

**DETEKSI KADAR HARA NITROGEN, FOSFOR DAN KALIUM (NPK)
PADA TANAH MENGGUNAKAN METODE KONDUKTIVITAS LISTRIK**

(Skripsi)

Oleh

**LULU QOMARIYAH ANGGRAENI
NPM 2117041042**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

**DETEKSI KADAR HARA NITROGEN, FOSFOR DAN KALIUM (NPK)
PADA TANAH MENGGUNAKAN METODE KONDUKTIVITAS LISTRIK**

Oleh

LULU QOMARIYAH ANGGRAENI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

DETEKSI KADAR HARA NITROGEN, FOSFOR DAN KALIUM (NPK) PADA TANAH MENGGUNAKAN METODE KONDUKTIVITAS LISTRIK

Oleh

LULU QOMARIYAH ANGGRAENI

Kesuburan tanah yang ditentukan oleh kandungan unsur hara NPK (Nitrogen, Fosfor, Kalium) sangat penting untuk produktivitas tanaman. Metode deteksi NPK konvensional seperti uji laboratorium memiliki keterbatasan dalam hal waktu, biaya, dan aksesibilitas bagi petani sedangkan alat ukur NPK dipasaran tergolong mahal. Penelitian ini bertujuan mengembangkan metode alternatif pengukuran kadar NPK tanah menggunakan konduktivitas listrik yang lebih ekonomis dan praktis. Percobaan ini dilaksanakan di Laboratorium Elektronika Dasar, Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada bulan Desember 2024 - Mei 2025. Sistem pengukuran dirancang menggunakan metode 4-titik dengan sumber arus konstan, sistem pembacaan tegangan, dan penguat *non-inverting* yang terintegrasi dengan mikrokontroler Wemos D1 Mini. Tanaman tomat digunakan sebagai indikator biologis untuk menguji efektivitas pemupukan NPK dengan tiga variasi komposisi pupuk: NPK 15-15-15, NPK 16-16-16, dan NPK 20-10-10. Hasil penelitian menunjukkan bahwa (1) sistem berhasil dikembangkan dengan akurasi sistem pembacaan tegangan 99,2% dan penguat *non-inverting* 97,92% menggunakan sumber arus konstan 1,25mA, (2) pupuk NPK 20-10-10 menghasilkan konduktivitas tertinggi (0,4441 S/m), diikuti pupuk NPK 16-16-16 (0,38 S/m), dan NPK 15-15-15 (0,32891 S/m) yang menunjukkan korelasi positif antara kandungan nitrogen dengan konduktivitas tanah, (3) Pertumbuhan tanaman tomat optimal dicapai pada NPK 20-10-10 dengan penambahan tinggi 1,8 cm dibandingkan NPK lainnya (1,5 cm), mengkonfirmasi bahwa konduktivitas listrik dapat menjadi indikator yang baik untuk memprediksi laju pertumbuhan tanaman.

Kata kunci: NPK, pengukuran 4-titik, konduktivitas listrik, tanah, tomat.

ABSTRACT

DETECTION OF NUTRIENT LEVELS OF NITROGEN, PHOSPHORUS AND POTASSIUM (NPK) IN SOIL USING THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY METHOD

By

LULU QOMARIYAH ANGGRAENI

Soil fertility determined by NPK (Nitrogen, Phosphorus, Potassium) nutrient content is crucial for plant productivity. Conventional NPK detection methods such as laboratory testing have limitations in terms of time, cost, and accessibility for farmers, while NPK measuring instruments on the market are relatively expensive. This research aims to develop an alternative method for measuring soil NPK content using electrical conductivity that is more economical and practical. This experiment was conducted at the Basic Electronics Laboratory, Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Lampung from December 2024 to May 2025. The measurement system was designed using a 4-point method with a constant current source, voltage reading system, and non-inverting amplifier integrated with a Wemos D1 Mini microcontroller. Tomato plants were used as biological indicators to test the effectiveness of NPK fertilization with three fertilizer composition variations: NPK 15-15-15, NPK 16-16-16, and NPK 20-10-10. The research results show that (1) the system was successfully developed with voltage reading system accuracy of 99.2% and non-inverting amplifier accuracy of 97.92% using a constant current source of 1.25mA, (2) NPK 20-10-10 fertilizer produced the highest conductivity (0.4441 S/m), followed by NPK 16-16-16 fertilizer (0.38 S/m), and NPK 15-15-15 (0.32891 S/m), demonstrating a positive correlation between nitrogen content and soil conductivity, (3) Optimal tomato plant growth was achieved with NPK 20-10-10 with a height increase of 1.8 cm compared to other NPK fertilizers (1.5 cm), confirming that electrical conductivity can serve as a good indicator for predicting plant growth rates.

Keywords: NPK, 4-point probe measurement, electrical conductivity, soil, tomato.

Judul Penelitian

**: DETEKSI KADAR HARA NITROGEN,
FOSFOR DAN KALSIUM (NPK) PADA
TANAH MENGGUNAKAN METODE
KONDUKTIVITAS LISTRIK**

Nama Mahasiswa

: Lulu Qomariyah Anggraeni

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2117041042

Jurusan

: Fisika

Bidang Keahlian

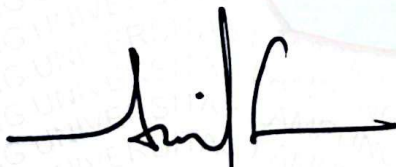
: Instrumentasi

Fakultas

: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing


Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP 19710909 200012 1 001


Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si.
NIP 19901125 201903 2 018

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

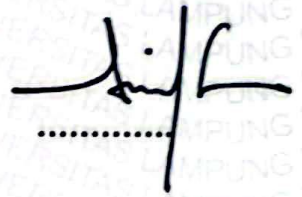

Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP 19710909 200012 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.



Sekretaris

: Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si.



Penguji

Bukan Pembimbing

: Dr. Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 20 Juni 2025

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Lulu Qomariyah Anggraeni
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117041042
Jurusan : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya dengan judul ***“Deteksi Kadar Hara Nitrogen, Fosfor dan Kalium (NPK) Pada Tanah Menggunakan Metode Konduktivitas Listrik”*** adalah benar hasil karya saya sendiri, baik ide, hasil maupun prosesnya. Selanjutnya saya tidak keberatan jika sebagian atau keseluruhan data didalam skripsi ini digunakan oleh dosen atau program studi dalam kepentingan publikasi atas persetujuan penulis dan sepanjang nama saya disebutkan sebelum dilakukan publikasi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran untuk dapat digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 20 Juni 2025
Yang Menyatakan,



Lulu Qomariyah Anggraeni
NPM. 2117041042

RIWAYAT HIDUP



Penulis Bernama lengkap Lulu Qomariyah Anggraeni yang lahir pada tanggal 30 Juni 2003 di Lampung Tengah, dari pasangan Alm. Bapak Tri Nur Samsu dan Ibu Misrina sebagai anak ketiga dari empat bersaudara. Pendidikan Taman Kanak-kanak (TK) Pertiwi Daya Indah Dayamurni diselesaikan tahun 2009. Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SDN 1 Dayamurni pada tahun 2015. Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 1 Tumijajar pada tahun 2018, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMAN 1 Tumijajar pada Tahun 2021.

Tahun 2021, penulis diterima dan terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Fisika FMIPA Unila melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiwa, penulis pernah menjadi asisten praktikum Fisika Dasar 1, Fisika Dasar 2, Metode Pengukuran, Fisika Komputasi, Elektronika Dasar, Fisika Eksperimen, Mikrokontroler, Sistem Akuisisi dan Transmisi Data, dan praktikum Komunikasi Nirkabel (IoT). Penulis juga aktif di Organisasi Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) FMIPA Unila sebagai Anggota bidang Sosial dan Masyarakat, Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) FMIPA Unila sebagai Asisten Keuangan, serta Tim Minat Bakat Seni Tari FMIPA Unila sebagai Ketua Umum. Pada Tahun 2024, penulis melakukan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Instalasi Pemeliharaan Sarana RSUD Dr. H. Abdul Moeloek Provinsi Lampung. Selain itu, penulis mengikuti program Kampus Merdeka yakni *Studi Independen* Bersertifikat di PT. Ozami Inti Sinergi. Pada tahun 2024, penulis terpilih sebagai Delegasi Unila pada lomba ONMIPA Fisika tingkat wilayah, lomba KRTI tingkat wilayah serta KKN Kebangsaan XII Universitas Pattimura untuk melaksanakan KKN di Desa Savanajaya, Kec. Waeapo, Kab. Buru, Provinsi Maluku.

MOTTO

Semakin Tinggi Aku Terbang, Semakin Dalam Aku Menunduk Untuk Melihat
Akar Yang Menopangku.

“Kejeniusan Adalah 1% Inspirasi Dan 99% Keringat”

~ **Thomas Edison** ~

“ Yang Terpenting Bukanlah Tidak Pernah Jatuh, Tetapi Bangkit Setiap Kali
Jatuh”

~ **Nelson Mandela** ~

“Semakin Saya Belajar, Semakin Saya Menyadari Betapa Sedikit Yang Saya
Ketahui”

~ **Albert Einstein** ~

PERSEMBAHAN

Segala puji bagi Allah SWT Tuhan seluruh Alam.
Saya persembahkan karya ini kepada:

Kedua Orang Tua Tercinta

Alm. Bapak Tri Nur Samsu dan Ibu Mistrina

Terimakasih atas kasih sayang, doa dan seluruh dukungan yang tak terhingga, sehingga Lulu mampu melewati semua tantangan tanpa rasa takut. Walaupun sudah tidak bersama Bapak, Lulu akan membuktikan kerja keras yang kalian tanamkan untuk meraih kesuksesan dan membanggakan keluarga.

Bapak Ibu Guru Serta Bapak Ibu Dosen

Terimakasih atas segala bimbingan, arahan, didikan serta saran yang sudah diberikan dengan meluangkan waktu dan pikiran. Semoga ilmu yang diberikan dapat menjadi bekal kesuksesan dan selalu kembali saya salurkan kepada siapapun, sehingga penuh kebermanfaatan.

Kakak-Kakak, Adik, dan Keponakan Tersayang

Mba Nidya Octavia Carolin, Mas Anang Triyono, Abang Julian Ade Praesatama, Fathia Nur Prinastiti dan Almira Nadhira Atha

Terimakasih karena selalu ada memberikan semangat, bantuan, menemani kemanapun, dan mendengarkan semua keluh kesah serta cerita hidupku. Tanpa kalian aku tidak bisa seperti sekarang, karena disetiap langkahku ada doa dan harapan dari kalian.

Rekan-rekan Fisika FMIPA Unila Angkatan 2021

Almamater Tercinta,
“UNIVERSITAS LAMPUNG”

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa, yang telah melimpahkan nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Deteksi Kadar Hara Nitrogen, Fosfor dan Kalium (NPK) Pada Tanah Menggunakan Metode Konduktivitas Listrik”**. Skripsi ini ditulis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains serta untuk melatih mahasiswa tentang cara berfikir yang kritis, cerdas, inovatif dan kreatif dalam menulis suatu karya ilmiah.

Penulis menyadari terdapat banyak kesalahan dalam penulisan skripsi ini. oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan agar kedepannya skripsi ini menjadi lebih baik lagi. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pembaca terkhusus saya sendiri.

Bandar Lampung, 20 Juni 2025
Penulis,

Lulu Qomariyah Anggraeni

SANWANCANA

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa, karena atas Rahmat dan Hidayah-Nya skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Skripsi dengan judul “*Deteksi Kadar Hara Nitrogen, Fosfor dan Kalium (NPK) Pada Tanah Menggunakan Metode Konduktivitas Listrik*” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Sains di Universitas Lampung. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng., selaku pembimbing I yang telah membimbing saya dengan penuh kesabaran, selalu meluangkan waktu dan pikiran saat saya memiliki pertanyaan, memberikan arahan serta motivasi saat dirasa kesulitan, dan mendengarkan keluh kesah dalam mengerjakan skripsi ini.
2. Ibu Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si., selaku pembimbing II yang telaten memastikan saya agar tidak tertinggal dalam studi serta memberikan bimbingan, saran dan arahan dalam kepenulisan dari awal hingga akhir.
3. Ibu Dr. Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si., selaku penguji yang telah memberikan bimbingan serta mengoreksi kekurangan serta memberikan kritik dan saran dalam penyusunan skripsi ini.
4. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang selalu tersenyum teduh, mendoakan dan memberikan semangat serta kasih sayang saat saya dikampus dan meluangkan waktu untuk memberikan konsultasi akademik serta motivasi untuk terus bermanfaat dan fokus meraih kesuksesan.
5. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.
6. Segenap dosen yang telah sabar memberikan ilmu yang bermanfaat bagi penulis selama menempuh Pendidikan di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu

Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

7. Kedua orang tua saya terkhusus mama, yang dengan sabar memberikan doa dan dukungan serta wejangan. Terimakasih juga sudah semangat menemani saya dalam menyusun skripsi ini.
8. Kakak-kakak, adik dan keponakanku, yang selalu menemani kemanapun saya butuhkan, yang selalu yakin dan percaya bahwa tantangan didepan saya akan bisa lewati dengan baik.
9. Dina Afrilia, teman seperjuanganku dalam berkuliah hingga selesai menyusun skripsi ini, yang bisa menyeimbangkan semangatku, menyeimbangkan energi untuk setiap hal yang akan menjadi tantangan. Terimakasih atas semua doa dan kata-kata yang dilontarkan setiap hari dengan selalu positif dan penuh perhatian, sehingga menjadi semangat untuk terus fokus pada tujuan.
10. Sahabat-sahabat saya sebagai *Role-Model*-ku, Erliza Miranda Putri, Sayyida Arenite Azzahra Anugrah Ramadhan dan Nuha Zakiya Kamila, yang setiap hari bertukar kabar dan menyemangati walaupun menempa ilmu berjauhan. Terimakasih sudah selalu kebersamaian, memberi saran dan masukan tentang apapun sehingga saya merasa penuh dukungan.
11. Sahabat Instru-ku, Dina, Anis, Inayah, Okka, Armel, Made, Gusti, Ega, Ketrin, Fathan, Made, Feby, yang setiap hari bersama-sama mencari ilmu di kampus dan saling mendukung serta saling membantu dalam melewati semua tantangan dan ujian.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa memberikan nikmat-Nya kepada kita semua.

Bandar Lampung, 20 Juni 2025

Penulis

Lulu Qomariyah Anggraeni

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
HALAMAN PERNYATAAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP.....	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	x
SANWANCANA.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
 I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
1.5. Batasan Masalah.....	4
 II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Penelitian Terkait.....	6
2.2. Teori Dasar	13
2.2.1. Konduktivitas	13
2.2.2. Tanah	14
2.2.3. Konduktivitas Listrik Tanah	16
2.2.4. Teknik Geolistrik	17
2.2.5. Metode 4 Point Probe Konfigurasi Wenner.....	19

2.2.6. Unsur Hara.....	28
2.2.7. Unsur Hara Nitrogen	24
2.2.8. Unsur Hara Fosfor	26
2.2.9. Unsur Hara Kalium.....	28
2.2.10. Tanaman Tomat.....	29

III. METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian	32
3.2. Alat dan Bahan	32
3.3. Prosedur Penelitian.....	34
3.3.1. Studi Literatur.....	35
3.3.2. Perancangan Alat Pengukuran.....	36
3.3.2.1. Perancangan Sumber Arus Konstan	36
3.3.2.2. Perancangan Sistem Pembacaan Tegangan	36
3.3.2.3. Perancangan Penguat <i>non-Inverting</i>	42
3.3.3. Persiapan Sampel Tanah	43
3.3.4. Penanaman dan Penyiraman Tanaman Tomat	43
3.3.5. Pemberian Pupuk NPK.....	43
3.3.6. Perancangan Pengambilan Data Penelitian	44

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Realisasi Alat Pengukuran.....	48
4.2. Pengujian Sumber Arus Konstan.....	51
4.3. Pengujian Sistem Pembacaan Tegangan.....	54
4.4. Pengujian Penguat <i>non-Inverting</i>	60
4.5. Persiapan Sampel Tanah dan Pupuk NPK.....	62
4.6. Pengujian Konduktivitas Meter	65
4.6.1. Program Konduktivitas Meter	65
4.6.2. Hasil Pengukuran Konduktivitas Meter	67

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan.....	73
5.2. Saran.....	73

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Alat Pengukuran tahanan jenis	6
2.2 Skematik alat pengukuran konduktivitas	8
2.3 <i>Soil box</i> dan rangkaian alat	10
2.4 Desain pengukuran pada penelitian	11
2.5 Komposisi penyusun tanah secara umum	15
2.6 Pengukuran dengan metode geolistrik	18
2.7 Susunan Elektroda Konfigurasi Wenner.....	20
2.8 Penggolongan unsur hara	22
2.9 Siklus hara Nitrogen.....	26
2.10 Tomat.....	30
3.1 Diagram alir penelitian.....	35
3.2 Metode pengukuran.....	36
3.3 Diagram blok penelitian.....	37
3.4 Rangkaian sumber arus konstan.....	37
3.5 Diagram alir pengujian rangkaian sumber arus konstan	38
3.6 Rangkaian sistem pembacaan tegangan	39
3.7 Diagram alir kalibrasi sistem pembacaan tegangan	40
3.8 Rangkaian penguat <i>non-inverting</i>	42
3.9 Diagram alir pengambilan data penelitian	44
3.10 Alat ukur analog kelembaban dan pH tanah	45

4.1	Prototipe konduktivitas meter	48
4.2	Konduktivitas meter	49
4.3	Tampilan depan konduktivitas meter	50
4.4	Tampilan belakang konduktivitas meter	50
4.5	<i>Probe</i> pengukuran 4 titik.....	51
4.6	Proses pengukuran sumber arus konstan.....	52
4.7	Hasil Pengujian Karakteristik Rangkaian Pengukuran Hambatan Tanah	54
4.8	Pengukuran sumber tegangan dari catu daya menggunakan (a) voltmeter (b) sistem pembacaan tegangan	55
4.9	Hasil kalibrasi rangkaian sistem pembacaan tegangan	57
4.10	Proses pengukuran sistem pembacaan tegangan setelah kalibrasi.....	59
4.11	Pengukuran lanjutan tanah dan tanaman	61
4.12	Penjemuran sampel tanah.....	62
4.13	Penyaringan tanah	63
4.14	Penimbangan sampel pupuk NPK.....	63
4.15	Penakaran air.....	64
4.16	Sampel tanah dalam kotak sampel	64
4.17	Proses pengukuran konduktivitas tanah.....	67
4.18	Hubungan konduktivitas rata-rata dengan perubahan kadar pupuk NPK.....	68
4.19	Pengukuran lanjutan tanah dan tanaman.....	69
4.20	Hubungan variasi kadar pupuk NPK terhadap penambahan tinggi tanaman.....	71

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Unsur hara yang dibutuhkan tanaman dan kandungannya.....	24
3.1 Alat penelitian	32
3.2 Bahan penelitian.....	33
3.3 Rancangan tabel data rangkaian arus konstan.....	39
3.4 Rancangan tabel data kalibrasi sistem pembacaan tegangan	41
3.5 Rancangan tabel data akurasi sistem pembacaan tegangan	41
3.6 Rancangan tabel data rangkaian penguat <i>non-inverting</i>	42
3.7 Rancangan tabel data pengukuran konduktivitas listrik tanah.....	46
3.8 Rancangan tabel data pengukuran pertumbuhan tanaman tomat pada sampel tanah dengan pupuk NPK 15-15-15	46
3.9 Rancangan tabel data pengukuran pertumbuhan tanaman tomat pada sampel tanah dengan pupuk NPK 16-16-16	46
3.10 Rancangan tabel data pengukuran pertumbuhan tanaman tomat pada sampel tanah dengan pupuk NPK 20-10-10	47
4.1 Data pengujian rangkaian sumber arus konstan dengan variasi hambatan ...	53
4.2 Data pengujian sistem pembacaan tegangan.....	56
4.3 Akurasi sistem pembacaan tegangan	59
4.4 Hasil pengujian penguat <i>non-inverting</i>	61
4.5 Data pengukuran konduktivitas listrik tanah.....	67
4.6 Data pengukuran pertumbuhan tanaman tomat pada sampel tanah dengan pupuk NPK 15-15-15	70

4.7	Data pengukuran pertumbuhan tanaman tomat pada sampel tanah dengan pupuk NPK 16-16-16.....	70
4.8	Data pengukuran pertumbuhan tanaman tomat pada sampel tanah dengan pupuk NPK 20-10-10.....	70

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tanah berperan penting sebagai media pertumbuhan tanaman dengan menyediakan pasokan kadar hara yang menjadi nutrisi utama bagi tanaman. Kemampuan tanah untuk menyediakan unsur hara yang cukup dapat disebut sebagai tanah subur. Kesuburan tanah selanjutnya menentukan kualitas produktivitas pada tanaman (Handayanto *et al.*, 2017). Tanah yang dikelola dengan kurang tepat menyebabkan hilangnya nutrisi penting, kerusakan tanah serta penurunan hasil panen. Selain itu, kadar hara tanah dapat mengalami fluktuasi akibat pengaruh proses fisika, kimia, dan biologi yang menyebabkan tanah tidak selalu ideal untuk digunakan sebagai media tanam dalam jangka panjang (Yunus *et al.*, 2024)

Unsur hara yang sangat penting bagi kesuburan tanah dan pertumbuhan tanaman antara lain Nitrogen (N), Fosfor (P) dan Kalium (K) yang dikenal sebagai NPK (Titiek *et al.*, 2021). Nitrogen merupakan unsur penyubur tanaman yang berperan dalam pertumbuhan dan perkembangan vegetatif terutama dalam membentuk zat hijau daun (klorofil) (Sholeha *et al.*, 2024). Fosfor juga memiliki peran penting sebagai makronutrien yang mendukung pertumbuhan tanaman. Kekurangan fosfor dapat memperlambat pertumbuhan, menyebabkan tanaman kerdil, serta memicu perubahan warna pada batang dan daun. Sedangkan Kalium memiliki fungsi yang vital dalam pembentukan protein dan proses fotosintesis. Kekurangan kalium tidak hanya berdampak buruk bagi tanaman, tetapi juga mengindikasikan kondisi tanah yang mudah terkikis (Basuki *et al.*, 2023).

Ketika kandungan hara pada tanah tidak mencukupi, tanaman akan mengalami gangguan pertumbuhan yang berdampak pada menurunnya produktivitas panen (Wahditiya *et al.*, 2024). Salah satu solusi yang efektif untuk mengatasi hal tersebut

adalah dengan penggunaan pupuk (Suntari *et al.*, 2021). Pupuk, baik organik maupun anorganik mengandung unsur hara penting yang mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Pupuk dapat diaplikasikan melalui tanah, daun, atau batang tanaman, termasuk dengan metode injeksi (Mansyur *et al.*, 2021).

Pemenuhan kebutuhan unsur hara dapat dilakukan melalui pemupukan menggunakan pupuk NPK, yang merupakan pupuk majemuk dengan kandungan nitrogen, fosfor, dan kalium secara lengkap untuk tanaman. Jenis-jenis pupuk NPK yang tersedia di pasaran cukup beragam, dengan kandungan unsur yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan tanaman dan kondisi lahan (Lingga, 2001). Dalam menghadapi tantangan pertanian modern untuk meningkatkan produktivitas guna memenuhi kebutuhan pangan global yang terus meningkat, manajemen nutrisi tanah yang efektif menjadi faktor kunci (Darmawan *et al.*, 2023). Menganalisis tanah sebelum melakukan penanaman tanaman juga sangat penting untuk mengetahui kadar unsur hara. Dengan mendeteksi kandungan NPK di tanah, petani bisa mengatur pupuk dengan tepat yaitu menambah atau mengurangi dosis sesuai kebutuhan tanaman (Lubis, 2021).

Berbagai metode telah dilakukan dan dikembangkan oleh peneliti diseluruh dunia untuk mendeteksi kadar hara NPK pada tanah. Beberapa diantaranya meliputi pengukuran nutrisi tanah menggunakan sensor NPK tanah (Pratama *et al.*, 2021; Moruk *et al.*, 2023; Ratna *et al.*, 2023), menggunakan metode pengolahan citra digital (Amri dan Sumiharto, 2019), analisis hubungan pH tanah terhadap kadar NPK (Senapaty *et al.*, 2023), dan uji laboratorium. Meskipun masing-masing metode memiliki kelebihan, terdapat beberapa kelemahan yang membatasi penggunaannya. Pengukuran menggunakan sensor NPK tanah menawarkan kemudahan dan hasil cepat, tetapi perangkat ini relatif mahal sehingga sulit dijangkau oleh sebagian besar petani. Metode menggunakan citra digital memerlukan banyak data set dan hasilnya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti variasi ketinggian, sudut dan pencahayaan saat pengambilan citra sehingga akurasi terbatas. Pengukuran NPK tanah berdasarkan pH tanah memiliki kelemahan utama karena hubungan antara pH tanah dan ketersediaan unsur NPK tidak selalu linier atau konsisten. Sementara itu, metode konvensional untuk pengukuran NPK seperti uji laboratorium yang meskipun akurat tetapi sering

kali memerlukan waktu lama dan biaya yang tinggi. Keterbatasan tersebut menunjukkan perlunya inovasi dalam metode pemantauan nutrisi tanah yang lebih praktis, ekonomis dan mudah diakses petani. Solusi seperti ini akan sangat membantu dalam meningkatkan efisiensi pertanian dan menjaga keberlanjutan produktivitas lahan.

Salah satu cara yang memungkinkan dan diusulkan dalam penelitian ini adalah penggunaan metode konduktif sebagai indikator kandungan NPK di dalam tanah. Konduktivitas listrik tanah merupakan kemampuan tanah untuk menghantarkan arus listrik yang dipengaruhi oleh konsentrasi ion-ion terlarut dalam larutan tanah. Secara umum, semakin tinggi kadar ion atau garam yang terlarut dalam tanah maka semakin besar pula daya hantar listriknya (Widiasmadi, 2023). Dengan metode ini, tidak diperlukan banyak waktu serta biaya yang mahal karena memberikan perbandingan konduktivitas listrik terhadap kadar NPK dalam tanah menggunakan bahan yang lebih ekonomis. Penelitian ini diusulkan untuk mengoptimalkan metode deteksi kandungan NPK. Metode ini bekerja dengan prinsip bahwa kandungan ion seperti nitrat (NO_3^-), fosfat (PO_4^{3-}), dan kalium (K^+) dalam tanah memengaruhi nilai konduktivitas listrik (Adirianto *et al.*, 2021).

Dalam penelitian ini, tanaman tomat digunakan sebagai indikator untuk menguji efektivitas pemupukan NPK dengan kandungan yang berbeda-beda karena pada penelitian yang dilakukan oleh Subhan *et al.*, (2009) menunjukkan bahwa tanaman tomat memiliki kebutuhan unsur hara nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) yang relatif tinggi, menjadikannya tanaman yang ideal untuk menguji efektivitas pemupukan. Sebagai tanaman indikator, tomat akan menunjukkan respons pertumbuhan yang berbeda sesuai variasi kandungan NPK. Pengukuran konduktivitas listrik tanah dilakukan untuk memetakan hubungan antara variasi unsur hara dan kondisi elektrik tanah. Dengan mengamati pertumbuhan tomat dan mengukur konduktivitas listrik pada setiap sampel tanah dengan komposisi NPK berbeda, penelitian ini bertujuan mengembangkan metode alternatif yang lebih efisien dan hemat biaya dibandingkan metode konvensional.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana cara membuat alat pengukuran kadar NPK menggunakan metode konduktivitas listrik tanah?
2. Bagaimana pengaruh kadar NPK terhadap konduktivitas listrik tanah?
3. Bagaimana pengaruh perbedaan kadar pupuk NPK terhadap pertumbuhan tanaman tomat?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Membuat alat pengukuran NPK menggunakan metode konduktivitas listrik tanah.
2. Menganalisis pengaruh kadar NPK terhadap konduktivitas listrik tanah.
3. Mengetahui pengaruh perbedaan kadar pupuk NPK terhadap pertumbuhan tanaman tomat.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Menyediakan alat pengukuran NPK dengan metode konduktivitas listrik tanah.
2. Membantu petani dalam mengetahui kualitas nutrisi tanah secara efisien.
3. Memberikan informasi NPK untuk pemupukan yang lebih tepat dengan metode konduktivitas listrik tanah.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Kadar Hara serta variabel tanah yang di analisis terhadap hubungannya dengan konduktivitas listrik tanah hanya NPK.

2. Pengukuran dilakukan dengan metode konduktivitas listrik tanah tanpa membandingkan dengan metode lain.
3. Penelitian menggunakan jenis pupuk NPK dengan kadar berbeda.
4. Penelitian menggunakan tanaman tomat sebagai sampel tanaman dengan pemberian kadar pupuk NPK yang berbeda-beda.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terkait

Penelitian mengenai hubungan konduktivitas Listrik tanah dengan unsur hara NPK dan pH pada lahan pertanian gambut (Sari *et al.*, 2019). Pengambilan sampel tanah gambut dilakukan dengan jarak yang telah diatur, kemudian diukur nilai konduktivitas listrik serta kandungan NPK, pH dan kadar airnya. Alat pengukuran tahanan jenis dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Alat Pengukuran tahanan jenis (Sari *et al.*, 2019)

Dalam penelitian ini, sampel tanah diambil di beberapa titik pada lahan gambut dan diuji untuk mengukur konduktivitas Listrik, kadar pH, serta kandungan unsur hara NPK menggunakan metode tahanan jenis. Penelitian ini mengidentifikasi bahwa konduktivitas listrik tanah dipengaruhi oleh parameter fisik tanah dan kandungan ion-ion di dalamnya. Pada pengukuran konduktivitas Listrik tanah, sampel dimasukkan kedalam kotak lalu arus listrik dialirkan kemudian beda potensial dicatat untuk dilakukan perhitungan dengan persamaan resistivitas dan konduktivitas

listrik. Namun, terdapat dua variasi pada sampel, yakni sampel yang dikeringkan dan sampel yang belum dikeringkan. Tujuan pengeringan ini adalah mengidentifikasi ion hara dengan lebih fokus karena konduktivitas listrik tanah didominasi oleh nilai daya hantar Listrik yang diakibatkan jenuhnya kandungan air terhadap nilai hantar Listrik dikarenakan kandungan ion hara tersebut.

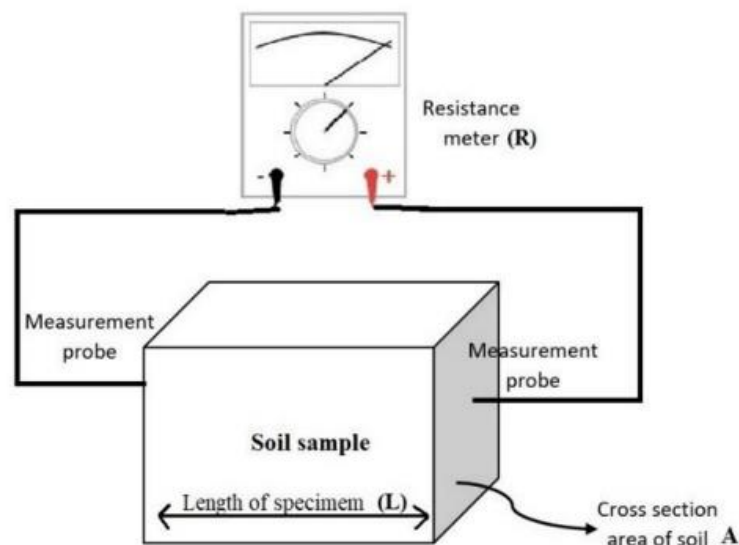
Pengukuran kadar air dilakukan dengan cara mengoven terlebih dahulu cawan ukur dengan suhu 150°C selama satu jam lalu setelah selesai cawan dimasukkan ke dalam desikator untuk menghilangkan air yang ada di cawan ukur. Kemudian sampel tanah dimasukkan sebanyak 2 gram ke cawan ukur dengan dipastikan pengukuran berat cawan ditimbang sebelum dan sesudah terisi sampel. Selanjutnya sampel dimasukkan kembali ke dalam oven selama satu jam hingga berat yang dicapai sudah konstan dan kadar air dapat dihitung.

Sedangkan pengukuran Unsur hara NPK dan pH dilakukan di laboratorium kimia tanah Fakultas Pertanian Universitas Tanjungpura dengan menggunakan larutan buffer pH 7 dan pH 4. Uji kandungan nitrogen menggunakan metode penetapan nitrogen Kjeldahl, kandungan fosfor menggunakan metode Bray I, dan kandungan kalium menggunakan metode ekstraksi NH_4OAC pH:7.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai konduktivitas listrik tanah bervariasi antara kondisi sebelum dan sesudah pengeringan tanah dengan nilai rata-rata berkisar $0,0079\text{--}0,066\text{ Sm}^{-1}$ sebelum pengeringan dan $0,029\text{--}0,056\text{ Sm}^{-1}$ setelah pengeringan. Korelasi antara konduktivitas listrik dengan pH memiliki nilai positif sebesar 0,5 atau kategori sedang, sedangkan korelasi dengan Nitrogen, Fosfor, dan Kalium masing-masing bernilai -0,4, 0,28, dan 0,26. Korelasi yang rendah ini mengindikasikan bahwa meskipun konduktivitas listrik dapat memberikan indikasi terhadap kandungan unsur hara, pengaruhnya cenderung tidak terlalu kuat. Hasil ini menegaskan bahwa lahan gambut memiliki tingkat kemasaman tinggi dengan rentang pH 3,38–5,72 dan kandungan unsur hara yang bervariasi tergantung lokasi sampel. Kenaikan nilai konduktivitas listrik di beberapa titik cenderung diikuti oleh kenaikan pH dan unsur hara Fosfor dan Kalium, tetapi penurunan pada kandungan Nitrogen.

Darmawan *et al.*, (2023) melakukan penelitian mengenai sifat elektrik dari tanah

sebagai indikator kandungan unsur NPK dalam tanah. Skematik alat pengukuran konduktivitas dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2 Skematik alat pengukuran konduktivitas (Darmawan *et al.*, 2023)

Nilai konduktivitas dan kapasitansi tanah diukur untuk berbagai konsentrasi N, P, dan K guna menentukan parameter kelistrikan yang paling sesuai untuk mengindikasikan kadar NPK. Pengambilan sampel dilakukan pada tanah laterit dari area perkebunan di Lembang, Jawa Barat. Sampel tanah dikondisikan menjadi kering dengan pengeringan pada oven suhu 250°C selama 30 menit, kemudian diberi variasi kadar air untuk kondisi basah. Variasi kadar unsur hara dilakukan dengan mencampurkan pupuk urea (46% N), SP-36 (36% P), dan kalium sulfat (52% K) dalam tanah.

Pengukuran dilakukan menggunakan metode dua-*probe* dengan alat Multimeter, di mana *probe* berbentuk silinder dengan diameter 5 mm dan panjang penetrasi 8 cm. Pengukuran konduktivitas dihitung menggunakan persamaan resistivitas, sedangkan kapasitansi diukur langsung dari alat. Pada tanah kering, konduktivitas dan kapasitansi diukur setelah penambahan pupuk kering dalam rentang konsentrasi 0–100%. Pada tanah basah, pupuk dilarutkan dalam air sebelum dicampurkan ke tanah, dengan variasi kadar air 20–100 mL.

Hasil menunjukkan bahwa pada tanah kering, konduktivitas tanah lebih linear terhadap konsentrasi NPK dengan koefisien determinasi rata-rata 0,81 dibandingkan kapasitansi (0,72). Sebaliknya, pada tanah basah, kapasitansi

menunjukkan linearitas lebih baik (0,55) dibandingkan konduktivitas (0,34). Secara khusus, nitrogen memiliki korelasi paling signifikan terhadap parameter kelistrikan dibandingkan fosfor dan kalium. Kombinasi pengukuran konduktivitas dan kapasitansi dapat meningkatkan akurasi dalam mendeteksi kadar NPK di tanah untuk berbagai kondisi kelembaban.

Penelitian yang dilakukan oleh Dattatreya *et al.*, (2024) membahas metode konvensional dan modern dalam pengukuran kandungan NPK tanah untuk meningkatkan produktivitas hasil pertanian. Penelitian ini mengulas berbagai metode untuk mendeteksi kandungan NPK dalam tanah seperti metode optik, metode elektrokimia, dan metode pengukuran konduktivitas. Dalam penelitian ini juga membahas teknologi mutakhir dalam penginderaan pertanian yang dapat digunakan seperti sensor berbasis *Micro-Electro-Mechanical System* (MEMS), sensor berbasis polimer dan nanobiosensor. Salah satu metode yang dibahas adalah pengukuran konduktivitas listrik yang menjadi alternatif menarik karena kesederhanaannya, respons cepat, dan biaya yang rendah. Metode ini bekerja dengan mendeteksi daya hantar listrik tanah yang bergantung pada ion-ion seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Meskipun presisinya lebih rendah dibanding metode lain seperti optik atau elektrokimia, metode konduktivitas mampu memberikan data awal yang cukup untuk mengidentifikasi area yang memerlukan analisis lebih rinci. Selain metode konduktivitas, penelitian ini juga membahas metode optik yang sangat sensitif tetapi membutuhkan persiapan sampel yang lebih signifikan, serta metode elektrokimia yang lebih portable tetapi kurang efektif untuk tanah dengan variabilitas tinggi. Penelitian menyoroti bahwa metode konduktivitas jika digabungkan dengan teknologi modern seperti IoT dapat menghasilkan data real-time yang mendukung pengelolaan tanah secara efisien.

Septiyani *et al.*, (2016) melakukan penelitian mengenai analisis konduktivitas listrik tanah gambut dengan menggunakan variasi pupuk KCl. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pupuk KCl berbeda variasi yang dicampurkan dengan tanah gambut terhadap nilai konduktivitas. Penelitian ini dilakukan dengan metode resistivitas menggunakan soil box untuk tiga variasi perbandingan tanah gambut dan pupuk KCl yaitu 3:1, 2:2, dan 1:3. Soil box beserta rangkaian alat yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 2.3**.



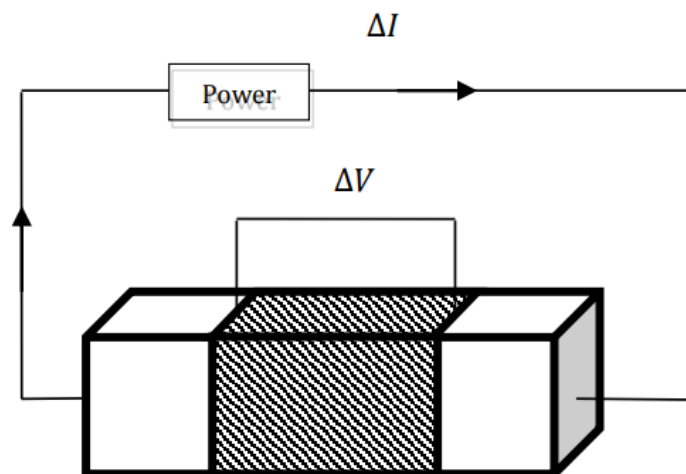
Gambar 2.3 *Soil box* dan rangkaian alat (Septiyani dan Ivansyah, 2016)

Sampel tanah gambut diambil dari kedalaman yang sama agar tidak ada variasi sifat-tanah dengan kedalaman 35 cm, kemudian sampel dipreparasi dengan cara dijemur dengan memperhatikan ketebalan tanah yang disamakan dan selanjutnya diayak hingga dapat digunakan. Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran nilai tahanan jenis gambut, pengukuran kadar air dan pengukuran densitas.

Pengukuran nilai tahanan jenis dilakukan dengan memasukkan sampel tanah gambut yang sudah selesai dipreparasi kedalam *soil box* dan rangkaian alat seperti pada **Gambar 2.3**. Pengambilan data dilakukan dengan memberikan aliran Listrik menggunakan catu daya ke elektroda yang terdapat pada *soil box* dengan kabel penghubung yang selanjutnya besar potensial yang terbaca di multimeter digital dapat dicatat untuk penghitungan konduktivitas listrik tanah.

Pengukuran kadar air dilakukan dengan menaruh sampel yang telah dipreparasi diatas alumunium dengan berat yang diketahui dan ditimbang. Setelah mengetahui berat sampel yang digunakan, sampel dikeringkan lagi dalam oven dengan suhu 105°C sampai massanya konstan dan ditimbang kembali.

Pengukuran nilai densitas dilakukan dengan mengukur volume dari *soil box* yang digunakan, kemudian ditimbang tanpa dan dengan sampel untuk mengetahui massanya saat tidak ada sampel dan saat terdapat sampel. Desain pengukuran pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 Desain pengukuran pada penelitian (Septiyani dan Ivansyah, 2016)

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kadar air pada tanah gambut dengan variasi pupuk KCl berkisar antara 14,94% hingga 66,67%. Densitas tanah dalam variasi ini berada pada rentang 834,428 kg/m³ hingga 1011,966 kg/m³, sementara nilai konduktivitasnya bervariasi dari 0,249372 (Ωm)⁻¹ hingga 0,709735 (Ωm)⁻¹. Analisis menunjukkan bahwa konduktivitas pupuk KCl dipengaruhi oleh komposisi campuran tanah gambut dan pupuk KCl. Korelasi kadar air terhadap konduktivitas menunjukkan hubungan yang sangat lemah dengan nilai koefisien 0,3451, sedangkan korelasi antara densitas dan konduktivitas tergolong kuat namun negatif dengan nilai koefisien -0,731, yang mengindikasikan bahwa densitas tidak secara langsung memengaruhi nilai konduktivitas.

Suud *et al.*, (2022) mereview efektivitas pengukuran konduktivitas listrik atau *Electrical Conductivity* (EC) tanah untuk menduga kesuburan lahan pertanian dalam konteks pertanian presisi. Nilai EC tanah sering digunakan untuk memetakan salinitas, kandungan ion, kadar air, dan kondisi tekstur tanah. Penelitian ini menyoroti bahwa meskipun EC tanah memiliki banyak potensi sebagai indikator kesuburan, interpretasinya rumit karena dipengaruhi berbagai faktor seperti temperatur, pH, kepadatan, dan kadar air. EC tanah tidak hanya mencerminkan tingkat salinitas tetapi juga hubungan kompleks antarparameter tanah lainnya, sehingga mengharuskan metode interpretasi yang cermat untuk hasil yang akurat.

Metode pengukuran EC tanah berkembang dari metode langsung seperti *wenner array* hingga metode induksi elektromagnetik yang lebih canggih. Teknik *wenner array* melibatkan penggunaan elektroda yang ditanam langsung ke tanah untuk membaca nilai EC berdasarkan hubungan tegangan dan tahanan listrik. Metode ini sederhana, cocok untuk pengukuran dangkal, dan dapat memberikan korelasi kuat dengan salinitas serta kadar air tanah. Di sisi lain, metode induksi elektromagnetik menggunakan sensor tanpa kontak dengan tanah, yang menghasilkan data EC dengan efisiensi tinggi tanpa mengganggu struktur tanah. Kedua metode ini terbukti memiliki hasil yang konsisten meskipun memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing.

Faktor-faktor yang memengaruhi nilai EC tanah sangat kompleks. Misalnya, nilai EC tanah memiliki hubungan yang erat dengan kadar air, salinitas, dan kepadatan tanah. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar air atau kepadatan tanah cenderung meningkatkan nilai EC. Namun, salinitas juga menjadi faktor dominan dalam tanah salin, sedangkan pada tanah non-salin, tekstur tanah dan kadar air lebih berpengaruh. Selain itu, faktor sekunder seperti kontur tanah, topografi, dan keberadaan logam juga dapat memengaruhi pengukuran nilai EC, sehingga memerlukan protokol yang tepat untuk meminimalkan bias data.

Pengembangan pemetaan spasial berbasis EC tanah menjadi alat penting dalam manajemen lahan pertanian. Pemetaan ini memungkinkan analisis sebaran kualitas tanah yang terintegrasi dengan data GPS untuk menciptakan peta dua dimensi atau tiga dimensi kondisi tanah. Data EC dapat digunakan untuk mendukung aplikasi manajemen berbasis lokasi seperti pengaturan dosis pupuk yang tepat. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa nilai EC tanah memiliki korelasi yang kuat dengan hasil panen, kandungan karbon organik, dan aktivitas mikroorganisme tanah. Pengukuran EC secara berkala dapat membangun basis data historis yang bermanfaat untuk perencanaan pengelolaan lahan jangka panjang. Pengukuran EC tanah adalah alat yang efektif untuk menduga kesuburan tanah, tetapi memerlukan pemahaman yang mendalam tentang kondisi lahan dan faktor pengaruhnya. Interpretasi nilai EC harus dilakukan dengan hati-hati, memperhitungkan pengaruh faktor primer seperti kadar air, salinitas, dan tekstur tanah, serta meminimalkan pengaruh faktor sekunder seperti kontur lahan dan logam.

2.2. Teori Dasar

2.2.1. Konduktivitas

Setiap material memiliki hambatan jenis yang berbeda-beda. Material dengan hambatan jenis yang tinggi akan memiliki hambatan besar pula, sehingga sulit menghantarkan arus listrik. Berdasarkan kemampuan menghantarkan listrik (konduktivitas listrik), material dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu konduktor, isolator, dan semikonduktor. Konduktor adalah material yang memungkinkan elektron bergerak dengan mudah melaluinya. Contohnya, logam seperti tembaga dan perak terdiri dari atom-atom yang tidak terlalu kuat mengikat elektron-elektronnya. Akibatnya, elektron dapat bergerak dengan bebas melalui material tersebut. Isolator merupakan bahan yang tidak dapat menghantarkan listrik. Dalam isolator, elektron tidak dapat bergerak bebas melalui materialnya. Semikonduktor adalah material dengan kemampuan menghantarkan listrik yang berada di antara konduktor dan isolator. Elektron pada lapisan terluar semikonduktor terikat cukup kuat oleh gaya inti atom, meskipun tidak sekuat pada isolator (Ngara, 2023).

Resistansi suatu material dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti panjang, luas penampang, jenis material, dan suhu. Pada material nonohmik, arus tidak berbanding lurus dengan tegangan, sehingga resistansinya bergantung pada arus dan dapat dijelaskan melalui persamaan (2.1).

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Resistansi sebuah kawat penghantar berbanding lurus dengan panjang kawat (L) dan berbanding terbalik dengan luas penampang lintangnya (A), seperti yang dinyatakan dalam persamaan (2.2).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.2)$$

Dengan ρ merupakan resistivitas material penghantar yang dinyatakan dalam satuan ohm meter ($\Omega \cdot m$). Resistivitas listrik menunjukkan sejauh mana material tersebut menghambat arus listrik. Resistivitas merupakan sifat suatu material untuk

menghambat aliran elektron yang dapat menghasilkan panas. Setiap material memiliki nilai resistivitas yang berbeda-beda. Konduktivitas listrik merupakan kebalikan dari resistivitas listrik (Muskhir dan Latif, 2021). Sebaliknya, konduktivitas σ yang dinyatakan dalam (S/m) adalah kebalikan dari resistivitas. Nilai konduktivitas material bergantung dari sifat material tersebut. Konduktivitas listrik menggambarkan kemampuan suatu material dalam menghantarkan arus listrik. Semakin tinggi nilai konduktivitas listrik suatu material, semakin tinggi kemampuan material tersebut untuk menghantarkan Listrik. Persamaan konduktivitas listrik dapat dilihat pada persamaan (2.3) dan (2.4).

$$R = \frac{L}{\sigma A} \quad (2.3)$$

$$\sigma = \frac{L}{RA} \quad (2.4)$$

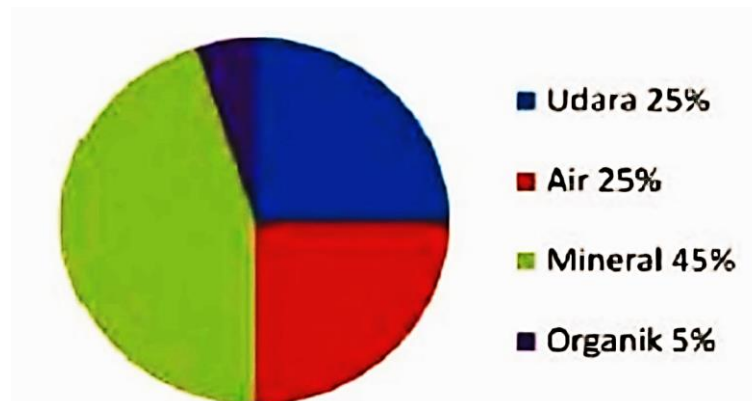
Sehingga hubungan antara resistivitas dan konduktivitas dapat didefinisikan pada persamaan (2.5)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.5)$$

(Ngara, 2023).

2.2.2. Tanah

Tanah adalah bagian dari permukaan bumi yang terbentuk melalui transformasi zat mineral dan organik. Komponen-komponen penyusun tanah terdiri dari mineral, bahan organik, air serta udara, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5**. Tanah tersusun atas tiga fase, yaitu fase padat, fase cair, dan fase gas. Fase cair berada di dalam pori-pori tanah, sedangkan fase padat terdiri dari mineral dan juga bahan organik (Yunus *et al.*, 2024).



Gambar 2.5 Komposisi penyusun tanah secara umum (Yunus *et al.*, 2024)

Tanah tidak harus memiliki horizon genetik yang jelas, meskipun keberadaan dan sifat horizon genetik sangat penting dalam proses klasifikasi tanah. Tanaman dapat ditanam di rumah kaca menggunakan pot yang diisi dengan material seperti gambut atau pasir, bahkan di air sekalipun. Dalam kondisi tertentu, media ini dapat menjadi produktif untuk tanaman. Namun, bahan-bahan tersebut dianggap sebagai bukan-tanah (*nonsoil*) karena tidak dapat diklasifikasikan dalam sistem yang sama seperti tanah di wilayah survei, baik di tingkat kabupaten, provinsi, maupun negara. Tumbuhan juga dapat tumbuh di pohon atau di celah batuan yang terpapar (singkapan batuan), tetapi pohon dan singkapan batuan tidak termasuk dalam definisi tanah.

Tanah tidak selalu terbentuk dari batuan padat, melainkan juga dapat berasal dari bahan lunak seperti material aluvial, marin, vulkanik, dan lainnya. Tanah menutupi permukaan bumi sebagai suatu rangkaian yang berkelanjutan (kontinum), kecuali pada area dengan batuan terbuka, daerah dengan lapisan es abadi, pada perairan dalam, atau gletser yang tidak subur. Ketebalan tanah biasanya ditentukan oleh kedalaman akar tumbuhan, yang dapat berkisar dari beberapa sentimeter hingga puluhan meter (Rayes, 2017).

Tanah memiliki empat fungsi utama bagi tanaman, yaitu sebagai media tumbuh, penyedia air dan unsur hara, penyedia udara untuk akar dan mikroorganisme tanah, serta habitat bagi mikroba tanah. Tanah hanya dapat menjalankan fungsi-fungsi tersebut secara optimal jika kualitasnya dalam kondisi baik. Kualitas tanah mengacu pada kapasitas tanah untuk mendukung produktivitas tanaman, menjaga

ketersediaan air, dan mendukung aktivitas manusia. Kondisi tanah yang ideal bagi tanaman umumnya memiliki tekstur lempung, struktur yang gembur, pH netral (tidak masam), dan kandungan bahan organik yang tinggi. Tanah dengan kualitas ini memiliki banyak pori yang dapat menyimpan air dan udara, yang sangat penting bagi pertumbuhan akar tanaman. Kondisi ini juga membantu menjaga suhu tanah tetap stabil serta mendukung aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam pelapukan bahan organik. Sebaliknya, tanah yang padat dengan partikel kecil cenderung menjadi liat saat basah, menggumpal, dan menggenang air, yang menghambat sirkulasi udara. Ketika kering, tanah semacam ini akan retak dan memutus sistem perakaran tanaman (Alqamari *et al.*, 2022).

2.2.3. Konduktivitas Listrik Tanah

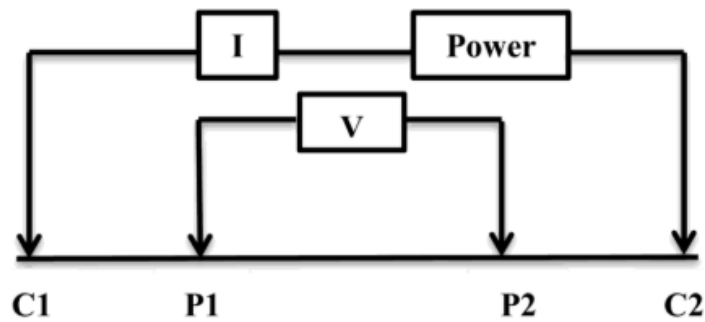
Konduktivitas listrik tanah (*soil electrical conductivity* atau EC) adalah kemampuan tanah untuk menghantarkan arus listrik, yang ditentukan oleh konsentrasi ion-ion terlarut dalam larutan tanah seperti natrium (Na^+), kalium (K^+), kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), klorida (Cl^-), sulfat (SO_4^{2-}), dan nitrat (NO_3^-). EC digunakan sebagai indikator untuk menilai kesuburan tanah, tingkat salinitas, dan kelembaban tanah. Nilainya dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, termasuk tekstur tanah, kadar air, konsentrasi garam terlarut, dan suhu tanah. Tekstur tanah memengaruhi porositas dan kapasitas retensi air, sementara kadar air menentukan jumlah ion terlarut yang tersedia untuk menghantarkan listrik. Konsentrasi garam merupakan pengaruh utama terhadap EC, di mana nilai yang tinggi menandakan salinitas yang tinggi, sedangkan suhu memengaruhi mobilitas ion dalam larutan. Meskipun tidak mengukur ion atau senyawa garam spesifik secara langsung, parameter EC mampu menggambarkan korelasi dengan konsentrasi berbagai ion terhadap produktivitas tanah, ketersediaan nutrisi, aktivitas mikroorganisme, dan pada akhirnya hasil panen (Widiasmadi, 2023).

Konduktivitas adalah sifat intrinsik dari material, sama seperti sifat material lainnya seperti densitas atau porositas. Kegunaan konduktivitas tanah berasal dari fakta bahwa pasir memiliki konduktivitas rendah, lumpur memiliki konduktivitas sedang, lempung memiliki konduktivitas tinggi, dan tanah salin merupakan yang paling konduktif. Oleh karena itu, konduktivitas berkorelasi kuat dengan ukuran butir dan

tekstur tanah. Lempung lebih konduktif sebagian karena menyimpan lebih banyak kelembaban dan juga karena memiliki luas permukaan yang lebih besar, yang memberikan kontak antar partikel lebih banyak dibandingkan tanah berbutir kasar. Ketika terdapat jumlah garam terlarut yang signifikan dalam tanah, baik di dalam air pori maupun dalam lapisan air yang mengelilingi partikel tanah, tingkat konduktivitas listrik meningkat (Logsdon *et al.*, 2008). Konduktivitas listrik sering digunakan untuk mengevaluasi kondisi tanah, termasuk tingkat salinitas, kelembaban, dan kandungan bahan organik. Nilai ini juga penting dalam memahami karakteristik fisik tanah yang berkaitan dengan aktivitas pertanian dan lingkungan.

2.2.4. Teknik Geolistrik

Teknik geolistrik merupakan salah satu pendekatan geofisika yang umum diterapkan dalam penelitian subsurface seperti eksplorasi air tanah, penentuan kedalaman lapisan batuan, pencarian mata air, identifikasi zona longsor, survei awal penambangan, dan eksplorasi mineral lainnya. Implementasi teknik geolistrik memiliki banyak kegunaan dalam survei subsurface untuk berbagai keperluan seperti hidrogeologi, mitigasi bencana, dan arkeologi (Susilo *et al.*, 2022). Teknik geolistrik memanfaatkan prinsip yang berkaitan dengan konduktivitas listrik tanah, tetapi lebih fokus pada pengukuran tahanan jenis (resistivitas) tanah yang merupakan kebalikan dari konduktivitas. Dalam metode ini, arus listrik diinjeksikan ke dalam tanah melalui dua elektroda arus (C1 dan C2), sementara beda potensial yang dihasilkan diukur dengan dua elektroda potensial (P1 dan P2) dapat dilihat pada **Gambar 2.6**. Resistivitas tanah dihitung berdasarkan hasil pengukuran ini dan digunakan untuk mengidentifikasi sifat-sifat fisik tanah, seperti struktur geologi dan keberadaan air tanah (Ismail, 2022).



Gambar 2.6 Pengukuran dengan metode geolistrik (Ismail, 2022)

Hubungan antara keduanya terlihat jelas karena nilai konduktivitas listrik tanah dapat diperkirakan dari resistivitas yang diukur menggunakan metode geolistrik. Spasi antar elektroda dalam pengukuran geolistrik menentukan kedalaman yang dicapai yakni semakin jauh jaraknya maka semakin dalam lapisan tanah yang dapat dianalisis. Dengan demikian, metode geolistrik tidak hanya berguna untuk memahami struktur bawah permukaan tetapi juga membantu memperkirakan konduktivitas tanah sebagai indikator sifat fisik dan kimia tanah.

Setiap material batuan memiliki sifat unik dalam mengalirkan arus listrik. Material heterogen berbeda dengan material homogen dalam karakteristik konduktivitasnya. Kondisi homogenitas batuan menjadi persyaratan penting dalam pengukuran geolistrik. Namun, sifat homogen pada batuan yang berdekatan dengan permukaan memerlukan perhatian khusus karena kondisi homogenitas akan mempengaruhi hasil pengukuran beda potensial listrik dalam metode geolistrik, yang dapat menyebabkan penyimpangan dari nilai sebenarnya.

Faktor yang menentukan ketidakseragaman lapisan batuan disebabkan oleh keberadaan fragmen batuan lain yang bercampur secara tidak merata, seperti material anorganik yang terkandung, genangan air di permukaan, banyaknya pagar dari bahan penghantar listrik yang baik, dan sebagainya. Terdapat berbagai konfigurasi dalam metode geolistrik yang berpengaruh pada perhitungan faktor koreksi geometri. Faktor koreksi geometri ini muncul karena pola perpindahan dan posisi elektroda potensial dan elektroda arus. Pada kondisi lapangan yang sebenarnya, kemiringan topografi sering ditemui, sehingga penempatan elektroda harus lebih teliti dengan menyejajarkan susunan elektroda. Dalam dunia geolistrik,

terdapat berbagai konfigurasi yang disesuaikan dengan kondisi lapangan berdasarkan topografi dan luas area, yang menentukan pilihan konfigurasi elektroda. Konfigurasi yang umum digunakan meliputi Wenner Alpha, Wenner Beta, Wenner Gamma, Schlumberger, Wenner-Schlumberger, Pole-Pole, Pole-Dipole, dan Dipole-Dipole (Vebrianto, 2016).

Setiap konfigurasi memiliki faktor koreksi geometri yang sama, namun pengukuran akan memiliki perbedaan saat pengukuran. Nilai faktor koreksi geometri mengikuti pola distribusi elektroda. Berdasarkan cara pengambilan dan penataan elektroda serta hubungannya dengan kondisi bawah permukaan, faktor koreksi geometri pada elektroda potensial ganda secara umum memenuhi Persamaan 2.6:

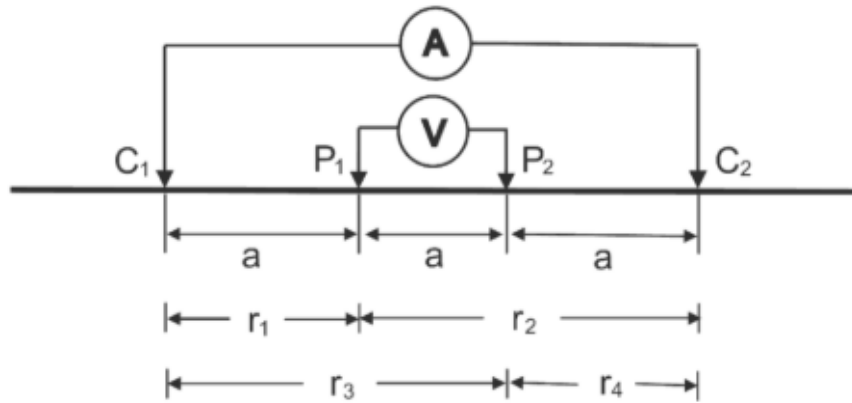
$$K = 2\pi \left[\left(\frac{1}{r_{C_1P_1}} - \frac{1}{r_{C_2P_1}} \right) - \left(\frac{1}{r_{C_1P_2}} - \frac{1}{r_{C_2P_2}} \right) \right]^{-1} \quad (2.6)$$

(Loke, 2001).

Dengan K adalah faktor koreksi geometri, 2π adalah konstanta, $r_{C_1P_1}$ adalah jarak antara elektroda arus pertama (C_1) dengan elektroda potensial pertama (P_1), $r_{C_2P_1}$ adalah jarak antara elektroda arus kedua (C_2) dengan elektroda potensial pertama (P_1), $r_{C_1P_2}$ adalah jarak antara elektroda arus pertama (C_1) dengan elektroda potensial kedua (P_2), dan $r_{C_2P_2}$ adalah jarak antara elektroda arus kedua (C_2) dengan elektroda potensial kedua (P_2) (Syukri, 2025).

2.2.5. Metode 4 Point *Probe* Konfigurasi Wenner

Dalam susunan konfigurasi Wenner, keempat elektroda ditempatkan dengan jarak yang sama dalam satu garis lurus. Jarak antara elektroda pertama dengan elektroda keempat ($r_1 = r_4$) sama dengan nilai a , sedangkan jarak antara elektroda kedua dan ketiga ($r_2 = r_3$) adalah $2a$, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2.7 Susunan Elektroda Konfigurasi Wenner (Vebrianto, 2016)

Berdasarkan **Gambar 2.7**, dapat diperoleh untuk setiap nilai r yaitu $r_1 = a$, $r_2 = 2a$, $r_3 = 2a$ dan $r_4 = a$. Sehingga faktor koreksi geometri untuk konfigurasi Wenner ini menjadi:

$$K = 2\pi \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right]^{-1} \quad (2.7)$$

$$K = 2\pi \frac{2a}{2} \quad (2.8)$$

$$K = 2\pi a \quad (2.9)$$

(Vebrianto, 2016).

Menggunakan perhitungan ini, resistivitas semu selanjutnya akan dapat dihitung menggunakan persamaan 2.11 dan persamaan 2.12.

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} \right) - \left(\frac{1}{r_{C1P2}} - \frac{1}{r_{C2P2}} \right) \quad (2.10)$$

$$\rho = 2\pi a \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad (2.11)$$

$$\rho = K \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad (2.12)$$

(Ismail, 2022).

Dengan ΔV merupakan beda potensial terukur yang dinyatakan dalam satuan (V), I merupakan arus yang diinjeksikan dan dinyatakan dalam satuan ampere (A) serta a merupakan jarak elektroda yang dinyatakan dalam satuan meter (m). Meski konfigurasi Wenner memiliki faktor geometri yang relatif mudah dipahami, penerapannya di lapangan terbilang kompleks (Susilo *et al.*, 2022). Keunggulan

utama dari metode ini adalah kemampuannya menghasilkan pengukuran beda potensial yang lebih baik pada elektroda P_1P_2 dengan angka yang relatif besar karena posisinya yang dekat dengan elektroda C_1C_2 . Selain itu, ketika menggunakan set elektroda yang tidak identik, pengaturan susunan elektroda dalam konfigurasi Wenner merupakan satu-satunya cara untuk memastikan nilai resistivitas semu optimal pada setiap jarak elektroda, terutama untuk keperluan pengukuran dangkal. Meskipun demikian, konfigurasi Wenner ini memiliki kelemahan yaitu tidak mampu mendeteksi homogenitas batuan pada pengukuran dangkal di dekat permukaan, yang selanjutnya dapat mempengaruhi akurasi hasil perhitungan (Syukri, 2025).

Pada konfigurasi Wenner, ukuran spasi antar elektroda sangat mempengaruhi kedalaman investigasi yang dapat dicapai. Ketika menggunakan peralatan dengan sensitivitas tinggi dan kemampuan menghasilkan arus besar, kedalaman pengukuran yang dapat dijangkau semakin meningkat. Dalam pengukuran 2D menggunakan metode Wenner, terdapat hubungan langsung antara jarak elektroda dengan kedalaman lapisan yang terdeteksi maka semakin lebar jarak antar elektroda, semakin dalam lapisan yang dapat diidentifikasi. Pemilihan jarak antar elektroda pada konfigurasi Wenner harus disesuaikan dengan target kedalaman investigasi yang diinginkan. Kelebihan konfigurasi ini adalah kemampuannya mendeteksi variasi lokal di area pengamatan, karena memiliki karakteristik dimana setiap perubahan jarak elektroda arus akan disertai dengan perubahan proporsional pada jarak elektroda potensial. Hal ini menjadikan konfigurasi Wenner sangat efektif dalam upaya mengidentifikasi variasi kondisi bawah permukaan yang bersifat lokal (Ismail, 2022).

2.2.6. Unsur Hara

Unsur hara adalah zat yang sangat penting bagi tanaman untuk hidup, tumbuh, dan menyelesaikan siklus hidupnya. Zat ini dibutuhkan dalam jumlah yang cukup untuk mendukung pertumbuhan optimal tanaman (Alridiwirsyah *et al.*, 2022). Tanaman menyerap unsur hara dari tanah untuk memenuhi kebutuhan fisiologisnya, seperti membentuk struktur sel, mengatur tekanan osmotik dan turgor sel (ketegangan sel akibat cairan dalam vakuola), mendukung reaksi transfer energi, bertindak sebagai

katalis reaksi, serta mendukung proses reproduksi. Namun, proses penyerapan ini menyebabkan kandungan unsur hara di tanah berkurang, sehingga perlu ditambahkan kembali melalui pupuk. Pupuk yang digunakan bisa berupa pupuk organik, seperti pupuk kandang, kompos, dan humus, atau pupuk kimia. Kandungan unsur hara makro dalam tanah bervariasi, tergantung pada jenis tanah dan lokasi geografisnya, yang membuat manajemen pemupukan menjadi penting untuk mempertahankan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman (Basuki *et al.*, 2023).

Setidaknya terdapat 60 jenis unsur hara yang diperlukan untuk mendukung pertumbuhan tanaman, dan 16 di antaranya merupakan unsur hara esensial yang sangat penting bagi tanaman. Kekurangan unsur hara ini dapat menghambat pertumbuhan tanaman, memicu timbulnya penyakit, bahkan berujung pada kematian tanaman. Dari 16 unsur esensial tersebut, tiga di antaranya Karbon (C), Hidrogen (H), dan Oksigen (O₂) umumnya tidak menjadi masalah karena tersedia melimpah di alam. Unsur-unsur ini dapat diperoleh secara langsung dari udara. Sementara itu, kebutuhan air tanaman dapat dipenuhi melalui air tanah maupun penyiraman (Pranata, 2010). Unsur hara dibedakan menjadi unsur hara esensial dan unsur hara non-esensial atau fungsional yang ditunjukkan pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2.8 Penggolongan unsur hara (Satar, 2024)

Unsur hara esensial adalah unsur-unsur yang sangat penting bagi tanaman untuk menyelesaikan siklus hidupnya dan tidak dapat digantikan oleh unsur lain. Tiga kriteria agar suatu unsur disebut esensial yakni diperlukan untuk menyelesaikan siklus hidup tanaman secara normal, memiliki peran penting dalam proses biokimia

tertentu yang tidak dapat digantikan secara keseluruhan oleh unsur lain, serta berperan secara langsung maupun tidak langsung dalam proses biokimia suatu tanaman (Satar, 2024). Unsur hara esensial terbagi menjadi dua kategori, yaitu unsur hara makro dan mikro. Unsur hara makro, seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan sulfur (S), dibutuhkan tanaman dalam jumlah besar untuk mendukung pembentukan jaringan, pertumbuhan, dan fungsi metabolisme utama. Sementara itu, unsur hara mikro, termasuk molibdenum (Mo), tembaga (Cu), seng (Zn), mangan (Mn), besi (Fe), boron (Bo), dan klorin (Cl), hanya diperlukan dalam jumlah kecil tetapi tetap penting untuk berbagai proses fisiologis dan metabolisme tanaman (Waidah dan Achmad, 2020).

Unsur hara non-esensial atau fungsional adalah unsur yang diperlukan tanaman untuk aktivitas hidupnya, namun tanaman masih dapat hidup normal tanpa adanya unsur hara ini. Unsur hara non-esensial ini tidak wajib ada untuk semua jenis tanaman, tetapi kehadirannya dapat memberikan manfaat tambahan bagi pertumbuhan, efisiensi metabolisme, dan ketahanan tanaman terhadap berbagai stres lingkungan. Contohnya adalah natrium (Na) yang membantu dalam metabolisme karbon pada tanaman tertentu, silikon (Si) yang memperkuat dinding sel sehingga meningkatkan ketahanan terhadap serangan patogen dan stres abiotik dan kobalt (Co), yang mendukung proses fiksasi nitrogen pada tanaman leguminosa. Unsur lain seperti nikel (Ni) diperlukan dalam aktivitas enzim urease, sementara aluminium (Al) dalam jumlah kecil dapat meningkatkan pertumbuhan akar. Meskipun tidak esensial, unsur-unsur ini sering dimanfaatkan dalam budidaya untuk meningkatkan produktivitas dan daya tahan tanaman dalam kondisi yang kurang ideal (Satar, 2024).

Unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman dan bentuk tersedianya atau kandungannya dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Unsur hara yang dibutuhkan tanaman dan kandungannya

Elemen	Simbol Kimia	Bentuk Ion yang Diserap Tanaman	Kandungan ($\mu\text{g/g}$ berat kering pada tanaman)
<i>Unsur Hara Makro</i>			
Nitrogen	N	NH_4^+ , NO_3^-	15.000
Kalium	K	K^+	10.000
Kalsium	Ca	Ca^{2+}	5.000
Magnesium	Mg	Mg^{2+}	2.000
Fosfor	P	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}	2.000
Sulfur	S	SO_4^{2-}	1.000
<i>Unsur Hara Mikro</i>			
Zat Besi	Fe	Fe^{3+} , Fe^{2+}	100
Mangan	Mn	Mn^{2+}	50
Seng	Zn	Zn^{2+}	20
Tembaga	Cu	Cu^{2+}	6
Molibdenum	Mo	MoO_4^{2-}	0,1
Klorin	Cl	Cl^-	100
Boron	B	H_3BO_3	20

Sumber: Nugroho *et al.*, (2023)

2.2.7. Unsur Hara Nitrogen

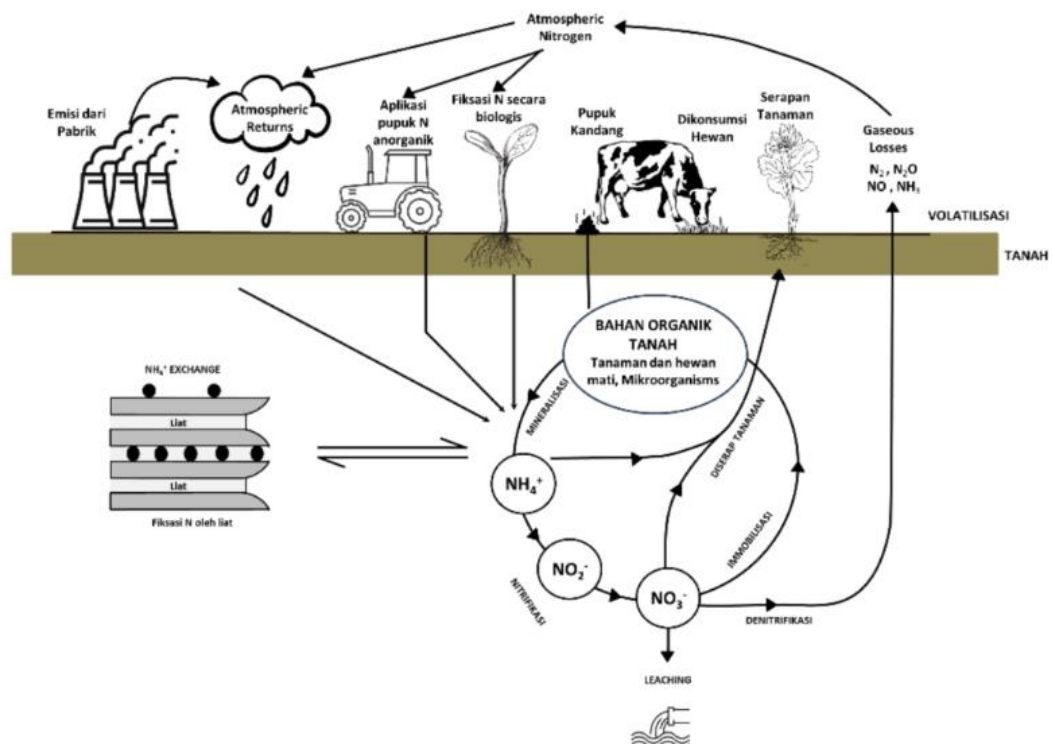
Nitrogen (N) adalah unsur penting dalam tanah yang mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Sebagai komponen utama asam amino, protein, asam nukleat, dan klorofil yang esensial untuk fotosintesis, nitrogen berperan besar dalam proses metabolisme tanaman. Meskipun nitrogen melimpah dalam bentuk gas di atmosfer bumi, tanaman tidak dapat menyerap nitrogen bebas tersebut secara langsung. Oleh karena itu, tanaman memerlukan pupuk yang mengandung nitrogen, baik pupuk majemuk (seperti Urea) atau pupuk organik, yang ditambahkan ke dalam tanah agar dapat diserap oleh akar tanaman (Nurhidayah, 2023).

Nitrogen masuk ke tanaman terutama melalui akar, dan cadangan nitrogen terlarut terakumulasi dalam tanaman. Komposisi nitrogen terlarut ini bervariasi antar spesies, dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti panjang hari, waktu dalam sehari, suhu malam, kekurangan hara, dan ketidakseimbangan nutrisi (Nihayati, 2023). Di dalam tanah, nitrogen tersedia dalam bentuk nitrat (NO_3^-) dan ammonium (NH_4^+), yang sangat dibutuhkan untuk pembentukan senyawa penting seperti asam amino

dan asam nitrat. Senyawa-senyawa ini mendukung pertumbuhan tanaman dan keberlanjutan hidupnya. Namun, ketersediaan nitrogen sering kali terbatas akibat pencucian atau volatilitas, yang dapat menyebabkan kekurangan nitrogen pada tanaman. Kekurangan nitrogen pada tanaman mengarah pada gejala seperti pertumbuhan terhambat dan daun yang menguning. Sebaliknya, kelebihan nitrogen dapat memicu pertumbuhan vegetatif berlebihan dan meningkatkan kerentanan terhadap hama (Tando, 2019).

Siklus nitrogen (N) di dalam tanah merupakan bagian penting dari berbagai reaksi nitrogen dalam ekosistem. Perilaku nitrogen dikendalikan oleh reaksi biokimia dan kimia yang dipengaruhi oleh faktor fisik serta biogeokimia tanah. Aktivitas manusia, seperti kegiatan industri dan pertanian, turut memengaruhi karakteristik siklus nitrogen secara global. Siklus nitrogen secara umum digambarkan pada **Gambar 2.9**, yang menunjukkan berbagai sumber nitrogen yang masuk ke tanah dan bermanfaat bagi tanaman. Untuk mempermudah pemahaman, siklus nitrogen dikelompokkan menjadi tiga kategori utama yakni penambahan, transformasi, dan kehilangan.

1. **Penambahan nitrogen ke tanah** dapat berasal dari berbagai sumber, seperti aplikasi pupuk anorganik dan organik, kotoran hewan, sisa tanaman, fiksasi nitrogen, serta presipitasi nitrogen oksida (NO) yang dihasilkan dari emisi industri dan bertemu dengan air hujan.
2. **Transformasi nitrogen** mencakup perubahan bentuk nitrogen dalam tanah melalui proses seperti mineralisasi, imobilisasi, amonifikasi, dan nitrifikasi.
3. **Kehilangan nitrogen** terjadi ketika nitrogen keluar dari zona perakaran tanaman, sehingga tidak lagi tersedia untuk tanaman. Kehilangan ini dapat disebabkan oleh pencucian (leaching), denitrifikasi, volatilisasi, atau serapan oleh tanaman. Selain itu, pengangkatan unsur hara melalui hasil panen tanpa mengembalikan sisa tanaman ke tanah juga dianggap sebagai kehilangan nitrogen (Nugroho et al., 2023).



Gambar 2.9 Siklus hara Nitrogen (Nugroho *et al.*, 2023)

2.2.8. Unsur Hara Fosfor

Fosfor tergolong sebagai unsur hara makro yang memiliki peran fundamental dalam pertumbuhan dan kehidupan tanaman. Sebagai nutrisi utama, zat ini memiliki kontribusi penting dalam serangkaian proses biologis tanaman, terutama dalam fotosintesis, metabolisme karbohidrat, dan berbagai mekanisme perpindahan energi. Keberadaannya sangat krusial, khususnya dalam bentuk gula fosfat yang berperan aktif dalam fase gelap fotosintesis. Selain itu, fosfor juga memainkan fungsi esensial dalam proses respirasi dan berbagai aktivitas metabolisme lainnya, sehingga menjadi komponen vital yang mendukung kelangsungan hidup dan perkembangan tanaman secara menyeluruh. Melalui keterlibatannya dalam reaksi-reaksi biokimia, fosfor memungkinkan tanaman untuk mentransformasi dan mendistribusikan energi dengan efisien, yang berpengaruh langsung terhadap pertumbuhan, produktivitas, dan kesehatan tanaman (Mutakin, 2023).

Fosfor (P) dalam tanah hadir dalam berbagai bentuk, yang secara praktis dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori utama yakni P-larut, P-aktif, dan P-terikat.

1. **P-larut**

Merupakan bagian terkecil dengan kandungan hanya beberapa ppm dalam tanah, 27 bagian besar berbentuk ortofosfat, meskipun mungkin juga mengandung sedikit P-organik. Tanaman hanya dapat menyerap P dalam bentuk ortofosfat ini. P-larut penting karena menjadi sumber utama fosfor yang tersedia bagi tanaman serta satu-satunya bentuk P dengan mobilitas terbatas dalam tanah. Selama musim tanam, tanaman dapat menghabiskan P-larut dengan cepat kecuali jika pasokannya terus-menerus diperbarui. Mobilitas P-larut biasanya hanya berada sekitar beberapa inci dari akar tanaman (Nopriani *et al.*, 2021).

2. **P-aktif**

Merupakan P dalam bentuk padatan yang dapat dengan mudah melepaskan fosfat menjadi P-larut. Saat akar menyerap fosfat, konsentrasi fosfat dalam larutan tanah menurun, sehingga P-aktif akan mengisi ulang P-larut tersebut. Karena P-larut jumlahnya sangat sedikit, P-aktif menjadi sumber utama fosfor yang tersedia bagi tanaman. P-aktif mencakup fosfat anorganik yang terjerap pada partikel tanah, fosfat yang bereaksi dengan kalsium atau aluminium membentuk senyawa agak sulit larut, serta P-organik yang mudah mengalami mineralisasi. Perubahan jumlah fosfat dalam larutan tanah berbanding lurus dengan tingkat jerapan dan pelepasan fosfat dari P-aktif. Partikel tanah berperan penting, baik sebagai sumber maupun penyerap fosfat, tergantung pada kondisi lingkungan (Nopriani *et al.*, 2021).

3. **P-terikat**

Merupakan senyawa fosfat anorganik yang sangat sulit larut serta P-organik yang resisten terhadap mineralisasi oleh mikroorganisme tanah. Fosfat dalam bentuk ini dapat bertahan lama didalam tanah tanpa berubah menjadi P-tersedia bagi tanaman, sehingga dampaknya terhadap kesuburan tanah sangat kecil. Fosfat anorganik dalam P-terikat biasanya berada dalam struktur kristal yang jauh lebih sulit larut dibandingkan senyawa dalam P-aktif. Namun, proses konversi lambat antara P-terikat dan P-aktif masih dapat terjadi melalui reaksi sorpsi dan desorpsi (Nopriani *et al.*, 2021).

2.2.9. Unsur Hara Kalium

Kalium (K) adalah unsur hara primer esensial bagi tanaman yang diserap dalam jumlah besar, namun ketersediaannya sangat terbatas. Meskipun tanah mengandung kalium total antara 0,1%-3%, hampir 98% kalium terikat dalam mineral tanah sehingga tidak dapat diserap tanaman. Interaksi antara kalium dan mineral tanah menjadi faktor kunci yang menentukan ketersediaan unsur hara ini, mengapa pemberian pupuk kalium masih sangat diperlukan meskipun kandungan kalium total dalam tanah cukup tinggi (Nurhayati, 2021).

Kalium adalah unsur hara esensial ketiga setelah nitrogen (N) dan fosfor (P). Unsur ini memiliki valensi satu dan diserap oleh tanaman dalam bentuk ion K^+ . Kalium termasuk unsur yang bersifat mobil dalam tanaman, baik di dalam sel, jaringan tanaman, maupun dalam xilem dan floem. Meskipun kadar total kalium dalam tanah cukup tinggi, yaitu sekitar 2,06% dari berat tanah, kalium yang tersedia bagi tanaman biasanya rendah. Pemupukan nitrogen dan fosfor dalam jumlah besar dapat meningkatkan serapan kalium dari tanah (Mutmainna *et al.*, 2024).

Penyerapan kalium oleh tanaman dari larutan tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk tekstur tanah, kelembaban, suhu, pH, dan aerasi tanah. Karena sifatnya yang mudah bergerak di dalam tanah, kalium cenderung tercuci oleh air hujan dari zona perakaran, terutama pada tanah dengan kapasitas tukar kation rendah. Oleh karena itu, pemupukan kalium sangat diperlukan dalam kondisi ini (Mutmainna *et al.*, 2024).

Pemupukan kalium membantu menjenuhkan kompleks adsorpsi tanah sehingga tercipta keseimbangan dengan kalium dalam larutan tanah, yang menjadi sumber utama bagi tanaman. Jumlah kalium yang dapat diadsorpsi tanah bergantung pada tingkat kejenuhannya. Kalium yang diadsorpsi sebagian besar berada dalam keseimbangan dengan kalium di larutan tanah. Kekurangan kalium pada tanaman dapat menyebabkan gejala seperti batang yang lemah sehingga mudah roboh, daun yang menguning, penurunan produksi, pengurangan kadar karbohidrat, serta hilangnya rasa manis pada buah-buahan (Mutmainna *et al.*, 2024).

Kalium dalam bentuk pupuk mengandung 45% K_2O dan klorin, yang bersifat agak masam dan higroskopis. Namun, klorin dapat memberikan efek negatif pada tanaman yang tidak toleran, seperti kentang, wortel, dan tembakau. Berikut beberapa jenis pupuk kalium:

1. Kalium sulfat (K_2SO_4)

Pupuk ini dikenal sebagai ZK dengan kandungan K_2O sekitar 48-52%. Berbentuk tepung putih yang larut dalam air, pupuk ini bersifat sedikit mengasamkan tanah dan dapat digunakan sebagai pupuk dasar setelah tanam. Tanaman yang sensitif terhadap klorin, seperti tembakau, dianjurkan menggunakan pupuk ini (Mutmainna *et al.*, 2024).

2. Kalium nitrat (KNO_3)

Pupuk ini mengandung 13% nitrogen (N) dan 44% K_2O , berbentuk butiran putih yang tidak higroskopis dan bersifat netral (Mutmainna *et al.*, 2024).

2.2.10. Tanaman Tomat

Tomat adalah salah satu tanaman perdu yang termasuk dalam famili *Solanaceae*, atau dikenal juga sebagai suku terung-terungan. Tanaman ini memiliki hubungan kekerabatan yang dekat dengan kentang. Berikut adalah klasifikasi botani dari tanaman tomat:

- **Kingdom:** Plantae (tumbuhan)
- **Sub Kingdom:** Tracheobionta (tumbuhan berpembuluh)
- **Divisi:** Spermatophyta (tumbuhan berbunga)
- **Subdivisi:** Angiospermae (menghasilkan biji)
- **Kelas:** Dicotyledoneae (berkeping dua/dikotil)
- **Ordo:** Tubiflora
- **Famili:** Solanaceae (suku terung-terungan)
- **Genus:** *Lycopersicon*
- **Spesies:** *Lycopersicon esculentum* Mill (Lubis, 2020)



Gambar 2.10 Tomat (Lubis, 2020)

Tomat (dapat dilihat pada **Gambar 2.10**) merupakan salah satu jenis sayuran yang sudah dikenal luas oleh Masyarakat (Dasipah, 2023). Menurut Andrew F. Smith (2001) dalam bukunya "The Tomato in America: Early History, Culture and Cookery", tanaman ini diduga berasal dari wilayah dataran tinggi di pesisir barat Amerika Selatan. Setelah Spanyol menjajah kawasan tersebut, mereka mulai menyebarkan tomat ke koloni-koloni mereka di Karibia. Filipina menjadi salah satu pusat awal penyebaran tomat ke berbagai wilayah di Asia. Selain itu, Spanyol juga memperkenalkan tomat ke Eropa, di mana tanaman ini mudah tumbuh di daerah dengan iklim mediterania (Supriati dan Siregar, 2015).

Dalam budidaya tanaman tomat, benih yang digunakan merupakan benih unggul dari sumber terpercaya yang sesuai dengan varietas yang diinginkan. Benih tomat perlu disemai terlebih dahulu hingga menjadi bibit, karena benih baru memerlukan perlakuan khusus agar tumbuh optimal dengan batang dan daun yang kuat. Penyemaian sebaiknya dilakukan di media terpisah, menggunakan wadah yang terlindung dari hujan dan sinar matahari langsung. Media semai dapat berupa bedengan, rak semai, atau polybag, dengan jenis media yang sesuai untuk tanaman hortikultura (Adelyna, 2021). Penyiraman dengan air bersih dan pemupukan memainkan peran kunci untuk pertumbuhan optimal (Wahyudi, 2012). Tanaman tomat membutuhkan penyiraman pada permukaan tanah disekeliling tanaman sebanyak dua kali sehari pada pagi dan sore, namun dengan catatan penting yakni

hindari genangan air yang dapat merusak sistem perakaran tanaman. Pada pagi hari, gunakan air dalam jumlah lebih sedikit, sementara penyiraman sore hari lebih kritis untuk menggantikan air yang hilang akibat penguapan dan memulihkan kondisi tanaman (Tri, 2023).

Pemupukan merupakan tahap penting untuk memastikan tanaman tumbuh subur dan menghasilkan buah melimpah, dengan pilihan pupuk NPK yang beragam seperti NPK 15-15-15, 16-16-16, 12-34-12, 8-24-24, dan 12-12-7 (Wiryanta, 2002). Metode pemberian pupuk dapat dilakukan melalui penaburan langsung atau kocoran, dengan rekomendasi menggunakan NPK 15:15:15 sebanyak 4-5 kg yang dilarutkan dalam 200 liter air, diaplikasikan 250 ml per rumpun tanaman secara rutin setiap minggu (Syukur *et al.*, 2015). Sebagai alternatif, pupuk organik seperti SP 36, ZA, dan KCl dengan perbandingan 1:1:½ dapat digunakan untuk mendukung fase pertumbuhan vegetatif tanaman (Iskandar *et al.*, 2022).

III. METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Desember 2024 sampai Mei 2025. Perancangan dan pembuatan alat serta pengambilan data dilakukan di Laboratorium Elektronika, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1. Alat penelitian

No	Nama	Fungsi
1	Voltmeter	Alat ukur tegangan
2	Amperemeter	Alat ukur arus
3	Timbangan	Penimbang massa sampel tanah dan pupuk
4	Gelas Ukur	Pengukur volume air untuk pelarutan pupuk
5	Kotak Pengukuran	Wadah tempat sampel tanah yang akan diukur
6	Resistor 2,2k Ω	Beban untuk menguji arus konstan
7	Catu Daya	Sumber tegangan untuk kalibrasi sistem pembacaan tegangan
8	Saringan	Penyaring tanah

Bahan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 3.2.**

Tabel 3.2. Bahan penelitian

No	Nama	Fungsi
1	Pupuk NPK (15-15-15, 16-16-16, 20-10-10)	Sampel pupuk dengan berbagai komposisi NPK untuk pengujian
2	Tanah homogen	Media sampel pengujian yang akan diberi perlakuan
3	Air	Pelarut untuk melarutkan pupuk NPK sebelum aplikasi ke tanah
4	Tanaman Tomat 3 buah	Sampel tanaman untuk pengujian
5	Wemos D1 Mini	Mikrokontroler untuk sistem
6	IC CD4047	Pembangkit gelombang untuk rangkaian arus konstan
7	Transistor IRF3205	MOSFET penguat daya
8	Resistor 10 Ω	Resistor pembatas arus gate pada transistor IRF3205 dan menstabilkan sinyal keluaran dari IC CD4047
9	Potensiometer 10k Ω	Resistor pengatur tegangan pada rangkaian arus konstan
10	Kapasitor keramik 681-2kV 2000V	Filter frekuensi tinggi
11	Kapasitor elco 250V 22 μ F	Filter tegangan
12	Trafo CT 1A	Transformator <i>step-up</i>
13	IC UA741	Op-amp penguat sinyal <i>non inverting</i>
14	Resistor 10k Ω	Resistor umpan balik pada rangkaian penguat <i>non inverting</i>
15	Resistor 1k Ω	Resistor <i>input</i> pada rangkaian penguat <i>non inverting</i>
16	Dioda <i>Bridge</i> 35A	Penyearah arus
17	<i>Power Switch</i>	Saklar rangkaian
18	<i>Probe</i> silinder tembaga	Elektroda pengukuran konduktivitas
19	<i>Box</i> PVC Plastik	Casing instrumen
20	LCD 2.4 ILI9341 TFT	<i>Display</i> hasil pengukuran
21	Baterai 18650 6800 mAh 6 buah	Sumber daya rangkaian
22	Baterai ABC 9V 2 buah	Sumber tegangan untuk op-amp
23	XL4015 DC-DC <i>Step Down</i>	Pengatur tegangan dan arus konstan untuk LCD
24	<i>PCB dot matrix double layer</i>	Papan rangkaian
25	<i>Pin header</i> dan <i>socket IC</i>	Konektor komponen
26	Kotak baterai 18650 3s	Wadah baterai

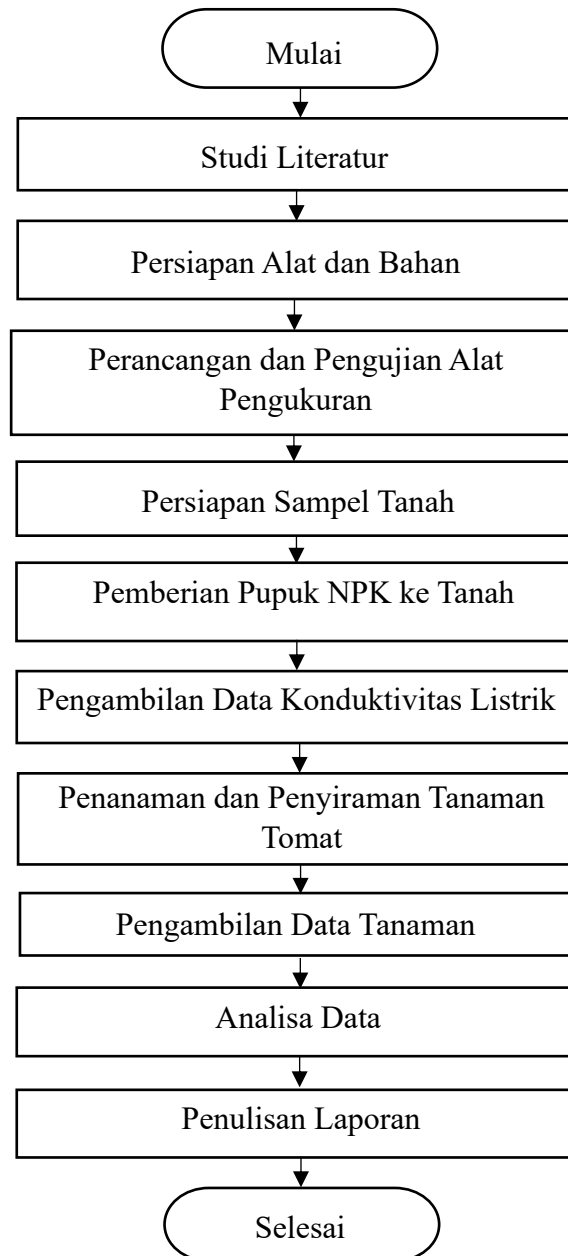
27	BMS <i>Charger</i> 18650 <i>typeC</i> 3S	Sistem manajemen baterai
28	<i>Socket banana</i> merah hitam	Soket konektor
29	<i>Jack banana</i> merah hitam	Konektor <i>probe</i>
30	Kabel <i>probe</i>	Kabel pengukuran penghubung instrumentasi pengukuran dengan <i>probe</i> tembaga
31	Resistor 30k Ω dan 7,5k Ω	Resistor pembagi tegangan pada rangkaian sistem pembacaan tegangan

3.3. Prosedur Penelitian

Sistem perangkat keras (hardware) terdiri dari 5 bagian rangkaian utama meliputi rangkaian sumber arus konstan, rangkaian penguatan sinyal, rangkaian *probe* 4-titik dengan elektroda tembaga, rangkaian sistem pembacaan tegangan serta rangkaian kontroler sebagai pengukur dan penyedia data. Semua komponen terintegrasi pada PCB untuk menghasilkan alat ukur konduktivitas listrik tanah yang portabel dan akurat.

Sistem perangkat lunak (software) terdiri dari perancangan program menggunakan mikrokontroler Wemos D1 Mini yang diprogram melalui Arduino IDE untuk akuisisi data, kalibrasi, perhitungan konduktivitas listrik, dan visualisasi hasil pengukuran pada LCD. Program dirancang untuk mengolah data pengukuran tegangan dari *probe* tanah, menghitung hambatan untuk kemudian menghasilkan nilai konduktivitas listrik.

Prosedur penelitian secara umum diperlihatkan dalam diagram alir penelitian pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

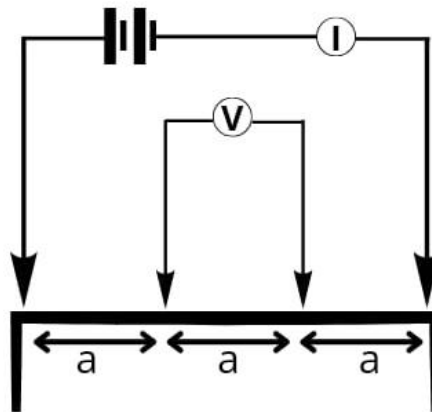
Guna mencapai tujuan penelitian, prosedur penelitian dijelaskan secara lebih rinci sebagai berikut.

3.3.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengetahui konsep-konsep dasar yang menunjang penelitian ini. literatur yang dikaji pada penelitian ini yaitu kadar hara pada tanah, tanaman tomat, pupuk NPK, dan metode pengukuran menggunakan konduktivitas Listrik pada tanah.

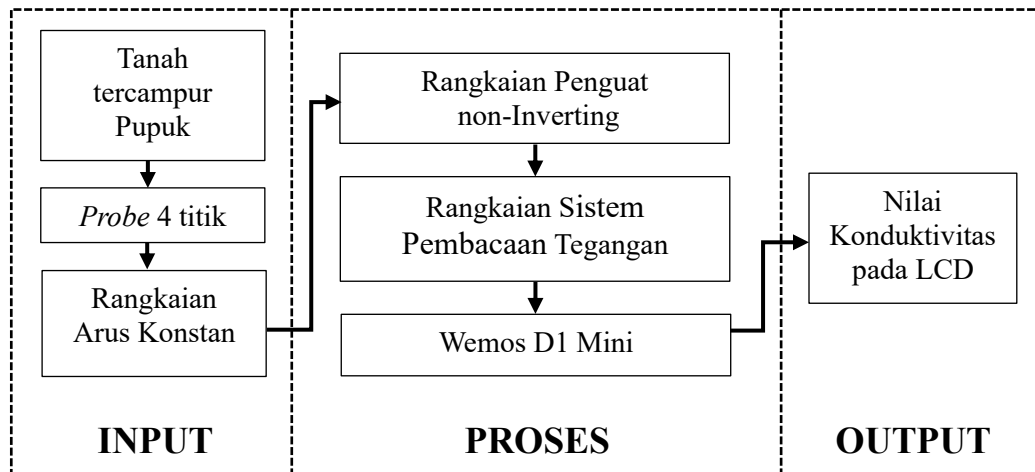
3.3.2. Perancangan Alat Pengukuran

Pada penelitian ini, dirancang sebuah sistem untuk mengukur konduktivitas listrik tanah yang mudah digunakan. Sistem ini terdiri dari beberapa bagian yang saling terhubung untuk menghasilkan alat ukur yang akurat. Alat ukur konduktivitas listrik tanah ini menggunakan metode 4-titik, di mana empat elektroda ditancapkan ke tanah dengan jarak yang sama. Dua elektroda di bagian luar mengalirkan arus listrik, sedangkan dua elektroda di bagian dalam mengukur tegangan yang timbul. Elektroda *probe* akan dirancang dengan gagang untuk memudahkan pengukuran yang ditancapkan pada tanah. Dari nilai arus dan tegangan ini, bisa dihitung konduktivitas listrik tanah yang turut merepresentasikan kadar hara dalam tanah seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Metode pengukuran

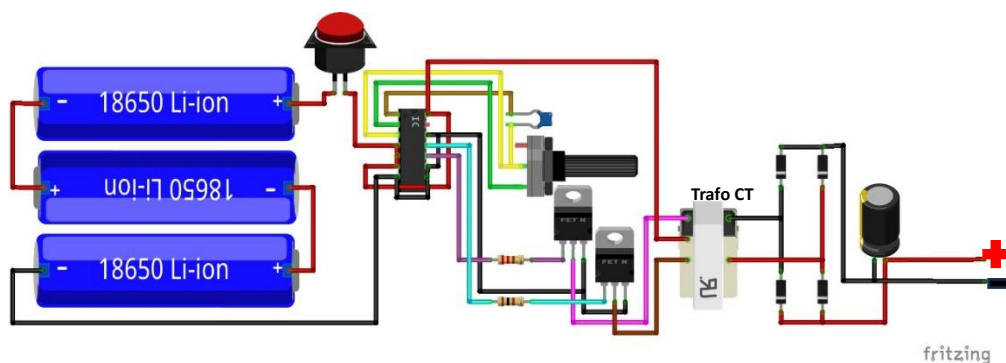
Untuk memahami cara kerja sistem secara keseluruhan, dibuat diagram blok yang menunjukkan komponen input, proses, dan output dari alat ukur. Bagian input terdiri dari *probe* dan sampel tanah yang diberi pupuk NPK yang terhubung dengan rangkaian elektronik untuk menghasilkan arus konstan. Bagian proses terdiri dari penguatan sinyal, pengukuran tegangan, dan mikrokontroler untuk membaca dan mengolah data. Bagian output berupa layar LCD yang menampilkan hasil pengukuran. Diagram blok sistem pengukuran konduktivitas listrik tanah dapat dilihat pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Diagram blok penelitian

3.3.2.1. Perancangan Sumber Arus Konstan

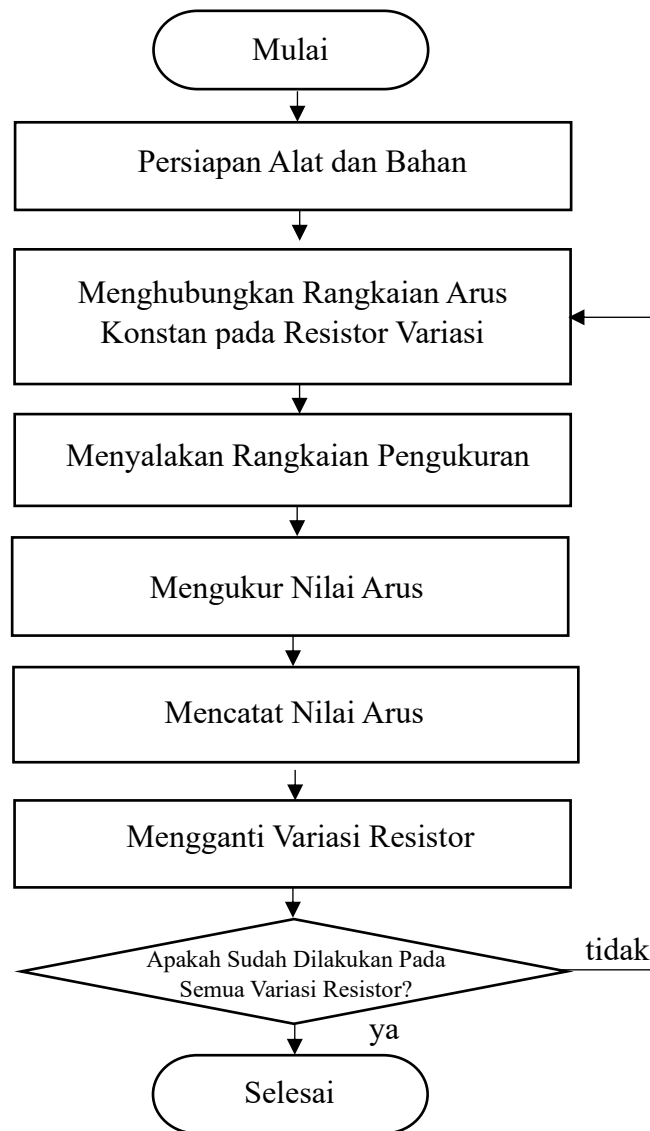
Pada penelitian ini, digunakan sumber tegangan searah namun arus listrik yang dialirkan pada sampel harus bernilai konstan, sehingga untuk menjaga arus yang dialirkan tetap konstan maka digunakan rangkaian menggunakan sumber arus konstan yang menggunakan Baterai 18650 3S (12V), IC CD4047, transistor IRF3205, Resistor 10Ω , Resistor variabel $10k\Omega$, kapasitor elco 250V 22 μ F, kapasitor keramik 681-2kV 2000V, dioda bridge 35A dan trafo CT 1 Ampere seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.4**.



Gambar 3.4 Rangkaian sumber arus konstan

Sebelum rangkaian sumber arus konstan digunakan pada sampel, terlebih dahulu dilakukan pengukuran menggunakan amperemeter supaya menguji kekonstanan arus dari rangkaian tersebut. Dalam proses kalibrasi, digunakan resistor tambahan sebagai pengganti beban uji yang dapat divariasikan nilainya untuk memperoleh hasil yang baik bahwa alat sudah siap digunakan. Variasi resistor yang digunakan

yakni $2,2\text{k}\Omega$, $4,4\text{k}\Omega$, $6,6\text{k}\Omega$, $8,8\text{k}\Omega$, $11\text{k}\Omega$, $13,2\text{k}\Omega$, $15,4\text{k}\Omega$, $17,6\text{k}\Omega$, $19,8\text{k}\Omega$, $22\text{k}\Omega$, $24,2\text{k}\Omega$, $26,4\text{k}\Omega$, $28,6\text{k}\Omega$, $30,8\text{k}\Omega$, $33\text{k}\Omega$, $35,2\text{k}\Omega$, $37,4\text{k}\Omega$, $39,6\text{k}\Omega$, $41,8\text{k}\Omega$, $44\text{k}\Omega$, $66\text{k}\Omega$, $88\text{k}\Omega$ dan $110\text{k}\Omega$. Proses perancangan dan pengujian rangkaian sumber arus konstan ditunjukkan dengan diagram alir yang ditunjukkan pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5 Diagram alir pengujian rangkaian sumber arus konstan

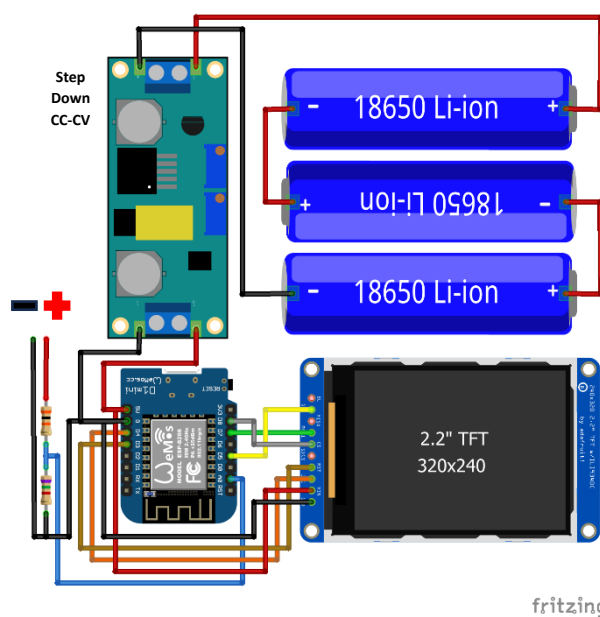
Untuk menampilkan dan menganalisis hasil pengujian kekonstanan arus pada berbagai nilai hambatan, maka desain tabel rancangan pengujiannya dapat dilihat pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3.3 Rancangan tabel data rangkaian arus konstan

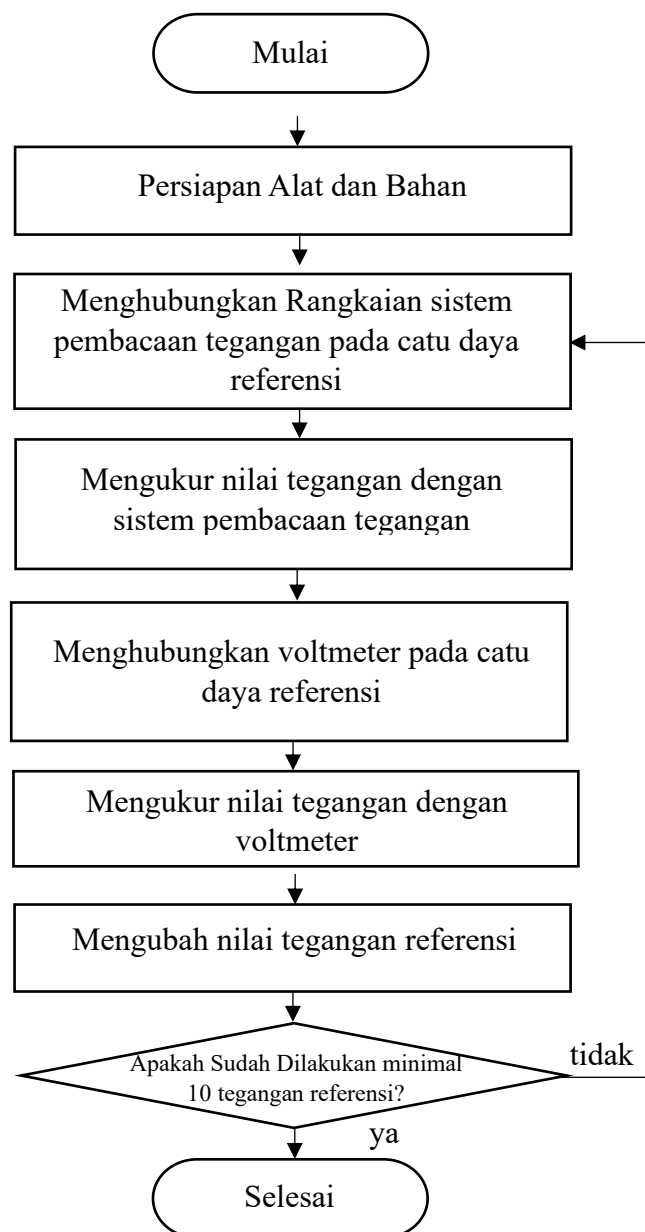
No	Hambatan ($k\Omega$)	Arus (mA)

3.3.2.2. Perancangan Sistem Pembacaan Tegangan

Untuk mengetahui beda potensial pada tanah yang dihasilkan dari aliran arus konstan, dibutuhkan sistem pembacaan tegangan yang terus membaca perubahan potensial tersebut. Pada penelitian ini sistem pembacaan tegangan dirancang menggunakan prinsip pembagi tegangan dengan resistor $30k\Omega$ dan $7,5k\Omega$ yang dirangkai seri. Titik pencabangan kedua resistor ini menghasilkan tegangan yang proporsional dengan beda potensial pada *probe* tanah. Sistem pembacaan tegangan ini dihubungkan ke input analog Wemos D1 Mini sebagai mikrokontroler untuk konversi analog ke digital dengan resolusi 10-bit. Data tegangan yang sudah didigitalisasi kemudian diolah menggunakan algoritma kalibrasi untuk mendapatkan nilai konduktivitas listrik tanah yang akurat. Hasil pengukuran ditampilkan secara real-time pada LCD TFT ILI9341 2.4" yang terhubung dengan Wemos D1 Mini melalui komunikasi SPI. Rangkaian sistem pembacaan tegangan ditunjukkan pada **Gambar 3.6**.

**Gambar 3.6** Rangkaian sistem pembacaan tegangan

Sebelum rangkaian sistem pembacaan tegangan digunakan, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi untuk menguji keefektifan dari rangkaian tersebut. Dalam proses kalibrasi, digunakan catu daya sebagai sumber tegangan referensi dan voltmeter sebagai kalibrator untuk membandingkan hasil bacaan tegangan sistem pembacaan tegangan dengan kalibrator. Proses perancangan dan kalibrasi rangkaian sistem pembacaan tegangan ditunjukkan dengan diagram alir yang ditunjukkan pada **Gambar 3.7**.



Gambar 3.7 Diagram alir kalibrasi sistem pembacaan tegangan

Analisis perbandingan antara nilai tegangan yang terbaca oleh mikrokontroler dengan nilai aktual yang terukur pada voltmeter perlu dilakukan guna memastikan keakuratan pengukuran sistem. Perbandingan ini bertujuan menentukan faktor koreksi yang akan digunakan dalam penghitungan konduktivitas listrik tanah. Perhitungan nilai error dan akurasi sistem menggunakan Persamaan (3.1) dan Persamaan (3.2).

$$Error (\%) = \left| \frac{X_n - Y}{Y} \right| \times 100\% \quad (3.1)$$

$$Akurasi = 100\% - Error \quad (3.2)$$

(Hadi *et al.*, 2022).

Nilai Y merupakan nilai referensi dan X adalah nilai hasil pengukuran. Hasil perbandingan pembacaan tegangan tersebut ditampilkan dan dianalisis menggunakan rancangan tabel sebagaimana terlihat pada **Tabel 3.4**.

Tabel 3.4 Rancangan tabel pengujian sistem pembacaan tegangan

No	Voltmeter (V)	Mikrokontroler (V)	Error (%)	Akurasi (%)
----	---------------	--------------------	-----------	-------------

Proses pengujian sistem pembacaan tegangan disempurnakan melalui analisis regresi linear guna memperoleh persamaan koreksi yang diimplementasikan ke dalam program mikrokontroler. Efektivitas persamaan koreksi divalidasi dengan membandingkan nilai tegangan terkoreksi dengan voltmeter sehingga memastikan sistem siap digunakan dalam pengukuran konduktivitas tanah. Hasil pengujian akurasi ditampilkan menggunakan rancangan pada **Tabel 3.5**.

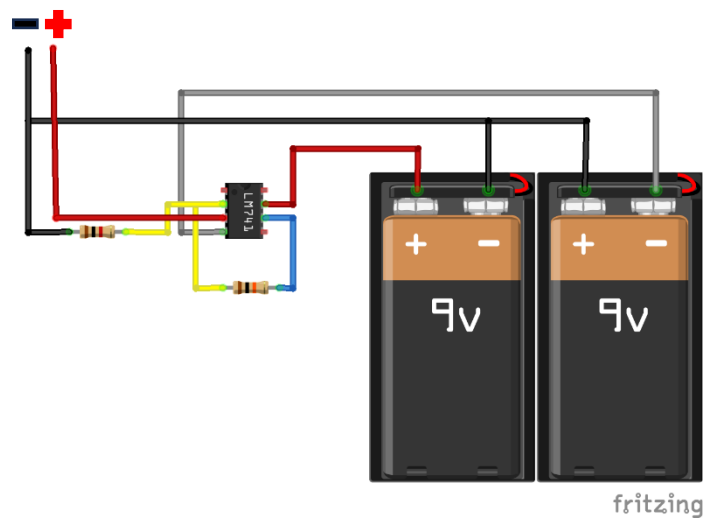
Tabel 3.5 Rancangan tabel data akurasi sistem pembacaan tegangan

No	Voltmeter (V)	Mikrokontroler (V)	Akurasi (%)	Error (%)
----	---------------	--------------------	-------------	-----------

Rata-rata

3.3.2.3. Perancangan Penguat *non-Inverting*

Untuk meningkatkan hasil pembacaan beda potensial pada tanah, dirancang rangkaian penguat *non-inverting* menggunakan IC op-amp UA741. Pada penelitian ini, penguat *non-inverting* diimplementasikan dengan resistor umpan balik $10\text{k}\Omega$ dan resistor input $1\text{k}\Omega$, menghasilkan penguatan sebesar 11 kali berdasarkan persamaan $V_{out} = (\frac{R_f}{R_g} + 1) V_{in}$. Sinyal beda potensial dari *probe* tanah yang relatif kecil, diterima melalui rangkaian penguat *non-inverting* yang menghasilkan output tegangan yang diperbesar, kemudian dibaca oleh sistem pembacaan tegangan. Catu daya rangkaian penguat menggunakan baterai 9V terpisah. Rangkaian penguat *non-inverting* ditunjukkan pada **Gambar 3.8**.



Gambar 3.8 Rangkaian penguat *non-inverting*

Untuk memastikan rangkaian penguat *non-inverting* berfungsi dengan baik dan memberikan penguatan sebesar 11 kali seperti yang diharapkan, perlu diperhatikan bahwa meskipun secara teoritis penguatan dapat mencapai 11 kali, namun tegangan output maksimal dibatasi oleh tegangan catu daya IC op-amp UA741 yang menggunakan baterai 9V. Hal ini mengakibatkan tegangan output tidak dapat melebihi 9V meskipun hasil penguatan secara perhitungan lebih besar. Pengujian ini akan memverifikasi linearitas dan akurasi rangkaian penguat dalam batas kerja yang ditentukan sebelum diintegrasikan ke dalam sistem pengukuran konduktivitas tanah. Untuk menampilkan dan menganalisis hasil pengujian rangkaian penguat *non-inverting*, maka desain tabel rancangannya dapat dilihat pada **Tabel 3.6**.

Tabel 3.6 Rancangan tabel data rangkaian penguat *non-inverting*

No	Tegangan Input (V)	Tegangan Output (V)	Gain Terukur	Gain Teoritis	Akurasi (%)	Error (%)
Rata-rata						

3.3.3. Persiapan Sampel Tanah

Persiapan sampel tanah dilakukan dengan mengambil tanah dari lokasi dan kedalaman yang sama (5-10 cm) sebanyak 1,5 kg per pot untuk menghindari perbedaan karakteristik tanah. Tanah disaring dari akar, batu, dan kotoran, kemudian dicampur merata untuk mendapatkan homogenitas. Selanjutnya tanah dicampur dengan pupuk dan dimasukkan ke dalam pot dengan volume yang sama untuk setiap perlakuan.

3.3.4. Penanaman dan Penyiraman Tanaman Tomat

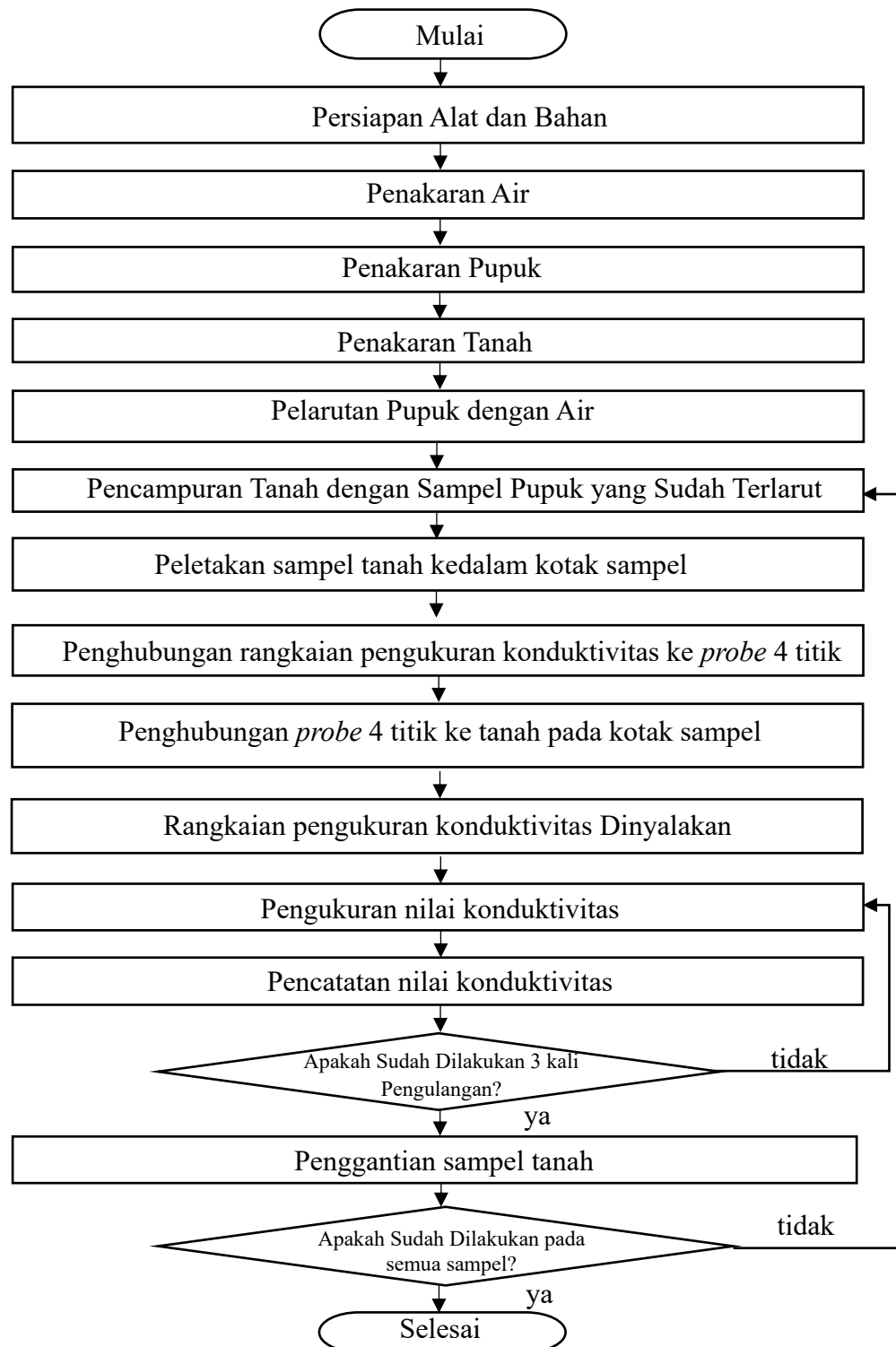
Prosedur penanaman tomat dimulai dengan pemilihan tanaman tomat unggul dari petani atau penyedia bibit tanaman, dan memilih tanaman tomat yang berumur 3-4 minggu. Penyiraman dilakukan dua kali sehari, pada pagi dan sore hari, dengan memperhatikan volume air yang sama setiap pot dan menjaga agar tidak menimbulkan genangan yang dapat merusak sistem perakaran. Pada pagi hari air yang digunakan dalam jumlah sedikit, sedangkan penyiraman sore hari lebih banyak untuk menggantikan air yang hilang akibat penguapan dan memulihkan kondisi tanaman.

3.3.5. Pemberian Pupuk NPK

Pemupukan menggunakan pupuk NPK dengan variasi formulasi seperti 15-15-15, 16-16-16 dan 10-20-20 dilakukan dengan ketentuan 6,25 gr yang dilarutkan dalam 62,5 ml dan diaplikasikan per pot tanaman. Takaran seharusnya adalah 25 gr per 1 liter air, namun diambil satu perempat takaran yakni 6,25 gr per 250 ml air. Akan tetapi, 250 ml air dapat menggenangi pada pot dengan tanah hanya 1,5 kg, sehingga air dikurangi menjadi 62,5 ml.

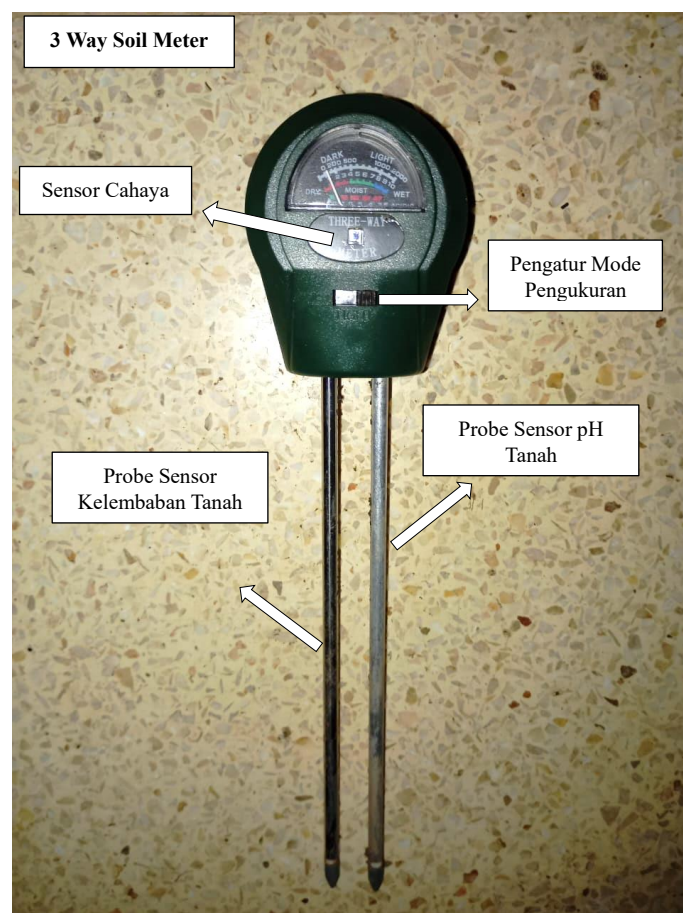
3.3.6. Perancangan Pengambilan Data Penelitian

Diagram alir proses pengambilan data penelitian ditunjukkan pada **Gambar 3.9**.



Gambar 3.9 Diagram alir pengambilan data penelitian

Selama proses pengambilan data, dilakukan pencatatan nilai konduktivitas listrik tanah pada sampel-sampel tanah yang diuji, serta ditambah dengan pengambilan data kelembaban serta pH tanah menggunakan alat ukur analog sebagai tambahan informasi. Selanjutnya pada pengukuran tanaman tomat meliputi parameter pertumbuhan tanaman tomat meliputi tinggi tanaman yang mengindikasikan pertumbuhan vertical serta jumlah daun sebagai indikator perkembangan vegetatif. Pertumbuhan dan perkembangan tanaman tomat selalu dipantau setiap harinya disertai pemantauan kelembaban dan pH tanah menggunakan alat ukur analog yang dapat dilihat pada **Gambar 3.10**.



Gambar 3.10 Alat ukur analog kelembaban dan pH tanah

Alat ukur pada **Gambar 3.10** merupakan alat ukur analog tanpa baterai atau sumber daya, yang dapat mengukur kelembaban tanah, pH dan cahaya. Namun yang diambil hanya kelembaban dan pH yang merupakan indikasi tambahan pada tanah pengukuran. Selain itu, untuk mengukur tinggi tanaman tomat digunakan alat ukur penggaris.

Untuk menampilkan dan menganalisis hasil pengukuran secara komprehensif, maka desain tabel rancangannya dapat dilihat pada **Tabel 3.7**, **Tabel 3.8**, **Tabel 3.9** dan **Tabel 3.10**.

Tabel 3.7 Rancangan tabel data pengukuran konduktivitas listrik tanah

Pengulangan	Konduktivitas (S/m)		
	NPK 15-15-15	NPK 16-16-16	NPK 20-10-10
1			
2			
3			
Rata-rata			

Tabel 3.8 Rancangan tabel data pengukuran pertumbuhan tanaman tomat pada sampel tanah dengan pupuk NPK 15-15-15

Hari ke-	NPK 15-15-15			
	Tinggi	Jumlah Daun	Kelembaban	pH
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

Tabel 3.9 Rancangan tabel data pengukuran pertumbuhan tanaman tomat pada sampel tanah dengan pupuk NPK 16-16-16

Hari ke-	NPK 16-16-16			
	Tinggi	Jumlah Daun	Kelembaban	pH
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

Tabel 3.10 Rancangan tabel data pengukuran pertumbuhan tanaman tomat pada sampel tanah dengan pupuk NPK 20-10-10

Hari ke-	NPK 20-10-10			
	Tinggi (cm)	Jumlah Daun	Kelembaban	pH
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Sistem pengukuran konduktivitas listrik tanah berhasil dikembangkan menggunakan sumber arus konstan 1,25mA dan sistem pembacaan tegangan dengan akurasi 99,2% serta penguat *non-inverting* dengan akurasi 97,92%.
2. Pupuk NPK 20-10-10 menghasilkan konduktivitas tertinggi (0,44 S/m), diikuti NPK 16-16-16 (0,38 S/m), dan NPK 15-15-15 (0,33 S/m). Konduktivitas berbanding lurus dengan kandungan nitrogen.
3. Konduktivitas tinggi berkorelasi dengan pertumbuhan optimal tanaman. NPK 20-10-10 menghasilkan pertumbuhan tomat tertinggi (1,8 cm) dibanding NPK lainnya (1,5 cm), menunjukkan konduktivitas sebagai indikator yang baik untuk memprediksi laju pertumbuhan tanaman.

5.2. Saran

Penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari kekurangan, baik kekurangan dalam perencanaan maupun implementasi sistem. Untuk memperbaiki kekurangan tersebut, maka diberikan beberapa saran untuk pengembangan selanjutnya di antaranya:

1. Mengembangkan sistem pengukuran konduktivitas tanah yang dapat secara real-time mengirimkan data ke *database* atau *platform* IoT, sehingga monitoring kondisi tanah dapat dilakukan secara jarak jauh dan berkelanjutan.

2. Melakukan penelitian lanjutan untuk mempelajari korelasi antara konduktivitas tanah dan pertumbuhan tanaman pada berbagai jenis tanaman dan kondisi lingkungan yang berbeda.
3. Mengintegrasikan sensor tambahan ke dalam prototipe, seperti sensor kelembaban dan pH tanah, untuk memberikan informasi yang lebih lengkap tentang kondisi tanah secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adelyna. (2021). *Teknik Budi Daya Tomat dalam Pot dan Polybag*. DIVA Press. Yogyakarta.
- Adirianto, B., Dyah Utami, A., Kurniawan, I., Khotimah, A. H., Al Qifary, M. R., dan Nabila, R. (2021). Hambatan Listrik Menggunakan Multitester Pada Campuran NPK dan Pupuk Kandang di Tanah Kering. *Jurnal Pertanian Agros*, 23(2), 403–408.
- Alqamari, M., Fitria, Mukhtar, Y., dan Sitorus, R. S. (2022). *Ekologi Tanaman*. UMSU Press. Medan.
- Alridiwirsyah, Alqamari, M., dan Cemda, A. R. (2022). *Pengantar Ilmu Pertanian*. UMSU Press. Medan.
- Amri, M. M., dan Sumiharto, R. (2019). Sistem Pengukuran Nitrogen, Fosfor, Kalium Dengan Local Binary Pattern Dan Analisis Regresi. *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)*, 9(2), 107.
- Ariyanto, D., Astika, I., dan Setiawan, R. (2016). Pengembangan Metode Akuisisi Data Kandungan Unsur Hara Makro Secara Spesial dengan Sensor EC dan GPS. *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 4(1), 107-114.
- Basuki, Sirappa, M. P., Lahati, B. K., Rahmah, N., Fitra, R. A., Adawiyah, R., Rachman, R. M., YM, H., Wilujeng, E. D. I., Heryanto, R., Mulya, T., Hartati, Ikhsan, F., Takdir, N., dan Hidayat, B. (2023). *Kesuburan Tanah*. CV. Tohar Media. Gowa.
- Darmawan, D., Perdana, D., Ismardi, A., and Fathona, I. W. (2023). Investigating the electrical properties of soil as an indicator of the content of the NPK element in the soil. *Measurement and Control*, 56(1–2), 351–357.
- Dasipah, E. (2023). *Pertanian Berkelanjutan: Meningkatkan Hasil Usahatani Tomat di Dataran Rendah*. Mega Press Nusantara. Sumedang.
- Dattatreya, S., Khan, A. N., Jena, K., and Chatterjee, G. (2024). Conventional to Modern Methods of Soil NPK Sensing: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 24(3), 2367–2380.
- Hadi, S., Labib, R. P. M. D., dan Widayaka, P. D. (2022). Perbandingan Akurasi Pengukuran Sensor LM35 dan Sensor DHT11 Untuk Monitoring Suhu Berbasis Internet of Things. *Jurnal STRING*, 6(3), 269-278.

- Handayanto, E., Muddarisna, N., and Fiqri, A. (2017). *Pengelolaan Kesuburan Tanah*. Universitas Brawijaya Press. Malang.
- Iskandar, N. A., Rosnah, Mega, I. A., Rizkita, A. F., Rahmah, N., Sary, I. P., Syarmilah, SM, S., Nurlina, Fadilla, N., dan Anwar. (2022). *Let's Go Let's Plants*. Jejak Pustaka. Bantul.
- Ismail, N. (2022). *Geofisika Arkeologi: Studi Kasus pada Benteng Indrapatra dan Kuta Lombok, Aceh Besar*. Syiah Kuala University Press. Banda Aceh.
- Lingga, P. (2001). *Petunjuk Penggunaan Pupuk*. Niaga Swadaya. Jakarta.
- Logsdon, S., Clay, D., Moore, D., and Tsegaye, T. 2008. *Soil Science: Step-by-step Field Analysis*. Soil Science Society of America. Amerika Serikat.
- Loke, M. H. 2001. *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Geotomo Software. Malaysia.
- Lubis, E. R. (2020). *Bercocok Tanam Tomat, Untung Melimpah*. Bhuana Ilmu Populer. Jakarta.
- Lubis, E. R. (2021). *Untung Berlimpah Budi Daya Pisang*. Bhuana Ilmu Populer. Jakarta.
- Mansyur, N. I., Pudjiwati, E. H., dan Murti Laksono, A. (2021). *Pupuk dan Pemupukan*. Syiah Kuala University Press. Banda Aceh.
- Moruk, A., Hermantoro, H., dan Suparyanto, T. (2023). Monitoring Tingkat Ph dan Kandungan NPK pada Proses Composting Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Agricultural Engineering Innovation Journal*, 1(2), 121–130.
- Muskhair, M., dan Latif, M. R. (2021). *Rangkaian Listrik*. UNP Press. Padang.
- Mutakin, J. (2023). *Mengenal Sayuran dan Sumber Fosfat*. Wawasan Ilmu. Banyumas.
- Mutmainna, Trisnowali, A., Asfar, I. T., Asfar, I. A., Nurannisa, A., Rasmiati, dan Ika Sari, E. (2024). *Daun Gamal Sebagai Substituen Biofertilizer Alternatif*. KBM Indonesia. Bojonegoro.
- Ngara, Z. S. (2023). *Fisika Zat Padat*. Nasya Expanding Management. Pekalongan.
- Nihayati, E. (2023). *Curcuma: Botani dan Lingkungan Tumbuh*. Universitas Brawijaya Press. Malang.
- Nopriani, L. S., Soemarno, Hadiwijoyo, E., Hanuf, A. A., dan Sholikah, D. H. (2021). *Pengelolaan P Tanah dan Pemupukan Fosfat*. Universitas Brawijaya Press. Malang.
- Nugroho, G. A., Soemarno, Lutfi, M. W., dan Hanuf, A. A. (2023). *Pengelolaan N-Tanah dan Pemupukan Nitrogen*. Universitas Brawijaya Press. Malang.
- Nurhayati, D. R. (2021). *Pengantar Nutrisi Tanaman*. UNISRI Press. Surakarta.
- Nurhidayah, T. (2023). *Pembuatan Nitrogen Buatan dengan Menggunakan Alat*

Mesin Pengolah Tanah Bagi Tanaman. Media Nusa Creative. Malang.

- Pranata, A. S. (2010). *Meningkatkan Hasil Panen dengan Pupuk Organik*. PT AgroMedia Pustaka. Jakarta Selatan.
- Pratama, H., Yunan, A., dan Arif Candra, R. (2021). Design and Build a Soil Nutrient Measurement Tool for Citrus Plants Using NPK Soil Sensors Based on the Internet of Things. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 1(2), 67–74.
- Ratna, S. (2023). *Tanah Menggunakan Sensor Npk Berbasis Wireless*. 14(4), 466–471.
- Rayes, M. L. (2017). *Morfologi dan Klasifikasi Tanah*. Universitas Brawijaya Press. Malang.
- Sari, M. A. W., Ivansyah, O., dan Nurhasanah, N. (2019). Hubungan Konduktivitas Listrik Tanah dengan Unsur Hara NPK dan pH Pada Lahan Pertanian Gambut. *Prisma Fisika*, 7(2), 55.
- Satar, S. (2024). *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*. Sonpedia Publishing Indonesia. Jambi.
- Senapaty, M. K., Ray, A., and Padhy, N. (2023). Modelo de recomendación de cultivos y análisis de nutrientes del suelo habilitado por IoT para agricultura de precisión. *Computación*, 12(3), 1-34.
- Septiyani-, F., dan Ivansyah-, O. (2016). *Analisis Konduktivitas Listrik Tanah Gambut Berdasarkan Variasi Pupuk KCl*. IV(03), 88–93.
- Sholeha, N. A., Wiraguna, E., Farobie, O., Mahardika, M., Pertiwi, T. H. A., Nurhadi, M. D., dan Claire, J.-A. St. (2024). *Polimer Dalam Pupuk Lepas Terkontrol dan Unsur Hara Mikro yang Tersedia Bagi Tanaman*. Adab. Indramayu.
- Smith, Andrew F. 2001. *The Tomato in America: Early History, Culture and Cookery*. University of Illinois Press. Champaign Illinois.
- Subhan, Nurtika, N., dan Gunadi, N. (2009). Respons Tanaman Tomat Terhadap Penggunaan Pupuk Majemuk NPK 15-15-15 Pada Tanah Latosol Pada Musim Kemarau. *Jurnal Hortikultura*, 19(1), 40–48.
- Suntari, R., Nugroho, G. A., Fitria, A. D., Nuklis, A., dan Albarki, G. K. (2021). *Teknologi Pupuk dan Pemupukan Ramah Lingkungan*. Universitas Brawijaya Press. Malang.
- Supriati, Y., dan Siregar, F. D. (2015). *Bertanam Tomat di Pot (Edisi Revisi)*. Penebar Swadaya. Jakarta.
- Susilo, A., Sunaryo, M, J. A., Fina, F., Puspita, M. B., Hasan, M. F. R., Farizky, H., dan Suryo, E. A. (2022). *Teori dan Aplikasi Metode Geolistrik Resistivitas*.
- Syukri, M. (2025). *Pengantar Teknik Geofisika*. USK Press. Aceh.
- Syukur, M., Saputra, H. E., dan Hermanto, R. (2015). *Bertanam Tomat di Musim*

Hujan. Penebar Swadaya. Jakarta.

- Tando, E. (2019). Upaya Efisiensi Dan Peningkatan Ketersediaan Nitrogen Dalam Tanah Serta Serapan Nitrogen Pada Tanaman Padi Sawah (*Oryza sativa* L.). *Buana Sains*, 18(2), 171.
- Titiek, P., Sudaryono, T., Ardiansyah, Fidiyawati, E., dan Asnita, R. (2021). *Arahan Pemupukan Spesifik Lokasi untuk Tanaman Jeruk (Citrus sp) di Jawa Timur*. Universitas Muhammadiyah Malang. Malang.
- Tri, T. (2023). *Cara Praktis Merawat Tanaman Tomat dan Beberapa Makanan Olahannya*. Rumah Baca. Yogyakarta.
- Vebrianto, Suhendra. *Eksplorasi Metode Geolistrik: Resistivitas, Polarisasi Terinduksi, dan Potensial Diri*. UB Press. Malang.
- Wahditiya, A. A., Sumbari, C., Rahman, F. A., Malado, M., Laimeheriwa, S., Supriyadi, S., Risamsu, R. G., Nendissa, J. I., Suhadi, Rahmah, M., Hidayati, F., Apriyani, D., dan Sampe, F. (2024). *Pengantar Dasar Agronomi*. CV. Gita Lentera. Padang.
- Wahyudi. (2012). *Bertanam Tomat di Dalam Pot dan Kebun Mini*. AgroMedia Pustaka. Jakarta Selatan.
- Waidah, B. F., dan Achmad, C. A. (2020). *Ilmu Hara*. Alinea Media Dipantara. Semarang.
- Widiasmadi, N. (2023). *Smart Agriculture 1*. Adab. Indramayu.
- Wiryanta, B. T. W. (2002). *Bertanam Tomat*. AgroMedia Pustaka. Jakarta Selatan.
- Yunus, A. I., Suyadi, Cengristitama, Marlina, L., Yuliatr, Rahman, F. A., Supriyadi, S., Ningsih, M. S., Raco, B., dan Sari, M. W. (2024). *Ilmu Tanah*. CV. Gita Lentera. Padang.