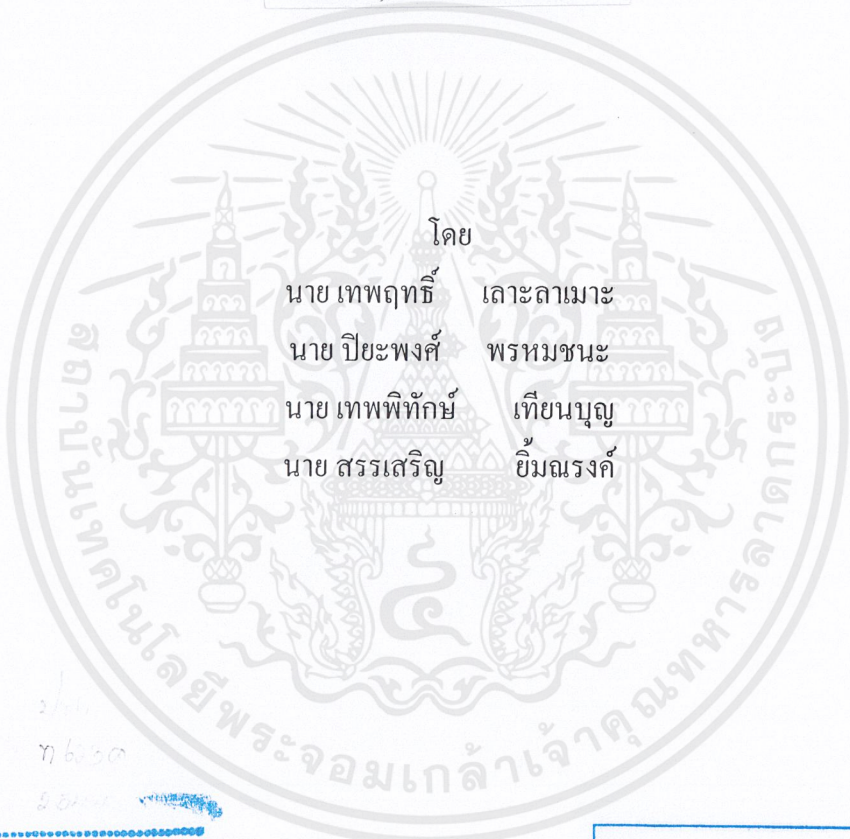


เครื่องพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์

Toroidal Winding Machine



โดย
นาย เทพฤทธิ์ เลาะตาเมาะ
นาย ปิยะพงศ์ พรหมชนะ
นาย เทพพิทักษ์ เทียนบุญ
นาย สรรเสริญ ยิ้มณรงค์

รับ
๗ ๖ ๖ ๐
๕ ๘ ๖ ๖

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 45944
วัน, เดือน, ปี 2 6 ก.พ. 2546

b.....
i.....

ปฏิยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์

Toroidal Winding Machine

ผู้จัดทำ

นาย เทพฤทธิ์	เลาะลาเมาะ	รหัสนักศึกษา 42015087
นาย ปิยะพงศ์	พรหมชนะ	รหัสนักศึกษา 42015101
นาย เทพพิทักษ์	เทียนบุญ	รหัสนักศึกษา 42015129
นาย สรรเสริญ	ยิ้มณรงค์	รหัสนักศึกษา 42015143

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ประภาส ไพรสุวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ สุรินทร์ คำฝอย)

เครื่องพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์

โดย	นาย เทพฤทธิ์	เลาะลาเมาะ	42015087
	นาย ปิยะพงศ์	พรหมชนะ	42015101
	นาย เทพพิทักษ์	เทียนบุญ	42015129
	นาย สรรเสริญ	ยิ้มณรงค์	42015143

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ประภาส ไพรสุวรรณ
อาจารย์ สุรินทร์ คำฝอย

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการสร้างเครื่องพันแกนขดลวดเทอร์รอยด์ โดยเลือกใช้หลักการพันแกนเทอร์รอยด์แบบการคล้องเส้นลวดด้วยแบบ โครงสร้างที่จำกัดทำให้สามารถเลือกใช้ได้กับแกนเทอร์รอยด์และขดลวดที่มีขนาดเดียวกันนั้น แกนเทอร์รอยด์ที่ใช้จะเป็นแกนที่มีย่านความถี่ใช้งานอยู่ที่ 10 กิโลเฮิร์ต - 50 กิโลเฮิร์ต นอกจากนี้ยังได้นำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์ โดยจะช่วยให้การพันมีความรวดเร็วและมีความแม่นยำของจำนวนรอบยิ่งขึ้น จากแกนเทอร์รอยด์ที่พันได้นั้นได้นำมาทดสอบวัดค่า อินดักแตนซ์ แล้วทำการศึกษาและเปรียบเทียบค่า อินดักแตนซ์ ที่ได้จากการพันจริงกับการเปลี่ยนแปลงของความถี่ต่างๆจากวงจร ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ค่าความสัมพันธ์ที่ได้จะนำเสนอในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์รวมไปถึงค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัด โดยได้กล่าวไว้ในส่วนของผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

จากการพัฒนาเครื่องพันแกนขดลวดเทอร์รอยด์นี้ พบว่ายังมีข้อจำกัดอยู่มากอย่างเช่นสามารถพันได้กับแกนและลวดขนาดเดียวกันนั้น รวมไปถึงโครงสร้างและหลักการพันที่จำกัดทำให้ไม่สามารถพันได้กับแกนขนาดเล็กลงได้ เป็นต้น โดยได้กล่าวไว้ในส่วนของแนวทางการพัฒนาเครื่องพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป

TOROIDAL WINDING MACHINE

Teparit	Lohlomoh	
Piyapong	Phromchana	
Theppitak	Tianboon	
Sunsarn	Yimnarong	
Prapat	Paisuwan	Advisor
Surin	Kumfo	Co-Advisor

ABSTRACT

This thesis presents a prototype of toroidal automatic inductance machine. The technique for creating an inductor use inserting a wiring inside a toroid. Basically, the size of a toroid is unchangeable because the infrastructure is limit. Principal of a toriod has frequency response ranging from 10 kHz to 50 kHz. For precision and facility, a microcontroller is used. In addition, the study and comparison of inductance value, resulting from a toroidal automatic inductance machine, are considered to function of frequency. Results obtained from the study, showing in the section of results and conclusions, are illustrated by graphic. Consequently, results have been considered. Comparison of calculation and measurement results has been made. Eventually, development of the toroidal automatic inductance machine will be show in further works section.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 (บทนำ)	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในโครงการ	4
2.1 โครงสร้างเบื้องต้นของแกนเทอร์รอยด์	4
2.1.1 ข้อดีของแกนเทอร์รอยด์	4
2.1.2 ข้อเสียของแกนเทอร์รอยด์	4
2.1.3 ตัวอย่างของแกนแบบ	5
2.1.4 เทอร์รอยด์สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง	6
2.1.5 แกนเฟอร์ไรท์ (Ferrites) และการเลือกใช้	7
2.1.6 การคำนวณหาค่าอินดักแตนซ์ของแกนเทอร์รอยด์	8
2.1.7 การหาค่าอินดักแตนซ์	11
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการทำงานของสเตปมอเตอร์	12
2.2.1 ชนิดของสเตปมอเตอร์	14
2.2.2 ระบบขับ (Drive System)	18
2.3 ทฤษฎีและเนื้อหาไมโครคอนโทรลเลอร์	18
2.3.1 การจัดหาไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51	19
2.3.2 คีย์แพด	22
2.3.3 การใช้งานโมดูลแสดงผล แบบผลึกเหลว (LCD Module)	23
2.3.4 การใช้คำสั่งควบคุม โมดูล LCD	24
2.3.5 การเขียนคำสั่งและข้อมูลให้แก่โมดูล LCD	27
2.3.6 จังหวะการทำงานของ โมดูลLCD	28

	หน้า
2.4 ทฤษฎีเฟืองเบื้องต้น	31
2.4.1 คำจำกัดความ	32
2.4.2 กฎของการจับเฟือง	32
2.4.3 ระยะเวลาขบเฟือง	34
2.4.4 การป้องกันการขัดกันของเฟือง	34
2.4.5 วัสดุสำหรับเฟือง	35
2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นของ อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส	36
2.5.1 การวัดค่าอินดัคแตนซ์ที่ความถี่ต่างๆ โดยใช้ อินเวอร์เตอร์	37
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	39
3.1 กลไกชุดฟันแกนเทอร์รอยด์	39
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดฟันขดลวด	40
3.1.2 การประกอบชุดฟันขดลวด	41
3.2 กลไกชุดจับแกนเทอร์รอยด์	42
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดยึดจับแกนเทอร์รอยด์	43
3.2.2 การประกอบส่วนยึดจับแกนเทอร์รอยด์	43
3.3 ชุดเก็บขดลวด	44
3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดเก็บขดลวด	44
3.3.2 การประกอบชุดเก็บขดลวด	45
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	47
4.1 การทดลองที่ 1	47
4.1.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง	47
4.1.2 วงจรที่ใช้ในการทดลอง	47
4.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	49
4.1.4 ขั้นตอนการทดลอง	49
4.1.5 ผลการทดลอง	49
4.1.6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	54
4.2 การทดลองที่ 2	54
4.2.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง	54
4.2.2 วงจรที่ใช้ในการทดลอง	54
4.2.3 ขั้นตอนการทดลอง	54

	หน้า
4.2.4 ผลการทดลอง	54
4.2.5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	60
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	61
5.1 สรุปโครงการ	61
5.2 บทวิจารณ์และปัญหา	62
5.3 แนวทางพัฒนา	62
5.3.1 การพัฒนาในด้านของชุดฟันและชุดจับแกนเทอร์รอยด์	63
5.3.2 การพัฒนาในด้านของชุดระบบควบคุมเครื่องฟันแกนเทอร์รอยด์	63
ภาคผนวก	65
เอกสารอ้างอิง	76



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากแกนเทอร์รอยด์	1
รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างเครื่องพันแกนเทอร์รอยด์จากต่างประเทศ	2
รูปที่ 2.1 แสดงการวัดขนาดของแกนเทอร์รอยด์	4
รูปที่ 2.2 แสดงภาพตัดขวางตัวอย่างเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเทอร์รอยด์	5
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของสเตปมอเตอร์	12
รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการทำงานของสเตปมอเตอร์แบบ เต็มสเตปหนึ่งเฟส	13
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมี 4 เฟส แต่ละเฟสพันด้วยขดลวดบน 2 ขั้วของสเตเตอร์มุมสเตปเท่ากับ 45 องศา	14
รูปที่ 2.6 แสดงภาพตัดขวางของสเตปมอเตอร์แบบ 3 เฟส ชนิดปรับค่ารีล็กเตนซ์ได้	15
รูปที่ 2.7 แสดง โครงสร้างของสเตปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์	16
รูปที่ 2.8 การคอนโทรลสเตปมอเตอร์	16
รูปที่ 2.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรขับสเตปมอเตอร์	17
รูปที่ 2.10 แสดง โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชในอนุกรม AT89Cxx	19
รูปที่ 2.11 แสดงการจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในอนุกรม AT89Cxx	20
รูปที่ 2.12 แสดงวงจรการต่อสวิทช์แบบต่อเข้าไฟเลี้ยงกับกราวด์และการต่อสวิทช์ แบบเมตริกหรือคีย์แพด	22
รูปที่ 2.13 แสดงรูปร่างและการจัดการโมดูล LCD แบบอักษร	23
รูปที่ 2.14 แสดงไฟว์ชาร์ตและตัวอย่างโปรแกรมย่อยส่งพัลส์เอ็นเอเบิลให้แก่ โมดูล LCD	28
รูปที่ 2.15 แสดง ไฟล์ชาร์ตและตัวอย่างโปรแกรมย่อยการอินนิเชียล LCD	29
รูปที่ 2.16 แสดงวงจรส่วนควบคุมทั้งหมดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-AT89C52	30
รูปที่ 2.17 แสดงวงจรเรกกูเรเตอร์ควบคุมความเร็วของคีมอเตอร์	31
รูปที่ 2.18 แสดง การเรียกชื่อส่วนต่างๆ	31
รูปที่ 2.19 แสดงการทำงานของฟันเฟืองที่ขบกัน	33
รูปที่ 2.20 แสดง ระยะเวลาขบของฟันเฟืองสองอัน	34
รูปที่ 2.21 แสดงแผนภาพบล็อกของอินเวอร์เตอร์แสดงการเชื่อมโยงไฟตรง(DC link)	36

	หน้า
รูปที่ 3.1 แสดง โครงสร้างของชุดฟัน	39
รูปที่ 3.2 แสดง เฟืองหมุนและเฟืองขับ	40
รูปที่ 3.3 แสดงขนาดของชุดฟัน	41
รูปที่ 3.4 แสดงการประกอบชุดฟัน	42
รูปที่ 3.5 แสดง โครงสร้างของชุดจับ	42
รูปที่ 3.6 แสดงขนาดด้านบนของชุดจับแกน	43
รูปที่ 3.7 แสดงการยึดจับแกนเทอร์รอยด์	44
รูปที่ 3.8 แสดง โครงสร้างชุดเก็บลวด	45
รูปที่ 3.9 แสดงการนำชุดเก็บลวดติดที่เฟืองหมุน	45
รูปที่ 3.10 แสดงการเริ่มพันแกนเทอร์รอยด์	46
รูปที่ 3.11 แสดงการพันแกนเทอร์รอยด์	46
รูปที่ 4.1 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส โดยใช้มอสเฟต	47
รูปที่ 4.2 แสดงวงจรไดรฟ์อินเวอร์เตอร์	48
รูปที่ 5.1 แสดงเครื่องพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์ที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว	61

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างของแกนแบบต่างๆ	5
ตารางที่ 2 แสดงการใช้งานของแกนเทอร์รอยด์ขนาดต่างๆ	9
ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติของวัสดุของแกนเทอร์รอยด์	10
ตารางที่ 4 แสดงการทำงานของขาร _s ,R/WและE	24
ตารางผลการทดลองที่ 1	52
ตารางผลการทดลองที่ 2	58



บทที่ 1

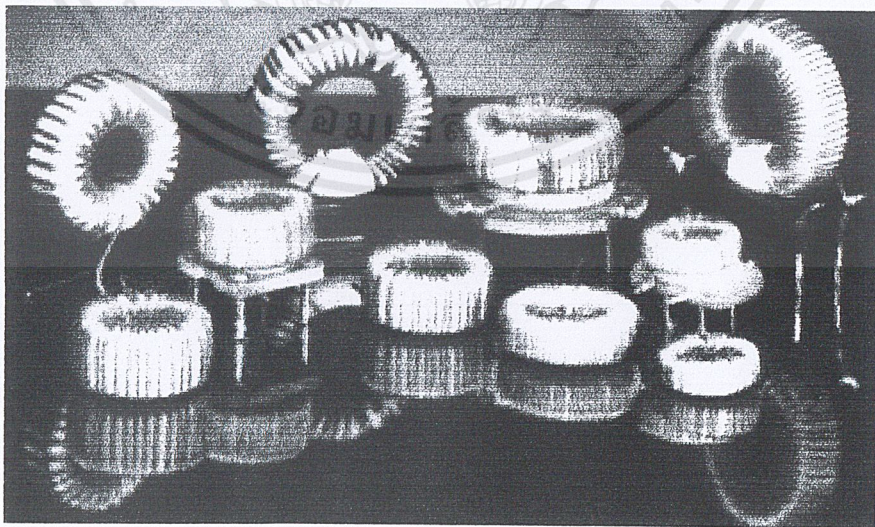
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์ในประเทศไทยนั้นยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น ความยุ่งยากในการพัน ค่าใช้จ่ายในการพันค่อนข้างสูงทำให้ราคาของผลิตภัณฑ์เองสูงตามไปด้วย ทั้งๆที่เทอร์รอยด์นั้นมีข้อดีหลายประการ เช่น ค่าความเป็นเชิงเส้นของอินดักแตนซ์ที่ดี สามารถลดปัญหาด้านความร้อนและเสียงได้และที่สำคัญคือสามารถลดปัญหาการรบกวนจากเส้นแรงแม่เหล็กทั่วไหลได้เป็นอย่างดีซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการเสถียรภาพสูง เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ และงานด้านการแพทย์ เป็นต้น

ในต่างประเทศได้มีการพัฒนาการพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์มาเป็นเวลานานแล้ว ซึ่งมีความก้าวหน้าไปมาก โดยขนาดการผลิตจะเป็นไปในรูปอุตสาหกรรมสามารถผลิตจำหน่ายต่างประเทศได้ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตใช้เทคโนโลยีขั้นสูง โดยนำเอาระบบไมโครโปรเซสเซอร์มาสั่งการทำงานทั้งหมดและสามารถพันได้สวยงาม เรียบร้อยและที่สำคัญคือความแม่นยำและรวดเร็ว

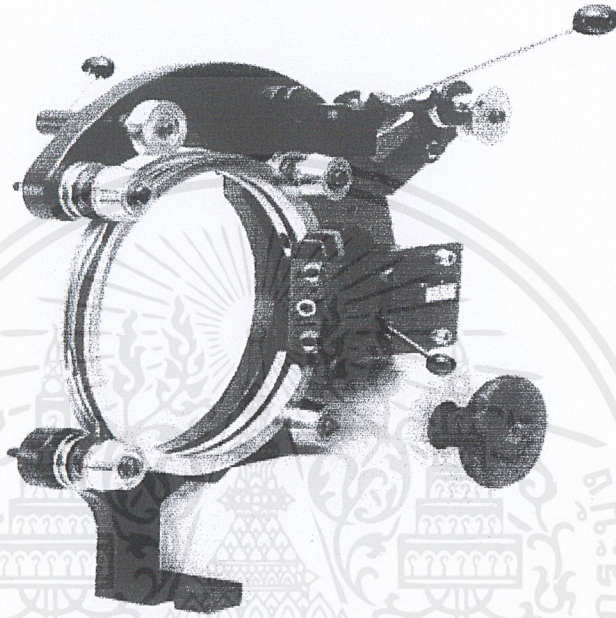
แต่ในประเทศไทยนั้นยังไม่มีผู้ผลิตคิดค้นเครื่องพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์ขึ้นมาใช้เอง โดยมีแต่นำเข้าเครื่องพันจากต่างประเทศมาพันแกนเทอร์รอยด์ขายในประเทศ ซึ่งยังมีต้นทุนที่สูงเนื่องจากเครื่องพันนั้นมีราคาที่สูงมาก หากนำปัญหานี้มาศึกษาและหาวิธีสร้างเครื่องพันแกนเทอร์รอยด์ได้จริงในราคาที่ต่ำลง ผลิตภัณฑ์มีราคาถูกลงทำให้เทอร์รอยด์เป็นที่นิยมและใช้แทนผลิตภัณฑ์แบบเก่าที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า ซึ่งจะเป็นผลดีกับทั้งตัวผู้ใช้งานและกับประเทศอีกด้วย



รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากแกนเทอร์รอยด์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะสร้างเครื่องพ่นขดลวดแกนเทอร์รอยด์
- 1.2.2 ศึกษารูปแบบการพ่นที่เหมาะสมและออกแบบมาเป็นชุดต้นแบบ
- 1.2.3 เพื่อสร้างเครื่องพ่นขดลวดแกนเทอร์รอยด์โดยการควบคุมแบบอัตโนมัติมาใช้ และให้มีการพ่นที่ดีกว่าเดิม(งานวิจัยปี 43)
- 1.2.4 เพื่อนำเสนอแนวทาง และการพัฒนารูปแบบการพ่นต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างเครื่องพ่นแกนเทอร์รอยด์จากต่างประเทศ

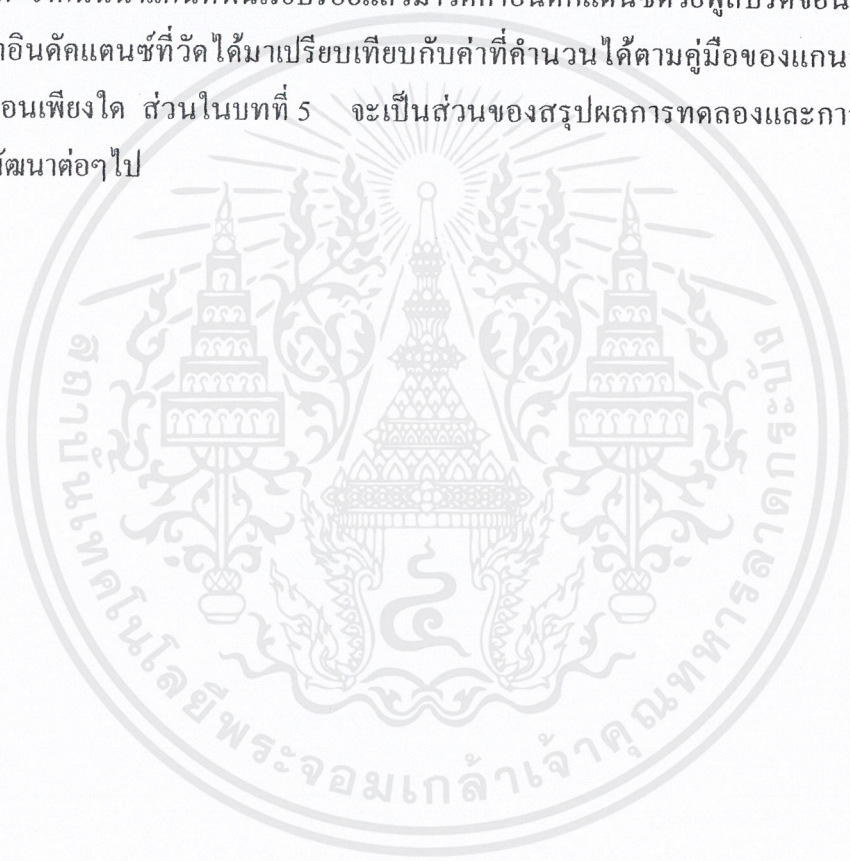
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาต่อจากงานวิจัยเมื่อปี 2543 ซึ่งจะต้องเป็นต้นแบบของการพัฒนาต่อไปแต่ละพัฒนาจากต้นแบบเดิมดังต่อไปนี้

- 1.3.1 พัฒนาชุดหล่อลื่นให้ดีกว่าเดิมโดยนำเฟืองและลูกปืนมาใช้
- 1.3.2 ออกแบบชุดพ่นขดลวดใหม่ โดยแก้ไขปัญหาจากงานวิจัยเดิมซึ่งจะไม่ทำให้เกิดขดลวดค้างอยู่ด้านในชุดพ่นซึ่งขดลวดที่ใช้จะใช้นขนาดของลวดเบอร์เดียวเท่านั้น
- 1.3.3 ชุดจับแกนเทอร์รอยด์จะทำการออกแบบให้มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยใช้โครงสร้างที่ทำจากโลหะและมีมอเตอร์ที่มีแรงขับสูงขึ้นสามารถพ่นโดยไม่เกิดการกระตุก โดยจะใช้ได้กับแกนขนาดเดียวเท่านั้น (ดูขนาดแกนได้จากส่วนของการทดลอง ในบทที่ 3)
- 1.3.4 นำระบบควบคุมอัตโนมัติมาใช้เพื่อความสะดวกและทันสมัย
- 1.3.5 พัฒนาการพ่นให้มีจำนวนรอบที่แม่นยำเป็นระเบียบและรวดเร็ว

1.4 วิธีการดำเนินการ

ปฏิยานิพนธ์นี้จะเริ่มต้นจากการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของรูปแบบการพันแบบต่างๆ เพื่อให้ได้รูปแบบการพันที่เหมาะสมที่สุดรวมไปถึงทฤษฎีแบบต่างๆ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 2 จากนั้นจะเป็นการสร้างในส่วนของกลไกในการพัน และการสร้างวงจรควบคุมในการพันทั้งหมด ซึ่งก็จะมีส่วนประกอบหลักๆ คือชุดพัน ส่วนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งในส่วนของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ จะเป็นเพียงอุปกรณ์ช่วยในการวัดค่าอินดักแตนซ์เท่านั้น หลังจากนั้นจะทำอุปกรณ์ทั้งหมดมาประกอบเข้าด้วยกัน แล้วจึงทำการทดลองโดยผลการทดลองจะกล่าวถึงในบทที่ 4 ซึ่งในการทดลองจะทดลองการพันโดยสั่งงานผ่านคีแพค จากนั้นนำแกนที่พันเรียบร้อยแล้วมาวัดค่าอินดักแตนซ์ด้วยฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แล้วนำค่าอินดักแตนซ์ที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ตามคู่มือของแกนว่ามีความคลาดเคลื่อนเพียงใด ส่วนในบทที่ 5 จะเป็นส่วนของสรุปผลการทดลองและการนำเสนอแนวทางพัฒนาต่อไป

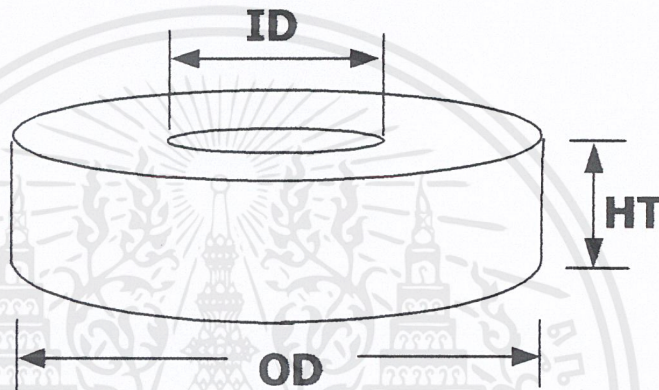


บทที่ 2

ทฤษฎีที่ใช้ในโครงการ

2.1 โครงสร้างเบื้องต้นของแกนเทอร์รอยด์

ในส่วนนี้จะรวบรวมบทความที่เกี่ยวข้องกับแกนเทอร์รอยด์ซึ่งเป็นเพียง ตัวอย่างแกนเทอร์รอยด์และสูตรการคำนวณอย่างคร่าวๆรวมไปถึงชนิดต่างๆของแกนแบบที่ใช้กับไฟฟ้า กระแสตรงเทอร์รอยด์ (Toroidal) มีลักษณะเป็นแกนวงกลมปิดมีรูปร่างคล้ายโดนัท(doughnuts) ดังรูป



รูปที่ 2.1 แสดงการวัดขนาดของแกนเทอร์รอยด์

โดย ID คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน
OD คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก
HT คือ ความสูง

2.1.1 ข้อดีของแกนเทอร์รอยด์

- 2.1.1.1 ใช้กับงานที่ต้องใช้ความนำเชื่อถือสูง
- 2.1.1.2 จะไม่มีรอยต่อของแกนลดปัญหา Eddy current
- 2.1.1.3 สามารถลดความชื้นซาบของเส้นแรงแม่เหล็กลงได้
- 2.1.1.4 การใช้งานหลากหลายมีขนาดให้เลือกมากมาย
- 2.1.1.5 ลดปัญหาการสั้นสะเทือนและเสียงฮัมลงได้

2.1.2 ข้อเสียของแกนเทอร์รอยด์

- 2.1.2.1 การสร้างหรือการพันยุ่งยาก
- 2.1.2.2 ราคาค่อนข้างสูง

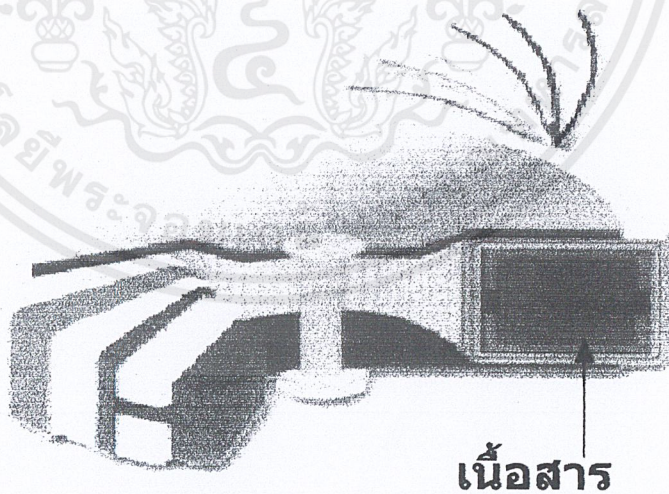
2.1.3 ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างของแกนแบบต่างๆ

TYPE	COLOR	A_L (μ H)	Freq. Range
T_{50-26}	Yel_Wri	320	Power freq
T_{50-3}	Gray	175	50 KHz to 500 KHz
T_{50-1}	Blue	100	500 KHz to 5 KHz
T_{50-2}	Red	57	2 KHz to 30 KHz
T_{50-6}	Yellow	47	10 KHz to 50 KHz
T_{50-10}	Black	32	30 KHz to 100 KHz

จากตารางข้อมูลข้างบน สามารถออกแบบการสร้าง Induction โดย A_L เป็น factor การซึมซาบของเส้นแรงแม่เหล็ก (inductance per 100 turn)

หมายเหตุ ข้อมูลจาก <http://www.electronics-tutorials.com/basics/torroids.html>

ในการคำนวณหาจำนวนรอบของการพัน L นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า A_L หรืออาจจะเป็นค่าคงที่อื่นๆ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตว่าใช้แกนชนิดใด



รูปที่ 2.2 แสดงภาพตัดขวางตัวอย่างเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเทอร์รอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 เทอร์รอยด์สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง

(Toroidal Powder core Selection with DC current)

เทอร์รอยด์จะมีด้วยกัน 2 แบบ คือ Powdered Iron และ Ferrites ซึ่งหัวข้อนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบของสารที่ใช้ทำแกน และ ค่าทางเทคนิคต่างๆ รวมไปถึงการนำไปใช้งานในแต่ละแบบ

2.1.4.1 MPP core: Molybdenum Perm alloy Powder cores

มีส่วนผสมของ Nikel 81%, Molybdenum Alloy 2%, Iron 17% แกนแบบนี้จะเป็นผงละเอียดอัดแน่นเป็นแท่งวงกลมแทนการใช้แผ่น laminate ซึ่งสามารถลดปัญหา eddy current ลงได้โดยขนาดของแกนแบบนี้มีตั้งแต่ 0.1 – 0.5 inches (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก)

ข้อมูลทางเทคนิคพิเศษที่มีความสำคัญ ดังนี้

- 1 ความหนาแน่นของฟลักซ์อิ่มตัวสูง (0.7 T)
- 2 ใช้ทำ Pulse Transformer
- 3 Differential Mode EMI noise filters
- 4 Fly back Transformers
- 5 เป็นอุปกรณ์ช่วยในการประหยัดพลังงานเมื่อใช้ในงานกระแสตรงสูงๆ

2.1.4.2 Iron Powder Cores

แกนแบบนี้จะเป็นแกนเหล็กโดยจะมี 2 แบบ คือ Hydrogen – reduced irons และ Carbonyl irons แกนแบบ iron powder ใช้กับงานด้านออกดีโอแต่ไม่เหมาะกับงานในวงจรที่ต้องการค่า Q สูงๆ แบบ Hydrogen – reduced irons ซึ่งมีความต้านทานต่ำ แกนแบบนี้มีค่าซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็ก

(permeabilities) สูง มีค่าความสูญเสียต่ำที่ความถี่ต่ำ แต่ค่าความสูญเสียจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แกนแบบนี้สามารถนำไปใช้ได้กับ Switching power supplies สำหรับแกนแบบ Carbonyl iron แกนแบบนี้จะมีความต้านทานสูงกว่าแบบแรกเนื่องจากรอยต่อของเหล็กซึ่งเป็นรอยต่อเล็กๆมีขนาดประมาณ 3 – 5 μm สามารถใช้กับงานความถี่สูงๆ , ใช้กับงานที่ต้องการความทนทาน , สามารถรักษาเสถียรภาพในสภาวะต่างๆ เช่น ความถี่อุปกรณ์ต่างๆ และ สัญญาณต่างๆ ที่สำคัญเหมาะกับวงจรที่ต้องการค่า Q สูงๆ (high Q)

จุดเด่นของแกนแบบนี้คือ มีจุดอิ่มตัวที่สูง แต่ข้อเสียของแกนแบบนี้ คือ เมื่อมีความถี่สูงขึ้น ค่าการสูญเสียก็จะมากขึ้นด้วย เพราะฉะนั้นแกนแบบนี้ จึงมีราคาที่ไม่สูงมากนักซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากกว่าแบบแรก

2.1.4.3 Inductor

เราสามารถนำแกนเฟอร์ไรท์ (Ferrites) มาพันนำเป็น Inductor (L) เพื่อนำมาประกอบใช้ในวงจรโดย L จะทำหน้าที่เป็น filter หลักการของ L เมื่อมีกระแส i_L ไหลผ่าน กระแส i_L จะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้

$$\frac{1}{T} \int_0^T V_L dt = 0$$

หมายเหตุ ข้อมูลจาก T. mclymam anal Conel Wm , Transformers and Induction Design Hand Book

2.1.5 แกนเฟอร์ไรท์ (Ferrites) และการเลือกใช้

แกนเฟอร์ไรท์จะผลิตออกมาหลายแบบทั้งแบบแกนเทอร์รอยด์และแบบแกน EI , EE เป็นต้น โดยชนิดเนื้อสารของแกนเฟอร์ไรท์ที่แตกต่างกัน จะให้คุณสมบัติทางเดินแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์แตกต่างกันด้วยถึงแม้ว่าจะมีขนาดและลักษณะเดียวกันก็ตาม แกนเฟอร์ไรท์แต่ละแบบจะมีคู่มือซึ่งเป็นข้อมูลของเนื้อสารที่ให้มากับแกนเฟอร์ไรท์นั้น จะต้องมีการละเอียดของเนื้อสารใช้เสมอ ซึ่งข้อมูลที่สำคัญคือ เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Curve) และ ค่าสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์

2.1.5.1 เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Curve)

จะเป็นเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้นในแกน กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดที่พันบนแกน โดยค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) มีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดๆหนึ่งซึ่งค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) จะเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ยังมีอยู่ก็ตามซึ่งเรียกว่า “ แกนเริ่มมีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก ” (saturation)

ดังนั้นการเลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์จะต้องระวังไม่ทำให้แกนเกิดการอิ่มตัวขึ้นได้ โดยทั่วไปการกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกนขณะทำงานมีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก(B) สูงสุดก่อนอิ่มตัว เพื่อความปลอดภัย

2.1.5.2 การสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์

การสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์จะทำให้แกนร้อน ซึ่งมีสาเหตุ 2 ประการ คือ การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิสของแกน (Hysteresis Loss) และการสูญเสียเนื่องจาก กระแสไหลวนภายในแกน (eddy current Loss)

หมายเหตุ ข้อมูลจาก บริษัท เอนเทลไทย จำกัด , เทคนิคการออกแบบสวิตซ์ชิงพาวเวอร์ซัพพลาย

2.1.6 การคำนวณหาค่าอินดักแตนซ์ของแกนเทอร์รอยด์

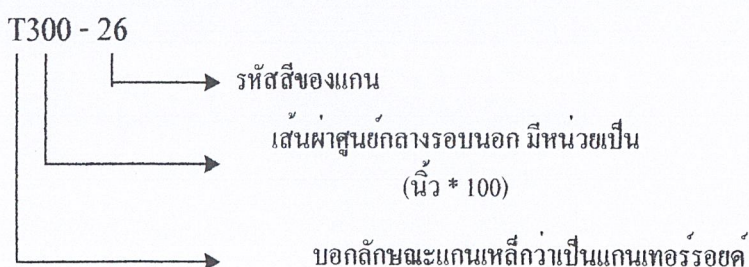
ปกติกแกนเทอร์รอยด์จะมีหลายขนาดซึ่งแต่ละขนาดจะเหมาะสมกับงานแต่ละชนิด และแต่ละขนาดยังแบ่งเป็นอีกหลายเบอร์ตามคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งจะแบ่งได้ดังนี้

- 2	มีรหัสสีเป็น	Red/Clear
- 8	มีรหัสสีเป็น	Yellow/Red
-14	มีรหัสสีเป็น	Black/Red
-18	มีรหัสสีเป็น	Green/Red
-26	มีรหัสสีเป็น	Yellow/White
-30	มีรหัสสีเป็น	Green/Gray
-34	มีรหัสสีเป็น	Gray/Blue
-35	มีรหัสสีเป็น	Yellow/Gray
-38	มีรหัสสีเป็น	Gray/Black
-40	มีรหัสสีเป็น	Green/Yellow
-45	มีรหัสสีเป็น	Black/Black
-52	มีรหัสสีเป็น	Green/Blue

ส่วนแกนเทอร์รอยด์แบ่งเป็นขนาดต่างๆได้คือ T14 , T16 , T20 , T22 , T25 , T26 , T27 , T30 , T32 , T37 , T38 , T40 , T44 , T50 , T51 , T57 , T60 , T68 , T69 , T72 , T80 , T90 , T94 , T106 , T124 , T130 , T131 , T132 , T141 , T150 , T157 , T175 , T184 , T200 , T201 , T224 , T225 , T249 , T250 , T300 , T400 , T520 , T650

ซึ่งปัจจุบันในเมืองไทยจะมีไม่ครบทุกขนาด เนื่องจากแกนเทอร์รอยด์ยังไม่เป็นที่นิยมใช้มากนัก ที่นิยมก็ใช้แต่เฉพาะขนาดเล็กและขนาดกลาง ส่วนขนาดใหญ่ไม่ค่อยมีใช้

การอ่านรหัสของแกนเทอร์รอยด์ (ในงานนี้ใช้แกนเทอร์รอยด์เบอร์ T 300 - 26)



ตารางที่ 2. แสดงการใช้งานของแกนเทอร์รอยด์ขนาดต่างๆ

Material Applications													
Typical Application	-2	-8	-18	-26	-28	-30	-33	-34	-35	-38	-40	-45	-52
Light Dimmer Chokes				X						X	X	X	
60 Hz Differential-mode EMI Line Chokes				X						X	X	X	X
DC Chokes: < 50kHz or lower Et/N				X	X	X	X	X	X	X	X	X	
DC Chokes: \geq 50kHz or higher Et/N	X	X				X		X	X				X
Power Factor Correction Chokes: < 50kHz				X	X	X	X	X	X		X		
Power Factor Correction Chokes: \geq 50kHz	X	X	X			X		X	X				X
Resonant Inductors: \geq 50kHz	X												

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3. แสดงคุณสมบัติของวัสดุของแกนเทอร์รอยด์

General Material Properties for RF Materials						
Material Mix No.	Basic Iron Powder	Material Permeability μ	Temperature ¹ Stability (ppm /°C)	Relative Cost	Toroidal Code	Color
-1	Carbonyl C	20	280	2.7	Blue/Clear	
-2	Carbonyl E	10	95	1.7	Red/Clear	
-3	Carbonyl HP	35	370	2.5	Grey/Clear	
-4	Carbonyl J	9.0	280	2.0	Blue/White	
-6	Carbonyl SF	8.5	35	2.0	Yellow/Clear	
-7	Carbonyl TH	9.0	30	2.0	White/Clear	
-8	Carbonyl GQ4	35	255	2.5	Orange/Clear	
-10	Carbonyl W	6.0	150	4.7	Black/Clear	
-12*	Carbonyl Oxide	4.0	170**	1.5	Green/White	
-15	Carbonyl GS6	25	190	3.1	Red/White	
-17	Carbonyl	4.0	50	3.1	Blue/Yellow	
-42	Hydrogen Reduced	40	550	1.4	Blue/Red	
-0	Phenolic	1	0	1.0	Tan/Tans	

¹ Temperature stability values, averaged from -55°C to +125°C are listed for closed magnet structures.

*Non-linear

**Mix 17 was developed as a temperature stable alternative to mix 12 and is recommended for all new designs.

Note: For information an Mix #'s 8, 18, 26, 28, 33, 40 and 52 see Micrometals Catalog 4 for Power Conversion and Line Filter Applications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7 การหาค่าอินดักแตนซ์

$$\text{สูตร} \quad \text{Turn} = \sqrt{\frac{L(nH)}{A_L(nH / N^2)}}$$

โดย T = จำนวนรอบที่ต้องพัน (รอบ)

L = ค่าอินดักแตนซ์ที่ออกแบบ (nH)

และ A_L เป็นค่าคงที่ดูจากคู่มือของแกนเหล็ก โดยต้องรู้เบอร์ของแกนเหล็ก แล้วจึงดู

ในตารางแสดงลักษณะแกนเหล็ก

หมายเหตุ ในกรณีที่ใช้กับความถี่ต่างๆค่า A_L จะต้องคูณด้วยค่า $\% \mu$ โดยดูจากกราฟที่ภาคผนวก

ตัวอย่าง ต้องการอินดักแตนซ์ 2 mH ใช้กับแกนเหล็กเบอร์ T300-26

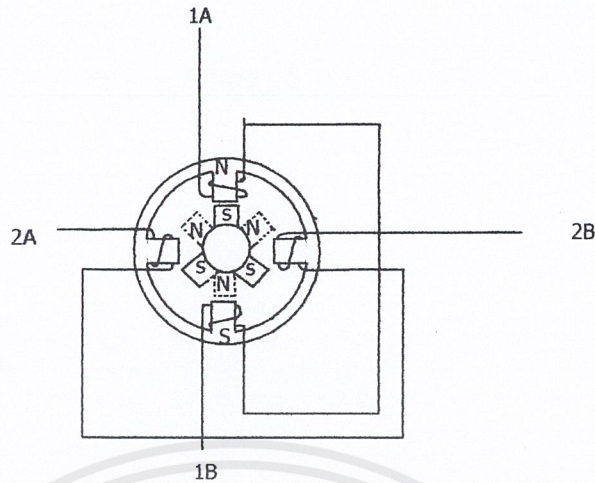
จากตารางลักษณะของแกนเหล็กของ T300-26 $A_L = 80 \text{ nH/N}^2$

$$\text{Turn} = \sqrt{\frac{2000000}{80}} = 158.11 \approx 158 \text{ รอบ}$$

ค่า A_L นั้นจะมีค่าความผิดพลาด ซึ่งในทางปฏิบัติจะทำให้ค่า L ที่ได้เกิดการผิดพลาดได้ ในกรณีที่เป็นการออกแบบ DC INDUCTOR มีวิธีหาคือ

1. หาค่า energy storage (พลังงานสะสม : w) จากสูตร $\frac{1}{2} LI^2$ (μj)
2. นำค่า w ไปหาค่า Ampere- Turn(NI) จากกราฟของ dc energy storage กับ Ampere-Turn ของแกนเหล็กที่ใช้ จากภาคผนวก
3. หาจำนวนรอบโดยนำค่า NI หาค่าด้วยกระแส

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการทํางานของสเตปมอเตอร์



รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างของสเตปมอเตอร์

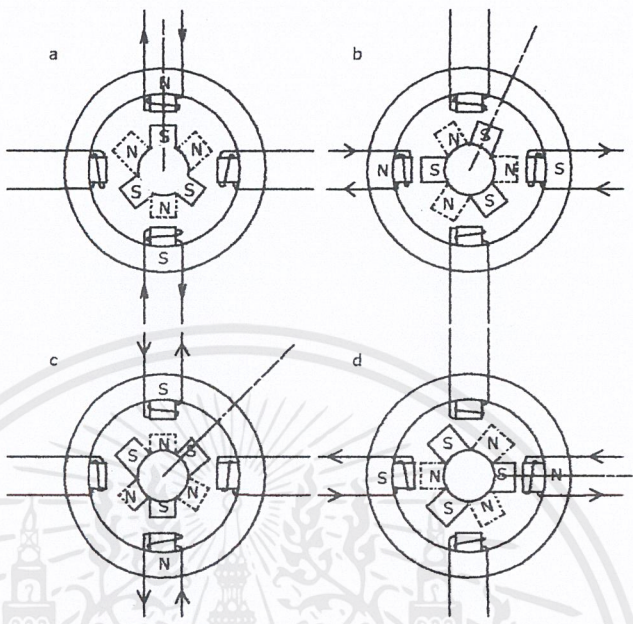
หลักการทํางาน

สเตปมอเตอร์สามารถแบ่งโครงสร้างทางกายภาพออกเป็น 2 ส่วน คือ สเตเตอร์ (Stator) และ โรเตอร์ (Rotor) ตัวสเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่ ประกอบด้วยขดลวดทองแดงที่พันอยู่รอบแกนเหล็กเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กเมื่อมีการจ่ายกระแสผ่านขดลวด ส่วนโรเตอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กทรงกลม และที่ผิวรอบนอกมีลักษณะเป็นซีกฟันซึ่งทำจากแม่เหล็กถาวรดังรูปที่ 2.3.

เมื่อยังไม่มีการจ่ายกระแสให้กับขดลวดมอเตอร์ ซีกฟันอันใดอันหนึ่งของโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันกับซีกฟันอันใดอันหนึ่งของสเตเตอร์ ทั้งนี้เพราะแม่เหล็กถาวรที่ตัวของโรเตอร์พยายามที่จะทำให้ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Reluctance) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุด และจากรูปที่ 2.3. เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหนือ และ ได้ขึ้นมา 2 คู่ ทั้งที่ตัวสเตเตอร์และโรเตอร์ดังรูป ค่าทอร์กที่ทำให้ตัวโรเตอร์สามารถยึดอยู่ในตำแหน่งดังกล่าวนี้เรียกว่า ดิเท็นทอร์ก (Detent Torque) ซึ่งการที่จะทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่ขณะ ไม่ได้จ่ายกระแสให้กับขดลวดของมอเตอร์นั้นคือจะต้องออกแรงให้มากกว่าค่า ดิเท็นทอร์ก จึงจะทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ ในรูปที่ 2.3. นั้นมี 12 ตำแหน่ง ที่สามารถเกิดดิเท็นทอร์กได้

เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดที่อยู่ในสเตเตอร์คู่ใดคู่หนึ่ง ดังรูปที่ 2.4. (a) จะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้ ที่ซีกฟันของตัวสเตเตอร์ซึ่งจะดูดซีกฟันของตัวโรเตอร์ที่ขั้วแม่เหล็กที่ต่างกันที่อยู่ใกล้ที่สุดเข้าไว้ ตำแหน่งนี้เรียกว่า สเตเบิลโพสิชัน (Stable Position) ของโรเตอร์

จะมีจำนวนตำแหน่งเท่ากับจำนวนขั้วของ โรเตอร์ และแรงที่จะทำให้ โรเตอร์เปลี่ยนตำแหน่ง ไปจากตำแหน่ง Stable Position ได้ เรียกว่า Holding Touque (โขลคิงทอว์ค)



รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการทำงานของสเตปมอเตอร์แบบ เต็มสเตปหนึ่งเฟส

เมื่อสับเปลี่ยนกระแสให้กับขดลวดไปยังอีกขดหนึ่ง เนื่องจากขดลวดวางอยู่ในตำแหน่ง ที่ต่างกัน 90 องศา ก็จะทำให้ตัวสเตเตอร์ดึงดูดขั้วของตัวโรเตอร์อีกขั้วหนึ่งที่อยู่ใกล้ที่สุดเข้าไว้ ซึ่งจะทำให้ตัวโรเตอร์เคลื่อนที่ไป 1 สเตป หรือ 30 องศา ดังรูปที่ 2.4.(b) จากนั้นก็จ่ายกระแส ให้ขดลวดชุดแรก โดยเปลี่ยนทิศทางกระแสจ่ายกระแสเข้าให้ตรงข้ามกับครั้งแรกซึ่งจะทำให้ตัวโร เตอร์เคลื่อนที่ไปอีก 1 สเตป ดังรูปที่ 2.4

(c) หลังจากนั้นก็ไปจ่ายให้กับขดลวดชุดที่สอง โดยกลับทิศทางของการจ่ายกระแสไหลเข้าทำ ให้โรเตอร์หมุนไป 90 องศา ดังรูปที่ 2.4.(d) หากป้อนกระแสให้ขดลวดชุดแรกเหมือนกับการ ป้อนครั้งแรก ขั้วที่ติดกับขั้วของตัวโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่เหมือนกับในรูปที่ 2.4.(a) อีก ครั้งหนึ่ง หากต้องการเคลื่อนที่หนึ่งรอบ ต้องทำการกระตุ้นมอเตอร์เคลื่อนที่ไปจนครบ 12 สเตป และถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนไปอีกทิศทางหนึ่งก็ทำการสลับลำดับการจ่ายกระแส จาก รูปที่ (a), (b), (c) และ (d) ไปเป็น (a), (d), (c), (b) ตามลำดับ

2.2.1 ชนิดของสเตปมอเตอร์

สามารถแบ่งออกได้หลายชนิดตามโครงสร้างลักษณะการใช้งานดังนี้

2.2.1.1 สเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

สเตปมอเตอร์ชนิดนี้ใช้แม่เหล็กถาวรเป็นโรเตอร์ และมีซี่ฟันของสเตเตอร์ล้อมรอบซี่ฟันของ สเตเตอร์ถูกพันด้วยขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก เมื่อต้องการให้สเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมีขนาดมุมของสเตปเล็กลงจะต้องเพิ่มซี่แม่เหล็กของ โรเตอร์ และซี่ฟันของสเตเตอร์ ลักษณะของสเตปมอเตอร์ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.5

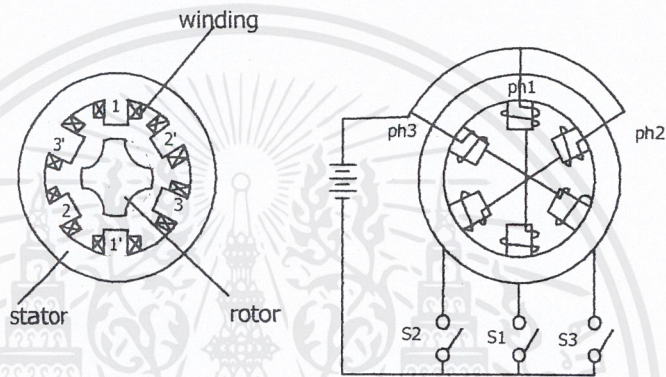


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมี 4 เฟสแต่ละเฟสพันด้วยขดลวดบน 2 ขั้วของสเตเตอร์มุมสเตปเท่ากับ 45 องศา

ข้อเสียของสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร คือ มีขนาดมุมสเตปใหญ่ทำให้ความละเอียดของสเตปต่อรอบน้อย เนื่องจากโครงสร้างของโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร การสร้างให้มีหลายขั้วทำได้ยาก ทำให้ไม่สามารถมีสเตปที่ละเอียดได้ สเตปมอเตอร์แบบนี้ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างขนาดเล็กทำให้ค่าทอร์คที่ได้ต่อหน่วยมีปริมาตรต่ำ ถ้าต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพในเรื่องทอร์คแม่เหล็กถาวรที่ใช้ต้องทำจากสารแม่เหล็กที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กสูง

2.2.1.2 สเตปมอเตอร์แบบปรับค่ารีลัคแตนซ์ได้ (Variable Reluctance Stepping motor)

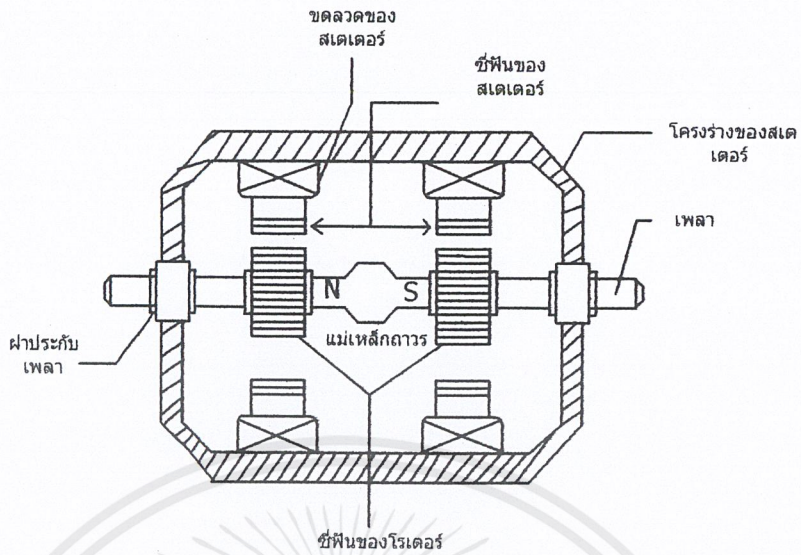
สเตปมอเตอร์ชนิดนี้สามารถปรับค่ารีลัคแตนซ์ได้ ซึ่งรูปที่ 2.6 แสดงภาพตัดขวางของสเตปมอเตอร์แบบ 3 เฟส โดยที่สเตเตอร์มีฟันทั้งหมด 6 ซี่ ซึ่งที่อยู่ตรงข้ามกันหรือทำมุม 180 องศาซึ่งกันและกันจะเป็นเฟสเดียวกัน ขดลวดที่พันอยู่ที่ฟันของสเตเตอร์ในแต่ละเฟสจะต่ออนุกรมหรือขนานกันก็ได้ จากรูปเป็นการต่อแบบอนุกรม ส่วนโรเตอร์นั้นมีฟัน 4 ซี่ ฟันของสเตเตอร์ในเฟสเดียวกันจะมีขั้วต่างกัน โดยซี่ที่ 1, 2, 3 เป็นขั้วเหนือ และ ซี่ที่ 1', 2', 3' เป็นขั้วใต้หลังจากถูกกระตุ้น



รูปที่ 2.6 แสดงภาพตัดขวางของสเตปมอเตอร์แบบ 3เฟส ชนิดปรับค่ารีลัคแตนซ์ได้

2.2.1.3 สเตปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ (HSM)

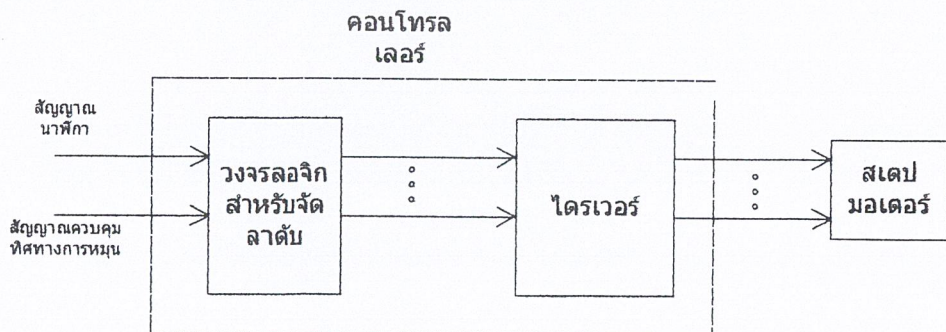
สเตปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์มีลักษณะผสมของสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร และแบบปรับค่า รีลัคแตนซ์ได้ และมีโครงสร้างของสเตเตอร์คล้ายกับแบบปรับค่ารีลัคแตนซ์ได้ แต่ต่างกันที่การต่อขดลวดโดยที่แต่ละเฟสของสเตปมอเตอร์แบบปรับค่ารีลัคแตนซ์ได้จะมีขดลวด 2 ชุด แต่จะมีขดที่ขั้วต่างกัน แต่ HSM ขดลวดทั้งสองจะพันอยู่ที่ขั้วเดียวกัน เรียกว่า ไบไฟลาร์ (BIFILAR) ซึ่งในการกระตุ้นแต่ละครั้งจะให้ขั้วที่ต่างกัน



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของสเตปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์

ข้อดีของ HSM คือ มีขนาดสเตปขนาดเล็ก มีความละเอียดของสเตปต่อรอบสูงมีค่าทอร์คสูงกว่าสเตปมอเตอร์แบบปรับค่ารีลักแตนซ์ได้ แต่สเตปมอเตอร์แบบปรับค่ารีลักแตนซ์ได้มีแรงเฉื่อยทางแมคคานิกส์น้อยกว่าไฮบริดจ์สเตปมอเตอร์

นอกจากสเตปมอเตอร์ทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว ยังมีสเตปมอเตอร์ชนิดอื่นๆที่ยังไม่ได้กล่าวถึงอีก เช่น ลิเนียร์สเตปมอเตอร์ ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่ได้รับการออกแบบให้มีการเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้น อิเล็กโทรค ไฮโคคลิกสเตปมอเตอร์ ซึ่งเป็นสเตปมอเตอร์กำลังสูงที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น การทำงานของสเตปมอเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับพัลส์ที่ป้อนให้แก่ขดลวดเฟสของมันในลำดับที่ถูกต้อง ด้วยวงจรถลอจิกสำหรับจัดลำดับ (Sequence logic) และกระแสที่เพียงพอด้วยวงจรวจร ไคเวอร์ ดังนั้นการคอนโทรลของสเตปมอเตอร์จะเป็นดังรูป



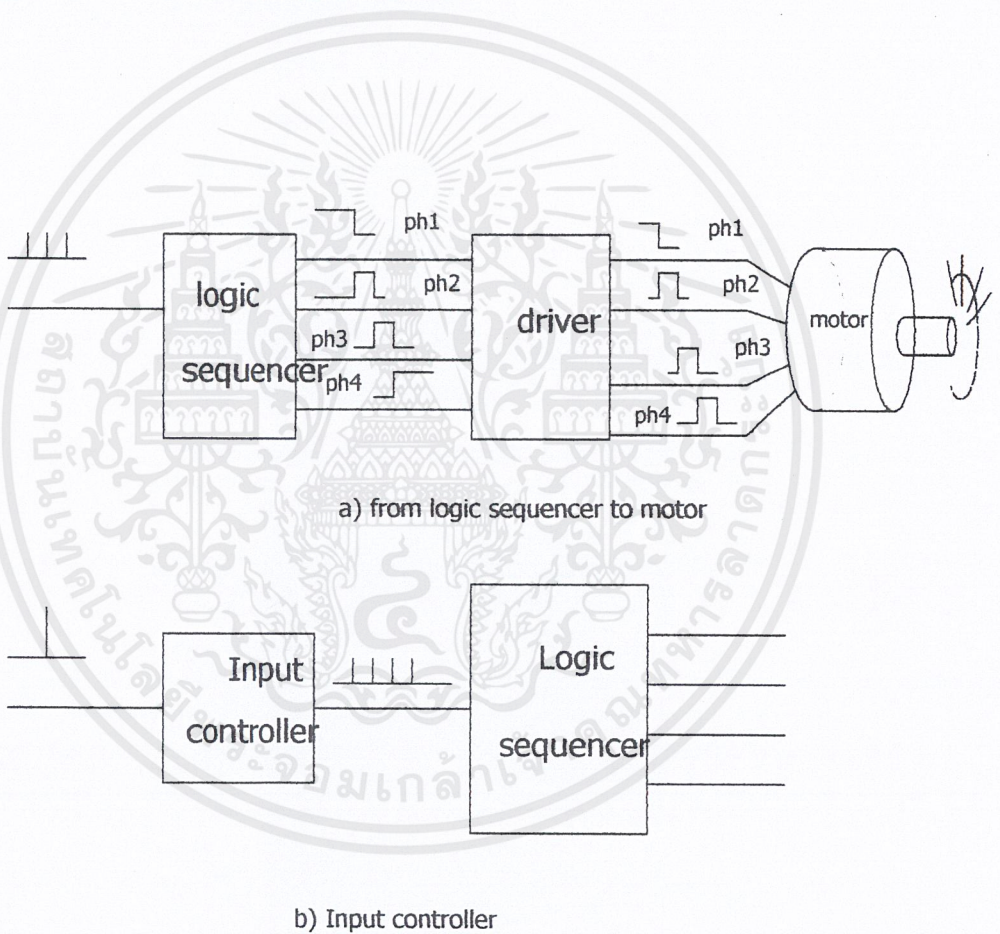
รูปที่ 2.8 การคอนโทรลสเตปมอเตอร์

จากรูปสเตปมอเตอร์จะทำงานได้เมื่อเราป้อน

- สัญญาณพัลส์นาฬิกา (Clock pulses)
- อินพุตสำหรับควบคุมทิศทางการหมุน

2.2.1.4 วงจรขับสเตปมอเตอร์

วงจรขับสเตปมอเตอร์ (Stepper Drive) เป็นวงจรที่แปลงสัญญาณที่มีขนาดเล็ก (Small Signal) จากระบบควบคุม (Control System) ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีกำลังมากขึ้น เพื่อส่งไปยังมอเตอร์ในการทำให้สเตปมอเตอร์เคลื่อนที่



รูปที่ 2.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรขับสเตปมอเตอร์

2.2.2 ระบบขับ (Drive System)

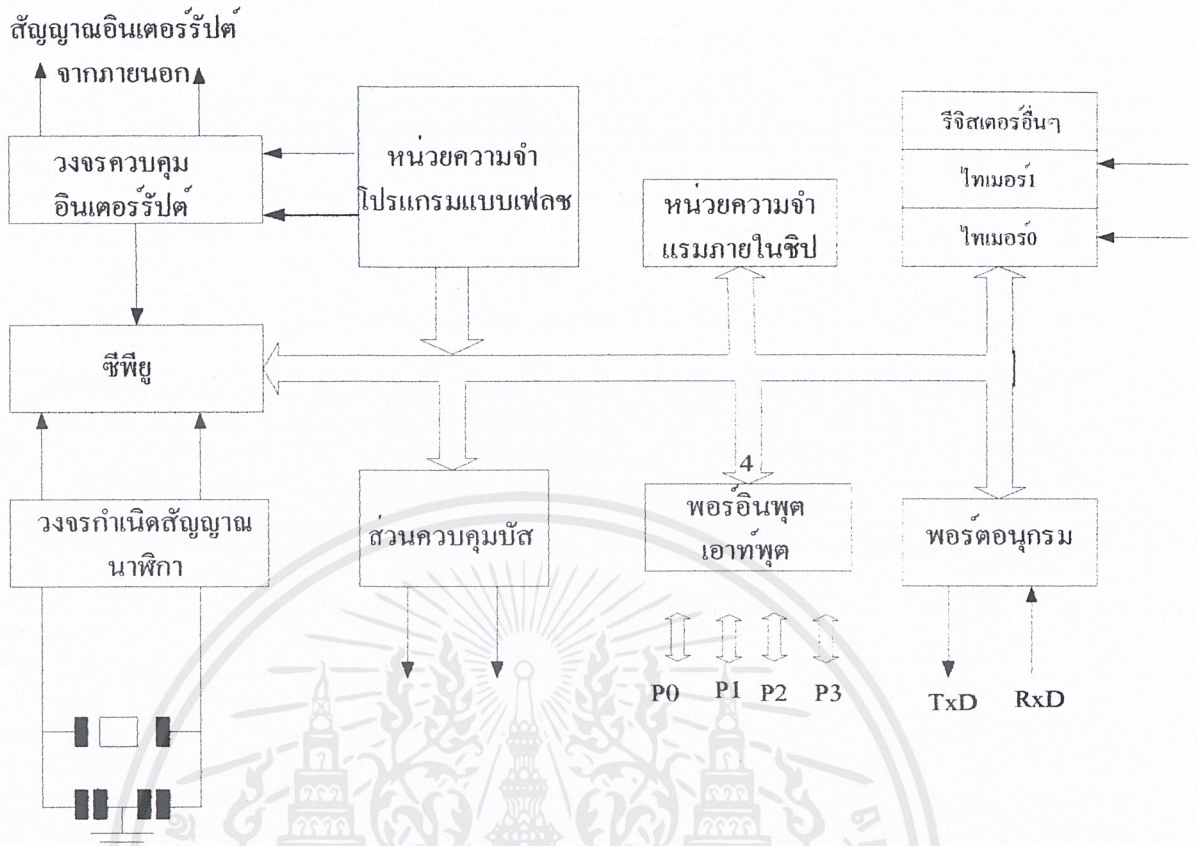
ในรูปที่ 2.9 ได้แสดงถึงพื้นฐานของระบบขับของสเตปมอเตอร์ ในรูปที่ 2.9 (a) แสดงถึง ส่วนของลอจิกซีควเอนเซอร์ (Logic Sequencer) ไดรเวอร์ (Driver) และสเตปมอเตอร์ชนิด 4 เฟส (Four-Phase Stepmoter) เมื่อมีสัญญาณสเตปพัลส์เข้ามาทางลอจิกซีควเอนเซอร์ จะทำให้ เกิดสัญญาณควบคุมออกจาก ลอจิกซีควเอนเซอร์ในลักษณะต่างๆ กันดังรูป 2.9 เพื่อให้ไดรเวอร์ ทำการขยายสัญญาณและส่ง ไปควบคุมให้สเตปมอเตอร์หมุนไปตามทิศทางที่ต้องการ ทิศทาง ของการหมุนถูกกำหนดโดยสถานะของสัญญาณกำหนดทิศทาง (High Level) ก็ให้หมุนไป ตามทิศทางของเข็มนาฬิกา เป็นต้น ในบางครั้งเมื่อมอเตอร์ต้องการ สเตปหลายๆ สเตปในการ เคลื่อนที่ จึงจำเป็นต้องมีอินพุตคอนโทรลเลอร์ (Input controller) ในการจะเคลื่อนที่ได้ ดังรูป ที่ 2.9 (b) แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้ามา 1 อินพุต หน่วยอินพุตคอนโทรลเลอร์จะ กำเนิดสัญญาณพัลส์จำนวน 4 พัลส์ ให้กับหน่วยลอจิกซีควเอนเซอร์

2.3 ทฤษฎีและเนื้อหาไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51 AT89XX

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS – 51 ที่ใช้งานวิจัยจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ AT89C51 ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ชิพขนาด 8 บิต
2. ภายในมีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟรชสามารถลบและเขียนใหม่ได้พันครั้ง
3. หน่วยความจำข้อมูลพื้นฐานเป็นหน่วยความจำแบบแรม
4. ขาพอร์ตเป็นแบบสองทิศทางสามารถใช้งาน ได้ทั้งเป็นอินพุตและเอาต์พุต
5. มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบฟูลดูเพล็กซ์
6. ไทเมอร์/เคาท์เตอร์ขนาด 16 บิตอย่างน้อย 2 ตัว
7. สามารถรองรับแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปได้ 6 ประเภท
8. สามารถขยายหน่วยความจำภายนอกเพิ่มเติมได้สูงสุด 64 กิโลไบต์
9. มีวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาอยู่ในชิป



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบ แฟลชใน อนุกรม AT89Cxx

2.3.1 การจัดหาไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51 ทุกเบอร์ จะมีสถาปัตยกรรมและใช้งานพื้นฐาน เหมือนกันดังแสดงในรูป 2.11 โดยมีรายละเอียดดังนี้

P1.0	○	+Vcc
P1.1		P0.0
P1.2		P0.1
P1.3		P0.2
P1.4		P0.3
P1.5		P0.4
P1.6		P0.5
P1.7		P0.6
RESET		P0.7
P3.0/RxD		EA
P3.1/TxD		ALE
P3.2/INT0		PSEN
P3.3/INT1		P2.7
P3.4/T0		P2.6
P3.5/T1		P2.5
P3.6/WR		P2.4
P3.7/RD		P2.3
XTAL2	P2.2	
XTAL1	P2.1	
GND	P2.0	

รูปที่ 2.11 แสดงการจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในอนุกรม AT89Cxx

ขา Vcc ใช้สำหรับต่อไฟเลี้ยง

ขา GND เป็นขาราวด์ สำหรับต่อกราวด์ของระบบ

ขาพอร์ต 0 มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุตสำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ต 0 ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุตสามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อกับสาย ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมีสถานะปล่อยลอย (float) จึงมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุตได้ นอกจากนั้นขาพอร์ตนี้ยังถูกใช้งานในการติดต่อกับขาแอดเดรสไบต์ของหน่วยความจำ (A0 – A7) และขาข้อมูล (D0 – D7) โดยใช้กระบวนการมัลติเพล็กซ์เข้าช่วยเพื่อสลับการทำงานเป็นได้ทั้งขาติดต่อกับแอดเดรสและขาข้อมูล

ขาพอร์ต 1 (P1.0 – P1.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุตสำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาใดเป็นอินพุต สามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อกับสาย

ขาพอร์ต 2 (P2.0 – P2.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นทั้งอินพุตและเอาต์พุตสำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ตใด เป็นอินพุตสามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อกับสาย ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมี

สถานะปล่อยลอย (float) จึงมีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุทได้ นอกจากนั้นขาพอร์ตนี้ยังถูกใช้งานในการติดต่อกับขาแอดเดรสไบต์สูงของหน่วยความจำภายนอก (A8 - A15)

ขาพอร์ต 3 (P3.0 - P3.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุทและเอาต์พุทสำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาใดเป็นอินพุทสามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมีสถานะปล่อยลอย

(float) จึงมีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุทได้ นอกจากนั้นขาพอร์ต 3 ยังเป็นขาที่มีหน้าที่การใช้งานพิเศษ ดังต่อไปนี้

- P3.0 เป็นขาอินพุทสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา RxD
- P3.1 เป็นขาอินพุทสำหรับส่งข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา TxD
- P3.2 เป็นขาอินพุทสำหรับรับสัญญาณอินเทอร์รัปจากภายนอกช่อง 0 หรือขา INTO
- P3.3 เป็นขาอินพุทสำหรับรับสัญญาณอินเทอร์รัปจากภายนอกช่อง 1 หรือขา INT1
- P3.4 เป็นขาอินพุทสำหรับรับสัญญาณไทมเมอร์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา T0
- P3.5 เป็นขาอินพุทสำหรับรับสัญญาณอินเทอร์รัปจากภายนอกช่อง 1 หรือขา T1
- P3.6 เป็นขาสัญญาณ WR ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก
- P3.7 เป็นขาสัญญาณ RD ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

ขา รีเซ็ต (Reset) ใช้ในการรีเซ็ตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในการป้อนสัญญาณเพื่อรีเซ็ตสถานะที่ขานี้ต้องอยู่ในระดับรีเซ็ตอย่างน้อย 2 แมกซ์ซีไอเคล โดยที่วงจรถูกกำหนดสัญญาณนาฬิกายังคงทำงานต่อเนื่องไปอย่างปกติ

ขา ALE / PRUG (Address Latch Enable / Program pulse input) เป็นขาที่ใช้ควบคุมการแลตช์ของขาพอร์ต 0 เมื่อมีการใช้หน่วยความจำภายนอก นอกจากนั้นขานี้ยังเป็นสำหรับรับพัลส์ของการโปรแกรมสำหรับโปรแกรมข้อมูลลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS - 51 ในรุ่นที่มีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบอีพรอม

ขา PSEN (Program store Enable) ขานี้ใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อร้องขอติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณออกมาที่ขานี้ 2 ครั้งในแต่ละแมกซ์ซีไอเคล แต่ถ้าหากติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก ขานี้จะไม่มีการส่งสัญญาณใดๆออกมา

ขา EA / Vpp (External Access enable / Programming Voltage input) ใช้สำหรับเลือกการติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกหรือภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ถ้าหากขานี้เป็น “0” เป็นการเลือกติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก แต่ถ้าเลือกเป็น “1” เป็นการเลือกติดต่อกับหน่วยความจำภายใน

กับหน่วยความจำภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เองนอกจากนี้ขาขึ้นยังเป็นขาอินพุทรับแรงดันไฟสูงสำหรับโปรม

แกรมการโปรมแกรมหน่วยความจำภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ (+12 v)

ขา XTAL 1 / XTAL 2 เป็นขาสำหรับต่อคริสตัลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการกำหนดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

2.3.2 คีย์แพด

การเชื่อมต่อกับคีย์แพดหรือ สวิตช์เมตริกซ์ 4x3 จุด

การอ่านค่าหรือการกด สวิตช์จะมีด้วยกัน 2 ลักษณะใหญ่ คือ ต่อเข้ากับไฟเลี้ยงหรือกราวด์โดยตรง เมื่อสวิตช์ตัวใดต่อวงจรสามารถอ่านค่าได้โดยตรง ดังรูปที่ 2.12(a) วงจรในลักษณะนี้ จะไม่มีความซับซ้อน สามารถอ่านค่าได้ง่ายและรวดเร็ว แต่ข้อเสียก็คือ ถ้าหากสวิตช์มีจำนวนมากทำให้จำนวนของสายข้อมูลจะมีมากตามไปด้วยทำให้ระบบและวงจรมีขนาดใหญ่และสิ้นเปลือง



รูปที่ 2.12 แสดงวงจรการต่อสวิตช์แบบต่อเข้าไฟเลี้ยงกับกราวด์และการต่อสวิตช์แบบเมตริกหรือ คีย์แพด

ในรูปที่ 2.12(b) วงจรแผงสวิตช์อีกลักษณะหนึ่งคือ การต่อวงจรแบบเมตริกซ์ (matrix switch) จะถูกต่อกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอน จะเรียกแนวตั้งว่า หลักหรือ คอลัมน์ (column) แนวนอนจะเรียกว่าแถวหรือ (row) ดังนั้นค่าของสวิตช์จะต้องประกอบด้วยตำแหน่งที่แน่นอน สวิตช์แบบนี้จะมีข้อดีคือสามารถรองรับการเพิ่มของสวิตช์ได้อย่างสะดวก เพียงทำการแก้ไข

ซอฟต์แวร์เล็กน้อยเท่านั้น ทำให้เป็นที่นิยมใช้กันมากในระบบควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ ที่มีจำนวนสวิทช์มากกว่า 8 ตัว ในกรใช้งานจะเรียกว่า คีย์แพด(key pad)

2.3.3 การใช้งานโมดูลแสดงผล แบบผลึกเหลว (LCD Module)

ในโมดูลผลึกเหลวนี้ จะมีส่วนประกอบหลักๆ 3 ส่วน ดังนี้

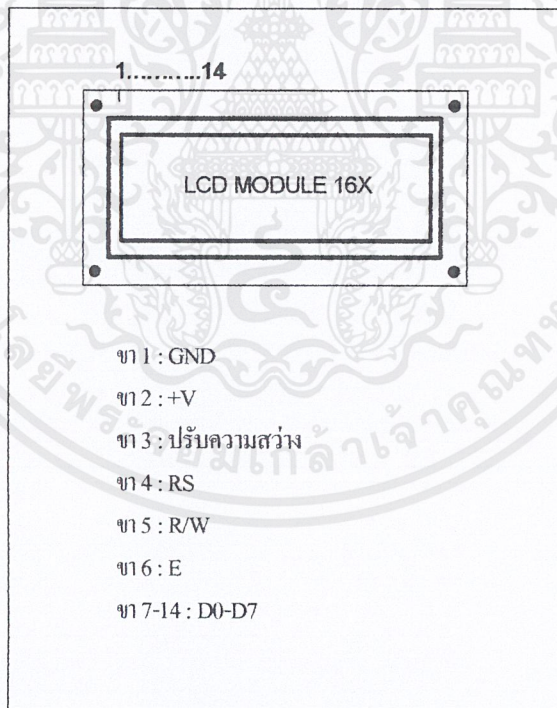
1. ตัวแสดงผล (Display) ภายในเป็นผลึกเหลวสามารถแสดงผลให้เห็น โดยอาศัยแสงจากภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีมุมในการมอง

2. ตัวควบคุม (Controller) เป็นตัวรับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกมาควบคุมการทำงานของโมดูล LCD เช่น ลบจอภาพ แสดงตัวอักษร เป็นต้น ตัวควบคุมนี้ จะใช้ชิบควบคุมโดยเฉพาะ

3. ตัวขับ (Driver) เป็นตัวรับสัญญาณจากตัวควบคุมมาขับให้ตัวแสดงผลแสดงข้อมูลตามที่กำหนด ชิปที่เป็นตัวขับ คือ HD 44700H และ MSM5259 เป็นต้น

โมดูล LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 1 บรรทัด (LCD 16 x 1)

สำหรับ โมดูล LCD ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นขนาด 16 ตัวอักษร 1 บรรทัด โดยจะมีขาต่อทั้งสิ้น 14 ขา ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงรูปร่างและการจัดการ โมดูล LCD แบบอักษร

Vss (ขา1) : เป็นขาต่อ กราวด์

Vdd (ขา2) : ต่อไฟเลี้ยง +5 โวลท์

Vo (ขา3) : เป็นขา อินพุตเพื่อปรับความเข้มของการแสดงผล





Rs (ขา4): เป็นขาอินพุตที่ใช้ในการแยกชนิดของข้อมูลที่ทำการประมวลผลในขณะนั้นว่าเป็นคำสั่งสำหรับรีจิสเตอร์ IR หรือเป็นข้อมูลสำหรับรีจิสเตอร์ DR โดยขานี้เป็น “0” ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นคำสั่งแต่ถ้าขาเป็น “1” จะเป็นการอ่านข้อมูล

R/W (ขา5): เป็นขาที่เลือกการอ่านหรือเขียน ข้อมูลกับ โมดูล LCD ถ้าเป็น “0” เป็นการกำหนดให้เขียนข้อมูล แต่ถ้าเป็น “1” จะเป็นการอ่านข้อมูล

E (ขา6): เป็นขาสำหรับรับสัญญาณพัลส์ โมดูล LCD ให้ทำงาน

D0 - D7 (ขา 7 -14): เป็นขาที่ใช้เป็นทางผ่านของข้อมูลระหว่าง LCD กับอุปกรณ์ภายนอก ขนาด 8 บิต อนึ่ง ขา RS,R/W และ E จะใช้งานร่วมกันโดยมีความสัมพันธ์แสดงในตารางดังนี้

ตารางที่ 4 แสดงการทำงานของขา Rs , R/w และ E

Rs	R/W	E	การทำงาน
0	0		เขียนคำสั่ง
0	1		อ่านสถานะของ โมดูล LCD
1	0		เขียนข้อมูล
1	1		อ่านข้อมูล

2.3.4 การใช้คำสั่งควบคุม โมดูล LCD

ในการเขียนคำสั่งในการควบคุมจะต้องกำหนดให้ขา Rs และ R/W เป็น “0” แล้วเขียนคำสั่งตามไป ซึ่งคำสั่งควบคุม โมดูล LCD ของชิป ควบคุม HD 44780 ที่สำคัญที่ 9 คำสั่งดังนี้

1. คำสั่งเคลียร์ตัวแสดงผล(Clear Display)

มีข้อมูลเป็นคำสั่ง 01H เป็นคำสั่งที่ใช้เขียนข้อมูลช่องว่าง space เข้าไปใน DDRAM ทั้งหมด เมื่อตัวควบคุมเอ็กซ์ซิทีฟ คำสั่งนี้ จะทำการกำหนด แอดเดรสของ DDRAM เป็น 0 เคอร์เซอร์ จะกลับไปอยู่ที่ซ้ายมือสุดของจอแสดงผล แล้วเซตบิต I/O ให้เป็น “1”

2. คำสั่ง return home

ต้องกำหนดให้บิต 1 ของข้อมูลเป็น “1” เป็นคำสั่งที่ให้เคอร์เซอร์ เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งซ้ายสุดของจอแสดงผล แต่ข้อมูลของจอแสดงผล ไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือข้อมูลคำสั่งของคำสั่งนี้จะเป็น 02H หรือ 03H ก็ได้

3. คำสั่งเลือกโหมดการป้อนข้อมูล(Entry Mode Set)

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	0	0	1	I/O	S

บิต S เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของการแสดงผลเมื่อมีการป้อนข้อมูล กำหนดบิต S เป็น “1” เมื่อเกิดข้อมูลใหม่บนจอแสดงผล เคอร์เซอร์จะอยู่กับที่ แต่ตัวอักษรข้อมูลเดิมจะถูกดันไปทางซ้าย แต่ถ้าเป็น “0” ข้อมูลใหม่ที่แสดงผลจะเลื่อนไปทางขวามือ

บิต I/O เป็นบิตที่ใช้กำหนดว่า เมื่อเขียนหรือผ่านข้อมูลแล้ว แอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้นหรือลดลงหนึ่งแอดเดรส โดยถ้าเป็น “1” แอดเดรสจะเพิ่มขึ้น ถ้าเป็น “0” แอดเดรสจะลดลง

4. คำสั่ง ควบคุมการแสดงผล

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	0	1	D	C	B

บิต D ใช้ทำการเปิด-ปิดจอแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น “1” จอจะเปิด ถ้าเป็น “0” จะปิดจอแสดงผล

บิต C ใช้ควบคุมเคอร์เซอร์บนจอแสดงผล ถ้าต้องการให้มีเคอร์เซอร์แสดงผลต้องกำหนดบิตนี้เป็น “1” ถ้าเป็น “0” จะไม่แสดงผล

บิต B ใช้ควบคุมการกระพริบของเคอร์เซอร์ ถ้าบิตนี้เป็น “1” เคอร์เซอร์จะกระพริบ

5. คำสั่งควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และข้อมูลตัวอักษร

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	1	S/C	R/L	*	*

การควบคุมเลื่อนเคอร์เซอร์และตัวอักษรบนจอแสดงผลขึ้นอยู่กับกำหนดบิต S/C และ R/L ดังตารางด้านล่าง

S/C	R/L	ลักษณะการเขียน	ข้อมูลคำสั่ง
0	0	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางซ้าย	10H – 13H
0	1	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางขวา	14H – 17H
1	0	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางซ้าย	18H – 1BH
1	1	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางขวา	1CH – 1FH

6. คำสั่งกำหนดฟังก์ชันการทำงาน

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	1	DL	N	F	*	*

บิต DL ใช้กำหนดบิตที่ใช้ติดต่อส่งผ่านข้อมูลถ้าบิตนี้ เป็น “0” จะเป็นการติดต่อแบบ 4 บิต ถ้าเป็น “1” จะเป็น 8 บิต

บิต N ใช้กำหนดจำนวนบรรทัดของการแสดงผล ถ้าเป็น “0” จะแสดงผล 1 บรรทัด ถ้าเป็น “1” จะแสดงผล 2 บรรทัด

บิต F ใช้เลือกความละเอียดของตัวอักษรในการแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น “0” จะแสดงผลแบบ 5x7 จุด และถ้าเป็น “1” จะแสดงผล 5x10 จุด

7. คำสั่งเลือกแอดเดรสของ CGRAM

เมื่อต้องการกำหนดแอดเดรสของ CGRAM ต้องกำหนดให้บิต 7 เป็น “0” บิต 6 เป็น “1” ส่วนอีก 6 บิตที่เหลือจะแทนด้วยแอดเดรสของ CGRAM จะต้องทำการกำหนดแอดเดรสด้วยคำสั่งนี้ก่อนที่จะอ่านหรือเขียนข้อมูลให้ CGRAM โดยแอดเดรสของ CGRAM อยู่ระหว่าง 00H – 3FH

8. คำสั่งเลือกแอดเดรสของ DDRAM

ใช้ในการเลือกแอดเดรสของ DDRAM ก่อนที่จะทำการอ่านหรือเขียนข้อมูล โดยบิตที่ 7 จะต้องเป็น “1” และข้อมูลที่เหลืออีก 7 บิตจะเป็นค่าแอดเดรสของ DDRAM ที่แอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 80H – 0FFH ทั้งนี้จำนวนแอดเดรสถังขึ้นกับการกำหนดสถานะที่บิต N เป็น “0” แอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 80H – 0CFH และถ้าบิต N เป็น “1” แอดเดรสของ DDRAM จะมี 2 ช่วง คือ 8CH – 87H และ 0C0H – 0C7H

9. คำสั่งอ่าน แพลต Busy และ แอคเดรส

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
BF	A	A	A	A	A	A	A

แอกเดรสไบต์สูง
แอกเดรสไบต์ต่ำ

เป็นคำสั่งที่ใช้แพลต Busy (BF) โดยแพลตนี้ จะต้องบอกสถานะของตัวควบคุม LCD ว่าพร้อมที่จะรับข้อมูลอยู่หรือไม่ ถ้าบิต BF เป็น “0” แสดงว่าตัวควบคุม LCD พร้อมรับข้อมูลคำสั่ง แต่ถ้าเป็น “1” แสดงว่าตัวควบคุม LCD ยังอยู่ในกระบวนการทำงานภายในหรือคำสั่งประมวลผลข้อมูลอยู่ ยังไม่พร้อมรับข้อมูลและคำสั่ง

เมื่อต้องการอ่านแพลตต้องกำหนดให้ขา R/W เป็น “1” ด้วยแต่สัญญาณที่ Rs ยังต้องเป็น “0” อยู่เพราะข้อมูลนี้เป็นข้อมูลคำสั่ง นอกจากนี้ยังใช้คำสั่งอ่านข้อมูลแอกเดรสของ CGRAM และ DDRAM ด้วย โดยบิต 0 – 6 เป็นค่าข้อมูลของแอกเดรสที่ต้องการอ่าน

2.3.5 การเขียนคำสั่งและข้อมูลให้แก่โมดูล LCD

การเขียนข้อมูลเพื่อควบคุมโมดูล LCD ให้แสดงผลตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ต้องส่งคำสั่ง (instruction) แล้วกำหนดการทำงานให้แก่โมดูล LCD ก่อน จากนั้นจึงค่อยส่งข้อมูล (data) ที่ต้องการแสดงผล เนื่องจากบัสข้อมูลของ โมดูล LCD มี 8 เส้น คือ D0 – D7 และใช้เป็นทางผ่านของคำสั่งและข้อมูลดังนั้นในการส่งคำสั่งและข้อมูลจึงต้องอาศัยการกำหนดสัญญาณลจิก ที่ขา RS ได้สัญญาณลจิก “0” หมายความว่าข้อมูลที่ป้อนให้แก่โมดูล LCD ขณะนั้นเป็นคำสั่งในทางตรงข้ามหากขา RS ด้รับลจิก “1” ข้อมูลที่ป้อนให้ขณะนั้นเป็นข้อมูลที่จะใช้แสดงผล

เมื่อต้องการเขียนหรืออ่านข้อมูลต้องกำหนดให้ขา CGRAM และ DDRAM เริ่มต้นต้องกำหนดแอกเดรสที่ต้องการอ่านหรือเขียนก่อน โดยใช้คำสั่งเลือกแอกเดรส จากนั้นกำหนดให้ขา RS เป็น “1” เพื่อแจ้งให้ในตัวควบคุมภายในโมดูล LCD ทราบว่าข้อมูลที่ปรากฏต่อไปนี้เป็นข้อมูลปกติ ไม่ใช่คำสั่ง

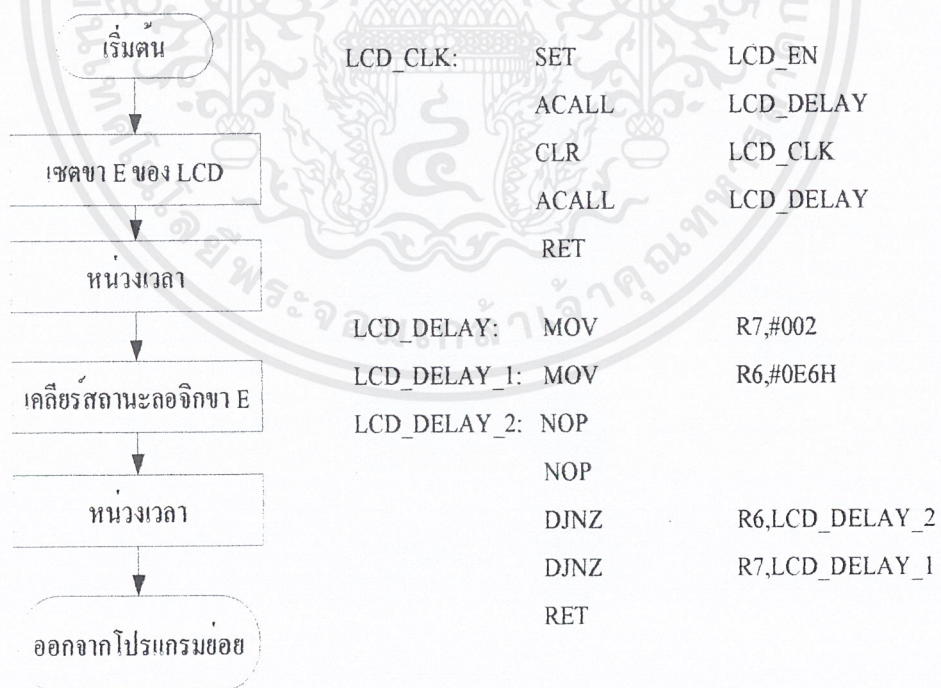
ในกรณีที่ต้องการอ่านข้อมูลต้องกำหนดให้ขา R/W เป็น “1” ข้อมูลขนาด 8 บิตหรือ 4 บิต ก็จะปรากฏบนบัสข้อมูลโดยข้อมูลที่ใช้อ่านออกมาจะได้เป็นข้อมูลจากแอกเดรสของ CGRAM หรือ DDRAM ตามที่ต้องการ

ในกรณีที่ต้องการเขียนข้อมูลก็เช่นเดียวกันเมื่อกำหนดแอดเดรสและบิตลอคจิก"1" ให้ขา RS แล้วต้องกำหนดให้ขา R/W เป็น "0" ข้อมูลที่อยู่บนบัสข้อมูลจะถูกเขียนลงในรีจิสเตอร์ DR จากนั้นจึงถ่ายทอกลงใน DDRAM ต่อไป

2.3.6 จังหวะการทำงานของ โมดูล LCD

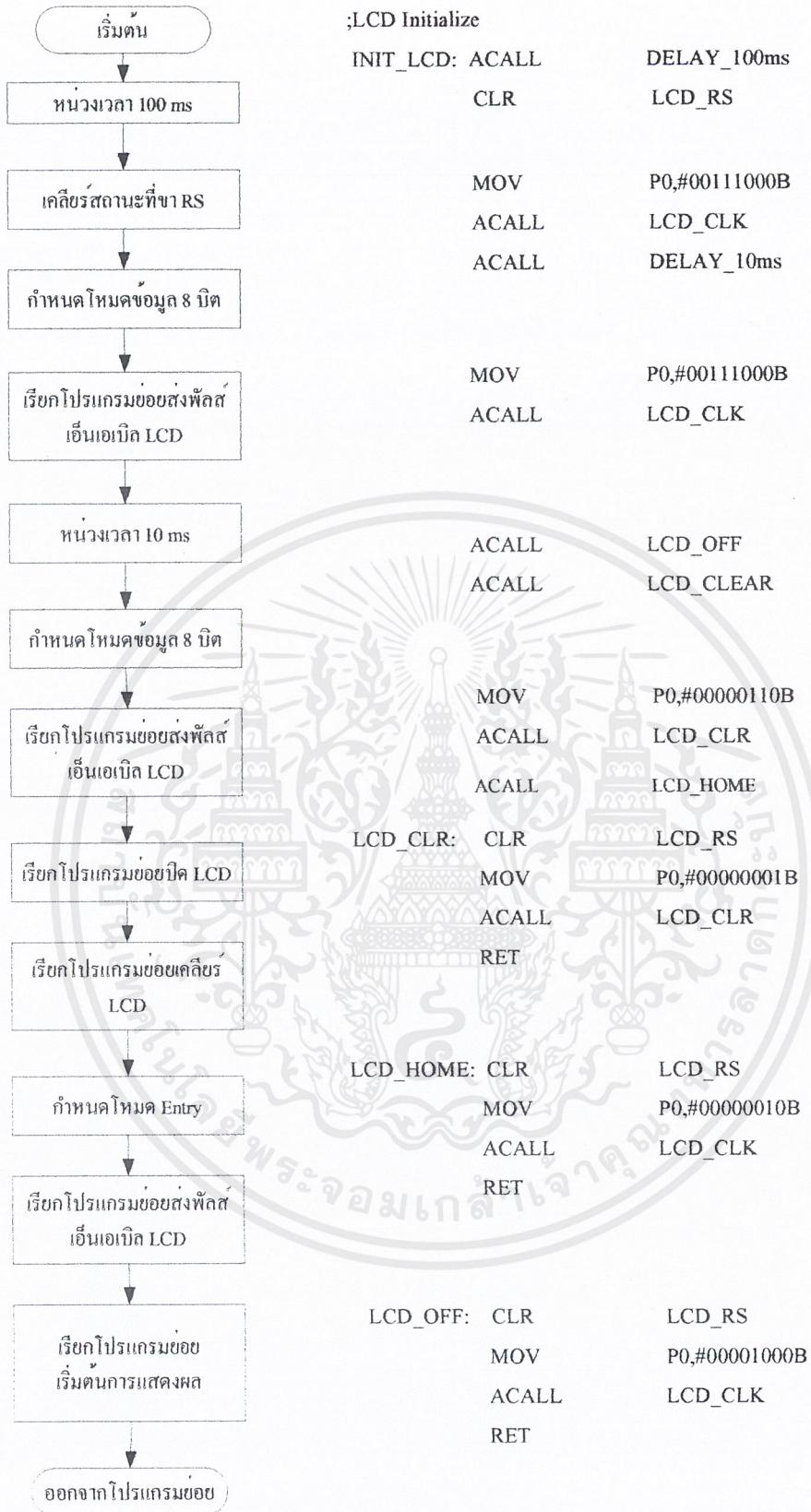
การติดต่อกับ โมดูล LCD จะต้องมีการหน่วงเวลาหลังจากที่ทำการส่งรหัสคำสั่งหรือข้อมูล เนื่องจากต้องรอให้ ตัวควบคุมภายในแปลความหมายของรหัสคำสั่งและทำงานตามคำสั่งให้เรียบร้อย จากนั้นจึงจะรับข้อมูลหรือดำเนินการต่อไป

ดังนั้นในการใช้ จะต้องมีการเขียน โปรแกรมเพื่อหน่วงเวลารอให้โมดูล LCD พร้อมทำงานด้วย โดยเมื่อเริ่มจ่ายไฟให้แก่โมดูล LCD ต้องรอประมาณ 10 มิลลิวินาที เพื่อให้โมดูล LCD ทำการเตรียมความพร้อมหรือ (initial) หลังจากนั้นจึงเป็นการกำหนดลอคจิกให้แก่ขา RS ของโมดูล LCD ต้องเป็นตัวหน่วงเวลาอีก 2 มิลลิวินาที เพื่อให้ตัวควบคุมภายในแปลความหมายของลอคจิกที่ขา RS ว่าข้อมูลที่จะได้รับนั้นเป็นรหัสคำสั่งข้อมูลหรือเป็นข้อมูลที่ต้องแสดงผล จากนั้นจะเป็นการส่งข้อมูลมารอบที่บัส D0 -D7 (กรณี 8 บิต) ขึ้นต่อไปจะเป็นการส่งสัญญาณพัลส์ ไปยังขา E เพื่อ เอ็นเนเบิล โมดูล LCD ให้ได้รับข้อมูลจากบัสข้อมูลเข้าไป โดยพัลส์ที่ป้อนเข้าไปที่ขา E ของโมดูล LCD ต้องเป็นพัลส์ขอบขาขึ้น จากนั้นทำการแปลงเวลา 2 มิลลิวินาที



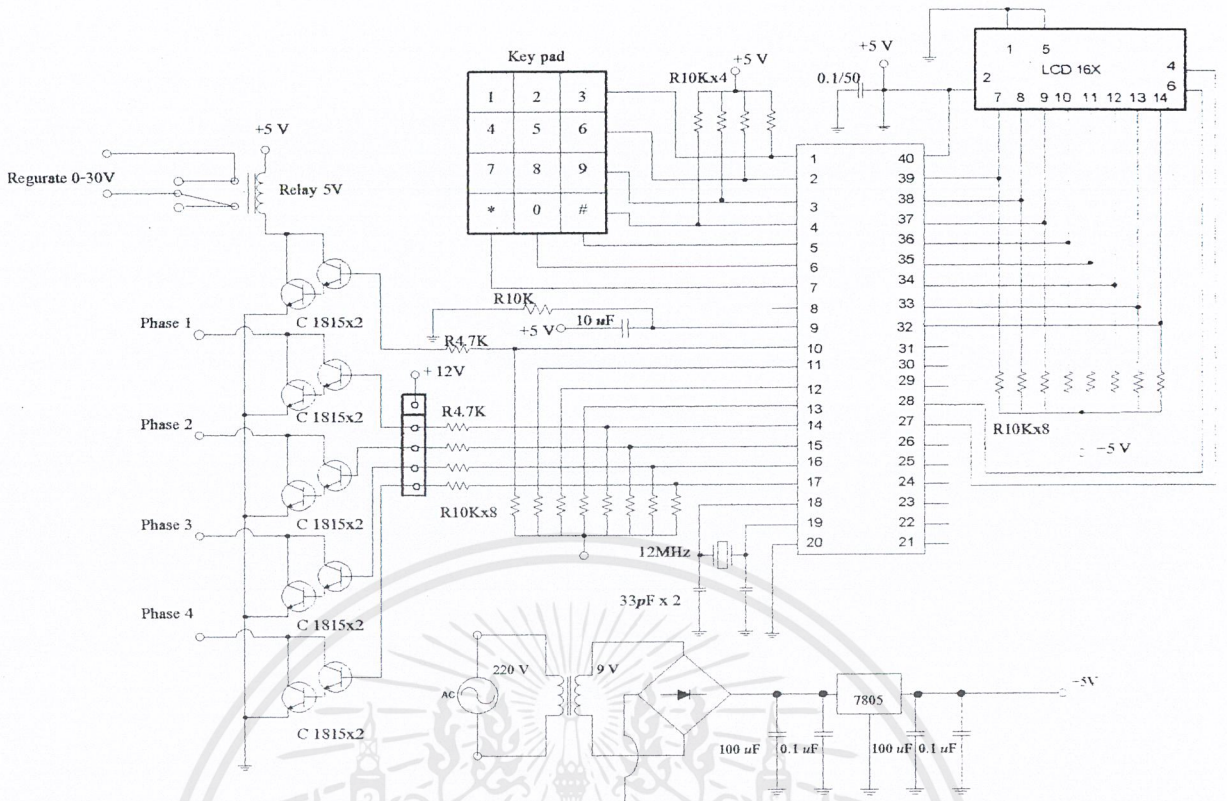
รูปที่ 2.14 แสดง ไฟว์ชาร์ตและตัวอย่าง โปรแกรมย่อยส่งพัลส์เอ็นเนเบิลให้แก่โมดูล LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



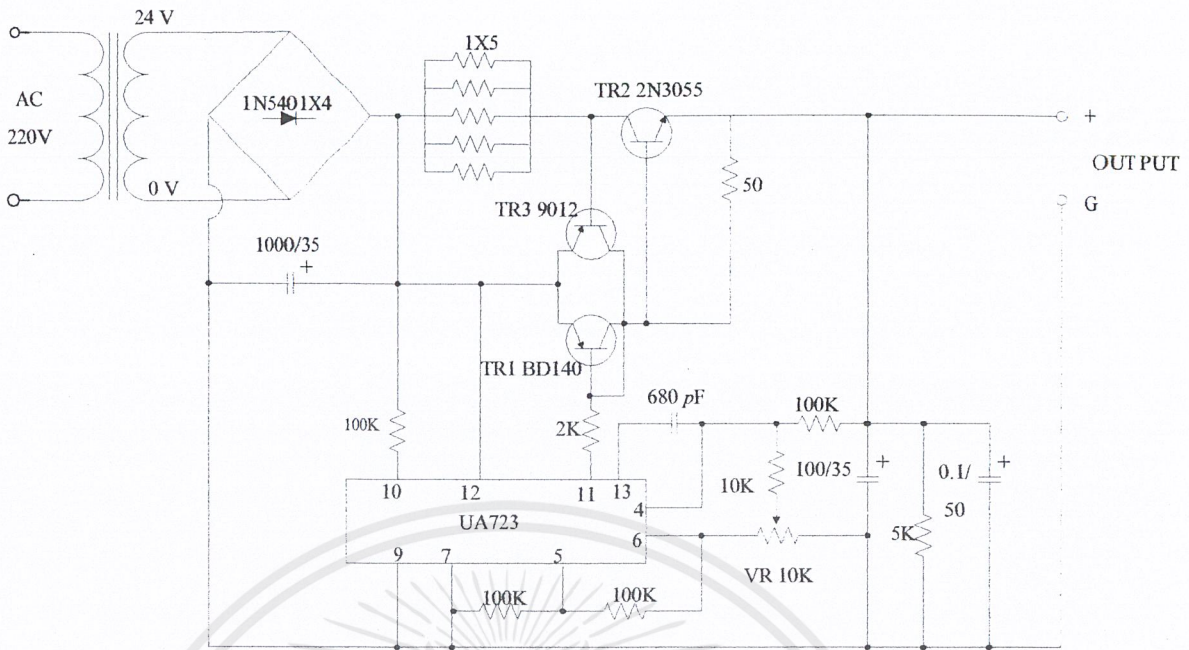
รูปที่ 2.15 แสดงโฟลว์ชาร์ตและตัวอย่างโปรแกรมย่อยการอินนิเชียล LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงวงจรส่วนควบคุมทั้งหมดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-AT89C52

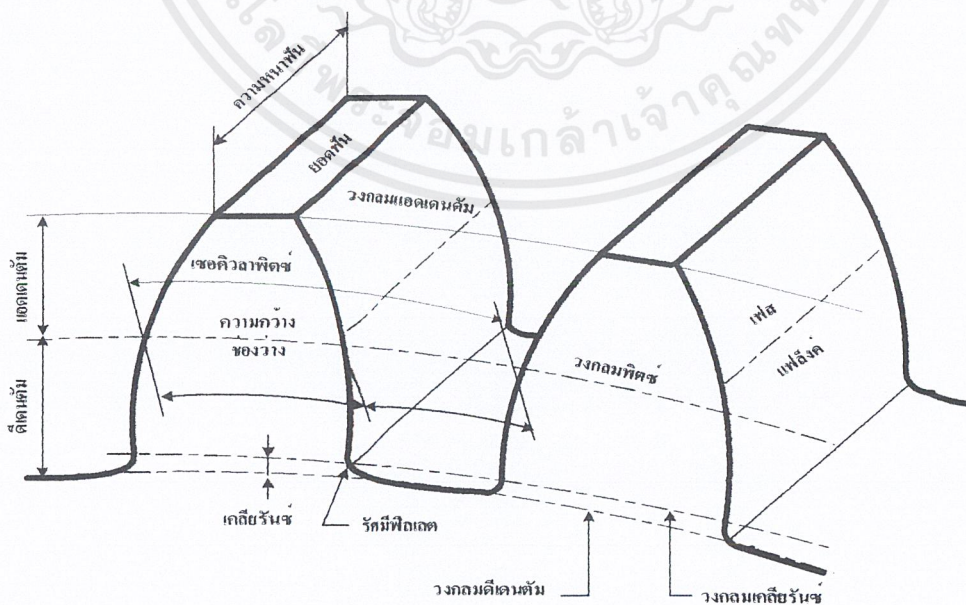
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงวงจรเรกกูเรเตอร์ควบคุมความเร็วของดีซี.มอเตอร์

2.4 ทฤษฎีเฟืองเบื้องต้น

เฟืองตรง (spur gear) ทำหน้าที่ส่งกำลังการหมุนจากเพลานึง ไปยังอีกเพลานึง ส่วนมากเฟืองขับ (driving gear) จะมีขนาดเล็กกว่าเฟืองตาม ซึ่งจะพบได้ตามชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล



รูปที่ 2.18 แสดงการเรียกชื่อส่วนต่างๆ

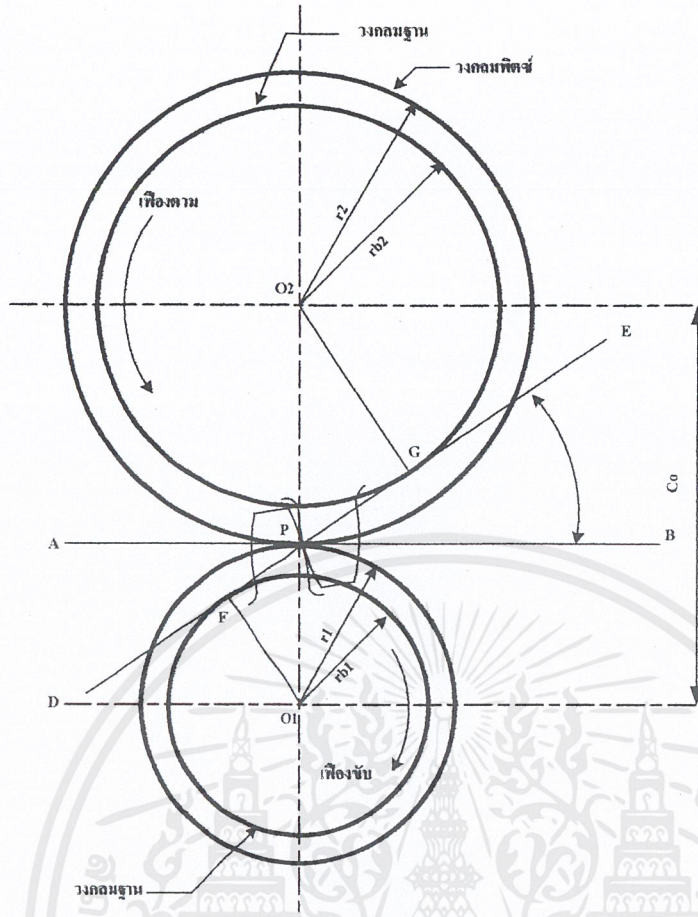
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 คำจำกัดความ

- Pitch circle วงกลมพิตช์ เป็นมิตติหลักในการเรียกขนาดของเฟืองด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์
- Circular pitch (p) เป็นระยะที่วัดบนวงกลมพิตช์จากจุดหนึ่งบนฟันเฟืองไปยังอีกจุดหนึ่งบนฟันเฟืองถัดไป ณ ตำแหน่งเดียวกัน
- Module (m) เป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์กับจำนวนฟันบนเฟือง
- Diametral pitch (P) เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนฟันบนเฟืองกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ เป็นส่วนกลับของ Module
- Addendum (a) หรือช่วงสูงบน เป็นระยะที่วัดในแนวรัศมีระหว่างยอดฟัน (top land) ถึงวงกลมพิตช์
- Dedendum (d) หรือช่วงสูงล่าง เป็นระยะที่วัดในแนวรัศมีระหว่างโคนฟัน (bottom land) ถึงวงกลมพิตช์
- Clearance (c) การที่เฟืองสองอันขบกัน Dedendum (d) หรือช่วงสูงล่าง เป็นระยะที่วัดในแนวรัศมีระหว่างโคนฟัน (bottom land) ถึงวงกลมพิตช์ของเฟืองหนึ่งต้องมีค่ามากกว่า Addendum (a) หรือช่วงสูงบน เป็นระยะที่วัดในแนวรัศมีระหว่างยอดฟัน (top land) ถึงวงกลมพิตช์ ของอีกเฟืองหนึ่งเพื่อที่จะไม่ให้เกิดการขัดกันขึ้น นั่นก็คือค่าผลต่างระหว่าง Dedendum (d) กับ Addendum (a) นั่นเอง
- Backlash คือผลต่างระหว่างความกว้างช่องว่างระหว่างฟันเฟืองหนึ่งกับความกว้างของอีกฟันเฟืองหนึ่งที่ขบกัน โดยวัดตามแนวเส้นวงกลมพิตช์ ฉะนั้นการขับเฟืองที่มี Backlash เฟืองขับจะสามารถหมุนไปได้เล็กน้อยก่อนที่เฟืองตามจะหมุนไปจึงจำเป็นต้องมีอยู่เสมอ
- Face width (b) ความหนาของฟันเฟือง โดยวัดในทิศทางเดียวกับแนวแกนของเฟือง ก็คือความหนาของเฟืองนั่นเอง
- Flank คือผิวทางด้านข้างของฟันเฟือง ซึ่งอยู่ระหว่างวงกลมพิตช์กับวงกลม Dedendum

2.4.2 กฎของการขับเฟือง

เฟืองสองอันที่ขบกันจะทำให้อัตราทดคงที่ก็คือเมื่อเฟืองคู่หนึ่งเป็นไปตามกฎการขับของเฟืองซึ่งกล่าวได้ว่า รูปร่างของฟันเฟืองจะต้องทำให้เส้นตั้งฉากร่วม (Common Normal) ที่ลาก ณ จุดสัมผัสระหว่างฟันทั้งสองผ่านจุดคงที่จุดหนึ่ง ซึ่งอยู่บนเส้นโค้งที่อยู่ระหว่างจุดศูนย์กลางของเฟืองทั้งสองและจุดนี้เรียกว่า จุดพิตช์ (Pitch Point)



รูปที่ 2.19 แสดงการทำงานของฟันเฟืองที่ขบกัน

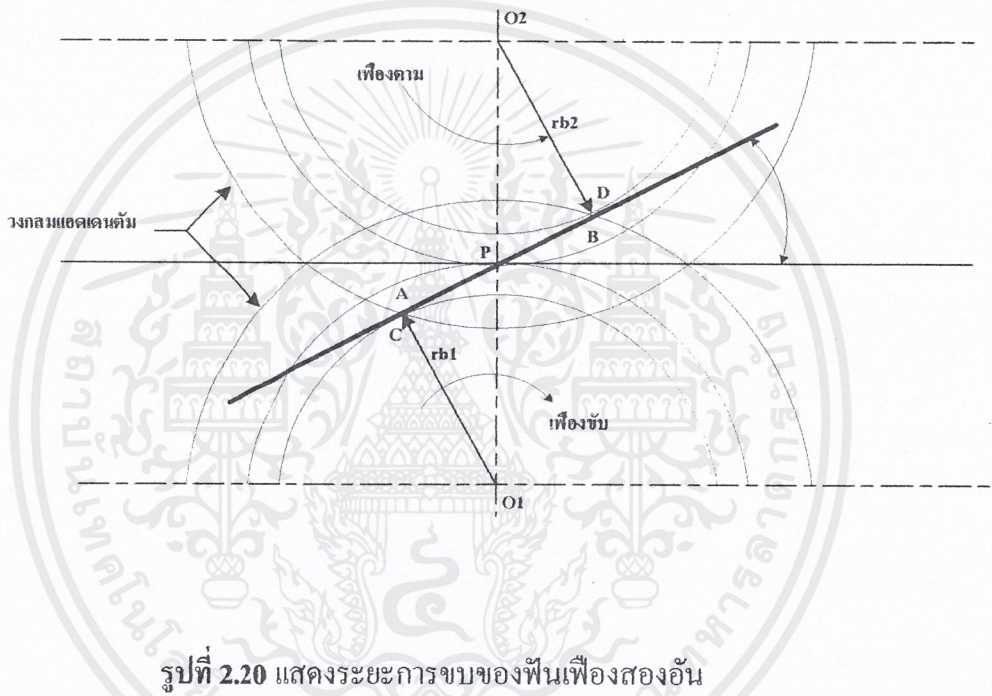
โดยพิจารณาดังรูปที่ 2.19 จุดคงที่ดังกล่าวนี้คือจุด P ซึ่งอยู่บนเส้นที่โยงระหว่างจุดศูนย์กลาง O_1 และ O_2 ของเฟืองทั้งสอง รูปร่างของฟันเฟืองที่เป็นไปตามกฎการขบนี้เรียกว่า คอนจูเกตเคอฟ

(Conjugate curves) และที่นิยมใช้กันมากก็คืออินโวลูตเคอฟ (Involute curves) โดยเริ่มต้นจากวงกลมที่เรียกว่าวงกลมฐาน (Base circle) เส้นตั้งฉากกับอินโวลูตเคอฟ DE ในรูป 2.3 เป็นแนวเส้นที่แรงปฏิกิริยาที่ฟันเฟืองกระทำ เรียกว่า แนวของการกระทำ (Line of action) หรือแนวแรงกด (Pressure line) และมุม ϕ ในรูปเรียกว่ามุมกด (Pressure angle) เฟืองที่ผลิตขึ้นใช้กับเครื่องจักรกลในปัจจุบันนี้มีมุมกด 20 และ 25 องศา เป็นส่วนมากสำหรับเฟืองที่มีมุมกดเท่ากับ 14 1/2 องศา ก็ยังคงมีผลิตออกมาใช้บ้างทั้งนี้ก็เพื่อใช้สำหรับการเปลี่ยนเฟืองของเครื่องกลเก่าที่ยังคงมีใช้อยู่

2.4.3 ระยะการขบเฟือง

เมื่อเฟืองอันหนึ่งจะขบเฟืองอีกอันหนึ่ง จุดสัมผัสระหว่างฟันเฟืองจะเริ่มขึ้นเมื่อผิวด้านข้างของฟันเฟืองขบสัมผัสกับปลายฟันเฟืองของเฟืองตาม และการขบสัมผัสสิ้นสุดเมื่อปลายฟันเฟืองของเฟืองขบสัมผัสกับผิวด้านข้างของฟันเฟืองตาม

ในขณะที่เฟืองขบกันควรมีเฟืองอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่ขบกันอยู่ตลอดเวลา โดยปกติแล้ว การขบกันของเฟืองมักจะมีมากกว่าหนึ่งคู่ แต่ถ้าฟันเฟืองของเฟืองคู่หนึ่งจะจากกันก่อนที่ฟันอีกคู่หนึ่งจะเข้ามาขบกัน ในกรณีเช่นนี้เกิดขึ้นแล้วจะทำให้การทำงานของฟันเฟืองไม่ราบรื่นเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องจากจะมีแรงที่เกิดจากการกระทบเกิดขึ้น โดยมาก



2.4.4 การป้องกันการขัดกันของเฟือง

วิธีการป้องกันมิให้มีการขัดกันเกิดขึ้น ทำได้หลายวิธีดังนี้

1. ใช้วิธีตัดเนื้อโลหะส่วนที่อยู่ต่ำกว่าวงกลมฐานออกบ้าง (Undercutting) ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการสัมผัสกันของฟันเฟืองบริเวณนี้แต่ข้อเสียคือจะทำให้ฟันเฟืองบอบบางลง
2. ใช้วิธีตัดปลายฟันเฟืองให้สั้นลง (Stubbed teeth) ข้อเสียที่ตามมาก็คือให้อัตราส่วนการขบน้อยลง
3. การเพิ่มมุมกด ϕ จะลดขนาดของวงกลมฐาน แต่จะทำให้การขบกันระหว่างฟันเฟืองมีความราบเรียบน้อยลง

2.4.5 วัสดุสำหรับเฟือง

วัสดุที่ใช้ทำเฟืองมีอยู่หลายชนิดทั้งที่เป็น โลหะและอโลหะ หลักทั่วไปในการออกแบบชิ้นส่วนใดๆของเครื่องจักรก็คือ การเลือกใช้วัสดุที่ราคาถูก ผลิตง่ายและสามารถทำงานได้ตามความประสงค์ สำหรับการเลือกใช้วัสดุสำหรับทำเฟืองผู้ออกแบบจะต้อง ใ้ใคร่ครองจุดประสงค์ใดเป็นสิ่งที่มีความสำคัญที่สุดต่อการใช้งาน เช่น ถ้าต้องการให้มีความต้านแรงสูง (high strength) เป็นสิ่งสำคัญ ก็จะต้องเลือกใช้เหล็กกล้า เพราะดีกว่าเหล็กหล่อ แต่ถ้าต้องการให้ทนทานต่อการสึกกร่อนเนื่องจากการเสียดสีได้เป็นอย่างดี ก็ควรเลือกใช้วัสดุที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น อลูมิเนียมบรอนซ์ (Aluminum bronze) หรือ ถ้าต้องการลดระดับเสียงในขณะที่ใช้งานก็อาจจะใช้วัสดุที่เป็นอโลหะ เช่น ไนลอน เป็นต้น

วัสดุที่นิยมใช้ทำเฟืองมากที่สุดชนิดหนึ่งก็คือ เหล็กหล่อ ทั้งนี้เพราะมีราคาต่ำ หล่อได้ง่าย ทนต่อการสึกหรอได้ดีและดูดเสียงได้มากพอสมควร แต่ข้อเสียของเหล็กหล่อก็คือมีความต้านแรงดิ่งต่ำ ทำให้ฟันเฟืองหนามาก ดังนั้นในบางครั้งจึงใช้เหล็กหล่อเหนียวพิเศษ (nodular cast iron) ซึ่งเป็นเหล็กหล่อที่ผสมแมกนีเซียมหรือซีเรียม (cerium) เข้าไป ทำให้ได้เหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ยังคงไว้ซึ่งคุณสมบัติอย่างอื่นที่ได้กล่าวมาแล้ว

เหล็กกล้าที่ใช้ในการทำเฟืองโดยมากเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา (Plain carbon steel) หรือเหล็กกล้าผสม (alloy steel) ซึ่งมีความต้านแรงดิ่งสูงกว่าเหล็กหล่อ โดยที่ราคาไม่สูงมากนัก แต่เนื่องจากผิวหน้าของเหล็กกล้ามีความแข็งน้อย ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการทำผิวหน้าให้แข็งขึ้น โดยกรรมวิธีทางความร้อน (heat treatment) เพื่อให้ฟันเฟืองทนต่อการสึกหรอได้ดี แต่กรรมวิธีทางความร้อนมักจะทำให้ฟันเฟืองเกิดการบิดเบี้ยวขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นแรงที่มากกระทำต่อฟันจึงไม่กระจายออกไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอาจทำให้ฟันเฟืองเสียหาย เนื่องจากการบิดเบี้ยวนี้เกิดในเหล็กกล้าผสมน้อยกว่าเหล็กกล้าธรรมดา ผู้ออกแบบจึงนิยมใช้เหล็กกล้าผสมมากกว่า

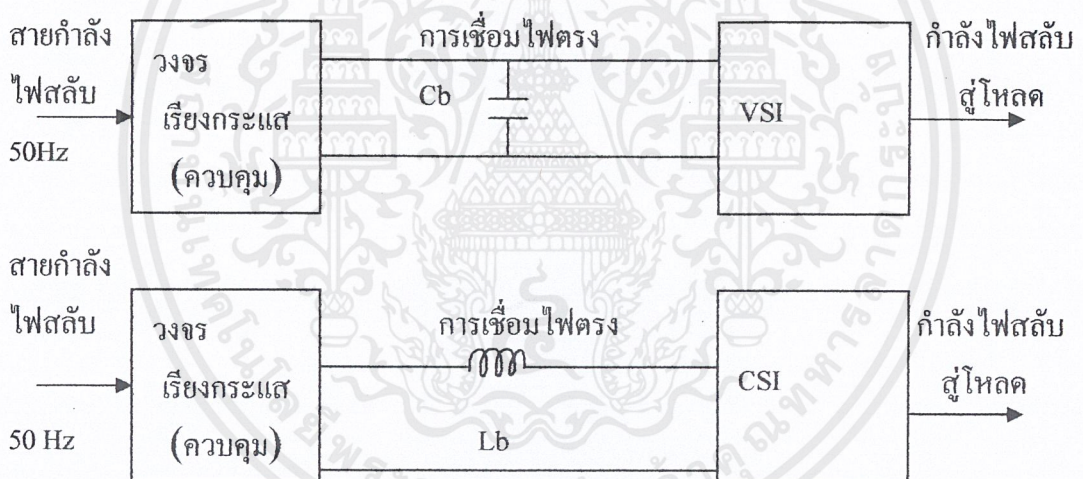
โลหะผสมที่นำมาใช้ทำเฟืองได้แก่ ทองแดง สังกะสี อลูมิเนียม และไทเทเนียม ทองแดงผสมที่นิยมใช้ทำเฟืองเป็นอย่างมากคือบรอนซ์ เพราะทนต่อการกัดกร่อนได้ดี มีความเสียหายน้อย และทนต่อการสึกหรอ อโลหะที่นิยมใช้ทำเฟืองได้แก่ rawhide nylon และพลาสติกชนิดต่างๆ เป็นต้น เฟืองที่ทำด้วยวัสดุเหล่านี้จะทำงานเงียบมาก มีความเสียดทานน้อย และผลิตได้ง่าย นอกจากนี้แล้ว วัสดุประเภทนี้ยังช่วยดูดซับการสั่นสะเทือนได้เป็นอย่างดี แต่ก็มีข้อเสีย คือ เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อย และนำความร้อนไม่ดี ทำให้มีความร้อนสะสมอยู่ในเฟืองขณะใช้งานมาก และอาจจะเป็นผลทำให้ฟันบิดเบี้ยวได้

2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นของ อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส

อินเวอร์เตอร์ คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนไฟกระแสตรงให้เป็นไฟกระแสลับ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้

อินเวอร์เตอร์ เป็นวงจรที่จ่ายกำลังไฟสลับให้แก่โหลด เมื่อเทียบกับสายกำลังไฟสลับซึ่งจ่ายกำลังที่ความถี่ 50 Hz เราสังเกตได้ว่าสายกำลังไฟสลับจ่ายกำลังที่แรงดันคงตัวที่ความถี่คงตัว แต่เป็นไฟสลับที่มี ฮาร์มอนิกน้อยมากและจ่ายกำลังได้สูงมาก ส่วนอินเวอร์เตอร์นั้นมีคุณสมบัติเหนือกว่าสายกำลังคือสามารถจ่ายกำลังที่แปรค่าได้และความถี่แปรค่าได้แต่รูปคลื่นด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีฮาร์มอนิกมากและจ่ายกำลังได้จำกัด

แหล่งด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งไฟตรง เรียกว่าอินเวอร์เตอร์ที่ใช้แหล่งแรงดัน (Voltage source inverter; VSI หรือ Voltage fed inverter; VFI) ถ้าเราต่อตัวเหนี่ยวนำค่าสูงอนุกรมกับแหล่งแรงดันกระแสของกึ่งวงจรมีค่าเกือบคงตัว เราเรียกว่า อินเวอร์เตอร์ที่ใช้แหล่งกระแส (Current source inverter; CSI หรือ Current fed inverter; CFI)



รูปที่ 2.21 แสดงแผนภาพบล็อกของอินเวอร์เตอร์แสดงการเชื่อมโยงไฟตรง(DC link)

แผนภาพบล็อกของอินเวอร์เตอร์ในความหมายกว้าง อันที่จริงแผนภาพนี้ แสดงการแปลงผันไฟสลับ 50 Hz เป็นไฟสลับที่แปรค่าและแปรความถี่ได้ ระบบนี้ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์และการเชื่อมโยงไฟระหว่างสองวงจรถ้าการเชื่อมโยงเป็นแบบตัวเก็บประจุขนาน(ซึ่งทำหน้าที่วงจรกรอง)อินเวอร์เตอร์ก็เป็นชนิด VSI แต่ถ้าเป็นการเชื่อมโยงอาศัยตัวเหนี่ยวนำอนุกรม อินเวอร์เตอร์ก็เป็นชนิด CSI ประมาณด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นปริมาณไฟสลับ ซึ่งอาจเป็นปริมาณ 1 เฟส กรณีที่กำลังไฟด้านออกไม่มากนัก เช่น ไม่เกิน 10 kW

(ยกเว้นโหลดต้องการปริมาณ 1 เฟส) หรือเป็นปริมาณ 3 เฟส โดยเฉพาะกำลังด้านออกมีค่าสูง สำหรับอินเวอร์เตอร์ VSI ปริมาณด้านออกเป็นแรงดันรูปคลื่นเหลี่ยมหรือ รูป PWM อินเวอร์เตอร์ VSI จึงเป็นเหมือนแหล่งแรงดันไฟสลับ แต่โดยทั่วไปโหลดจะเป็นชนิดตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นกระแสจะมีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปไซน์ ยิ่งไปกว่านั้นเราอาจใช้การป้อนกลับกระแสเพื่อควบคุมรูปคลื่นของกระแส ในกรณีอินเวอร์เตอร์ VSI มีการป้อนกลับกระแส วงจรทำหน้าที่คล้ายกับแหล่งกระแส มากกว่าแหล่งแรงดัน ส่วนอินเวอร์เตอร์ CSI ก็เป็นเหมือนแหล่งกระแสรูปคลื่นเหลี่ยมหรือ PWM โดยที่รูปคลื่นแรงดันอาจมีรูปใกล้เคียงไซน์ถ้าโหลดสามารถกรองฮาร์มอนิกต่างๆออกไปได้ อย่างไรก็ดี ถ้ามีการป้อนกลับแรงดันพฤติกรรมของอินเวอร์เตอร์ CSI จะคล้ายแหล่งแรงดันมากขึ้น

องค์ประกอบที่สำคัญของอินเวอร์เตอร์ก็คือสิ่งประดิษฐ์ ซึ่งได้แก่ ไทริสเตอร์ และทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ไทริสเตอร์มีข้อดีคือ ทนกระแสและแรงดัน ได้สูงจุดจนวนง่าย แต่มีข้อเสียคือทำให้หยุดนำกระแสหรือดับได้ยาก อีกทั้งไม่สามารถสวิตซ์ที่ความถี่สูงมากนัก(ต่ำกว่า 10kHz) ทรานซิสเตอร์ มีข้อดีคือ สวิตซ์ความถี่สูงได้ถึง 100 kHz แต่ไม่แข็งแรงทนทานได้เท่าไทริสเตอร์ เรานิยมใช้ทรานซิสเตอร์ในกรณีที่กำลังไม่สูงนัก(ต่ำกว่า 100 kVA)

ตัวอย่างการใช้อินเวอร์เตอร์ได้แก่

- แหล่งจ่ายไฟสำรอง
- แหล่งจ่ายไฟที่ไม่ขาดตอน(uninterruptible power suppliers:UPS)
- วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟสลับแบบปรับความเร็วได้
- เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
- อุปกรณ์แปลงผันพลังงานที่ปลายทางของสายส่งไฟตรง
- ฯลฯ

2.5.1 การวัดค่าอินдукแตนซ์ที่ความถี่ต่างๆโดยใช้ อินเวอร์เตอร์

การวัดตัวเหนี่ยวนำปกติจะมีเครื่องมือวัดที่สามารถคำนวณค่าออกมาได้ตามค่าความถี่ที่ต้องการซึ่งเครื่องมือที่ใช้วัดมีราคาค่อนข้างแพง ดังนั้นจึงมีวิธีการวัดค่าตัวเหนี่ยวนำ โดยอาศัยจากการอ่านของรูปคลื่นสัญญาณ จากออสซิลโลสโคป แล้วจึงใช้สูตรในการคำนวณ

$$\text{จาก} \quad V_L = L \cdot (di/dt)$$

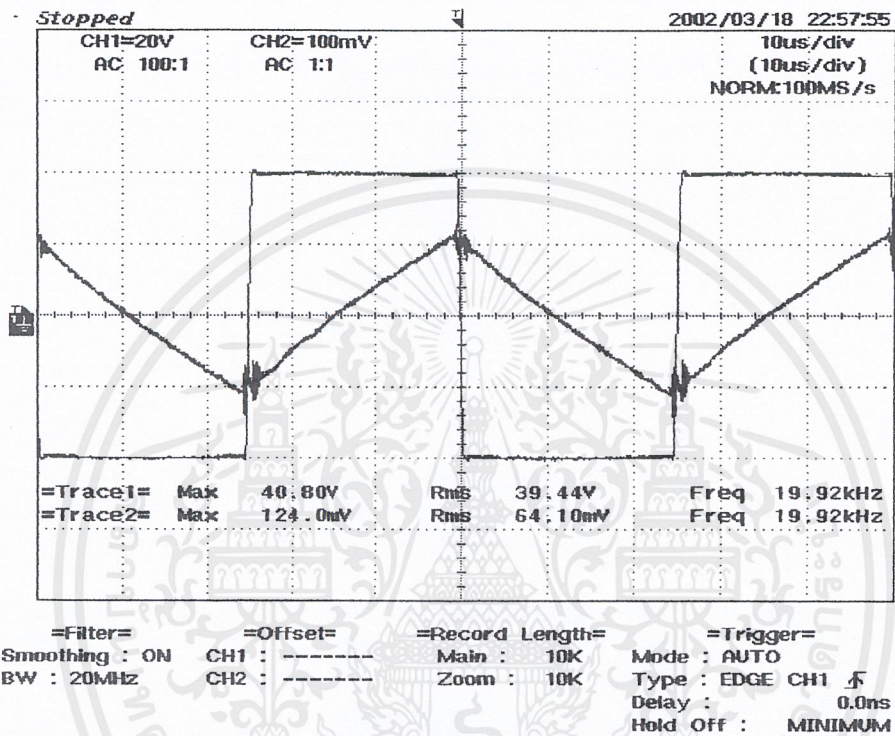
$$\text{ดังนั้น} \quad L = V_L / (di/dt)$$

การวัดสัญญาณรูปคลื่น จากออสซิลโลสโคป เราจะวัดค่าของ $V_L, di/dt$

V_L คือ แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมตัวเหนี่ยวนำ

di/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลา

ตัวอย่างการคำนวณ



$$V_L = 40.8 \text{ volt}$$

$$Di = 250 \text{ mA}$$

$$Dt = 25 \text{ } \mu\text{s}$$

$$L = 40.8 \text{ V} * 25 \text{ } \mu\text{s} / 250 \text{ mA}$$

$$= 4.08 \text{ mH} \#$$

บทที่ 3

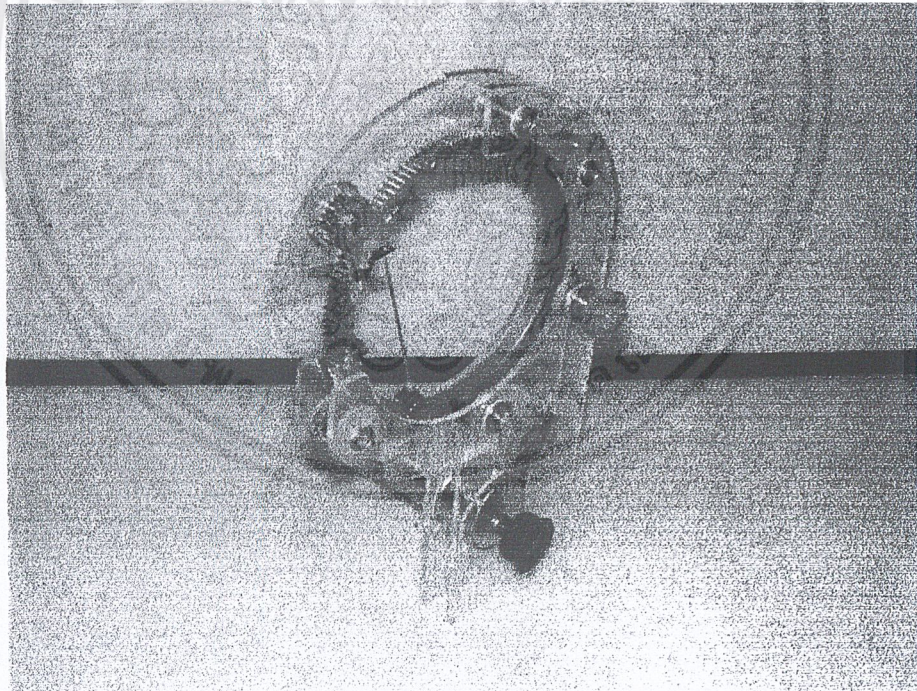
การออกแบบและการสร้าง

เครื่องพันแกนเทอร์รอยด์นี้ในส่วนของการสร้างจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆด้วยกันคือ

- 3.1 ส่วนของกลไกชุดพันแกนเทอร์รอยด์
- 3.2 ส่วนของกลไกชุดจับแกนเทอร์รอยด์
- 3.3 ส่วนของชุดเก็บลวด

3.1 กลไกชุดพันแกนเทอร์รอยด์

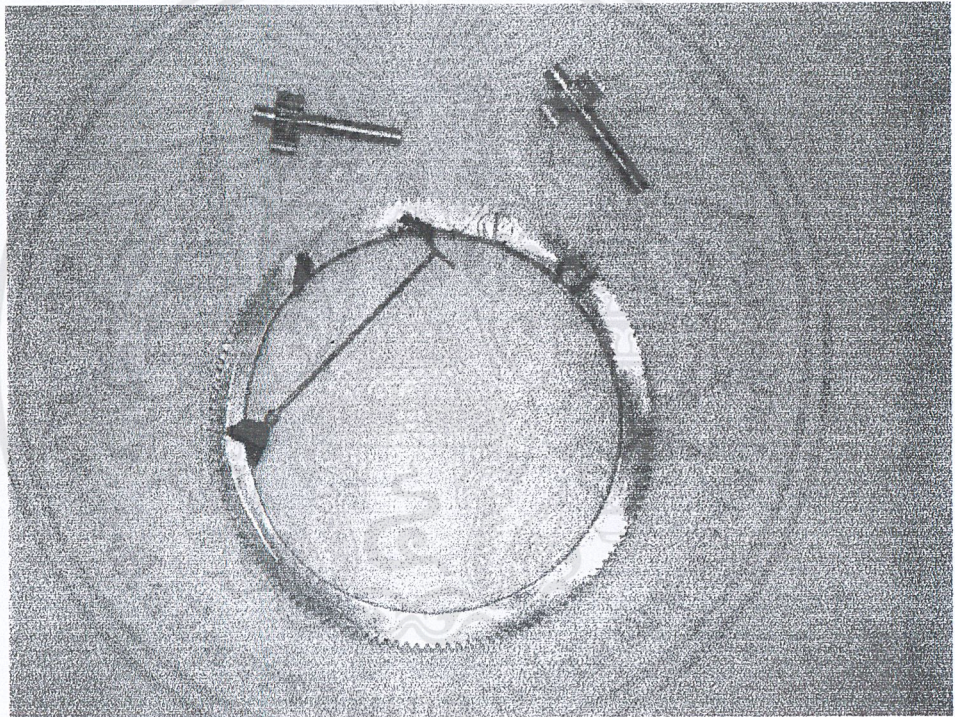
ในการออกแบบชุดพันแกนเทอร์รอยด์ แกนเทอร์รอยด์นั้นจะเป็นแบบวงแหวนปิดไม่สามารถเปิดหรือตัดออกมาพันลวดทองแดงได้ จึงได้ทำการออกแบบให้ชุดพันที่ประกอบไปด้วยเฟืองหมุนให้มีช่องว่างพอที่จะใส่แกนเทอร์รอยด์เข้าไปได้ โดยเฟืองหมุนจะถูกจับให้หมุนได้โดยเฟืองจับขนาดเล็ก และดึงลวดจากชุดเก็บลวดซึ่งติดอยู่กับเฟืองหมุนลงมาพันในแกนเทอร์รอยด์ได้ ซึ่งในส่วนนี้ของชุดเก็บลวดจะกล่าวในส่วนต่อไป



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของชุดพัน

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดพันขดลวด

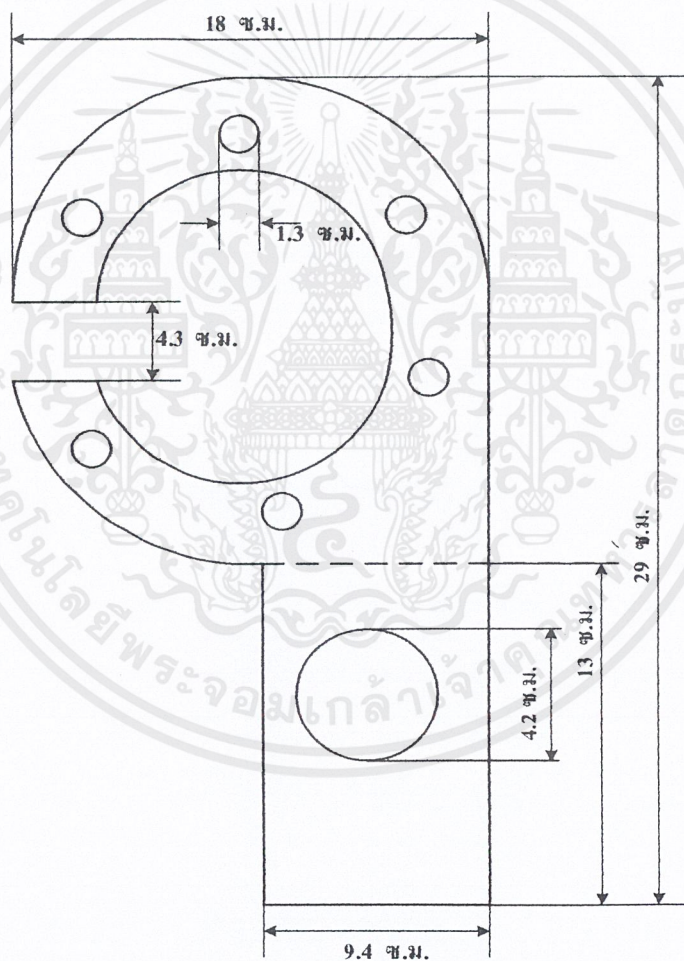
1. แผ่นพลาสติก 0.5 เซนติเมตร
2. เฟืองเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 เซนติเมตร จำนวน 6 ตัว
3. เฟืองใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.5 เซนติเมตร
4. แกนเพลลาขนาด 0.6 เซนติเมตร
5. ลูกปัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 0.6 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 1.3 เซนติเมตร จำนวน 12 ลูก
6. ดี.ซี.มอเตอร์ ขนาด 24 V แบบทศรอบ พร้อมสายพาน



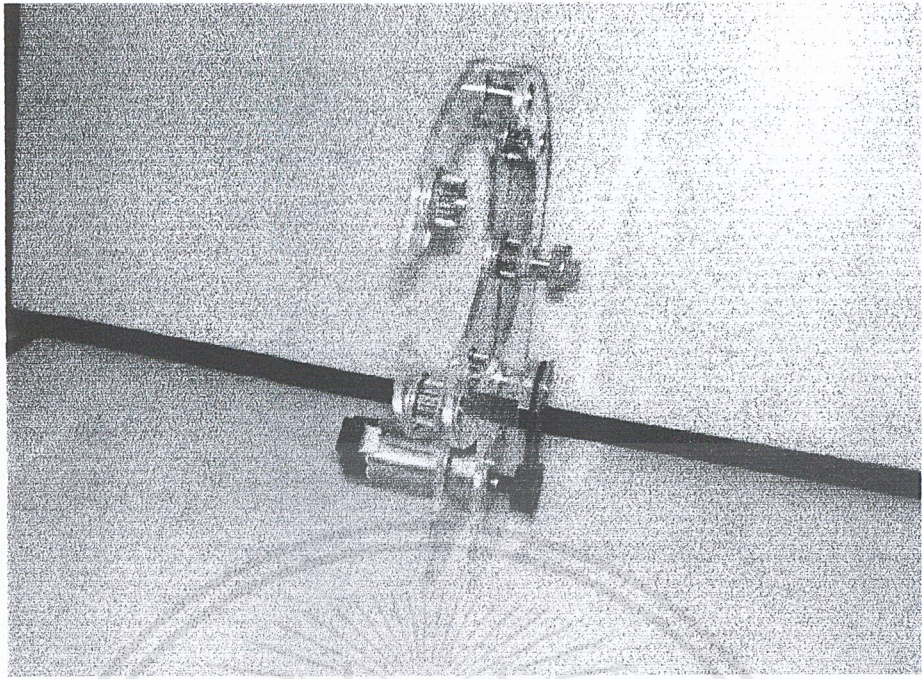
รูปที่ 3.2 แสดงเฟืองหมุนและเฟืองขับ

3.1.2 การประกอบชุดพื้นขดลวด

1. นำแผ่นพลาสติกมาตัดตามแบบจำนวน 2 แผ่นและเจาะรูกว้าง เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกของลูกปืนเพื่อใส่ลูกปืนดังรูปที่ 3.3
2. ตัดแกนเพลายาว 2.5 เซนติเมตร จำนวน 4 อัน และยาว 3.5 เซนติเมตร จำนวน 2 อัน
3. นำเฟืองขับใส่ลงในแกนเพลลาและสวมเข้ากับลูกปืนเพื่อเป็นตัวหล่อลื่นแล้วนำไปประกอบลงในแผ่นพลาสติกตามรูปที่ 3.4
4. นำมอเตอร์และสายพานมาใส่เพื่อขับเคลื่อน



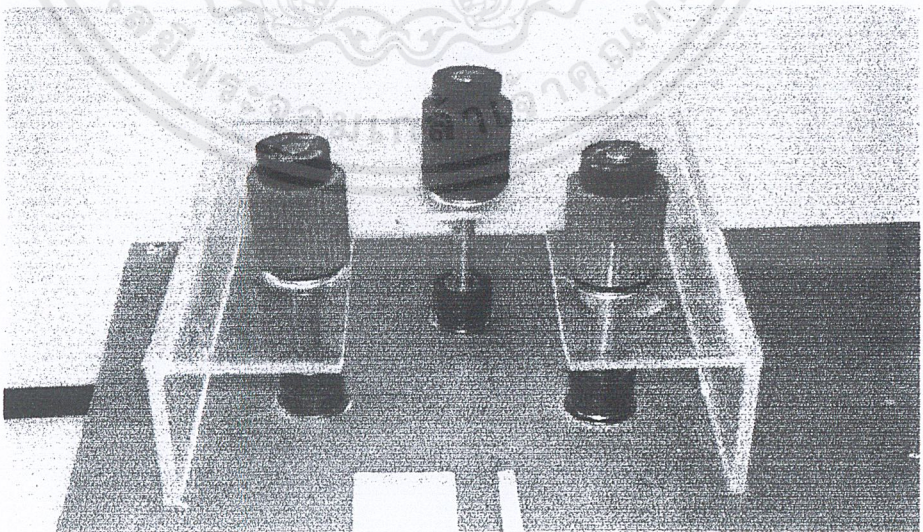
รูปที่ 3.3 แสดงขนาดของชุดพื้น



รูปที่ 3.4 แสดงการประกอบชุดฟัน

3.2 กลไกชุดจับแกนเทอร์รอยด์

การออกแบบส่วนยึดจับแกนเทอร์รอยด์นั้นมีไว้เพื่อจับและควบคุมการหมุนของแกนเทอร์รอยด์เพื่อใช้ในการเรียงเส้นลวดเมื่อทำการพันลงไปบนแกนเทอร์รอยด์ โดยความเร็วในการหมุนของแกนต้องให้มีความสัมพันธ์กับชุดฟันที่จะนำลวดหมุนลงมาพันแกนเทอร์รอยด์ โดยใช้สเตปมอเตอร์เป็นตัวขับ ควบคุมความเร็วและจำนวนรอบที่พันด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของชุดจับ

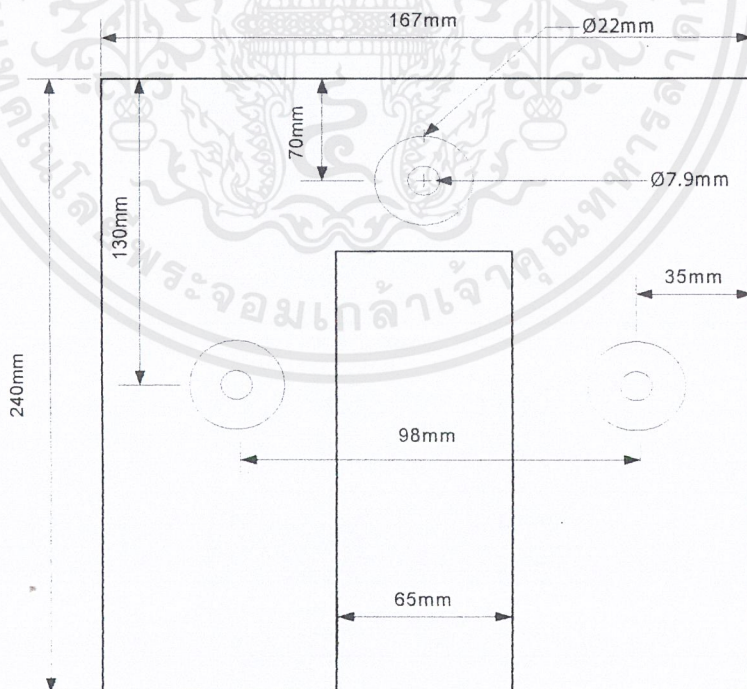
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดยึดจับแกนเทอร์รอยด์

1. แผ่นพลาสติกใสหนา 0.5 เซนติเมตร
2. แกนเพลลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
3. สายพาน
4. ลูกป็น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตรจำนวน 6 ตลับ
4. ลูกยาง
5. อลูมิเนียมฉาก
6. สเตปมอเตอร์

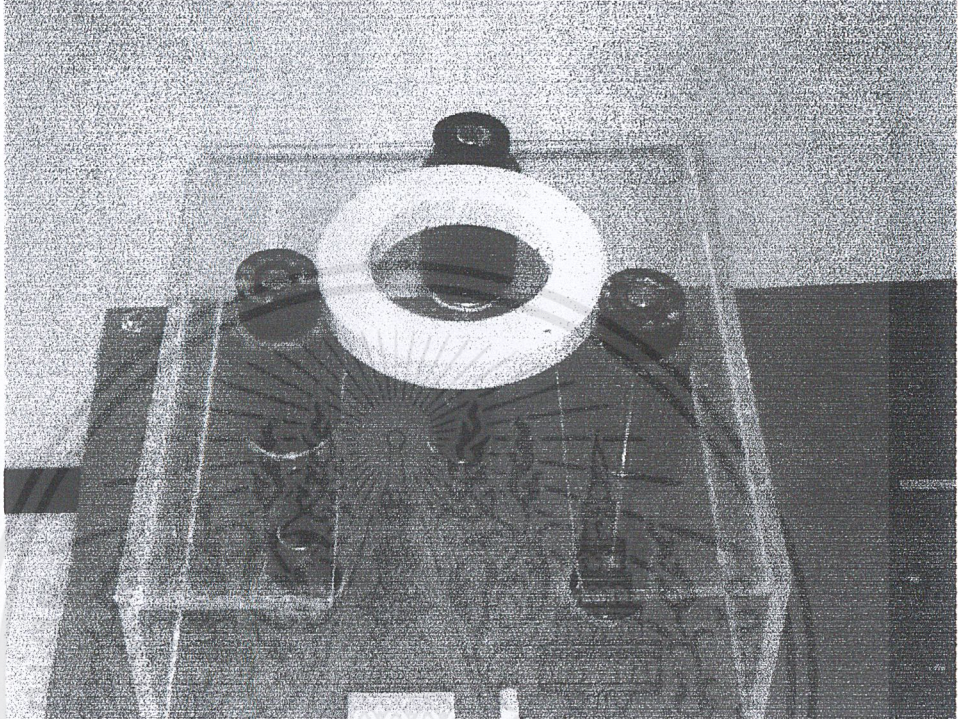
3.2.2 การประกอบส่วนยึดจับแกนเทอร์รอยด์

1. นำแผ่นพลาสติกมาตัดและเจาะรูดังรูปที่ 3.6
2. นำแผ่นพลาสติกมาตัดขนาด 17 x 20.5 เซนติเมตร จำนวน 1 แผ่นเพื่อเป็นฐานล่าง
3. นำแผ่นพลาสติกมาตัดขนาด 11.5 x 17 เซนติเมตรจำนวน 2 แผ่นและขนาด 20.5 x 11.5 เซนติเมตร 1 แผ่น เพื่อประกอบด้านข้างและหลัง
4. ตัดแกนเพลลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร จำนวน 3 อัน
5. นำลูกป็นมาใส่รูที่เจาะไว้ตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงขนาดด้านบนของชุดยึดจับแกน

6. วัดขนาดความกว้างของแกนเพื่อจัดให้สมดุลกันในการยึดแกนให้เท่ากันทั้งสามด้าน
7. ประกอบแกนเพลลาเข้าไปรูในของลูกปืน และใส่เฟืองพร้อมสายพาน
8. ใส่สเตปมอเตอร์เข้ากับสายพานที่คล้องทั้งสามแกนและทดลองจับดูว่าห่อลื่นดีหรือไม่จากนั้นใส่ลูกยางที่หัวของแกนทั้งสามเพื่อรอง แกนเทอร์รอยด์



รูปที่ 3.7 แสดงการยึดจับแกนเทอร์รอยด์

3.3 ชุดเก็บขวดลวด

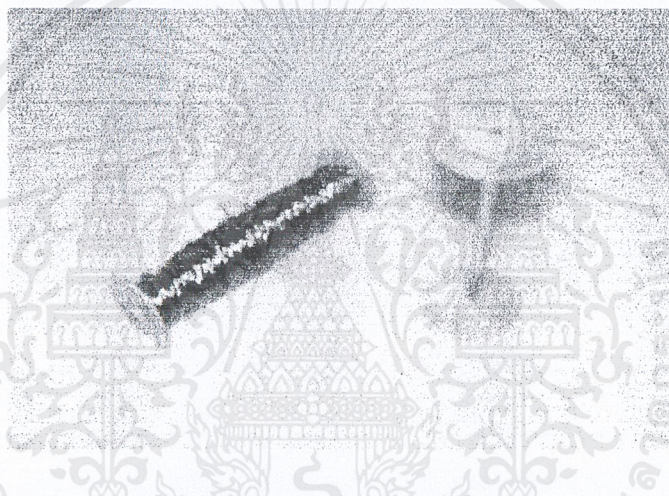
ในการพันแกนเทอร์รอยด์นั้นจะต้องนำลวดมาพันลงในชุดเก็บลวดซึ่งจะติดอยู่กับเฟืองหมุนของชุดพันเพื่อหมุนลวดลงมาพันในแกนเทอร์รอยด์ ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบชุดเก็บลวดให้มีขนาดเล็กและสามารถเก็บลวดให้ได้มากพอที่จะพันลวดลงในแกนเทอร์รอยด์ตามจำนวนรอบที่ต้องการ

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดเก็บลวด

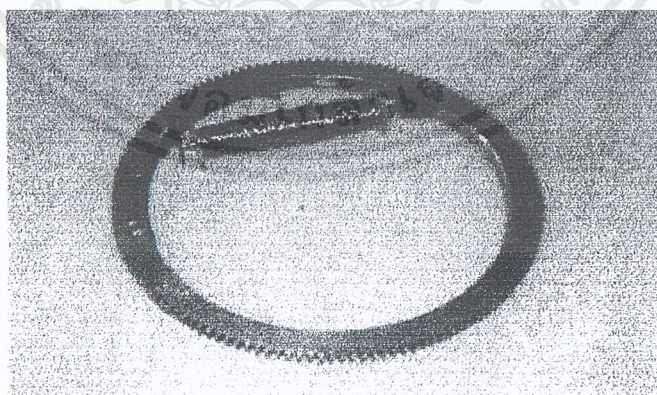
1. เหล็กแกนกลางกลวงยาว 6 เซนติเมตร
2. แผ่นพลาสติกใสหนา 0.3 เซนติเมตร
3. แกนเพลลาเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร ยาว 8 เซนติเมตร
4. หางปลาตัวเล็ก 2 ตัว

3.3.2 การประกอบชุดเก็บลวด

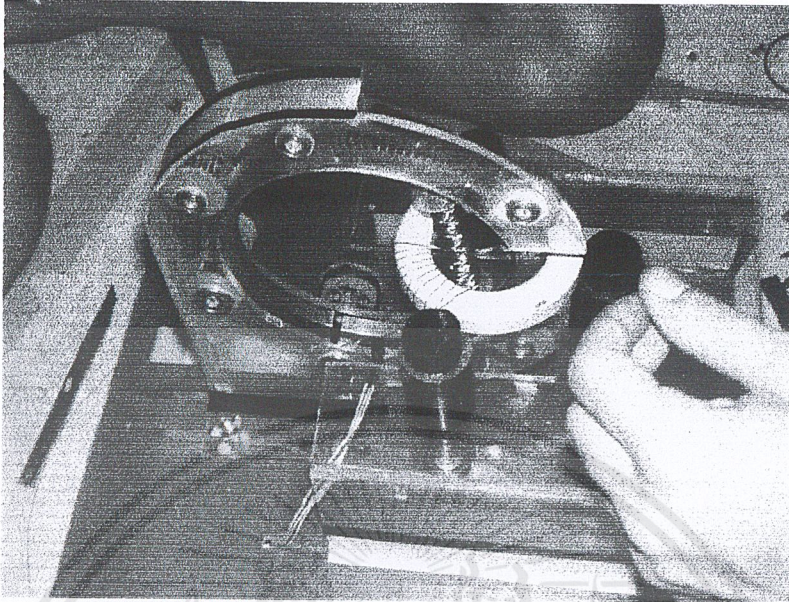
1. นำแผ่นพลาสติกมาตัดเป็นวงกลมและเจาะรูที่จุดศูนย์กลางตามขนาดดังรูป
2. นำเหล็กแกนกลางตามขนาดที่กำหนดไว้มาสวมในรูพลาสติกทั้งสองด้านให้แน่นเพื่อเป็นตัวกันลวดทองแดงไม่ให้หลุดออกขณะพันลวดดังรูป 3.8
3. นำลวดทองแดงพันลงเหล็กแกนกลางที่เตรียมไว้ให้เต็มและเพียงพอต่อการพันลงในแกนเทอร์รอยด์
4. นำหางปลาที่เตรียมไว้มาติดที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งของแกนเพลลา
5. นำแกนเพลลาไปยึดติดอยู่กับเฟืองหมุนที่ชุดพันดังรูป 3.9
6. นำเหล็กแกนกลางไปใส่ลงในแกนเพลลาที่ยึดติดกับเฟืองหมุนและออกแบบให้ปลายอีกด้านหนึ่งของแกนเพลลาสามารถถอดเข้าและถอดออกได้เพื่อทำการเปลี่ยนลวดหากลวดหมด



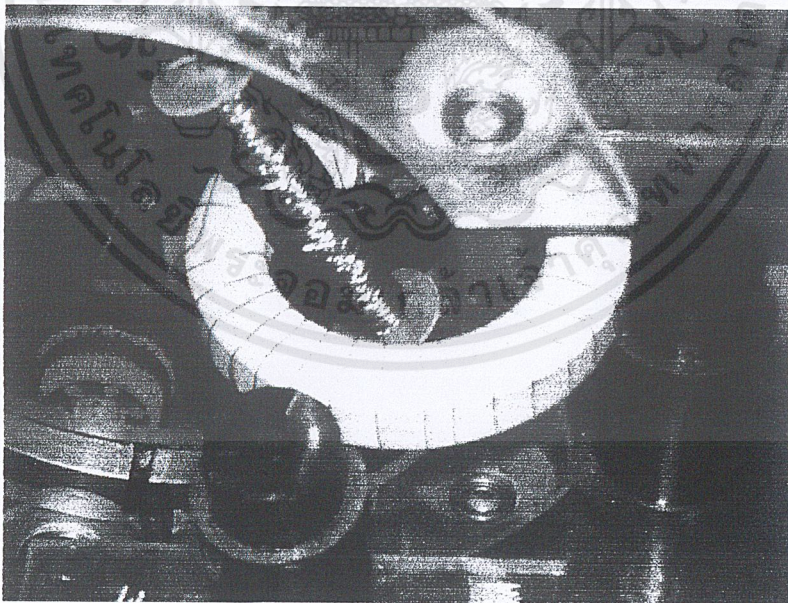
รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างชุดเก็บลวด



รูปที่ 3.9 แสดงการนำชุดเก็บลวดติดที่เฟืองหมุน



รูปที่ 3.10 แสดงการเริ่มพันแกนเทอร์รอยด์



รูปที่ 3.11 แสดงการพันแกนเทอร์รอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

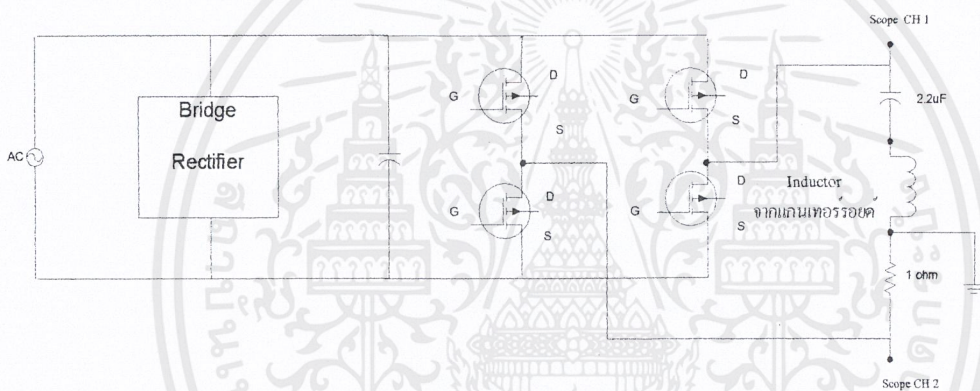
4.1 การทดลองที่ 1

การทดลองหาผลของความถี่กับค่าอินดักแตนซ์

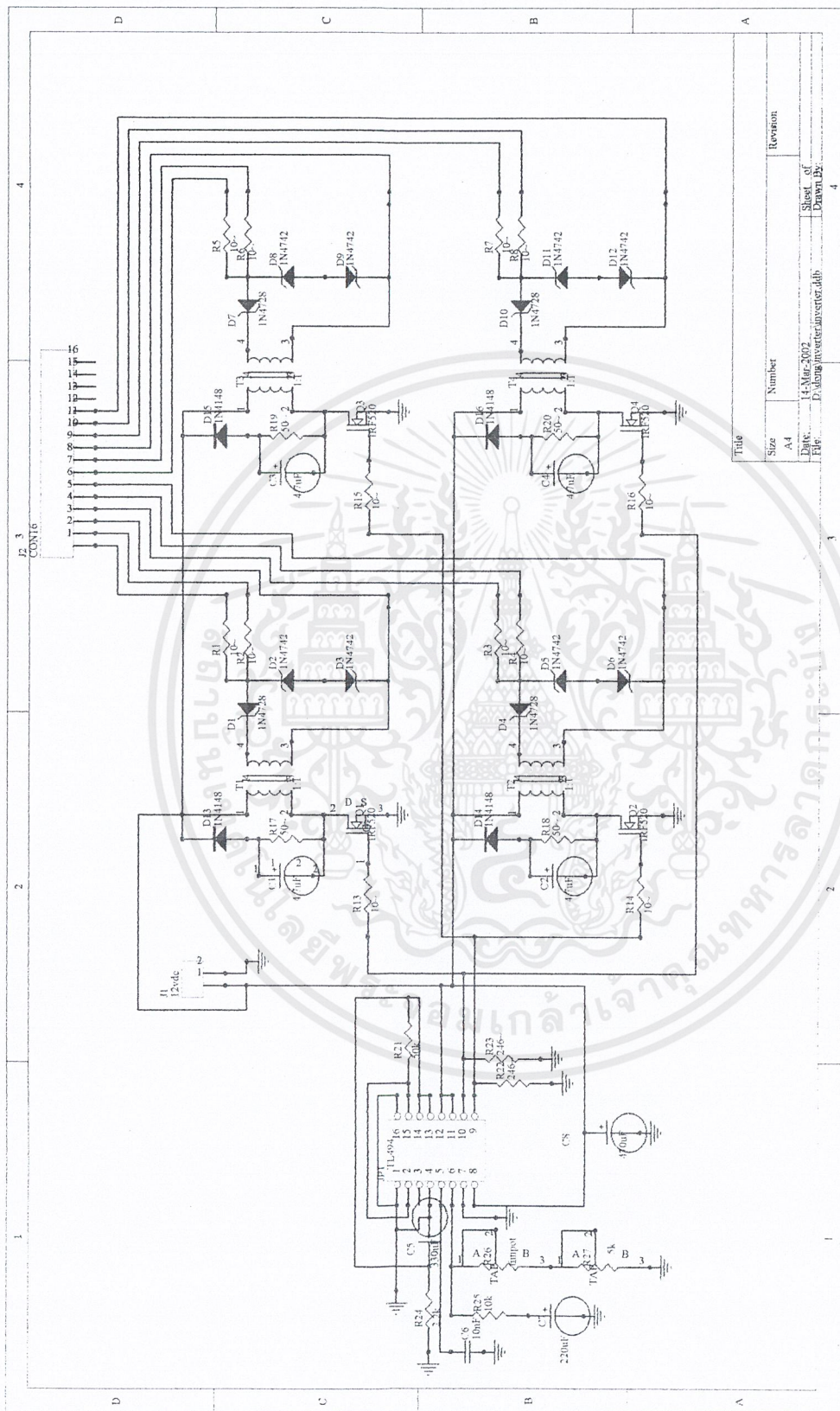
4.1.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. เพื่อศึกษาถึงผลของความถี่ต่อค่าอินดักแตนซ์
2. เพื่อศึกษาถึงการใช้งาน วงจรอินเวอร์เตอร์มาวัดค่ากระแส, แรงดันและคาบเวลาเพื่อคำนวณหาค่าอินดักแตนซ์

4.1.2 วงจรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส โดยใช้มอสเฟต



Title		Revision	
Size	A4	Number	
Date	14-Mar-2002	Sheet of	4
File	D:\alog\prover\anvotr.dtb	Drawn By	

รูปที่ 4.2 แสดงวงจร ไดร์อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

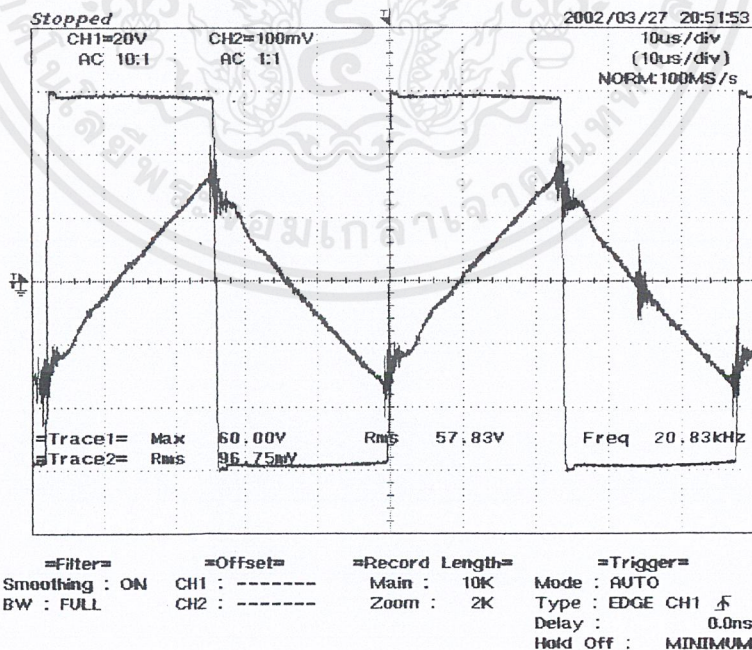
1. แหล่งจ่ายไฟสลับ 0-220 โวลท์
2. แกนเทอร์รอยด์ที่พันลวดเบอร์ 27 จำนวน 180รอบ
3. เครื่อง Digital Oscilloscope
4. สายโพรบ 2 เส้น

4.1.4 ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่ออินดักเตอร์ที่พันจากแกนเทอร์รอยด์จำนวนรอบ 180 รอบเข้ากับวงจร
2. ต่อสายโพรบ ที่ CH 1 เพื่อวัดแรงดันตกคร่อมอินดักเตอร์ (V_L)
3. ต่อสายโพรบ ที่ CH 2 เพื่อวัดแรงดันที่คร่อม ความต้านทาน 1Ω (V_{R1})
4. จ่ายแรงดันโดยปรับแหล่งจ่ายไฟสลับไปที่ 30 โวลท์
5. ปรับความถี่ไปที่ 20 kHz โดยทำการปรับที่ความต้านทานปรับค่าได้ $5k\Omega$ แล้วทำการวัดสัญญาณของ (V_L), (V_{R1}) โดย $I = V/R$ เมื่อ $R = 1\Omega$ ดังนั้น $I = V$
6. อ่านค่า V_L และ di/dt เพื่อนำมาหาค่าอินดักแตนซ์ จากสูตร $L = V_L / (di/dt)$
7. เปลี่ยนค่าความถี่ไปเรื่อยๆ ดังนี้ 20 kHz, 25 kHz, 30 kHz, 35 kHz, 40kHz, 45 kHz, 50 kHz ทำการทดลอง เปลี่ยนจำนวนรอบเป็น 150รอบ แล้วทดลองเหมือนเดิม

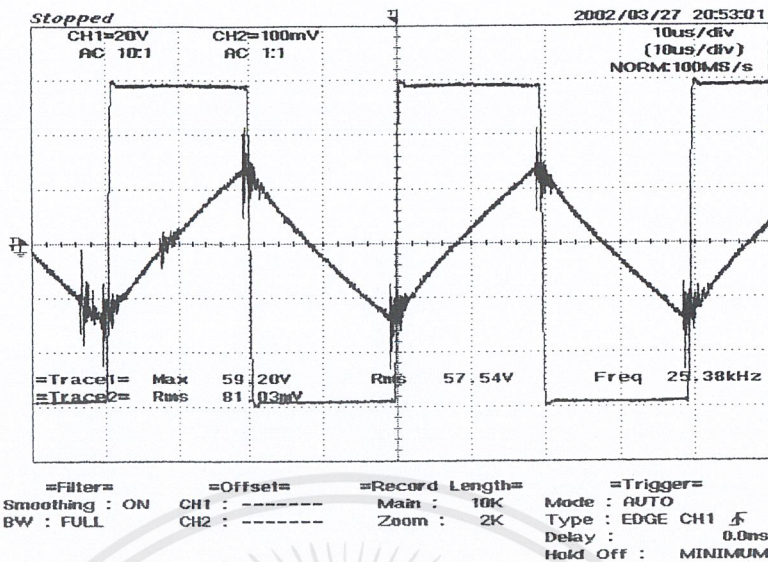
4.1.5 ผลการทดลอง

- ที่ 180รอบ 20 kHz

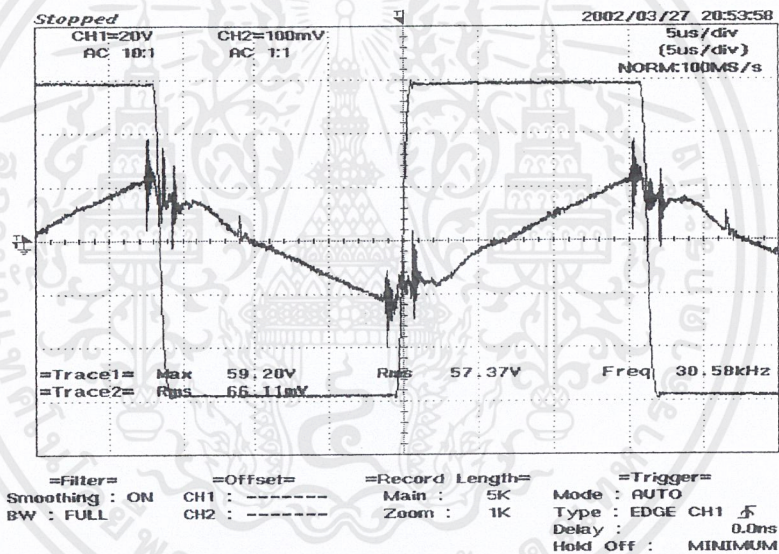


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

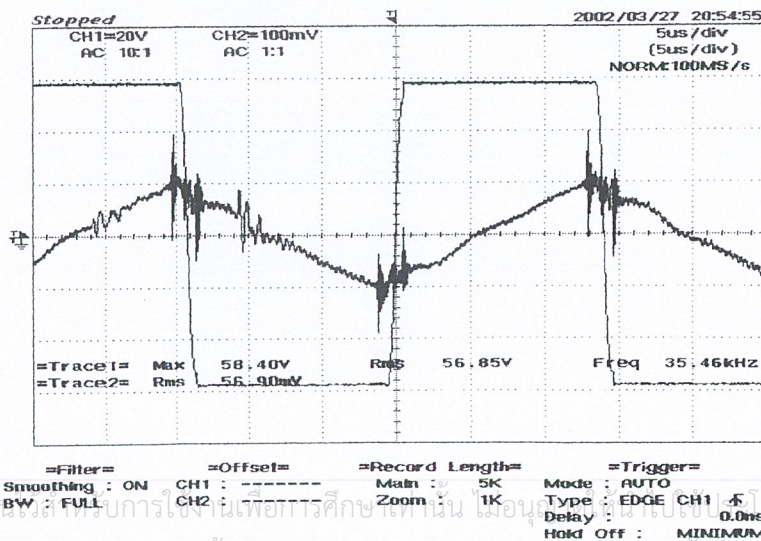
-ที่ 180 รอบ 25 kHz



-ที่ 180 รอบ 30 kHz

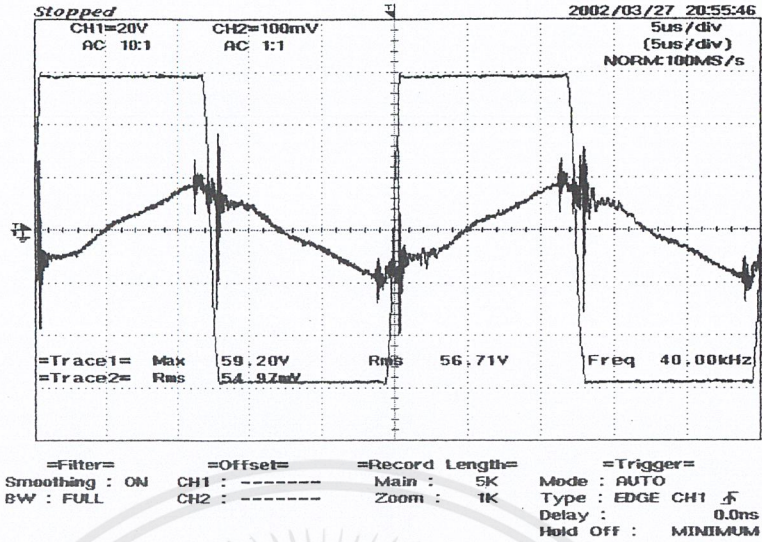


-ที่ 180 รอบ 35 kHz

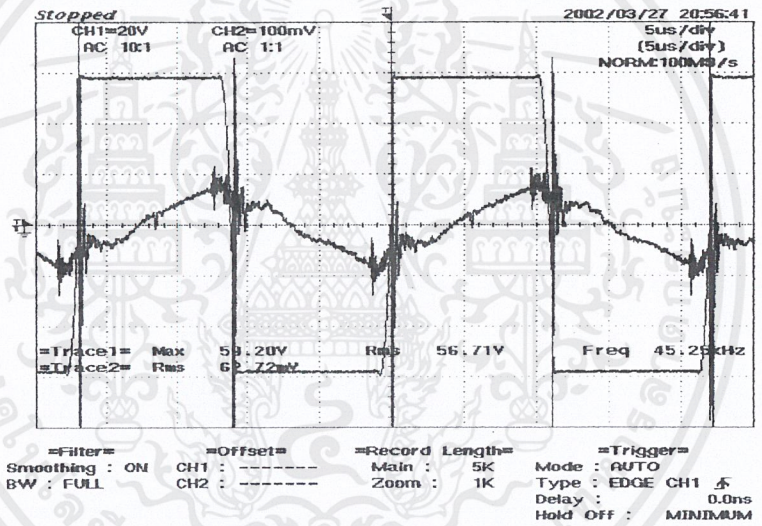


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากหน่วยงานต้นทาง
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

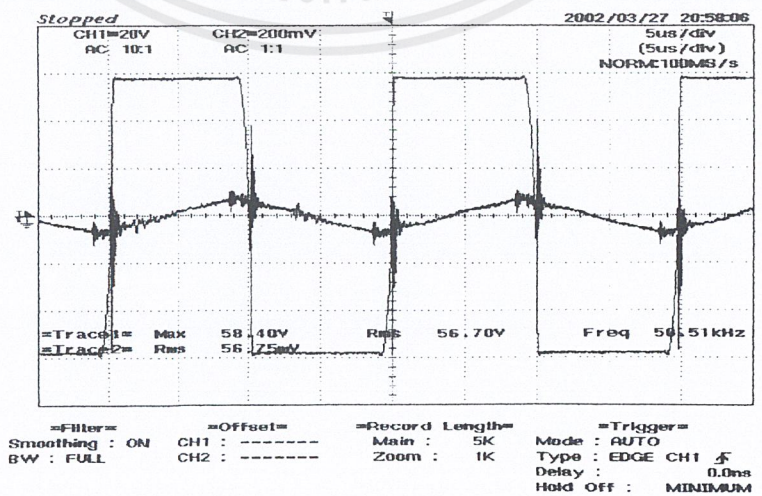
- ที่ 180 รอบ 40 kHz



- ที่ 180 รอบ 45 kHz



- ที่ 180 รอบ 50 kHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 1 แสดงค่าอินดักแทนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยจำนวนรอบ 180 และ 150 รอบ

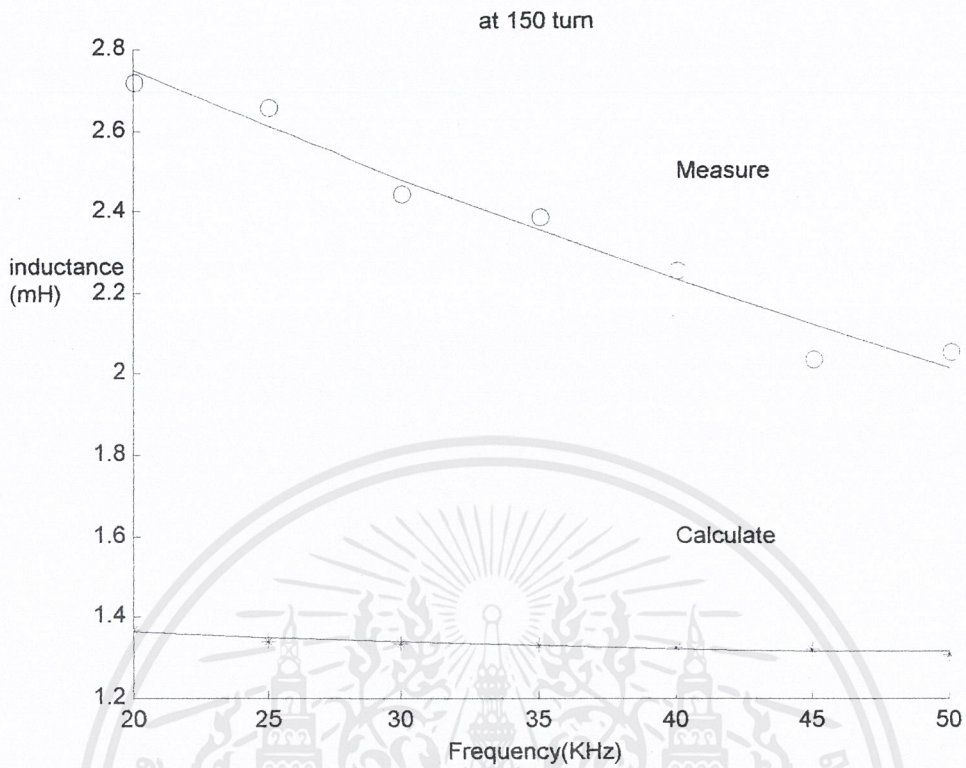
ความถี่ (KHz)	20	25	30	35	40	45	50
ค่า L ที่วัด ได้จาก เครื่องวัด อินดักเตอ ร์ ที่ 150 รอบ	1.68	1.65	1.66	1.6	1.58	1.55	1.5
ค่า L ที่วัด ได้จาก อินเวอร์เต อร์ ที่ 150 รอบ	2.72	2.66	2.45	2.39	2.26	2.04	2.08
ค่า L ที่ คำนวณได้ ที่ 150 รอบ	1.37	1.34	1.335	1.332	1.328	1.324	1.31

ตารางผลการทดลองแสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากการใช้วงจรอินเวอร์เตอร์วัดค่าอินดักแทนซ์
ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยจำนวนรอบ 150 รอบ

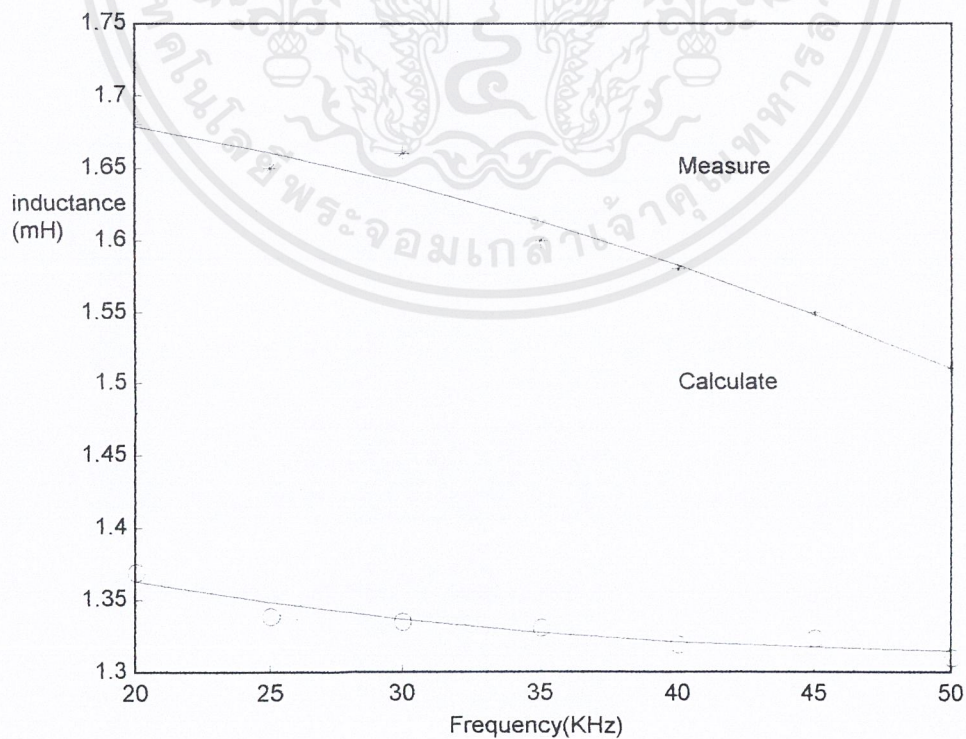
ความถี่ (KHz)	20	25	30	35	40	45	50
ค่าความ ผิดพลาดที่ 150 รอบ (%)	22.6	23.1	24.3	20.1	18.9	17.1	14.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงผลของความถี่กับค่าอินดักแตนซ์จากการวัดโดยใช้อินเวอร์เตอร์

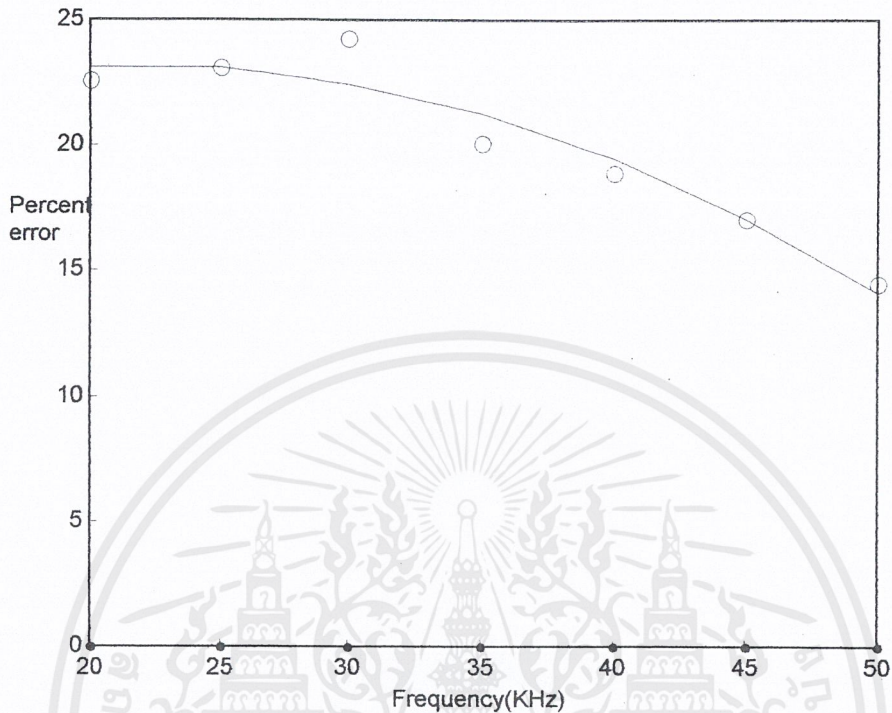


กราฟแสดงค่าที่ผิดพลาดจากการใช้อินเวอร์เตอร์วัดค่าอินดักแตนซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดโดยใช้เครื่องวัดค่าอินดักเตอร์จำนวน 150 รอบ



4.1.6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองนี้ เมื่อทำการปรับค่าความถี่ที่ป้อนให้กับอินดักแทนซ์ จะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่าอินดักแทนซ์จะลดลงซึ่งเป็นผลจากค่า μ_0 จากกราฟที่ภาคผนวก นั่นคือค่า อินดักแทนซ์จะแปรผกผันกับค่าความถี่แต่จากการทดลองจะเห็นว่ารูปกราฟที่ได้มา จะมีค่าลดลง แต่ลดลงเล็กน้อยแสดงให้เห็นว่าความถี่มีผลกับค่าอินดักแทนซ์ จะเห็นว่าค่าที่วัดได้มีความแตกต่างจากที่คำนวณมา มีสาเหตุจากการวัดรูปคลื่นสัญญาณของ V_L และ t จะมีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นและการตั้งค่าความถี่มีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง อีกทั้งค่า A_L ของแกนเหล็กมีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง ดังนั้นค่าที่ทำการคำนวณนี้จึงเป็นค่าที่ประมาณจึงทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้

4.2 การทดลองที่ 2

การทดลองหาผลของจำนวนรอบกับค่าอินดักแตนซ์

4.2.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. เพื่อศึกษาถึงผลของจำนวนรอบที่พันขดลวด กับค่าอินดักแตนซ์เมื่อความถี่คงที่
2. เพื่อเปรียบเทียบถึงค่าอินดักแตนซ์ที่วัด ได้กับค่าที่คำนวณได้

4.2.2 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

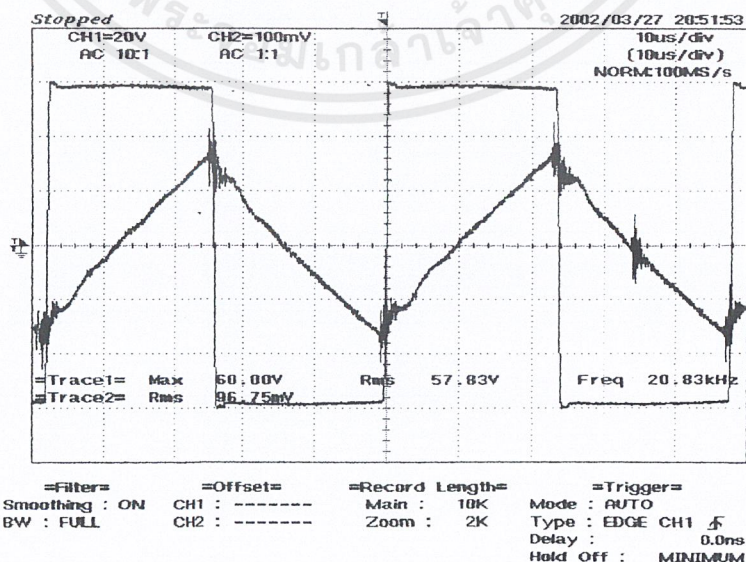
ใช้วงจรเดียวกับการทดลองครั้งที่ 1

4.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่ออินดักเตอร์ที่พันจากแกนเทอร์รอยด์จำนวน 180 รอบ เข้ากับวงจร
2. ต่อสายไฟโรงงานที่ CH1. เพื่อวัดแรงดันเครื่องอินดักเตอร์ (V_2)
3. ต่อสายไฟโรงงานที่ CH2. เพื่อวัดแรงดันเครื่องความต้านทาน 1-2
4. จ่ายแรงดันโดยปรับ Variac ไปที่ 50 V.
5. ปรับความถี่ไปที่ 20 kHz โดยปรับที่ความต้านทานปรับค่าได้ $sk\Omega$ แล้วได้สัญญาณของ V_2 กับ $V_{R1}\Omega$ นั่นก็คือค่ากระแสที่จ่ายออกมา
6. อ่านค่า V_L และ di/dt เพื่อนำมาหาค่าอินดักแตนซ์จากสมการ $L = V_L / di/dt$
7. เปลี่ยนค่าจำนวนรอบการพันขดลวดเป็น 160,140,120,100,80,60,40 และ 20 โดยตั้งความถี่ไว้ที่ 20 kHz แล้วทำการทดลองซ้ำเพื่อหาค่าอินดักแตนซ์ที่จำนวนรอบต่าง ๆ

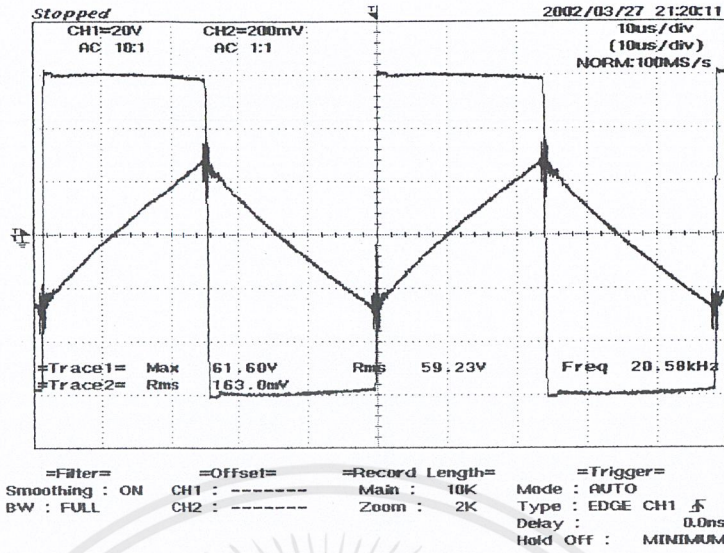
4.2.4 ผลการทดลอง

- ที่ 180 รอบ 20 kHz

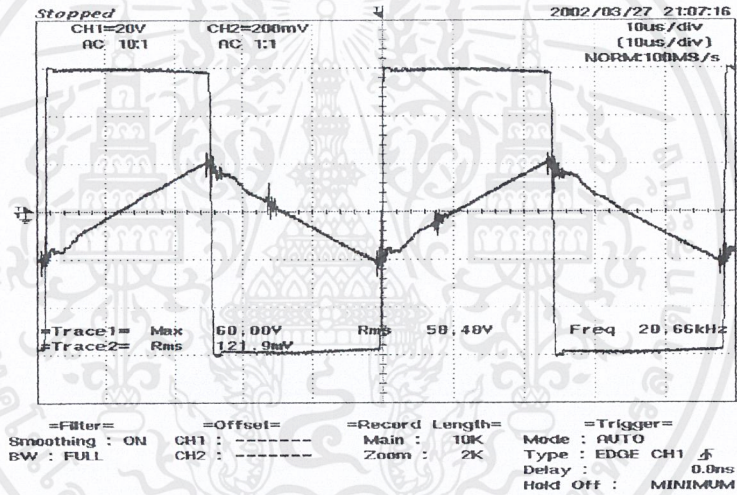


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

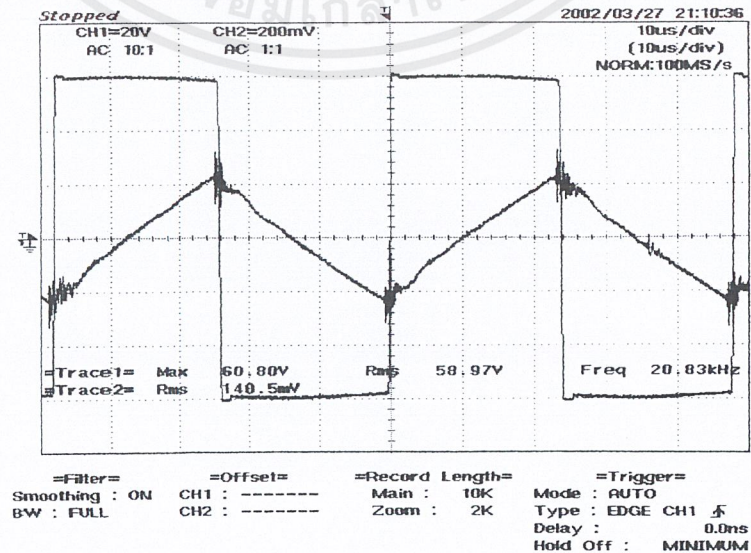
- ที่ 160 รอบ 20 kHz



- ที่ 140 รอบ 20 kHz

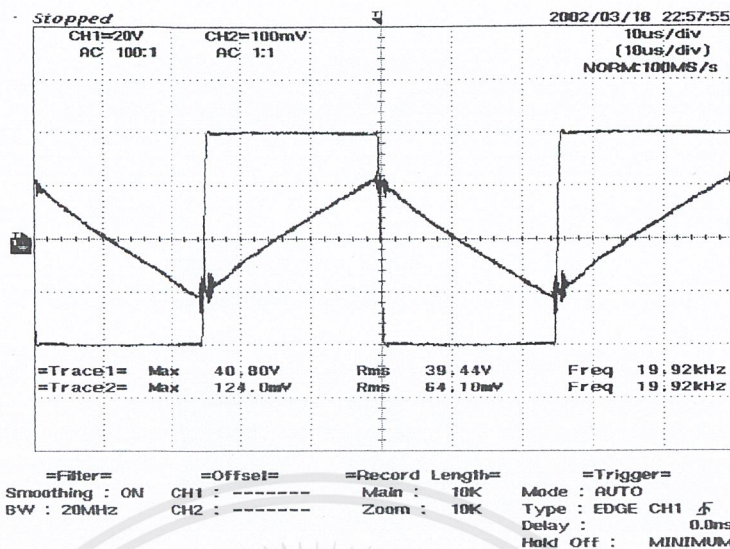


- ที่ 120 รอบ 20 kHz

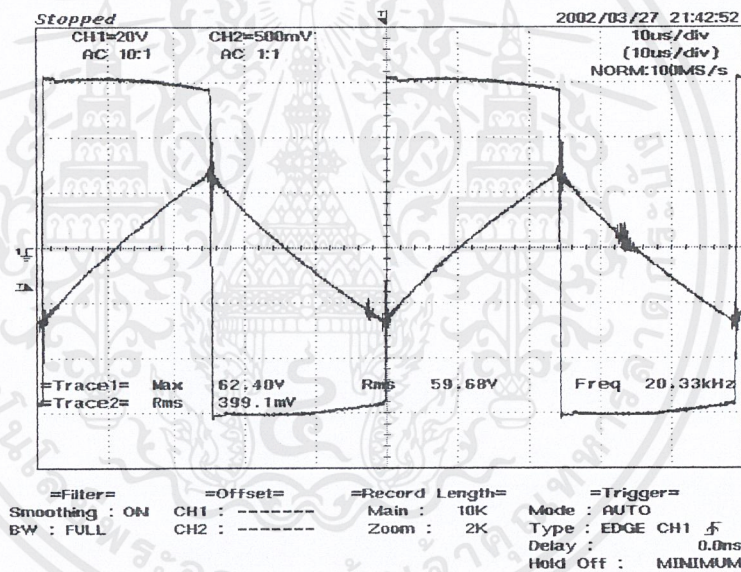


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

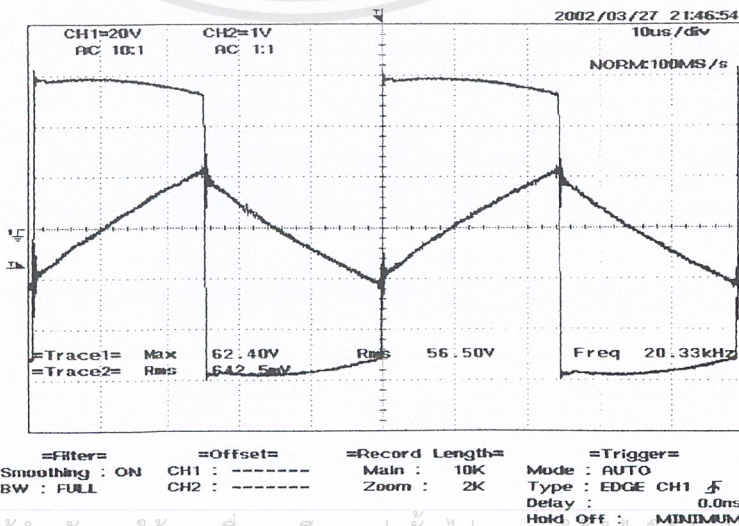
- ที่ 100 รอบ 20 kHz



- ที่ 80 รอบ 20 kHz

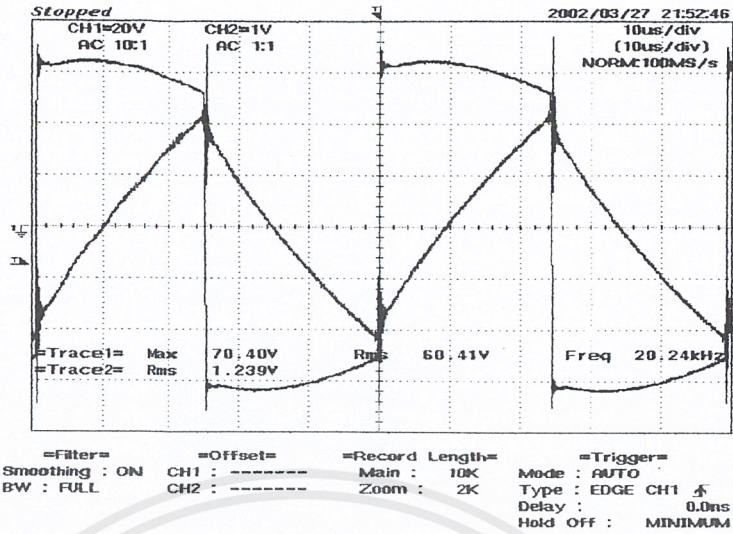


- ที่ 60 รอบ 20 kHz

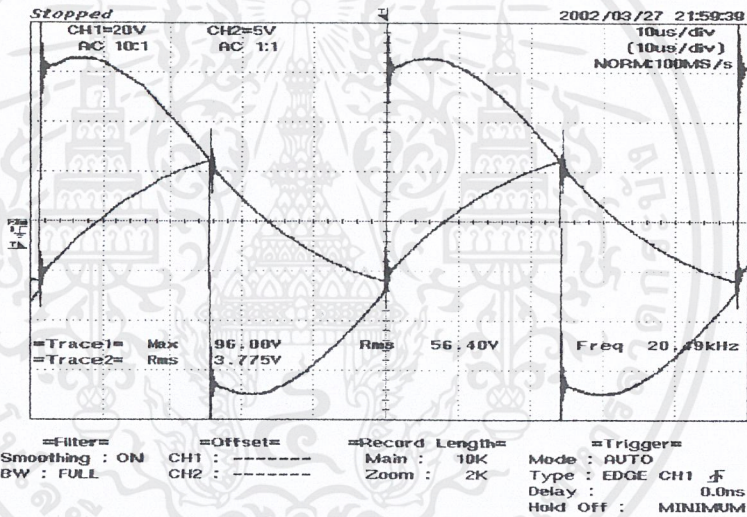


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ 40 รอบ 20 kHz



- ที่ 20 รอบ 20 kHz



ตารางผลการทดลองที่ 2

(N)	180	160	140	120	100	80	60	40	20
L(mH)	3.385	2.92	2.54	1.56	1.19	0.89	0.48	0.27	0.06
L(mH)	3.18	2.58	3.05	1.56	1.14	0.74	0.43	0.2	0.053
L(mH)	2.59	2.05	1.56	1.152	0.8	0.512	0.288	0.13	0.032

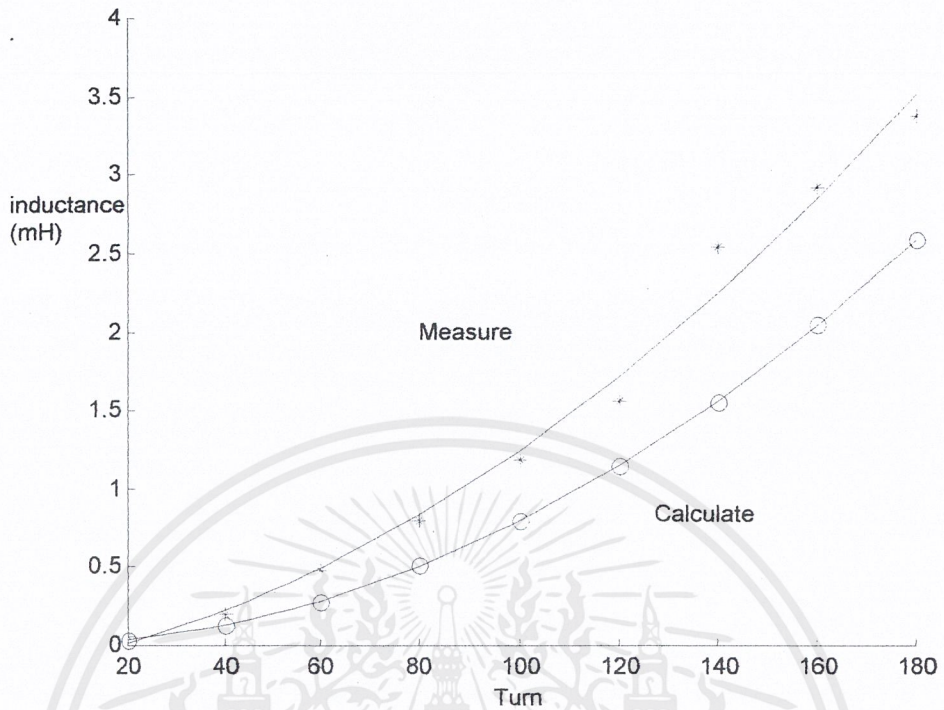
แถวที่ 1 (N) จำนวนรอบ

แถวที่ 2 ค่าอินดักแตนซ์ที่ได้จากการวัดรูปคลื่นโดยใช้วงจรมินิเวอริเตอร์

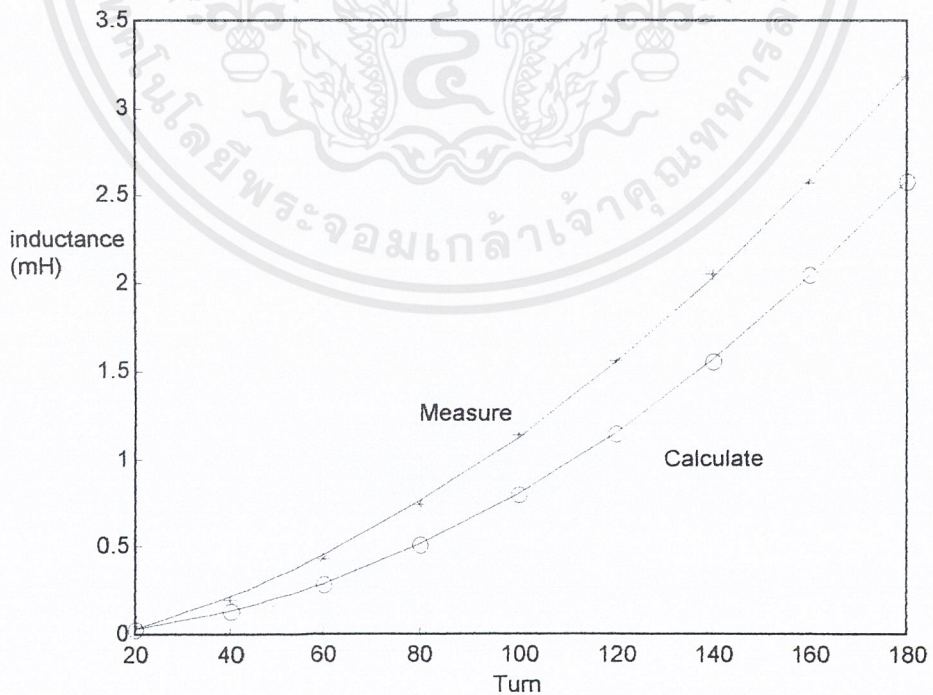
แถวที่ 3 ค่าอินดักแตนซ์ที่ได้จากการวัดจากเครื่องวัดอินดักเตอร์

แถวที่ 4 ค่าอินดักแตนซ์ที่ได้จากการคำนวณ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินดักแตนซ์กับจำนวนรอบโดยวัดจากวงจรอินเวอร์เตอร์

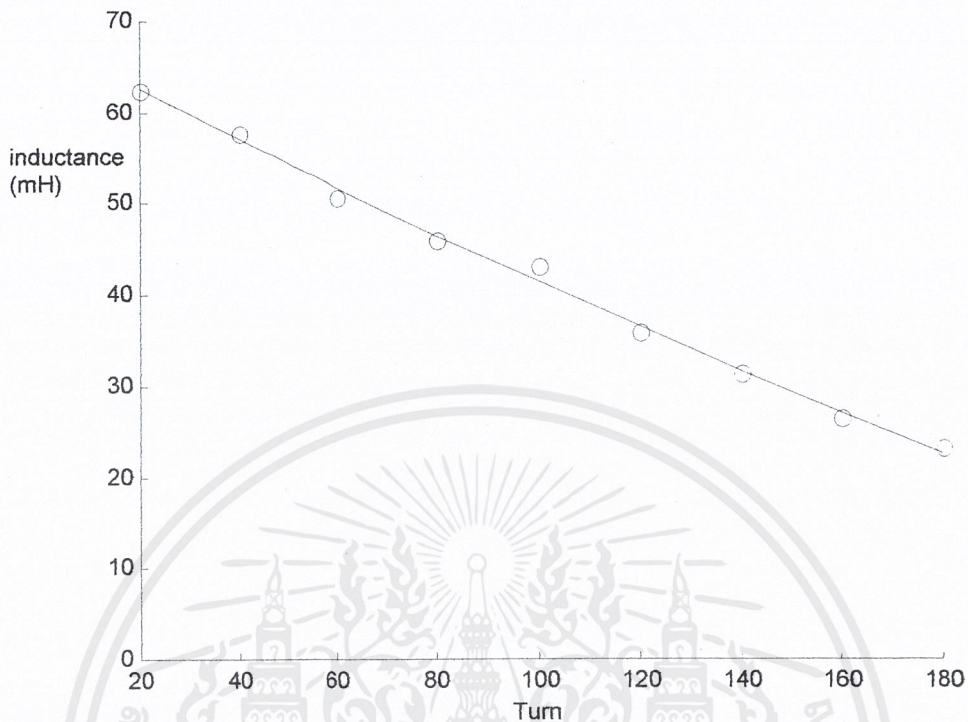


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินดักแตนซ์กับจำนวนรอบโดยวัดจากเครื่องวัดอินดักเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัด



4.2.5 สรุปและวิจารณ์การทดลอง

จากการทดลองเมื่อลดจำนวนรอบของขดลวดที่พันแกนเทอร์รอยด์ลงจะพบว่าค่า อินดักแตนซ์จะแปรผันตามจำนวนรอบ เนื่องจากเมื่อลดค่าจำนวนรอบให้ลดลงค่ากระแสจะสูงขึ้น เนื่องจากค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดลดลง ทำให้กระแสเพิ่มขึ้น เพื่อรักษาให้แรงดันที่จ่ายคงที่ โดยที่ความถี่นั้นคงที่ นั่นคือทำให้ค่า di/dt เพิ่มขึ้น

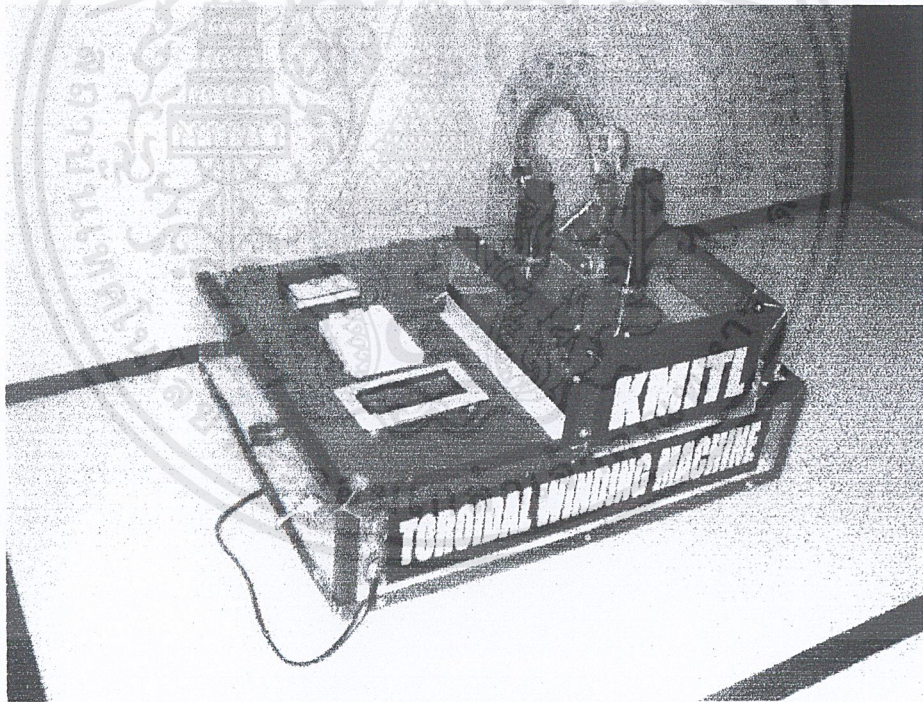
เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ จะเห็นว่าลักษณะของกราฟจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่ค่าที่ได้จะมีค่าผิดพลาดไปบ้าง ซึ่งเกิดจากการวัดรูปคลื่นสัญญาณของ V_L และ I_L มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นและมีสัญญาณการรบกวน ดังนั้นค่าที่คำนวณได้จึงเป็นค่าประมาณ และสาเหตุอีกประการหนึ่ง คือ ค่าคงที่ของแกนเหล็ก (A_L) ในทางปฏิบัติอาจมีค่าไม่เท่ากับค่าที่ใช้คำนวณ ดังนั้นจึงเกิดค่าความผิดพลาดได้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

5.1 สรุปโครงการ

งานวิจัยนี้ เป็น เครื่องพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์ที่พัฒนาจากเครื่องต้นแบบซึ่งเป็นการพัฒนาแบบเริ่มต้นเท่านั้นแต่ก็สามารถพันค่าออกมาได้ตามที่ต้องการ ในการออกแบบเครื่องพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์ สามารถแยกสร้างเป็นส่วนใหญ่ ๆ ได้ดังนี้ ชุดพันแกนเทอร์รอยด์ ชุดจับแกนเทอร์รอยด์ ชุดเก็บลวด และชุดควบคุม ซึ่งในแต่ละส่วนจะพบปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นจุดย่อย ๆ หลายส่วน และได้ทำการตัดแปลงแก้ไข ปัญหาเฉพาะหน้าเป็นจุด ๆ ไป และได้สร้างชุดอินเวอร์เตอร์ เพื่อทำการวัดค่าอินดักแตนซ์ ที่เครื่องพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์พันออกมาได้และนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ ถึงแม้ว่าค่าที่วัดได้จะมีความคลาดเคลื่อนไปบ้างพอสมควร และจากการวิเคราะห์ยังพบว่าสามารถพัฒนาเครื่องพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีได้ขึ้นอีก โดยการแก้ไขจุดบกพร่องหลาย ๆ ด้านที่ปรากฏอยู่ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 5.1 แสดงเครื่องพันขดลวดแกนเทอร์รอยด์ที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว

5.2 บทวิจารณ์ และปัญหา

เนื่องจากแกนเทอร์รอยด์มีรูปทรงเป็นวงแหวนวงปิด ไม่สามารถตัดหรือถอดออกมาพันได้ เพราะฉะนั้นในการพันจึงต้องนำลวดทองแดงมาพันในชุดเก็บลวด และใส่ไว้กับชุดพันซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวขับ เพื่อออกแบบให้ลวดคล้องลงในแกนเทอร์รอยด์ จนเครื่องสามารถพันแกนเทอร์รอยด์ได้จริง พร้อมทั้งยังนำสเตปมอเตอร์ และชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์มาทำการควบคุมในชุดจับ เพื่อให้ความเร็วของชุดจับและชุดพันสัมพันธ์กัน ทำให้ค่าที่ออกมาตามความต้องการ และเพื่อเพิ่มความสวยงามในการเรียงลวดให้มีการกระจายการพันให้เต็มแกนเหล็กได้โดยปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (โดยปรับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์) เครื่องพันลวดแกนเทอร์รอยด์ที่สร้างนี้ยังมีข้อบกพร่องอยู่หลายประการที่ยังต้องทำการแก้ไข เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องพันแกนเทอร์รอยด์ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งข้อบกพร่องดังกล่าวมีดังนี้

1. สามารถพันแกนเทอร์รอยด์ได้ขนาดเดียว เนื่องจากข้อจำกัดที่ชุดเก็บลวดติดอยู่กับชุดพัน ทำให้แกนเทอร์รอยด์ต้องมีขนาดวงใหญ่ เพื่อเว้นระยะให้ชุดเก็บลวดลอดผ่านวงของแกนเทอร์รอยด์ได้
2. เนื่องจากชุดเก็บลวดต้องนำไปติดที่ชุดพัน จึงทำให้มีข้อจำกัดทางด้านขนาดของชุดเก็บลวดยังไม่สามารถเก็บลวดได้เป็นจำนวนมาก ๆ
3. มีแรงเสียดทานค่อนข้างมาก ในด้านของชุดพัน เนื่องจากโครงสร้างของเฟืองหมุนเป็นเหล็กทำให้มีน้ำหนักมาก ในการหมุนพันจึงยังไม่ได้ดีเท่าที่ควรทำให้มอเตอร์กระแสตรงและภาคจ่ายไฟต้องทำงานหนักมากขึ้น
4. ชุดจับแกนเทอร์รอยด์ยังไม่สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดของแกนเทอร์รอยด์ให้ได้หลาย ๆ ขนาด
5. โครงสร้างของเครื่องพันยังไม่แข็งแรงเท่าที่ควร เนื่องจากทำจากพลาสติก เมื่อเริ่มการทำงาน ทำให้เครื่องสั่นและมีผลต่อการเรียงลวด โดยทำให้การเรียงลวดในบางจังหวะเรียงทับกัน

5.3 แนวทางการพัฒนา

เครื่องพันแกนเทอร์รอยด์ชุดนี้เป็นเพียงการพัฒนาเริ่มแรกเท่านั้นแต่ก็สามารถพันได้จริงตามต้องการ โดยนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุม แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นยังมีข้อบกพร่องหลาย ๆ ด้าน อาทิ เช่น ชีตความสามารถในการพัน และด้านความแข็งแรงของโครงสร้าง เป็นต้น โดยสิ่งที่ต้องพัฒนามีดังนี้

5.3.1 การพัฒนาในด้านของชุดฟันและชุดจับแกนเทอร์รอยด์

5.3.1.1 เครื่องฟันขดลวดแกนเทอร์รอยด์ที่ได้สร้างขึ้นมา นั้น ในด้านของชุดจับยังมีข้อจำกัดในการฟัน คือ สามารถฟันได้ กับแกนเทอร์รอยด์ที่มีขนาดเดียวกันนั้น ปกติแล้วแกนเทอร์รอยด์มีหลากหลายขนาดมาก และแกนเทอร์รอยด์ส่วนมากที่ใช้กันทั่วไป มักจะมีขนาดเล็ก ซึ่งเครื่องฟันขดลวดแกนเทอร์รอยด์ที่ได้สร้างมา ยังไม่สามารถฟันแกนขนาดเล็กได้ เพราะมีข้อจำกัดของชุดเก็บลวดที่ต้องติดอยู่กับชุดฟัน ซึ่งในการพัฒนาควรทำการดึงลวดมาจากด้านนอกของชุดฟันและพัฒนาให้ชุดฟันลวดมีขนาดเล็กลงพอที่จะฟันลวดลงในแกนเทอร์รอยด์ขนาดเล็กได้

5.3.1.2 ในด้านโครงสร้าง โครงสร้างของชุดฟันยังไม่มี ความแข็งแรงมากนัก เนื่องจากเฟืองหมุนทำจากเหล็กทำให้โครงสร้างในการประกอบ ยังรับน้ำหนักได้ไม่เท่าที่ควรเมื่อทำการฟันจะทำให้เกิดการสั่นของเครื่องและมีผลต่อการเรียงลวด ควรพัฒนาให้โครงสร้างเป็นเหล็กเพื่อความแข็งแรง

5.3.1.3 ในชุดจับเคลื่อนยังจับเคลื่อนได้ไม่คล่องตัวมากนัก การพัฒนาควรศึกษาความรู้เรื่องความคล่องตัวของ การจับเคลื่อนของเฟือง และทางด้านของเครื่องกลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการฟันให้ดียิ่งขึ้น ทั้งยังทำให้ไม่เกิดเสียงดังในขณะฟัน

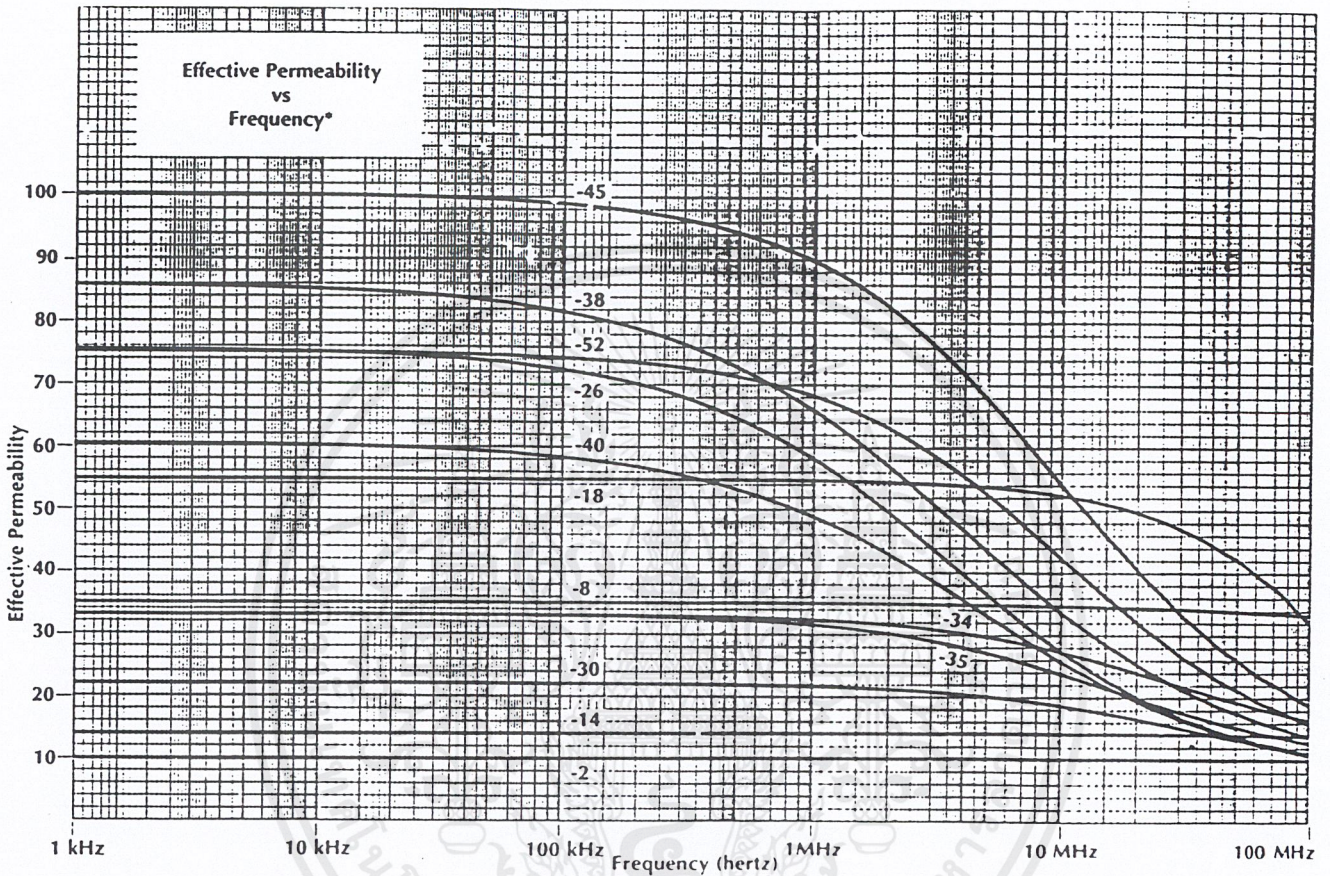
5.3.1.4 เครื่องฟันแกนเทอร์รอยด์นี้ ยังมีข้อจำกัดของขนาดลวดเบอร์เดียวกันนั้น ดังนั้นควรพัฒนาให้มีการฟันกับลวดได้หลายขนาด

5.3.2 การพัฒนาในด้านของชุดระบบควบคุมเครื่องฟันแกนเทอร์รอยด์

เครื่องฟันแกนเทอร์รอยด์ที่สร้างขึ้นมา นี้ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมความเร็วของสเตปมอเตอร์ให้หมุนในความเร็วเดียวกันและคำนวณจำนวนรอบของค่าอินดักแตนซ์ เพื่อสั่งการให้ฟันได้ตรงกับค่าที่ต้องการโดยคำนวณจากสูตร และค่าของอินดักแตนซ์แต่ละค่าต้องสัมพันธ์กับความเร็วของชุดฟันเพื่อให้ได้การเรียงลวดที่สวยงาม แต่ข้อจำกัดของเครื่องฟันแกนเทอร์รอยด์ที่สร้างขึ้นมา นี้ คือ ยังต้องปรับความเร็วของชุดฟันด้วยมือเพื่อให้สัมพันธ์กับความเร็วของสเตปมอเตอร์ จึงทำให้การเรียงลวดยังไม่สวยงามเท่าที่ควร การพัฒนา ควรจะให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมความเร็วของสเตปมอเตอร์ให้สัมพันธ์กับความเร็วของชุดฟัน โดยให้ความเร็วของชุดฟันคงที่ และสั่งการ โดยอัตโนมัติ

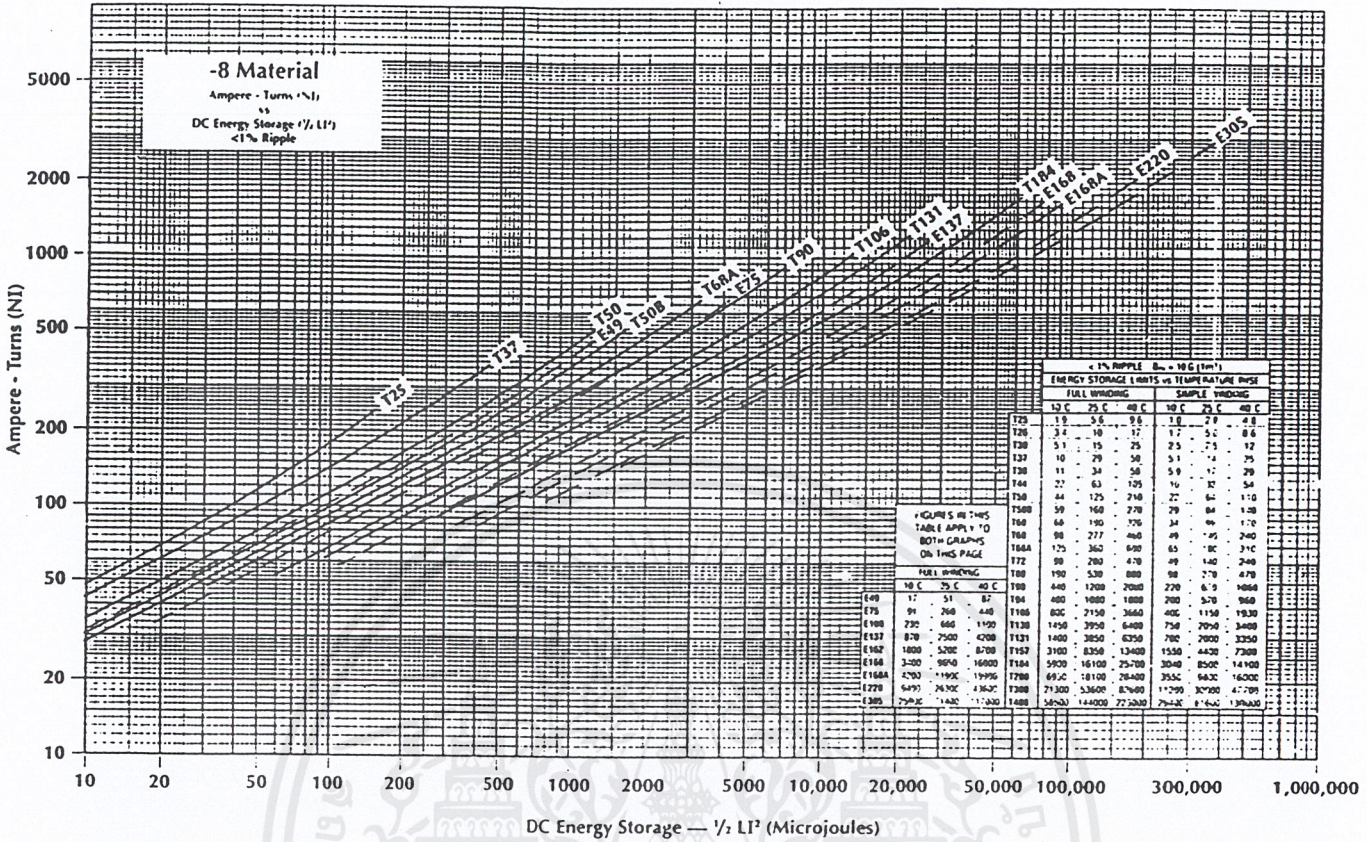
ภาคผนวก

ตารางแสดงผลของความถี่กับค่าความซึมซาบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

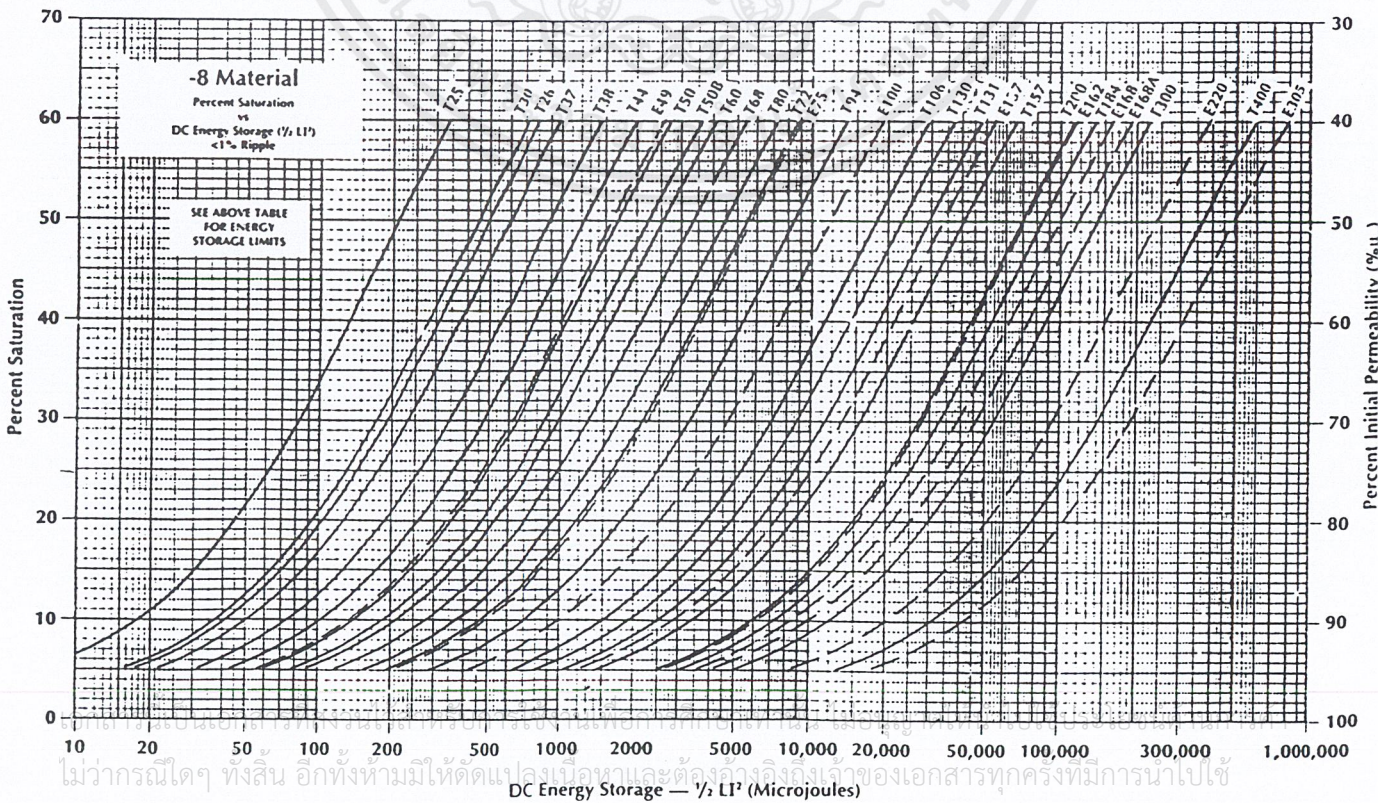
ตารางแสดงค่า DC Energy Storage

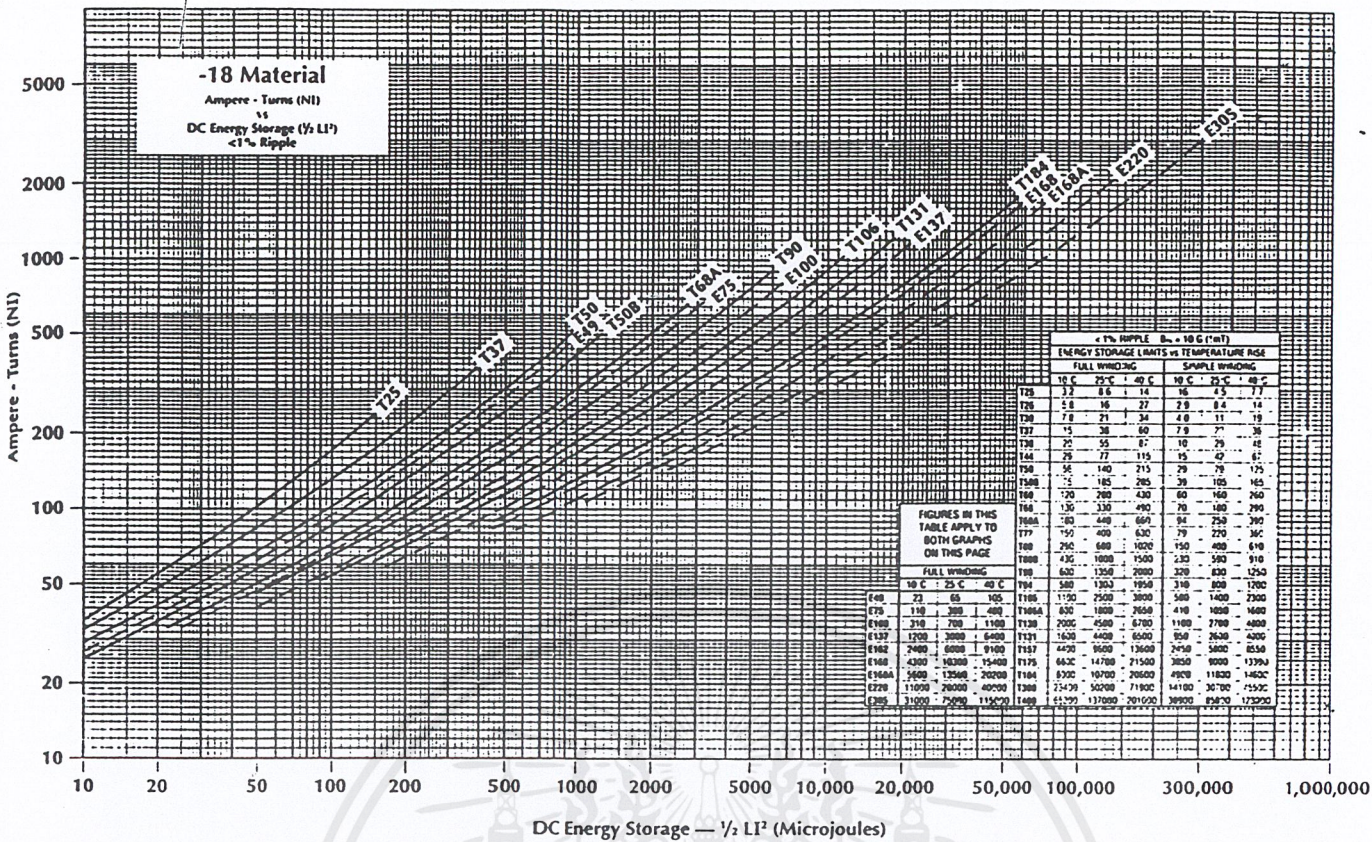


QUICK REFERENCE A_L VALUES FOR -8 MATERIAL

PART NO.	T25	T26	T30	T37	T38	T44	T50	T50B	T60	T68	T72	T80	T94	T106	T130	T131	T157	T184	T200	T300
A_L VALUE	10.0	24.0	14.0	12.0	20.0	18.0	17.5	23.0	19.0	19.5	36.0	18.0	25.0	45.0	35.0	52.5	42.0	72.0	42.5	37.0

PART NO.	T400	E49	E75	E100	E137	E162	E168	E168A	E220	E305
A_L VALUE	60.0	20.5	33.5	48.0	67.0	105	97.0	116	143	156

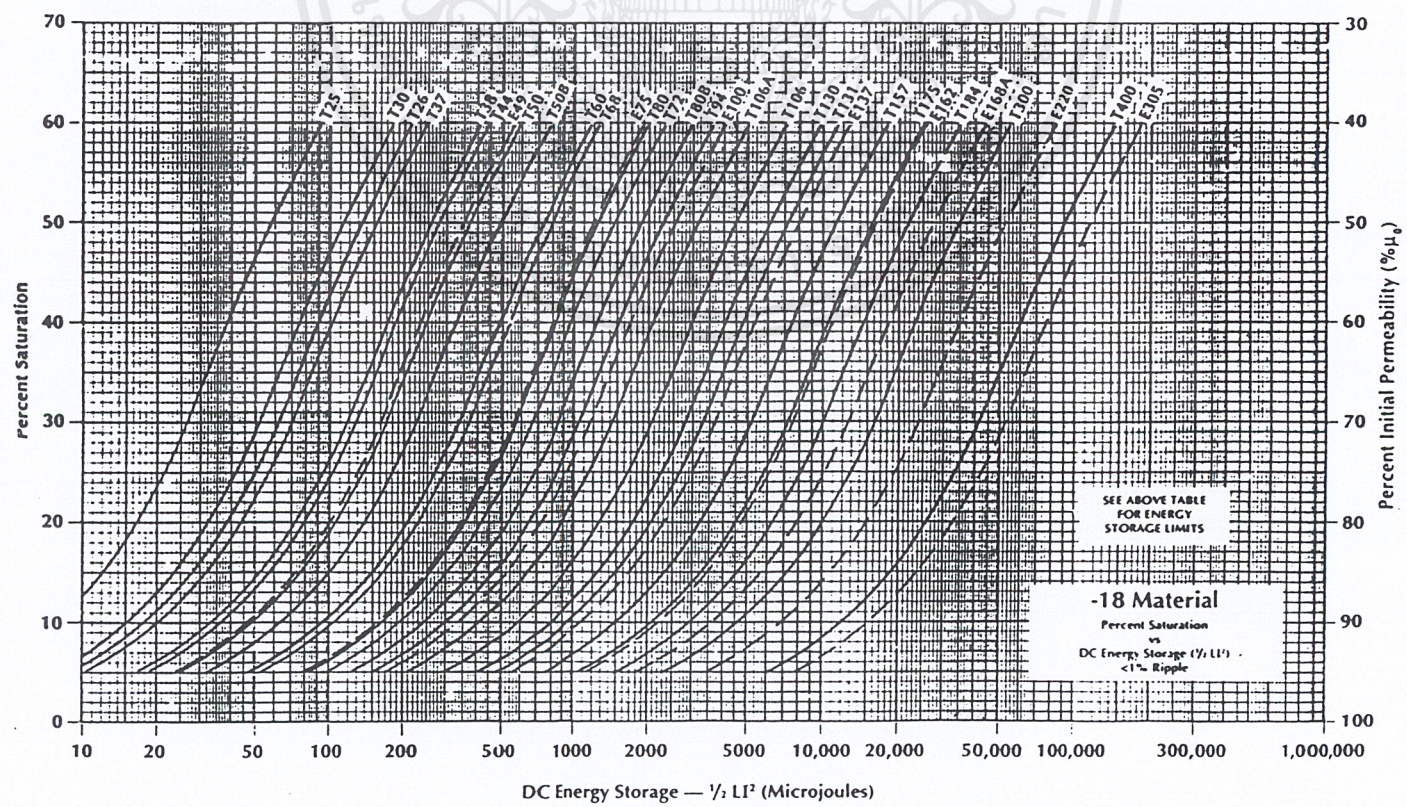




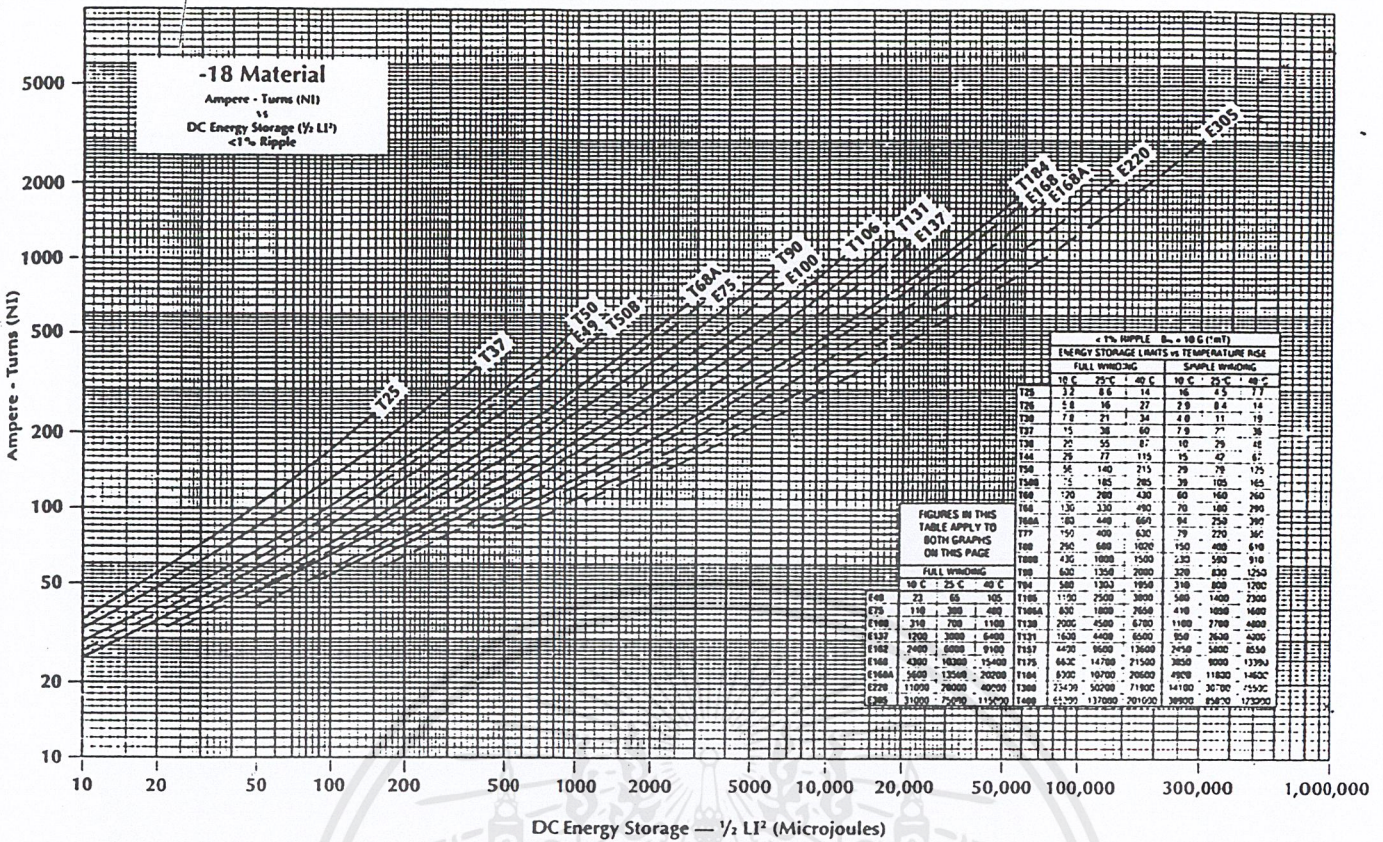
QUICK REFERENCE A_k VALUES FOR -18 MATERIAL

PART NO.	T25	T26	T30	T37	T38	T44	T50	T50B	T60	T68	T72	T80	T80B	T94	T106	T106A	T130	T131	T157	T175
A_k VALUE	17.0	41.5	22.0	19.0	36.0	25.5	24.0	32.0	34.5	29.0	60.0	31.0	46.5	42.0	70.0	49.0	58.0	79.0	73.0	82.0

PART NO.	T184	T300	T400	E49	E75	E100	E137	E162	E168A	E220	E305
A_k VALUE	116	58.0	96.0	29.0	45.5	65.0	100	149	170	196	222

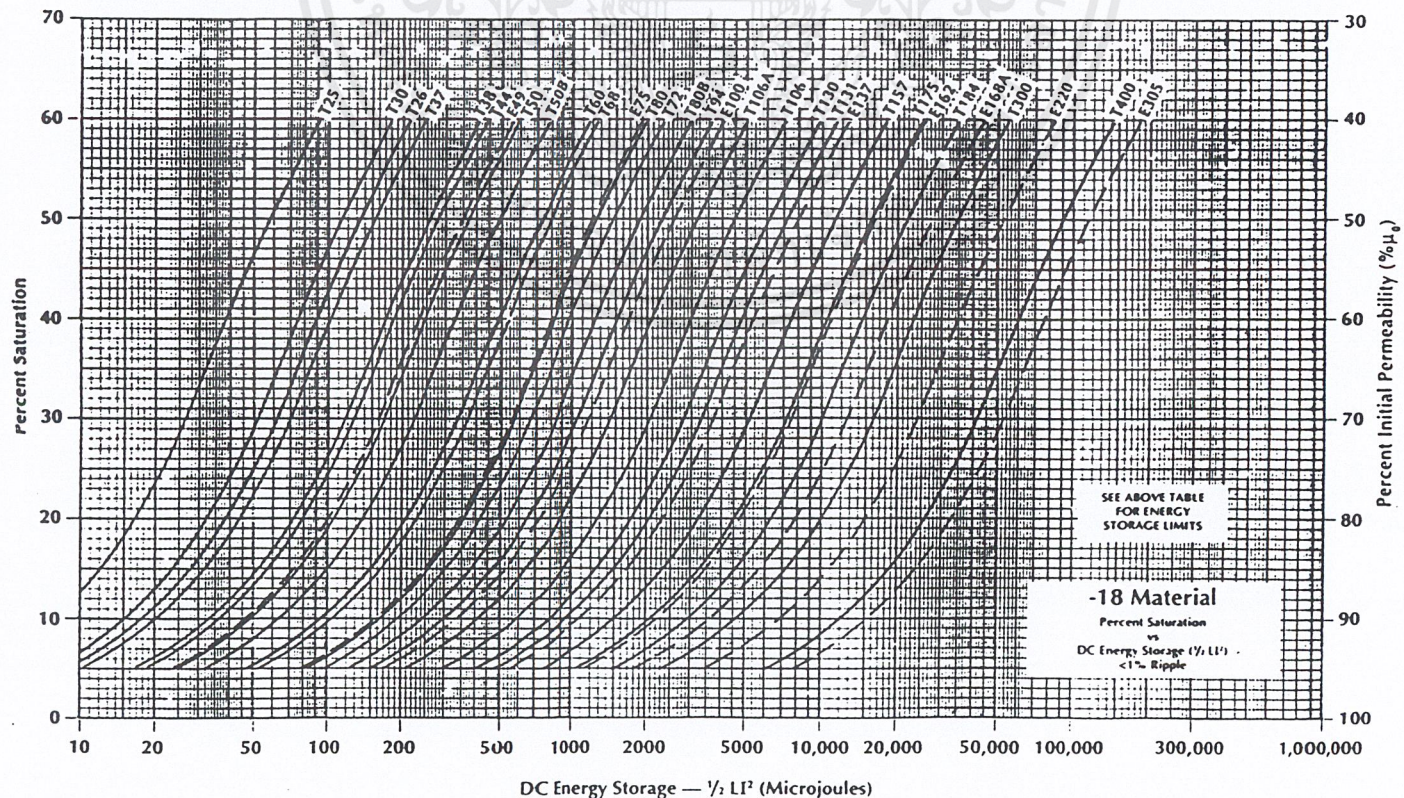


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

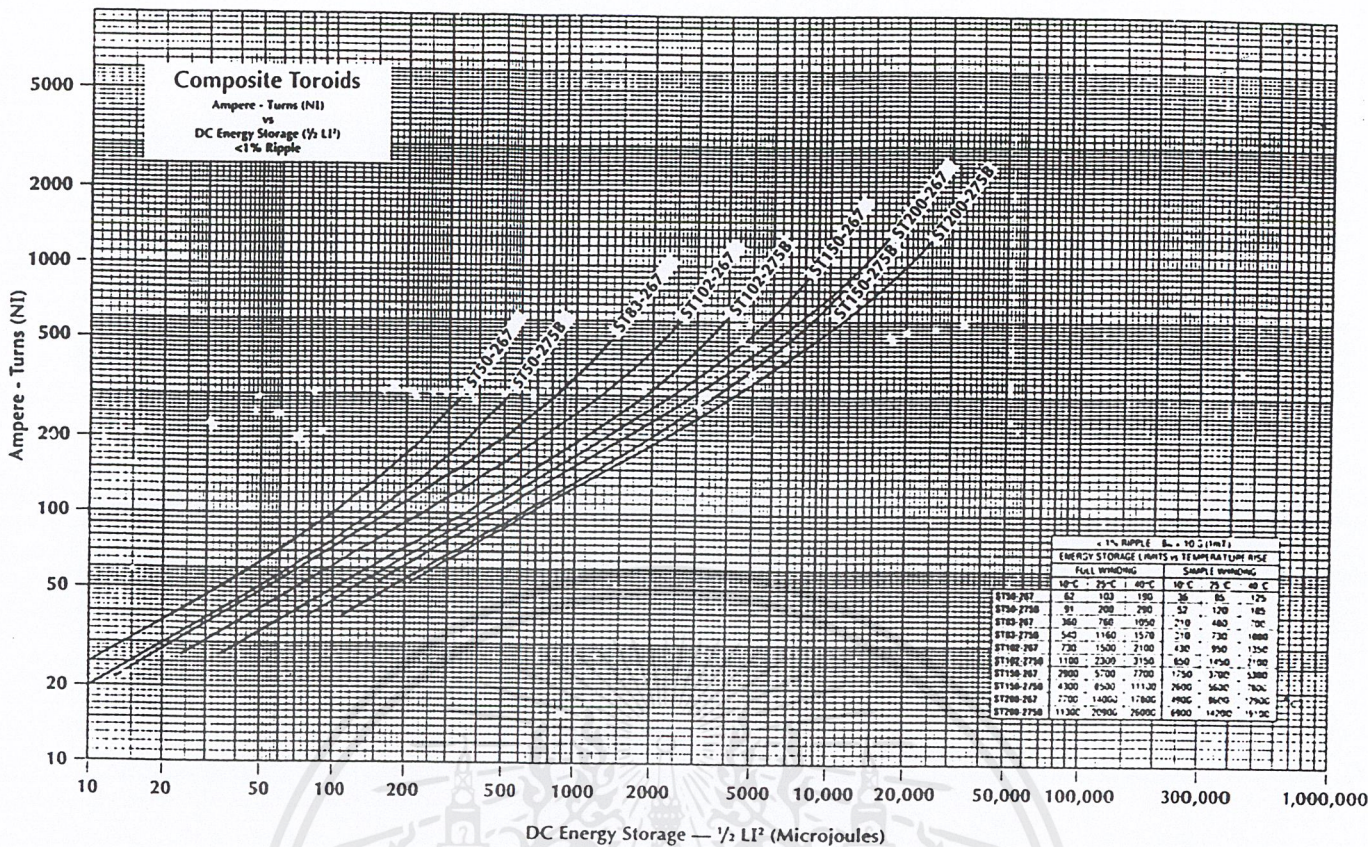


QUICK REFERENCE A_k VALUES FOR -18 MATERIAL

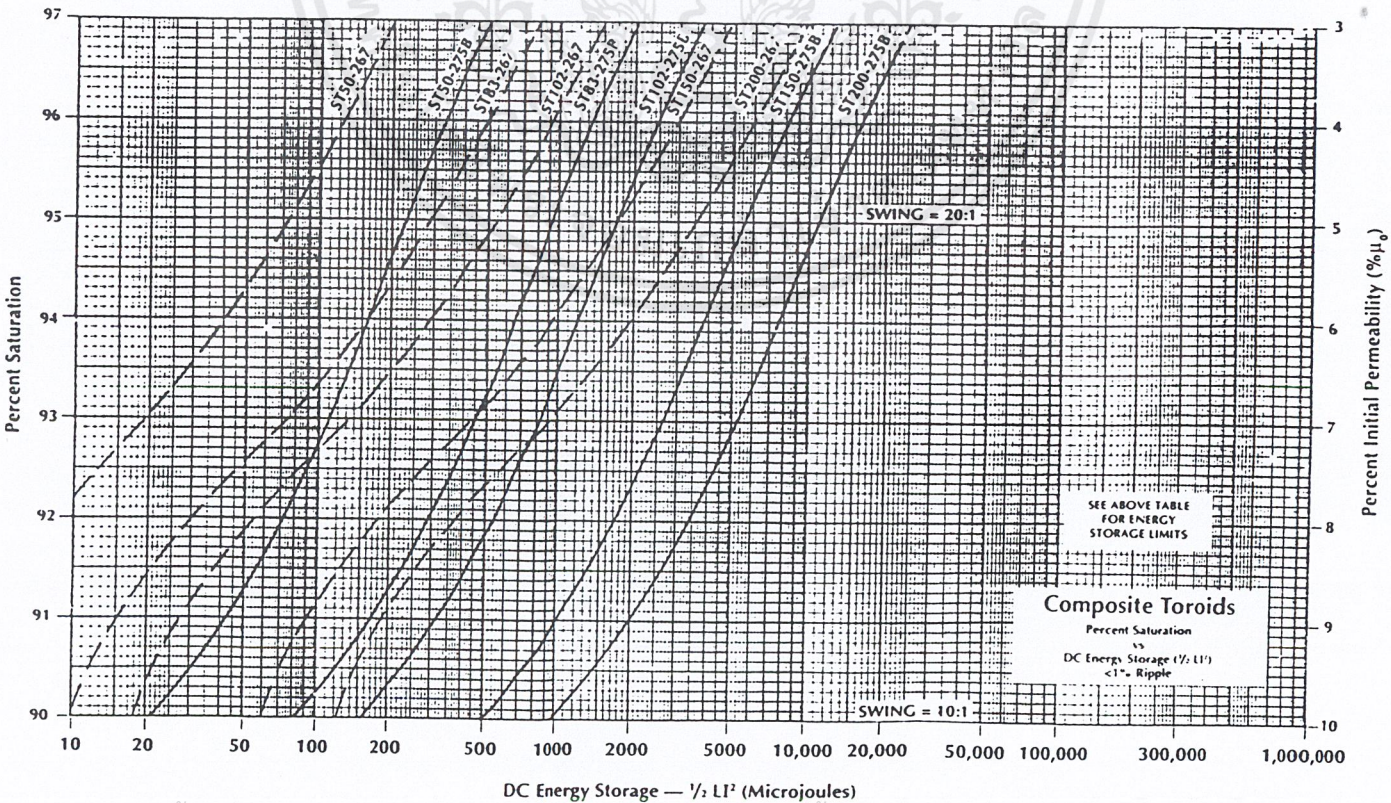
PART NO.	T25	T26	T30	T37	T38	T44	T50	T50B	T60	T68	T72	T80	T80B	T94	T106	T106A	T130	T131	T157	T175	
A_k VALUE	17.0	41.5	22.0	19.0	36.0	25.5	24.0	32.0	34.5	29.0	60.0	31.0	46.5	42.0	70.0	49.0	58.0	79.0	73.0	82.0	
PART NO.	T184	T300	T400	E49	E75	E100	E137	E162	E168A	E220	E305										
A_k VALUE	116	58.0	96.0	29.0	45.5	65.0	100	149	170	196	222										



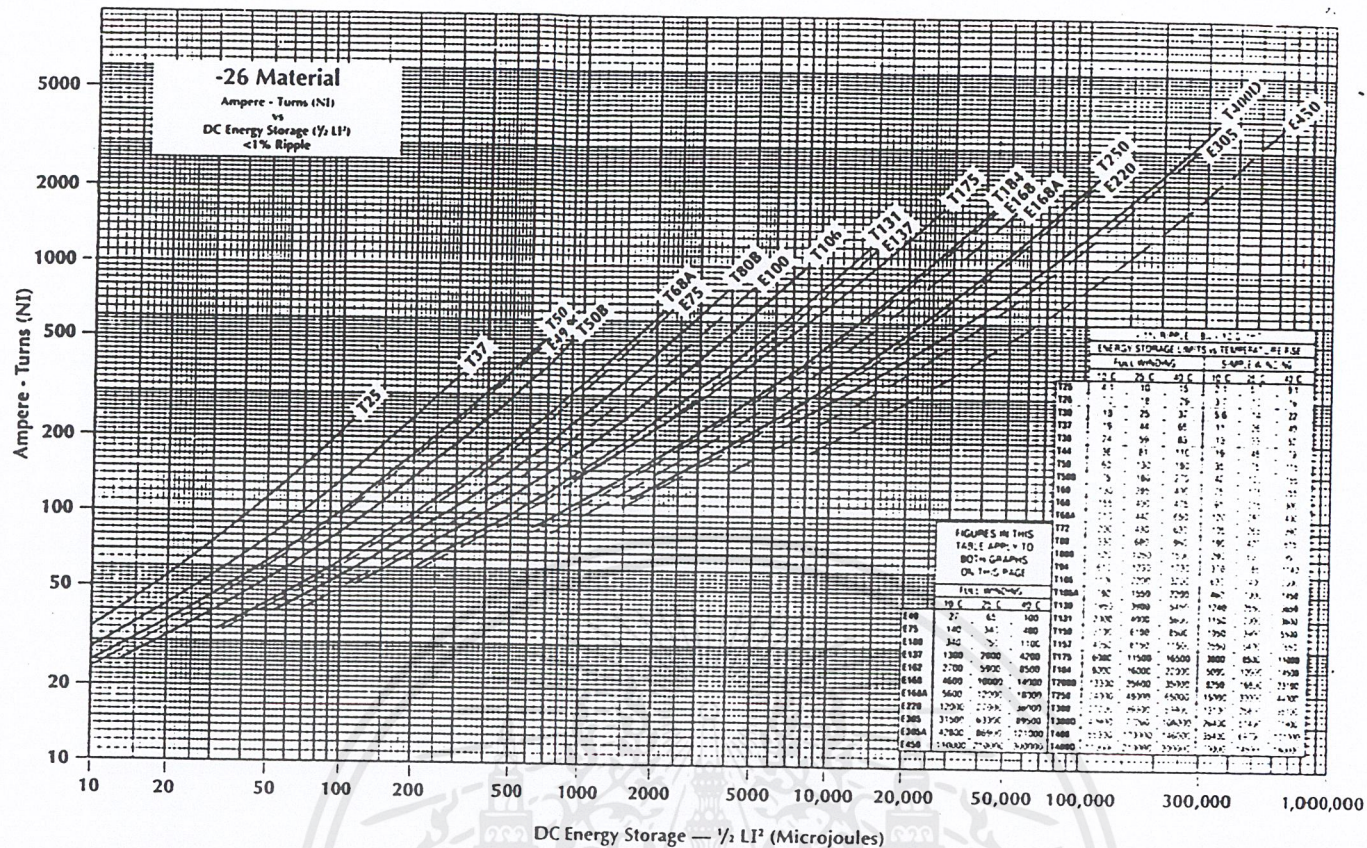
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



QUICK REFERENCE A_v VALUES FOR COMPOSITE TOROIDS										
PART NO.	ST50-267	ST50-275B	ST83-267	ST83-275B	ST102-267	ST102-275B	ST150-267	ST150-275B	ST200-267	ST200-275B
A_v VALUE	450	475	625	650	800	825	1250	1300	1275	1225



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ENERGY STORAGE LIMITS vs TEMPERATURE RISE

PART NO.	TEMPERATURE RISE			
	25°C	50°C	75°C	100°C
T25	4.1	10	15	21
T26	18	29	37	45
T30	13	25	32	39
T37	19	34	42	50
T38	24	39	48	57
T44	36	51	62	74
T50	52	73	90	108
T50B	3	18	27	34
T60	20	32	40	48
T68	24	37	45	54
T72	28	42	51	61
T80	33	49	59	70
T80B	22	35	43	51
T94	27	41	50	60
T106	31	46	55	65
T106A	50	75	92	110
T130	42	63	77	92
T131	48	72	88	105
T150	68	102	125	150
T157	80	120	145	175
T175	110	165	200	240
T184	120	180	220	270
E162	130	195	240	290
E168	140	210	260	310
E168A	150	225	280	330
E220	160	240	300	360
E305	170	255	315	380
E305A	180	270	330	400
E450	190	285	345	420

FIGURES IN THIS TABLE APPLY TO BOTH GRAPHS ON THIS PAGE

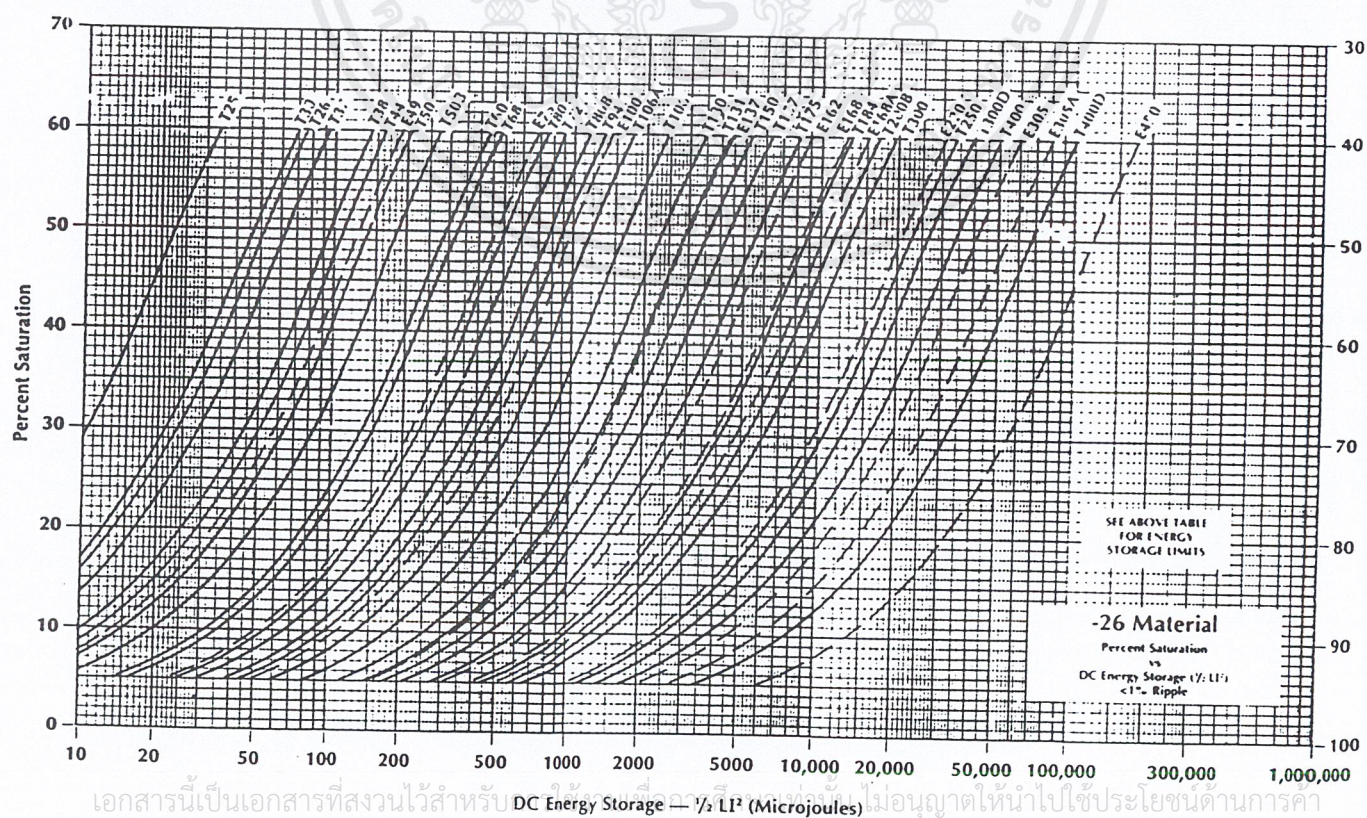
TEMPERATURE RISE

PART NO.	25°C	50°C	75°C	100°C
E49	27	41	50	60
E75	34	51	62	74
E100	42	63	77	92
E137	52	78	95	114
E162	60	90	110	132
E168	68	102	125	150
E168A	75	112	138	165
E220	84	126	156	187
E305	96	144	177	212
E305A	110	165	200	240
E450	126	189	232	280

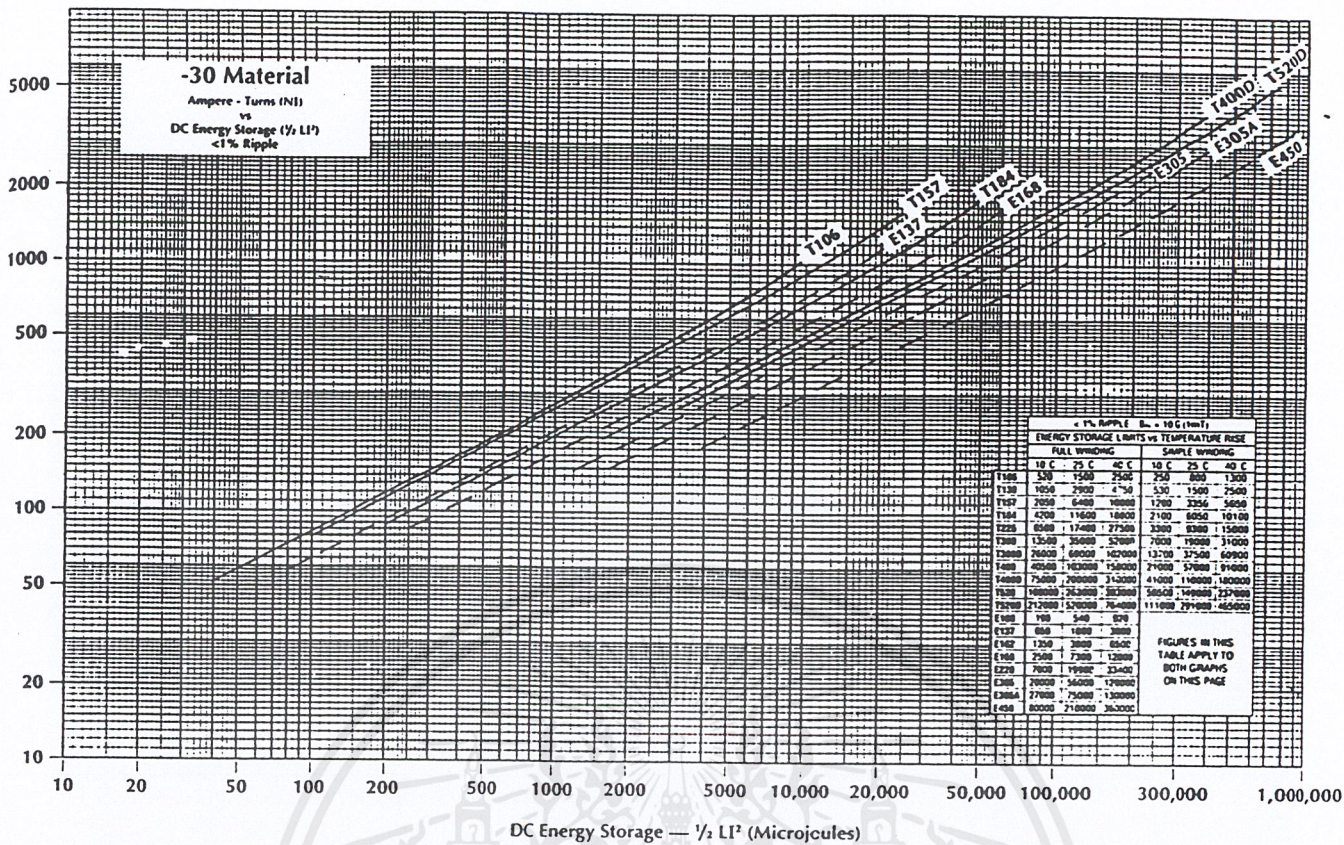
QUICK REFERENCE A_i VALUES FOR -26 MATERIAL

PART NO.	T25	T26	T30	T37	T38	T44	T50	T50B	T60	T68	T72	T80	T80B	T94	T106	T106A	T130	T131	T150	T157
A _i VALUE	24.5	57.0	33.5	28.5	49.0	37.0	33.0	43.5	50.0	43.5	90.0	46.0	71.0	60.0	93.0	67.0	81.0	116	96.0	100

PART NO.	T175	T184	T200B	T250	T300	T300D	T400	T400D	E49	E75	E100	E137	E162	E168	E168A	E220	E305	E305A	E450
A _i VALUE	105	169	160	242	80	160	131	262	38.0	64.0	92.0	134	210	195	232	275	287	382	540



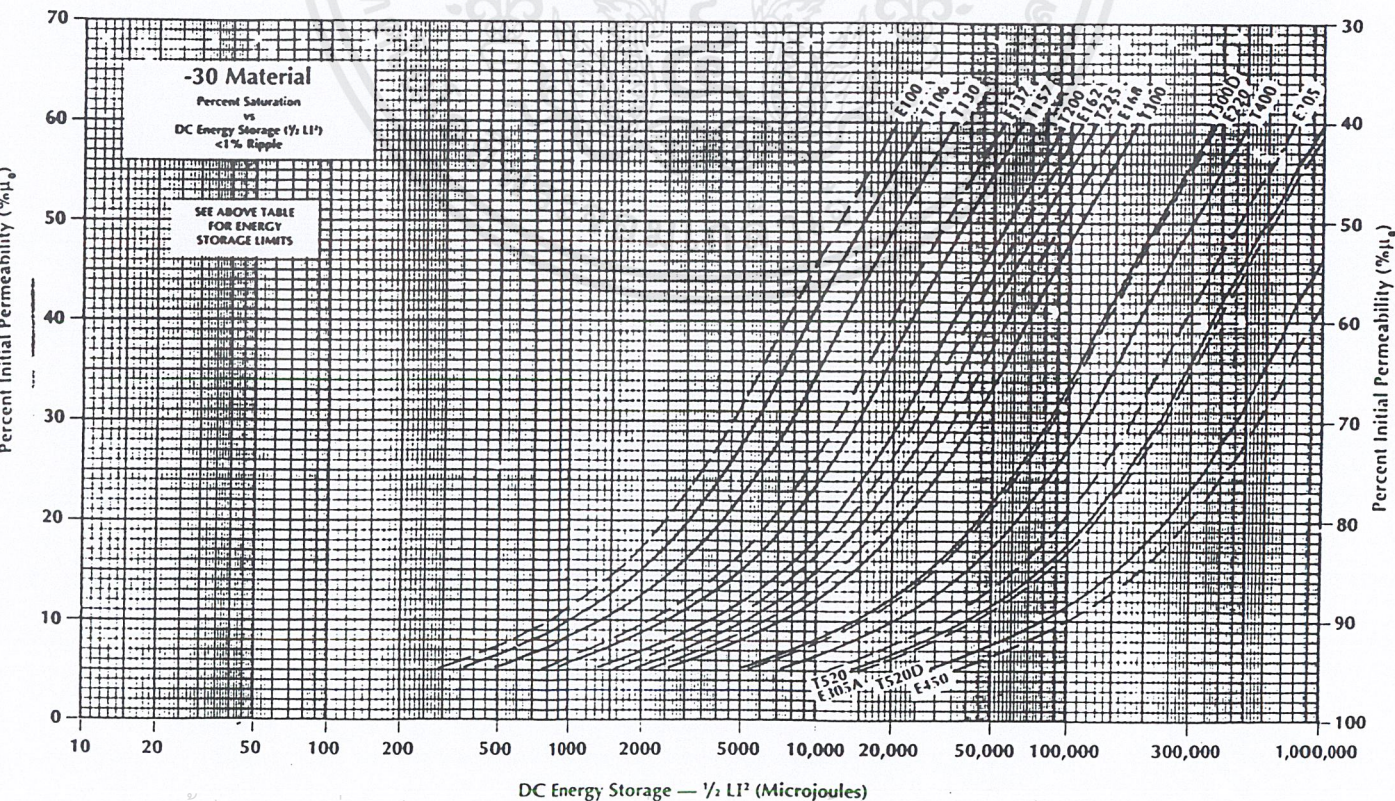
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ DC Energy Storage — 1/2 LI² (Microjoules) ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถแก้ไขทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



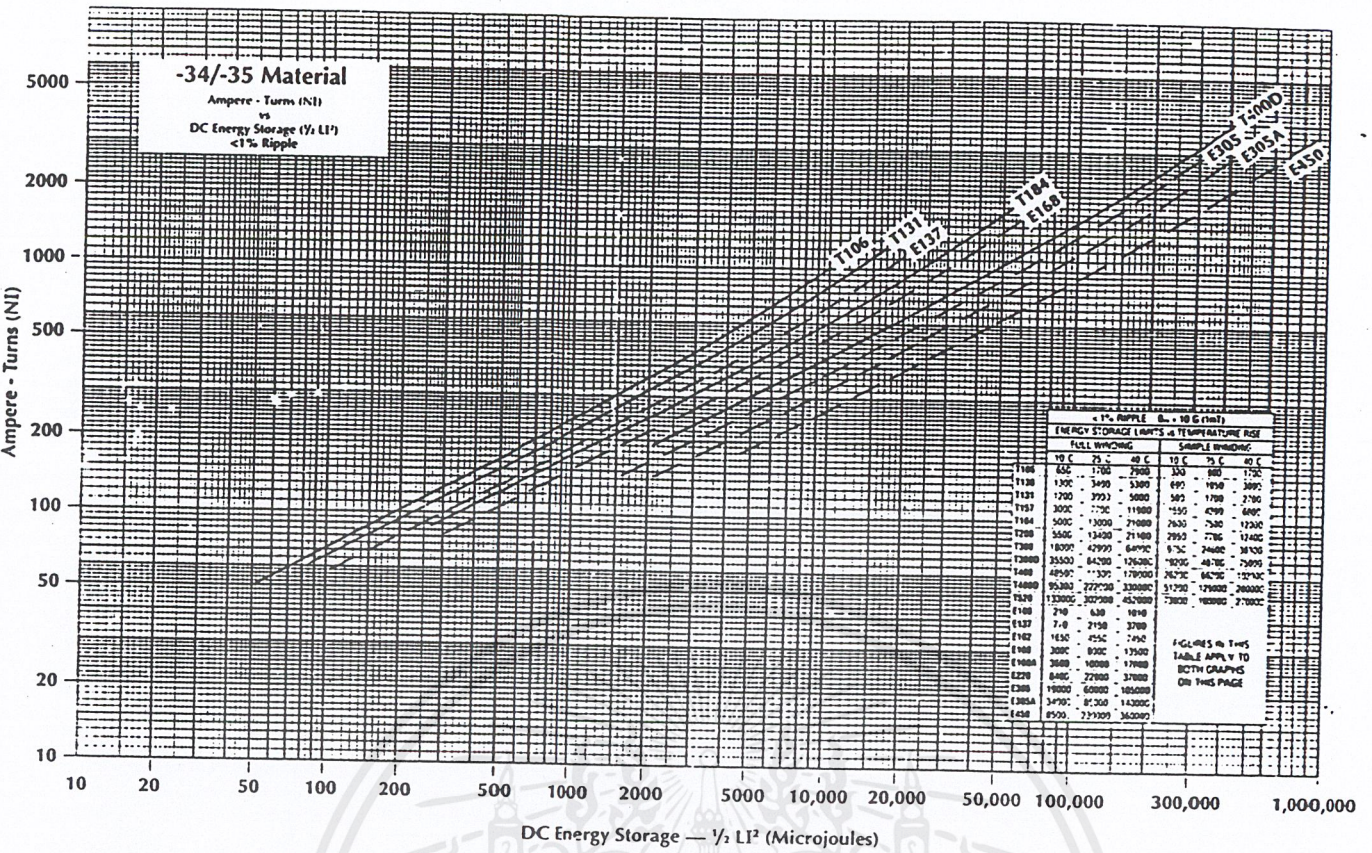
QUICK REFERENCE A_L VALUES FOR -30 MATERIAL

PART NO.	T106	T130	T157	T225	T300	T300D	T400	T520	T520D
A_L VALUE	30.0	25.0	31.5	28.0	23.0	46.0	40.5	45.0	90.0

PART NO.	E220	E305	E305A	E450
A_L VALUE	107	124	165	235



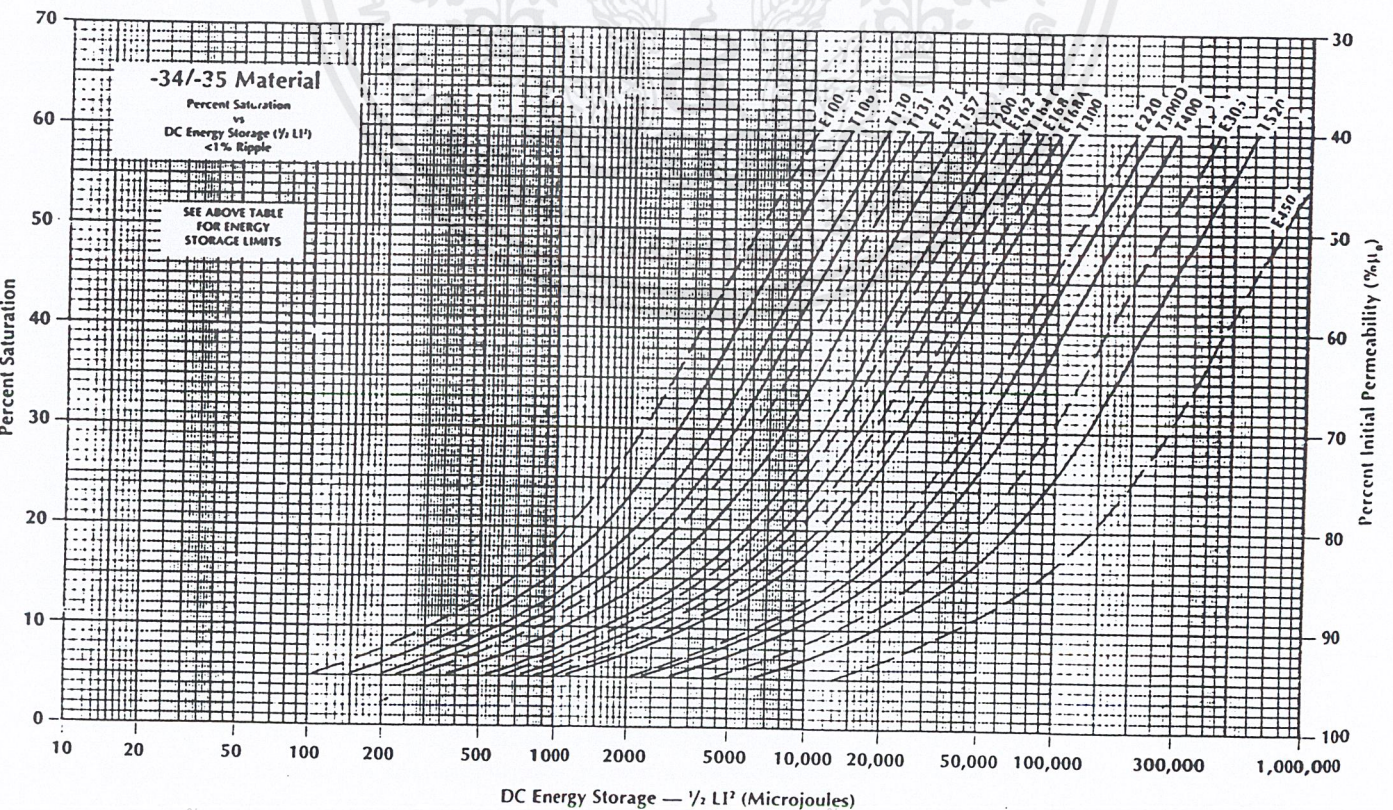
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้



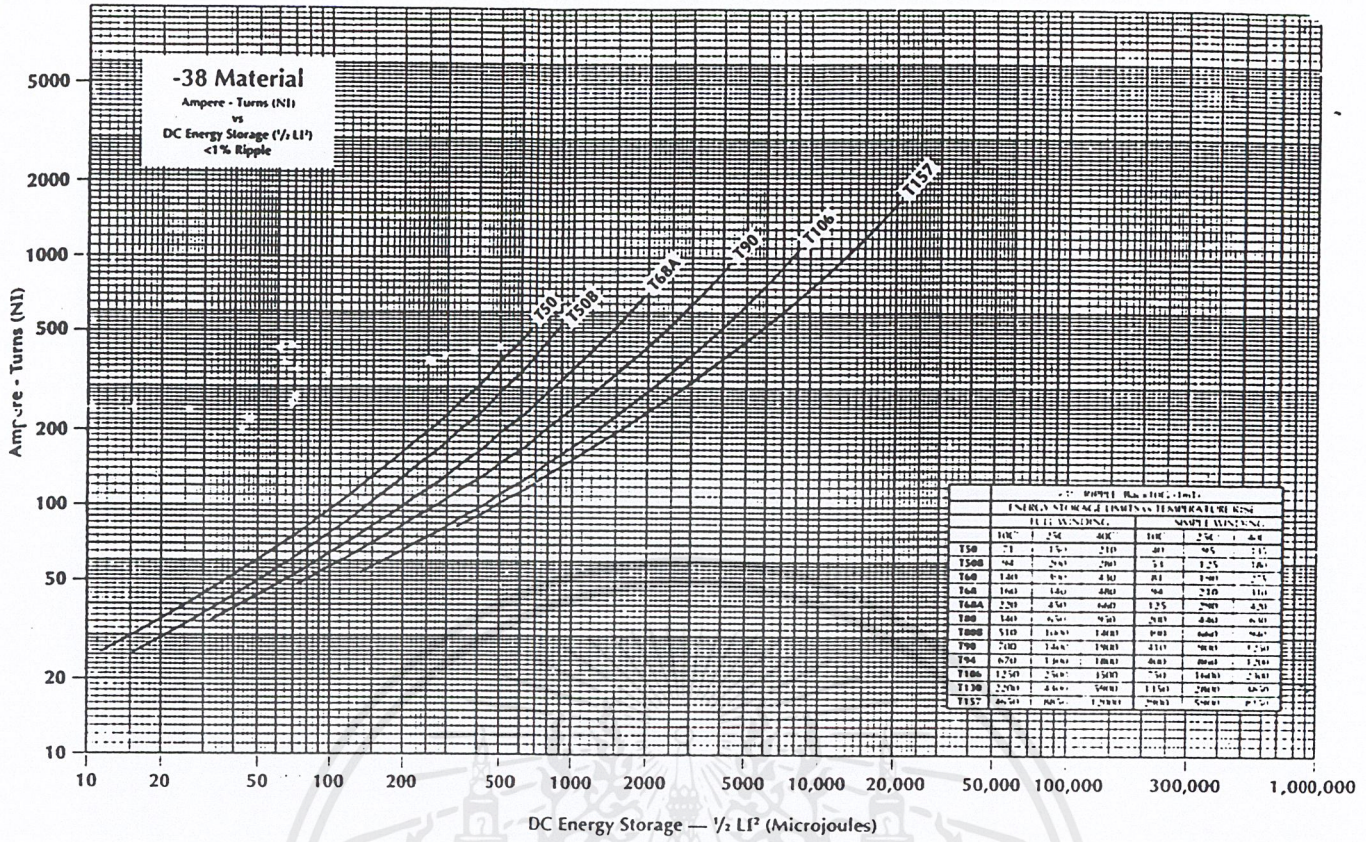
QUICK REFERENCE A_i VALUES FOR -34/-35 MATERIAL

PART NO.	T106	T130	T131	T157	T184	T200	T300	T300D	T400	T520
A _i VALUE	40.0	33.5	46.5	43.5	70.0	37.0	34.5	69.0	55.0	65.0

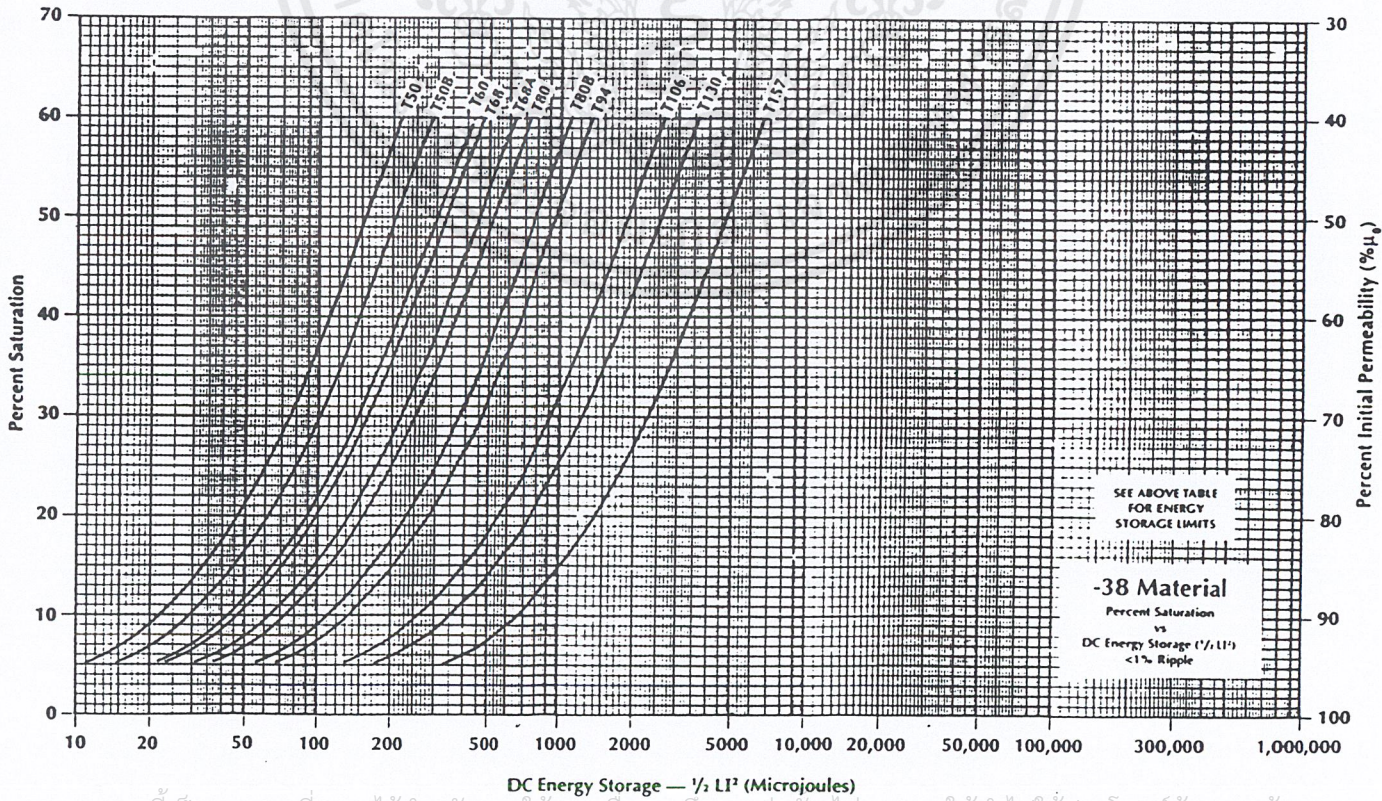
PART NO.	E220	E305	E450
A _i VALUE	136	150	300



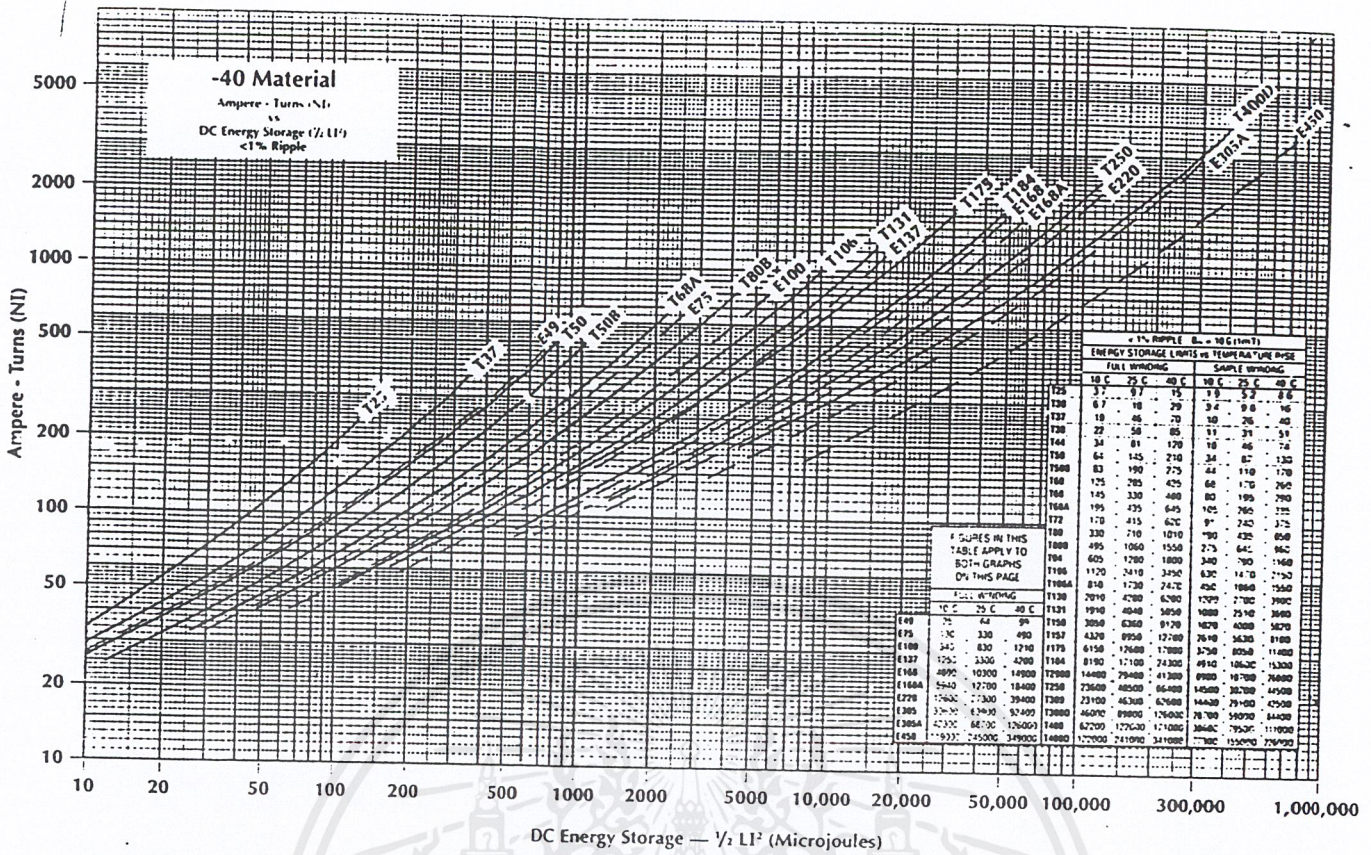
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้



PART NO.	T50	T50B	T60	T68	T68A	T80	T80B	T90	T94	T106	T130	T157
A_L VALUE	37.5	49.5	53.0	45.0	61.0	48.0	72.0	73.0	65.0	108.0	90.0	112.0



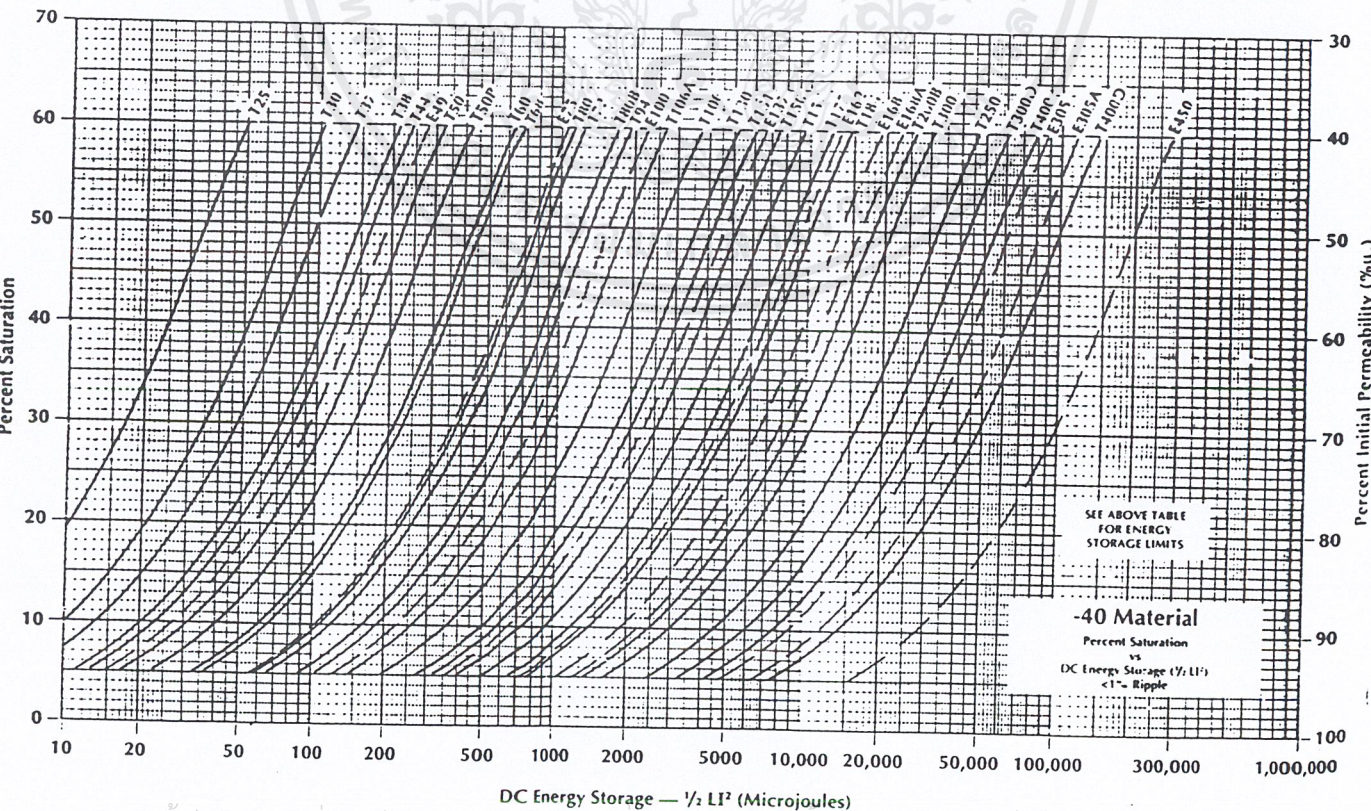
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



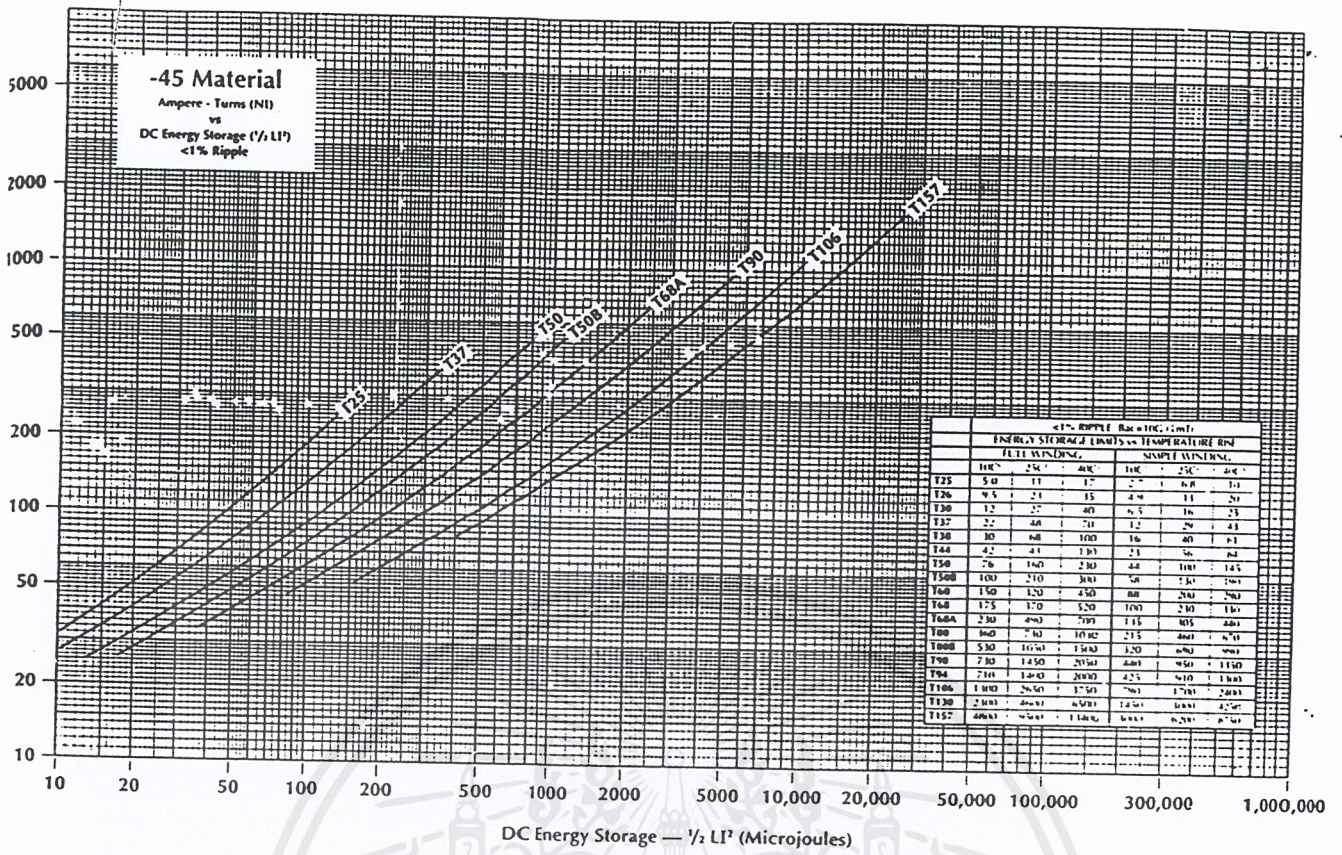
QUICK REFERENCE A_1 VALUES FOR -40 MATERIAL

PART NO.	T25	T30	T37	T38	T44	T50	T50B	T60	T68	T72	T80	T80B	T94	T106	T106A	T130	T131	T150	T157	T175
A_1 VALUE	20.5	28.0	24.5	41.5	31.0	29.5	38.5	41.5	35.0	71.0	39.5	59.0	49.0	81.0	58.0	69.0	93.0	78.0	86.0	90.0

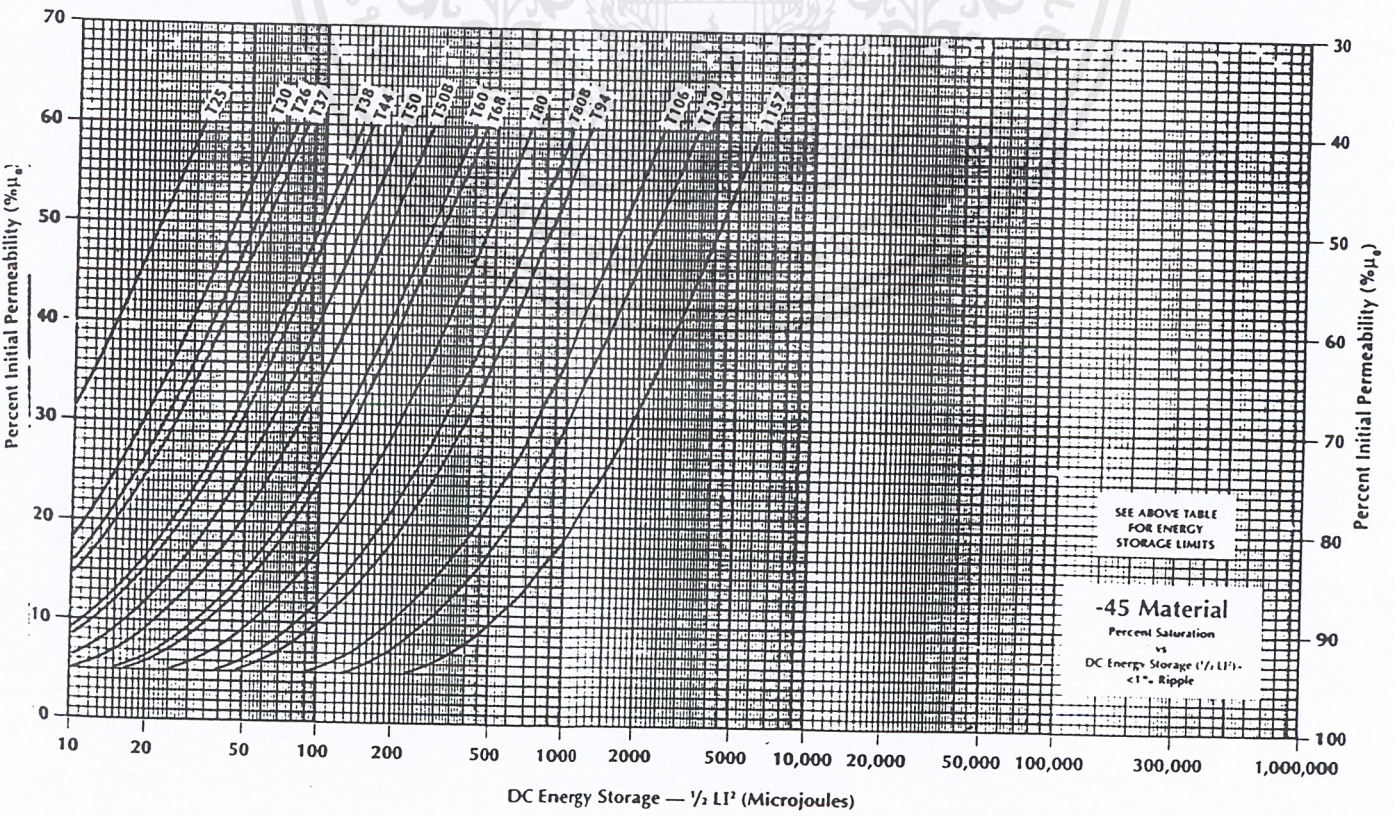
PART NO.	T184	T200B	T250	T300	T300B	T400	T450	E49	E75	E100	E137	E162	E168	E168A	E305	E305A	E450
A_1 VALUE	143	142	194	71.0	142	115	230	31.5	55.0	81.0	113	175	163	196	255	339	480



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้



QUICK REFERENCE A_i VALUES FOR -45 MATERIAL																		
PART NO.	T25	T26	T30	T37	T38	T44	T50	T50B	T60	T68	T68A	T80	T80B	T90	T94	T106	T130	T157
A_i VALUE	31.0	77.0	40.5	34.0	65.0	46.5	44.0	58.0	62.0	53.0	71.0	56.0	84.0	85.0	76.0	125.0	105.0	130.0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

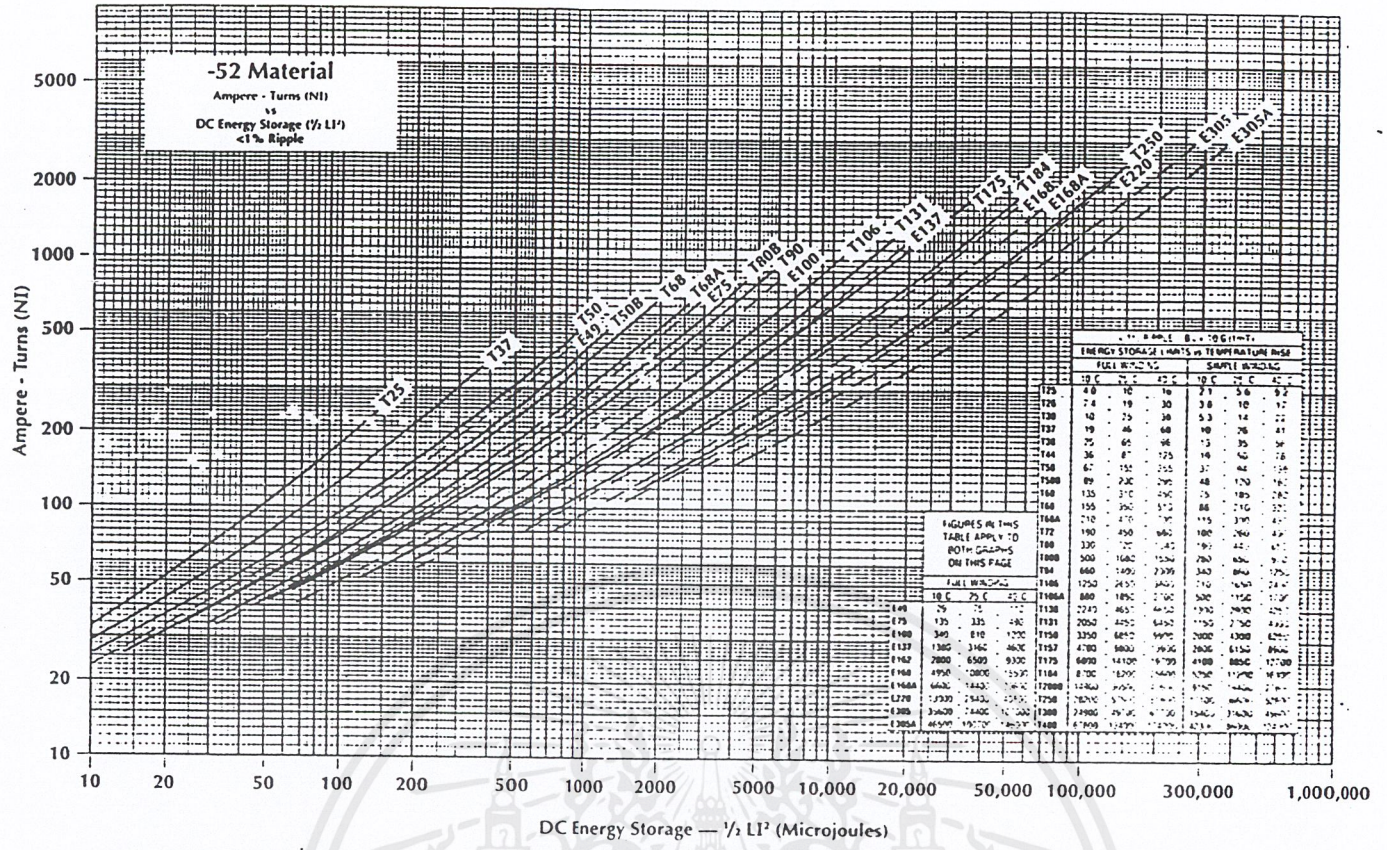


TABLE B - TEMPERATURE

ENERGY STORAGE LIMITS vs TEMPERATURE RISE

PART NO.	FULL WAVE				SAMPLE WAVE			
	10 C	25 C	50 C	75 C	10 C	25 C	50 C	75 C
T25	4.0	10	16	20	5.6	14	22	28
T26	7.4	19	30	3.8	10	17	22	28
T30	10	25	38	5.3	14	22	28	35
T37	19	46	68	10	26	41	52	65
T38	25	65	96	13	35	54	68	85
T44	36	87	125	16	40	62	78	98
T50	67	155	235	37	74	112	142	178
T50B	89	230	295	48	120	180	230	290
T60	135	370	550	75	185	280	360	450
T68	155	395	570	88	210	320	410	520
T72	210	570	790	115	290	440	570	720
T80	190	450	660	100	260	400	520	660
T80B	330	770	1100	185	480	720	920	1180
T94	500	1360	1950	270	650	980	1250	1600
T106	660	1890	2700	360	860	1300	1680	2150
T106A	1250	3450	5000	710	1650	2450	3100	3950
T1130	880	1850	2700	500	1150	1750	2250	2850
T1131	2240	6050	8650	1300	2900	4350	5600	7150
T1150	2050	5450	7950	1150	2700	4050	5200	6650
T1157	3250	8650	12500	1900	4300	6450	8300	10650
T175	4700	12500	18000	2800	6150	9150	11800	15100
T184	6090	16100	23000	3600	7850	11700	15200	19500
T200B	11560	30950	44500	17000	45000	67000	87000	111000
T250	12700	34000	49000	18500	49000	72000	93000	119000
T300	13600	36000	51000	19500	51000	74000	96000	123000
T400	24900	66000	94000	34000	88000	130000	168000	215000
E49	6700	17500	25000	2800	7200	10800	14000	18000
E75	8500	22500	32000	3600	9200	13800	18000	23000
E100	11000	29000	41000	4700	12000	18000	23500	30000
E137	13100	34500	48000	5600	14500	21500	28000	36000
E162	17000	45000	63000	7400	19000	28000	36000	46000
E168	21000	55000	76000	9200	23000	34000	44000	57000
E168A	27000	71000	99000	11800	30000	44000	57000	73000
E220	37000	98000	136000	16000	41000	60000	78000	100000
E305	50000	130000	185000	21000	54000	79000	102000	130000
E305A	65000	170000	238000	27000	70000	103000	133000	170000

FIGURES IN THIS TABLE APPLY TO BOTH GRAPHS ON THIS PAGE

FULL WAVE

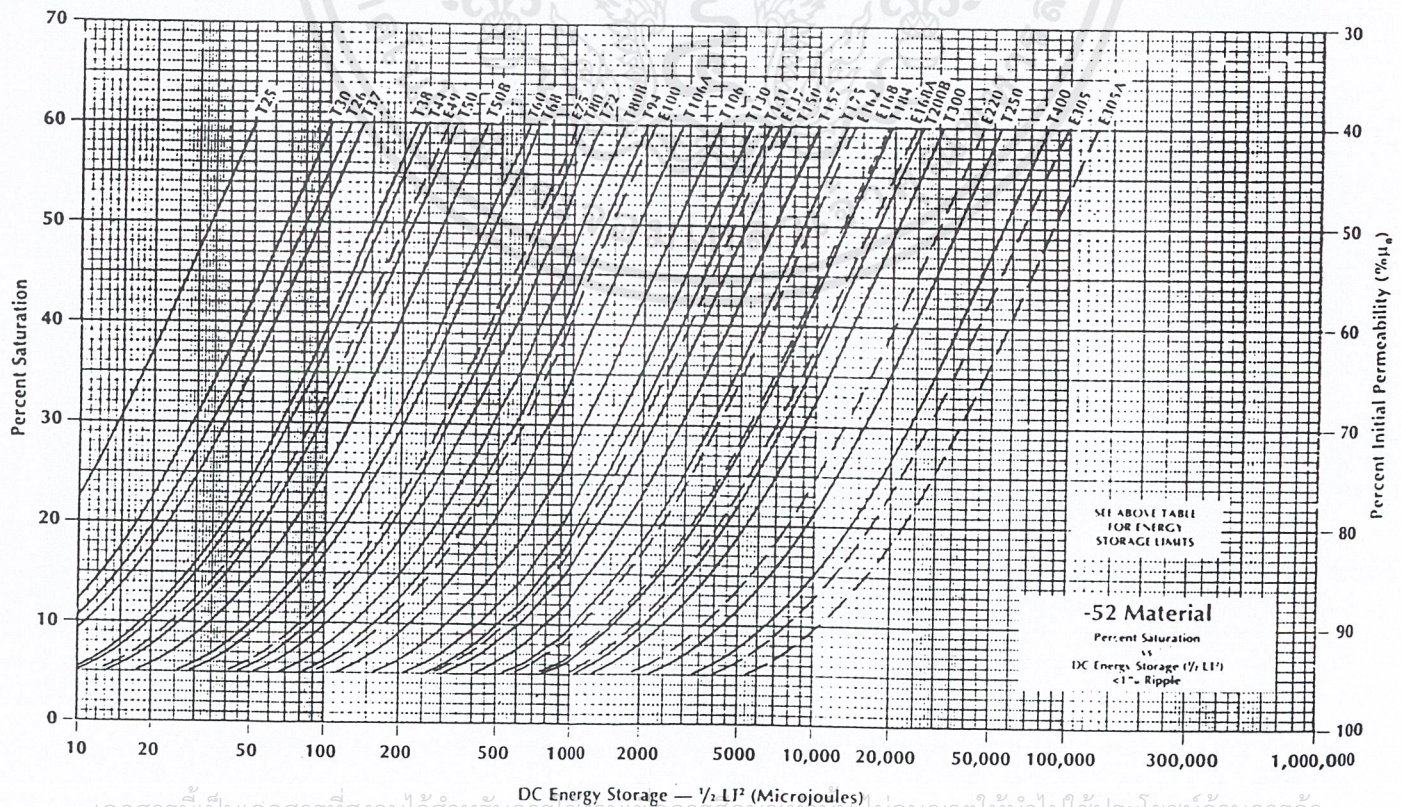
10 C 25 C 50 C 75 C

SAMPLE WAVE

10 C 25 C 50 C 75 C

QUICK REFERENCE A_i VALUES FOR -52 MATERIAL

PART NO.	T25	T26	T30	T37	T38	T44	T50	T50B	T60	T68	T72	T80	T80B	T94	T106	T106A	T1130	T1131	T1150	T1157	
A _i VALUE	23.0	56.0	30.5	26.0	49.0	35.0	33.0	43.5	47.0	40.0	82.0	42.0	63.0	57.0	95.0	67.0	79.0	108	89.0	99.0	
PART NO.	T175	T184	T200B	T250	T300	T400	E49	E75	E100	E137	E162	E168	E168A	E220	E305	E305A					
A _i VALUE	105	159	155	242	80.0	131	38.0	59.0	85.0	131	199	174	230	262	287	442					



SEE ABOVE TABLE FOR ENERGY STORAGE LIMITS

-52 Material
Percent Saturation vs DC Energy Storage (1/2 LI²) <1% Ripple

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ประภาส ไพรสุวรรณ ซึ่งเป็นแรงบันดาลใจ ผู้คิดค้นและมองเห็นความสำคัญของงานชิ้นนี้ ซึ่งเป็นผลให้โครงการนี้ได้ถือกำเนิดขึ้น และที่ลืมไม่ได้ พี่ที่แสนดีของพวกเราเหล่า พาย ไอห้ม ทุกคน อาจารย์ สุรินทร์ คำฝอย หรือที่พวกเรา รู้จักว่า พี่ฮ้อด สำหรับทุกคำปรึกษา และทุกอย่างที่พี่มิให้ งานชิ้นนี้สำเร็จไปด้วยดี ขอขอบคุณมากครับ

ขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่เอื้อเฟื้อ สถานที่ และอุปกรณ์ ขอขอบคุณพระคุณสำหรับมันสมองและไหวพริบที่อาจารย์ทุกท่านมอบให้

ขอบคุณสถาบันชั้นนำของประเทศแห่งนี้ ที่ผลิตบุคคลอันมีค่าสู่สยามประเทศ

ขอขอบคุณทุกๆสิ่ง ทุกๆอย่าง ทั้งที่มีชีวิต และ ไม่มี ที่ช่วยให้งานชิ้นนี้ออกมาสู่สายตาประชาชน และสำเร็จลุล่วง แม้จะมีอุปสรรคมากมาย ก็ไม่มีใครทิ้งเรา

ขอขอบคุณจริงๆ จากใจเรา ... Toroidal Group... ขอขอบคุณมากครับ...

เทพฤทธิ์ เถาะลาเมาะ
ปิยะพงศ์ พรหมชนะ
เทพพิทักษ์ เทียนบุญ
สรรเสริญ ยัมณรงค์

เอกสารอ้างอิง

- ปริญญาโทปีการศึกษา 2543, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- นิตยสาร HOBBY ELECTRONIC ฉบับ 111 มิถุนายน 2544
- บริษัท เอนเทลไทย จำกัด , เทคนิคการออกแบบสวิตซ์พาวเวอร์ซัพพลาย
- ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์, การออกแบบเครื่องจักรกล, หน้า 21-53
- รศ.ดร. โคนม อารียา, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2 , หน้า 16-17
- T.McIyman and Conel Wm, Transformer and Induction Design Handbook
- <http://www.ruff-worldwide.com>
- <http://www.electronics-tutorials.com/basics/torroids.html>
- <http://www.micrometal.com>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้