisa Tri Suci

NIM : F1603222013

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. I Wayan Budiastara, M.Agr.



Pembimbing 2:

Prof. Dr. Ir. Y. Aris Purwanto, M.Sc.



Pembimbing 3:

Dr. Slamet Widodo, S.T.P., M.Sc.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Prof. Dr. Ir. I Wayan Budiastara, M.Agr.

NIP. 196110191986011002



Dekan Fakultas Teknik dan Teknologi

Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M.Agr.

NIP. 196105021986031002





PRAKATA

Alhamdulillah rabbil 'alamin, segala puji dan rasa syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah *subhanahu wa ta'ala* atas limpahan rahmat, karunia, dan pertolongan-Nya, sehingga penyusunan disertasi yang berjudul “Pengembangan Metode Klasifikasi Kematangan dan Prediksi Mutu Kimia Buah Kelapa Sawit secara Non Destruktif berbasis Portabel Spektrometer” dapat diselesaikan dengan baik. Shalawat beriring salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad shalallahu ‘alaihi wasallam sebagai suri teladan bagi umat manusia.

Selama perjalanan akademik dalam menempuh studi doktoral hingga tahap penyusunan dan penyelesaian disertasi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, baik dalam bentuk bimbingan ilmiah, arahan, motivasi, dukungan moril dan materil, maupun penyediaan fasilitas yang menunjang keberhasilan penelitian. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati dan penghargaan yang setinggi-tingginya, penulis menyampaikan terima kasih dan apresiasi kepada:

1. Prof. Dr. Ir. I Wayan Budiastra, M.Agr. , selaku ketua komisi pembimbing, bersama Prof. Dr. Ir. Y. Aris Purwanto, M.Sc., dan Dr. Slamet Widodo, S.TP., M.Sc., selaku anggota komisi pembimbing, yang telah memberikan dedikasi, waktu, dan kesabaran dalam proses pembimbingan. Berbagai arahan, masukan, saran, serta penguatan aspek akademik yang diberikan selama penyusunan disertasi ini sangat berperan dalam meningkatkan kualitas dan kedalaman kajian ilmiah yang dilakukan
2. Prof. Dr. Ir. Sutrisno, M. Agr. dan Dr. Dwi Setyaningsih, S.TP, M.Si selaku penguji luar komisi pada ujian tertutup yang telah memberikan banyak masukan, arahan, dan saran selama ujian tertutup. Prof. Dr. Taufik S.T.P., M.Si selaku pimpinan sidang dan Prof. Dr. Ir. Edy Hartulistiyoso, M.Sc.Agr selaku perwakilan dari prodi yang telah memberikan banyak masukan, arahan saran dan motivasi saat ujian tertutup sehingga meningkatkan kualitas dan kedalaman kajian ilmiah untuk disertasi ini
3. Dr. Idha Widi Arsanti, SP, M.P (Kepala Badan PPSDMP, Kementerian Pertanian) selaku penguji luar komisi pada Sidang Promosi Doktor yang telah memberikan banyak masukan, arahan, dan saran selama Sidang Promosi Doktor serta kepada Dekan Fakultas Teknik dan Teknologi Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M.Agr selaku pimpinan sidang dan Prof. Dr. Ir. Usman Ahmad, M.Agr. selaku perwakilan dari prodi yang telah memberikan banyak masukan, arahan saran dan motivasi saat Sidang Promosi Doktor sehingga meningkatkan kualitas dan kedalaman kajian ilmiah untuk disertasi ini
4. Tim sekretariat Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian (TEP), Dr. Liyantono selaku Sekretaris Program Studi TEP, Bapak Ahmad Mulyawatullah, serta seluruh dosen dan tenaga kependidikan di Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, atas segala bantuan, bimbingan, arahan, dan dukungan yang diberikan selama proses penyelesaian studi.
5. Kementerian Pertanian Republik Indonesia melalui Badan Penyuluhan dan Pengembangan Sumber Daya Manusia Pertanian (BPPSDMP), Pusat Pelatihan Pertanian, serta Balai Pelatihan Pertanian (Bapeltan) Jambi telah memberikan dukungan dan kesempatan melalui program Beasiswa Tugas Belajar Kementerian Pertanian Tahun 2022. Serta Direktorat Penelitian dan Pengabdian

kepada Masyarakat, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi (Kemdiktisaintek) melalui hibah Program Penelitian Disertasi Doktor (PDD) Tahun Anggaran 2024

6. Dr. Ir. Zahron Helmy, MP selaku Kepala Bapeltan Jambi Tahun 2019-2023 yang telah memberikan izin, kesempatan, serta dukungan kepada penulis untuk melaksanakan Tugas Belajar.
7. Teman-teman Riset Sawit NIR dan Listrik tahun 2023-2024, Mbak Vera, Nisa, Muy, Arief, Annisy, Hadyan, Fatih, dan Charel, yang telah membantu proses pengambilan data dan diskusi selama penelitian.
8. Teman-teman dan adik-adik Lab. Robins, Mas Diang, Mas Azam, Ira, Akbar, Amar, dan Budi, yang telah membantu dan berdiskusi selama proses pembuatan alat.
9. Teman-teman Program Studi Doktor Ilmu Keteknikan Pertanian Angkatan 2022, Bang Sudirman, Bu Rani, Edo, Pak Husen, Pak Harianto, Bu Ana, Bintang, Pak Andi, dan Pak Heri, saya menyampaikan terima kasih atas kebersamaan, dukungan, serta berbagai diskusi yang telah terjalin selama menjalani proses studi doktoral.
10. Teman-Teman diskusi dan bertukar pikiran selama menempuh studi: Widya, Kak Yulni, Mbak Nunik, dan teman-teman TEP lintas angkatan.
11. Kedua orang tua, Papa Mawardi dan Omak Yusmaniar, yang selalu memberikan kasih sayang, dukungan, motivasi, dan doa terbaik. Adik-adik M. Iqbal Tawakkal, M.Si., dan M. Farhan Abror, S.Pd., serta Keluarga Besar alm. H. Jamaluddin Yus dan alm. Wahidin Syihab atas segala dukungan yang telah diberikan.
12. Teristimewa, penulis menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan kepada suami tercinta, Ifan Okcantnedi, S.Hum., dan kedua buah hati tersayang, Zahra Assyifa serta Sadiyatu Shafiyya Halimah, atas dukungan, doa, kasih sayang, dan pengorbanan yang diberikan, yang menjadi sumber kekuatan dan motivasi bagi penulis dalam menyelesaikan perjalanan pendidikan doktoral ini.
13. Seluruh pihak yang telah memberikan kontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam pelaksanaan penelitian hingga penyusunan disertasi ini, yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih memiliki keterbatasan, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk penyempurnaan di masa mendatang. Semoga hasil penelitian ini bermanfaat dan berkontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang keteknikan pertanian, serta menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya.

Bogor, September 2026

Yunisa Tri Suci



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR SINGKATAN	xvi
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat	4
1.5 Ruang Lingkup	5
1.6 Kebaruan (<i>novelty</i>)	6
II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Karakteristik Buah Kelapa Sawit	7
2.2 NIR Portabel Spektrometer	9
2.3 Konsep dan Prinsip <i>Machine Learning</i>	11
2.4 Metode Nondestruktif untuk Evaluasi Mutu dan Kematangan Buah Kelapa Sawit	14
III MODEL PREDIKSI KUALITAS KELAPA SAWIT BERBASIS <i>LONG-WAVE NIR</i> PORTABEL SPEKTROMETER	18
3.1 Abstrak	18
3.2 Pendahuluan	18
3.3 Bahan dan Metode	20
3.4 Hasil dan Pembahasan	26
3.5 Kesimpulan	37
IV PREDIKSI KANDUNGAN KIMIA BUAH KELAPA SAWIT SECARA NON-DESTRUKTIF MENGGUNAKAN SHORT WAVE-NIR PORTABLE SPEKTROMETER	38
4.1 Abstrak	38
4.2 Pendahuluan	38
4.3 Metode Penelitian	40
4.4 Hasil dan Pembahasan	44
4.5 Kesimpulan	54
V PENGEMBANGAN SISTEM DETEKSI KEMATANGAN DAN MUTU KIMIA BUAH KELAPA SAWIT SECARA NONDESTRUKTIF BERBASIS SPEKTROMETER PORTABEL	56
5.1 Pendahuluan	55
5.2 Abstrak	55
5.3 Metode Penelitian	57
5.4 Evaluasi Model Prediksi	71
5.5 HASIL DAN PEMBAHASAN	72
5.6 Perubahan Kandungan Kimia Kelapa Sawit selama Proses Kematangan	73



5.7	Klasifikasi Tingkat Kematangan buah Kelapa Sawit	77
5.8	Prediksi Kandungan Kimia Buah Kelapa Sawit	85
5.9	Simpulan	94
VI	PEMBAHASAN UMUM	95
6.1	Analisis Kinerja dan Implikasi Spektrometer Portabel untuk Evaluasi Nondestruktif Buah Kelapa Sawit	95
6.2	Sintesis Kinerja dan Kesesuaian Platform Spektral Portabel untuk Deteksi Kematangan dan Prediksi Mutu Kimia Buah Kelapa Sawit	98
VII	KESIMPULAN UMUM DAN SARAN	102
7.1	Kesimpulan	102
7.2	Saran	103
	DAFTAR PUSTAKA	104
	LAMPIRAN	115
	RIWAYAT HIDUP	118
	RIWAYAT HIDUP	119



DAFTAR TABEL

1	Perbedaan tebal cangkang beberapa varietas kelapa sawit	7
2	Perubahan fisiologis buah kelapa sawit berdasarkan fraksi kematangan	8
3	Kelebihan, keterbatasan, dan aplikasi sensor multichannel AS7265x	10
4	Implementasi algoritma machine learning pada evaluasi mutu dan klasifikasi kematangan buah kelapa sawit	13
5	Kandungan kimia buah kelapa sawit	29
6	Hasil kalibrasi dan validasi untuk prediksi kadar air buah kelapa sawit	31
7	Hasil kalibrasi dan validasi untuk prediksi kadar ALB buah kelapa sawit	34
8	Hasil kalibrasi dan validasi untuk prediksi kadar minyak buah kelapa sawit	35
9	Model prediktif kadar ALB buah kelapa sawit	45
10	Hasil kalibrasi dan prediksi kadar air buah kelapa sawit	49
11	Hasil kalibrasi dan prediksi kadar minyak buah kelapa sawit	52
12	Model prediktif kadar ALB buah kelapa sawit	54
13	Karakteristik sensor AS7265x	61
14	Konfigurasi sensor AS7265x pada pengukuran data spektral utama dan tambahan	61
15	Analisis desain fungsional komponen peralatan multichannel UV VIS NIR	62
16	Korelasi antarparameter mutu kimia buah kelapa sawit	76
17	Nilai PC1 dan PC2 untuk setiap perlakuan pra- pemrosesan	79
18	Perbandingan metode prapemrosesan berdasarkan F1-macro <i>cross-validation</i>	81
19	Parameter optimum model klasifikasi menggunakan 24 kanal dan MSC	82
20	Performa model klasifikasi pada data pengujian	82
21	Hasil klasifikasi	84
22	Statistik deskriptif data kadar air buah kelapa sawit	86
23	Model prediktif kadar air buah kelapa sawit	86
24	Statistik deskriptif data kadar minyak buah kelapa sawit	89
25	Model prediktif kadar minyak buah kelapa sawit	90
26	Statistik deskriptif data kadar ALB buah kelapa sawit	91
27	Model prediktif kadar ALB buah kelapa sawit	92
28	Perbandingan karakteristik, kinerja, dan aspek portabilitas tiga platform spektral	99

DAFTAR GAMBAR

1	Diagram ruang lingkup penelitian	5
2	Varietas buah kelapa sawit: a. <i>Dura</i> , b. <i>Pisifera</i> , c. <i>Tenera</i>	7
3	Perkembangan metode nondestruktif untuk evaluasi mutu dan kematangan buah kelapa sawit	14
4	Peta penelitian menggunakan kata kunci <i>nondestructive</i> dan <i>portable spectroscopy</i>	17

5	Alat NeoSpectra SWS62231	21
6	Diagram alir prosedur penelitian	23
7	Spektra reflektansi NIR buah kelapa sawit pada berbagai umur	26
8	Spektra reflektansi hasil <i>pre-treatment</i> (a) <i>normalize</i> ; (b) SNV; dan (c) MSC	27
9	Perubahan kandungan kimia buah kelapa sawit	28
10	<i>Loading plot</i> PCA spektra buah kelapa sawit	30
11	Hasil kalibrasi dan validasi kadar air pada metode (a) PLSR dan (b) PCA-MLR	32
12	Hasil kalibrasi dan validasi kadar ALB pada metode (a) PLSR dan (b) PCA-MLR	33
13	Hasil kalibrasi dan validasi kadar minyak pada metode (a) PLSR dan (b) PCA-MLR	36
14	Diagram alir prosedur penelitian	41
15	Spektra absorban buah kelapa sawit	45
16	Spektra absorban hasil <i>pre-treatment</i> (a) <i>smoothing SG</i> ; (b) SNV; (c) <i>normalize</i> ; (d) SNV + <i>smoothing SG</i>	46
17	Spektra absorban buah kelapa sawit	48
18	Plot hubungan kadar minyak prediksi dan aktual pada metode (a) SVR dan (b) PLSR	51
19	Plot hubungan kadar ALB prediksi dan aktual pada metode (a) SVR dan (b) PLSR	53
20	Prosedur Penelitian	59
21	Sparkfun TRIAD AS7265x sensor	60
22	Diagram skematik komponen peralatan akuisisi sensor multichannel UV-VIS-NIR	63
23	Desain perangkat sistem akuisi kematangan dan prediksi kandungan kimia kelapa sawit berbasis sensor multispectral (UV-VIS-NIR)	64
24	Sampel sawit 10 umur panen	64
25	Prosedur akuisisi spektra	65
26	Instrumentasi prototipe sistem deteksi minyak kelapa sawit berbasis sensor <i>multichannel</i> (UV-VIS-NIR)	65
27	Karakteristik spektrum UV-VIS-NIR asli dan dengan pra-perlakuan (a) Original, (b) rata-rat, (c) <i>pre-treatment</i> SNV, (d) <i>pre-treatment</i> Normalisasi, (e) <i>pre-treatment</i> Baseline, (f) <i>pre-treatment</i> SG1	73
28	Kandungan Kimia Kelapa sawit selama pada berbagai umur panen	74
29	Spektrum PCA dan <i>Loading Plot</i>	78
30	Spektrum PCA dan <i>loading plot</i>	80
31	<i>Confusion Matrix</i> buah kelapa sawit menggunakan algoritma SVM-RBF, RF, KNN	83

DAFTAR LAMPIRAN

1	Lampiran 1 Studi nondestruktif untuk evaluasi mutu dan kematangan buah kelapa sawit	115
2	Lampiran 3. Alur metode klasifikasi tingkat kematangan buah kelapa sawit	118

DAFTAR SINGKATAN

ALB	: ALB
ANN	: <i>Artificial Neural Network</i>
AS7265x	: Sensor Multichannel AS7265x
CPO	: <i>Crude Palm Oil</i> (Minyak Sawit Mentah)
CNN	: <i>Convolutional Neural Network</i>
ESP8266	: Mikrokontroler Wi-Fi ESP8266
FAOSTAT	: <i>Food and Agriculture Organisation Statistics</i>
FFA	: <i>Free Fatty Acid</i> (ALB)
FT-NIR	: <i>Fourier Transform Near Infrared</i>
IoT	: <i>Internet of Things</i>
K-NN / KNN	: <i>K-Nearest Neighbor</i>
LED	: <i>Light Emitting Diode</i>
LW-NIR	: <i>Long Wave Near Infrared</i>
MEMS	: <i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
ML	: <i>Machine Learning</i>
MOEMS	: <i>Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems</i>
MSC	: <i>Multiplicative Scatter Correction</i>
MSR	: Minggu Setelah Reseptik (fase fisiologis buah sawit)
NIR	: <i>Near Infrared</i>
NIRS	: <i>Near Infrared Spectroscopy</i>
OB	: <i>Oil per Bunch</i> (minyak per tandan)
OER	: <i>Oil Extraction Rate</i>
OWM	: <i>Oil per Wet Mesocarp</i> (minyak per mesokarp basah)
PCA	: <i>Principal Component Analysis</i>
PCR	: <i>Principal Component Regression</i>
PLS	: <i>Partial Least Squares</i>
PLSR	: <i>Partial Least Squares Regression</i>
RF	: <i>Random Forest</i>
RPD	: <i>Residual Predictive Deviation</i>
SciO	: Short Wave-NIR Portable Spectrometer SCiO
SG	: <i>Savitzky-Golay</i> (metode smoothing spektrum)
SNV	: <i>Standard Normal Variate</i>
SVM	: <i>Support Vector Machine</i>
SVR	: <i>Support Vector Regression</i>
SW-NIR	: <i>Short Wave Near Infrared</i>
TBS	: Tandan Buah Segar
UV-Vis-NIR	: <i>Ultraviolet-Visible-Near Infrared</i>