

Analisa Penggunaan Teknologi *Wireless Power Transfer*

Arsanto Narendro^{1*}

¹Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Budi Luhur, Jakarta, Indonesia

Email: 1*arsanto.narendro@budiluhur.ac.id

(* : coresponding author)

Abstrak— Sifatnya yang serba ada dan proliferasi perangkat seluler telah membuat transfer daya nirkabel (*Wireless Power Transfer* atau WPT) menjadi bidang penelitian yang sangat penting. Fleksibilitas dan efektivitas biaya dalam mengisi daya perangkat-perangkat yang sangat banyak di dunia kita tanpa harus terhubung secara fisik ke port listrik mana pun—terutama saat pengguna berhalangan untuk melakukannya—merupakan karakteristik WPT yang sangat menarik. Cara konvensional dalam mengisi daya baterai perangkat seluler ini menggunakan kabel, yang berarti selalu memerlukan koneksi fisik ke sumber daya melalui kabel listrik. Daya listrik ditransmisikan secara nirkabel ketika medan magnet yang dihasilkan oleh kopling induktif antar kumparan, atau medan listrik yang dihasilkan oleh kopling kapasitif antar elektroda, ditransfer dalam jarak pendek melalui antarmuka udara dan kemudian diterima oleh antena untuk digunakan. Artikel ini memberikan tinjauan mendalam tentang teknologi transfer daya nirkabel yang ada, prinsip operasi, aplikasi, serta peluang penelitian masa depan di bidang teknologi yang sedang berkembang ini. Meskipun WPT memiliki beberapa kelemahan, teknologi ini merupakan teknologi disruptif yang memiliki kemampuan untuk merevolusi dinamika sistem nirkabel seluler, *Internet of Things* (IoT), dan teknologi masa depan terkait lainnya.

Kata Kunci: *Wireless Power Transfer, Energy Harvesting, Wireless Charging, Inductive Coupling, Capacitive Coupling, Charging Flexibility*

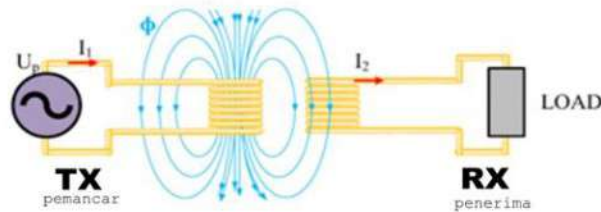
Abstract- The extensive adoption and rapid expansion of mobile gadgets have positioned wireless power transfer (WPT) as a critical domain of scientific inquiry. A compelling feature of WPT lies in its ability to offer a versatile and economical charging solution, eliminating the necessity for a direct physical link to power outlets—a particularly beneficial trait when manual connection is impractical for the user. Historically, battery replenishment for such hardware has relied on wired systems, necessitating a tethered attachment to electricity via physical cabling. In contrast, WPT facilitates the transmission of energy through the air over brief spans, utilizing either magnetic fields generated by inductive coil coupling or electric fields arising from capacitive electrode interaction, which are subsequently captured by an antenna for functional use. This paper provides a comprehensive analysis of current WPT methodologies, their functional mechanisms, practical implementations, and prospective research trajectories within this nascent field. Despite existing limitations, WPT represents a transformative advancement poised to fundamentally reshape the operational framework of mobile networks, the *Internet of Things* (IoT), and associated future technological ecosystems.

Keywords: *Wireless Power Transfer, Energy Harvesting, Wireless Charging, Inductive Coupling, Capacitive Coupling, Charging Flexibility.*

1. PENDAHULUAN

WPT, yang juga disebut sebagai Transfer Daya Tanpa Kabel, dapat digambarkan sebagai transmisi daya atau listrik tanpa bentuk koneksi fisik apa pun antara beban dan sumber daya. Hal ini dapat diterapkan di mana pengiriman daya/energi secara terus-menerus diperlukan, dan/atau di mana penggunaan kabel konvensional terbukti berbahaya, tidak nyaman, mahal, tidak praktis, atau tidak diinginkan. Dalam kerangka teknologi WPT, perangkat pemancar (transmitter) yang disuplai dari sumber daya menghasilkan medan elektromagnetik yang bergeser secara periodik. Daya tersebut kemudian ditransmisikan melintasi ruang ke perangkat penerima (recipient gadget). Transmisi lintas ruang ini memisahkan daya dari medan tersebut ke beban listrik yang disuplai daya. Inovasi teknologi WPT meningkatkan portabilitas dan fleksibilitas perangkat, menjadikannya lebih nyaman dan lebih aman untuk digunakan.

Teknologi ini juga dapat menghilangkan penggunaan koneksi fisik untuk memberi daya pada perangkat. WPT atau sistem pengisian daya nirkabel diperlukan untuk memberi daya pada perangkat listrik di mana interkoneksi fisik kabel tidak praktis, berbahaya, atau tidak tertata dengan baik. WPT memiliki keuntungan bawaan seperti memungkinkan transmisi jarak jauh; penggunaan yang nyaman dan fleksibel; serta tingkat keausan yang rendah atau tidak ada karena penggunaan kabel telah sangat dikurangi Li, J. (2017).



Gambar 1. *Wireless Power Transfer*

WPT memiliki banyak aplikasi seperti pengisian daya kendaraan listrik dengan sistem tanpa kontak, otomasi pabrik, dan suplai daya nirkabel untuk perangkat elektronik portabel atau yang dapat dikenakan (wearable), dan lain-lain. Skema sistem WPT disajikan pada Gambar 1.

Tanggal WPT sudah ada sejak abad ke-19 Sun, L., Ma, D., & Tang, H. (2018). Berdasarkan teori yang telah dikembangkan oleh Michael Faraday dan James Maxwell, pada tahun 1890-an Nikola Tesla mulai melakukan eksperimen mengenai WPT, yang ia gambarkan sebagai teknologi yang sangat vital dengan “kepentingan yang melampaui segala sesuatu bagi umat manusia” Venkateswara R M, Sai H Kand Venkat MC (2013). Tesla membangun sebuah kumparan besar dan memberinya daya 300 kW pada frekuensi 150 kHz, hingga puncaknya tercapai tegangan RF sebesar 100 MV. Eksperimennya dianggap gagal karena terjadinya dispersi daya listrik ke segala arah dengan frekuensi radio 150 kHz. Karyanya mengenai transmisi daya gelombang mikro dan kopling induktif mengarah pada terbentuknya prinsip-prinsip dasar WPT.

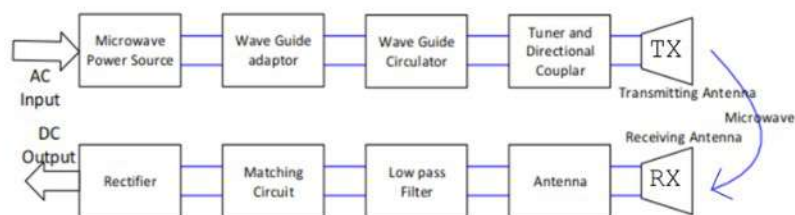
Pada tahun 1901, Tesla merancang dan membangun menara Wardenclyffe (juga disebut menara Tesla) yang memvalidasi prinsip-prinsipnya tentang transfer daya nirkabel, Chhawchharia S (2018). Pada tahun 1961, John Schuder mengusulkan sebuah sistem energi transkutan—untuk mentransfer daya melintasi kedalaman kulit—yang digunakan untuk perangkat implan.

Pada tahun 1964, William Brown secara nirkabel menyalurkan listrik ke sebuah pesawat model sehingga memvalidasi kelayakan transmisi daya gelombang mikro. Peter Glaser mengusulkan sebuah satelit bertenaga surya pada tahun 1968 yang membawa gagasan baru untuk transmisi daya gelombang mikro. Pada tahun 2007, beberapa peneliti dari MIT berhasil mentransmisikan daya sebesar 60 W pada jarak 2 m. Sun L (2018). Kemajuan inovatif dalam transmisi daya nirkabel dapat dibagi menjadi dua yaitu:

- i. Transmisi vitalitas jarak jauh dan berdaya tinggi dari jarak jauh
- ii. Transmisi vitalitas jarak dekat dan berdaya rendah dari jarak jauh. Wang B (2013).

2. METODOLOGI PENELITIAN

Valenta dkk. dalam Valenta CR (2014) menjelaskan bagaimana daya nirkabel dapat dipanen (diambil) dan komponen-komponen yang dibutuhkan. Pada bagian transmisi, sumber daya menghasilkan daya gelombang mikro. Sementara itu, *waveguide circulator* melindungi sumber dari daya yang terpantul, yang terhubung melalui adaptor *co-ax waveguide*. *Tuner* menyesuaikan impedansi antara sumber dan antena pemancar, dan *directional coupler* memisahkan sinyal-sinyal yang telah teratenuasi. Antena pemancar memancarkan daya secara teratur melalui ruang bebas menuju antena penerima. Pada simpul pemanenan, antena menerima daya yang ditransmisikan dan mengubahnya menjadi daya DC menggunakan rangkaian penyearah (*rectifier*). Rangkaian pencocokan impedansi memastikan transfer daya maksimum dari antena ke penyearah; sedangkan *LPF* menghilangkan frekuensi fundamental dan harmonik dari keluaran yang dihasilkan. Diagram blok sistem WPT ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem *Wireless Power Transfer*

Metrik untuk mengkarakterisasi rangkaian pemanenan energi bergantung pada sensitivitas dan efisiensi. Efisiensi dapat dinyatakan sebagai *power-conversion efficiency* (efisiensi konversi daya), dengan daya yang berguna yang disuplai oleh rangkaian sebagai keluaran (*output*). Selain itu, perlu dicatat bahwa pilihan peralatan sangat dipengaruhi oleh biaya, daya transmisi, dan efisiensi menurut Shinohara N (2000) juga, arah dan polaritas antena ditentukan oleh area spesifik tempat transfer daya nirkabel diterapkan. Namun, kepatuhan terhadap standar regulasi dan keselamatan yang diperlukan tetap harus dipenuhi. FCC(2014).

WPT dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan jarak transmisi. Ada teknik *near-field* atau *non-radiative* (medan dekat atau non-radiasi), dan teknik *far-field* atau *radiative* (medan jauh atau radiasi). Teknik *Near-field* pada dasarnya melibatkan transmisi daya nirkabel melalui medan magnet dengan *kopling induktif* antara dua kumparan kawat yang terpisah. Daya listrik juga dapat ditransmisikan secara nirkabel melalui medan listrik dengan *kopling kapasitif* antar elektroda logam. Akan tetapi, teknik ini terbukti terbatas dalam jangkauan; sebagian besar penerapannya biasanya membutuhkan kontak atau jarak dekat sekitar beberapa sentimeter antara sumber daya dan tujuan. Li, J. (2017).

Pendekatan *far-field* atau *radiative* sebaliknya ditandai dengan transmisi daya jarak yang lebih jauh, sering kali dapat mencapai beberapa kilometer. Pendekatan ini dapat diuraikan lagi menjadi dua subkategori, yaitu: *Wireless Energy Harvesting* (WEH) dan *Directive Power Transmission* (transmisi daya terarah). Transmisi daya terarah melibatkan penggunaan sumber energi khusus, dari mana daya (biasanya dalam bentuk RF, gelombang mikro, atau laser) dipancarkan ke sebuah penerima yang telah ditentukan/ditargetkan dan ditempatkan pada jarak tertentu Venkateswara R M (2013). Hal ini berguna untuk aplikasi *solar powered satellite* (SPS) serta berbagai kasus *intentional remote charging* lainnya. Dalam kasus WEH, arah daya yang diterima tidak diketahui; yang ditangkap dan dikonversi menjadi energi listrik untuk digunakan adalah sinyal energi sekitar yang terdapat di lingkungan. Valenta C R (2014). WPT dapat dicapai menggunakan sejumlah metode. Parmar Y(2015). Metode-metode tersebut adalah:

2.1 Kopling Induktif

Paling cocok untuk transmisi daya *near-field*, teknik ini memanfaatkan *inductive coupling* (induksi elektromagnetik) antara kumparan pemancar dan kumparan penerima. Kumparan-kumparan ini disebut *repeater* dan fungsinya meningkatkan efisiensi transfer daya sehingga menghilangkan ketidakmampuan penggunaan teknologi WPT untuk jarak yang jauh.

2.2 Gelombang Mikro (*Microwave*)

Pada teknik ini, energi listrik diubah menjadi energi gelombang mikro. Pertama, AC dikonversi menjadi DC, lalu DC diubah menjadi gelombang mikro menggunakan magnetron. Gelombang-gelombang ini kemudian dipancarkan dari stasiun pangkalan ke penerima atau perangkat seluler. Setelah transmisi, sebuah *rectenna* menerima energi gelombang mikro tersebut yang kemudian dikonversi kembali menjadi energi listrik (DC) pada keluaran (*output*).

2.3 Laser

Energi listrik diubah menjadi berkas laser yang dapat diarahkan ke penerima tertentu, yang kemudian mengonversi kembali berkas laser tersebut menjadi energi listrik. Laser dapat dipasang menggunakan generator listrik, *high-intensity-focused light*, atau sinar matahari. Laser yang ditransmisikan diterima oleh sel *photovoltaic* yang mengubahnya menjadi sinyal listrik. Metode ini cocok untuk jarak jauh karena ukurannya yang ringkas dan minim gangguan sinyal; namun, metode ini cenderung berbahaya. Selain itu, efisiensi selama proses konversi umumnya belum mencapai 50%, sinyal dapat terhambat di atmosfer, dan diperlukan garis pandang (*line of sight*).

Metode ini sebagian besar telah disempurnakan untuk keperluan militer dan kedirgantaraan (*aerospace*). Jumlah daya yang ditransfer dalam suatu sistem WPT dapat dikendalikan dengan melakukan *modulating* (memodulasi) frekuensi yang diketahui dari sinyal transmisi di sekitar frekuensi resonansi yang terbentuk oleh kapasitor penyetel dan induktansi kumparan. Hal ini juga dapat dilakukan dengan metode alternatif, yaitu dengan mengubah tegangan pada jembatan pemancar; tingkat daya dapat divariasikan secara otonom dengan menaikkan atau menurunkan tegangan rel yang diberikan sesuai kebutuhan beban (*load*). Namun, metode ini kurang populer

dibanding metode sebelumnya, tetapi dapat diterapkan pada situasi ketika *frequency modulation* saja tidak dapat menghasilkan rentang tingkat daya yang diperlukan. Metode ini juga menunjukkan bahwa pengisian sebaiknya dilakukan pada frekuensi yang berada jauh di bawah atau jauh di atas frekuensi resonansi, untuk memastikan keselamatan platform yang sedang diisi daya. Sanborn G(2017).

Zhang dkk. dalam Zhang R (2013). mempertimbangkan *Electromagnetic* atau sinyal radio frequency (RF) sebagai daya untuk WPT secara khusus. Karena sinyal RF mampu mentransmisikan sekaligus informasi dan daya, penulis melakukan kajian terpadu tentang *simultaneous wireless information and power transfer* (SWIPT). Makalah ini secara khusus meneliti sistem komunikasi nirkabel *multiple-input multiple-output* (MIMO) Okoyeigbo O (2017). yang terdiri dari tiga node terpisah. Dalam sistem tersebut, satu penerima memanen (mengambil) daya, sementara penerima lain memproses (mendekode) informasi secara terpisah dari sinyal yang ditransmisikan dan bersifat umum bagi kedua penerima. Dua skenario berbeda juga diteliti: pertama, ketika kedua penerima saling terisolasi dan mengalami kanal MIMO yang berbeda; dan kedua, ketika keduanya berada bersama serta menerima kanal MIMO dari pemancar yang sama.

Transfer daya dan informasi secara simultan melalui kanal nirkabel dapat meningkatkan kenyamanan penggunaan perangkat seluler. Namun, desain praktis penerima saat ini memiliki keterbatasan teknis dalam mewujudkan sistem seperti itu. Hal ini terjadi karena sistem perangkat keras yang digunakan untuk memanen energi dari sinyal RF tidak mampu mendekode informasi secara langsung. Zhou X (2013). Untuk mendapatkan dasar teoretis, penulis mengusulkan tugas kolektor umum, yaitu *dynamic power splitting* (DPS), yang dapat membagi sinyal yang diterima dengan berbagai rasio daya, sehingga informasi didekode dan energi dipanen dengan cara yang berbeda. Dalam Sample A P (2011). penulis menunjukkan bahwa teknologi WPT dapat digunakan untuk memotong “*last rope*” (hambatan terakhir), sehingga pengguna dapat menyalakan perangkat gadget portabel mereka dengan sempurna melalui udara, sebagaimana dicontohkan pada bagaimana informasi ditransmisikan. Penelitian awal tentang penggunaan *magnetically coupled resonators* untuk aplikasi ini telah memberikan hasil yang menggembirakan.

Penulis juga mempresentasikan penelitian baru yang menghasilkan pengetahuan dasar mengenai struktur sistem, termasuk metrik untuk membandingkan berbagai geometri dan kondisi operasi. Model rangkaian juga ditampilkan bersama dengan penurunan konsep-konsep penting seperti *critical coupling*, *frequency splitting*, perilaku sistem ketika tidak saling kopel (tidak berhubungan), dan lain sebagainya. Tinjauan kritis pada Hui SYR (2014). menunjukkan berbagai aktivitas penelitian yang dilakukan pada WPT *magneto-inductive* dengan jarak transmisi yang lebih besar daripada dimensi kumparan pemancar. Tinjauan tersebut memberikan deskripsi singkat tentang prinsip kerja berbagai macam sistem WPT serta gambaran mengenai prinsip *maximum power transfer* (pemindahan daya maksimum) dan prinsip *maximum energy efficiency* (efisiensi energi maksimum). Implikasi dan perbedaan antara kedua metode tersebut dibahas secara eksplisit terkait jarak transmisi dan kualitas efisiensi energinya. Perbedaan antara efisiensi energi dan efisiensi transmisi sistem juga ditinjau. Isu desain lainnya seperti perhatian terhadap keselamatan dan penurunan resistansi lilitan juga dibahas dalam makalah tersebut.

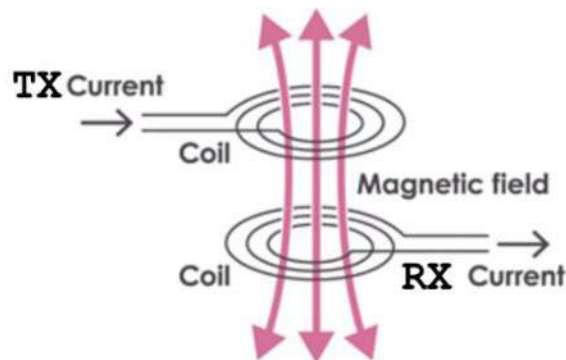
Low dkk. pada Low Z N (2009). berfokus pada pendekatan yang diajukan untuk mencapai sistem WPT yang sangat efisien, dengan rugi daya yang rendah menggunakan mode operasi *Class-E*. Sistem ini dapat menghasilkan respons penyaluran daya yang efisien pada berbagai rentang hambatan beban (*load resistances*) tanpa sistem kendali atau *feedback loop*, tetapi bergantung pada reaksi atau tanggapannya terhadap impedansi alami agar dapat membentuk profil penyaluran dayanya yang diinginkan pada rentang hambatan beban yang luas, sekaligus mempertahankan efisiensi tinggi untuk mencegah masalah pemanasan. Desain yang diusulkan mencakup *multichannel* yang memiliki *independent gate drive* untuk memungkinkan pengendalian penyaluran daya.

Lee dkk. pada Lee S and Lorenz RD (2011). mengusulkan model rangkaian ekuivalen atau model rangkaian yang sepadan untuk transfer daya nirkabel sebesar 60 W dan lebih, serta mengkaji sistem berdasarkan model yang diusulkan. Model yang diajukan tersebut divalidasi menggunakan analisis elemen hingga (*finite-element analysis*, FEA) dan beberapa hasil eksperimen. Selain itu, untuk aplikasi berdaya tinggi, dilakukan kajian terhadap rugi-rugi dalam sistem WPT. Karena frekuensi operasi yang tinggi, rugi-rugi akibat efek *proximity* (kedekatan) dan efek *skin* terlihat

cukup menonjol pada sistem. Tata letak kumparan dalam ruang yang (*spatial coil layout*) mengurangi rugi-rugi akibat efek *proximity* dan efek *skin* juga dibahas. Kumparan induktor yang terkopel mampu menyalurkan daya atau listrik pada jarak pendek, dan jaraknya sebanding dengan induktansi bersama (*mutual inductance*).

Masalah transfer daya dan informasi nirkabel melalui rangkaian induktor terkopel yang bising (*noisy*) dipertimbangkan dalam Grover P and Sahai A (2010). Rangkaian ini terdiri dari kanal *frequency-selective* yang memiliki *additive white gaussian noise* (AWGN). *Trade-off* paling sesuai antara daya yang ditransfer dan laju (*rate*) yang dapat dicapai dapat ditentukan menggunakan total daya yang tersedia. Aplikasi praktis dari sistem-sistem tersebut juga dibahas dalam makalah tersebut. Perlu dicatat bahwa *convenience* (kemudahan) dan *overall cost per watt* (biaya total per watt) untuk sistem pengisian merupakan keunggulan utama dan pendorong utama teknologi transfer daya nirkabel. Namun, hingga saat ini masih terdapat berbagai metode untuk mencapai WPT.

Sebagai contoh, resonansi medan magnet menawarkan efisiensi transfer daya terbaik serta transmisi daya nirkabel yang lebih besar pada jarak *near-field*. Kim dkk. pada Kim Jet al. (2013). berfokus pada prinsip-prinsip teknik WPT resonansi medan magnet sambil menyoroti pengaruh kebisingan medan elektromagnetik (*EM field noise*) dari WPT serta metode *shielding* (peredaman/penyekatan) yang terkait untuk berbagai aplikasi. Dalam penggunaan resonansi medan magnet, desain kumparan, rangkaian ber-rugi rendah (*low-loss circuits*), rangkaian pencocokan (*matching circuits*), serta struktur *shielding* merupakan faktor-faktor penting yang perlu dipertimbangkan. Kombinasi yang efisien dari konsep-konsep ini membantu memastikan transfer daya maksimum. Sistem WPT resonansi medan magnet seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 terdiri dari kumparan pemancar dan penerima yang saling terkopel secara magnetis; serta rangkaian elektronika daya yang mencakup *voltage regulators* (pengatur tegangan), *rectifiers* (penyearah), dan *inverters* (inverter). Untuk memaksimalkan daya yang mampu ditransfer antara kumparan yang terkopel secara magnetis, dapat digunakan sebuah kapasitor, sekaligus untuk mengurangi besarnya reaktansi.



Gambar 3. Sistem *Wireless Power Transfer* Resonansi

3. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Terdapat beragam aplikasi WPT di beberapa industri. Namun, aplikasi-aplikasi tersebut memiliki spesifikasi unik seperti tingkat daya (*power rating*), jarak, dan ukuran. Walaupun demikian, dasar-dasar metamaterial telah dirancang sedemikian rupa untuk meningkatkan efisiensi energi transmisi dengan faktor-faktor seperti *chirality* (kekiralitas), *permeability* (permeabilitas), dan *permittivity* (permitivitas) Li J L (2013). WPT dapat digunakan untuk mengisi daya target yang bergerak seperti pesawat tanpa awak berbahan bakar, robot bergerak, serta kendaraan listrik. Ketika terjadi transfer daya dari kumparan pemancar ke kumparan penerima, arus yang mengalir melalui kumparan menghasilkan medan elektromagnetik. Medan yang terbentuk ini dikenal sebagai *EMF noise* (bising gangguan EMF) di sekitar kumparan. Selain itu, *reactive resonant current loop* (loop arus resonansi reaktif) merupakan pendekatan yang dapat digunakan untuk membatalkan medan magnet ini sekaligus untuk *passive shielding* (peredaman/pelindungan pasif). Hal ini dilakukan untuk meminimalkan kehilangan daya akibat *shielding*.

Kurs menyatakan penggunaan metode WPT yang bersifat radiative (radiasi). Argumennya adalah bahwa meskipun radiasi merupakan metode yang sangat cocok untuk mentransfer informasi, metode ini masih menimbulkan sejumlah tantangan untuk aplikasi transfer daya karena efisiensi transfer dayanya yang rendah Kurs A (2007). Para penulis juga berpendapat bahwa cenderung ada efisiensi pertukaran energi yang lebih baik dengan energi yang terdisipasi (terbuang menjadi panas) relatif kecil ketika dua objek resonan dengan frekuensi resonansi yang sama dikopelkan satu sama lain. Sample dan Smith dalam Sample A (2009). menjelaskan aplikasi dua sistem WPT menggunakan hasil eksperimen. Yang pertama adalah Wireless Identification and Sensing Platform (WISP), yaitu sensor-sensor kecil yang mengonsumsi daya listrik sekitar 2 μ W hingga 2 mW, dan dapat digunakan pada jarak beberapa meter dari pembaca RFID UHF komersial siap pakai (commercial off-the-shelf, 915 MHz). Sistem kedua digunakan untuk memanen energi UHF atau VHF dari menara TV di sekitar, sehingga total jumlah daya yang tersedia bergantung pada jangkauannya serta daya pancar siaran (broadcast transmitting power). Penulis meninjau sebuah investigasi di mana daya 60 μ W dipanen pada jarak sekitar 4 km. Karena performa sistem komunikasi dibatasi oleh masa pakai baterai perangkat, penulis dalam Bi S (2015). berpendapat bahwa komunikasi bertenaga nirkabel dapat menyediakan energi gelombang mikro yang stabil dan berkelanjutan, memungkinkan jaringan dengan fleksibilitas yang lebih baik, ketahanan yang lebih kuat, dan *throughput* yang lebih besar. Batasan pengisian daya baterai juga dibahas dalam Xie L (2013). Penulis mengusulkan penggunaan WPT (Transfer Daya Nirkabel) untuk menyelesaikan tantangan energi per masa pakai jaringan sensor nirkabel yang membutuhkan masa pakai yang berkelanjutan dan lama.

Dengan demikian, hal ini menyelesaikan kendala kepadatan energi dan meminimalkan biaya sistem penyimpanan energi yang merupakan bagian signifikan dalam biaya kendaraan listrik. Li dkk. mengusulkan dalam Li S (2015). bahwa hambatan jarak tempuh, biaya, dan pengisian daya dapat dimitigasi melalui WPT. Hata dkk. dalam Hata K (2015). juga mengajukan proposisi penggunaan WPT pada kendaraan listrik untuk mengurangi ukuran penyimpanan energi dan memperpanjang jarak tempuh kendaraan listrik. WPT juga dapat diterapkan pada implan medis untuk deteksi dan juga pengobatan penyakit tubuh manusia, karena gawai ini membutuhkan daya tanpa henti untuk berfungsi dengan baik dalam jangka waktu lama. Perangkat eksternal mengisi daya perangkat medis yang ditanamkan menggunakan kopling induktif Jawad A M (2017). Selain itu, aplikasi WPT dalam energi terbarukan disorot oleh Chhawchharia dkk. dalam Chhawchharia S (2018) terutama dalam Sistem Tenaga Surya Luar Angkasa (SSPS), Kendaraan Udara Tanpa Awak (UAV), dan Kendaraan Bawah Air Otonom (AUV), dll. Dengan Sistem Tenaga Surya Luar Angkasa, satelit mengumpulkan energi dari sinar matahari dan mengirimkan daya kembali ke bumi melalui MPT, yang merupakan solusi energi terbarukan potensial bagi planet ini. Selanjutnya, WPT dapat digunakan dalam desain sistem pendingin bertenaga surya untuk kabin kendaraan, guna mengurangi emisi gas rumah kaca yang dapat terjadi jika menggunakan mesin kabin Pan H (2017).

Transfer daya nirkabel ke perangkat elektronik pada efisiensi maksimum dengan tetap mempertimbangkan masalah keselamatan bisa menjadi tantangan tersendiri Dai H (2014). Transfer daya gelombang mikro menggunakan gelombang mikro yang lebih intens dibandingkan dengan sistem komunikasi nirkabel; gelombang mikro ini dapat berbahaya bagi manusia. *Specific Absorption Rate* (SAR) adalah tolok ukur yang digunakan dalam menentukan apakah gelombang mikro berbahaya bagi manusia Chhawchharia S (2018). Masalah lainnya adalah kepadatan daya yang sulit untuk diperkirakan. Karena pembiasan dan pemantulan sinyal yang berasal dari sumber, kontrol yang ada menjadi minimal. Radiasi elektromagnetik memiliki pergerakan yang tidak menentu sehingga akan ada tingkat kekhawatiran keselamatan yang terkait dengannya saat digunakan untuk perangkat yang dapat dikenakan (*wearable devices*). WPT berbagi frekuensi yang sama (2,45 GHz atau 5,8 GHz) dengan sejumlah layanan radio, sehingga WPT dimungkinkan mengganggu layanan tersebut Chhawchharia S (2018). Tantangan lain dalam menerapkan teknologi transfer daya nirkabel dapat disorot pada penerapan WPT ke sistem komunikasi karena sistem tersebut cenderung menderita kemungkinan intersepsi informasi mengingat sifat saluran nirkabel yang dapat meningkatkan kerentanan sistem terhadap penyadapan Pan H (2017). Hal ini juga ditekankan dalam penerapan WPT dalam aplikasi klinis karena keterbatasannya mencakup masalah keselamatan dan keamanan akibat gangguan (*jamming*), pemantauan, dan pemalsuan (*spoofing*);

yang lebih lanjut menekankan poin bahwa Transfer Daya Nirkabel rentan terhadap serangan. Li S (2015).

4. KESIMPULAN

WPT adalah teknologi merevolusi yang memiliki aplikasi bawaan di berbagai sektor seperti yang disorot dalam makalah ini. Namun, terdapat beberapa batasan dalam mencapai penggunaan teknologi ini secara luas. Oleh karena itu, batasan-batasan ini berfungsi sebagai peluang untuk investigasi lebih lanjut terhadap pertanyaan-pertanyaan yang sudah berusia berabad-abad ini. Solusi dalam hal teknologi dan metode baru yang akan disediakan oleh penelitian-penelitian ini berpotensi memberikan kontribusi besar dalam mewujudkan sistem tenaga listrik dengan penggunaan kabel yang minimal, yang pada gilirannya akan menghasilkan penghematan biaya yang lebih baik. Penghapusan kabel tersebut juga memiliki efek resultan dalam memungkinkan portabilitas yang lebih besar dan kinerja perangkat seluler yang lebih baik yang memerlukan pengoperasian terus-menerus.

REFERENCES

- Bi, S., Ho, C. K., & Zhang, R. (2015). Wireless powered communication: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 53, 117-125.
- Capua, G. D., Femia, N., Petrone, G., Lisi, G., Du, D., & Subramonian, R. (2017). Power and efficiency analysis of high-frequency wireless power transfer systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 84, 124-134. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.05.005>
- Chen, X., Ng, D. W. K., & Chen, H. (2016). Secrecy wireless information and power transfer: Challenges and opportunities. *IEEE Wireless Communications*, 23, 54-61.
- Chhawchharia, S., Sahoo, S. K., Balamurugan, M., Sukchai, S., & Yanine, F. (2018). Investigation of wireless power transfer applications with a focus on renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 888-902.
- Dai, H., Liu, Y., Chen, G., Wu, X., & He, T. (2014). Safe charging for wireless power transfer. In *IEEE INFOCOM 2014 – IEEE Conference on Computer Communications* (pp. 1105-1113).
- Federal Communications Commission. (2014). *FCC Rules and Regulations Part 15 Section 247 (15.247) in Operation within the bands 902–928 MHz, 2400–2483.5 MHz, and 5725–5850 MHz* (Tech. Rep.).
- Grover, P., & Sahai, A. (2010). Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer. In *2010 IEEE International Symposium on Information Theory* (pp. 2363-2367).
- Hata, K., Imura, T., & Hori, Y. (2015). Dynamic wireless power transfer system for electric vehicle to simplify ground facilities - power control based on vehicle-side information. *World Electric Vehicle Journal*, 7, 558-569.
- Hui, S. Y. R., Zhong, W., & Lee, C. K. (2014). A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29, 4500-4511.
- Jawad, A. M., Nordin, R., Gharghan, S. K., Jawad, H. M., & Ismail, M. (2017). Opportunities and challenges for near-field wireless power transfer: A review. *Energies*, 10.
- Kim, J., et al. (2013). Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system. *Proceedings of the IEEE*, 101, 1332-1342.
- Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P., & Soljacic, M. (2007). Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, 317, 83-86.
- Lee, S., & Lorenz, R. D. (2011). Development and validation of model for 95%-efficiency 220-w wireless power transfer over a 30-cm air gap. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47, 2495-2504.
- Li, J. (2017). Research progress of wireless power transmission technology and the related problems. *AIP Conference Proceedings*, 1820. <https://doi.org/10.1063/1.4977407>
- Li, J. L., Krairiksh, M., Rahman, T. A., & Al-Shamma'a, A. (2013). Keynote speakers: Wireless power transfer: From long-distance transmission to short-range charging. In *2013 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM)* (pp. xi-xv).

- Li, S., & Mi, C. C. (2015). Wireless power transfer for electric vehicle applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3, 4-17.
- Low, Z. N., Chinga, R. A., Tseng, R., & Lin, J. (2009). Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power transfer system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56, 1801-1812.
- Okoyeigbo, O., et al. (2018). Comparative study of mimo-ofdm channel estimation in wireless systems. *International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.)*, 11(3), 158-165. <https://doi.org/10.15866/iremos.v11i3.13884>
- Okoyeigbo, O., Okokpujie, K., Omoruyi, O., & Nkordeh, N. (2017). Comparative analysis of channel estimation techniques in siso, miso and mimo systems. *International Journal of Electronics and Telecommunications (IJET)*, 63(3), 307-312.
- Pan, H., Qi, L., Zhang X., Zhang Z., Salman W., Yuan Y., et al. (2017). A portable renewable solar energy-powered cooling system based on wireless power transfer for a vehicle cabin. *Applied Energy*, 195, 334-343.
- Parmar, Y., Patel, A., & Shah, J. (2015). Review paper on wireless power transmission. *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET)*, 4, 1171-1173.
- Sample, A., & Smith, J. R. (2009). Experimental results with two wireless power transfer systems. In *2009 IEEE Radio and Wireless Symposium* (pp. 16-18).
- Sample, A. P., Meyer, D. T., & Smith, J. R. (2011). Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58, 544-554.
- Sanborn, G., & Phipps, A. (2017). Standards and methods of power control for variable power bidirectional power transfer. In *2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)* (pp. 1-4).
- Shinohara, N. (2000). Wireless power transmission for solar power satellite (SPS). *Space Solar Power*.
- Sun, L., Ma, D., & Tang, H. (2018). A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 490-503.
- Tesla, N. (1905). The transmission of electrical energy without wires as a means for furthering peace. *Electrical World and Engineer*, 4.
- Valenta, C. R., & Durgin, G. D. (2014). Harvesting wireless power: Survey of energy-harvester conversion efficiency in far-field, wireless power transfer systems. *IEEE Microwave Magazine*, 15, 108-120.
- Venkateswara, R. M., Sai, H. K., & Venkat, M. C. (2013). Microwave power transmission, A next generation power transmission System. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4.
- Wang, B., Yezazunis, W., & Teo, K. H. (2013). Wireless power transfer: Metamaterials and array of coupled resonators. *Proceedings of the IEEE*, 101, 1359-1368.
- Xie, L., Shi, Y., Hou, Y. T., & Lou, A. (2013). Wireless power transfer and applications to sensor networks. *IEEE Wireless Communications*, 20, 140-145.
- Zhang, R., & Ho, C. K. (2013). MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer. *IEEE Transaction on Wireless Communications*, 12, 1989-2001
- Zhou, X., Zhang, R., & Ho, C. K. (2013). Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff. *IEEE Transactions on Communications*, 61, 4754-4767.