



PENGEMBANGAN SENSOR CETAK *CHIPLESS* RFID BERBASIS NANOKOMPOSIT CuNP-rGO-PANI UNTUK *MULTI-ANALYTE* *SENSING* DAN EVALUASI KINERJA NIRKABEL

PRISKA WISUDAWATY



**TEKNIK INDUSTRI PERTANIAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
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.



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Pengembangan Sensor Cetak *Chipless* RFID Berbasis Nanokomposit CuNP-rGO-PANI untuk *Multi-Analyte Sensing* dan Evaluasi Kinerja Nirkabel” 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 disertasi ini.

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

Bogor, Januari 2026

Priska Wisudawaty
NIM F3601212024



@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.

RINGKASAN

PRISKA WISUDAWATY. Pengembangan Sensor Cetak *Chipless* RFID Berbasis Nanokomposit CuNP-rGO-PANI untuk *Multi-Analyte Sensing* dan Evaluasi Kinerja Nirkabel. Dibimbing oleh ENDANG WARSIKI, SUGIARTO dan TAUFIK DJATNA.

Sensor cetak berbasis tinta konduktif berperan penting dalam mendukung transformasi digital di sektor manufaktur dan logistik, khususnya pada kemasan cerdas untuk produk sensitif seperti pangan, farmasi, dan elektronik. Sensor ini memungkinkan integrasi fungsi identifikasi dan pemantauan kondisi lingkungan secara nirkabel dengan biaya rendah dan fleksibilitas tinggi. Pendekatan *chipless* RFID menjadi solusi menjanjikan karena menghilangkan kebutuhan *chip* aktif, sehingga lebih sesuai untuk produksi massal dan sistem *internet of things (IoT)* pasif. Namun demikian, kompleksitas desain resonator dan keterbatasan material konduktif cetak masih menjadi tantangan utama, sehingga diperlukan pengembangan material fungsional dan formulasi tinta yang sederhana, stabil, dan mudah diskalakan melalui metode *screen printing*.

Material berbasis grafena memiliki sifat listrik dan mekanik yang unggul, namun kecenderungan *restacking* antar lembaran *reduced graphene oxide* (rGO) dapat menurunkan kinerjanya. Dalam penelitian ini, polianilin (PANI) berperan sebagai matriks polimer sekaligus *spacer* utama yang mencegah *restacking* rGO dan membentuk struktur berpori, sedangkan nanopartikel tembaga (CuNP) berfungsi sebagai *conductive bridge* yang memperpendek jalur perkolasi elektron dan meningkatkan konduktivitas listrik. Kombinasi CuNP-rGO-PANI dirancang sebagai material multifungsi yang berperan sebagai elemen konduktif sekaligus elemen sensitif pada sensor cetak *chipless* RFID.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan sensor cetak *chipless* RFID berbasis nanokomposit CuNP-rGO-PANI dan evaluasi kinerjanya melalui dua aspek utama, yaitu (i) kemampuan *sensing* multi-analit, yang direpresentasikan oleh respon sensor terhadap amonia (NH₃), etanol, dan kelembaban, serta (ii) keandalan pembacaan nirkabel (*reading robustness*) terhadap variasi jarak baca dan sudut pembacaan. Parameter S₁₁ dan S₂₁ digunakan sebagai indikator perubahan karakteristik resonansi frekuensi tinggi akibat interaksi material dengan analit, bukan sebagai parameter *sensing* itu sendiri. Respon sensor bersifat *near real-time*, di mana perubahan sifat listrik nanokomposit dapat terdeteksi secara langsung melalui pergeseran dan atenuasi sinyal resonansi tanpa proses pasca pengolahan yang kompleks.

Tahap pertama penelitian mencakup sintesis nanokomposit CuNP-rGO-PANI serta karakterisasi struktural, morfologi, dan interaksi kimia antar komponen. Hasil raman menunjukkan peningkatan rasio ID/IG akibat interaksi CuNP dan proses termal, sementara analisis SEM mengonfirmasi dispersi CuNP berukuran nano dengan ukuran ekuivalen rata-rata 11,48 nm dalam matriks rGO-PANI. Hasil FTIR mengindikasikan adanya interaksi kimia antar komponen, dan stabilisasi CuNP dalam matriks PANI terbukti membantu mengurangi *restacking* grafena. Hasil ini menegaskan bahwa nanokomposit CuNP-rGO-PANI memiliki potensi tinggi sebagai material tunggal multifungsi yang mampu berperan sekaligus sebagai elemen konduktif dan sensitif dalam sensor cetak *chipless* RFID.



Tahap kedua berfokus pada optimasi formulasi tinta konduktif menggunakan pendekatan *response surface methodology-central composite design* (RSM-CCD). Hasil penelitian menunjukkan formulasi terbaik pada 74,52% material, 17,40% pengikat, dan waktu *curing* 10,09 menit, menghasilkan konduktivitas sekitar 5,03 S/cm dan resistansi sekitar 20,12 Ω dengan validitas model yang tervalidasi secara statistik.

Tahap ketiga mengevaluasi kinerja sensor cetak terhadap berbagai analit dan performa pembacaan frekuensi tinggi untuk aplikasi *chipless* RFID. Sensor menunjukkan resonansi yang stabil di sekitar 8,58 GHz dengan penurunan tajam parameter S_{11} dan S_{21} , serta mempertahankan respon resonansi yang andal hingga jarak baca sekitar 6,2 cm dan toleransi sudut pembacaan hingga $\pm 30^\circ$. Sensor juga menunjukkan kemampuan *multi-analyte sensing* yang selektif, dengan respons paling kuat terhadap NH_3 melalui mekanisme *dedoping* PANI yang diperkuat oleh rGO dan CuNP, sementara respons terhadap etanol dan kelembaban terdeteksi secara *reproducible* dan stabil. Secara keseluruhan, perubahan sifat listrik nanokomposit CuNP-rGO-PANI terbukti dapat dimanfaatkan secara efektif sebagai mekanisme *sensing* dalam sistem pembacaan nirkabel berbasis gelombang mikro untuk aplikasi sensor cetak *chipless* RFID.

Kata kunci: *chipless RFID, multi-analit sensing, nanokomposit CuNP-rGO-PANI, reading robustness, sensor cetak*

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

SUMMARY

PRISKA WISUDAWATY. Development of CuNP-rGO-PANI Nanocomposite-Based Chipless RFID Printable Sensors for Multi-Analyte Sensing and Wireless Performance Evaluation. Supervised by ENDANG WARSIKI, SUGIARTO, and TAUFIK DJATNA.

Conductive ink-based printable sensors play an important role in supporting digital transformation in the manufacturing and logistics sectors, particularly in smart packaging for sensitive products such as food, pharmaceuticals, and electronics. These sensors enable the integration of identification and environmental monitoring functions wirelessly at low cost and with high flexibility. The chipless RFID approach is a promising solution because it eliminates the need for active chips, making it more suitable for mass production and passive internet of things (IoT) systems. However, the complexity of resonator design and the limitations of printable conductive materials remain major challenges, requiring the development of functional materials and ink formulations that are simple, stable, and easily scalable through screen printing methods.

Graphene-based materials have superior electrical and mechanical properties, but the tendency for reduced graphene oxide (rGO) sheets to restack can reduce their performance. In this study, polyaniline (PANI) acts as both a polymer matrix and a main spacer that prevents rGO restacking and forms a porous structure, while copper nanoparticles (CuNP) function as conductive bridges that shorten the electron percolation path and increase electrical conductivity. The CuNP-rGO-PANI combination is designed as a multifunctional material that acts as both a conductive element and a sensitive element in chipless RFID printed sensors.

This study focuses on the development of a printable chipless RFID sensor based on CuNP-rGO-PANI nanocomposites and the evaluation of its performance from two main perspectives: (i) multi-analyte sensing capability, as reflected by the sensor responses to ammonia (NH₃), ethanol, and humidity; and (ii) the robustness of wireless readout under variations in reading distance and reading angle. The S₁₁ and S₂₁ parameters are employed as indicators of changes in high-frequency resonance characteristics resulting from interactions between the nanocomposite material and target analytes, rather than serving as direct sensing parameters. The sensor exhibits a near real-time response, wherein changes in the electrical properties of the nanocomposite are directly detected through resonance shifts and signal attenuation without the need for complex post-processing.

The first stage of the study involved the synthesis of CuNP-rGO-PANI nanocomposites and comprehensive characterisation of their structural, morphological, and chemical properties. Raman spectroscopy revealed an increase in the ID/IG ratio, attributed to interactions between CuNPs and rGO as well as thermal processing effects. SEM analysis confirmed the homogeneous dispersion of nano-sized CuNPs within the rGO-PANI matrix, with an average equivalent particle size of 11.48 nm. FTIR spectra indicated the presence of chemical interactions among the composite components, while stabilisation of CuNPs within the PANI matrix was found to mitigate graphene restacking. These findings demonstrate that the CuNP-rGO-PANI nanocomposite is a promising

multifunctional single material capable of simultaneously serving as both conductive and sensitive elements in printed chipless RFID sensors.

The second stage focused on optimising the conductive ink formulation using a Response Surface Methodology–Central Composite Design (RSM–CCD) approach. The optimal formulation was determined to consist of 74.52% nanocomposite material, 17.40% binder, and a curing time of 10.09 minutes, yielding a conductivity of approximately 5.03 S/cm and an electrical resistance of approximately 20.12 Ω . The developed quadratic model exhibited strong statistical validity, confirming the reliability of the optimisation results.

The third stage evaluated the performance of the printed sensor in response to various analytes as well as its high-frequency wireless readout characteristics for chipless RFID applications. The sensor exhibited a stable single resonance at approximately 8.58 GHz, accompanied by sharp decreases in the S_{11} and S_{21} parameters. Reliable resonance behaviour was maintained at reading distances of up to approximately 6.2 cm, with angular tolerance extending to $\pm 30^\circ$. In addition, the sensor demonstrated selective multi-analyte sensing performance, with the strongest and fastest response observed for NH_3 , attributed to a PANI dedoping mechanism synergistically enhanced by rGO and CuNPs. Responses to ethanol and humidity were also detected in a reproducible and stable manner. Overall, the observed changes in the electrical properties of the CuNP–rGO–PANI nanocomposite confirm its effective utilisation as a sensing mechanism in microwave-based wireless readout systems for printed chipless RFID sensor applications.

Keywords: chipless RFID, CuNP–rGO–PANI nanocomposite, multi-analyte sensing, printed sensor, reading robustness



@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.

© 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.



@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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PENGEMBANGAN SENSOR CETAK *CHIPLESS* RFID BERBASIS NANOKOMPOSIT CuNP-rGO-PANI UNTUK *MULTI-ANALYTE* *SENSING* DAN EVALUASI KINERJA NIRKABEL

@Hak cipta milik IPB University

PRISKA WISUDAWATY

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Teknik Industri Pertanian

**TEKNIK INDUSTRI PERTANIAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Ir. Irzaman, S.Si., M.Si
- 2 Dr. Agus Mulyana, S.Kom., M.T

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Ir. Irzaman, S.Si., M.Si
- 2 Dr. Agus Mulyana, S.Kom., M.T

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 Sensor Cetak *Chipless* RFID Berbasis Nanokomposit CuNP-rGO-PANI untuk *Multi-Analyte Sensing* dan Evaluasi Kinerja Nirkabel
Nama : Priska Wisudawaty
NIM : F3601212024

Disetujui oleh:

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Endang Warsiki S.T.P., M.Si

Pembimbing 2:
Dr. Ir. Sugiarto M.Si

Pembimbing 3:
Prof. Dr. Eng. Ir Taufik Djatna, M.Si

Diketahui oleh:

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Eng. Ir Taufik Djatna, M.Si
NIP. 197006141995121001

Dekan Fakultas Teknik dan Teknologi:
Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M.Agr.
NIP. 196105021986031002

Tanggal Ujian:
Ujian Tertutup: 11 Februari 2026
Ujian Terbuka: 12 Maret 2026

Tanggal Lulus:



@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.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *Subhanaahu Wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Judul yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Januari 2024 sampai bulan Agustus 2025 ini ialah Pengembangan Sensor Cetak *Chipless* RFID Berbasis Nanokomposit CuNP-rGO-PANI untuk *Multi-Analyte Sensing* dan Evaluasi Kinerja Nirkabel.

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Endang Warsiki, STP., M.Si sebagai ketua komisi pembimbing, Dr. Ir. Sugiarto, M.Si dan Prof. Dr. Eng. Ir. Taufik Djatna, M.Si sebagai anggota komisi pembimbing, atas kesabaran dan keikhlasannya memberikan bimbingan, arahan, saran, dan dukungan moral serta waktu, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan disertasi ini.
2. Prof. Dr. Farah Fahma, S.TP, MT. dan Prof. Dr. Akhiruddin Maddu, S.Si., M.Si sebagai penguji luar komisi pada ujian kualifikasi lisan penulis, Dr. Ir. Erfiani, M.Si sebagai moderator seminar, pimpinan ujian tertutup dan sidang promosi, serta Prof. Dr. Ir. Irzaman, S.Si., M.Si dan Dr. Agus Mulyana, S.Kom., M.T sebagai penguji luar komisi pembimbing pada ujian tertutup dan sidang promosi.
3. Ketua Program Studi, seluruh dosen, staf, dan laboran pada Program Studi Teknik Industri Pertanian Institut Pertanian Bogor untuk semua bantuan yang diberikan.
4. Papa Endang Kusdiman, Mama Tetty Mutiara Sutresnawaty, Suami R. Faid Abdul Manan Wirakartakusumah, Anak R. Faqih Hasan Wirakartakusumah dan Fayra Hadija Kumalawangi, dan seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya selama kuliah dan penyelesaian disertasi.
5. Rektor Universitas Teknologi Bandung, Dekan Fakultas Industri Kreatif, Ketua Departemen Teknik Industri, seluruh dosen, dan staf pada Departemen Teknik Industri atas izin dan dukungan yang diberikan.
6. Pusat Pelayanan Pembiayaan dan Asesmen Pendidikan Tinggi Kementerian Pendidikan Tinggi, Ilmu Pengetahuan, dan Teknologi Republik Indonesia, kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah memberikan beasiswa untuk pelaksanaan kuliah melalui skema Beasiswa Pendidikan Indonesia (BPI).
7. Seluruh teman-teman pada Program Studi Teknik Industri Pertanian Institut Pertanian Bogor, khususnya angkatan 2021 ganjil-genap, grup DPR, Jum'at Berkah atas bantuan dan dukungan yang diberikan.

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

Bogor, Januari 2026

Priska Wisudawaty



@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.

GLOSARIUM

1. Ag : Perak
2. AgNP : Nanopartikel perak
3. Ag@Ppy : *Silver@polypyrrole*
4. AgNWs : *Silver nanowires*
5. APS : Amonium persulfat
6. Au : Emas
7. AuNP : Nanopartikel emas
8. B(OH)₃ : Asam borat
9. C' : Faktor koreksi
10. CaCl₂ : Kalsium klorida
11. CCD : *Central composite design*
12. CMC : *Carboxymethyl cellulose*
13. CNTs : *Carbon nanotubes*
14. CuNP : Nanopartikel tembaga
15. CuSO₄ : Tembaga(II) sulfat (*Copper(II) sulfate*)
16. CV : Koefisien variasi
17. d : Lebar permukaan sampel (cm)
18. D-AuNP : *Dextrin-capped gold nanoparticle*
19. DI Water : *Deionized water*
20. DMF : *Dimethylformamide*
21. DMSO : *Dimetil sulfoksida*
22. DUT : *Device under test*
23. FSPL : *Free-space path loss*
24. FTIR : *Fourier transform infrared spectroscopy*
25. GO : *Graphene oxide*
26. H₂ : Gas hidrogen
27. H₂O : Air
28. H₂O₂ : Hidrogen peroksida
29. H₂SO₄ : Asam sulfat
30. HCL : Asam klorida
31. HEC : *Hydroxyethyle cellulose*
32. I : Arus listrik (A)
33. IoT : *Internet of things*
34. KMnO₄ : Kalium permanganat
35. LFP : *Large format printer*
36. MFC : *Melamine faced chipboard*
37. MnO₂ : Mangan oksida
38. MWCNT : *Multi walled carbon nanotubes*
39. NaNO₃ : Natrium nitrat
40. Na₂SO₄ : Natrium sulfat
41. NH₃ : Amonia
42. NaBH₄ : Natrium borohidrat
43. NGP : *Nanographene platelets*
44. NMP : *N-Methyl pyrrolidone*
45. NTC : *Negative temperature coefficient*

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



46. PANI : Polianilin
47. PEDOT : *Poly (3,4-ethylenedioxythiophene)*
48. PEI : *Polyethyleneimine*
49. PET : *Polyethylene terephthalate*
50. PSS : *Polystyrene sulfonate*
51. Pt : Platina
52. PTFE : *Polytetrafluoroetilena*
53. PTS : *Positive temperature sensor*
54. PVA : *Polyvinyl alcohol*
55. PVP : *Polyvinyl pyrrolidone*
56. RFID : *Radio frequency identification*
57. rGO : *Reduced graphene oxide*
58. ρ : Resistivitas (Ω)
59. RSM : *Response surface methodology*
60. RuO₂ : Ruthenium oxide
61. S : Jarak antar probe (cm)
62. SEM : *Scanning electron microscopy*
63. SMA : *Shape memory alloy*
64. SWCNT : *Single walled carbon nanotubes*
65. TDR : *Time domain reflectometry*
66. THF : Terahydrofuran
67. σ : Konduktivitas listrik (S/cm)
68. TPU : Termoplastik poliuretan
69. UWB : *Ultra wideband*
70. V : Beda potensial listrik (V)
71. VNA : *Vector network analyzer*
72. Zn : Zinc
73. ZnO : *Zinc oxide*

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Penelitian	4
1.6 Kebaruan	4
1.7 Hipotesis Penelitian	4
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sensor Cetak dan Perkembangannya	5
2.2 Teknologi dan Perkembangan <i>Chipless</i> RFID Berbasis Resonansi	7
2.3 Nanokomposit	12
2.4 Tinta Konduktif	14
III METODE	18
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	18
3.2 Alat dan Bahan	18
3.3 Prosedur Kerja	18
IV SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOKOMPOSIT CuNP-rGO-PANI SEBAGAI TINTA KONDUKTIF UNTUK SENSOR CETAK	21
4.1 Pendahuluan	21
4.2 Metode	22
4.3 Hasil dan Pembahasan	24
4.1 Simpulan	32
V OPTIMASI TINTA KONDUKTIF BERBASIS NANOKOMPOSIT CuNP- rGO-PANI UNTUK APLIKASI SENSOR CETAK DALAM KEMASAN CERDAS	33
5.1 Pendahuluan	33
5.2 Metode	34
5.3 Hasil dan Pembahasan	37
5.4 Simpulan	49
VI KARAKTERISTIK SENSOR CETAK BERBASIS NANOKOMPOSIT CuNP-rGO-PANI UNTUK DETEKSI MULTI-ANALIT DAN RESPON FREKUENSI TINGGI	50
6.1 Pendahuluan	50
6.2 Metode	51
6.3 Hasil dan Pembahasan	52
6.4 Simpulan	67
VII PEMBAHASAN UMUM	69



7.1	Potensi Hasil Penelitian dan Aplikasi Industri	69
7.2	Implikasi Penelitian	71
7.3	Kelebihan dan Keterbatasan Penelitian	73
7.4	Rekomendasi Penelitian Selanjutnya dan Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT)	73
VIII SIMPULAN DAN SARAN		75
8.1	Simpulan	75
8.2	Saran	76
DAFTAR PUSTAKA		77
LAMPIRAN		89
RIWAYAT HIDUP		107

DAFTAR TABEL

1	Kelebihan dan kekurangan teknik pencetakan	6
2	Karakteristik tinta untuk pencetakan	7
3	Penelitian berbasis <i>chipless</i> RFID sensor	10
4	Berbagai penelitian dengan nanokomposit sebagai material sensor	13
5	Penelitian bahan penyusun tinta konduktif (<i>screen printing</i>)	15
6	Ringkasan parameter sintesis nanokomposit CuNP-rGO-PANI	18
7	Parameter formulasi tinta konduktif dan pencetakan sensor <i>chipless</i> RFID berbasis nanokomposit CuNP-rGO-PANI	19
8	Parameter pengujian respon dan kinerja sensor <i>chipless</i> RFID terhadap lingkungan	19
9	Hasil perhitungan ukuran partikel nanokomposit CuNP-rGO-PANI	27
10	Level faktor dan desain CCD pada variabel independen	36
11	Rancangan CCD penelitian pada berbagai kombinasi faktor independen	36
12	Hasil pencetakan sensor berdasarkan substrat yang digunakan	37
13	Hasil pengukuran resistivitas dan konduktivitas listrik sensor	39
14	Analisa uji-t data eksperimen dengan prediksi model untuk respon konduktivitas listrik	48
15	Analisa uji-t data eksperimen dengan prediksi model untuk respon resistensi	48
16	Ringkasan performa utama sensor cetak <i>chipless</i> RFID berbasis nanokomposit CuNP-rGO-PANI	66
17	Perbandingan teknologi identifikasi dan sensor nirkabel untuk aplikasi industri dan <i>smart packaging</i>	70

DAFTAR GAMBAR

1	Skema kerja <i>chipless</i> RFID sensor	8
2	Skema komposisi tinta konduktif	15
3	Tahapan penelitian	20
4	Proses sintesis nanokomposit CuNP-rGO-PANI	24
5	Hasil sintesis (a) GO, (b) rGO, (c) CuNP, dan (d) Nanokomposit CuNP-rGO-PANI	25
6	Hasil karakterisasi SEM (a) rGO perbesaran 10000x, (b) rGO perbesaran 20000x, (c) CuNP-GO-PANI perbesaran 10000x, dan (d) CuNP-GO-PANI perbesaran 20000x	27
7	a. Hasil karakterisasi SEM CuNP-GO-PANI pada perbesaran $\times 20000$, b. hasil <i>Threshold</i> nanokomposit pada <i>software</i> ImageJ, c. hasil <i>Outline</i> nanokomposit pada <i>software</i>	28
8	Hasil karakterisasi FTIR rGO dan CuNP-rGO-PANI	29
9	Hasil karakterisasi raman spektroskopi (a) rGO, dan (b) CuNP-rGO PANI	30
10	Ilustrasi metode <i>screen printing</i> (Wisudawaty <i>et al.</i> 2025)	35



11	Hasil pencetakan sensor dengan substrat (a) PET, (b) kertas foto, dan (c) kaca	38
12	Hasil karakterisasi SEM sensor dengan pengikat (a) PVA dan (b) epoxy resin	39
13	Pengaruh rasio material terhadap konduktivitas listrik dan resistensi tinta konduktif	40
14	Pengaruh pengikat terhadap konduktivitas listrik dan resistensi tinta konduktif	41
15	Pengaruh waktu <i>curing</i> terhadap konduktivitas listrik dan resistensi tinta konduktif	42
16	Grafik kontur 2D dan 3D (a) dan (b) interaksi antara perbandingan bahan dan pengikat terhadap konduktivitas listrik, (c) dan (d) interaksi antara perbandingan bahan dan pengikat terhadap resistensi.	46
17	Pengujian respon sensor <i>chipless</i> RFID terhadap gas NH ₃ , etanol dan kelembaban	52
18	Kurva S-Parameter transmisi (S_{21}) dan refleksi (S_{11})	52
19	(a). Koefisien transmisi (S_{21}) dan (b). koefisien refleksi (S_{11}) sensor CuNP-rGO-PANI yang dicetak, diukur pada sudut pembacaan yang berbeda (0°, 30°, dan 60°)	57
20	Respon koefisien transmisi (S_{21}) sensor <i>chipless</i> RFID berbasis CuNP-rGO-PANI	58
21	(a) Respon waktu dan (b) sensitivitas sensor <i>chipless</i> RFID berbasis nanokomposit CuNP-rGO-PANI terhadap paparan gas NH ₃	60
22	(a) Respon waktu dan (b) sensitivitas sensor <i>chipless</i> RFID berbasis nanokomposit CuNP-rGO-PANI terhadap paparan gas etanol	61
23	Respon waktu sensor <i>chipless</i> RFID berbasis nanokomposit CuNP-rGO PANI terhadap kelembaban	63

DAFTAR LAMPIRAN

1	Prosedur analisa dan karakterisasi	90
2	<i>Mapping</i> EDS CuNP-rGO-PANI	91
3	Analisa ANOVA pengaruh rasio material terhadap konduktivitas dan resistensi tinta konduktif	92
4	Analisa ANOVA pengaruh rasio pengikat terhadap konduktivitas dan resistensi tinta konduktif	93
5	Analisa ANOVA pengaruh waktu <i>curing</i> terhadap konduktivitas dan resistensi tinta konduktif	94
6	Data hasil respon konduktivitas dan resistensi dengan CCD-RSM	95
7	Analisis varians model regresi dari faktor rasio material, pengikat dan waktu pengeringan terhadap konduktivitas	96
8	Analisis varians model regresi dari faktor rasio material, pengikat dan waktu pengeringan terhadap resistensi	97
9	Data S_{21} (dB) terhadap kapasitas pengkodean dan kapasitas transfer	98
10	Pengukuran tingkat kesiapterapan penelitian	102