

## Pengukuran Medan Magnetik Helmholtz Coil Melalui Konversi Tegangan Efek Hall

Yudhistira<sup>1,2\*</sup> dan Priyo Wibowo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Penelitian Teknologi Pengujian – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia,  
Kawasan PUSPIPTEK Gedung 417, Setu, Tangerang Selatan 15314

<sup>2</sup>Sekolah Teknik Elektro dan Informatika – Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132

\*Corresponding Author : yudhis\_itb@yahoo.com

### Abstrak

Pengukuran medan magnetik yang dihasilkan oleh kumparan dapat dilakukan dengan menggunakan sensor efek Hall. Pada penelitian ini, sensor efek Hall yang digunakan adalah tipe UGN3503. Sistem pengukuran medan magnetik dirancang dengan menggunakan rangkaian pengondisi sinyal yang terdiri dari rangkaian penyangga, rangkaian penguat non-inverting, dan rangkaian penguat diferensial yang terhubung dengan sensor efek Hall. Hasil keluaran dari rangkaian pengondisi sinyal ini adalah tegangan Hall ( $V_H$ ) dengan orde mili-Volt (mV) dan belum berupa besaran medan magnetik (B). Medan magnetik dihasilkan dengan menggunakan kumparan model Helmholtz Coil (sepasang kumparan simetris berjarak setengah diameter kumparan) dengan diameter 20 cm dan 30 cm dimana masing-masing kumparan terdiri dari 100 lilitan kawat tembaga. Arus DC (*Direct Current*) diberikan pada kumparan tersebut dan divariasikan dari 0 hingga 2 A secara bertahap dan posisi sensor juga divariasikan secara aksial. Parameter yang diperoleh untuk mendapatkan nilai medan magnetik adalah nilai gradien dari linieritas sensor efek Hall dan nilai tegangan Hall ( $V_H$ ) yang terukur. Sehingga, nilai medan magnetik dalam satuan mili-Tesla (mT) di setiap titik pengukuran diperoleh melalui konversi nilai tegangan Hall (mV). Nilai konversi diperoleh dengan menggabungkan persamaan medan magnetik Helmholtz Coil dan persamaan efek Hall, yakni dengan nilai konversi 0,0945 Tesla per Volt pada pasangan kumparan 20 cm dan 0,063 Tesla per Volt untuk pasangan kumparan 30 cm.

**Kata kunci:** Arus DC, Helmholtz Coil, medan magnetik, rangkaian pengondisi sinyal, sensor Efek Hall

### Abstract

*The measurement of the magnetic field generated by the coil is done using Hall Effect sensors. In this study, the Hall Effect sensor used is UGN3503 type. The magnetic field measurement system has been designed using a signal conditioning circuit consisting of a buffer circuit, a non-inverting amplifier circuit, and a differential amplifier circuit connected to Hall Effect sensor. The output of this signal conditioning circuit is in the form of Hall voltage ( $V_H$ ) with unit of mili-Volt (mV) and not yet in a magnetic field quantity (B). To produce a magnetic field, Helmholtz Coil's model is used (pair of symmetrical coil with half of the diameter coil distance) with diameter of 20 cm and 30 cm which consists of 100 turns copper wire per coil. The DC (Direct Current) is given on the coil and varied from 0 to 2 A in stages also the position of the sensor is varied axially. The parameters to obtain the magnetic field value are the gradient of the Hall Effect sensor linearity and Hall voltage value ( $V_H$ ). Therefore, the magnetic field value (mT) at each measurement point is obtained through the conversion of Hall voltage conversion value (mV). The conversion value is obtained by combining the Helmholtz Coil magnetic field equation and the Hall effects equation, which is a conversion value of 0.0945 Tesla per Volt in a 20 cm coil pair and 0.063 Tesla per Volt for a 30 cm coil pair.*

**Keywords:** DC Current, Helmholtz Coil, magnetic field, signal conditioning circuit, Hall Effect sensor

## PENDAHULUAN

Medan magnetik merupakan sebuah besaran yang nilainya dapat diukur dengan berbagai cara, salah satunya adalah dengan menggunakan sensor medan magnet yakni sensor efek Hall. Pada saat ini, penggunaan sensor tersebut banyak digunakan untuk berbagai bidang seperti bidang industri, rumah tangga, kesehatan, iptek, dan lain-lain. Selain harganya yang terjangkau, sensor tersebut mudah ditemukan di pasaran dengan berbagai keunggulan seperti linearitas dan kestabilan dalam pengukuran, sensitivitas yang tinggi, dan tidak merusak (non destruktif). Beberapa penelitian mengenai pengukuran medan magnetik ini diantaranya adalah untuk mengukur kemiringan suatu bangunan, mengukur massa berbasis mikrokontroler, hingga mengukur arus listrik pada suatu kumparan secara non-destruktif (A. Ro'uf, 2011; Suryono, Riyanti, & Suseno, 2009; Susilo, 2015; Wahyudi & Ahmad, 2013).

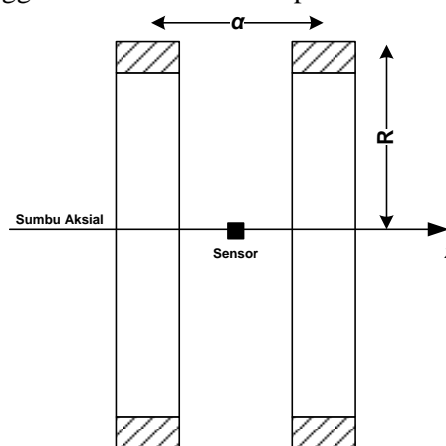
Sensor efek Hall tipe UGN3503 merupakan sensor medan magnet yang mempunyai ketahanan pengukuran pada rentang suhu yang cukup besar, yakni dari  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  hingga  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Allegro MicroSystems, 1999). Pada tulisan ini, untuk memperoleh nilai tegangan keluaran, sensor efek Hall dihubungkan dengan rangkaian pengondisi sinyal yang terdiri dari rangkaian penyangga, rangkaian penguat non-inverting, dan rangkaian penguat differensial (Awaluddin, 2011; Erlangga, 2017; Yudhistira, 2017).

Sumber pembangkit medan magnetik dapat berupa magnet yang bersifat permanen maupun magnet yang dihasilkan melalui induksi elektromagnetik (bersifat sementara). Model kumparan yang digunakan pada tulisan ini adalah model kumparan Helmholtz Coil, yakni sepasang kumparan simetris berjarak setengah diameter kumparan yang masing-masing terdiri dari 100 lilitan kawat tembaga dengan diameter kumparan 20 cm dan sepasang kumparan dengan jumlah lilitan yang sama (100 lilitan) berdiameter 30 cm. Dengan menerapkan Hukum Biot-Savart, arus listrik yang mengalir di kawat penghantar akan menimbulkan medan magnetik di sekitarnya dan dideteksi oleh sensor efek Hall UGN3503. Medan magnetik yang mengenai sensor secara tegak lurus dapat memicu timbulnya beda tegangan yang akan terbaca oleh alat pengukur tegangan (voltmeter)

setelah melalui rangkaian pengondisi sinyal (Awaluddin, 2011).

Parameter yang perlu dikarakterisasi terlebih dahulu adalah linearitas pembacaan sensor dalam mengukur tegangan output dari sensor terhadap perubahan nilai arus kumparan dari 0 hingga 2 A secara bertahap. Karakteristik tegangan Hall ( $V_H$ ) yang diperoleh dari sensor akan dikonversi ke besaran medan magnetik dengan menggunakan persamaan Efek Hall dan persamaan medan magnetik Helmholtz Coil. Pada akhirnya, diperoleh nilai medan magnetik dalam satuan mili-Tesla (mT) di setiap titik pengukuran melalui konversi nilai tegangan Hall (mV).

Model Helmholtz Coil memiliki bentuk susunan kumparan simetris yang memiliki jari-jari kumparan bernilai  $R$  dan jarak antar kumparan adalah  $\alpha$  (dalam hal ini nilai  $\alpha = R$ ), seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1. Untuk dapat menghasilkan medan magnetik, kedua kumparan ini dialiri arus yang sama, yakni  $I$  (Batista, 2018; Linares, Berger, Hinaje, Douine, & Leveque, 2016; Trout, 1988). Keunggulan dari model ini adalah nilai medan magnetik yang dihasilkan lebih homogen dan lebih stabil dibandingkan dengan hanya menggunakan satu buah kumparan.



Gambar 1. Irisan penampang model Helmholtz Coil.

Pengukuran medan magnetik yang dihasilkan model kumparan ini dapat dilakukan dengan menempatkan sensor efek Hall baik di sepanjang sumbu aksial maupun sepanjang arah radial. Pada tulisan ini, eksperimen dilakukan hanya untuk mengukur medan magnetik arah aksial. Persamaan umum medan magnetik yang dihasilkan oleh kumparan model Helmholtz

Coil di sepanjang sumbu aksial adalah (Bhatt, Rautela, Sharma, Tiwari, & Khushu, 2010)

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2R} \left( \left[ 1 + \left( \frac{x+\alpha/2}{R} \right)^2 \right]^{-3/2} + \left[ 1 + \left( \frac{x-\alpha/2}{R} \right)^2 \right]^{-3/2} \right) \quad (1)$$

Sedangkan, untuk medan magnetik yang dihasilkan di pusat sistem kumparan ( $x = 0$ ) adalah

$$B = \frac{\mu_0 IN}{R} \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{2R} \right)^2 \right]^{-3/2} \quad (2)$$

dengan

$\mu_0$  = permeabilitas magnet ( $4\pi \times 10^{-7}$

H/m)

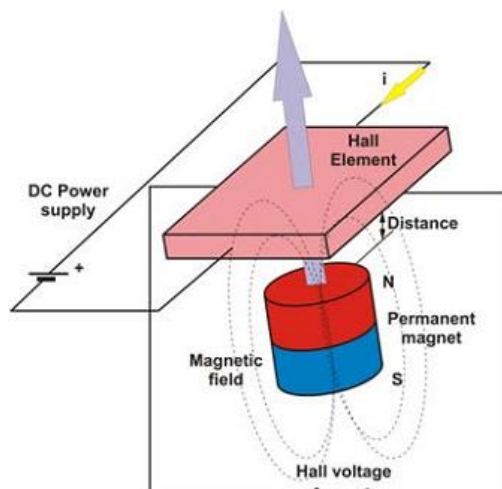
I = arus kumparan

N = jumlah lilitan kumparan

R = jari-jari kumparan

$\alpha$  = jarak antar kumparan

Pada tahun 1879, E. H. Hall mengamati efek yang terjadi pada sebuah plat konduktor tipis yang dialiri oleh arus listrik apabila diberi medan magnetik secara tegak lurus terhadap plat tersebut. Efek yang diamati adalah timbulnya beda tegangan yang terjadi pada plat konduktor tersebut dimana nilai beda tegangan tersebut berbanding lurus dengan arus yang mengalir pada plat konduktor (Popovic, 1991). Nilai beda tegangan ini disebut Tegangan Hall atau *Hall Voltage* ( $V_H$ ). Prinsip kerja efek Hall dapat dilihat pada gambar di bawah ini (Honeywell, 2011; Kelemenová, Kelemen, Virgala, & Miková, 2015).



Gambar 2. Prinsip kerja efek Hall.

Besarnya tegangan Hall ( $V_H$ ) dapat ditentukan menggunakan persamaan

$$V_H = \left( \frac{i}{n.e.t} \right) \times B \quad (3)$$

dengan

i = arus listrik yang mengalir pada plat konduktor (A)

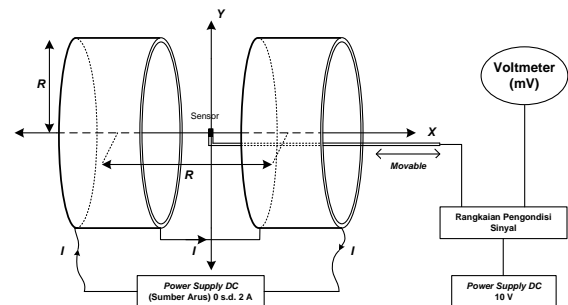
B = medan magnetik yang menembus plat secara tegak lurus (T)

t = ketebalan plat konduktor (m)

n.e = jumlah pembawa muatan per volume ( $C/m^3$ )

## METODE

Pengukuran dilakukan dengan menyiapkan berbagai macam peralatan seperti sensor efek Hall UGN3503, rangkaian pengondisi sinyal, voltmeter guna mengukur nilai tegangan keluaran dari sensor, power supply (catu daya) 10 Volt DC untuk supply tegangan rangkaian pengondisi sinyal, serta power supply DC sebagai sumber arus untuk kumparan Helmholtz yang dapat divariasikan dari 0 hingga 2 A. Alur kerja pengukuran dapat dilihat pada Gambar 3.

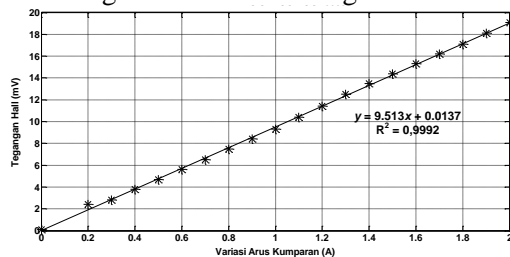


Gambar 3. Alur kerja pengukuran medan magnetik menggunakan sensor efek Hall UGN3503.

Batang penggerak (*movable*) dapat menggerakkan sensor dari posisi satu ke posisi lainnya secara bebas dan stabil. Dalam kasus ini, sensor ditempatkan terlebih dahulu untuk di pusat sistem kumparan guna memperoleh karakteristik linieritas sensor terhadap kenaikan arus kumparan (Anisa, 2011; Haromain, 2010). Setelah diperoleh nilai gradien dari linieritas sensor tersebut, yakni tegangan Hall (mV) terhadap perubahan arus kumparan (A), maka akan diperoleh konversi nilai tegangan ke medan magnetik menggunakan persamaan (2) dan (3). Sehingga, pada akhirnya hasil pengukuran medan magnetik yang telah dikonversi dapat digunakan pada variasi besaran arus kumparan (1; 1,5; dan 2 A) dan variasi diameter kumparan (pasangan 20 cm dan pasangan 30 cm).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil plot grafik linieritas sensor efek Hall UGN3503 disajikan pada Gambar 4. Pada awalnya sensor ditempatkan secara diam di pusat sistem kumparan dan kumparan belum diberikan arus oleh power supply DC sehingga belum ada beda tegangan yang terukur. Setelah kumparan diberi arus, nilai tegangan yang terukur perlahan mulai naik seiring dengan kenaikan arus. Setelah kumparan diberi arus sebesar 2 A, nilai tegangan Hall yang dihasilkan masih dalam bentuk linier dengan nilai  $R^2 > 0,9992$  sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor efek Hall UGN3503 memiliki linieritas yang baik dan sangat baik digunakan untuk pengukuran. Selain itu, hasil ini menunjukkan bahwa model kumparan Helmholtz cukup stabil dalam menghasilkan medan magnetik.



Gambar 4. Grafik linieritas sensor efek Hall UGN3503 untuk sistem pasangan kumparan diameter 20 cm.

Nilai output yang terbaca dari sensor efek Hall adalah berupa nilai tegangan Hall (mV) yang bermakna adanya beda tegangan yang terjadi akibat adanya medan magnetik yang menembus permukaan sensor. Untuk memperoleh nilai medan magnetik yang menembus permukaan sensor tersebut, maka diperlukan konversi nilai tegangan Hall yang terbaca oleh voltmeter dengan menggunakan persamaan (2) dan (3).

Nilai  $B$  yang ada di persamaan (2) dan (3) merupakan besaran yang sama, yakni besarnya medan magnetik yang dihasilkan kumparan pada suatu titik (pusat sistem kumparan). Dengan menggabungkan kedua persamaan tersebut, diperoleh persamaan baru yakni

$$\frac{\mu_0 IN}{R} \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{2R} \right)^2 \right]^{-3/2} = \frac{n.e.t}{i} V_H \quad (4)$$

Selanjutnya, hubungan antara tegangan Hall ( $V_H$ ) dengan variasi arus kumparan ( $I$ ) diperoleh dengan persamaan

$$V_H = \left( \frac{i}{n.e.t} \frac{\mu_0 N}{R} \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{2R} \right)^2 \right]^{-3/2} \right) \times I \quad (5)$$

Pada pembahasan sebelumnya mengenai linieritas sensor, hubungan nilai tegangan Hall adalah berbanding lurus (linier) terhadap perubahan arus kumparan. Sehingga, nilai gradien dari persamaan garis pada grafik Gambar 4 ( $m = 9,513 \text{ mV/A}$ ) merupakan nilai total variabel yang ada di dalam tanda kurung di persamaan (5), yakni

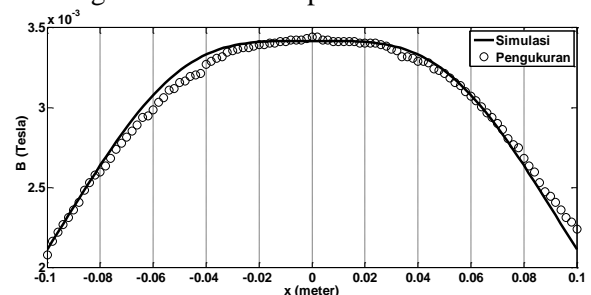
$$m = \frac{i}{n.e.t} \frac{\mu_0 N}{R} \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{2R} \right)^2 \right]^{-3/2} \quad (6)$$

Berikutnya adalah menentukan nilai tetapan  $\frac{n.e.t}{i}$  untuk dapat menyatakan konversi tegangan Hall ke medan magnetik yang dituliskan pada persamaan (3), yakni

$$\frac{n.e.t}{i} = \frac{\mu_0 N}{m.R} \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{2R} \right)^2 \right]^{-3/2} \quad (7)$$

Merujuk pada persamaan (3), nilai konversi tegangan Hall ke medan magnetik untuk kumparan berdiameter 20 cm adalah sebesar 0,0945 Tesla per Volt, yang bermakna apabila pada voltmeter terukur beda tegangan sebesar 1 mV maka medan yang ada pada titik tersebut adalah sebesar 0,0945 mT. Sedangkan, untuk kumparan berdiameter 30 cm adalah sebesar 0,063 Tesla per Volt.

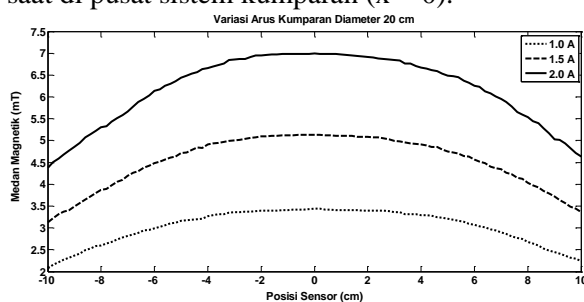
Selanjutnya, medan magnetik yang telah diukur oleh sensor efek Hall dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan program MATLAB untuk meyakinkan hasil dari pengukuran. Hasil plot medan magnetik yang merujuk pada persamaan (1) dan hasil pengukuran pada Helmholtz Coil berdiameter 20 cm yang dialiri arus 1 A disajikan pada Gambar 5. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa nilai medan magnetik hasil pengukuran berkorelasi dengan baik dengan hasil simulasi MATLAB dengan sedikit nilai penyimpangan akibat adanya berbagai faktor seperti *losses* dan faktor geometri dari kumparan.



Gambar 5. Perbandingan nilai medan magnetik yang dihasilkan dari simulasi dan pengukuran pada tiap posisi sensor (aksial).

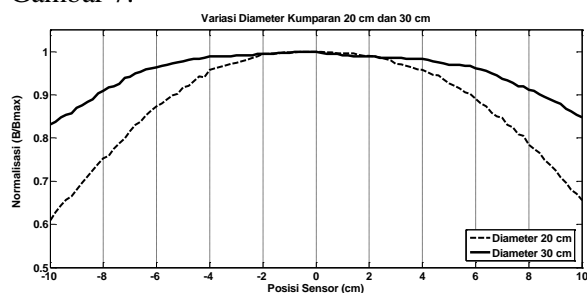
Guna menguji keandalan sistem pengukuran medan magnetik menggunakan sensor efek Hall, dilakukan penelitian untuk mengubah nilai arus kumparan dengan 3 variasi nilai arus, yakni 1 A, 1,5 A, dan 2 A. Grafik hasil pengukuran disajikan pada Gambar 6.

Hasil pengukuran yang ditunjukkan pada Gambar 6 menunjukkan hubungan grafik yang sesuai dengan persamaan (1), yakni nilai medan magnetik akan bertambah besar seiring dengan bertambahnya arus kumparan. Namun, nilai medan magnetik akan mengecil apabila menjauhi kumparan ( $x > \pm R$ ) dan maksimum saat di pusat sistem kumparan ( $x = 0$ ).



Gambar 6. Nilai medan magnetik pada tiap posisi sensor (aksial) dengan variasi arus kumparan.

Dengan menggunakan diameter kumparan yang berbeda, dapat diamati bahwa nilai medan magnetik yang dihasilkan 2 buah sistem kumparan ini memiliki profil yang berbeda pula. Untuk arus kumparan yang sama, nilai medan magnetik kumparan berdiameter 30 cm boleh jadi lebih kecil dibandingkan dengan kumparan berdiameter 20 cm (merujuk pada konversi nilai mV ke mT), tetapi kumparan yang berdiameter lebih besar dapat menghasilkan medan magnetik yang lebih homogen karena lebih luasnya ruang yang terbentuk pada kumparan yang lebih besar. Hasil perbandingan nilai medan magnetik dari variasi diameter kumparan dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Profil medan magnetik untuk pasangan kumparan berbeda diameter.

## SIMPULAN DAN SARAN

Penggunaan sensor efek Hall telah banyak diaplikasikan dalam berbagai hal, yakni digunakan untuk mengukur medan magnetik. Pada penelitian ini telah diperoleh nilai konversi medan magnetik melalui konversi tegangan Hall dengan merancang sistem pengukuran model kumparan Helmholtz. Nilai konversi diperoleh dengan menggabungkan persamaan medan magnetik Helmholtz Coil dan persamaan efek Hall, yakni dengan nilai konversi 0,0945 Tesla per Volt pada pasangan kumparan 20 cm dan 0,063 Tesla per Volt untuk pasangan kumparan 30 cm. Hasil karakteristik linieritas sensor menunjukkan sensor dapat bekerja dengan baik dan pengukuran medan magnetik untuk variasi arus kumparan dan variasi diameter kumparan menunjukkan hasil yang berkesesuaian dengan teori yang ada. Kedepannya, perlu dilakukan validasi dengan menggunakan bahan material magnetik acuan (terkalibrasi) agar dapat diperoleh perbandingan nilai akurasi dan presisi dengan metode ini.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ditujukan kepada Tim Laboratorium EMC Pusat Penelitian Teknologi Pengujian – LIPI, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika – ITB, dan Beasiswa Sainstek – Kemenristekdikti 2018 dari penulis atas fasilitas dan dukungan dalam melakukan kegiatan penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- A. Ro'uf, Z. S. (2011). Karakterisasi Sensor Efek Hall UGN3503 Untuk Mengukur Kemiringan. *IJEIS*, 1(1), 25–30.
- Allegro MicroSystems, I. (1999). *Ratiometric, linear hall-effect sensors* (p. 1). p. 1. Retrieved from [www.pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/allegromicrosystems/3503.pdf](http://www.pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/allegromicrosystems/3503.pdf)
- Anisa, P. (2011). *Alat Ukur Distribusi Medan Magnet pada Kumparan Helmholtz*. Universitas Indonesia.
- Awaluddin, M. I. (2011). *Pola Medan Elektromagnetik Dari Dua Pasang Kumparan Segiempat*. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Batista, D. S. (2018). Three-Axial Helmholtz Coil Design and Validation for Aerospace Applications. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 54(1),

- 392–403.  
<https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2760560> Refereeing
- Bhatt, V., Rautela, R., Sharma, P., Tiwari, D., & Khushu, S. (2010). Design & Development of Helmholtz Coil for Hyperpolarized MRI. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2010 India*. Retrieved from [https://www.comsol.com/paper/download/62250/bhatt\\_paper.pdf](https://www.comsol.com/paper/download/62250/bhatt_paper.pdf)
- Erlangga, I. S. (2017). *Pembuatan Alat Ukur Medan Magnet Pada Kumparan Helmholtz Menggunakan Sensor UGN3503 Yang Dilengkapi Dengan Interface Digital* (Universitas Brawijaya). Retrieved from <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/3772>
- Haromain, I. (2010). *Rancang Bangun Sistem Pengukuran Medan Magnet Berbasis Mikrokontroler*. Universitas Indonesia.
- Honeywell. (2011). Hall Effect Sensing and Application. In *Sensing and Control*. <https://doi.org/005715-2-EN GLO 1198>
- Kelemenová, T., Kelemen, M., Virgala, I., & Miková, E. (2015). Experimental Verification of Hall Effect Sensor Properties. *Journal of Automation and Control*, 3(3), 75–78. <https://doi.org/10.12691/automation-3-3-7>
- Linares, R., Berger, K., Hinaje, M., Douine, B., & Leveque, J. (2016). Design of a Vector Magnet Generating Up to 3 T with Three-Axis Orientation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(3). <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2539545>
- Popovic, R. S. (1991). *Hall Effect Devices: Magnetic Sensors and Characterization of Semiconductors*.
- Suryono, Riyanti, A., & Suseno, J. E. (2009). Karakterisasi Sensor Magnetik Efek Hall UGN3503 Terhadap Sumber Magnet dan Implementasinya pada Pengukuran Massa. *Berkala Fisika*, 12(1), 1–8.
- Susilo, F. (2015). *Pembuatan Teslameter dengan Sensor Efek Hall A1302UA Berbasis Digital*. Universitas Negeri Malang.
- Trout, R. (1988). Use of Helmholtz Coils for Magnetic Measurements. *IEEE Transaction on Magnetism*, 24(4), 2108–2111.
- Wahyudi, J., & Ahmad, G. (2013). Desain dan Karakterisasi Penggunaan Sensor Efek Hall UGN3503 untuk Mengukur Arus Listrik pada Kumparan Leybold P6271 Secara Non Destruktif. *Teori Dan Aplikasi Fisika*, 01(02), 185–190.
- Yudhistira. (2017). Karakterisasi Sensor Efek Hall (UGN3503) untuk Pengukuran Medan Magnetik Kumparan Berarus DC. *Annual Meeting on Testing and Quality (AMTeQ)*, 24–27. <https://doi.org/ISSN1907-7459>