



การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI โดยใช้วิธีออปทิไมเซชัน

DESIGN OF AN EI CORE INDUCTOR
USING OPTIMIZATION TECHNIQUES



โดย
นายนิพัทธ์ จันทรมินทร์
นายบัณฑิต สามพันธ์
นายภาคภูมิ กิจสมบูรณ์โลหะ

วัน เดือน ปี.....	30.09.2541
เลขทะเบียน.....	038240
เลขเรียกหนังสือ.....	139260 นส41ก.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

ปีการศึกษา 2539

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI โดยใช้วิธีออปติไมเซชัน
DESIGN OF AN EI CORE INDUCTOR
USING OPTIMIZATION TECHNIQUES



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2539


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI โดยใช้วิธีออปติไมเซชัน

ผู้จัดทำ

1. นายนิพัทธ์ จันทรมินทร์
2. นายบัณฑิต สามพันธ์
3. นายภาคภูมิ กิจสมบูรณ์โลหะ


อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.ชัยวุฒิ จัตราทัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำและวัตถุประสงค์	1
บทที่ 2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI	3
2.1 บทนำ	3
2.2 แบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI	4
2.3 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI	5
2.4 วัตถุประสงค์ของการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI	5
2.5 หลักการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	9
บทที่ 3 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	15
3.1 บทนำ	15
3.2 Gradient Evaluation	26
3.3 การอ็อปติไมเซชันโดยวิธีเชิงตัวเลขแบบไม่มีเงื่อนไข	29
3.4 วิธีการเปลี่ยนรูป	33
บทที่ 4 แผนผังของโปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสม	40
บทที่ 5 ผลการทดสอบต้นแบบตัวเหนี่ยวนำ	56
5.1 การเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากการทดสอบจริง	57
5.2 การหาค่าความต้านทาน	69
5.3 การหาค่าคุณสมบัติของแกนเหล็ก	78
5.4 การหาค่าความเหนี่ยวนำ	112
5.5 การใช้วิธี Area Product ในการออกแบบ	118
บทที่ 6 สรุปผลและวิจารณ์การทดสอบ	127
ภาคผนวก	130
ภาคผนวก ก. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธี Area Product	132
ภาคผนวก ข. ตารางค่าต่าง ๆ ที่ใช้	144
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI โดยใช้วิธีอ็อปทีไมเซชัน

นายนิพัทธ์ จันทรินทร์

นายบัณฑิต สามพันธ์

นายภาคภูมิ กิจสมบุญโรหะ

ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้า การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้คุณสมบัติต่าง ๆ ตามที่ต้องการ เช่น น้ำหนัก, ราคา และประสิทธิภาพ จึงจำเป็นที่นักออกแบบจะต้องพิจารณาให้มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

ปริญญาโทนี้นำเสนอหลักการทำงานและแนวทางการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดแกนเหล็ก EI ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอิเล็กทรอนิกส์กำลังและทางด้านไฟฟ้ากำลัง เช่น ฟิวเตอร์, เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ และ PWM อินเวอร์เตอร์ เป็นต้น

ในการออกแบบ เราได้ใช้ทฤษฎีกระบวนการทางเชิงตัวเลขโดยใช้วิธีอ็อปทีไมเซชันมาช่วยเพื่อให้ได้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ดังนี้

1. น้ำหนักเบาที่สุด
2. ราคาถูกที่สุด
3. ประสิทธิภาพสูงที่สุด

DESIGN OF AN EI CORE INDUCTOR USING OPTIMIZATION TECHNIQUES

Niphat	Jantharamin	
Bundit	Samphan	
PharkPhoom	Kijsomboonloha	
Dr.Chaiwut	Chat-uthai	Advisor
1996		

ABSTRACT

Since inductor represents one of the major ingredients constituting a power processing system, it is important to optimize the inductor design when a given design quantity is desirable, for example the total weight, cost and efficiency.

This thesis describes performance and designing of an EI core inductor which can use in power electronics and electrical power such as filter, power converter and pulse-width-modulated(PWM) inverter.

Numerical optimization methods are used for designing the EI core inductors which have the desired objectives as follows.

1. Minimum weight
2. Minimum cost
3. Maximum efficiency

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2-1	EI Core Configuration	3
รูปที่ 2-2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียของตัวเหนี่ยวนำและกระแส	7
รูปที่ 3-1	แผนผังแสดงอัลกอริทึมของการอ็อปติไมเซชัน	17
รูปที่ 3-2	สถานะของเงื่อนไข	19
รูปที่ 3-3	Usable and Feasible Search Direction	20
รูปที่ 3-4	จุดที่เหมาะสมสัมพันธ์ของฟังก์ชันเงื่อนไข	21
รูปที่ 3-5	Geometrix: Interpretation of the Kuhn-Tucker Condition	23
รูปที่ 3-6	Graphical Representation of optimum point	24
รูปที่ 3-7	Finite Difference Intervals	27
รูปที่ 3-8	อัลกอริทึมของการคำนวณหาค่าของ h	28
รูปที่ 3-9	ประเภทของ Search Methods	30
รูปที่ 3-10	Step size Determination Algorithm	32
รูปที่ 3-11	ประเภทของวิธีการเปลี่ยนรูป	33
รูปที่ 3-12	ภาพประกอบของวิธีการฟังก์ชัน Exterior Penalty ได้นำมาใช้หาค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ 1 ตัวแปรที่ถูกจำกัด โดย 2 เงื่อนไขของการไม่เท่ากัน	35
รูปที่ 3-13	ภาพประกอบของวิธีการฟังก์ชัน Exterior Penalty ได้นำมาใช้หาค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ 1 ตัวแปรที่ถูกจำกัด โดย Single Equality Constraint	36
รูปที่ 3-14	Illustration of the Interior Penalty Function Methods	36
รูปที่ 3-15	General Procedure for the Sequential Unconstrained Minimization Techniques	39
รูปที่ 4-1	แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	41
รูปที่ 4-2	แผนผังแสดงส่วนป้อนค่าตัวแปร (Input) และส่วนแสดงผล (Output)	42
รูปที่ 4-3	แผนผังแสดงขั้นตอนของ Finite Difference	43
รูปที่ 4-4	ภาพหน้าจอลือกรูปแบบการทำงานและค่าตัวแปรป้อนเข้า	45
รูปที่ 4-5	ภาพหน้าจอของตัวแปรป้อนเข้าของราคาของขดลวดและแกนเหล็ก	46
รูปที่ 4-6	ภาพหน้าจอแสดงข้อมูลของกราฟความสูญเสียในแกนเหล็ก	47
รูปที่ 4-7	ภาพหน้าจอของส่วนแสดงผลของโปรแกรมน้ำหนักเบาที่สุด	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-8	ภาพหน้าจอของส่วนแสดงผลของโปรแกรมราคาถูกที่สุด	49
รูปที่ 4-9	ภาพหน้าจอของส่วนแสดงผลของโปรแกรมประสิทธิภาพสูงที่สุด	50
รูปที่ 4-10	ภาพหน้าจอหลังจากป้อนค่าตัวแปร	51
รูปที่ 4-11	ภาพหน้าจอหลังจากป้อนราคาของแกนเหล็กและขดลวด	52
รูปที่ 4-12	ภาพหน้าจอหลังจากป้อนค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก	53
รูปที่ 4-13	กราฟความสูญเสียในแกนเหล็ก	54
รูปที่ 4-14	ภาพหน้าจอแสดงผล	55
รูปที่ 5-1	วงจรสำหรับหาค่าความต้านทาน	69
รูปที่ 5-2	กราฟระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักรวมมากที่สุด ขนาดใหญ่	74
รูปที่ 5-3	กราฟระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่	75
รูปที่ 5-4	กราฟระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดใหญ่	75
รูปที่ 5-5	กราฟระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักรวมมากที่สุด ขนาดเล็ก	76
รูปที่ 5-6	กราฟระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก	76
รูปที่ 5-7	กราฟระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก	77
รูปที่ 5-8	วงจรสำหรับทดสอบคุณสมบัติของแกนเหล็ก	78
รูปที่ 5-9	$B - H$ curve ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักรวมมากที่สุด ขนาดใหญ่	85
รูปที่ 5-10	core loss curve ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักรวมมากที่สุด ขนาดใหญ่	88
รูปที่ 5-11	$B - H$ curve ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่	93
รูปที่ 5-12	core loss curve ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่	96
รูปที่ 5-13	$B - H$ curve ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักรวมมากที่สุด ขนาดเล็ก	99
รูปที่ 5-14	core loss curve ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักรวมมากที่สุด ขนาดเล็ก	101
รูปที่ 5-15	$B - H$ curve ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก	104
รูปที่ 5-16	core loss curve ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก	106
รูปที่ 5-17	$B - H$ curve ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก	109
รูปที่ 5-18	core loss curve ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก	111
รูปที่ 5-19	วงจรสำหรับทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำ	112
รูปที่ 6-1	EI Core Configuration	123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 5.1	แสดงคุณสมบัติของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมก่อนปรับเข้าสู่แกนมาตรฐาน ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดใหญ่	57
ตารางที่ 5.2	แสดงคุณสมบัติของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมก่อนปรับเข้าสู่แกนมาตรฐาน ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่	58
ตารางที่ 5.3	แสดงคุณสมบัติของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมก่อนปรับเข้าสู่แกนมาตรฐาน ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดใหญ่	59
ตารางที่ 5.4	แสดงคุณสมบัติของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมก่อนปรับเข้าสู่แกนมาตรฐาน ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดเล็ก	60
ตารางที่ 5.5	แสดงคุณสมบัติของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมก่อนปรับเข้าสู่แกนมาตรฐาน ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก	61
ตารางที่ 5.6	แสดงคุณสมบัติของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมก่อนปรับเข้าสู่แกนมาตรฐาน ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก	62
ตารางที่ 5.7	แสดงคุณสมบัติของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ จากการทดสอบจริงของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดใหญ่	63
ตารางที่ 5.8	แสดงคุณสมบัติของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ จากการทดสอบจริงของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่	64
ตารางที่ 5.9	แสดงคุณสมบัติของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ จากการทดสอบจริงของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดใหญ่	65
ตารางที่ 5.10	แสดงคุณสมบัติของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ จากการทดสอบจริงของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดเล็ก	66
ตารางที่ 5.11	แสดงคุณสมบัติของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ จากการทดสอบจริงของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก	67
ตารางที่ 5.12	แสดงคุณสมบัติของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ จากการทดสอบจริงของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก	68
ตารางที่ 5.13	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าตรงที่ทดสอบ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดใหญ่	70
ตารางที่ 5.14	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าตรงที่ทดสอบ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่	71

ตารางที่ 5.15	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าตรงที่ทดสอบ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดใหญ่	71
ตารางที่ 5.16	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าตรงที่ทดสอบ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดเล็ก	72
ตารางที่ 5.17	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าตรงที่ทดสอบ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก	72
ตารางที่ 5.18	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าตรงที่ทดสอบ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก	73
ตารางที่ 5.19	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าและมุมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ที่ทดสอบของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดใหญ่	81
ตารางที่ 5.20	แสดงค่า $B - H$ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดใหญ่	83
ตารางที่ 5.21	แสดงค่า $P_c - B$ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดใหญ่	86
ตารางที่ 5.22	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าและมุมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ที่ทดสอบของต้นแบบ ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่	89
ตารางที่ 5.23	แสดงค่า $B - H$ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่	91
ตารางที่ 5.24	แสดงค่า $P_c - B$ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่	94
ตารางที่ 5.25	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าและมุมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ที่ทดสอบของต้นแบบ ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดเล็ก	97
ตารางที่ 5.26	แสดงค่า $B - H$ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดเล็ก	98
ตารางที่ 5.27	แสดงค่า $P_c - B$ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดเล็ก	100
ตารางที่ 5.28	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าและมุมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ที่ทดสอบของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก	102
ตารางที่ 5.29	แสดงค่า $B - H$ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก	103
ตารางที่ 5.30	แสดงค่า $P_c - B$ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก	105
ตารางที่ 5.31	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าและมุมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ที่ทดสอบของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก	107
ตารางที่ 5.32	แสดงค่า $B - H$ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก	108
ตารางที่ 5.33	แสดงค่า $P_c - B$ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก	110
ตารางที่ 5.34	แสดงผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของน้ำหนักราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก	114
ตารางที่ 5.35	แสดงผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก	114
ตารางที่ 5.36	แสดงผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก	115
ตารางที่ 5.37	แสดงผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของน้ำหนักราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่	115
ตารางที่ 5.38	แสดงผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.39	แสดงผลการทดสอบหาค่าความเหนียวนำของประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดใหญ่	116
ตารางที่ 5.40	แสดงค่าความเหนียวนำที่ได้จากการวัดทางไฟฟ้า	116
ตารางที่ 5.41	แสดงค่าความเหนียวนำ ที่ได้จากการวัดโดย LCR Meter	117
ตารางที่ 5.42	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติที่ได้จากโปรแกรมกับวิธี Area Product ของต้นแบบตัวเหนียวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดใหญ่	125
ตารางที่ 5.43	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติที่ได้จากโปรแกรมกับวิธี Area Product ของต้นแบบตัวเหนียวนำไฟฟ้าน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดเล็ก	126



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำและวัตถุประสงค์

จุดประสงค์ของบริษัทยาพันธ์นี้ เพื่อศึกษาถึงการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังและทางด้านไฟฟ้ากำลัง ซึ่งการออกแบบโดยทั่วไปจะไม่คำนึงถึงการเลือกแกนเหล็กให้เหมาะสมกับการออกแบบ โดยจะเผื่อแกนเหล็กเอาไว้เพื่อให้สามารถพันขดลวดลงได้ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลือง

ดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดที่จะลดปัญหานี้ โดยสร้างโปรแกรมที่ใช้ออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าให้มีขนาดที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการ อันประกอบด้วย น้ำหนักเบาที่สุด , ราคาถูกที่สุด , ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยนำเอาหลักการของการอ็อปติไมเซชันมาใช้ นอกจากนี้โปรแกรมที่สร้างขึ้นยังก่อให้เกิดความสะดวกแก่ผู้ใช้เนื่องจากเขียนด้วยภาษา VISUAL BASIC ซึ่งสามารถติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้ขณะใช้งานได้

หลังจากนั้น จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมในการนำไปใช้งาน โดยสร้างต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI ตามที่โปรแกรมได้ออกแบบไว้ ทั้ง 3 คุณสมบัติ ๆ ละ 2 แบบ แล้วนำไปทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดสอบกับโปรแกรมแล้วสรุปผล

ซึ่งเนื้อหาของบริษัทยาพันธ์นี้แบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

บทที่ 2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกนเหล็ก EI

ในบทนี้จะแนะนำการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเบื้องต้นที่มีน้ำหนักเบาที่สุด หรือ ราคาถูกที่สุด หรือประสิทธิภาพสูงที่สุด , แบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกนเหล็ก EI , ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ

บทที่ 3 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

ในบทนี้จะแนะนำทฤษฎีโดยทั่วไปของการอ็อปติไมเซชัน , การหากราดิเียน (Gradient Evaluation) , การอ็อปติไมเซชันเชิงตัวเลขแบบไม่มีเงื่อนไข (Unconstrained Numerical Optimization) , วิธีการเปลี่ยนรูป (Transformation Method)

บทที่ 4 แผนผังของโปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสม

ในบทนี้จะแสดงอัลกอริทึมและอธิบายลำดับการทำงานของโปรแกรมออกแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ Flow chart และรูปภาพที่ปรากฏบนจอภาพคอมพิวเตอร์ เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้น

บทที่ 5 ผลการทดสอบต้นแบบตัวเหนี่ยวนำ

ในบทนี้จะเป็นการแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของวิธีอ็อพทิไมเซชันที่ได้จากโปรแกรม และวิธี Area Product เพื่อให้เห็นได้ง่ายขึ้น

บทที่ 6 สรุปผลและวิจารณ์การออกแบบ

ในบทนี้จะสรุปผลและวิจารณ์การออกแบบต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกนเหล็ก EI ทั้งหมด



บทที่ 2

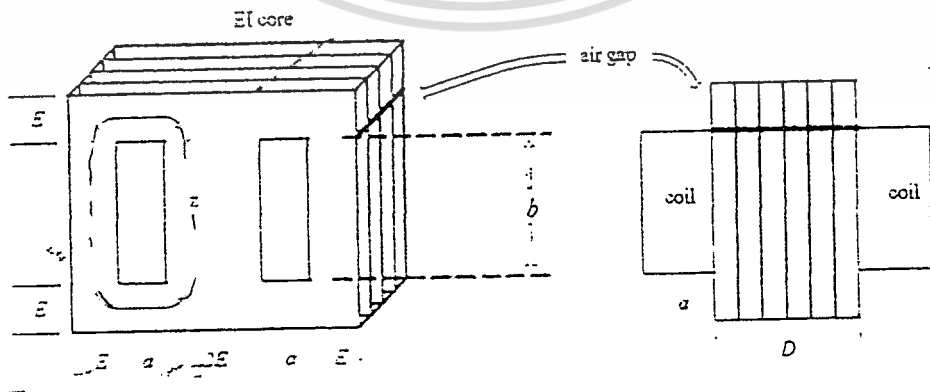
การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกนเหล็ก EI

2.1 บทนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีอยู่หลายวิธีการเพื่อพัฒนาการสร้างความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่น Power Converter , Power inverter และ Pulse-width-modulater (PWM) inverter การใช้กระบวนการเชิงตัวเลขจะเหมาะสมกับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกนเหล็ก EI ซึ่งการเหนี่ยวนำของแกนเหล็กมีค่าสูงมาก และในการออกแบบจะสามารถปรับขนาดเหล็กได้ง่าย เพราะสามารถปรับช่องอากาศได้ตามต้องการ

จุดประสงค์ของการออกแบบคือให้มีน้ำหนักรวมเบาที่สุด หรือมีราคาแพงที่สุด หรือมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการ โดยกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านคือ A_c , กระแสสูงสุดที่ไหลในขดลวด คือ I_p และค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ คือ L_d ค่าคงที่ที่ควรรู้ในการออกแบบ เช่น ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของแกนเหล็ก คือ B_{max} , ความหนาแน่นของตัวนำไฟฟ้า คือ D_w , ความหนาแน่นของแกนเหล็ก คือ D_i

รูปร่างของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกนเหล็ก EI ได้แสดงในรูปที่ (2-1) ซึ่ง a คือ ความกว้างของช่องว่าง , b คือ ความยาวของช่องว่าง , $2E$ คือ ความกว้างของ tongue และ D คือ ความหนาแน่นของแกนเหล็ก จุดมุ่งหมายในการออกแบบนี้ คือ ให้ได้รูปร่างของตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมและมีน้ำหนักเบาที่สุด หรือราคาแพงที่สุด หรือประสิทธิภาพสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องหาว่า $a, b, 2E$ และ D ด้วยวิธีต่างๆ



รูปที่ 2-1 EI core configuration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI

ค่าความเหนี่ยวนำ คือ อัตราส่วนของค่าฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดกับกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ (L) สามารถหาได้จาก

$$L = \frac{\lambda_\phi}{I_p} = \frac{N_w B_{\max} A_m}{I_p} = \frac{\mu N_w^2 A_m}{Z} \quad (2-1)$$

ซึ่ง $\lambda_\phi = N_w \phi$ คือ ฟลักซ์ที่เกี่ยวข้อง
 N_w คือ จำนวนรอบของขดลวด
 A_m คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก
 μ คือ ค่า permeability
 Z คือ ทางเดินหลักของแม่เหล็ก

การใช้วิธีเชิงตัวเลข (numerical) กำหนดจะเกิดความยุ่งยาก เนื่องจากการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ทางด้านปฏิบัติการออกแบบตัวเหนี่ยวนำสำหรับแบบทดลองจะพิจารณาค่ากระแสแม่เหล็กในช่องอากาศด้วย สำหรับคำนวณค่าความเหนี่ยวนำแสดงได้ว่าถ้ารวมเอาค่าของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศด้วย จะได้ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง ในชั้นงานซึ่งพอจะทราบได้ว่า ช่องอากาศจะต้องรวมเข้ากับวงจร ซึ่งหมายความว่าความหนาแน่นของฟลักซ์จะถูกควบคุมโดยระยะช่องอากาศ

จากสมการที่ (2-1) จะหาค่า A_m , Z และ μ ได้จาก

$$A_m = (2E)D \quad (2-2)$$

$$Z = (2a + 2b) + \pi E \quad (2-3)$$

$$\mu = \frac{L_d Z}{(N_w)^2 A_m F_s} \quad (2-4)$$

ซึ่ง F_s (Stacking Factor) คือ ค่าประสิทธิภาพของแกนเหล็กซึ่งคิดเป็นร้อยละที่ใช้ในวงจรแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกนเหล็ก EI

นักออกแบบจำเป็นต้องสังเกตในการออกแบบของตัวเหนี่ยวนำ ในส่วนของการออกแบบ มีสิ่งจำเป็นที่จะต้องพิจารณาอยู่ 2 อย่าง เพื่อให้ได้รูปร่างของตัวเหนี่ยวนำแกน EI ที่เหมาะสม คือ

2.3.1 ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

$$B_{\max} A_m F_s N_w = L_d I_p \quad (2-5)$$

2.3.2 พื้นที่ช่องว่าง

$$\frac{A_c N_w}{F_w} = ab \quad (2-6)$$

ซึ่ง F_w (Window Utilization Factor) คือ พื้นที่ช่องว่างของขดลวดที่เกิดขึ้นบนแกนเหล็กที่นำมาพัน

ปัจจัยที่มีผลมีอยู่ 4 อย่างคือ ฉนวนของขดลวด, ขดลวดที่วางพาดกัน, พื้นที่กระสวย (bobbin area) และฉนวนที่ป้องกันระหว่างขดลวดที่พันกันอยู่แต่ละชั้น

จาก สมการที่ (2-2) นำเอา A_m มาแทน และจากสมการที่ (2-6) นำเอา N_w มาแทนในสมการที่ (2-5) ดังนั้นจะได้ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์ คือ

$$\frac{B_{\max} F_s F_w ab (2E) D}{A_c} = L_d I_p \quad (2-7)$$

2.4 วัตถุประสงค์ของการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI

2.4.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI ที่มีน้ำหนักเบาที่สุด

น้ำหนักทั้งหมดของตัวเหนี่ยวนำ (W_t) ประกอบด้วยน้ำหนักของแกนเหล็ก (W_c) และน้ำหนักของขดลวด (W_w) สามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_i = 2D_i F_s (2E) D(2E + a + b) \quad (2-8)$$

$$W_w = D_w A_c N_w (MLT) = 2D_w F_c A_c N_w (2E + D) \quad (2-9)$$

ซึ่ง F_c (Pitch Factor) คือ อัตราส่วนของจำนวนตัวนำที่คิดค่าความยาวเฉลี่ยถึงเส้นรอบวง กับ MLT (ความยาวเฉลี่ยต่อ 1 รอบ) โดยให้ $MLT = 2F_c(2E + D)$
เมื่อรวมสมการที่ (2-8) กับ (2-9) จะได้ว่าหาค่าต่ำสุดของ

$$W_i(a, b, 2E, D) = 2D_i F_s (2E) D(2E + a + b) + 2D_w F_c F_w ab(2E + D) \quad (2-10)$$

2.4.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก EI ที่มีราคาต่ำที่สุด

ใช้หลักการคล้ายกับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก EI ที่มีน้ำหนักเบาที่สุด นั่นคือราคาของตัวเหนี่ยวนำ (C_i) ประกอบด้วยราคาของแกนเหล็ก (C_c) และราคาของขดลวด (C_w)
เมื่อ

CC คือราคาแกนเหล็ก (บาท/กิโลกรัม)

CW คือราคาขดลวด (บาท/กิโลกรัม)

จะได้ว่า

$$C_c = 2D_i F_s (2E) D(2E + a + b) \times CC \quad (2-11)$$

$$C_w = D_w A_c N_w (MLT) = 2D_w F_c A_c N_w (2E + D) \times CW \quad (2-12)$$

หาค่าต่ำสุดของ

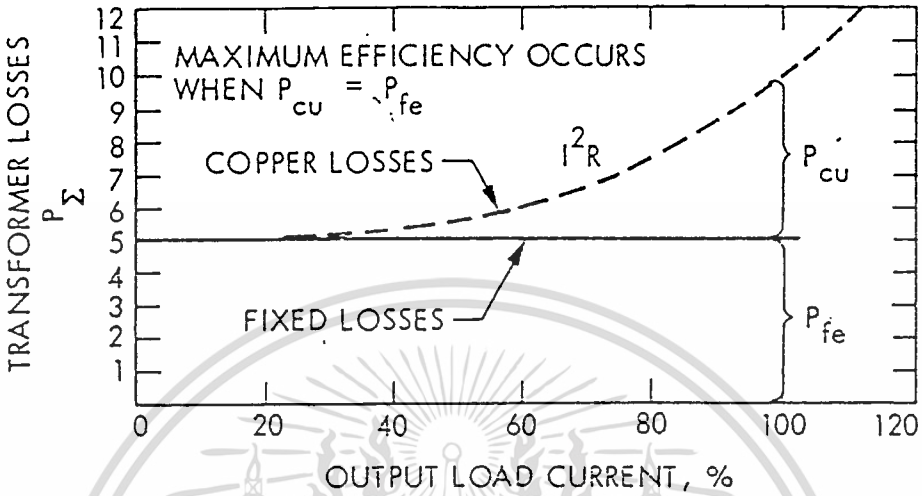
$$C_i(a, b, 2E, D) = 2D_i F_s (2E) D(2E + a + b) CC + 2D_w F_c F_w ab(2E + D) CW \quad (2-13)$$

2.4.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

จากการที่เราทราบว่า ประสิทธิภาพเป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าส่งออก (P_o) ต่อกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า (P_i) โดยความแตกต่างระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าทั้งสองก็คือความสูญเสีย ซึ่งความสูญเสียรวม (P_l) ของตัวเหนี่ยวนำจะประกอบด้วยความสูญเสียในแกนเหล็ก (P_c) และความสูญเสียในขดลวด (P_{cu})
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้ว่า

$$P_t = P_c + P_{cu} \tag{2-14}$$



รูปที่ 2-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียของตัวเหนี่ยวนำและกระแส

ซึ่งความสูญเสียในขดลวดจะแปรตามกำลังสองของกำลังไฟฟ้าส่งออก ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{cu} = KP_o^2 \tag{2-15}$$

หรืออาจจะเขียนได้ว่า

$$P_t = P_c + KP_o^2 \tag{2-16}$$

แต่จาก

$$P_i = P_o + P_t \tag{2-17}$$

ดังนั้นเราจะหาประสิทธิภาพของตัวเหนี่ยวนำ (η) จาก

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_o}{P_o + P_t} \tag{2-18}$$

เอกสารนี้แทนค่าจากสมการ (2-16) ลงในสมการ (2-18) จะได้นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = \frac{P_o}{P_c + P_o + KP_o^2} \quad (2-19)$$

หาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการ (2-19)

$$\frac{d\eta}{dP_o} = (P_c + P_o + KP_o^2) - P_o(P_c + P_o + KP_o^2)^{-2}(1 + 2KP_o) \quad (2-20)$$

$$\frac{d\eta}{dP_o} = 0 \quad \text{สำหรับค่าประสิทธิภาพสูงสุด} \quad (2-21)$$

$$(P_c + P_o + KP_o^2) - P_o(1 + 2KP_o) = 0 \quad (2-22)$$

$$P_c + P_o + KP_o^2 - P_o - 2KP_o^2 = 0 \quad (2-23)$$

$$P_c = KP_o^2 = P_{cu} \quad (2-24)$$

นั่นคือประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อความสูญเสียในแกนเหล็กเท่ากับความสูญเสียในขดลวด เมื่อ P_c คือความสูญเสียต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (วัตต์/กิโลกรัม) และ R คือค่าความต้านทานของขดลวด (Ω/m) หากความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปของ E, D ได้ดังนี้

$$P_c = W_i \times P_C = 2D_i F_s (2E)D \times 6EP_C = 24D_i F_s E^2 DP_C \quad (2-25)$$

$$P_{cu} = (MLT \times N_w) \times I^2 R \quad (2-26)$$

จากสมการ (2-6) แทนค่า $a = E, b = 3E$ จะได้

$$N_w = \frac{abF_w}{A_c} = \frac{E \times 3E \times F_w}{2E \times D} = \frac{3}{2} \frac{E \times F_w}{D} \quad (2-27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ที่ออกให้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{cu} = \{3F_c F_w E(2E + D)I^2 R\} / D \quad (2-28)$$

ดังนั้นจากสมการ (2-24) จะได้

$$(24D_i F_s E^2 D P_C) - \{3F_c F_w E(2E + D)I^2 R\} / D = 0 \quad (2-29)$$

โดยที่ทั้งสามกรณีมีสมการควบคุมดังนี้

$$\frac{B_{\max} F_s F_w a b (2E) D}{A_c} - L_d I_p = 0 \quad (2-30)$$

เพื่อหลีกเลี่ยงการปฏิบัติที่ยุ่งยาก เราควรรวมขนาดโดยการใช้การจำกัดขอบเขตของค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด จะได้ดังนี้

$$2.5E - 03m \leq (a, b, 2E, D) \leq 3.0E - 01m \quad (2-31)$$

2.5 หลักการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

2.5.1 สิ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

2.5.1.1 การเลือกอุปกรณ์

1. ชนิด ลักษณะ โครงสร้าง และขนาดของแกนเหล็ก
2. ชนิด รูปร่าง ขนาด และจำนวนรอบที่ใช้ในการพันของลวดตัวนำ
3. ชนิด และลักษณะของฉนวน
4. ลักษณะโครงสร้างของ case ตลอดจนการระบายความร้อน
5. คุณสมบัติทางไฟฟ้า และเชิงกลอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.2 ข้อกำหนด

1. ค่าความเหนี่ยวนำ
2. ขนาดและรูปร่างรวมทั้งความถี่ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า
3. กำลังสูญเสีย ประสิทธิภาพ หรืออุณหภูมิเพิ่ม (T_{rise})
4. คุณสมบัติทางไฟฟ้า และเชิงกลอื่น ๆ

2.5.1.3 ชีตจำกัด

1. ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิมดัวของแกนแม่เหล็ก
2. กำลังสูญเสียในลวดทองแดงหรือแกนเหล็ก
3. คุณสมบัติอื่น ๆ เช่น ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability : μ) , Breakdown voltage (V_b)

2.5.1.4 สมการการออกแบบ

จากขีดจำกัดของแกนแม่เหล็ก (สารแม่เหล็กอิมเหล็กหรือการสูญเสียในแกนเหล็ก)

$$B_{max} = \frac{\phi_{max}}{S} = \frac{\lambda_{max}}{S \cdot N} = \frac{LI_{peak}}{S \cdot N} \quad (2-32)$$

$$\phi_{max} = \frac{LI_{peak}}{N} \quad \text{สนามแม่เหล็กแปรตามกระแส} \quad (2-33)$$

$$k \cdot W = N \cdot A_w \quad \text{ขีดจำกัดของหน้าตัด ; } k = 0.3-0.9 \quad (2-34)$$

จากขีดจำกัดของลวดทองแดง โดยคำนึงถึงการสูญเสียในขดลวด (P_{cu})

$$P_{cu} = I_{rms}^2 \cdot R \quad (2-35)$$

$$R = \frac{\rho l}{A_w} \quad (2-36)$$

$$J = \frac{I_{rms}}{A_w} \quad (2-37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $J = 100 - 1,000 \text{ A/cm}^2$ $\rho = 1.724 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$

จากคุณสมบัติของวงจรแม่เหล็กและตัวเหนี่ยวนำ

$$L = N^2 P_c = \frac{N^2}{R_c} \quad (2-38)$$

$$R_c = R_m + R_g; R_g = \frac{l_g}{\mu_o \cdot S}$$

$$I_g = \frac{N^2 \mu_o S}{L} \quad (2-39)$$

2.5.2 การออกแบบโดยใช้วิธีการคำนวณแบบ A_p Approach

วิธีนี้เป็นวิธีการออกแบบที่ใช้ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอยู่ในรูปของความหนาแน่นของกระแสของลวดตัวนำ $J = 100 - 1,000 \text{ A/cm}^2$

$$N = \frac{L \cdot I_{peak}}{B_{max} \cdot S} \quad (2-40)$$

$$k \cdot W = \frac{N \cdot I_{rms}}{J} \quad (2-41)$$

แทนค่า N จะได้

$$A_p = W \cdot S = \frac{L \cdot I_{peak} \cdot I_{rms}}{k \cdot B_{max} \cdot J}$$

ถ้า $I_{peak} = I_{rms}$

$$A_p = W \cdot S = \frac{2 E_{peak}}{k \cdot B_{max} \cdot J} \quad \text{เมื่อ} \quad E_{peak} = (1/2) L \cdot I_{peak}^2 \quad (2-42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.1 ขั้นตอนในการออกแบบโดยวิธี A_p Approach

1. จากข้อกำหนดและขีดจำกัดคำนวณค่า A_p
2. เลือกขนาดของแกนให้มีค่ามากกว่า A_p ที่คำนวณได้จากข้อ 1
3. คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ (N)
4. คำนวณหาขนาดของลวดตัวนำ (A_w)
5. เลือกเบอร์ของลวดทองแดงให้มี A_w ใหญ่กว่า A_w ที่ได้จากการคำนวณในข้อ 4 โดยเลือกครีมีของลวดทองแดงที่เล็กกว่าความลึกผิวของทองแดง (skin depth) ที่ความถี่สูงสุดที่ใช้งานโดยที่

$$\delta(m) = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu W}}$$

6. คำนวณหา $P_{cu} = I_{rms}^2 \cdot R$

7. ปรับค่า J เริ่มตั้งแต่ข้อ 1-6 ใหม่ จนได้ P_{cu} ที่เหมาะสม

8. คำนวณหาขนาดของช่องว่างอากาศ (air gap) $I_g = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot S}{L}$

หรือค่า μ ของแกน

9. คำนวณหาค่า Fringing Flux Correction Factor (F)

$$F = 1 + (l_g / \sqrt{S}) \{ \ln(2G / l_g) \}$$

อันเนื่องมาจากผลของฟลักซ์ที่ขอบ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ปรับลด l_g จนได้ค่า L ตามต้องการ

2.5.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยทั่วไป

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ เราจะต้องกำหนดค่าหรือทราบค่าดังต่อไปนี้

1. ค่ากระแสที่ต้องการใช้งาน (A)
2. ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการในการออกแบบ (L)

2.5.3.1 ขั้นตอนในการออกแบบ

1. หาค่าของแรงดันไฟฟ้า จากสูตร

$$V = 2\pi \cdot f \cdot L \cdot I \quad (2-43)$$

2. หาค่าพื้นที่หน้าตัด (A_1) และขนาดของแกนเหล็ก ($2I$) โดยนำค่าแรงดันไฟฟ้าจากข้อ 1 และค่ากระแส (A) ที่กำหนดมาแทนในสูตร

$$A_1 = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} \quad (2-44)$$

$$(2I) = \sqrt{A_1}$$

3. หลังจากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากข้อ 1 และพื้นที่หน้าตัด (A_1) จากข้อ 2 ไปหาจำนวนรอบของขดลวด (N) ที่ใช้ในการพัน จากสูตร

$$V = 4.44 f N B A_1 \times (2.54)^2 \times 10^{-4} \quad (2-45)$$

4. หาขนาดของลวดที่ใช้ในการพัน (A_w) จากสูตร

$$A_w = \frac{A}{J} \quad (2-46)$$

โดยที่ J คือ ค่า current density มีหน่วยเป็น (A/mm^2)

A_w มีหน่วยเป็น mm^2

5. จากนั้นจึงมาหาค่าพื้นที่หน้าตัดรวมของลวด (A_w รวม) จากสูตร

$$A_w \text{ รวม} = N \times A_w \quad (2-47)$$

โดยที่ A_w รวม มีหน่วยเป็น mm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. หาพื้นที่ใช้งานจริงหรือเรียกว่าพื้นที่หน้าตัด (A_R) จากสูตร

$$A_R = (3I) \times (I) \times 25.4^2 \quad (2-48)$$

โดยที่ A_R มีหน่วยเป็น mm^2

7. ตรวจสอบพื้นที่หน้าตัดรวมของลวด (A_w รวม) และพื้นที่ใช้งานจริง (A_R) ว่าสามารถพันลวดลงไปได้หรือไม่ จากเงื่อนไข

$$(A_w \text{ รวม}) < 0.5(A_R) \quad (2-49)$$

หมายเหตุ ถ้าหากตรวจสอบแล้วไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจะต้องปรับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (A) โดยที่เราคงที่ค่าขนาดของแกนเหล็ก ($2I$) และเปลี่ยนความหนาของแกนเหล็กเพิ่มขึ้นแทนแล้วกลับไปคำนวณหาจำนวนรอบ (N) ตามข้อ 3 เสียใหม่ โดยแทนค่า (A) ใหม่ ในสูตรแทนและทำตามขั้นตอนต่อไป

8. หาค่าของช่องว่างอากาศ (gap) จากสูตร

$$g = \frac{N^2 \mu_o A}{2L} \quad (2-50)$$

บทที่ 3

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการของการอ็อปทิไมเซชัน ซึ่งมีอัลกอริทึมที่แสดงในรูป 3-1 และได้พูดถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ เช่น การหาค่ากราเดียนซึ่งใช้วิธี Finite Difference Approximation การอ็อปทิไมเซชัน โดยการแปลงให้อยู่ในรูปที่มีเงื่อนไข , ทฤษฎีในการหาทิศทาง , ทฤษฎี Conjugate Gradient , ทฤษฎี Variable Metric และยังได้กล่าวถึงทฤษฎี Transformation ในการแก้ปัญหาในกรณีที่มีเงื่อนไขมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยจะทำการเปลี่ยนรูปฟังก์ชันหลักและฟังก์ชันเงื่อนไข ซึ่งมีเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

เทคนิคแรก คือ Sequential Unconstrained Minimization ซึ่งแบ่งได้อีก 3 วิธี คือ

1. Exterior Penalty Function
2. Interior Penalty Function
3. Extended Interior Penalty Function

เทคนิคที่สอง คือ Augmented Lagrangian Multiplier Method ซึ่งเทคนิคนี้จะไม่ได้นำมาใช้ในการทำโครงงานนี้

3.1.1 General Optimization Statement

โดยมากการออกแบบการแก้ปัญหาของการอ็อปทิไมเซชัน สามารถจัดให้อยู่ในสูตรทางคณิตศาสตร์ของเงื่อนไขทั่วไปในการอ็อปทิไมเซชัน ได้ตามนี้

$$\text{Minimize } F(x) \quad \text{ฟังก์ชันหลัก} \quad (3-1)$$

โดย

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad \text{เงื่อนไขของการเท่ากัน} \quad (3-2)$$

$$g_k(x) \leq 0 \quad k = 1, \dots, l \quad \text{เงื่อนไขของการไม่เท่ากัน} \quad (3-3)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i'' \quad i = 1, \dots, n \quad \text{เงื่อนไขขอบเขต} \quad (3-4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

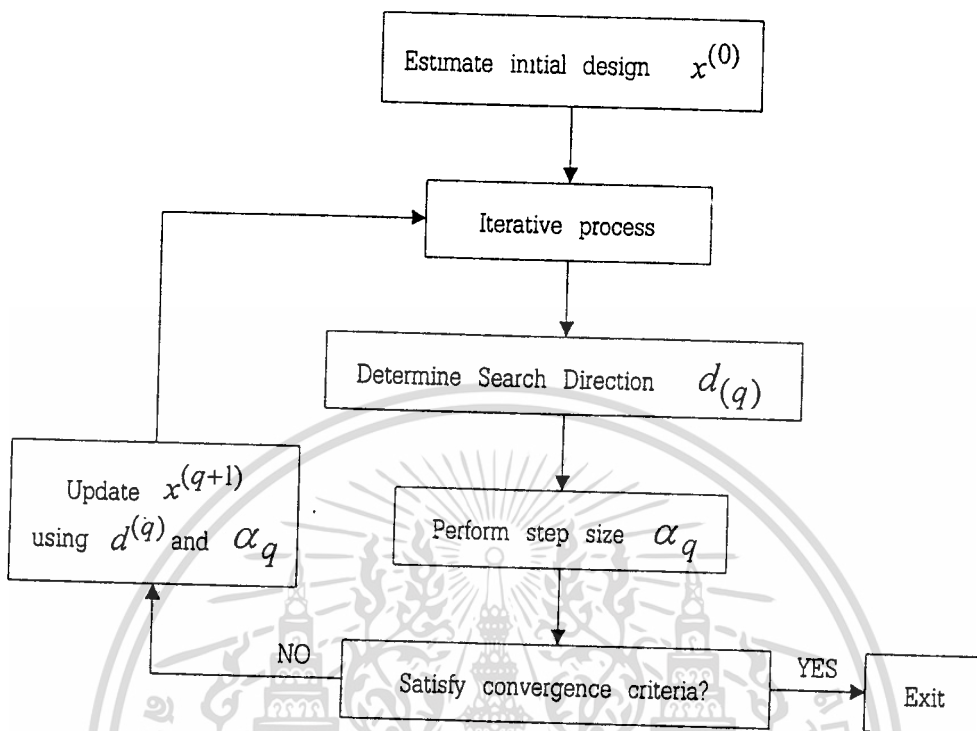
เมื่อ $x = x_1, \dots, x_n$ เป็นเวกเตอร์ของการออกแบบตัวแปร (design variables) และเงื่อนไขขอบเขต (side constraints) เป็นขอบเขตที่ชัดเจนของการออกแบบตัวแปร x_i^L และ x_i^U โดยเป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดของขอบเขตตามลำดับ ฟังก์ชันหลัก (objective function) และ ฟังก์ชันเงื่อนไข (constraint function) อาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้ ในการออกแบบตัวแปร x ฟังก์ชันเหล่านี้จะหาค่า x อย่างแน่นอนหรือรู้เป็นนัยและต้องหาค่าโดยใช้เทคนิคเชิงวิเคราะห์ (analytical) หรือวิธีเชิงตัวเลข (numerical) วิธีแบบเชิงตัวเลข ซึ่งสามารถหาค่าได้ถ้ามีเงื่อนไขในการเท่ากัน (equality constraints) เป็นจำนวน m และจะต้องรู้ค่า x อย่างแน่นอน ซึ่งเป็นไปได้ที่จะใช้เงื่อนไขในการเท่ากันเหล่านั้นเพื่อที่จะลดตัวแปรที่ออกแบบ

หลังจากนั้นปัญหาจะถูกลดลงเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขด้วยตัวแปรไม่ทราบค่า $n - m$ ตัว เงื่อนไขขอบเขตในสมการที่ (3-4) ถูกกำหนดให้เป็นขอบเขตของตัวแปรที่ออกแบบเพื่อที่จะป้องกันจากการเข้าสู่ค่าที่เป็นไปไม่ได้ทางกายภาพ (non-physical values) รูปแบบที่แสดงไว้ในสมการที่ (3-1) ถึง (3-4) ไม่ได้แสดงไว้ในรูปแบบเดียว ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาที่ต้องจัดในรูปค่าสูงสุด (maximization) สามารถจัดใหม่โดยการทำให้สมการที่ (3-1) เปลี่ยนเป็น $-F(x)$ และยังคงขึ้นอยู่กับสมการเงื่อนไขเดิมในสมการที่ (3-2) ถึง (3-4)

ปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขอาจจะกำหนดจากสมการที่ (3-1) โดยปราศจากเงื่อนไขในการหาตัวแปร x ดังเช่นปัญหาที่ไม่ได้ใช้ในการปฏิบัติจริงทางวิศวกรรม ปัญหาที่มีเงื่อนไขโดยเงื่อนไขในการเท่ากันอาจจะถูกแปลงไปเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไข โดยการลดจำนวนของตัวแปรที่ออกแบบลง บางทีปัญหาที่มีทั้งเงื่อนไขในการเท่ากันและไม่เท่ากันสามารถแก้ไขเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขโดยใช้ทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (Transformation Method) เพราะฉะนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะเข้าใจอย่างเพียงพอเกี่ยวกับทฤษฎี unconstrained optimization

แผนผังทั่วไปของอัลกอริทึมของการอ็อปทิไมเซชัน แสดงในรูปที่ (3-1) กระบวนการอ็อปทิไมเซชัน ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 3 ขั้นตอน

1. การดำเนินการหาทิศทางของเวกเตอร์ $|d|$ ในสเปซ (space)
2. กระทำการค้นหาระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทางเวกเตอร์ $|d|$ โดยการกำหนดที่ละชั้นของขนาดของการขยับ (Step size)
3. แสดงผลได้เมื่อกระบวนการมีการพุ่งเข้ามาหาค่าที่ยอมรับได้



รูปที่ 3-1 แผนผังแสดงอัลกอริทึมของการอ็อปทิไมเซชัน

โดยมากอัลกอริทึมการอ็อปทิไมเซชัน จะมีการตั้งค่าเริ่มต้นของการออกแบบตัวแปร ($x^{(0)}$) จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากจุดเริ่มต้นและปรับค่า โดยการออกแบบข้อมูลซ้ำ ๆ ดังรูปแบบนี้

$$x^{(q+1)} = x^{(q)} + \alpha_q d^{(q)} \quad (3-5)$$

เมื่อ q เป็นจำนวนการทำซ้ำ อยู่ในส่วนที่ติดตามในอัลกอริทึมต่าง ๆ ใช้สำหรับแสดงผลสถานะปัจจุบันของการค้นหาทิศทางของเวกเตอร์ $|d|$ และขนาดของการขยับ α

3.1.2 สถานะของเงื่อนไข

ในการอ็อปทิไมเซชันแบบมีเงื่อนไข (constrained optimization) มีการกำหนดสถานะของการบังคับของการออกแบบจุด ซึ่งมีความจำเป็นในการได้เพียงของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พิจารณาในรูปที่ (3-2) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับ... พิจารณาในรูปที่ (3-2) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$g_k(x)$ เป็นเงื่อนไขของการไม่เท่ากัน (inequality constraint) แบ่งช่วงการออกแบบเป็นช่วงที่เป็นไปได้ (feasible) และช่วงที่เป็นไปไม่ได้ (infeasible) ดังนั้น สถานะของเงื่อนไขสามารถกำหนดได้ดังนี้

3.1.2.1 Active Constraint

เงื่อนไขของการไม่เท่ากัน $g_k(x) \leq 0$ สามารถเป็นเงื่อนไขแอคทีฟ (active) ของการออกแบบที่จุด $x^{(q)}$ ถ้าแทนค่าแล้วเป็นอิกวอลิตี (equality) ที่จุดนั้น เช่น $g_k(x^{(q)}) = 0$

3.1.2.2 Inactive Constraint

เงื่อนไขของการไม่เท่ากัน $g_k(x) \leq 0$ สามารถเป็นเงื่อนไขไม่แอคทีฟ ของการออกแบบที่จุด $x^{(q)}$ ถ้าแทนค่าแล้วมีค่าเป็นลบที่จุดนั้น เช่น $g_k(x^{(q)}) < 0$

3.1.2.3 Violated Constraint

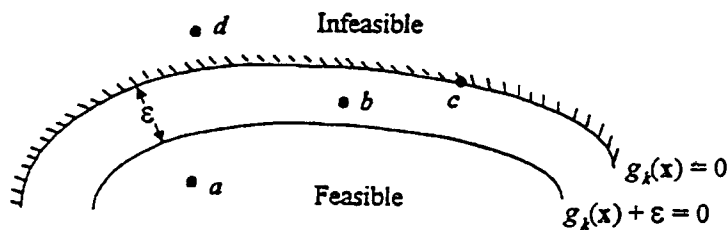
เงื่อนไขของการไม่เท่ากัน $g_k(x) \leq 0$ สามารถเป็นเงื่อนไขแวง (violated) ของการออกแบบที่จุด $x^{(q)}$ ถ้าแทนค่าแล้วมีค่าเป็นบวกที่จุดนั้น $g_k(x^{(q)}) > 0$. เงื่อนไขของการเท่ากัน $h_j(x) = 0$ เป็นเงื่อนไขแวงของการออกแบบที่จุด $x^{(q)}$ ถ้าแทนค่าแล้วมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ $h_j(x^{(q)}) \neq 0$

3.1.2.4 ϵ -Active constraint

เงื่อนไขของการไม่เท่ากัน $g_k(x) \leq 0$ เป็นเงื่อนไข ϵ -active ที่จุด $x^{(q)}$ ถ้า $g_k(x^{(q)}) < 0$ แต่ $g_k(x^{(q)}) + \epsilon \geq 0$ เมื่อ $\epsilon > 0$ เป็นค่าน้อย ๆ

การอธิบายถึงสถานะของเงื่อนไข พิจารณาเงื่อนไขของการไม่เท่ากันลำดับที่ k . $g_k(x) \leq 0$ ในรูปที่ (3-2) ช่วงที่เป็นไปได้และช่วงที่เป็นไปไม่ได้จะเหมือนกันขอบเขต $g_k(x) + \epsilon = 0$ ซึ่งอยู่ภายในช่วงที่เป็นไปได้ พิจารณาการออกแบบจุด a . เงื่อนไข $g_k(x)$ มีค่าเป็นลบ และ $g_k(x) + \epsilon < 0$ เสมอ ดังนั้นเงื่อนไขจะเป็นแบบไม่แอคทีฟ สำหรับการออกแบบที่จุด a เมื่อออกแบบจุด b , มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งเป็นไม่แอคทีฟเช่นเดียวกันแต่อย่างไร $g_k(x) + \epsilon > 0$ ดังนั้นเงื่อนไขเป็นแอคทีฟ จากการออกแบบจุด b สำหรับการออกแบบจุด c , $g_k(x) = 0$ เพราะฉะนั้นเงื่อนไขเป็นแบบแอคทีฟ สำหรับการออกแบบที่จุด d $g_k(x)$ มีค่ามากกว่าศูนย์ ดังนั้นเงื่อนไขเป็นแบบแวง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-2 สถานะของเงื่อนไข ณ จุดที่ออกแบบ a, b, c และ d

3.1.3 เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการอ็อปทิไมเซชันแบบมีเงื่อนไข

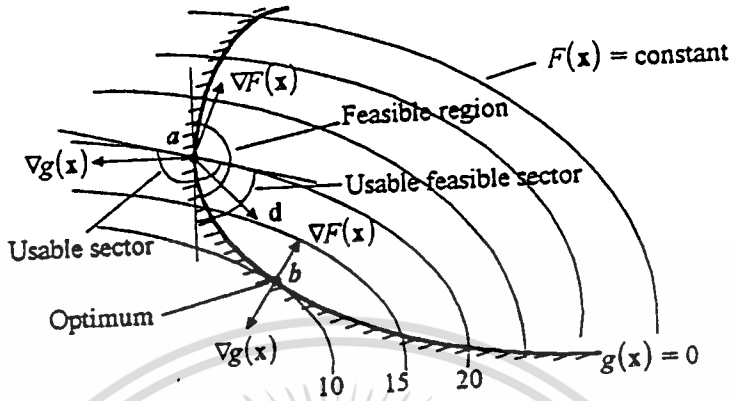
จากรูปที่ (3-3) สมมติว่าที่จุด a เป็นเงื่อนไขที่แอคทีฟ ซึ่งทำให้ดีขึ้นโดยการหาทิศทางของเวกเตอร์ $|d|$ จะทำให้ฟังก์ชันหลักลดลงและไม่ทำให้เงื่อนไขที่แอคทีฟมีสถานะกว้าง ผลคูณแบบสเกลาร์ของเวกเตอร์ทิศทาง $|d|$ ที่เป็นส่วนที่ใช้ได้ (usable sector) กับกราเดียนของฟังก์ชันหลัก $\nabla F(x)$ จะน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ เมื่อเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ใช้ได้เขียนให้อยู่ในรูปคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{ทิศทางที่ใช้ได้} \quad d^T \nabla F(x) \leq 0 \quad (3-6)$$

แต่อย่างไรผลคูณของเวกเตอร์ $|d|$ กับกราเดียนของเงื่อนไข $\nabla g(x)$ จะต้องเป็นลบหรือเท่ากับศูนย์ ในทางปฏิบัติของปัญหาการอ็อปทิไมเซชัน ซึ่งมีเงื่อนไขที่แอคทีฟมากในการออกแบบ ต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่เป็นไปได้ (Feasible direction)

$$\text{ทิศทางที่เป็นไปได้} \quad d^T \nabla g_k(x) \leq 0 \quad \text{เมื่อทุกค่าของ } k \text{ ทำให้ } g_k(x) = 0 \quad (3-7)$$

จุดที่น่าสนใจ คือ การเคลื่อนที่ควรเป็นไปในระยะสั้น ๆ ของทิศทางซึ่งสัมพันธ์กับ hyper plane ซึ่งเป็นขอบเขตของช่วงที่เป็นไปได้ (Feasible region) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ให้เงื่อนไขแบบกว้าง แต่ก็ช่วยลดฟังก์ชันหลักอย่างรวดเร็วทีเดียว



รูปที่ 3-3 Usable and feasible search direction

ให้จุด b เป็นจุดที่อ็อพทิไมเซชันจากการออกแบบเพื่อใช้ในการอธิบาย รูปที่ (3-3) แสดงถึงกราฟิกของฟังก์ชันหลักและกราฟิกของเงื่อนไข ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับเวกเตอร์ $|s|$ จะมีความปลอดภัยในการใช้ได้ (usability) และความเป็นไปได้ (feasibility) โดยเป็นเส้นสัมผัสกับขอบเขตของขอบเขต และเส้นคงที่ของฟังก์ชันหลักที่มีมุม 90 องศา กับกราฟิก โดยที่เขียนมาดังกล่าว สามารถเขียนในรูปคณิตศาสตร์ได้

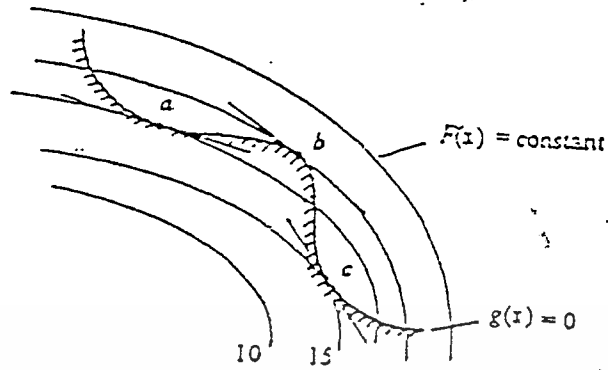
$$\nabla F(x) + \sum_{k=1}^l \lambda_k \nabla g_k(x) + \sum_{j=1}^m \lambda_{l+j} \nabla h_j(x) = 0 \quad (3-8)$$

$$\lambda_k \geq 0; \lambda_{l+j} \quad \text{unrestricted in sign}$$

เมื่อ λ เป็นตัวคูณของลาแกรง (Lagrange multiplier)

จากสมการ (3-8) ได้กำหนดเงื่อนไขที่จำเป็นในการอ็อพทิไมเซชัน แต่ก็ยังไม่เพียงพอ ซึ่งสามารถเห็นได้จากรูปที่ (3-4) จุด a, b และ c ทุกจุดได้จากสมการที่ (3-8) แต่มีจุด c ที่เป็น true global optimum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-4 จุดที่เหมาะสมสัมพันธ์ของฟังก์ชันเงื่อนไข

3.1.4 เงื่อนไขของ Kuhn-Tucker

ถ้าให้เวกเตอร์ x^* ถูกกำหนดมาในการอ็อปทิไมเซชัน แต่ต้องมีเงื่อนไข 3 ข้อ ดังนี้

3.1.4.1 x^* เป็นสิ่งที่เป็นไปได้ (Feasible) (3-9)

ถ้าต้องการที่จะออกแบบให้ได้ค่าที่เหมาะสมทุก ๆ เงื่อนไข

3.1.4.2 $\lambda_k g_k(x^*) = 0; k = 1, \dots, l \quad \lambda_k \geq 0$ (3-10)

ถ้าเงื่อนไขที่ได้มายังไม่ถูกต้องทั้งหมด เช่น โดยใช้ตัวคูณของลาแกรนจ์ที่มากกว่าศูนย์

3.1.4.3 $\nabla F(x^*) - \sum_{k=1}^l \lambda_k \nabla g_k(x^*) + \sum_{j=1}^m \lambda_{l+j} \nabla h_j(x^*) = 0$ (3-11)

$\lambda_k \geq 0; \lambda_{l+j}$ unrestricted in sign

เป็นเงื่อนไขเหมือนกับใช้ในสมการที่ (3-8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขของ Kuhn-Tucker สามารถให้เห็นโดยเทียบกับรูปที่ (3-5) ซึ่งแสดงถึงปัญหาการหาค่าต่ำที่สุด (minimization) 2 ตัวแปรด้วยเงื่อนไขของการไม่เท่ากัน ณ จุดที่เหมาะสมซึ่งเป็นไป x^* ได้เงื่อนไข $g(x^*)$ ไม่เป็นจุดวิกฤตจากสมการ (3-10) จะได้เป็นเงื่อนไขที่สำคัญของการให้กราดิเียนของเงื่อนไขที่วิกฤต $g_1(x^*)$ และ $g_2(x^*)$ ซึ่งคูณโดยตัวคูณของลากรอง แล้วผลรวมของเวกเตอร์นั้นจะเท่ากับค่าลบของกราดิเียนของฟังก์ชันหลัก จากรูปที่ (3-5) จะได้

$$F(x^*) - \lambda_1 \nabla g_1(x^*) + \lambda_2 \nabla g_2(x^*) = 0 \quad (3-12)$$

$$\lambda_1, \lambda_2 \geq 0$$

เริ่มต้น $g_1(x^*) = 0$ และ $g_2(x^*) = 0$ เงื่อนไขที่สองถูกต้องสำหรับเงื่อนไข ดังนั้นก็จะได้ว่าเงื่อนไขของ Kuhn-Tucker จะถูกต้อง

3.1.5 Global และ Local Minima

ในทางปฏิบัติปัญหาของการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันหลายตัวแปร ซึ่งสุดท้ายก็ต้องหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันหลัก ซึ่งอยู่ในช่วงที่เป็นไปได้ (feasible region) โดยการหาค่าที่เหมาะสม ในฟังก์ชันทั่วไปหาจำนวนที่แสดงของจุดที่เหมาะสม ถ้าจุดดังกล่าวของฟังก์ชันหลักเป็นค่าที่เพิ่มขึ้นในเส้นทางของทุกทิศทาง หรือ เป็นอยู่ในบางทิศทาง แต่เพิ่มขึ้นในทุกส่วนซึ่งเรียกว่า local minimum แต่จะมีอยู่จุดหนึ่งที่ฟังก์ชันมีค่าต่ำสุดเรียกว่า global minimum ซึ่งจะอธิบายให้เข้าใจยิ่งขึ้น

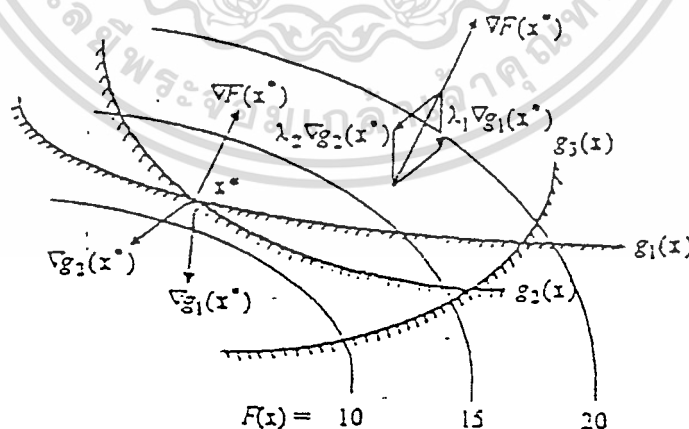
3.1.5.1 Global Minimum

เป็นฟังก์ชันที่มี n ตัวแปร มี global minimum คือ x^* ถ้า $F(x^*) \leq F(x)$ ทุกค่าของ x ในช่วงที่เป็นไปได้ ถ้า strict inequality ทุก x นั้น ๆ แล้วจะเรียก x^* ว่า strict global minimum

3.1.5.2 Local Minimum

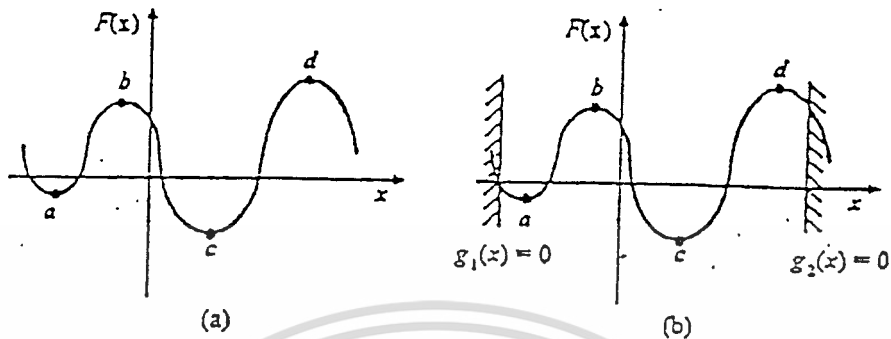
เป็นฟังก์ชันที่มี n ตัวแปร มี local minimum คือ x^* ถ้า $F(x^*) \leq F(x)$ ทุกค่าของ x ที่อยู่ภายใน a small neighborhood N ของ x^* ในช่วงที่เป็นไปได้ ถ้า strict inequality คือว่า x^* นั้นเรียกว่า strict local minimum. Neighborhood N ของจุด x^* ที่กำหนดจาก set ของจุด $N = \{x / x \in S, \|x - x^*\| < \delta\}$ และมีค่าน้อย จะได้ว่าเป็นช่วงเล็กๆ ที่เป็นไปได้ (small feasible region) ที่อยู่ของจุด x^*

รูปที่ (3-6(a)) a, c เป็น local minima เริ่มเป็นฟังก์ชันที่มีค่าน้อยที่สุดซึ่งเกิดใน neighborhood จุด b, d เป็นจุด local maxima ของฟังก์ชัน ซึ่งในกรณีนี้ จะไม่มี global minimum หรือ maximum ของฟังก์ชัน เพราะโดเมน (domain) และฟังก์ชัน $F(x)$ ไม่มีขอบเขต x และ $F(x)$ จะมีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ และ $+\infty$ ค่าโดเมนมีการ strict constraint (restricted) ที่แสดงในรูป (3-6(b)) จะได้จุด c เป็น global minimum และจุด d เป็น global maximum ของฟังก์ชัน



รูปที่ 3-5 Geometric interpretation of the Kuhn-Tucker condition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-6 Graphical representation of optimum point

3.1.6 Convergence Criteria (การลู่เข้าสู่จุดวิกฤต)

เส้นทางวิกฤตการอ็อปทิไมเซชัน สามารถหาได้เมื่อหยุดกระบวนการค้นหาจุดที่เหมาะสม การสิ้นสุดของจุดวิกฤต เราสามารถเลือกจากปฏิกิริยาที่สำคัญของประสิทธิภาพและความแน่นอนของกระบวนการอ็อปทิไมเซชัน ซึ่งการลู่เข้าสู่เส้นทางวิกฤตหาได้จาก

3.1.6.1 Maximum number of iteration (จำนวนสูงสุดของกระบวนการซ้ำ)

ถ้าจำนวนของกระบวนการซ้ำ q มีค่ามาก จำนวน q_{\max} นั้นแล้วกระบวนการค้นหาจะจบลง ถ้ากระบวนการซ้ำเพราะกระบวนการเชิงตัวเลขหรืออัลกอริทึม (numerical หรือ algorithmic) ยากหรือง่ายอันเนื่องมาจากโปรแกรมผิดพลาด ทำให้โปรแกรมนั้นไม่ต่อเนื่องถึง iterate indefinitely

3.1.6.2 การเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันหลัก ซึ่งมี 2 วิธี ถ้าหากกระบวนการนั้นซ้ำมากจนไม่มีทางจะหาค่าลู่เข้าได้

3.1.6.2.1 เป็นการเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์ของ $F(x)$ มีผลต่อกระบวนการทำซ้ำ การลู่เข้านั้นได้แสดงดังนี้

$$|F(x^{(q+1)}) - F(x^{(q)})| \leq \varepsilon_A \quad (3-13)$$

เมื่อ ε_A เป็น specified tolerance (ค่าผิดพลาด) ซึ่งเป็นค่าคงที่ หรือเป็นค่าคงที่ของ objective function ที่ค่า $x^{(0)}$ จากตัวอย่าง ตั้งค่า $\varepsilon_A = 0.001|F(x^{(0)})|$

3.1.6.2.2 การตรวจความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนในระหว่างการเป็นไปได้ของกระบวนการซ้ำในการลู่เข้าที่เป็นไปได้คือ

$$\frac{2|F(x^{(q+1)}) - F(x^{(q)})|}{|F(x^{(q+1)})| + |F(x^{(q)})| + 10^{-10}} \leq \varepsilon_R \quad (3-14)$$

เมื่อ ε_R เป็นค่า specified fractional change

3.1.6.2.3 เงื่อนไขของ Kuhn-Tucker จากการหาค่าต่ำที่สุดแบบมีเงื่อนไข (constrained minimization) เงื่อนไขถูกกำหนดโดยอยู่ในส่วน 3.1.3 ในกรณีของการหาค่าต่ำที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไข (unconstraint minimization) ในการต้องการกราฟิเดียนของ $F(x)$ ซึ่งตรวจได้จากส่วนของ $\nabla F(x^{(q)})$ ที่มีขนาดเล็กเพียงพอกับศูนย์ คือ $\varepsilon_R = 1.00E - 04$

3.2 Gradient Evaluations

Gradient Evaluations เป็นหัวข้อสำคัญในขบวนการปฏิบัติของการอ็อปทิไมเซชันเชิงตัวเลข (numerical optimization) ของการประมาณค่าของ derivatives จากฟังก์ชันอย่างง่ายที่ทำได้โดยการวิเคราะห์ (Calculate analytically) และสามารถทำได้โดยใช้กราดิเียนหรือ Hessian Evaluations โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical method) อย่างไรก็ตามบางฟังก์ชันนั้นมีความยากในการวิเคราะห์หรือความลำบากมากในการคำนวณ เพื่อความสะดวกในการหาค่าตอบจะใช้วิธี finite difference ในการหาค่าตอบโดยประมาณของอนุพันธ์ (derivative) ปัญหาส่วนใหญ่ในการปฏิบัติในการวิศวกรรมส่วนมากจะเป็น implicit model for function evaluation จากตัวอย่างของฟังก์ชันนี้อาจจะได้มาจากการหาค่าตอบทางการวิเคราะห์เชิงตัวเลขซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ของแบบจำลองระบบ electromagnetic โดยวิธี finite element

3.2.1 Finite Difference Approximations

คำตอบจากการวิเคราะห์ที่ใช้ในการอ็อปทิไมเซชันเสมอ ๆ นั้นมาจากอนุกรมของเทย์เลอร์ ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวมีความสำคัญเพราะเป็นการแสดงลักษณะของอนุพันธ์ (derivative) ที่จุด ๆ หนึ่งของฟังก์ชัน จากการประมาณค่าของฟังก์ชันสามารถคำนวณทุกจุดที่อยู่กึ่งกลางของจุดขอบเขตได้ในรูปที่ (3-7) เป็นฟังก์ชัน 1 ตัวแปรอย่างง่าย ๆ ซึ่งใช้ออนุกรมของเทย์เลอร์ที่รอบจุด x_0 เขียนอธิบายได้ดังนี้

$$F(x_0 + h) = F(x_0) + hF'(x_0) + (1/2)h^2F''(x_0) + \dots + (1/(r-1)!)h^{(r-1)}F^{(r-1)}(x_0) + Oh^{(r)} \quad (3-15)$$

สมมุติให้ $|F^{(r)}(x_0)|$ อยู่ในช่วง $[x_0, x_0 + h]$ ในการคำนวณเพื่อนำมาใช้ เราสนใจใน 3 พจน์แรกของสมการเท่านั้น

$$F(x_0 + h) = F(x_0) + hF'(x_0) + (1/2)h^2F''(x_0) + Oh^{(3)} \quad (3-16)$$

การหาค่าตอบของ $F'(x)$ และไม่คิดถึงพจน์อันดับสูงกว่า เราจะได้

$$F'(x_0) = \frac{F(x_0 + h) - F(x_0)}{h} + O(h) \quad (3-17)$$

ซึ่งพจน์อันดับคือ $(1/2)hF''(\xi), x_0 \leq \xi \leq x_0 + h$ เป็นการประมาณค่าของ derivatives ซึ่งเป็นแบบไปข้างหน้า (forward) และค่า $(1/2)hF''(\xi)$ เป็นพจน์ที่จะละได้ของสมการ Taylor

ถ้าสมมติให้สมการเป็นย้อนกลับ (backward) ที่จุด $x_0 - h$ นั้น เราจะได้

$$F(x_0 - h) = F(x_0) - hF'(x_0) + (1/2)h^2 F''(x_0) - 0h^3 \quad (3-18)$$

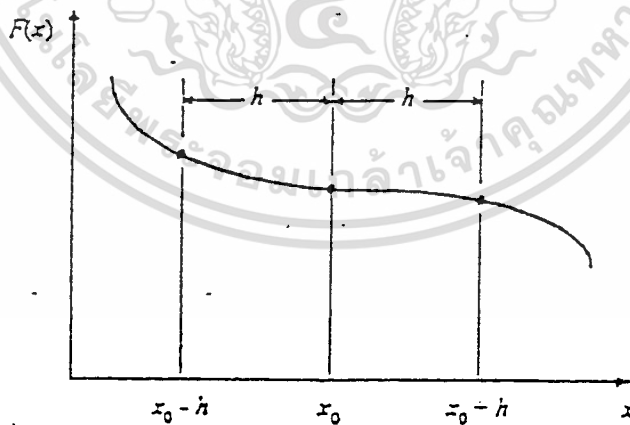
การกระจายสมการนี้เป็นการประมาณค่าแบบ backward difference

$$F'(x_0) = \frac{F(x_0) - F(x_0 - h)}{h} + 0(h) \quad (3-19)$$

นำสมการ (3-18) ลบกับสมการ (3-16) แล้วจัดสมการใหม่เพื่อหา $F'(x_0)$ เราจะได้

$$F'(x_0) = \frac{F(x_0 + h) - F(x_0 - h)}{2h} + 0(h^2) \quad (3-20)$$

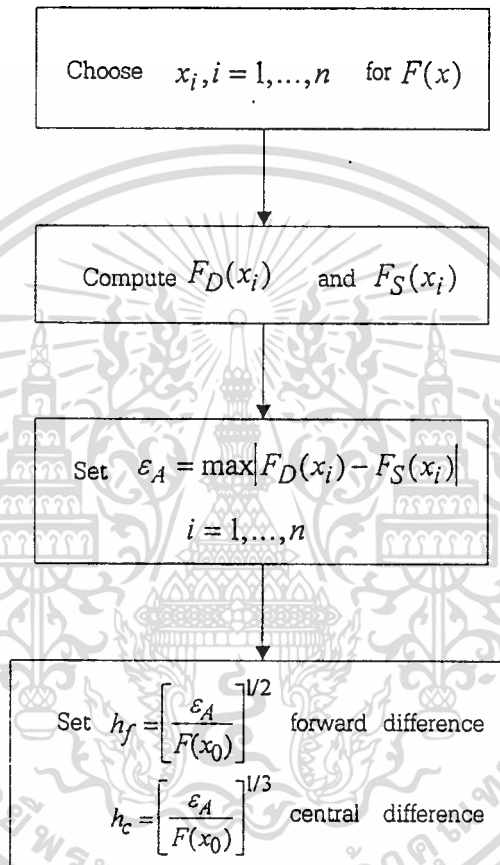
ที่ซึ่งพจน์หลังเป็น $(1/6)h^2 F'''(\xi)$ นี้จึงเรียกว่า การประมาณแบบ central difference



รูปที่ 3-7 Finite difference intervals

ในการคำนวณด้วย finite difference มีความผิดพลาดอื่น ๆ ที่อยู่ในการคำนวณหาค่าของฟังก์ชันของตัวเลข ความผิดนี้ปกติเรียกว่า "เงื่อนไขหรือการยกเลิกค่าผิดพลาด" ซึ่งเป็นคุณสมบัติโดยตรง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ $1/h$ โดยที่ค่าผิดพลาดทั้งหมดนั้นเราจะประมาณให้อยู่ในรูปของ 2 พจน์เท่านั้นคือ ค่าจริง (truncation) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ h และการยกเลิกค่าผิดพลาด (cancellation) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $1/h$ การคำนวณหาค่า h โดยใช้โปรแกรมตามรูป (3-8)



รูปที่ 3-8 อัลกอริทึมของการคำนวณหาค่าของ h

การแนะนำความถูกต้องของการประมาณ finite difference โดยการทดสอบฟังก์ชัน 2 สมการ โดยใช้การคำนวณวิเคราะห์และการประมาณค่าแบบ finite difference (GRAD-FD code) ฟังก์ชันแรก เรียกว่า Rosenbrock's function) และฟังก์ชันที่สองได้โดยการใช้ quadratic programming problem ซึ่งข้อมูลอยู่ส่วนที่ 3.4.2 และ 3.5.3 ทุกฟังก์ชันที่ใช้ทดสอบจะมีการกำหนดค่าของ x เป็น 3 ค่า ตารางที่ (3-1) และ (3-2) แสดงผลลัพธ์ของ first derivative ของทั้งสองฟังก์ชัน ค่าผิดพลาดของผลลัพธ์โดยการใช้ forward และ central derivative เหมาะสำหรับการนำมาใช้งานทีเดียว อย่างไรก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามค่าความผิดพลาดอาจแตกต่างกันเพราะว่าฟังก์ชันต่างกันและอาจมีค่าแตกต่างกันมากเพราะเป็นฟังก์ชันแบบ non-linear

3.3 การอ็อปทิไมเซชันโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบไม่มีเงื่อนไข

การอ็อปทิไมเซชัน โดยวิธีเชิงตัวเลขแบบไม่มีเงื่อนไข (unconstrained numerical) เป็นการใช้พื้นฐานของสูตรการวนซ้ำที่ใช้ในสมการ (3-5) อัลกอริทึมของการอ็อปทิไมเซชัน ส่วนมากจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสำคัญคือ การหาทิศทาง (search direction) และการกำหนดขนาดที่ขยับ (step size determination) สำหรับปัญหาของการอ็อปทิไมเซชัน ด้วยตัวแปรหลายตัวก็คือปัญหาในการหาทิศทางที่ใช้ในการแก้ปัญหาเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นจึงกำหนดขนาดที่จะกระโดด โดยการหาฟังก์ชันที่น้อยที่สุดตามทิศทางที่กำหนดในพื้นที่ที่ออกแบบ ซึ่งเรียกว่า การหาในหนึ่งมิติ (one-dimensional search)

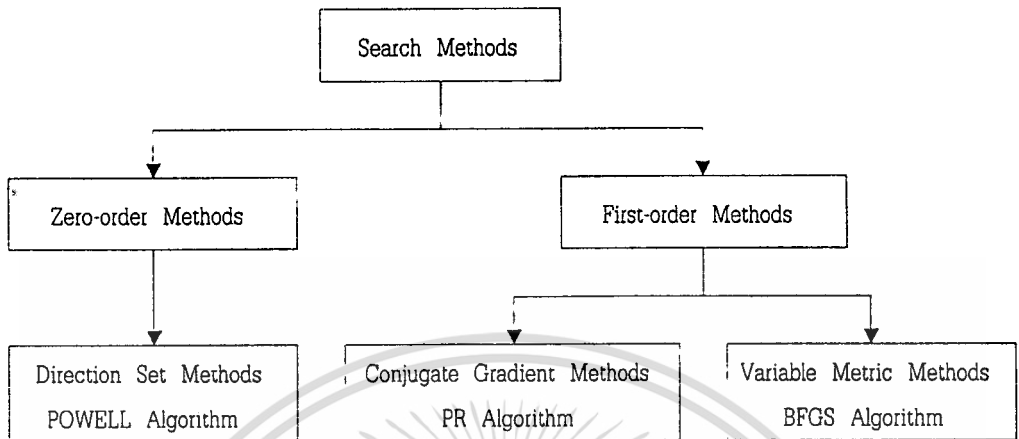
ในการเลือกทฤษฎีที่มีใช้ในการอ็อปทิไมเซชันอยู่บนพื้นฐานของคุณสมบัติของฟังก์ชันที่สนใจหรือฟังก์ชันหลัก (objective function) และฟังก์ชันเงื่อนไข (constraint function) ยิ่งไปกว่านั้นทฤษฎีจะเปลี่ยนไปขึ้นกับวิธีการใช้ในการแก้ปัญหา เช่น อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first derivative) ซึ่งการใช้อนุพันธ์จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการหาค่าโดยใช้ฟังก์ชันทั่วไป ถ้าหากการใช้อนุพันธ์ไม่สามารถนำมาใช้ได้ ทฤษฎีที่ไม่ใช้อนุพันธ์ (non-derivative method) จะต้องถูกนำมาใช้ แต่ควรระวังถึงกระบวนการที่ยุ่งยากจะเพิ่มขึ้นและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ลดลงจากการที่ไม่ได้ใช้วิธีการอนุพันธ์

3.3.1 การกำหนดวิธีหาทิศทางและขนาดของการขยับ (Step)

การหาทิศทางสามารถจะหาโดยใช้อนุพันธ์หรือไม่ใช้อนุพันธ์ก็ได้ ดังแสดงในรูป (3-9) ซึ่งการใช้อนุพันธ์สามารถแบ่งได้เป็นอีก 2 วิธี โดย 2 วิธีที่จำเป็นต้องการวิธีหาค่าน้อยที่สุดใน 1 มิติ (one-dimension minimization subproblem)

วิธีแรกนี้เรียกว่า conjugate gradient methods ซึ่งมีแบบอย่างมาจากอัลกอริทึม "Fletcher-Reeves" และอัลกอริทึม "Polak-ribiere"

วิธีที่สองเรียกว่า variable metric หรือ quasi-Newton method ซึ่งมีแบบอย่างมาจากอัลกอริทึม "Davidon-Fletcher-Powell (DFP)" และ Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)" เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-9 ประเภทของ search methods

3.3.1.1 ทฤษฎีการจัดทิศทาง (Direction Set Methods)

ทฤษฎีนี้เริ่มต้นด้วยการกำหนดเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) e_1, e_2, \dots, e_N ซึ่งเป็นเวกเตอร์ทิศทาง การใช้ทฤษฎี Golden Section Search จะเคลื่อนที่ไปตามเวกเตอร์ทิศทางแรกที่กำหนดไปสู่ค่าน้อยที่สุดของทิศทางนั้น หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่สองเพื่อไปสู่ค่าน้อยที่สุดของทิศทางที่สองนั้น และจะเป็นลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ ขบวนการนี้จะวนซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่าของฟังก์ชันไม่สามารถลดค่าลงได้อีก ซึ่งเทคนิคนี้จะเห็นว่าเป็นต้องกำหนดทิศทางเริ่มต้นให้ดี โพลเวลล์ค้นพบทฤษฎีในการจัดทิศทาง ซึ่งเป็นพื้นฐานของ conjugate direction โดยที่ทิศทาง d' และ d'' เป็นคอนจูเกต (conjugate) กัน ถ้า

$$(d')^T S d'' = 0 \quad (3-21)$$

ซึ่ง S เป็นเมตริกซ์เอกลักษณะที่เริ่มต้นและ d' โดยที่ $i = 1, \dots, n$ เป็นทิศทางร่วม (coordinate direction)

3.3.1.2 ทฤษฎี Conjugate Gradient Method

ทฤษฎี conjugate gradient method พัฒนามาจากทฤษฎี steepest descent ซึ่ง 2 ส่วนที่สำคัญที่สุดของคอนจูเกต คือ ทฤษฎี Fletcher-Reeves และทฤษฎี Polak-Ribiere ทฤษฎีการหาทิศทางนั้นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องเก็บไว้จากการหาค่าต่ำที่สุดใน 1 มิติ และต้องการฟังก์ชันที่ใช้ในการหาค่าจำนวนมาก การใช้กราเดียนจะช่วยให้อายุข้อมูลใหม่ ๆ ที่มีประโยชน์สำคัญการกำหนดการจัดหาทิศทางและขนาดการขยับในกระบวนการทำซ้ำ

$$d^{(q)} = -\nabla F(x^{(q)}) + \beta_q d^{(q-1)} \quad (3-22)$$

$$\beta_q = \frac{|\nabla F(x^{(q)})|^2}{|\nabla F(x^{(q-1)})|^2} \quad (3-23)$$

3.3.1.3 ทฤษฎี Variable Metric Methods

ทฤษฎี variable metric methods บางทีอาจเรียกว่า quasi-newton method โดยไม่แตกต่างไปจากกราเดียนคอนจูเกต (conjugate gradient) แทนที่ข้อมูลจะอยู่ในรูป single scalar ข้อมูลจะถูกเก็บในรูปอะเรย์ n มิติ การหาทิศทางที่ลำดับ q ของการวนซ้ำจะได้เป็น

$$C^{(q)} = \nabla F(x^{(q)}) \quad (3-24)$$

$$H^{(q)} d^{(q)} = -C^{(q)} \quad (3-25)$$

ซึ่ง H คือการประมาณสำหรับ Hessian matrix ของฟังก์ชันที่เราสนใจระหว่างกระบวนการออปติไมเซชัน ซึ่งสามารถสร้างได้จากการใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่งเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีเหล่านี้จะมีลักษณะการลู่เข้าเหมือนกับอนุพันธ์อันดับสอง (second order) ที่จุดเริ่มต้นเมตริกซ์ H จะถูกกำหนดเป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ $H = I$ หลังจากนั้นในการวนซ้ำที่ q ค่า H ใหม่จะได้ว่า

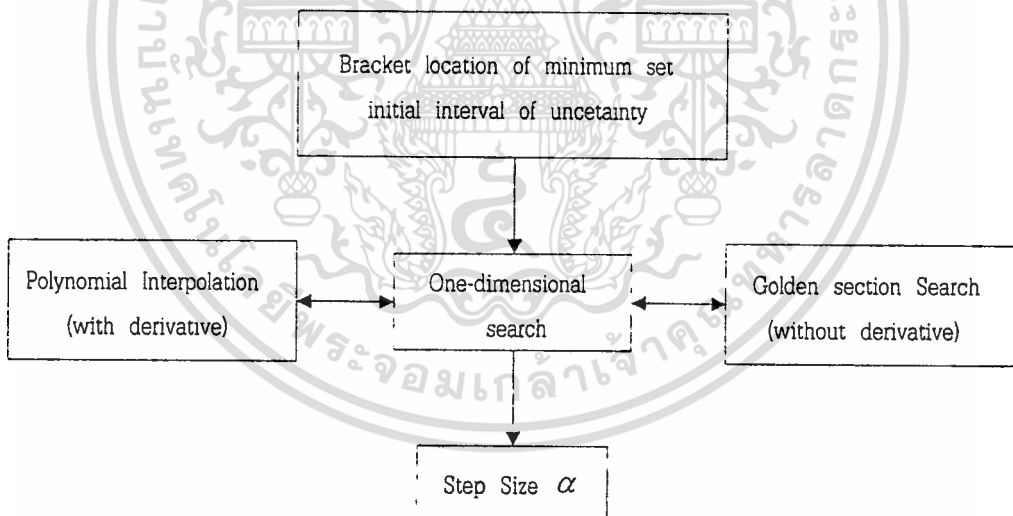
$$H^{(q-1)} = H^{(q)} + D^{(q)} + E^{(q)} \quad (3-26)$$

ซึ่ง D และ E เป็นเมตริกซ์ symmetric correction มี 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการเปลี่ยนเมตริกซ์คือ Davidon-Powell (DFP code) และ Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno ซึ่งทฤษฎีทั้งสองแตกต่างกันในรายละเอียดเท่านั้น เช่น ค่า round-off error และ convergence tolerances

ขบวนการเบื้องต้นของการหาขนาดการขยับ โดยอาศัยอัลกอริทึม ในรูปที่ (3-10) ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน

ขั้นตอนแรกจะแบ่งขอบเขตของเส้นทางเริ่มต้นในการหาจุดต่ำสุด

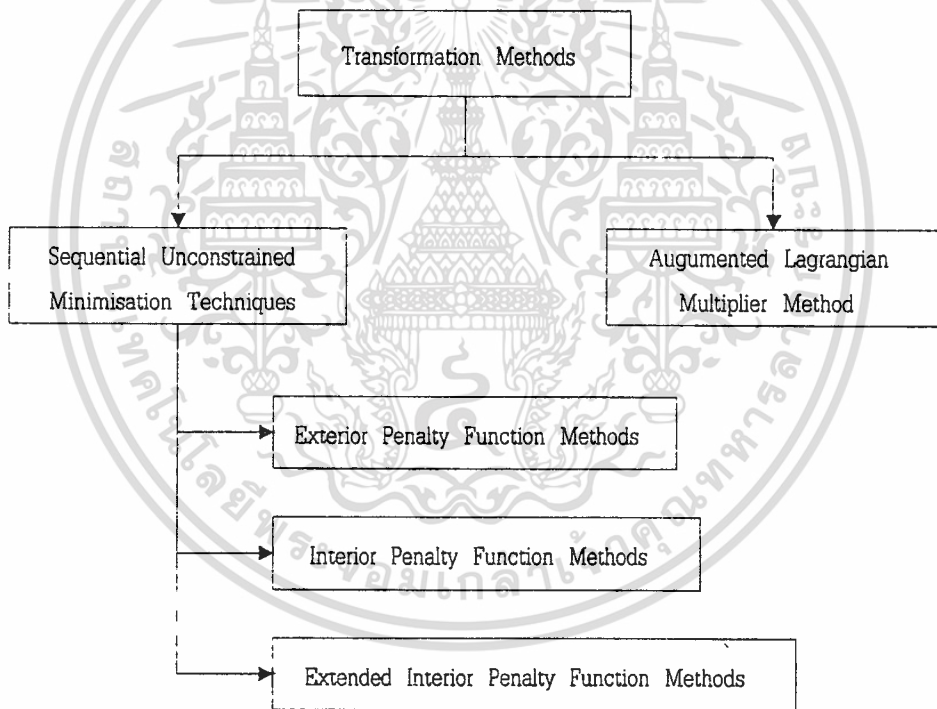
ขั้นตอนที่สอง ในเส้นทางที่กำหนดจะถูกปรับโดยการตัดพื้นที่ในส่วนที่ไม่ได้ให้ค่าต่ำสุดออก ในที่สุดก็จะได้ขนาดการขยับที่เหมาะสม สิ่งที่น่าสนใจก็คือ วิธี Golden Section เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับ Non-derivative แต่วิธีนี้ต้องการฟังก์ชันเป็นจำนวนมากในการคำนวณ ซึ่งวิธีนี้จะไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติของการออกแบบ แต่หาวิธี polynomial interpolation จะมีประสิทธิภาพดีกว่า



รูปที่ 3-10 Step size determination algorithm

3.4 วิธีการเปลี่ยนรูป

ในส่วนนี้จะ เป็นเทคนิคในการแก้ค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้ได้ผลดีที่สุด ซึ่งจะใช้วิธีการเปลี่ยนรูปโดยปรับปรุงค่าและฟังก์ชันที่เป็นจุดเริ่มต้นของปัญหาซึ่งสามารถแก้ปัญหานั้นไม่จำเป็นต้อง โดยพื้นฐานเพื่อที่จะสร้างฟังก์ชันเทียม (Pseudo function) และฟังก์ชันเงื่อนไข วิธีการเปลี่ยนรูปสามารถแยกออกเป็น 2 ชนิด ซึ่งแสดงในรูปที่ (3-11) วิธีแรกเกี่ยวกับวิธีการภายนอก (penalty) และภายใน (barrier) ซึ่งอ้างถึง Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT) อย่างที่ 2 คือ การปรับปรุงฟังก์ชัน Lagrangian ที่เรียกว่า วิธีการ Augmented Lagrangian Multiplier Method (ALMM)



รูปที่ 3-11 ประเภทของวิธีการเปลี่ยนรูป

จากสมการ (3-1) ถึง (3-4) วิธีการเปลี่ยนแปลงรูปฟังก์ชันเหล่านี้เข้ากับปัญหาที่ไม่จำเป็นสำหรับฟังก์ชันเทียม จะได้ว่า

$$\phi(x, r) = F(x) + P[h(x), g(x)] \quad (3-28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่ r คือเวกเตอร์ทั่วไปของตัวแปรควบคุม และ $P[h(x), g(x)]$ คือ ค่าฟังก์ชันจริง ซึ่งแปรตามค่า r รูปแบบ P ขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ ฟังก์ชัน $\phi(x, r)$ เป็นค่าของฟังก์ชันที่ไม่มีเงื่อนไขที่มีค่าต่ำสุด โดยการเก็บค่า r ในระหว่างที่ทำซ้ำแต่ละครั้ง ค่าพารามิเตอร์ r จะถูกเปลี่ยนใหม่และกระบวนการจะถูกทำซ้ำจนกระทั่งไม่สามารถปรับปรุงค่าได้อีกแล้ว สำหรับค่า P และ r ที่เหมาะสมควรใช้วิธีแบบไม่มีเงื่อนไขเพื่อแก้ปัญหา

3.4.1 Sequential Unconstrained Minimization Techniques

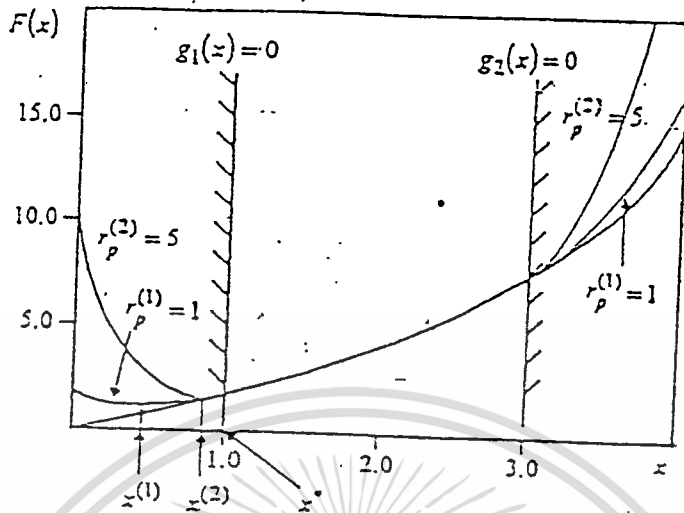
วิธีการเหล่านี้ถูกพัฒนาและอธิบายรายละเอียดโดยเพียตโกและแมคคอนิค(1968) วิธีลำดับค่าจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ลักษณะคุณสมบัติของการรักษาเงื่อนไขทั้งหมดที่เป็นไปได้ จากการออกแบบค่าที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีที่ดีกว่า ถ้าตัดสินใจใช้ Penalty เพราะถ้าหากว่ามันไม่รวมกัน มันยังคงออกแบบค่าที่เป็นไปได้ ในส่วนที่ 2 ใช้ลำดับค่าที่เป็นไปไม่ได้และเป็นไปได้ที่มีค่าเหมาะสมเท่านั้น มันอ้างถึงวิธีการฟังก์ชัน exterior penalty หรือ penalty เพื่อให้ได้ลักษณะวิธีการภายนอกและภายในที่ดีที่สุด

3.4.1.1 วิธีการ Exterior Penalty Function

วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดที่จะรวมเอากระบวนการที่เหมาะสมเข้าไว้ด้วยกัน เพราะมันจะบังคับแค่ฟังก์ชันเทียมเท่านั้น การปฏิบัติได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ควบคุมค่า equality และ inequality ดังนี้

$$P[h(x), g(x), r_p] = r_p \left\{ \sum_{k=1}^l [\max\{0, g_k(x)\}]^2 + \sum_{j=1}^m [h_j(x)]^2 \right\} \quad (3-29)$$

จากสมการ (3-29) ฟังก์ชัน penalty ไม่ถูกบังคับถ้าเงื่อนไขทั้งหมดเป็นที่น่าพอใจ พารามิเตอร์ r_p เป็นค่าเริ่มต้นที่มีค่าน้อย ($r_p = 1$) และจะถูกเปลี่ยนค่าโดยแฟคเตอร์ตัวคูณ γ ($\gamma > 1$) รูปที่ (3-12) และ (3-13) แสดงตัวอย่างเพื่อสาธิตเทคนิคให้ดู มันมีค่าต่ำสุดที่ดีและง่ายในการใช้โพลีโนเมียล แต่ค่าที่เหมาะสมคือ ค่าภายนอกขอบเขตที่น่าเป็นไปได้ สังเกตได้ว่า เมื่อ r_p มีค่าเพิ่มขึ้น ฟังก์ชันจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้น เพราะการออกแบบค่าที่เหมาะสมจากช่วงที่เป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงไม่มีประโยชน์ เพราะถ้ากระบวนการหยุดก่อนถึงเวลาอันควร การออกแบบก็ไม่สามารถใช้ได้ อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้สามารถเริ่มกระบวนการด้วยการออกแบบค่าดั้งเดิมที่เป็นไปไม่ได้



รูปที่ 3-12 ภาพประกอบของวิธีการฟังก์ชัน exterior penalty ได้นำมาใช้หาค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ 1 ตัวแปรที่ถูกจำกัดโดย 2 เงื่อนไขของการไม่เท่ากัน

3.4.1.2 วิธีการ Interior Penalty Function

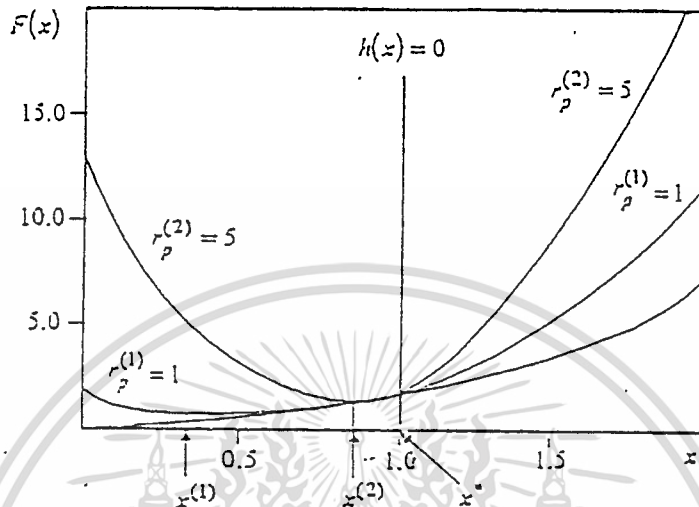
วิธีการนี้จะออกแบบเพื่อปรับปรุงค่าที่เป็นไปได้ โดยการเลือกรูปแบบที่แตกต่างกันของฟังก์ชัน Penalty ประยุกต์เข้ากับเงื่อนไขของการไม่เท่ากัน และเก็บค่าของเงื่อนไขของการเท่ากัน ก่อนพารามิเตอร์ Penalty จะถูกลดลงแทนที่จะเพิ่มขึ้นระหว่างกระบวนการ วิธีนี้ไม่เหมาะสมกับค่าของเงื่อนไขของการเท่ากัน เพราะไม่มีทางแน่ใจว่า เป็นที่น่าพอใจของเงื่อนไขของการเท่ากันหรือไม่

$$P[h(x), g(x), r_p'] = r_p' \sum_{k=1}^l [-1/g_k(x)] \quad (3-30)$$

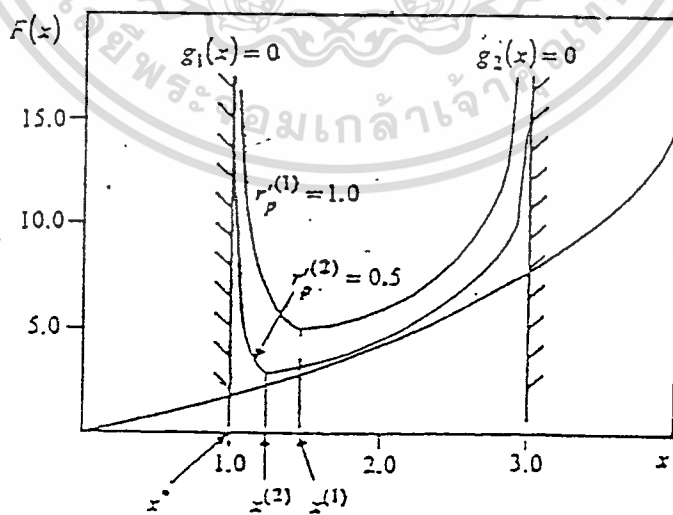
$$P[h(x), g(x), r_p'] = r_p' \sum_{k=1}^l -\log[-g_k(x)] \quad (3-31)$$

ในกรณีนี้ r_p' เริ่มต้นมีค่าบวกมากและลดลงมา r_p' ถูกคูณโดย $\gamma'(\gamma' = 1)$ สังเกตได้ว่าสมการ (3-29) สามารถนำมาใช้เมื่อ $g_k(x)$ มีค่าบวกหรือลบค่าใดค่าหนึ่ง แต่สมการที่ (3-31) สามารถนำมาใช้เมื่อ $g_k(x)$ เป็นลบเท่านั้น แต่อัลกอริทึมนี้ไม่สามารถใช้ได้กับวิธีเชิงตัวเลขที่ยาก ๆ เมื่อ $g_k(x) \rightarrow 0$ เพราะค่า Penalty จะเข้าใกล้อนันต์ ดังแสดงในรูปที่ (3-14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-13 ภาพประกอบของวิธีฟังก์ชัน exterior penalty ได้นำมาใช้หาค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ 1 ตัวแปรที่ถูกจำกัดโดย Single equality constraints



รูปที่ 3-14 Illustration of the interior penalty function methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1.3 วิธีการ Extended Interior Penalty

เทคนิคเหล่านี้สามารถนำไปใช้ร่วมกับวิธีการภายในและภายนอกได้ดีที่สุด ในส่วนนี้จะนำเสนอเทคนิค 2 อย่างที่ใช้ได้ดี ฟังก์ชัน penalty สำหรับเงื่อนไขของการเท่ากันก็ยังคงเหมือนก่อน รูปแบบของ penalty ของเงื่อนไขของการไม่เท่ากันเท่านั้น จะแตกต่างออกไปดังนี้

3.4.1.3.1 ฟังก์ชันเชิงเส้น Extended Penalty

$$P[h(x), g(x), r_p, r'_p] = r'_p \sum_{k=1}^l \bar{g}_k(x) + r_p \sum_{j=1}^l [h_j(x)]^2 \quad (3-32)$$

$$\bar{g}_k(x) = [-1/g_k(x)] \quad \text{ถ้า} \quad g_k(x) \leq \varepsilon_e \quad (3-33)$$

$$\bar{g}_k(x) = -[2\varepsilon - g_k(x)]/\varepsilon_e^2 \quad \text{ถ้า} \quad \bar{g}_k(x) = [-1/g_k(x)] \quad \text{ถ้า} \quad g_k(x) \leq \varepsilon_e \quad (3-34)$$

$$\varepsilon_e = -c_e(r'_p)^a \quad 1/3 \leq a_e \leq 1/2 \quad (3-35)$$

เมื่อ ε_e คือค่าลบน้อย ๆ ซึ่งเปลี่ยนค่าจาก interior penalty เป็น extended penalty และ คือค่า c_e คงที่

3.4.1.3.2 ฟังก์ชัน Quadratic Extended Penalty

$$\bar{g}_k(x) = [-1/g_k(x)] \quad \text{ถ้า} \quad g_k(x) \leq \varepsilon_e \quad (3-36)$$

$$\bar{g}_k(x) = -1/\left\{[g_k(x)/\varepsilon_e]^2 - 3[g_k(x)/\varepsilon_e] + 3\right\} \quad \text{ถ้า} \quad g_k(x) > \varepsilon_e \quad (3-37)$$

ฟังก์ชันเชิงเส้น extended penalty มีค่าต่อเนื่องและต่อเนื่องในอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ที่ $g_k(x) = \varepsilon_e$ อย่างไรก็ตามถ้าเป็นอนุพันธ์อันดับสองจะไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นถ้าประมาณค่าโดยวิธีอนุพันธ์อันดับสอง ซึ่งใช้กับวิธีการหาค่าต่ำสุดแบบไม่มีเงื่อนไข ควรใช้วิธีการฟังก์ชัน quadratic penalty เทคนิคนี้ได้เคยนำมาใช้ในการออกแบบหาค่าต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า

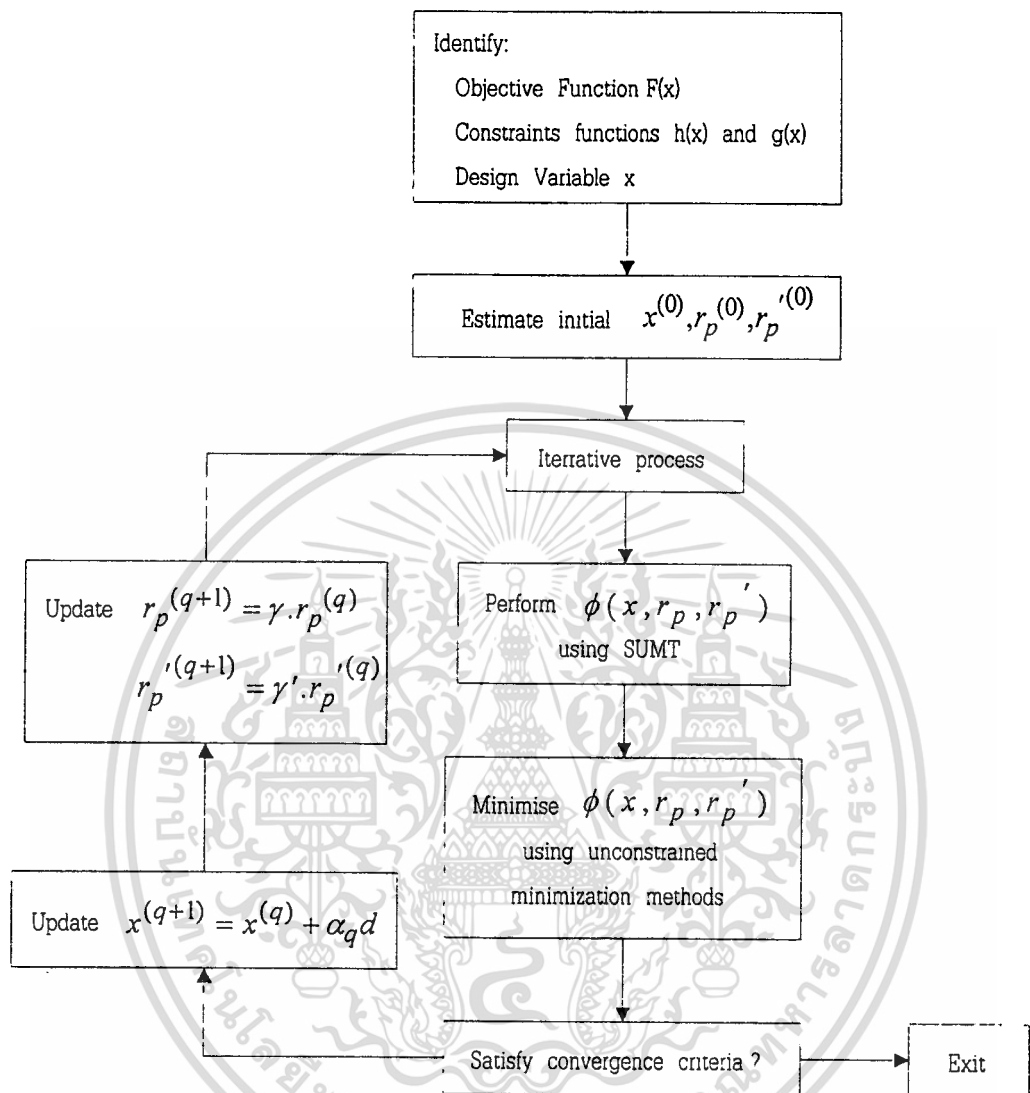
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1.4 การปฏิบัติโดยทั่วไปสำหรับ SUMT

การปฏิบัติทั่วไปสำหรับ SUMT ถูกอธิบายไว้ในรูปที่ (3-15) กระบวนการเริ่มต้นด้วยการประมาณค่าเดิม $x^{(0)}$ และ r ดังนั้น pseudo function $\phi(x, r)$ ได้ถูกพิสูจน์โดยใช้เทคนิคของ SUMT , $\phi(x, r)$ เป็นค่า unconstrained ที่ต่ำสุดและพารามิเตอร์ r เป็นค่าคงที่ที่เก็บไว้ระหว่างการทำซ้ำในแต่ละครั้ง ดังนั้นจึงถูกเปลี่ยนโดยตัวคูณที่ทำซ้ำครั้งต่อไป กระบวนการจะทำซ้ำจนกว่าค่าที่ได้จะเป็นค่าที่น่าพอใจ

การเลือกค่าพารามิเตอร์ r_p และ r'_p เป็นจุดสำคัญในกระบวนการอ็อปทิไมเซชันบางครั้ง ตัวเลือกของ $r_p^{(0)}$ และ $r'_p^{(0)}$ อาจจะทำให้กระบวนการเชิงตัวเลขเกิด overflow ดังนั้นจึงมีอุปสรรคบ้างในการใช้ SUMT ในทางปฏิบัติ แวนเดอเพลท(1994) ให้คำแนะนำว่า ค่าดั้งเดิมที่ใกล้เคียงคือ ตัวเลือกที่ดีสำหรับพารามิเตอร์ r_p สำหรับฟังก์ชัน interior penalty คาสซิสและเซอมีท(1976) สมมติค่าเดิมของ r'_p สามารถประมาณได้เป็น

$$r'_p{}^{(0)} = \frac{\beta \cdot F(x^{(0)})}{P(x^{(0)})}, \quad 0 < \beta < 1 \quad (3-38)$$



รูปที่ 3-15 General procedure for the sequential unconstrained minimization techniques

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

แผนผังของโปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสม

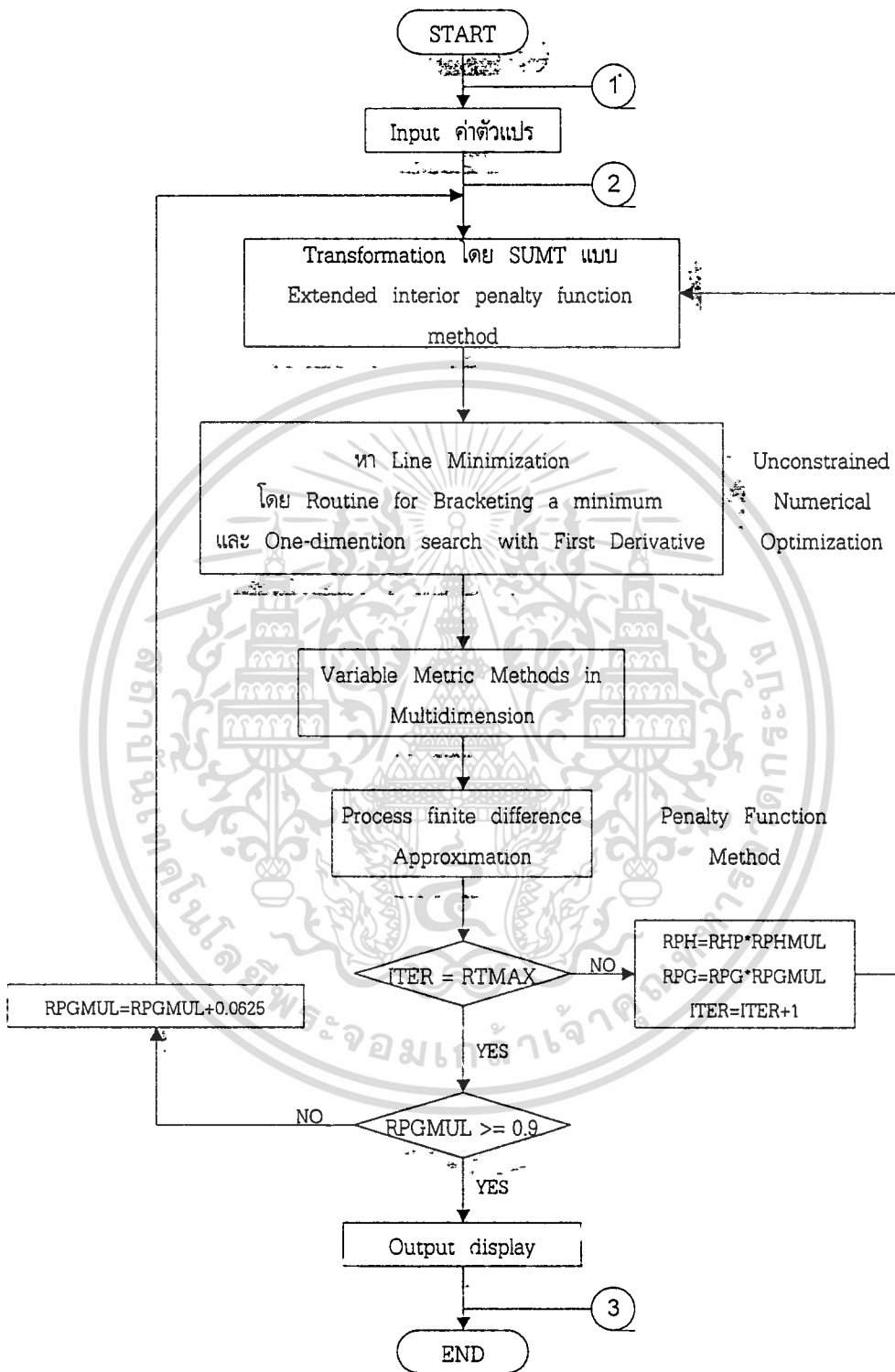
เป็นอัลกอริทึมของการหาที่เหมาะสม โดยประยุกต์ใช้กับฟังก์ชันทั้งที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นได้ โดยในบทนี้จะแสดงถึงแผนผังข้อมูลในแต่ละขั้นตอน เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงโปรแกรมการทำงานได้ง่าย

รูปที่ 4-1 แสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม โดยเริ่มจากการป้อนค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งแสดงอยู่ในรูป 4-2 เข้าผ่านทางจอภาพ หลังจากนั้นกลุ่มตัวแปรดังกล่าวจะเข้าสู่กระบวนการอ็อปทิมิเซชันทางเชิงตัวเลข (Numerical Optimization) เพื่อค้นหาจุดวิกฤติ แล้วตรวจสอบจุดดังกล่าวว่าเป็นคำตอบที่แท้จริงของฟังก์ชันหลักหรือไม่ ถ้ายังไม่ใช่คำตอบ กระบวนการจะย้อนกลับไปทำซ้ำจนกระทั่งได้จุดวิกฤติที่เป็นคำตอบที่แท้จริงของฟังก์ชันหลัก แล้วแสดงผลออกทางจอภาพ ซึ่งส่วนแสดงผลจะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 4-2

รูปที่ 4-3 แสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมของ Finite difference technique ซึ่งเป็นการหาค่าที่ต่ำที่สุดของ Line Minimization

รูปที่ 4-4 - 4-6 เป็นส่วนของตัวแปรเข้า (input)

รูปที่ 4-7 - 4-9 เป็นส่วนของตัวแปรออก (output) ที่แสดงค่าออกมา ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างเป็นการออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักเบาที่สุดขนาด

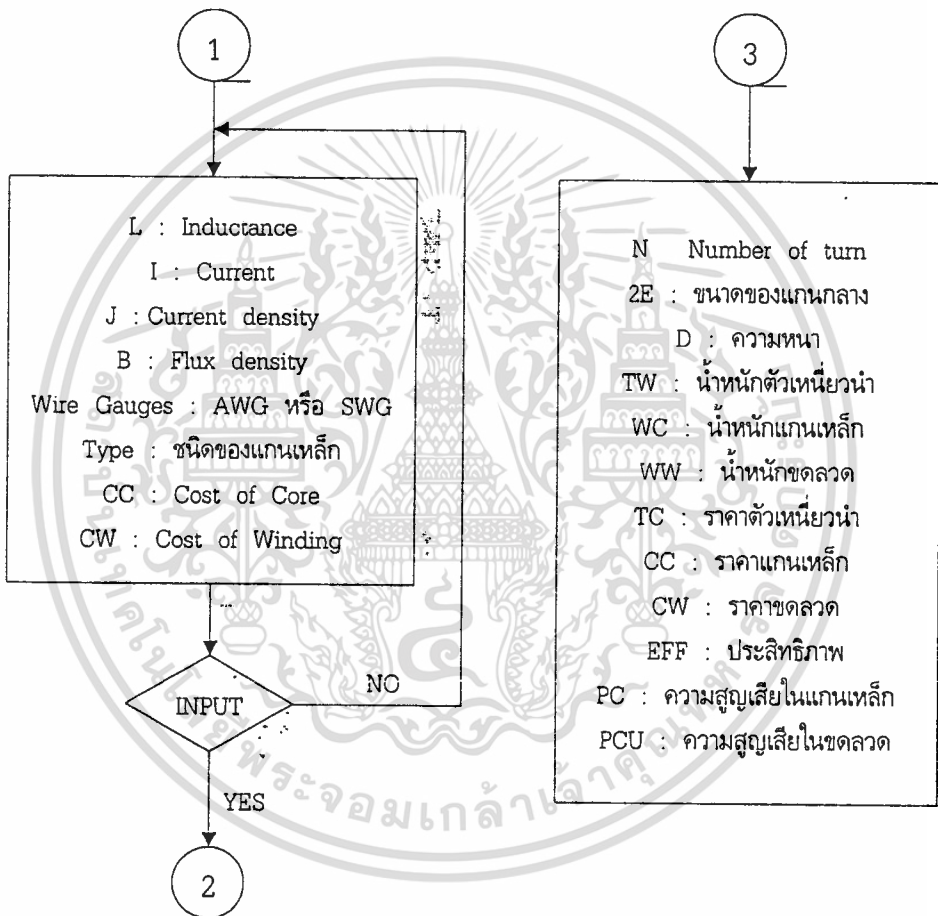


รูป 4-1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

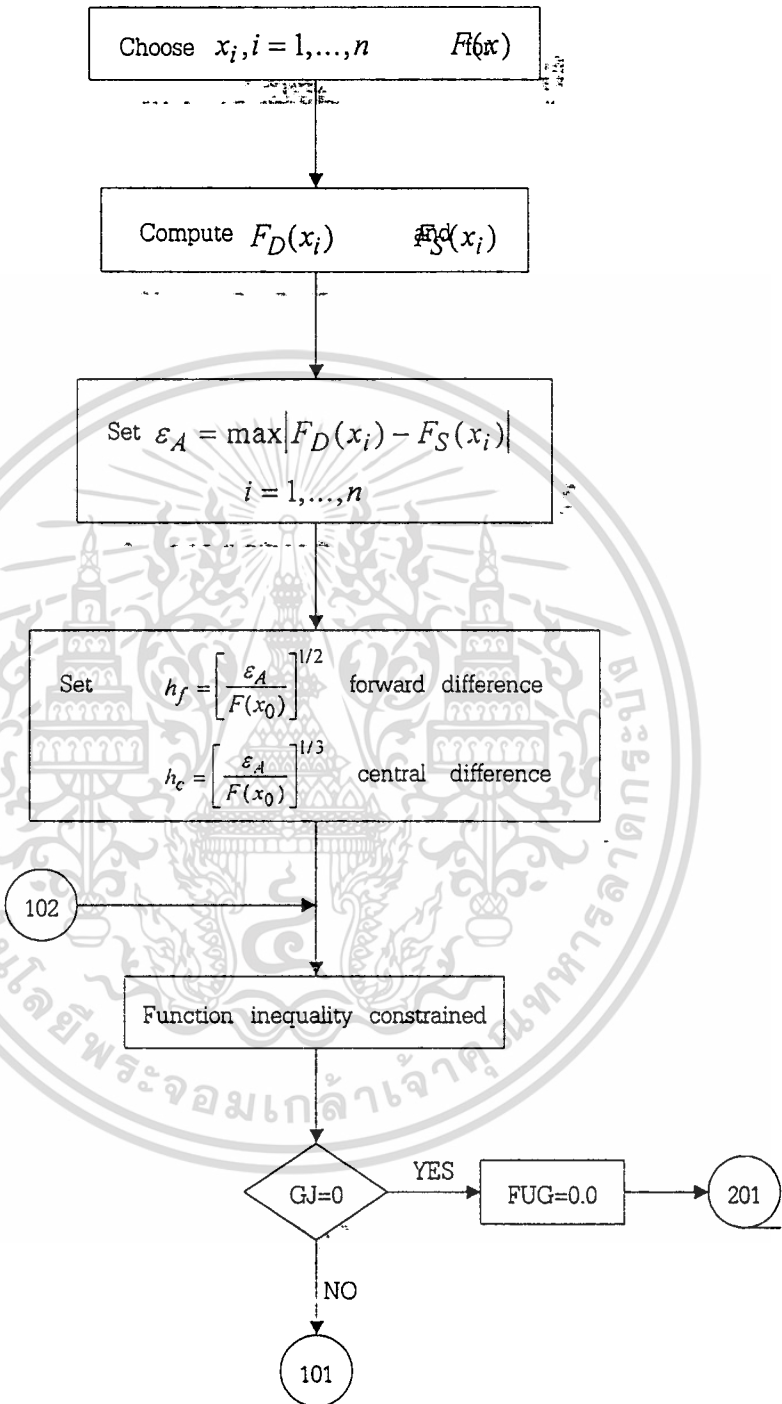
Input ป้อนค่าตัวแปร

Output แสดงผล



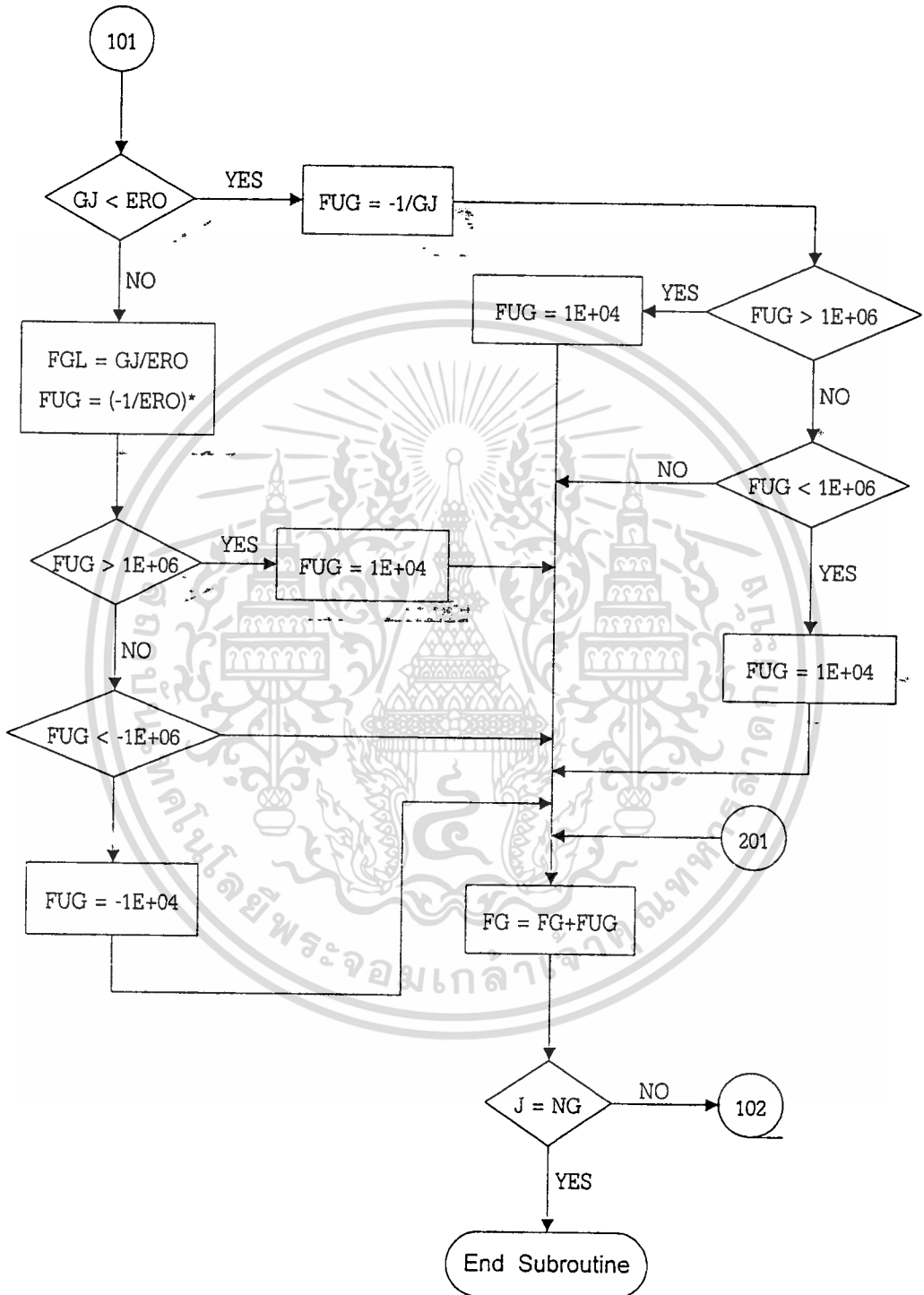
รูปที่ 4-2 แสดงส่วนป้อนค่าตัวแปร และส่วนแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



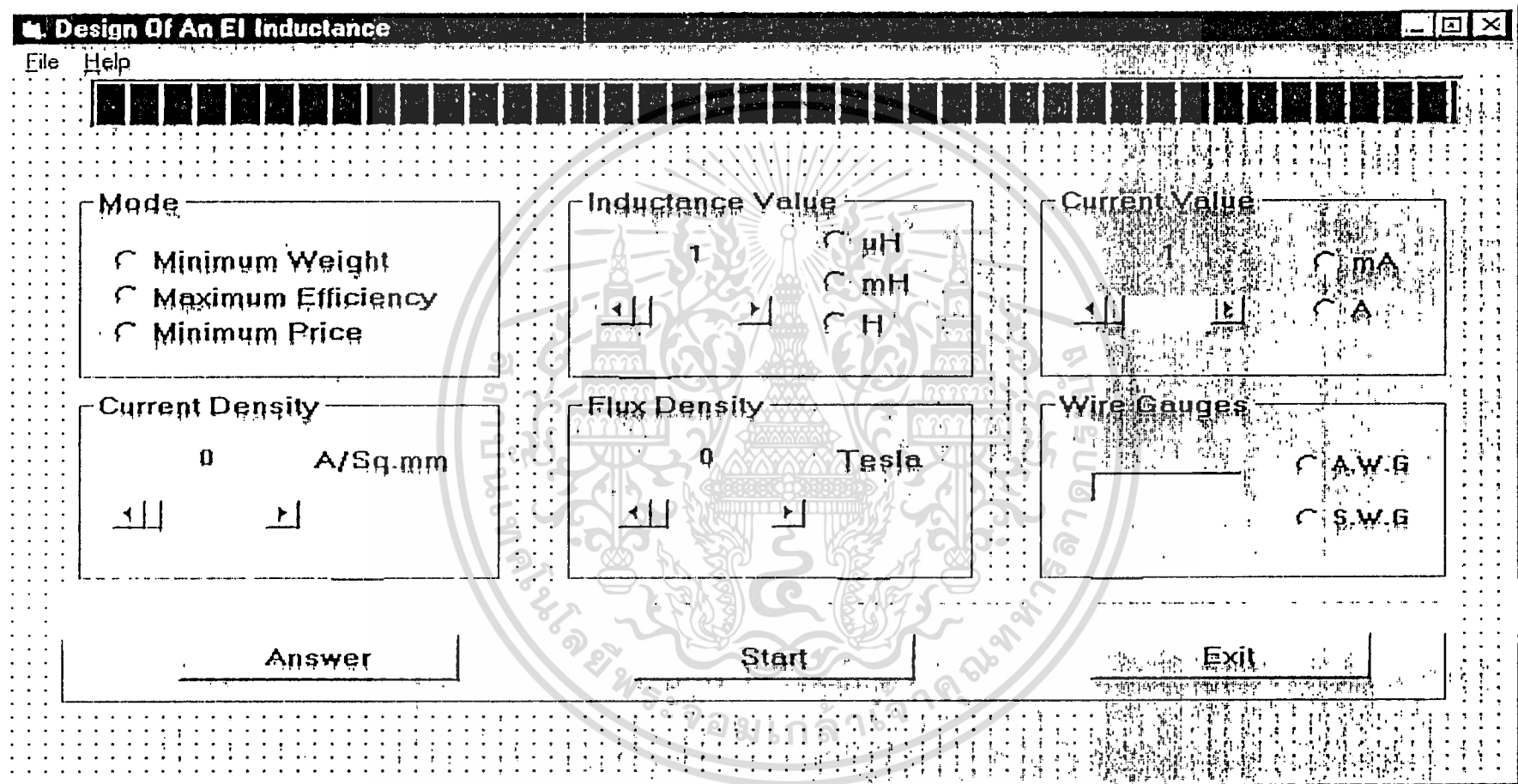
รูปที่ 4-3 แผนผังแสดงขั้นตอนของ finite element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

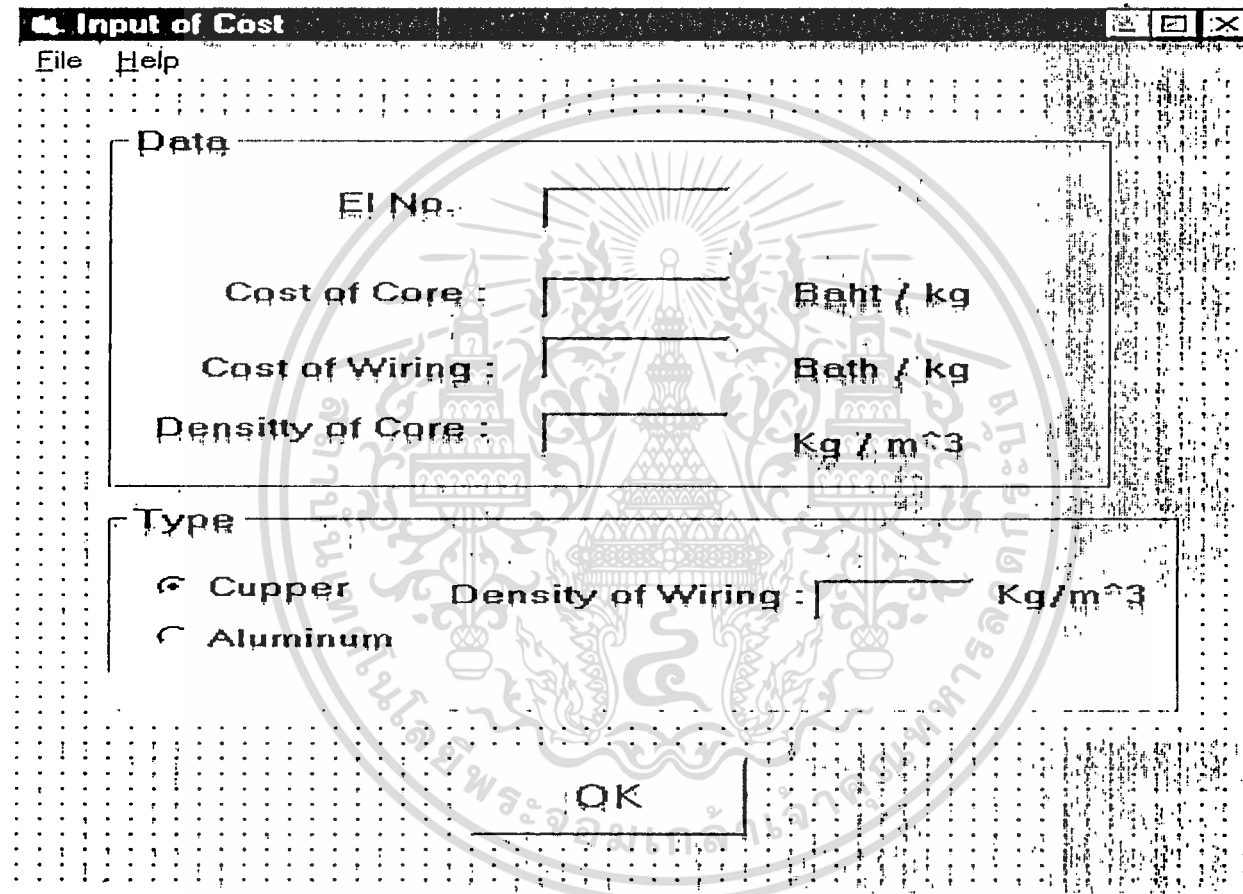


รูปที่ 4-3 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-4 แสดงภาพหน้าจอการเลือกรูปแบบทำงานและค่าตัวแปรป้อนเข้า



รูปที่ 4-5 แสดงภาพหน้าจอของตัวแปรป้อนเข้าของราคาของขดลวดและราคาของแกนเหล็ก

Answer Of Minimum Weight

General

Side of Core : inch . Thickness of Core: cm . Number of Wiring : turns

Weight

Total Weight : kg

Weight of Core : kg

Weight of Wiring : kg

Price

Total Price : Baht

Price of Core : Baht

Price of Wiring : Baht

Efficiency

Efficiency :

Core Loss : Watts

Copper Loss : Watts

RETURN TO MAIN

EXIT

PRINT

รูปที่ 4-7 ภาพหน้าจอของส่วนแสดงผลของโปรแกรมทำหมักเบ้าที่ดีที่สุด

General

Side of Core : inch Thickness of Core: cm Number of Wiring : turns

Price

Total Price : Baht

Price of Core : Baht

Price of Wiring : Baht

Weight

Total Weight : kg

Weight of Core : kg

Weight of Wiring : kg

Efficiency

Efficiency :

Core Loss : Watts

Copper Loss : Watts

RETURN TO MAIN

EXIT

PRINT

รูปที่ 4-8 ภาพหน้าจอของส่วนแสดงผลของโปรแกรมราคาถูกที่สุด

General

Side of Core : inch Thickness of Core: cm Number of Wiring : turns

Efficiency
 Efficiency :
 Core Loss : Watts
 Copper Loss : Watts

Weight
 Total Weight : kg
 Weight of Core : kg
 Weight of Wiring : kg

Price
 Total Price : Baht
 Price of Core : Baht
 Price of Wiring : Baht

RETURN TO MAIN

EXIT

PRINT

รูปที่ 4-9 ภาพหน้าจอของส่วนแสดงผลของโปรแกรมประสิทธิภาพสูงที่สุด

Design Of An EI Inductance

File Help

Mode <input checked="" type="radio"/> Minimum Weight <input type="radio"/> Maximum Efficiency <input type="radio"/> Minimum Price	Inductance Value 30 <input type="radio"/> μ H <input checked="" type="radio"/> mH <input type="radio"/> H	Current Value 15 <input type="radio"/> mA <input checked="" type="radio"/> A
Current Density 2 A/Sq.mm	Flux Density 1 Tesla	Wire Gauges <input type="radio"/> A.W.G <input checked="" type="radio"/> S.W.G
<input type="button" value="Start"/> <input type="button" value="Exit"/>		

รูปที่ 4-10 ภาพหน้าจอหลังจากป้อนค่าตัวแปร

Input of Cost

File Help

Data

EI No. : 21

Cost of Core : 43 Baht / kg

Cost of Wiring : 130 Baht / kg

Density of Core : 7836 Kg / m³

Type

Copper Density of Wiring : 0.07381 Kg/m³

Aluminum

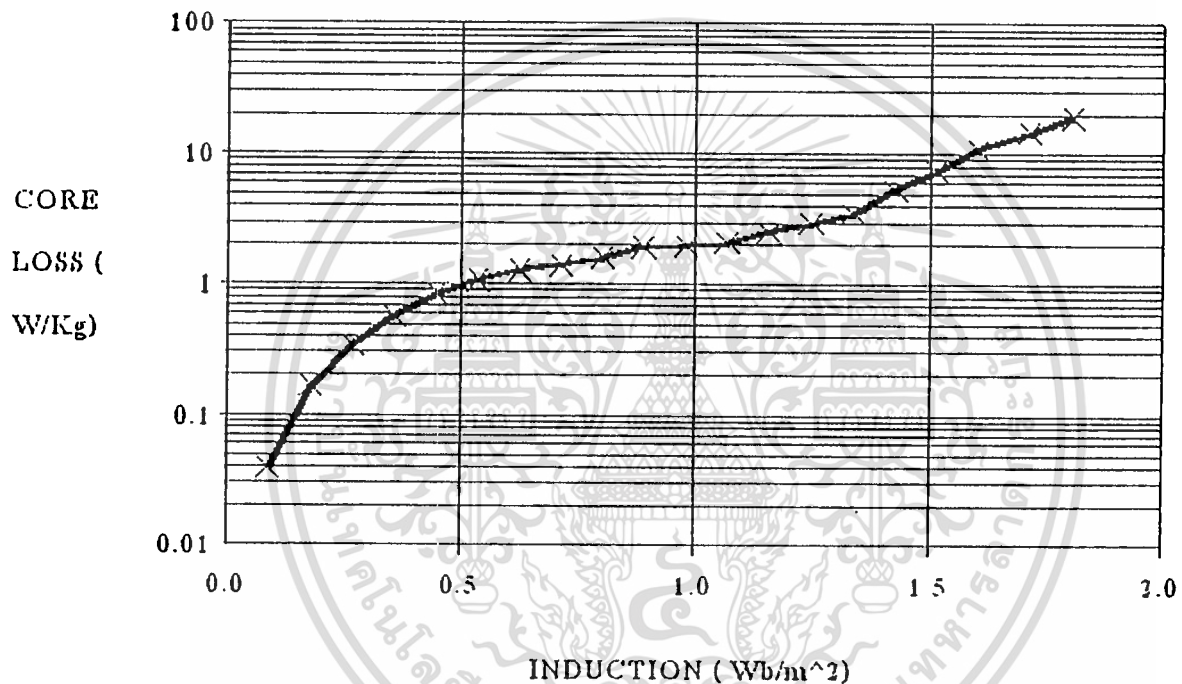
OK

รูปที่ 4-11 ภาพหน้าจอหลังจากป้อนราคาของแกนเหล็กและขดลวด

DATA OF CORE LOSS CURVE			
File Help		EJ NO. 23	
B(Tesla)	CL(W/ Kg)	B(Tesla)	CL(W / Kg)
0.0091	0.0396	0.9798	1.9962
0.1702	0.1675	1.069	2.1012
0.2673	0.3463	1.158	2.522
0.3563	0.5778	1.247	2.9945
0.4454	0.8603	1.336	3.5297
0.5345	1.084	1.425	5.415
0.6236	1.3	1.514	7.5588
0.7126	1.4009	1.603	11.12
0.8017	1.598	1.714	15.042
0.8908	1.9407	1.806	19.478
RETURN TO MAIN	CURVE	PRINT	EXIT

รูปที่ 4-12 ภาพหน้าจอหลังจากป้อนค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

CORE LOSS CURVE OF EI NO.23



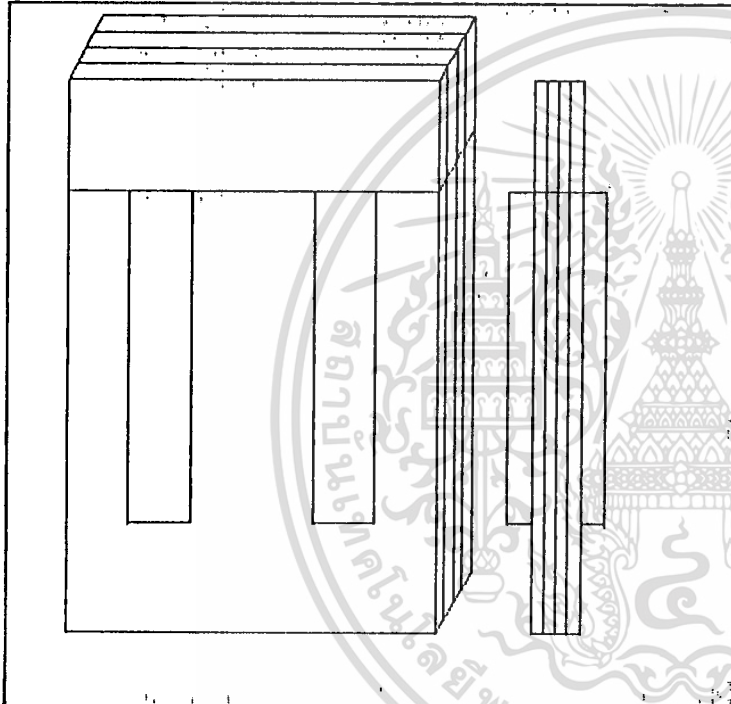
BACK

PRINT CORE LOSS CURVE

รูปที่ 4-13 กราฟความสูญเสียในแกนเหล็ก

General

Side of Core : inch . Thickness of Core : cm . Number of Wiring : turns



Weight

Total Weight : kg
 Weight of Core : kg
 Weight of Wiring : kg

Price

Total Price : Baht
 Price of Core : Baht
 Price of Wiring : Baht

Efficiency

Efficiency :
 Core Loss : Watts
 Copper Loss : Watts

รูปที่ 4-14 ภาพหน้าจอแสดงผล

บทที่ 5

ผลการทดสอบต้นแบบตัวเหนี่ยวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำต้นแบบของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากโปรแกรมอ็พทิไมเซชันของน้ำหนักเบาที่สุด หรือราคาถูกที่สุด หรือประสิทธิภาพสูงที่สุด ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ที่ได้ทำการปรับค่าเข้าสู่เกณฑ์มาตรฐานแล้วนำไปสร้างเพื่อทำการทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ กับผลที่ได้จากโปรแกรมอ็พทิไมเซชัน

1. การทดสอบหาความต้านทานของขดลวด
2. การทดสอบคุณสมบัติของแกนเหล็ก โดยทดสอบหา $B-H$ curve และกราฟความสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss curve)
3. การทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของต้นแบบตัวเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ที่ได้ทดสอบทั้งจากการวัดทางไฟฟ้าและการวัดโดย LCR meter

นอกจากนี้ยังแสดงการเปรียบเทียบการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI ที่ได้จากโปรแกรมอ็พทิไมเซชันกับการออกแบบด้วยวิธี Area Product ทั้งขนาดเล็ก และขนาดใหญ่

5.1 การเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากการทดสอบจริง

5.1.1 ค่าที่ได้ก่อนปรับเข้าสู่เกณฑ์มาตรฐาน

5.1.1.1 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดใหญ่

$$I = 15 \text{ A} , L = 30 \text{ mH} , B = 1 \text{ Tesla} , J = 2 \text{ A/mm}^2 ,$$

ราคาแกนเหล็ก = 43 บาท , ราคาขดลวด = 130 บาท , SWG : 10

ความสูญเสียในแกนเหล็กต่อกิโลกรัม = 3.2 WATTS / KG ,

ความต้านทานในขดลวด = 2.372 mΩ / m

ก. น้ำหนักเบาที่สุด (Minimum Weight)

ตาราง 5-1

คุณสมบัติ	ค่าที่คำนวณ	
2E	2.50614	นิ้ว
ความหนา	5.3820	ซม.
จำนวนรอบ	139	รอบ
น้ำหนักรวม	13.3568	กก.
น้ำหนักของแกนเหล็ก	9.74125	กก.
น้ำหนักของขดลวด	3.61557	กก.
ราคารวม	888.898	บาท
ราคาของแกนเหล็ก	418.874	บาท
ราคาของขดลวด	470.024	บาท
ความสูญเสียรวม	57.3185	วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	31.1720	วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	26.1465	วัตต์
ประสิทธิภาพ	97.29	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ราคาถูกที่สุด (Minimum Cost)

ตาราง 5-2

คุณสมบัติ	ค่าที่คำนวณ	
2E	2.4506	นิ้ว
ความหนา	5.81467	ซม.
จำนวนรอบ	132	รอบ
น้ำหนักรวม	13.58115	กก.
น้ำหนักของแกนเหล็ก	10.0627	กก.
น้ำหนักของขดลวด	3.51845	กก.
ราคารวม	890.0946	บาท
ราคาของแกนเหล็ก	432.6961	บาท
ราคาของขดลวด	457.3985	บาท
ความสูญเสียรวม	57.64505	วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	32.20064	วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	25.4444	วัตต์
ประสิทธิภาพ	97.28	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum Efficiency)

ตาราง 5-3

คุณสมบัติ	ค่าที่คำนวณ
2E	2.2361 นิ้ว
ความหนา	6.57928 ซม.
จำนวนรอบ	121 รอบ
น้ำหนักรวม	13.9382 กก.
น้ำหนักของแกนเหล็ก	10.5689 กก.
น้ำหนักของขดลวด	3.36957 กก.
ราคารวม	892.4807 บาท
ราคาของแกนเหล็ก	454.4643 บาท
ราคาของขดลวด	438.0165 บาท
ความสูญเสียรวม	58.1866 วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	33.8206 วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	24.3660 วัตต์
ประสิทธิภาพ	97.25 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดเล็ก

$$I = 5 \text{ A}, L = 10 \text{ mH}, B = 1 \text{ Tesla}, J = 2 \text{ A/mm}^2,$$

ราคาแกนเหล็ก = 38 บาท/กก., ราคาขดลวด = 130 บาท/กก., SWG : 15

ความสูญเสียในแกนเหล็กต่อกิโลกรัม = 2.3569 วัตต์/กก.,

ความต้านทานในขดลวด = 6.558 $\text{m}\Omega/\text{m}$

ก. นำหนักเบาที่สุด

ตาราง 5-4

คุณสมบัติ	ค่าที่คำนวณ
2E	1.1736 นิ้ว
ความหนา	2.64879 ซม.
จำนวนรอบ	68 รอบ
น้ำหนักรวม	1.8989 กก.
น้ำหนักของแกนเหล็ก	1.0513 กก.
น้ำหนักของขดลวด	0.8475 กก.
ราคารวม	150.1365 บาท
ราคาของแกนเหล็ก	39.9512 บาท
ราคาของขดลวด	110.1852 บาท
ความสูญเสียรวม	4.36085 วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	2.47792 วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	1.88293 วัตต์
ประสิทธิภาพ	94.44 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ราคาถูกที่สุด

ตาราง 5-5

คุณสมบัติ	ค่าที่คำนวณ
2E	1.1692 นิ้ว
ความหนา	2.79123 ซม.
จำนวนรอบ	64 รอบ
น้ำหนักรวม	1.91588 กก.
น้ำหนักของแกนเหล็ก	1.09956 กก.
น้ำหนักของขดลวด	0.81632 กก.
ราคารวม	147.904 บาท
ราคาของแกนเหล็ก	41.7836 บาท
ราคาของขดลวด	106.904 บาท
ความสูญเสียรวม	4.4050 วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	2.5915 วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	1.8134 วัตต์
ประสิทธิภาพ	94.39 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ประสิทธิภาพสูงสุด

ตาราง 5-6

คุณสมบัติ	ค่าที่คำนวณ
.2E	1.0777 นิ้ว
ความหนา	3.97401 ซม.
จำนวนรอบ	50 รอบ
น้ำหนักรวม	1.52274 กก.
น้ำหนักของแกนเหล็ก	1.28912 กก.
น้ำหนักของขดลวด	0.23362 กก.
ราคารวม	79.3575 บาท
ราคาของแกนเหล็ก	48.9868 บาท
ราคาของขดลวด	30.3706 บาท
ความสูญเสียรวม	5.0427 วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	3.40265 วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	1.6400 วัตต์
ประสิทธิภาพ	93.14 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ค่าที่ได้หลังปรับเข้าสู่แกนมาตรฐาน

5.1.2.1 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดใหญ่

$I = 15 \text{ A}$, $L = 30 \text{ mH}$, $B = 1 \text{ Tesla}$, $J = 2 \text{ A/mm}^2$,
 ราคาแกนเหล็ก = 43 บาท , ราคาขดลวด = 130 บาท , SWG : 10
 ความสูญเสียในแกนเหล็กต่อกิโลกรัม = 3.2 WATTS / KG ,
 ความต้านทานในขดลวด = 2.372 $\text{m}\Omega/\text{m}$

ก. น้ำหนักเบาที่สุด

ตาราง 5-7

คุณสมบัติ	คำนวณ	ทดสอบ
2E	3 นิ้ว	3 นิ้ว
D	2.9897 ซม.	3.00 ซม.
จำนวนรอบของขดลวด	209	209
น้ำหนักรวม	12.663 กก.	13.179 กก.
น้ำหนักแกนเหล็ก	7.7537 กก.	8.151 กก.
น้ำหนักขดลวด	4.9097 กก.	5.028 กก.
ราคารวม	971.67 บาท	1004.13 บาท
ราคาแกนเหล็ก	333.41 บาท	350.49 บาท
ราคาขดลวด	638.26 บาท	653.64 บาท
ความสูญเสียรวม	61.78 วัตต์	44.836 วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	24.81 วัตต์	7.336 วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	36.97 วัตต์	37.50 วัตต์
ประสิทธิภาพ	97.24 %	98.71 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ราคาถูกที่สุด

ตาราง 5-8

คุณสมบัติ	จำนวน	ทดสอบ
2E	2.5 นิ้ว	2.5 นิ้ว
D	5.431 ซม.	5.50 ซม.
จำนวนรอบของขดลวด	138	138
ราคารวม	888.60 บาท	859.76 บาท
ราคาแกนเหล็ก	420.62 บาท	420.75 บาท
ราคาขดลวด	467.98 บาท	439.01 บาท
น้ำหนักรวม	13.382 กก.	13.162 กก.
น้ำหนักแกนเหล็ก	9.782 กก.	9.785 กก.
น้ำหนักขดลวด	3.599 กก.	3.377 กก.
ความสูญเสียรวม	57.335 วัตต์	40.582 วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	31.302 วัตต์	15.607 วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	26.0326 วัตต์	24.975 วัตต์
ประสิทธิภาพ	97.29 %	98.67 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ประสิทธิภาพสูงสุด

ตาราง 5-9

คุณสมบัติ	คำนวณ	ทดสอบ
2E	2.5 นิ้ว	2.5 นิ้ว
D	5.431 ซม.	5.50 ซม.
จำนวนรอบของขดลวด	138	138
ความสูญเสียรวม	57.335 วัตต์	41.81 วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	31.302 วัตต์	15.485 วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	26.0326 วัตต์	26.325 วัตต์
ประสิทธิภาพ	97.29 %	98.62 %
น้ำหนักรวม	13.382 กก.	13.376 กก.
น้ำหนักแกนเหล็ก	9.782 กก.	9.709 กก.
น้ำหนักขดลวด	3.599 กก.	3.677 กก.
ราคารวม	888.60 บาท	895.49 บาท
ราคาแกนเหล็ก	420.62 บาท	417.48 บาท
ราคาขดลวด	467.98 บาท	478.01 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดเล็ก

$I = 5 \text{ A}$, $L = 10 \text{ mH}$, $B = 1 \text{ Tesla}$, $J = 2 \text{ A/mm}^2$,
 ราคาแกนเหล็ก = 38 บาท/ กก. , ราคาขดลวด = 130 บาท / กก. , SWG : 15
 ความสูญเสียในแกนเหล็กต่อกิโลกรัม = 2.3569 วัตต์ / กก. ,
 ความต้านทานในขดลวด = 6.558 $\text{m}\Omega / \text{m}$.

ก. น้ำหนักเบาที่สุด

ตาราง 5-10

คุณสมบัติ	คำนวณ	ทดสอบ
2E	1.5 นิ้ว	1.5 นิ้ว
D	1.095 ซม.	1.10 ซม.
จำนวนรอบของขดลวด	127	127
น้ำหนักรวม	1.146 กก.	1.149 กก.
น้ำหนักแกนเหล็ก	0.710 กก.	0.721 กก.
น้ำหนักขดลวด	0.436 กก.	0.428 กก.
ราคารวม	83.66 บาท	83.04 บาท
ราคาแกนเหล็ก	26.98 บาท	27.40 บาท
ราคาขดลวด	56.68 บาท	55.64 บาท
ความสูญเสียรวม	4.738 วัตต์	8.474 วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	1.674 วัตต์	4.824 วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	3.064 วัตต์	3.650 วัตต์
ประสิทธิภาพ	93.96 %	92.75 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ราคาถูกที่สุด

ตาราง 5-11

คุณสมบัติ	คำนวณ	ทดสอบ
2E	1.5 นิ้ว	1.5 นิ้ว
D	1.095 ซม.	1.10 ซม.
จำนวนรอบของขดลวด	127	127
ราคารวม	83.66 บาท	82.20 บาท
ราคาแกนเหล็ก	26.98 บาท	27.47 บาท
ราคาขดลวด	56.68 บาท	54.73 บาท
น้ำหนักรวม	1.146 กก.	1.144 กก.
น้ำหนักแกนเหล็ก	0.710 กก.	0.723 กก.
น้ำหนักขดลวด	0.436 กก.	0.421 กก.
ความสูญเสียรวม	4.738 วัตต์	8.471 วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	1.674 วัตต์	4.696 วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	3.064 วัตต์	3.775 วัตต์
ประสิทธิภาพ	93.96 %	92.47 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ประสิทธิภาพสูงสุด

ตาราง 5-12

คุณสมบัติ	จำนวน	ทดสอบ
2E	1.5 นิ้ว	1.5 นิ้ว
D	1.095 ซม.	1.10 ซม.
จำนวนรอบของขดลวด	127	127
ความสูญเสียรวม	4.738 วัตต์	8.276 วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	1.674 วัตต์	4.701 วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	3.064 วัตต์	3.575 วัตต์
ประสิทธิภาพ	93.96 %	92.58 %
น้ำหนักรวม	1.146 กก.	1.138 กก.
น้ำหนักแกนเหล็ก	0.710 กก.	0.723 กก.
น้ำหนักขดลวด	0.436 กก.	0.415 กก.
ราคารวม	83.66 บาท	81.42 บาท
ราคาแกนเหล็ก	26.98 บาท	27.47 บาท
ราคาขดลวด	56.68 บาท	53.95 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

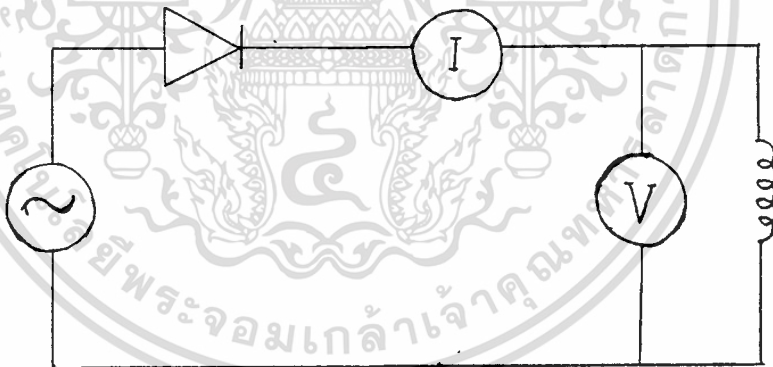
5.2 การหาค่าความต้านทาน

5.2.1 อุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า (variac) ขนาด 15 A
2. เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าตรง 0 - 100 V
3. เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าตรง 0 - 100 A
4. ชุดเรียงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสไฟฟ้าตรง (bridge rectifier)
5. ชุดต่อสาย (Junction Box)
6. สายไฟ

5.2.2 วิธีทดสอบหาค่าความต้านทาน

1. นำตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีน้ำหนักเบาที่สุดขนาดใหญ่มาต่อวงจร ดังรูป 5-1



รูปที่ 5-1 วงจรสำหรับหาค่าความต้านทาน

2. ทำการปรับเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า ให้ได้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์ จากนั้นทำการบันทึกค่าของกระแสไฟฟ้า
3. ทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ครั้งละ 0.5 โวลต์ จนถึง 4.0 โวลต์ พร้อมทั้งบันทึกค่าของกระแสไฟฟ้า
4. นำค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มาเขียนกราฟ ซึ่งความชันของกราฟที่ได้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับค่าความต้านของ ขดลวด เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ ข้อ 1 ถึง ข้อ 4 แต่เปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำเป็นดังนี้
- 5.1 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดเล็ก
 - 5.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่
 - 5.3 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก
 - 5.4 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดใหญ่
 - 5.5 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก ตามลำดับ

5.2.3 ผลการทดสอบ

5.2.3.1 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดใหญ่

ก. น้ำหนักเบาที่สุด

ตาราง 5-13

I_{DC} (Amp)	V_{DC} (Volt)
2.6	0.5
5.8	1.0
8.9	1.5
12.2	2.0
15.1	2.5
18.5	3.0
21.1	3.5
24.9	4.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ราคาถูกที่สุด

ตาราง 5-14

I_{DC} (Amp)	V_{DC} (Volt)
4.3	0.5
8.8	1.0
13.5	1.5
18.2	2.0
22.3	2.5
27.2	3.0
30	3.5
36	4.0

ค. ประสิทธิภาพสูงที่สุด

ตาราง 5-15

I_{DC} (Amp)	V_{DC} (Volt)
4.4	0.5
8.35	1.0
13.4	1.5
18.0	2.0
21.3	2.5
25.4	3.0
29.3	3.5
33.5	4.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดเล็ก

ก. น้ำหนักเบาที่สุด

ตาราง 5-16

I_{DC} (Amp)	V_{DC} (Volt)
3.5	0.5
7.4	1.0
10.7	1.5
14.3	2.0
17.9	2.5
21.3	3.0
24.2	3.5
26.8	4.0

ข. ราคาถูกที่สุด

ตาราง 5-17

I_{DC} (Amp)	V_{DC} (Volt)
3.6	0.5
7.3	1.0
11.2	1.5
14.7	2.0
17.7	2.5
20.5	3.0
23.6	3.5
28.4	4.0

ค. ประสิทธิภาพสูงสุด

ตาราง 5-18

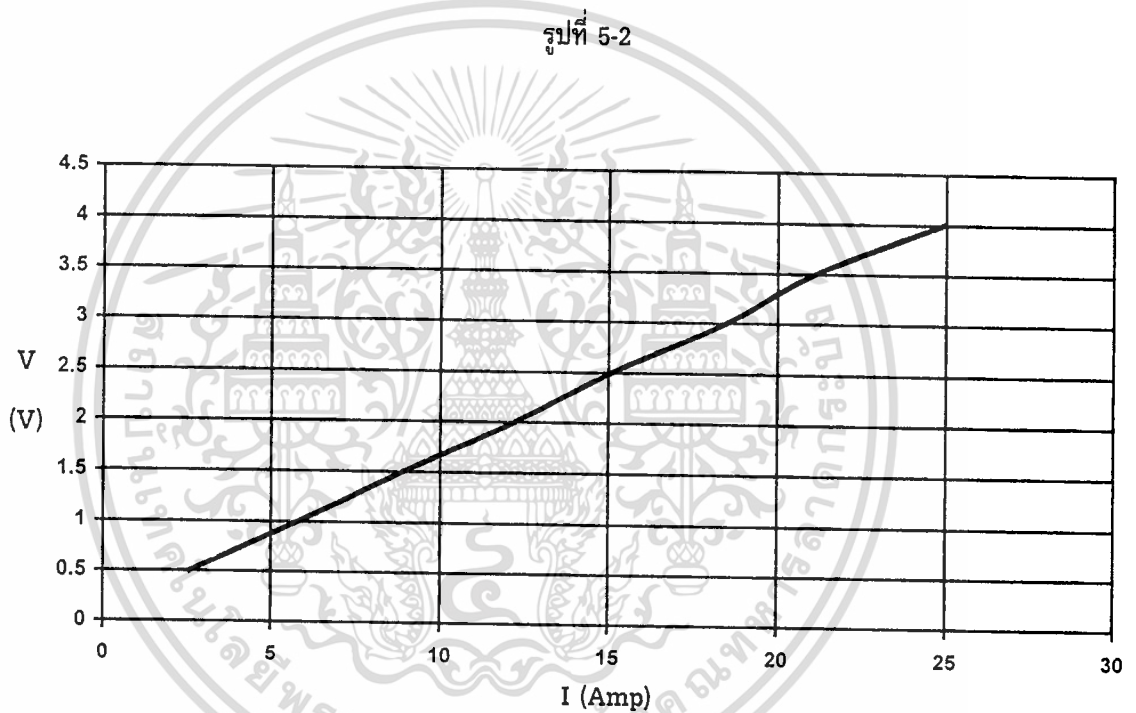
I_{DC} (Amp)	V_{DC} (Volt)
3.6	0.5
8.1	1.0
10.6	1.5
15.3	2.0
17.7	2.5
21.1	3.0
22.6	3.5
25.2	4.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 กราฟจากการทดลองที่ใช้หาความต้านทาน

5.2.4.1 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดใหญ่

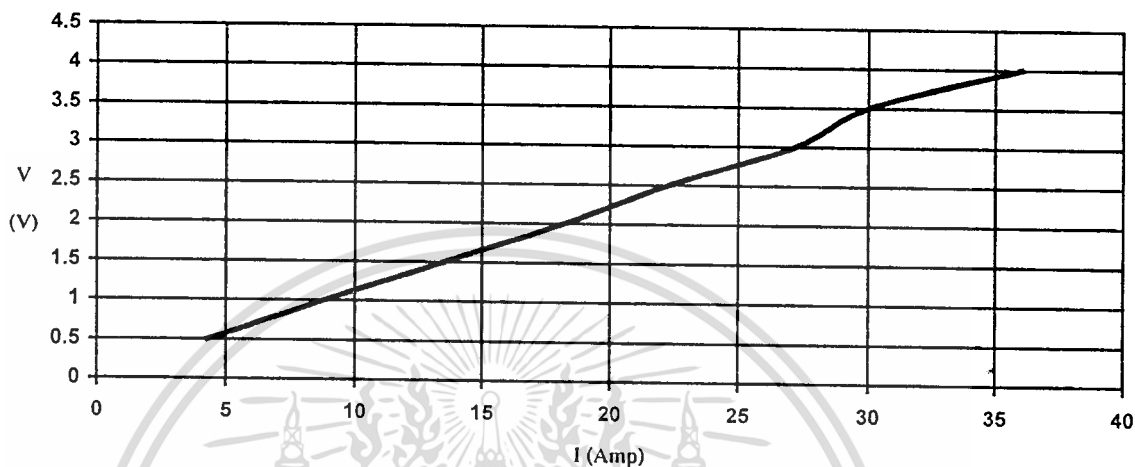
ก. น้ำหนักเบาที่สุด แสดงได้ดังรูปที่ 5-2



จากกราฟรูปที่ 5-2 จะได้ $R = 0.1667 \Omega$

ข. ราคาถูกที่สุด แสดงได้ดังรูปที่ 5-3

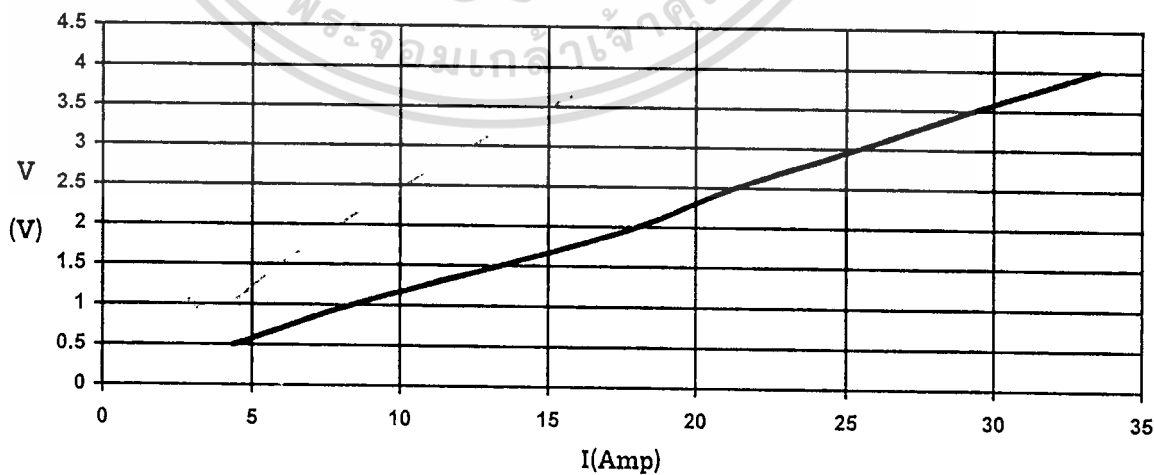
รูปที่ 5-3



จากกราฟรูปที่ 5-3 จะได้ $R = 0.111 \Omega$

ค. ประสิทธิภาพสูงที่สุด ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5-4

รูปที่ 5-4



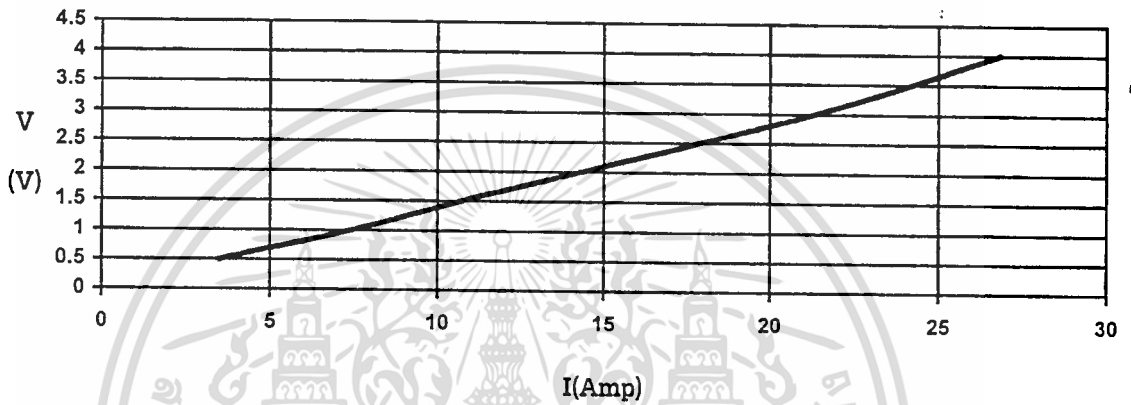
จากกราฟรูปที่ 5-4 จะได้ $R = 0.117 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดเล็ก

ก. นำหนักเบาที่สุด แสดงได้ดังรูปที่ 5-5

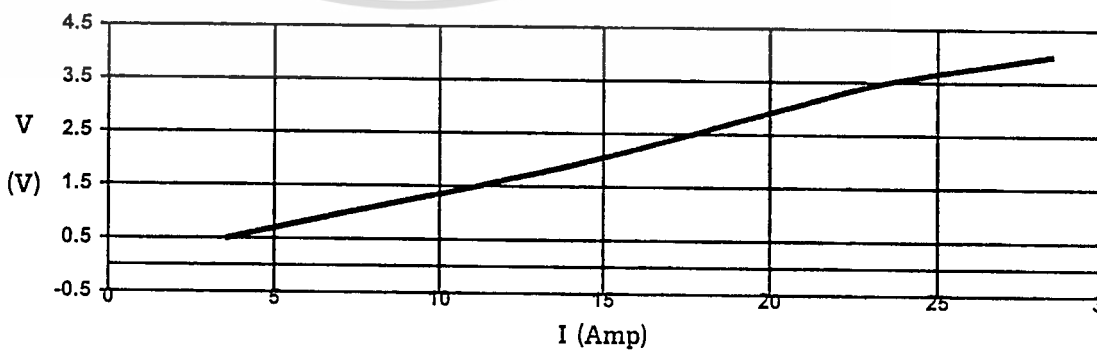
รูปที่ 5-5



จากกราฟรูปที่ 5-5 จะได้ $R = 0.146 \Omega$

ข. ราคาถูกที่สุด แสดงได้ดังรูปที่ 5-6

รูปที่ 5-6

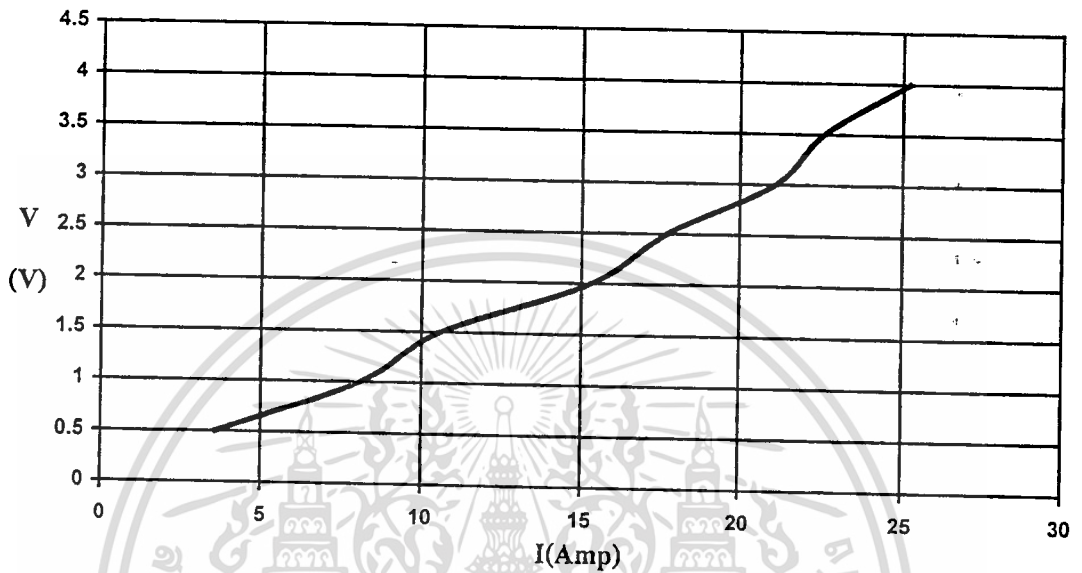


จากกราฟรูปที่ 5-6 จะได้ $R = 0.151 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ประสิทธิภาพสูงที่สุด ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5-7

รูปที่ 5-7



จากกราฟรูปที่ 5-7 จะได้ $R = 0.143 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การหาคุณสมบัติของแกนเหล็ก

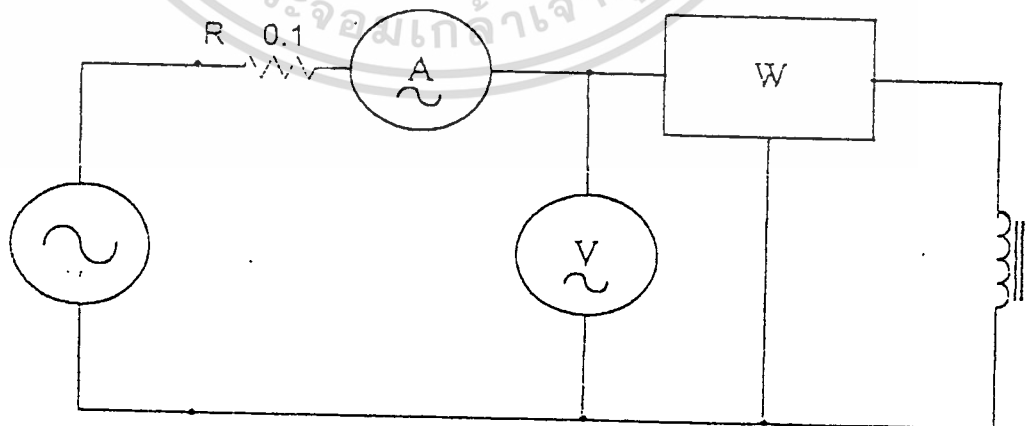
คุณสมบัติของแกนเหล็กที่จะทำการทดสอบหา คือ $B-H$ curve ของแกนเหล็ก และกราฟของความสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss curve)

5.3.1 อุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องปรับระดับแรงดันไฟฟ้า (variac) ขนาด 15 A
2. ออสซิลโลสโคป พร้อมสายโพล (Probe) 2 เส้น
3. เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าสลับ 0 - 30 A
4. เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าสลับ 0 - 300 V
5. เครื่องวัดกำลังงานไฟฟ้าสลับ 1 เฟส
6. ชุดความต้านทาน 0.1Ω 10 W
7. ชุดต่อสาย (Junction Box)
8. สายไฟ

5.3.2 วิธีการทดสอบคุณสมบัติของแกนเหล็ก

1. นำตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักเบาที่สุดขนาดใหญ่ มาต่อวงจร ดังรูป 5-8



รูปที่ 5-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องปรับระดับแรงดันไฟฟ้า ตั้งแต่ศูนย์จนถึงแรงดันที่ทำให้กระแสมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า
3. ทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ทำการปรับ
4. ทำการวัดค่ามุมต่างเฟสระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากออสซิลอสโคป
5. ทำการบันทึกค่ากำลังงานจาก เครื่องวัดกำลังงานไฟฟ้าสลับ 1 เฟส ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ทำการปรับ
6. นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่บันทึก มาหาค่าความหนาแน่นแม่เหล็ก (B) ได้จากสมการ

$$E = 4.44 fNB_{max} A_m F, \quad (5-1)$$

7. นำค่ากระแสไฟฟ้าที่บันทึก มาหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ได้จากสมการ

$$H = \frac{0.4 \pi N^2 I}{l} \quad (5-2)$$

โดยที่ l คือความยาวของเส้นทางของฟลักซ์แม่เหล็ก

8. นำค่าความหนาแน่นแม่เหล็ก และ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก มาวาดกราฟ โดยให้ความหนาแน่นแม่เหล็กเป็นแกนตั้ง และ ความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็นแกนนอน
9. นำค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และ ค่ามุมต่างเฟสระหว่าง กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า มาคำนวณหาค่าความสูญเสียรวม ตามสมการ

$$P_{tot} = VI \cos \theta \quad (5-3)$$

10. คำนวณหาค่าความสูญเสียในขดลวดจากค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความต้านทาน

$$P_{cu} = I^2 R_{dc} \quad (5-4)$$

11. คำนวณหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $P_{tot} = P_{cu} + P_{fe}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น (5-5)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นคำนวณหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็ก

12. นำค่าความหนาแน่นแม่เหล็ก และ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็กมาวาดกราฟ โดยให้ ความหนาแน่นแม่เหล็กเป็นแกนตั้ง และความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็ก เป็นแกนนอน
13. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ ข้อ 1 ถึง ข้อ 12 แต่เปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำเป็นดังนี้
 - 13.1 ตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดเล็ก
 - 13.2 ตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่.
 - 13.3 ตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก
 - 13.4 ตัวเหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดใหญ่
 - 13.5 ตัวเหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก ตามลำดับ

5.3.3 ผลการทดสอบ

การทดสอบนี้จะแบ่งประเภทของตัวเหนี่ยวนำออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ (Large EI Design)
2. ตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็ก (Small EI Design)

5.3.3.1 ตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ แบ่งออกได้เป็นดังนี้

- ก. ตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักเบาที่สุด
โดยมีขนาด $2E = 3$ นิ้ว , $D = 3$ เซนติเมตร
จำนวนรอบของขดลวด 209 รอบ ที่ ความถี่ 50 Hz
ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5-19

ตารางที่ 5-19

V (Volt)	I (Amp)	θ (Degree)
5	0.079	75
10	0.134	75
15	0.183	72
20	0.228	72
25	0.272	72.3
30	0.316	72.3
35	0.360	72.3
40	0.400	72.6
45	0.437	72.6
50	0.475	72.6
55	0.510	72.6
60	0.544	74.1
65	0.577	74.1
70	0.615	75.6
75	0.635	76.6
80	0.670	77.5
85	0.705	78.6
90	0.740	78.6
95	0.775	78.6
100	0.810	78.6
105	0.845	79.5
110	0.886	80.3
115	0.935	81.0
120	0.975	81.5
125	1.02	81.5
130	1.08	81.5
135	1.13	81.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V (Volt)	I (Amp)	θ (Degree)
140	1.19	81.5
145	1.24	81.5
150	1.34	81.7
155	1.45	80
160	1.60	80
165	1.78	78.5
170	2.10	80
175	2.48	80
180	2.92	80
185	3.57	81.5
190	4.40	81.5
195	5.10	82.4
200	6.05	82.4
205	7.10	82.4
210	8.40	82.4
215	9.70	82.4
220	11.20	82.4
225	12.60	82.4
230	14.30	82.4
235	16.20	82.4
240	18.00	82.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า B และ H ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5-20

ตารางที่ 5-20

H (A-turn/m)	B (tesla)
66.6839	0.04714
113.1094	0.094281
154.4703	0.141422
192.4548	0.188856
229.5952	0.235703
266.7356	0.282843
303.876	0.329984
337.64	0.377124
368.8717	0.424265
400.9457	0.471405
430.491	0.518546
459.1904	0.565686
487.0457	0.612827
519.1215	0.659967
536.0035	0.707108
565.547	0.754248
595.0905	0.801389
624.634	0.848529
654.1775	0.89567
683.721	0.94281
713.265	0.989951
747.873	1.037091
789.2335	1.084232
822.9975	1.131372
860.982	1.178513

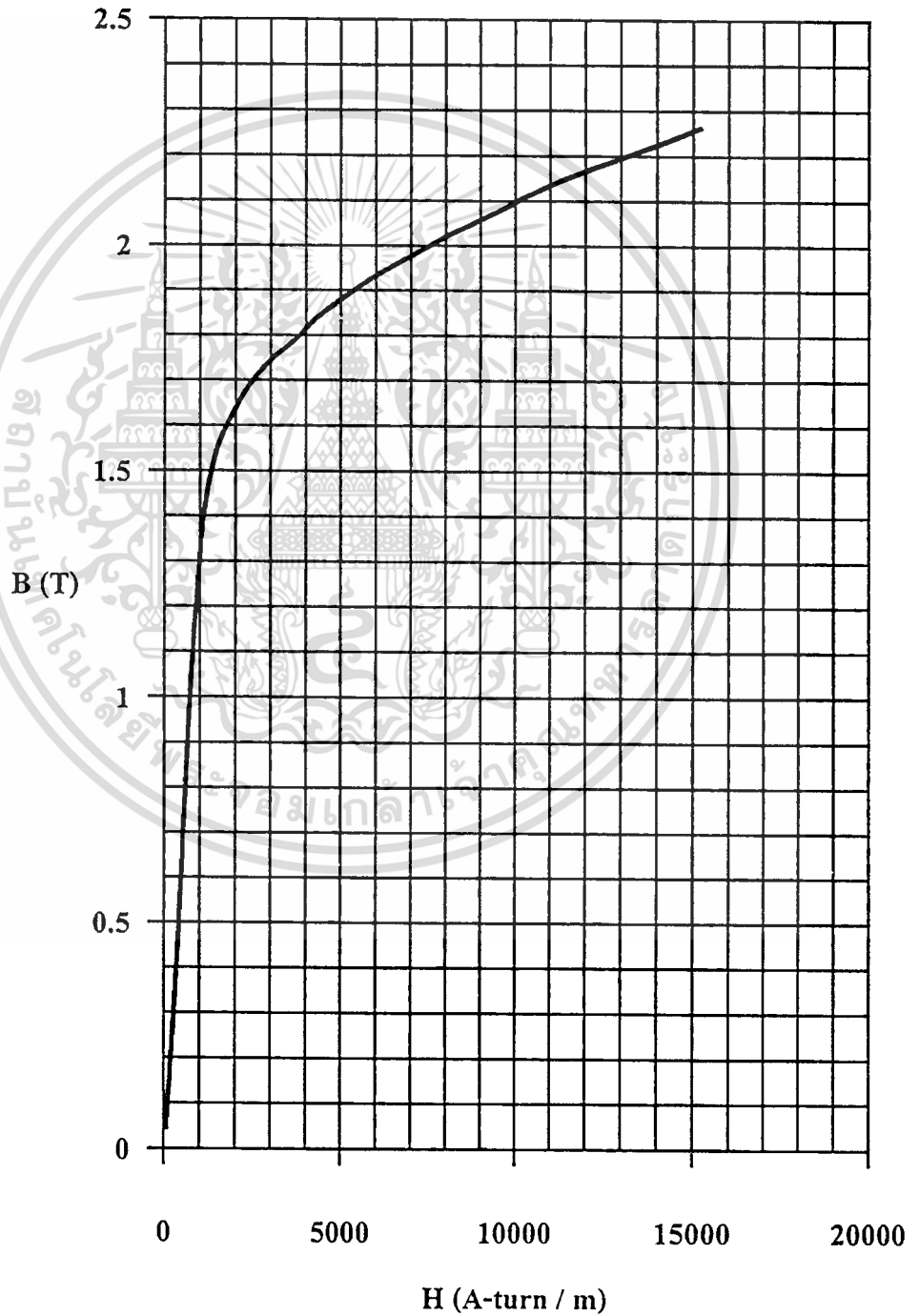
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H (A-turn/m)	B (tesla)
953.833	1.272794
1004.479	1.319934
1046.684	1.367075
1131.094	1.414215
1223.945	1.461356
1350.56	1.508496
1502.498	1.555637
1772.61	1.602777
2093.368	1.649918
2464.772	1.697058
3013.437	1.744199
3714.04	1.791339
4304.91	1.83848
5106.805	1.88562
5993.11	1.932761
7090.11	1.979901
8187.77	2.027042
9453.92	2.074182
10635.66	2.121323
12070.63	2.168463
13674.42	2.215604
15193.8	2.262744

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้กราฟ $B-H$ ของแกนเหล็ก ดังรูปที่ 5-9

รูปที่ 5-9 B - H Curve of Limination



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า B และ P_c และ Core Loss Curve ซึ่งสามารถแสดงได้ในตารางที่ 5-21 และ รูปที่ 5-10 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-21

P_c (W/kg)	B (Tesla)
0.010927	0.04714
0.039809	0.094281
0.100324	0.141422
0.168213	0.188856
0.248078	0.235703
0.347142	0.282843
0.462619	0.329984
0.578821	0.377124
0.712525	0.424265
0.861616	0.471405
1.018657	0.518546
1.085982	0.565686
1.24876	0.612827
1.300888	0.659967
1.341074	0.707108
1.409574	0.754248
1.438728	0.801389
1.599877	0.848529
1.769513	0.89567
1.947637	0.94281
1.966377	0.989951
1.996472	1.037091
2.044498	1.084232
2.10172	1.131372

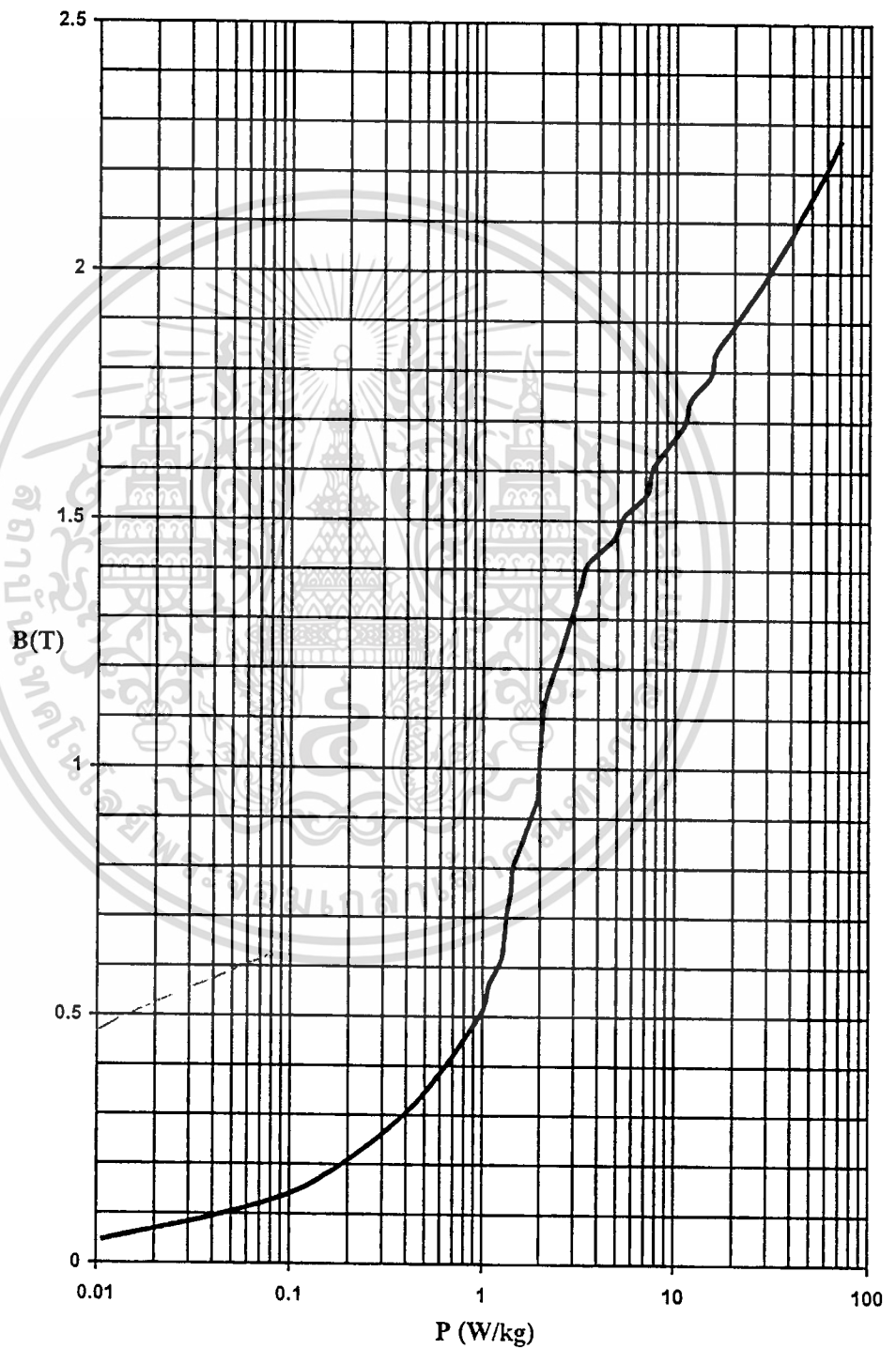
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังสาธารณะในด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_c (W/kg)	B (Tesla)
2.291205	1.178513
2.523905	1.225653
2.743208	1.272794
2.996762	1.319934
3.235106	1.367075
3.532349	1.414215
4.758394	1.461356
5.421073	1.508496
7.147266	1.555637
7.56254	1.602777
9.195168	1.649918
11.13761	1.697058
11.90349	1.744199
15.06991	1.791339
16.0322	1.83848
19.50941	1.88562
23.47136	1.932761
28.45041	1.979901
33.6404	2.027042
39.75116	2.074182
45.74228	2.121323
53.074	2.168463
61.44008	2.215604
69.72707	2.262744

F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-10 Core Loss Curve



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ข. ตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาถูกที่สุด และ ตัวเหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด
โดยมีขนาด $2E = 2.5$ นิ้ว , $D = 5.5$ เซนติเมตร
จำนวนรอบของขดลวด 138 รอบ ที่ ความถี่ 50 Hz
ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5-22

ตารางที่ 5-22

V (Volt)	I (Amp)	θ (Degree)
5	0.092	78.0
10	0.166	73.2
15	0.217	73.2
20	0.266	72.0
25	0.327	72.0
30	0.370	75.0
35	0.430	75.0
40	0.478	75.0
45	0.533	75.8
50	0.582	75.8
55	0.635	75.8
60	0.694	75.8
65	0.753	75.8
70	0.810	76.8
75	0.849	77.3
80	0.910	78.8
85	0.980	79.3
90	1.04	80.3
95	1.10	80.3
100	1.17	80.3
105	1.24	81.1
110	1.33	81.1

V (Volt)	I (Amp)	θ (Degree)
115	1.41	81.8
120	1.51	81.8
125	1.60	81.8
130	1.71	81.8
135	1.82	82.6
140	1.97	82.6
145	2.15	82.6
150	2.38	82.6
155	2.68	82.6
160	3.10	83.4
165	3.85	83.4
170	4.60	83.4
175	5.65	83.4
180	6.70	83.4
185	8.05	83.4
190	9.75	83.4
195	11.75	83.4
200	13.50	83.4
205	16.20	84.0
210	18.80	84.0

จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า B และ H แสดงได้ดังในตารางที่ 5-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-23

H (A-turn / m)	B (Tesla)
61.5204	0.046731
111.0018	0.093461
145.1048	0.140192
177.8742	0.186922
218.6649	0.233653
247.419	0.280384
287.541	0.327114
319.6386	0.373845
356.4171	0.420575
389.1834	0.467306
424.6245	0.514037
464.0778	0.560767
503.5311	0.607498
541.647	0.654228
567.7263	0.700959
608.517	0.74769
655.326	0.79442
695.448	0.841151
735.57	0.887881
782.379	0.934612
829.188	0.98134
889.371	1.02807
942.867	1.074804
1009.737	1.121534
1069.92	1.168265
1143.477	1.214996
1217.034	1.261726

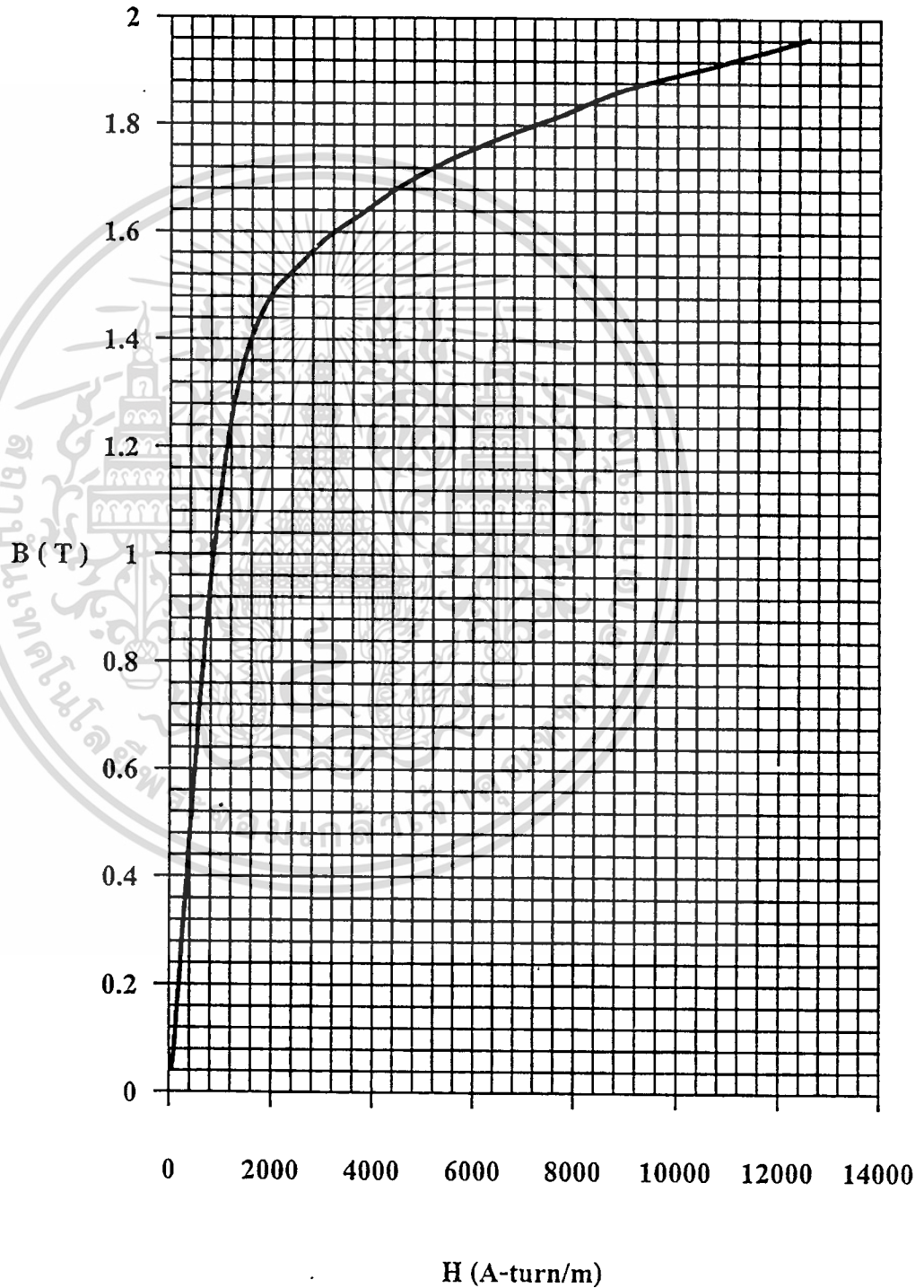
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H (A-turn / m)	B (Tesla)
1317.339	1.308457
1437.705	1.355187
1591.506	1.401918
1792.116	1.448649
2072.97	1.495379
2574.495	1.54211
3076.02	1.58884
3778.155	1.635571
4480.29	1.682302
5383.035	1.729032
6519.825	1.775763
7823.79	1.822493
9027.45	1.869224
10832.94	1.915955
12571.56	1.962685

จะได้กราฟ $B - H$ ของแกนเหล็ก ดังรูปที่ 5-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-11 B - H Curve of Limination



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า B และ P_c และ Core Loss Curve ซึ่งสามารถแสดงได้ใน ตารางที่ 5-24 และ รูปที่ 5-12 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-24

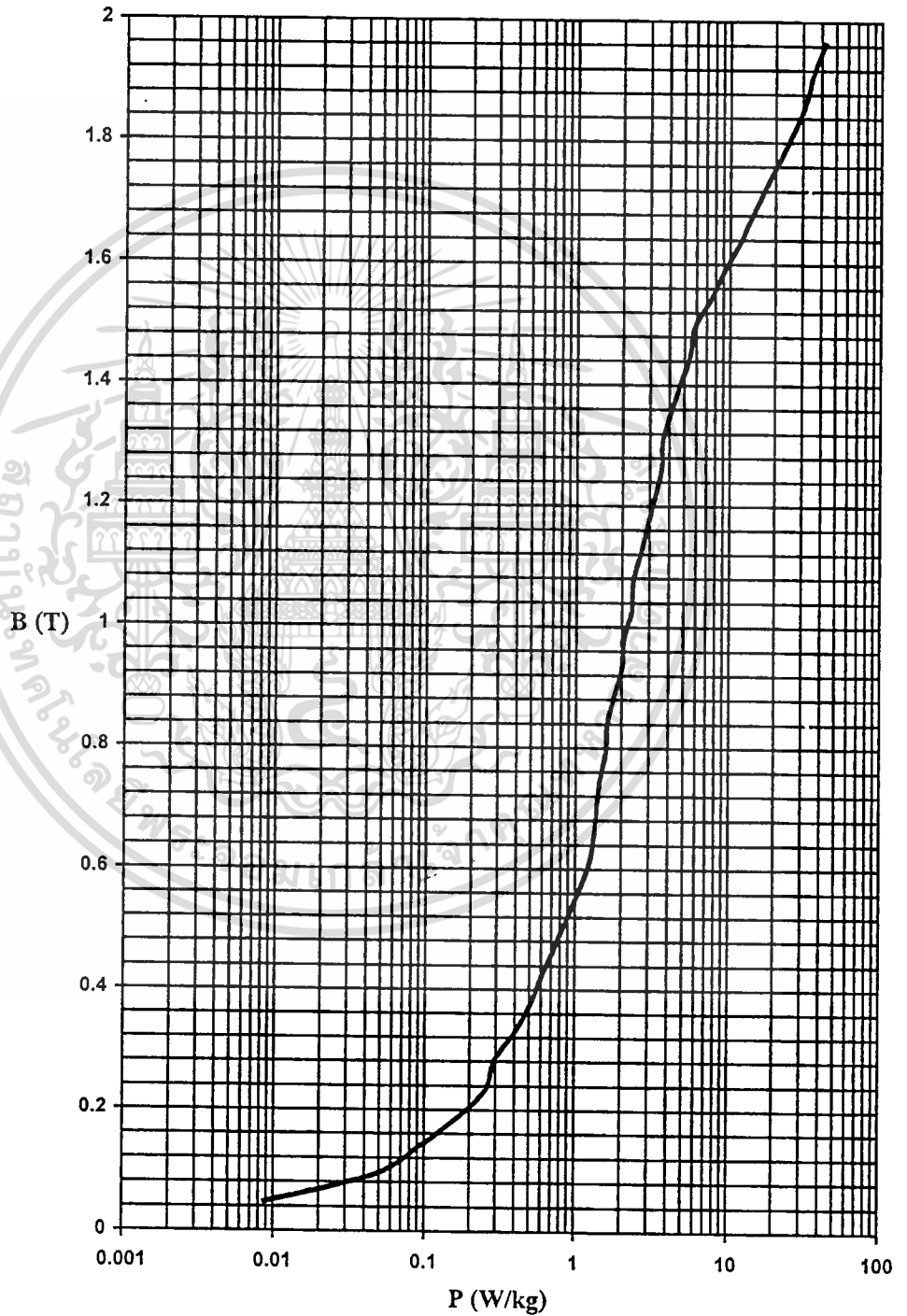
P_c (Watt / kg)	B(Tesla)
0.008742	0.046731
0.047417	0.093461
0.094284	0.140192
0.166118	0.186922
0.256252	0.233653
0.291442	0.280384
0.396017	0.327114
0.503936	0.373845
0.599581	0.420575
0.728225	0.467306
0.874761	0.514037
1.043711	0.560767
1.227567	0.607498
1.32379	0.654228
1.375706	0.700959
1.445409	0.74769
1.581152	0.79442
1.611792	0.841151
1.800227	0.887881
2.016307	0.934612
2.059755	0.981343
2.315219	1.028073

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_c (W/kg)	B(Tesla)
2.365039	1.074804
2.643684	1.121534
2.918776	1.168265
3.245044	1.214996
3.587471	1.261726
3.634892	1.308457
4.109619	1.355187
4.717112	1.401918
5.478204	1.448649
5.834386	1.495379
7.473816	1.54211
9.202033	1.58884
11.63693	1.635571
14.19612	1.682302
17.53302	1.729032
21.81276	1.775763
26.86784	1.822493
31.80043	1.869224
35.55897	1.915955
42.27798	1.962685

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-12 Core Loss Curve



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3.2 ตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็ก (Small EI Inductance Design) โดยแบ่งได้เป็นดังนี้

ก. ตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักต่ำสุด

โดยจะมีขนาด $2E = 1.5$ นิ้ว $D = 1.1$ เซนติเมตร

จำนวนรอบของขดลวด 127 รอบ ที่ ความถี่ 50 Hz

ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5-25

ตารางที่ 5-25

V (Volt)	I (Amp)	θ (Degree)
1	0.330	56.84
2	0.370	57.60
3	0.415	58.38
4	0.460	60.81
5	0.502	60.81
6	0.552	60.81
7	0.602	60.81
8	0.660	60.81
9	0.717	60.81
10	0.800	62.40
11	0.875	60.81
12	0.990	60.81
13	1.225	67.20
14	1.550	72.00
15	2.025	69.60
16	2.700	65.68
17	3.650	66.32
18	4.800	63.12

จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า B และ H ในตารางที่ 5-26

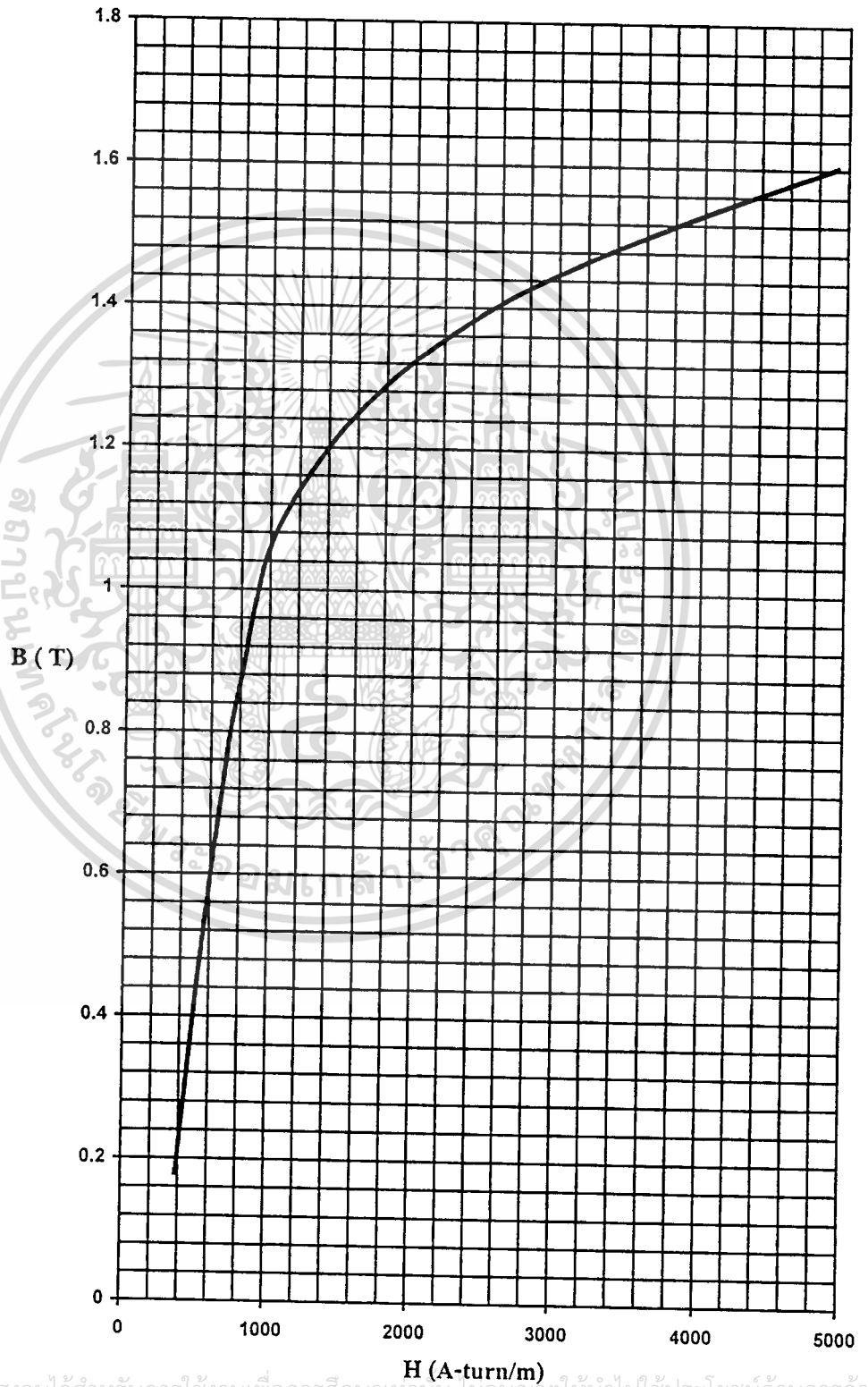
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-26

H (A-turn/m)	B (Tesla)
338.45	0.0891
379.47	0.1782
425.62	0.2673
471.78	0.3563
515.36	0.4454
566.64	0.5345
617.92	0.6236
676.89	0.7126
735.87	0.8017
820.48	0.8908
897.40	0.9798
1015.34	1.0690
1256.36	1.1580
1589.65	1.2470
2076.84	1.3360
2769.12	1.4250
3743.44	1.5140
4922.88	1.6030

จะได้กราฟ $B - H$ ของแกนเหล็ก ดังรูปที่ 5-13

รูปที่ 5-13 B - H Curve of Limination



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

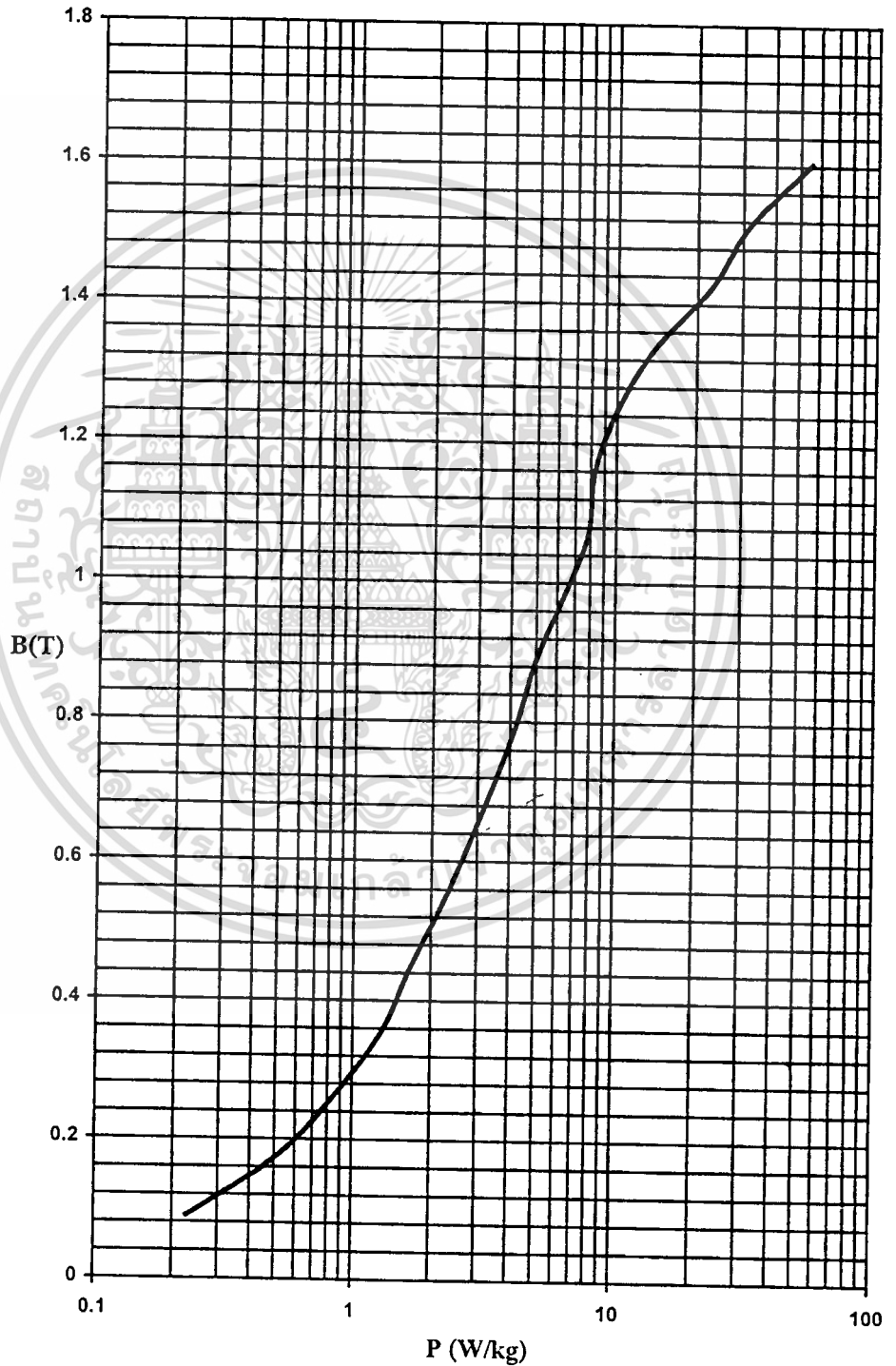
จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า B และ P_c และ Core Loss Curve ซึ่งสามารถแสดงได้ในตารางที่ 5-27 และ รูปที่ 5-14 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-27

Core Loss (W/kg)	B (Tesla)
0.2280	0.0891
0.5223	0.1782
0.8706	0.2673
1.2950	0.3563
1.6480	0.4454
2.1800	0.5345
2.7790	0.6236
3.4830	0.7126
4.2640	0.8017
5.0110	0.8908
6.3550	0.9798
7.8380	1.0690
8.2550	1.1580
10.004	1.2470
13.854	1.3360
22.588	1.4250
31.867	1.5140
55.251	1.6030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-14 Core Loss Curve



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ข. ตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาถูกที่สุด
 โดยจะมีขนาด $2E = 1.5$ นิ้ว , $D = 1.1$ เซนติเมตร
 จำนวนรอบของขดลวด 127 รอบ ที่ ความถี่ 50 Hz
 ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5-28

ตารางที่ 5-28

V (Volt)	I (Amp)	θ (Degree)
1	0.310	57.78
2	0.345	57.78
3	0.375	58.50
4	0.425	58.50
5	0.460	58.50
6	0.500	59.24
7	0.545	59.24
8	0.595	60.75
9	0.650	60.75
10	0.710	58.50
11	0.790	58.50
12	0.905	58.50
13	1.155	64.44
14	1.600	68.05
15	2.175	65.85
16	3.050	63.66
17	4.100	59.27
18	5.500	57.07

จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า B และ H ในตารางที่ 5-29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

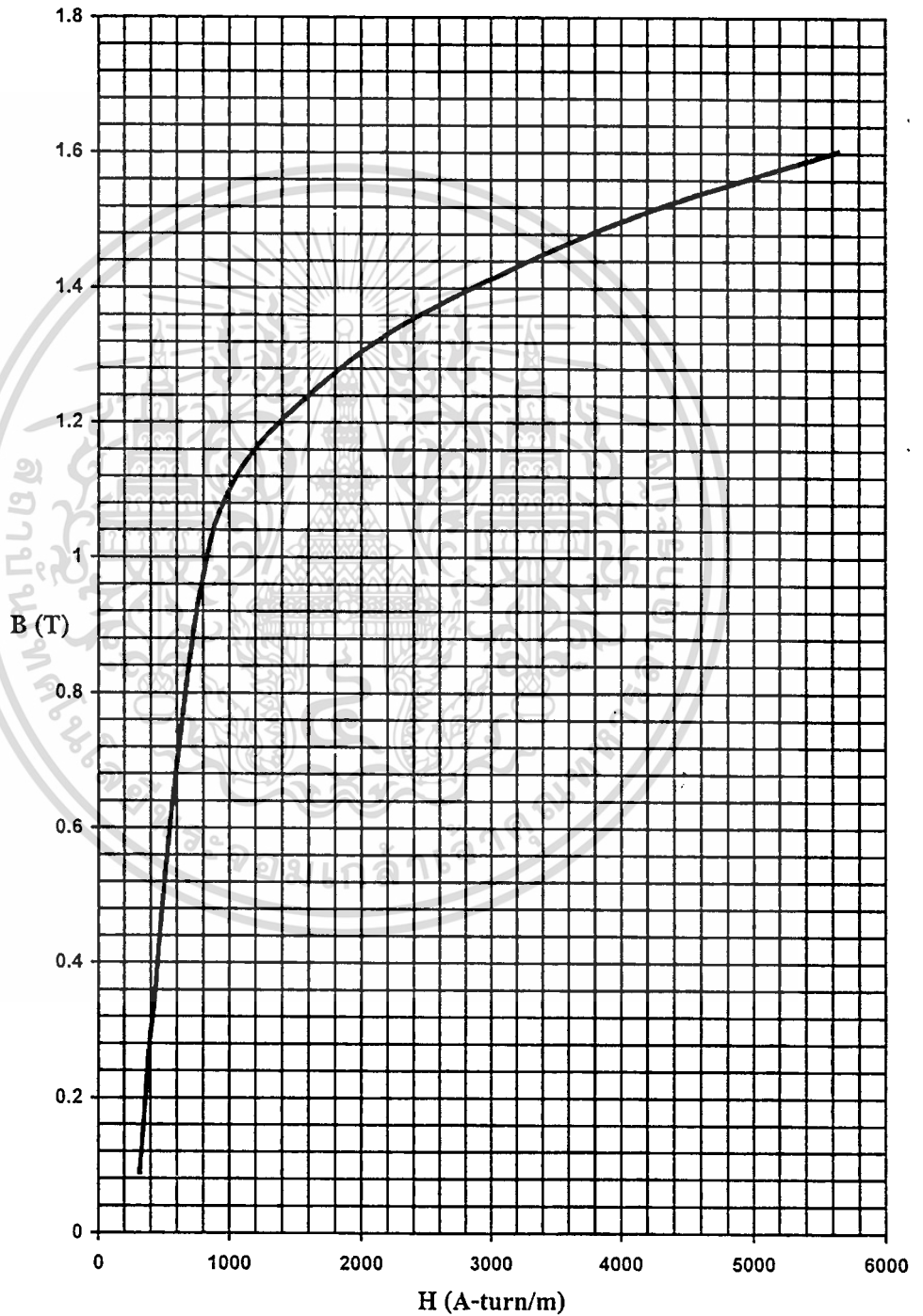
ตารางที่ 5-29

H (A-turn/m)	B (Tesla)
317.94	0.0891
353.83	0.1782
384.60	0.2673
435.88	0.3563
471.77	0.4454
512.80	0.5345
558.95	0.6236
610.23	0.7126
666.64	0.8017
728.17	0.8908
810.22	0.9798
928.17	1.0690
1184.57	1.1580
1640.96	1.2470
2230.68	1.3360
3128.08	1.4250
4204.96	1.5140
5640.80	1.6030

จะได้กราฟ $B - H$ ของแกนเหล็ก ดังรูปที่ 5-15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-15 B - H Curve of Limination



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

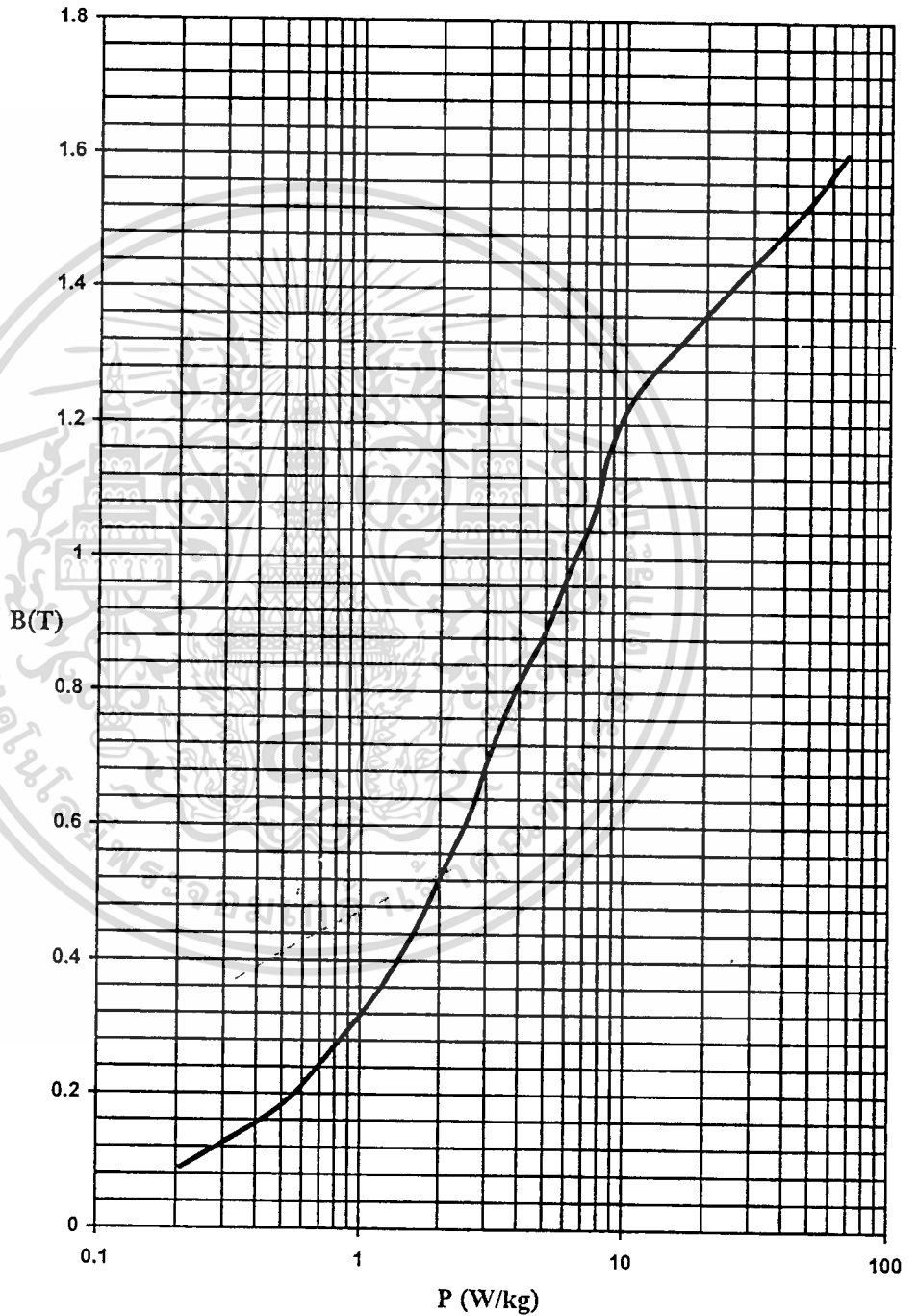
จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า B และ P_c และ Core Loss Curve ซึ่งสามารถแสดงได้ในตารางที่ 5-30 และ รูปที่ 5-16 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-30

Core Loss (W/kg)	B (Tesla)
0.2080	0.0891
0.4840	0.1782
0.7840	0.2673
1.1820	0.3563
1.6180	0.4454
2.0690	0.5345
2.6370	0.6236
3.1430	0.7126
3.8650	0.8017
5.0260	0.8908
6.1490	0.9798
7.6770	1.0690
8.6800	1.1580
11.074	1.2470
17.471	1.3360
28.007	1.4250
45.754	1.5140
68.113	1.6030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-16 Core Loss Curve



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ตัวเหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

โดยจะมีขนาด $2E = 1.5$ นิ้ว $D = 1.1$ เซนติเมตร

จำนวนรอบของขดลวด 127 รอบ ที่ ความถี่ 50 Hz

ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5-31

ตารางที่ 5-31

V (Volt)	I (Amp)	θ (Degree)
1	0.345	60.00
2	0.390	60.00
3	0.435	60.00
4	0.480	60.00
5	0.525	60.80
6	0.565	60.80
7	0.615	61.58
8	0.665	61.58
9	0.720	61.58
10	0.790	61.58
11	0.870	61.58
12	1.000	61.58
13	1.380	63.95
14	1.975	66.32
15	2.775	63.95
16	3.800	60.00
17	5.000	57.60
18	6.600	52.80

จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า B และ H ในตารางที่ 5-32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

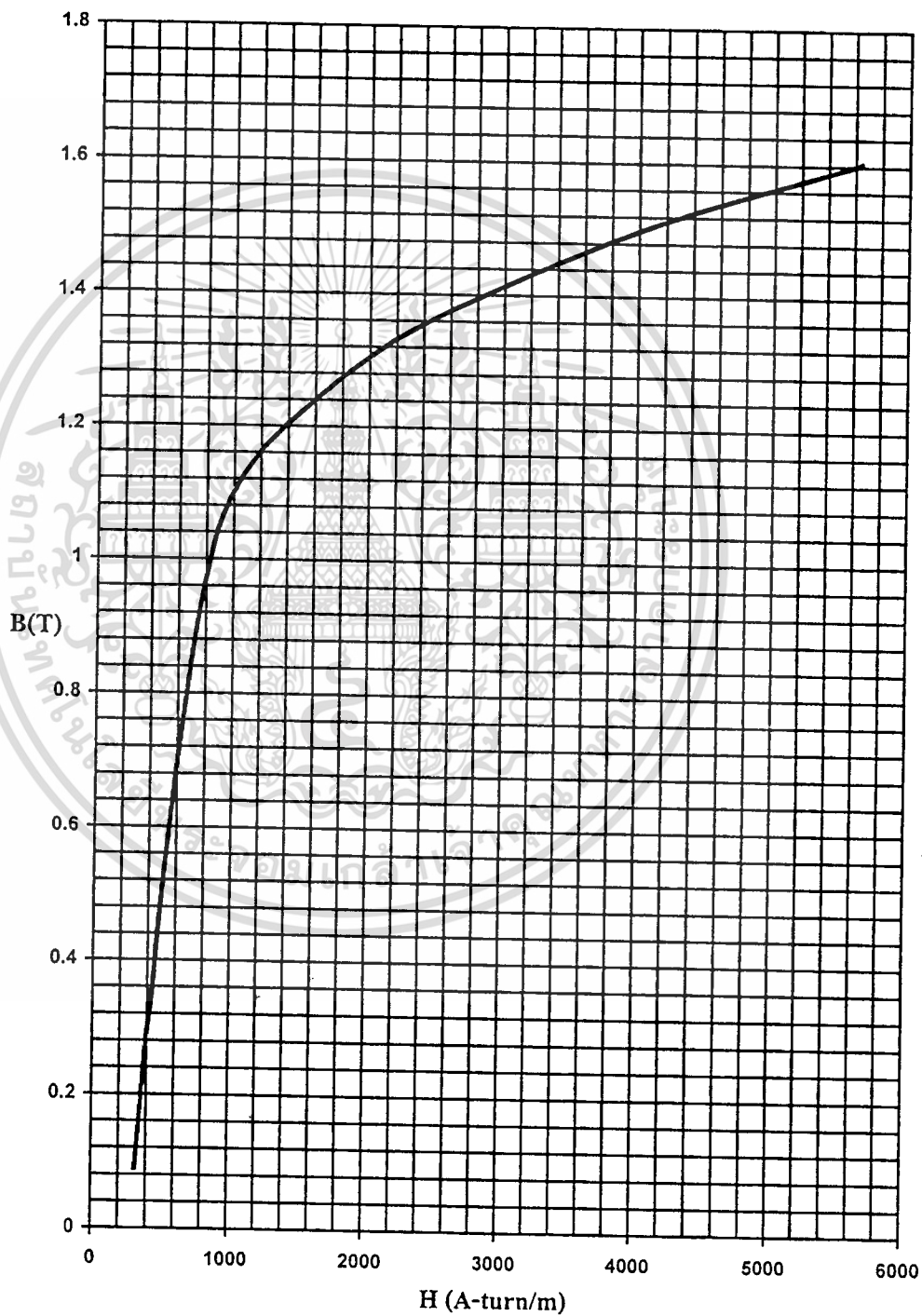
ตารางที่ 5-32

H (A-turn/m)	B (Tesla)
317.94	0.0891
353.83	0.1782
384.60	0.2673
435.88	0.3563
471.77	0.4454
512.80	0.5345
558.95	0.6236
610.23	0.7126
666.64	0.8017
728.17	0.8908
810.22	0.9798
928.17	1.0690
1184.57	1.1580
1640.96	1.2470
2230.68	1.3360
3128.08	1.4250
4204.96	1.5140
5640.80	1.6030

จะได้กราฟ $B - H$ ของแกนเหล็ก ดังรูปที่ 5-17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-17 B - H Curve of Limination



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

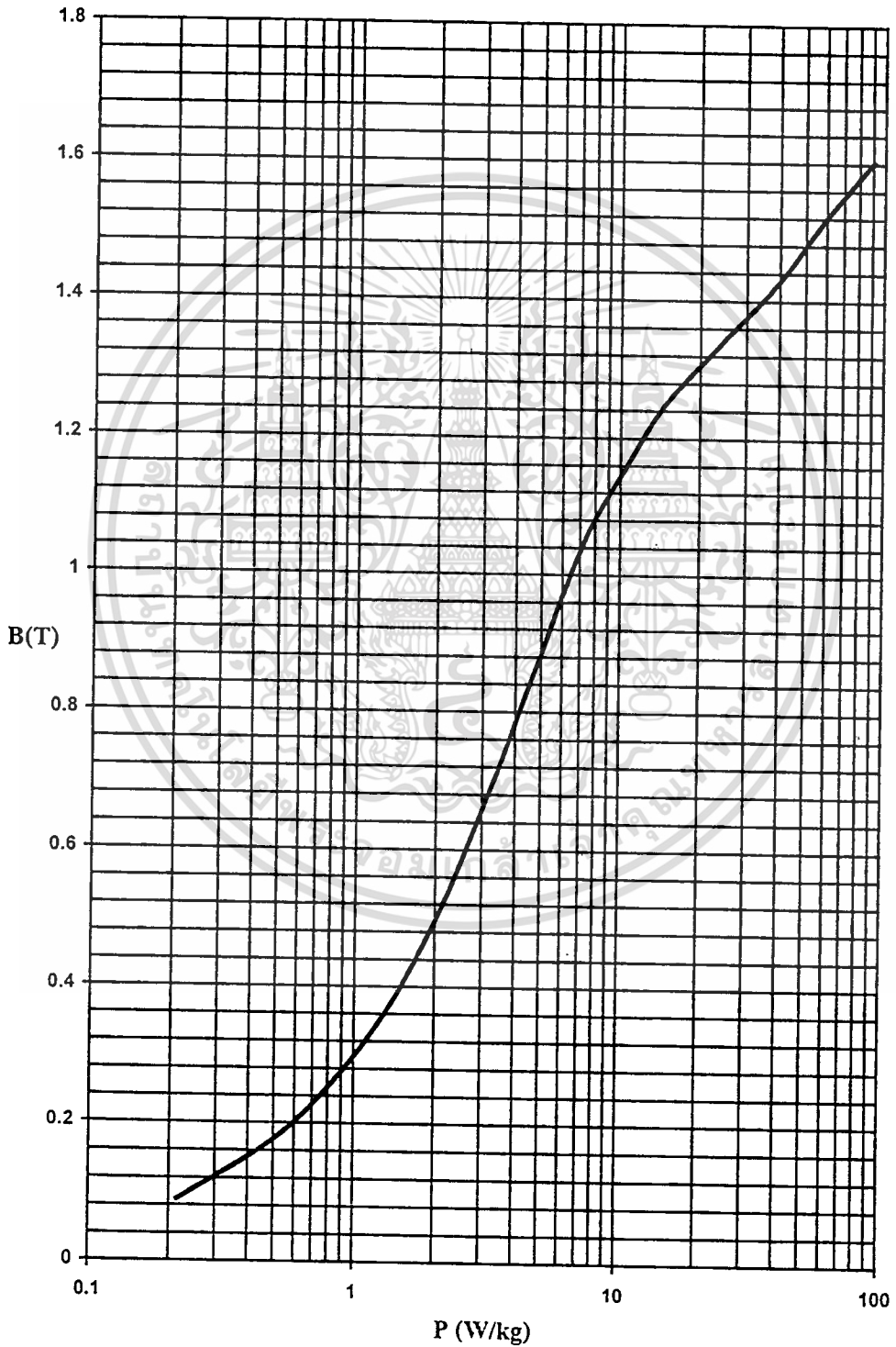
จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า B และ P_c และ Core Loss Curve ซึ่งสามารถแสดงได้ในตารางที่ 5-33 และ รูปที่ 5-18 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-33

Core Loss (W/kg)	B (Tesla)
0.2150	0.0891
0.5090	0.1782
0.8650	0.2673
1.2820	0.3563
1.7210	0.4454
2.2240	0.5345
2.7590	0.6236
3.4150	0.7126
4.1630	0.8017
5.0760	0.8908
6.1510	0.9798
7.7010	1.0690
10.521	1.1580
14.591	1.2470
23.762	1.3360
39.198	1.4250
58.050	1.5140
90.728	1.6030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-18 Core Loss Curve



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

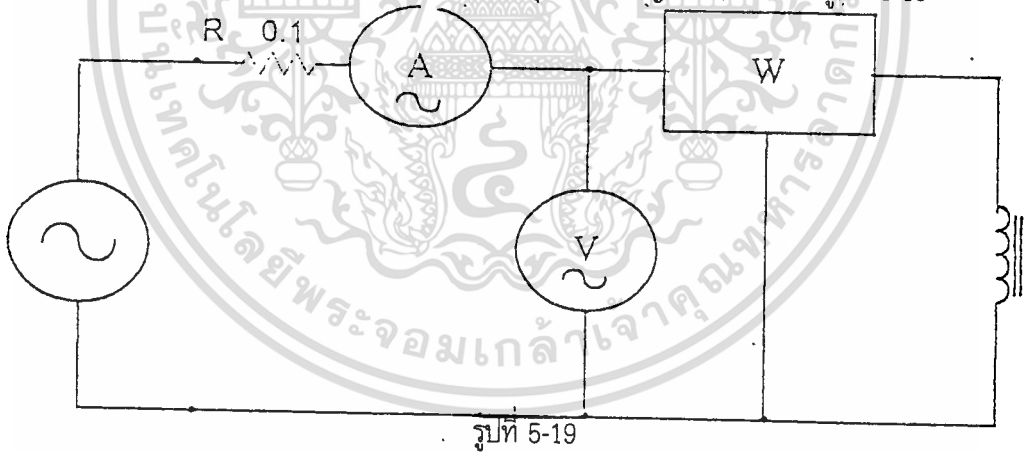
5.4 การหาค่าความเหนี่ยวนำ

5.4.1 อุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า (variac) ขนาด 15 A
2. ออสซิลอโคป พร้อมสายโพรบ (Probe) 2 เส้น
3. เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าสลับ 0 - 300 V
4. เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าสลับ 0 - 30 A
5. ชุดความต้านทาน 0.1Ω 10 W
6. ชุดต่อสาย (Junction Box)
7. สายไฟ

5.4.2 วิธีการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำ

1. นำตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักต่ำสุดขนาดใหญ่ มาต่อวงจร ดังรูปที่ 5-19



2. ทำการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักต่ำสุด ขนาดใหญ่ ที่ใช้งาน ได้จากสมการ

$$V = I|Z| \quad (5.6)$$

$$\text{เมื่อ } |Z| = (R_{dc}^2 + X_L^2)^{1/2}$$

$$X_L = 2\pi fL$$

I เป็นกระแสที่กักตัวของตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักต่ำสุด ขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการปรับเครื่องรับแรงดันไฟฟ้า ให้ได้กระแสที่พิกัด แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้จาก ข้อ 2 ให้ทำการปรับช่องว่างอากาศให้น้อยลง และถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่ามากกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้จาก ข้อ 2 ให้ทำการปรับช่องว่างอากาศให้มากขึ้น
4. ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า และช่องว่างอากาศที่ได้ใน ข้อ 3
5. ทำการเปิดช่องว่างอากาศออก จากนั้นทำการทดสอบซ้ำกับ ข้อ 3 และ ข้อ 4
6. ทำการปิดช่องว่างอากาศออก จากนั้นทำการทดสอบซ้ำกับ ข้อ 3 และ ข้อ 4
7. ทำการวัด และบันทึกค่าความเหนี่ยวนำโดยใช้ LCR METER ที่สภาวะ เปิดช่องว่างอากาศ , มี ช่องว่างอากาศ และปิดช่องว่างอากาศ
8. ทำการหาค่าความเหนี่ยวนำที่สภาวะเปิดช่องว่างอากาศ , มีช่องว่างอากาศ และปิดช่องว่างอากาศที่ได้จากการวัดทางไฟฟ้า แล้วเปรียบเทียบกับค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จาก ข้อ 7
9. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ ข้อ 1 ถึง ข้อ 12 แต่เปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำเป็นดังนี้
 - 9.1 ตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดเล็ก
 - 9.2 ตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาถูกที่สุด ขนาดใหญ่
 - 9.3 ตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาถูกที่สุด ขนาดเล็ก
 - 9.4 ตัวเหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดใหญ่
 - 9.5 ตัวเหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ขนาดเล็ก ตามลำดับ

5.4.3 ผลการทดสอบ

5.4.3.1 การหาค่าความเหนี่ยวนำจากการวัดทางไฟฟ้า แบ่งได้เป็นดังนี้

5.4.3.1.1 ตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็ก

ก. นำหนักเบาที่สุด

ตาราง 5-34

ช่องอากาศ	V (V)	I (A)	θ (Degree)	W (W)
gapless	23.40	5	60.00	8.50
design gap	17.20	5	77.84	6.75
open gap	5.60	5	68.10	4.00

ข. ราคาถูกที่สุด

ตาราง 5-35

ช่องอากาศ	V (V)	I (A)	θ (Degree)	W (W)
gapless	22.53	5	57.10	8.0
design gap	17.00	5	77.84	6.0
open gap	5.10	5	66.30	4.0

ค. ประสิทธิภาพสูงสุด

ตาราง 5-36

ช่องอากาศ	V (V)	I (A)	θ (Degree)	W (W)
gapless	22.3	5	57.60	11.00
design gap	15.80	5	77.84	6.00
open gap	4.80	5	61.60	3.75

5.4.3.1.2 ตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่

ก. น้ำหนักเบาที่สุด

ตาราง 5-37

ช่องอากาศ	V (V)	I (A)	θ (Degree)	W (W)
gapless	232.5	15	81.82	85.0
design gap	147.0	15	77.14	75.0
open gap	92.0	15	75.79	50.0

ข. ราคาถูกที่สุด

ตาราง 5-38

ช่องอากาศ	V (V)	I (A)	θ (Degree)	W (W)
gapless	201.5	15	90.0	75.0
design gap	130.0	15	87.1	50.0
open gap	45.0	15	85.1	25.0

ค. ประสิทธิภาพสูงสุด

ตาราง 5-39

ช่องอากาศ	V (V)	I (A)	θ (Degree)	W (W)
gapless	202.0	15	87.43	75.0
design gap	136.5	15	85.38	50.0
open gap	46.0	15	81.00	25.0

5.4.3.1.3 ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดทางไฟฟ้า

ตาราง 5-40

ประเภท	ค่าความเหนี่ยวนำ (L); mH		
	GAPLESS	DESIGN GAP	OPEN GAP
1. ตัวเหนี่ยวนำ ขนาดเล็ก			
1.1 น้ำหนักเบาที่สุด	14.89	10.95	3.57
1.2 ราคาถูกที่สุด	14.34	10.82	3.25
1.3 ประสิทธิภาพสูงสุด	14.20	10.06	3.06
2. ตัวเหนี่ยวนำ ขนาดใหญ่			
2.1 น้ำหนักเบาที่สุด	49.34	31.20	19.52
2.2 ราคาถูกที่สุด	42.76	27.58	9.54
2.3 ประสิทธิภาพสูงสุด	42.87	28.97	9.762

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3.2 การหาค่าความเหนี่ยวนำโดยใช้ LCR METER

ตาราง 5-41

ประเภท	ค่าความเหนี่ยวนำ (L) ; mH		
	GAPLESS	DESIGN GAP	OPEN GAP
1.ตัวเหนี่ยวนำ ขนาดเล็ก			
1.1 น้ำหนักเบาที่สุด	18.10	8.10	3.25
1.2 ราคาถูกที่สุด	15.50	8.45	2.90
1.3 ประสิทธิภาพสูงที่สุด	15.70	7.77	2.70
2. ตัวเหนี่ยวนำ ขนาดใหญ่			
2.1 น้ำหนักเบาที่สุด	117.60	27.10	18.20
2.2 ราคาถูกที่สุด	109.00	25.10	9.10
2.3 ประสิทธิภาพสูงที่สุด	95.60	24.10	9.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 การใช้วิธี Area Product ในการออกแบบ

5.5.1 ตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ กำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$L = 30 \text{ mH}, I = 15 \text{ A}, J = 200 \text{ A/mm}^2, B = 1 \text{ Tesla}, f = 50 \text{ Hz}$$

$$F_s = 0.95, F_w = 0.5, F_c = 1.5, D_c = 7836 \text{ kg/m}^3, K_i = 0.155$$

$$D_w = 0.0738 \text{ kg/m}^3, CC = 43 \text{ บ./กน.}, CW = 130 \text{ บ./กน.}$$

ขั้นตอนที่ 1

จาก

$$\begin{aligned} V &= 2 \pi f I L \\ &= 2 * \pi * 50 * 15 * 30 * 10^{-3} \\ &= 141.37 \text{ V} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2

$$\begin{aligned} A_p &= \left[\frac{VA \times 10^4}{4.44 B f F_w J} \right]^{1.14} \\ &= 2496 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

จากตารางภาคผนวก ก. จะได้ขนาดของแกนเหล็ก เท่ากับ 3 นิ้ว, ค่า A_c เท่ากับ 33.8 cm^2 และ $D = 2E = 7.56 \text{ ซม.}$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวด

$$N = \left[\frac{V \times 10^4}{4.44 B f A_c} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 188 \text{ รอบ}$$

คำนวณหาพื้นที่ของขดลวด

$$A_{cop} = \frac{I}{J}$$

$$= 7.5 \text{ mm}^2$$

จะได้ขดลวด SWG เบอร์ 10 ซึ่งมี $A_{cop} = 8.04 \text{ mm}^2$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาความกว้างของช่องอากาศ

$$I_g = \frac{0.4 \pi A_c N^2 \times 10^{-8}}{L}$$

$$= 0.5 \text{ cm}$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาน้ำหนักของขดลวด

$$W_w = 2 D_w A_c N F_c (2E + D)$$

$$= 2.49 \text{ กก.}$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาน้ำหนักของแกนเหล็ก

$$W_c = 2 D_c F_s \times 2E \times D \times 4E$$

$$= 19.9 \text{ กก.}$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาความสูญเสียในขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = 2F_c(2E + D)N\rho_r \times 10^{-6}$$

$$= 0.0312 \Omega$$

$$P_{cu} = I^2 R$$

$$= 7.02 \text{ วัตต์}$$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

$$P_c = W_c \times P_{cu}$$

$$= 19.9 * 2.1$$

$$= 41.79 \text{ วัตต์}$$

ขั้นตอนที่ 9 คำนวณหาค่าความสูญเสียในช่องอากาศ

$$P_g = K_e I_g^2 f B^2$$

$$= 29.3 \text{ วัตต์}$$

ขั้นตอนที่ 10 คำนวณหาค่าประสิทธิภาพ

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + LOSS}$$

$$= \frac{VA}{(VA) + (P_c + P_g + P_{cu})}$$

$$= 0.9645$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 11 คำนวณหาราคาของแกนเหล็กและราคาของขดลวด

$$C_c = W_l \times CC$$

$$= 855.70 \text{ บาท}$$

$$C_w = W_w \times CW$$

$$= 323.70 \text{ บาท}$$

ขั้นตอนที่ 12 คำนวณหาราคารวม

$$C_t = C_c + C_w$$

$$= 1179.40 \text{ บาท}$$

5.5.2 ตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็ก กำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$L = 10 \text{ mH}, I = 5 \text{ A}, J = 200 \text{ A/mm}^2, B = 1 \text{ Tesla}, f = 50 \text{ Hz}$$

$$F_s = 0.95, F_w = 0.5, F_c = 1.5, D_c = 7836 \text{ kg/m}^3, D_w = 0.0738 \text{ kg/m}^3$$

$$K_f = 0.155, CC = 38 \text{ บ./กก.}, CW = 130 \text{ บ./กก.}$$

ขั้นตอนที่ 1

จาก
$$V = 2 \pi f I L$$

$$= 2 * \pi * 50 * 15 * 30 * 10^{-3}$$

$$= 15.7 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2

$$A_p = \left[\frac{VA \times 10^4}{4.44 B f F_w J} \right]^{1.14}$$

$$= 5.825 \text{ cm}^4$$

จากตารางภาคผนวก ก. จะได้ขนาดของแกนเหล็กเท่ากับ 1.5 นิ้ว และค่า A_c เท่ากับ 8.77 cm^2

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดหาจำนวนรอบของขดลวด

$$N = \left[\frac{V * 10^4}{4.44 * B * f * A_c} \right]$$

$$= 80 \text{ รอบ}$$

หาขนาดขดลวด

$$A_{cop} = \frac{I}{J}$$

$$= 2.5 \text{ mm}^2$$

จะได้ขดลวด SWG เบอร์ 15 ซึ่งมี $A_{cop} = 2.54 \text{ mm}^2$

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดหาความกว้างของช่องอากาศ

$$l_g = \frac{0.4 \pi A_c N^2 \times 10^{-8}}{L}$$

$$= 0.07 \text{ cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาหน้าหนักของขดลวด

$$W_w = 2 D_w A_c N F_c (2E + D)$$

$$= 1.38 \text{ กก.}$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาหน้าหนักของแกนเหล็ก

$$W_c = 2 D_c (F_r) \times 2E \times D \times 4E$$

$$= 1.19 \text{ กก.}$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาความสูญเสียในขดลวด

$$R = 2 F_c (2E + D) N \rho_r \times 10^{-6}$$

$$= 0.0156 \Omega$$

$$P_{cu} = I^2 R$$

$$= 0.39 \text{ วัตต์}$$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาความสูญเสียในแกนเหล็ก

$$P_c = W_c \times P_c$$

$$= 1.19 * 6.502$$

$$= 7.74 \text{ วัตต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 9 คำนวณหาความสูญเสียในช่องอากาศ

$$P_g = K_e I_g f B^2$$

$$= 1.6 \text{ วัตต์}$$

ขั้นตอนที่ 10 คำนวณหาประสิทธิภาพ

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + \text{LOSS}}$$

$$= \frac{VA}{(VA) + (P_c + P_g + P_{cu})}$$

$$= 0.8895$$

ขั้นตอนที่ 11 คำนวณหาราคาของแกนเหล็กและราคาของขดลวด

$$C_c = W_l \times CC$$

$$= 51.17 \text{ บาท}$$

$$C_w = W_w \times CW$$

$$= 179.40 \text{ บาท}$$

ขั้นตอนที่ 12 คำนวณหาราคารวม

$$C_t = C_c + C_w$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสร้างตัวเหนี่ยวนำทั้ง 2 วิธี คือ จากโปรแกรมอ็อพทีไมเซชัน และวิธี Area Product โดยนำคุณสมบัติที่ได้จากโปรแกรมอ็อพทีไมเซชันมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติที่ได้จากวิธี Area Product เช่น ตัวอย่างคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักเบาที่สุด ดังในตารางที่ 5-42 ($L = 30 \text{ mH}$, $I = 15 \text{ A}$) และตารางที่ 5-43 ($L = 10 \text{ mH}$, $I = 5 \text{ A}$)

ตารางที่ 5-42

คุณสมบัติ	ค่าที่ได้จากการคำนวณ		Area Product	
2E	2.50614	นิ้ว	2.97	นิ้ว
ความหนา	5.3820	ซม.	7.56	ซม.
จำนวนรอบ	139	รอบ	188	รอบ
น้ำหนักรวม	13.3568	กก.	22.39	กก.
น้ำหนักของแกนเหล็ก	9.74125	กก.	19.90	กก.
น้ำหนักของขดลวด	3.61557	กก.	2.49	กก.
ราคารวม	888.898	บาท	1179.4	บาท
ราคาของแกนเหล็ก	418.874	บาท	855.7	บาท
ราคาของขดลวด	470.024	บาท	323.7	บาท
ความสูญเสียรวม	57.3185	วัตต์	78.11	วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	31.1720	วัตต์	41.79	วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	26.1465	วัตต์	7.02	วัตต์
ความสูญเสียในช่องอากาศ	0.00	วัตต์	29.30	วัตต์
ประสิทธิภาพ	97.29	%	96.45	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-43

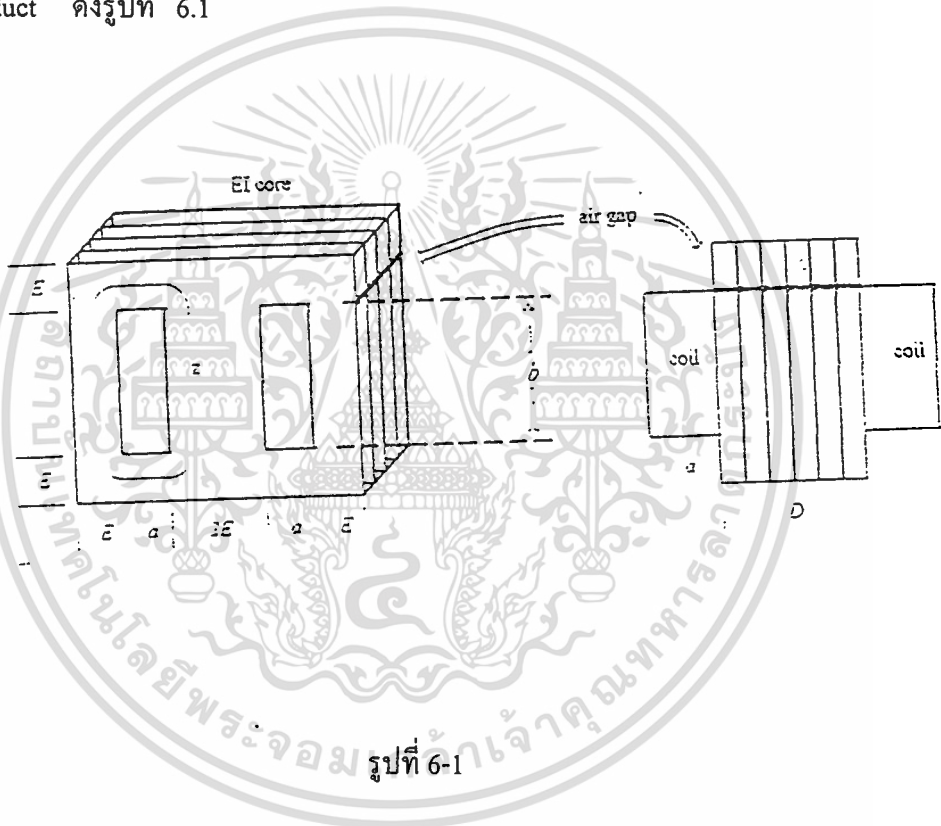
คุณสมบัติ	ค่าที่ได้จากการคำนวณ	Area Product
2E	1.1736 นิ้ว	1.16 นิ้ว
ความหนา	2.64879 ซม.	2.96 ซม.
จำนวนรอบ	68 รอบ	80 รอบ
น้ำหนักรวม	1.8989 กก.	2.57 กก.
น้ำหนักของแกนเหล็ก	1.0513 กก.	1.19 กก.
น้ำหนักของขดลวด	0.8475 กก.	1.38 กก.
ราคารวม	150.14 บาท	230.57 บาท
ราคาของแกนเหล็ก	110.18 บาท	51.17 บาท
ราคาของขดลวด	39.95 บาท	179.40 บาท
ความสูญเสียรวม	4.36 วัตต์	9.73 วัตต์
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	2.48 วัตต์	7.74 วัตต์
ความสูญเสียในขดลวด	1.88 วัตต์	0.39 วัตต์
ความสูญเสียในช่องอากาศ	0.00 วัตต์	1.6 วัตต์
ประสิทธิภาพ	94.44 %	88.95 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลและวิจารณ์การทดสอบ

1. รูปร่างของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมอ็อพทิไมเซชันของทั้ง โปรแกรมออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้านำหนักเบาที่สุด , โปรแกรมออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าราคาถูกที่สุด และ โปรแกรมออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด เปรียบเทียบกับวิธี Area Product ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6-1

สรุปผลได้ว่า

$$2E_{OP} < 2E_{AP} \quad (6.1)$$

$$D_{OP} < D_{AP} \quad (6.2)$$

เมื่อ

D_{OP} คือ ความหนาของตัวเหนี่ยวนำที่คำนวณโดยวิธีอ็อพทิไมเซชัน

D_{AP} คือ ความหนาของตัวเหนี่ยวนำที่คำนวณโดยวิธี Area Product

$2E_{OP}$ คือ ขนาดของแกนเหล็กที่คำนวณโดยวิธีอ็อพทิไมเซชัน

$2E_{AP}$ คือ ขนาดของแกนเหล็กที่คำนวณโดยวิธี Area Product

1. จากสมการ (6-1) และ (6-2) จะเห็นได้ว่า ค่าของน้ำหนักของแกนเหล็กที่ได้จากโปรแกรมอ็อพทิไมเซชันจะน้อยกว่าค่าของน้ำหนักที่คำนวณได้จากวิธี Area Product เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่ได้จากโปรแกรมอ็อพทิไมเซชันมีค่าน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดที่ได้จากวิธี Area Product
 2. จากสมการ (6-1) และ (6-2) จะเห็นได้ว่า เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีค่าลดลง จะทำให้จำนวนรอบของขดลวดที่ได้จากโปรแกรมอ็อพทิไมเซชันมีค่ามากกว่าจำนวนรอบที่ได้จากวิธี Area Product
 3. วิธีโปรแกรมอ็อพทิไมเซชันสามารถออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีน้ำหนักรวมน้อยกว่า เมื่อเทียบกับวิธี Area Product
 4. วิธีโปรแกรมอ็อพทิไมเซชัน สามารถออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีราคาถูกลงกว่าเมื่อเทียบกับวิธี Area Product
 5. วิธีโปรแกรมอ็อพทิไมเซชัน สามารถออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับวิธี Area Product
2. การออกแบบโปรแกรมอ็อพทิไมเซชันของตัวเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ คือ
- ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีน้ำหนักเบาที่สุด
 - ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีราคาถูกที่สุด
 - ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด
- โดยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในแต่ละรูปแบบ จะถูกออกแบบทั้งตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดเล็ก . และตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดใหญ่ เพื่อแสดงว่าโปรแกรมอ็อพทิไมเซชันสามารถออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้แกนเหล็กมาตรฐานตั้งแต่ขนาดเล็กที่สุดจนถึงแกนเหล็กมาตรฐานขนาดใหญ่ที่สุด คือตั้งแต่ 1/2 นิ้ว จนถึง 4 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 ดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้ก่อนปรับเข้าสู่เกณฑ์มาตรฐาน

จากการสร้างดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมน้ำหนักเบาที่สุดและโปรแกรมราคาถูกที่สุด จะได้ดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีลักษณะคล้ายกัน เนื่องจากทั้ง 2 โปรแกรมมีฟังก์ชันเป้าหมายคล้ายกัน แต่จากโปรแกรมประสิทธิภาพสูงที่สุด จะได้ดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีลักษณะต่างจาก 2 โปรแกรมข้างต้น

จากคุณสมบัติของดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของทั้ง 3 โปรแกรม จะเห็นว่าดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของ โปรแกรมน้ำหนักเบาที่สุดจะดีที่สุด เพราะเมื่อน้ำหนักเบาที่สุดจะทำให้มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพที่ยอมรับได้ในการนำไปใช้งาน

2.2 ดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้หลังจากปรับเข้าสู่เกณฑ์มาตรฐาน

1. ดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดเล็ก จะพบว่าดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของทั้ง โปรแกรมน้ำหนักเบาที่สุด , โปรแกรมราคาถูกที่สุด และ โปรแกรมประสิทธิภาพสูงที่สุด จะมีลักษณะและรูปร่างเหมือนกันทุกประการ
2. ดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดใหญ่ จะพบว่าดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของ โปรแกรมราคาถูกที่สุด และดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของ โปรแกรมประสิทธิภาพสูงที่สุด จะมีลักษณะและรูปร่างเหมือนกันทุกประการ แต่ดันแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของ โปรแกรมน้ำหนักเบาที่สุด จะมีลักษณะต่างจาก 2 แบบข้างต้น

3. ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของด้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ออกแบบโดยโปรแกรมอ็อพทิไมเซชันของทั้งโปรแกรมน้ำหนักเบาที่สุด , โปรแกรมราคาถูกที่สุด และโปรแกรมประสิทธิภาพสูงที่สุด จะอยู่ในช่วง Close gap ถึง Open gap นอกจากนี้ยังสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของด้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ โดยการปรับช่องอากาศ ตั้งแต่ Close gap ถึง Open gap เช่น ด้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดเล็ก สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 3 mH ถึง 14 mH เป็นต้น
4. ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่วัดทางไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดโดย LCR meter โดยค่าที่วัดได้ทั้ง 2 วิธีจะมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งความแตกต่างนี้เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux) และความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าจากเครื่องวัด
5. การออกแบบโปรแกรมอ็อพทิไมเซชันทั้ง 3 รูปแบบ จะมีประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมการผลิตตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI โดยจะทำให้สามารถใช้วัตถุดิบได้อย่างคุ้มค่า จึงช่วยลดต้นทุนการผลิต และเกิดผลกำไรตามมา และ ทฤษฎีอ็อพทิไมเซชันนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้ในการออกแบบงานด้านอื่นๆ ได้ เช่น การออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ เป็นต้น

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธี Area Product

ก.1 บทนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Inductor) คล้ายกับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ถ้าไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้ากระแสตรงในแกนเหล็ก การคำนวณในการออกแบบจะมีความแม่นยำมาก กำลังงานที่ได้ (Apparent power : P_t) ของตัวเหนี่ยวนำ คือค่าโวลต์-แอมแปร์ของเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นผลมาจากกระแสกระตุ้น และแรงดันกระตุ้นที่ใส่ให้แก่ตัวเหนี่ยวนำ

$$P_t = VA$$

(ก.1)

ก.2 ความสัมพันธ์ของ A_p และ A_p Capability ของตัวเหนี่ยวนำ

ค่า A_p ขึ้นอยู่กับค่าโวลต์-แอมแปร์ของแกนเหล็ก เขียนด้วยสมการ

$$A_p = \left[\frac{VA \times 10^4}{4.44 B_m f K_v K_j} \right]^{1.14}$$

(ก.2)

เมื่อ

K_j คือค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นกระแส

K_v คือ window utilization factor

f คือความถี่ (Hz)

B_m คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

จากที่กล่าวมาแล้วจะเป็นว่าแฟคเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก, K_j , K_v มีผลต่อพื้นที่ตัวเหนี่ยวนำ ค่าคงที่ K_j เป็นตัวควบคุมความสูญเสียในขดลวด

ก.3 พื้นฐานในการพิจารณา

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำเชิงเส้นขึ้นอยู่กับปัจจัย 4 อย่าง คือ

1. ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ
2. แรงดันไฟฟ้า
3. ความถี่
4. ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นได้ ผู้ออกแบบต้องหาค่าสูงสุดของ B_{ac} ที่ไม่ทำให้แม่เหล็กอิ่มตัว และ make tradeoffs ที่จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำสูงสุดสำหรับปริมาตรที่กำหนดให้วัสดุที่ใช้ทำแกนเป็นตัวกำหนดค่าสูงสุดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งสามารถทนทานได้

จำนวนรอบของขดลวดสามารถคำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ดังนี้

$$N = \frac{E \times 10^4}{4.44 B_n f A_c} \quad (\text{ก.3})$$

ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็กที่มีช่องอากาศ (air gap) แสดงดังนี้

$$L = \frac{0.4 \pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{l_g + l_m / \mu_r} \quad (\text{ก.4})$$

ค่าความเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับผลของความยาวของเส้นทางแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลรวมความยาวของช่องอากาศ (l_g) และอัตราส่วนของความยาวเฉลี่ยของแกนกับค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (l_m / μ_r)

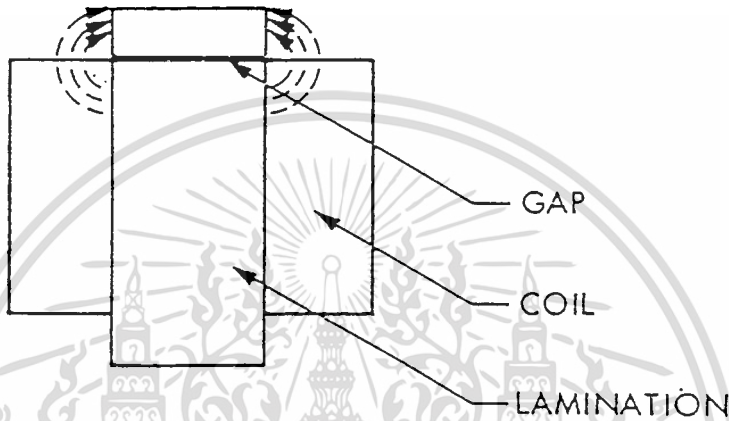
เมื่อค่า l_g มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่า l_m / μ_r เนื่องจาก μ_r มีค่าสูง การเปลี่ยนแปลงของค่า μ_r ไม่มีผลต่อความยาวของเส้นทางแม่เหล็กหรือค่าความเหนี่ยวนำ

สมการค่าเหนี่ยวนำลดรูปได้เป็น

$$L = \frac{0.4 \pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{l_g} \quad (\text{ก.5})$$

การคำนวณครั้งสุดท้ายของช่องอากาศเป็นตัวพิจารณาผลของฟลักซ์แม่เหล็กโค้งตัวในช่องอากาศ (fringing flux) ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงของช่องอากาศ, รูปทรงของขั้ว และรูปร่างขนาดที่ตั้งของลวดตัวนำ

fringing flux ทำให้ผลรวมความต้านทานแม่เหล็กลดลง และทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น โดยที่ fringing flux factor (F) ซึ่งมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากสมการ (ก.5) fringing flux มากทำให้ผลรวมของช่องอากาศมาก



รูปที่ ก.1

สมการของ fringing flux factor คือ

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_c}} \ln\left(\frac{2G}{l_g}\right) \tag{ก.6}$$

เมื่อ G เป็นค่าของการใช้แผ่นเหล็กบางเรียงซ้อนกันเป็นแกน (laminations)

ค่าความเหนี่ยวนำ (L) ที่คำนวณจากสมการ (ก.5) ไม่ได้รวมผลของ fringing flux ค่าของความเหนี่ยวนำ (L') จึงรวม fringing flux ไว้ด้วย

$$L' = \frac{0.4 \pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{l_g} \tag{ก.7}$$

ความสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำกระแสสลับประกอบด้วยความสูญเสียในแกนเหล็ก (P_c) .ความสูญเสียในขดลวด (P_{cu}) และอาจสูญเสียในช่องอากาศ (P_g) ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของแกน และค่า μ ในการคำนวณการคำนวณเป็นเอกสารอ้างอิงและให้คำปรึกษาฟรี โทร 02-2525252 หรือ 02-2525253 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อความสูญเสียในขดลวด มีค่าเท่ากับความสูญเสียในแกนเหล็ก เหมือนในหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อไม่มีช่องอากาศ ความสูญเสียในช่องอากาศจะเป็นศูนย์ แต่ถ้าช่องอากาศ มีความกว้างเพิ่มขึ้นจะเกิด fringing flux เพิ่มขึ้น และ fringing flux บางส่วนจะทำให้เกิดกระแสไหลวน ทำให้เกิดความสูญเสียเพิ่มขึ้นอีก ลักษณะทางเรขาคณิตของแกนเหล็กก็มีผลต่อ fringing flux ค่าความสูญเสียในช่องอากาศขึ้นอยู่กับจำนวน fringing flux

$$P_g = K_i E l_g f B_m^2 \quad (ก.8)$$

เมื่อ E คือ strip on torque width (cm) จากตารางที่ ก.5

ตาราง ก.1 Gap loss coefficient

Configuration	K_i
Two-coil C core	0.0388
Single-coil C core	0.075
Lamination	0.155

ก.4 กระบวนการออกแบบ

1. หาค่ากำลังที่เกิดขึ้น (apparent power : P_t) จากสมการ (ก.1)

$$P_t = VA$$

2. หาพื้นที่ A_p จากสมการ (ก.2)

$$A_p = \left[\frac{VA \times 10^4}{4.44 B_m f K_v K_j} \right]^{1.14}$$

3. เลือกขนาดของแกนที่ใช้แผ่นเหล็กบางเรียงซ้อนกันจากตาราง ก.3 ด้วยค่า A_p โดยค่าในตารางที่ใกล้เคียงกับ A_p ที่หาได้ต่างกัน 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หาคำนวนของขดลวดจากกฎของฟาราเดย์ สมการ (ก.3)

$$N = \frac{E \times 10^4}{4.44 B_n f A_c}$$

และพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก A_c ดูจากตาราง ก.3

5. หาค่าอิมพีแดนซ์

$$X_L = \frac{E}{I}$$

6. หาค่าความเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{X_L}{2 \pi f}$$

7. หาคความกว้างของช่องอากาศจากค่าความเหนี่ยวนำจากสมการ (ก.5)

$$l_g = \frac{0.4 \pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{L}$$

ส่วนมากจะใช้กระดาษสีน้ำตาลกันเป็นช่องอากาศ แต่กระดาษโดยส่วนมากหนาเป็นมิลลิเมตร ดังนั้นความกว้างช่องอากาศซึ่งหาได้เป็นเซนติเมตรต้องเปลี่ยนเป็นมิลลิเมตรก่อนโดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$cm \times 397.7 = mils$$

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยไม่มีฟลักซ์กระแตรง (DC flux)

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้แกนเหล็กที่ใช้แผ่นเหล็กบางเรียงซ้อนกันจะใช้วัสดุแทนที่ช่องอากาศระหว่างค่า E และ I เมื่อใช้วิธีปรับช่องอากาศนี้ทำให้วัสดุเพียงครึ่งหนึ่ง

8. หาจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กรั้วจากสมการ (ก.6) , ค่า G ดูได้ตาราง ก.3

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_c}} \ln\left(\frac{2G}{l_g}\right)$$

หลังจากหาฟลักซ์ซึ่ง F แทนค่าในสมการ (ก.7) จัดรูปสมการและหาจำนวนรอบ

$$N = \left(\frac{l_g L}{0.4 \pi A_c F \times 10^{-8}} \right)^{1/2}$$

การออกแบบควรตรวจสอบความถูกต้องว่าการลดลงหาจำนวนรอบจะไม่ทำให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก

9. หาความหนาแน่นของกระแสโดยใช้ตาราง ก.2

$$J = K_j A_p^{-0.12}$$

10. หาขนาดของเส้นลวด $A_w(B)$

$$A_w(B) = \frac{I}{J}$$

11. เลือกขนาดของลวด AWG จากตาราง ก.4 หลัก A

กฎของการหาขนาดเส้นลวดไม่ได้แสดงในตาราง ควรเลือกลวดที่มีขนาดที่เล็กกว่าที่เลือก

12. หาค่าความต้านทานของขดลวดในตาราง ก.4 หลัก C และหา MLT จากตาราง ก.3

$$R = MLT \times (\text{column C}) \times 5 \times 10^{-6}$$

13. หากำลังสูญเสียในขดลวด

$$P_{cu} = I^2 R$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟการสูญเสียในแกนเหล็ก เราสามารถหาความสูญเสียในแกนเหล็กได้

$$P_c = W_l \times P_c$$

14. หาความสูญเสียในช่วงจากสมการ (ก.8) ค่า E ดูจากตาราง ก.5

$$P_g = K_i E l_g f B_m^2$$

15. หาความสูญเสียของทองแดง , เหล็ก และช่องอากาศ

$$P_t = P_{cu} + P_c + P_g$$

ตาราง ก.2 ค่าคงที่ของโครงสร้างแกน

Core	Losses	K_i (25°C)	K_i (50°C)	(x)	K_c	K_w	K_s
Pot core	$P_{cu} = P_{fe}$	433	632	-0.17	33.8	48.0	14.5
Powder core	$P_{cu} \gg P_{fe}$	403	590	-0.12	32.5	58.8	13.1
Lamination	$P_{cu} = P_{fe}$	366	534	-0.12	41.3	68.2	19.7
C core	$P_{cu} = P_{fe}$	323	468	-0.14	39.2	66.6	17.9
Single-coil	$P_{cu} \gg P_{fe}$	395	569	-0.14	44.5	76.6	25.6
Tape-wound core	$P_{cu} = P_{fe}$	250	365	-0.13	50.9	82.3	25.0

$J = K_i A_p^{0.5}$	$A_i = K_i A_p^{0.50}$
$W_l = K_w A_p^{0.75}$	$Vol = K_s A_p^{0.75}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.3
คุณสมบัติของแผ่นเหล็กบาง

1	2	3	4	5	6	7	8
Core	A_n , cm ²	A_p , cm ²	MLT, cm	N AWG	$\Omega(50^\circ\text{C})$	P_E	$I = \sqrt{\frac{W}{\Omega}}$
1 EE-3031	4.07	0.0088	1.72	90 30	0.58	0.123	0.323
2 EE-2829	6.53	0.0228	2.33	147 30	1.30	0.199	0.276
3 E1-187	14.2	0.108	3.20	314 30	3.82	0.432	0.237
4 EE-2425	23.3	0.293	5.08	498 30	9.61	0.714	0.192
5 EE-2627	38.5	0.906	5.79	245 25	1.68	1.22	0.602
6 E1-375	46.2	1.23	6.30	350 25	2.62	1.43	0.522
7 E1-50	53.2	1.75	7.09	263 25	2.21	1.73	0.625
8 E1-21	62.1	2.36	7.57	372 25	3.34	1.98	0.544
9 E1-625	83.2	4.29	8.84	503 25	5.27	2.70	0.505
10 E1-75	120.0	8.89	10.6	211 20	0.826	3.90	1.54
11 E1-87	165.0	16.5	12.3	296 20	1.34	5.28	1.40
12 E1-100	213.0	28.1	14.5	386 20	2.07	6.90	1.29
13 E1-112	270.0	44.9	16.0	492 20	2.91	8.76	1.23
14 E1-125	333.0	68.7	17.7	625 20	4.09	10.8	1.15
15 E1-138	403.0	107.0	19.5	740 20	5.33	13.0	1.10
16 E1-150	473.0	143.00	21.2	893 20	6.99	15.5	1.05
17 E1-175	742.0	263.0	24.7	1080 20	9.85	21.1	1.034
18 E1-36	649.0	324.0	26.5	1701 20	16.6	23.3	0.836
19 E1-19	1069.0	601.0	31.7	2836 20	33.8	32.8	0.696

Copper loss = iron loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.3 (ต่อ)

9	10	11	12	13	14		15	16
					Weight			
$\Delta T(25^{\circ}\text{C})$ $J = I/\text{cm}^2$	$\Omega(75^{\circ}\text{C})$	P_{\pm}	$I = \sqrt{\frac{W}{\Omega}}$	$\Delta T(50^{\circ}\text{C})$ $J = I/\text{cm}^2$	fe	cu	Volume, cm^3	$A_c \text{ cm}^2$
638	0.645	0.288	0.472	932	1.02	1.02	0.651	0.0502
546	1.43	0.464	0.403	795	2.19	1.59	1.35	0.0907
469	4.19	1.01	0.347	685	7.09	3.08	4.34	0.204
380	10.5	1.67	0.281	555	15.5	9.06	9.22	0.363
371	1.85	2.84	0.876	540	45.8	15.5	19.1	0.816
322	2.87	3.34	0.762	470	49.7	24.7	25.3	0.816
385	2.43	4.04	0.912	562	90.6	31.7	36.8	1.45
335	3.66	4.62	0.793	489	99.3	41.0	39.2	1.45
312	5.79	6.50	0.737	455	179	44.4	60.0	2.27
296	0.906	9.10	2.24	432	312	105	104.0	3.27
270	1.48	12.3	2.04	393	481	135	164.0	4.45
249	2.27	16.1	1.88	363	712	241	246.0	5.81
237	3.19	20.4	1.79	344	1029	342	350.0	7.34
222	4.49	25.3	1.68	324	1414	460	481.0	9.07
213	5.85	30.2	1.61	310	1880	680	629.0	11.6
203	7.67	36.3	1.54	296	2457	906	829.0	13.1
199	10.8	49.3	1.51	291	3906	1273	1312.0	17.8
161	18.3	54.5	1.22	235	3575	2355	1654.0	15.3
134	37.1	76.5	1.015	196	4389	3805	2875.0	17.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.4

คุณสมบัติของขดลวด

AWG	Bare Area		Resistance		Heavy Synthetics									
	cm ² × 10 ⁻³ (footnote b)	CIR-MIL ²	10 ⁻⁴ Ω cm at 20°C	cm ² × 10 ⁻³	Area CIR-MIL ²	Diameter cm	Diameter inch ²	Turns per cm	Turns per inch ²	Turns per cm ²	Turns per inch ²	Weight g/cm		
10	52.61	10384	32.70	55.9	11046	0.267	0.1051	3.87	9.5	10.73	69.20	0.468		
11	41.68	8226	41.37	44.5	8798	0.238	0.0938	4.36	10.7	13.48	89.95	0.3750		
12	33.08	6529	52.09	35.64	7022	0.213	0.0838	4.85	11.9	16.81	108.4	0.2977		
13	26.26	5184	65.64	28.36	5610	0.190	0.0749	5.47	13.4	21.15	136.4	0.2367		
14	20.82	4109	82.80	22.95	4556	0.171	0.0675	6.04	14.8	26.14	168.6	0.1879		
15	16.51	3260	104.3	18.37	3624	0.153	0.0602	6.77	16.6	32.66	210.6	0.1492		
16	13.07	2581	131.8	14.73	2905	0.137	0.0539	7.32	18.6	40.73	262.7	0.1184		
17	10.39	2052	165.8	11.68	2323	0.122	0.0482	8.18	20.8	51.36	331.2	0.0943		
18	8.228	1624	209.5	9.326	1857	0.109	0.0431	9.13	23.2	64.33	414.9	0.07472		
19	6.531	1289	263.9	7.539	1490	0.0980	0.0386	10.19	25.9	79.85	515.0	0.05940		
20	5.188	1024	332.3	6.065	1197	0.0879	0.0346	11.37	28.9	98.93	638.1	0.04726		
21	4.116	812.3	418.9	4.837	954.8	0.0785	0.0309	12.75	32.4	124.0	799.8	0.03757		
22	3.243	640.1	531.3	3.857	761.7	0.0701	0.0276	14.25	36.2	155.5	1003	0.02965		
23	2.588	510.8	666.0	3.135	620.0	0.0632	0.0249	15.82	40.2	191.3	1234	0.02372		
24	2.047	404.0	842.1	2.514	497.3	0.0566	0.0223	17.63	44.8	238.6	1539	0.01884		
25	1.623	320.4	1062.0	2.002	396.0	0.0505	0.0199	19.80	50.3	299.7	1933	0.01498		
26	1.280	252.8	1345.0	1.603	316.8	0.0452	0.0178	22.12	56.2	374.2	2414	0.01185		
27	1.021	201.6	1687.6	1.313	259.2	0.0409	0.0161	24.41	62.1	456.9	2947	0.00945		
28	0.8046	158.8	2142.7	1.0515	207.3	0.0366	0.0144	27.32	69.4	570.6	3680	0.00747		
29	0.6470	127.7	2664.3	0.8548	169.0	0.0330	0.0130	30.27	76.9	701.9	4527	0.00602		
30	0.5067	100.0	3402.2	0.6785	134.5	0.0294	0.0116	33.93	86.2	884.3	5703	0.00472		
31	0.4013	79.21	4294.6	0.5596	110.2	0.0267	0.0105	37.48	95.2	1072	6914	0.00372		
32	0.3242	64.00	5314.9	0.4559	90.25	0.0241	0.0095	41.45	105.3	1316	8488	0.00305		
33	0.2554	50.41	6748.6	0.3662	72.25	0.0216	0.0085	46.33	117.7	1638	10565	0.00241		
34	0.2011	39.69	8572.8	0.2863	56.25	0.0191	0.0075	52.48	133.3	2095	13512	0.00189		
35	0.1589	31.36	10849	0.2268	44.89	0.0170	0.0067	58.77	149.3	2545	17060	0.00150		
36	0.1266	25.00	13608	0.1813	36.00	0.0152	0.0060	65.62	166.7	3309	21343	0.00119		
37	0.1026	20.25	16801	0.1538	30.25	0.0140	0.0055	71.57	181.8	3901	25161	0.000977		
38	0.08107	16.00	21266	0.1207	24.01	0.0124	0.0049	80.35	204.1	4971	32062	0.000773		
39	0.06207	12.25	27775	0.0912	18.49	0.0109	0.0043	91.57	232.6	6437	41518	0.000593		
40	0.04869	9.61	35400	0.0723	14.44	0.0096	0.0038	103.6	263.2	8298	53522	0.000464		
41	0.03972	7.84	43405	0.0584	11.56	0.00863	0.0030	115.7	294.1	10273	66260	0.000379		
42	0.03166	6.25	55428	0.04558	9.00	0.00762	0.0024	131.2	333.3	13163	84901	0.000299		
43	0.02452	4.84	70308	0.03683	7.29	0.00685	0.0027	145.8	370.4	16291	105076	0.000233		
44	0.0202	4.00	85072	0.03165	6.25	0.00635	0.0025	157.4	400.0	18957	122272	0.000195		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.5
แผ่นเหล็กบางแบบ EI และ EE

Cat. no.	D (cm) 1	E (cm) 2	F (cm) 3	G (cm) 4	MPL (cm) 5	HT (cm) 6	WTH (cm) 7	LT (cm) 8
1-94EI	.236	.236	.239	.396	1.7	.6	.7	1.0
1-30-31EE	.236	.236	.239	.714	2.4	1.0	.7	1.0
1-28-29EE	.317	.317	.317	.795	2.9	1.1	1.0	1.3
1-32-33EE	.356	.356	.381	.698	2.9	1.1	1.1	1.5
1-186EI	.478	.478	.478	.635	3.2	1.1	1.4	1.9
1-185EI	.478	.478	.478	.874	3.7	1.3	1.4	1.9
1-187EI	.478	.478	.478	1.113	4.1	1.6	1.4	1.9
1-188EI	.478	.478	.478	1.587	5.1	2.1	1.4	1.9
1-186-187EE	.478	.478	.478	1.748	5.4	2.2	1.4	1.9
1-186-188EE	.478	.478	.478	2.222	6.4	2.7	1.4	1.9
1-187-188EE	.478	.478	.478	2.697	7.3	3.2	1.4	1.9
1-25EIS	.635	.635	.635	.952	4.4	1.6	1.6	1.9
1-24-25EE	.635	.635	.635	1.270	5.1	1.9	1.9	2.5
1-26-38EE	.952	.952	.635	1.321	5.8	2.3	2.2	3.2
1-312EI	.795	.795	.952	1.984	7.5	2.8	2.7	3.5
1-26-27EE	.952	.952	.635	1.748	6.7	2.7	2.2	3.2
1-27-38EE	.952	.952	.635	2.113	7.4	3.1	2.2	3.2
1-375EI	.952	.952	.795	1.905	7.3	2.9	2.5	3.5
1-50EI	1.270	1.270	.635	1.905	7.6	3.2	2.5	3.8
1-21EI	1.270	1.270	.795	2.065	8.3	3.3	2.9	4.1
1-625EI	1.587	1.587	.795	2.383	9.5	4.0	3.2	4.8
1-68EI	1.748	1.748	.874	2.619	10.5	4.4	3.5	5.2
1-202EI	1.905	1.905	1.270	2.286	10.9	3.9	4.4	7.0
1-75EI	1.905	1.905	.952	2.857	11.4	4.8	3.8	5.7
1-87EI	2.222	2.222	1.113	3.335	13.3	5.6	4.4	6.7
1-100EI	2.540	2.540	1.270	3.810	15.2	6.3	5.1	7.6
1-112EI	2.857	2.857	1.430	4.288	17.2	7.1	5.7	8.6
1-125EI	3.175	3.175	1.587	4.762	19.0	7.9	6.3	9.5
1-138EI	3.492	3.492	1.748	5.240	21.0	8.7	7.0	10.5
1-150EI	3.810	3.810	1.905	5.715	22.9	9.5	7.6	11.4
1-145EI	3.683	3.683	2.349	7.620	27.3	11.4	8.4	12.1
1-36EI	4.127	4.127	3.175	6.667	27.9	10.8	10.5	14.6
1-175EI	4.445	4.445	2.222	6.680	26.7	11.1	8.9	13.3
1-19EI	4.445	4.445	4.445	7.620	33.0	12.1	13.3	17.8
1-212EI	5.397	5.397	2.700	8.098	32.4	13.5	10.8	16.2
1-225EI	5.715	5.715	2.857	8.572	34.3	14.3	11.4	17.1
1-20EI	6.350	6.350	4.762	9.525	41.3	15.9	15.9	22.2
1-3EI	7.620	7.620	3.810	11.430	45.7	19.0	15.2	22.9
1-301EI	7.620	7.620	5.715	11.430	49.5	19.0	19.0	26.7
1-4EI	10.160	10.160	5.080	15.240	61.0	25.4	20.3	30.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.5 (ต่อ)

Gross WTFE (kg) 9	WTCU (kg) 10	MLT (cm) 11	Gross A_c cm ² 12	Gross W_c cm ² 13	Gross A_z cm ⁴ 14	Gross K_z cm ⁵ 15	A_z cm ² 16
.001	.001	2.1	.06	.09	.01	.000056	3.0
.001	.001	2.1	.06	.17	.01	.000101	4.1
.002	.002	2.7	.10	.25	.03	.000384	6.6
.003	.003	3.0	.13	.27	.03	.000563	7.7
.006	.004	3.8	.23	.30	.07	.001652	11.0
.006	.006	3.8	.23	.42	.10	.002274	12.6
.007	.007	3.8	.23	.53	.12	.002895	14.2
.009	.010	3.8	.23	.76	.17	.004131	17.4
.009	.011	3.8	.23	.83	.19	.004547	18.5
.011	.014	3.8	.23	1.06	.24	.005783	21.7
.013	.017	3.8	.23	1.29	.29	.007019	24.8
.014	.011	4.9	.40	.60	.24	.007960	20.6
.016	.014	4.9	.40	.81	.53	.010614	23.4
.040	.019	6.2	.91	.84	.76	.044456	33.8
.036	.044	6.6	.63	1.89	1.19	.045893	47.2
.046	.025	6.2	.91	1.11	1.01	.058819	38.4
.051	.030	6.2	.91	1.34	1.22	.071129	42.4
.051	.036	6.7	.91	1.51	1.37	.074266	46.2
.094	.033	7.7	1.61	1.21	1.95	.163800	53.2
.102	.048	8.2	1.61	1.64	2.65	.298652	62.1
.183	.064	9.5	2.52	1.89	4.77	.508804	83.2
.244	.084	10.3	3.05	2.29	6.99	.825090	100.7
.302	.126	12.2	3.63	2.90	10.54	1.251557	131.7
.316	.109	11.2	3.63	2.72	9.88	1.277636	119.8
.503	.171	13.0	4.94	3.71	18.33	2.786457	163.0
.730	.254	14.8	6.45	4.84	31.22	5.458068	212.9
1.068	.360	16.5	8.17	6.13	50.06	9.890285	269.5
1.465	.492	18.3	10.08	7.56	76.21	16.795435	332.7
1.951	.654	20.1	12.20	9.16	111.69	27.152304	402.5
2.532	.853	22.0	14.52	10.89	158.04	41.638281	479.0
2.826	1.447	22.7	13.56	17.90	242.85	57.985265	600.5
3.632	2.055	27.5	17.04	21.17	360.65	90.027224	742.7
4.024	1.350	25.6	19.76	14.85	293.34	90.642741	652.0
4.978	3.922	32.6	19.76	33.87	669.22	162.443682	1066.9
7.200	2.401	30.9	29.13	21.86	636.95	240.316839	961.6
8.545	2.844	32.7	32.66	24.50	800.07	320.126244	1077.8
12.699	6.708	41.6	40.32	45.36	1829.14	709.478561	1673.4
20.255	6.763	43.7	58.06	43.55	2528.61	1344.824692	1916.1
21.943	11.534	49.7	58.06	65.32	3792.91	1774.078934	2409.7
48.013	15.918	57.8	103.23	77.42	7991.64	5706.912170	3406.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตาราง ข.1

มาตรฐานการวัด

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	mil	mm.	Cir. Mil	in ²	mm ²	lb/1,000 ft	kg/km
5.0	-	7/0	-	500	12.700	250.000	.1964	126.7	756.9	1.126
-	-	-	12	472.4	12.000	223.162	.1753	113.1	675.6	1.005
-	-	6/0	-	464	11.786	215.296	.1691	109.1	651.7	969.9
-	4/0	-	-	460	11.684	211.600	.1662	107.2	640.5	953
4.0	-	-	-	454	11.532	206.100	.1619	104.4	624	928.1
-	-	5/0	-	432	10.973	186.624	.1466	94.56	565	840.6
-	-	-	-	425	10.795	180.600	.1419	91.52	546.9	813.6
3.0	-	-	-	409.6	10.404	167.772	.1318	85.03	508	755.9
-	3/0	-	-	400	10.160	160.000	.1257	81.07	484.5	720.7
-	-	4/0	-	393.7	10.000	155.000	.1217	78.54	468	698.2
-	-	-	10	380	9.652	144.400	.1134	73.17	437.1	650.5
2.0	-	-	-	372	9.440	138.384	.1087	70.12	418.9	623.4
-	-	3/0	-	364.8	9.266	133.079	.1045	67.42	402.7	599.4
-	2/0	-	-	354.3	9.000	125.523	.09859	63.62	380	565.6
-	-	9	-	348	8.839	121.104	.09512	61.36	366.6	545.5
1.0	-	2/0	-	340	8.636	115.600	.09079	58.58	349.9	520.3
-	0	-	-	324.9	8.250	105.560	.08291	53.49	319.5	475.5
-	-	0	-	324	8.230	104.976	.08245	53.19	317.3	472.8
-	-	-	3	315	8.000	99.225	.07793	50.27	300.3	446.9
1	-	-	-	300	7.629	90.000	.07069	45.60	272.4	405.4
-	1	-	-	289.3	7.348	83.694	.06573	42.41	253.3	377
-	-	-	-	284	7.214	80.660	.06335	40.87	244.2	363.3
2	-	-	-	276	7.010	76.176	.05983	39.60	230.6	343.2
-	-	2	-	275.6	7.000	75.955	.05966	38.48	229.9	342.1
-	-	-	-	259	6.579	67.080	.05269	33.99	203.1	302.2
3	-	-	-	257.5	6.544	66.358	.05212	33.63	200.9	299.0
-	-	-	6.5	255.9	6.500	65.485	.05143	32.18	189.2	295
-	-	-	-	252	6.401	63.504	.04988	32.18	192.2	286.1
4	-	3	-	238	6.045	56.640	.04449	28.70	171.5	255.1
-	-	-	6.0	236.2	6.000	55.790	.04382	28.27	168.9	251.1
-	-	-	-	232	5.893	53.324	.04227	27.27	162.9	242.4
-	-	4	-	229.4	5.827	52.624	.04133	26.66	159.3	237
5	-	-	-	220	5.538	48.400	.03801	24.52	146.5	218
-	-	-	5.5	216.5	5.500	46.372	.03681	23.72	141.9	210.9
-	-	5	-	212	5.385	44.944	.03530	22.77	136	202.4
-	-	-	-	204.5	5.189	41.738	.03278	21.15	126.3	188
6	-	-	-	203	5.156	41.210	.03237	20.88	124.3	185.6
-	-	-	5.0	196.9	5.000	38.770	.03045	19.63	117.4	174.5
-	-	6	-	192	4.877	36.864	.02895	18.68	111.6	166.3
-	-	-	-	181.9	4.621	33.088	.02599	16.77	100.2	149.1
7	-	-	-	180	4.572	32.400	.02545	16.42	98.08	146
-	-	-	4.5	177.2	4.500	31.400	.02466	15.90	95.04	141.4
-	-	-	-	176	4.470	30.976	.02433	15.70	93.77	139.6
8	-	-	-	165	4.191	27.220	.02138	13.80	82.40	122.7
-	-	8	-	162	4.115	25.244	.02061	13.30	79.43	118.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 (ต่อ)

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
S.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mill	mm.	Cir. Mill	in ²	mm ²	lb/1,000 ft	kg/km
1	-	3	-	160	4.064	25.600	.02011	12.97	77.50	115.30
-	-	-	4.0	157.5	4.000	24.806	.01948	12.57	75.08	111.80
9	-	-	-	148	3.759	21.900	.01720	11.10	66.29	98.68
-	7	-	-	144.3	3.665	20.822	.01635	10.55	63.01	93.79
-	-	9	-	144	3.658	20.736	.01629	10.52	62.78	93.52
10	-	-	3.5	137.8	3.500	18.989	.01491	9.621	57.46	85.53
-	-	-	-	134	3.404	17.960	.01410	9.098	54.34	80.88
-	8	-	-	128.5	3.264	16.512	.01297	8.368	49.99	74.39
-	-	10	-	128	3.251	16.384	.01287	8.302	49.60	73.81
-	-	-	3.2	126	3.200	15.376	.01247	8.043	48.06	71.49
11	-	-	-	120	3.048	14.400	.01131	7.297	43.59	64.87
-	-	11	-	116	2.946	13.456	.01057	6.818	40.74	60.61
-	9	-	-	114.4	2.906	13.087	.01028	6.632	39.62	58.96
-	-	-	2.9	114.2	2.900	13.042	.01024	6.605	39.47	58.72
12	-	-	-	109	2.769	11.380	.009331	6.020	35.96	53.52
-	-	12	-	104	2.642	10.816	.008495	5.481	32.74	48.73
-	-	-	2.6	102.4	2.600	10.486	.008246	5.309	31.78	47.29
-	10	-	-	101.9	2.588	10.384	.008156	5.262	31.43	46.78
13	-	-	-	95	2.413	9.025	.007088	4.573	27.32	40.65
-	-	13	-	92	2.337	8.464	.006648	4.289	25.62	38.13
-	11	-	-	90.74	2.305	8.234	.006467	4.172	24.92	37.09
-	-	13	-	90.55	2.300	8.199	.006439	4.155	24.82	36.94
14	-	-	-	83	2.108	6.889	.005411	3.491	20.85	31.04
-	-	12	-	80.81	2.053	6.530	.005129	3.309	19.77	29.42
-	-	14	-	80	2.032	6.400	.005027	3.243	19.37	28.83
-	-	10	2.0	78.74	2.000	6.200	.004869	3.142	18.77	27.93
15	-	15	-	72	1.829	5.184	.004072	2.637	18.46	27.36
-	-	13	-	71.96	1.828	5.178	.004067	2.624	18.46	27.36
-	-	-	1.8	70.37	1.800	5.023	.003945	2.545	18.20	27.03
16	-	-	-	65	1.651	4.225	.003318	2.141	12.79	19.03
-	14	-	-	64.08	1.628	4.106	.003225	2.081	12.43	18.50
-	-	16	-	64	1.625	4.096	.003217	2.075	12.40	18.45
-	-	-	1.6	62.99	1.600	3.968	.003116	2.011	12.01	17.88
17	-	-	-	58	1.473	3.364	.002642	1.705	10.18	15.16
-	15	-	-	57.07	1.450	3.257	.002558	1.650	9.859	14.67
-	-	17	-	56	1.422	3.136	.002463	1.589	9.493	14.13
-	-	-	1.4	55.12	1.400	3.038	.002386	1.539	9.196	13.68
-	-	-	-	50.82	1.291	2.583	.002029	1.309	7.820	11.64
18	-	-	-	49	1.245	2.401	.001886	1.217	7.269	10.82
-	-	18	-	48	1.219	2.304	.001810	1.167	6.976	10.38
-	-	-	1.2	47.24	1.200	2.232	.001753	1.131	6.756	10.06
-	17	-	-	45.25	1.150	2.048	.001608	1.037	6.197	9.219
19	-	-	-	42	1.067	1.764	.001385	0.8938	5.388	7.946
-	-	18	-	40.50	1.024	1.624	.001275	0.8226	4.914	7.313
-	-	19	-	40	1.016	1.600	.001257	0.8107	4.845	7.207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 (ต่อ)

Gauge			Diameter			Sectional area			Weight	
F.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	in ²	mm ²	lb/1,000 ft	kg/km
-	-	-	1.0	39.37	1.000	1.550	.001217	0.7854	4.690	6.982
-	-	20	-	36	0.9144	1.296	.001018	0.6576	3.923	5.838
-	19	-	-	35.39	0.9116	1.288	.001012	0.6529	3.900	5.804
-	-	-	.90	35.43	0.9000	1.255	.0009857	0.6362	3.799	5.656
20	-	-	-	35	0.8890	1.225	.0009621	0.6207	3.708	5.518
21	-	21	-	32	0.8128	1.024	.0008042	0.5189	3.099	4.613
-	20	-	-	31.96	0.8118	1.021	.0008019	0.5174	3.091	4.600
-	-	-	.30	31.50	0.8000	992.5	.0007794	0.5027	3.004	4.469
-	21	-	-	28.46	0.7229	810	.0006362	0.4105	2.452	3.649
22	-	22	-	28	0.7112	784	.0006158	0.3973	2.373	3.532
-	-	-	.70	27.56	0.7000	759.6	.0005966	0.3848	2.299	3.421
-	-	-	.65	25.59	0.6500	654.3	.0005143	0.3318	1.982	2.950
-	22	-	-	25.35	0.6438	642.6	.0005047	0.3256	1.945	2.895
23	-	-	-	25	0.6350	625	.0004909	0.3167	1.892	2.816
-	-	23	-	24	0.6096	576	.0004524	0.2919	1.744	2.595
-	-	-	.60	23.62	0.6000	557.9	.0004382	0.2827	1.689	2.513
24	-	24	-	22.57	0.5733	509.4	.0004001	0.2581	1.542	2.295
-	-	-	.55	22	0.5583	484	.0003801	0.2452	1.465	2.180
-	-	-	.55	21.65	0.5500	468.7	.0003681	0.2376	1.419	2.112
-	24	-	-	20.10	0.5106	404	.0003173	0.2047	1.223	1.820
25	-	25	-	20	0.5080	400	.0003142	0.2027	1.211	1.802
-	-	.50	-	19.69	0.5000	387.7	.0003045	0.1963	1.174	1.745
26	-	26	-	18	0.4572	324	.0002545	0.1642	0.9809	1.460
-	25	-	-	17.90	0.4547	320.4	.0002516	0.1623	0.9697	1.443
-	-	-	.45	17.72	0.4500	314	.0002466	0.1590	0.9504	1.414
27	-	27	-	16.4	0.4166	269	.0002113	0.1365	0.844	1.212
-	-	-	-	16	0.4064	256	.0002011	0.1297	0.7750	1.153
-	26	-	-	15.94	0.4049	254.1	.0001996	0.1288	0.7693	1.145
-	-	.40	-	15.75	0.4000	248.1	.0001949	0.1257	0.7512	1.113
-	-	-	-	14.8	0.3759	219	.0001720	0.1110	0.6629	0.9868
27	-	-	-	14.20	0.3606	201.6	.0001583	0.1021	0.6101	0.9077
-	-	-	-	14	0.3556	196	.0001539	0.09932	0.5931	0.8356
-	-	.35	-	13.78	0.3500	189.9	.0001491	0.09621	0.5746	0.8553
28	-	29	-	13.6	0.3454	185	.0001453	0.09372	0.5600	0.8332
-	-	-	-	13	0.3302	169	.0001327	0.08563	0.5114	0.7613
-	28	-	-	12.54	0.3211	159.3	.0001255	0.08097	0.4837	0.7198
-	-	.30	-	12.60	0.3200	158.3	.0001246	0.08042	0.7306	0.7149
30	-	30	-	12.4	0.3150	153.3	.0001208	0.07791	0.4656	0.6926
-	-	-	-	12	0.3048	144	.0001131	0.07297	0.4359	0.6487
-	-	31	-	11.6	0.2946	134.6	.0001057	0.06818	0.4074	0.6061
-	-	.29	-	11.42	0.2900	130.4	.0001024	0.06605	0.3947	0.5872
-	29	-	-	11.26	0.2859	126.3	.00009959	0.06425	0.3838	0.5712
-	-	32	-	10.3	0.2743	116.6	.00009158	0.05913	0.3530	0.5257
-	-	.26	-	10.24	0.2600	104.9	.00008239	0.05309	0.3175	0.4720
30	-	-	-	10.03	0.2546	100.6	.00007901	0.05097	0.3045	0.4531

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 (ต่อ)

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	in ²	mm ²	lb/1,000 ft	kg/km
31	-	33	-	10	0.2540	100	.00007954	0.025067	0.3027	0.4502
-	-	34	-	9.2	0.2337	84.64	.00006648	0.021289	0.2562	0.3812
-	-	-	.23	9.055	0.2300	81.99	.00006440	0.021155	0.2482	0.3694
32	-	-	-	9	0.2286	81.002	.00006362	0.021104	0.2452	0.3643
-	31	-	-	8.928	0.2238	79.71	.00006260	0.021039	0.2413	0.3594
-	-	35	-	8.4	0.2134	70.56	.00005542	0.020375	0.2136	0.3172
33	-	-	-	8	0.2032	64	.00005027	0.020243	0.1937	0.2888
-	32	-	-	7.950	0.2019	63.20	.00004964	0.020203	0.1913	0.2857
-	-	-	.20	7.874	0.2000	62	.00004869	0.020142	0.1877	0.2792
-	-	36	-	7.6	0.1930	57.76	.00004536	0.020227	0.1748	0.2607
-	-	-	.18	7.087	0.1800	50.23	.00003945	0.02545	0.1520	0.2253
-	33	-	-	7.080	0.1798	50.13	.00003937	0.02540	0.1517	0.2252
34	-	-	-	7	0.1778	49	.00003848	0.02483	0.1483	0.2235
-	-	37	-	6.8	0.1727	46.24	.00003632	0.02343	0.1400	0.2087
-	34	-	-	6.305	0.1601	39.75	.00003122	0.02014	0.1203	0.1783
-	-	-	.16	6.299	0.1600	39.68	.00003116	0.02011	0.1201	0.1782
-	-	38	-	6	0.1524	36	.00002827	0.01824	0.1090	0.1632
-	35	-	-	5.615	0.1426	31.55	.00002476	0.01597	0.09543	0.1427
-	-	-	.14	5.512	0.1400	30.38	.00002386	0.01539	0.09196	0.1364
-	-	39	-	5.2	0.1321	27.04	.00002124	0.01370	0.08186	0.1211
35	36	-	-	5.000	0.1270	25	.00001963	0.01267	0.07565	0.1117
-	-	40	-	4.8	0.1219	23.04	.00001810	0.01167	0.06976	0.1034
-	-	-	.12	4.724	0.1200	22.32	.00001753	0.01131	0.06736	0.1010
-	37	-	-	4.455	0.1131	19.33	.00001557	0.01005	0.06001	0.0888
-	-	41	-	4.4	0.1118	19.36	.00001521	0.009810	0.05812	0.0862
36	-	42	-	4	0.1016	16.00	.00001257	0.008107	0.04845	0.0717
-	38	-	-	3.965	0.1007	15.72	.00001235	0.007968	0.04760	0.0707
-	-	43	-	3.937	0.1000	15.50	.00001217	0.007854	0.04690	0.0696
-	-	-	.10	3.6	0.09114	12.96	.00001018	0.006367	0.03923	0.0571
-	39	-	-	3.551	0.08969	12.47	.000009794	0.006319	0.03775	0.0557
-	-	44	-	3.2	0.08138	10.24	.000008042	0.005819	0.03099	0.0454
-	40	-	-	3.145	0.07987	9.391	.000007768	0.005012	0.02994	0.0441
-	41	45	-	3.000	0.07613	7.842	.000006159	0.003973	0.02374	0.0351
-	-	-	-	2.994	0.06334	6.219	.000004884	0.003151	0.01882	0.0278
-	-	46	-	2.4	0.06096	5.760	.000004528	0.002929	0.01744	0.0259
-	43	-	-	2.221	0.05641	4.932	.000003873	0.002495	0.01498	0.0219
-	-	47	-	2	0.05080	4.000	.000003142	0.002027	0.01211	0.0178
-	44	-	-	1.987	0.05023	3.911	.000003072	0.001982	0.01184	0.0175
-	-	48	.05	1.969	0.05000	3.877	.000003045	0.001963	0.01174	0.0174
-	45	-	-	1.761	0.04473	3.102	.000002436	0.001572	0.009383	0.0138
-	-	48	-	1.6	0.04064	2.560	.000002011	0.001297	0.007750	0.0114
-	46	-	-	1.568	0.03984	2.460	.000001931	0.001246	0.007446	0.0110
-	47	-	-	1.397	0.03547	1.951	.000001532	0.0009884	0.005904	0.0086
-	48	-	-	1.344	0.03159	1.547	.000001215	0.0007838	0.004683	0.0069
-	-	49	-	1.2	0.03048	1.440	.000001131	0.0007297	0.004359	0.0064

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	in ²	mm ²	lb/1,000 ft	kg/km
-	49	-	-	0.1118	0.02813	1.227	.0000019635	0.0006216	0.003713	0.005526
-	-	50	-	1	0.02540	1.000	.0000007854	0.0005067	0.003027	0.004505
-	50	-	-	0.986	0.02505	0.9723	.0000007641	0.0004929	0.002945	0.004382

NOTE : 3.W.G. - Birmingham Iron Wire Gauge
 A.W.G. - American Wire Gauge
 S.W.G. - British Standard Wire Gauge
 mm. G. - Millimeter Gauge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.2

อัตราส่วนความต้านทาน DC/AC

The AC/DC resistance ratio of the conductor is given by the following formula

$$K_2 = 1 + \lambda_s + \lambda_p$$

where :

K_2 = AC/DC resistance ratio of conductor

λ_s = skin effect factor

λ_p = proximity effect factor

The skin effect factor is given by :

$$\lambda_s = \frac{X^2}{192 + 0.3 X^2}$$

where :

$$X = \sqrt{\frac{3\pi f}{R_0 k_t \times 10^3}}$$

f = supply frequency, Hz

R_0 = DC resistance of conductor at 20° C Ω/km

k_t = reciprocal factor of temperature correction factor

The proximity effect factor is given by :

$$\lambda_p = \frac{X^2}{192 + 0.3 X^2} \left(\frac{d_1}{S} \right)^2 \left\{ 0.312 \left(\frac{d_1}{S} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{X^2}{192 + 0.3 X^2} + 0.27} \right\}$$

where :

$$X^2 = \sqrt{0.3 X}$$

d_1 = diameter of conductor, mm.

S = distance between conductor axes, mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.3
ความต้านทานของตัวนำ

Nominal cross-sectional area (mm ²)	Number of wires in conductor	Diameter of wires in conductor (mm)	Maximum resistance of conductor at 20°C (Ohms/km)
			Single core & Multi core
0.5	1	0.80	36.0
1	1	1.13	18.1
1	7	0.40	18.1
1.5	1	1.38	12.1
1.5	7	0.50	12.1
2.5	1	1.78	7.41
2.5	7	0.67	7.41
4	1	2.25	4.61
4	7	0.35	4.61
6	7	1.04	3.08
10	7	1.35	1.83
16	7	1.70	1.15
25	7	2.14	0.727
35	19	1.53	0.524
50	19	1.78	0.387
70	19	2.14	0.268
95	19	2.52	0.193
120	37	2.03	0.153
150	37	2.25	0.124
185	37	2.52	0.0991
240	61	2.25	0.0754
300	61	2.52	0.0601
400	61	2.85	0.0470
500	61	3.20	0.0366

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ดร.ชัชวดี นัตอรุทัย และคุณต่อพงษ์ ขวงพานิช เป็นอย่างสูงที่ให้คำปรึกษา รวมทั้งแนะนำโครงการและให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน ซึ่งทำให้โครงการและปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Colonel Wm.T.McIlyman , “ Transformer and Inductor Handbook ” , Marcel Dekker , Inc.1990.
- [2] ณัฐติพล ทันจิตรวัฒนะ , ต่อพงศ์ ขวงพานิช และอนุชิต ศรีสมบูรณ์สกุล , “ การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก EI ” ,ปริญญาานิพนธ์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2538.
- [3] Arora , J.S. , “ Introduction to Optimum Design ” , Mc Graw-Hill , New York , 1989.
- [4] A.E. Fitzgerald , Charles Kingsley , Jr. Stephen D. Umans , “ Electric Machinery ” fifth Edition , Mc Graw-Hill , 1990.
- [5] สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช , “ Visual Basic 4.0 Professional ” , บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน) , 2539.
- [6] พิเชิต ถ้ายอง , “ เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 ” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2537.