

Studi Komparasi dan Analisis Kumbaran pada Wireless Power Transfer dengan Mempertimbangkan Variasi Jarak dan Misalignment

Tri Winarno¹, Dedet Candra Riawan², Heri Suryoatmojo³

^{1,2,3} Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jl. Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo, Kota Surabaya, Jawa Timur, 60111, Indonesia

winarno.19071@mhs.its.ac.id¹, dedet.riawan@ee.its.ac.id², suryomgt@ee.its.ac.id³

Abstrak — Metode pengisian kendaraan listrik dapat diklasifikasikan berdasarkan media pengisiannya, yaitu pengisian dengan kabel (*Conductive Charging*) dan tanpa kabel (*Wireless Charging*). Metode *Wireless Charging* sekarang ini mulai banyak diteliti karena dinilai lebih nyaman dan praktis untuk pengguna daripada metode pengisian dengan kabel. *Wireless Power Transfer* (WPT) merupakan metode yang sering digunakan pada pengisian baterai kendaraan listrik berbasis tanpa kabel atau wireless. Dalam membangun sistem WPT yang optimal diperlukan desain kumparan yang tepat karena parameter-parameter kumparan akan berdampak pada kinerja sistem WPT. Parameter yang dimaksud meliputi induktansi diri, induktansi timbal balik, dan koefisien kopling. Selain itu, desain kumparan ini nantinya akan mempengaruhi penerapan sistem WPT pada kendaraan listrik karena luas dari kendaraan listrik yang berbeda-beda. Pada penelitian ini akan dilakukan komparasi dan analisis kumparan circular planar spiral dan kumparan square planar spiral pada variasi jarak 10 hingga 100 mm dan misalignment 0 hingga 40 mm. pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa kumparan square planar spiral menghasilkan daya output yang lebih besar daripada kumparan circular planar spiral pada variasi jarak dan misalignment yang sama.

Kata Kunci — Kendaraan Listrik, WPT, Inductive Resonant Power Transfer, Koil

Abstract — The method of charging electric vehicles can be classified based on the charging medium, namely *Conductive Charging* and *Wireless Charging*. *Wireless Charging* is now being extensively researched as it is considered more convenient and practical for users compared to the method of charging with cables. *Wireless Power Transfer* (WPT) is a frequently used method for charging wireless electric vehicles. In building an optimal WPT system, a proper coil design is essential since coil parameters will impact the performance of the WPT system. These parameters include self-inductance, mutual inductance, and coupling coefficient of the coil. Additionally, the coil design will also influence the implementation of the WPT system in electric vehicles due to the varying sizes of electric vehicles. This study will conduct a comparison and analysis of circular planar spiral coils and square planar spiral coils at distances ranging from 10 to 100 mm and misalignments from 0 to 40 mm. It can be concluded from this research that the square planar spiral coil produces a higher output power than the circular planar spiral coil at the same variation of distance and misalignment.

Keywords — EV, WPT, Inductive Resonant Power Transfer, Coil

I. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan kendaraan listrik sebagai moda transportasi baik transportasi umum maupun transportasi pribadi mengalami peningkatan yang cukup signifikan[1]. Fenomena ini terjadi karena kendaraan listrik memiliki potensi untuk menggantikan kendaraan konvensional yang tidak ramah lingkungan dan juga dapat berkontribusi terhadap Sustainable Development Goals (SDGs). Namun dalam penerapannya sebagai moda transportasi, kendaraan listrik memiliki banyak tantangan. Kapasitas baterai yang relatif kecil, siklus umur baterai yang terbatas, dan harga baterai yang mahal menyebabkan jarak yang ditempuh oleh kendaraan listrik menjadi terbatas. Selain itu, proses dan infrastruktur pengisian baterai kendaraan listrik yang kurang optimal juga merupakan hambatan utama dalam penggunaan kendaraan listrik sebagai moda transportasi[2].

Untuk mendukung peningkatan penggunaan kendaraan listrik ini, pengembangan proses, metode, dan infrastruktur pengisian baterai untuk kendaraan listrik harus terus dilakukan. Sekarang ini, proses pengisian baterai kendaraan listrik didasarkan pada 4 skema pengisian yang diklasifikasikan berdasarkan level tegangan pengisian, level arus, level daya, dan waktu pengisian. Sedangkan apabila diklasifikasikan berdasarkan media pengisian baterai terdapat dua teknologi yang dapat digunakan. Pengisian dengan kabel (*Conductive Charging*) dan tanpa kabel (*Wireless Charging*)[3]. Metode pengisian dengan kabel sekarang ini lebih banyak digunakan daripada metode pengisian tanpa kabel. Hal tersebut karena pengisian dengan kabel dinilai lebih sederhana, lebih murah, dan efisien. Namun, penggunaan kabel sebagai media penghubung pada pengisian baterai menyebabkan terjadinya line losses selama proses transfer daya. Selain itu, resiko terkena sengatan listrik serta ketidaknyamanan dalam menggunakan kabel yang panjang juga merupakan masalah utama. Oleh karena itu, teknologi pengisian tanpa kabel diperkenalkan sebagai metode pengisian yang lebih nyaman dan praktis untuk pengguna dan bebas dari resiko tersengat listrik[4].

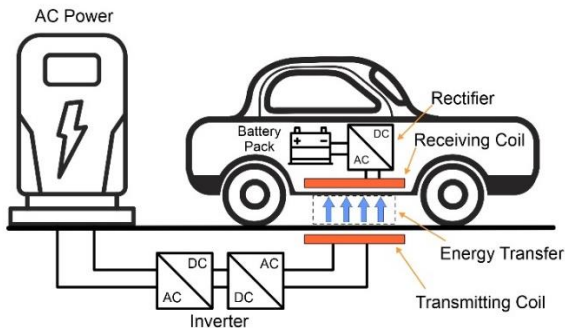
Wireless Power Transfer (WPT) merupakan suatu metode transfer daya dari sumber ke beban tanpa menggunakan kabel. Terdapat berbagai jenis WPT namun yang sering diterapkan pada sistem pengisian baterai kendaraan listrik adalah WPT dengan jenis Induktif Power Transfer (IPT). WPT jenis ini biasanya menggunakan dua kumparan yang digunakan

sebagai pemancar daya (primer) dan penerima daya (sekunder). Permasalahan utama penerapan IPT pada sistem pengisian kendaraan listrik adalah terbatasnya jarak tranfer daya, besarnya daya yang dapat ditransfer, operasional frekuensi yang tinggi, rendahnya efisiensi transfer daya dikarenakan pengaruh pergeseran jarak dan sudut antar kumparan serta isu kompatibilitas elektromagnetik[5]. Berdasarkan permasalahan tersebut maka dalam mendesain sistem Wireless Power Transfer terdapat beberapa aspek yang harus diperhatikan, salah satunya adalah desain kumparan primer dan sekunder. Bentuk dan parameter kedua kumparan ini nantinya akan mempengaruhi efisiensi dan kinerja dari sistem WPT secara keseluruhan[6]. Circluar Planar Spiral dan Square Planar Spiral adalah dua bentuk kumparan yang sekarang ini sering digunakan pada IPT karena dinilai lebih sederhana[7]. Pada tugas akhir ini akan dilakukan studi komparasi kedua bentuk kumparan diatas untuk dapat menentukan desain kumparan yang paling optimal dan efisien guna mengatasi permasalahan pada sistem WPT yang khususnya diperuntukkan untuk pengisian kendaraan listrik. Akan digunakan dua variabel pengujian pada penelitian ini yaitu jarak dan misalignment. Jarak yang dimaksud ialah jarak antara kumparan primer dan sekunder sedangkan misalignment adalah perbedaan posisi pusat kumparan primer dan sekunder.

II. DASAR TEORI

A. Wireless Power Transfer

Wireless Power Transfer adalah transfer energi dari sumber ke beban melalui medan atau gelombang elektromagnetik. Berdasarkan medan elektromagnetiknya teknologi WPT dapat dikategorikan ke dalam *inductive coupling* (IPT) dan *capacitive coupling* atau biasa disebut *capacitive power transfer* (CPT)[8].



Gbr. 1 Sistem Wireless Power Transfer

Sistem WPT adalah sistem yang mampu mensuplai beban dengan energi listrik yang berasal dari jaringan tanpa menggunakan perantara kabel antara beban dan jaringan. Karena keunggulannya yang sangat besar dibandingkan dengan pengisian kabel, maka WPT sistem sangat tepat untuk diaplikasikan pada pengisian kendaraan listrik[9].

B. Induktansi Diri

Induktansi diri adalah induktansi yang ditimbulkan akibat gaya gerak listrik induksi di dalam kumparan. Besarnya nilai induktansi diri suatu kumparan dapat dipengaruhi oleh faktor geometrinya, seperti bentuk kumparan, jumlah lilitan

kumparan, jari-jari luar dan dalam kumparan, jarak antar kumparan, dan luas penampang kumparan[10]. Untuk menghitung induktansi diri kumparan circular planar spiral digunakan parameter pada Gbr. 2 dan Gbr. 3 serta persamaan sebagai berikut[7]:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 d_{avg}}{2} \ln \left(\frac{2,46}{\alpha} + 0,2\alpha^2 \right) \quad (1)$$

Sedangkan untuk kumparan square planar spiral digunakan persamaan :

$$L = 2,34 \times \mu_0 \times \frac{N^2 (d_{avg})}{1 + 2,75\alpha} \quad (2)$$

Dengan

$$d_{avg} = \frac{d_{out} + d_{in}}{2} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad (4)$$

Apabila s diasumsikan sangat kecil ($s \approx 0$)

$$d_{out} = d_{in} + 2 \times (N \times w) \quad (5)$$

Dimana,

μ_0 = Permeabilitas ruang hampa

N = Jumlah lilitan

w = Lebar penampang kumparan (meter)

s = Jarak antar kumparan (meter)

d_{out} = Diameter luar kumparan (meter)

d_{in} = Diameter dalam kumparan (meter)

C. Induktansi Bersama

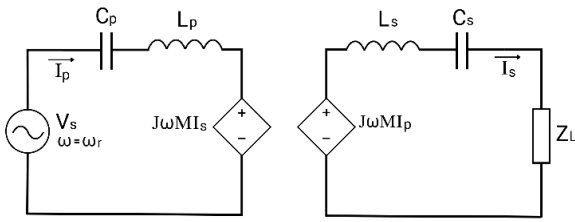
Induktansi bersama timbul apabila dua buah kumparan yang berarus saling berdekatan Induktansi timbal balik atau mutual induktansi memiliki hubungan yang erat dengan induktansi diri dan koefisien kopling. Ketiganya menyatakan hubungan antara kumparan itu dengan dirinya sendiri dan kumparan itu dengan kumparan yang lain[11]. Hubungan mutual induktansi (M), induktansi diri (L), dan koefisien kopling (k) dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$M = k\sqrt{L_1 \times L_2} \quad (5)$$

D. Rangkaian Ekuivalen WPT

Dalam suatu sistem WPT biasanya terdiri dari inverter frekuensi tinggi, magnetic coupler, filter rectifier, dan beban. Untuk meningkatkan efisiensi biasanya bagian primer dan sekunder dari magnetic coupler dihubungkan dengan rangkaian kompensasi. Rangkaian kompensasi yang sering digunakan ialah *S-S Compensation Circuit* dimana dalam rangkaianannya digunakan kapasitor yang disusun seri dengan kumparan. Sistem WPT dapat direpresentasikan ke dalam suatu rangkaian ekuivalen berdasarkan prinsip mutual induktansi. Prinsip ini

akan merepresentasikan fenomena mutual induktansi yang terjadi pada kedua kumparan ke dalam suatu sumber tegangan tergantung atau *dependent voltage source* ($J\omega M I_p$ dan $J\omega M I_s$) seperti yang terlihat pada Gbr. 4 [12].



Gbr. 2 Rangkaian Ekuivalen WPT

Dengan,

V_s = Sumber AC frekuensi tinggi

C_p = Kapasitor kompensasi primer

L_p = Induktansi kumparan primer

L_s = Induktansi kumparan sekunder

C_s = Kapasitor kompensasi sekunder

Z_L = Beban

Apabila sistem bekerja pada keadaan resonansi maka C_p dan L_p serta C_s dan L_s akan saling meniadakan, oleh karena itu daya output pada beban Z_L dapat dirumuskan menjadi :

$$P_{out} = \frac{\omega^2 \times M^2 \times I_p^2}{Z_L} \quad (6)$$

Dimana,

P_{out} = Daya output sistem (watt)

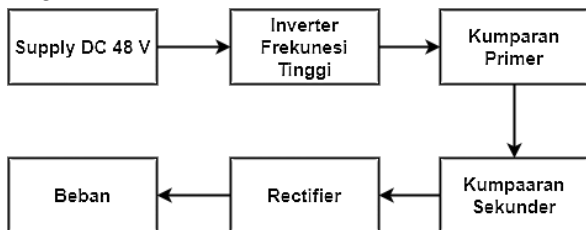
$\omega = 2\pi f$ = Frekuensi operasi sistem (Rad/s)

M = Mutual induktansi (H)

I_p = Arus primer (A)

III. DESAIN SIMULASI DAN IMPLEMENTASI

A. Diagram Blok Sistem



Gbr. 3 Diagram Blok Sistem

Pada Gbr. 3 dapat dilihat bahwa sistem WPT atau lebih spesifik *Inductive Resonance Power Transfer* menggunakan sumber DC 48 V sebagai input dari inverter frekuensi tinggi. Arus AC frekuensi tinggi akan dihasilkan oleh inverter dan diteruskan melewati kumparan primer yang akan menginduksi kumparan sekunder. Kemudian tegangan induksi berfrekuensi tinggi pada kumparan sekunder akan disearahkan kembali menjadi arus DC dengan bantuan rectifier. Hasil penyerahan berupa arus DC yang akan diteruskan ke beban. Untuk kumparan primer dan sekunder sendiri akan digunakan dua bentuk kumparan, yaitu circular planar spiral dan square planar spiral. Kedua bentuk kumparan akan dibuat berdasarkan perhitungan, desain, dan simulasi yang berbasis *Finite Element*

Method (FEM). Perhitungan parameter kumparan akan mengacu pada daya output sistem WPT yang diinginkan. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut akan dibuat desain kumparan pada software Finite Element Analysis (FEA). Hasil desain akan disimulasikan menggunakan FEM untuk mendapatkan hasil parameter kumparan. Parameter kumparan ini akan digunakan untuk simulasi sistem WPT pada PSIM sehingga hasil yang didapat dari simulasi dan pengujian *prototipe* kedua bentuk kumparan ini nantinya dapat dibandingkan dan disimpulkan.

B. Desain Spesifikasi Sistem WPT

Dalam mendesain sistem wireless power transfer harus ditentukan terlebih dahulu spesifikasi dari sistem. Spesifikasi tersebut meliputi daya keluaran (daya output) dari sistem WPT, frekuensi operasi yang digunakan, sumber tegangan DC atau tegangan input, dan besarnya beban pada sisi sekunder. Pada tugas akhir ini akan didesain sistem wireless power transfer dengan spesifikasi daya output sebesar 250 watt, tegangan output 48V DC, tegangan sumber 48 V DC, beban 9,22 Ω dan frekuensi operasi 100 kHz.

C. Desain Kawat Kumparan

Pada sistem WPT ini nantinya akan digunakan kawat tembaga dengan diameter 0,1 mm sebagai bahan pembuat kumparan dengan KHA berdasarkan standar AWG sebesar 0,13 yang akan diparalel dan dililit menjadi sebuah litz wire. Mengingat sistem akan beroperasi pada frekuensi tinggi maka penggunaan litz wire adalah solusi yang tepat karena frekuensi tinggi akan menimbulkan rugi-rugi skin effect dan proximity effect. Litz wire akan dibuat paralel sebanyak 120 sehingga diharapkan dapat menahan arus sebesar 15,6 A.

D. Desain Kumparan Circular dan Square

Dalam tugas akhir ini terdapat dua bentuk kumparan yang akan dipelajari dan dikomparasi yaitu square planar spiral dan circular planar spiral dimana kedua bentuk kumparan ini paling banyak digunakan pada sistem WPT karena desainnya yang sederhana. Pada proses desain kumparan harus berdasarkan spesifikasi dari sistem WPT yang akan dibuat karena parameter-parameter kumparan nantinya akan mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan. Parameter tersebut adalah nilai induktansi diri dan mutual induktansi dari kedua kumparan (primer dan sekunder) yang akan mempengaruhi daya output sistem.

Berdasarkan spesifikasi sistem WPT pada subbab sebelumnya maka dengan menggunakan persamaan 3 dan 4 dapat dilakukan perhitungan nilai kebutuhan induktansi diri (L) sebagai berikut:

$$P_{out} = \frac{\omega^2 \times M^2 \times I_p^2}{Z_L}$$

Dengan $L_1 = L_2$

$$250 = \frac{(2\pi 10^5)^2 \times 0,2^2 \times 5,2^2 \times L^2}{9,22}$$

$$L = 73,47 \mu H$$

Kemudian dengan spesifikasi kawat yang telah ditentukan maka dapat dihitung jumlah lilitan kedua kumparan jenis

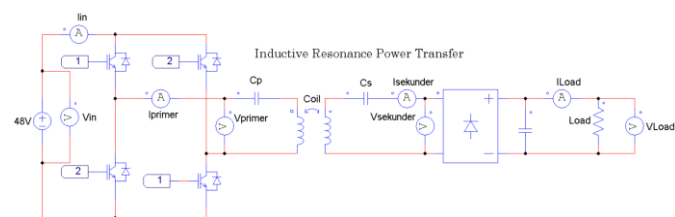
kumparan menggunakan persamaan 1 dan 2 dan didapatkan hasil berupa kumparan circular 31 lilitan sedangkan kumparan square 28 lilitan.

E. Pemodelan dan Simulasi Kumparan dengan FEM

Setelah dilakukan perhitungann nilai induktansi kumparan yang dibutuhkan, selanjutnya akan dilakukan desain dan simulasi kedua bentuk kumparan tersebut pada software FEA. Pada software FEA ini nantinya kedua bentuk kumparan akan disimulasikan dengan metode FEM pada variasi jarak dan misalignment yang telah ditentukan. Dengan simulasi menggunakan metode FEM akan didapatkan nilai induktansi diri, mutual induktansi, dan koefisien kopling yang nantinya akan digunakan untuk simulasi sistem WPT pada PSIM. Selain itu, simulasi ini juga bertujuan untuk membuktikan bahwa perhitungan dimensi dan parameter kumparan yang dilakukan sebelumnya telah sesuai.

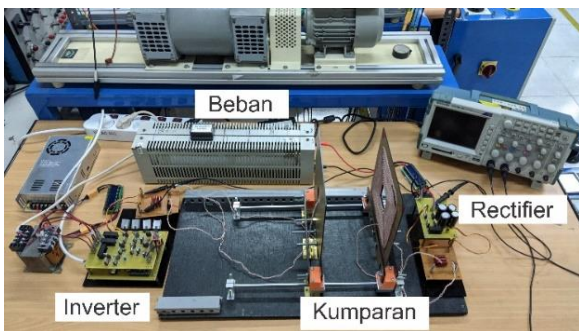
F. Pemodelan dan Simulasi Sistem WPT dengan PSIM

Setelah didapatkan nilai – nilai kumparan hasil perhitungan dan simulasi, selanjutnya akan dilakukan desain simulasi menggunakan PSIM guna memastikan perhitungan yang dilakukan sebelumnya benar. Dalam desain simulasi ini akan digunakan kapasitor yang disusun secara seri sebagai rangkaian kompensasi atau biasa disebut S-S Compensation. Nilai kapasitor yang digunakan harus sesuai dengan nilai dari induktansi diri (L) dari setiap kumparan serta nilai koefisien kopling antar kedua kumparan. Nilai kapasitansi kapasitor juga dipengaruhi oleh frekuensi operasi dari sistem WPT. Hasil Pemodelan dan Desain Sistem WPT pada PSIM dapat dilihat pada Gbr. 6 sebagai berikut.



Gbr. 4 Pemodelan WPT Pada PSIM

G. Manufaktur Prototype Sistem WPT



Gbr. 5 Prototype Sistem WPT

Proses manufaktur prototipe sistem WPT dimulai dengan pembuatan inverter frekuensi tinggi dilanjutkan dengan membuat kumparan primer dan kumparan sekunder kedua bentuk kumparan. Setelah itu, dilanjutkan dengan pembuatan

full bridge rectifier sehingga nantinya antara input dan ouput akan sama, yaitu listrik DC. Pembuatan prototipe diatas dilakukan berdasarkan parameter-parameter yang telah didapatkan dari desain dan simulasi pada software sebelumnya.

IV. HASIL SIMULASI DAN EKSPERIMEN

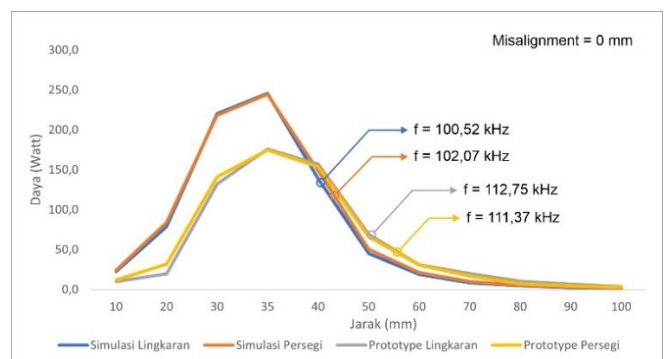
Pada perhitungan, desain dan simulasi kumparan dengan software Ansys Maxwell yang menggunakan metode FEM dihasilkan nilai induktansi diri yang berbeda dari hasil prototipe. Hal ini karena terdapat eror yang terjadi saat proses pembuatan prototipe yang meliputi jenis kawat yang digunakan dan jarak antar kumparan yang tidak presisi. Selain itu juga terdapat perbedaan pada desain rangkaian kompensasi dengan prototipe rangkaian kompensasi yang terjadi karena ketidakterediaan komponen kapasitor dengan ukuran yang tepat di pasaran. Perbedaan nilai induktansi dan kapasitor kompensasi ini menyebabkan penggunaan nilai frekuensi resonansi yang berbeda pada simulasi PSIM dan Prototipe. Berikut ini adalah perbandingan nilai induktansi diri primer sekunder (L_p dan L_s) dan jumlah lilitan (N) serta kapasitor kompensasi kumparan (C_p dan C_s) dan juga pengaruhnya terhadap frekuensi resonansi (f) yang digunakan antara kumparan circular dan square.

TABEL I
HASIL PENELITIAN

Parameter	Simulasi FEM		Prototipe	
	Circular	Square	Circular	Square
L_p (μ H)	73,52	71,75	69,91	71,65
L_s (μ H)	73,54	71,82	70,83	69,2
N	31	28	31	28
C_p (nF)	43,062	43,062	35,65	35,65
C_s (nF)	43,062	43,062	35,61	35,61
f (kHz)	100,52	102,07	112,75	111,37

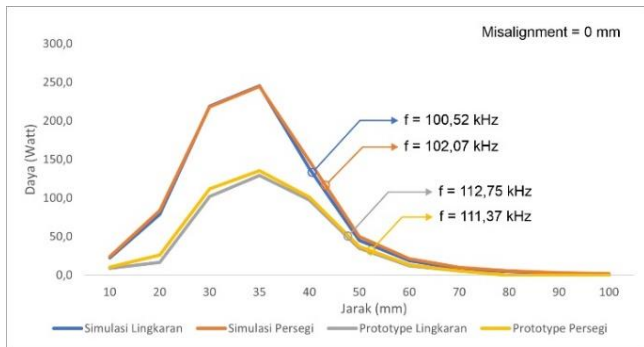
A. Hasil Variasi Jarak

Simulasi dan pengujian variasi jarak pada sistem WPT dilakukan pada jarak kumparan primer dan sekunder 1 hingga 10 cm pada kedua bentuk kumparan. Pada pengujian ini misalignment kumparan primer dan sekunder diatur tetap yaitu 0 cm. Pada simulasi dan pengujian ini akan dibandingkan daya input, daya ouput dan efisiensi dari kedua bentuk kumparan. Berikut merupakan hasil dari simulasi dan pengujian pada variasi jarak:



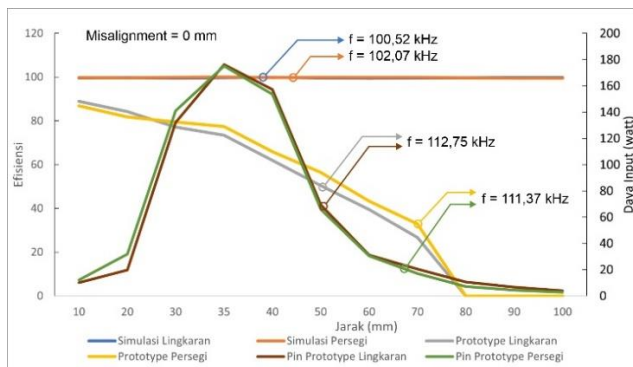
Gbr. 6 Grafik Komparasi Daya Input Variasi Jarak

Berdasarkan Gbr. 6 terlihat bahwa daya input berupa daya aktif mengalami kenaikan pada jarak 1 cm hingga 3 cm dan mencapai puncak pada jarak 3,5 cm yang kemudian mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak. Pada simulasi daya input kedua bentuk kumparan dapat mendekati 250 watt sedangkan pada prototipe daya input maksimal kedua bentuk kumparan hanya mencapai kisaran 170 watt pada jarak 3,5 cm. Dari Gbr. 6 juga terlihat bahwa setiap pengujian sistem bekerja pada frekuensi yang berbeda. Hal ini karena perlu adanya penyesuaian frekuensi operasi agar sistem tetap bekerja pada kondisi resonansi.



Gbr. 7 Grafik Komparasi Daya Output Variasi Jarak

Dari Gbr. 7 terlihat bahwa pada simulasi nilai dari daya output dari kedua bentuk kumparan dapat mencapai nilai mendekati 250 watt pada jarak 3,5 cm sedangkan pada prototipe nilai daya output tertinggi terjadi pada jarak jarak 3,5 cm dengan nilai 135,5 watt pada kumparan square planar spiral dan 129,4 watt pada kumparan circular planar spiral. Hal ini terjadi karena desain awal WPT diatur agar beresonansi pada koefisien kopling 0,2 dimana daya maksimal dapat tercapai apabila sistem bekerja pada kondisi resonansi. Berdasarkan simulasi FEM yang telah dilakukan, nilai koefisien kopling 0,2 pada kedua bentuk kumparan tercapai pada jarak 3,5 cm sehingga dapat dikatakan bahwa karakteristik hasil prototipe sudah sesuai dengan desain awal WPT yang diinginkan.



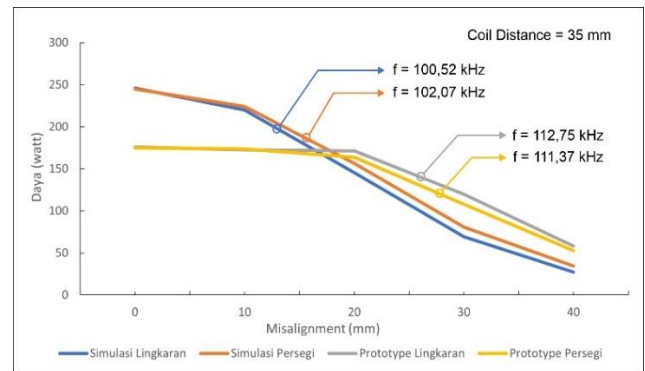
Gbr. 8 Grafik Komparasi Efisiensi Variasi Jarak

Pada grafik efisiensi terlihat bahwa pada simulasi efisiensi sistem mendekati 100 % pada setiap perubahan jarak yang dilakukan. Hal ini karena pada simulasi sistem bekerja pada kondisi ideal atau tanpa losses. Efisiensi yang dimaksud disini adalah efisiensi daya aktif karena pada simulasi PSIM sistem WPT, sistem dibebani secara resistif sehingga hanya daya aktif

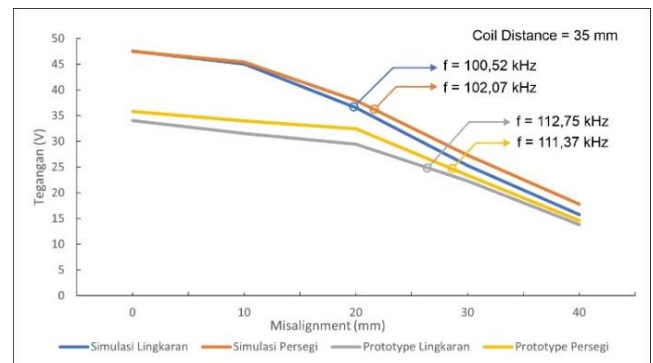
yang akan diamati pada proses tranfer daya. Efisiensi keseluruhan prototipe sistem WPT mengalami penurunan seiring dengan penambahan jarak. Efisiensi yang semakin turun ini disebabkan karena berdasarkan hasil simulasi FEM nilai koefisien kopling antara kumparan primer dan kumparan sekunder akan mengalami penurunan seiring penambahan jarak. Selain itu, terdapat juga rugi-rugi komponen, rugi panas kumparan, dan rugi daya reaktif yang menyebabkan efisiensi pada prototipe tidak bisa 100%.

B. Hasil Variasi Misalignment

Simulasi dan pengujian variasi misalignment pada penelitian ini dilakukan pada misalignment kumparan primer dan sekunder 0 hingga 4 cm pada kedua bentuk kumparan. Misalignment sendiri memiliki arti kesesuaian posisi poros pada dua benda sehingga pada pengujian ini nantinya poros antara kumparan primer dan sekunder akan digeser sesuai variasi nilai. Pada pengujian ini jarak kumparan primer dan sekunder diatur tetap yaitu 3,5 cm. Pada simulasi dan pengujian ini akan dibandingkan daya input, daya ouput dan efisiensi dari kedua bentuk kumparan. Berikut merupakan hasil dari simulasi dan pengujian pada variasi misalignment:



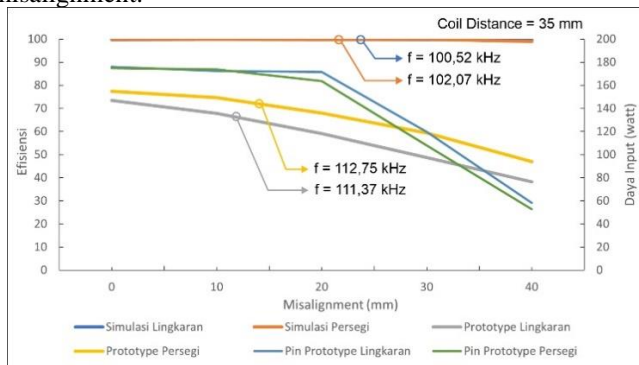
Gbr. 9 Grafik Komparasi Daya Input Variasi Misalignment



Gbr. 10 Grafik Komparasi Daya Ouput Variasi Misalignmnet

Dari Gbr. 9 terlihat bahwa daya input sistem WPT mengalami penurunan seiring bertambahnya nilai misalignment. Daya input maksimal terjadi pada misalignmet 0 mm atau no misalignment yaitu 176 watt untuk kumparan circular dan 170 watt untuk kumparan square. Nilai tersebut mengalami penurunan seiring bertambahnya misalignment yang menindikasikan bahwa pergeseran pusat antara kedua kumparan juga mempengaruhi sisi primer sistem WPT.

Karakteristik grafik daya output pengujian prototipe memiliki kesamaan dengan hasil simulasi dimana nilainya semakin turun pada misalignment yang semakin besar. Dari grafik daya output juga terlihat bahwa nilai daya output kumparan square sedikit lebih besar daripada kumparan circular di setiap nilai misalignment.



Gbr. 11 Grafik Komparasi Efisiensi Variasi Misalignment

Berdasarkan grafik efisiensi juga menunjukkan bahwa prototipe kumparan square memiliki nilai yang lebih tinggi daripada kumparan circular. Sedangkan pada simulasi keduanya memiliki nilai efisiensi mendekati 100% karena keduanya bekerja pada keadaan ideal.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi, implementasi, dan pengujian dari kedua bentuk kumparan dengan metode FEM untuk aplikasi wireless power transfer dapat ditarik kesimpulan bahwa desain dan simulasi kumparan dengan metode finite elemen menghasilkan parameter kumparan yang akurat dan sesuai dengan realisasi prototipe sehingga metode FEM merupakan metode perancangan kumparan yang tepat untuk aplikasi WPT. Kemudian dengan nilai induktansi diri yang mendekati sama kumparan square planar spiral memiliki jumlah lilitan yang lebih sedikit daripada kumparan circular planar spiral. Pada simulasi sistem WPT di PSIM pada jarak 35 mm didapatkan hasil daya output maksimal kumparan circular sebesar 244,7 watt dengan frekuensi resonansi 100,5232 kHz sedangkan kumparan square sebesar 245,4 watt dengan frekuensi resonansi 102,069 kHz. Sedangkan pada realisasinya untuk variasi jarak didapatkan daya output maksimal pada jarak 35 mm yaitu sebesar 129,4 watt untuk kumparan circular dengan frekuensi resonansi 112,747 kHz dan efisiensi 72% dan 135,5 watt untuk kumparan square dengan frekuensi resonansi 111,369 kHz dan efisiensi 78%. Kemudian pada variasi misalignment baik pada simulasi PSIM atau realisasi prototipe didapatkan daya output dan efisiensi yang semakin menurun pada nilai misalignment yang semakin meningkat dengan kumparan square yang memiliki nilai daya output yang sedikit lebih tinggi daripada kumparan circular pada nilai misalignment yang sama. Dengan demikian, pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa kumparan square planar spiral menghasilkan daya output yang lebih besar daripada kumparan circular planar spiral pada variasi jarak dan misalignment yang sama. Nilai hasil simulasi dan pengujian prototipe pada penelitian ini memang memiliki karakteristik yang sama namun

hubungan antara kedua pengujian tersebut sangat sulit disintesis menjadi sebuah persamaan atau indeks hubungan karena adanya losses komponen dan rugi-rugi tak terduga yang sangat variatif pada hasil manufaktur dan pengujian prototype.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, yang telah mendukung penelitian ini sehingga bisa diikutsertakan dalam seminar nasional Teknik Elektro Tahun 2023.

REFERENSI

- [1] R. Tavakoli and Z. Pantic, 'Analysis, Design, and Demonstration of a 25-kW Dynamic Wireless Charging System for Roadway Electric Vehicles', *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 6, no. 3, pp. 1379–1393, Sep. 2018, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2761763.
- [2] A. G. Boulanger, A. C. Chu, S. Maxx, and D. L. Waltz, 'Vehicle electrification: Status and issues', in *Proceedings of the IEEE*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2011, pp. 1116–1138. doi: 10.1109/JPROC.2011.2112750.
- [3] B. Joseph and D. V. Bhoir, 'Design and Simulation of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle', in *2019 6th IEEE International Conference on Advances in Computing, Communication and Control, ICAC3 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2019. doi: 10.1109/ICAC347590.2019.9036745.
- [4] Y. Zhu, Z. Wang, X. Cao, and L. Wu, 'Design of High-Power High-Efficiency Wireless Charging Coils for EVs with MnZn Ferrite Bricks', *J Sens*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/9931144.
- [5] Y. Yang, J. Cui, and X. Cui, 'Design and analysis of magnetic coils for optimizing the coupling coefficient in an electric vehicle wireless power transfer system', *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 6, Aug. 2020, doi: 10.3390/en13164143.
- [6] T. Bouanou, H. El Fadil, A. Lassioui, O. Assaddiki, and S. Njili, 'Analysis of coil parameters and comparison of circular, rectangular, and hexagonal coils used in wpt system for electric vehicle charging', *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, no. 1, Mar. 2021, doi: 10.3390/wevj12010045.
- [7] A. Triviño-Cabrera, J. M. González-González, and J. A. Aguado, 'Power Systems Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach', 2020. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/4622>
- [8] Y. Zhang, S. Chen, X. Li, and Y. Tang, 'Design of High-Power Static Wireless Power Transfer via Magnetic Induction: An Overview', *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 6, no. 4, pp. 281–297, Dec. 2021, doi: 10.24295/CPSSPEA.2021.00027.
- [9] K. N. Mude, 'Battery Charging Method for Electric Vehicles: From Wired to On-Road Wireless Charging', 2018.
- [10] I. Hussain and D. K. Woo, 'Self-Inductance Calculation of the Archimedean Spiral Coil', *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15010253.
- [11] H. Isyanto and H. Birawan, 'RANCANG BANGUN PENGISI DAYA TANPA KABEL UNTUK SEMUA JENIS ALAT PORTABLE', *Jurnal Elektum*, vol. 15, no. 2, 2018.
- [12] S. Song, W. Zhang, Z. Jin, and Q. Geng, 'Analysis of S-S resonance compensation circuit of electric vehicle wireless power transfer system', in *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Connecting the Grids Towards a Low-Carbon High-Efficiency Energy System, EI2 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2020, pp. 619–622. doi: 10.1109/EI250167.2020.9347234.