

**RANCANG BANGUN PROTOTIPE *WIRELESS POWER TRANSFER* (WPT) MENGGUNAKAN INDUKTOR PLANAR  
UNTUK PERALATAN ELEKTRONIKA BERDAYA RENDAH**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**RIO ANDESTA**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2018**

## **ABSTRACT**

### **DESIGN OF PROTOTYPE WIRELESS POWER TRANSFER (WPT) USING PLANAR INDUCTOR FOR LOW POWER ELECTRONIC EQUIPMENT**

**By**

**RIO ANDESTA**

Electrical power transfer is a process of transferring power from power source to user or load. Electrical power transfer usually use a copper conductor wire as a transfer medium. Copper conductor wire can be replaced by using air medium (wireless). The magnetic flux transferred through the air medium is resonated to the receiver coil so on the receiver coil flows current with the same frequency as the sending frequency.

This thesis discusses the method of wireless power transfer using magnetic resonance coupling by utilizing the similar resonance frequency between two inductor coils within a certain distance. The inductor coil used is a planar inductor made of printed circuit board (PCB) with dimensions of 5 x 5 cm. Planar Inductors are designed with different layouts and rounds (trace). The planar circular planar inductor layout consists of 10,15,20 and 25 trace and rectangular planar inductor with 10 and 20 trace. The measured data variable consisted of the design of the planar inductor varied using constant transfer distance and fixed planar inductor design with transfer distance varying from 1-10 centimeters.

The results of this study show the planar inductor printed in the PCB can transfer electrical power using magnetic resonance coupling method. The received efficiency achieved the maximal value of 69.98%. The efficiency of this power transfer is influenced by the value of the inductance and the transfer distance. Wireless power transfer using magnetic resonance coupling method using planar inductor can be developed as wireless charger for electronics equipments with low power consumption as used in mobile phone and some electronic equipment.

**Keywords:** Wireless Power Transfer, magnetic resonance coupling, planar inductor, printed circuit board (PCB).

## ABSTRAK

### **RANCANG BANGUN PROTOTIPE *WIRELESS POWER TRANSFER* (WPT) MENGGUNAKAN INDUKTOR PLANAR UNTUK PERALATAN ELEKTRONIKA BERDAYA RENDAH**

Oleh

**RIO ANDESTA**

Transfer daya listrik merupakan proses mengirimkan daya listrik dari sumber daya menuju pengguna atau beban. Transfer daya listrik umumnya menggunakan media penghantar berupa kawat konduktor tembaga. Kawat konduktor tembaga dapat digantikan dengan menggunakan medium udara (*wireless*). Fluks magnet yang ditransferkan melalui medium udara ini diresonansikan ke kumparan penerima sehingga pada kumparan penerima mengalir arus dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi pengirimnya.

Skripsi ini membahas metode transfer daya listrik secara *wireless* menggunakan kopling resonansi magnetik dengan memanfaatkan frekuensi resonansi yang sama antara dua buah kumparan induktor dalam jarak tertentu. Kumparan induktor yang digunakan adalah induktor planar yang terbuat dari papan sirkuit tercetak (PCB) dengan dimensi 5 x 5 cm. Induktor planar didesain dengan layout dan putaran (*trace*) yang berbeda. Layout induktor planar *circular* terdiri atas 10,15,20 dan 25 putaran serta *rectangular* dengan 10 dan 20 putaran. Variabel data yang diukur terdiri dari desain induktor planar bervariasi dengan jarak transfer konstan dan desain induktor planar tetap dengan jarak transfer bervariasi dari 1-10 centimeter.

Hasil penelitian ini menunjukkan induktor planar tercetak dalam PCB dapat mentransfer daya listrik menggunakan metode kopling resonansi magnetik. Efisiensi yang diterima mencapai nilai terbesar 69.98%. Efisiensi transfer daya ini dipengaruhi oleh nilai induktansi dan jarak transfer. Transfer daya *wireless* dengan metode kopling resonansi magnetik menggunakan induktor planar ini dapat dikembangkan sebagai *wireless charger* untuk peralatan elektronika dengan konsumsi daya rendah seperti yang digunakan pada *mobile phone* dan beberapa peralatan elektronika saat ini.

Kata kunci : *Wireless Power Transfer*, kopling resonansi magnetik, induktor planar, papan sirkuit tercetak (PCB).

**RANCANG BANGUN PROTOTIPE *WIRELESS POWER TRANSFER* (WPT) MENGGUNAKAN INDUKTOR PLANAR UNTUK PERALATAN ELEKTRONIKA BERDAYA RENDAH**

Oleh

**RIO ANDESTA**

**Skripsi**

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar  
**SARJANA TEKNIK**

Pada

Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2018**

Judul Skripsi : **RANCANG BANGUN PROTOTIPE  
WIRELESS POWER TRANSFER(WPT)  
MENGUNAKAN INDUKTOR PLANAR  
UNTUK PERALATAN ELEKTRONIKA  
BERDAYA RENDAH**

Nama Mahasiswa : RIO ANDESTA

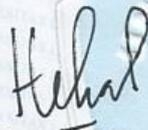
Nomor Pokok Mahasiswa : 1215031063

Program Studi : Teknik Elektro

akultas : Teknik

**MENYETUJUI**

1. Komisi Pembimbing

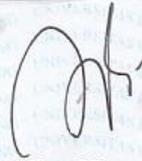


**Dr. Herman Halomoan S, S.T., M.T.**  
NIP : 19711130 199903 1 003



**Dr. Eng. Diah S.T., M.T.**  
NIP : 19700528 199803 2 003

2. Ketua Jurusan Teknik Elektro

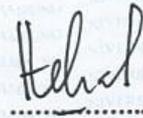


**Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc.**  
NIP : 19731128 199903 1 005

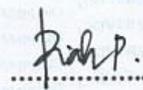
**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

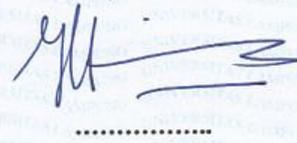
Ketua : **Dr. Herman Halomoan S, S.T.,M.T.**



Sekretaris : **Dr. Eng. Diah Permata S.T., M.T.**

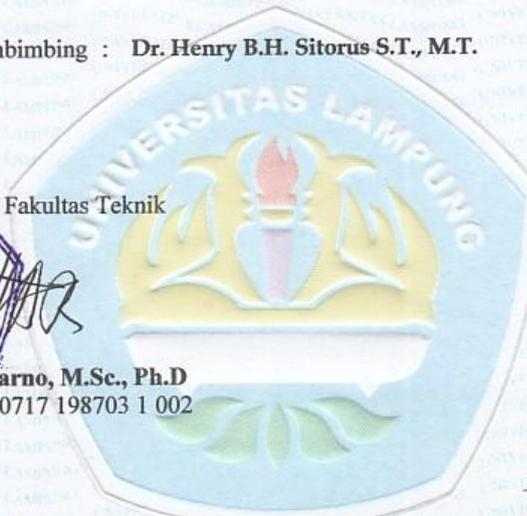


Penguji  
Bukan Pembimbing : **Dr. Henry B.H. Sitorus S.T., M.T.**



Dekan Fakultas Teknik

**Prof. Suharno, M.Sc., Ph.D**  
NIP. 19620717 198703 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **23 November 2017**

## SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

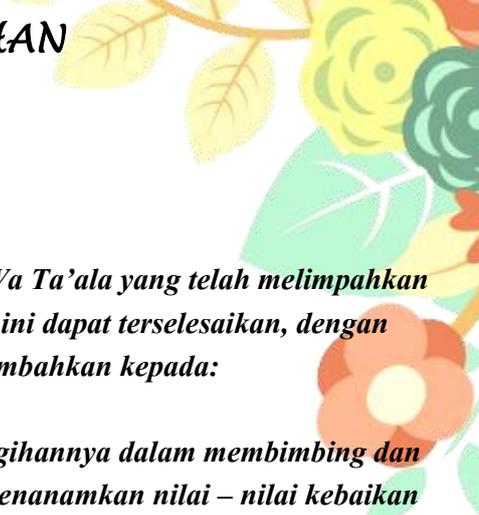
Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, Januari 2018



Rio Andesta  
NPM 1215031063

## PERSEMBAHAN



*Segala puji hanya milik-Mu Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang telah melimpahkan nikmat sehat sehingga atas Ridho-Nya karya ini dapat terselesaikan, dengan sepenuh hati karya ini ku persembahkan kepada:*

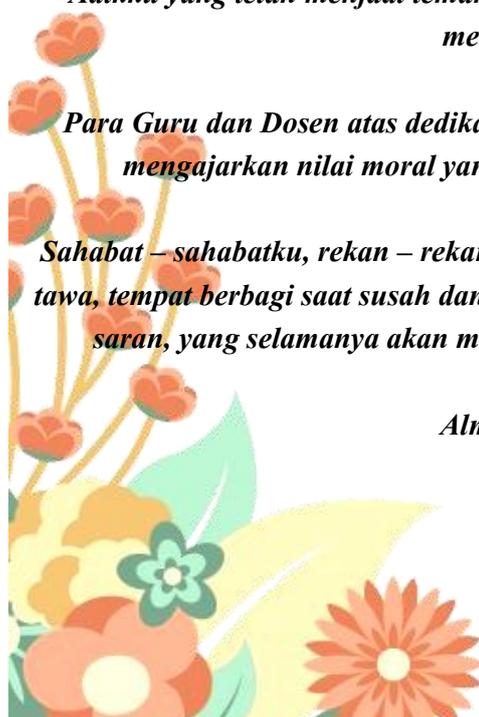
*Orangtuaku, Ayah dan Ibu, dengan segala kegigihannya dalam membimbing dan menyertai suksesi kedua anaknya di samping menanamkan nilai – nilai kebaikan serta “frame” bahwa pendidikan itu penting, yang telah mencurahkan segala usaha dan doa untuk anaknya agar mendapat pendidikan yang lebih baik, yang selalu aku harapkan Ridhonya, serta tiada hentinya memberikan dukungan materil dan imateril.*

*Adikku yang telah menjadi teman bicaraku dan motivasiku untuk berkarya dan menuntaskan studi.*

*Para Guru dan Dosen atas dedikasi dan keikhlasannya yang telah mendidik dan mengajarkan nilai moral yang berperan dalam membentuk pribadi ini.*

*Sahabat – sahabatku, rekan – rekan sehipunanku, yang selalu memberikan canda tawa, tempat berbagi saat susah dan bahagia, yang selalu memberikan semangat dan saran, yang selamanya akan menjadi bagian dari cerita perjalanan studiku.*

*Almamater tercinta.*



## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Desa Suka Merindu, Kecamatan Talang Padang, Kabupaten Tanggamus pada tanggal 13 Desember 1993 sebagai anak pertama dari dua bersaudara, dari Bapak Ardiansyah dan Ibu Tisna Jauhari. Penulis menyelesaikan masa sekolah dasar dan menengah pertama di Yayasan Abadi Perkasa PT Indo Lampung Perkasa Tulang Bawang lulus pada Tahun 2009. Lalu Melanjutkan Sekolah Menengah Kejuruan di SMK YPT Pringsewu lulus pada Tahun 2012. Tahun 2012, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN Tertulis. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif di berbagai organisasi intra/ekstra kampus dan juga aktif dalam komunitas yang berfokus pada isu lingkungan dan energi. Penulis juga tercatat sebagai asisten praktikum *transformator* dan *buck-converter* di Laboratorium Konversi Energi Elektrik. Pada September 2015 penulis melaksanakan kerja praktik di Perum Jasa Tirta II Jatiluhur, Purwakarta. Selain itu penulis memiliki pengalaman kerja sebagai Data Entry di Telkom Indonesia Cabang Kedaton Lampung, Surveyor Survey Kepuasan Pelanggan (SKP) 2015 dan 2017 serta Integritas Layanan Pelanggan (ILP) PLN.

## MOTTO

*“...And don’t worry about losing. If it is right, it happens –  
The main thing is not to hurry. Nothing good gets away.”  
(John Steinbeck)*

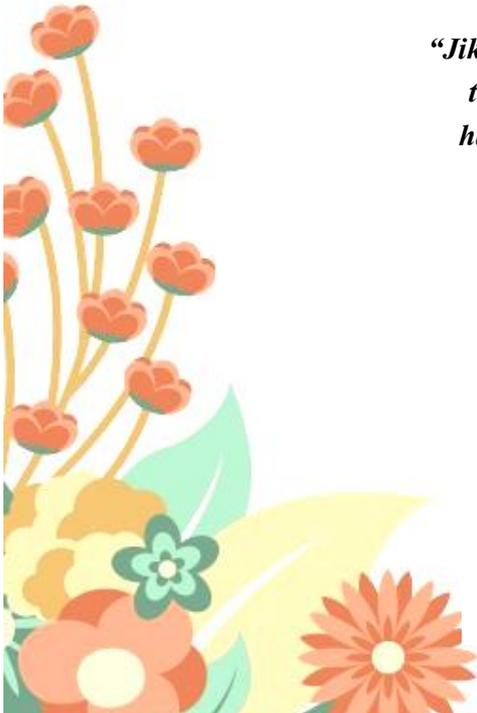
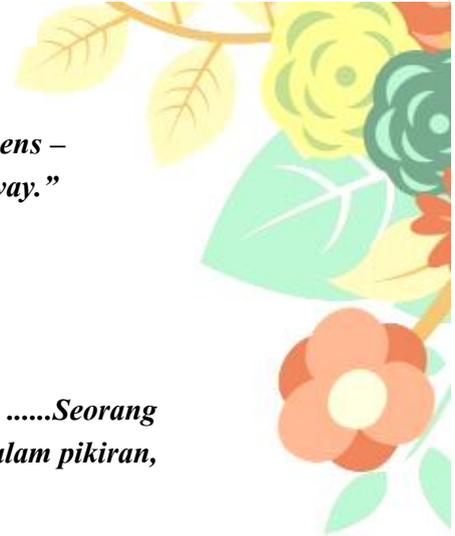
*“Kau terpelajar, cobalah bersetia pada kata hati. ....Seorang  
terpelajar harus juga berlaku adil sudah sejak dalam pikiran,  
apalagi perbuatan.”*

*(Pramoedya Ananta Toer dalam Bumi Manusia)*

*“Jika kau gagal mencapai sesuatu, istirahatlah. Pikirkan  
tentang berapa banyak waktu dan energi yang kau  
habiskan demi ketidakberhasilanmu. Melangkahlah  
perlahan kembali dengan pengalaman itu.”*

*(Rio Andesta)*

*“Setiap orang membutuhkan kepercayaan dan  
keyakinan. Oleh karena itu selain harus benar  
maka harus sesuai hati nurani (dhamier).”  
(Nurcholis Madjid)*



## SANWACANA

Alhamdulillahirobbil'alamiin, penulis menghaturkan puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir ini.

Tugas akhir dengan judul “**RANCANG BANGUN PROTOTIPE WIRELESS POWER TRANSFER (WPT) MENGGUNAKAN INDUKTOR PLANAR UNTUK PERALATAN ELEKTRONIKA BERDAYA RENDAH**” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Dalam masa perkuliahan dan penelitian, penulis mendapat banyak hal baik berupa dukungan, semangat, motivasi dan banyak hal yang lainnya. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hasriadi Mat Akin, M.P. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Suharno, M.Sc, Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T.,M.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Herman H. Sinaga, S.T.,M.T. selaku pembimbing utama skripsi yang telah dengan sabar membimbing, meberikan ilmunya, motivasi dalam hidup dan arahannya disela-sela kesibukan beliau yang sangat padat.

5. Ibu Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T. selaku pembimbing pendamping yang telah membimbing, memberi ilmunya, serta sarannya dalam individu menyusun penelitian ini.
6. Bapak Dr. Henry B.H. Sitorus, S.T., M.T. selaku dosen penguji skripsi yang telah memberikan saran, kritikan yang sangat membangun dalam penyusunan skripsi.
7. Segenap dosen dan pegawai di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu dan wawasan yang tak terlupakan oleh penulis.
8. Ayahanda Ardiansyah (Bapak) dan Ibunda Tisna Jauhari (Mamak). Sungguh Besar pengorbanan dan jasa yang kalian berikan, hanya doa dan sedikit usaha meraih prestasi sekarang dan kedepannya serta menyelesaikan kewajiban agar terpancar senyum bangga di wajah kalian yang sangat saya impikan.
9. Adik tercinta Resti Marantika yang selama ini jadi teman berbagi solusi mengenai hal – hal keseharian dan masa depan yang juga turut memotivasi dan mendukung penulis.
10. Teman diskusi saya sekaligus pembimbing di luar dosen saudara Suwanto, S.T yang menyempatkan waktunya disela-sela kesibukannya untuk berdiskusi dengan penulis.
11. Teman sebangunan dari kerja praktik hingga skripsi saudara Agung Heru Saputra terima kasih atas semua jasa dan ilmunya, semoga langkah kita ke depan selalu dalam lindungan Allah SWT.
12. Teman seperjuangan dari awal sampai akhir Elang(Elektro Angkatan) 2012 Khususnya Barbados (Kocong, Bok, Yayan, Guntur, Rama, Panji, Winal, Dharma, Aji, Salim, sipam, lelek) dan semua yang belum bisa disebut satu – satu semoga pertemanan kita selalu seru sampai ke depannya.

13. Teman dan rekan Lab Konversi Yayan, Dharma Guntur, Aji, Hekson, Paian, Agung, Rendi, Venus yang selalu mengisi hari – hari penelitian dengan canda tawa dan kebersamaan yang mengasyikkan.
14. Seorang yang spesial yang selalu ada untukku baik dalam hal semangat dan motivasi ataupun dalam sosok pribadi. Bagi mereka yang telah menjadi sosok penginspirasi penulis pada masanya masing - masing. Terima kasih telah hadir dan menghiasi perjalanan penulisan skripsi ini.

Penulis meminta maaf atas segala kesalahan dan ketidaksempurnaan dalam penyusunan tugas akhir ini. Saran dan kritik membangun sangat diharapkan penulis demi kebaikan di masa yang akan datang. Terimakasih

Bandar Lampung, Januari 2018

Penulis,

**Rio Andesta**

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xviii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xx</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	2
1.3 Manfaat Penelitian .....	3
1.4 Rumusan Masalah .....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Hipotesis.....	4
1.7 Sistematika Penulisan.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Induksi Elektromagnetik.....	6
2.2 Induktansi.....	8
2.2.1 Induktansi Sendiri.....	11
2.2.2 Induktansi Bersama .....	12
2.3 Kopling Resonansi Magnetik.....	13
2.4 Wireless Power Transfer .....	14

2.5 Transmitter .....	18
2.6 Receiver.....	19
2.7 Kumparan .....	19
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	24
3.2 Alat dan Bahan .....	24
3.3 Prosedur Kerja.....	25
1 Studi Literatur .....	26
2 Perancangan Blok Diagram Sistem .....	26
3 Implementasi dan Realisasi Rangkaian.....	26
a. Merancang dan Menentukan Komponen Rangkaian.....	26
b. Melakukan Pengujian Per Blok Rangkaian .....	26
c. Pengujian Rangkaian Secara Keseluruhan .....	26
3.3.4 Pengujian Alat.....	26
3.3.5 Analisa dan Kesimpulan .....	26
3.4 Tahap – Tahap Perancangan Alat .....	26
3.5 Perancangan WPT Device.....	29
3.5.1 Rangkaian Pengirim .....	29
1. Rangkaian Osilasi.....	29
2. Kumparan Magnetik.....	31
3.5.2 Rangkaian Penerima.....	32
3.6 Pengujian Alat.....	32

## **BAB IV PEMBAHASAN**

4.1 Pengujian Rangkaian.....	34
4.1.1 Pengujian Rangkaian Pengirim .....	35
1. Rangkaian Osilasi.....	36
2. Kumparan Pengirim .....	37
4.1.2. Pengujian Rangkaian Penerima.....	38
1. Kumparan Penerima.....	39
2. Rangkaian Penyearah DC .....	40
4.2 Hasil Pengujian .....	40
4.2.1 Output dengan Induktor Planar Bervariasi.....	41
4.2.2 Output dengan Jarak Transfer Bervariasi.....	43
4.2.3 Daya Transfer dan Terima oleh Rangkain WPT .....	47
4.2.4 Efisiensi Daya .....	50
4.3 Analisa Output WPT.....	51

## **BAB V KESIMPULAN**

5.1 Kesimpulan .....	56
5.2 Saran.....	57

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Percobaan Michael Faraday .....	6
2.2 Bentuk Umum Induktor .....	9
2.3 Rangkaian Induktansi Sendiri .....	11
2.4 Rangkaian Induktansi Bersama.....	12
2.5 Rangkaian Kopling LC .....	14
2.6 Bentuk Umum Selenoid .....	20
2.7 Bentuk Umum Planar.....	20
2.8 Bentuk Umum Circular Layout Induktor Planar.....	21
2.9 Bentuk Umum Rectangular Layout Induktor Planar .....	22
3.1 Blok Diagram WPT .....	26
3.2 Diagram Alir Langkah Kerja Perancangan WPT .....	28
3.3 Skematik Rangkaian Keseluruhan .....	29
3.4 Skematik Rangkaian Pengirim.....	31
3.5 Skematik Rangkaian Penerima .....	32
4.1 Rangkaian Wireless Power Transfer.....	35

4.2 Rangkaian Pengirim.....	36
4.3 Gelombang yang Dibangkitkan Osilator Colpitts .....	36
4.4 Kumparan Pengirim dalam Bentuk Induktor Planar.....	37
4.5 Rangkaian Penerima .....	39
4.6 Kumparan Induktor Planar.....	39
4.7 Rangkaian Penyearah DC .....	40
4.8 Nilai pada Kumparan Pengirim dan Penerima Jarak 1 cm .....	41
4.9 Pengukuran Kumparan Pengirim dan Penerima Jarak 1 cm.....	44
4.10 Hubungan Daya Terima Tiap Desain dengan Jarak Konstan 1 cm .....	53
4.11 Hubungan Efisiensi Tiap Desain dengan Jarak Konstan 1 cm .....	53
4.12 Hubungan Daya Terima dengan Desain Konstan dan Jarak Bervariasi .....	54
4.13 Hubungan Efisiensi dengan Desain Konstan dan Jarak Bervariasi .....	55

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Rumus Induktansi dari Berbagai Induktor .....	10
2.2 Koefisien Modifikasi Layout Induktor Planar .....	23
2.3 Koefisien Lembar Arus Layout Induktor Planar .....	23
4.1 Nilai Induktansi Tiap Desain Induktor Planar .....	38
4.2 Nilai Pengukuran Tegangan dan Frekuensi Tiap Desain.....	42
4.3 Nilai Perhitungan Reaktansi Induktif dan Arus Tiap Desain.....	43
4.4 Pengukuran Induktor Planar Circular 10 Putaran Jarak 1-10 cm .....	44
4.5 Hasil Pengukuran Tiap Desain dengan Jarak Transfer Bervariasi.....	45
4.6 Nilai Daya pada Kumparan Pengirim dan Penerima Tiap Desain.....	48
4.7 Daya Induktor Planar Circular 10 Putaran dengan Jarak Bervariasi .....	49
4.8 Efisiensi Daya Tiap Desain dengan Jarak Konstan 1 cm.....	50
4.9 Efisiensi Induktor Planar Circular 10 Putaran dengan Jarak Bervariasi .....	51

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Transfer daya listrik merupakan proses untuk mengirimkan daya listrik dari sumber daya menuju pengguna atau beban. Transfer daya listrik memanfaatkan perambatan gelombang elektromagnetik dengan cara konduksi dan induksi. Konduksi memanfaatkan konduktor sebagai media perambatan. Sedangkan induksi merupakan perambatan gelombang elektromagnetik melalui media udara (*wireless*).

Pengguna peralatan elektronika berdaya rendah (*gadget*) secara umum melakukan pengisian daya baterai dengan menggunakan *charger* yang terhubung ke saluran daya. Melakukan pengisian baterai tanpa terhubung dengan kabel *charger* dan saluran daya akan memudahkan pengguna. Hal ini yang mendasari penulis untuk mencoba membuat metode *Wireless Power Transfer*. Telepon genggam merupakan peralatan elektronika berdaya rendah yang memungkinkan untuk digunakan sebagai pengaplikasian metode transfer daya listrik secara *wireless*.

Nikola Tesla adalah orang yang pertama kali menggagas teknologi transfer daya listrik secara nirkabel. Tesla mendemonstrasikan alatnya yang kemudian disebut

Tower Wardencllyffe pada tahun 1893 pada *World Columbian Exposition* di Chicago. Setelah itu mulai dilakukan pengembangan dan penelitian untuk transfer daya listrik secara nirkabel.

Seiring kemajuan teknologi, penelitian mengenai teknologi transfer daya listrik nirkabel dikembangkan pada peralatan elektronika berdaya rendah. *Wireless Charging Pad* (WCP) merupakan alat yang digunakan untuk men-charge baterai peralatan elektronika dengan konsumsi daya rendah seperti telepon genggam dan kamera digital. WCP memanfaatkan konsep transfer energi listrik secara *wireless* dengan metode induksi elektromagnet tanpa menyamakan frekuensi resonansi antara kumparan pengirim dan penerima.

Penelitian tugas akhir ini akan mendesain perangkat transfer daya listrik secara *wireless* menggunakan metode kopling resonansi magnetik dengan menyamakan frekuensi resonansi antara kumparan pengirim dan penerima. Kumparan yang digunakan merupakan induktor planar, yang dibuat menggunakan rangkaian sirkuit tercetak (*PCB-printed circuit board*) dengan dimensi 5 x 5 cm. Desain yang digunakan berbentuk *circular* dan *rectangular* dengan jumlah putaran (*trace*) bervariasi. Pengembangan dari hasil penelitian ini akan diaplikasikan sebagai *wireless charger* untuk peralatan elektronika dengan konsumsi daya rendah.

## **1.2. Tujuan Penelitian**

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan, yaitu:

1. Mengetahui prinsip kerja transfer daya listrik secara *wireless* menggunakan metode kopling resonansi magnetik.

2. Merancang prototipe *Wireless Power Transfer (WPT) device* menggunakan induktor planar.
3. Menganalisa efisiensi transfer daya listrik secara *wireless* dengan desain induktor planar bervariasi dan jarak 1-10 cm.

### **1.3. Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui dan mendesain sistem transfer daya listrik secara *wireless* menggunakan metode kopling resonansi magnetik yang diharapkan dapat diaplikasikan sebagai pengisi baterai (*charger*) pada peralatan elektronika dengan konsumsi daya rendah. Penelitian ini dapat dikembangkan menjadi *wireless charger* sehingga memungkinkan mengisi baterai tanpa menggunakan kabel agar lebih memberikan kenyamanan dan mengurangi jumlah penggunaan kabel listrik.

### **1.4. Rumusan Masalah**

Dalam melaksanakan penelitian ini digunakan beberapa rumusan masalah, yaitu:

1. Bagaimana membuat *Wireless Power Transfer (WPT) device* menggunakan metode kopling resonansi magnetik?
2. Bagaimana mengganti kumparan fisik menjadi kumparan induktor planar berbentuk rangkaian sirkuit tercetak (PCB)?
3. Bagaimana memvariasikan desain induktor planar?
4. Bagaimana memaksimalkan efisiensi daya yang diterima?

### **1.5. Batasan Masalah**

Penelitian ini memiliki beberapa batasan masalah, yaitu:

1. Prinsip transfer elektromagnetik secara nirkabel hanya menggunakan metode kopling resonansi magnetik.
2. Induktor yang digunakan adalah induktor planar dengan bentuk *circular* dan *rectangular* yang didesain tercetak pada PCB berdimensi 5 x 5 cm.
3. WPT *device* yang digunakan hanya untuk alat elektronika dengan konsumsi daya rendah dengan tegangan kerja maksimal 5 V dan konsumsi daya maksimal 2 watt dengan jarak 1-10 cm.

### **1.6. Hipotesis**

Rancangan WPT *device* pada penelitian ini menggunakan metode kopling resonansi magnetik yang dapat mentransferkan daya listrik secara nirkabel dengan menyamakan frekuensi resonansi pada sisi pengirim dan penerima. Efisiensi yang didapatkan akan cukup besar menggunakan prinsip resonansi elektromagnetik dalam transfer energi *wireless* ini. Energi yang diterima pada sisi penerima akan hampir sama besar dengan energi yang dikirimkan oleh sisi pengirim sesuai dengan jarak di antaranya. Kumbaran yang digunakan adalah induktor planar yang tercetak di PCB. Kumbaran ini akan mampu menghasilkan nilai induktansi yang akan digunakan untuk mentransfer energi melalui fluks magnetik dengan efisiensi yang besar. Efisiensi ini akan dipengaruhi nilai jarak yang digunakan dalam proses pentransferan energi listrik menggunakan metode kopling resonansi magnetik. Semakin dekat jarak antara sisi pengirim dan sisi penerima maka efisiensi akan semakin besar.

## **1.7. Sistematika Penulisan**

Adapun sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut,

### **BAB I PENDAHULUAN**

Memuat latar belakang masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Berisi teori – teori yang mendukung dalam perancangan dan realisasi alat serta *review* hasil penelitian para peneliti transfer energi secara nirkabel terdahulu sampai saat ini.

### **BAB III METODE PENELITIAN**

Memuat langkah – langkah yang dilakukan pada penelitian, yaitu waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan, komponen serta perangkat penelitian, prosedur kerja, perancangan, dan pengujian alat.

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Menjelaskan prosedur pengujian, hasil pengujian dan analisa terhadap data – data hasil pengujian yang diperoleh.

### **BAB V SIMPULAN DAN SARAN**

Memuat simpulan yang diperoleh dari perancangan dan pengujian alat, serta saran saran untuk pengembangan lebih lanjut.

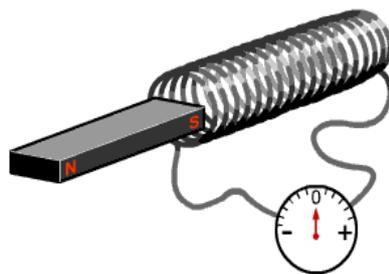
### **DAFTAR PUSTAKA**

### **LAMPIRAN**

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. 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. Timbulnya arus listrik pada kumparan disebabkan karena beda potensial medan magnet memotong kumparan. Percobaan Faraday dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Percobaan Michael Faraday[1]

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:

$$\epsilon_{\text{induksi}} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :  $\epsilon_{\text{induksi}}$  = Gaya gerak listrik induksi (Volt)  
 $N$  = Jumlah lilitan  
 $d\Phi$  = Perubahan garis gaya (weber)  
 $dt$  = Selang waktu (detik)

Tanda negatif berarti gaya gerak listrik induksi selalu membangkitkan arus yang medan magnetiknya berlawanan dengan sumber perubahan fluks magnetik (Hukum Lenz).

*Fluks Magnetik* ( $\Phi$ ) adalah kerapatan garis – garis gaya dalam medan magnet. Fluks magnetik yang berada pada permukaan yang lebih luas, kerapatan garis gaya dalam magnet menjadi rendah dan kuat medan magnetik ( $B$ ) menjadi lebih lemah, sedangkan pada permukaan ( $A$ ) yang lebih sempit kerapatan garis gaya dalam magnet menjadi kuat dan kuat medan magnetik ( $B$ ) menjadi lebih tinggi.

Besar fluks magnetik dinyatakan dalam persamaan:

$$\Phi = B \cdot A \text{ (Weber)} \dots\dots\dots(2.2)$$

Biot-Savart menjelaskan bahwa medan magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik adalah proses induktansi[1]. 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[2].

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*).

## 2.2. Induktansi

Induksi (L) adalah efek dari medan magnet yang terbentuk di sekitar konduktor yang dialiri arus. Arus listrik yang melewati konduktor membuat medan magnet sebanding dengan besar arus. Perubahan dalam arus menyebabkan perubahan medan magnet yang mengakibatkan gaya elektromotif lawan melalui GGL induksi yang bersifat menentang perubahan arus. Induktansi diukur berdasarkan jumlah gaya elektromotif yang ditimbulkan untuk setiap perubahan arus terhadap waktu. Secara matematis induktansi pada suatu induktor dengan jumlah lilitan sebanyak N adalah akumulasi flux magnet untuk tiap arus yang melewatinya :

$$L = N \Phi i \dots\dots\dots(2.3)$$

- Keterangan : L = Induktansi (H)  
N = Jumlah banyak lilitan  
 $\Phi$  = Fluks magnet (Wb)  
I = Arus (Ampere)

Induktansi dalam sebuah rangkaian timbul akibat adanya medan magnet yang disebabkan oleh arus listrik yang mengalir pada suatu penghantar dan berada di

antara medan magnet (Biot-Savart). Suatu rangkaian elektronika akan memiliki nilai induktansi jika terdapat komponen induktor di dalamnya. Induktor merupakan komponen elektronika pasif yang dapat menyimpan energi dalam bentuk medan magnet.



Gambar 2.2 Bentuk Umum Induktor[1]

Induktor terdiri dari belitan kabel atau tembaga untuk memusatkan medan magnet dan memanfaatkan GGL yang dihasilkannya. 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 ( $\mu$ )

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

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} \dots\dots\dots(2.4)$$

Tabel 2.1 Rumus Induktansi dari Berbagai Bentuk Induktor

Konstruksi	Rumus	Keterangan
Lilitan silinder[3]	$L = \frac{\mu_0 \cdot K \cdot N^2 \cdot \pi \cdot r^2}{l}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>L</math> = Induktansi</li> <li>• <math>\mu_0</math> = Permeabilitas vakum</li> <li>• <math>K</math> = Konstanta Nagaoka</li> <li>• <math>N</math> = Jumlah lilitan</li> <li>• <math>r</math> = Jari-jari lilitan</li> <li>• <math>l</math> = Panjang lilitan</li> </ul>
Kawat lurus	$L = 200 \cdot l \left( \ln \frac{4l}{d} - 1 \right) \cdot 10^{-9}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>L</math> = Induktansi</li> <li>• <math>l</math> = Panjang kawat</li> <li>• <math>d</math> = Diameter kawat</li> </ul>
Lilitan silinder pendek berinti udara	$L = \frac{r^2 \cdot N^2}{9r + 10l}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>L</math> = Induktansi (<math>\mu\text{H}</math>)</li> <li>• <math>r</math> = Jari-jari lilitan (in)</li> <li>• <math>l</math> = Panjang lilitan (in)</li> <li>• <math>N</math> = Jumlah lilitan</li> </ul>
Lilitan berlapis-lapis berinti udara[4]	$L = \frac{0,8r^2 \cdot N^2}{6r + 9l + 10d}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>L</math> = Induktansi (<math>\mu\text{H}</math>)</li> <li>• <math>r</math> = Rerata jari-jari lilitan (in)</li> <li>• <math>l</math> = Panjang lilitan (in)</li> <li>• <math>N</math> = Jumlah lilitan</li> <li>• <math>D</math> = Tebal lilitan (in)</li> </ul>

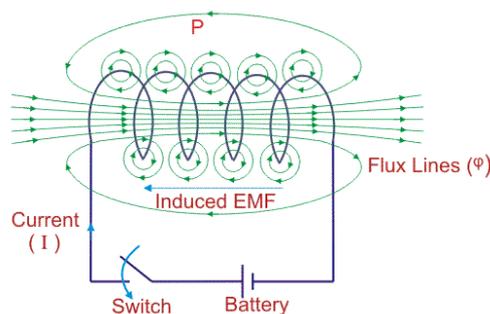
Lilitan spiral datar berinti udara	$L = \frac{r^2 \cdot N^2}{(2r + 2,8d) \times 10^5}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>L</math> = Induktansi</li> <li>• <math>r</math> = Rerata jari-jari spiral</li> <li>• <math>N</math> = Jumlah lilitan</li> <li>• <math>d</math> = Tebal lilitan</li> </ul>
Inti toroid	$L = \mu_0 \cdot \mu_r \frac{r^2 \cdot N^2}{D}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>L</math> = Induktansi</li> <li>• <math>\mu_0</math> = Permeabilitas vakum</li> <li>• <math>\mu_r</math> = Permeabilitas solenoid bahan inti</li> <li>• <math>N</math> = Jumlah lilitan</li> <li>• <math>R</math> = Jari-jari gulungan</li> <li>• <math>D</math> = Diameter keseluruhan</li> </ul>

### 2.2.1. Induktansi Sendiri

Induktansi sendiri adalah proses timbulnya tegangan listrik pada kumparan saat terjadi perubahan arus. Jika suatu kawat penghantar berpotongan dengan medan magnet, maka akan terjadi tegangan pada kawat tersebut. Nilai induktansi dapat ditentukan dengan rumus :

$$V = L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots(2.5)$$

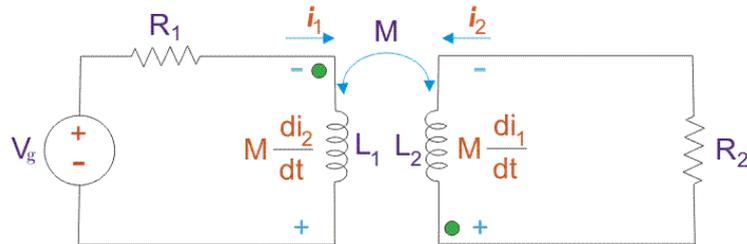
Dimana  $V$  adalah gaya gerak listrik (Volt) yang ditimbulkan dan  $di$  adalah arus listrik (ampere) yang berubah – ubah. Bentuk paling sederhana dari persamaan induktansi sendiri terjadi saat arus berubah secara konstan terhadap waktu sehingga gaya gerak listrik yang dihasilkan konstan.



Gambar 2.3 Rangkain Induktansi Sendiri[15]

### 2.2.2.Induktansi Bersama

Induktansi bersama adalah induktansi yang timbul pada suatu kumparan karena perubahan fluks dari kumparan lain.



Gambar 2.4 Rangkaian Induktansi Bersama[5]

Proses terjadinya induktansi bersama ketika kumparan  $N_1$  dialiri arus maka akan timbul fluks magnetik. Fluks magnetik pada kumparan  $N_1$  akan merambat ke kumparan  $N_2$  dan menimbulkan induksi elektromagnetik pada kumparan  $N_2$ . Fluks magnetik pada kumparan  $N_2$  akan menghasilkan gaya gerak listrik induksi pada kumparan  $N_2$ .

Ketika arus ( $i_1$ ) mengalir melalui  $L_1$  maka di sekeliling  $L_1$  akan timbul fluks magnetik ( $\phi$ ). Fluks magnetik yang dihasilkan oleh  $L_1$  akan menginduksi  $L_2$  sehingga timbul tegangan dan arus listrik. Besar induktansi bersama ini dapat dihitung dengan persamaan :

$$M = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot L_1 \cdot L_2}{l} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana  $\mu_0$  adalah permeabilitas udara yang memisahkan kedua induktor,  $\mu_r$  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.

### **2.3. Kopling Resonansi Magnetik**

Resonansi elektromagnetik ada secara luas di dalam sistem elektromagnetik. Medan elektromagnetik itu sendiri merupakan bidang energi yang dapat memberikan energi untuk digunakan dalam proses terjadinya aliran listrik. Mengingat bahaya bagi masyarakat dan organisme lain di dalam medan listrik, medan magnet yang aman dan lebih sesuai untuk digunakan sebagai media pengiriman energi dalam perpindahan energi resonansi secara magnetis. Radiasi gelombang elektromagnetik itu sendiri mengandung energi. Tidak peduli apakah ada atau tidak penerimanya, energi dari gelombang elektromagnetik itu secara terus menerus dikonsumsi. Jika kita dapat membuat suatu medan magnetik non-radiasi dengan frekuensi resonansi tertentu, saat penghasil resonansi seperti rangkaian osilasi LC, dengan frekuensi resonansi yang sama di dalamnya, maka dapat dihasilkan suatu resonansi elektromagnetik, kumparan induktansi akan terus mengumpulkan energi, tegangan akan naik, dan energi yang diterima dapat disalurkan ke beban setelah dikonversi dengan rangkaian tambahan.

Kopling resonansi magnetik adalah pengembangan dari induksi elektromagnetik. Konsep resonansi magnetik yang kemudian disebut resonansi induktif medan elektromagnetik menggunakan konsep dasar elektromagnetik dengan nilai frekuensi yang sama antara dua kumparan. Kopling resonansi magnetik mampu mentransfer energi listrik antara dua kumparan melalui medan magnet yang bervariasi atau bersilasi. Kumparan yang digunakan dalam kopling resonansi magnetik ini adalah kumparan dengan frekuensi resonansi yang sama sehingga kopling yang terjadi cukup kuat dan dapat mencapai efisiensi yang cukup tinggi.

Efisiensi yang dapat dicapai oleh kopling resonansi magnetik ini sebesar 92.6% pada jarak 0.03 cm[5].

Penggunaan resonansi induktif medan elektromagnetik untuk meningkatkan *bandwith* gelombang medan elektromagnetik dengan menggunakan frekuensi yang sama antara sinyal pengirim dan sinyal penerima, sehingga jarak pengiriman energi listrik secara nirkabel menjadi lebih jauh dengan efisiensi daya yang lebih tinggi[6]. Frekuensi yang digunakan menggunakan frekuensi tinggi menggunakan rangkaian osilator (variasi dan gabungan dari komponen kapasitor (C), induktor (L) dan transistor).

#### Gambar 2.5 Rangkaian Kopling LC[6]

Rangkaian LC adalah rangkaian resonansi yang terdiri dari induktor (L) dan kapasitor(C). rangkaian LC biasa digunakan untuk menghasilkan sumber arus bolak balik atau sebagai pembangkit sinyal. Prinsip kerja rangkaian LC agar dapat menghasilkan sinyal bolak balik (berisolasi) adalah dengan menggunakan kapasitor dan induktor. Kapasitor menyimpan energi dalam bentuk medan listrik antara kedua pelatnya, sedangkan induktor menyimpan energi dalam bentuk medan magnet berdasarkan besarnya arus yang melalui induktor tersebut.

#### **2.4. Wireless Power Transfer**

Wireless Power Transfer(WPT) merupakan metode transfer daya listrik dari sumber tegangan menuju ke beban tanpa menggunakan konduktor kawat tembaga.

WPT digunakan untuk mentransfer daya dalam kasus dimana interkoneksi kabel yang merepotkan, berbahaya, atau tidak memungkinkan. Pada transfer daya nirkabel ini perangkat pengirim mentransmisikan daya listrik menggunakan medan elektromagnet ke pada satu atau beberapa perangkat penerima yang kemudian diubah kembali menjadi energi listrik. Dalam sistem komunikasi jumlah energi listrik yang diterima *receiver* umumnya berjumlah kecil. Hal tersebut tidak begitu berpengaruh dikarenakan dalam sistem komunikasi tujuannya bukan transfer energi tetapi transfer informasi. Sebaliknya pada sistem transmisi energi, jumlah daya yang diterima adalah hal yang penting, sehingga efisiensi adalah parameter yang selalu dianggap penting.

Rugi – rugi daya (*losses*) yang terjadi selama transmisi dan distribusi listrik merupakan masalah utama dalam sistem energi listrik. Seiring kebutuhan akan energi listrik meningkat, pembangkit listrik pun meningkat sehingga *losses* pun meningkat. *Losses* terbesar energi listrik terjadi pada sistem transmisi dan distribusi. Persentase dari *losses* energi pada transmisi dan distribusi mencapai 26% [7]. Resistansi kabel yang digunakan untuk jaringan menjadi alasan utama *losses* energi pada transmisi dan distribusi. Efisiensi transmisi energi dapat ditingkatkan pada level tertentu dengan menggunakan konduktor *overhead* dengan kekuatan komposit yang tinggi dan kabel bawah tanah dengan superkonduktor bertekanan tinggi.

WPT terbagi menjadi beberapa bagian sesuai dengan klasifikasinya. WPT yang menggunakan medan dekat (*near-field*) disebut *Non-radiative techniques*. Teknik ini mentransfer energi dengan jarak dekat oleh medan magnetik menggunakan prinsip kopling induktif antara kumparan atau dalam beberapa peralatan oleh

medan listrik menggunakan kopling kapasitif antara elektroda[8]. Fokus pengembangan teknik ini adalah *charging* untuk perangkat komunikasi *mobile* seperti ponsel, pemutar musik digital dan komputer portabel.

Selain menggunakan medan dekat, WPT juga dapat digunakan dengan teknik medan jauh (*far field*). Teknik medan jauh ini biasanya disebut *radiativetechniques* atau *power beaming*. Energi listrik ditransmisikan menggunakan sinar (*beams*) dari radiasi elektromagnetik seperti gelombang mikro atau sinar laser. Aplikasi yang diusulkan untuk tipe ini adalah satelit tenaga surya dan pesawat *drone wirelesspower*.

Kopling induksi magnetik dan kopling resonansi magnetik bekerja pada medan dekat (*near-field*) dimana medan elektromagnetik yang dihasilkan mendominasi daerah yang dekat dengan transmitter. Energi *near-field* dilemahkan berdasarkan timbal balik pangkat tiga dari jarak *charging*[9]. Sebagai alternatif, radiasi gelombang mikro bekerja pada medan jauh (*far-field*) dan jarak yang lebih jauh. Energi *far-field* berkurang berdasarkan timbal balik kuadrat dari jarak *charging*. Lagipula, untuk teknik *far-field* penyerapan radiasi tidak mempengaruhi transmitter. Sebaliknya, untuk teknik *near-field* penyerapan radiasi mempengaruhi beban pada transmitter[10]. Hal ini terjadi karena antena pengirim dan penerima tidak terkopling untuk teknik *far-field*. Sementara itu kumparan pengirim dan penerima digabungkan (*coupled*) untuk teknik *near-field*.

WPT memiliki beberapa kelebihan seperti membuat perangkat elektronik lebih nyaman dengan menghilangkan kebutuhan akan kabel listrik. Karena tidak menggunakan kabel listrik maka kecil kemungkinan untuk terjadinya kegagalan daya dikarenakan *short circuit*. Selain memiliki kelebihan WPT juga memiliki

kekurangan diantaranya modal untuk mengaplikasikannya secara skala besar sangat mahal. WPT juga dapat menyebabkan gangguan pada sistem komunikasi. Di samping itu efisiensinya masih tergolong rendah dibandingkan dengan pengisian daya tradisional.

“*WiTricity*” atau Wireless Transfer Electricity merupakan istilah yang digunakan dalam proyek yang berlangsung di MIT dan dipimpin oleh Marin Soljacic pada tahun 2007[11]. Para Peneliti MIT berhasil menunjukkan kemampuan untuk menyalakan lampu dengan daya 60 watt tanpa kabel, menggunakan dua kumparan jenis *5-turn copper* dengan diameter 60 cm berjarak 2 meter jauhnya dengan efisiensi 45%. Kumparan didesain untuk beresonansi dalam frekuensi 9.9MHz dengan panjang gelombang 30 meter dan berorientasi sepanjang *axis* sama[12]. Konfigurasinya berhasil menyalakan lampu, walaupun saat percobaan dilakukan penghalangan menggunakan sebuah papan kayu. Peneliti berhasil menyalakan lampu 60 watt dengan efisiensi 90% pada jarak 3 kaki. Pada akhirnya proyek ini berubah menjadi perusahaan swasta yang disebut dengan *WiTricity*.

Penelitian tugas akhir ini akan menggunakan teknik transfer energi secara nirkabel dengan medan dekat (*near-field*). Penelitian ini menggunakan prinsip induksi elektromagnetik untuk menganalisa efisiensi pada sisi penerima. *Prototype* WPT (Wireless Power Transfer) *device* ini menggunakan kumparan dalam bentuk rangkaian sirkuit tercetak (*PCB-printed circuit board*) dengan dimensi 5x5 cm. Range jarak yang digunakan pada penelitian ini adalah 1-10 cm. Objek Penelitian yang digunakan pada tugas akhir ini adalah peralatan elektronika berdaya rendah dengan beban input maksimal 5V.

## 2.5. Transmitter (Pengirim)

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 ).

Berbeda halnya bila menggunakan osilator yang lain dimana osilator yang pada dasarnya memiliki daya yang kecil harus dihubungkan dengan rangkaian penguat lagi sehingga sistem penghantaran dapat terjadi. Namun terlepas dari itu semua masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Bagian LC merupakan bagian terpenting dari oscillator. Perubahan yang dilakukan di LC membuat frekuensi berubah, hal ini yang menjadi percobaan. Sedangkan untuk design LOOP yang merupakan sebuah induktor namun tidak berupa lilitan tapi berupa selubung tembaga yang dibengkokkan sedemikian rupa. Sebenarnya penggunaan kawat pejal juga dapat dipergunakan namun jika dibuat dengan diameter yang sama dan nilai induktasinya sama, maka menghasilkan diameter yang cukup kecil. Namun jika menggunakan kawat pejal tersebut akan terjadi panas yang berlebih dibandingkan dengan menggunakan selubung tembaga. Loop tembaga berselubung menjadi pilihan yang baik untuk merancang loop pada pemancar (transmitter) dan penerima.

## 2.6. Receiver (Penerima)

Receiver (penerima) gelombang elektromagnetik dengan proses resonansi magnetik, rangkaian penerima hanya terdiri dari rangkaian LC saja yang akan terhubung ke beban Rangkaian LC. Untuk mendapatkan penerimaan gelombang yang hampir sempurna, maka frekuensi resonansi sendiri pada rangkaian penerima kurang lebih sama dengan frekuensi resonansi pada rangkaian transmitter, ini berguna untuk mendapatkan frekuensi resonansi bersama bisa terpenuhi.

Jika dalam suatu sistem pengiriman daya listrik tanpa kabel konstruksi dan perancangan pada sisi penerima juga akan sangat mempengaruhi daya listrik yang dapat diterima baik itu dalam hal jarak maupun tegangan keluaran yang dihasilkan ke beban. Untuk kerja yang dihasilkan dalam sistem ini diharapkan lebih baik jika dibandingkan dengan menggunakan konsep induksi tradisional seperti pada konsep yang dipakai pada trafo, tetapi mungkin tidak lebih baik jika dibandingkan dengan memakai kabel seperti biasa.

## 2.7. Kumparan

Dimensi belitan pengirim dan penerima akan menentukan besar induktansi belitan [4]. Induktansi belitandihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

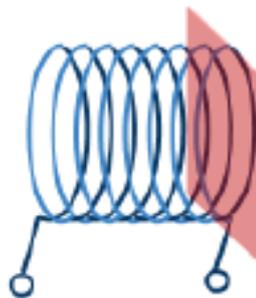
$$L = \frac{(r.N)^2}{22.9 r + 25.4 l} \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan :  
L= Induktansi ( $\mu$ H)  
r = Jarak antar kumparan (cm)  
N= Jumlah putaran lilitan  
l = Panjang lilitan (cm)

Untuk belitan berbentuk solenoid, rumusan nilai induktansi dapat dilihat dalam persamaan[13] :

$$L = r^2 \cdot \frac{N^2}{9.r + 10.l} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan: L= Induktansi  
 r = Jari-jari solenoid (inci)  
 N= Banyaknya putaran  
 l = Panjang solenoid (inci)

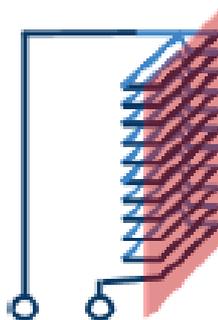


Gambar 2.6 Bentuk Umum Selenoid[1]

Sedangkan untuk belitan berbentuk planar, mencari nilai induktansi dapat diperoleh menggunakan persamaan [13]:

$$L = r^2 \cdot \frac{N^2}{8.r + 11.w} \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan: L= Induktansi  
 r = Jari-jari dalam (inci)  
 N= Banyaknya putaran  
 w= Diameter kawat (inci)



Gambar 2.7 Bentuk Umum Planar[1]

Nilai Induktansi pada kumparan antena:

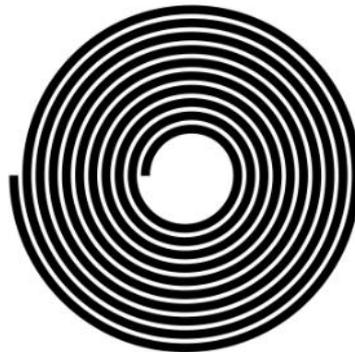
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan : f = Frekuensi (Hz)  
 L= Induktansi (H)  
 C= Kapasitansi (F)

Dengan f adalah frekuensi osilasi, disesuaikan dengan frekuensi sistem transfer energi yang diinginkan dan merupakan frekuensi tinggi dalam orde MHz. Penggunaan frekuensi tinggi dimaksudkan untuk memperkecil dimensi rangkaian transfer energi. Untuk Faktor kualitas pada resonansi kumparan:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan: Q = Faktor Kualitas Kumparan  
 L = Induktansi  
 C = Kapasitor



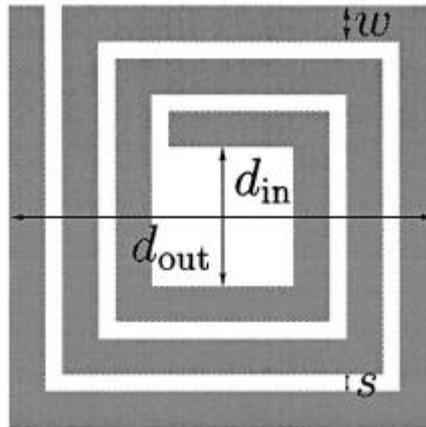
Gambar 2.8 Bentuk Umum Circular Layout Induktor Planar[14]

Untuk kumparan atau belitan dengan sistem planar spiral dengan layout circular, nilai induktansi dapat dihitung dengan cara[14]:

$$L = K_1\mu_0 \frac{n^2 d_{avg} C_1}{1+K_2\rho} \left( \ln \left( \frac{C_2}{\rho} \right) + C_3\rho + C_4\rho^2 \right) \dots\dots\dots (2.12)$$

Keterangan : L = Induktansi  
 K = Koefisien layout desain

- $\mu_0$  = Permeabilitas Udara
- $n$  = putaran
- $d_{avg} = \frac{D_{out} + D_{in}}{2} = (\text{Diameter Luar} + \text{Diameter dalam})/2$
- $\rho = \frac{D_{out} - D_{in}}{D_{out} + D_{in}} = (\text{Diameter Luar} - \text{Diameter dalam}) / (\text{Diameter Luar} + \text{Diameter dalam})$
- $C$  = Koefisien Arus



Gambar 2.9 Bentuk Umum Rectangular Layout Induktor Planar<sup>[14]</sup>

Kumparan dalam bentuk sirkular induktor planar dapat dihitung nilai induktansinya dengan perhitungan:

$$L = \frac{K_1 \mu_0 n^2 d_{avg}}{1 + K_2 \rho} \dots \dots \dots (2.13)$$

Keterangan :L = Induktansi

- $\mu_0$  = Permeabilitas Udara
- $n$  = putaran
- $d_{avg} = \frac{D_{out} + D_{in}}{2} = (\text{Diameter Luar} + \text{Diameter dalam})/2$
- $\rho = \frac{D_{out} - D_{in}}{D_{out} + D_{in}} = (\text{Diameter Luar} - \text{Diameter dalam}) / (\text{Diameter Luar} + \text{Diameter dalam})$
- $k$  = Koefisien

Dalam menghitung nilai induktansi pada induktor planar yang terbuat dari papan sirkuit tercetak dibutuhkan koefisien-koefisien yang digunakan dalam perhitungan. Koefisien tersebut adalah seperti dibawah ini:

Tabel 2.2 Koefisien untuk Modifikasi Layout Induktor Planar

<b>Koefisien Layout Planar Induktor</b>		
<b>Layout</b>	<b>K<sub>1</sub></b>	<b>K<sub>2</sub></b>
Square	2.34	2.75
Hexagonal	2.33	3.82
Octagonal	2.25	3.55

Tabel 2.3 Koefisien untuk Lembar Arus Layout Induktor Planar

<b>Koefisien Arus Layout Planar Induktor</b>				
<b>Layout</b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>4</sub></b>
Square	1.27	2.07	0.18	0.13
Hexagonal	1.09	2.23	0	0.17
Octagonal	1.07	2.29	0	0.19
Circle	1	2.46	0	0.2

### **III. METODE PENELITIAN**

#### **3.1. Waktu dan Tempat Penelitian**

Perancangan dan penelitian ini akan dilakukan pada Laboratorium Terpadu Teknik Elektro Universitas Lampung. Waktu Pelaksanaan penelitian akan berlangsung mulai dari Juni hingga September 2017.

#### **3.2. Alat dan Bahan**

Peralatan dan bahan – bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah

1. Komputer Pribadi (PC)
2. PCB (*Printed Circuit Board*)
3. Transistor KSP2222A
4. Resistor 260 $\Omega$ , 68  $\Omega$  , 100 k $\Omega$ , 33 k $\Omega$
5. Kapasitor 1  $\mu$ F; 10 nF; 1 nf ; dan 2.2 nF
6. LED
7. Dioda 1N41418
8. IC LM 7805
9. Timah solder
10. *Feriklorit*

Perangkat kerja yang terdiri dari:

1. Adaptor

2. *Project Board*
3. Kabel penghubung
4. Bor PCB
5. Solder dan peralatan pembersih timah

### **3.3. Prosedur Kerja**

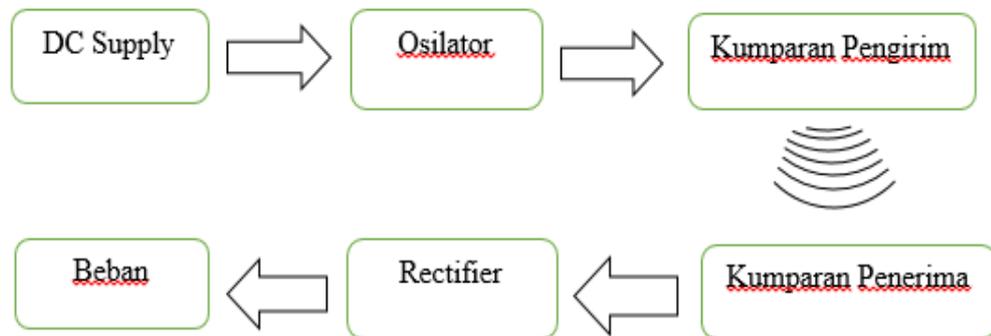
Langkah – langkah kerja yang dilakukan pada perancangan model sistem secara keseluruhan adalah sebagai berikut :

1. Studi literatur

Studi literatur merupakan tahapan awal dimana penulis mempelajari berbagai sumber referensi baik dari skripsi, buku, jurnal , dan makalah ilmiah yang berkaitan dengan topik penelitian. Khususnya penulis mempelajari sistem kerja dari transfer energi nirkabel beserta karakteristik dan bagian – bagiannya. Selain itu penulis pun *me-review* penelitian sebelumnya guna sebagai batasan dalam melakukan penelitian.

2. Perancangan blok diagram sistem.

Perancangan blok diagram sistem bertujuan untuk mempermudah realisasi transfer energi secara nirkabel. Gambar 3.1 menunjukkan bahawa Wireless Power Transfer menggunakan sumber daya dengan daya arus searah (DC) sebesar 20 V. Daya arus searah kemudian diubah menjadi daya arus bolak-balik (AC) berfrekuensi tinggi menggunakan rangkaian osilator Colpitts. Frekuensi yang dibangkitkan kemudian diresonansikan oleh kumparan pengirim menggunakan metode kopling resonansi magnetik menuju kumparan penerima. Daya arus bolak-balik (AC) yang diterima disearahkan oleh penyearah setengah gelombang menjada daya arus searah (DC) untuk menyalakan lampu LED sebagai beban(indikator).



Gambar 3.1 Blok Diagram WPT Device

3. Implementasi rangkaian transfer energi secara nirkabel. Implementasi rangkaian dilakukan dengan tahapan – tahapan sebagai berikut :
  - a. Merancang pembuatan rangkaian dan menentukan komponen yang digunakan.
  - b. Melakukan pengujian rangkaian dari setiap blok diagram di *project board*.
  - c. Menggabungkan setiap rangkaian blok diagram yang telah diuji dan melakukan pengujian ulang.
4. Pengujian alat
 

Pengujian alat dilakukan untuk mengetahui tingkat keberhasilan alat yang dirancang dan dilakukan dengan cara pengambilan data terhadap parameter referensi yang telah ditentukan.
5. Analisa dan Kesimpulan
 

Analisa dilakukan terhadap data-data yang diperoleh dari hasil pengujian dan kemudian disimpulkan

#### 3.4. Tahap – Tahap Perancangan Alat

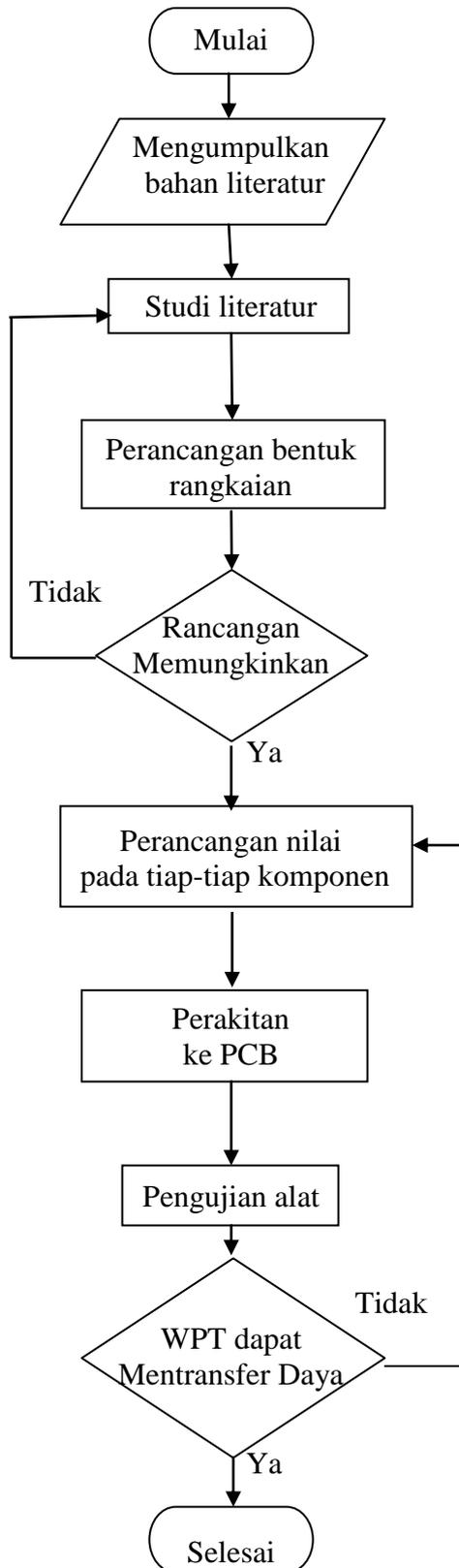
Dalam tahapan ini dilakukan realisasi dari skematik yang telah dibuat. Realisasi skematik rangkaian dilakukan pertama kali dengan menggunakan *project board*,

Jika rangkaian telah bekerja sesuai dengan fungsi yang diinginkan maka rangkaian dibuat ke dalam bentuk *Printed Circuit Board* (PCB). Namun jika ada beberapa fungsi yang tidak bekerja maka akan dilakukan peninjauan ulang terhadap rancangan rangkaian, baik itu berupa peninjauan terhadap pemilihan jenis komponen ataupun pengaturan bentuk rangkaian.

Ada beberapa proses yang dilakukan dalam tahapan pembuatan alat ini yaitu:

1. Membuat skema bentuk rangkaian alat dan menggambar rangkaian ke dalam program Diptrace menggunakan komputer.
2. Menentukan besaran nilai pada bahan atau material yang dipergunakan (nilai tahanan resistor, kapasitor, induktor).
3. Merangkai alat sesuai data yang telah diperoleh ke dalam *project board*.
4. Memindahkan hasil bentuk atau skema rangkaian yang telah berhasil ke dalam program Diptrace.
5. Memplot hasil gambar rangkaian pada PCB.
6. Melakukan penglarutan rangkaian pada PCB menggunakan *ferry chloride*.
7. Melakukan pengeboran untuk melakukan pemasangan komponen.
8. Melakukan pemasangan komponen pada PCB.
9. Melakukan penyolderan komponen ke PCB.
10. Membentuk konstruksi *prototype* transfer energi listrik sesuai dengan bentuk yang telah direncanakan.

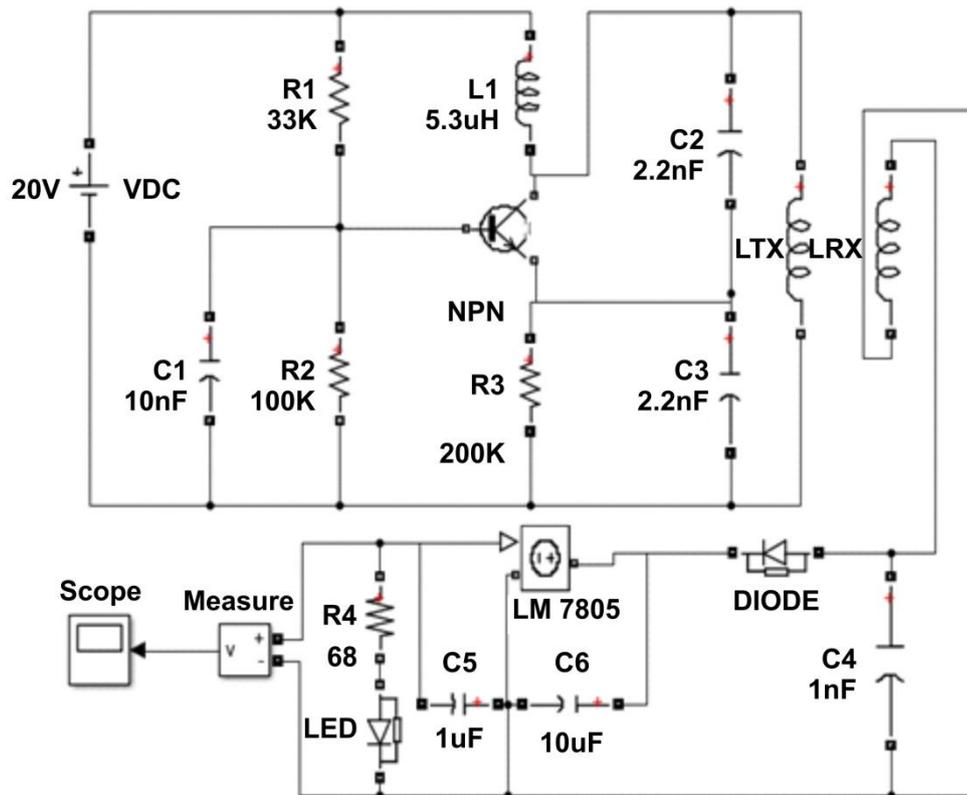
Tahap perancangan dan realisasi alat yang dilakukan dalam penelitian ini dijelaskan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Langkah Kerja Perancangan Alat

### 3.5. Perancangan WPT (*Wireless Power Transfer*) Device

Wireless Power Transfer dengan metode resonansi elektromagnetik ini dapat dilihat pada gambar 3.3. Gambar 3.3 merupakan gambaran rangkaian secara keseluruhan beserta alat pengukuran yang digunakan.



Gambar 3.3 Rangkaian Keseluruhan

#### 1. Rangkaian Pengirim

Rangkaian pengirim terdiri dari beberapa komponen elektronika yang digabungkan menjadi satu rangkaian yang berfungsi untuk mengirimkan energi listrik menuju rangkaian penerima tanpa menggunakan kawat konduktor sebagai perantara. Komponen penyusun dari rangkaian pengirim ini terdiri dari:

##### a. Rangkaian Osilasi

Rangkaian osilasi (Osilator) merupakan gabungan antar elemen – elemen aktif dan pasif yang menghasilkan gelombang sinusoidal atau gelombang periodik lainnya. Rangkaian osilasi mengubah daya searah (DC) dari catu daya ke daya arus bolak – balik (AC) dalam beban. Osilator dapat membangkitkan bentuk gelombang pada suatu Frekuensi dalam batas beberapa siklus. Osilator dapat menghasilkan gelombang sinusoidal dengan frekuensi tetap.

Osilator juga dapat diartikan sebagai perangkat yang bekerja hanya bila diberikan tegangan DC dan menghasilkan sinyal output sinusoidal.

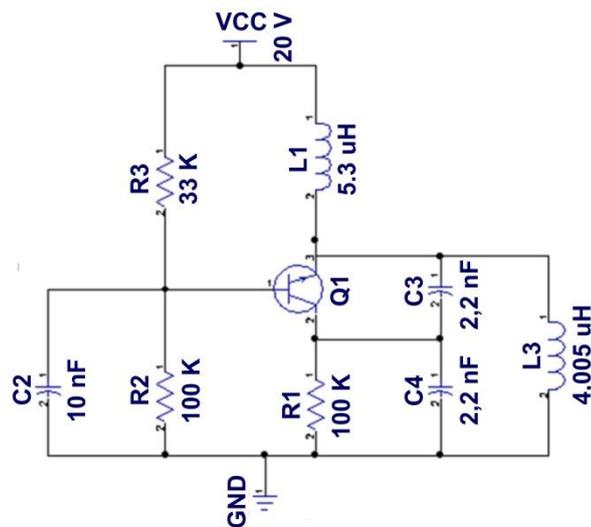
Rangkaian osilasi mempunyai bagian sebagai berikut:

1. Penguat, yang berfungsi memperkuat sinyal output.
2. Penentuan frekuensi, yang berfungsi menentukan frekuensi kerja osilator.
3. Jaringan umpan balik, yang berfungsi mengumpanbalikkan sinyal dari jaringan keluaran ke jaringan masukan.

Osilator membangkitkan gelombang FM dengan frekuensi kerja berada pada frekuensi 88-108 MHz.

Dalam tugas akhir ini rangkaian pengirim menggunakan transistor sebagai penguat elektronik yang terhubung dengan umpan balik. Pada gambar 3.4 rangkaian RC (Resistor-Capacitor) berfungsi sebagai filter frekuensi. Resistansi dan kapasitansi membentuk pergeseran fasa osilator untuk memberikan umpan balik positif. Jika sumber listrik merupakan masukan pada rangkaian penguat, noise pada rangkaian akan membuat osilator bekerja.

Setelah osilator bekerja, rangkaian LC (Induktor-Capacitor) akan menyesuaikan frekuensi operasi. Induktansi dan kapasitansi akan menyimpan daya listrik pada frekuensi resonansi. Pada titik ini, arus mengalir menuju kumparan dan medan induksi elektromagnetik akan ditransferkan melalui medium udara. Pada gambar 3.4 terdapat juga rangkaian *low pass filter*. Induktansi  $X_L$  merupakan bagian *low*-nya dan kapasitansi  $X_C$  adalah bagian *high*-nya. Sinyal dengan frekuensi rendah dapat dengan mudah melewati kumparan induktif dimana keluaran dari sistem yang tinggi. Pada gilirannya, sinyal frekuensi yang lebih tinggi akan susah melewati filter.



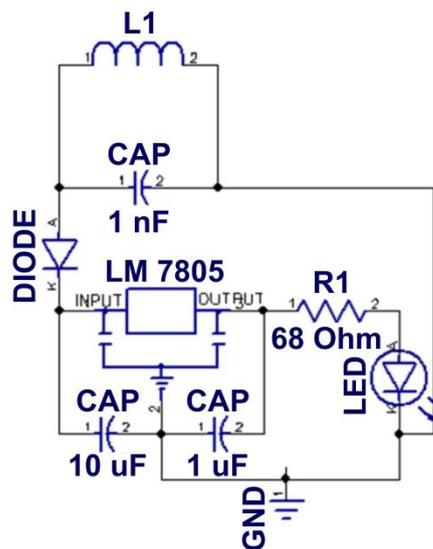
Gambar 3.4 Rangkaian Pengirim

b. Kumparan Magnetik

Salah satu paling penting dari WPT *device* ini adalah kumparan magnet. Tugas akhir ini menggunakan induktor planar yang dibuat pada rangkaian sirkuit tercetak (PCB- *printed circuit board*) dengan dimensi 5x5 cm dengan jumlah putaran yang beragam.

## 2. Rangkaian Penerima

Bagian yang terpenting dari rangkaian penerima adalah kumparan penerima yang bereaksi terhadap transfer daya dari rangkaian pengirim. Arus yang dihasilkan oleh kumparan penerima akan diumpungkan ke *rectifier* untuk dikonversikan dari AC ke DC. Regulator tegangan digunakan untuk mengontrol tingkat kestabilan keluaran pada 5V. Regulator sangat berperan penting karena dapat berfungsi sebagai pemeriksa keamanan untuk beban jika tegangan keluaran tidak stabil. Rangkaian penerima ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Rangkaian Penerima

## 3.6. Pengujian Alat

Pengujian alat dilakukan untuk mendapatkan data – data yang dihasilkan oleh alat saat bekerja. Parameter yang diukur antara lain adalah tegangan, arus, daya efisiensi alat dan jarak. Rumus – rumus yang digunakan untuk menghitung data adalah rumus daya dan efisiensi.

$$V = I \times R \dots\dots\dots(3.1)$$

$$P = V \times I \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\eta = \frac{\rho_{Rx}}{\rho_{Tx}} \times 100 \% \dots\dots\dots(3.3)$$

- Keterangan :
- $V$  = Tegangan (Volt)
  - $I$  = Arus (Ampere)
  - $R$  = Hambatan (Ohm)
  - $\eta$  = Efisiensi (%)
  - $\rho_{Rx}$  = Daya Receiver (watt)
  - $\rho_{Tx}$  = Daya Transfer (watt)

Pengujian alat dilakukan dengan cara bertahap. Tahapan – tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Pengujian rangkaian pengirim

Pengujian ini dilakukan untuk mengukur nilai tegangan, dan frekuensi pada kumparan pengirim. Tegangan dan frekuensi diukur menggunakan osiloskop. Pengukuran ini tidak menggunakan *voltmeter* ataupun *amperemeter* dikarenakan keterbatasan alat ukur pada frekuensi tinggi.

2. Pengujian rangkaian penerima

Pengujian dengan cara yang sama dilakukan pada sisi penerima. Pengukuran pada kumparan penerima ini merupakan *input* yang ditransferkan oleh kumparan dengan metode resonansi elektromagnetik. Pengujian ini dilakukan untuk melihat apakah *receiver* mampu menerima fluks magnet dari *transmitter* dengan desain dan jarak tertentu. Pada *output* rangkaian penerima dilakukan pengukuran nilai tegangan dan arus dengan memasang beban lampu *LED*.

## V. KESIMPULAN

### 5.1. Kesimpulan

Penelitian perancangan prototipe *Wireless Power Transfer* menggunakan induktor planar yang tercetak di papan sirkuit tercetak (PCB), menghasilkan beberapa kesimpulan yaitu:

1. Induktor planar yang terbuat dari *trace* PCB yang dibentuk sedemikian rupa dapat menjadi alternatif induktor yang memiliki nilai induktansi dalam rentang nilai micro Henry
2. Induktor planar yang digunakan untuk transfer daya listrik secara *wireless* menggunakan metode resonansi magnetik berdimensi 5 x 5 cm dalam bentuk *circular* dan *rectangular* dengan jumlah putaran bervariasi. Jumlah putaran yang lebih banyak menyebabkan induktansi yang lebih besar. Induktansi yang divariasikan memengaruhi nilai induktansi induktor planar yang mengakibatkan frekuensi resonansi berubah – ubah berdasarkan desain.
3. Transfer daya listrik menggunakan induktor planar dengan induktansi yang menyebabkan frekuensi resonansi semakin besar. Frekuensi resonansi yang semakin besar akan semakin memaksimalkan efisiensi.

4. Pada penelitian ini untuk desain induktor planar bervariasi dengan jarak konstan 1 cm maupun jarak transfer bervariasi dengan desain konstan dihasilkan nilai efisiensi terbaik pada desain induktor planar *circular* 10 putaran dengan jarak transfer 1 cm.
5. Efisiensi terbesar dihasilkan pada induktor planar *circular* 10 putaran dengan jarak transfer 1 cm yakni 69.68 %.

## 5.2. Saran

*Prototype* Wireless Power Transfer ini didesain untuk mengetahui apakah dengan menggunakan induktor non-fisik dapat mentransfer energi listrik secara wireless. Setelah dilakukan penelitian ternyata sesuai dengan yang diharapkan dengan memvariasikan desain induktor planar dan jarak daya listrik dapat ditransferkan secara resonansi magnetik. Kumparan penerima mampu menerima tegangan rata – rata sebesar 5 V untuk menhidupkan lampu LED sebagai indikator. Untuk memaksimalkan nilai transfer daya listrik adalah dengan meminimalkan nilai induktansi dengan memperkecil jumlah *trace* pada induktor planar. Selain itu berdasarkan penelitian desain induktor planar *circular* dan jarak transfer yang dekat juga dapat memaksimalkan efisiensi daya yang diterima. Penelitian ini dapat dikembangkan sebagai *wireless charger* dengan meningkatkan nilai efisiensi daya dengan meningkatkan nilai tegangan dan arus di sisi pengirim dan penerima sehingga daya yang diterima minimal sebesar 2.5 Watt yang terdiri dari tegangan sebesar 5 V dan arus sebesar 0.5 A.

## DAFTAR PUSTAKA

1. David J. Griffiths. 2000. *Introduction to Electrodynamics, 3<sup>rd</sup> edition*. Prentice Hal.pp. 559-562. PHI Learning. ISBN 013805326X.
2. Young, Hugh D dan Roger Freedman. 2001: *Fisika Universitas. Edisi X jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
3. Nagaoka, H. 1909. The Inductance Coefficients of Solenoids. Journal of the College of science Vol.27, Art 6. Tokyo.
4. Matias, R. Cunha, B. dan Martins, R. 2013. "Modeling inductive coupling for Wireless Power Transfer to integrated circuits", *IEEE Journal*. pp.198 – 201.
5. X. Li, C. Tsui, dan W. Ki, 2015, "A. 13.56 MHz Wireless Power Transfer System With Reconfigurable Resonant Regulating Rectifier and Wireless Power Control for Implantable Medical Device", *IEEE Journal of Solid-Stade Circuits*, Vol. 50, No. 4, pp. 978-989.
6. Kim, Hee-Seung, Do-Hyun Wono, Byung-Jun Jang. *Simple design method of wireless power transfer system using 13.56MHz loop antennas*. Kookmin Power Electronic Center – KPEC.Department of Electrical Engineering, Kookmin university, Seoul, Korea.

7. Abu Sadat dan Habiba Afrin, 2015, "Wireless Power Transfer via Strongly Couple Magnetic Resonance", *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)*, Vol. 2, Issue. 1, pp. 1-5.
8. Farouk Balouchi dan Bob Ghon, 2012, "Wireless Power: Mobile Device, Consumer Electronics, Industrial Device, Wireless Charging of Electric Vehicles: Technology Analysis, Environmental Impact, and Market Forecast", *Pike Research Report*.
9. X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, dan Z. Han, 2015, "Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey", *IEEE Communications Surveys and Tutorial*, Vol. 17, No. 2, pp. 757-789.
10. N. Shinohara, 2012, "The Wireless Power Transmission: Inductive Coupling, Radio Wave, and Resonance Coupling", Vol 1, No. 3, pp 1290-1301.
11. Castelvechi, Davide, 2006, "Wireless Electricity could power consumer, industrial electgronics" MIT News.
12. Genuth, Iddo, 2008, "Wireless Power Demonstrated".
13. Pannier, J., Dries Hendrickx, Frederik Petré, Tiene Nobels.2011. *Wireless Power Transfer for Industrial Applications Through Strongly Couple Magnetic*. FMTC-Flanders MECHATRONICS Technology Centre and Groep T-Internationale Hogesschool,Belgium.
14. S. Mohan, Maria del Mar Hershenson, Stephen P. Boyd, H. Lee, 1999, "Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductance", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 34, No. 10, pp 1419-1424.