



SENSOR ELEKTROKIMIA BERBASIS KOMPOSIT N-Ti₃C₂T_x DAN MULTI WALLED CARBON NANOTUBES TERFUNGSIONALISASI UNTUK DETEKSI METIL PARATION

@Hak cipta milik IPB University

NABILA ELRINDA SYAHRANI



**PROGRAM STUDI KIMIA
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Sensor Elektrokimia Berbasis Komposit $N-Ti_3C_2T_x$ dan Multi Walled Carbon Nanotubes Terfungsionalisasi untuk Deteksi Metil Paration” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, 02 Juli 2026

Nabila Elrinda Syahrani
G4501232053

RINGKASAN

NABILA ELRINDA SYAHRANI. Sensor Elektrokimia Berbasis Komposit N-Ti₃C₂T_x dan Multi Walled Carbon Nanotubes Terfungsionalisasi untuk Deteksi Metil Paration. Dibimbing oleh WULAN TRI WAHYUNI, ETI ROHAETI, dan MUNAWAR KHALIL.

Penggunaan pestisida golongan organofosfat dalam sektor pertanian masih banyak dilakukan karena efektif dalam mengendalikan hama. Penggunaan pestisida yang berlebihan dan tidak terkontrol dapat menyebabkan akumulasi residu pestisida pada produk pangan dan lingkungan. Senyawa organofosfat diketahui memiliki toksisitas tinggi karena mampu menghambat aktivitas enzim asetilkolinesterase yang berperan penting dalam sistem saraf. Salah satu pestisida organofosfat yang menjadi perhatian adalah metil paration karena memiliki tingkat toksisitas yang tinggi serta berpotensi mencemari lingkungan. Oleh karena itu, penelitian mengenai deteksi residu metil paration perlu dilakukan untuk menghasilkan metode analisis yang sensitif, selektif, cepat, dan akurat guna mendukung pengawasan keamanan pangan serta pemantauan pencemaran lingkungan.

Teknik analisis yang dikembangkan pada penelitian ini adalah sensor elektrokimia. Sensor elektrokimia pada penelitian ini dikembangkan berbasis *Glassy Carbon Electrode* (GCE) yang dimodifikasi dengan MXene dan MWCNTs terfungsionalisasi untuk deteksi metil paration. Kedua material terlebih dahulu disintesis kemudian dikompositkan dan didepositkan pada permukaan GCE secara *drop casting*. Sifat struktural dan morfologi permukaan GCE termodifikasi dikarakterisasi menggunakan *X-ray diffraction* (XRD), *fourier transform infrared spectroscopy* (FTIR), *field-emission scanning electron microscopy* (FE-SEM), *high-resolution transmission electron microscopy* (HR-TEM). Evaluasi elektrokimia sensor berbasis MXene dan MWCNTs terfungsionalisasi meliputi optimasi komposit, optimasi pH, luas permukaan (A), koefisien difusi (D), dan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS). Evaluasi kinerja analitik yang dilakukan meliputi linearitas, sensitivitas, LOD, LOQ, selektivitas, ketertiruan, dan stabilitas. Evaluasi pada sampel gandum dari sensor dilakukan menggunakan voltametri siklik (CV) dan differential pulse voltametri (DPV).

Karakterisasi material menggunakan TEM, HRTEM, SAED, FESEM, dan XPS menunjukkan bahwa MXene terfungsionalisasi terdispersi secara homogen pada permukaan MWCNT-OH tanpa merusak struktur nanotube. Analisis HRTEM dan SAED mengonfirmasi eksfoliasi MXene terfungsionalisasi menghasilkan peningkatan jarak antar lapisan serta menunjukkan bahwa MWCNT-OH tetap mempertahankan morfologi dan struktur nanotube karbon MWCNT-OH setelah pembentukan komposit. Analisis EDS dan XPS mengonfirmasi keberadaan unsur Ti, N, F, dan C, serta menunjukkan adanya gugus fungsi oksigen pada permukaan komposit. Sensor yang dikembangkan menunjukkan puncak reduksi metil paration yang tinggi dengan respon linear pada konsentrasi 2 – 100 µM diukur pada rentang potensial -0,65 V vs Ag/AgCl dan memiliki komposisi optimum N-Ti₃C₂T_x/MWCNT-OH 1:9. Nilai limit deteksi dan limit kuantisasi untuk metil paration adalah 0,951 µM dan 2,882 µM. Selain itu, sensor tersebut juga memiliki stabilitas dan ketertiruan dengan %RSD < 5%.



Sensor yang dikembangkan juga menunjukkan selektivitas tinggi untuk mendeteksi metil paration dengan adanya beberapa senyawa pengganggu, seperti diazinon, karbaril, tiamin (vitamin B1), urea, glukosa dan alfa-tokoferol (vitamin E) dengan persen perolehan kembali sebesar 96 – 102 %. Selanjutnya sensor yang dikembangkan telah berhasil digunakan untuk mendeteksi metil paration dalam sampel gandum. Berdasarkan hasil yang diperoleh sensor elektrokimia berbasis GCE termodifikasi MXene dan MWCNTs terfungsionalisasi berhasil dikembangkan untuk deteksi metil paration dengan sensitivitas, selektivitas, dan stabilitas yang baik. Sensor ini menunjukkan potensi untuk diaplikasikan sebagai metode analisis cepat, sensitif, dan efisien untuk memantau residu metil paration pada produk pangan guna mendukung keamanan pangan. Selain itu, sensor yang dikembangkan berpotensi dikembangkan lebih lanjut menuju aplikasi praktis dan pemantauan real-time dalam bidang analisis pangan dan lingkungan.

Kata kunci: $N-Ti_3C_2T_x$, MWCNT-OH, metil paration, sensor elektrokimia

SUMMARY

NABILA ELRINDA SYAHRANI. Electrochemical Sensor Based on an N-Ti₃C₂T_x and Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotube Composite for the Detection of Methyl Parathion. Supervised by Wulan Tri Wahyuni, Eti Rohaeti, and Munawar Khalil.

Organophosphate pesticides are widely employed in agriculture due to their efficacy in pest control. Nevertheless, their excessive and unmanaged application can lead to pesticide residue accumulation in food products and the environment. Organophosphate compounds are recognized for their high toxicity, as they can inhibit acetylcholinesterase enzyme activity, which is crucial for the nervous system. Methyl Parathion, a particular organophosphate pesticide of concern, possesses a high toxicity level and poses a potential environmental contaminant risk. Consequently, research into detecting methyl parathion residues is essential to develop analytical methods that are sensitive, selective, rapid, and accurate, thereby supporting food safety supervision and environmental pollution monitoring.

This research employed electrochemical sensors, specifically a Glassy Carbon Electrode (GCE) modified with functionalized MXene and MWCNTs, for methyl parathion detection. The two materials were synthesized, composited, and then deposited onto the GCE surface via drop casting. Structural and morphological properties of the modified GCE were characterized using X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM), and high-resolution transmission electron microscopy (HR-TEM). Electrochemical evaluation of the MXene and MWCNTs functionalized sensor involved optimizing the composite, pH, surface area (A), diffusion coefficient (D), and employing electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Analytical performance was assessed through linearity, sensitivity, LOD, LOQ, selectivity, reproducibility, and stability. Finally, wheat samples were analyzed using cyclic voltammetry (CV) and differential pulse voltammetry (DPV) with the developed sensor.

Material characterization using TEM, HRTEM, SAED, FESEM, and XPS revealed that functionalized MXene was homogeneously dispersed on the MWCNT-OH surface without damaging the nanotube structure. HRTEM and SAED analyses confirmed the exfoliation of functionalized MXene resulted in increased interlayer spacing and indicated that MWCNT-OH retained its carbon nanotube morphology and structure after composite formation. EDS and XPS analyses confirmed the presence of Ti, N, F, C elements, and showed the existence of oxygen functional groups on the composite surface. The developed sensor exhibited a high methyl parathion reduction peak with a linear response over concentrations from 2 to 100 µM, measured at a potential range of -0.65 V vs Ag/AgCl, and possessed an optimal composition of N-Ti₃C₂T_x/MWCNT-OH at a 1:9 ratio. The limit of detection and limit of quantification for methyl parathion were 0.951 µM and 2.882 µM, respectively. Furthermore, the sensor demonstrated good stability and reproducibility with %RSD < 5%.

The developed sensor exhibited high selectivity in detecting methyl parathion amidst several interfering compounds, including diazinon, carbaryl, thiamine (vitamin B1), urea, glucose, and alpha-tocopherol (vitamin E), with a recovery rate of 96–102%. Furthermore, the fabricated sensor was successfully employed to

detect methyl parathion in wheat samples. The obtained results indicate that the electrochemical sensor based on modified GCE with functionalized MXene and MWCNTs was effectively developed for methyl parathion detection, demonstrating good sensitivity, selectivity, and stability. This sensor holds potential for application as a rapid, sensitive, and efficient analytical method for monitoring methyl parathion residues in food products, thereby contributing to food safety. Moreover, the developed sensor can be further advanced for practical applications and real-time monitoring within the fields of food and environmental analysis.

Keywords: electrochemical sensor, methyl parathion, MWCNT-OH, N-Ti₃C₂T_x

@Hak cipta milik IPB University

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.



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.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



SENSOR ELEKTROKIMIA BERBASIS KOMPOSIT N-Ti₃C₂T_x DAN MULTI WALLED CARBON NANOTUBES TERFUNGSIONALISASI UNTUK DETEKSI METIL PARATION

@Hak cipta milik IPB University

NABILA ELRINDA SYAHRANI

Tesis

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister pada Program Studi Kimia

**PROGRAM STUDI KIMIA
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

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.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:

- 1 Budi Riza Putra, S.Si., M.Si., Ph.D
- 2 Prof. Dr. Dra. Charlena, M.S.

Judul Tesis : Sensor Elektrokimia Berbasis Komposit N-Ti₃C₂T_x dan Multi Walled Carbon Nanotubes Terfungsionalisasi untuk Deteksi Metil Paration
Nama : Nabila Elrinda Syahrani
NIM : G4501232053

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Wulan Tri Wahyuni, S.Si., M.Si.



Pembimbing 2:
Prof. Dr. Dra. Eti Rohaeti, MS.



Pembimbing 3:
Munawar Khalil, S.Si., M.Eng,Sc., PhD.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Irmanida Batubara, S.Si., M.Si.
NIP. 1975080720005012001



Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam :
Dr. Berry Juliandi, S.Si., M.Si.
NIP 197807232007011001



Tanggal Ujian: 09 Juli 2026

Tanggal Lulus:

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.



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Februari 2025 sampai bulan Desember 2025 ini berjudul “Sensor Elektrokimia Berbasis MXene dan MWCNTs Terfungsionalisasi untuk Deteksi Metil Paration”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Dr. Wulan Tri Wahyuni, S.Si., M.Si., Prof. Dr. Dra. Eti Rohaeti MS., dan Munawar Khalil, S.Si., M.Eng.Sc., PhD yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Terima kasih juga penulis ucapkan kepada Prof. Dr. Dra. Charlena, MS sebagai moderator ujian tesis penulis. Terima kasih juga penulis ucapkan kepada Budi Riza Putra, S.Si., M.Si., Ph.D selaku penguji pada sidang tesis penulis. Disamping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada keluarga terutama Ibu Elmaizar, Muhammad Nurwahid, Nadya Andhika Putri, dan Muhammad Raihan Akbar yang telah memberikan dukungan, do'a, dan kasih sayangnya. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada tenaga kependidikan, yaitu Ibu Rindi, Ibu Nunung Nurhayati, Bapak Kosasih, dan rekan saya Ulfiatunnisa, Afra Najiyah, Leni Andriani, Shelly Hafira Nikma, Kama Alayandra dan Alifa Widyasari Riestyawan yang telah membantu dan memberikan dukungan selama penelitian ini berlangsung.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Ilmu Pengetahuan dan Teknologi, Republik Indonesia, atas skema pendanaan penelitian Penelitian Fundamental Reguler tahun anggaran 2026, nomor kontrak 032/C3/DT.05.00 /PLMULTITAHUNLANJUTAN/2026 dan 18798/IT3.D10/PT.01.03/P/B/2026. Para penulis juga mengucapkan terima kasih kepada E-layanan Sains (ELSA) BRIN atas akses yang diberikan untuk karakterisasi material.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, 02 Juli 2026

Nabila Elrinda Syahrani

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.

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
II METODE	4
2.1 Waktu dan Tempat Penelitian	4
2.2 Alat dan Bahan	4
2.3 Prosedur Kerja	4
III HASIL DAN PEMBAHASAN	8
3.1 MXene Terfungsionalisasi Nitrogen Hasil Sintesis	8
3.2 Karakteristik N-Ti ₃ C ₂ T _x /MWCNT-OH Termodifikasi	11
3.3 Karakteristik Permukaan Elektrode Termodifikasi	13
3.4 Kinerja Elektrokimia Elektrode Termodifikasi	14
3.5 Kinerja Elektrokimia GCE Termodifikasi	16
3.6 Kinerja Analitik GCE Termodifikasi	19
3.7 Kinerja Sensor Untuk Deteksi Metil Paration pada Sampel Gandum	23
IV SIMPULAN DAN SARAN	25
4.1 Simpulan	25
4.2 Saran	25
DAFTAR PUSTAKA	25
LAMPIRAN	31
RIWAYAT HIDUP	36



DAFTAR TABEL

3.1	Perbandingan kinerja sensor metil paration yang diusulkan	21
3.2	Nilai perolehan kembali metil paration pada analisis sampel nyata dengan teknik elektrokimia	24

DAFTAR GAMBAR

3.1	Proses sintesis senyawa $Ti_3C_2T_x$ dengan HF dan adanya sonikasi	8
3.2	Ilustrasi proses sintesis $N-Ti_3C_2T_x$	9
3.3	Ilustrasi sintesis MWCNT-OH dengan HNO_3 dan H_2O_2	10
3.4	Diagram skema nanokomposit $N-Ti_3C_2T_x$ /MWCNT-OH	11
3.5	(a) Difraktogram sinar-X dan (b) spektrum FT-IR dari komposit nano $Ti_3C_2T_x$, $N-Ti_3C_2T_x$, MWCNT-OH, dan $N-Ti_3C_2T_x$ /MWCNT-OH, serta spektrum XPS resolusi tinggi dari (c) Ti 2p, (d) N 1s, (e) F 1s, (f) C 1s, dan (g) O 1s dari $N-Ti_3C_2T_x$	12
3.6	HRTEM and FESEM (insets: SAED analysis) (a dan b) $N-Ti_3C_2T_x$, (c dan d) $N-Ti_3C_2T_x$ /MWCNT-OH, (e) $Ti_3C_2T_x$, (f) $N-Ti_3C_2T_x$, dan (g) $N-Ti_3C_2T_x$ /MWCNT-OH	14
3.7	(a) voltamogram siklik dari 100 μ M metil paration dalam larutan buffer fosfat 0,1 M (PBS) pada pH 7,0 menggunakan GCE murni; (b) voltamogram pulsa diferensial metil paration yang diukur menggunakan berbagai jenis elektrode; (c) plot Nyquist berbagai jenis elektrode menggunakan 1 mM $K_3[Fe(CN)_6]$; serta (d) sistem 1 dan (e) sistem 2	15
3.8	pH optimum dan hubungan pH buferfosfat 0,1 M terhadap arus reduksi dan potensial metil paration	17
3.9	(a) kronoamperogram metilparation pada berbagai konsentrasi (sisipan: plot Cottrell); (b) plot kemiringan Cottrell vs. konsentrasi metil paration dan V oltamogram 1 mM $K_3[Fe(CN)_6]$ dalam buffer fosfat 0,1 M pH 7, diukur dengan berbagai elektrode pada laju pemindaian 50 mVs^{-1}	18
3.10	Voltammogram siklik 1 mM $K_3[Fe(CN)_6]$ dalam buffer fosfat 0,1 M pH 7, diukur pada elektrode (a) GCE, (b) $N-Ti_3C_2T_x$ /GCE, (c) MWCNT-OH/GCE, dan (d) $N-Ti_3C_2T_x$ /MWCNT-OH/GCE	19
3.11	Voltammogram pulsa differensial 2–100 μ M metil paration dalam buffer fosfat pH 7 pada $N-Ti_3C_2T_x$ /MWCNT-OH dengan kecepatan bayar 50 $mV s^{-1}$	20
3.12	(a) Selektivitas pengukuran 100 μ M metil paration dalam bufer fosfat pH 7 sebelum dan sesudah penambahan senyawa interferens pada $N-Ti_3C_2T_x$ /MWCNT-OH/GCE dengan kecepatan bayar 50 $mV s^{-1}$; (b) Reprodusibilitas dengan 6 elektrode berbeda; (c) Stabilitas selama 5 hari berturut-turut pengukuran metil paration pada konsentrasi 100 μ M dalam larutan penyangga fosfat 0,1 M pH 7	22
3.13	Voltammogram pulsa differensial (a) sampel gandum, ditambahkan dengan konsentrasi standar metil paration (2–12 μ M), pada modifikasi $N-Ti_3C_2T_x$ /MWCNT-OH dengan kecepatan bayar 50 $mV s^{-1}$ (b) nilai pemulihan untuk deteksi metil paration	23



DAFTAR LAMPIRAN

1	Diagram alir penelitian	32
2	MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) hasil sintesis	33
3	MXene Terfungsionalisasi (N- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) hasil sintesis	33
4	Pengukuran blanko buffer fosfat pH 7	33
5	Persamaan regresi linear Metil Paration	34
6	Konsentrasi metil paration dalam sampel gandum dengan DPV pada modifikasi N- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{MWCNT-OH}$	34

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.