



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

ผลของอุณหภูมิต่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์สำหรับการทำงานในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์

Effects of Temperature on Inductance of Ferrite Toroidal Inductors During Operating Frequencies of 20 Hz–2 MHz

ศุภวิทย์ บัวบุญ¹ ชลธิ์ โพธิ์ทอง^{1*}

¹ หน่วยงานวิจัยพลังงานรังสีอาทิตย์และแหล่งพลังงานสำรอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

Supawit Buaboon¹ Chonlatee Photong^{1*}

¹ Solar Energy and Energy Resources Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kham Riang, Kantarawichai, Maha Sarakham, 44150

* Corresponding author.

E-mail: chonlatee.p@msu.ac.th; Telephone: 09 5662 3633

วันที่รับบทความ 6 ธันวาคม 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 1 6 กุมภาพันธ์ 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 2 12 มีนาคม 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 3 1 พฤษภาคม 2561; วันที่ตอบรับบทความ 15 พฤษภาคม 2561

บทคัดย่อ

ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์เป็นตัวเหนี่ยวนำที่นิยมใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและสร้างสัญญาณรบกวนต่ำ อย่างไรก็ตาม แกนเฟอร์ไรต์และขดลวดทองแดงซึ่งเป็นวัสดุหลักของตัวเหนี่ยวนำเป็นวัสดุไวต่ออุณหภูมิแวดล้อม อาจส่งผลกระทบต่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำได้ งานวิจัยนี้นำเสนอผลของอุณหภูมิแวดล้อมในช่วง 25–100 องศาเซลเซียส ต่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ในย่านความถี่วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์) ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ความถี่สูง ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ลวดตัวนำขนาดเล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำสูงกว่าลวดขนาดใหญ่ ในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำที่มีจำนวนรอบขดลวดต่ำกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำต่ำกว่า

คำสำคัญ

ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าความเหนี่ยวนำ

Abstract

Ferrite toroidal inductors are commonly used in electronic circuits due to their simple structure and low electromagnetic interference. However, the ferrite core and copper coils, the main materials of the inductors, are sensitive to ambient temperature. This would effect to inductance of the inductors. This paper presents effects of ambient temperature in the range of 25-100 °C on inductance of ferrite toroidal inductors during electronics operation frequencies

(20Hz-2MHz). The experiment results showed that inductance of the inductors increased when ambient temperature increases; especially at high frequencies. The inductors with small size of copper wires had high variation of inductance compared with the larger size, while the inductors with less number of turns of coils had high variation of inductance.

Keywords

ferrite toroidal inductors; effects of temperature on Inductance

1. บทนำ

ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์เป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีโครงสร้างง่ายแต่ให้ความเหนี่ยวนำสูงทำให้มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับตัวเหนี่ยวนำรูปแบบอื่น ตัวเหนี่ยวนำชนิดนี้ประกอบด้วยแกนเฟอร์ไรต์รูปร่างคล้ายโดนัท (toroidal shape) ที่พันด้วยลวดตัวนำจำพวกลวดทองแดงดังแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนี้มีโครงสร้างง่ายและขนาดเล็กแล้ว ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ยังสร้างสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนต่ำ (low electromagnetic interference) ด้วย เหตุนี้ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์จึงเป็นตัวเหนี่ยวนำที่นิยมใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนใหญ่ [1,2]

การประยุกต์ใช้งานตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่มีความต้องการใช้ค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่าคงที่เพื่อหลีกเลี่ยงค่าความเพี้ยนหรือความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นกับวงจร ซึ่งโดยทั่วไปสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ (L) สำหรับตัวเหนี่ยวนำชนิดนี้ตามสมการ (1)

$$L = \frac{N^2 A \mu_c}{l} \quad (1)$$

โดยที่ N คือ จำนวนรอบขดลวด (รอบ)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์ (m^2)

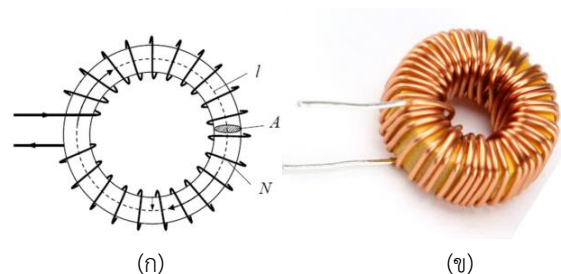
l คือ ความยาวเฉลี่ยของแกนเฟอร์ไรต์ (m)

μ_c คือ ค่าความซาบซึมแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์; permeability (Hm^{-1})

หากพิจารณาสมการ (1) แล้วจะเห็นว่า N A และ l เป็นค่าทางกายภาพซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าต่ำ จึงมีผลต่อการ

เปลี่ยนแปลงค่า L น้อย ในขณะที่ μ_c เป็นค่าคุณสมบัติของวัสดุแกนเฟอร์ไรต์ที่มีค่าแตกต่างกันไปตามลักษณะของวัสดุ ดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1 [3] โดยค่า μ_r เป็นจำนวนเท่าของค่าความซาบซึมแม่เหล็กของวัสดุเมื่อเทียบกับสุญญากาศ (μ_o อากาศ = $4\pi \times 10^{-7} Hm^{-1}$) นอกจากนั้น ค่า μ_c ยังมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแวดล้อมและความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2 [4,5] และ รูปที่ 3 [6] ซึ่งอุณหภูมิแวดล้อมและความถี่สัญญาณวงจรส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า μ_c ดังนั้นค่า L ของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ทอรอยด์จึงน่าจะมีการเปลี่ยนแปลงด้วย

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า μ_c จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาตามสมการ (1) ก็จะได้ว่า ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ควรมีค่าสูงขึ้นด้วย จนกระทั่งถึงค่าอุณหภูมิหนึ่งก็จะสูญเสียความเป็นแม่เหล็ก เรียกว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) เช่น เฟอร์ไรต์ T36 จะมีอุณหภูมิคูรีที่ประมาณ $130^\circ C$ เป็นต้น ในขณะที่ค่า μ_c จะมีการเปลี่ยนแปลงต่อความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยจะมีค่าเป็นเชิงซ้อนประกอบด้วยค่าจริง (real part) และค่าจินตภาพ (imaginary part) โดยวัสดุเฟอร์ไรต์จะที่เกิด



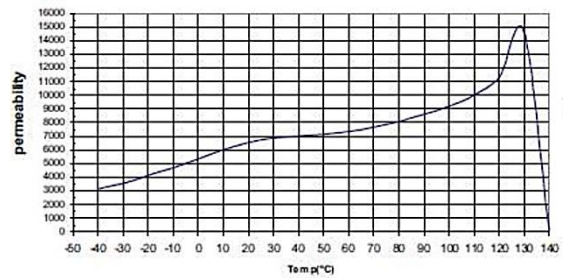
รูปที่ 1 โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์: (ก) ภาพร่าง และ (ข) ตัวอย่างอุปกรณ์จริง

ตารางที่ 1 ตัวอย่างวัสดุแกนเฟอร์ไรต์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม และค่าความซาบซึมแม่เหล็กของวัสดุ [3]

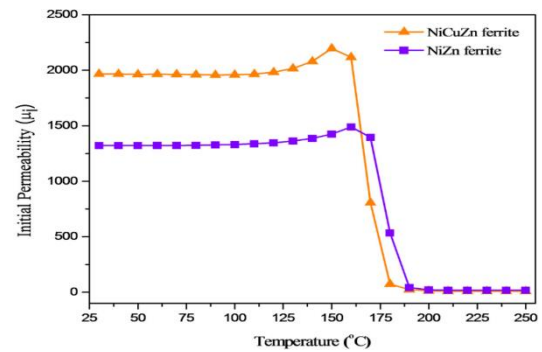
Material	μ_c (Hm ⁻¹)	μ_r	Application
Ferrite U60	1.00E-05	8	UHF chokes
Ferrite M33	9.42E-04	750	Resonance Circuit RM Core
Nickel (99%)	7.54E-04	600	-
Ferrite N41	3.77E-03	3,000	Power Circuit
Iron (99.8%)	6.28E-03	5,000	-
Ferrite T38	1.26E-02	10,000	Broadband Transformers
Silicon GO	5.03E-02	40,000	Dynamos, main transformers
Supermalloy	1.26	1,000,000	Recording heads

การแตมบั้ง (damping) ของค่าจริงที่ค่าความถี่หนึ่งจากปรากฏการณ์ ferrimagnetic resonance (FR) [7] ซึ่งวัสดุตัวอย่างในรูป มีค่าที่ความถี่ FR ที่ค่าประมาณ 2.5 GHz เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงของค่า μ_c เนื่องจากอุณหภูมิและความถี่สัญญาณในทางทฤษฎีจึงน่าจะส่งผลกระทบต่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ ซึ่งจะได้มีการศึกษาในงานวิจัยนี้

นอกจากแกนเฟอร์ไรต์แล้ว ลวดตัวนำก็เป็นส่วนประกอบหลักของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ ในลักษณะคล้ายกัน อุณหภูมิแวดล้อมมีผลต่อช่องทางเดินของอิเล็กตรอน (กระแสไฟฟ้า) ซึ่งโดยปกติแล้วอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่บริเวณผิวของลวดทองแดงมากที่สุดและน้อยลงไปเรื่อย ๆ ที่ระยะเข้าใกล้แกนลวดตัวนำ เรียกว่า skin effect และระยะทางดังกล่าวที่ยังมีอิเล็กตรอนหนาแน่นอยู่สูงกว่าร้อยละ 37 เรียกว่า skin depth หรือ penetration depth (δ) หาค่าได้จาก (2) ตัวอย่างค่า skin depth ของลวดทองแดงซึ่งเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิที่ 20 °C และ 900 °C ในช่วงความถี่ 50 Hz–1 MHz แสดงในตารางที่ 2 [8] ซึ่งจะเห็นว่า δ มีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิ

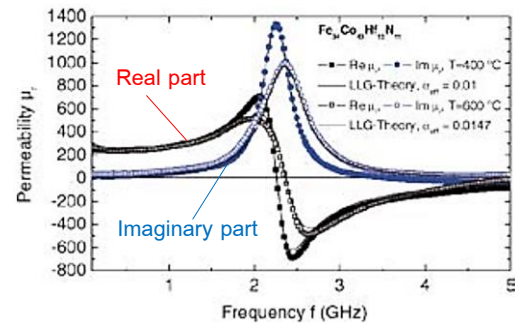


(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความซาบซึมแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ (ก) Ferrite T36 [4] และ (ข) NiCuZn/NiZn Ferrite [5]



รูปที่ 3 ผลของความถี่ต่อค่าความซาบซึมแม่เหล็กของตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ Fe₃₄Co₄₃H₁₂N [6]

ขึ้น ในขณะที่มีค่าต่ำลงเมื่อกระแสทำงานที่ความถี่สูงขึ้น กล่าวคือ ลวดตัวนำจะนำกระแสสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่จะนำกระแสได้ต่ำลงเมื่อความถี่กระแสสูงขึ้น

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_{con}}} \quad (2)$$

โดยที่ ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของลวด ($\Omega \cdot m$)

f คือ ความถี่ของกระแส (Hz)

μ_{con} คือ ความซาบซึมแม่เหล็กของตัวนำ (Hm⁻¹)

ตารางที่ 2 ค่า Skin depth ของลวดทองแดงที่อุณหภูมิ 20 °C และ 900 °C ในช่วงความถี่กระแส 50 Hz – 1 MHz [8]

frequency	Skin depth (δ)	
	20°C	900°C
50 Hz	9.31	20.87
100 Hz	6.58	14.76
1 kHz	2.08	4.67
10 kHz	0.66	1.48
100 kHz	0.21	0.47
1 MHz	0.07	0.15

การเพิ่มสูงขึ้นของกระแสในขดลวดตัวนำซึ่งเป็นผลของ skin effect ส่งผลต่อการสร้างฟลักซ์และค่าความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็ก (H) รอบขดลวดตัวนำที่สูงขึ้นตามกฎของโอห์ม (Ohm's circuit law) เมื่อ H เพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์มีค่าคงที่ ก็จะทำให้ค่าความหนาแน่นแม่เหล็ก (B) สูงขึ้น และส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า μ_c ตามสมการ (3) และค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำตามสมการ (1) ตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

$$\mu_c = \frac{B}{H} \quad (3)$$

งานวิจัยส่วนหนึ่งได้สนับสนุนเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นกับระบบสายส่ง โดยงานวิจัย [9] พบว่า กระแสในสายไฟแบบ aluminium conductor steel reinforced มีการเปลี่ยนแปลงค่าได้สูงกว่าร้อยละ 3.6–14.0 จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิแวดล้อม งานวิจัย [10] พบการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำวงจรในระบบสื่อสารช่วงความถี่ 0–3 MHz อันเป็นผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแวดล้อม

ในงานวิจัยนี้ จะได้นำเสนอผลของอุณหภูมิต่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ซึ่งนิยมใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในช่วงความถี่เฮคโตเมตริก

(Hectometric waves; 0–3 MHz) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่มีผลต่อวงจรมากที่สุด [11] โดยพิจารณาผลของขนาดของลวดตัวนำและจำนวนรอบของลวดตัวที่แตกต่างกัน รายละเอียดวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย นำเสนอในหัวข้อ 2 ผลการวิจัยในหัวข้อ 3 และ สรุปผลในหัวข้อ 4 ตามลำดับ

2. วัสดุ อุปกรณ์ และ วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

- 1) ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ MnZn PC47 ยี่ห้อ TDK [12] พันรอบด้วยลวดทองแดงอาบน้ำยาพอลิไวนิลฟออร์มัลมาตรฐาน มอก.82-2552 ทนความร้อน 170 °C [13] ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวด 0.812 0.644 และ 0.511 mm (AWG20 22 และ 24; โดย AWG คือ American Wire Gauge เป็นรหัสขนาดขดลวดมาตรฐานสหรัฐอเมริกา มีค่าอื่น ๆ ดังตารางที่ 3 โดยตัวเหนี่ยวนำทุกตัวมีค่าความเหนี่ยวนำเริ่มต้นเท่ากันคือ 2.63 ± 0.015 mH
- 2) ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์และลวดทองแดงชนิดเดียวกับหัวข้อ 2.1(1) พันรอบด้วยลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวด 0.405 mm (AWG26) ด้วยจำนวนรอบ 70 140 และ 210 รอบ (N 2N และ 3N รอบ) โดยให้ค่าความเหนี่ยวนำเริ่มต้นเท่ากับ 2.92 11.55 และ 33.4 mH ตามลำดับ
- 3) แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการทดลอง สามารถปรับอุณหภูมิได้ด้วยการควบคุมทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิไม่เกิน 200 ± 0.5 °C ในการทดลองใช้ความร้อนระหว่าง 25–100 °C
- 4) เทอร์โมมิเตอร์ Type K รุ่น CTM DT-613 สำหรับวัดอุณหภูมิบริเวณรอบตัวเหนี่ยวนำ

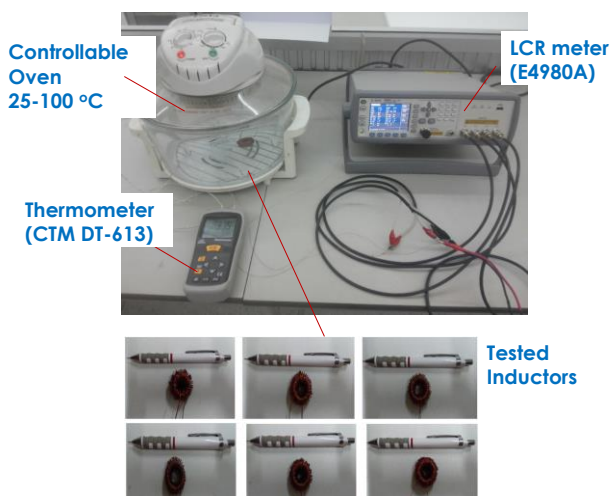
ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติของลวดทองแดงที่นำมาใช้ในการทดลอง

AWG	Diameter		Turns of wire, without insulation		Area		Copper wire						
							Resistance/length		Ampacity, at 20 °C insulation material temperature rating		Fusing current		
	60 °C	75 °C	Preece	Onderdonk									
	(in)	(mm)	(per in)	(per cm)	(kcmil)	(mm ²)	(m Ω /m)	(m Ω /ft)	(A)	~10 s	1 s	32 ms	
20	0.0320	0.812	31.3	12.3	1.02	0.518	33.31	10.15	7.5	11.0	58.5 A	158 A	882 A
22	0.0253	0.644	39.5	15.5	0.642	0.326	52.96	16.14	7.0	5.0	41 A	99 A	551 A
24	0.0201	0.511	49.7	19.6	0.404	0.205	84.22	25.67	3.5	2.1	29 A	62 A	348 A
26	0.0159	0.405	62.7	24.7	0.254	0.129	133.9	40.81	2.2	1.3	20 A	39 A	218 A

- 5) เครื่องตรวจวัดค่าอิมพีแดนซ์ (LCR meter รุ่น E4980A) วัดค่าความเหนี่ยวนำในช่วง 20 Hz–2 MHz ค่า accuracy $\pm 0.01\%$ [14]

2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง โดยการทดลองทั้ง 2 การทดลอง มีลักษณะการต่ออุปกรณ์การทดลองที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 ส่วนที่แตกต่างมีเพียงตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ใน



รูปที่ 4 แสดงชุดทดลองและการต่ออุปกรณ์เพื่อทดสอบตัวเหนี่ยวนำ ตามที่ได้ออกแบบในการวิจัย

การทดลองแต่ละชุดเท่านั้น โดยมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1

เป็นการทดสอบเพื่อวัดค่าความเหนี่ยวนำของตัวความเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ 3 ตัว โดยแต่ละตัวมีค่าความเหนี่ยวนำเริ่มต้นเท่ากัน ต่างกันเพียงเฉพาะพันด้วยลวดทองแดงขนาดต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อ 2.1(1) ทดสอบที่อุณหภูมิ 25–100 °C และความถี่ทดสอบ 20 Hz–2 MHz โดยทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำจำนวน 5 ครั้งต่ออุณหภูมิทดสอบ สำหรับแต่ละตัวเหนี่ยวนำ เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

การทดลองที่ 2

การทดสอบวัดค่าความเหนี่ยวนำของตัวความเหนี่ยวนำแกนแม่เหล็กเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ 3 ตัว รายละเอียดตัวเหนี่ยวนำแสดงในหัวข้อ 2.1(2) ทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 25–100 °C และความถี่ 20 Hz–2 MHz โดยทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำจำนวน 5 ครั้งต่ออุณหภูมิทดสอบ สำหรับแต่ละตัวเหนี่ยวนำ เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

3. ผลการวิจัย

ผลการทดลองที่ 1

ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5(ก)-(ค) และ 6(ก)-(ค) ซึ่งอธิบายผลได้ดังนี้

- 1) ตัวเหนี่ยวนำลวดขนาดใหญ่ (AWG20) มีค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่มีผลน้อยมากในช่วงความถี่ต่ำ (20 Hz–200 kHz) จากผลของ skin effect จากนั้นเพิ่มค่าขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุด (300 mH) ที่ความถี่ 800 kHz ก่อนจะเกิดการ damping เนื่องจากผลของ Ferrimagnetic resonance
- 2) ตัวเหนี่ยวนำลวดขนาดกลาง (AWG22) เกิดผลกระทบของอุณหภูมิในลักษณะเดียวกันกับตัวเหนี่ยวนำลวดขนาดใหญ่ แต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำสูงกว่าและมีความถี่ FR ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับลวดขนาดใหญ่
- 3) ตัวเหนี่ยวนำลวดขนาดเล็ก (AWG24) พบว่าอุณหภูมิส่งผลกระทบในลักษณะเดียวกันกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ลวดขนาดใหญ่และขนาดกลาง แต่มีการแปรปรวนของค่าความเหนี่ยวนำที่สูงและรวดเร็วกว่าและสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงความถี่ที่กว้างกว่า

ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า ขนาดของขดลวดทองแดงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ขดลวดขนาดเล็กจะมีการแปรปรวนของค่าความเหนี่ยวนำสูงกว่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ขดลวดขนาดใหญ่กว่า

ผลการทดลองที่ 2

ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7(ก)-(ค) และ 8(ก)-(ค) ซึ่งอธิบายผลได้ดังนี้

- 1) ตัวเหนี่ยวนำรอบขดลวดต่ำ มีค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยความถี่ FR เกิดขึ้นที่ 1,200 kHz

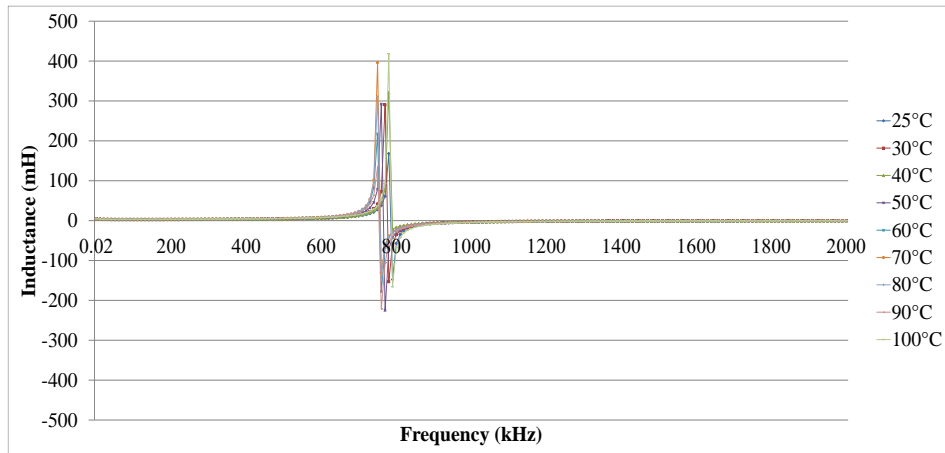
- 2) ตัวเหนี่ยวนำรอบขดลวดปานกลาง มีผลเช่นเดียวกับตัวเหนี่ยวนำรอบขดลวดต่ำ แต่เกิดการ damping ที่ค่าความถี่ FR ที่ 280 kHz ซึ่งต่ำกว่ารอบขดลวดต่ำ
- 3) ตัวเหนี่ยวนำรอบขดลวดสูง มีผลเช่นเดียวกับตัวเหนี่ยวนำรอบขดลวดต่ำและปานกลาง แต่ความถี่ FR เกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำลงอีกที่ 180 kHz แต่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำสูงกว่ารอบขดลวดต่ำและปานกลาง โดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำ ซึ่งเป็นผลจากการ damping ของ ferrimagnetic resonance

ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า จำนวนรอบของขดลวดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนไป โดยตัวเหนี่ยวนำที่มีรอบขดลวดต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำต่ำกว่าตัวเหนี่ยวนำที่มีจำนวนขดลวดสูงกว่า

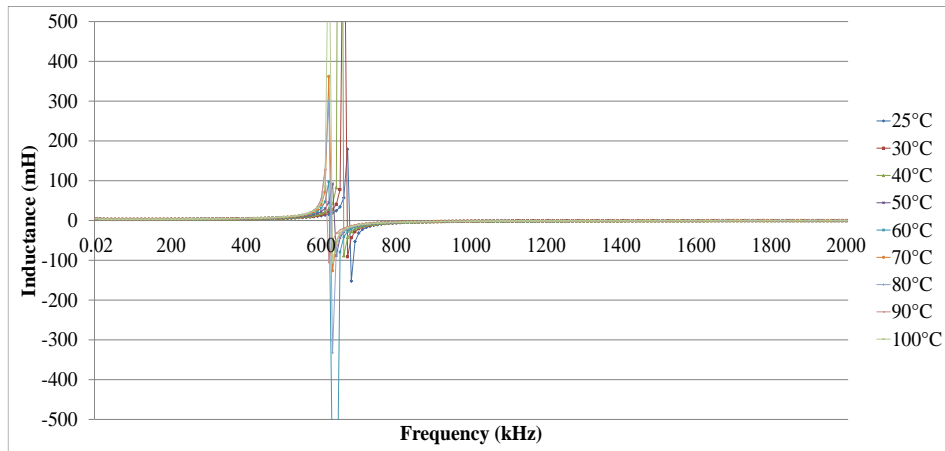
4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอผลของอุณหภูมิช่วง 25–100 °C ต่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ โดยทำการทดลอง 2 ชุด เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิเมื่อตัวเหนี่ยวนำใช้ลวดขนาดต่างกัน (AWG20 22 และ 24) และตัวเหนี่ยวนำที่ใช้จำนวนรอบขดลวดต่างกัน (N 2N และ 3N รอบ) ในช่วงความถี่การทำงาน 20 Hz–20 MHz ซึ่งพบว่า

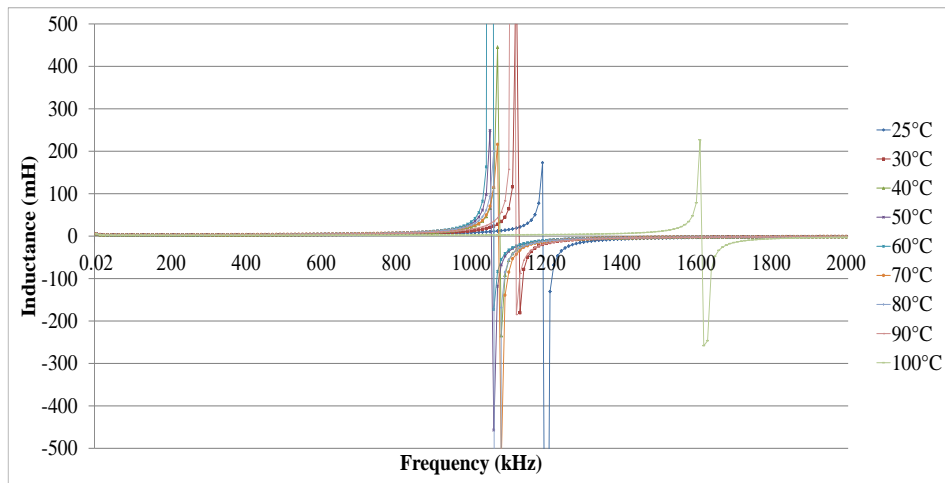
- 1) ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ที่มีที่ค่าความเหนี่ยวนำเริ่มต้นเท่ากันแต่สภาพต้านทานไฟฟ้าภายในขดลวดต่างกัน อุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ขดลวดขนาดเล็กมากกว่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ขดลวดขนาดใหญ่
- 2) ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์ที่ใช้จำนวนรอบขดลวดสูงจะมีเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำสูงกว่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้จำนวนรอบขดลวดต่ำกว่าในสภาวะที่สภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากันในขดลวดที่มีขนาดเท่ากัน ซึ่งเป็นผลจากปรากฏการณ์ ferrimagnetic resonance



(ก) ขดลวดขนาดใหญ่ (AWG20)

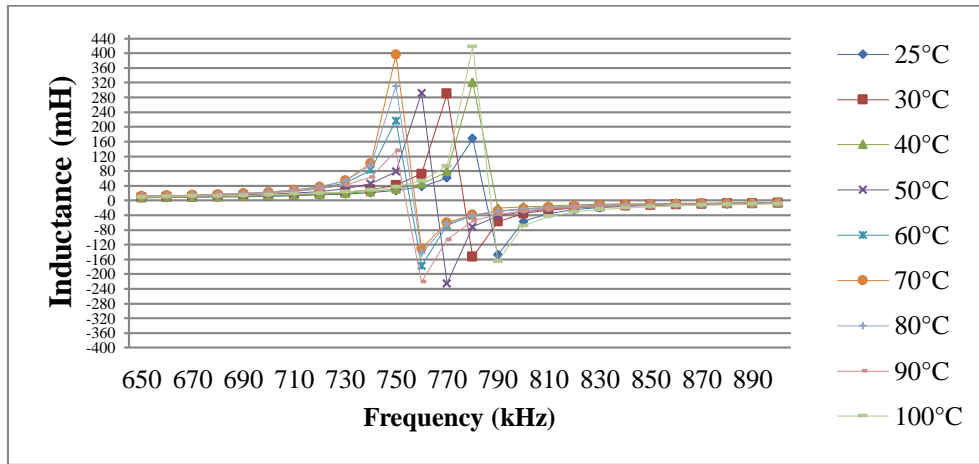


(ข) ขดลวดขนาดกลาง (AWG22)

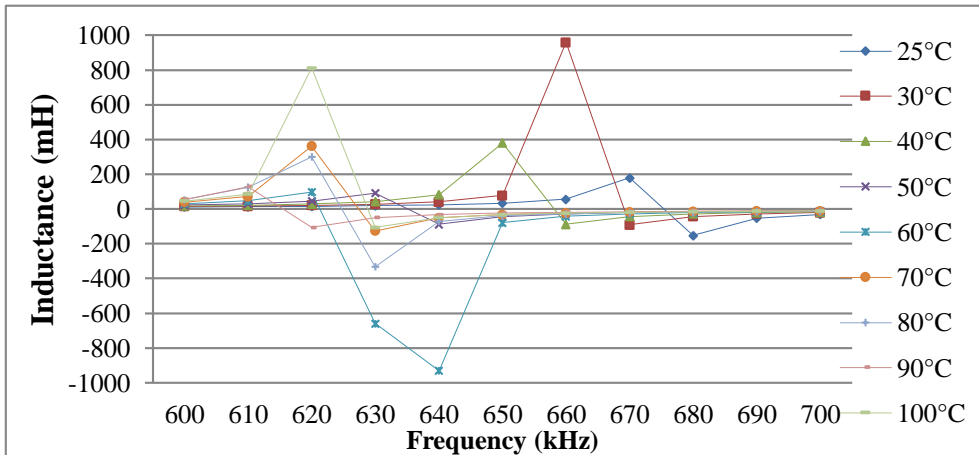


(ค) ขดลวดขนาดเล็ก (AWG24)

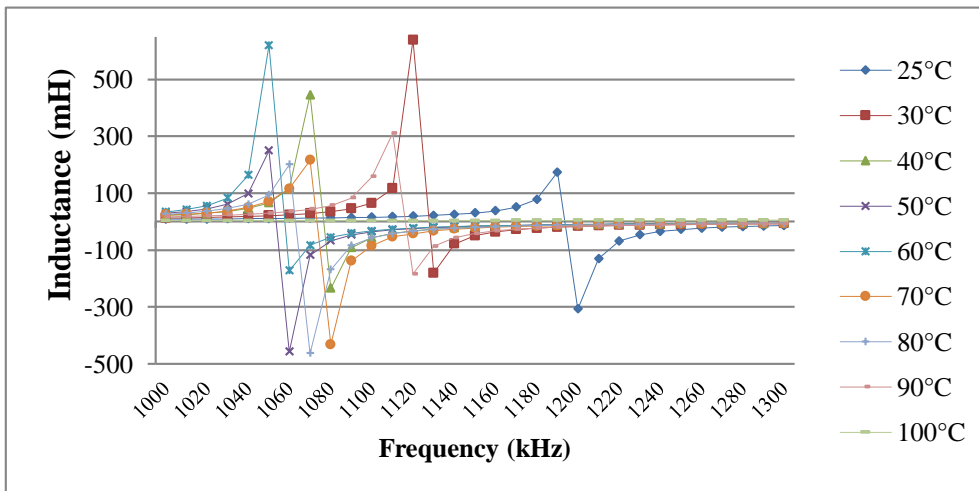
รูปที่ 5 ผลการทดลองค่าความเหนี่ยวนำเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 25 – 100 °C สำหรับช่วงความถี่ตรวจสอบ 20 Hz – 2000 kHz เมื่อตัวเหนี่ยวนำทดสอบมีค่าความเหนี่ยวนำเริ่มต้นเท่ากันแต่ใช้ขนาดลวดต่างกัน: (ก) ขนาดใหญ่ AWG20 (ข) ขนาดกลาง AWG22 และ (ค) ขนาดเล็ก AWG24



(ก) ขดลวดขนาดใหญ่ (AWG20)

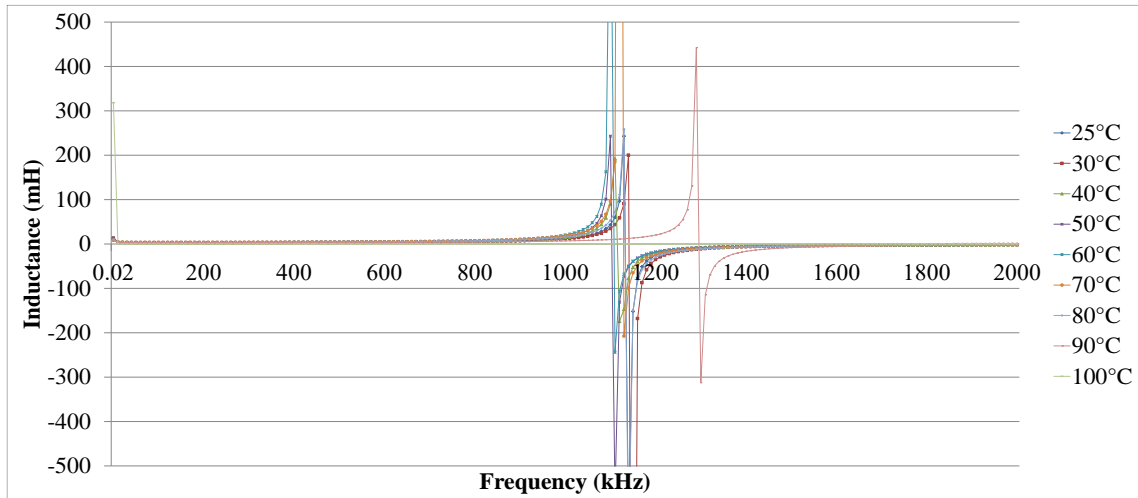


(ข) ขดลวดขนาดกลาง (AWG22)

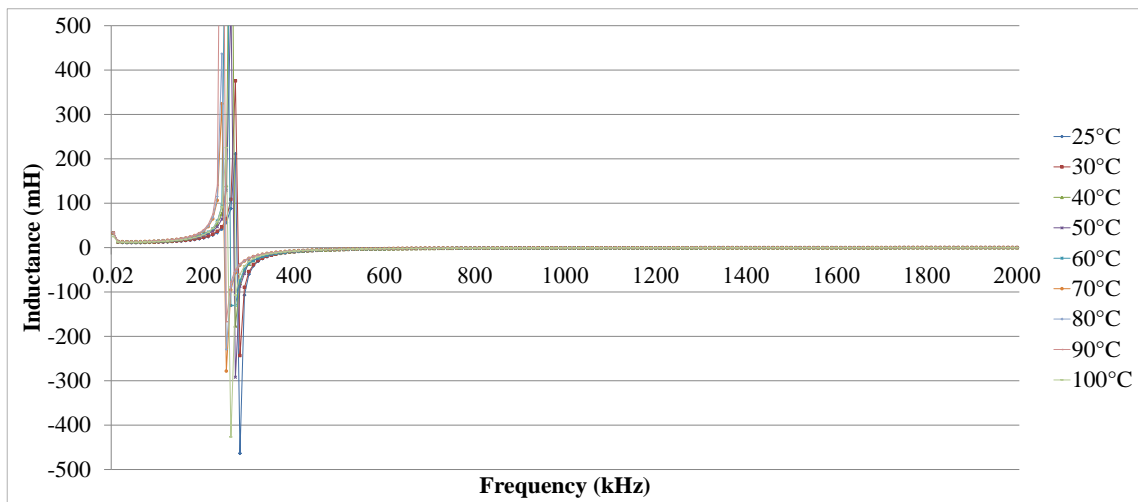


(ค) ขดลวดขนาดเล็ก (AWG24)

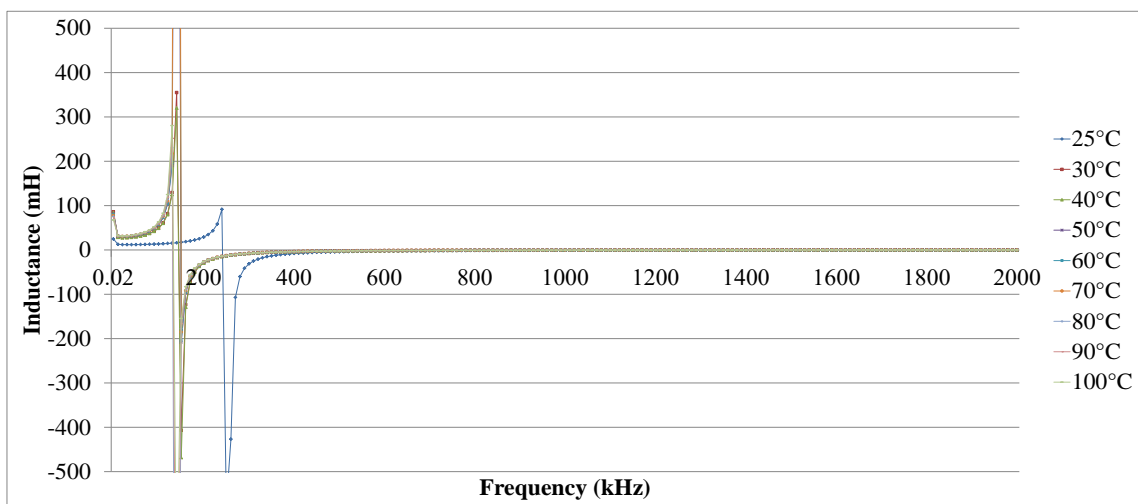
รูปที่ 6 (ส่วนขยาย) ผลการทดลองค่าความเหนี่ยวนำเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 25 – 100 °C สำหรับช่วงความถี่ตรวจสอบ 20 Hz – 2000 kHz เมื่อตัวเหนี่ยวนำทดสอบมีค่าความเหนี่ยวนำเริ่มต้นเท่ากันแต่ใช้ขนาดลวดต่างกัน: (ก) ขนาดใหญ่ AWG20 (ข) ขนาดกลาง AWG22 และ (ค) ขนาดเล็ก AWG24



(ก) จำนวนรอบขดลวดต่ำ (70 รอบ)

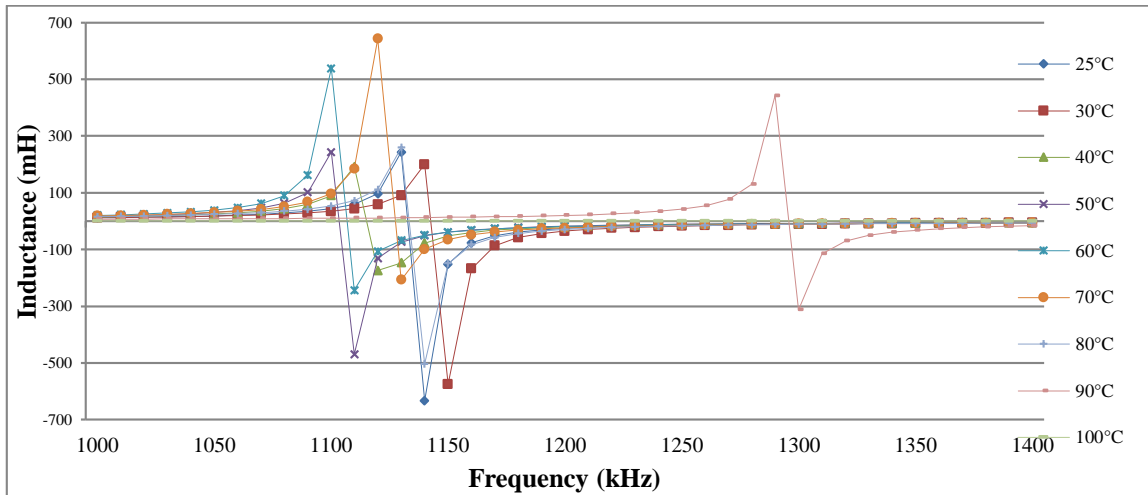


(ข) จำนวนขดลวดปานกลาง (2x70=140 รอบ)

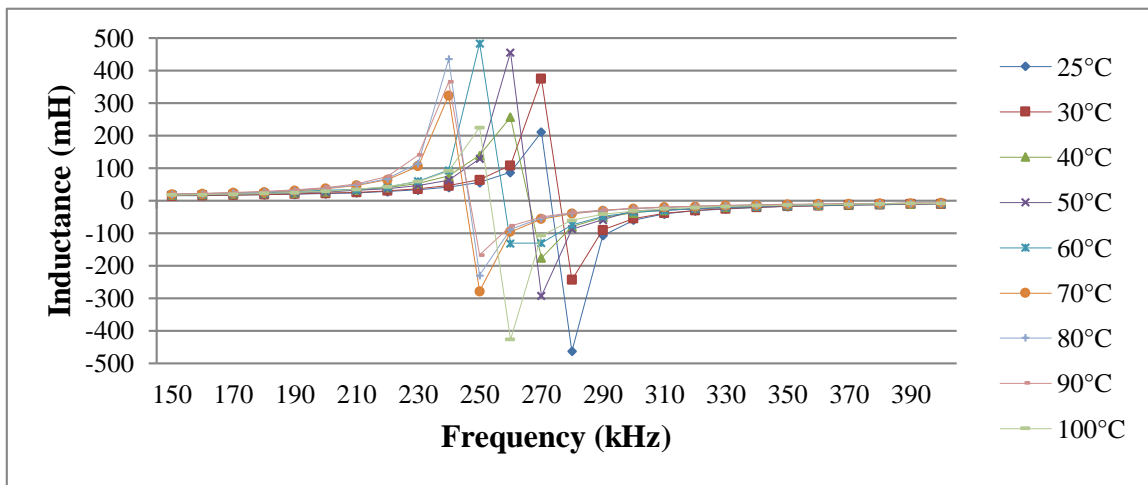


(ค) จำนวนขดลวดสูง (3x70=210 รอบ)

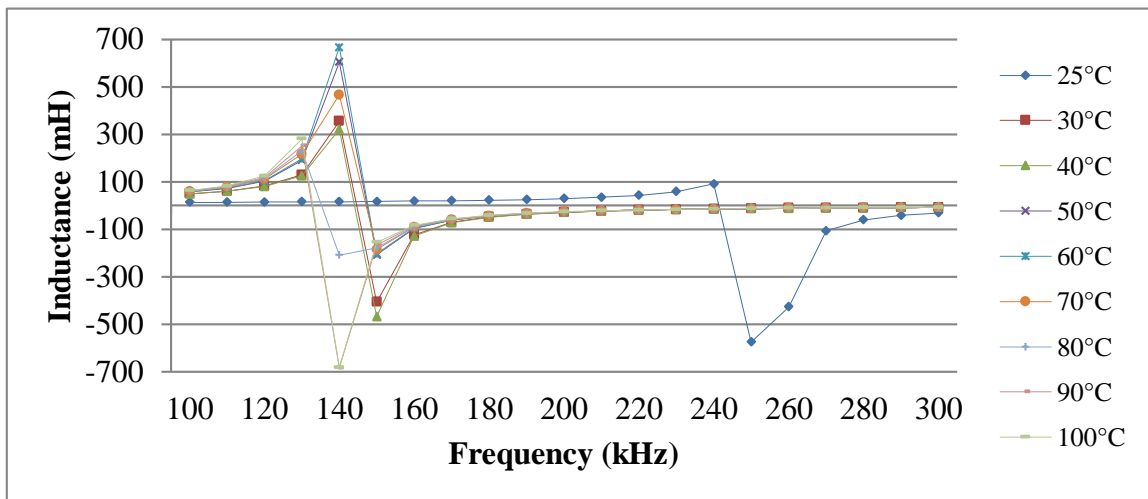
รูปที่ 7 ผลการทดลองค่าความเหนี่ยวนำเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 25 – 100 °C สำหรับช่วงความถี่ที่ตรวจสอบ 20 Hz – 2000 kHz เมื่อตัวเหนี่ยวนำทดสอบมีจำนวนรอบของขดลวดแตกต่างกัน: (ก) 70 รอบ (ข) 140 รอบ และ (ค) 210 รอบ



(ก) จำนวนรอบขดลวดต่ำ (70 รอบ)



(ข) จำนวนขดลวดปานกลาง (2x70=140 รอบ)



(ค) จำนวนขดลวดสูง (3x70=210 รอบ)

รูปที่ 8 (ส่วนขยาย) ผลการทดลองค่าความเหนี่ยวนำเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์แบบทอรอยด์เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 25 – 100 °C สำหรับช่วงความถี่ที่ตรวจสอบ 20Hz-2000kHz เมื่อตัวเหนี่ยวนำทดสอบมีจำนวนรอบของขดลวดแตกต่างกัน: (ก) 70 รอบ; (ข) 140 รอบ และ (ค) 210 รอบ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ หน่วยวิจัยพลังงานรังสีอาทิตย์และแหล่งพลังงานสำรอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ สถานที่ทดลอง และอำนวยความสะดวกในการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kronsbein J, Schoessow GJ. The magnetic field of a knotted toroidal inductor. *Proceedings of the IEEE*. 1967; 55(1): 108–109.
- [2] Tacca HE. Ferrite Toroidal Inductor Design. *IEEE Latin America Transactions*. 2009; 7(6). 630–635.
- [3] Goldman A. *Modern Ferrite Technology*. Boston: Springer US; 2006.
- [4] Mukherjee P, Goswami S. *Ferrite Material for Energy-Meter Current Transformer -T36*. India: Epcos; 2006.
- [5] Reddy MP, et al. Characterization and Electromagnetic Studies on NiZn and NiCuZn Ferrites Prepared by Microwave Sintering Technique. *Materials Sciences and Applications*. 2012; 3(9): 628–632.
- [6] Leiste H. *High frequency permeability with real and imaginary (damping) part using a coplanar measuring head in a frequency range of 30 kHz <math> < f < 6 \text{ GHz}</math>*, Germany: Karlsruhe Institute of Technology; 2018.
- [7] Dorsey P, Vittoria C, Wittenauer M. Novel technique for ferrimagnetic resonance measurement. In: *Digests of InterMag. International Magnetism Conference*; 1992.
- [8] Rudnev V, Loveless D, Cook R, Black M. *Handbook of Induction Heating*. New York: Marcel Dekker; 2003.
- [9] Bockarjova M, Andersson G. Transmission line conductor temperature impact on state estimation accuracy. *Power Tech*. 2007.
- [10] Hubbi W, Wang Y, Zhang W. Effects of inductance variations due to temperature on load-flow results. In: *North American Power Symposium (NAPS)*. Manhattan: KS; 2013. p. 1–4.
- [11] Saleem MJ, Bertilsson K. EMI filter design for high frequency power converters. In: *11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*. Venice; 2012. p. 586–589.
- [12] TDK. *Mn-Zn Ferrite Material Characteristics*. 2019.
- [13] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก.82-2551. กระถางอุตสาหกรรม*; 2552.
- [14] Keysight Technologies. *E4980A Precision LCR Meter 20 Hz to 2 MHz E4980AL Precision LCR Meter 20 Hz to 300 kHz/500 kHz/1 MHz Datasheet*. USA; 2018.