

Perancangan dan Analisis Sistem Transfer Daya Nirkabel Untuk Kendaraan Listrik Menggunakan Resonansi Kopling Magnetik

Daniel Setiadikarunia, Enrico Leonardo Hardy

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi dan Rekayasa Cerdas
Universitas Kristen Maranatha
Email : *blessed_dsk@yahoo.com*

Abstrak

Perkembangan kendaraan listrik mendorong penelitian mengenai teknologi pengisian baterai secara nirkabel. Teknologi transfer daya nirkabel medan dekat dapat dikelompokkan menjadi transfer daya induktif dan transfer daya kapasitif. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem pengisian baterai nirkabel berbasis resonansi kopling magnetik yang termasuk dalam kategori transfer daya induktif. Pada sisi pemancar, sumber listrik diubah menjadi arus bolak-balik berfrekuensi tinggi menggunakan inverter jembatan penuh. Arus tersebut dialirkan melalui kumparan pemancar untuk menghasilkan medan magnet yang berubah terhadap waktu. Kumparan penerima dirancang agar beresonansi pada frekuensi yang sama dengan kumparan pemancar sehingga dapat menangkap medan magnet dan menghasilkan tegangan induksi. Tegangan bolak-balik pada sisi penerima kemudian disearahkan dan distabilkan untuk digunakan dalam pengisian baterai. Jaringan kompensasi seri-paralel digunakan untuk meningkatkan efisiensi transfer daya antara kumparan pemancar dan kumparan penerima. Kedua kumparan dirancang berbentuk spiral datar melingkar dengan diameter 15 cm. Pengujian dilakukan menggunakan dua variasi kumparan, yaitu kumparan dengan 9 lilitan dan 16 lilitan, yang dirancang masing-masing memiliki frekuensi resonansi sebesar 69,43 kHz dan 42,59 kHz. Hasil pengujian menunjukkan bahwa efisiensi transfer daya maksimum dari sisi DC masukan inverter ke DC keluaran (beban) sebesar 21,81% diperoleh pada jarak antarkumparan 6 cm menggunakan kumparan 16 lilitan. Dibandingkan dengan kumparan 9 lilitan, kumparan 16 lilitan menghasilkan efisiensi transfer daya yang lebih tinggi serta memiliki toleransi yang lebih baik terhadap pertambahan jarak sampai 12 cm dan ketidaksejajaran antarkumparan maksimum 9 cm.

Kata Kunci: *transfer daya nirkabel, pengisi daya baterai, kopling magnetik, jaringan kompensasi, resonansi*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dalam dunia otomotif sangatlah pesat, salah satu bentuk teknologi terbaru adalah kendaraan dengan menggunakan energi listrik. Kendaraan listrik merupakan salah satu alternatif untuk mengurangi polusi udara dan efek pemanasan global. Kendaraan listrik membutuhkan baterai sebagai tempat penyimpanan energi listrik yang nantinya digunakan untuk menggerakkan motor listrik. Oleh karena itu, teknologi pengisian daya baterai menjadi salah satu faktor yang paling krusial dalam memengaruhi adopsi kendaraan listrik secara luas. Kinerja, keamanan, kelayakan ekonomi, dan kenyamanan pengguna dari sistem pengisian daya baterai secara langsung memengaruhi tingkat penerimaan konsumen dan laju penyebaran infrastruktur kendaraan listrik [1].

Pengisian daya baterai pada kendaraan listrik secara umum dilakukan dengan menggunakan kabel yang terhubung ke saluran daya. Pengisian daya melalui kabel menawarkan beberapa keunggulan, antara lain kemampuan transfer daya yang tinggi, biaya yang relatif rendah, serta kompatibilitas yang baik dengan infrastruktur jaringan listrik yang sudah ada [2].

Pengisian daya melalui kabel memiliki beberapa kelemahan bawaan, yaitu proses penyambungan kabel secara manual mengurangi kenyamanan; risiko keselamatan dapat muncul di lingkungan yang lembap atau korosif; dan konektor mekanis dapat mengalami keausan seiring waktu [3]. Hal-hal tersebut membatasi otomatisasi dan fleksibilitas pengisian daya, sehingga mendorong pengembangan pendekatan alternatif seperti transfer daya nirkabel [4]. Selain itu, masalah lainnya terkait dengan pengisian daya melalui kabel adalah kurangnya standarisasi global dalam hal antarmuka pengisian daya dan protokol komunikasi. Berbagai wilayah telah mengadopsi standar yang berbeda-beda, yang mencerminkan struktur jaringan listrik dan ekosistem industri setempat, sehingga mengakibatkan rendahnya interoperabilitas antara kendaraan listrik dan infrastruktur pengisian daya di seluruh dunia [3]. Teknologi transfer daya nirkabel menghilangkan kebutuhan akan konektor mekanis atau pengoperasian manual, serta menawarkan berbagai keunggulan seperti peningkatan keamanan, tingkat otomatisasi yang lebih tinggi, dan kemampuan beradaptasi dengan lingkungan yang lebih baik.

Akibatnya, transfer daya nirkabel secara luas dianggap sebagai solusi yang menjanjikan dan cerdas untuk pengisian daya kendaraan listrik di masa depan [3].

Pengisian daya baterai pada kendaraan listrik secara nirkabel dapat dilakukan dengan 3 cara, yaitu pengisian statis, pengisian semi dinamis, dan pengisian dinamis [5][3]. Pengisian statis terjadi ketika kendaraan berada dalam posisi berhenti dan mesin mati. Pengisian semi dinamis terjadi ketika kendaraan berada dalam posisi berhenti dan mesin menyala. Sedangkan pengisian dinamis terjadi ketika kendaraan berada dalam keadaan berjalan.

Permasalahan yang muncul adalah bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem pengisian baterai secara nirkabel, bagaimana pengaruh faktor kualitas kumparan, jumlah lilitan kumparan, jarak antara kumparan pemancar dan penerima, dan ketidaksejajaran antara kumparan pemancar dan penerima terhadap efisiensi transfer daya sistem. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan perancangan dan implementasi sistem pengisian baterai secara nirkabel yang nantinya diharapkan dapat dikembangkan untuk kendaraan listrik. Sistem pengisian baterai yang dirancang menggunakan transfer daya nirkabel dengan teknologi resonansi yang tergandeng secara magnetik dengan topologi jaringan kompensasi yang digunakan adalah seri-paralel berbeda dengan penelitian terdahulu yang menggunakan topologi seri-seri [6], selain itu ukuran dan jumlah lilitan kumparan yang digunakan juga berbeda. Dalam penelitian ini dilakukan investigasi bagaimana pengaruh faktor kualitas kumparan, jumlah lilitan kumparan, jarak antara kumparan pemancar dan penerima, dan ketidaksejajaran antara kumparan pemancar dan penerima terhadap efisiensi transfer daya sistem.

Artikel ini mengulas perancangan, implementasi, dan analisis sistem pengisian baterai untuk secara nirkabel menggunakan teknologi resonansi yang tergandeng secara magnetik. Bentuk dan ukuran kumparan yang dibuat untuk pemancar dan penerima dibuat sama, yaitu kumparan spiral melingkar datar (*flat circular spiral*). Pengujian dilakukan menggunakan dua buah kumparan, yaitu kumparan 9 lilitan dan kumparan 16 lilitan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kumparan 16 lilitan memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan kumparan 9 lilitan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transfer Daya Nirkabel

Transfer daya nirkabel adalah teknik transmisi atau transfer daya listrik tanpa menggunakan sambungan fisik. Pada transfer daya nirkabel terdapat pemancar (*transmitter*) dan penerima (*receiver*).

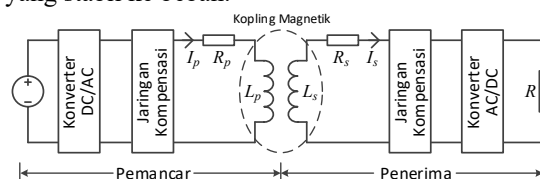
Teknologi transfer daya nirkabel terbagi menjadi 2 jenis berdasarkan mekanisme transfer dayanya, yaitu transfer daya nirkabel medan dekat (*near-field wireless power transmission*) atau teknik non-radiatif, dan transfer daya nirkabel medan jauh (*far-field wireless power transmission*) atau teknik radiatif [7][8].

Beberapa teknologi yang termasuk dalam transfer daya nirkabel medan dekat antara lain teknologi transfer daya induktif, teknologi transfer daya kapasitif, dan teknologi transfer daya resonansi kopling magnetik [7][3].

2.2 Transfer Daya Nirkabel Resonansi Kopling Magnetik (TDNRKM)

Transfer daya nirkabel medan dekat, khususnya resonansi kopling magnetik, telah menjadi pendekatan yang dominan dan menjanjikan berkat efisiensi dan keamanannya yang tinggi, kemudahan penggunaan, fleksibilitas pemasangan, dan kesesuaiannya untuk pengisian daya kendaraan listrik, meskipun kinerjanya sangat bergantung pada kesejajaran relatif antara unit pemancar dan penerima. Sistem TDNRKM dapat dirancang untuk menyesuaikan ketidaksejajaran dan jarak udara yang bervariasi antara kumparan pemancar dan penerima, sehingga sangat cocok untuk skenario pengisian daya di mana kendaraan mungkin tidak berada tepat di atas bantalan pengisian daya.

Teknologi TDNRKM ini memanfaatkan resonansi yang tergandeng secara magnetik untuk mentransfer energi secara efisien antara kumparan pemancar dan penerima pada jarak menengah. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, sistem TDNRKM terdiri dari pemancar dan penerima. Di sisi pemancar, konverter DC/AC menghasilkan arus bolak-balik frekuensi tinggi yang mengalir melalui kumparan pemancar untuk menghasilkan medan magnet yang berubah-ubah. Kumparan penerima, yang diatur agar beresonansi pada frekuensi yang sama dengan frekuensi medan magnet dari pemancar, menangkap medan magnet dan menginduksi arus bolak-balik, yang kemudian diperbaiki dan disaring untuk memasok daya DC yang stabil ke beban.



Gambar 1 Diagram Blok TDNRKM

Sistem TDNRKM beroperasi tanpa inti magnetik, sehingga kopling antara kumparan primer dan sekunder secara inheren lemah, yang biasanya menghasilkan koefisien kopling di bawah 0,3 [9].

Kopling yang lemah ini menyebabkan timbulnya daya reaktif yang cukup besar dan penurunan efisiensi transmisi. Untuk mengatasi masalah ini, jaringan kompensasi resonansi dipasang di kedua sisi sistem guna memastikan operasi resonansi. Dengan menetralkan efek reaktif dari induktansi bocor, jaringan ini secara signifikan meningkatkan pertukaran energi magnetik dan mempertahankan efisiensi tinggi bahkan dalam kondisi kopling lemah. Struktur klasik dari jaringan kompensasi adalah struktur seri-seri (SS), seri-paralel (SP), paralel-seri (PS), dan paralel-paralel (PP). Struktur jaringan kompensasi ini sederhana dan mudah diimplementasikan, walaupun sensitif terhadap variasi beban dan kopling [10].

2.3 Mekanisme Kopling

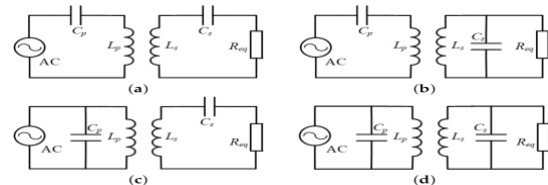
Mekanisme kopling dalam sistem TDNRKM, merupakan komponen esensial yang memungkinkan transmisi energi tanpa kontak. Mekanisme kopling dalam TDNRKM terutama terdiri dari kumparan pemancar, kumparan penerima, dan jalur kopling fluks magnetik yang menghubungkan keduanya. Dengan memberikan arus bolak-balik pada kumparan pemancar, medan magnet yang berubah-ubah dihasilkan dan kemudian digandeng melalui udara atau media magnetik untuk menginduksi gaya gerak listrik pada kumparan penerima. Sebagai saluran fundamental tempat energi elektromagnetik ditransfer, struktur geometris, parameter dimensi, dan susunan spasial mekanisme kopling memberikan pengaruh yang menentukan terhadap induktansi timbal balik, koefisien kopling, efisiensi sistem, stabilitas keluaran, dan toleransi terhadap ketidaksejajaran (*misalignment*) spasial. Variasi bentuk kumparan, baik berbentuk lingkaran, persegi panjang atau yang lain akan menghasilkan distribusi fluks magnetik dan karakteristik induktansi timbal balik yang sangat berbeda.

Di antara berbagai desain yang ada, struktur kumparan tunggal tetap menjadi bentuk yang paling mendasar dan paling banyak diteliti, yang terdiri dari kumparan spiral *loop* tertutup baik di sisi pemancar maupun penerima. Kumparan spiral melingkar dan kumparan planar persegi panjang menghasilkan distribusi fluks magnetik berbentuk cincin atau semicincin, dan kinerja koplingnya sangat bergantung pada dimensi kumparan, jumlah lilitan, jarak antar kumparan, serta kesejajaran relatif. Kumparan melingkar umumnya memberikan distribusi fluks simetris dan efisiensi tinggi dalam kondisi pengisian statis dengan kesejajaran yang baik antara kumparan pemancar dan penerima [3].

2.4 Jaringan Kompensasi

Jaringan kompensasi memainkan peran penting dalam menetralkan impedansi reaktif yang ditimbulkan oleh induktansi kumparan pada sistem TDNRKM.

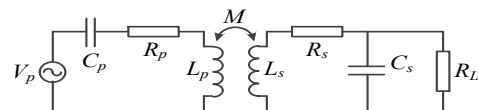
Penambahan kapasitor atau induktor eksternal berguna untuk mengimbangi induktansi bocor atau reaktansi kumparan, sehingga pemancar dan penerima beroperasi pada frekuensi resonansi yang sama. Hal ini mengurangi daya reaktif, meningkatkan faktor daya sistem, dan secara signifikan meningkatkan efisiensi transfer daya secara keseluruhan. Terdapat empat topologi jaringan kompensasi dasar, yaitu seri-seri (SS) [11][12], seri-paralel (SP) [13][14], paralel-seri (PS) [15][16], dan paralel-paralel (PP) [17][18], masing-masing ditunjukkan pada Gambar 2a-d.



Gambar 2. Topologi jaringan kompensasi dasar.
(a) SS (b) SP (c) PS (d) PP

2.5 TDNRKM dengan Topologi Jaringan Kompensasi SP

TDNRKM menggunakan topologi jaringan kompensasi seri-paralel akan meminimalkan daya reaktif dari sumber dan memaksimalkan efisiensi transfer daya. Rangkaian ekuivalen dari TDNRKM dengan kompensasi seri-paralel ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian ekuivalen TDNRKM dengan jaringan kompensasi seri-paralel

R_p dan L_p adalah resistansi dan induktansi kumparan primer, R_s dan L_s adalah resistansi dan induktansi kumparan sekunder, M adalah induktansi bersama, C_p adalah kapasitor kompensasi primer, C_s adalah kapasitor kompensasi sekunder, R_L adalah resistansi beban. Dengan rangkaian ekuivalen pada Gambar 3, efisiensi transfer daya (η) dari TDNRKM dengan topologi jaringan kompensasi seri-paralel dapat diekspresikan dengan Persamaan 1.

$$\eta = \frac{k^2 Q_p Q_s^2 Q_L}{(Q_s + Q_L)(Q_s + Q_L + k^2 Q_p Q_s Q_L)} \quad (1)$$

dengan $k = M / \sqrt{L_p L_s}$ adalah koefisien kopling magnetik;

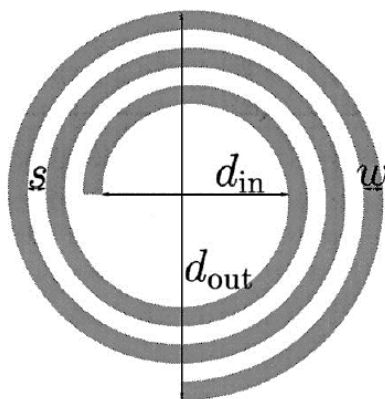
$Q_p = \omega_0 L_p / R_p$, $Q_s = \omega_0 L_s / R_s$, dan

$Q_L = R_L / (\omega_0 L_s)$ berturut-turut adalah faktor kualitas kumparan primer, kumparan sekunder, dan beban; ω_0 adalah frekuensi resonansi.

2.6 Bentuk Kumpanan

Dalam TDNRKM, resonator yang digunakan tersusun dari resistor, kapasitor, dan kumparan yang dapat dihubungkan secara seri ataupun paralel. Terdapat berbagai bentuk kumparan yang dapat digunakan untuk menghasilkan resonator, seperti yang berbentuk *flat/planar* atau yang tiga dimensi. Kumparan yang berbentuk *flat/planar* dapat berupa *circular* [19], *square* [20][21], *rectangular* [22], *octagonal* [23], *circular spiral* [24][25]. Pada topologi kompensasi, resonator yang digunakan terdiri atas kumparan dan kapasitor yang dapat dipasang secara seri ataupun paralel sesuai dengan topologi kompensasi yang digunakan.

Bentuk kumparan *circular*, *circular spiral*, *square*, dan *rectangular* paling banyak digunakan karena desainnya yang sederhana dan biaya pembuatan yang murah. Untuk pengisian daya pada kendaraan listrik tidak dapat digunakan struktur yang berbentuk *helix*, *omnidirectional*, *cavity*, dan *conical* [7]. Hal ini dikarenakan pada kendaraan listrik terdapat keterbatasan tempat, sehingga beberapa resonator pada kendaraan listrik dibuat dengan menggunakan struktur kumparan berbentuk spiral melingkar datar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kumparan spiral melingkar datar

Nilai induktansi pada kumparan pemancar ataupun penerima yang berbentuk spiral melingkar datar dapat dicari menggunakan metode *loop inductance* yang dinyatakan dengan Persamaan 2 [7].

$$L = \frac{N^2 A^2}{30A - 11d_{in}} \quad (2)$$

dengan

$$A = \frac{d_{in} + N(w+s)}{2} \quad (3)$$

L = induktansi (μH)

N = jumlah lilitan

w = diameter kawat (inch)

s = jarak antar lilitan (inch)

d_{in} = diameter dalam kumparan (inch)

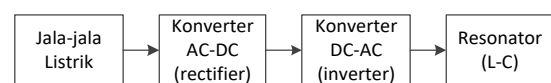
III. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Penelitian eksperimen dilakukan untuk mengamati dan menguji kinerja perangkat pengisi daya baterai menggunakan teknologi transfer daya nirkabel dengan resonansi kopling magnetik.

Tempat penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Elektronika Fakultas Teknologi dan Rekayasa Cerdas, Universitas Kristen Maranatha Bandung.

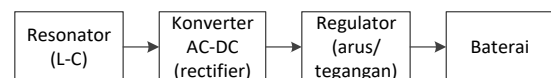
3.1 Perancangan Sistem

Sistem TDNRKM yang dirancang terdiri dari bagian pemancar dan bagian penerima. Diagram blok bagian pemancar ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram blok pemancar

Pada bagian pemancar, tegangan bolak-balik dari jala-jala listrik diubah menjadi tegangan searah menggunakan konverter AC ke DC berupa penyearah. Tegangan searah yang dihasilkan lalu diubah menjadi tegangan bolak-balik kembali tetapi dengan frekuensi yang jauh lebih tinggi dari frekuensi jala-jala listrik menggunakan konverter DC ke AC berupa inverter. Tegangan bolak-balik frekuensi tinggi yang dihasilkan diumpankan ke resonator (kumparan dan kapasitor) menghasilkan medan magnet yang berubah-ubah yang akan digandeng secara magnetik untuk menginduksi gaya gerak listrik pada resonator penerima.



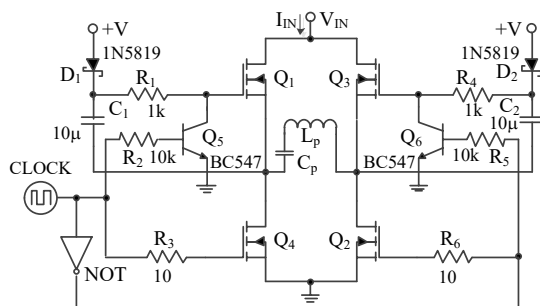
Gambar 6. Diagram blok penerima

Diagram blok bagian penerima ditunjukkan pada Gambar 6. Pada bagian penerima, gaya gerak listrik frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh resonator penerima diubah menjadi tegangan searah menggunakan konverter AC ke DC berupa penyearah. Tegangan searah yang dihasilkan diregulasi melalui regulator untuk menghasilkan tegangan atau arus yang teregulasi untuk pengisian muatan baterai.

3.2 Perancangan Bagian Pemancar

Konverter AC ke DC pada pemancar digunakan catu daya yang tersedia di laboratorium. Konverter DC ke AC pada pemancar yang dirancang merupakan inverter gelombang persegi menggunakan jembatan penuh (*H-bridge*).

Jembatan penuh yang dirancang menggunakan empat buah MOSFET IRLZ44N seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Keluaran dari inverter diumpankan pada resonator berupa kumparan primer (L_p) yang dipasang seri dengan kapasitor kompensasi (C_p). Pada sistem TDNRKM yang dirancang dalam penelitian ini, digunakan jaringan kompensasi dengan topologi seri-paralel (SP). Pada sisi pemancar digunakan hubungan seri antara kumparan dan kapasitor, sedangkan pada sisi penerima digunakan hubungan paralel seperti Gambar 2.b. Sumber *clock* atau gelombang persegi diimplementasikan menggunakan IC *timer* 555 yang dirangkai sebagai multivibrator astabil yang menghasilkan gelombang persegi dengan *duty cycle* 50% dan frekuensi yang dapat diatur sesuai dengan frekuensi resonansi yang digunakan.



Gambar 7. Konverter DC-AC (inverter jembatan penuh)

3.2.1 Perancangan Kumparan Resonator

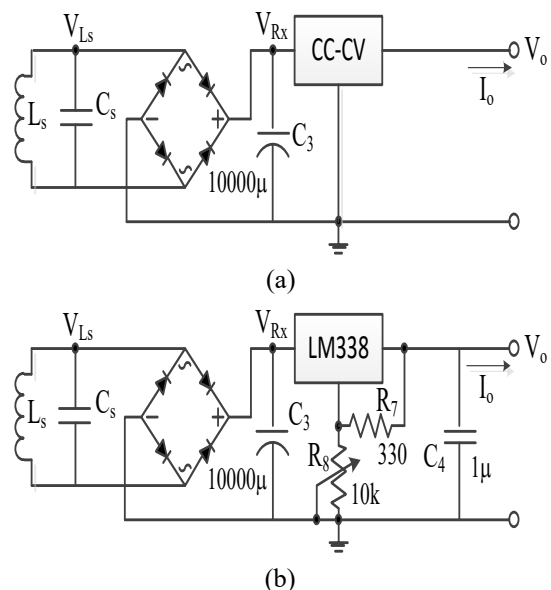
Kumparan resonator (L_p) yang dirancang pada sistem TDNRKM dalam penelitian ini berbentuk spiral melingkar seperti Gambar 4. Dalam penelitian ini dirancang dua buah kumparan, yaitu kumparan pertama berdiameter luar (d_{out}) 15 cm, 9 lilitan, dan kumparan kedua berdiameter luar (d_{out}) 15 cm, 16 lilitan. Kumparan direalisasikan dengan kawat tembaga berdiameter 1 mm. Nilai induktansi dari rancangan kumparan ini dapat dihitung menggunakan Persamaan 2 dan Persamaan 3. Nilai induktansi untuk kumparan 9 lilitan adalah 23,906 μ H dan untuk kumparan 16 lilitan adalah 63,544 μ H.

3.3 Perancangan Bagian Penerima

Resonator pada penerima berupa kumparan sekunder (L_s) yang dipasang paralel dengan kapasitor kompensasi (C_s). Medan magnet yang berubah-ubah yang dihasilkan oleh resonator pemancar kemudian digandeng secara magnetik untuk menginduksi gaya gerak listrik pada kumparan sekunder (L_s) yang paralel dengan C_s , menghasilkan resonansi pada resonator penerima. Kumparan sekunder (L_s) dibuat sama dengan kumparan primer (L_p) dan kapasitor C_s yang digunakan sama dengan C_p .

Sistem TDNRKM dalam penelitian ini dirancang untuk bekerja pada frekuensi antara 40 kHz – 80 kHz. Jadi resonator akan beresonansi pada frekuensi tersebut, tergantung pada nilai induktansi kumparan dan nilai kapasitansi kapasitor kompensasi yang digunakan. Persamaan untuk frekuensi resonansi adalah $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$. Untuk kumparan 9 lilitan dengan induktansi $L = 23,906 \mu$ H dan kapasitor yang digunakan dengan nilai kapasitansi $C = 0,22 \mu$ F, diperoleh frekuensi resonansi $f = 69,43$ kHz. Untuk kumparan 16 lilitan dengan nilai induktansi $L = 63,544 \mu$ H dan kapasitor yang digunakan sama, yaitu $C = 0,22 \mu$ F, diperoleh frekuensi resonansi $f = 42,59$ kHz.

Keluaran dari resonator diumpankan pada konverter AC ke DC berupa penyearah gelombang penuh dan filter kapasitor. Tegangan searah yang diperoleh, digunakan untuk mengisi baterai melalui modul regulator arus/tegangan. Dalam penelitian ini dibuat dua buah penerima yang berbeda, yaitu yang menggunakan modul CC-CV (*Constant Current - Constant Voltage*) dan yang menggunakan regulator tegangan LM338 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.

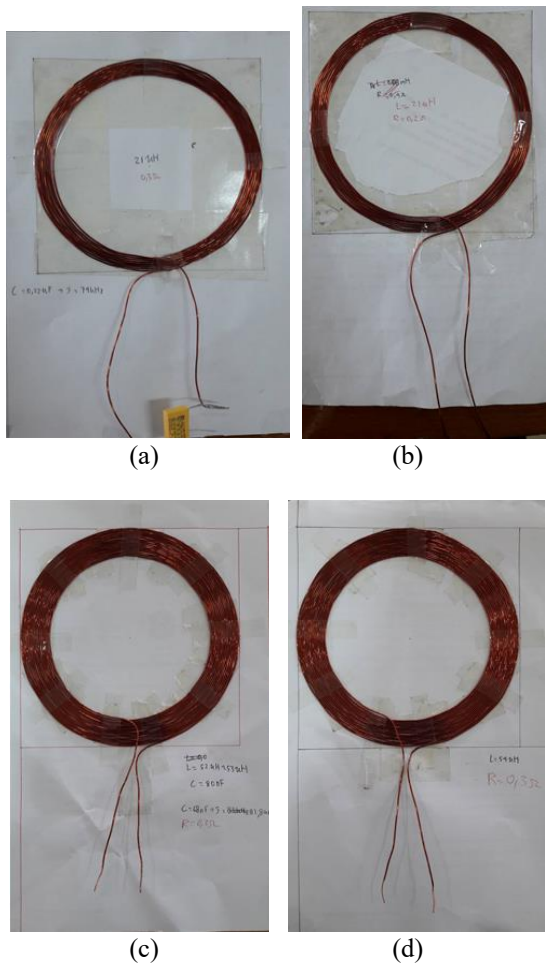


Gambar 8. Rangkaian penerima. (a) dengan modul CC-CV. (b) dengan regulator LM338

IV. HASIL DAN ANALISA

4.1 Realisasi Kumparan Spiral Melingkar Datar

Kumparan yang direalisasikan terdiri dari kumparan pemancar dan penerima seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Kumputan yang direalisasikan. (a) Kumputan pemancar 9 lilitan. (b) Kumputan penerima 9 lilitan. (c) Kumputan pemancar 16 lilitan. (d) Kumputan penerima 16 lilitan

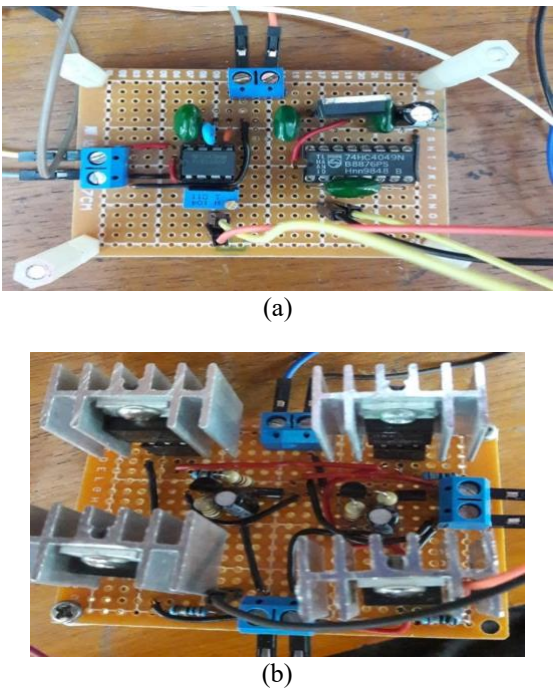
Hasil pengukuran induktansi dan resistansi kumputan pada pemancar dan penerima yang direalisasikan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil perhitungan dan pengukuran induktansi dan resistansi kumputan

Kumputan	Jumlah Lilitan	L (μH)		R (Ω)
		Perhitungan	Pengukuran	
Pemancar	9	23,906	21	0,3
Penerima	9	23,906	21	0,2
Pemancar	16	63,544	53	0,3
Penerima	16	63,544	54	0,3

4.2 Realisasi Inverter Jembatan Penuh

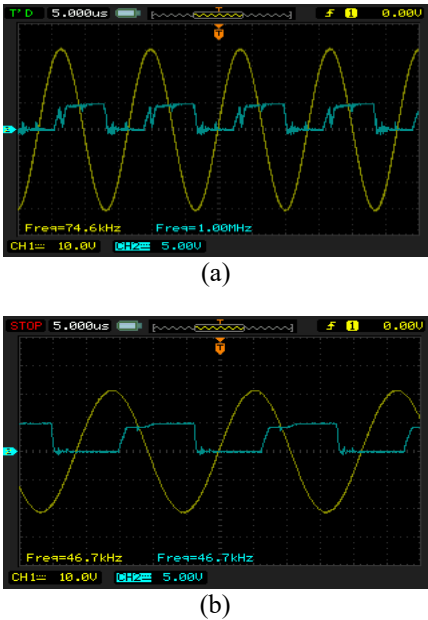
Konverter DC ke AC (inverter jembatan penuh) yang direalisasikan, terdiri dari rangkaian sumber gelombang persegi dan rangkain jembatan penuh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Rangkaian inverter *full-bridge* yang direalisasikan. (a) Rangkaian sumber gelombang persegi (*clock*). (b) Rangkaian *full-bridge*.

4.3 Frekuensi Resonansi

Frekuensi gelombang persegi (*clock*) diatur sampai resonator pemancar dan penerima masing-masing beresonansi. Bentuk gelombang persegi dan gelombang resonansi yang diperoleh pada penerima ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. (a) Gelombang persegi dan gelombang pada resonator penerima (V_L) untuk kumputan 9 lilitan. (b) Gelombang persegi dan gelombang pada resonator penerima (V_L) untuk kumputan 16 lilitan.

Frekuensi resonansi resonator hasil perhitungan dan yang diukur pada rangkaian ditunjukkan pada Tabel 2. Dapat dilihat terdapat perbedaan antara frekuensi resonansi yang dihitung secara teoritis dan yang diukur pada rangkaian. Hal ini disebabkan adanya toleransi nilai kapasitor yang digunakan dan hasil perhitungan diperoleh ketika resonator belum terpasang pada rangkaian, sehingga pengaruh dari rangkaian lainnya tidak diperhitungkan.

Tabel 2. Nilai frekuensi resonansi resonator

Resonator	Kumparan (Lilitan)	Frekuensi (kHz)	
		Perhitungan	Pengukuran
Pemancar	9	69,43	74,05
Penerima	9	69,43	74,05
Pemancar	16	42,59	46,61
Penerima	16	42,59	46,18

Transfer daya secara nirkabel sangat dipengaruhi oleh faktor kualitas dari kumparan yang digunakan [26]. Semakin tinggi faktor kualitas kumparan, maka kualitas transfer daya secara nirkabel semakin baik. Faktor kualitas kumparan bergantung pada frekuensi kerja (f), nilai induktansi (L), dan nilai resistansi (R) kumparan, yang secara matematis diekspresikan sebagai $Q = 2\pi fL/R$. Tabel 3 menunjukkan nilai faktor kualitas kumparan 9 lilitan dan 16 lilitan yang direalisasikan.

Tabel 3. Nilai faktor kualitas kumparan

Frekuensi (kHz)	Jumlah Lilitan	L (μ H)	R (Ω)	Faktor Kualitas
74,05	9	21	0,3	32,57
74,05	9	21	0,2	48,85
46,61	16	53	0,3	51,74
46,18	16	54	0,3	52,23

4.4 Pengisian Daya

Pengujian pengisian daya baterai dilakukan dengan kumparan 9 lilitan dan 16 lilitan. Pengisian daya akan dilakukan pada baterai bertegangan 13,04 V. Pengisian daya baterai dilakukan dengan 2 modul penstabil tegangan, yaitu modul CC-CV dan regulator tegangan LM338. Pada kumparan 9 lilitan digunakan tegangan V_{IN} (tegangan searah pada masukan inverter jembatan penuh) sebesar 8,91 V, sedangkan pada kumparan 16 lilitan digunakan tegangan V_{IN} sebesar 3,85 V. Tegangan ini ditentukan dari hasil percobaan, dimana tegangan keluaran penyearah yang dihasilkan pada penerima tidak melebihi batas tegangan masukan maksimum yang diperbolehkan oleh modul CC-CV dan regulator tegangan LM338.

Efisiensi transfer daya didefinisikan sebagai rasio daya arus searah pada keluaran penerima terhadap daya arus searah masukan inverter pada pemancar. Dalam pengujian pengisian daya baterai ini, efisiensi transfer daya dapat diekspresikan sebagai $E_{\text{efisiensi transfer daya}} = \frac{V_{\text{baterai}} \times I_o}{V_{IN} \times I_{IN}} \times 100\%$, dengan I_o adalah arus pengisian baterai, V_{IN} dan I_{IN} adalah tegangan dan arus searah pada inverter jembatan penuh seperti terlihat pada Gambar 7.

Hasil-hasil dari pengujian pengisian daya baterai ditunjukkan pada Tabel 4 – Tabel 7 dan Gambar 12.

Tabel 4. Pengujian pengisian daya baterai dengan kumparan 9 lilitan menggunakan modul CC-CV

Jarak (cm)	V_{IN} (V)	I_{IN} (A)	V_{Ls} (Vpp)	V_{Rx} (V)	I_o (mA)	Efisiensi (%)
4	8,91	0,3	47,6	21,85	6,8	3,32
6	8,91	0,5	54,4	24,60	7,3	2,14

Tabel 5. Pengujian pengisian daya baterai dengan kumparan 9 lilitan menggunakan LM338

Jarak (cm)	V_{IN} (V)	I_{IN} (A)	V_{Ls} (Vpp)	V_{Rx} (V)	I_o (mA)	Efisiensi (%)
4	8,91	0,6	34,8	14,60	28,1	6,85
6	8,91	0,5	33,6	14,49	10,0	2,93
8	8,91	0,5	33,2	14,43	4,7	1,38
10	8,91	0,5	32,4	14,30	0,4	0,11

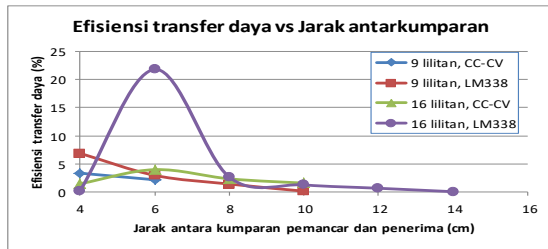
Tabel 6. Pengujian pengisian daya baterai dengan kumparan 16 lilitan menggunakan modul CC-CV

Jarak (cm)	V_{IN} (V)	I_{IN} (A)	V_{Ls} (Vpp)	V_{Rx} (V)	I_o (mA)	Efisiensi (%)
4	3,85	0,7	16,0	4,70	6,9	1,44
6	3,85	0,4	36,4	15,60	10,8	3,95
8	3,85	0,5	42,0	19,93	7,9	2,31
10	3,85	0,7	32,2	15,50	7,4	1,55

Tabel 7. Pengujian pengisian daya baterai dengan kumparan 16 lilitan menggunakan LM338

Jarak (cm)	V_{IN} (V)	I_{IN} (A)	V_{Ls} (Vpp)	V_{Rx} (V)	I_o (mA)	Efisiensi (%)
4	3,85	0,5	32,4	14,34	0,7	0,21
6	3,85	0,1	34,0	14,53	14,9	21,81
8	3,85	0,6	34,0	14,50	10,7	2,61
10	3,85	0,7	33,2	14,46	5,9	1,23
12	3,85	0,6	32,8	14,38	2,6	0,63
14	3,85	0,7	32,0	14,25	0,1	0,02

Grafik yang menunjukkan pengaruh jarak antara kumparan pemancar dan kumparan penerima terhadap efisiensi transfer daya sistem TDNRKM yang direalisasikan dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Kurva efisiensi transfer daya terhadap jarak antara kumparan pemancar dan kumparan penerima

Efisiensi transfer daya dari sistem TDNRKM yang direalisasikan masih sangat kecil. Efisiensi transfer daya yang diperoleh dari hasil pengujian maksimal sebesar 21,81%. Hal ini disebabkan adanya konsumsi daya oleh konverter – konverter tegangan dan penstabil tegangan yang digunakan.

Jarak antara kumparan pemancar dan kumparan penerima mempengaruhi efisiensi transfer daya seperti dapat dilihat pada kurva Gambar 12. Hal ini dikarenakan jarak antarkumparan d mempengaruhi nilai koefisien kopling magnetik k dan induktansi bersama M , yaitu nilai $k = M/\sqrt{L_p L_s}$ berbanding terbalik dengan pangkat tiga jarak antarkumparan atau $k \propto 1/d^3$. Jadi nilai k akan menurun seiring bertambahnya jarak antarkumparan. Dari Persamaan 1, diketahui bahwa efisiensi transfer daya η berbanding lurus dengan k^2 , sehingga efisiensi transfer daya menurun secara drastis seiring bertambahnya jarak antarkumparan ($\propto 1/d^6$) untuk jarak jauh ($d >$ jari-jari kumparan).

Efisiensi transfer daya menurun tidak hanya untuk jarak antarkumparan yang membesar, tetapi juga untuk jarak antarkumparan yang terlalu dekat ($d \ll$ jari-jari kumparan). Ketika jarak antarkumparan sangat dekat, nilai k dan M menjadi sangat besar, sehingga impedansi/resistansi refleksi ($R_{refleksi} \propto M^2$) yang muncul di sisi primer akan meningkat tajam menghasilkan fenomena *frequency splitting* [27], yaitu kurva karakteristik frekuensi sistem jadi mempunyai dua titik puncak baru (resonansi ganda). Jika sistem tetap dioperasikan pada frekuensi kerja tunggal ω_0 , efisiensi transfer daya akan menurun karena sistem tidak lagi beroperasi pada titik daya maksimumnya. Terdapat jarak optimal antarkumparan, yaitu terjadi kondisi kopling kritis ($k = k_{kritis}$). Pada kondisi ini efisiensi transfer daya mencapai nilai maksimum. Jadi untuk jarak antarkumparan yang jauh ($d > d_{optimal}$), nilai $k < k_{kritis}$, efisiensi transfer daya menurun secara drastis, untuk jarak antarkumparan yang sangat dekat ($d < d_{optimal}$), nilai $k > k_{kritis}$, efisiensi transfer daya menurun (tidak stabil, akibat *frequency splitting*).

Pada Gambar 12, dapat dilihat bahwa jarak optimal antarkumparan untuk kumparan 16 lilitan adalah 6 cm.

Rugi-rugi daya yang terjadi pada sistem TDNRKM terutama adalah rugi-rugi konduksi pada kumparan akibat adanya resistansi pada kawat tembaga kumparan primer (R_p) dan sekunder (R_s), rugi-rugi kapasitor kompensasi akibat adanya resistansi seri ekuivalen pada kapasitor kompensasi primer (C_p) dan sekunder (C_s), rugi-rugi pada konverter DC-AC (inverter jembatan penuh), dan rugi-rugi konverter AC-DC (penyearah, filter kapasitor, dan regulator tegangan).

Persamaan 1 menunjukkan bahwa efisiensi transfer daya merupakan fungsi dari faktor kualitas kumparan primer (Q_p) dan sekunder (Q_s) serta faktor kualitas beban Q_L . Semakin tinggi nilai faktor kualitas Q_p atau Q_s (berarti nilai R_p atau R_s kecil), semakin kecil rugi-rugi daya internal, maka efisiensi transfer daya meningkat. Untuk kondisi tanpa beban ($R_L = \infty$), nilai $Q_L = \infty$, maka efisiensi transfer daya menjadi nol, karena tidak ada daya yang ditransfer ke beban di sisi sekunder. Untuk kondisi beban hubung singkat ($R_L = 0$), nilai $Q_L = 0$, maka efisiensi transfer daya juga menjadi nol, karena daya pada beban sama dengan nol, seluruh daya akan terdisipasi pada resistansi R_s yang membahayakan kumparan sekunder, karena arus yang mengalir dapat melebihi arus maksimum yang diizinkan pada kumparan sekunder. Jadi untuk mencapai efisiensi transfer daya maksimum pada jarak antarkumparan tertentu, terdapat nilai beban optimal ($0 < R_{L-optimal} < \infty$) yang harus dipasang.

Penggunaan regulator tegangan LM338 memungkinkan jarak pemancar dan penerima lebih jauh dibandingkan dengan menggunakan modul CC-CV. Hal ini disebabkan konsumsi daya pada modul CC-CV yang lebih besar dibandingkan dengan regulator tegangan LM338. Efisiensi transfer daya terbesar dengan menggunakan modul CC-CV sebesar 3,95% yang dapat dilihat pada Tabel 6, sedangkan efisiensi transfer daya terbesar dengan menggunakan regulator tegangan LM338 adalah sebesar 21,81% yang dapat dilihat pada Tabel 7.

Kumparan 16 lilitan memiliki keunggulan dalam hal efisiensi transfer daya dan jarak transmisi (jarak antara kumparan pemancar dan penerima). Hal ini disebabkan kumparan 16 lilitan mempunyai faktor kualitas yang lebih tinggi dibandingkan kumparan 9 lilitan. Kumparan 16 lilitan memiliki efisiensi transfer daya paling besar 21,81%, sedangkan kumparan 9 lilitan memiliki efisiensi transfer daya paling besar 6,85%. Dalam hal jarak transmisi, kumparan 16 lilitan dapat mencapai jarak 14 cm, sedangkan kumparan 9 lilitan hanya mencapai jarak 10 cm.

4.5 Pengujian Ketidaksejajaran (*Misalignment*)

Pengujian ketidaksejajaran untuk kumparan 9 lilitan dan 16 lilitan dilakukan pada jarak antara pemancar dan penerima yang menghasilkan efisiensi transfer daya terbesar. Untuk kumparan 9 lilitan dilakukan pada jarak 4 cm dan untuk kumparan 16 lilitan dilakukan pada jarak 6 cm. Ketidaksejajaran dilakukan dengan menggeser kumparan penerima secara radial. Hasil pengujian ketidaksejajaran kumparan dalam pengisian daya baterai ditunjukkan pada Tabel 8 dan Tabel 9.

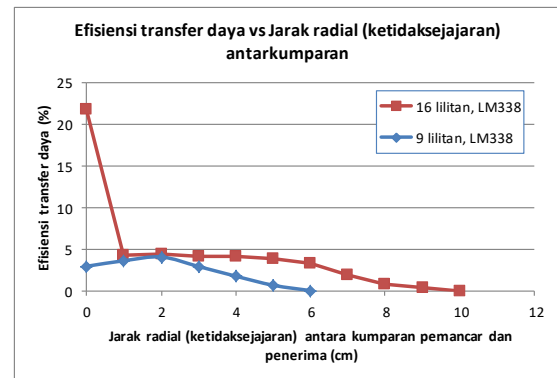
Tabel 8. Pengujian ketidaksejajaran kumparan 9 lilitan pada pengisian daya menggunakan LM338

Jarak radial (cm)	V_{IN} (V)	I_{IN} (A)	V_{Ls} (Vpp)	V_{Rx} (V)	I_o (mA)	Efisiensi (%)
0	8,91	0,5	33,6	14,49	10,0	2,93
1	8,91	0,7	34	14,31	17,4	3,6
2	8,91	0,6	34	14,31	16,8	4,05
3	8,91	0,6	33,6	14,27	12	2,9
4	8,91	0,5	32,8	14,21	6	1,73
5	8,91	0,5	32,4	14,15	2,2	0,64
6	8,91	0,5	31	13,89	0	0

Tabel 9. Pengujian ketidaksejajaran kumparan 16 lilitan pada pengisian daya menggunakan LM338

Jarak radial (cm)	V_{IN} (V)	I_{IN} (A)	V_{Ls} (Vpp)	V_{Rx} (V)	I_o (mA)	Efisiensi (%)
0	3,85	0,1	34,0	14,53	14,9	21,81
1	3,85	0,4	33,2	14,34	11,8	4,27
2	3,85	0,5	33,2	14,33	15,4	4,46
3	3,85	0,5	33,2	14,33	14,1	4,08
4	3,85	0,5	32,2	14,33	14,3	4,14
5	3,85	0,6	32,2	14,35	15,8	3,81
6	3,85	0,6	32,2	14,33	13,9	3,35
7	3,85	0,7	32,8	14,28	9,6	1,96
8	3,85	0,7	32	14,21	3,9	0,81
9	3,85	0,7	31,6	14,16	1,8	0,37
10	3,85	0,6	30,8	12,94	0	0

Grafik yang menunjukkan pengaruh ketidaksejajaran (pergeseran radial atau lateral) antara kumparan pemancar dan kumparan penerima terhadap efisiensi transfer daya sistem TDNRKM yang direalisasikan dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Kurva efisiensi transfer daya terhadap jarak radial (ketidaksejajaran) antara kumparan pemancar dan kumparan penerima

Penurunan efisiensi transfer daya akibat adanya pergeseran radial (ketidaksejajaran) akan berbentuk kurva lonceng (seperti kurva Gaussian). Efisiensi transfer daya berada pada titik maksimum ketika pergeseran radial sama dengan nol, kemudian menurun seiring bertambah besarnya pergeseran radial seperti dapat dilihat pada kuva Gambar 13. Kurva efisiensi transfer daya yang ditunjukkan pada Gambar 13 hanya untuk satu arah pergeseran radial saja. Jika dilakukan pergeseran ke semua arah radial (360°), maka akan diperoleh bentuk kurva lonceng. Efisiensi transfer daya menurun akibat koefisien kopling magnetik k mengecil seiring bertambah besarnya pergeseran radial antarkumparan.

Dari hasil pengujian ketidaksejajaran, diperoleh bahwa kumparan 16 lilitan lebih dapat memberikan toleransi terhadap ketidaksejajaran kumparan penerima terhadap kumparan pemancar dibandingkan dengan kumparan 9 lilitan. Dapat dilihat pada Tabel 8 dan Tabel 9, tegangan pada resonator penerima (V_{Ls}) kumparan 16 lilitan lebih stabil daripada kumparan 9 lilitan untuk pergeseran 1 cm hingga 5 cm. Kumparan 16 lilitan dapat digeser sampai sejauh 9 cm, sedangkan kumparan 9 lilitan dapat digeser sejauh 5 cm. Hal ini disebabkan nilai faktor kualitas kumparan 16 lilitan lebih tinggi daripada kumparan 9 lilitan.

Dari pengujian ketidaksejajaran, dapat diperoleh bahwa kumparan spiral melingkar datar cukup sensitif terhadap ketidaksejajaran. Contohnya untuk kumparan 16 lilitan, efisiensi transfer daya turun dari 21,81% menjadi 4,27% ketika kumparan penerima digeser sejauh 1 cm. Dengan demikian kumparan spiral melingkar datar lebih cocok untuk pengisian daya nirkabel statis, yaitu ketika kendaraan berada dalam posisi berhenti, mesin mati, dan kumparan penerima tepat sejajar dengan kumparan pemancar, misalnya ketika kendaraan sedang berada di garasi, di tempat parkir, atau di stasiun pengisian kendaraan listrik umum.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengamatan dan percobaan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Pengisi daya nirkabel dengan menggunakan kopling resonansi magnetik telah berhasil direalisasikan.
2. Efisiensi pengisi daya nirkabel yang dibuat sangat kecil, yaitu sebesar 21,81%. Hal ini disebabkan antara lain adanya konsumsi daya oleh konverter – konverter tegangan dan penstabil tegangan yang digunakan.
3. Kumputan 16 lilitan memiliki kelebihan dibandingkan dengan kumputan 9 lilitan, yaitu memiliki efisiensi transfer daya yang lebih tinggi dan toleransi ketidaksejajaran kumputan penerima dengan kumputan pemancar yang lebih besar. Hal ini disebabkan kumputan 16 lebih memiliki faktor kualitas yang lebih tinggi daripada kumputan 9 lilitan.
4. Kumputan spiral melingkar datar cukup sensitif terhadap ketidaksejajaran radial/lateral, sehingga lebih cocok untuk pengisian daya nirkabel statis.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian ini adalah:

1. Meningkatkan faktor kualitas kumputan agar diperoleh efisiensi pengisian daya yang lebih besar dengan menggunakan diameter kawat yang lebih besar dan menambah jumlah lilitan.
2. Dapat digunakan tipe/bentuk kumputan yang berbeda atau digunakan lebih dari satu kumputan agar tidak terlalu sensitif terhadap ketidaksejajaran.
3. Menggunakan penstabil tegangan lain yang lebih efisien atau menggunakan umpan balik untuk menaikkan tegangan pada pemancar ketika jarak antara kumputan pemancar dan penerima semakin jauh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Kristen Maranatha atas dukungan dana dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Tan, W. Zhao, H. Liu, J. Li, and X. Huang, "Design and Optimization of Ground-Side Power Transmitting Coil Parameters for EV Dynamic Wireless Charging System," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 74595–74604, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988622.
- [2] M. Masud Rana *et al.*, "Comprehensive Review on the Charging Technologies of Electric Vehicles (EV) and Their Impact on Power Grid," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 35124–35156, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3538663.
- [3] Y. Wu, P. Nie, Z. Wang, L. Wang, S. Hashimoto, and T. Kawaguchi, "A Comprehensive Review of Magnetic Coupling Mechanisms, Compensation Networks, and Control Strategies for Electric Vehicle Wireless Power Transfer Systems," *Process. 2026, Vol. 14, Page 287*, vol. 14, no. 2, p. 287, Jan. 2026, doi: 10.3390/PR14020287.
- [4] E. Asa, O. C. Onar, M. Mohammad, V. Prakash Galigekere, G. J. Su, and B. Ozpineci, "Overview of High-Power Wireless Charging Systems and Analysis of Polyphase Wireless Charging System Phase Winding and Resonant Tuning Network Connection Configurations," *IEEE Trans. Transp. Electr.*, vol. 11, no. 2, pp. 6700–6718, 2025, doi: 10.1109/TTE.2024.3514841.
- [5] P. Livreri, V. Di Dio, R. Miceli, F. Pellitteri, G. R. Galluzzo, and F. Viola, "Wireless battery charging for electric bicycles," *2017 6th Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact, ICCEP 2017*, pp. 602–607, Aug. 2017, doi: 10.1109/ICCEP.2017.8004750.
- [6] I. Bentalhik *et al.*, "Analysis, Design and Realization of a Wireless Power Transfer Charger for Electric Vehicles: Theoretical Approach and Experimental Results," *World Electr. Veh. J.*, vol. 13, no. 7, Jul. 2022, doi: 10.3390/WEVJ13070121.
- [7] M. A. Houran, X. Yang, and W. Chen, "Magnetically Coupled Resonance WPT: Review of Compensation Topologies, Resonator Structures with Misalignment, and EMI Diagnostics," *Electron. 2018, Vol. 7, Page 296*, vol. 7, no. 11, p. 296, Nov. 2018, doi: 10.3390/ELECTRONICS7110296.
- [8] A. El-Shahat and S. Sumaiya, "DC-Microgrid System Design, Control, and Analysis," *Electron. 2019, Vol. 8, Page 124*, vol. 8, no. 2, p. 124, Jan. 2019, doi: 10.3390/ELECTRONICS8020124.
- [9] P. Nie, S. Xu, Z. Wang, S. Hashimoto, L. Sun, and T. Kawaguchi, "Design and Implementation of a Wireless Power Transfer System Using LCL Coupling Network with Inherent Constant-Current and Constant-Voltage Output for Battery Charging," *Energies 2025, Vol. 18, Page 341*, vol. 18, no. 2, p. 341, Jan. 2025, doi: 10.3390/EN18020341.

- [10] Z. Li, C. Zhu, J. Jiang, K. Song, and G. Wei, "A 3-kW Wireless Power Transfer System for Sightseeing Car Supercapacitor Charge," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 5, pp. 3301–3316, May 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2584701.
- [11] Y. C. Hsieh, Z. R. Lin, M. C. Chen, H. C. Hsieh, Y. C. Liu, and H. J. Chiu, "High-Efficiency Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle Applications," *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 64, no. 8, pp. 942–946, Aug. 2017, doi: 10.1109/TCSII.2016.2624272.
- [12] X. Hong, W. Zhang, L. Xia, Z. Jin, C. Gong, and X. Zhang, "Loss Characteristics of Magnetic Resonant WPT System with S-S Topology," *2023 Int. Conf. Data Sci. Netw. Secur. ICDSNS 2023*, pp. 1–6, Jul. 2023, doi: 10.1109/ICDSNS58469.2023.10245311.
- [13] R. Jegadeesan and Y. X. Guo, "Topology selection and efficiency improvement of inductive power links," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 10, pp. 4846–4854, 2012, doi: 10.1109/TAP.2012.2207325.
- [14] L. Yang, L. Ren, Y. Shi, M. Wang, and Z. Geng, "Analysis and Design of an S/S/P-Compensated Three-Coil Structure WPT System With Constant Current and Constant Voltage Output," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 11, no. 3, pp. 2487–2500, Jun. 2023, doi: 10.1109/JESTPE.2022.3200420.
- [15] F. Liu, Y. Yang, D. Jiang, X. Ruan, and X. Chen, "Modeling and optimization of magnetically coupled resonant wireless power transfer system with varying spatial scales," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 4, pp. 3240–3250, Apr. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2581840.
- [16] V. Ravikiran and R. K. Keshri, "Comparative evaluation of S-S and P-S topologies for wireless charging of electrical vehicles," *Proc. IECON 2017 - 43rd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 2017-Janua, pp. 5324–5329, Dec. 2017, doi: 10.1109/IECON.2017.8216922.
- [17] J. Kim, D. H. Kim, J. Choi, K. H. Kim, and Y. J. Park, "Free-positioning wireless charging system for small electronic devices using a bowl-shaped transmitting coil," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 63, no. 3, pp. 791–800, Mar. 2015, doi: 10.1109/TMTT.2015.2398865.
- [18] A. O. Hariri, T. Youssef, A. Elsayed, and O. Mohammed, "A Computational Approach for a Wireless Power Transfer Link Design Optimization Considering Electromagnetic Compatibility," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 3, pp. 1–4, Mar. 2016, doi: 10.1109/TMAG.2015.2492922.
- [19] J. Zhang, X. Yuan, C. Wang, and Y. He, "Comparative Analysis of Two-Coil and Three-Coil Structures for Wireless Power Transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 1, pp. 341–352, Jan. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2526780.
- [20] F. L. Cabrera and F. Rangel De Sousa, "Achieving Optimal Efficiency in Energy Transfer to a CMOS Fully Integrated Wireless Power Receiver," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, no. 11, pp. 3703–3713, Nov. 2016, doi: 10.1109/TMTT.2016.2601916.
- [21] S. C. Moon and G. W. Moon, "Wireless Power Transfer System with an Asymmetric Four-Coil Resonator for Electric Vehicle Battery Chargers," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 10, pp. 6844–6854, Oct. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2506779.
- [22] W. Li, H. Zhao, J. Deng, S. Li, and C. C. Mi, "Comparison Study on SS and double-sided LCC compensation topologies for EV/PHEV Wireless Chargers," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 6, pp. 4429–4439, Jun. 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2479938.
- [23] M. Park *et al.*, "A study of wireless power transfer topologies for 3.3 kW and 6.6 kW electric vehicle charging infrastructure," *2016 IEEE Transp. Electrified Conf. Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific 2016*, pp. 689–692, Jul. 2016, doi: 10.1109/ITEC-AP.2016.7513041.
- [24] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 544–554, Feb. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2046002.
- [25] S. Jaafari, A. Khallaayoun, and E. Ahouzi, "Optimizing One-Block Planar Coil Design for Wireless Power Transfer in Electric Vehicles: A Comparative Study," *Transp. Res. Procedia*, vol. 84, pp. 153–160, 2025, doi: 10.1016/j.trpro.2025.03.058.
- [26] J. I. Moon, C. M. Awuah, P. Danuor, and Y. B. Jung, "Analysis of Coil-Thickness-Variation Technique for Q-Factor Enhancement of Rectangular Planar Coils," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, no. 2, pp. 1875–1882, Feb. 2023, doi: 10.1109/TAP.2023.3234985.
- [27] K. Aditya and S. S. Williamson, "Design guidelines to avoid bifurcation in a series-series compensated inductive power transfer system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 5, pp. 3973–3982, May 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2851953.