

# Sistem Verifikasi Medan Magnet untuk Sumber Magnet Kumparan Sejajar

PRIYO WIBOWO<sup>1</sup>, PRAYOGA BAKTI<sup>2</sup>, IHSAN SUPONO<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Badan Riset dan Inovasi Nasional, Indonesia  
<sup>1,2,3</sup>Teknik Industri, Universitas Pamulang, Indonesia  
Email: priyotenan@gmail.com

*Received* 12 November 2021 | *Revised* 8 Desember 2021 | *Accepted* 1 Januari 2022

## ABSTRAK

*Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan lebar keseragaman medan magnet dengan menyusun beberapa kumparan untuk diaplikasikan pada berbagai bidang. Namun, pembuatannya tidaklah sederhana dan perlu dikaji validitas besar medan yang dihasilkan secara teoritis dan praktis. Tujuan penelitian adalah merancang sistem verifikasi medan magnet untuk sumber magnet kumparan sejajar. Metode yang digunakan adalah merancang sistem yang terdiri dari sensor medan magnet, pengendali posisi, dan pengolah data. Uji akurasi pengendali posisi, linieritas rangkaian sensor, dan akurasi pengukuran medan magnet dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem. Hasil pengujian menunjukkan pengendali posisi memiliki akurasi 99,99% - 100%. Rangkaian sensor memiliki linieritas tinggi dengan nilai  $R^2 = 0,9995$ . Nilai rata-rata akurasi pengukuran medan magnet Helmholtz mencapai 99,943% sedangkan medan magnet tiga kumparan mencapai 99,483%. Hasil pengujian menunjukkan sistem dapat digunakan memverifikasi sumber magnet kumparan sejajar.*

**Kata kunci:** medan magnet, verifikasi, pengendali posisi, uji akurasi, kumparan sejajar

## ABSTRACT

*Studies have been carried out to increase the width of the magnetic field uniformity by arranging several coils that are applied in the various field. However, its construction is complex and the validity of its magnetic fields quantity is necessary to study theoretically and practically. The purpose of this research is to design a magnetic field verification system for a parallel coil magnet source. The method used is to design a system consisting of a magnetic field sensor, position controller, and data processor. Tests of position control accuracy, sensor circuit linearity, and magnetic field measurement accuracy were carried out to determine system performance. The test results show that the position controller has an accuracy of 99.99% - 100%. The sensor circuit has high linearity of  $R^2 = 0.9995$ . The average value of the Helmholtz magnetic field measurement accuracy reaches 99.943%, while that of the three-coil magnetic field reaches 99.483%. The test results show the system can be used to verify the magnet source formed by parallel coil.*

**Keywords:** magnetic field, verification, position control, accuracy test, parallel coil

## 1. PENDAHULUAN

Seiring perkembangan teknologi, medan elektromagnetik memegang peran penting dalam berbagai peralatan modern baik di bidang medis, transportasi, industri, rumah tangga hingga militer. Pada bidang medis, medan magnet dimanfaatkan dalam peralatan diagnosis, preventif maupun terapi penyakit **(Lai & Singh, 2010) (Slaker, dkk, 2015)**. Pemanfaatan medan magnet menjadi populer sebab menawarkan berbagai keunggulan seperti *non ionizing, non contact, flexibility*, murah, dan sederhana. *Magnetic Resonance Imaging* (MRI) dan *magnetocardiography* memanfaatkan medan magnet untuk menghasilkan citra 2D maupun 3D untuk diagnosis kondisi tubuh pasien. Beberapa tahun terakhir telah dikembangkan *magnetic induction tomography* sebagai alternatif lain metode diagnostik pada bidang medis maupun industri **(Klein, dkk, 2020) (Klein & Rueter, 2017) (Wei & Soleimani, 2013)**. Medan magnet juga dewasa ini terus dikembangkan untuk digunakan dalam terapi berbagai penyakit. Medan magnet frekuensi rendah sangat berpotensi dalam terapi kanker dan malaria **(Lai & Singh, 2010)**. Selain itu, medan magnet juga dapat dimanfaatkan dalam terapi penyakit neurodegeneratif **(Riancho, dkk, 2021)**, terapi penyakit Alzheimer **(Akbarnejad, dkk, 2018)** dan stroke.

Pada bidang transportasi, medan magnet berkembang pesat sebagai sistem pendorong pada bidang transportasi masal seperti kereta rel listrik, kendaraan listrik sampai dengan pelontar pesawat tempur pada kapal induk. Selain sebagai sistem penggerak, kumparan magnet juga digunakan sebagai sensor kendaraan pada sistem transportasi pintar (*Intelligent Transportation Systems*) **(Belenguer, dkk, 2018) (Belenguer, dkk, 2019) (Lamas-Seco, dkk, 2015)**. Pada bidang pertanian, sumber medan magnetik banyak diteliti dan dikembangkan untuk meningkatkan laju perkecambahan, pertumbuhan, dan perkembangan berbagai tanaman pangan **(De Souza A., dkk, 2014) (Maffei, 2014)**.

Perkembangan aplikasi medan magnet yang pesat dan bervariasi di berbagai bidang juga diikuti dengan penelitian dan pengembangan berbagai jenis sumber magnet. Sumber medan magnet yang digunakan umumnya berasal dari kumparan kawat berisolasi yang dapat dikontrol besar medan yang dihasilkan dengan mengontrol arus yang mengalir. Keseragaman medan yang dihasilkan sumber sangat penting karena berpengaruh pada validitas hasil dan efektivitas sistem. Kumparan Helmholtz yang dibentuk dari dua kumparan identik disusun sejajar dikenal sebagai sumber magnet seragam. Meskipun mampu menghasilkan medan magnet seragam, kumparan ini memiliki beberapa kelemahan. Keseragaman medan yang dihasilkan kumparan Helmholtz sangat terbatas dan volume medan magnet yang seragam pada kumparan Helmholtz sangat kecil dibandingkan dengan ukuran susunan kumparan itu sendiri **(Petković & Radić, 2015)**.

Berbagai penelitian dilakukan untuk memperlebar keseragaman medan magnet yang dihasilkan kumparan Helmholtz. Kajian teoritis dan eksperimental dilakukan dengan memodifikasi bentuk kumparan maupun menyusun beberapa kumparan dengan cara tertentu. Sumber magnet klasik dibuat dari kumparan dengan bentuk dasar lingkaran atau persegi. Modifikasi bentuk dasar lingkaran dilakukan dengan mengembangkan kumparan berbentuk sadel silinder agar volume medan magnet seragam yang diinginkan **(Dinale & Vrbancich, 2014)**. Kajian teoritis juga dilakukan untuk meningkatkan lebar keseragaman medan magnet. Sumber magnet dibuat dengan menyusun beberapa kumparan baik lingkaran maupun persegi untuk memperoleh keseragaman medan yang lebih lebar **(Baranov & Baranova, 2016) (Merritt, dkk, 1983) (Wibowo & Yudhistira, 2017)**.

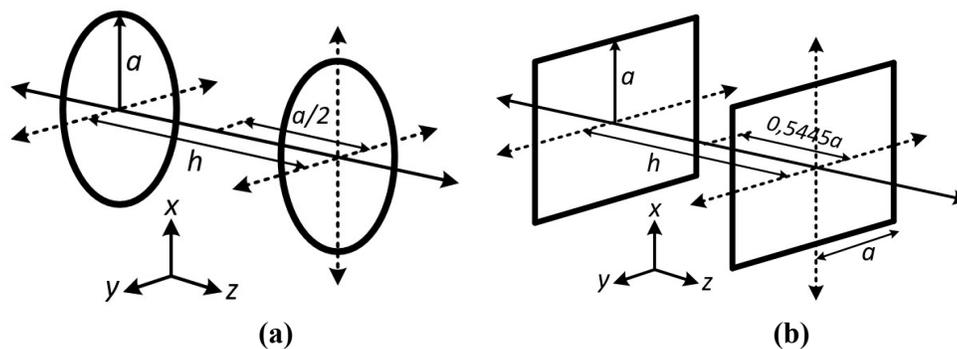
Meskipun secara teoritis lebar keseragaman medan magnet dapat ditingkatkan, pembuatan kumparan penyusun sumber maupun konstruksi sumber medan magnet dari beberapa kumparan tidaklah sederhana (**Magdaleno-Adame, dkk, 2010**). Faktor mekanik, listrik, dan temperatur saat pengoperasian akan berpengaruh pada karakteristik medan yang dihasilkan. Menurut persamaan Biot-Savart, medan magnet yang dihasilkan konduktor berarus berbanding terbalik dengan kuadrat jarak titik pengamatan terhadap elemen panjang kawat (**Griffiths, 2013**). Hal ini menunjukkan akurasi nilai jarak menjadi sangat penting. Tidak banyak penelitian yang mengkaji kesesuaian kajian-kajian teoritis tersebut dengan aplikasi praktisnya. Kalibrasi maupun verifikasi medan magnet yang dihasilkan suatu sumber menjadi sangat penting dilakukan untuk memastikan validitas dan keseragaman medan magnet agar dapat diaplikasikan sesuai rencana (**Grbic, dkk, 2015**). Dari uraian di atas, terlihat permasalahan dalam pembuatan sumber medan magnet dengan susunan kumparan sejajar yaitu bagaimana memverifikasi medan magnet yang dihasilkan suatu sumber magnet kumparan sejajar secara teoritis dan praktis. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem verifikasi medan magnet untuk sumber magnet kumparan sejajar.

## 2. METODE PENELITIAN

Bagian utama dari sisten validasi medan magnet adalah sensor efek Hall sebagai pendeteksi besar medan dari sumber magnet yang diuji, pengendali posisi tiga dimensi yang berfungsi mengatur posisi sensor pada sistem koordinat kartesian, pengolah data bertugas menyimpan rangkaian data posisi dan pembacaan sensor serta mengonversi dan menampilkan data pengukuran secara *real-time*. Uji akurasi pengendali posisi, linieritas rangkaian sensor, dan akurasi pengukuran medan magnet dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem. Kinerja sistem dianalisis dengan membandingkan hasil pengukuran medan magnet dan perhitungan medan magnet secara matematis.

### 2.1 Medan Magnet dari Susunan Kumparan Kawat Berarus

Kumparan kawat berisolator merupakan komponen penting dalam pembuatan sumber medan magnet. Kumparan yang digunakan umumnya adalah kawat konduktor yang dililit atau dibentuk mengitari suatu disain tertentu agar dapat menghasilkan medan magnet saat dialiri arus listrik. Besar medan magnet yang dihasilkan kumparan kawat dipengaruhi oleh bentuk, ukuran, jumlah liitan maupun besar arus listrik yang mengalir dalam kumparan. Sumber medan magnet seragam pada volume tertentu dapat dibentuk dari dua kumparan identik yang disusun berhadapan dengan jarak tertentu. Susunan kumparan ini disebut sebagai kumparan Helmholtz. Kumparan yang digunakan untuk membuat kumparan Helmholtz dapat berbentuk lingkaran maupun berbentuk persegi seperti ditunjukkan Gambar 1.



**Gambar 1. Kumparan Helmholtz (a) Lingkaran dan (b) Persegi (Alvarez, dkk, 2012).**

Dua kumparan masing-masing disusun dari  $N$  lilitan yang disusun sejajar pada sumbu yang sama dengan jarak  $h$ . Jarak  $h$  sama dengan panjang jari-jari kumparan penyusun Helmholtz yang berbentuk lingkaran dan sama dengan 0,5445 kali panjang sisi kumparan penyusun Helmholtz berbentuk persegi. Kumparan penyusunnya dihubungkan secara seri dan dialiri arus  $I$  (Ampere) sehingga menghasilkan medan magnet seragam di antara kedua kumparan. Dengan mengambil tengah-tengah kumparan Helmholtz berbentuk lingkaran sebagai titik O, maka medan magnet  $B$  (Tesla) pada titik  $z$  sepanjang sumbu yang menghubungkan kedua kumparan dapat didekati melalui Persamaan (1) **(Alvarez, dkk, 2012) (Baranova & Baranov, 2014) (Ogay, dkk, 2014) (Restrepo, dkk, 2017)**:

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 N I a^2}{2} * \left[ \frac{1}{\left(a^2 + \left(z + \frac{h}{2}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{\left(a^2 + \left(z - \frac{h}{2}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \right] \hat{z} \quad (1)$$

dengan

$a$  = jari-jari kumparan (m)

$h$  = jarak antara kedua kumparan penyusunnya (m)

$z$  = jarak titik yang diamati ke titik pusat (m)

$\mu_0$  = permeabilitas udara ( $4\pi \times 10^{-7}$  T.m.A<sup>-1</sup>)

Pada kumparan Helmholtz berbentuk persegi, besar medan magnet sepanjang sumbu  $z$  yang menghubungkan kedua kumparan dapat didekati melalui Persamaan (2) **(Alvarez, dkk, 2012) (Ogay, dkk, 2014) (Restrepo, dkk, 2017)**:

$$\vec{B}(z) = \frac{2\mu_0 N I a^2}{\pi} * \left[ \frac{1}{\left(a^2 + \left(z + \frac{h}{2}\right)^2\right)\left(2a^2 + \left(z + \frac{h}{2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{\left(a^2 + \left(z - \frac{h}{2}\right)^2\right)\left(2a^2 + \left(z - \frac{h}{2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \right] \hat{z} \quad (2)$$

Pada susunan kumparan sejajar berjumlah  $N$  buah, medan magnet  $B$  yang terjadi merupakan superposisi fluk magnet yang ditimbulkan oleh masing-masing kumparan yaitu  $B_i$ . Medan magnet yang dihasilkan oleh susunan kumparan sejajar dapat dinyatakan dengan Persamaan (3).

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^N \vec{B}_i \quad (3)$$

Fluk magnet  $B_i$  yang dibangkitkan oleh masing-masing kumparan dapat didekati dengan persamaan Biot-Savart dengan elemen arus arus listik ke- $i$  diwakili oleh  $I_i$  yaitu **(Griffiths, 2013)**:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I_i d\vec{l}_i \times \vec{r}}{r^3} \quad (4)$$

Dengan mengasumsikan kumparan cukup tipis dibandingkan dengan ukuran kumparan dan semua lilitan memberi kontribusi yang sama pada fluk magnet total maka rapat fluk magnet yang dihasilkan oleh susunan kumparan berbentuk lingkaran dapat dihitung pada koordinat silinder dengan Persamaan (5).

$$\vec{B}_i = n_i (B_{i\rho}, B_{i\phi}, B_{iz}) \quad (5)$$

dengan  $n_i$  jumlah lilitan pada kumparan ke- $i$  dan

$$\vec{B}_{i\rho} = -\frac{\mu_0 I_i k(z-h_i)}{4\pi\rho\sqrt{a_i\rho}} \left( K(k) - \frac{2-k^2}{2(1-k^2)} E(k) \right) \quad (6)$$

$$\vec{B}_{i\varphi} = 0 \quad (7)$$

$$\vec{B}_{iz} = -\frac{\mu_0 I_i k}{4\pi\sqrt{a_i\rho}} \left( K(k) + \frac{k^2(a_i+\rho)-2\rho}{2(1-k^2)} E(k) \right) \quad (8)$$

sedangkan  $K(k)$  dan  $E(k)$  merupakan integral eliptik pertama dan kedua.

## 2.2 Sensor Medan Magnet

Medan magnetik merupakan sebuah besaran fisika yang nilainya dapat diukur dengan beberapa cara. Sensor efek Hall merupakan salah satu sensor medan magnet yang umum digunakan. Karakter sensor efek Hall yang fleksibel menyebabkan sensor ini banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti industri, rumah tangga, kesehatan, robotika, dan lain-lain. Selain murah, sensor efek Hall memiliki beberapa keunggulan seperti linear, stabil, dan sensitif. Pada bidang industri, sensor Hall banyak digunakan pada aplikasi berdaya rendah, deteksi arus, deteksi posisi, dan saklar non kontak.

Sensor Hall umumnya dibuat dari plat berbahan semikonduktor. Kedua ujung plat diberi beda tegangan sehingga terjadi aliran arus listrik. Ketika terdapat medan magnet, aliran muatan akan terdistorsi sehingga elektron akan bergeser ke salah satu sisi dan *hole* (muatan positif) akan bergeser di sisi yang berseberangan. Proses ini menimbulkan beda tegangan antara kedua sisi plat yang dikenal sebagai efek Hall. Beda tegangan tersebut sebanding dengan fluks medan magnet yang melewati plat tersebut (**Paun, dkk, 2013a**).

Bila  $B$  medan magnet, faktor koreksi geometri  $G$ , faktor hamburan semikonduktor  $r_H$  rapat muatan  $n$ , ketebalan daerah aktif  $t$ , arus bias  $I_{bias}$  maka hubungan medan magnet dan tegangan Hall dapat dinyatakan dengan Persamaan (9) (**Paun, dkk, 2013b**):

$$V_{HALL} = G \frac{r_H}{nqt} I_{bias} B \quad (9)$$

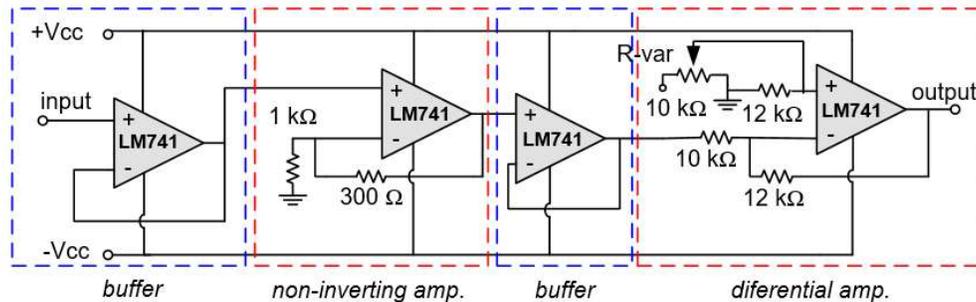
Bila sensitivitas absolut sensor Hall  $S_A$  maka medan magnet dapat dinyatakan dengan Persamaan (10).

$$B = \frac{V_{HALL}}{S_A} \quad (10)$$

Pada pengukuran medan magnet diperlukan sensor yang responsif terhadap medan magnet. Terdapat beberapa macam sensor medan magnet jenis efek Hall yang mampu mendeteksi perubahan fluks magnet yang kecil. SS49E merupakan salah satu sensor efek Hall linier yang dapat mendeteksi medan magnet dari magnet permanen maupun sumber elektromagnet. Sensor ini memiliki *noise* keluaran rendah sehingga relatif tidak memerlukan filter eksternal. Sensor beroperasi pada tegangan  $V_{cc}$  2,7 volt – 6,5 volt dengan arus maksimal 10 mA. Sensitivitas sensor sekitar 1,4 mV/G yang dapat mendeteksi medan magnet 0 - 1000 G. (**Honeywell International Inc., 2015**)

Sensor efek Hall memberikan tegangan *output* sekitar 2,5 V ketika dioperasikan dengan tegangan 5 V meskipun tidak ada pengaruh medan magnet. Meskipun perubahan tegangan sensor efek Hall sebanding dengan sensitivitas sensor, namun nilainya cukup kecil dalam orde millivolt yang dihitung dari tegangan *output* tanpa pengaruh medan magnet. Untuk

meningkatkan sensitifitas perlu ditambahkan rangkaian pengkondisi sinyal. Rangkaian pengkondisi sinyal terdiri dari dua buah rangkaian penyangga (*buffer*), rangkaian penguat *non-inverting*, dan rangkaian penguat differensial seperti ditunjukkan pada Gambar 2 (Awaluddin, 2011). Rangkaian penyangga berfungsi untuk menstabilkan keluaran, rangkaian penguat *non-inverting* berfungsi untuk menguatkan *output*, dan rangkaian penguat differensial berfungsi sebagai *zero adjustment* (pembuat nol) dari *offset* LM 741 serta *offset* sensor efek Hall.

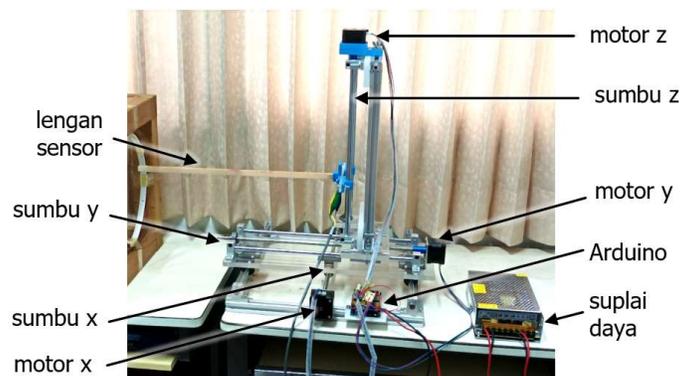


**Gambar 2. Rangkaian Pengkondisi Sinyal (Awaluddin, 2011).**

Rangkaian pengkondisi sinyal dihubungkan ke ADC dengan tipe ADS1115 untuk meningkatkan akurasi pembacaan sinyal dari sensor efek Hall dan memudahkan pengolahan menggunakan Arduino dan MATLAB. Arduino yang hanya memiliki resolusi 12-bit ditingkatkan menjadi 16-bit dengan ADS1115. Perubahan tegangan *output* pengkondisi sinyal yang terbaca oleh ADC sebanding dengan besar medan magnet yang memengaruhi sensor efek Hall. Karakterisasi pembacaan rangkain sensor medan magnet yang disusun dari sensor efek Hall, pengkondisi sinyal, dan ADS1115 dilakukan dengan pengukuran medan magnet yang dihasilkan sebuah sumber magnet acuan. Pengukuran dilakukan untuk mengamati linieritas rangkaian dan menghitung konversi tegangan *output* ke besar medan magnet.

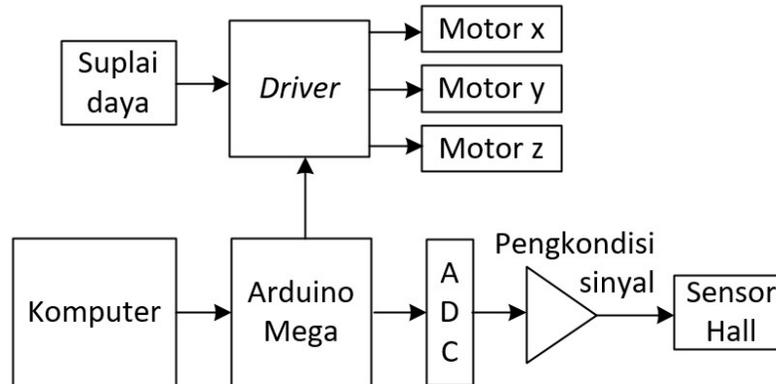
### 2.3 Pengendali Posisi

Pengendali posisi tiga dimensi dirancang untuk mengatur posisi sensor medan magnet pada sistem koordinat kartesian *x*, *y* dan *z* seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Masing-masing pengatur posisi terdiri dari sebuah motor *stepper* yang terhubung dengan sebuah poros ulir dan dua buah batang geser pada samping kiri dan kanannya. Poros ulir dan batang geser digunakan sebagai penghubung sekaligus tumpuan pengatur posisi yang tegak lurus dengannya. Pada pengatur posisi *z*, terdapat sebuahudukan yang dirangkai dengan lengan sensor. Ujung lengan inilah yang dipakai untuk menempatkan sensor medan magnet.



**Gambar 3. Pengendali Posisi Tiga Dimensi.**

Diagram rangkaian elektronik pengendali posisi seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Arduino Mega digunakan pada pengendali posisi untuk mengontrol putaran motor x, y dan z. Agar dapat menggerakkan motor x, y dan z berjenis motor *stepper*, Arduino Mega dihubungkan ke rangkaian *driver* motor *stepper* sebelum dihubungkan ke motor *stepper*.



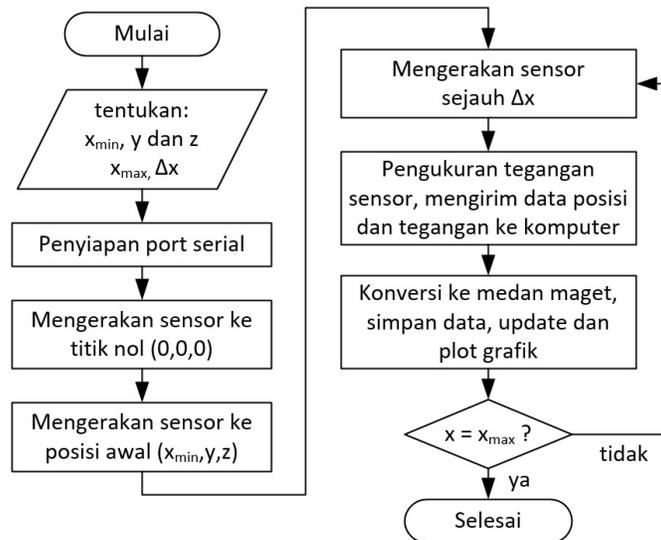
**Gambar 4. Diagram Rangkaian Elektronik Pengendali Posisi dan Sensor Medan Magnet.**

Rangkaian *driver* motor *stepper* juga merupakan *converter* tegangan DC dari suplai daya yang digunakan untuk menggerakkan motor *stepper*. Motor z digunakan untuk menaikkan dan menurunkan batang sensor sepanjang sumbu z. Motor y digunakan untuk menggerakkan batang sensor maju dan mundur sepanjang sumbu y. Motor x digunakan menggeser batang sensor ke kanan dan ke kiri sepanjang sumbu x. Akurasi penempatan posisi target dari sistem pengendali dihitung dengan Persamaan (11).

$$Akurasi = \left( 1 - \left| \frac{set\ point - posisi\ target}{set\ poin} \right| \right) \times 100\% \quad (11)$$

Selain itu untuk menggerakkan motor, Arduino Mega juga dihubungkan dengan *converter* analog ke digital (ADC) yang terhubung dengan rangkaian pengkondisi sinyal dan sensor efek Hall. Sensor efek Hall dipasang pada lengan sensor untuk mendeteksi besar medan magnet pada titik-titik yang ingin diamati.

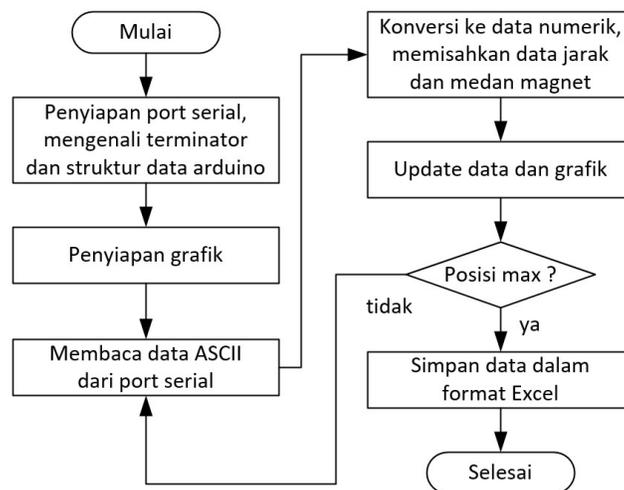
Pengoperasian pengendali posisi dan pembacaan sinyal dari sensor dilakukan dengan komputer mengikuti diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 5. Proses pengukuran dimulai dengan menentukan posisi awal pada koordinat x, y, dan z sebagai lokasi sensor mulai mengukur. Selanjutnya menetapkan salah satu sumbu koordinat sebagai variabel bebas misalkan x, menetapkan panjang dan jarak antar titik pengukuran. Setelah data-data dimasukkan dan proses dimulai, pengendali posisi menggerakkan lengan sensor titik nol. Selanjutnya pengendali posisi menggerakkan lengan sensor ke posisi awal dengan  $x = x_{min}$  untuk pengukuran searah sumbu x. Arduino akan mengirim hasil pembacaan medan magnet pada posisi tersebut ke komputer untuk disimpan dan ditampilkan dalam grafik fungsi jarak terhadap medan magnet menggunakan MATLAB. Proses berikutnya yaitu, pengendali posisi menggerakkan lengan sensor ke titik pengukuran berikutnya, pengukuran dilakukan, data dikirim ke komputer, data disimpan dan digunakan untuk memperbaharui tampilan grafik MATLAB. Langkah ini diulang hingga selesai pada titik akhir pengukuran. Pada akhir proses, dapat diperoleh grafik fungsi jarak terhadap medan magnet sepanjang sumbu koordinat yang ditetapkan sebagai variabel bebas. Selain itu data juga disimpan dalam bentuk file Excel. Langkah-langkah proses pengukuran tersebut dapat dilakukan baik pada sumbu x, sumbu y maupun sumbu z.



**Gambar 5. Diagram Alir Proses Pengukuran.**

## 2.4 Pengolahan Data

Peralatan akuisisi data untuk skala industri maupun laboratorium cukup mahal. Salah satu alternatif akuisisi data dapat dilakukan dengan menggunakan *microcontroller* seperti Raspberry Pi atau Arduino yang harganya relatif murah. Pembacaan sinyal dari sensor dapat dilakukan melalui Arduino menggunakan bantuan perangkat lunak Arduino. Namun kemampuan perangkat lunak Arduino sangat terbatas karena tidak memiliki piranti analisis maupun *fitting* data. Cara lain yang mungkin dilakukan adalah mengimpor data dari Arduino secara *real time* dalam satu paket analisis data. Impor data dapat dilakukan dari Arduino ke MATLAB dan Excel yang memungkinkan *ploting* data secara *real time*. *Data logger* dengan antarmuka MATLAB perlu satu program pada Arduino untuk membaca data dari sensor untuk dikirim ke MATLAB melalui komunikasi serial. Program ini disisipkan ke program pengendali posisi agar setelah sensor berpindah ke posisi yang ditentukan maka data pembacaan sensor langsung dikirim dan diolah oleh *data logger*. Urutan proses pengolahan data dengan MATLAB seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



**Gambar 6. Diagram Alir Pengolahan Data dengan MATLAB.**

Pengolahan data dimulai dari membaca port serial, mengenali terminator dan struktur data yang digunakan Arduino. Plot grafik data nol pada awal proses dilakukan untuk mempercepat proses penampilan grafik pada proses *update* data. Setelah grafik siap, proses selanjutnya yaitu pembacaan data ACSII dari serial plot. Data dikonversi menjadi data numerik dan dipisahkan antara data jarak dan data pembacaan sensor. Data sensor diubah ke kuat medan magnet dan digunakan untuk memperbaharui matrik data yang berisi nilai jarak dan medan magnet. Matrik data tersebut juga digunakan untuk memperbaharui grafik yang telah disiapkan pada awal proses. Bila data posisi belum mencapai posisi maksimum, proses diulang dari proses pembacaan pembacaan data ASCII dari port serial. Proses pengolahan data diakhiri dengan penyimpanan data ke dalam file Excel. Kesesuaian hasil pengukuran terhadap hasil perhitungan secara teoritis dinyatakan dengan akurasi pengukuran. Akurasi pengukuran dihitung dengan Persamaan (12).

$$Akurasi\ pengukuran = \left( 1 - \left| \frac{perhitungan - pengukuran}{perhitungan} \right| \right) \times 100\% \quad (12)$$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Uji Sistem Pengendali Posisi

Uji sistem dilakukan dengan mengamati kemampuan sistem yang dibangun. Sistem mekanik dan sistem elektronik pengendali posisi diintegrasikan sesuai dengan rancangan yang telah ditentukan sebelumnya. Integrasi sistem mekanik dan elektronik dari pengendali posisi seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Perintah yang diberikan pada sistem pengendali posisi dapat menggerakkan setiap sumbu dengan baik. Jangkauan yang dapat dicapai oleh masing-masing sumbu juga cukup luas yaitu untuk sumbu y dan z memiliki ruang gerak bebas sebesar 30 cm. Sedangkan untuk sumbu x memiliki ruang gerak sebesar 35 cm. Uji akurasi posisi dilakukan dengan mengatur posisi sumbu x, y dan z pada *set point* yang ditentukan dan mengukur jarak *set point* dari titik nol menggunakan jangka sorong digital yang memiliki ketelitian 0,01 mm. Hasil uji akurasi pengendali posisi seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

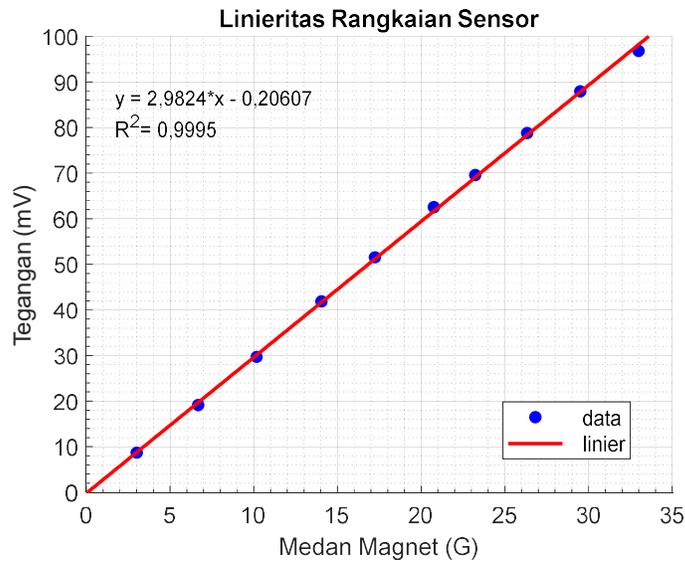
**Tabel 1. Pengujian Posisi Target dari Pengendali Posisi**

<i>Set point</i> (mm)	Hasil pengukuran					
	Sumbu x (mm)	Akurasi (%)	Sumbu y (mm)	Akurasi (%)	Sumbu z (mm)	Akurasi (%)
5	5,00	100%	5,00	100%	5,00	100%
10	10,00	100%	10,00	100%	10,00	100%
50	50,00	100%	50,00	100%	50,00	100%
100	99,99	99,99%	100,00	100%	100,00	100%
150	150,01	99,99%	150,01	99,99%	149,98	99,99%

Berdasarkan Tabel 1, dapat dikatakan bahwa sistem mampu bergerak sesuai dengan *set point* yang diinginkan. Meskipun di beberapa titik khususnya *set point* yang jauh (besar) masih kurang atau melebihi *set point*, namun nilainya sangat kecil yaitu  $\pm 0,01$  mm. Sistem pengendali posisi akurat dalam mencapai target posisi dengan tingkat akurasi 99,99% hingga 100%. Penyempurnaan sistem mekanik pengendali posisi masih diperlukan sehingga lebih akurat pada *set point* yang lebih jauh.

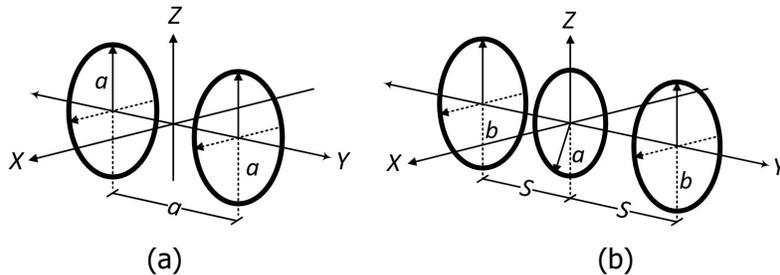
### 3.2 Uji Pengukuran Medan Magnet

Karakterisasi rangkaian sensor medan magnet dilakukan dengan memvariasikan besar medan magnet yang dihasilkan solenoid berdiameter 6 cm dengan panjang 6,32 cm dan 300 lilitan dan menghitung nilai rata-rata tegangan yang terbaca oleh ADC dalam 10 kali pengukuran. Hasil perhitungan regresi linier antara medan magnet dengan tegangan ADC seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Hasil perhitungan regresi linier menunjukkan perubahan medan magnet linier terhadap perubahan tegangan yang terbaca oleh ADC dengan nilai  $R^2 = 0,9995$ . Nilai ini menunjukkan bahwa rangkain sensor medan magnet memiliki linieritas yang sangat baik untuk digunakan dalam pengukuran. Berdasarkan grafik regresi linier diperoleh sensitifitas sensor meningkat dari 1,4 mV/G menjadi 2,9824 mV/G dengan penambahan rangkaian pengkondisi sinyal. Pembuat nol dapat berfungsi dengan baik dan menyisakan koreksi nilai 0,20607 mV pada pembacaan tegangan ADC. Konversi tegangan yang terbaca ADC ke besar magnet dapat dihitung dengan membagi tegangan yang terbaca ADC dengan 2,9824 mV/G.



**Gambar 7. Linieritas Rangkaian Sensor.**

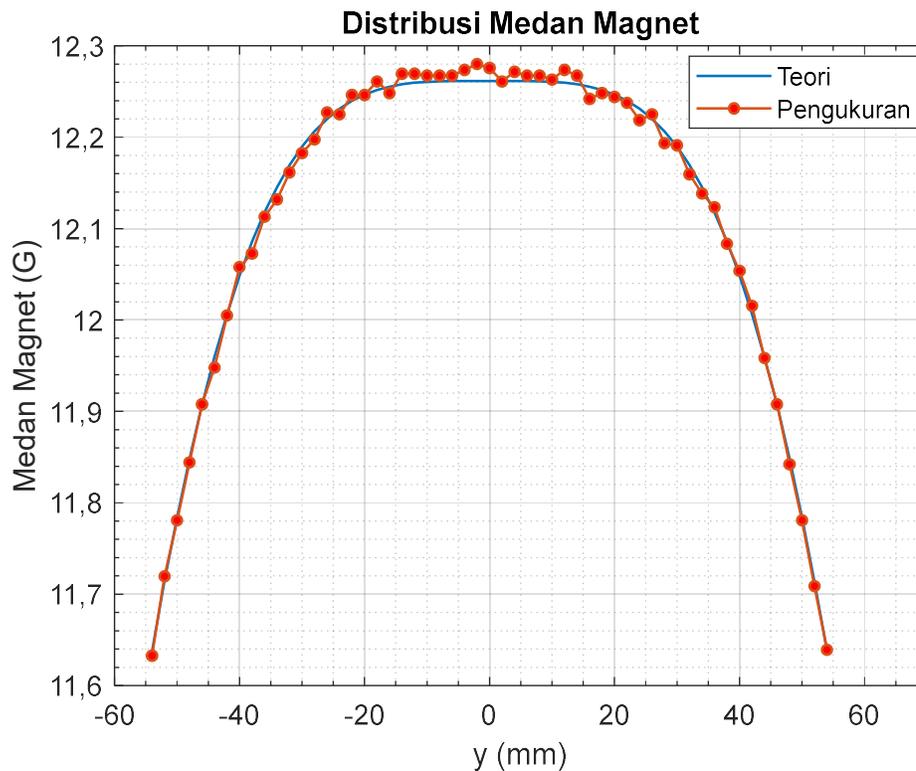
Analisis secara teoritis dan praktis dilakukan dengan beberapa kondisi yang ditetapkan. Performa suatu sistem pengukuran dapat dilihat dari kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai yang menjadi acuan/nilai standar. Untuk itu dilakukan pengukuran medan magnet serta perhitungan medan magnet secara matematis. Kedua proses tersebut dilakukan untuk memastikan sistem yang dibangun dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan yang diharapkan. Pada uji pengukuran medan magnet digunakan sumber medan magnet homogen dan non homogen yang disusun dari kumparan kawat melingkar seperti ditunjukkan Gambar 8.



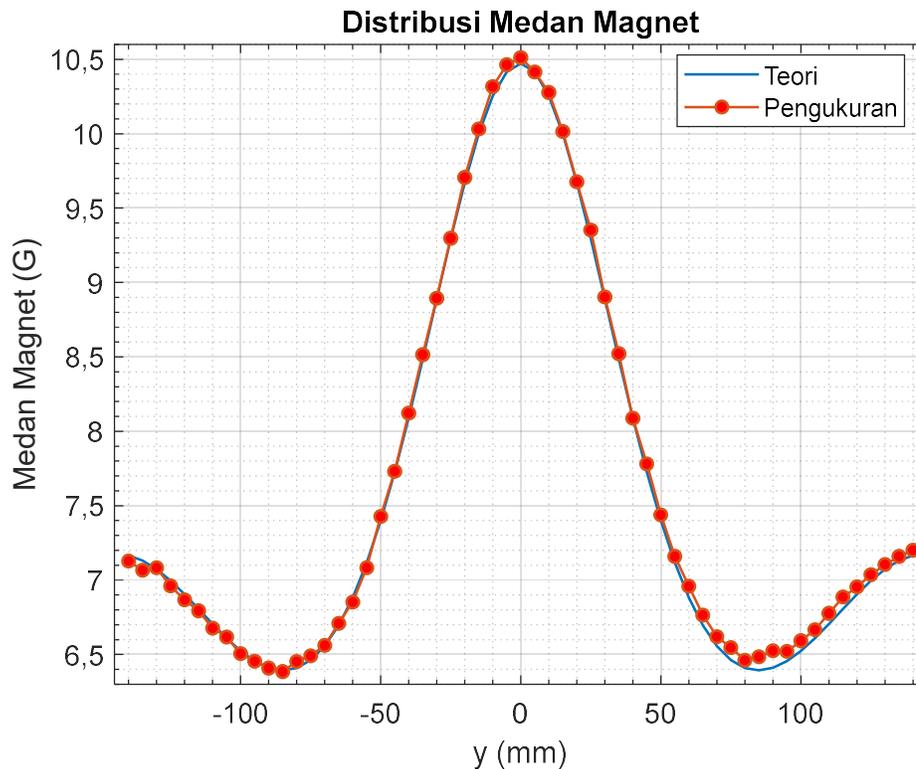
**Gambar 8. Sumber Medan Magnet, (a) Homogen dan (b) Non Homogen.**

Kumparan yang dirangkai menjadi sumber medan terdiri dari dua buah kumparan kawat melingkar seratus lilitan berdiameter  $a = 22$  cm dan sebuah kumparan kawat melingkar delapan puluh lilitan berdiameter  $b = 14$  cm. Dua buah kumparan berdiameter 22 cm disusun menjadi kumparan Helmholtz yang dialiri arus 1,5 A sebagai sumber medan magnet homogen. Sumber medan magnet non homogen dibentuk dari tiga kumparan dengan kumparan berdiameter 14 cm berada ditengah dan diapit kumparan berdiameter 22 cm pada jarak  $S = 15,2$  cm. Ketiga kumparan dialiri arus 1,1 A.

Distribusi medan magnet pada susunan kawat dapat dihitung dengan Persamaan (1) dan (5) untuk tiap titik pada ruang tiga dimensi yang melingkupi susunan kumparan. Besar medan pada titik-titik di bidang yang memotong kumparan dapat diplot menjadi pola distribusi medan magnet yang menggambarkan homogenitas medan pada bidang tertentu. Uji pengukuran medan magnet dilakukan sepanjang sumbu  $y$  ( $x = 0$  dan  $z = 0$ ) baik pada sumber homogen (Helmholtz) maupun non homogen (tiga kumparan). Hasil pengukuran distribusi kuat medan magnet pada kumparan Helmholtz pada  $x = 0$ ,  $z = 0$  di sepanjang sumbu  $y$  seperti ditunjukkan pada Gambar 9 sedangkan hasil pengukuran distribusi kuat medan magnet pada sumber non homogen tiga kumparan seperti ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 9. Distribusi Medan Magnet Helmholtz pada  $x=0$  dan  $z=0$ .



**Gambar 10. Distribusi Medan Magnet Tiga Kumparan di  $x=0$  dan  $z=0$**

Akurasi pengukuran yang menggambarkan kesesuaian hasil pengukuran terhadap hasil perhitungan secara teoritis dihitung menggunakan Persamaan (12). Hasil perhitungan akurasi pengukuran seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Akurasi Hasil Pengukuran terhadap Perhitungan Secara Teoritis**

Sumber medan magnet	Jumlah titik ukur	Akurasi (%)		
		Terendah	Tertinggi	Rata-rata
Kumparan Helmholtz (homogen)	54	99,849	99,996	99,943
Tiga kumparan (non homogen)	140	98,222	99,988	99,483

Dari Gambar 9 dan Gambar 10 nampak bahwa distribusi medan magnet hasil pengukuran mendekati hasil perhitungan secara teoritis baik pada pengukuran medan magnet kumparan Helmholtz maupun medan magnet tiga kumparan. Akurasi pengukuran pada Tabel 2 menunjukkan rata-rata akurasi pengukuran medan magnet pada kumparan Helmholtz mencapai 99,943% sedangkan pada tiga kumparan mencapai 99,483%. Akurasi pengukuran medan magnet tiga kumparan lebih rendah dari kumparan Helmholtz dapat terjadi karena ukuran sumber tiga kumparan lebih besar sedangkan akurasi *set point* yang besar juga lebih rendah. Akurasi yang rendah juga dapat dipengaruhi ketepatan geometri kumparan. Selain itu, pengukuran yang dilakukan semakin lama menyebabkan suhu kumparan juga meningkat. Hal ini dapat mempengaruhi hasil pengukuran sumber tiga kumparan. *Noise* yang berasal dari rangkaian juga dapat berkontribusi pada hasil pembacaan rangkaian sensor medan magnet. Berdasarkan hasil uji pengendali posisi, linieritas rangkaian sensor, dan pengukuran medan magnet menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja dengan baik. Sistem yang dibangun dapat digunakan untuk memverifikasi sumber medan magnet yang disusun dari beberapa kumparan.

#### 4. KESIMPULAN

Sistem pengukuran medan magnet yang dibangun dapat digunakan untuk verifikasi dan validasi besar medan magnet yang dihasilkan sumber magnet yang disusun dari beberapa kumparan. Hasil uji sistem menunjukkan pengendali posisi mampu mencapai target posisi dengan akurasi 99,99% - 100%. Perhitungan regresi linier rangkain sensor memberikan nilai  $R^2 = 0,9995$ . Nilai  $R^2$  mendekati 1 menunjukkan bahwa rangkain sensor medan magnet memiliki linieritas yang tinggi. Pengukuran medan magnet menunjukkan nilai rata-rata akurasi pada pengukuran medan magnet kumparan Helmholtz mencapai 99,943% sedangkan medan magnet tiga kumparan mencapai 99,483%. Rata-rata akurasi pengukuran tersebut menunjukkan sistem dapat bekerja dengan baik dan dapat digunakan untuk memverifikasi medan magnet, khususnya untuk sumber yang dibentuk dari susunan kumparan kawat sejajar. Sistem pengukuran dapat dikembangkan untuk memverifikasi distribusi medan magnet secara tiga dimensi atau mengukur distribusi medan magnet pada volume tertentu.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengutarakan terimakasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Universitas Pamulang yang telah memberikan dukungan melalui hibah penelitian No. 0545/D5/SPKP/LPPM/UNPAM/XII/2020 dan Pusat Penelitian Teknologi Pengujian – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia yang memfasilitasi pelaksanaan penelitian hingga selesai.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Akbarnejad, Z., Esmaeilpour, K., Shabani, M., Asadi-Shekaari, M., Saeedi Goraghani, M., & Ahmadi-Zeidabadi, M. (2018). Spatial memory recovery in Alzheimer's rat model by electromagnetic field exposure. *International Journal of Neuroscience*, 128(8), 691–696.
- Alvarez, A. F. R., Franco-Mejía, E., & Pinedo-Jaramillo, C. R. (2012). Study and analysis of magnetic field homogeneity of square and circular Helmholtz coil pairs: A Taylor series approximation. *2012 VI Andean Region International Conference*, (pp. 77-80).
- Awaluddin, M. I. (2011). *Pola Medan Elektromagnetik Dari Dua Pasang Kumparan Segiempat*. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Baranov, P., & Baranova, V. (2016). Modeling axial 8-coil system for generating uniform magnetic field in COMSOL. *MATEC Web of Conferences*, 48, 03001).
- Baranova, V. E., & Baranov, P. F. (2014). The Helmholtz coils simulating and improved in COMSOL. *2014 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, (Dynamics)*, (pp. 1-4).
- Belenguer, F. M., Salcedo, A. M., Ibañez, A. G., & Sánchez, V. M. (2019). Advantages offered by the double magnetic loops versus the conventional single ones. *PLoS ONE*, 14(2).
- Belenguer, F. M., Salcedo, A. M., Sánchez, V. M., & Núñez, J. H. A. (2018). Double Magnetic

- Loop and Methods for Calculating Its Inductance. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 1–15.
- De Souza A., García D, Sueiro L., & Gilart F. (2014). Improvement of the seed germination, growth and yield of onion plants by extremely low frequency non-uniform magnetic fields. *Sci. Hort. (Amsterdam)*, 176, 63–69.
- Dinale, J., & Vrbancich, J. (2014). Generation of long prolate volumes of uniform magnetic field in cylindrical saddle-shaped coils. *Measurement Science and Technology*, 25(3), 035903.
- Grbic, M., Naumovic-Vukovic, D., & Pavlovic, A. (2015). Calibration of magnetic field analyzer. *XXI IMEKO World Congress-Measurement in Research and Industry*.
- Griffiths, D. J. (2013). *Introduction to Electrodynamics* (4th ed.). Pearson Education, Inc.
- Honeywell International Inc. (2015). *SS39ET/SS49E/SS59ET Series: Linear Hall-Effect Sensor ICs* (pp. 1–9). Honeywell International Inc.
- Klein, M., Erni, D., & Rueter, D. (2020). Three-dimensional magnetic induction tomography: Improved performance for the center regions inside a low conductive and voluminous body. *Sensors (Switzerland)*, 20(5).
- Klein, M., & Rueter, D. (2017). A large and quick induction field scanner for examining the interior of extended objects or humans. *Progress In Electromagnetics Research B*, 78, (pp. 155-173).
- Lai, H. C., & Singh, N. P. (2010). Medical applications of electromagnetic fields. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 10(1), 012006.
- Lamas-Seco, J. J., Castro, P. M., Dapena, A., & Vazquez-Araujo, F. J. (2015). Vehicle classification using the discrete fourier transform with traffic inductive sensors. *Sensors (Switzerland)*, 15(10), 27201–27214.
- Maffei, M. E. (2014). Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 5, Issue SEP). Frontiers Research Foundation.
- Magdaleno-Adame, S., Olivares-Galvan, J. C., Campero-Littlewood, E., Escarela-Perez, R., Magdaleno-Adame, S., & Blanco-Brisset, E. (2010). Coil Systems to Generate Uniform Magnetic Field Volumes. In L. Paterson (Ed.), *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference* (Vol. 13, pp. 401–4011). COSMOL, Inc.
- Merritt, R., Purcell, C., & Stroink, G. (1983). Uniform magnetic field produced by three, four, and five square coils. *Review of Scientific Instruments*, 54(7), 879–882.
- Ogay, V., Baranov, P., & Stepankova, A. (2014). Modelling coils system for generating homogeneous magnetic field. *IOP Conference Series: Materials Science and*

*Engineering*, 66, 012009.

- Paun, M. A., Sallese, J. M., & Kayal, M. (2013a). Comparative study on the performance of five different hall effect devices. *Sensors (Switzerland)*, 13(2), 2093–2112.
- Paun, M. A., Sallese, J. M., & Kayal, M. (2013b). Hall effect sensors design, integration and behavior analysis. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2(1), 85–97.
- Petković, D. M., & Radić, M. D. (2015). Generalization of Helmholtz coil problem. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 12(3), 375–384.
- Restrepo, A. F., Franco, E., Cadavid, H., & Pinedo, C. R. (2017). A comparative study of the magnetic field homogeneity for circular, square and equilateral triangular helmholtz coils. *International Conference on Electrical, Electronics, Communication Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, (pp. 13-20).
- Riancho, J., Sanchez de la Torre, J. R., Paz-Fajardo, L., Limia, C., Santurtun, A., Cifra, M., Kourtidis, K., & Fdez-Arroyabe, P. (2021). The role of magnetic fields in neurodegenerative diseases. *International Journal of Biometeorology*, 65(1).
- Sliker, L., Ciuti, G., Rentschler, M., & Menciassi, A. (2015, August). Magnetically driven medical devices: A review. *Expert Review of Medical Devices*, 12, 1–16.
- Wei, H. Y., & Soleimani, M. (2013). Electromagnetic tomography for medical and industrial applications: Challenges and opportunities [Point of View]. *Proceedings of the IEEE*, 101(3), (pp. 559-565).
- Wibowo, P., & Yudhistira. (2017). Combining Two Helmholtz Coil Pairs for Expanded Magnetic Field Homogeneity. *Annual Meeting on Testing and Quality*, (pp. 257-262).