

**Analisis Pengaruh Jarak dan Jumlah Lilitan terhadap
Efisiensi Wireless Power Transfer Berbasis Induksi
Magnetik**

Dibuat Sebagai Salah Satu Syarat

Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana Pada Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Disusun Oleh :

MHD. KHAIRIYAN NAZMI

2007220030



UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Mhd. Khairiyan Nazmi

NPM : 2007220030

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Jarak dan Jumlah Lilitan terhadap Efisiensi
Wireless Power Transfer Berbasis Induksi Magnetik

Bidang Ilmu : Sistem Tenaga

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 12 September 2025

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing



Assoc. Prof. Dr. M. Fitra Lambak, S.T., M.Sc.

Dosen Penguji I



Faisal Irsan Pasaribu S.T., M.T.

Dosen Penguji II



Ir. Abdul Azis Hutasuht M.M.



Program Studi Teknik Elektro
Sumatera Utara,



Nasution S.T., M.Pd.

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Mhd. Khairiyah Nazmi
Tempat/ Tanggal Lahir : Medan / 18 Desember 2002
NPM : 2007220030
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

"Analisis Pengaruh Jarak dan Jumlah Lilitan terhadap Efisiensi Wireless Power Transfer Berbasis Induksi Magnetik".

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan nonmaterial, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/keserjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 12 September 2025



(Mhd. Khairiyah Nazmi)

ABSTRAK

Perkembangan teknologi saat ini menuntut adanya sistem pengisian daya yang lebih praktis dan efisien, salah satunya melalui Wireless Power Transfer (WPT) berbasis induksi magnetik. Sistem ini memungkinkan transfer energi listrik tanpa kabel dengan memanfaatkan medan magnet antara kumparan pengirim (transmitter) dan penerima (receiver). Namun, efisiensi WPT sangat dipengaruhi oleh faktor teknis, terutama jarak antara kumparan dan jumlah lilitan, sehingga penelitian mengenai kedua faktor ini penting dilakukan. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh jarak dan jumlah lilitan terhadap efisiensi transfer daya pada sistem WPT. Penelitian menggunakan metode eksperimental dengan merancang rangkaian transmitter dan receiver berbasis induksi magnetik. Variasi jumlah lilitan kawat enamel 0,60 mm yang diuji yaitu 20, 30, 40, 50, dan 60 lilitan, serta dilakukan pengujian pada beberapa jarak antara transmitter dan receiver. Data yang diamati meliputi tegangan keluaran pada receiver serta waktu pengisian smartphone sebagai beban. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jarak yang semakin jauh antara transmitter dan receiver menyebabkan penurunan signifikan pada tegangan keluaran dan efisiensi transfer daya. Selain itu, jumlah lilitan juga berpengaruh terhadap kinerja sistem. Variasi 40 hingga 50 lilitan memberikan hasil paling optimal dengan daya keluaran stabil, sedangkan penambahan lilitan hingga 60 justru menurunkan efisiensi akibat resistansi yang meningkat. Dengan demikian, penelitian ini menyimpulkan bahwa jarak transfer dan jumlah lilitan memiliki pengaruh langsung terhadap efisiensi WPT, dan terdapat batas optimal yang perlu diperhatikan dalam perancangan sistem pengisian daya nirkabel.

Kata kunci: Wireless Power Transfer, Induksi Magnetik, Jarak, Lilitan, Efisiensi

ABSTRACT

The development of modern technology demands more practical and efficient charging systems, one of which is Wireless Power Transfer (WPT) based on magnetic induction. This system enables the transfer of electrical energy without cables by utilizing a magnetic field between the transmitter and receiver coils. However, the efficiency of WPT is strongly influenced by technical factors, particularly the distance between coils and the number of turns, making research on these parameters essential. The objective of this study is to analyze the effect of distance and coil turns on the efficiency of power transfer in a WPT system. The research was conducted experimentally by designing a transmitter and receiver circuit based on magnetic induction. Variations in the number of coil turns using 0.60 mm enamel wire were tested at 20, 30, 40, 50, and 60 turns, with several distances between transmitter and receiver. The collected data included the output voltage on the receiver and the charging time of a smartphone as the load. The results show that increasing the distance between the transmitter and receiver significantly reduces the output voltage and overall transfer efficiency. Furthermore, the number of turns also affects system performance. The best performance was achieved with 40 to 50 turns, providing stable output power, while increasing the number of turns to 60 decreased efficiency due to higher coil resistance. In conclusion, both coil distance and number of turns directly influence the efficiency of WPT, and there is an optimal range that should be considered in designing effective and efficient wireless charging systems.

Keywords: *Wireless Power Transfer, Magnetic Induction, Distance, Coil Turns, Efficiency*

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur kepada Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya, maka skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Salam dan salawat semoga selalu tercurah pada baginda Rasulullah Muhammad SAW. Sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul **“Analisis Pengaruh Jarak dan Jumlah Lilitan terhadap Efisiensi Wireless Power Transfer Berbasis Induksi Magnetik”**. Adapun maksud dan tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan program sarjana Strata Satu di Fakultas Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Penulis mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya atas semua bantuan yang telah di berikan, baik secara langsung maupun tidak langsung selama penyusunan tugas akhir ini hingga selesai. Secara khusus rasa terima kasih tersebut saya sampaikan kepada:

1. Ayahanda tercinta Aripin dan Ibunda tersayang Kamilawati, Orang tua penulis yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini baik motivasi, nasihat, materi maupun do'a.
2. Bapak Dr. Agussani MAP selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
3. Bapak Assoc. Prof. Dr. M. Fitra Zambak, S.T., M.Sc.. selaku Dosen Pembimbing Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T. Selaku Penguji Satu Dalam Pelaksanaan Tugas Akhir Saya.
5. Bapak Ir. Abdul Aziz Hutasuhut, M.M. Selaku Penguji Satu Dalam Pelaksanaan Tugas Akhir Saya.
6. Bapak Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
7. Ibu Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd. selaku ketua Program Studi Teknik

Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

8. Bapak Benny Oktrialdy, S.T., M.T. selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
9. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu keteknik elektroan kepada penulis.
10. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
11. Teman-teman Seperjuangan Teknik Elektro Stambuk 2020
12. Teman-teman Ikatan Mahasiswa Elektro periode 2022/2023 yang telah banyak memberi pengalaman serta ilmu dalam dunia organisasi.

Penulis menyadari adanya kemungkinan terjadi kekeliruan ataupun kelebihan dan kekurangan kesalahan-kesalahan di dalam penyusunan tugas akhir ini, mungkin masih banyak kekurangannya. Oleh sebab itu saya mengharapkan kritik dan saran. Semoga tugas akhir ini dapat membawa manfaat yang sebesar-besarnya bagi penulis sendiri maupun bagi dunia pendidikan pada umumnya, khususnya untuk Fakultas Teknik Elektro. Terimah kasih atas segala perhatiannya penulis mengucapkan terimah kasih kembali.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Medan, 29 Agustus 2025

Mhd, Khairiyan Nazmi

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Ruang Lingkup	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan.....	5
2.2 Wireless Power Transfer	9
2.2.1 Sejarah Perkembangan Wireless Power Transfer	9
2.2.2 Prinsip Kerja Wireless Power Transfer	10
2.3 Tranmisi Energi Listik Tanpa Kabel	10
2.3.1 Aplikasi Transmisi Energi Listrik	12
2.4 Medan Elektromagnetik	13
2.5 Jenis-Jenis Wireless Power Transfer	14
2.6 Induksi Elektromagnetik	17
2.7 GGL (Gaya Gerak Listrik)	18

2.8 Induktansi	19
2.8.1 Induktansi Sendiri	22
2.8.2 Induktansi Bersama	23
2.9 Pengirim (<i>Transmitter</i>)	24
2.9.1 <i>Power Supply</i>	25
2.9.2 Rangkaian Osilator	26
2.9.3 Kumparan Pengirim (<i>Transmitter Coil</i>).....	27
2.9.4 Kapasitor Resonansi	27
2.9.5 PCB atau Media Pemasangan	28
2.10 Penerima (<i>Receiver</i>)	28
2.10.1 Kumparan Penerima (<i>Receiver Coil</i>).....	28
2.10.2 Rangkaian Penyearah (<i>Rectifier</i>)	29
2.10.3 Regulator Tegangan (<i>Voltage Regulator</i>).....	30
2.10.4 Beban (<i>Load</i>)	31
2.11 Kopling Induktif	32
2.12 Resonansi Kopling Induktif.....	32
2.13 Frekuensi Transfer Energi	33
Bab III METODE PENELITIAN	37
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	37
3.1.1 Tempat.....	37
3.1.2 Waktu	37
3.2 Alat dan Bahan	38
3.3 Teknik Pengumpulan Data.....	38
3.4 Prosedur Pengujian.....	38
3.5 Analisa Wireless Power Transfer Berbasis Induksi Magnetik.....	39
3.5.1 Rangkaian Wireless Power Transfer	39

3.6 Power Supply.....	39
3.7 Modul Wireless Power Transfer (WPT).....	40
3.8 Kawat Email.....	42
3.9 Multimeter Digital.....	43
3.10 Beban (<i>SmartPhone</i>)	44
3.11 Diagram Blok Wireless Power Transfer	44
3.10 Diagram Alir.....	45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	46
4.1 Desain Rangkaian WPT di Multisim.....	46
4.2 Hasil Pengujian Sistem Wireless Power Transfer	48
4.2.1 Pengujian Pengaruh Jarak dan Lilitan (20 Lilitan) terhadap Waktu Pengisian.....	49
4.2.2 Pengujian Pengaruh Jarak dan Lilitan (30 Lilitan) terhadap Waktu Pengisian.....	51
4.2.3 Pengujian Pengaruh Jarak dan Lilitan (40 Lilitan) terhadap Waktu Pengisian.....	53
4.2.4 Pengujian Pengaruh Jarak dan Lilitan (50 Lilitan) terhadap Waktu Pengisian.....	55
4.2.5 Pengujian Pengaruh Jarak dan Lilitan (60 Lilitan) terhadap Waktu Pengisian.....	57
4.3 Analisis Pengaruh Jarak terhadap Efisiensi Wireless Power Transfer.....	58
4.4 Analisis Pengaruh Jumlah Lilitan terhadap Efisiensi Wireless Power Transfer.....	59
4.5 Analisa Pengaruh Jumlah Lilitan terhadap Daya Yang mampu di Transfer	60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	62
5.1 Kesimpulan.....	62
5.2 Saran.....	63

DAFTAR PUSTAKA.....	65
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	71

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tabel rumus induktansi	21
Tabel 3. 1 Waktu Penelitian.....	37
Tabel 3. 2 Spesifikasi Modul WPT	41
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian 20 Lilitan.....	49
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian 30 Lilitan.....	51
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian 40 Lilitan.....	53
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian 50 Lilitan.....	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Kapsul Endoskopi	12
Gambar 2. 2 Pengisian Energi Mobil Listrik	13
Gambar 2. 3 Gelombang Elektromagnetik.....	14
Gambar 2. 4 Near-field Wireless Power transfer	15
Gambar 2. 5 WPT Far Field & Near Field.....	16
Gambar 2. 6 Percobaan Michael Faraday	17
Gambar 2. 7 Kaidah Tangan Kanan	19
Gambar 2. 8 Rangkaian Induktansi Sendiri	23
Gambar 2. 9 Rangkaian Induktansi Bersama	23
Gambar 2. 10 Rangkaian Transmitter	25
Gambar 2. 11 Power Supply	26
Gambar 2. 12 Rangkaian Osilator.....	27
Gambar 2. 13 Kapasitor Resonansi.....	27
Gambar 2. 14 Rangkaian Receiver.....	28
Gambar 2. 15 Rangkaian Penyearah	30
Gambar 2. 16 LM2596 Regulator Voltage	31
Gambar 2. 17 Kopling Induksi.....	32
Gambar 3. 1 Power Supply	40
Gambar 3. 2 Modul Wireless Charging 5V 2A.....	41
Gambar 3. 3 Kawat Enamel 0.60mm	42
Gambar 3. 4 Multimeter Digital.....	43
Gambar 3. 5 Blok Diagram WPT.....	44
Gambar 4. 1 Desain Rangkaian Transmitter	46
Gambar 4. 2 Desain Rangkaian Receiver	47
Gambar 4. 3 Grafik Hasil Pengujian 20 Lilitan	50
Gambar 4. 4 Grafik Pengujian 30 Lilitan.....	52
Gambar 4. 5 Grafik Pengujian 40 Lilitan.....	54
Gambar 4. 6 Grafik hasil Pengujian 50 Lilitan	56
Gambar 4. 7 Grafik Hasil Pengujian 60 Lilitan	58

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan dan sumber daya ekonomi paling penting di masyarakat saat ini. Di masa yang akan datang, permintaan daya listrik akan terus meningkat seiring dengan peningkatan dan perkembangan populasi penduduk, investasi, dan perkembangan teknologi. Kebutuhan energi listrik meningkat pesat diakibatkan oleh bertambahnya penggunaan peralatan elektronik yang menggunakan listrik (Wulandari, 2020). Kemajuan teknologi telah mendorong pengembangan sistem pengisian daya nirkabel atau Wireless Power Transfer (WPT), yang memungkinkan transfer energi tanpa menggunakan kabel. Salah satu metode yang paling umum digunakan dalam WPT adalah induksi magnetik, di mana energi ditransfer melalui medan magnet antara dua kumparan atau koil. Teknologi ini menawarkan berbagai keuntungan, terutama dalam hal kenyamanan dan keamanan, serta pengurangan keausan pada konektor fisik yang biasanya digunakan dalam pengisian daya konvensional.

Jika dapat mengirimkan daya listrik tanpa melewati suatu kabel, tentunya hal ini akan sangat membantu di dalam pengisian baterai dan juga akan menjadi lebih efektif serta efisien jika dapat mengisi ulang lebih dari satu baterai dalam suatu waktu bersamaan tanpa harus menggunakan . kabel lagi yang terpasang ke sumber listrik. Dengan adanya alat yang dapat mengirimkan daya listrik tanpa kabel ini, nantinya juga diharapkan dapat menggantikan peran baterai selama ini, selama masih berada di dalam jangkauan atau area alat tersebut (Husain et al., 2023). Pengiriman energi listrik secara nirkabel pertama kali dibuktikan oleh Nikola Tesla pada tahun 1893. Tesla melakukan penelitian mengenai transfer energi nirkabel dengan membangun Menara Wardenclyffe di Shoreham, Long Island, yang berfungsi sebagai fasilitas untuk telekomunikasi tanpa kabel dan pengiriman daya listrik. Ia berhasil mengirimkan energi listrik nirkabel dari Menara Wardenclyffe untuk menyalakan sebuah lampu pijar.

Namun, efisiensi sistem WPT berbasis induksi magnetik sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis. Di antara faktor-faktor tersebut, jarak antara koil pengirim dan penerima serta ukuran koil memainkan peran penting. Ketika jarak

antara koil pengirim dan penerima bertambah, efisiensi transfer daya biasanya menurun karena medan magnet yang semakin lemah. Selain itu, ukuran koil juga memengaruhi jangkauan dan intensitas medan magnet, yang pada akhirnya memengaruhi jumlah daya yang dapat ditransfer dengan efisiensi yang optimal. Untuk mencapai kinerja yang maksimal, diperlukan pemahaman yang mendalam mengenai interaksi antara jarak, ukuran koil, dan efisiensi transfer daya.

Penelitian ini penting karena dapat memberikan panduan dalam desain sistem WPT yang lebih efisien dan handal, terutama untuk aplikasi yang memerlukan transfer daya pada jarak yang bervariasi dan dengan dimensi perangkat yang beragam. Dengan menganalisis pengaruh jarak dan ukuran koil terhadap efisiensi transfer daya, diharapkan dapat ditemukan solusi untuk mengoptimalkan sistem WPT, baik untuk aplikasi elektronik portabel, kendaraan listrik, maupun perangkat IoT (Internet of Things).

Oleh karena itu, penelitian ini akan berfokus pada analisis pengaruh jarak dan ukuran koil terhadap efisiensi transfer daya pada sistem WPT berbasis induksi magnetik, dengan harapan dapat memberikan kontribusi pada peningkatan performa dan perluasan aplikasi teknologi pengisian daya nirkabel.

Berdasarkan masalah di atas maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisa proses energi listrik yang efisien yaitu mampu mentransfer energi listrik tanpa menggunakan kabel.

1.2 Rumusan Masalah

1. Seberapa berpengaruh jarak antar pengirim dan penerima terhadap efisiensi waktu pada Wireless Power Transfer?
2. Apa pengaruh jumlah lilitan kumparan terhadap besar daya yang mampu ditransfer?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis Pengaruh Jarak Antara Pengirim dan Penerima terhadap Efisiensi Waktu.
2. Menentukan Pengaruh Jumlah Lilitan Kumparan terhadap Besar Daya yang Ditransfer.

1.4 Ruang Lingkup

1. Penelitian ini akan membahas bagaimana jarak antara pengirim (transmitter) dan penerima (receiver) mempengaruhi efisiensi waktu transfer daya pada sistem WPT dalam mengisi daya smartphone. Penelitian ini akan membahas hubungan antara jarak dan penurunan efisiensi, serta batasan praktis jarak maksimal yang dapat dicapai oleh sistem ini.
2. Penelitian ini juga akan menganalisis peran jumlah lilitan pada kumparan (coil) dalam sistem WPT. Fokusnya adalah bagaimana jumlah lilitan kumparan memengaruhi besarnya daya yang dapat ditransfer dari pengirim ke penerima.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Menambah pemahaman tentang WPT. Penelitian ini bisa membantu menjelaskan bagaimana jarak antara pengirim dan penerima serta jumlah lilitan pada kumparan berpengaruh terhadap hasil transfer daya. Dengan begitu, penelitian ini bisa jadi tambahan pengetahuan untuk memahami cara kerja sistem *Wireless Power Transfer* berbasis induksi magnetik.
2. Berguna untuk pengembangan teknologi. Hasil penelitian ini bisa dijadikan acuan untuk membuat sistem pengisian daya nirkabel yang lebih baik. Misalnya, dalam merancang kumparan dengan jumlah lilitan yang pas supaya lebih efisien, atau menentukan jarak kerja yang optimal. Hal ini bisa bermanfaat untuk teknologi sehari-hari seperti charger smartphone, perangkat IoT, sampai ide pengisian daya kendaraan listrik tanpa kabel.
3. Jadi referensi untuk penelitian berikutnya. Penelitian ini bisa dipakai sebagai dasar atau rujukan bagi mahasiswa maupun peneliti lain yang mau melanjutkan riset tentang WPT. Ke depannya, penelitian bisa dikembangkan lagi dengan menambahkan faktor lain, seperti ukuran kawat, bentuk kumparan, bahan yang dipakai, atau rangkaian resonansi supaya efisiensinya lebih tinggi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Wireless power transfer (WPT) adalah metode transmisi energi listrik tanpa kabel, menggunakan medan listrik atau magnet sebagai medium transfer. Sistem ini sangat berguna untuk perangkat yang sulit dihubungkan dengan kabel dan memiliki keunggulan dalam kesederhanaan instalasi. Namun, sistem resonansi magnetik yang umum digunakan menunjukkan efisiensi yang menurun secara signifikan seiring bertambahnya jarak antara perangkat, sehingga penting untuk menentukan jarak optimal untuk aplikasi tertentu. Teknologi WPT berakar dari penelitian Nikola Tesla, seorang ilmuwan dan penemu terkenal. Tesla melakukan berbagai penemuan penting, termasuk arus bolak-balik (AC) dan WPT. Ia menciptakan Tesla coil, yang mampu mengirimkan tegangan tinggi hingga 1MV pada jarak 26 mil untuk menyalakan 200 lampu dan satu motor listrik. Namun, karena potensi bahaya dari penemuan ini, penelitiannya dihentikan. Penelitian WPT kemudian dilanjutkan oleh Heinrich Hertz, yang menyempurnakan eksperimen Tesla (Zaldy, 2018).

WPT berdasarkan induksi magnetik melibatkan dua komponen utama: transmitter dan receiver. Transmitter menghasilkan medan magnet yang diinduksi oleh arus bolak-balik (AC) di dalam kumparan induktor, sedangkan receiver menangkap medan magnet tersebut dan menginduksi tegangan listrik yang dapat digunakan untuk mengisi daya perangkat elektronik (Prasojo & Surjati, 2019). Proses ini sangat efisien ketika kedua kumparan berada dalam jarak yang dekat dan terorientasi dengan baik, sehingga memungkinkan transfer energi yang optimal. Selain itu, desain dan jumlah lilitan pada kumparan juga berperan penting dalam menentukan seberapa besar energi yang dapat ditransfer, membuat penelitian dan pengembangan lebih lanjut dalam bidang ini sangat krusial untuk meningkatkan kinerja sistem WPT.

Jarak antara kumparan pemancar dan penerima merupakan faktor kritis yang mempengaruhi efisiensi Wireless Power Transfer (WPT). Penelitian menunjukkan bahwa semakin jauh jarak antara kedua kumparan, semakin menurun nilai

tegangan yang diterima oleh kumparan penerima. Sebagai contoh, dalam eksperimen yang dilakukan oleh Supriyadi (2020), pengukuran menunjukkan bahwa dengan peningkatan jarak dari 1 cm hingga 5 cm, terjadi penurunan signifikan pada output tegangan dari pemancar ke penerima. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya fluks magnet yang menginduksi arus di kumparan penerima ketika jarak meningkat (Bachri & Abidin, 2020).

Jumlah lilitan pada kumparan dalam sistem Wireless Power Transfer (WPT) mempengaruhi beberapa aspek kinerja sistem. Pertama, induktansi kumparan meningkat seiring dengan peningkatan jumlah lilitan, yang dapat meningkatkan efisiensi transfer daya. Namun, peningkatan jumlah lilitan juga dapat menyebabkan peningkatan resistansi, sehingga perlu ada keseimbangan antara jumlah lilitan dan resistansi untuk menjaga efektivitas sistem. Kedua, arus dan tegangan yang dihasilkan oleh kumparan juga dipengaruhi oleh variasi jumlah lilitan. Misalnya, dalam sebuah studi, pengujian dengan variasi jumlah lilitan 18, 20, 22, dan 24 pada kumparan pemancar menunjukkan bahwa arus primer cenderung menurun dengan bertambahnya jumlah lilitan (Nurdiansari et al., 2022). Terakhir, efisiensi transfer daya tidak selalu meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah lilitan. Contohnya, pada jarak tertentu, kumparan dengan 8 lilitan pada tipe selenoid menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 28,15%, sementara kumparan lain mungkin tidak mencapai efisiensi yang sama (Lampung, 2018).

Dalam beberapa studi, seperti yang dilakukan oleh Andesta (2018), ditemukan bahwa penggunaan induktor planar dengan variasi jumlah lilitan dapat mempengaruhi efisiensi transfer daya secara signifikan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa dengan jumlah lilitan yang optimal, efisiensi dapat mencapai hingga 69,98% pada jarak transfer tertentu (Lampung, 2018). Selain itu, penelitian lain juga mencatat bahwa desain geometris kumparan dan material yang digunakan berperan penting dalam meningkatkan efisiensi WPT.

Jumlah lilitan pada kumparan dalam sistem Wireless Power Transfer berbasis induksi magnetik memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi transfer daya. Meskipun peningkatan jumlah lilitan dapat meningkatkan induktansi, faktor-

faktor lain seperti resistansi dan desain kumparan juga harus dipertimbangkan untuk mencapai efisiensi optimal. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi kombinasi terbaik dari parameter-parameter ini dalam aplikasi praktis WPT. Dengan memahami pengaruh jumlah lilitan terhadap kinerja sistem WPT, diharapkan dapat dikembangkan teknologi pengisian nirkabel yang lebih efisien dan efektif untuk berbagai aplikasi modern.

Uji material dan diameter koil dilakukan menggunakan sirkuit transmisi elektronik nirkabel prinsip resonansi. Tes meliputi desain sirkuit dan pengujian tegangan-amplitudo-persentase Ujung ke ujung pada gulungan. Tegangan referensi yang ditentukan dalam rangkaian uji transmisi listrik yaitu ± 7 volt dan frekuensi yang diberikan oleh rangkaian osilator adalah $\pm 1,35$ MHz. Berdasarkan tes koil, kemudian optimasi dilakukan dengan rangkaian transmisi (Pynanjung et al., 2019).

Metode draf Pemancar dan penerima energi nirkabel kecil ini dapat beroperasi dari jarak 2 cm – 5 cm. Pada jarak yang berbeda, daya yang dihasilkan juga akan berbeda. Berdasarkan pengujian yang dilakukan pada berbagai jarak memberikan hasil pengujian yang diperoleh dengan pembacaan tegangan sebesar 0,1 volt pada titik terjauh 5 cm Daya 0,03 mW dan tegangan 4,2 volt pada titik 2 cm menghasilkan daya 65,3 mW. Sumber tegangan pada rangkaian yang telah selesai tidak boleh melebihi 24 V volt, karena ini akan merusak transistor FET yang digunakan dalam lingkaran penyiaran. Pada dasarnya, tegangan sumber diterapkan ke sirkuit PLN 220V kemudian diturunkan menjadi 24,33V menggunakan trafo Output dari transformator diperbaiki oleh dioda penyearah

Frekuensi rendah digunakan dalam penelitian ini 1kHz, 3kHz dan 5kHz dengan sumber dan fungsi rangkaian osilator Generator. Pengukuran dengan rangkaian osilator, nilai efisiensi listrik untuk jarak transmisi 4 cm pada frekuensi 1 kHz 2,79%, pada frekuensi 3 kHz 18,05% pada frekuensi 5 kHz 6,41 dan jarak transmisi maksimum tiap frekuensi adalah 1 kHz pada jarak 10 cm, 3 kHz pada jarak 20 cm dan 5 kHz pada jarak 10 cm. Pengukuran dengan function generator, nilai efisiensi listrik maksimum pada Frekuensi 1 kHz = 14,65% frekuensi rata-rata 1 kHz, Frekuensi 3 kHz = 13,62% frekuensi rata-rata pada 3 kHz dan pada 5

kHz = 28,61% pada frekuensi tengah 5,5 kHz. rata-rata medan magnet maksimum diukur pada tingkat frekuensi 1 kHz = 33,91 μ T, tingkat frekuensi 3 kHz 12,97 μ T dan tingkat frekuensi 5 kHz = 5,21 μ T. Nilai rata-rata medan magnet adalah diukur di bawah 0,2mT, jadi memakainya aman untuk tubuh manusia (Wayan Suwika Adnyana et al., 2016)

Energi listrik merupakan salah satu sumber energi yang sangat dibutuhkan oleh masyarakat. Energi listrik dalam penyaluran kepusat-pusat beban menggunakan saluran mulai dari saluran bertegangan tinggi sampai saluran bertegangan rendah. Salah satu konsep penyaluran energi listrik yang masih dalam tahap riset yaitu transfer daya nirkabel. Transfer nirkabel adalah suatu konsep untuk menghantarkan atau mengirimkan energi tanpa menggunakan kabel. Tetapi kendala yang saat ini sedang terjadi, yaitu masih rendahnya presentase output efisiensi dari rangkaian transmitter, sehingga dibutuhkan penyempurnaan dan perbaikan agar efisiensi dapat terus ditingkatkan.

Eksperimen (Muchtar, 2013) transfer listrik nirkabel telah dilakukan di lab teknik tenaga listrik akademi teknik industri Makassar. Fokus dari tulisan ini adalah untuk menemukan kemungkinan menggunakan sistem transfer daya nirkabel untuk bola lampu hemat energi secara nirkabel. Riset metodologi terdiri dari studi literatur, sirkuit desain, konstruksi dan pengujian. Pemancar frekuensi osilator diatur ke 1,645 MHz. hasil menunjukkan bahwa daya yang diterima berbanding terbalik dengan jarak antara pemancar dan penerima. alih-alih mentransfer listrik dari pemancar ke penerima, pemancar mampu menyalakan energi 10 watt hemat bohlam secara nirkabel.

Telah dilakukan pengujian material dan diameter kumparan pada rangkaian transfer listrik tanpa kabel dengan prinsip resonansi. Pengujian (Pynanjung et al., 2019) meliputi perancangan rangkaian dan pengujian nilai persentase amplitudo tegangan puncak ke puncak pada kumparan. Tegangan referensi yang diberikan pada rangkaian uji coba transfer listrik yaitu sebesar ± 7 Volt dan frekuensi yang diberikan oleh rangkaian osilator $\pm 1,35$ MHz. berdasarkan pengujian kumparan, kemudian dilakukan optimasi pada rangkaian transfer listrik dengan menggunakan kumparan tembaga berdiameter 32 cm.

Kumparan pada rangkaian transmitter dibuat Center tapped dengan jumlah lilitan sebanyak 24 lilitan dan kumparan receiver 12 lilitan. rangkaian ini mampu menghidupkan sebuah lampu LED sejauh 50 cm dengan tegangan referensi yang diberikan sebesar ± 12 Volt dan frekuensi yang diberikan oleh rangkaian osilator $\pm 107,105$ kHz.

2.2 Wireless Power Transfer

Wireless Power Transfer adalah suatu proses transmisi energi listrik yang tidak menggunakan kabel sebagai medium transfer listrik, tetapi menggunakan medan listrik, magnet, atau medan magnet sebagai medium untuk proses transfer energi listrik. Sistem wireless power transfer ini sangat berguna untuk menyalakan perangkat listrik dimana kondisi interkoneksi dari kabel tidak nyaman, atau berbahaya, juga lebih sederhana karena tidak adanya kabel sebagai medium.

2.2.1 Sejarah Perkembangan Wireless Power Transfer

Sejarah teknologi Wireless Power Transfer (WPT) dimulai dengan penemuan oleh ilmuwan dan penemu terkenal, Nikola Tesla. Selama hidupnya, Tesla menciptakan berbagai penemuan penting yang menjadi fondasi bagi banyak teknologi modern, termasuk elektromagnetik, arus bolak-balik (AC), radio, sinar-X, motor AC, dan distribusi daya polyphase. Dalam upayanya untuk mengembangkan WPT, Tesla menciptakan alat yang dikenal sebagai Tesla coil, yang mampu mengirimkan tegangan hingga 1 MV pada jarak 26 mil, cukup untuk menyalakan 200 lampu bohlam dan satu motor listrik. Namun, karena kekhawatiran akan potensi bahaya dari penemuan ini terhadap keselamatan lingkungan sekitar, penelitian tersebut terpaksa dihentikan. Beberapa waktu kemudian, ilmuwan Jerman Heinrich Hertz melanjutkan penelitian ini dan berhasil menyempurnakan eksperimen yang telah dilakukan oleh Tesla. (Zaldy, 2018).

Pada tahun 2007, sekelompok ilmuwan dari MIT yang dipimpin oleh Marin Soljačić mengembangkan sistem Wireless Power Transfer (WPT) menggunakan konsep "strongly coupled magnetic resonance". Dalam percobaan ini, mereka menggunakan dua koil yang dihubungkan dengan tegangan beresonansi,

menghasilkan medan elektromagnet yang cukup kuat. Hasilnya, tim tersebut berhasil mentransmisikan daya sebesar 60 watt dengan efisiensi sekitar 40% pada jarak 2 meter. Penelitian ini dikenal dengan nama WiTricity, yang menggabungkan teori resonansi dan kopling induktif, atau resonansi kopling induktif (RIC). Konsep resonansi ini berfungsi untuk meningkatkan efisiensi dan memperluas jarak transmisi energi antara pengirim dan penerima dengan frekuensi yang sama, dengan rentang frekuensi antara 1 MHz hingga 10 MHz (Saputra, 2017).

2.2.2 Prinsip Kerja Wireless Power Transfer

Prinsip kerja dari teknologi transfer energi nirkabel mirip dengan cara kerja transformator. Proses transfer energi dimulai ketika sumber tegangan mengalirkan arus bolak-balik ke rangkaian pengirim, yang kemudian menghasilkan medan magnet di sekitar kumparan pengirim. Medan magnet yang dihasilkan ini menciptakan garis-garis gaya magnet. Selanjutnya, kumparan penerima harus berada dalam area garis gaya medan magnet tersebut agar dapat menginduksi arus listrik. Dengan demikian, energi dapat ditransfer dari kumparan pengirim ke kumparan penerima melalui induksi elektromagnetik (Saputra, 2017).

Pada rangkaian pengirim, terjadi perubahan tegangan yang menyebabkan variasi medan listrik di dalam rangkaian tersebut. Perubahan medan listrik ini seiring waktu menghasilkan fluks magnetik yang berubah di sekitar kumparan pemancar. Fluks magnetik yang berfluktuasi ini menginduksi medan magnet pada kumparan penerima. Akibatnya, medan magnet yang berubah-ubah pada kumparan penerima menghasilkan medan listrik dan menciptakan tegangan induksi dalam rangkaian kumparan penerima.

2.3 Tranmisi Energi Listik Tanpa Kabel

Transmisi daya listrik nirkabel mewakili terobosan signifikan dalam metode distribusi energi dengan memanfaatkan media udara atau jalur nirkabel. Konsep ini melibatkan mentransfer energi listrik dari sumber tenaga ke beban yang berjauhan tanpa memerlukan kabel atau saluran fisik. Salah satu pionir utama dalam pengembangan transmisi daya nirkabel adalah ilmuwan Serbia-Amerika, Nikola Tesla, yang pada tahun 1889 mengusulkan penggunaan gelombang radio

untuk menghantarkan listrik. Eksperimen Tesla yang terkenal mencakup prestasinya menyalakan ratusan bola lampu pada jarak 26 mil, membuktikan potensi revolusioner dari konsep transmisi daya nirkabel.

Konsep dasar di balik transmisi daya nirkabel adalah mengonversi arus listrik menjadi gelombang elektromagnetik dengan radiasi yang luas. Tesla berhasil menunjukkan bahwa gelombang elektromagnetik yang dihasilkan dapat menghasilkan tegangan listrik di penerima, mengikuti prinsip dasar percobaan Faraday yang mengungkapkan bahwa arus listrik dapat dihasilkan oleh gelombang elektromagnetik yang mengalami perubahan arah dari waktu ke waktu.

Prinsip dasar dalam transmisi daya nirkabel berkaitan erat dengan fenomena resonansi. Resonansi terjadi ketika suatu objek mengalami getaran sebagai respons terhadap getaran dari objek lain yang memiliki frekuensi yang sama. Dalam konteks transmisi daya nirkabel, prinsip ini dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi transfer energi antara unit pengirim (transmitter) dan penerima (receiver). Dengan memanfaatkan kondisi resonansi, energi dapat ditransmisikan secara lebih efektif melalui medan elektromagnetik tanpa kontak fisik langsung. Teknologi ini terus dikembangkan untuk menjawab kebutuhan energi di masa depan yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Seiring dengan kemajuan teknologi, diharapkan bahwa sistem transmisi daya nirkabel akan semakin luas diterapkan di berbagai sektor, seperti elektronik konsumen, kendaraan listrik, dan perangkat medis. Selain itu, dalam sistem transmisi daya nirkabel berbasis antenna, distribusi medan listrik dan medan magnet memberikan gambaran mengenai intensitas dan arah masing-masing medan di sekitar antenna saat memancarkan atau menerima gelombang elektromagnetik. Medan listrik biasanya tegak lurus terhadap sumbu antenna dan memiliki intensitas paling tinggi di sekitar elemen utama antenna. Sebaliknya, medan magnet sejajar dengan sumbu antenna dan menunjukkan intensitas terbesar di bagian ujung antenna. Pemahaman terhadap distribusi kedua medan ini sangat penting dalam merancang sistem transmisi yang optimal.

Distribusi medan ini tergantung pada jenis antenna, frekuensi operasi, dan geometri antenna. Pengukuran distribusi dilakukan menggunakan alat ukur khusus,

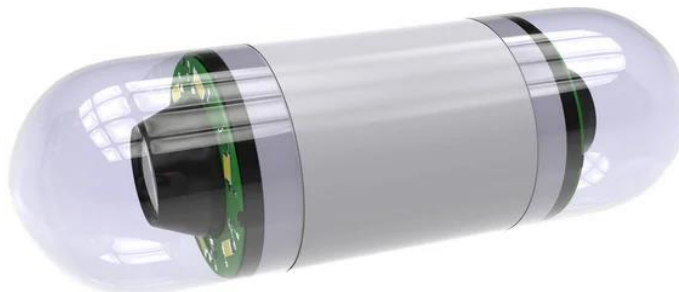
dan analisisnya membantu dalam desain antenna, optimasi kinerja antenna, dan prediksi gangguan elektromagnetik. Memahami distribusi medan listrik dan medan magnet pada antenna penting bagi para insinyur dan peneliti di bidang telekomunikasi, radar, dan elektronika (Sulawesi, 2018).

Jaringan Wireless LAN dan Wireless Charger merupakan dua contoh teknologi nirkabel yang menawarkan solusi konektivitas praktis dan modern. Wireless LAN memungkinkan pengguna untuk berbagi sumber daya dan terhubung ke internet dengan mudah, sementara Wireless Charger memberikan kemudahan dan estetika dalam pengisian daya perangkat elektronik. Seiring perkembangan teknologi, kita dapat menantikan solusi nirkabel yang lebih inovatif dan bermanfaat di masa depan (Arianto, 2009).

2.3.1 Aplikasi Transmisi Energi Listrik

Aplikasi transmisi tenaga listrik tanpa kabel dapat kita temukan di berbagai perangkat yang digunakan, seperti kapsulendoskopik dalam kedokteran, atau mobil listrik dalam dunia otomotif, dimana sistem pengisian baterai listrik menggunakan sistem transmisi tenaga tanpa kabel.

Endoskopi kapsul adalah alat kecil, biasanya berupa kapsul obat. Ada sensor, baterai, kamera, dan sirkuit elektronik berukuran mikro lainnya. Kapsul endoskopi digunakan untuk mendiagnosis penyakit pada saluran pencernaan. Kapsul endoskopi dilengkapi dengan sistem transmisi energi listrik nirkabel. Struktur kapsul endoskopi terdiri dari kumparan sebagai penerima arus, rangkaian penyearah dan rangkaian pengatur tegangan.



Gambar 2. 1 Kapsul Endoskopi

Penerapan lainnya adalah ide kendaraan yang pengisian energinya menggunakan sistem transfer energi nirkabel. Aki kendaraan dihubungkan ke penerima yang ditempatkan di bawah kendaraan. Saat mengisi daya, mobil menempatkannya sejajar dengan pemancar sebagai saluran listrik yang sejajar dengan tanah.



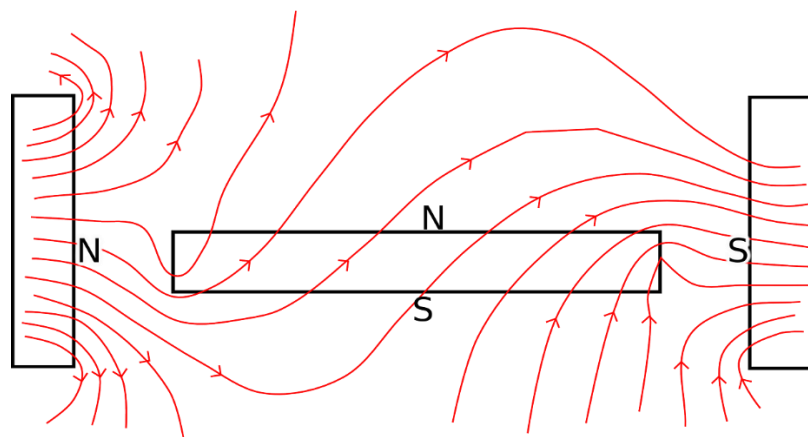
Gambar 2. 2 Pengisian Energi Mobil Listrik

2.4 Medan Elektromagnetik

Dalam kajian elektromagnetisme, medan elektromagnetik merupakan hasil interaksi antara dua medan vektor, yaitu medan listrik (E) dan medan magnet (B). Medan listrik muncul akibat keberadaan muatan listrik, sementara medan magnet dihasilkan dari pergerakan muatan atau arus listrik. Kedua medan ini bersifat vektor, memiliki arah dan besar, serta nilainya dapat berubah terhadap ruang dan waktu. Apabila hanya terdapat medan listrik yang tidak berubah terhadap waktu dan tidak disertai oleh medan magnet, maka kondisi tersebut disebut sebagai medan elektrostatik. Sebaliknya, ketika muatan bergerak menghasilkan arus listrik, maka akan muncul medan magnet di sekitarnya. Dengan demikian, medan elektromagnetik mencerminkan fenomena fisika yang kompleks dan dinamis dalam ruang-waktu (Experimental, n.d.)

Hubungan antara medan listrik dan medan magnet dijelaskan secara kuantitatif melalui persamaan Maxwell, yang menjadi dasar utama dalam teori elektromagnetik modern. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan pada salah satu medan dapat menimbulkan medan lainnya, sehingga

memungkinkan terbentuknya gelombang elektromagnetik yang dapat merambat dalam ruang tanpa medium, seperti cahaya, gelombang radio, dan sinyal nirkabel. Pemahaman konsep ini sangat penting dalam berbagai penerapan teknologi, termasuk sistem Wireless Power Transfer (WPT) berbasis induksi magnetik, yang memanfaatkan kopling medan untuk mentransfer energi listrik secara nirkabel. Teknologi ini telah diterapkan dalam berbagai bidang, seperti pengisian daya perangkat elektronik, kendaraan listrik, serta peralatan medis.



Gambar 2. 3 Gelombang Elektromagnetik

Dalam teknologi Wireless Power Transfer (WPT), medan elektromagnetik digunakan sebagai medium untuk mentransfer energi tanpa kabel, memungkinkan energi ditransmisikan dari pemancar ke penerima. Pemahaman tentang sifat dasar medan ini sangat penting untuk mengoptimalkan transfer energi dan memastikan efisiensi serta keamanan aplikasi WPT (Salsabila Aulia et al., 2024).

2.5 Jenis-Jenis Wireless Power Transfer

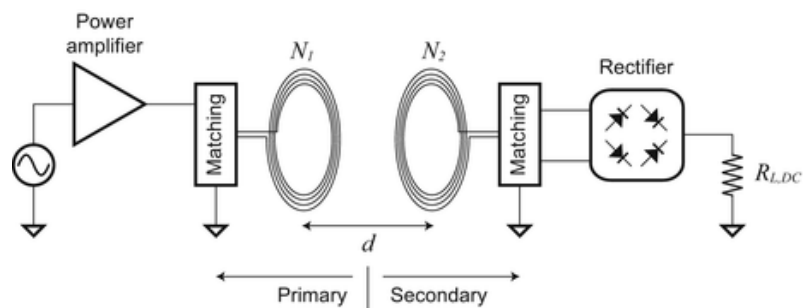
Wireless Power Transfer (WPT) terbagi menjadi beberapa bagian sesuai dengan klasifikasinya, yaitu :

a. Medan dekat (near-field) disebut *Non-radiative Techniques*

Pada jenis non-radiatif (jarak dekat) energi listrik ditransmisikan menggunakan medan magnet yang terdapat pada kopling induktif antara 2 kawat tembaga, atau menggunakan medan listrik yang terdapat pada kopling kapasitif antara elektroda logam. Pada realitanya kopling induktif lebih banyak digunakan

untuk melakukan proses wireless power transfer, diantaranya yaitu wireless charging, RFID, dan lainnya.

Transfer daya nirkabel nonradiatif bergantung pada kopling magnetik medan dekat dari loop konduktif. Energi ditransfer melalui jarak yang relatif pendek, yang merupakan urutan dimensi (seperti jari-jari atau diameter) dari koil yang digabungkan. Pemindahan daya radiasi bergantung pada eksitasi frekuensi tinggi dari sumber daya, dan daya radiasi dipancarkan dari antenna yang menyebar melalui media (seperti vakum atau udara) dalam jarak jauh (yaitu berkali-kali lebih besar dari dimensi antenna) dalam bentuk gelombang elektromagnetik (Zaldy, 2018).



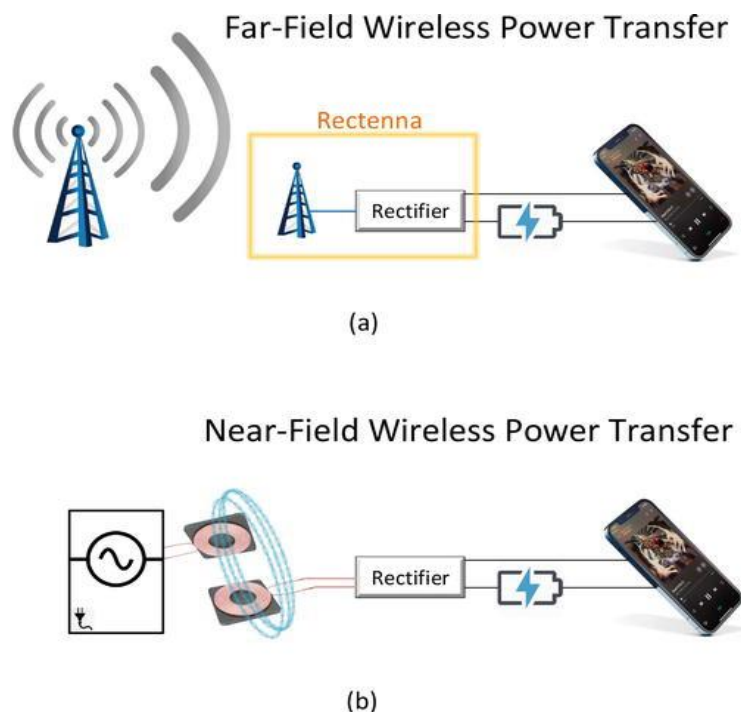
Gambar 2. 4 Near-field Wireless Power transfer

Konsep "osilasi trafo" melampaui prinsip induksi magnetik murni, dan lebih tepatnya, mengacu pada penggunaan resonansi magnetik antara dua resonator koil yang digabungkan secara magnetis. Kombinasi penggunaan induksi magnetik, sirkuit yang disetel, dan frekuensi operasi resonansi telah menjadi tema umum dalam penyelidikan daya nirkabel dan radionya. Penggunaan frekuensi resonansi adalah untuk mengurangi kebocoran impedansi jalur aliran daya. Kopling induktif adalah dasar dari teknologi Wireless Power Transfer (WPT), yang memungkinkan pengiriman energi listrik antara dua kumparan melalui induksi medan magnet. Dalam mekanisme ini, kumparan pemancar menciptakan medan magnet yang bervariasi, yang kemudian melintasi kumparan penerima. Ketika kumparan penerima berada dalam jangkauan medan magnet tersebut, arus listrik diinduksi di dalamnya, menghasilkan tegangan yang dapat digunakan untuk mengisi daya perangkat nirkabel atau sistem penyimpanan energi (Nurdiansari et al., 2022).

b. Medan jauh (power beaming) atau *Radiative techniques*

Energi listrik pada jenis radioaktif (jarak jauh) ditransmisikan menggunakan radiasi elektromagnetik seperti gelombang mikro atau laser. Proses ini mampu menjangkau jarak yang jauh, namun memerlukan penerima sebagai tujuan dari transmisi tersebut (Zaldy, 2018). Energi dalam mode near-field berkurang berdasarkan timbal balik pangkat tiga dari jarak pengisian, sedangkan dalam mode far-field, energi berkurang mengikuti hukum kuadrat kebalikan dari jarak. Meskipun radiasi gelombang mikro beroperasi pada jarak jauh, penyerapan radiasi dalam teknik far-field tidak mempengaruhi pemancar (Lampung, 2018).

Dengan beberapa teknik tersebut, wireless transfer energy memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihannya adalah perangkat elektronik lebih nyaman digunakan dengan menghilangkan kebutuhan akan pemakaian kabel listrik sehingga kecil kemungkinan akan terjadinya kegagalan daya yang disebabkan short circuit. Sedangkan kelemahannya adalah dapat menyebabkan gangguan pada sistem komunikasi, realisasi dalam skala besar membutuhkan biaya yang cukup mahal serta efisiensinya masih tergolong cukup rendah.



Gambar 2. 5 WPT Far Field & Near Field

2.6 Induksi Elektromagnetik

Induksi elektromagnetik merupakan peristiwa timbulnya gaya gerak listrik (GGL) pada suatu penghantar atau kumparan akibat perubahan garis – garis gaya magnet. Faraday dalam percobaannya menemukan bahwa medan magnet yang berubah – ubah nilai fluksnya dapat menghasilkan arus listrik. Percobaan Faraday menggunakan magnet batang yang digerakkan keluar – masuk sebuah kumparan. Jarum galvanometer digunakan sebagai indikator ada tidaknya arus yang mengalir. Jika jarum galvanometer bergerak dan mengalami penyimpangan maka pada kumparan terdapat arus listrik yang mengalir.

Berdasarkan percobaan yang dilakukannya, Faraday menyimpulkan bahwa medan magnet konstan tidak dapat menghasilkan arus listrik, namun perubahan fluks medan magnetik di dalam suatu rangkaian bahan penghantar atau kumparan akan menimbulkan tegangan induksi pada rangkaian tersebut (hukum faraday). Besar tegangan induksi dinyatakan dalam persamaan:

$$\varepsilon_{induksi} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

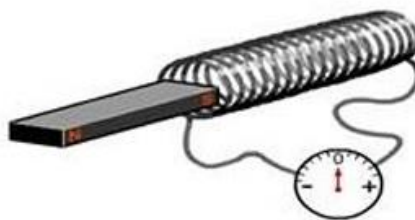
Keterangan :

$\varepsilon_{induksi}$ = Gaya gerak listrik induksi (Volt)

N = Jumlah lilitan

$d\Phi$ = Perubahahn garis gaya (weber)

dt = Selang waktu (detik)



Gambar 2. 6 Percobaan Michael Faraday

Tanda negatif menunjukkan bahwa gaya gerak listrik induksi selalu menghasilkan arus yang menciptakan medan magnet yang berlawanan dengan

sumber perubahan fluks magnetik, sesuai dengan Hukum Lenz. Fluks magnetik (Φ) adalah ukuran kerapatan garis-garis gaya dalam medan magnet. Ketika fluks magnetik berada pada permukaan yang lebih luas, kerapatan garis gaya dalam magnet menjadi lebih rendah, sehingga kekuatan medan magnet (B) menjadi lebih lemah. Sebaliknya, pada permukaan (A) yang lebih sempit, kerapatan garis gaya dalam magnet meningkat, yang mengakibatkan kekuatan medan magnet (B) menjadi lebih tinggi (Lampung, 2018).

Besar fluks magnetik dinyatakan dalam persamaan:

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos \theta \text{ (Weber)}$$

Φ = fluks magnetik (Wb)

B = induksi magnet (T)

A = luas penampang (m^2)

θ = sudut apit terkecil antara arah induksi magnetik B dengan arah normal bidang

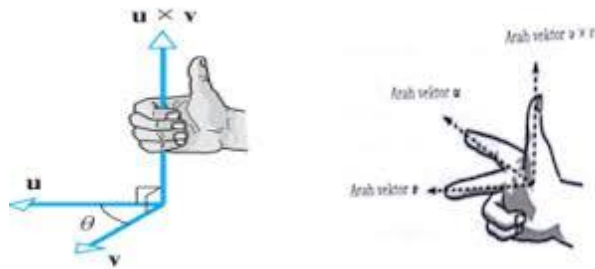
Biot-Savart menjelaskan bahwa medan magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik adalah proses induktansi. Peristiwa ini adalah kebalikan dari induksi elektromagnetik. Dalam sebuah rangkaian yang memiliki nilai induktansi biasanya terdapat induktor di dalamnya. Induktor merupakan komponen elektronika pasif yang menyimpan energi dalam medan magnet.

Induktansi dapat terjadi pada sebuah kumparan secara sendiri saat terjadi perubahan arus yang terjadi secara konstan. Induktansi juga dapat terjadi pada dua buah kumparan yang saling berdekatan. Hal tersebut terjadi jika salah satu kumparan dialiri arus listrik sehingga menimbulkan fluks magnet. Fluks magnet yang dihasilkan akan merambat ke kumparan lainnya dan menghasilkan medan magnet yang menimbulkan gaya gerak listrik induksi. Induktansi ini dapat disebut induktansi bersama (*mutual inductance*) (Lampung, 2018).

2.7 GGL (Gaya Gerak Listrik)

Gaya gerak listrik (GGL) adalah gaya gerak listrik yang dihasilkan dari perubahan jumlah garis gaya magnet. Gerakan ggl induksi yang dihasilkan direpresentasikan dengan aturan tangan kanan, saat telapak tangan dibuka

sehingga ibu jari dan keempat jari lainnya saling tegak lurus (900), maka ibu jari menunjukkan arah gerakan konduktif (F), sedangkan garis yang melewati telapak tangan kanan adalah garis medan (Φ) dan keempat jari lainnya menunjukkan arah terjadinya ggl induksi.



Gambar 2. 7 Kaidah Tangan Kanan

Dalam konteks WPT, kumparan transmiter yang dialiri arus bolak-balik (AC) menghasilkan medan magnet variabel yang memotong kumparan penerima; menurut hukum Faraday, perubahan fluks ini menimbulkan tegangan terinduksi yang kemudian digunakan untuk memasok beban

2.8 Induktansi

Induksi (L) adalah fenomena yang terjadi akibat medan magnet yang terbentuk di sekitar konduktor yang dialiri arus. Ketika arus listrik mengalir melalui konduktor, medan magnet yang dihasilkan sebanding dengan besarnya arus tersebut. Perubahan dalam arus menyebabkan perubahan medan magnet, yang menghasilkan gaya elektromotif (GGL) induksi yang bersifat menentang perubahan arus tersebut. Induktansi diukur berdasarkan jumlah gaya elektromotif yang dihasilkan untuk setiap perubahan arus terhadap waktu.

Secara matematis, induktansi pada suatu induktor dengan jumlah lilitan N dapat dinyatakan sebagai akumulasi fluks magnet untuk setiap arus yang melewatinya :

$$L = N \Phi i$$

Keterangan :

L = Induktansi (H)

N = Jumlah banyak lilitan

Φ = Fluks magnet (Wb)

I = Arus (Ampere)

Untuk menentukan nilai induktansi suatu induktor ada beberapa hal yang harus diperhatikan yaitu:

1. Jumlah putaran pada kumparan (N)

Nilai induktansi berbanding lurus dengan banyak jumlah lilitan pada kumparan. Semakin banyak jumlah lilitan pada kumparan akan menghasilkan induktansi yang lebih besar begitu juga sebaliknya. Jumlah lilitan pada kumparan menghasilkan gaya medan magnet yang berbanding lurus.

2. Luas penampang kumparan (A)

Luas penampang kumparan berbanding lurus dengan nilai induktansi pada kumparan. Semakin besar luas penampang kumparan maka nilai induktansinya akan semakin besar begitu juga sebaliknya. Luas penampang memengaruhi sebaran fluks magnet yang melaluinya.

3. Panjang kumparan (l)

Nilai induktansi berbanding terbalik dengan panjang kumparan. Semakin panjang kumparan yang digunakan maka semakin kecil nilai induktansi yang dihasilkan begitu juga sebaliknya. Panjang kumparan mempengaruhi fluks magnet karena terdapat hambatan pada kumparan.

4. Bahan inti (μ)

Bahan inti dengan permeabilitas magnet yang besar mampu menghasilkan fluks medan magnet yang lebih besar.

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l}$$

Keterangan :

L = Induktansi

N = Jumlah Lilitan

μ = Permeabilitas

A = Luas Penampang

l = Panjang Lilitan

Permeabilitas magnet adalah kemampuan suatu material untuk mendukung pembentukan medan magnet di dalamnya. Dalam konteks Wireless Power Transfer (WPT) berbasis induksi magnetik, permeabilitas material di sekitar kumparan, termasuk inti magnetik, memengaruhi kekuatan medan magnet dan efisiensi transfer daya.

Material dengan permeabilitas magnet yang tinggi, seperti ferit, dapat memperkuat medan magnet di antara kumparan pengirim dan penerima, sehingga meningkatkan induksi elektromagnetik. Sebaliknya, jika material memiliki permeabilitas rendah (seperti udara), medan magnet menjadi lebih lemah, dan efisiensi transfer daya berkurang. Dalam desain WPT, penggunaan material inti dengan permeabilitas tinggi pada kumparan pengirim dan penerima sering diterapkan untuk meningkatkan kopling magnetik dan mengurangi kerugian daya akibat disipasi medan magnet di sekitarnya. Faktor ini sangat penting untuk memastikan daya dapat ditransfer secara optimal pada jarak tertentu (Cahya Baswara & Sari, 2022).

Tabel 2. 1 Tabel rumus induktansi

Konstruksi	Rumus	Keterangan
Lilitan Silinder	$L = \frac{\mu_0 \cdot K \cdot N^2 \cdot \pi \cdot r^2}{l}$	L= Induktansi μ_0 = Permeabilitas vakum K =Konstanta Nagaoka N =Jumlah lilitan r = Jari-jari lilitan l = Panjang lilitan
Kawat Lurus	$L = 200 \cdot l \left(\ln \frac{4l}{d} - 1 \right) \cdot 10^{-9}$	L = Induktansi l = Panjang kawat d = Diameter kawat

Lilitan Silinder Pendek Berinti Udara	$L = \frac{r^2 \cdot N^2}{9r + 10l}$	L = Induktansi (μH) r = Jari-jari lilitan (in) l = Panjang lilitan (in) N = Jumlah lilitan
Lilitan berlapis-lapis berinti udara	$L = \frac{0,8r^2 \cdot N^2}{6r + 9l + 10d}$	L = Induktansi (μH) r = Rerata jari-jari lilitan (in) l = Panjang lilitan (in) N = Jumlah lilitan D = Tebal lilitan (in)
Lilitan spiral datar berinti udara	$L = \frac{r^2 \cdot N^2}{(2r + 2,8d) \times 10^5}$	L = Induktansi r = Rerata jari-jari spiral N = Jumlah lilitan d = Tebal lilitan
Inti Toroid	$L = \mu_0 \cdot \mu_r \frac{r^2 \cdot N^2}{D}$	L = Induktansi μ ₀ = Permeabilitas vakum μ _r = Permeabilitas solenoid bahan inti N = Jumlah lilitan R = Jari-jari gulungan D = Diameter keseluruhan

Induktansi juga dapat dibedakan menjadi dua jenis:

2.8.1 Induktansi Sendiri

Induktansi sendiri adalah kemampuan kumparan untuk menghasilkan GGL akibat perubahan arus dalam dirinya sendiri. Nilai induktansi dapat ditentukan dengan rumus :

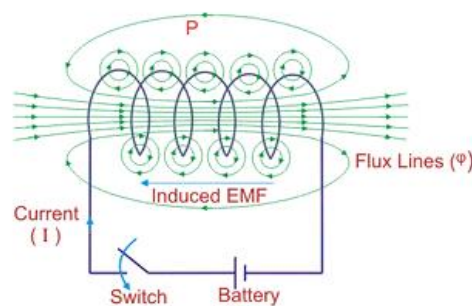
$$V = L \frac{di}{dt}$$

V = Tegangan (Volt)

L = Induktansi (Henry)

di / dt = laju perubahan arus terhadap waktu (A/s)

Dimana V adalah gaya gerak listrik (Volt) yang ditimbulkan dan di adalah arus listrik (ampere) yang berubah – ubah. Bentuk paling sederhana dari persamaan induktansi sendiri terjadi saat arus berubah secara konstan terhadap waktu sehingga gaya gerak listrik yang dihasilkan konstan.

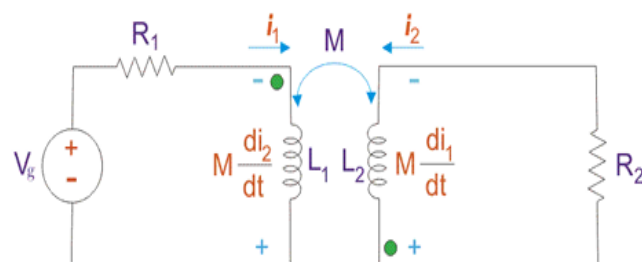


Gambar 2. 8 Rangkaian Induktansi Sendiri

2.8.2 Induktansi Bersama

Induktansi bersama timbul apabila dua buah kumparan yang berarus saling berdekatan. Induktansi timbal balik atau mutual induktansi memiliki hubungan yang erat dengan induktansi diri dan koefisien kopling. Ketiganya menyatakan hubungan antara kumparan itu dengan dirinya sendiri dan kumparan itu dengan kumparan yang lain (Tri et al., 2023).

induktansi bersama adalah fenomena di mana satu kumparan mempengaruhi kumparan lain yang berdekatan melalui fluks magnetik.



Gambar 2. 9 Rangkaian Induktansi Bersama

Proses terjadinya induktansi bersama ketika kumparan N1 dialiri arus maka akan timbul fluks magnetik. Fluks magnetik pada kumparan N1 akan merambat ke kumparan N2 dan menimbulkan induksi elektromagnetik pada kumparan N2. Fluks magnetik pada kumparan N2 akan menghasilkan gaya gerak listrik induksi pada kumparan N2.

Ketika arus (i_1) mengalir melalui L1 maka di sekeliling L1 akan timbul fluks magnetik (ϕ). Fluks magnetik yang dihasilkan oleh L1 akan menginduksi L2 sehingga timbul tegangan dan arus listrik. Besar induktansi bersama ini dapat dihitung dengan persamaan :

$$M = \frac{\mu_0 \mu_r L_1 L_2 A}{l}$$

M = induktansi timbal balik kedua kumparan

μ_0 = permeabilitas ruang bebas

μ_r = permeabilitas relatif inti besi lunak

L = jumlah lilitan pada kumparan

A = luas penampang dalam (m^2)

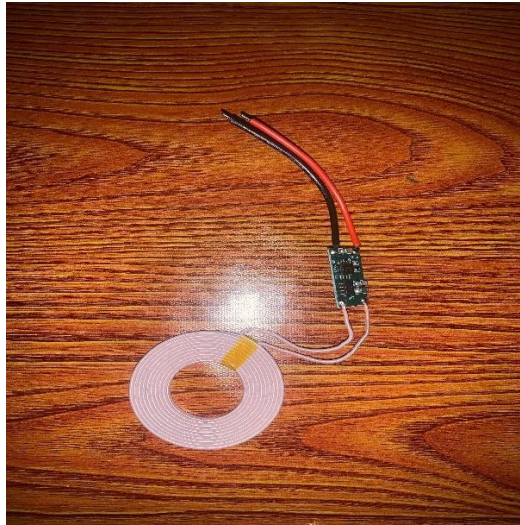
l = panjang kumparan (m)

Dimana μ adalah permeabilitas udara yang memisahkan kedua induktor, merupakan permeabilitas bahan inti induktor, L_1 dan L_2 adalah jumlah lilitan induktor 1 dan induktor 2, sedang A merupakan luas penampang induktor dan l adalah panjang induktor.

2.9 Pengirim (*Transmitter*)

Transmitter merupakan bagian yang paling penting dalam system transfer energi tanpa kabel, jika tidak ada rangkaian pemancar maka sebuah tegangan dari supply tidak dapat ditransmisi/hantarkan tanpa menggunakan kabel. Pada system transfer energi tanpa kabel, ini untuk memancarkan gelombang digunakanlah sebuah rangkaian osilasi yaitu rangkaian royer oscillator. Pemilihan rangkaian osilasi ini karena kebutuhan untuk penggunaan daya yang besar, serta dengan

menggunakan rangkaian ini tidak membutuhkan rangkaian penguat Radio Frequency (RF).



Gambar 2. 10 Rangkaian Transmitter

Penggunaan osilator yang memiliki daya kecil memerlukan penguatan tambahan agar sistem pengiriman energi dapat berfungsi dengan baik. Meskipun demikian, setiap jenis osilator memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Bagian LC dalam osilator merupakan komponen yang sangat penting, karena perubahan pada elemen ini akan memengaruhi frekuensi osilasi yang dihasilkan. Dalam desain LOOP, yang berfungsi sebagai induktor, bentuknya tidak berupa lilitan melainkan selubung tembaga yang dibentuk sedemikian rupa. Sementara kawat pejal juga dapat digunakan, jika diameter dan nilai induktansinya sama, maka kawat pejal akan menghasilkan ukuran yang lebih kecil. Namun, penggunaan kawat pejal cenderung menyebabkan peningkatan panas dibandingkan dengan menggunakan selubung tembaga. Oleh karena itu, loop tembaga berselubung menjadi pilihan yang lebih baik untuk merancang komponen pemancar (transmitter) dan penerima dalam sistem ini (Lampung, 2018).

2.9.1 Power Supply

Power supply adalah perangkat elektronik yang menyediakan dan mengatur energi listrik untuk menjalankan sistem atau perangkat. Secara umum, power supply mengubah energi listrik dari sumber, seperti listrik AC dari jaringan atau

baterai DC, menjadi bentuk yang sesuai dengan kebutuhan perangkat. Hal ini memastikan perangkat dapat berfungsi dengan stabil dan aman.

Sumber listrik (power source) yang digunakan pada penelitian ini berasal dari power supply. Power supply mampu menghasilkan daya yang fleksibel, sehingga daya bisa diatur sesuai kebutuhan penelitian (Kristiyono & Supriyanto, 2020). Power supply bertugas memberikan energi listrik kepada rangkaian transmitter, yang kemudian mengubah energi listrik tersebut menjadi medan magnet osilasi melalui kumparan pengirim.

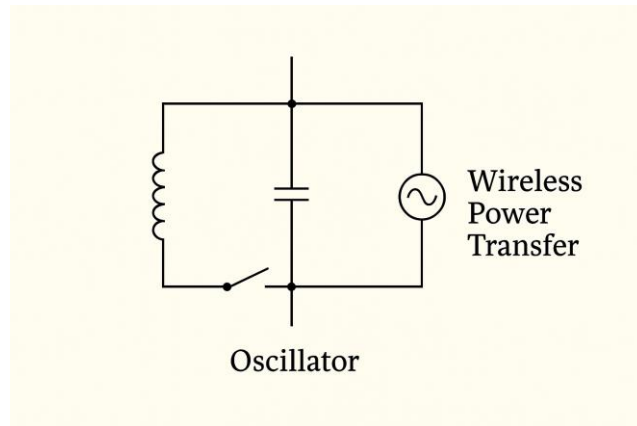


Gambar 2. 11 Power Supply

Efisiensi transfer daya juga dipengaruhi oleh kualitas power supply. Dengan pengaturan yang tepat, seperti penyesuaian frekuensi kerja yang sesuai dengan resonansi sistem, power supply membantu meminimalkan kehilangan energi. Dengan fungsi-fungsi tersebut, power supply menjadi komponen kunci dalam memastikan keberhasilan dan efisiensi sistem WPT berbasis induksi magnetik. Tanpa power supply yang dirancang dan diatur dengan baik, transfer daya nirkabel tidak akan berjalan secara optimal.

2.9.2 Rangkaian Osilator

Komponen ini bertugas mengubah tegangan DC dari power supply menjadi sinyal AC dengan frekuensi tinggi. Frekuensi tersebut harus sesuai dengan frekuensi resonansi dari rangkaian LC (induktor dan kapasitor) agar terjadi transfer daya yang efisien. Royer oscillator dipilih karena mampu bekerja pada daya besar tanpa memerlukan penguat RF tambahan.



Gambar 2. 12 Rangkaian Osilator

2.9.3 Kumparan Pengirim (*Transmitter Coil*)

Kumparan atau koil adalah elemen utama yang membangkitkan medan magnet. Arus bolak-balik yang mengalir melalui koil menghasilkan fluks magnetik yang akan menginduksi tegangan pada kumparan penerima. Desain koil, jumlah lilitan, diameter, dan jenis kawat sangat berpengaruh terhadap jangkauan dan efisiensi transfer daya.

2.9.4 Kapasitor Resonansi

Dipasang secara seri atau paralel dengan kumparan, kapasitor ini berfungsi untuk membentuk rangkaian resonansi LC. Ketika frekuensi osilasi sesuai dengan frekuensi resonansi alami dari rangkaian LC, arus dalam kumparan akan maksimal, sehingga medan magnet yang terbentuk juga lebih kuat.



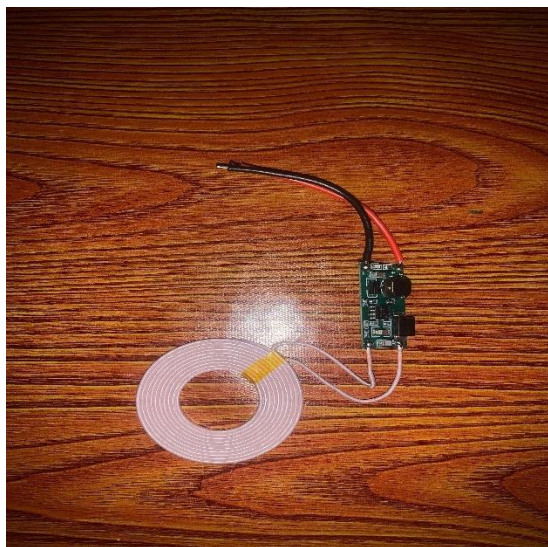
Gambar 2. 13 Kapasitor Resonansi

2.9.5 PCB atau Media Pemasangan

Digunakan sebagai tempat merangkai komponen-komponen transmitter. Dalam penelitianmu, media ini dapat berupa rangkaian sederhana dengan koneksi langsung antar komponen, atau bisa juga menggunakan papan sirkuit cetak (PCB).

2.10 Penerima (*Receiver*)

Receiver pada sistem *Wireless Power Transfer* (WPT) adalah bagian utama yang berfungsi untuk menerima energi listrik dari transmitter melalui mekanisme induksi magnetik. Energi listrik yang diterima oleh kumparan penerima (*receiver coil*) kemudian diubah menjadi bentuk energi listrik yang sesuai untuk mengisi beban, misalnya baterai smartphone. Kualitas dan efisiensi penerimaan energi sangat ditentukan oleh rancangan kumparan penerima, rangkaian penyearah, regulator tegangan, serta karakteristik beban yang digunakan.



Gambar 2. 14 Rangkaian Receiver

2.10.1 Kumparan Penerima (*Receiver Coil*)

Kumparan penerima merupakan komponen pertama yang berfungsi untuk menangkap fluks magnet yang ditransmisikan oleh kumparan pengirim. Prinsip dasar kumparan penerima adalah resonansi elektromagnetik, ketika frekuensi kumparan penerima menyamai transmitter, transfer daya optimal terjadi (Van Mulders et al., 2022). Prinsip kerjanya berdasarkan hukum induksi elektromagnetik Faraday, yaitu perubahan fluks magnet pada kumparan akan menimbulkan tegangan induksi. Tegangan induksi yang dihasilkan sebanding

dengan jumlah lilitan kawat, luas penampang kumparan, serta kekuatan medan magnet yang diterima.

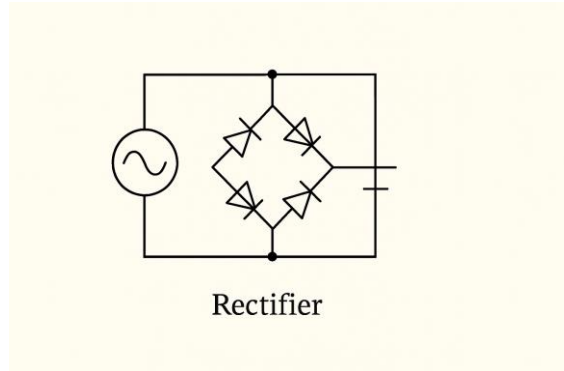
Faktor-faktor yang memengaruhi kinerja receiver coil antara lain:

- **Jumlah Lilitan:** Semakin banyak lilitan kawat, maka semakin besar tegangan induksi yang dapat dihasilkan. Namun, peningkatan jumlah lilitan juga meningkatkan resistansi kawat, sehingga perlu adanya keseimbangan antara jumlah lilitan dan hambatan kawat.
- **Diameter Kawat:** Diameter kawat yang lebih besar (misalnya 0,6–0,75 mm) dapat mengurangi resistansi sehingga arus yang mengalir lebih stabil, namun penggunaan kawat yang terlalu besar akan membuat kumparan menjadi tidak praktis.
- **Orientasi dan Jarak:** Kumparan penerima harus sejajar dengan kumparan pengirim agar fluks magnet yang diterima lebih maksimal. Semakin jauh jarak antara transmitter dan receiver, maka semakin kecil fluks magnet yang dapat ditangkap sehingga tegangan yang dihasilkan akan menurun.

Dengan memperhatikan aspek-aspek tersebut, receiver coil dapat dirancang agar mampu menerima energi secara optimal sesuai kebutuhan sistem.

2.10.2 Rangkaian Penyearah (*Rectifier*)

Tegangan yang dihasilkan oleh receiver coil berupa arus bolak-balik (AC). Untuk dapat digunakan oleh perangkat elektronik modern, tegangan ini harus diubah menjadi arus searah (DC). Proses ini dilakukan melalui rangkaian penyearah.



Gambar 2. 15 Rangkaian Penyearah

Jenis-jenis penyearah yang dapat digunakan pada receiver antara lain:

- *Half-Wave Rectifier*, menggunakan satu dioda untuk menyearahkan setengah siklus gelombang. Rangkaian ini sederhana, tetapi efisiensinya rendah.
- *Full-Wave Rectifier*, menggunakan dua dioda dan transformator dengan tap tengah. Rangkaian ini dapat menyearahkan kedua siklus gelombang, sehingga lebih efisien.
- *Bridge Rectifier*, menggunakan empat dioda dalam konfigurasi jembatan. Rangkaian ini paling umum digunakan karena lebih sederhana dibandingkan full-wave dengan tap tengah, dan dapat menghasilkan keluaran DC yang lebih stabil (Van Mulders et al., 2022).

Pada penelitian ini, modul penyearah sederhana berbasis bridge rectifier digunakan karena mampu menyearahkan tegangan dengan efisiensi yang baik, sesuai kebutuhan untuk pengisian daya perangkat elektronik.

2.10.3 Regulator Tegangan (*Voltage Regulator*)

Tegangan hasil penyearahan pada rangkaian penerima masih mengandung riak (*ripple*) dan nilainya dapat berubah-ubah tergantung kondisi transfer daya, seperti jarak antara kumparan maupun jumlah lilitan yang digunakan. Fluktuasi ini dapat menyebabkan ketidakstabilan daya yang diterima beban, sehingga diperlukan regulator tegangan untuk menstabilkan keluaran agar sesuai dengan spesifikasi perangkat. Salah satu modul regulator yang digunakan dalam

penelitian ini adalah LM2596, yaitu modul *DC-DC step-down converter* yang mampu menurunkan sekaligus menstabilkan tegangan sesuai kebutuhan. Modul ini dapat menjaga keluaran tetap berada pada nilai 5V meskipun tegangan input berfluktuasi, sehingga sangat cocok digunakan untuk mengisi daya *smartphone* yang umumnya membutuhkan tegangan 5V DC (Narusue et al., 2017).



Gambar 2. 16 LM2596 Regulator Voltage

Secara umum, penggunaan *DC/DC converter* (SMPS) lebih efisien dibandingkan *Low Dropout Regulator* (LDO), terutama untuk beban seperti mikrokontroler atau sistem pengisian baterai dengan metode constant voltage/constant current (CV/CC). Namun demikian, penerapan regulator switching di sisi receiver juga dapat menurunkan efisiensi apabila tidak dioptimalkan. Oleh karena itu, diperlukan perancangan yang tepat agar titik operasi tetap stabil sekaligus mampu memaksimalkan efisiensi transfer daya pada sistem *Wireless Power Transfer* berbasis induksi magnetik.

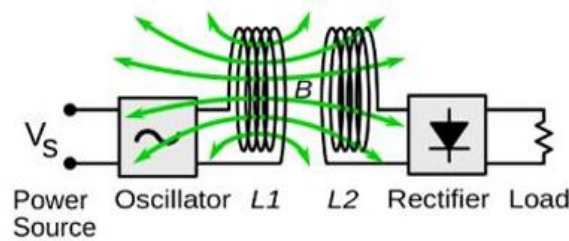
2.10.4 Beban (*Load*)

Bagian terakhir dari receiver adalah beban yang akan menggunakan energi listrik yang ditransfer. Dalam penelitian ini, beban yang digunakan adalah *smartphone*. *Smartphone* memiliki kebutuhan daya tertentu, umumnya tegangan sebesar 5V dan arus sekitar 1–2A untuk pengisian normal.

Oleh karena itu, rangkaian receiver harus mampu menjaga tegangan output pada level yang sesuai standar pengisian *smartphone*. Jika tegangan terlalu rendah, proses pengisian akan menjadi lambat. Sebaliknya, jika tegangan terlalu tinggi, maka dapat merusak sirkuit pengisian internal pada *smartphone*.

2.11 Kopling Induktif

Kopling induksi antara dua kumparan umumnya dikenal melalui prinsip kerja transformator. Ketika kumparan primer menghasilkan gelombang elektromagnetik, energi ini dimanfaatkan untuk mentransfer daya listrik. Hal ini terjadi karena arus yang mengalir melalui kumparan menciptakan fluks magnet. Fluks magnet yang terbentuk pada kumparan primer kemudian diteruskan ke kumparan sekunder. Sebagai penerima energi dalam medan magnet dekat, kumparan sekunder menginduksi tegangan atau arus listrik. Energi ini dapat digunakan untuk mengoperasikan sistem penyimpanan atau perangkat nirkabel. Jika beban memerlukan arus searah (DC), arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan akan diubah menjadi arus searah menggunakan penyearah (Rezeki et al., 2022).



Gambar 2. 17 Kopling Induksi

Sebuah studi membahas metode transfer daya nirkabel berbasis kopling induktif untuk mengisi daya ponsel pada jarak pendek. Penelitian ini menggunakan power pad dengan koil planar tumpang tindih sebagai pemancar, sementara perangkat seluler memiliki koil planar tunggal sebagai penerima, mampu menerima daya hingga 1,2 W. Hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi transfer daya menurun drastis jika jarak udara antara kumparan pengirim dan penerima bertambah atau terjadi ketidaksesuaian posisi kumparan (Wulandari, 2020)

2.12 Resonansi Kopling Induktif

Resonansi kopling induktif pada Wireless Power Transfer (WPT) adalah metode transfer daya listrik secara nirkabel yang memanfaatkan prinsip resonansi elektromagnetik. Proses ini melibatkan dua kumparan utama: kumparan pengirim (primer) dan kumparan penerima (sekunder), yang dirancang untuk beresonansi pada frekuensi tertentu. Resonansi terjadi ketika frekuensi medan magnet yang

dihasilkan oleh kumparan pengirim sama dengan frekuensi alami kumparan penerima.

Frekuensi resonansi dan konfigurasi kumparan sangat penting untuk meningkatkan efisiensi sistem WPT. Saat resonansi tercapai, impedansi menjadi kecil dan bersifat resistif, sehingga arus yang dikirim ke kumparan maksimal. Konfigurasi kumparan juga harus diperhatikan untuk menghasilkan fluks magnet yang optimal. Faktor-faktor seperti jari-jari kumparan, material kumparan, dan nilai induktansi kumparan berpengaruh besar terhadap efisiensi transfer daya (Rifqiana & Wijono, n.d.).

2.13 Frekuensi Transfer Energi

Frekuensi dalam konteks pengiriman tenaga listrik tanpa kabel merujuk pada seberapa sering gelombang listrik atau osilasi energi listrik berubah dalam suatu periode waktu tertentu. Dalam sistem pengiriman tenaga listrik tanpa kabel berbasis mikrokontroler, frekuensi ini sangat penting karena dapat mempengaruhi efisiensi transfer energi, stabilitas sistem, dan respons terhadap perubahan lingkungan atau beban.

Berikut beberapa aspek penting terkait frekuensi dalam konteks pengiriman tenaga listrik tanpa kabel berbasis mikrokontroler:

1. Frekuensi Resonansi

Frekuensi resonansi adalah frekuensi di mana efisiensi transfer energi mencapai puncaknya. Dalam pengiriman tenaga listrik tanpa kabel, sistem sering dirancang untuk beroperasi pada frekuensi resonansi tertentu untuk memaksimalkan efisiensi dan jarak transfer yang dapat dicapai.

2. Pengaruh Induktansi dan Kapasitansi

Frekuensi dalam rumus pengiriman tenaga listrik tanpa kabel sangat dipengaruhi oleh nilai induktansi (L) dan kapasitansi (C). Perubahan nilai induktansi atau kapasitansi dapat memengaruhi frekuensi resonansi dan, oleh karena itu, efisiensi sistem.

3. Penyesuaian Frekuensi

Sistem berbasis mikrokontroler dapat digunakan untuk mengontrol dan menyesuaikan frekuensi operasional. Penggunaan mikrokontroler memungkinkan sistem untuk beradaptasi dengan perubahan lingkungan, mengoptimalkan efisiensi, dan menjaga stabilitas saat terjadi perubahan beban atau kondisi operasional.

4. Stabilitas Sistem

Frekuensi yang stabil penting untuk menjaga kinerja sistem secara keseluruhan. Kontrol yang baik terhadap frekuensi memungkinkan pengiriman tenaga listrik tanpa kabel dengan stabilitas, mengurangi risiko fluktuasi yang dapat merugikan efisiensi sistem.

5. Interferensi dan Gangguan Frekuensi

Frekuensi operasional harus dipilih dengan hati-hati untuk menghindari interferensi elektromagnetik dengan perangkat lain. Sistem berbasis mikrokontroler dapat digunakan untuk mendeteksi dan menanggapi gangguan frekuensi yang dapat mempengaruhi kinerja pengiriman tenaga listrik.

6. Pemantauan dan Pengukuran

Pengukuran frekuensi secara terus-menerus diperlukan untuk memastikan sistem beroperasi pada frekuensi yang diinginkan. Mikrokontroler memainkan peran kunci dalam memantau dan mengontrol frekuensi secara real-time.

Dengan memahami dan mengelola frekuensi secara efektif, sistem pengiriman tenaga listrik tanpa kabel dapat dirancang untuk mencapai keseimbangan optimal antara efisiensi, stabilitas, dan adaptabilitas terhadap berbagai kondisi operasional.

Frekuensi pada pengiriman tenaga listrik tanpa kabel dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{2LC}}$$

Keterangan:

f = frekuensi (Hz)

L = induktansi (H)

C = kapasitansi (F)

π = konstanta pi, yang kurang lebih setara dengan 3.14159.

Rumus di atas didasarkan pada hubungan antara frekuensi, induktansi, dan kapasitansi dalam suatu rangkaian RLC (Resistor, Inductor, dan Capacitor) yang umumnya digunakan dalam sistem pengiriman tenaga listrik tanpa kabel.

Bab III

METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1 Tempat

Dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini dilakukan di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara.

3.1.2 Waktu

Waktu pelaksanaan tugas akhir ini berlangsung dimulai dari Oktober 2024 sampai Februari 2025.

Tabel 3. 1 Waktu Penelitian

NO	Uraian	Bulan							
		Okt	Nov	Jan	Juni	Juli	Agus	Agus	Sep
1	Kajian Literatur								
2	Penyusunan Proposal Penelitian								
3	Penulisan Bab 1 Sampai Bab 3								
4	Pengumpulan Data Rangkaian Wireless Power Transfer								
5	Analisa Data								
6	Seminar hasil								
7	Sidang Akhir								

3.2 Alat dan Bahan

Pada penelitian ini alat dan bahan yang digunakan untuk melakukan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Rangkaian Wireless Power Transfer
2. Power Supply
3. Multimeter
4. Kabel Tembaga
5. Beban (Smartphone)

3.3 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data yang dilakukan untuk memperoleh data primer berupa melakukan pemantauan terhadap jarak dan jumlah lilitan yang diambil dari rangkaian Wireless Power Transfer. Selanjutnya, eksperimen akan dilakukan untuk mengonfirmasi kemampuan Wireless Power Transfer dalam menghasilkan energi. Data pengukuran dan hasil eksperimen ini akan menjadi landasan utama dalam menganalisis efisiensi dan performa Wireless Power Transfer secara keseluruhan. Data yang akan diambil meliputi:

1. Data Jarak (m)
2. Jumlah Lilitan (N)

3.4 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian dari awal hingga akhir saat melakukan pengukuran pada sistem Wireless Power Transfer.

A. Pengaruh Jarak

1. Siapkan Kumparan
2. Atur Kumparan dengan Jarak Yang Berbeda
3. Ukur Tegangan Output
4. Catat Data

B. Pengaruh Jumlah Lilitan

1. Siapkan Kumparan dengan Jumlah Lilitan yang Berbeda
2. Atur jarak
3. Ukur Tegangan Output
4. Catat Data

3.5 Analisa Wireless Power Transfer Berbasis Induksi Magnetik

Analisis yang akan dilakukan dalam rangkaian Wireless Power Transfer ini menggunakan beberapa parameter alat ukur dan alat pengoperasian Wireless Power Transfer seperti berikut:

3.5.1 Rangkaian Wireless Power Transfer

Sistem Wireless Power Transfer (WPT) berbasis induksi magnetik dirancang untuk mentransfer daya listrik tanpa kabel dengan memanfaatkan induksi elektromagnetik. Prinsip kerjanya adalah arus listrik pada kumparan pengirim (transmitter) menciptakan medan magnet, yang kemudian ditangkap oleh kumparan penerima (receiver) untuk menghasilkan energi listrik. Energi ini digunakan untuk menyalakan beban seperti lampu atau mengisi baterai.

Rangkaian WPT terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sumber daya, kumparan pengirim, kumparan penerima, kondensator, dan beban. Sumber daya menyediakan arus listrik ke kumparan pengirim, yang menghasilkan medan magnet saat dialiri arus bolak-balik. Medan magnet tersebut diinduksi oleh kumparan penerima, menghasilkan arus listrik yang dapat digunakan untuk beban.

3.6 Power Supply

Power supply berfungsi sebagai penyedia energi utama dalam sistem WPT. Energi listrik dari power supply dialirkan ke rangkaian transmitter, yang kemudian digunakan untuk menghasilkan medan magnet osilasi. Tanpa power supply yang memadai, sistem tidak dapat beroperasi atau menghasilkan daya yang cukup untuk proses transfer energi. Power supply membantu menciptakan kondisi resonansi optimal pada rangkaian LC dalam transmitter. Resonansi ini penting untuk memaksimalkan transfer energi antara kumparan pengirim dan penerima dengan efisiensi tinggi, terutama pada jarak tertentu.



Gambar 3. 1 Power Supply

Dengan desain yang tepat, power supply dapat meningkatkan efisiensi transfer daya. Misalnya, melalui pengaturan frekuensi keluaran yang sesuai dengan kebutuhan sistem atau optimalisasi arus keluaran untuk meminimalkan kehilangan daya selama proses transfer.

3.7 Modul Wireless Power Transfer (WPT)

Modul Wireless Power Transfer (WPT) yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi sebagai media utama untuk melakukan transfer energi listrik tanpa kabel dari sisi pengirim (transmitter) ke sisi penerima (receiver). Modul ini bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana arus bolak-balik (AC) yang mengalir pada kumparan transmitter menghasilkan medan magnet. Medan magnet tersebut ditangkap oleh kumparan receiver untuk diubah kembali menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk mengisi perangkat elektronik.

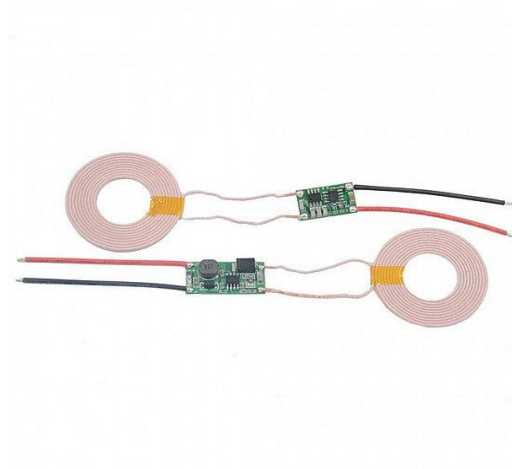
1. Transmitter :

- Terdiri dari rangkaian osilator dan kumparan pengirim.
- Kumparan transmitter menggunakan kawat tembaga enamel dengan variasi jumlah lilitan (20, 30, 40, 50, dan 60 lilitan).
- Sumber daya untuk transmitter berasal dari adaptor DC dengan tegangan input 5V.

2. Receiver :

- Terdiri dari kumparan penerima, rangkaian penyearah (rectifier), dan regulator tegangan.

- Kumputan receiver berfungsi menangkap energi dari transmitter, kemudian mengubahnya menjadi tegangan listrik.
- Tegangan AC yang diterima akan dikonversi menjadi DC melalui penyearah, lalu distabilkan menggunakan regulator agar sesuai dengan kebutuhan beban.
- Pada penelitian ini, modul WPT dirancang menghasilkan tegangan output 5V dengan arus maksimal 2A, sehingga sesuai untuk pengisian daya perangkat smartphone.



Gambar 3. 2 Modul Wireless Charging 5V 2A

Spesifikasi teknis modul WPT yang digunakan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3. 2 Spesifikasi Modul WPT

Komponen Modul WPT	Spesifikasi Utama	Keterangan
Tegangan Input (TX)	5V DC	Sumber dari adaptor USB / power supply
Arus Maksimum	2A	Sesuai spesifikasi modul WPT
Tegangan Output (RX)	5V DC stabil	Digunakan untuk mengisi smartphone
Jarak Transfer Optimal	1 – 5 cm	Efisiensi menurun pada jarak > 5 cm

Diameter Kawat Koil	0,60 mm	Kawat tembaga enamel
Jumlah Lilitan (variasi)	20, 30, 40, 50, 60	Parameter penelitian
Modul Regulator	LM2596 Step Down DC-DC	Menjaga tegangan output tetap 5V
Beban (Load)	Smartphone	Kapasitas baterai 4000–5000 mAh

Dengan modul WPT berkapasitas 5V 2A, sistem dapat digunakan untuk simulasi pengisian daya smartphone dengan kondisi yang mendekati pengisi daya kabel konvensional. Hal ini memungkinkan analisis yang lebih akurat terhadap pengaruh jarak dan jumlah lilitan terhadap efisiensi transfer daya.

3.8 Kawat Email

Pada penelitian ini digunakan kawat tembaga enamel dengan diameter 0,60 mm sebagai bahan utama untuk membuat kumparan transmitter dan receiver. Kawat enamel dipilih karena memiliki sifat penghantar listrik yang baik, fleksibel, serta dilapisi dengan lapisan tipis isolasi berbahan enamel untuk mencegah terjadinya hubungan singkat antar lilitan.



Gambar 3. 3 Kawat Enamel 0.60mm

Penggunaan kawat enamel sangat penting dalam sistem *Wireless Power Transfer* (WPT) berbasis induksi magnetik karena kumparan merupakan

komponen yang menghasilkan dan menangkap medan magnet. Diameter kawat yang dipilih berpengaruh langsung terhadap nilai resistansi, induktansi, serta kemampuan hantar arus pada kumparan.

3.9 Multimeter Digital

Multimeter adalah alat pengukur elektronik serbaguna yang digunakan untuk mengukur berbagai parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, dan resistansi. Alat ini sering digunakan dalam pekerjaan listrik, elektronik, serta eksperimen laboratorium untuk memeriksa atau menguji komponen dan rangkaian listrik.



Gambar 3. 4 Multimeter Digital

Multimeter memiliki berbagai fungsi utama. Untuk pengukuran tegangan, terdapat mode DC Voltage (VDC) yang digunakan pada sumber daya arus searah seperti baterai, dan mode AC Voltage (VAC) untuk mengukur tegangan arus bolak-balik seperti listrik rumah. Pada pengukuran arus, multimeter dapat mengukur arus DC pada rangkaian arus searah, dan pada beberapa model, juga mendukung pengukuran arus AC.

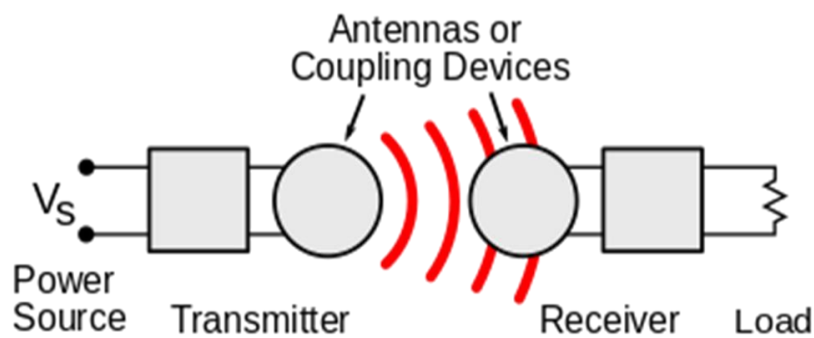
Selain itu, multimeter dapat digunakan untuk mengukur resistansi atau hambatan komponen seperti resistor. Fungsi pengujian kesinambungan (continuity test) memungkinkan pengguna memeriksa hubungan listrik antar titik dengan indikator suara. Beberapa multimeter juga mendukung pengukuran kapasitansi pada kapasitor dan induktansi pada induktor.

3.10 Beban (*SmartPhone*)

Smartphone memiliki peran penting sebagai perangkat keluaran (output) dalam penerapan teknologi Wireless Power Transfer (WPT). Teknologi WPT memungkinkan smartphone mengisi daya tanpa menggunakan kabel, sehingga meningkatkan kenyamanan pengguna dan mengurangi ketergantungan pada pengisi daya konvensional. Dengan kemajuan teknologi induksi magnetik, WPT telah menjadi salah satu fitur populer pada banyak smartphone modern.

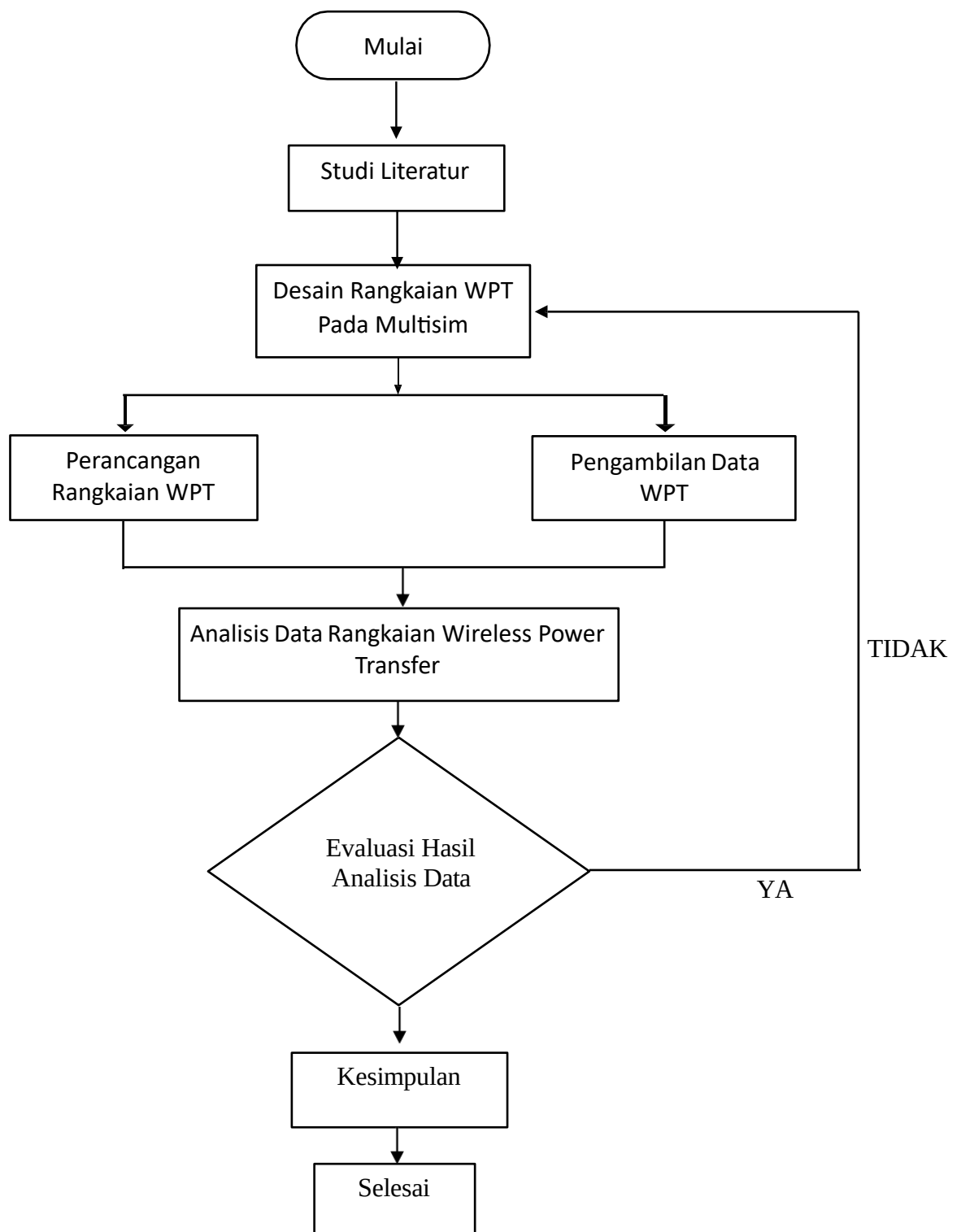
Salah satu kegunaan utama smartphone pada WPT adalah sebagai perangkat yang mendukung pengisian daya secara nirkabel. Dalam sistem ini, smartphone menerima energi listrik melalui medan magnet dari pengisi daya nirkabel. Efisiensi transfer daya sangat bergantung pada jarak antara perangkat pengirim dan penerima, serta konfigurasi kumparan induksi pada kedua perangkat. Smartphone modern biasanya dilengkapi dengan komponen penerima berupa kumparan induksi kecil yang dirancang untuk menyerap energi secara optimal.

3.11 Diagram Blok Wireless Power Transfer



Gambar 3. 5 Blok Diagram WPT

3.10 Diagram Alir

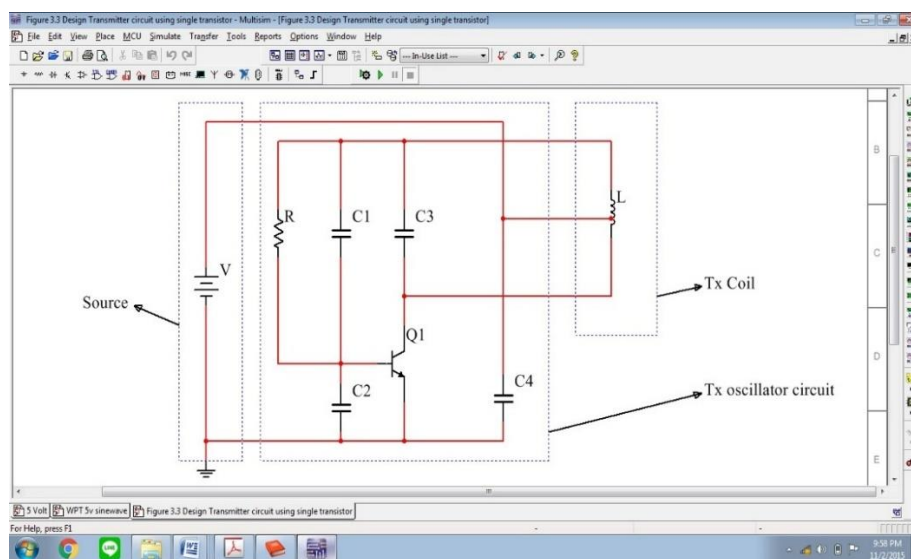


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Desain Rangkaian WPT di Multisim

Pada tahap awal penelitian ini, dilakukan perancangan rangkaian sistem Wireless Power Transfer (WPT) berbasis induksi magnetik menggunakan perangkat lunak Multisim. Perancangan ini bertujuan untuk memvisualisasikan bentuk rangkaian secara keseluruhan sebelum direalisasikan ke dalam bentuk fisik, serta memastikan bahwa setiap komponen yang digunakan dapat berfungsi sesuai perannya. Rangkaian terdiri dari dua bagian utama, yaitu transmitter dan receiver.

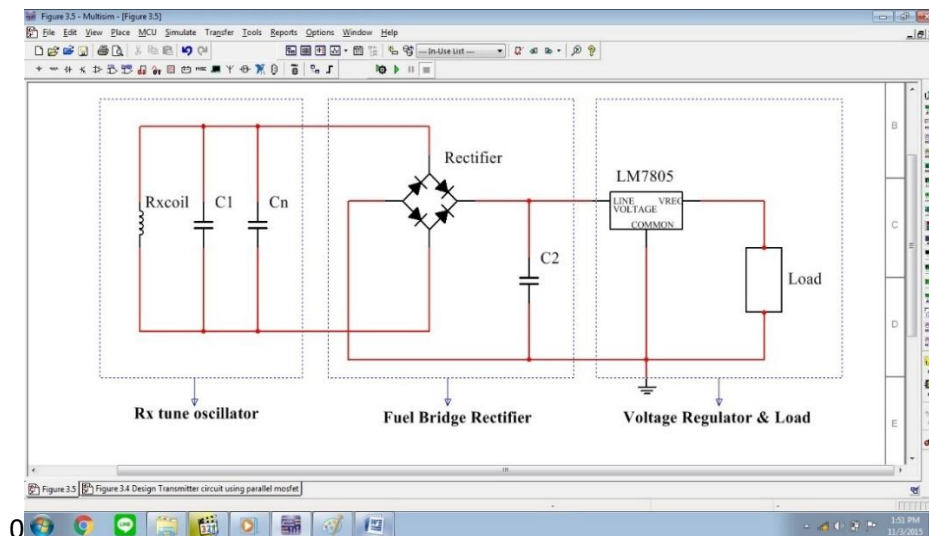
Rangkaian terdiri dari sumber tegangan AC 5V, kumparan transmitter dan receiver, kapasitor resonansi, serta beban resistif. Parameter kapasitor dan induktor disesuaikan agar frekuensi resonansi mendekati 100 kHz. Rangkaian ini bertujuan meniru konfigurasi dari alat yang digunakan secara nyata.



Gambar 4. 1 Desain Rangkaian Transmitter

Pada bagian **transmitter**, rangkaian dimulai dari sumber daya DC yang dihubungkan ke rangkaian osilator. Osilator ini berfungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi sinyal AC yang kemudian dialirkan ke kumparan pengirim (transmitter coil). Agar medan magnet yang dihasilkan lebih kuat dan terfokus,

kumparan transmitter dipadukan dengan kapasitor resonansi sehingga terbentuk rangkaian LC yang mampu menghasilkan frekuensi kerja tertentu.



Gambar 4. 2 Desain Rangkaian Receiver

Pada bagian receiver, kumparan penerima (receiver coil) berperan menangkap fluks magnet yang dihasilkan transmitter. Fluks ini kemudian menginduksikan tegangan AC pada kumparan penerima. Tegangan hasil induksi dialirkan menuju rangkaian penyearah (dioda bridge) yang berfungsi mengubah tegangan AC menjadi DC. Selanjutnya, tegangan DC yang masih mengandung riak (ripple) distabilkan dengan regulator tegangan agar sesuai dengan kebutuhan beban, dalam hal ini smartphone yang digunakan sebagai media pengujian.

Desain ini menggambarkan prinsip dasar kerja WPT, yaitu transfer daya tanpa kabel melalui kopling induktif. Simulasi Multisim memungkinkan peneliti menguji alur tegangan dan arus secara virtual, sehingga dapat dipastikan bahwa rangkaian dapat bekerja sesuai harapan sebelum dilakukan perakitan secara nyata. Dengan adanya perancangan melalui Multisim, peneliti dapat mengevaluasi perilaku komponen, aliran tegangan, dan arus pada setiap titik rangkaian. Hasil simulasi ini menjadi dasar dalam menentukan konfigurasi terbaik sebelum dilakukan pengujian langsung pada perangkat nyata.

4.2 Hasil Pengujian Sistem Wireless Power Transfer

Pada tahap ini dilakukan pengujian sistem *Wireless Power Transfer* (WPT) berbasis induksi magnetik dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh jumlah lilitan kumparan serta jarak antara transmitter dan receiver terhadap besarnya tegangan, arus, dan daya yang diterima beban (smartphone).

Pengujian dilakukan dengan menggunakan modul WPT 5V 2A, yang terdiri dari:

- *Transmitter* : kumparan tembaga berdiameter 0,60 mm dengan variasi jumlah lilitan sebanyak 20, 30, 40, 50, dan 60 lilitan.
- *Receiver* : kumparan dengan ukuran dan bentuk serupa.
- *Power supply DC* : output 5V 2A sebagai sumber tegangan.
- *Multimeter digital* : untuk mengukur tegangan dan arus pada sisi penerima.
- *Smartphone* : sebagai beban penerima daya.

Proses pengukuran dilakukan dengan memvariasikan jumlah lilitan pada kumparan transmitter dan receiver, serta mengubah jarak antar kumparan dari 0 cm hingga 4 cm. Parameter yang diamati meliputi:

1. Tegangan (Volt) yang diterima pada sisi penerima.
2. Arus (Ampere) yang mengalir ke beban.
3. Daya (Watt) yang diperoleh dari hasil perkalian tegangan dan arus.

Hasil pengukuran ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik. Grafik digunakan untuk mempermudah visualisasi kecenderungan perubahan tegangan, arus, dan daya terhadap variasi jumlah lilitan maupun jarak antar kumparan.

Diharapkan dari hasil pengujian ini akan terlihat pola bahwa semakin jauh jarak antar kumparan, maka nilai tegangan, arus, dan daya yang diterima akan cenderung menurun. Sebaliknya, dengan menambah jumlah lilitan, akan terjadi perbedaan pada besar tegangan serta daya yang mampu ditransfer dari transmitter ke receiver.

4.2.1 Pengujian Pengaruh Jarak dan Lilitan (20 Lilitan) terhadap Waktu Pengisian

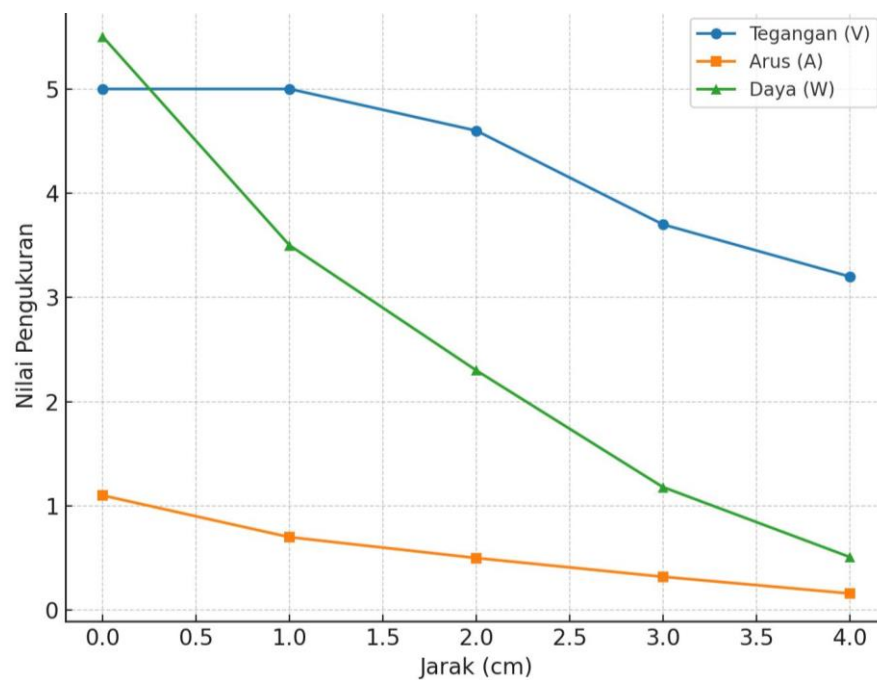
Pengujian pertama dilakukan pada kumparan dengan jumlah 20 lilitan. Variasi jarak antara transmitter dan receiver diatur mulai dari 0 cm hingga 4 cm. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui bagaimana perubahan jarak memengaruhi tegangan, arus, serta daya yang diterima pada beban dengan jumlah lilitan relatif kecil.

Berikut adalah tabel dan grafik dari hasil pengujian :

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian 20 Lilitan

No.	Jumlah Lilitan (Tx & Rx)	Jarak (cm)	Tegangan Output (V)	Arus Output (A)	Daya Output (W)	Pengisian 10 menit (%)	Estimasi Penuh
1.	20	0 cm	5	1.1	5.50	5 %	200 menit
2.	20	1 cm	5	0.7	3.50	3 %	345 menit
3.	20	2 cm	4,6	0.5	2.30	2 %	500 menit
4.	20	3 cm	3,7	0.32	1.18	1 %	1000 menit
5.	20	4 cm	3,2	0.16	0.51	0.4 %	2439 menit

Hasil pengujian dengan 20 lilitan menunjukkan bahwa pada jarak 0 cm sistem mampu menghasilkan daya 5,5 W dengan tegangan stabil 5 V dan arus 1,1 A. Namun, seiring bertambahnya jarak, arus mengalami penurunan signifikan sehingga daya menurun drastis. Pada jarak 4 cm, daya hanya tersisa 0,51 W. Hal ini menegaskan bahwa pada jumlah lilitan yang relatif sedikit, efisiensi transfer daya cepat menurun ketika jarak bertambah.



Gambar 4. 3 Grafik Hasil Pengujian 20 Lilitan

Dari grafik hasil pengujian dengan 20 lilitan, terlihat bahwa pada jarak 0 cm tegangan masih stabil di 5 V dengan arus sebesar 1,1 A sehingga menghasilkan daya 5,5 W. Namun, ketika jarak bertambah, arus turun signifikan sehingga daya juga menurun. Pada jarak 4 cm, daya yang diterima hanya sekitar 0,51 W. Hal ini menunjukkan bahwa pada jumlah lilitan 20, efisiensi transfer daya menurun drastis seiring bertambahnya jarak.

4.2.2 Pengujian Pengaruh Jarak dan Lilitan (30 Lilitan) terhadap Waktu Pengisian

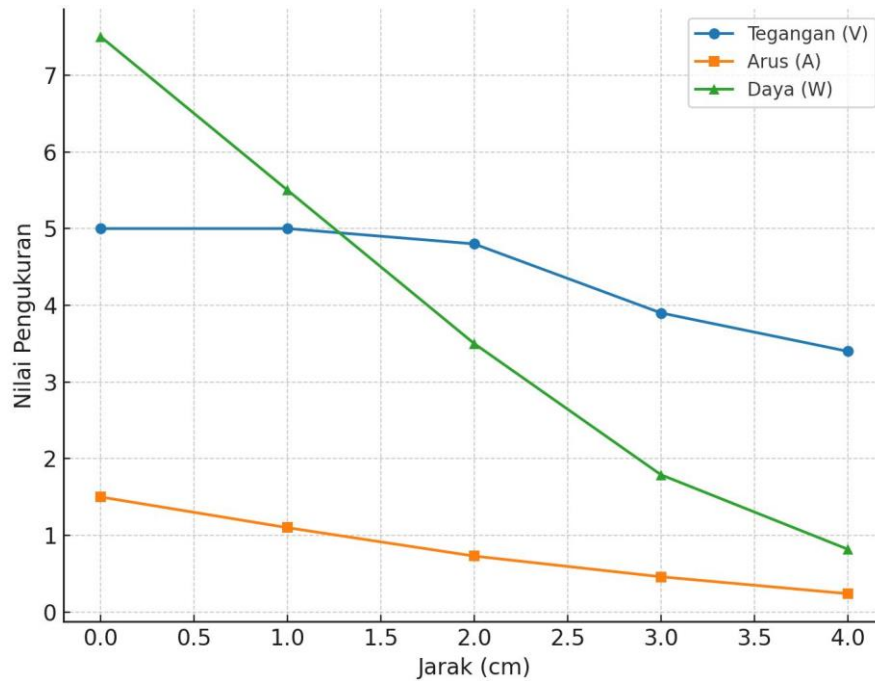
Pengujian selanjutnya menggunakan kumparan dengan jumlah 30 lilitan. Sama seperti sebelumnya, variasi jarak diatur dari 0 cm hingga 4 cm. Percobaan ini dimaksudkan untuk melihat perbedaan karakteristik tegangan, arus, dan daya yang diterima jika jumlah lilitan kumparan ditingkatkan dibandingkan dengan 20 lilitan.

Berikut adalah tabel dan grafik dari hasil pengujian :

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian 30 Lilitan

No.	Jumlah Lilitan (Tx & Rx)	Jarak (cm)	Tegangan Output (V)	Arus Output (A)	Daya Output (W)	Pengisian 10 menit (%)	Estimasi Penuh
1.	30	0 cm	5	1.50	7.50	6 %	161 menit
2.	30	1 cm	5	1.10	5.50	5 %	217 menit
3.	30	2 cm	4,8	0.73	3.50	3 %	345 menit
4.	30	3 cm	3,9	0.46	1.79	1 %	667 menit
5.	30	4 cm	3.4	0.24	0.82	0.7 %	1430 menit

Pengujian dengan 30 lilitan memperlihatkan peningkatan performa dibanding 20 lilitan. Pada jarak 0 cm, daya yang dihasilkan mencapai 7,5 W, lebih besar daripada konfigurasi sebelumnya. Penurunan daya tetap terjadi dengan bertambahnya jarak, namun nilainya masih lebih tinggi. Misalnya pada 2 cm daya masih 3,5 W, dan pada 4 cm tersisa 0,82 W. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan lilitan dapat memperkuat induktansi dan meningkatkan daya yang ditransfer pada jarak dekat.



Gambar 4. 4 Grafik Pengujian 30 Lilitan

Hasil pengujian dengan 30 lilitan menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan 20 lilitan. Pada jarak 0 cm, daya mencapai 7,5 W dengan tegangan tetap 5 V dan arus 1,5 A. Penurunan daya terjadi seiring pertambahan jarak, namun masih lebih tinggi dibandingkan konfigurasi 20 lilitan. Pada jarak 2 cm, daya masih sebesar 3,5 W, sedangkan pada 4 cm daya turun menjadi 0,82 W. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan lilitan dapat meningkatkan daya yang ditransfer pada jarak dekat.

4.2.3 Pengujian Pengaruh Jarak dan Lilitan (40 Lilitan) terhadap Waktu Pengisian

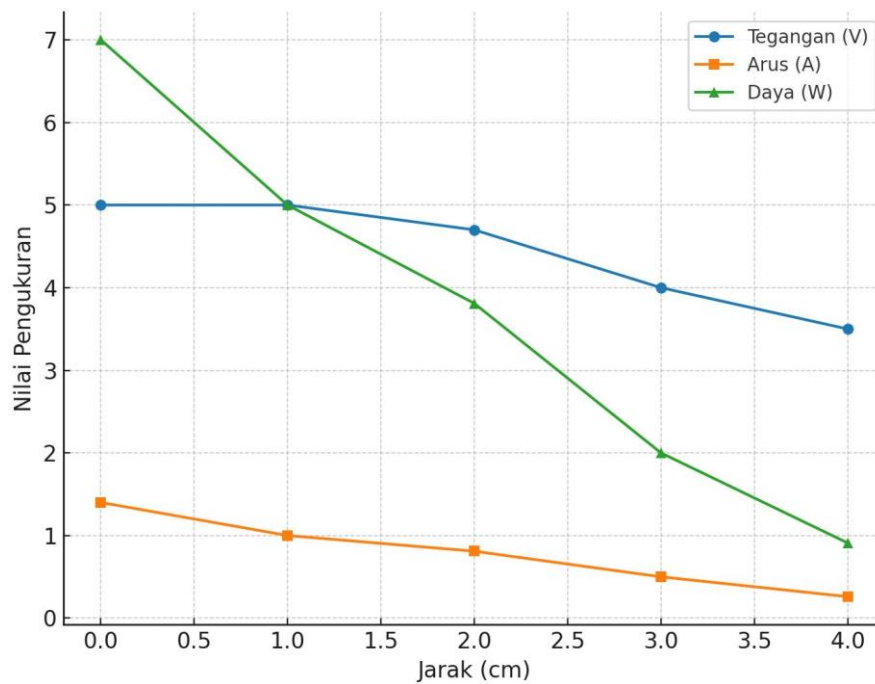
Pada pengujian dengan 40 lilitan, dilakukan pengukuran dengan variasi jarak yang sama, yaitu antara 0 cm hingga 4 cm. Hasil pengujian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai sejauh mana peningkatan jumlah lilitan dapat memperbaiki efisiensi transfer daya pada sistem WPT.

Berikut adalah tabel dan grafik dari hasil pengujian :

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian 40 Lilitan

No.	Jumlah Lilitan (Tx & Rx)	Jarak (cm)	Tegangan Output (V)	Arus Output (A)	Daya Output (W)	Pengisian 10 menit (%)	Estimasi Penuh
1.	40	0 cm	5	1.40	7	6 %	172 menit
2.	40	1 cm	5	1	5	4 %	238 menit
3.	40	2 cm	4.7	0.81	3.81	3 %	312 menit
4.	40	3 cm	4.0	0.50	2	2 %	588 menit
5.	40	4 cm	3.5	0.26	0.91	1 %	1000 menit

Pada pengujian dengan 40 lilitan, daya maksimum yang diperoleh sebesar 7,0 W pada jarak 0 cm. Walaupun lebih rendah sedikit dibanding 30 lilitan, distribusi daya pada jarak menengah lebih stabil. Pada jarak 2 cm daya tercatat 3,81 W dan pada 3 cm masih 2,0 W, sehingga penurunan tidak terlalu drastis. Kondisi ini menunjukkan bahwa konfigurasi 40 lilitan mampu menjaga kestabilan transfer daya pada variasi jarak menengah.



Gambar 4. 5 Grafik Pengujian 40 Lilitan

Pengujian pada 40 lilitan memperlihatkan hasil yang relatif stabil. Pada jarak 0 cm, daya maksimum tercatat sebesar 7,0 W, sedikit lebih rendah dibandingkan 30 lilitan, namun distribusi daya pada jarak 2–3 cm lebih merata. Misalnya, pada jarak 2 cm daya masih 3,81 W, dan pada jarak 3 cm sebesar 2,0 W. Hal ini menandakan bahwa jumlah lilitan 40 dapat memberikan kestabilan transfer daya dengan penurunan yang tidak terlalu drastis.

4.2.4 Pengujian Pengaruh Jarak dan Lilitan (50 Lilitan) terhadap Waktu Pengisian

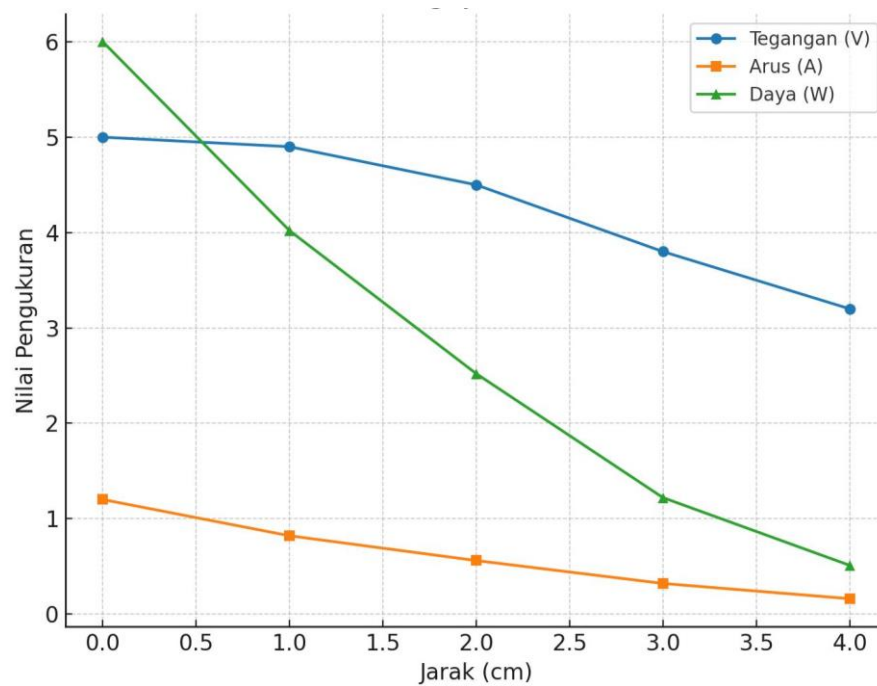
Untuk variasi 50 lilitan, pengujian kembali dilakukan dengan perubahan jarak dari 0 cm hingga 4 cm. Bagian ini bertujuan untuk mengamati bagaimana perubahan jumlah lilitan mendekati nilai optimal dapat memengaruhi penurunan tegangan, arus, serta daya pada sisi penerima.

Berikut adalah tabel dan grafik dari hasil pengujian :

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian 50 Lilitan

No.	Jumlah Lilitan (Tx & Rx)	Jarak (cm)	Tegangan Output (V)	Arus Output (A)	Daya Output (W)	Pengisian 10 menit (%)	Estimasi Penuh
1.	50	0 cm	5	1.20	6	5 %	200 menit
2.	50	1 cm	4.9	0.82	4.02	3 %	303 menit
3.	50	2 cm	4.5	0.56	2.52	2 %	476 menit
4.	50	3 cm	3.8	0.32	1.22	1 %	983 menit
5.	50	4 cm	3.2	0.16	0.51	0.4 %	2439 menit

Pengujian dengan 50 lilitan menghasilkan daya maksimum 6,0 W pada jarak 0 cm, lebih rendah daripada konfigurasi 30 maupun 40 lilitan. Penurunan daya terjadi lebih cepat ketika jarak diperbesar, di mana pada jarak 4 cm daya turun menjadi 0,51 W. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun jumlah lilitan bertambah, resistansi kawat yang lebih besar justru menurunkan efisiensi sistem.



Gambar 4. 6 Grafik hasil Pengujian 50 Lilitan

Pada 50 lilitan, daya maksimum yang dicapai adalah 6,0 W pada jarak 0 cm. Nilai ini lebih rendah dibandingkan dengan 30 maupun 40 lilitan. Selain itu, penurunan daya terjadi cukup cepat seiring bertambahnya jarak, di mana pada 4 cm

daya hanya 0,51 W. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan lilitan tidak selalu meningkatkan daya, karena resistansi kumparan juga bertambah sehingga efisiensi menurun.

4.2.5 Pengujian Pengaruh Jarak dan Lilitan (60 Lilitan) terhadap Waktu Pengisian

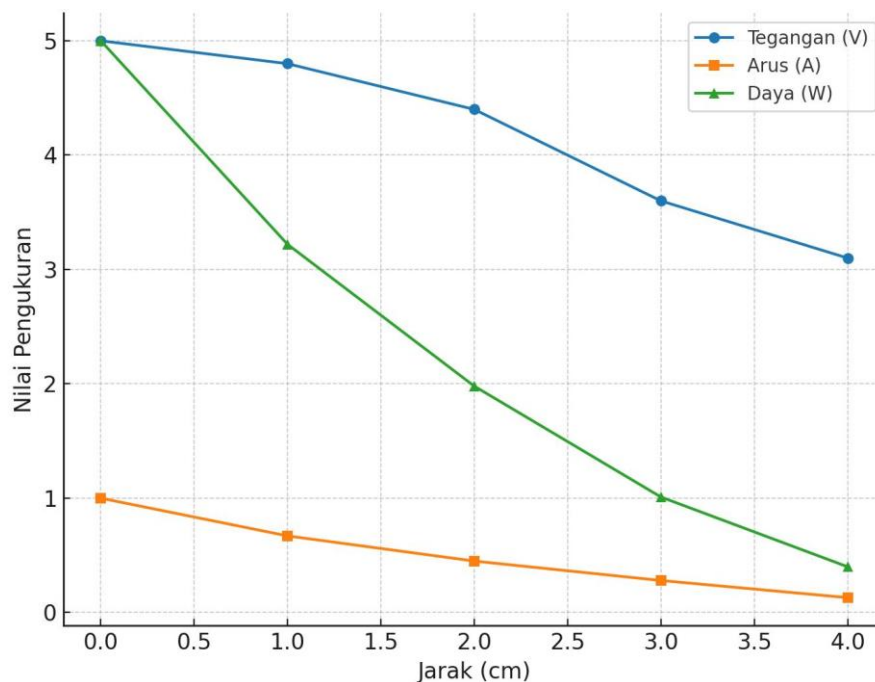
Pengujian terakhir dilakukan pada kumparan dengan jumlah 60 lilitan. Sama seperti sebelumnya, variasi jarak diatur dari 0 cm hingga 4 cm. Percobaan ini bertujuan untuk mengetahui apakah peningkatan jumlah lilitan lebih lanjut akan tetap meningkatkan efisiensi transfer daya atau justru menghasilkan penurunan akibat faktor resistansi dan rugi-rugi lainnya.

Berikut adalah tabel dan grafik dari hasil pengujian :

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian 60 Lilitan

No.	Jumlah Lilitan (Tx & Rx)	Jarak (cm)	Tegangan Output (V)	Arus Output (A)	Daya Output (W)	Pengisian 10 menit (%)	Estimasi Penuh
1.	60	0 cm	5	1	5	4 %	238 menit
2.	60	1 cm	4.8	0.67	3.22	3 %	370 menit
3.	60	2 cm	4.4	0.45	1.98	2 %	625 menit
4.	60	3 cm	3.6	0.28	1.01	1 %	990 menit
5.	60	4 cm	3.1	0.13	0.40	0.3 %	3333 menit

Hasil pengujian dengan 60 lilitan menunjukkan daya maksimum sebesar 5,0 W pada jarak 0 cm, yang merupakan penurunan lebih lanjut dibanding variasi sebelumnya. Pada jarak 4 cm, daya bahkan hanya 0,40 W. Temuan ini membuktikan bahwa jumlah lilitan yang terlalu banyak meningkatkan resistansi kawat dan menimbulkan rugi-rugi daya dalam bentuk panas, sehingga efisiensi transfer energi justru menurun.



Gambar 4. 7 Grafik Hasil Pengujian 60 Lilitan

Pada pengujian dengan 60 lilitan, daya maksimum semakin berkurang yaitu 5,0 W pada jarak 0 cm. Penurunan daya juga lebih cepat, sehingga pada jarak 4 cm daya yang diterima hanya 0,40 W. Hal ini menandakan bahwa terlalu banyak lilitan justru mengurangi efisiensi transfer daya akibat meningkatnya resistansi kawat dan rugi-rugi panas.

4.3 Analisis Pengaruh Jarak terhadap Efisiensi Wireless Power Transfer

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan dengan variasi jarak antara kumparan pengirim (*transmitter*) dan kumparan penerima (*receiver*), diperoleh bahwa semakin besar jarak yang dipasang, maka tegangan serta arus yang diterima pada beban semakin menurun. Hal ini terlihat jelas dari grafik hubungan antara jarak dan tegangan keluaran, di mana pada jarak terdekat (misalnya 1 cm) nilai tegangan yang diterima relatif tinggi, sedangkan pada jarak lebih jauh (di atas 4–5 cm) tegangan yang diterima turun secara signifikan hingga mendekati nol.

Fenomena ini sesuai dengan teori induksi elektromagnetik, di mana intensitas fluks magnet yang sampai pada kumparan penerima berbanding terbalik dengan

jarak. Semakin jauh jarak antara kedua kumparan, semakin kecil jumlah garis gaya magnet yang dapat memotong kumparan penerima, sehingga gaya gerak listrik (GGL) induksi yang terbentuk juga semakin lemah. Kondisi ini berimplikasi langsung terhadap menurunnya daya dan efisiensi sistem.

Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa efisiensi transfer daya pada sistem *wireless power transfer* berbasis induksi magnetik sangat sensitif terhadap jarak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa jarak efektif sistem yang dirancang pada penelitian ini terbatas pada beberapa sentimeter saja. Apabila jarak diperbesar melebihi nilai optimal, maka daya yang ditransfer tidak lagi cukup untuk mengisi daya beban secara stabil. Oleh karena itu, pemanfaatan sistem ini lebih tepat digunakan untuk aplikasi jarak dekat, seperti *wireless charger* perangkat elektronik portabel.

4.4 Analisis Pengaruh Jumlah Lilitan terhadap Efisiensi Wireless Power Transfer

Hasil pengujian dengan variasi jumlah lilitan kumparan menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah lilitan yang digunakan, nilai tegangan induksi pada kumparan penerima cenderung meningkat. Hal ini disebabkan oleh besarnya induktansi yang berbanding lurus dengan jumlah lilitan (N), sebagaimana tercantum pada persamaan induktansi:

$$\varepsilon_{induksi} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Semakin banyak lilitan, semakin besar nilai GGL induksi yang dihasilkan, sehingga energi yang ditransfer juga lebih besar. Dari hasil pengujian terlihat bahwa jumlah lilitan 20 dan 30 menghasilkan tegangan relatif kecil, sedangkan pada lilitan 40 dan 50 diperoleh tegangan serta daya yang lebih tinggi. Namun, ketika jumlah lilitan ditingkatkan menjadi 60, efisiensi sistem tidak lagi meningkat secara signifikan, bahkan cenderung menurun. Hal ini disebabkan oleh adanya kenaikan resistansi kawat akibat bertambahnya panjang lilitan, sehingga sebagian energi justru hilang dalam bentuk panas.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa terdapat jumlah lilitan optimum untuk mencapai efisiensi transfer daya yang maksimal. Dalam penelitian ini, jumlah lilitan 40–50 terbukti memberikan hasil paling stabil dengan daya keluaran yang lebih besar dibandingkan variasi lilitan lain. Hasil ini menguatkan bahwa desain kumparan tidak hanya ditentukan oleh banyaknya lilitan, tetapi juga harus mempertimbangkan keseimbangan antara induktansi, resistansi kawat, serta luas penampang lilitan.

Temuan ini konsisten dengan teori induksi elektromagnetik dan beberapa penelitian terdahulu yang menekankan pentingnya pemilihan jumlah lilitan secara tepat dalam merancang sistem *wireless power transfer*. Oleh karena itu, pada implementasi praktis, pemilihan jumlah lilitan harus disesuaikan dengan kebutuhan daya, jarak transfer, serta ukuran fisik perangkat agar diperoleh kinerja yang optimal.

4.5 Analisa Pengaruh Jumlah Lilitan terhadap Daya Yang mampu di Transfer

Jumlah lilitan pada kumparan penerima maupun pengirim memiliki pengaruh yang signifikan terhadap besarnya daya yang dapat ditransfer melalui sistem Wireless Power Transfer (WPT). Secara teori, semakin banyak jumlah lilitan maka nilai induktansi kumparan akan meningkat. Peningkatan induktansi ini dapat memperkuat medan magnet yang terbentuk, sehingga tegangan induksi yang dihasilkan pada kumparan penerima juga bertambah. Namun, penambahan lilitan yang terlalu banyak tidak selalu memberikan hasil yang lebih baik, karena resistansi kumparan juga ikut meningkat seiring bertambahnya panjang kawat. Hal ini menyebabkan rugi daya (power loss) sehingga efisiensi sistem menurun.

Berdasarkan hasil pengujian, variasi lilitan 20 dan 30 menghasilkan tegangan yang relatif lebih rendah dan waktu pengisian lebih lama karena induktansi kumparan belum optimal untuk menghasilkan fluks magnet yang kuat. Pada lilitan 40 dan 50 diperoleh kinerja yang paling stabil, dengan tegangan keluaran lebih besar dan daya yang ditransfer lebih efektif. Kondisi ini menunjukkan adanya keseimbangan antara jumlah lilitan, nilai induktansi, dan resistansi kumparan sehingga efisiensi sistem berada pada titik optimal.

Sementara itu, penambahan lilitan hingga 60 justru menurunkan efisiensi. Meski induktansi meningkat, resistansi kawat yang lebih besar menghambat arus, sehingga daya yang ditransfer tidak bertambah signifikan bahkan cenderung menurun. Hal ini menegaskan bahwa terdapat titik optimum jumlah lilitan yang perlu diperhatikan dalam perancangan sistem WPT. Dengan demikian, untuk diameter kawat 0,60 mm yang digunakan pada penelitian ini, jumlah lilitan sekitar 40–50 merupakan konfigurasi paling ideal dalam mentransfer daya ke beban secara efisien.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan mengenai “Analisis Pengaruh Jarak dan Jumlah Lilitan terhadap Efisiensi Wireless Power Transfer (WPT) Berbasis Induksi Magnetik”, maka dapat disimpulkan beberapa hal penting yang berkaitan dengan kinerja sistem WPT.

1. Jarak antara transmitter dan receiver terbukti memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap besar tegangan, arus, serta daya yang diterima oleh beban. Dari pengujian yang dilakukan, terlihat bahwa semakin jauh jarak kedua kumparan, maka semakin besar pula penurunan tegangan yang diterima. Hal ini disebabkan oleh semakin melemahnya fluks magnet yang ditangkap oleh kumparan penerima seiring bertambahnya jarak. Pada jarak dekat, khususnya 0–1 cm, tegangan yang diterima relatif stabil dan mampu digunakan untuk mengisi perangkat smartphone dengan baik. Namun, ketika jarak diperbesar hingga lebih dari 3 cm, terjadi penurunan tegangan dan daya yang cukup drastis, sehingga proses pengisian menjadi tidak efektif. Kondisi ini sejalan dengan teori induksi elektromagnetik.
2. Jumlah lilitan pada kumparan juga memberikan pengaruh nyata terhadap besarnya tegangan dan daya yang mampu ditransfer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan lilitan memang meningkatkan induktansi, sehingga tegangan yang diinduksikan pada kumparan penerima cenderung lebih besar. Akan tetapi, penambahan lilitan secara berlebihan tidak selalu berdampak positif. Hal ini dikarenakan resistansi kawat juga meningkat seiring bertambahnya jumlah lilitan, sehingga sebagian energi hilang dalam bentuk panas. Dalam penelitian ini, jumlah lilitan 40–50 lilitan menghasilkan tegangan dan daya paling optimal, sedangkan pada 60 lilitan terjadi penurunan efisiensi.
3. Kinerja sistem secara keseluruhan menunjukkan bahwa Wireless Power Transfer berbasis induksi magnetik lebih sesuai untuk aplikasi pengisian jarak dekat. Sistem ini mampu bekerja dengan baik pada jarak 0–1 cm, tetapi kurang efektif jika diaplikasikan pada jarak lebih jauh. Hal ini menjadi

keterbatasan utama teknologi WPT berbasis induksi magnetik, yang dalam kondisi penelitian ini masih belum dapat menggantikan sistem pengisian daya konvensional untuk penggunaan jarak menengah maupun jauh. Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil membuktikan bahwa faktor jarak dan jumlah lilitan merupakan variabel penting dalam menentukan efisiensi sistem WPT. Efisiensi terbaik diperoleh pada jarak dekat dengan jumlah lilitan optimum, sedangkan pada jarak lebih jauh atau lilitan berlebih, efisiensi menurun secara signifikan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, penulis memberikan beberapa saran yang diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi penelitian selanjutnya maupun pengembangan sistem WPT ke arah yang lebih aplikatif.

1. untuk meningkatkan efisiensi, perlu dilakukan optimasi pada desain kumparan. Penelitian ini hanya memvariasikan jumlah lilitan, sehingga penelitian berikutnya disarankan untuk mengkaji pengaruh variasi diameter kawat, bentuk kumparan (misalnya planar coil), serta jarak antar lilitan terhadap kinerja sistem.
2. penelitian lanjutan disarankan untuk menerapkan rangkaian resonansi, baik seri maupun paralel, pada transmitter maupun receiver. Prinsip resonansi dapat memperkuat medan magnet yang terbentuk dan memperluas jangkauan transfer daya.
3. frekuensi kerja yang lebih tinggi dapat dipertimbangkan pada penelitian selanjutnya. Dengan penggunaan frekuensi tinggi, intensitas medan magnet dapat meningkat, dan daya yang ditransfer lebih besar meskipun pada jarak beberapa sentimeter.
4. dari sisi aplikasi, sistem WPT sebaiknya diuji pada berbagai jenis beban, tidak hanya smartphone, tetapi juga perangkat IoT, perangkat medis, maupun sensor nirkabel.
5. disarankan untuk menambahkan sistem proteksi dan regulator tegangan pada rangkaian penerima agar tegangan keluaran lebih stabil dan aman digunakan untuk berbagai perangkat elektronik.

DAFTAR PUSTAKA

- Arianto, T. (2009). Implementasi Wireless Local Area Network dalam RT / RW Net. *Implementasi Wireless Local Area Network Dalam RT/RW Net, XIV(2)*, 152–157. tri_arianto@yahoo.com
- Bachri, A., & Abidin, Z. (2020). Simulasi Kopling Magnetik Transfer Energi Nirkabel (Wireless Power Transfer). *JE-Unisla*, 5(1), 321. <https://doi.org/10.30736/je.v5i1.424>
- Cahya Baswara, A. R., & Sari, N. A. (2022). Analisis Pengaruh Posisi Dan Media Penghalang Terhadap Gelombang Keluaran Pada Wireless Power Transfer. *Jurnal Teknologi Elektro*, 13(3), 183. <https://doi.org/10.22441/jte.2022.v13i3.009>
- Experimental, B. (n.d.). *Element of electromagnetics-Sadiku Matthew*. <https://docs.google.com/file/d/0B6LN8LD0xzNAcnFoZHdEN1EzLVU/view?resourcekey=0-Y-mrnot4rH37V5ykiIWROqA>
- Husain, S., Duyo, R. A., & Zainuddin, Z. (2023). Analisis Pemanfaatan Wireless Energy Transfer Terhadap Transmisi Daya Listrik Dengan Menggunakan Prinsip Resonansi Elektro Magnetik. *Virtex Elektro*, 15(1), 2023.
- Kristiyono, R., & Supriyanto, B. (2020). Wireless Power Transfer System Menggunakan Magnetic Resonant Coupling. *Jurnal Teknik Atw*, 6, no. 23, 125–134.
- Lampung, U. (2018). *Rancang Bangun Prototipe Wireless Power Transfer (Wpt) Menggunakan Induktor Planar Untuk Peralatan Elektronika Berdaya Rendah Rio Andesta*.
- Muchtar, M. (2013). *Terobosan Baru Transmisi Energi Listrik Tanpa*. November, 7–12.
- Narusue, Y., Kawahara, Y., & Asami, T. (2017). Maximizing the efficiency of wireless power transfer with a receiver-side switching voltage regulator. *Wireless Power Transfer*, 4(1), 42–54. <https://doi.org/10.1017/wpt.2016.14>

- Nurdiansari, H., Santoso, A. D., & Rahman, N. J. (2022). Electromagnetic Wireless Charging System. *Jurnal 7 Samudra*, 7(2), 7–12.
<https://doi.org/10.54992/7samudra.v7i2.142>
- Prasojo, A. K., & Surjati, I. (2019). Rancang Banun Wireless Power Transfer (WPT) Menggunakan Prinsip Resonansi Induktif Elektromagnetik dan Blocking Oscillator dengan Coil Berbentuk Spiral Mendatar. *Elekro Jurnal*, 12(2), 97–102.
- Pynanjung, P. A., Lapanporo, B. P., & Faryuni, I. D. (2019). Optimasi Rangkaian dan Material Kumpan pada Rangkaian Transfer Listrik Tanpa Kabel Terhadap Jarak Jangkauan Pengiriman Energi Listrik. *Prisma Fisika*, II(2), 35–39.
- Rezeki, Y. A., Zahra, A., Kamilla, A. A., & Ramadhani, F. (2022). Mini Review: Wireless Charging Sebagai Inovasi Pengembangan Teknologi Elektromagnetik Dalam Menuju Era Society 5.0. *EduFisika: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(2), 138–146.
<https://doi.org/10.59052/edufisika.v7i2.21484>
- Rifqiana, A., & Wijono. (n.d.). Variasi Frekuensi Dan Jarak Antar Kumpan Pada Sistem Wireless Power Transfer. *Seminar Nasional Fortel Regional 7*, 28–32.
- Salsabila Aulia, Sandi Rahyadi, Nadita Dwi Pramestia, Bryant Reza Pahlevi, & Diyajeng Luluk Karlina. (2024). Pemanfaatan Medan Elektromagnetik untuk Teknologi Wireless Power Transfer. *Jurnal Penelitian Rumpun Ilmu Teknik*, 4(1), 16–26. <https://doi.org/10.55606/juprit.v4i1.4613>
- Saputra, A. H. (2017). *Desain Wireless Transfer Energy Dengan Koil Toroid Dansolenoid Menggunakan Teknik Resonansi Induksielektromagnetik*.
- Sulawesi, S. (2018). *Departement Of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Fajar, Makassar*. 2(1), 43–50.
- Tri, W., Dedet Candra, R., & Heri, S. (2023). Studi Komparasi dan Analisis Kumpan pada Wireless Power Transfer dengan Mempertimbangkan

Variasi Jarak dan Misalignment. *Seminar Nasional Teknik Elektro*, 2–7.

Van Mulders, J., Delabie, D., Lecluyse, C., Buyle, C., Callebaut, G., Van der Perre, L., & De Strycker, L. (2022). Wireless Power Transfer: Systems, Circuits, Standards, and Use Cases. *Sensors*, 22(15).
<https://doi.org/10.3390/s22155573>

Wayan Suwika Adnyana, I., Zubaidah, T., & Mustiko Okta, C. M. (2016). Perancangan Dan Analisis Sistem Transfer Daya Listrik Tanpa Kabel Dengan Kumparan Multilayer Yang Bekerja Pada Frekuensi Rendah (Design And Analysis Of Wireless Power Transfer By Multilayer Coils In Low Frequencies). *Dielektrika*, 3(2), 161–172. www.aaronia.de

Wulandari, I. Y. (2020). Analisa Desain, Konsep, dan Karakteristik Sistem Transfer Daya Nirkabel. *Jurnal Serambi Engineering*, 5(2), 1017–1022.
<https://doi.org/10.32672/jse.v5i2.1929>

Zaldy, R. R. (2018). Analisa Perbedaan Ukuran Diameter Kumparan Pada Tx Dan Rx Terhadap Jarak Dan Besar Transfer Daya Wireless Power Transfer. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 7, 1–25.

Muhammad Fitra Zambak (2021) Buku Transfer Listrik Tanpa Kabel Menggunakan

Resonan Magnetik Koil

- [1] A. Pratama, N. P. Miefthawati, B. Sc, and M. Sc, "Analysis Of The Potential Of Fecal Waste As An Alternative Fuel Analisis Potensi Limbah Tinja Sebagai Bahan Bakar Alternatif," vol. 5, no. June, pp. 12–20, 2025.
- [2] Y. Benyahya, A. Fail, A. Alali, and M. Sadik, "Recovery of Household Waste by Generation of Biogas as Energy and Compost as Bio-Fertilizer—A Review," *Processes*, vol. 10, no. 1, 2022, doi: 10.3390/pr10010081.
- [3] H. Wasajja *et al.*, "Improvement of biogas quality and quantity for small-scale biogas-electricity generation application in off-grid settings: A field-based study," *Energies*, vol. 14, no. 11, 2021, doi: 10.3390/en14113088.
- [4] A. Haryanto, S. Triyono, M. Telaumbanua, and D. Cahyani, "Pengembangan Listrik Tenaga Biogas Skala Rumah Tangga Untuk Daerah Terpencil Di Indonesia," *J. Ilm. Rekayasa Pertan. dan Biosist.*, vol. 8, no. 2, pp. 168–183, 2020, doi: 10.29303/jrpb.v8i2.187.
- [5] Y. Tengker, G. M. C. Mangindaan, and M. Rumbayan, "Potensi Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) Di Universitas Sam Ratulangi," *Repos. Unsrat*, pp. 1–11, 2022.
- [6] G. M. Pasaribu, E. W. Sinuraya, and D. Denis, "Perancangan Dan Analisa Tekno Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Dengan Memodifikasi Generator Set (Genset) Berbahan Bakar Minyak Menjadi Generator Set (Genset) Biogas," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 275–283, 2021, doi: 10.14710/transient.v10i1.275-283.
- [7] A. I. Pratiwi and F. Ali, "Analisis Kelayakan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Di TPA Tamangapa Makassar," *Researchgate.Net*, no. December 2015, 2018.
- [8] N. Hendrasarie and E. RP, "Pelatihan Pembuatan Biogas Dari Limbah Rumah Makan Dan Tinja," *Abdimas Unwahas*, vol. 6, no. 2, pp. 164–170, 2021, doi: 10.31942/abd.v6i2.5687.
- [9] D. Rika Widianita, "No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title," *AT-TAWASSUTH J. Ekon. Islam*, vol.

VIII, no. I, pp. 1–19, 2023.

- [10] H. Benyahya, M. Elalami, A. H. Beni, and M. Elalami, “Recovery of household waste by generation of biogas as energy and compost as bio-fertilizer—A review,” *Processes*, vol. 10, no. 1, p. 81, 2022.
- [11] S. Han, X. Chen, and Y. Li, “Biogas potential of food waste-recycling wastewater after oil–water separation,” *Energies*, vol. 17, no. 17, p. 4428, 2024.
- [12] P. Kiran, R. Kumar, and R. Singh, “Food waste as feedstock for anaerobic mono-digestion process: A review,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 22, p. 10593, 2024.
- [13] O. K. Adebayo and L. O. Ojediran, “Recovery of organic waste by biogas production: Mathematical modeling of anaerobic digestion—A short literature review,” *Int. J. Biochem. Res. Rev.*, vol. 31, no. 3, pp. 1–12, 2022.
- [14] A. S. Jaworska, P. Olszewski, and A. Głodek, “Food waste management for biogas production in the context of sustainable development,” *Energies*, vol. 15, no. 16, p. 5940, 2022.
- [15] L. Olatunji, M. R. Sarker, and R. Khan, “How to use biogas?: A systematic review of biogas utilization pathways in power generation, transportation, and heating,” *Bioresour. Bioprocess.*, vol. 9, no. 57, pp. 1–19, 2022.
- [16] S. Gupta and R. Mehra, “Emerging technologies for biogas production: A critical review,” *Renew. Sust. Energy Rev.*, vol. 193, p. 113040, 2024.
- [17] V. Arora, N. Sharma, and A. Singh, “Enhanced biogas production via anaerobic co-digestion using ferric oxide: An experimental study,” *arXiv preprint arXiv:2505.04635*, 2025.
- [18] J. O. Oladele and K. T. Adebisi, “A systematic review of design considerations for small-scale biogas digesters,” *Processes*, vol. 11, no. 2, p. 321, 2023.
- [19] K. JASMINE, “~~濟無~~No Title No Title No Title,” *Penambahan Natrium Benzoat Dan Kalium Sorbat Dan Kecepatan Pengadukan Sebagai Upaya Penghambatan Reaksi Inversi Pada Nira Tebu*, pp. 6–33, 2014.

- [20] A. A. Franthena, "Pemanfaatan Limbah Sekam padi Dan Kotoran Sapi Dalam Pembuatan Biogas Menggunakan Alat Anaerobic Biodiegester," pp. 3–16, 2015.
- [21] E. L. Talakua, "Pemanfaatan Tinja Manusia Sebagai Bio Energi Alternatif Melalui Perancangan Sistem Instalasi Pipa Pembuangan Septik-Tank Tersentralisasi Pada Perencanaan Pembangunan Perumahan," *Tecnoscienza*, vol. 3, no. 2, pp. 178–194, 2019.
- [22] Zambak, M. F., Andriana, A., & Hadipramana, H. (2024). *Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) Menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg)*. Medan: UMSU Press. ISBN 978-623-408-531-0.
- [23] W. Sunanda and R. Kurniawan, "Tenaga Biogas Dari Limbah Cair Sawit," *Pros. Semin. Nas. Penelit. Pengabdi. pada Masy.*, no. October, 2018,
- [24] Niam *et al.*, "Pengolahan Limbah Cair Tahu Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Digester Tipe Balon," *Community Dev. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 1789–1796, 2023.
- [25] A. Villarroel Schneider, R. Bove, J. Bernal-Agustin, and J. L. M. Ramos, "Performance analysis of a small-scale biogas-based trigeneration plant: An absorption refrigeration system integrated to an externally fired microturbine," *Energies*, vol. 12, no. 20, p. 3830, Oct. 2019, doi: 10.3390/en12203830.
- [26] M. Mills, S. Singh, and I. Blackett, "Treatment of human waste in small-scale facilities: A prospective review," *Proc. Inst. Civ. Eng. – Waste and Resource Management*, vol. 175, no. 2, pp. 75–84, 2022, doi: 10.1680/jwarm.22.00017.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nama	: Mhd. Khairiyan Nazmi
Tempat/Tanggal Lahir	: Medan / 18 Desember 2002
Jenis kelamin	: Laki - Laki
Umur	: 22 Tahun
Agama	: Islam
Status	: Belum Menikah
Tinggi Badan / Berat Badan	: 173 cm / 70 kg
Kewarganegaraan	: Indonesia
Alamat	: Jl.Suka Teguh No. 28 Medan, Kec. Medan Johor, Sumater Utara
No Hp	: 0857-6763-5786
Email	: mhd.khairiyan@gmail.com

Latar Belakang Pendidikan

TK Khairul Imam	: Tahun 2007 - 2008
SDN 067775	: Tahun 2008 - 2014
MTsN 1 Medan	: Tahun 2014 - 2017
MAN 3 Medan	: Tahun 2017 - 2020

Universitas Muhammadiyah : Tahun 2020 – 2025
Sumatera Utara, Teknik Elektro