

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



ปีการศึกษา 2542

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแบบแกน EI ที่มีช่องอากาศ  
DESIGN OF EI-INDUCTOR WITH AIR-GAP



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

อาจารย์ วีระศักดิ์ วงศ์วิวัต

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 37006  
วัน, เดือน, ปี 30 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

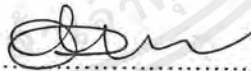
เรื่อง การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแบบแกน EI ที่มีช่องอากาศ

ผู้จัดทำ

- |                   |                  |
|-------------------|------------------|
| 1. นายก้องเกียรติ | เมฆอัครมกรณ์     |
| 2. นายประวิทย์    | เชียรสิทธิ์พิศาล |
| 3. นายพรชัย       | เจริญงามวงสว่าง  |



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร. ชัยวุฒิ จิตฺรอุทัย)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	3
2.1 บทนำ	3
2.2 General Optimization Statement	4
2.3 ทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (Transformation Method)	6
2.4 แบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI	7
2.5 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI โดยวิธี Optimization	8
2.6 สูตรการคำนวณต่าง ๆ ที่ใช้ในโปรแกรมออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธี Optimization	11
บทที่ 3 การออกแบบและการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	13
3.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ที่มีช่องอากาศ	13
3.2 ผลที่ได้จากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	19
3.3 ตัวเหนี่ยวนำที่ได้ทำการสร้าง	22
3.4 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ	28
3.5 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ	36
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ และการแก้ไขการออกแบบ	37
4.1 ผลของรูปทรงแกนกลางกับการออกแบบ	37
4.2 การวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบ	38
4.3 แนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบ	44
4.4 ผลจากการแก้ไขค่าการออกแบบ	46
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์และแนวทางในการแก้ไขการออกแบบ	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก	หน้า
ภาคผนวก ก การออกแบบ Inductor โดยวิธี Area Product	56
ภาคผนวก ข Minimization or Maximization of Function	57
ภาคผนวก ค. ข้อมูลออกแบบและผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ	61
ภาคผนวก ง. ข้อมูลที่ใช้ออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	95
กิตติกรรมประกาศ	127
เอกสารอ้างอิง	131
	132



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแบบแกน EI ที่มีช่องอากาศ

นายก้องเกียรติ เมฆอัคฆกรรม

นายประวิทย์ เจริญทรัพย์พิศาล

นายพรชัย เจริญงามวงศ์วาน

ผศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา ๒๕๔๒

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นงานนำเสนอวิธีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้แกน EI ที่มีช่องอากาศ การวิเคราะห์ต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และการปรับปรุงการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ซึ่งเน้นที่วิธีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธีออปติไมเซชัน โดยพิจารณาผลระยะของช่องอากาศ และขนาดพื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็ก โดยวิธีนี้จะทำให้ได้ตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด หรือราคาถูกที่สุด หรือค่าการสูญเสียน้อยที่สุด และสามารถนำไปใช้งานได้จริงตรงตามที่ออกแบบซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานทางด้านไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF EI-INDUCTOR WITH AIR-GAP

Kongkiat                      Mekakkakorn  
 Pravit                         Thainsittpisal  
 Pornchai                      Jaroengamwongwan  
 Asst.Prof.Chaiwut             Chat-uthai  
 Lecturer. Vccerasak            Vongvivat  
 1999

ABSTRACT

This project presents the method of designing the EI-core inductor with air-gap, the analysis of prototype and improvement that specify to the design of inductor by using the optimization method. We need to consider the effect of distance of air-gap and the area of magnetic core. By using this method, the minimum weight, minimum cost or minimum loss can be obtained and can be useful for the applications in power engineering.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงอัลกอริทึมของการ Optimizaton	5
รูปที่ 2.2 Classification of the transformation methods	6
รูปที่ 2.3 EI- Core Inductor Configuration	7
รูปที่ 2.4 Magnetic Circuit	7
รูปที่ 3.1 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	13
รูปที่ 3.2 หน้าจอรับข้อมูลของโปรแกรมออกแบบ	15
รูปที่ 3.3 หน้าจอแสดงผลจากการออกแบบ	16
รูปที่ 3.4 หน้าจอแสดงขั้นตอนการเลือกวิธีปรับแกน	17
รูปที่ 3.5 หน้าจอแสดงขั้นตอนการป้อนขนาดแกนที่ต้องการ	17
รูปที่ 3.6 หน้าจอแสดงผลหลังจากการปรับแกน	18
รูปที่ 3.7 หน้าจอแสดงโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ	18
รูปที่ 3.8 หน้าจอแสดง โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ	19
รูปที่ 3.9 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)	22
รูปที่ 3.10 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)	23
รูปที่ 3.11 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)	24
รูปที่ 3.12 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)	25
รูปที่ 3.13 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3 A (Optimization : Minimum loss)	26
รูปที่ 3.14 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum loss)	27
รูปที่ 3.15 วงจรทดสอบคุณสมบัติแกนเหล็ก	28
รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบในการหาค่าความต้านทานขดลวด	40
รูปที่ 4.2 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)	46
รูปที่ 4.3 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)	47
รูปที่ ก.1 รูปการเกิด fringing flux	59
รูปที่ ข.1 จุดต่างๆ ของฟังก์ชัน	61
รูปที่ ข.2 ค่า step เพื่อหา minimum bracket	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ ข.3 การลู่เข้าจุดต่ำสุด โดย inverse parabolic interpolation	67
รูปที่ ข.4 วิธีในการ Step โดยใช้ทฤษฎี Downhill simplex	69
รูปที่ ข.5 การลู่เข้าของฟังก์ชันที่ N มิติ	71
รูปที่ ข.6 การลู่เข้าจุดต่ำสุดโดย steepest Descent	75
รูปที่ ข.7 Constraint status at design a, b, c and d	81
รูปที่ ข.8 Usable and feasible search direction	82
รูปที่ ข.9 Relative optimum of constrained function	83
รูปที่ ข.10 Geometric interpretation of the Kuhn – Tucker condition	85
รูปที่ ข.11 Graphical representation of optimum point	85
รูปที่ ข.12 Finite difference intervals	88
รูปที่ ข.13 อัลกอริทึมของการคำนวณค่าของ $h$	89
รูปที่ ข.14 ค่าความถูกต้องของการประมาณค่าแบบ finite difference ของ $\partial F(x)/\partial x_1$ ในตารางที่ ข.2 เมื่อ $\partial F(x)/\partial x_1$ มีค่ามาก	91
รูปที่ ข.15 ค่าความถูกต้องของการประมาณค่าแบบ finite difference ของ $\partial F(x)/\partial x_1$ ในตารางที่ ข.2 เมื่อ $\partial F(x)/\partial x_1$ มีค่าน้อย	91
รูปที่ ข.16 Classification of search methods	92
รูปที่ ข.17 Step size determination algorithm	94
รูปที่ ค.1 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Minimum weight)	95
รูปที่ ค.2 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Minimum weight)	96
รูปที่ ค.3 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Minimum weight)	96
รูปที่ ค.4 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5 A (Minimum weight)	97
รูปที่ ค.5 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A (Minimum weight)	98
รูปที่ ค.6 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A (Minimum weight)	98
รูปที่ ค.7 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5 A (Minimum weight)	99
รูปที่ ค.8 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5A (Minimum weight)	100
รูปที่ ค.9 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5A (Minimum weight)	100
รูปที่ ค.10 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Minimum weight)	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ ค.11 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Minimum weight)	102
รูปที่ ค.12 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Minimum weight)	102
รูปที่ ค.13 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5 A (Minimum Loss)	103
รูปที่ ค.14 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5 A (Minimum Loss)	104
รูปที่ ค.15 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5 A (Minimum Loss)	104
รูปที่ ค.16 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3 A (Minimum Loss)	105
รูปที่ ค.17 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3A (Minimum Loss)	106
รูปที่ ค.18 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3 A (Minimum Loss)	106
รูปที่ ค.19 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Minimum Loss)	107
รูปที่ ค.20 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3A (Minimum Loss)	108
รูปที่ ค.21 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Minimum Loss)	108
รูปที่ ค.22 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A (Minimum weight)	109
รูปที่ ค.23 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A (Minimum weight)	110
รูปที่ ค.24 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A (Minimum weight)	110
รูปที่ ค.25 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A (Minimum weight)	111
รูปที่ ค.26 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A (Minimum weight)	112
รูปที่ ค.27 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A (Minimum weight)	112
รูปที่ ง.1 Magnetizing curve และ D.C. Permeability Curve	127
รูปที่ ง.2 Core loss Curve	128
รูปที่ ง.3 A.C. Excitation Curve	129
รูปที่ ง.4 D.C. Hysteresis Loops Curve	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ผลจากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5A ออกแบบโดยวิธีต่างๆ	19
ตารางที่ 3.2 ผลจากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5A ออกแบบโดยวิธีต่างๆ	20
ตารางที่ 3.3 รูปร่างตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5A ที่ออกแบบโดยวิธีต่างๆ	20
ตารางที่ 3.4 รูปร่างตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5A ที่ออกแบบโดยวิธีต่างๆ	21
ตารางที่ 3.5 ผลการทดลองตัวเหนี่ยวนำ 42 mH กระแส 5 A (Area Product)	29
ตารางที่ 3.6 ผลการทดลองตัวเหนี่ยวนำ 42 mH กระแส 5 A (Optimization)	30
ตารางที่ 3.7 ผลการทดลองตัวเหนี่ยวนำ 68 mH กระแส 5 A (Optimization)	30
ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Area Product)	32
ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Optimization)	32
ตารางที่ 3.10 การเปรียบเทียบผลจากการออกแบบและผลจากการทดสอบ ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5A (Area Product)	33
ตารางที่ 3.11 การเปรียบเทียบผลจากการออกแบบและผลจากการทดสอบ ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5A (Optimization)	34
ตารางที่ 3.12 การเปรียบเทียบผลจากการออกแบบและผลจากการทดสอบ ตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5A (Optimization)	35
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบความกว้างช่องอากาศที่ออกแบบกับที่ทดสอบ	38
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อัตราส่วนความกว้างช่องอากาศกับอัตราส่วน 2E ต่อ D	39
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากการออกแบบและจากการทดสอบ	39
ตารางที่ 4.4 ค่าความสูญเสียในขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ	41
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าสูญเสียในขดลวดจากการออกแบบและจากการทดสอบ	41
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าสูญเสียในช่องอากาศจากการออกแบบและจากการทดสอบ	43
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อัตราส่วนค่าการสูญเสียในช่องอากาศกับอัตราส่วน 2E ต่อ D	43
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบผลของค่าความเหนี่ยวนำที่ทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่แก้ไข L 13 mH 3A	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบผลของค่าความเหนี่ยวนำที่ทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่แก้ไข L 75 mH 3A	48
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบผลของค่าความเหนี่ยวนำที่ทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่แก้ไข L 42 mH 5A	49
ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบผลของค่าความเหนี่ยวนำที่ทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่แก้ไข L 31.5 mH 5A	49
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบผลของค่าความเหนี่ยวนำที่ทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่แก้ไข L 50 mH 5A	49
ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบผลของค่าความเหนี่ยวนำที่ทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่แก้ไข L 60 mH 3A	50
ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าสูญเสียในช่องอากาศจากการออกแบบที่ได้แก้ไขแล้วและจากการ ทดสอบของตัวเหนี่ยวนำที่ได้ทำการสร้างใหม่	50
ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าสูญเสียในช่องอากาศจากการออกแบบที่ได้แก้ไขแล้วและจากการ ทดสอบของตัวเหนี่ยวนำเดิมที่ได้ทำการสร้างไว้แล้ว	51
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลจากการออกแบบที่แก้ไขแล้วกับผลการทดสอบคุณสมบัติของ ตัวเหนี่ยวนำสนใจที่ค่าความกว้างช่องอากาศตามค่าการออกแบบ	54
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลจากการออกแบบที่แก้ไขแล้วกับผลการทดสอบคุณสมบัติของ ตัวเหนี่ยวนำสนใจที่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ	55
ตารางที่ ก.1 Gap loss coefficient	60
ตารางที่ ข.1 First derivative of $F(x) = 100(x_2 - x_1^2) + (1 - x_1)^2$	90
ตารางที่ ข.2 First derivative of $2x_1^2 + 2x_2^2 + x_3^2 + 2x_1x_2 - x_1x_3 - 0.8x_2x_3$	90
ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5A	113
ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A	114
ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A	115
ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A	115
ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A	116
ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5 A	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบค่าความเหนียวนำของตัวเหนียวนำ 50 mH 5A	117
ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนียวนำ 50 mH 5A	117
ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบค่าความต้านทานตัวเหนียวนำ 50 mH 5A	118
ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนียวนำ 50 mH 5 A	118
ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบค่าความเหนียวนำของตัวเหนียวนำ 60 mH 3	119
ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนียวนำ 60 mH 3 A	119
ตารางที่ ค.13 ผลการทดสอบค่าความต้านทานตัวเหนียวนำ 60 mH 3 A	120
ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนียวนำ 60 mH 3 A	120
ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบค่าความเหนียวนำของตัวเหนียวนำ 13 mH 3A	121
ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนียวนำ 13 mH 3 A	121
ตารางที่ ค.17 ผลการทดสอบค่าความต้านทานตัวเหนียวนำ 13 mH 3 A	122
ตารางที่ ค.18 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนียวนำ 13 mH 3 A	122
ตารางที่ ค.19 ผลการทดสอบค่าความเหนียวนำของตัวเหนียวนำ 75 mH 5A	123
ตารางที่ ค.20 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนียวนำ 75 mH 3 A	123
ตารางที่ ค.21 ผลการทดสอบค่าความต้านทานตัวเหนียวนำ 75 mH 3 A	124
ตารางที่ ค.22 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนียวนำ 75 mH 3 A	124
ตารางที่ ค.23 ผลการทดสอบค่าความเหนียวนำของตัวเหนียวนำ 54.5 mH 3 A	125
ตารางที่ ค.24 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนียวนำ 54.5 mH 3 A	125
ตารางที่ ค.25 ผลการทดสอบค่าความเหนียวนำของตัวเหนียวนำ 60 mH 3 A	126
ตารางที่ ค.26 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนียวนำ 60 mH 3 A	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีอยู่หลายวิธีการ เพื่อพัฒนาการสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเหมาะสมสำหรับนำไปใช้วงจรไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ เช่นวิธี Area Product [1] ซึ่งการออกแบบโดยวิธี Area Product และวิธีอื่นๆ โดยทั่วไปผู้ออกแบบจะไม่คำนึงถึงความเหมาะสมในการเลือกแกนเหล็กให้เหมาะสมกับการออกแบบ โดยจะเผื่อขนาดของแกนเหล็กเอาไว้เพื่อให้สามารถทำการพันขดลวดลงได้ ซึ่งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองโดยใช่เหตุ เพื่อแก้ไขข้อเสียดังกล่าวเราสามารถออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าให้มีขนาดที่เหมาะสมโดยนำหลักการ Numerical Optimization [2, 3, 4] มาใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยลักษณะการออกแบบเป็น โปรแกรมออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าให้มีขนาดที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการ อันประกอบด้วย น้ำหนักเบาที่สุด, ราคาถูกที่สุด และค่าความสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งเรามุ่งที่สนใจศึกษาเป้าหมายในการออกแบบ 2 แบบเท่านั้น คือ น้ำหนักเบาที่สุด และ ค่าความสูญเสียน้อยที่สุด เนื่องจาก เป้าหมาย ราคาถูกที่สุดนั้น มีปัจจัยเนื่องจากราคาอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ประกอบเป็นตัวเหนี่ยวนำ นั้นมีราคาเปลี่ยนแปลงตลอดเวลายากแก่การนำมาวิเคราะห์

ซึ่งการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้วิธีการ Numerical Optimization นี้จะใช้โปรแกรมในการออกแบบ ซึ่งผลที่ได้จากการออกแบบจะได้รูปทรงของตัวเหนี่ยวนำต่างๆ กันออกไป ซึ่งลักษณะที่ได้จะมีลักษณะของแกนกลางไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังที่ได้จากการออกแบบโดยวิธี Area product ซึ่งหลังจากทำการสร้างตัวเหนี่ยวนำแล้วนำมาทดสอบหาคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ พบว่า ตัวเหนี่ยวนำที่สร้างโดยมีเป้าหมายการออกแบบค่าสูญเสียที่น้อยที่สุดนั้นมีคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำใกล้เคียงกับที่ออกแบบ แต่การออกแบบโดยมีเป้าหมายแบบน้ำหนักเบาที่สุดนั้นมีคุณสมบัติต่างไปจากที่ได้ออกแบบไว้ โดยคุณสมบัติที่แตกต่างไปคือ ระยะเวลาของอากาศ และค่าสูญเสียที่ทดสอบได้มีค่าเปลี่ยนไป

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะแสดงการวิเคราะห์ผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำรูปทรงต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีต่างๆ โดยจะทำการวิเคราะห์ผลของระยะเวลาของอากาศ และขนาดของพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก ว่ามีผลเป็นปัจจัยหนึ่งในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI และจะแสดงการวิเคราะห์ เพื่อหาแนวทางในการหาแนวโน้มของเฟลคเตอร์ที่ต้องเพิ่มเติมเข้าไปในสมการการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI โดยวิธี Numerical Optimization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อหาของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 บทประกอบไปด้วย

บทที่ 2 เป็นการแนะนำทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI โดยใช้วิธี Numerical Optimizaion , แสดงแบบจำลองตัวเหนี่ยวนำแบบแกน EI, ข้อกำหนดต่างๆ ในการออกแบบ และสมการเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบ บทที่ 3 แสดงลำดับการทำงานของโปรแกรมออกแบบ, ผลของการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยมีเป้าหมายต่างๆ และแสดงถึงการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำที่สร้างโดยเป้าหมายต่างๆ บทที่ 4 แสดงการวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้, แสดงวิเคราะห์ปัญหาที่พบ และแสดงแนวทางในการแก้ไขการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์ และสรุปแนวทางในการแก้ไขการออกแบบ แสดงแก้ไขการออกแบบแล้วจะทำให้ได้ตัวเหนี่ยวนำที่สร้าง โดยการออกแบบที่ได้ทำการแก้ไขแล้วได้คุณสมบัติใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน

### 2.1 บทนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีอยู่หลายวิธีการเพื่อพัฒนาการสร้างความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับนำไปเป็นส่วนประกอบในวงจรทางด้านไฟฟ้ากำลัง แต่ที่สนใจศึกษามีอยู่ 2 วิธีคือวิธี Area Product [1] และวิธี Optimization [2, 3, 4] ซึ่งการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบวิธี Area Product โดยทั่วไปผู้ออกแบบจะไม่คำนึงถึงความเหมาะสมในการเลือกแกนเหล็กให้เหมาะสมกับการออกแบบ โดยจะเผื่อขนาดของแกนเหล็กเอาไว้เพื่อให้สามารถทำการพันขดลวดลงได้ ซึ่งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองโดยใช้เหตุ เพื่อแก้ไขข้อเสียดังกล่าวเราสามารถออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าให้มีขนาดเหมาะสมโดยนำหลักการ Numerical Optimization มาใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยลักษณะการออกแบบเป็นโปรแกรมออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าให้มีขนาดที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการ อันประกอบด้วย น้ำหนักเบาที่สุด, ราคาถูกที่สุด และค่าความสูญเสียที่น้อยที่สุด

ดังนั้นในบทนี้ยังกล่าวถึงหลักการของการ Optimization [5] ซึ่งหลักการ Optimization จะมีอยู่ 2 วิธีการดังนี้

1. Linear programming
2. Non-linear programming

ซึ่งโปรแกรมที่ใช้เขียนจะใช้หลักการของ Non-Linear Programming เพียงอย่างเดียวเพราะฉะนั้นในส่วนของ Linear programming จะไม่ขอกล่าวถึง

Non-linear programming โดยจะมีอัลกอริทึมดังแสดงในรูป 2.1 และได้พูดถึงทฤษฎีต่างๆ ที่ต้องใช้ เช่น การหาค่า gradient ซึ่งใช้วิธี Finite Difference Approximation การ Optimization โดยการแปลงให้อยู่ในรูป unconstrain, ทฤษฎีในการหาทิศทาง, ทฤษฎี Conjugate Gradient, ทฤษฎี Variable Metric และยังสามารถกล่าวถึงทฤษฎี Transformation ในการแก้ปัญหาในกรณีที่มีเงื่อนไขเป็น non-linear โดยจะทำการเปลี่ยนรูปของ objective และ constraint functions ซึ่งมีเทคนิคต่างๆ ดังนี้ เทคนิคแรกคือ Sequence Unconstrained Minimization และเทคนิคที่สองคือ Augmented Lagrangian Multiplier Method ซึ่งเทคนิคนี้ไม่ได้นำมาใช้ในโปรแกรมออกแบบ

และในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ที่มีช่องอากาศ โดยจะกล่าวถึงแบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ายวมถึงการคำนวณพื้นฐานต่างๆ, ข้อพิจารณา, ข้อกำหนด และหลักการต่างๆ ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้หลักการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Numerical Optimization ในการออกแบบ ส่วนข้อกำหนดในการออกแบบ และหลักการในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้วิธีการแบบ Area Product ไม่ขอก้าวถึงในบทนี้ซึ่งสามารถดูรายละเอียดการออกแบบในภาคผนวก ก

## 2.2 General Optimization Statement [5]

โดยมากการออกแบบการแก้ปัญหาของการอ็อปติไมเซชัน สามารถจัดให้อยู่ในรูปสูตรทางคณิตศาสตร์ของเงื่อนไขทั่วไปในการอ็อปติไมเซชัน ได้ดังนี้

### 1. สมการฟังก์ชันหลัก (Objective Function)

$$\text{Minimize } F(x) \quad \text{ฟังก์ชันหลัก (Objective Function)} \quad (2.1)$$

### 2. สมการเงื่อนไข (Constraint Function)

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1 \dots m \quad \text{เงื่อนไขของการเท่ากัน (Equality Constraints)} \quad (2.2)$$

$$g_k(x) = 0 \quad k = 1 \dots l \quad \text{เงื่อนไขของการไม่เท่ากัน (Inequality Constraints)} \quad (2.3)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1 \dots n \quad \text{เงื่อนไขขอบเขต (Side Constraints)} \quad (2.4)$$

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  $x$  ฟังก์ชันเหล่านี้อาจจะทราบค่า  $x$  อย่างแน่นอน หรือรู้เป็นนัย และต้องหาค่าโดยการใช้เทคนิคเชิงวิเคราะห์ (Analytical) หรือวิธีเชิงตัวเลข (Numerical) วิธีแบบเชิงตัวเลข (Numerical) ซึ่งสามารถหาค่าได้ถ้ามีเงื่อนไขในการเท่ากัน (Equality Constraints) เป็นจำนวน  $m$  และจะต้องรู้ค่า  $x$  อย่างแน่นอน ซึ่งเป็นไปได้ที่จะใช้เงื่อนไขในการเท่ากันเหล่านั้นเพื่อที่จะลดตัวแปรที่ออกแบบ

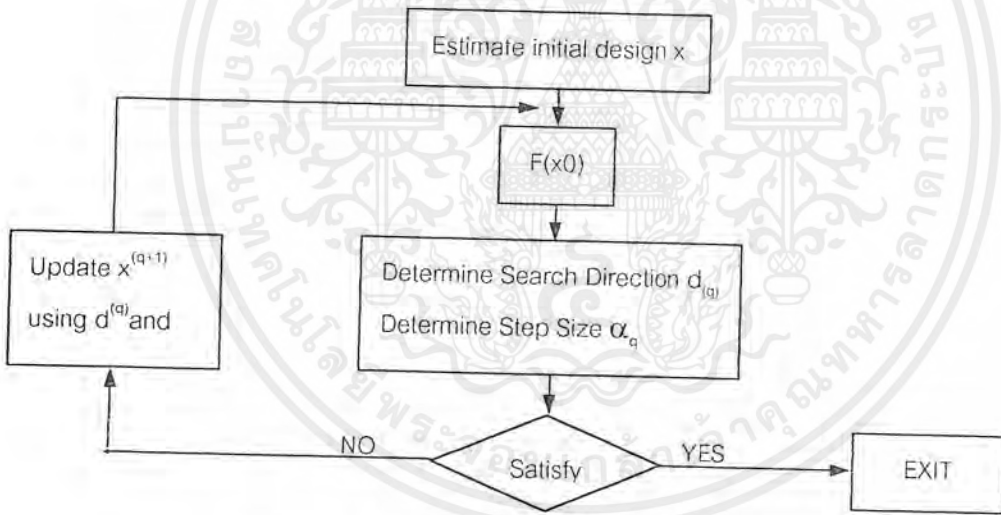
หลังจากนั้นปัญหาจะถูกลดลงเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขด้วยตัวแปรไม่ทราบค่า  $n - m$  ตัว เงื่อนไขขอบเขตในสมการที่ (2.4) ถูกกำหนดให้เป็นขอบเขตของตัวแปรที่ออกแบบเพื่อที่จะป้องกันจากการเข้าสู่ค่าที่เป็นไปไม่ได้ทางกายภาพ (non - physical values) รูปแบบที่แสดงไว้ในสมการที่ (2.1) ถึง (2.4) ไม่ได้แสดงไว้ในรูปแบบเดียว ยกตัวอย่างเช่นปัญหาที่ต้องจัดอยู่ในรูปค่าสูงสุด (maximization) สามารถจัดใหม่โดยการทำให้ สมการที่ (3-1) เปลี่ยนเป็น  $-F(x)$  และยังคงขึ้นอยู่กับสมการเงื่อนไขเดิมในสมการที่ (2.2) ถึง (2.4)

ปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขอาจจะกำหนดจากสมการที่ (2.1) โดยปราศจากเงื่อนไขในการหาตัวแปร  $x$  ดังเช่นปัญหาที่ไม่ได้ใช้ในการปฏิบัติจริงทางวิศวกรรม ปัญหาที่มีเงื่อนไขด้วยเงื่อนไขในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาเป็นเชิงประจักษ์บนด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากันอาจจะถูกแปลงไปเป็นปัญหาที่มีเงื่อนไข โดยการลดจำนวนของตัวแปรที่ออกแบบลงบางที ปัญหาที่มีทั้งที่เงื่อนไขในการเท่ากันและไม่เท่ากันสามารถแก้ไขเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขโดยใช้ ทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (Transformation Method) เพราะฉะนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะเข้าใจอย่างเพียงพอ กับทฤษฎี unconstraint Optimization

แผนผังทั่วไปของอัลกอริทึม Optimization แสดงในรูปที่ 2.1 กระบวนการของ Optimization ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน

1. การดำเนินการหาทิศทางของเวกเตอร์  $d$  ในสเปซ (space)
2. กระทำการค้นหาทางระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทางเวกเตอร์  $d$  โดยการกำหนดคที ละขั้นของขนาดของการขยับ (step size)
3. แสดงผลได้เมื่อกระบวนการมีการพุ่งเข้าหาค่าที่ยอมรับได้



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงอัลกอริทึมของการ Optimizaton

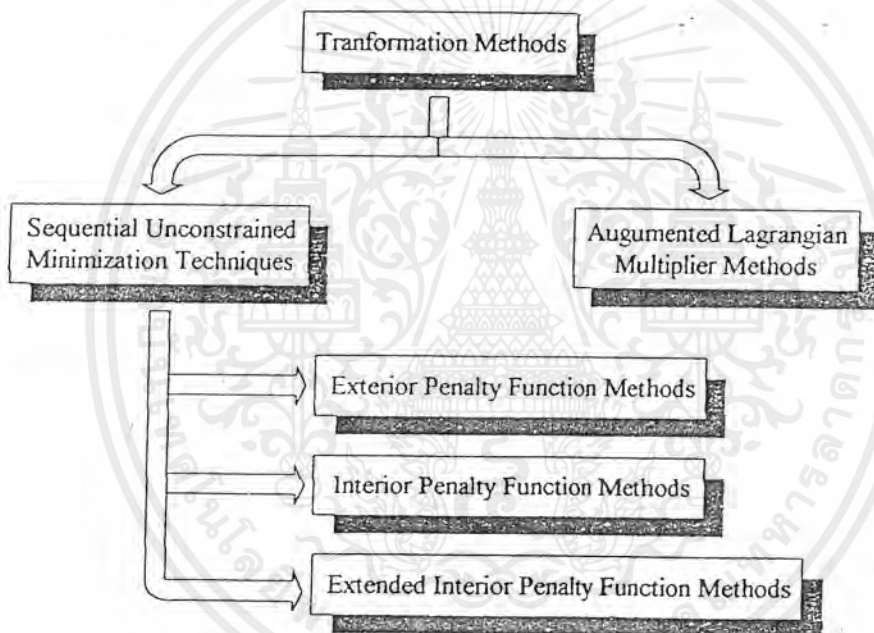
โดยมากอัลกอริทึมการอ้อพติไมเซชัน จะมีการตั้งค่าเริ่มต้นของการออกแบบตัวแปร  $(x^{(0)})$  จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากจุดเริ่มต้น และปรับค่า โดยการออกแบบข้อมูลซ้ำๆ ดังรูปแบบนี้

$$x^{(q+1)} = x^{(q)} + \alpha_q d^{(q)} \tag{2.5}$$

เมื่อ  $q$  เป็นจำนวนการทำซ้ำ อยู่ในส่วนที่ติดตามในอัลกอริทึมต่างๆ ใช้สำหรับแสดงผล สถานะปัจจุบันของการค้นหาทิศทางของเวกเตอร์  $d$  และขนาดของการขยับ  $\alpha$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 ทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (Transformation Method) [5]

วิธีการเปลี่ยนรูปเป็นเทคนิคในการแก้ค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้ได้ผลดีที่สุด ซึ่งจะใช้วิธีการเปลี่ยนรูปโดยปรับปรุงค่าและฟังก์ชันที่เป็นจุดเริ่มต้นของปัญหาซึ่งสามารถแก้ปัญหาที่ไม่จำเป็นได้ โดยพื้นฐานเพื่อที่จะสร้างสตูดิโอฟังก์ชัน (Pseudo function) และคอนสเตรนฟังก์ชัน (Constraint function) วิธีการเปลี่ยนรูปสามารถแยกออกเป็น 2 ชนิด ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 วิธีแรกเกี่ยวกับวิธีการภายนอก (penalty) และภายใน (barrier) ซึ่งอ้างถึง Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT) อย่างที่ 2 คือ การปรับปรุงฟังก์ชัน Lagrangian เรียกว่า วิธีการ Augmented Lagrangian Multiplier Methods (ALMM)



รูปที่ 2.2 Classification of the transformation methods

จากสมการ (2.1) ถึง (2.4) วิธีการเปลี่ยนรูปฟังก์ชันเหล่านี้เข้ากับปัญหาที่ไม่จำเป็นสำหรับ สตูดิโอฟังก์ชัน จะได้ว่า

$$\phi(x,r) = F(x) + P[h(x),g(x),r] \quad (2.6)$$

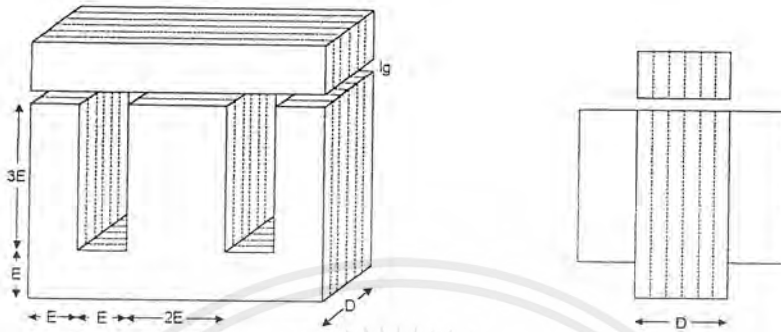
ขณะที่  $r$  คือเวกเตอร์ทั่วไปของตัวแปรควบคุม และ  $P[h(x),g(x),r]$  คือ ค่าฟังก์ชันจริง ซึ่งแปรตามค่า  $r$  รูปแบบของ  $P$  ขึ้นกับวิธีการที่ใช้ ฟังก์ชัน  $\phi(x,r)$  เป็นค่าของ Unconstrained ที่ต่ำที่สุด โดยการเก็บค่า  $r$  ในระหว่างที่ทำซ้ำแต่ละครั้ง ค่าพารามิเตอร์  $r$  จะถูกเปลี่ยนใหม่และกระบวนการ จะถูกทำซ้ำจนกระทั่งไม่สามารถปรับปรุงค่าได้อีกแล้ว สำหรับค่า  $P$  และ  $r$  ที่เหมาะสมควรใช้วิธี

Unconstrained แก้ปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

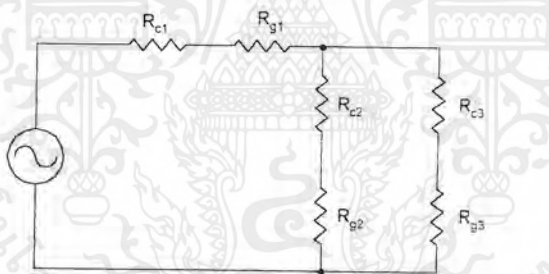
2.4 แบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI

รูปร่างของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่ง 2E คือความกว้างของแกน และ D คือความหนาของแกนเหล็ก



รูปที่ 2.3 EI-Core Inductor Configuration

จากรูปร่างของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในรูปที่ 2.3 สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรแม่เหล็กได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Magnetic Circuit

จากรูปวงจรแม่เหล็กสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ(L) [6,7] ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$L = \frac{N^2}{R} \tag{2.7}$$

$$= \frac{N^2 (\mu_0 \mu_c ED)}{\mu_0 (2E + E + 3E) + \mu_c l_g} \tag{2.8}$$

$$= \frac{N^2 ED}{\frac{2E + E + 3E}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0}} \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\mu_c$  มีค่ามากกว่า  $\mu_0$  มากๆ  $\therefore \frac{2E + E + 3E}{\mu_c} \ll \frac{l_g}{\mu_0}$  (2.10)

$$L = \frac{\mu_0 N^2 ED}{l_g} \quad (2.11)$$

- ค่าโดยที่
- $L$  = ความเหนี่ยวนำ(Inductance)
  - $N$  = จำนวนรอบของขดลวด(Turns)
  - $R$  = ค่าความต้านทานแม่เหล็ก(Reluctance)
  - $R_c$  = ค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็ก(Reluctance of Core)
  - $R_g$  = ค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องอากาศ(Reluctance of Free Space)
  - $\mu_0$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมซาบแม่เหล็กของช่องอากาศ(Permeability of Free Space)
  - $\mu_c$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็ก(Permeability of Core)
  - $l_g$  = ค่าความกว้างช่องอากาศ

จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างช่องอากาศ ( $l_g$ ) จะแปรผกผันกับค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ )

## 2.5 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI โดยวิธี Optimization

ซึ่งการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของโปรแกรมออกแบบจะอาศัยสมการ 2 สมการซึ่งได้แก่ สมการเป้าหมายหรือสมการฟังก์ชันหลัก (Objective function) และสมการเงื่อนไข(Constraint fuction) ตามหลักการของวิธีการ Optimization ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ซึ่งสมการเป้าหมายจะได้จากเป้าหมายในการออกแบบ โดยวิธีนี้จะพิจารณาเป้าหมายอยู่ 3 ประการดังนี้

1. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI ที่มีน้ำหนักเบาที่สุด(Minimum Weight) น้ำหนักทั้งหมดของตัวเหนี่ยวนำ ประกอบด้วยน้ำหนักของแกนเหล็ก และน้ำหนักของขดลวด
2. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI ที่มีราคาต่ำที่สุด(Minimum Cost) ราคาของตัวเหนี่ยวนำประกอบด้วยราคาของแกนเหล็ก และราคาของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การออกแบบค้ำเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI ที่มีค่าความสูญเสียน้อยที่สุด (Minimum Loss) การที่เราจะทำให้มีค่าความสูญเสียน้อยที่สุด เราจะต้องทำให้เกิดความสูญเสียในแกนเหล็ก และความสูญเสียในขดลวดให้มีค่าน้อยที่สุด โดยที่ความสูญเสียทั้งสองเป็นความสูญเสียรวมทั้งหมดของค้ำเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ซึ่งจากเป้าหมายในการออกแบบสามารถนำมาเขียนเป็นสมการ[5] โดยพิจารณาจากรูปร่างค้ำเหนี่ยวนำไฟฟ้านี้

$$f_{(weight)} = \text{น้ำหนักแกนเหล็ก} + \text{น้ำหนักขดลวดค้ำนำ} \\ = [24D_i F_s E^2 D] + [6D_w F_c F_w E^2 (2ED)] \quad (2.12)$$

$$f_{(cost)} = (\text{ราคาแกนเหล็กต่อน้ำหนัก} \times \text{น้ำหนักแกนเหล็ก}) + (\text{ราคาขดลวดทองแดงต่อน้ำหนัก} \times \text{น้ำหนักขดลวดทองแดง}) \\ = [C_{core} \times (24D_i F_s E^2 D)] + [C_{copper} \times \{6D_w F_c F_w E^2 (2ED)\}] \quad (2.13)$$

$$f_{(loss)} = (\text{กระแสยกกำลังสอง} \times \text{ความต้านทานขดลวดทองแดง}) + (\text{กำลังสูญเสียค้ำนำน้ำหนัก} \times \text{น้ำหนักเหล็ก}) + \text{ค่าสูญเสียที่ช่องอากาศ} \\ = I^2 R + [P_{core/kg} \times (24D_i F_s E^2 D)] + P_{gap} \quad (2.14)$$

เมื่อ	$D_i$	คือ ความหนาแน่นของแกนเหล็ก
	$D_w$	คือ ความหนาแน่นของค้ำนำ
	$F_s$	คือ stacking factor
	$F_c$	คือ (Pitch factor) อัตราส่วนค้ำนำต่อเส้นรอบวง
	$F_w$	คือ (window utilization factor) พื้นที่ช่องว่างของขดลวดที่เกิดขึ้นบนแกนเหล็กที่นำมาพัน
	$C_{core}$	คือ ราคาแกนเหล็กต่อกิโลกรัม
	$C_{copper}$	คือ ราคาขดลวดค้ำนำต่อกิโลกรัม
	$P_{core/kg}$	คือ ค่าสูญเสียในแกนเหล็กต่อกิโลกรัม
	$P_{gap}$	คือ ค่าสูญเสียในช่องอากาศ
	$I$	คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านค้ำเหนี่ยวนำ
	$R$	คือ ค่าความต้านทานของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนสมการเงื่อนไข [5] ได้มาจากการที่ออกแบบต้องคำนึงถึงเงื่อนไขที่ทำให้ได้รูปร่างของตัวเหนี่ยวนำแกน EI ที่เหมาะสมดังต่อไปนี้

1) ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก [6,7]

$$\text{จาก } L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} = \frac{NB_m A_c F_s}{I} \quad (2.15)$$

$$B_m A_c F_s N = LI \quad (2.16)$$

โดยที่  $B_m$  คือ ความหนาแน่น Flux แม่เหล็ก

$\lambda$  คือ Flux เกี่ยวคล้อง

$\phi$  คือ Fluxแม่เหล็ก

$N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก

2) พื้นที่ช่องว่าง

$$\frac{A_w N}{F_w} = E(3E) \quad (2.17)$$

ซึ่งจากสมการที่ (2.15) และ (2.16) สามารถกำจัดตัวแปร  $N$  ได้ คือ

$$N = \frac{LI}{B_m A_c F_s} = \frac{3E^2 F_w}{A_w} \quad (2.18)$$

$$\frac{B_m A_c F_s 3E^2 F_w}{A_w} - LI = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{B_m (2ED) F_s 3E^2 F_w}{A_w} - LI = 0 \quad (2.20)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ Inequality constraint คือ

$$\frac{B_m F_s F_w D 6E^2}{A_w} - LI = 0 \quad (2.21)$$

$$\text{โดยที่ } 0.002 < E < 0.3 \quad (2.22)$$

$$0.0005 < D < 0.3 \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า  $D$  และ  $E$  จะกำหนดให้อยู่ในช่วงที่ Feasible เพื่อให้สามารถหาซื้อแกนเหล็กได้ตามท้องตลาด

## 2.6 สูตรการคำนวณต่างๆ ที่ใช้ในโปรแกรมออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธี Optimization

จากสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขที่ได้ เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณค่าโดยวิธี Numerical Optimization แล้วจะทำให้ได้ค่า  $E$  และค่า  $D$  ที่เหมาะสมค่าต่างๆ ที่ขึ้นกับเป้าหมายในการออกแบบ ซึ่งค่า  $E$  และ  $D$  ที่ได้นี้จะนำมาคำนวณหาค่าต่างๆ จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและมีค่าคุณสมบัติต่างๆ ดังสมการต่อไปนี้

1. ค่าจำนวนรอบของขดลวด

$$N = \frac{\sqrt{LI}}{B_m \cdot 2E \cdot D \cdot F_s} \quad (2.24)$$

2. ความกว้างช่องอากาศ

$$l_g = \frac{N^2 \mu_0 E D}{L} \quad (2.25)$$

3. ค่าน้ำหนักต่างๆ

- ค่าน้ำหนักของขดลวด

$$W_w = 6D_w F_c F_w E^2 (2ED) \quad (2.26)$$

- ค่าน้ำหนักของแกนเหล็ก

$$W_i = 24D_i F_s E^2 D \quad (2.27)$$

- ค่าน้ำหนักรวม

$$W_t = W_w + W_i \quad (2.28)$$

4. ค่าสูญเสียต่างๆ

- ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก

$$P_{core} = P_{core, kg} \times 24D_i F_s E^2 D \quad (2.29)$$

- ค่าสูญเสียในขดลวด

$$P_{cu} = I^2 R \quad (2.30)$$

- ค่าสูญเสียในช่องอากาศ

$$P_{gap} = K_f (2E) (2l_g) f B_m^2 \quad (2.31)$$

- ค่าสูญเสียรวม

$$P_t = P_{core} + P_{cu} + P_{gap} \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5. รูปร่างตัวเหนียวนา

- ค่าความกว้างแกนเหล็ก 2E
- ค่าความหนาแกนเหล็ก D

ซึ่งค่าต่างๆที่ได้ก็นำมาสร้างคั่นแบบตัวเหนียวนี้เพื่อนำมาวิเคราะห์ทดสอบต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

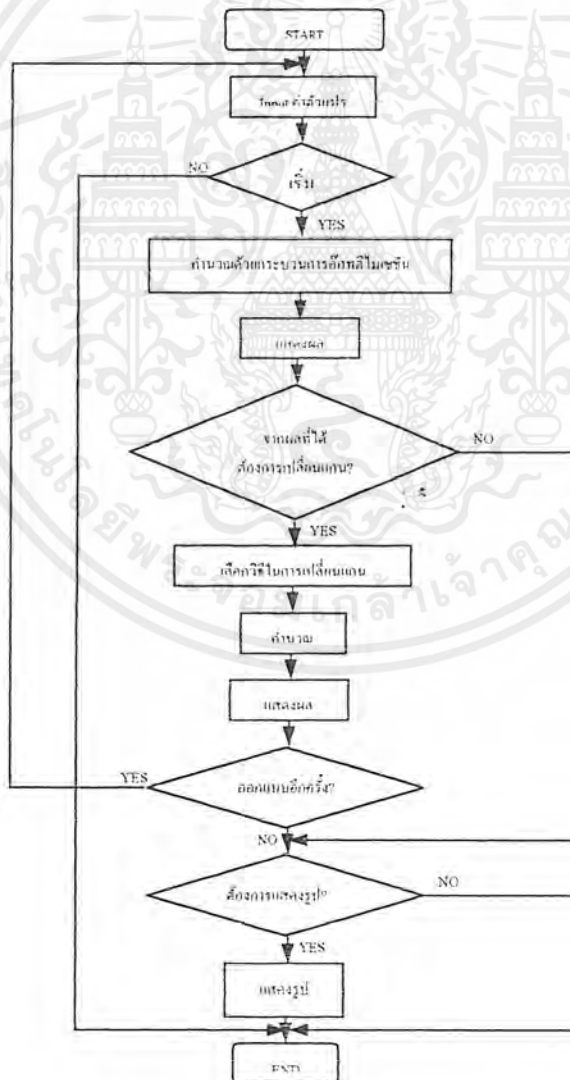
## การออกแบบและการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

### 3.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ที่มีช่องอากาศ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI โปรแกรมออกแบบที่อาศัยหลักการ Numerical Optimization ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะแสดงขั้นตอนวิธีการออกแบบได้ดังนี้

#### 3.1.1 แผนภูมิขั้นตอนการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI

สามารถแสดงเป็นแผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมออกแบบได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนภูมิการทำงานของ โปรแกรมออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ขั้นตอนต่างๆ ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรมออกแบบ สามารถแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมได้เป็นส่วนๆ ดังต่อไปนี้

ก. ขั้นตอนการป้อนข้อมูลตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ต้องการ

ค่า Input ที่ต้องทำการป้อนค่ามีดังนี้

1. เป้าหมายในการออกแบบ (Objective)

- Minimum Weight of inductance core EI
- Minimum Cost of inductance core EI
- Minimum Loss of inductance core EI

2. ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance, mH)

3. ค่ากระแส (Current) ซึ่งต้องทำการเลือกหน่วย mA หรือ A ด้วย

4. ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (Flux Density, Tesla)

5. ค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density, A/cm<sup>2</sup>)

6. ค่า Condition ต่างๆ

- Fs (Stacking Factor) ค่าตัวประกอบพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
- Di (Density Core, Kg./m<sup>3</sup>) ค่าความหนาแน่นของแกนเหล็กตัวเหนี่ยวนำ
- Dw (Density Winding, Kg./m<sup>3</sup>) ค่าความหนาแน่นของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ
- Cco (Cost of core, Bath/Kg.) ราคาของแกนเหล็กตัวเหนี่ยวนำ
- Ccu (Cost of Winding, Bath/Kg.) ราคาของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ
- Pco (Core loss, Watt/Kg.) ค่าสูญเสียของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ต่อกิโลกรัม

7. เลือกชนิด Wire Gauges , A.W.G. หรือ S.W.G.

ซึ่งค่าต่างๆที่จำเป็นต้องระบุหรือป้อนค่าในส่วนนี้คือ เป้าหมายในการออกแบบ

(Minimum Weight, Minimum Cost, Minimum Loss), ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต้องการ (L) และค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำ (I)

หน้าจอรับข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3.2

Objective		Condition	
<input type="radio"/> Minimum Weight of inductance core EI		Fs	0.95
<input type="radio"/> Minimum Cost of inductance core EI		D1	7650.00 Kg./m <sup>3</sup>
<input type="radio"/> Minimum Loss of inductance core EI		D2	8080.00 Kg./m <sup>3</sup>
Inductance	Current	Cco	47.00 Bath/Kg.
50 mH	5 mA	Ccu	130.00 Bath/Kg.
		Pco	2.0000 Watt/Kg.
Flux Density	Current Density	Wire Gauges	
1.2 Tesla	250 A/cm <sup>2</sup>	<input type="radio"/> A W G	
		<input type="radio"/> S W G	14

รูปที่ 3.2 หน้าจอรับข้อมูลของโปรแกรมออกแบบ

ข. ขั้นตอนการแสดงผลจากการออกแบบ

ส่วนของการแสดงผล แสดงรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

1. Dimension คือ ขนาดความกว้าง ความยาว ความหนา ของตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น cm
2. Weight คือ น้ำหนักของตัวเหนี่ยวนำ
  - Wt (Total Weight, Kg) น้ำหนักรวมของตัวเหนี่ยวนำ
  - Wi (Weight of Core, Kg) น้ำหนักของขดลวด
  - Ww (Weight of Winding, Kg) น้ำหนักของแกนเหล็ก
3. Cost คือ ราคาของตัวเหนี่ยวนำ
  - Ct (Total Cost, Bath) ราคารวมของตัวเหนี่ยวนำ
  - Cco (Cost of Core, Bath) ราคาของแกนเหล็ก
  - Ccu (Cost of Winding, Bath) ราคาของขดลวด
4. Loss คือ ค่าความสูญเสีย
  - Pt (Total loss, Watt) ค่าสูญเสียรวมของตัวเหนี่ยวนำ
  - Pco (Core loss, Watt) ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก
  - Pcu (Copper loss, Watt) ค่าสูญเสียในขดลวด
  - Pgp (Gap loss, Watt) ค่าสูญเสียในช่องอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Detail คือ รายละเอียดอื่น ๆ

- N (Number of turn, Turn) จำนวนรอบของขดลวด
- Lg (Length of Gap ,mm) ค่าความกว้างช่องอากาศ
- Lt (Length of Winding, m) ค่าความยาวของขดลวด
- R (Resistance, Ohm) ค่าความต้านทานของขดลวด
- L (Inductance ,milli Henry) ค่าความเหนี่ยวนำ
- I (Current, Ampere) ค่ากระแสที่ทนได้ของตัวเหนี่ยวนำ
- J (Current Density, A/cm<sup>2</sup>) ค่าความหนาแน่นกระแส
- Ac ( Area of core, mm<sup>2</sup>) ค่าพื้นที่หน้าตัดของขดลวด
- Fs (Stacking Factor) ค่าตัวประกอบพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
- Fc (Pitch Factor) ค่าอัตราส่วน MLT คอเส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
- Fw (Windows utilization Factor) เปอร์เซนต์พื้นที่ใช้งานของขดลวดตัวนำ
- Bmax (Flux density, Tesla) ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก
- ชนิดของ Wire gauges (S.W.G. หรือ A.W.G) ชนิดของขดลวดตัวนำ

แสดงหน้าจอการทำงานของหน้าจอแสดงข้อมูล ได้ดังรูปที่ 3.3

Dimension		Detail		Detail	
2F	4.944 cm	N	560.982 Turn	Ldt	0.05000 H
D	3.846 cm	Lg	1.546 mm	Ipt	3.000 A
a	2.472 cm	Lt	56.146 m	Jt	250.000 A/cm <sup>2</sup>
b	7.416 cm	Rt	0.352 ohm	Act	3.243 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Fs	
Wt	5.963 Kg	Pt	47.762 Watt	Fc	1.442
Wi	4.099 Kg	Pcu	3.193 Watt	Fw	0.462
Ww	1.864 Kg	Pcu	22.505 Watt	Bmax	1.200 Tesla
		Pfp	17.060 Watt	SWG	14
Cost		Change case		Exp	Picture
Ct	134.931 Bath				
Cw	107.646 Bath				
Ccu	242.335 Bath				

รูปที่ 3.3 หน้าจอแสดงผลจากการออกแบบ

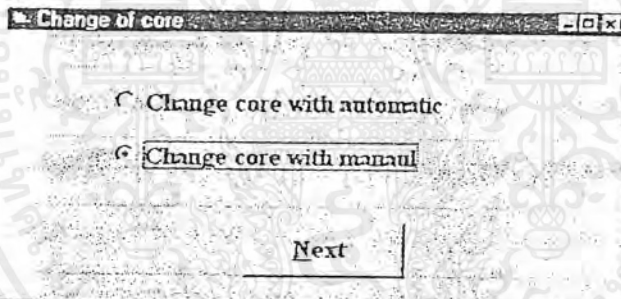
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ขั้นตอนการปรับแกน

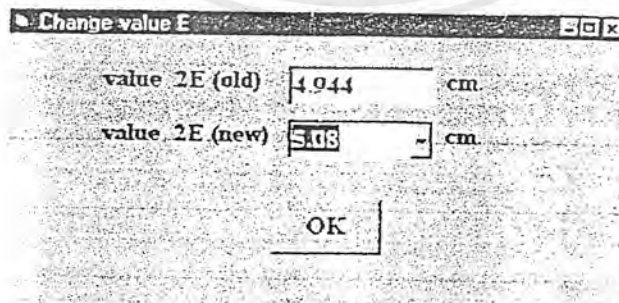
เนื่องจากข้อมูลของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากโปรแกรมออกแบบนั้น ขนาดของแกนไม่สามารถสร้างจริงเพื่อนำมาทดสอบได้เนื่องจากขนาดแกนนั้นไม่มีขายในท้องตลาด จึงต้องทำการปรับแกนใหม่ โดยค่าที่ปรับนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับขนาดเดิมเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ขั้นตอนการปรับแกนนั้นมีขั้นตอน 2 วิธีคือ 1. ปรับแกนแบบอัตโนมัติ

2. ปรับแกนแบบเลือกขนาดแกนเอง

โดยที่วิธีการปรับแกนแบบอัตโนมัตินั้น โปรแกรมจะทำการปรับขนาดแกนที่ใกล้เคียงกับค่าเดิมมากที่สุด แต่การปรับแบบเลือกเองนั้นสามารถที่จะเลือกขนาดแกนที่ต้องการได้เอง แสดงหน้าจอการเลือกวิธีปรับแกนแสดงดังรูปที่ 3.4 และแสดงหน้าจอการป้อนขนาดแกนที่ต้องการสำหรับการปรับแกน โดยวิธีเลือกขนาดแกนเองดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 หน้าจอแสดงขั้นตอนการเลือกวิธีปรับแกน



รูปที่ 3.5 หน้าจอแสดงขั้นตอนการป้อนขนาดแกนที่ต้องการ

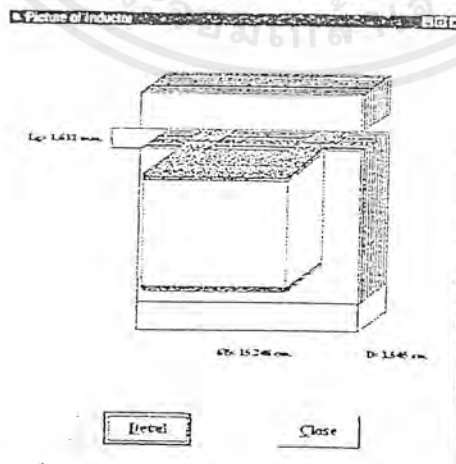
หลังจากนั้นจะได้ข้อมูลของตัวเหนี่ยวนำหลังจากทำการปรับการแล้วซึ่งข้อมูลที่ได้นั้นจะแสดงข้อมูลเช่นเดียวกันกับขั้นตอนการแสดงผลตอนแรก แสดงหน้าจอแสดงผลหลังจากการปรับแกนแล้วดังรูปที่ 3.6

Dimension		Detail		Detail	
2E	5.080 cm	N	575.554	Iron	Ldt 0.05000 H.
D	3.545 cm	Lg	1.632	non	Lpt 3.000 A.
n	2.540 cm	Lt	33.931	m	Lk 250.000 A/cm <sup>2</sup>
L	7.620 cm	Rr	0.366	ahan	Act 3.243 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Est	
Wt	5.932 Kg.	Pt	49.939	Watt	Fct 1.450
Wi	3.989 Kg.	Pco	7.078	Watt	Fwt 0.462
Ww	1.943 Kg.	Pcu	23.452	Watt	Bmax 1.200 Tesla
Cost		Pcp	18.508	Watt	SWC 14
Ct	440.021 Bath				
Cco	187.483 Bath				
Ccu	252.538 Bath				

รูปที่ 3.6 หน้าจอแสดงผลหลังจากการปรับแกน

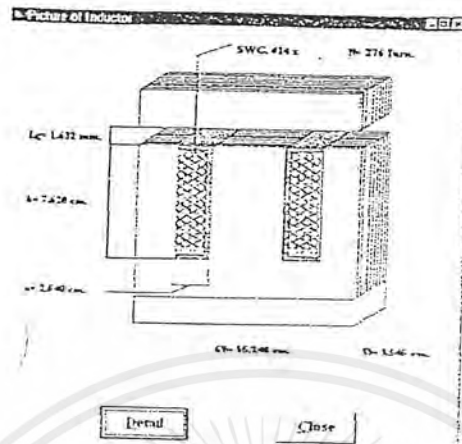
ง. ขั้นตอนการแสดงผล โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ

ขั้นตอนนี้จะแสดงผลโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบได้เป็นรูปภาพ แสดงหน้าจอแสดงผลโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 หน้าจอแสดงผล โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 หน้าจอแสดง โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ

### 3.2 ผลที่ได้จากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

#### 3.2.1 การเปรียบเทียบผลจากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ผลจากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ออกแบบโดยวิธี Numerical Optimization เป้าหมาย ต่างๆกันและวิธี Area Product จะได้ผลจากการออกแบบดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

$$L = 42 \text{ mH}, I = 5 \text{ A}$$

	น้ำหนัก (Kg)	ราคา (Cost)	ค่าสูญเสีย (Loss)
Minimum Weight	3.134	248.042	22.201
Minimum Cost	3.297	220.270	15.256
Minimum Loss	4.263	252.804	13.471
Arca Product	3.340	243.18	16.71

ตารางที่ 3.1 ผลจากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5A ออกแบบโดยวิธีต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$L = 68 \text{ mH}, I = 5 \text{ A}$

	น้ำหนัก (Kg)	ราคา (Cost)	ค่าสูญเสีย (Loss)
Minimum Weight	<b>5.105</b>	394.624	30.037
Minimum Cost	5.677	<b>366.501</b>	19.826
Minimum Loss	6.815	407.390	<b>17.986</b>
Area Product	6.960	437.49	24.29

ตารางที่ 3.2 ผลจากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5A ออกแบบโดยวิธีต่างๆ

จากตารางจะเห็นได้ว่า การออกแบบโดยวิธี Optimization หากเลือกเป้าหมายโดยให้น้ำหนักน้อยที่สุด จะได้ตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบโดยวิธีอื่น หากเลือกเป้าหมายโดยให้มีราคาต่ำที่สุด จะได้ตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาต่ำที่สุด และหากเลือกเป้าหมายให้มีความสูญเสียน้อยที่สุด จะได้ตัวเหนี่ยวนำที่มีความสูญเสียน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบโดยวิธีอื่น

### 3.2.2 การเปรียบเทียบรูปร่างของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการออกแบบ

รูปร่างที่ได้ของตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธีต่างๆ สามารถที่จะแสดงได้ตาราง

ที่ 3.3

$L = 42 \text{ mH}, I = 5 \text{ A}$

	ค่า 2E (cm)	ค่า D (cm)
Minimum Weight	4.44	2.234
Minimum Cost	3.5	4.699
Minimum Loss	2.54	12.908
Area Product	3.81	3.81

ตารางที่ 3.3 รูปร่างตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5A ที่ออกแบบโดยวิธีต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = 68 \text{ mH}, I = 5 \text{ A}$$

	ค่า 2E (cm)	ค่า D (cm)
Minimum Weight	5.08	2.88
Minimum Cost	3.81	7.072
Minimum Loss	3.0	14.69
Area Product	5.08	5.08

ตารางที่ 3.4 รูปร่างตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5A ที่ออกแบบ โดยวิธีต่างๆ

จากตารางสรุปได้ว่า

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้วิธี Area Product รูปร่างของแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ด้าน  $2E=D$

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้วิธี Numerical Optimization โดยเป้าหมายต่างๆ กันได้รูปร่างดังนี้ - เป้าหมายน้ำหนักเบาที่สุด จะมีรูปร่างของแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยที่ด้าน  $2E > D$

- เป้าหมายราคาถูกที่สุด จะมีรูปร่างของแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยที่ด้าน  $2E < D$

- เป้าหมายค่าสูญเสียน้อยที่สุด จะมีรูปร่างของแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยที่ด้าน  $2E < D$

### 3.3 ตัวเหนี่ยวนำที่ได้ทำการสร้าง

หลังจากทำการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธี Numerical Optimization หลายๆรูปทรงโดยเป้าหมายต่างๆ เพื่อทำการทดสอบหาคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำที่ได้ต่อไป โดยข้อมูลจากโปรแกรมของเหนี่ยวนำที่ได้ทำการออกแบบไว้แสดงในภาคผนวก ค

ตัวเหนี่ยวนำที่ได้ทำการสร้างเพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติมีดังต่อไปนี้

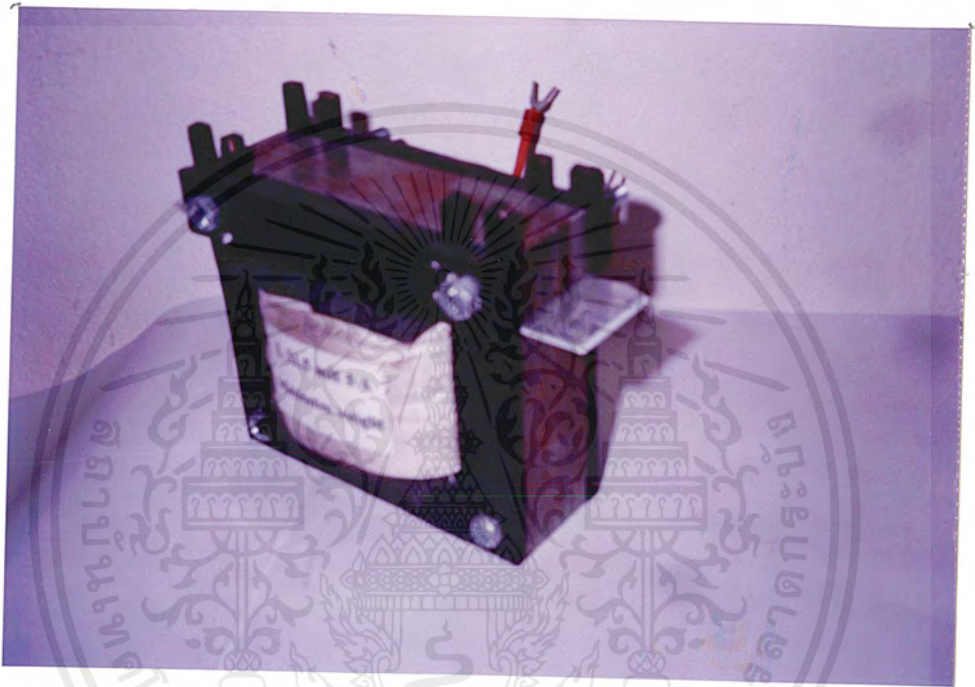
1. ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5A ออกแบบโดยวิธี Optimization เป้าหมายน้ำหนักน้อยที่สุด มีรูปแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A ออกแบบโดยวิธี Optimization เป้าหมายน้ำหนักน้อยที่สุด มีรูปแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

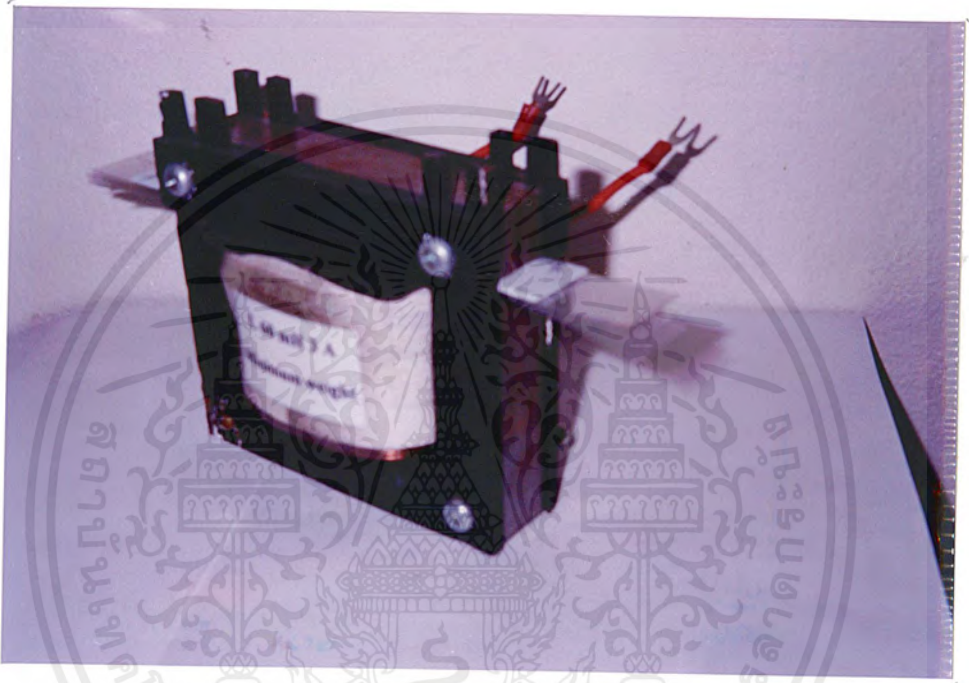
3. ตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5A ออกแบบโดยวิธี Optimization เป้าหมายน้ำหนักน้อยที่สุด มีรูปแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

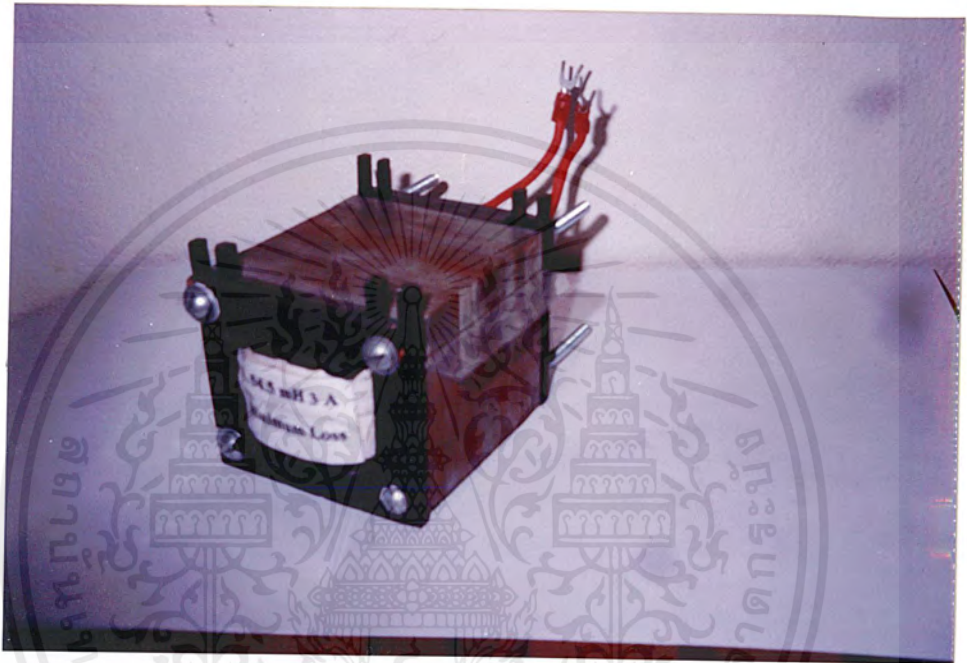
4. ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3A ออกแบบโดยวิธี Optimization เป้าหมายน้ำหนักน้อยที่สุด มีรูปแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

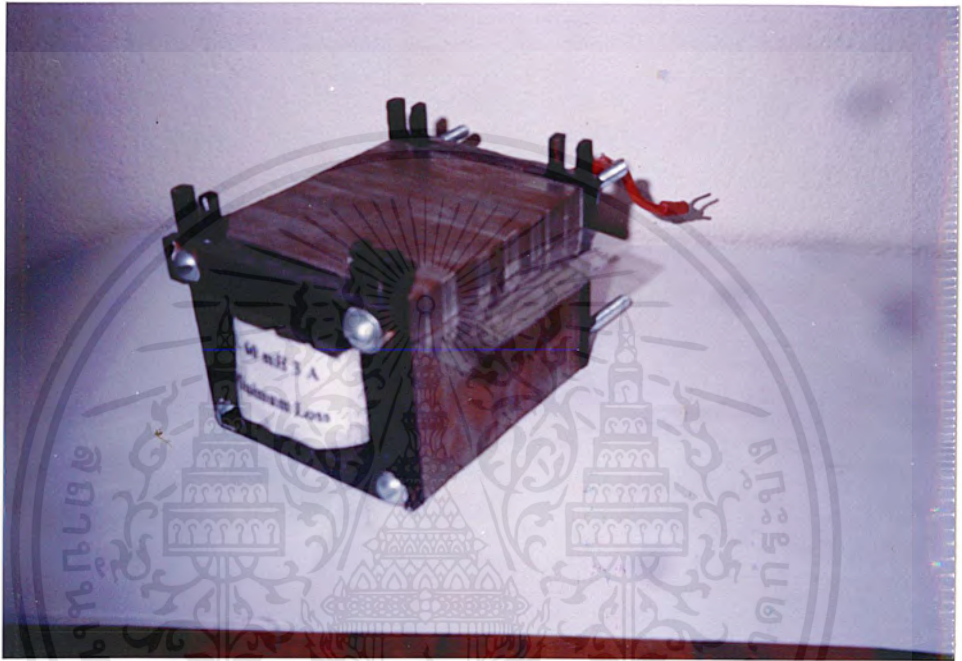
5. ตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3A ออกแบบโดยวิธี Optimization เป้าหมายค่าสูญเสียน้อยที่สุด มีรูปแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3 A (Optimization : Minimum loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3A ออกแบบโดยวิธี Optimization เป้าหมายค่าสูญเสียที่น้อยที่สุด มีรูปแสดงดังรูปที่ 3.14



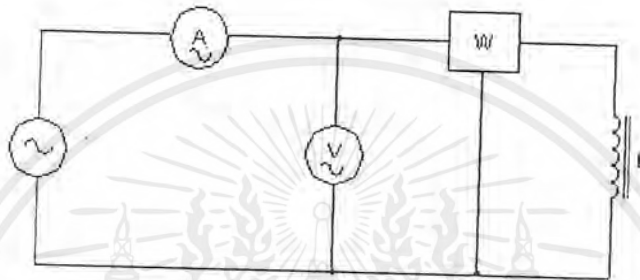
รูปที่ 3.14 รูปของตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ

การทดสอบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพื่อหาคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างคุณสมบัติผลที่ทดสอบได้ กับผลที่ได้จากการออกแบบ

ซึ่งการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้านั้นจะใช้วงจรทดสอบดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.15 วงจรทดสอบคุณสมบัติแกนเหล็ก

ลักษณะการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำนั้นสามารถแบ่งลักษณะของการทดสอบได้ดังนี้

#### 3.4.1 การทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำ

โดยการทดสอบนี้จะทดสอบเพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยดูผลของช่องอากาศที่มีต่อค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะทำการทดสอบโดยคงค่ากระแสไว้ที่ค่าๆ หนึ่ง แล้วทำการปรับค่าความกว้างช่องอากาศไปเรื่อยๆ แล้วทำการบันทึกค่าแรงดัน (V) และค่ากำลังงาน (P) ที่ค่าต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำดังสมการต่อไปนี้

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{P}{VI} \right) \quad (3.1)$$

$$Z = \frac{V}{I} \quad (3.2)$$

$$X_L = Z \cdot \sin \theta \quad (3.3)$$

$$L = \frac{Z \cdot \sin \theta}{2\pi f} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_L = 2\pi fL \quad (3.5)$$

- โดยที่  $P$  = ค่ากำลังไฟฟ้า (watt)  
 $V$  = ค่าแรงดันไฟฟ้า (volt)  
 $I$  = ค่ากระแสไฟฟ้า (Amp)  
 $Z$  = ค่าอิมพีแดนซ์ (ohm)  
 $f$  = ค่าความถี่ (Hz)  
 $\theta$  = ค่ามุมระหว่างแรงดัน และกระแสไฟฟ้า

เมื่อทำการทดสอบแล้วได้ตัวอย่างผลการทดสอบดังตารางต่อไปนี้

L 42 mH, 5 A, Gap 0.635 mm ออกแบบโดยวิธี Area Product

GAP	V(Volt)	I(A)	P(W)	L(mH)
Close	100.6	5	27.6	63.924
0.55	72.7	5	17.9	46.209
<b>0.6</b>	<b>68.5</b>	5	<b>17.1</b>	<b>43.538</b>
0.65	63.4	5	16.5	40.292
Open	13.33	5	9.33	8.473

ตารางที่ 3.5 ผลการทดลองตัวเหนี่ยวนำ 42 mH กระแส 5 A (Area Product)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L 42 mH, 5A, Gap 1.091 mm. ออกแบบโดยวิธี Optimization: Minimum Weight

GAP	V(Volt)	I(A)	P(W)	L(mH)
Close	113.5	5	27.00	72.147
0.5	104.2	5	26.10	66.228
1	94.33	5	24.20	59.951
1.5	84.33	5	22.00	53.593
2	75.5	5	20.20	47.978
2.5	69.2	5	19.00	43.971
2.6	68	5	18.80	43.208
2.7	67.2	5	18.66	42.699
<b>2.8</b>	<b>66.1</b>	<b>5</b>	<b>18.33</b>	<b>42.000</b>
2.9	65	5	18.25	41.300
3	63.33	5	17.90	40.238
open	36.75	5	13.20	23.327

ตารางที่ 3.6 ผลการทดลองตัวเหนี่ยวนำ 42 mH กระแส 5 A (Optimization)

L 68 mH, 5A, Gap 0.736 mm. Optimization : Minimum Loss

GAP	V(Volt)	I(A)	P(W)	L(mH)
Close	200	5	50	127.117
0.5	150	5	33	95.365
<b>0.7</b>	<b>107</b>	<b>5</b>	<b>22</b>	<b>68.035</b>
0.9	92.5	5	19.5	58.813
Open	22	5	11	13.931

ตารางที่ 3.7 ผลการทดลองตัวเหนี่ยวนำ 68 mH กระแส 5 A (Optimization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผลการทดลองตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A, 50 mH 5 A, 60 mH 3 A (เป้าหมายน้ำหนักน้อยที่สุด) 54.5 mH 3A, 60 mH 3A (เป้าหมายค่าสูญเสียน้อยที่สุด) แสดงในภาคผนวก ค

จากผลการทดลองพบว่า

- ก) ค่าความเหนี่ยวนำแปร ผกผันกับค่าความกว้างช่องอากาศจริง ตรงตามสมการ (2-11) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสอดคล้องทั้งตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการออกแบบ โดยวิธี Optimization ทุกๆ เป้าหมายการออกแบบและ วิธี Area Product
- ข) ค่าแรงดันที่ได้แปรผกผันกับค่าความกว้างช่องอากาศด้วยซึ่งได้จากกับสมการ

$$L = \frac{\mu_0 N^2 ED}{l_g} \quad (3.6)$$

$$v = 2\pi f Li \quad (3.7)$$

$$v = 2\pi f \left( \frac{N^2 \mu_0 E d}{l_g} \right) i \quad (3.8)$$

ซึ่งพฤติกรรมนี้สอดคล้องตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการออกแบบทุกๆวิธี

### 3.4.2 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวเหนี่ยวนำ

จะทำการทดสอบโดยคงค่าความกว้างช่องอากาศที่ได้จากการทดสอบ ที่ทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการในการออกแบบ และปรับค่ากระแสทดสอบไปที่ค่าต่างๆ แล้วทำการบันทึกค่าแรงดัน (V) และค่ากำลังงาน (P) ที่แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำดังสมการ (2-6)

เมื่อทำการทดสอบแล้วได้ตัวอย่างผลการทดสอบดังตารางต่อไปนี้

L 42 mH. 5 A, Gap ที่ทดสอบ 0.6 mm ออกแบบโดยวิธี Area Product

I(A)	V(Volt)	P(W)	L(mH)
0.5	6.74	0.532	42.357
1	13.5	1.36	42.739
1.5	20.45	2.66	43.218

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2	27.47	4.2	43.577
2.5	34.47	6.33	43.754
3	41.5	8.75	43.908
3.5	48.6	11.25	44.087
4	55.5	13.9	44.063
4.5	62.2	17.33	43.897
5	68.7	18.8	43.654

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Area Product)

42 mH, 5A, Gap ที่ทดสอบ 2.8 mm. ออกแบบโดยวิธี Optimization: Minimum Weight

I(A)	V(Volt)	P(W)	L(mH)
1.5	19.75	1.66	41.830
2	26.33	3	41.822
2.5	33.1	4.66	42.062
3	39.8	6.5	42.151
3.5	46.33	8.9	42.056
4	53	11.66	42.097
4.5	59.5	14.8	42.008
5	66.3	18.5	42.127

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Optimization)

ส่วนผลการทดลองตัวเหนี่ยวนำที่ 31.5 mH 5A, 50 mH 5 A, 60 mH 3 A (เป้าหมายน้ำหนักน้อยที่สุด) 54.5 mH 3A, 60 mH 3A (เป้าหมายค่าสูญเสียน้อยที่สุด) แสดงในภาคผนวก ค จากการทดลองพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคงค่าความกว้างช่องอากาศไว้ที่ค่าๆ หนึ่ง แล้วทำการปรับค่ากระแส จะทำให้ตัวเหนี่ยวนำที่มีความเป็นเชิงเส้น (Linearity) จริง คือจะมีค่าความเหนี่ยวนำประมาณค่าๆหนึ่งตามการออกแบบจริง ซึ่งจะเห็นได้ว่าพฤติกรรมความเป็นเชิงเส้นนี้สอดคล้องทั้งตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการออกแบบโดยวิธี Optimization และ วิธี Area Product

### 3.4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลจากการออกแบบ

หลังจากที่ได้ทำการทดลองหาคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำแล้ว ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำต้นแบบกับตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบไว้ ซึ่งแสดงเปรียบเทียบในแต่ละวิธีการออกแบบได้ดังนี้

#### ออกแบบโดยวิธี Area Product

แสดงตัวอย่างตารางการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการออกแบบ และ จากการทดสอบได้ดังนี้

L 42 mH, 5 A, Gap 0.635 mm. Area Product

	จากการออกแบบ	จากการทดสอบ
ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)	42	43.538
2E (cm.)	3.81	3.81
D (cm.)	3.81	3.81
จำนวนรอบ (Turn.)	160	160
ความกว้างช่องอากาศ (mm.)	0.635	0.6
ค่าสูญเสีย (W)	16.638	17.1

ตารางที่ 3.10 การเปรียบเทียบผลจากการออกแบบและผลจากการทดสอบ  
ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5A (Area Product)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางเปรียบเทียบพบว่า

ที่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ ค่าการสูญเสียของตัวเหนี่ยวนำที่ทดสอบได้จากคั้นแบบ และค่าความกว้างช่องอากาศของตัวเหนี่ยวนำ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการออกแบบ และมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

### ออกแบบโดยวิธี Optimization

แสดงตัวอย่างตารางการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการออกแบบ และ จากการทดสอบ ได้ดังนี้

L 42 mH, 5A, Gap 1.091 mm. Optimization : Minimum Weight

	จากการออกแบบ	จากการทดสอบ
ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)	42	42
2E (cm.)	5.08	5.08
D (cm.)	1.653	1.65
จำนวนรอบ (Turn.)	294.707	295
ความกว้างช่องอากาศ (mm.)	1.091	2.8
ค่าสูญเสีย (W)	26.30	20.33

ตารางที่ 3.11 การเปรียบเทียบผลจากการออกแบบและผลจากการทดสอบ  
ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5A (Optimization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L 68 mH, 5A, Gap 0.736 mm. Optimization : Minimum Loss

	จากการออกแบบ	จากการทดสอบ
ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)	68	68.035
2E (cm.)	3.81	3.81
D (cm.)	7.615	7.62
จำนวนรอบ (Turn.)	165.736	165
ความกว้างช่องอากาศ (mm.)	0.736	0.7
ค่าสูญเสีย (W)	21.009	22

ตารางที่ 3.12 การเปรียบเทียบผลจากการออกแบบและผลจากการทดสอบ

ตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5A (Optimization)

จากตารางสามารถแยกผลการเปรียบเทียบตามเป้าหมายการออกแบบที่ออกแบบ โดยวิธี Optimization นี้ ได้ดังนี้

ก. เป้าหมายค่าสูญเสียน้อยที่สุด

พบว่า ที่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการนั้น ค่าความกว้างช่องอากาศของตัวเหนี่ยวนำ และค่าความสูญเสียที่ทดสอบ ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

ข. เป้าหมายน้ำหนักเบาที่สุด

พบว่า ที่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการนั้น ค่าความกว้างช่องอากาศของตัวเหนี่ยวนำ มีค่าไม่ตรงกับค่าความกว้างช่องอากาศจากการออกแบบ และมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่มาก และค่าความสูญเสียที่ทดสอบ ได้ก็มีความคลาดเคลื่อนจากที่ได้ออกแบบไว้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวเหนียวนำ

สามารถสรุปผลการทดสอบ โดยแยกผลการทดสอบคุณสมบัติตามวิธีที่ใช้ออกแบบตัวเหนียวนำได้ ดังนี้

#### 1. ตัวเหนียวนำที่ออกแบบ โดยวิธี Area Product

พบว่า ตัวเหนียวนำที่ออกแบบ โดยวิธีนี้ สามารถสร้างตัวเหนียวนำตามข้อมูลที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ได้คุณสมบัติตามที่ได้ออกแบบไว้ คือ มีค่าความกว้างช่องอากาศตรงกับที่ได้ออกแบบไว้ มีค่าสูญเสียตรงกับที่ได้ออกแบบไว้ และตัวเหนียวนำที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นจริง ตามคุณสมบัติของตัวเหนียวนำที่มีช่องอากาศ

#### 2. ตัวเหนียวนำที่ออกแบบไว้โดยวิธี Area Product

แบ่งตามเป้าหมายที่ต้องการ

##### ก. เป้าหมายค่าสูญเสียที่น้อยที่สุด

พบว่า ตัวเหนียวนำที่ออกแบบ โดยวิธีนี้ สามารถสร้างตัวเหนียวนำตามข้อมูลที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ได้คุณสมบัติตามที่ได้ออกแบบไว้ คือ มีค่าความกว้างช่องอากาศตรงกับที่ได้ออกแบบไว้ มีค่าสูญเสียตรงกับที่ได้ออกแบบไว้ และตัวเหนียวนำที่ได้มีความเป็นเชิงเส้น

##### ข. เป้าหมายน้ำหนักเบาที่สุด

พบว่า ตัวเหนียวนำที่ออกแบบ โดยวิธีนี้ ถ้าต้องการให้ค่าความเหนียวนำที่ต้องการ คุณสมบัติของตัวเหนียวนำยังไม่ตรงกับที่ออกแบบนัก คือ ค่าความกว้างช่องอากาศ และค่าความสูญเสียยังมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่มาก แต่ตัวเหนียวนำที่ได้มีความเป็นเชิงเส้น

ซึ่งในบทต่อไปจะทำการวิเคราะห์หาแนว โนมัสสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบ โดยวิธี Optimization ที่มีเป้าหมายน้ำหนักเบาที่สุด รวมทั้งแนวทางการแก้ไขปัญหามาจากการออกแบบ

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบ และการแก้ไขการออกแบบ

จากผลการทดสอบที่ได้กล่าวมาแล้วดังบทที่ 3 สามารถนำผลการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบต้นแบบตัวเหนี่ยวนำที่ทำการสร้างโดยวิธีต่างๆ ได้ต่อไปนี้

#### 4.1 ผลของรูปทรงแกนกลางกับการออกแบบ

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำสามารถนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำว่ามีผลเนื่องจากรูปทรงของแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำได้ดังต่อไปนี้

ก. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยวิธี Area Product

รูปทรงของแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยวิธีนี้พบว่ารูปทรงของแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำนั้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสที่ ด้าน 2E เท่ากับด้าน D หลังจากทำการทดสอบคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำพบว่า คุณสมบัติที่ทดสอบได้ตรงกับที่ได้ออกแบบไว้

ข. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยวิธี Numerical Optimization

รูปทรงของแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยวิธีนี้โดยมีเป้าหมาย ค่าสูญเสียน้อยที่สุดพบว่ารูปทรงของแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำนั้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสที่ ด้าน 2E น้อยกว่าด้าน D หลังจากทำการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำพบว่า คุณสมบัติที่ทดสอบ ได้ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้

รูปทรงของแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยวิธีนี้โดยมีเป้าหมาย น้ำหนักน้อยที่สุดพบว่ารูปทรงของแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำนั้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสที่ ด้าน 2E มากกว่าด้าน D หลังจากทำการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำพบว่า คุณสมบัติที่ทดสอบคลาดเคลื่อนกับที่ได้ออกแบบไว้มาก

ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ของรูปทรงแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำกับการออกแบบได้ว่า ถ้าการออกแบบที่ได้ผลของรูปทรงแกนกลางเป็นแบบ ด้าน 2E เท่ากับด้าน D และ ด้าน 2E น้อยกว่าด้าน D แล้วสูตรที่ใช้คำนวณออกแบบที่ได้กล่าวมาแล้ว สามารถนำมาใช้ในการออกแบบได้ถูกต้อง

แต่ถ้าผลจากการออกแบบแล้วได้ผลรูปทรงของแกนกลางเป็นแบบ ด้าน 2E มากกว่า D แล้วสูตรที่ใช้คำนวณเดียวกันนั้นยังไม่สามารถนำมาใช้คำนวณออกแบบตัวเหนี่ยวนำได้ถูกต้องนัก

ซึ่งจะทำการวิเคราะห์แนว โน้มของปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบที่ตัวเหนี่ยวนำที่มีรูปทรงแกนกลางเป็นแบบด้าน 2E มากกว่าด้าน D ในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบ

ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่ใช้วิธี Optimization โดยมีเป้าหมายน้ำหนักน้อยที่สุด โดยจะวิเคราะห์ปัญหาว่ามีความสัมพันธ์กับรูปทรงของแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยจะวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปสัมพันธ์กับค่าขนาดของแกนกลาง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

### 4.2.1 วิเคราะห์ค่าความกว้างช่องอากาศที่เปลี่ยนไป

สามารถเปรียบเทียบค่าความกว้างช่องอากาศที่ออกแบบ กับค่าความกว้างช่องอากาศที่ทดสอบได้แล้วทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามต้องการได้ดังตาราง 4.1

ตัวเหนี่ยวนำ	รูปทรงแกนกลาง		ความกว้างช่องอากาศที่ออกแบบ (mm.)	ความกว้างช่องอากาศที่ทดสอบได้ (mm.)
	2E (cm.)	D (cm.)		
31.5 mH 5 A	3.81	3.205	0.852	1.35
42 mH 5 A	5.08	1.65	1.091	2.80
50 mH 5 A	5.08	2.11	1.531	5.20
60 mH 3A	3.81	2.195	0.854	1.6

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบความกว้างช่องอากาศที่ออกแบบกับที่ทดสอบ

ซึ่งจะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ค่าความกว้างช่องอากาศที่เปลี่ยนไปจากการออกแบบกับขนาดรูปร่างของแกนกลางโดยหาความสัมพันธ์อัตราส่วนระหว่างค่าความกว้างช่องอากาศที่ทดสอบได้กับค่าความกว้างช่องอากาศที่ออกแบบ สัมพันธ์กับขนาดของด้าน 2E และด้าน D อย่างไร

จะแสดงอัตราส่วนของค่าความกว้างช่องอากาศที่เปลี่ยน ไปกับ อัตราส่วนของด้าน 2E และด้าน D ได้ดังตารางที่ 4.2

ตัวเหนี่ยวนำ	อัตราส่วน 2E ต่อ D (2E/D)	อัตราส่วนของค่าความกว้างช่องอากาศ (ทดสอบ/ออกแบบ)
31.5 mH 5 A	1.189	1.585
42 mH 5 A	3.079	2.566
50 mH 5 A	2.408	3.396
60 mH 3 A	1.752	1.874

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อัตราส่วนความกว้างช่องอากาศกับอัตราส่วน 2E ต่อ D

จากตารางที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนความกว้างช่องอากาศที่เปลี่ยนไปนั้น ประมาณค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราส่วนของด้าน 2E และ ด้าน D

#### 4.2.2 วิเคราะห์ค่าการสูญเสียที่เปลี่ยนไป

ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียที่ทดสอบได้ กับ ค่าการสูญเสียที่ออกแบบได้ดังตารางที่ 4.3

ตัวเหนี่ยวนำ	ค่าการสูญเสียจากการออกแบบ	ค่าการสูญเสียที่ทดสอบได้
31.5 mH 5 A	15.85	13.8
42 mH 5 A	26.304	20.33
50 mH 5 A	29.815	22.2
60 mH 3 A	13.729	10.9

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากการออกแบบและจากการทดสอบ

จากค่าความสูญเสียของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีช่องอากาศประกอบด้วย

1. ค่าความสูญเสียในขดลวด
2. ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก
3. ค่าความสูญเสียในช่องอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียของตัวเหนี่ยวนำที่ทดสอบได้นั้นเปลี่ยนไปเป็นเช่นไร  
นั้นต้องทำการวิเคราะห์หาค่าสูญเสียใดที่เปลี่ยนแปลงไปจากที่ออกแบบไว้

การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

### 1. ค่าความสูญเสียในขดลวด

จากสมการที่ใช้หาค่าการสูญเสียในขดลวดใน โปรแกรมออกแบบดังสมการ (2.30)

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

ดังนั้น การหาค่าความสูญเสียในขดลวดจะทำหาได้โดยหาค่าความต้านทานของขดลวด  
โดยทำการต่อวงจรเพื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบในการหาค่าความต้านทานขดลวด

โดยการทดสอบจะทำการปรับค่าแรงดัน ที่เครื่องปรับระดับแรงดันไฟฟ้า (Variac) บันทึกราค่า  
แรงดัน กระแส โดยบันทึกประมาณ 5 ค่า เพื่อหาค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานในขดลวด ดังสูตร

$$V = IR \quad (4.1)$$

ซึ่งแสดงผลการหาค่าความต้านทานในภาคผนวก ค.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้ค่าความสูญเสียในขดลวดได้ดังตาราง 4.4

ตัวเหนี่ยวนำ	ค่าความต้านทาน (ohm)	ค่าความสูญเสียในขดลวด (Watt)
31.5 mH 5 A	0.283	7.075
42 mH 5 A	0.432	10.8
50 mH 5 A	0.554	13.85
60 mH 3 A	0.642	5.778

ตารางที่ 4.4 ค่าความสูญเสียในขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ

ซึ่งแสดงตารางเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในขดลวดจากการทดสอบและจากการออกแบบ ดังตารางที่ 4.5

ตัวเหนี่ยวนำ	ค่าสูญเสียจากการออกแบบ	ค่าสูญเสียจากการทดสอบ
31.5 mH 5 A	6.349	7.075
42 mH 5 A	10.016	10.8
50 mH 5 A	12.495	13.85
60 mH 3 A	5.629	5.778

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าสูญเสียในขดลวดจากการออกแบบและจากการทดสอบ

จากตารางเปรียบเทียบพบว่าค่าการสูญเสียในขดลวดของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบ แตกต่างจากค่าการออกแบบเล็กน้อยมีค่าคลาดเคลื่อนในช่วงที่ยอมรับได้ จึงสรุปได้ว่า ค่าการสูญเสียในขดลวดที่ทดสอบได้ไม่แตกต่างจากค่าที่ได้จากการออกแบบ

## 2. ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

จากสมการที่ใช้หาค่าการสูญเสียในขดลวดใน โปรแกรมออกแบบดังสมการที่ (2.29)

$$P_{core} = P_{core} / kg \times 24D_i F_e E^2 D$$

ซึ่งจากสมการการออกแบบค่าการสูญเสียในแกนเหล็กขึ้นกับค่าคุณสมบัติ และขนาดของแกนเหล็กซึ่ง คุณสมบัติและขนาดของแกนเหล็กที่ใช้สร้างตัวเหนี่ยวนำนั้นมีค่าต่างๆดัง โปรแกรม ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าการสูญเสียในแกนเหล็กไม่เปลี่ยนจากค่าที่ได้ทำการออกแบบ

## 3. ค่าความสูญเสียในช่องอากาศ

จากสมการที่ใช้หาค่าการสูญเสียในขดลวดใน โปรแกรมออกแบบดังสมการที่ (2.31)

$$P_{gap} = K_f (2E) (2I_g) f B_m^2$$

ซึ่งจากสมการการออกแบบพบว่า ค่าความกว้างช่องอากาศซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งในสมการค่าการสูญเสียในช่องอากาศมีค่าเปลี่ยนแปลงจากที่ได้ออกแบบไว้ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าการสูญเสียในช่องอากาศมีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าการออกแบบ

ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์หาเฟลักเตอร์ที่จะนำมาแก้ไขสมการที่ใช้หาค่าการสูญเสียในช่องอากาศโดยพิจารณาที่ขนาดของพื้นที่หน้าตัดวงจรแม่เหล็ก (ค่าความยาวด้าน  $2E$  และค่าความยาวด้าน  $D$ )

จาก 
$$P_{gap} = P_t - P_{cu} - P_{core} \quad (4.2)$$

ซึ่งเมื่อคิดหาค่าการสูญเสียในขดลวด และค่าการสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงจากค่าที่ได้จากการออกแบบแล้วจะได้ค่าการสูญเสียในช่องอากาศจากการทดสอบโดยนำค่าการสูญเสียรวมที่ทดสอบได้ลบจากค่าการสูญเสียในขดลวดและแกนเหล็ก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าการสูญเสียในช่องอากาศกับค่าที่ได้จากการออกแบบดังตาราง 4.6

ตัวเหนี่ยวนำ	ค่าสูญเสียจากการออกแบบ	ค่าสูญเสียจากการทดสอบ
31.5 mH 5 A	5.034	2.985
42 mH 5 A	12.372	4.398
50 mH 5 A	12.057	4.443
60 mH 3 A	5.043	2.214

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าสูญเสียในช่องอากาศจากการออกแบบและจากการทดสอบ

จากตารางเปรียบเทียบนำมาหาความหาความสัมพันธ์โดยพิจารณาค่าการสูญเสียที่เปลี่ยนไปสัมพันธ์กับค่าขนาดของรูปร่างของแกนกลางของวงจรมแม่เหล็กได้ ซึ่งความสัมพันธ์ซึ่งจะนำมาแก้ไขค่าการออกแบบของค่าการสูญเสียในช่องอากาศ คืออัตราส่วน 2E/D ซึ่งแสดงอัตราส่วนของค่าการสูญเสียในช่องอากาศที่ทดสอบกับที่ออกแบบเดิม กับอัตราส่วน 2E และ D ได้ดังตารางที่ 4.7

ตัวเหนี่ยวนำ	อัตราส่วน 2E ต่อ D (2E/D)	อัตราส่วนค่าการสูญเสียในช่องอากาศ (ออกแบบ/ทดสอบ)
31.5 mH 5 A	1.189	1.686
42 mH 5 A	3.079	2.813
50 mH 5 A	2.408	2.714
60 mH 3 A	1.752	2.278

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อัตราส่วนค่าการสูญเสียในช่องอากาศกับอัตราส่วน 2E ต่อ D

จากตารางเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนทั้งสองอยู่ แต่เป็นความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของค่าการสูญเสียในช่องอากาศที่เปลี่ยนไปจากที่ออกแบบ ที่สัมพันธ์กับขนาดรูปร่างของแกนกลางที่ใกล้เคียงที่สุด ดังนั้นจึงจะนำค่าอัตราส่วน 2E/D นี้มาแก้ไขสมการที่ใช้ในการหาค่าการสูญเสียในช่องอากาศใน โปรแกรมออกแบบตัวเหนี่ยวนำต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 แนวทางการแก้ไขสมการที่ใช้ในการออกแบบ

#### 4.3.1 แนวทางการแก้ไขการออกแบบค่าความกว้างช่องอากาศ

จากสูตรที่ใช้ในการออกแบบค่าความกว้างช่องอากาศ

$$L = \frac{\mu_0 N^2 ED}{I_g} \quad (4.3)$$

$$I_g = \frac{\mu_0 N^2 ED}{L} \quad (4.4)$$

จากความสัมพันธ์ของค่าความกว้างช่องอากาศที่เปลี่ยนไปเป็นอัตราส่วนเท่ากับค่า  $2E/D$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_{g\text{ออกแบบใหม่}} = I_{g\text{ออกแบบเดิม}} \times \left(\frac{2E}{D}\right) \quad (4.5)$$

ดังนั้นจะได้ว่าค่าความกว้างช่องอากาศที่จะแก้ไขในการออกแบบเป็น

$$I_g = \frac{\mu_0 N^2 ED}{L} \cdot \left(\frac{2E}{D}\right) \quad (4.6)$$

#### 4.3.2 แนวทางการแก้ไขการออกแบบค่าสูญเสียในช่องอากาศ

จากสูตรที่ใช้ในการออกแบบค่าสูญเสียในช่องอากาศ

$$P_{gap} = K_i(2E)(2L_g) f B_m^2 \quad (4.7)$$

จากค่าความสัมพันธ์ที่จะนำมาแก้ค่าสูญเสียในช่องอากาศที่เปลี่ยนไป(ค่าสูญเสียที่ทดสอบได้มีค่าน้อยกว่าที่ออกแบบไว้) มีค่าเท่าอัตราส่วนระหว่าง  $2E$  และ  $D$  เท่ากับ  $1/(2E/D)$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$P_{gap\text{ออกแบบใหม่}} = \frac{P_{gap\text{ออกแบบเดิม}}}{(2E/D)} \quad (4.8)$$

ซึ่งค่าความกว้างช่องอากาศ  $I_g$  ในสมการ 4.8 นั้นเป็นค่าความกว้างช่องอากาศเดิม แต่สมการนี้ในการคำนวณต้องใช้ค่าความกว้างช่องอากาศคิดในโปรแกรมดังนั้น ต้องแทนให้เป็น  $I_g$  ใหม่แล้วหารด้วย  $2E/D$  ให้เป็นค่าของ  $I_g$  เดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นจะได้สมการ ค่าสูญเสียในช่องอากาศที่จะใช้แก่ในการออกแบบได้เป็น

$$P_{gap} = \frac{K_i(2E)(2L_g)fB_m^2}{(2E/D)^2} \quad (4.9)$$

#### 4.3.3 สูตรที่นำไปใช้แก่ไขการออกแบบ

ค่าความกว้างช่องอากาศ

$$l_g = \frac{\mu_0 N^2 E D}{L} \cdot \left( \frac{2E}{D} \right) \quad (4.10)$$

ค่าสูญเสียในช่องอากาศ

$$P_{gap} = \frac{K_i(2E)(2L_g)fB_m^2}{(2E/D)^2} \quad (4.11)$$

#### 4.4 ผลจากการแก้ไขค่าการออกแบบ

หลังจากทำการแก้ไขสูตรที่ใช้คำนวณใน โปรแกรมที่ใช้อยู่แล้วก็นำมาออกแบบตัวเหนี่ยวนำ เพื่อทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำที่สร้างจากโปรแกรมใหม่อีกครั้ง ได้ข้อมูลตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบใหม่ในภาคผนวก ค. แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบนั้นมาสร้างตัวเหนี่ยวนำเพื่อทดสอบอีกครั้ง ซึ่งจะแสดงข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมในภาคผนวก ค. และตัวเหนี่ยวนำที่ได้ทำการสร้างจากโปรแกรมที่ได้ทำการแก้ไขแล้วคือ

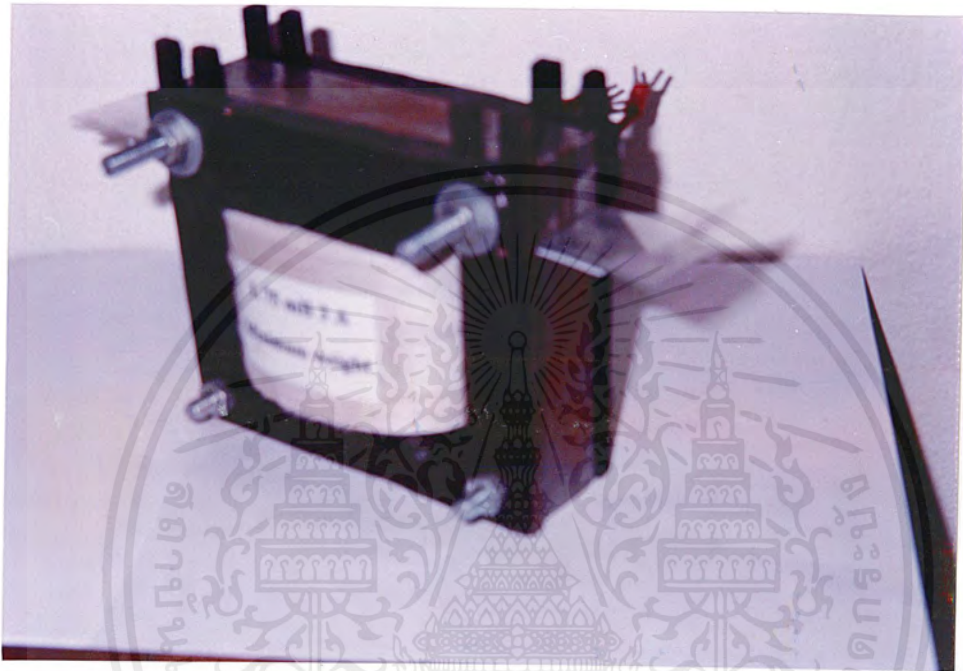
1. ตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A ออกแบบ โดยวิธี Optimization เป้าหมายน้ำหนักน้อยที่สุด มีรูปแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ของตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A ออกแบบโดยวิธี Optimization เป้าหมายน้ำหนักน้อยที่สุด มีรูปแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ของตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเมื่อทำการทดสอบแล้วสามารถสรุปเป็นผลเปรียบเทียบค่าต่างๆ ที่ได้ทำการแก้ไขนั้นดังต่อไปนี้

#### 4.4.1 ค่าความกว้างช่องอากาศ

แสดงการเปรียบเทียบค่าความเหนียวน้ำที่ทำการปรับค่าความกว้างช่องอากาศตามที่ได้ออกแบบไว้ กับค่าความเหนียวน้ำที่ต้องการดังตารางต่อไปนี้

L 13 mH 3 A

	ค่าจากการออกแบบที่แก้ไขแล้ว	ค่าจากการทดสอบ
ค่าความเหนียวน้ำ (mH.)	13	12.343
ค่าความกว้างช่องอากาศ (mm.)	0.56	0.55

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบผลของค่าความเหนียวน้ำที่ทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่แก้ไข

L 13 mH 3A

L 75 mH 3 A

	ค่าจากการออกแบบที่แก้ไขแล้ว	ค่าจากการทดสอบ
ค่าความเหนียวน้ำ (mH.)	75	83.899
ค่าความกว้างช่องอากาศ (mm.)	1.187	1.2

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบผลของค่าความเหนียวน้ำที่ทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่แก้ไข

L 75 mH 3A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทำการแก้ไขค่าการออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไว้แล้วโดยใช้สูตรการคำนวณใหม่  
ที่ได้แก้ไข แล้วทดสอบค่าความเหนี่ยวนำที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่ค่าแก้ไขนั้น  
ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

L 42 mH 5 A

	ค่าจากการออกแบบที่แก้ไขแล้ว	ค่าจากการทดสอบ
ค่าความเหนี่ยวนำ (mH.)	42	37.372
ค่าความกว้างช่องอากาศ (mm.)	3.359	3.35

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบผลของค่าความเหนี่ยวนำที่ทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่แก้ไข  
L 42 mH 5A

L 31.5 mH 5 A

	ค่าจากการออกแบบที่แก้ไขแล้ว	ค่าจากการทดสอบ
ค่าความเหนี่ยวนำ (mH.)	31.5	37.109
ค่าความกว้างช่องอากาศ (mm.)	1.013	1

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบผลของค่าความเหนี่ยวนำที่ทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่แก้ไข  
L 31.5 mH 5A

L 50 mH 5 A

	ค่าจากการออกแบบที่แก้ไขแล้ว	ค่าจากการทดสอบ
ค่าความเหนี่ยวนำ (mH.)	50	58.171
ค่าความกว้างช่องอากาศ (mm.)	3.687	3.7

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบผลของค่าความเหนี่ยวนำที่ทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่แก้ไข  
L 50 mH 5A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L 60 mH 3 A

	ค่าจากการออกแบบที่แก้ไขแล้ว	ค่าจากการทดสอบ
ค่าความเหนี่ยวนำ (mH.)	60	62.176
ค่าความกว้างช่องอากาศ (mm.)	1.496	1.45

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบผลของค่าความเหนี่ยวนำที่ทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่แก้ไข

L 60 mH 3A

สรุปผลจากตารางเปรียบเทียบได้ดังนี้

ค่าความกว้างช่องอากาศที่ได้ทำการแก้ไขสูตรการออกแบบแล้วทำการทดสอบที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่ออกแบบใหม่นั้นพบว่าสามารถให้ค่าความเหนี่ยวนำได้ใกล้เคียงกับการออกแบบมากขึ้นกว่าสูตรการคำนวณค่าความกว้างช่องอากาศเดิม และถึงแม้ว่าค่าความเหนี่ยวนำที่ได้นั้นจะยังมีค่าคลาดเคลื่อนจากที่ได้ออกแบบไว้แต่ก็มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่มาก และหากต้องการค่าความเหนี่ยวนำให้ตรงกับที่ออกแบบก็สามารถทำการปรับค่าความกว้างช่องอากาศเพียงเล็กน้อยก็จะได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ ซึ่งการแก้ไขนี้ทำให้ไม่ต้องปรับค่าความกว้างช่องอากาศจากค่าการออกแบบไปมากๆ เพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการเหมือนกับค่าความกว้างช่องอากาศจากการออกแบบของสูตรการคำนวณเดิม

#### 4.4.2 ค่าการสูญเสีย

แสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียที่ทดสอบที่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการกับค่าการสูญเสียที่ได้จากการออกแบบที่ทำการแก้ไขสูตรการคำนวณแล้วได้ดังตารางต่อไปนี้

ตัวเหนี่ยวนำ	ค่าสูญเสียจากการออกแบบ	ค่าสูญเสียจากการทดสอบ
13 mH 3 A	3.676	3.6
75 mH 5 A	13.425	13.6

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าสูญเสียในช่องอากาศจากการออกแบบที่ได้แก้ไขแล้วและจากการทดสอบของตัวเหนี่ยวนำที่ได้ทำการสร้างใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียที่ทดสอบได้มีค่าใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้มากกว่าสูตรการคำนวณเดิมและทำการแก้ไขค่าการออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไว้แล้วโดยใช้สูตรการคำนวณใหม่ที่ได้แก้ไข แล้วทดสอบค่าการสูญเสียของตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบไว้เดิมได้ผลดังตาราง

ตัวเหนี่ยวนำ	ค่าสูญเสียจากการออกแบบ	ค่าสูญเสียจากการทดสอบ
42 mH 5A	17.949	18.33
31.5 mH 5A	15.047	13.8
50 mH 5A	22.764	22.2
60 mH 3A	11.564	10.9

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าสูญเสียในช่องอากาศจากการออกแบบที่ได้แก้ไขแล้วและจากการทดสอบของตัวเหนี่ยวนำเดิมที่ได้ทำการสร้างไว้แล้ว

สรุปผลจากตารางเปรียบเทียบได้ดังนี้

ค่าการสูญเสียที่ได้ทำการแก้ไขสูตรการคำนวณค่าสูญเสียในช่องอากาศแล้ว มีค่าใกล้เคียงกับค่าการสูญเสียที่ทดสอบ ได้มากขึ้นกว่าสูตรการคำนวณเดิมซึ่งมีค่าการสูญเสียแตกต่างจากที่ทดสอบได้เป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าสูตรการคำนวณใหม่นี้จะยังให้ค่าการสูญเสียไม่ตรงกับที่ทดสอบได้ แต่ก็มีค่าความคลาดเคลื่อนดีขึ้นกว่าสูตรการคำนวณเดิมมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิเคราะห์และแนวทางในการแก้ไขการออกแบบ

#### สรุปผล

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI มีอยู่หลายวิธีการ แต่วิธีต่างๆ ไปจะไม่คำนึงถึงความเหมาะสมในการเลือกขนาดแกน เช่น วิธี Area Product ดังนั้นจึงใช้วิธี Numerical Optimization เข้ามาช่วยในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า แบบแกน EI ที่เหมาะสมยิ่งขึ้น โดยมีเป้าหมายในการออกแบบ 3 ประการ คือ น้ำหนักน้อยที่สุด ราคาถูกที่สุด และค่าการสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งในปฏิญญานิพนธ์นี้จะเสนอเพียง 2 วิธีคือ น้ำหนักน้อยที่สุด และค่าสูญเสียน้อยที่สุด

ซึ่งจากการออกแบบโดยวิธี Numerical Optimization นี้ตัวเหนี่ยวนำที่ได้จะมีลักษณะรูปร่างของแกนกลางไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังเช่น ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยวิธี Area Product

โดยที่ - ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบ โดยมีเป้าหมายน้ำหนักน้อยที่สุด จะมีรูปร่างด้าน 2E มากกว่า ด้าน D

- ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบ โดยมีเป้าหมายค่าสูญเสียน้อยที่สุด จะมีรูปร่างด้าน 2E น้อยกว่า ด้าน D

หลังจากการสร้างตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยวิธี Numerical Optimization แล้วนำมาทดสอบคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำพบว่า

- ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบ โดยมีเป้าหมายค่าสูญเสียน้อยที่สุด มีคุณสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการออกแบบ
- ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบ โดยมีเป้าหมายน้ำหนักน้อยที่สุด มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากที่ได้ทำการออกแบบไว้โดย ถ้าต้องการค่าความเหนี่ยวนำตามที่ออกแบบไว้ต้องการปรับค่าความกว้างช่องอากาศออกไปอีกมาก และค่าความสูญเสียที่ได้ก็แตกต่างจากที่ออกแบบอยู่มากเช่นกัน

ในปฏิญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์หาแนวทางการแก้ไขการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธี Numerical Optimization เป้าหมายน้ำหนักเบาที่สุดที่ไม่ตรงกับที่ออกแบบ โดยวิเคราะห์ว่ามีความสัมพันธ์กับรูปร่างของแกนกลางที่เปลี่ยนจากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งสามารถสรุปแนวโน้มนำการแก้ไขได้ดังนี้

#### 1) การแก้ไขค่าความกว้างช่องอากาศ

จากผลการทดลองที่ได้เสนอในบทที่ 3. ภาคผนวก ก และการเปรียบเทียบผลในบทที่ 4 สามารถหาแนวโน้มนำค่าความกว้างช่องอากาศที่เปลี่ยนไปสัมพันธ์กับค่าด้าน 2E และ D ได้ว่า ความกว้างช่องอากาศเปลี่ยนไปเป็นอัตราส่วน 2E/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งทำการแก้ไขสมการได้เป็น

$$l_g = \frac{\mu_0 N^2 ED}{L} \cdot \left( \frac{2E}{D} \right) \quad (5.1)$$

## 2) การแก้ไขค่าสูญเสียของตัวเหนี่ยวนำ

จากการวิเคราะห์ในบทที่ 4 เพื่อหาค่าการสูญเสียที่เปลี่ยนไปมีนั้นสาเหตุจากที่ค่าสูญเสียโดยเปลี่ยนจากที่ออกแบบ สรุปได้ว่ามีสาเหตุจากค่าสูญเสียในช่องอากาศเปลี่ยนไปจากที่ออกแบบไว้มาก

และจากผลการทดสอบภาคผนวก ค. และผลการเปรียบเทียบในบทที่ 4 สามารถหาแนวโน้มของค่าการสูญเสียในช่องอากาศที่เปลี่ยนไปจากที่ออกแบบสัมพันธ์กับค่าด้าน  $2E$  และ  $D$  ได้ว่าเปลี่ยนไปเป็นอัตราส่วน  $1/(2E/D)$

ซึ่งสามารถแก้ไขสมการได้เป็น

$$P_{gap} = \frac{K_i(2E)(2L_g) f B_m^2}{(2E/D)^2} \quad (5.2)$$

ซึ่งจากการแก้ไขสูตรในการออกแบบแล้วนำมาทดสอบอีกครั้งพบว่า

### 1) ค่าความกว้างช่องอากาศ

ที่ค่าความกว้างช่องอากาศที่ออกแบบใหม่นี้ เมื่อทดสอบแล้วสามารถทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำได้ใกล้เคียงขึ้น แม้ว่าจะไม่ได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับที่ต้องการ แต่ก็สามารถปรับค่าความกว้างช่องอากาศเพียงเล็กน้อยก็ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ

### 2) ค่าสูญเสียของตัวเหนี่ยวนำ

หลังจากทำการแก้ไขสูตรในการหาค่าการสูญเสียในการออกแบบแล้ว เมื่อทำการทดสอบแล้วพบว่า ค่าการสูญเสียที่ทดสอบใกล้เคียงกับค่าการสูญเสียที่ออกแบบมากขึ้นกว่าเดิมมาก

แสดงตารางสรุปการเปรียบเทียบผลจากการออกแบบที่แก้ไขแล้วกับผลจากการทดลองได้ดังตารางที่ 5.1 โดยเปรียบเทียบที่ค่าความกว้างช่องอากาศปรับขนาดตามค่าการออกแบบ และตารางที่ 5.2 โดยเปรียบเทียบที่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ

	ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ
ค่าความเหนี่ยวนำ(mH)	13	12.343	75	83.899	42	37.372	31.5	37.109	50	58.171	60	62.176
กระแส(A)	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	3	3
2E(cm)	2.54	2.54	3.81	3.81	5.08	5.08	3.81	3.81	5.08	5.08	3.81	3.81
D (cm)	1.655	1.67	2.746	2.74	1.653	1.65	3.207	3.205	2.126	2.11	2.195	2.175
จำนวนรอบ(Turn)	138.126	138	320.13	320	294.707	295	191.872	192	344.66	345	323.67	320
ความกว้างช่องอากาศ(mm)	0.56	0.55	1.187	1.2	3.359	3.35	1.013	1	3.687	3.7	1.496	1.45
น้ำหนักขดลวด(kg)	0.24	0.24	0.845	0.95	1.305	1.44	0.883	0.9	1.739	1.76	0.796	0.84
น้ำหนักแกนเหล็ก(kg)	0.466	0.48	1.738	1.74	1.958	1.92	2.03	2.05	2.392	2.45	1.39	1.38
น้ำหนักรวม(kg)	0.706	0.72	2.584	2.69	3.263	3.6	2.914	2.95	4.13	4.21	2.186	2.22
ค่าความต้านทาน(ohm)	0.189	0.21	0.664	0.741	0.401	0.432	0.254	0.283	0.5	0.554	0.625	0.642
ค่าสูญเสียรวม(Watt)	3.676	3.75	13.425	13.9	17.949	16.8	15.047	14.5	22.764	23.9	11.564	12.6

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลจากการออกแบบที่แก้ไขแล้วกับผลการทดสอบชุดสมมติตัวเหนี่ยวนำ

สนใจที่ค่าความกว้างช่องอากาศตามค่าการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ
ค่าความเหนี่ยวนำ(mH)	13	12.402	75	73.319	42	42	31.5	31.655	50	50.059	60	60.356
กระแส(A)	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	3	3
2E(cm)	2.54	2.54	3.81	3.81	5.08	5.08	3.81	3.81	5.08	5.08	3.81	3.81
D (cm)	1.655	1.67	2.746	2.74	1.653	1.65	3.207	3.205	2.126	2.11	2.195	2.175
จำนวนรอบ(Turn)	138.126	138	320.13	320	294.707	295	191.872	192	344.66	345	32.367	320
ความกว้างช่องอากาศ(mm)	0.56	0.5	1.187	1.35	3.359	2.8	1.013	1.35	3.687	5.2	1.496	1.6
น้ำหนักขดลวด(kg)	0.24	0.24	0.845	0.95	1.305	1.44	0.883	0.9	1.739	1.76	0.796	0.84
น้ำหนักแกนเหล็ก(kg)	0.466	0.48	1.738	1.74	1.958	1.92	2.03	2.05	2.392	2.45	1.39	1.38
น้ำหนักรวม(kg)	0.706	0.72	2.584	2.69	3.263	3.6	2.914	2.95	4.13	4.21	2.186	2.22
ค่าความต้านทาน(ohm)	0.189	0.21	0.664	0.741	0.401	0.432	0.254	0.283	0.5	0.554	0.625	0.642
ค่าสูญเสียรวม(Watt)	3.676	3.6	13.425	13.6	17.949	18.33	15.047	13.8	22.764	22.2	11.564	10.9

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลจากการออกแบบที่ได้เปรียบกับผลการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ  
สนใจที่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การออกแบบ Inductor โดยวิธี Area Product

#### ก.1 บทนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ (AC inductor) ก็เหมือนกับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งถ้าหากว่าไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรง การคำนวณในการออกแบบก็จะถูกต้อง

กำลังงานที่ได้ (Apparent power  $P$ ) ของตัวเหนี่ยวนำก็คือค่า Volt-Ampere ซึ่งเป็นผลมาจากกระแสกระตุ้น และแรงดันกระตุ้นที่ได้ให้ตัวเหนี่ยวนำ

$$P_r = VA \text{ [W]}$$

(ก.1)

#### ก.2 ความสัมพันธ์ของ $A_p$ กับ Volt-Ampere Capability ของตัวเหนี่ยวนำ

ค่า  $A_p$  ขึ้นอยู่กับค่า Volt-Ampere ของแกนเหล็ก เขียนด้วยสมการ

$$A_p = \left( \frac{VA \times 10^4}{4.444 B_m f K_u K_j} \right)^{1.14}$$

(ก.2)

- เมื่อ  $K_j$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ ความหนาแน่นกระแส  
 $K_u$  เป็น window utilization factor  
 $F$  เป็นความถี่ (Hz)  
 $B_m$  เป็นความหนาแน่นฟลักซ์ (T)

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่า Factor ต่างๆ เช่น ความหนาแน่นฟลักซ์  $K_j$ ,  $K_u$  นั้นมีผลต่อพื้นที่ตัวเหนี่ยวนำ ค่าคงที่  $K_j$  เป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุม Copper loss

#### ก.3 พื้นฐานในการพิจารณาการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำเชิงเส้นขึ้นอยู่กับปัจจัย 4 ประการ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นได้ ผู้ออกแบบต้องหาค่าสูงสุดของ  $B_m$  ที่ไม่ทำให้แม่เหล็กอิ่มตัวและ make tradeoffs ที่จะทำให้เกิดความล่าช้าวนำสูงสุดสำหรับปริมาตรที่กำหนดให้วัสดุที่ใช้ทำแกน เป็นตัวกำหนดค่าสูงสุดของความหนาแน่น flux ซึ่งสามารถทนทานได้ จำนวนรอบของขดลวดที่ใช้สามารถคำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ ดังนี้

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

ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็กที่มี air gap แสดงดังนี้

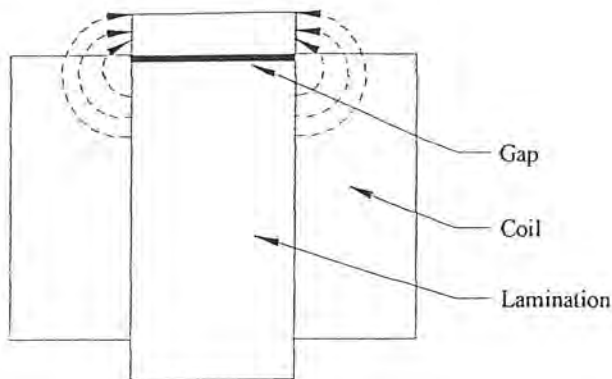
$$L = \frac{0.4\pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{l_g + l_m / \mu_r} \quad [H] \quad (ก.4)$$

ค่าความเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับผลของความยาวของเส้นทางแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลรวมของความยาวของ air gap ( $l_g$ ) และอัตราส่วนของความยาวเฉลี่ยของแกนกับ Relative permeability  $l_m / \mu_r$  เมื่อค่า  $l_g$  มีค่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่า  $l_m / \mu_r$  เนื่องจาก  $\mu_r$  มีค่าสูง การเปลี่ยนแปลงของค่า  $\mu_r$  ไม่มีผลต่อความยาวของเส้นทางแม่เหล็กหรือค่าความเหนี่ยวนำ สมการค่าความเหนี่ยวนำสามารถลดรูปได้เป็น

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

การคำนวณครั้งสุดท้ายของช่องอากาศเป็นตัวพิจารณาผลของ fringing flux ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงของช่องอากาศ รูปทรงของขั้ว และรูปร่างขนาดที่ตั้งของลวดตัวนำ

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



รูปที่ ก.1 แสดงการเกิด fringing flux

สมการของ fringing flux factor คือ

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

เมื่อ  $G$  เป็นค่าของ laminations

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

$$L' = \frac{0.4\pi N^2 A_c F \times 10^{-8}}{l_g} \quad (\text{ก.7})$$

ความสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำกระแสน้ำประกอบด้วย

1. Copper loss ( $P_{cu}$ )
2. ความสูญเสียจากแกนเหล็ก ( $P_{Fe}$ )
3. ความสูญเสียจาก gap ( $P_g$ )

ประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อ copper loss เท่ากับ core loss เหมือนในหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อช่องอากาศเป็นศูนย์ ความสูญเสียจะไม่เกิดขึ้นในช่องว่างอากาศ แต่ถ้าช่องอากาศเพิ่มขึ้นจะเกิด fringing flux เพิ่มขึ้น และ fringing flux บางส่วนจะทำให้เกิดกระแสไหลวนจะทำให้เกิดกระแสไหลวน ทำให้เกิดความสูญเสียเพิ่มขึ้นอีก และลักษณะทางเรขาคณิตของแกนเหล็กก็มีผลต่อ fringing flux

ค่าความสูญเสียจากช่องอากาศขึ้นอยู่กับจำนวน fringing flux

$$P_g = K_f E l_g f B_m^2 \quad [H] \quad (\text{ก.8})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Configuration	K
Two-coil C core	0.0388
Single-coil C core	0.0775
Lamination	0.155

ตารางที่ ก.1 Gap loss coefficient



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### Minimization or Maximization of Function

#### ข.1 บทนำ

สมมุติว่ามีฟังก์ชันใด ๆ ให้เป็น  $f$  ที่ขึ้นกับค่าหนึ่งค่า หรือขึ้นกับค่าตัวแปรใด ๆ และจำเป็นต้องหาค่าของตัวแปรเหล่านี้เพื่อให้ได้ค่าของ  $f$  เป็นค่าสูงสุด หรือต่ำสุด โดยในการคำนวณต้องการที่จะให้ได้ค่าที่รวดเร็ว และอาจจะใช้หน่วยความจำน้อย

จุดสูงสุด และจุดต่ำสุดที่จะกล่าวในที่นี้แบ่งเป็น 2 แบบคือ

1. Global ซึ่งเป็นจุดที่ต่ำที่สุดจริง ๆ ของฟังก์ชันและ
2. Local ซึ่งเป็นจุดที่ต่ำที่สุดในช่วงหรือในขอบเขตที่กำหนด

ดังแสดงในรูปที่ (ข.1) มีวิธีเสิร์ชเรคิตอยู่ 2 วิธี คือ

1. หาจุดที่เป็นค่าสูงสุด ค่าสุดที่เป็น local โดยเริ่มจากการเปลี่ยนค่าทางค่านกว้างและเก็บค่าที่สูงสุด ค่าสุดของเหล่านั้น หรือ
2. ในการหาค่าสูงสุด ค่าสุดที่เป็น local โดยการนำค่า amplitude ในขั้นตอนสุดท้ายมาจากมัน และเส้นทางเดินรากที่มีอยู่กลับมา เพื่อให้ได้จุดที่ดีกว่าสำหรับวิธี annealing methods จะใช้แก้ปัญหาค่าสูงสุด ค่าสุดที่เป็น global



รูปที่ ข.1 แสดงจุดต่าง ๆ ของฟังก์ชัน

ในที่นี้จะกล่าวถึง optimization ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้หาผลลัพธ์ในกรณีที่มีตัวแปรจำนวนมาก ส่วนสำคัญที่จะพัฒนาขอบเขตของวิธี Constrained optimization คือ โปรแกรมเชิงเส้นเมื่อฟังก์ชันเป็นค่าที่เหมาะสม และมีข้อบังคับ เกิดขึ้นกับฟังก์ชันเชิงเส้นของค่าที่เป็นอิสระโดยเราไม่สนใจเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใจในส่วนที่เหลือ ซึ่งได้รวมไว้ในบทนี้แล้ว ถูกเรียกว่า Simplex algorithm สำหรับปัญหาที่เป็นโปรแกรมเชิงเส้นจุดสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันจากรูปคือ จุด A , C และ E เป็น local ไม่เป็น global maxima จุด B และ F เป็น local คือจุด G ซึ่งอยู่ที่ขอบเขตของช่วงที่พิจารณาของฟังก์ชัน Global minima คือจุด D

Annealing methods ที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่เคาได้ว่าในทางปฏิบัติจะแก้ไม่ตกและมันจะสนับสนุนปัญหาของการหาค่าสูงสุด ต่ำสุดที่เป็น global ซึ่งมีจำนวนมากโดยไม่ต้องการหาค่าสูงสุด ต่ำสุดที่เป็น local ดังนั้น วิธีการนี้จึงถูกเลือกเพื่อสรุปข้อพิจารณาของพื้นที่ใหม่นี้

ในส่วนนี้จะแก้ปัญหาโดยหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการหาค่าต่ำสุด ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับค่าตัวต่อไปและจะขึ้นอยู่กับค่าตัวก่อนหน้านั้น ถ้าจะหา Algorithm ที่สมบูรณ์แบบในการแก้ปัญหาในส่วนที่นำมาประยุกต์ใช้ อาจจะบอกอะไรหลายสิ่งซึ่งมากกว่าที่ต้องการจะรู้ แต่ว่ามันมี Algorithm ที่ไม่สมบูรณ์แบบ ในการหาค่าที่เหมาะสม ในกรณีนี้อาจจะกระตุ้นให้หาวิธีมากกว่า 1 วิธี เพื่อเป็นแบบในการเปรียบเทียบ

วิธีในการเลือกสำหรับใช้ในการพิจารณามีดังต่อไปนี้

# เลือกระหว่างวิธีที่ใช้หาค่าฟังก์ชันที่ต่ำที่สุดแบบนี้ และ วิธีที่หาค่าส่วนที่แยกออกมา (derivative) ของฟังก์ชันในกรณีที่มีขนาดหลายมิติ (Multidimensional) ส่วนที่แยกย่อย (derivative) นี้เป็นขนาดเวกเตอร์เกรเดียน

# สำหรับการหาค่าต่ำสุดขนาด 1 มิติ (ค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ 1 ตัวแปร)โดยไม่คำนวณค่าของส่วนที่แยกออกมา (derivative) ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ ๓.3 แล้ว และได้ใช้วิธีของ Berent อธิบายในหัวข้อที่ ๓.4 ถ้าฟังก์ชันที่มีอยู่มีค่าของส่วนที่แยกออกมาอันดับสองไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงทำให้สมการพาราโบลของวิธีการ Berent ก็ไม่มีประโยชน์ และใช้รูปแบบที่ง่ายที่สุดของ golden section search ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ ๓.3

# สำหรับการหาค่าต่ำสุดที่คำนวณส่วนที่แยกออกมาด้วย (derivative) ในหัวข้อ ๓.5 ได้แปลงวิธีการ Berent ออกไป ซึ่งทำให้จำกัดขอบเขตการใช้ข้อมูลส่วนที่แยกออกมา (derivative) อันดับแรก ทางเลือกในการใช้ข้อมูล (derivative) เพื่อให้ได้โพลีโนเมียล ที่มีลำดับสูงในการปรับปรุง Convergence ให้มีค่าเรียบมาก ๆ วิเคราะห์ค่าต่ำสุดที่ไม่ทำให้โพลีโนเมียลในขั้นตอนต้น ๆ มีค่าผิดพลาดมาก ๆ โดยเฉพาะฟังก์ชันที่อาจจะเป็นฟังก์ชัน exponential ในภายหลัง

กลับไปกรณีหลายมิติ (multidimensional) ทั้งที่มีและไม่มีกรคำนวณในอันดับแรก

# เลือกวิธีการระหว่างการเก็บค่าลำดับ  $N^2$  และค่าเหล่านั้นต้องการลำดับ  $N$  ขณะที่  $N$  เป็นจำนวนของมิติ สำหรับค่าใหม่ของ  $N$  และขนาดของหน่วยความจำไม่จำเป็นมาก แต่อย่างไรก็ตาม บางทีการประยุกต์ใช้งานในขณะที่เก็บข้อมูลอาจทำให้เกิดภาวะวิกฤติได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อความแม่นยำตลอดการเปลี่ยนไปตามหลักของ Optimization problem ; bracket minimum ใช้หารากของฟังก์ชันโดยใช้จุดที่เป็นคู่  $a < b$  เมื่อฟังก์ชันมีเครื่องหมายตรงข้ามกันทั้ง 2 จุด ค่าต่ำสุดโดยการเปรียบเทียบกับค่า bracket เมื่อมีอยู่ 3 จุด  $a < b < c$  ดังนั้น  $f(b)$  จะน้อยกว่า และ  $f(c)$  ดังนั้นเราจึงทราบว่าค่าของฟังก์ชันที่มีค่าต่ำสุดอยู่ระหว่างช่วง  $(a,c)$

ความต่อเนื่องของวิธีการแบ่งครึ่ง (bisection) จะเลือกจุด  $x$  ใหม่ซึ่งอยู่ระหว่าง  $a$  และ  $b$  หรือระหว่าง  $b$  และ  $c$  ซึ่งเราสามารถที่จะทำได้ การคำนวณ  $f(x)$  ถ้า  $f(b)$  น้อยกว่า  $f(x)$  จะได้ bracket ใหม่เป็น 3 จุด คือ  $a < b < x$  เปรียบเทียบถ้า  $f(b) > f(x)$  จะได้ bracket ใหม่และ 3 จุดคือ  $b < x < c$  ซึ่งทุกกรณีจะได้จุดกึ่งกลางใหม่เป็น 3 จุด ทำให้หาค่าที่ดีที่สุดของ Minimum ดังรูป (ข.2) ค่าที่น้อยที่สุดของ tolerably (ค่าที่ยอมรับได้) จากค่าน้อยของ  $b$  เราสามารถให้ bracket มีช่วงห่างคือ  $(1-\varepsilon)b < b < (1+\varepsilon)b$  เมื่อ  $\varepsilon$  ค่าของ floating point precision ของคอมพิวเตอร์มีจำนวน  $3 \times 10^{-8}$  (single precision) หรือ  $10^{-15}$  (double precision) แต่โดยทั่วไป  $f(x)$  โทลด์โดยใช้อนุกรม Taylor

$$f(x) \approx f(b) + \frac{1}{2} f''(b)(x-b)^2 \quad (\text{ข.1})$$

เทอมที่ 2 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบเทอมแรกจะได้

$$|x-b| < \left(\sqrt{\varepsilon b}\right) \sqrt{\frac{2|f(b)|}{b^2 f''(b)}} \quad (\text{ข.2})$$

จากสมการเมื่อเราเขียนให้อยู่ในรูปทางขวามือ เราจะได้อยู่ในรูปของรากที่ 2 ทำให้เราวัดความกว้างของช่วงของ bracket น้อยกว่า  $\sqrt{\varepsilon}$  ที่ค่าศูนย์กลางโดยความกว้างประมาณ  $10^{-4}$  (single precision) หรือ  $3 \times 10^{-8}$  (double precision)

1. ถ้าในการวางแผนเลือกจุด  $x$  ใหม่จากจุด  $a, b, c$  สมมติให้เศษส่วนของ  $a$  และ  $b$  กับ  $a$  และ  $c$  เป็น  $w$

$$\frac{b-a}{c-a} = w ; \frac{c-b}{c-a} = 1-w \quad (\text{ข.3})$$

สมมติว่าที่จุด  $x$  มีการรวม  $z/b$

$$\frac{x-b}{c-a} = z \quad (\text{ข.4})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเข้าใกล้ส่วน bracketing จะมีความยาวของ  $w + z$  มีความสัมพันธ์กับความยาวเดิม หรือจะยาวเท่ากับ  $1-w$  ถ้าเราหา minimize ในกรณีที่เป็นไปได้เราจะเลือก  $z$  ที่จะทำให้เท่ากัน คือ

$$z = 1 - 2w \quad (\text{ข.5})$$

เราจะเห็นว่าจุดใหม่ที่ได้มีความสมมาตรกับจุด  $b$  อยู่ในช่วงเดิม เมื่อ  $|b - a|$  โดยมี implies ของจุด  $x$  มีค่ามากกว่า 2 ส่วน ( $z$  เป็นบวก ถ้า  $w$  น้อยกว่า  $1/2$ )

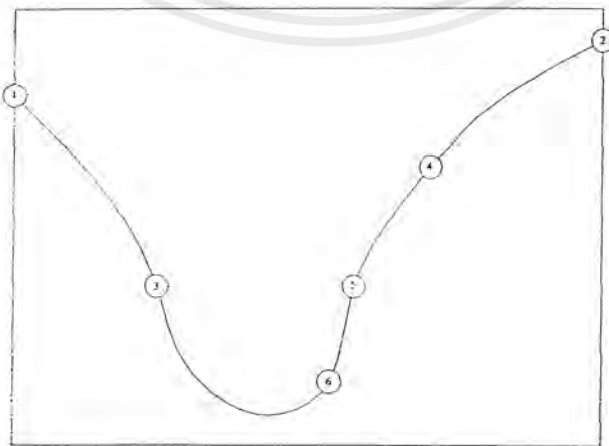
แต่ถ้าส่วนมีขนาดใหญ่มากกว่าค่าของ  $w$  ควรเป็นอย่างไร จากไหนถึงไหน โดยเราต้องออกแบบว่าถ้า  $z$  ถึงถูกเลือกเป็น Optimum ซึ่งต้องมีค่าก่อน  $w$  scale similarity implies ของ  $x$  นั้นจะเท่ากับ เศษส่วนของระยะทางจาก  $b$  ถึง  $c$  และผลต่าง ของ  $b$  กับ  $a$  ถึง  $c$  เขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{z}{1-w} = w \quad (\text{ข.6})$$

2. จากสมการ (ข.5) และ (ข.6) จะได้สมการควอดราติก

$$w^2 - 3w + 1 = 0 \quad \text{จะได้} \quad w = \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \approx 0.38197 \quad (\text{ข.7})$$

โดยทั่วไปนั้น Optimal bracketing interval  $a < b < c$  จะมีจุดกึ่งกลางเป็นจุด  $b$  ซึ่งจะมีระยะห่าง 0.38197 จากจุด  $a$  และ 0.61803 จากจุด  $b$  ซึ่งเศษส่วนนี้จะเรียกว่า golden mean หรือ golden section วิธี minimization ของฟังก์ชัน optimal ซึ่งความต่อเนื่องของวิธีแบ่งครึ่งเพื่อที่จะหาค่าศูนย์ ซึ่งจะเรียกว่า วิธีการหา golden section



รูปที่ ข.2 แสดงค่า step เพื่อหา minimum bracket

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมี bracketing ของ minimum ต่อไป ค่าต่ำสุดเริ่มต้นของ bracket ที่จุด 1,3,2 จำนวนจากฟังก์ชันได้จุดที่ 4 แล้วแทนที่จุดที่ 2 ได้จุดที่ 5 แล้วจุดที่ 1 ได้จุดที่ 6 แล้วแทนที่จุดที่ 4 ก็จะได้เป็น stage มาจนได้ จุดศูนย์กลางที่อยู่ระหว่างจุด outside ซึ่งมีค่าต่ำสุด หลังจากแสดงทีละ step จะได้ minimum bracket เป็นจุด 3, 6, 5

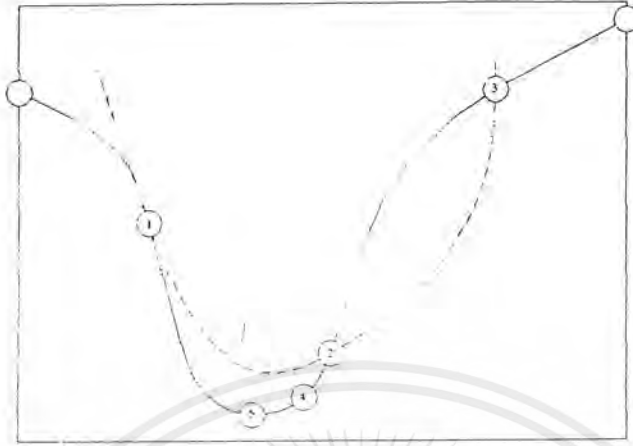
### ข.3 การเปลี่ยนรูป Parabolic และทฤษฎีของ Brent ในหนึ่งมิติ

(Parabolic Interpolation and Brent's Method in One-dimension)

วิธี Golden Section Search เป็นวิธีที่ไม่ดีในกรณีการทำ minimization function เนื่องจากไม่มีการทำงานร่วมกันในการทำ minimum ให้ลดค่าลงเรื่อยๆ และค่า minimum ที่จุดมุมทำไมถึงว่าวิธีนี้ไม่ดีก็คือจะต้องใช้ฟังก์ชันที่คล้ายกับรูป Parabola ก็นั้นเราจึงใช้วิธี “inverse parabolic” แทนการใช้ Golden Section Search ซึ่งสูตรในการหาค่า  $x$  ที่เป็นจุดต่ำสุดของ parabola ของ 3 จุดของ function ที่ให้มาคือ

$$x = b - \frac{1}{2} \frac{(b-a)^2 |f(b) - f(c)| - (b-c)^2 |f(b) - f(a)|}{(b-c) |f(b) - f(a)| - (b-a) |f(b) - f(c)|} \quad (ข.8)$$

สูตรนี้จะใช้ไม่ได้ถ้าจุดทั้ง 3 เป็น collinear ซึ่งกรณีนี้ตัวหารจะเป็น 0 (จุดต่ำสุดจะอยู่ไกลมากที่ infinity) ทฤษฎี Brent จะมีจุดของฟังก์ชันอยู่ 6 จุด คือ  $a, b, u, v, w$  และ  $x$  จุดต่ำสุดจะอยู่ในขอบเขตระหว่าง  $a$  และ  $b, x$  เป็นจุดที่ฟังก์ชันมีค่าน้อยที่สุด  $w$  เป็นจุดที่ฟังก์ชันมีค่าน้อยที่สุดลำดับที่ 2,  $v$  เป็นค่าอันก่อนของ  $w, u$  เป็นจุดซึ่งฟังก์ชันถูกจัดรูปใหม่ ทฤษฎีนี้จะใช้การประมาณการเปลี่ยนแปลงระหว่างการ step ของ parabolic และ golden sections รูป (ข.3) การดูเข้าของจุดต่ำสุดโดยใช้วิธี inverse parabolic interpolation ของ function แทนด้วยเส้นที่บิซึ่งจุดเริ่มต้น คือจุด 1, 2, 3 และเราจะวาดรูป Parabola ได้ดังเส้นประ จุดต่ำสุดจะอยู่ที่จุด 4 ซึ่งจะแทนที่จุด 3 เราจะได้ Parabola ใหม่ ตามเส้นจุด ๆ ซึ่งวาดผ่าน 1, 4, 2 จุดต่ำสุดของ Parabola นี้จะอยู่ที่จุด 5 ซึ่งเป็นจุดต่ำสุดของฟังก์ชันนี้



รูปที่ ข.3 แสดงการลู่เข้าจุดต่ำสุด โดย inverse parabolic interpolation

การลู่เข้าสู่ค่า minimum โดยการใช้ inverse parabolic interpolation ซึ่งจะเป็น parabola (เส้น dashed) จึงวาดโดยใช้จุดเริ่มต้น 1, 2, 3 ของฟังก์ชัน (เส้นทึบ) คำนวณหาจุด parabola minimum คือจุด 4 แล้วไปแทนค่าที่จุด 3 ซึ่งจะได้ parabola ใหม่ (เส้น dotted) ซึ่งวาดจากจุด 1, 4, 2 ซึ่งจะได้ minimum ของ parabola คือจุดที่ 5 ซึ่งจะเป็นจุดต่ำสุดของฟังก์ชัน

#### ข.4 การหาทิศทางในหนึ่งมิติโดยใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่ง

(One-dimensional Search with First Derivatives)

หลักในการหาก็คือจะพยายามหาค่าศูนย์ของอนุพันธ์ โดยไม่สนใจข้อมูลของ function ซึ่งการใช้อนุพันธ์จะช่วยให้เราในการเลือกจุด 3 จุดใหม่ๆ ที่อยู่ในขอบเขต

การใช้อนุพันธ์จะต้องเป็นไปตามนี้เท่านั้นคือ สัญลักษณ์ของอนุพันธ์ที่จุดตรงกลางของขอบเขต ทั้ง 3 จุดคือ  $a < b < c$  ที่กำหนดอย่างชัดเจนว่า จุดทดสอบต่อไปจะต้องอยู่ในเส้นทาง  $(a,b)$  หรืออยู่ในเส้นทาง  $(b,c)$  ซึ่งในวิธีของ Brent เราจะมีความยุ่งยากในการเรียงจุดทั้ง 3 ใหม่ แต่ถ้าเราสามารถใช้วิธีอนุพันธ์ในการทำ minimization ในหนึ่งมิติ จะช่วยให้เราจัดจุดทั้ง 3 ไล่คี่ขึ้น แต่ถ้าฟังก์ชันมีความยุ่งยากการใช้อนุพันธ์จะให้ค่าฟังก์ชันไม่สมบูรณ์และจุดต่ำสุดที่ได้จะไม่ถูกต้องเท่าที่ควร อันเนื่องมาจาก round off errors บางทีอาจมาจาก function error ในทฤษฎีของการหาอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ๒.5 Downhill Simplex Method in Multidimensions

ในการแก้ปัญหาของ minimization ของฟังก์ชันหลายมิติ (Multidimension) ซึ่งจะได้ค่า minimum ของฟังก์ชันมีค่ามากกว่าแบบหนึ่งตัวแปร ( One independent Variable ) โดยส่วนที่จะแตกต่างจากหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว

วิธี Downhill Simplex ถูกพัฒนาโดย Nelder และ Mead ( 1965 ) เป็นวิธีคำนวณฟังก์ชัน โดยไม่ใช้วิธี derivative ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่มีประสิทธิภาพดีเมื่อเทอมของฟังก์ชันมีจำนวนมากกว่าวิธี Powell ( ในหัวข้อ ข.6 ) เป็นวิธีที่ประสิทธิภาพสูงในการใช้งาน แต่อย่างไรวิธี downhill simplex ก็ยังมีการใช้อยู่ ทั้งนี้เพราะเป็นวิธีที่ใช้ง่าย

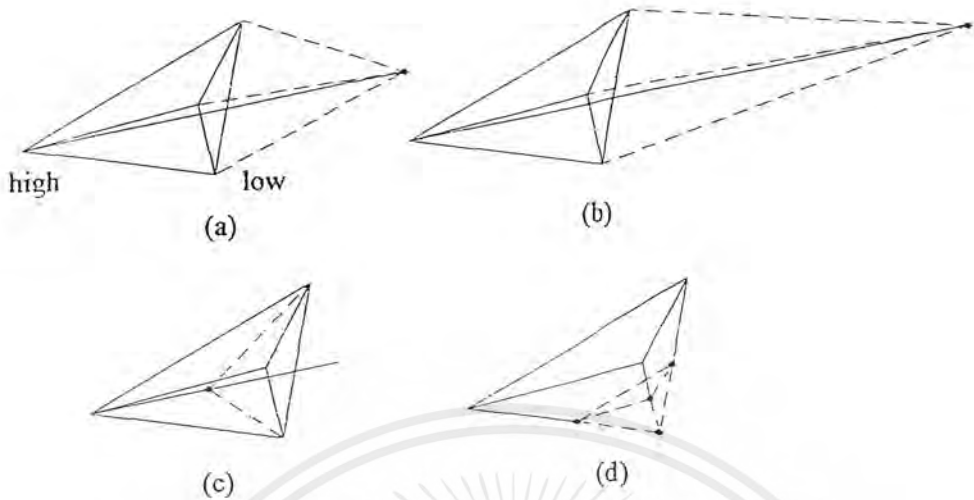
ซึ่งวิธีนี้จะสร้างรูปทางเรขาคณิตที่ไม่เป็นธรรมชาติ โดยที่รอบรูปจะมีการสร้างรูปเพิ่มขึ้นจนเสร็จ

Simplex เป็นรูปทางเรขาคณิต โดยอยู่ใน  $N$  มิติ ของ  $N+1$  จุด (Vertices) และมีการเชื่อมถึงกันโดยใช้เส้นที่ทำให้เกิดพื้นผิวของรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) ในระยะ 2 มิติ Simplex จะเป็นรูปสามเหลี่ยมใน 3 มิติ จะเป็นรูปสี่เหลี่ยม (tetrahedron) ไม่จำเป็นว่าจะจะเป็น regular tetrahedron (วิธี Simplex เป็น linear program ที่สร้างโดยใช้หลักการทางเรขาคณิตของ) โดยทั่วไปเราจะใช้ Simplex ที่มีประโยชน์เท่านั้น ซึ่งจะเป็นรูปปิด โดยภายในเป็นปริมาตร  $N$  มิติ ถ้าทุกจุดของ nondegenerate simplex อยู่ที่จุดกำเนิดและจุด  $N$  จะกำหนดแนวเดอริทีสทางใน  $N$  มิติ

วิธี downhill simplex ไม่สามารถเริ่มต้นได้จากจุดเดียว แต่ต้องใช้  $N+1$  จุดเพื่อกำหนด Simplex เริ่มต้น ถ้าคุณมีจุดใดจุดหนึ่งเป็นจุดเริ่มต้น คือจุด  $P_0$  แล้วต้องมีจุดอีก  $N$  จุด

$$P_i = P_0 + \lambda e_i \quad (๒.9)$$

เมื่อ  $e_i$  เป็น  $N$  unit vector และ  $\lambda$  เป็นค่าคงที่ ที่สามารถสมมติได้จากคุณสมบัติของความยาวของฟังก์ชัน



รูปที่ ข.4 แสดงวิธีในการ Step โดยใช้ทฤษฎี Downhill simplex

วิธี downhill simplex เป็นกระบวนการต่อเนื่องทีละ step การเคลื่อนที่จุดของ Simplex มาก เมื่อฟังก์ชันมีขนาดใหญ่ (มีจุดมาก) และจะตรงกันข้ามกันเมื่อ Simplex มีจุดน้อย โดยแต่ละ step จะเรียกว่า การสะท้อนกลับ (reflection) และโครงสร้างจะรักษาปริมาตรของ simplex ไว้โดยการขยายตัวของ simplex ในหนึ่ง ทิศทางและทิศทางอื่น ๆ เพื่อค้นหา Valley floor การ Contract ด้วยตัวเอง ในทิศทางตามขวางและเคลื่อนเข้าหา Valley โดยใช้ เดียวกันในทุกทิศทาง ก็จะได้จุดต่ำสุด (best) การเคลื่อนที่ดังกล่าวอธิบายได้ดังรูป (ข.4)

#### ข.6 วิธี Directional Set (Powell's) ใน N มิติ

จากหัวข้อ ข. 2 - ข. 4 ซึ่งมีวิธีการหาค่าต่ำสุด ทางฟังก์ชัน 1 ตัวแปร ถ้าเริ่มต้นที่ N มิติ แล้วดำเนินการจุดที่ direction vector  $n$  จำนวนหนึ่ง ดังนั้นทุก ๆ ฟังก์ชัน N ตัวแปร  $f(p)$  ซึ่งจะสามารถทำให้ค่าสุดตลอดแนว  $n$  โดยวิธีที่เป็น one dimension ทำให้ค่าต่ำสุดของ N มิติได้โดยประกอบด้วยค่าต่ำสุดหลาย ๆ แนว ในแต่ละวิธีจะมีขั้นตอนที่แตกต่างกัน ซึ่งวิธีการทั้งหมดจะทำการสมมติ subalgorithm ของ black box ขึ้นเรียกว่า LINMIN

*LINMIN Given as input the vector  $P$  and  $n$ . and*

*The function  $f$  find the scalar  $\lambda$  that minimizes*

*$f(P + \lambda n)$ . Replane  $P$  by  $P + \lambda n$ . Replane  $n$  by  $\lambda n$*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการหาค่าต่ำสุดในส่วนนี้ทั้งหมด และอีก 2 ส่วนต่อจากนี้เป็นแบบแผนทั่วไปในการหาแนวของค่าต่ำสุด ในส่วนแรกนี้จะพิจารณาวิธีที่สามารถเลือกมิติได้อย่างถูกต้อง โดยยังไม่รวมถึงการคำนวณค่าของฟังก์ชันเกรเดียนท์ และสำหรับ 2 ส่วนที่เหลือ ต้องใช้การคำนวณส่วนประกอบของฟังก์ชันเกรเดียนท์ และบันทึกค่าไว้ โดยไม่จำเป็นต้องเจาะจงว่าจะต้องใช้ LINMIN ที่ประกอบด้วยฟังก์ชันเกรเดียนท์หรือไม่ ในการคัดเลือกความเหมาะสมกับส่วนของฟังก์ชันนั้น ซึ่งอาจสลับกันโดยใช้เกรเดียนท์ที่อยู่ใน LINMIN หรือไม่ก็ได้ การเลือกทิศทางที่ใช้เกรเดียนท์จะช่วยลดเวลาในการคำนวณลงได้อย่างมาก

แต่สามารถจะนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไร การคำนวณเกรเดียนท์จะถูกตัดออกจากคำถามซึ่งจะต้องคิดวิธีธรรมดาก่อนโดยใช้ unit vector  $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$  ซึ่งถือว่าเป็นเซตของทิศทางแล้วใช้ LINMIN เคลื่อนไปตลอดทิศทางแรกไปยังค่าต่ำสุด แล้วเริ่มจากจุดเดิมเคลื่อนไปยังทิศทางที่ 2 เพื่อจะได้ค่าต่ำสุดแล้วทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งฟังก์ชันไม่ลดลงอีก

วิธีง่าย ๆ เช่นนี้เพียงพอสำหรับหลาย ๆ ฟังก์ชัน แต่สำหรับอีกหลาย ๆ ฟังก์ชันก็ใช้ไม่ได้ผล พิจารณาฟังก์ชัน 2 มิติ เช่น แผนที่ contour (ระดับเส้น) ที่เกิดขึ้นตาม Long narrow valley ที่ทำมุมกับเวกเตอร์คู่ลำดับในรูปที่ (ข.5) ดังนั้น วิธีการลดความยาวของ valley เท่านั้น ที่เป็นไปตามเวกเตอร์ในแต่ละขั้นตอน โดยอนุกรมขั้นตอนน้อยจำนวนมาก ส่วนมากใน N มิติ ถ้าฟังก์ชันที่แยกมาครั้งที่ 2 มีทิศทางที่มีขนาดใหญ่กว่าทิศทางอื่น ดังนั้น จึงต้องการเวกเตอร์จำนวนทั้งหมด N ที่วนรอบหลายครั้งเพื่อจะได้ค่าในทุกที่

จะสังเกตได้ว่าเราจำเป็นต้องมีการเซททิศทางที่ดีกว่าของ  $e_1$  วิธีการเซททิศทางประกอบด้วยคำแนะนำสำหรับการเปลี่ยนแปลงวิธีการเซททิศทาง วิธีการเซททิศทางเป็นวิธีดำเนินการความพยายามที่จะให้เท่าเทียมกับการเซทซึ่งมีดังนี้

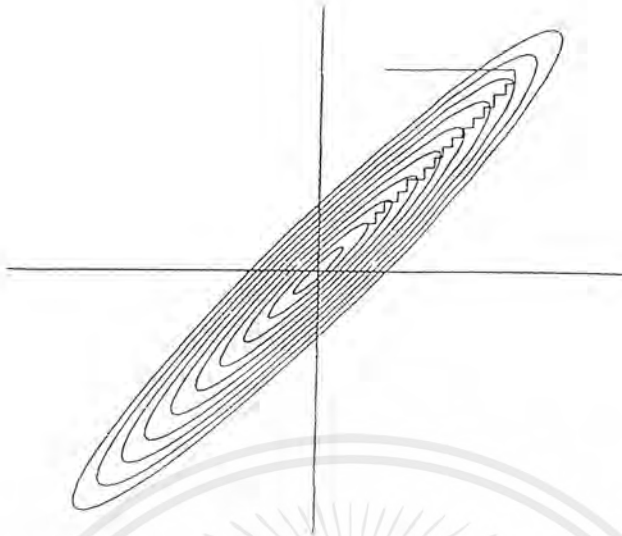
(I) รวมทิศทางที่ดีไว้ เพื่อจะได้นำไปใช้ใน narrow valley

(II) รวมจำนวนทิศทางที่ไม่ได้แทรกแซงกับคุณภาพพิเศษ ซึ่งการหาค่าต่ำสุดหนึ่ง ๆ ไม่เกิดความเสียหาย โดยการแยกย่อยค่าต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงการเซททิศทางที่จะเกิดการวนรอบไม่รู้จบ แนวความคิดของทิศทางที่ไม่มีการรบกวนนี้ ตามธรรมชาติจะเรียกว่า ทิศทางคอนจูกท มีความสำคัญต่อความแน่นอนทางคณิตศาสตร์

อันดับแรก สังเกตว่าการหาฟังก์ชันต่ำสุดตามทิศทาง  $u$  ดังนั้นเกรเดียนท์ ของฟังก์ชันต้องตั้งฉากกับ  $u$  ที่เส้นชั้นค่าต่ำสุดนั้น ถ้าไม่ใช่ดังนั้นก็ยังมีทิศทางที่แยกออกมาไม่เป็นศูนย์ตามทิศ  $u$

ถัดมาในรายละเอียดที่จุด  $P$  ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของคู่ลำดับ  $x$  ดังนั้นฟังก์ชัน  $f$  สามารถประมาณค่าโดยวิธีอนุกรมเอเลอร์ (Euler) ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 การลู่เข้าของฟังก์ชันที่ N มิติ

การต่อเนื่องของ coordinate ของ minimization ในทิศทางของ narrow valley (แสดง เส้น) ยกเว้นแต่ที่ valley ของ optimally เริ่มต้น ซึ่งไม่สามารถทำให้ได้ เพราะว่าจะมีการ step เพื่อหาค่า minimum ซึ่งอาจจะข้ามหรือไม่ข้ามเกณฑ์ที่สำคัญทิศทางคอนจูเกต

$$f(x) = f(P) + \sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i} x_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} x_i x_j + \dots \approx c - b \cdot x + \frac{1}{2} x \cdot A \cdot x \quad (\text{ข.10})$$

เมื่อ

$$c \equiv f(P) \quad b \equiv -\nabla f \Big|_P \quad [A]_{ij} \equiv \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \Big|_P \quad (\text{ข.11})$$

เมตริกซ์ A มีส่วนประกอบของมันคือ ส่วนที่ 2 แยกออกมาจากเมตริกซ์ ของฟังก์ชันที่ เรียกว่าเมตริกซ์ เฮสเซียน ของฟังก์ชันที่ P

ในการประมาณค่าของสมการ (ข.10) เกรเดียนท์ ของ f คำนวณได้ง่ายๆ ดังนี้

$$\nabla f = A \cdot x - b \quad (\text{ข.12})$$

เราเปลี่ยนทิศทางของเกรเดียนท์  $\nabla f$  จะได้

$$\partial(\nabla f) = A \cdot (\partial x) \quad (\text{ข.13})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าเคลื่อนที่ในทิศทาง  $u$  ให้เป็นค่าต่ำสุด และสมมติว่าในขณะนี้ได้เคลื่อนที่ทิศทางใหม่เป็น  $v$  สภาพการเคลื่อนที่ตาม  $v$  ไม่ได้ทำให้การหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันในทิศทาง  $u$  เสียหายซึ่งค่าเกรเดียนท์จะตั้งฉากกับ  $u$  โดยสมการ (ข.13) จะได้

$$u \cdot \partial(\nabla f) = u \cdot A \cdot v = 0 \quad (\text{ข.14})$$

เมื่อ (ข.14) มี 2 เวกเตอร์  $u$  และ  $v$  ซึ่งอาจจะเป็นคอนจูเกต เมื่อความสัมพันธ์ทั้งคู่ของจำนวนทั้งหมดเป็นเซตของเวกเตอร์ ซึ่งจะเรียกว่า เป็นคอนจูเกตเซต การที่จะใช้วิธีเซตทิศทางให้สำหรับต้องเซตค่า  $N$  เซ็งเส้นที่ไม่ขึ้นกับทิศทางคอนจูเกตทั้งสองทิศทาง ดังนั้นหนึ่งเส้นหวงของเซตค่าต่ำสุด  $N$  จะมีค่าต่ำสุดที่แน่นอนที่เทอมควอดราติกเหมือนกับสมการ (ข.10) สำหรับฟังก์ชัน  $f$  ซึ่งไม่มีรูปแบบควอดราติกที่แน่นอน จะไม่ได้ค่าต่ำสุดที่แน่นอนแต่ทำ  $N$  วนซ้ำ จะได้ค่าที่ต่ำสุด

#### วิธีการ Quadratic Convergence ของ Powell

Powell ได้พบว่าวิธีการเซตทิศทาง ซึ่งประกอบด้วยทิศทางคอนจูเกตทั้ง  $N$  ทิศทางแต่เดิมการเซตทิศทาง  $U_i$  ให้เป็นเวกเตอร์หลัก

$$U_i = e_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (\text{ข.15})$$

ขณะที่ทำซ้ำตามลำดับขั้นตอนจนกระทั่งค่าของฟังก์ชันไม่ลดลง

- เก็บตำแหน่งในการเริ่มต้นเป็น
- สำหรับ  $i = 1, 2, 3, \dots, N$  ย้าย  $P_{i-1}$  เป็นทิศทาง  $U_i$  ที่ต่ำสุดและเรียกจุดนี้ว่า  $P_i$
- สำหรับ  $i = 1, 2, \dots, N-1$  เซต  $U_i \leftarrow U_{i-1}$
- เซต  $U \leftarrow P - P_0$
- ย้าย  $P_N$  เป็นทิศทาง  $U_N$  และเรียกจุดนี้ว่า  $P_0$

ในปี 1964 Powell ได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบในสมการ (ข.10) ค่า  $k$  เป็นกระบวนการทำซ้ำให้ได้เซตทิศทาง  $U_i$  ของ  $k$  ค่าสุดที่รวมเข้าด้วยกัน ดังนั้นการปฏิบัติการพื้นฐานที่ทำซ้ำจำนวน  $N$  ครั้งจนถึง  $N(N+1)$  ครั้ง จะได้ค่าต่ำสุดที่แน่นอน อย่างไรก็ตามหากมีปัญหาเกี่ยวกับทฤษฎีการถ่วงเข้าของสมการควอดราติกของ Powell การดำเนินการในแต่ละขั้นตอน  $U_i$  มีผลต่อ  $P_N - P_0$  เพื่อให้ได้ทิศทางที่เซตไว้ และมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังนั้นค่าต่ำสุดของการดำเนินการของฟังก์ชัน  $f$  เท่านั้นที่นอกเหนือจากกลุ่มสมาชิกของ มิติ อีกนัยหนึ่งเป็นคำตอบที่ผิด ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริทึมจะไม่ใช้รูปแบบที่ใหม่

จำนวนของวิธีที่จะแก้ไขปัญหอัลกอริทึมของ Powell ที่มีลักษณะเชิงเส้นมีดังนี้

1. สามารถเซททิศทางของ  $U_i$  ใหม่เพื่อให้ได้เวกเตอร์หลัก  $e_i$  หลังจากที่ทำซ้ำ ทุก ๆ  $N$  หรือ  $N + 1$  ครั้ง วิธีการนี้แนะนำให้ไปประยุกต์สมการควอดราติก

2. เบนท์ได้ชี้ให้เห็นว่า การเซททิศทางสามารถทำได้ดีพอ ๆ กับการเริ่มต้นในแนวตั้งของเมตริกซ์ใด ๆ เบนท์ได้เริ่มต้นทิศทางใหม่เพื่อกำหนดทิศทางหลักของเมตริกซ์  $A$  การคำนวณอัลกอริทึมที่มีค่าแยกกันเป็นพิเศษ การขยายความของเบนท์ได้สนับสนุนวิธีการของ Powell เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามมันค่อนข้างละเอียดเกินไป

3. สามารถยกคุณสมบัติของ Quadratic Convergence เพื่อสนับสนุนวิธีการเฮอริสติกมากขึ้นเพื่อพยายามที่จะหาทิศทางที่ดี 2 - 3 ทิศทางระหว่างช่องแคบ ๆ แทนการรวมทิศทางที่จำเป็น  $N$  วิธีการตัดทิศทางที่มีค่าลดลงจำนวนมากที่สุดของ Powell

เมื่อใช้คุณสมบัติของ Quadratic Convergence ซึ่งขึ้นอยู่กับฟังก์ชันที่กำลังหาค่าต่ำสุด ฟังก์ชันที่ได้บางครั้งมีทิศทางที่คดเคี้ยวในเส้น Valley Quadratic Convergence ก็ไม่มีความสำคัญต่อ โปรแกรมซึ่งต้องตัดทอนความยาวของพื้นที่ valley ที่คดเคี้ยวหนึ่งทาง และอีกเส้นทางหนึ่ง (ที่มี  $N$  มิติ) วิธี Quadratic Convergence ได้พยายามที่จะหาค่าต่ำสุดบนพาราโบลาที่ยังไม่มี ขณะที่ทำการรวมทิศทางที่ใหม่จำนวน  $N - 1$  ครั้ง ซึ่งเก็บค่าไว้จะทำให้เสียหายโดยเส้นทางที่คดเคี้ยวนั้น

เมื่อทำการประมาณค่าต่ำสุดบนเส้นวงรี ดังนั้นขึ้นอยู่กับว่าเราต้องการความแน่นอนมากเท่าไร วิธีการหนึ่งใน Quadratic Convergence ที่สามารถประหยัดจำนวนครั้งของการหาเส้นค่าต่ำสุดได้  $N^2$  เนื่องจากการเพิ่มทวีคูณ Quadratic Convergence ตัวเลขที่สำคัญในแต่ละครั้งที่ทำซ้ำ

โดยพื้นฐานแล้ววิธีของ Powell ยังคงทำเพื่อให้  $P_N - P_0$  เป็นทิศทางใหม่ ทิศทางเฉลี่ยที่เคลื่อนที่ได้หลังจากพยายามหาทิศทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจำนวน  $N$  การเปลี่ยนแปลงต้องตัดทิศทางเก่าทิ้งไป ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ทำให้มันมีค่าลดลงมากที่สุด เราจะตัดค่าออกไปควรหลีกเลี่ยงการที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามทิศทางใหม่นั้นยังมีหลักเกณฑ์ที่ว่า เราจะตัดออกไปควรหลีกเลี่ยงการที่จะเกิดลักษณะเชิงเส้น

มีแนวความคิดอีก 2 อย่างที่เป็นที่ยอมรับบางครั้งมันไม่ดีไปกว่าการเพิ่มทิศทางใหม่ทั้งหมดจะได้

$$f_n \equiv f(P_n) \quad f_N \equiv f(P_N) \quad f_R \equiv f(2P_N - P_0) \quad (จ.16)$$

$f_R$  คือ ค่าฟังก์ชันที่เป็นจุดขั้วภายนอก ซึ่งสมมติทิศทางใหม่กำหนด  $f$  เป็นขนาดของทิศทางที่ลดลงมากที่สุดของการทำซ้ำกัน ดังนั้น

1. ถ้า  $f_E \leq f_0$  ดังนั้นเก็บค่าทิศทางเก่าที่เซตไว้สำหรับการทำครั้งต่อไป เพราะทิศทางเฉลี่ย  $P_N - P_0$  ใกล้หมดเต็มที่

2. ถ้า  $2(f_0 - 2f_N + f_E) \{(f_0 - f_N) - \nabla f\} \geq (f_0 - f_E)^2 \nabla f$  ดังนั้นเก็บค่าของทิศทางเก่าที่เซตไว้สำหรับการทำครั้งต่อไป เพราะอาจจะเป็น

(i) ทิศทางเฉลี่ยที่ลดลง ไม่ใช่ทิศทางที่ลดลงทางด้านปรนภูมิ

(ii) มีใจความของส่วนที่แยกครั้งที่ 2 ตามทิศทางเฉลี่ยและใกล้เคียงกับค่าต่ำสุด

### ข.7 วิธี Conjugate Gradient ในหลายมิติ

การที่เราคำนวณ  $N$  มิติที่จุด  $P$  ซึ่งไม่ใช่ค่าของฟังก์ชัน  $f(P)$  แต่เป็นเกรเดียนท์ (เวกเตอร์ของส่วนที่แยกมาครั้งแรก)

สมมติว่าฟังก์ชัน  $f$  ถูกประมาณให้เป็นรูปแบบควอดราติกเช่นเดียวกับสมการ (ข.10)

$$f(x) = c - bx + \frac{1}{2}(x \cdot A \cdot x) \quad (\text{ข.17})$$

ดังนั้นจำนวนตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าใน  $f$  มีค่าเท่ากับจำนวนตัวแปรอิสระใน  $A$  และ  $B$  ซึ่งก็คือ  $1/2 N(N+1)$  การเปลี่ยนค่าตัวแปรเหล่านี้สามารถย้ายที่ตั้งของตัวแปรต่ำสุดได้ ดังนั้นจะยังไม่พบค่าต่ำสุดจนกระทั่งสะสมข้อมูลที่คล้ายกัน ซึ่งมีจำนวน  $N^2$

ในวิธีการเซตทิศทางจากหัวข้อ ข.6 การสะสมข้อมูลที่จำเป็นโดยการลำดับขั้น  $N^2$  แยกเส้นขั้นค่าต่ำสุดออก ในขณะที่ค่าของเกรเดียนท์แต่ละค่าจะนำ  $N$  เป็นส่วนประกอบของข้อมูลใหม่ ดังนั้นจำเป็นต้องทำตามลำดับขั้นตอน  $N$  แยกตามเส้นขั้นค่าต่ำสุด

กรณีของ  $N$  ที่แก้ไขในการคำนวณความเร็วไม่จำเป็นต้องแสดงความหมาย ขณะที่ประมาณเส้นทางอาจจะคิดว่าการคำนวณส่วนประกอบแต่ละค่าของเกรเดียนท์ที่นำมาใช้เกี่ยวกับการหาค่าฟังก์ชันด้วยตัวมันเอง ในกรณีนั้นจะมี  $N^2$  ขั้นตอน คล้ายกับฟังก์ชันที่หาค่าทั้งคู่ด้วยและไม่มีข้อมูลเกรเดียนท์ แม้ว่าผลที่ได้ไม่เป็นตามระดับ  $N$  อย่างไรก็ตามในความมืออยู่ว่า

(i) จำนวนส่วนประกอบแต่ละค่าจะไม่ได้ช่วยหาค่าฟังก์ชันหนึ่ง ๆ แต่จำนวนที่คล้ายกันว่าทั้งหมดเป็นค่าขั้นต่ำสุด

(ii) มีรูปแบบที่มากเกินไปสำหรับส่วนประกอบต่าง ๆ ของฟังก์ชันของเกรเดียนท์ เมื่อเป็นไปตามที่ใช้ที่นี่ เมื่อมีการคำนวณฟังก์ชันที่ซ้ำซ้อน ดังนั้นจำนวนเกรเดียนท์อาจจะมีค่าน้อยกว่าการหาค่าฟังก์ชัน  $N$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติความผิดพลาดของผู้เริ่มต้น คือ สมมติว่าวิธีการรวมข้อมูลสกรเดียนที่น่าจะดีพอ ๆ กับอีกวิธีหนึ่ง การนำความคิดนี้เพื่อไปดำเนินการต่อไป ไม่ใช่อัลกอริทึมที่มีมากนัก

วิธี Steepest Descent :

**Steepest Descent** เริ่มที่จุด  $P_0$  มีความจำเป็นที่จะต้องย้ายจากจุด  $P_i$  ไปจุด  $P_{i+1}$  โดยการหาค่าต่ำสุดตามเส้นทางจาก  $P_i$  ในทิศทางของเกรเดียนที่ที่ลาดลง  $-\Delta f(P)$

ปัญหาของวิธี Steepest Descent เหมือนกับปัญหาที่แสดงในรูป (ข.5) วิธีการนั้นจะแสดงขั้นตอนขนาดเล็กจำนวนมากที่กำลังลดลงตาม narrow valley ราวกับว่า valley นั้นเป็นรูปแบบของควอดราติกที่สมบูรณ์ ซึ่งอาจจะหวังไว้ใน 2 มิติ ขั้นตอนแรก ควรจะนำพื้นของ valley มาใช้ขั้นตอนที่ 2 สถิติทางตามแกนยาวแต่นำไว้ว่า เกรเดียนที่ใหม่ที่จะต่ำสุดของเส้นขั้นต่ำสุด เป็นเส้นตั้งฉากกับทิศทางเส้นทแยง ดังนั้นวิธี Steepest Descent ต้องปรับปรุงให้ตรงทำให้ได้ค่าต่ำสุด (ดูรูป (ข.6) )



(a) วิธี Steepest Descent ตาม narrow valley ขณะที่ประสิทธิภาพดีกว่าวิธีในรูป (ข.5) Steepest Descent ไม่มีประสิทธิภาพดีพอเท่ากับการทำหลายขั้นตอน เพื่อให้ได้ถึง valley

(b) ภาพขยายของ 1 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก เริ่มหยุดลงในทิศทางเกรเดียนที่ (local) เส้นตั้งฉากกับเส้นแสดงความสูงต่ำ แต่ เส้นตรงขวางจนกระทั่งถึงจุดต่ำสุด (local) เมื่อเส้นขวางขนานกับเส้นแสดงความสูงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการที่ (ข.14) ต้องการวิธีการของกระบวนการที่ไม่ได้ลดค่าเกรเดียนท์ใหม่ แต่เพื่อที่จะผูกความหมายกับคอนจูทเกรเดียนท์อันเก่า และเป็นไปได้ว่า จะทำนายทิศทางเส้นทางแย่งทั้งหมดได้ วิธีการที่จะประสบความสำเร็จในที่นี้คือ วิธีคอนจูทเกรเดียนท์

มี 2 วิธีที่มีความสำคัญต่อวิธีคอนจูทเกรเดียนท์คือ วิธีเฟลทเซอร์รีฟ (Fletcher Reeves) และวิธี โพลาคีเรียร์ (Polak - Ribiere) ให้  $A$  เป็นสัดส่วนที่เป็นบวก เมตริกซ์  $n \times n$  ให้  $g_0$  เป็นเวกเตอร์ที่ไม่มีเกณฑ์  $h_0 = g_0$  สำหรับ  $i = 0, 1, 2, \dots$  ค่าเวกเตอร์ลำดับสอง

$$g_{i+1} = g_i - \lambda_i A h_i \quad h_{i+1} = g_{i+1} + y_i h_i \quad (\text{ข.18})$$

ขณะที่  $\lambda_i \mathcal{H}_i$  ถูกเลือกให้  $g_{i+1}^* g_i = 0$  และ  $h_{i+1}^* A h_i = 0$   
(ไม่ใช่ส่วนที่มีค่าเท่ากับศูนย์, ในกรณีนี้  $\lambda_i \mathcal{H}_i$  ดังนั้นสำหรับ  $i = j$ )

$$g_i^* g_j = 0 \quad , \quad h_i^* A h_j = 0 \quad (\text{ข.19})$$

จากสมการ (ข.20) สามารถอธิบายสมการ (ข.18) และพิสูจน์ว่า สำหรับ  $\lambda_i$  และ  $\mathcal{H}_i$  เหมือนกับสมการ (ข.19)

$$y_i = \frac{g_{i+1}^* g_{i+1}}{g_i^* g_i} = \frac{(g_{i+1} - g_i)^* g_{i+1}}{g_i^* g_i} \quad (\text{ข.20})$$

$$\lambda_i = \frac{g_i^* h_i}{h_i^* A h_i} \quad (\text{ข.21})$$

การที่จะประยุกต์ปัญหาของการประมาณค่าต่ำสุด โดยรูปแบบควอดราติก (ข.17) สมมติว่าใช้เฮสเซียนเมตริกซ์  $A$  ดังนั้นควรใช้ (ข.18) เพื่อหาทิศทางคอนจูท  $h_i$  ตามเส้นชันค่าต่ำสุดหลังจาก  $N$  เป็นเช่นนั้นจะได้ค่าต่ำสุดของสมการควอดราติก แต่ยังไม่รู้จักค่า  $A$

มีบทพิสูจน์อีกอย่างหนึ่งซึ่งช่วยประหยัดเวลา : ให้  $g_i$  และ  $h_i$  เป็นเวกเตอร์ลำดับที่เหมือนกัน สมมติว่าเรามี  $g_i = -\nabla f(P_i)$  สำหรับจุด  $P_i$  ขณะที่  $f$  คือรูปแบบของสมการ (ข.17) สมมติว่าได้จาก  $P_i$  ตามทิศทาง  $h_i$  สู่อันดับค่าต่ำสุดของ  $f$  ที่ตั้งบางจุด  $P_{i+1}$  และดังนั้นเฮส  $g_i = -\nabla f(P_{i+1})$  ดังนั้น  $g_{i+1}$  เป็นเวกเตอร์ที่สร้างจากสมการ (ข.18)

พิสูจน์ : โดยสมการ (ข.12) :  $g_i = -A P_i + b$  ; และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g_{i+1} = -A[F_i + \lambda h_j] + b = g_i - \lambda A h_i \quad (จ.23)$$

ซึ่ง  $\lambda$  ถูกเลือกเพื่อนำไปใช้กับเส้นชั้นค่าต่ำสุดแต่ที่เส้นชั้นต่ำสุด  $h_i \cdot \nabla f = -h_i \cdot g_{i+1} = 0$  ซึ่งสภาพตอนหลังนี้รวมกันได้ง่ายกับสมการ (จ.23) เพื่อแก้ค่า  $\lambda$  ซึ่งแสดงความหมายของ (จ.22) ได้แน่นอน แต่ค่านี้ของ  $\lambda$  ในสมการ (จ.22) จะคล้ายกับ (จ.18)

เมื่อต้องการใช้วิธีของเฮสเซียน ไมอันไดค็อันหนึ่ง แม้ว่าจำเป็นที่จะต้องสะสมข้อมูลในเมตริกซ์ลำดับของทิศทาง  $h$ , ถูกสร้างขึ้น โดยใช้เส้นชั้นค่าต่ำสุดเท่านั้น ค่าของเกรเดียนท์เวกเตอร์และเวกเตอร์ช่วยเพื่อเก็บค่าต่ำสุดในลำดับของ  $g$

ดังนั้นที่กล่าวมาถูกประยุกต์ทั้งวิธีของ Fletcher - Reeves และ Polak - Ribiere บางครั้งความแตกต่างที่สำคัญ 2 วิธี Fletcher และ Reeves เริ่มต้นใช้การแสดงความหมายในครั้งแรกสำหรับ  $\lambda$  ของสมการ (จ.21) Polak และ Ribiere ได้สมมติการใช้การแสดงความหมายครั้งที่ 2 ในสมการที่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามฟังก์ชันไม่ได้เป็นสมการควอดราติกที่มีค่าแน่นอน การสมมติค่าต่ำสุดของสมการควอดราติก อาจจำเป็นที่จะต้องดำเนินการกับการเซตค่าอีกอันหนึ่งของการทำซ้ำซึ่งแสดงให้เห็นว่า Polak - Ribiere ประสบความสำเร็จในการเปลี่ยนค่าเพื่อทำซ้ำ

## ข.8 วิธี Variable Metric ในลายมิติ

วิธี Variable Metric บางครั้งจะถูกเรียกว่า วิธี Quasi - Newton มันไม่ต่างจากวิธีคอนจูเกตเกรเดียนท์เพื่อนสะสมค่าต่ำสุดอย่างต่อเนื่อง ค่า  $N$  ซึ่งเป็นขอบเขตค่าต่ำสุดจะทำให้ได้ค่าต่ำสุดที่แน่นอนของสมการควอดราติกจาก  $N$  มิติ ในกรณีที่วิธีการนั้นจะถูกรวมเป็นควอดราติกเพื่อให้ฟังก์ชันมีความราบเรียบมากขึ้น

ทั้งวิธี Variable Metric และ Conjugate gradient จะต้องใช้เพื่อสามารถคำนวณฟังก์ชันเกรเดียนท์หรือส่วนที่แยกออกมาครั้งแรก Variable Metric แตกต่างจาก Conjugate gradient ตรงที่ว่ามันจะสะสมและเปลี่ยนค่าของข้อมูลที่ถูกคำนวณได้

ในทางกลับกันวิธี Conjugate gradient มีประโยชน์มากกว่าวิธี Conjugate gradient การพัฒนาตัวคูณและการกระจายไปอย่างกว้างขวาง วิธี Variable Metric ได้ถูกพัฒนาให้เป็นที่น่าพอใจแก้ไข เช่นเดียวกันสิ่งที่ช่วยสนับสนุนวิธีการนี้ได้ถูกพัฒนาให้มีระดับที่ดีกว่าเมื่อนำออกมาให้และให้คำพิพลาคน้อยกว่า ส่วนใหญ่เราจะใช้วิธี Variable Metric มากกว่าวิธี Conjugate gradient

ส่วนมากตัวที่ช่วยสนับสนุนวิธี Conjugate gradient อยู่บ่อย ๆ คือ Dowidon-Fletcher-Powell (DFP) วิธีที่มีความสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่คิดว่า Broyden – Fletcher – Goldfarb - Shonns (BFGS)

ได้ถูกพิสูจน์ความสำคัญแล้ว โคซอนได้แสดงให้เห็นว่า DFP และ BFGS มีลักษณะต่างกันที่ค่าความผิดพลาด ลักษณะการรวมเข้าด้วยกัน อย่างไรก็ตามจากการสังเกตโดยทั่วไป BFGS จะมีรายละเอียดเหล่านี้จำนวนมาก จึงสนับสนุน BFGS ในส่วนนี้

ก่อนที่จะชี้ขาดว่า ฟังก์ชัน  $f(x)$  สามารถถูกประมาณโดยสมการควอดราติก  $f(x) = c-bx+1/2 (x \cdot A \cdot x)$  ซึ่งไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับค่าของพารามิเตอร์  $A$  และ  $b$  ซึ่งสามารถรวบรวมข้อมูลได้จากฟังก์ชันที่หาค่าได้และขอบเขตต่ำสุด

โดยพื้นฐานวิธี Variable Metric ต้องสร้าง Inverse Metric ที่ทำการประมาณโดยการทำซ้ำ ซึ่งลำดับของเมตริกซ์  $H_i$  มีคุณสมบัติดังนี้

$$\lim_{i \rightarrow \infty} H_i = A^{-1} \quad (9.24)$$

ถ้าเราทำในสมการ (9.24) แล้วคั้งนั้นสามารถใช้  $H$  ต่อไปที่จุดต่ำสุด  $x_m$

$$Ax_m = b \quad (9.25)$$

ที่จุด  $x_i$  จะได้ว่า

$$Ax_i = f(x_i) + b \quad (9.26)$$

ลบสมการทั้งสองแล้วคูณด้วยเมตริกซ์  $A^{-1}$

$$x_m - x_i = A^{-1}[-f(x_i)] \quad (9.27)$$

ทางด้านซ้ายมือคือ ขั้นตอนที่กำลังเป็นที่จะได้รับค่าต่ำสุดที่แน่นอนทางด้านขวามือจะได้ว่าค่าที่คำนวณได้  $H = A^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราไม่จริงจังกับค่าอัลกอริทึม DFP สำหรับ  $H_i$  ถึง  $H_{i+1}$  ลบสมการ (ข.27) ที่  $X_{i+1}$ , จากสมการที่เหมือนกันที่  $X_i$

$$x_{i+1} - x_i = A^{-1}[\nabla f_{i+1} + \nabla f_i] \quad (\text{ข.28})$$

ขณะ  $\nabla f_j \equiv \nabla f(x_j)$  ซึ่งทำจาก  $X_i$  ถึง  $X_{i+1}$ , ซึ่งอาจจะต้องการค่าประมาณ  $H_{i+1}$  ใหม่ราวกับว่ามันคือ  $A'$  จะได้ว่า

$$x_{i+1} - x_i = H_{i+1}[\nabla f_{i+1} - \nabla f_i] \quad (\text{ข.29})$$

เราอาจจะได้ว่ารูปแบบที่เปลี่ยนใหม่ควรจะเป็น  $H_{i+1} = H_i$  ค่าที่ถูกต้องจากสมการที่ (ข.29) ทำให้ DFP มีรูปแบบที่เปลี่ยนใหม่เป็น

$$H_{i+1} = H_i + \frac{(x_{i+1} - x_i) \otimes (x_{i+1} - x_i)}{(x_{i+1} - x_i)(\nabla f_{i+1} - \nabla f_i)} - \frac{[H_i(\nabla f_{i+1} - \nabla f_i)] \otimes [H_i(\nabla f_{i+1} - \nabla f_i)]}{[(\nabla f_{i+1} - \nabla f_i)][H_i(\nabla f_{i+1} - \nabla f_i)]} \quad (\text{ข.30})$$

ขณะที่  $\otimes$  คือ ค่าทิศทางผลลัพธ์ทั้งสองเวกเตอร์ เมตริกซ์  $ij$  ของ  $u \otimes v$  คือ  $u_i v_j$  ตัว BFGS มีค่าที่แน่นอนเหมือนกัน แต่มีอยู่หนึ่งเทอม

$$\dots + (\nabla f_{i+1} - \nabla f_i) \cdot H_i(\nabla f_{i+1} - \nabla f_i) u \otimes u \quad (\text{ข.31})$$

เมื่อ  $u$  คือ ค่าเวกเตอร์กำหนด

$$u = \frac{(x_{i+1} - x_i)}{(x_{i+1} - x_i)(\nabla f_{i+1} - \nabla f_i)} - \frac{H_i(\nabla f_{i+1} - \nabla f_i)}{(\nabla f_{i+1} - \nabla f_i)H_i(\nabla f_{i+1} - \nabla f_i)} \quad (\text{ข.32})$$

ส่วนที่ช่วยสนับสนุนวิธี Variable Metric

มันเป็นไปได้ว่าจะเกิดค่าผิดพลาดกับเมตริกซ์  $H_i$  ซึ่งใกล้เคียงกับ Singular หรือ nonpositive-definite จึงควรให้ความสนใจเพราะสมมติว่าค้นหาทิศทาง ซึ่งอาจจะได้ตรงตามนั้น และเพราะว่า  $H_i$  มีแนวโน้มว่าจะเป็น Singular ในภายหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของข้อสงสัยก็ได้มีการอ้างอิงในหัวข้อ ๗.5 ควรเริ่มอัลกอริทึมที่จุดค่าสุดก่อนและจะพบในที่ต่าง ๆ ธรรมดาไม่คิดมากนัก ส่วนที่ช่วยสนับสนุนวิธี Variable Metric ในสมัยนี้จริง ๆ แล้วจะชักชวนในทางที่ผิดมากกว่า

การประมาณค่า  $A^{-1}$  อาจจะประมาณจากค่า  $A$  ก็ได้ ดังนั้นแทนค่าคำนวณทางด้านซ้ายมือของสมการ (๗.27) โดยตรง แก้สมการเส้นตรง

$$A(x_{\text{new}} - x_i) = -\nabla f(x_i) \quad (๗.33)$$

ในตอนแรกดูเหมือนจะเป็นความคิดที่แย่มากเพราะการแก้สมการ (๗.33) ยังมีค่าของ  $N^3$  ทำอย่างไรจะช่วยแก้ปัญหาคำนวณผิดพลาดได้ คำแนะนำคือ อย่าเก็บค่าของเมทริกซ์  $A$  ได้ 3 ส่วน การพัฒนารูปแบบสำหรับจำแนกเมทริกซ์เป็นการประกันได้ว่า เมทริกซ์เป็นประกันได้ว่า เมทริกซ์ยังเป็น Positive และ non-singular แม้ว่าจะมีค่าแกว่งในช่วงสุดท้าย อีกวิธีที่น่าออกมาใช้ คือ คำถามของความแน่นอนที่จำเป็นในการเก็บรวบรวมวิธีที่ครอบคลุมทั้งหมดได้อย่างไร ใคร่ประโยชน์ที่จะรวบรวมรวมค่าค่าสุดแต่ละค่า ซึ่งไม่ใช่ส่วนสำคัญกับฟังก์ชันขนาด  $N$  มันเป็นเรื่องความจริงว่า BFGS นั้นมีความทนทานต่อค่าค่าสุดที่ไม่ตรงไปตรงมามากกว่า DSP ที่เหลือดูเหมือนว่าไม่รู้จักวิธีหาค่าค่าสุดที่มีประสิทธิภาพพอที่จะใช้กับฟังก์ชันทั้งหมดหรือหาค่าเกรเดียนท์ซึ่งได้จากค่าค่าสุดแต่ละค่าเป็นทางหนึ่งซึ่งหวังว่าจะนำไปใช้ในอนาคต

## ๗.9 Status of Constraints

ใน Constrained Optimization มีการกำหนดสถานะของการบังคับการออกแบบจุดซึ่งมีความจำเป็นในการโต้เถียงของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พิจารณาในรูปที่ (๗.7)  $g_k(x)$  เป็น inequality constraint แบ่งช่วงการออกแบบเป็นช่วง feasible และช่วง infeasible ดังนั้นสถานะของเงื่อนไขสามารถกำหนดได้ดังนี้

### 1. Active Constraint

Inequality constraint  $g_k(x) \leq 0$  สามารถเป็นเงื่อนไข active ของการออกแบบที่จุด  $x^{(q)}$  ถ้าแทนค่าแล้วเป็น equality ที่จุดนั้น เช่น  $g_k(x^{(q)}) = 0$

### 2. Inactive Constraint

Inequality constraint  $g_k(x) \leq 0$  สามารถเป็นเงื่อนไข inactive ของการออกแบบที่จุด  $x^{(q)}$  ถ้าแทนค่าแล้วเป็นลบที่จุดนั้น เช่น  $g_k(x^{(q)}) < 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

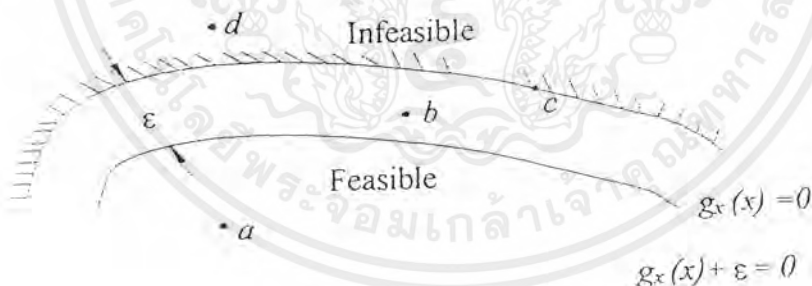
### 3. Violated Constraint

inequality constraint  $g_k(x^{(q)}) < 0$  สามารถเป็นเงื่อนไข violated ของการออกแบบที่จุด  $x^{(q)}$  ถ้าแทนค่าแล้วเป็นบวกที่จุดนั้น  $g_k(x^{(q)}) < 0$  equality constraint  $h_j(x) = 0$  เป็น Violated ของการออกแบบที่จุด  $x^{(q)}$  ถ้าแทนค่าแล้วมีค่าไม่เท่ากับศูนย์  $h_j(x^{(q)}) \neq 0$

### 4. $\epsilon$ -Active constraint

inequality constraint  $g_k(x) \leq 0$  สามารถเป็นเงื่อนไข  $\epsilon$ -active ที่จุด  $x^{(q)}$  ถ้า  $g_k(x^{(q)}) < 0$  แต่  $g_k(x^{(q)}) + \epsilon \geq 0$  เมื่อ  $\epsilon \geq 0$  เป็นค่าน้อยๆ

การอธิบายถึงสถานะของ constraint พิจารณา  $k^{\text{th}}$  inequality constraint  $g_k(x) < 0$  ในรูปที่ (ข.7) ด้าน feasible และ infeasible ของ constraint จะเหมือนกันขอบเขต  $g_k(x) + \epsilon = 0$  ซึ่งอยู่ภายในช่วง feasible พิจารณาการออกแบบจุด a. constraint  $g_k(x)$  มีค่าเป็นลบ และ  $g_k(x) + \epsilon < 0$  เสมอ ดังนั้น constraint จะเป็นแบบ inactive สำหรับการออกแบบที่จุด a เมื่อออกแบบจุด b,  $g_k(x)$  มีค่าน้อยกว่าศูนย์ซึ่งเป็น inactive เช่นเดียวกันแต่อย่างไร  $g_k(x) + \epsilon > 0$  ดังนั้น constraint เป็น active จากการออกแบบจุด b สำหรับการออกแบบจุด c,  $g_k(x) = 0$  เพราะฉะนั้น constraint เป็นแบบ inactive สำหรับการออกแบบจุด d,  $g_k(x)$  มีค่ามากกว่าศูนย์ ดังนั้น constraint เป็นแบบ violated



รูปที่ ข.7 Constraint status at design a, b, c and d

### ข.9 The Necessary Condition for Constrained Optimization

(เงื่อนไขที่จำเป็นของ Condition Optimization)

จากรูปที่ (ข.8) สมมติว่าที่จุด a เป็น constraint active ซึ่งทำให้ทิศทางโดยการศึกษาของ vector  $|d|$  จะทำให้ Objective function ลดลงและไม่ทำให้ active constraint มีค่าเป็น violate ผลคูณแบบ scalar ของ direction vector  $|d|$  ที่เป็น usable sector กับ Gradient ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

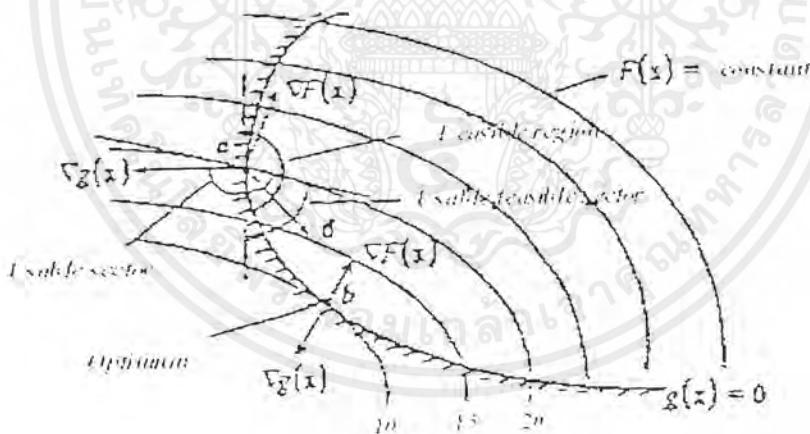
Objective function  $\nabla F(x)$  จะน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ เมื่อเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ usable เขียนให้อยู่ในรูปได้ดังนี้

$$\text{Usable direction} \quad d' \nabla F(x \leq 0) \quad (\text{จ.34})$$

แต่อย่างไรผลคูณของ vector  $|d|$  กับ gradient ของ constraint  $\nabla g_k$  จะต้องเป็นลบหรือเท่ากับศูนย์ ในทางปฏิบัติของปัญหา Optimization ซึ่งมี active constraint มากในการออกแบบต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่เป็นไปได้ (Feasible direction)

$$\text{Feasible direction} \quad d' \nabla g_k(x \leq 0) \text{ เมื่อ ทุกค่าของ } K \text{ ทำให้ } g_{(k)}(x) = 0 \quad (\text{จ.35})$$

จุดที่น่าสนใจคือ การเคลื่อนที่ ควรเป็นไปในระยะสั้นๆ ของทิศทางซึ่งสัมพันธ์กับ hyperplane ซึ่งขอบเขตของช่วงที่เป็นไปได้ (Feasible) ซึ่งผลลัพธ์ให้ constraint violate แต่ก็ช่วยลด Objective Function อย่างรวดเร็วทีเดียว



รูป จ.8 Usable and feasible search direction

ให้จุด b เป็นจุดที่ Optimization จากการออกแบบเพื่อใช้ในการอธิบายรูปที่ (จ.8) แสดงถึง gradient ของ object และ gradient ของ constraint ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้าม vector  $|S|$  จะมีความปลอดภัยในการ usability และ feasibility โดยเป็นเส้นสัมผัสกับขอบเขตของค่า constraint และเส้นคงที่ของ Objective function ที่มีมุม 90 องศา กับ gradient จากที่เขียนมาดังกล่าว สามารถเขียนในรูปคณิตศาสตร์ได้

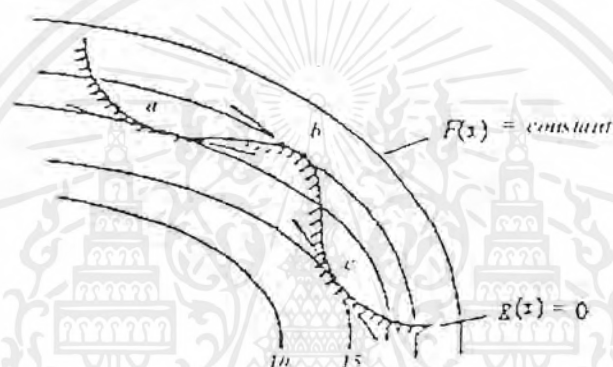
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla F(x) + \sum_{k=1}^l \lambda_{1+j} \nabla g_k(x) + \sum_{j=1}^m \lambda_{1+j} \nabla h_j(x) = 0 \quad (\text{ข.36})$$

$\lambda_k \geq 0$ ;  $\lambda_{1+j}$  unrestricted in sign

เมื่อ  $\lambda$  เป็น Lagrange multiplier

จากสมการ (ข.36) ได้กำหนดเงื่อนไขในการออกแบบ Optimization แต่ก็ยังไม่เพียงพอ ซึ่งสามารถเห็นได้จากรูปที่ (ข.9) จุด  $a, b$  และ  $c$  ทุกจุดได้จากสมการที่ (ข.36) แต่มีจุด  $c$  ที่เป็น true global optimum



รูปที่ ข.9 Relative optimum of constrained function

เงื่อนไขของ Kuhn-Tucker

ถ้าให้ vector  $X^*$  ถูกกำหนดมาในการออกแบบ optimization แต่ต้องมีเงื่อนไข 3 ข้อดังนี้

$$1) x^* \text{ เป็นสิ่งที่เป็นไปได้ (feasible)} \quad (\text{ข.37})$$

ถ้าต้องการที่จะออกแบบให้ optimization ที่พอใจทุก ๆ constraint

$$2) \lambda_k g_k(x^*) = 0; k = 1, \dots, l; \lambda_k \geq 0 \quad (\text{ข.38})$$

ถ้า constraint  $g_k(x)$  ที่ได้มา ยังไม่ถูกต้องทั้งหมดเช่น  $g_k(x) < 0$  โดยใช้ตัวคูณ

Lagrange ที่มากกว่าศูนย์

$$3) \nabla F(x^*) = 0 + \sum_{k=1}^l \lambda_k \nabla g_k(x^*) + \sum_{j=1}^m \lambda_{1+j} \nabla h_j(x^*) = 0 \quad (\text{ข.39})$$

$\lambda_k \geq 0$ ;  $\lambda_{1+j}$  unrestricted in sign เป็นเงื่อนไขเหมือนกับใช้ในสมการที่ (ข.36)

เงื่อนไขของ Kuhn - Tucker สามารถให้เห็นโดยเทียบกับรูปที่ (ข.10) ซึ่งแสดงถึงปัญหา minimization 2 ตัวแปรด้วย inequality constraints ณ จุด optimum  $x^*$  ซึ่งเป็นไปได้ constraint  $g(x^*)$  ไม่เป็นจุดวิกฤตจากสมการ (ข.38) จะได้  $\lambda_3 = 0$  เป็นเงื่อนไขที่สำคัญของการให้ gradient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ constraint ที่วิกฤต  $g_1(x^*)$  และ  $g_2(x^*)$  ซึ่งคูณโดย Lagrange multiplier แล้วผลรวมของ vector นั้นจะเท่ากับค่าลบของ objective function จากรูปที่ (ข.10) จะได้

$$\nabla F(x^*) + \lambda_1 \nabla g_1(x^*) + \lambda_2 \nabla g_2(x^*) = 0 \quad (\text{ข.40})$$

$$\lambda_1 \geq 0; \lambda_2 \geq 0$$

เริ่มต้น  $g_1(x^*) = 0$  และ  $g_2(x^*) = 0$  เงื่อนไขที่สองถูกต้องสำหรับ ดังนั้นก็จะได้ว่าเงื่อนไข ของ Kuhn-Tucker จะถูกต้อง

### ข.10 Global และ Local Minimum

ในทางปฏิบัติปัญหา optimization ซึ่งสุดท้ายก็ต้องหาค่า minimum ของ Objective function ซึ่งอยู่ในช่วงที่เป็นไปได้ (Feasible region) โดยการหา Optimum ในฟังก์ชันทั่วไปหาจำนวนที่แสดงของจุด Optimum ถ้าจุดดังกล่าวของ Objective function เป็นค่าที่เพิ่มขึ้นในเส้นทางของทุกทิศทาง หรือ เป็นอยู่ในทางทิศทาง แต่เพิ่มขึ้นในทุกส่วนซึ่งเรียกว่า local minimum แต่จะมีอยู่จุดหนึ่งที่ฟังก์ชันมีค่าต่ำสุดเรียกว่า global minimum ซึ่งจะอธิบายให้เข้าใจยิ่งขึ้น

#### 1) Global Minimum

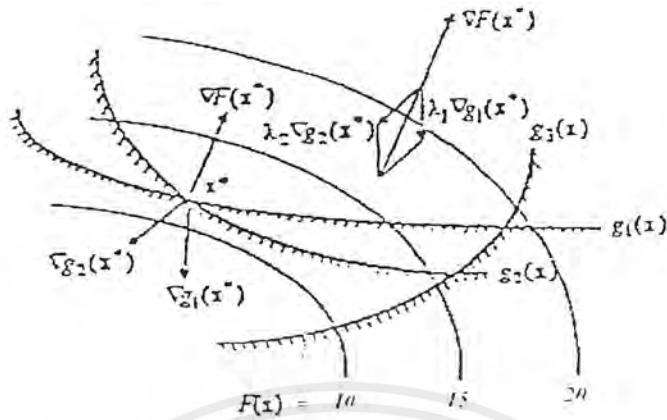
$F(x)$  เป็นฟังก์ชันที่มี  $n$  ตัวแปร มี global minimum คือ  $x^*$  if  $F(x^*) \leq F(x)$  ทุกค่าของ  $x$  ในช่วงที่เป็นไปได้ (Feasible region) ถ้า strict inequality ทุก  $x$  นั้น ๆ แล้ว  $x^*$  จะเป็น  $x^*$  ที่เรียกว่า strict global minimum

#### 2) Local minimum

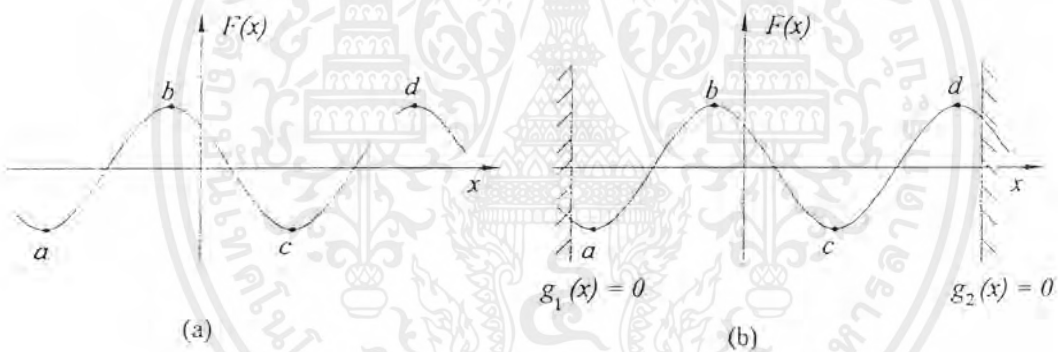
$F(x)$  เป็นฟังก์ชันที่มี  $n$  ตัวแปร มี local minimum คือ  $x^*$  ถ้า  $F(x^*) \leq F(x)$  ทุกค่าของ  $x$  ที่อยู่ใน a small Neighborhood  $N$  of  $x^*$  ในช่วงที่เป็นไปได้ (Feasible region) ถ้า strict inequality คือว่า  $x^*$  นั้นเรียกว่า strict local minimum. Neighborhood  $N$  ของจุด  $x^*$  ที่กำหนดจาก set ของจุด  $N = \{x | x \in S \text{ เมื่อ } |x - x^*| < \delta\}$  และมีค่าน้อย  $\delta > 0$  จะได้ว่าในช่วงเล็ก ๆ ที่เป็นไปได้ small feasible region ที่อยู่ของจุด  $x^*$

รูปที่ (ข.11 (a))  $a$  และ  $c$  เป็น local minimum เริ่มเป็นฟังก์ชันที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเกิดใน neighborhood จุด  $b$  และ  $d$  เป็นจุด local maximum ของ function ซึ่งใน case นี้จะไม่มี global minimum or maximum ของ function เพราะ domain และ function  $F(x)$  ไม่มีขอบเขต  $x$  และ  $F(x)$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง  $-\infty$  และ  $+\infty$  ค่า domain มีการ strict constrain (restricted) ที่แสดงโดยรูปที่ (ข.11 (b)) จะได้จุด  $c$  เป็น global minimum และจุด  $d$  เป็น global maximum ของ function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.10 Geometric interpretation of the Kuhn – Tucker condition



รูปที่ ข.11 Graphical representation of optimum point

**ข.11 Convergence Criteria ( การเข้าสู่จุดวิกฤต )**

เส้นทางวิกฤตของ Optimization สามารถหาได้เมื่อหยุดกระบวนการค้นหา optimum การสิ้นสุดของจุดวิกฤต เราสามารถเลือกจาก ปฏิบัติการที่สำคัญของประสิทธิภาพและความแน่นอน ของกระบวนการ ptimization ซึ่งการเข้าสู่เส้นวิกฤตหาได้จาก

1) Maximum number of iteration ( จำนวนสูงสุดของกระบวนการซ้ำ )

ถ้าจำนวนของกระบวนการซ้ำ q มีค่ามาก จำนวน  $q_{max}$  นั้นแล้วกระบวนการค้นหา จะจบ ลง ถ้ากระบวนการซ้ำเพราะ numerical หรือ algorithmic ยากหรือง่ายอันเนื่องมาจากโปรแกรม ผิดพลาดทำให้โปรแกรมนั้นไม่ต่อเนื่องถึง Iterate indefinitely

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การเปลี่ยนแปลง Objective function ซึ่งมี 2 วิธี ถ้าหากกระบวนการนั้นซ้ำมากจนไม่มีทางจะหาจุดเข้าได้

1. เป็นการเปรียบเทียบ ค่าสัมบูรณ์ของ  $F(x)$  มีผลต่อกระบวนการทำซ้ำ การลู่เข้านั้นได้แสดงดังนี้

$$|F(x^{[q+1]}) - F(x^{(q)})| \leq \varepsilon_A \quad (\text{ข.41})$$

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

2. การตรวจความสัมพัทธ์ ของการเปลี่ยนในระหว่างการเป็นไปได้ของกระบวนการซ้ำในการลู่เข้าที่เป็นไปได้คือ

$$\frac{2|F(x^{(q+1)}) - F(x^{(q)})|}{|F(x^{(q+1)})| + |F(x^{(q)})| + 10^{-10}} \leq \varepsilon_R \quad (\text{ข.42})$$

เมื่อ  $\varepsilon_R$  เป็นค่า specified fractional change

3. เงื่อนไขของ Kuhn – Tucker

จาก constrained minimization เงื่อนไขถูกกำหนดโดยอยู่ในส่วน ข.9 ใน case ของ unconstrained minimization ในการต้องการ gradient ของ  $F(x)$  ซึ่งตรวจได้จากส่วนของ  $\nabla F(x^{(q)})$  ที่มีขนาดเล็กเพียงพอกับศูนย์คือ  $\varepsilon_k = 1 \times 10^{-4}$

## ข.12 Gradient Evaluations

Gradient Evaluations เป็นหัวข้อสำคัญในขบวนการปฏิบัติของ numerical optimization ของการประมาณค่าของ derivative จาก a simple function ที่หาได้โดยการวิเคราะห์ (Calculate analytically) และสามารถหาได้โดยใช้ gradient หรือ Hessian Evaluation โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical method) อย่างไรก็ตามบางฟังก์ชันนั้นมีความยากในการวิเคราะห์หรือความลำบากมากในการคำนวณ เพื่อความสะดวกในการหาค่าตอบจะใช้วิธี finite difference ในการหาค่าตอบโดยประมาณของ derivative ปัญหาส่วนใหญ่ในการปฏิบัติในทางวิศวกรรมส่วนมากจะเป็น implicit model for function evaluation จากตัวอย่างของฟังก์ชัน อาจจะได้มาจากการหาค่าตอบทางการวิเคราะห์เชิงตัวเลขซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ของแบบจำลองระบบ electromagnetic โดยวิธี finite element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.13 Finite Difference Approximations

คำตอบจากการวิเคราะห์ที่ใช้ใน optimization เสมอๆ นั้นมาจากอนุกรม Taylor ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวมีความสำคัญเพราะเป็นการแสดงลักษณะ derivative ที่จุดจุดหนึ่ง ของฟังก์ชันจากการประมาณค่าของฟังก์ชันสามารถคำนวณทุกจุดที่อยู่กึ่งกลางของจุดขอบเขตได้ ในรูปที่ (ข.12) เป็นฟังก์ชัน 1 ตัวแปรอย่างง่ายๆ ซึ่งใช้อนุกรมของ Taylor ที่รอบจุด  $x_0$  เขียนอธิบายได้ดังนี้

$$F(x_0 + h) = F(x_0) + hF'(x_0) + (1/2)h^2F''(x_0) + \dots + (1/(r-1)!)h^{(r-1)}F^{(r-1)}(x_0) + oh^{(r)} \quad (\text{ข.43})$$

สมมติให้  $|F^{(r)}(x_0)|$  อยู่ในช่วง  $[x_0, x_0 + h]$

ในการคำนวณเพื่อนำมาใช้ เราสนใจใน 3 เทอมแรกของสมการเท่านั้น

$$F(x_0 + h) = F(x_0) + hF'(x_0) + (1/2)h^2F''(x_0) + O(h^3) \quad (\text{ข.44})$$

การหาค่าตอบของ  $F'(x_0)$  และไม่คิดถึงเทอมอันดับสูงกว่า เราได้

$$F'(x_0) = \frac{F(x_0 + h) - F(x_0)}{h} + o(h) \quad (\text{ข.45})$$

ซึ่งเทอมอันดับคือ  $(1/2)hF''(\xi)$ ;  $x_0 \leq \xi \leq x_0 + h$  เป็นการประมาณค่าของ derivatives ซึ่งเป็นแบบ forward และค่า  $(1/2)hF''(\xi)$  เป็นเทอมที่จะละได้ของสมการ Taylor

ถ้าสมมติให้สมการเป็น backward ที่จุด  $x_0 - h$  นั้นเราจะได้

$$F(x_0 - h) = F(x_0) - hF'(x_0) + (1/2)h^2F''(x_0) - O(h^3) \quad (\text{ข.46})$$

การกระจายสมการนี้เป็นการประมาณค่าแบบ backwark difference

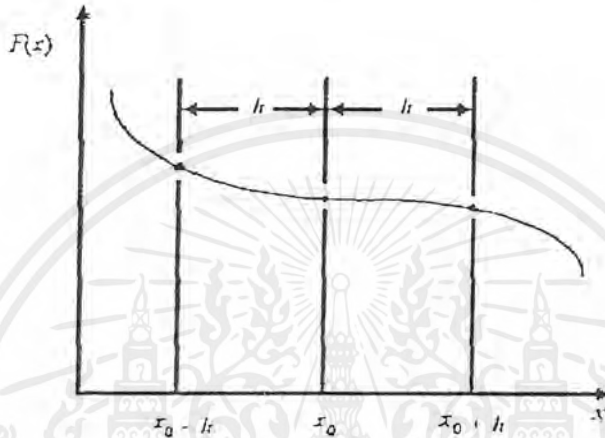
$$F'(x_0) = \frac{F(x_0) - F(x_0 - h)}{h} + o(h) \quad (\text{ข.47})$$

นำสมการ (ข.46) ลบกับสมการ (ข.44) จัดสมการใหม่เพื่อหา  $F'(x_0)$  เราจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F'(x_0) = \frac{F(x_0 + h) - F(x_0 - h)}{2h} + O(h^2) \quad (\text{ข.48})$$

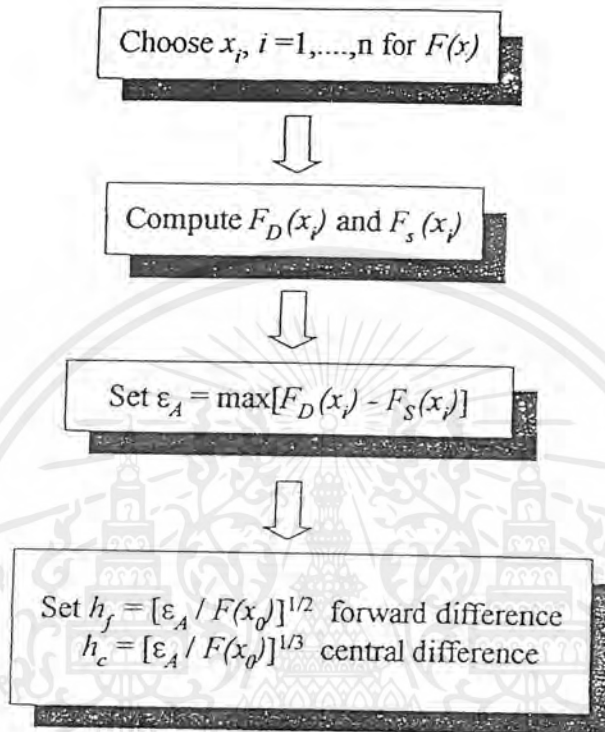
ที่ซึ่งเทอมหลังเป็น  $(1/6 h^2 F'''(\xi))$  นี้จึงเรียกว่า การประมาณแบบ central difference



รูปที่ ข.12 Finite difference intervals

ในการคำนวณด้วย finite difference มีความผิดพลาดอื่น ๆ ที่อยู่ในการคำนวณหาค่าของฟังก์ชันของตัวเลข ความผิดนี้ปกติเรียกว่า เงื่อนไขหรือการยกเลิกข้อผิดพลาดซึ่งเป็นคุณสมบัติโดยตรงกับ  $1/h$  โดยที่ค่าผิดพลาดทั้งหมดนั้นเราจะประมาณให้อยู่ในรูปของ 2 เทอมเท่านั้น คือค่าจริง (truncation) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $h$  และการยกเลิกค่าผิดพลาด (cancellation) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $1/h$  การคำนวณหาค่า  $h$  โดยใช้โพธิ์เซอร์ตามรูป (ข.13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.13 อัลกอริทึมของการคำนวณค่าของ  $h$

การแนะนำความถูกต้องของการประมาณ finite difference โดยการทดสอบฟังก์ชันสองสมการ โดยใช้การคำนวณ วิเคราะห์และการประมาณค่าแบบ finite difference (GRAD-FD code) ฟังก์ชันแรก เรียกว่า Rosenbrock's function และฟังก์ชันที่สองได้โดยการใช้ quadratic ทุกฟังก์ชันที่ใช้ทดสอบจะมีการกำหนดค่าของ  $x$  เป็น 3 ค่า ตารางที่ (ข.1) และ (ข.2) แสดงผลลัพธ์ของ first derivative ของทั้งสองฟังก์ชัน ค่าผิดพลาดโดยการใช้ forward derivative และ central derivative เหมาะสำหรับการนำมาใช้งานที่เดียว อย่างไรก็ตามค่าความผิดพลาดอาจแตกต่างกัน เพราะว่าฟังก์ชันต่างกัน เพราะว่าฟังก์ชันต่างกันและอาจมีค่าแตกต่างกันมากเพราะเป็นฟังก์ชันแบบ non-linear

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

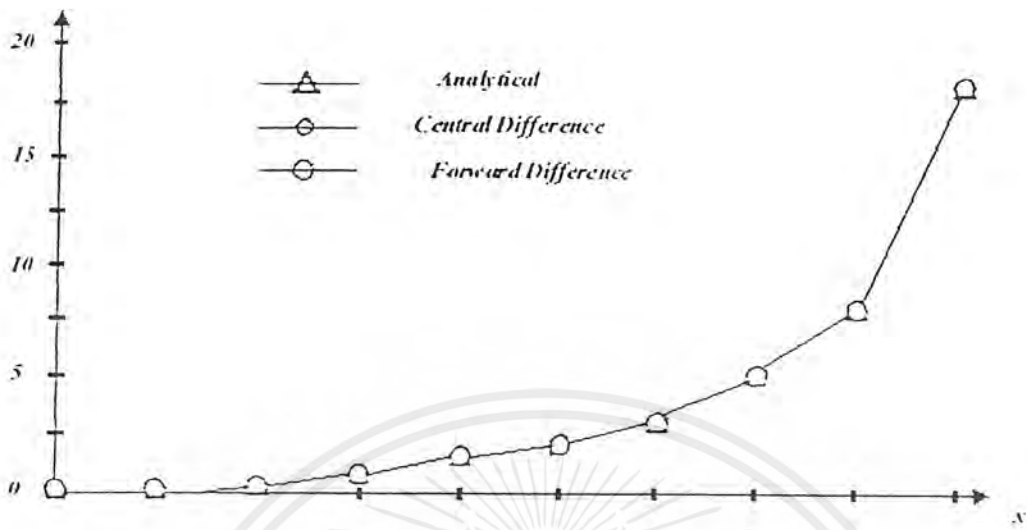
Test		I	II	III
Design	$x_1$	0.0005	0.5000	5.0000
Variables	$x_2$	0.0005	0.5000	5.0000
	$F(x)$	0.9990	6.5000	40016.00
$\partial F(x)/\partial x_1$	Analytical	-1.9991	-51.0000	40008.00
	Central	-1.9991	-50.9988	40008.01
	Forward	-1.9990	-50.9938	40009.71
$\partial F(x)/\partial x_2$	Analytical	0.0999	50.0000	-4000.00
	Central	0.0999	50.0000	-4000.00
	Forward	0.1121	50.0122	-3999.98

ตารางที่ ข.1 First derivative of  $F(x) = 100(x_2 - x_1^2) + (1 - x_1)^2$

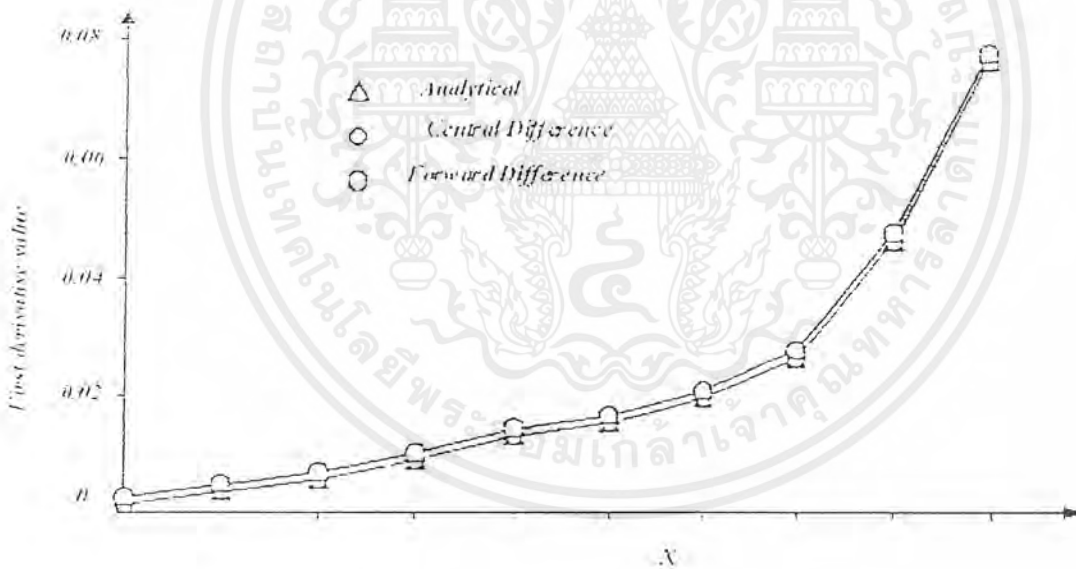
Test		I	II	III
Design	$x_1$	0.0005	-0.5000	5.0000
Variables	$x_2$	0.0005	0.5000	5.0000
	$x_3$	0.0005	-5.0000	5.0000
	$F(x)$	1.3000E-06	7000.00	1.3000E06
$\partial F(x)/\partial x_1$	Analytical	25000E-03	-50.0000	2500.0000
	Central	25000E-03	-50.9988	2500.0000
	Forward	3.7529E-03	-49.9987	2500.0013
$\partial F(x)/\partial x_2$	Analytical	2.6000E-03	140.0000	2600.0000
	Central	2.6000E-03	140.0000	2600.0000
	Forward	3.8529E-03	140.0013	2600.0012
$\partial F(x)/\partial x_3$	Analytical	1.0000E-04	-90.0000	100.0000
	Central	1.0000E-04	-90.0000	100.0000
	Forward	7.2647E-04	-89.9994	100.0006

ตารางที่ ข.2 First derivative of  $2x_1^2 + 2x_2^2 + x_3^2 + 2x_1x_2 - x_1x_3 - 0.8x_2x_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.14 ค่าความถูกต้องของการประมาณค่าแบบ finite difference ของ  $\partial F(x)/\partial x_1$  ในตารางที่ ข.2 เมื่อ  $\partial F(x)/\partial x_1$  มีค่ามาก



รูปที่ ข.15 ค่าความถูกต้องของการประมาณค่าแบบ finite difference ของ  $\partial F(x)/\partial x_1$  ในตารางที่ ข.2 เมื่อ  $\partial F(x)/\partial x_1$  มีค่าน้อย

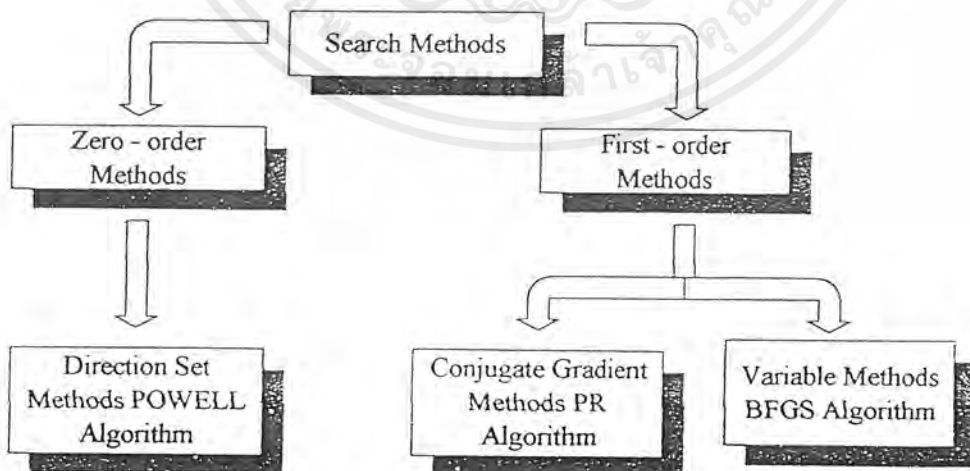
### ข.13 การ Optimization โดยใช้วิธี Unconstrained Numerical

การ Optimization โดยใช้วิธี Unconstrained Numerical เป็นการใช้พื้นฐานของสูตรการวนซ้ำอัลกอริทึมของการ Optimization ส่วนมากจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือการหาทิศทาง (search direction) และการกำหนดขนาดที่ขยับ (step size - determination) สำหรับปัญหาของการเอกซารนี้เป็นเอกซารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกซารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optimization ด้วยตัวแปรหลายตัวก็คือปัญหาในการหาทิศทางที่ใช้ในการแก้ปัญหาเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นจึงกำหนดขนาดที่จะกระโดด โดยการหาฟังก์ชันที่น้อยที่สุดตามทิศทางที่กำหนดในพื้นที่ที่ออกมาซึ่งเรียกว่าการหาในหนึ่งมิติ (one - dimensional search) ในการเลือกทฤษฎีที่ใช้ในการ optimization อยู่บนพื้นฐานของคุณสมบัติของฟังก์ชันสนใจ (objective function) และฟังก์ชันเงื่อนไข (constraint function) ยิ่งไปกว่านั้นทฤษฎีเปลี่ยนไปขึ้นกับวิธีการใช้ในการแก้ปัญหา เช่น อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first - derivative) ซึ่งการใช้อนุพันธ์จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการหาโดยฟังก์ชันทั่วไป ถ้าหากการใช้อนุพันธ์ไม่สามารถนำมาใช้ได้ ทฤษฎีที่ไม่ใช้อนุพันธ์(non-derivative) จะต้องถูกนำมาใช้ แต่ควรระวังที่จะหลีกเลี่ยงการที่ยุ่งยากจะเพิ่มขึ้นและ ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ลดลงจากการที่ไม่ได้ใช้วิธีการอนุพันธ์

### ข.13.1 การกำหนดวิธีหาทิศทาง และ ขนาดของการขยับ (Step)

การหาทิศทางสามารถจะหาได้โดยใช้อนุพันธ์หรือไม่ใช้อนุพันธ์ก็ได้แสดงในรูป (ข.16) ซึ่งการใช้อนุพันธ์สามารถแบ่งได้เป็นอีก 2 วิธีที่วันนี้จะต้องการวิธีหาค่าน้อยที่สุดในหนึ่งมิติ (one - dimensional minimization subproblem) วิธีแรกนี้เรียกว่า conjugate gradient methods ซึ่งมีแบบอย่างมาจาก อัลกอริทึม " Fletcher - Reeves " และอัลกอริทึม " Polak - ribiere " วิธีที่สองเรียกว่า variable metric หรือ quasi Newton method ซึ่งมีแบบอย่างมาจากอัลกอริทึม " Davidon - Fletcher - Powell ( DFP ) และ Broyden - Fletcher - Goldfarb - shanno - ( BFGS ) "



รูปที่ ข.16 Classification of search methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.13.1.1 ทฤษฎีการจัดทิศทาง ( Direction Set Methods )

ทฤษฎีนี้เริ่มต้นด้วยการกำหนดเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector)  $c_1, c_2, \dots, c_n$  ซึ่งเป็นเวกเตอร์ทิศทาง การใช้ทฤษฎี Golden Section Search จะเคลื่อนที่ไปตามเวกเตอร์ทิศทางแรกที่กำหนดไปสู่ค่าน้อยที่สุดของทิศทางนั้น หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่สอง เพื่อไปสู่ค่าน้อยที่สุดของทิศทางที่สองนั้น และจะเป็นลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ ขบวนการที่จะวนไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าของฟังก์ชันไม่สามารถลดลงได้อีก ซึ่งเทคนิคนี้จะเห็นว่าจำเป็นต้องกำหนดทิศทางเริ่มต้นให้ดี Powell ค้นพบทฤษฎีในการจัดทิศทาง ซึ่งเป็นพื้นฐานของ conjugate direction โดยที่ทิศทาง  $d$  และ  $d'$  เป็น conjugate กัน ถ้า

$$(d')^T S d = 0 \quad (ข.49)$$

ซึ่ง  $S$  เป็นเมตริกซ์เอกลักษณะที่เริ่มต้นและ  $d$  โดย  $i=1, \dots, n$  ที่เป็นทิศทางร่วม (co-ordinate direction)

### ข.13.1.2 ทฤษฎี Conjugate Gradient Method

ทฤษฎี Conjugate Gradient Method พัฒนาจากทฤษฎี steepest descent ซึ่ง 2 ส่วนที่สำคัญที่สุดของ Conjugate Gradient คือ ทฤษฎี Fletcher – Reeves และทฤษฎี Polak Ribiere ทฤษฎีการหาทิศทางนั้นถึงที่จำเป็นจะต้องถูกจัดเก็บไว้จากการ minimization ในหนึ่งมิติและต้องการฟังก์ชันที่ใช้ในการหาจำนวนมาก การใช้ Gradient จะช่วยให้ข้อมูลใหม่ๆ ที่มีประโยชน์สำหรับการกำหนดการหาทิศทางและขนาด การขยับในกระบวนการทำซ้ำ

$$d^{(q)} = -\nabla F(x^{(q)}) + \beta_q d^{(q-1)} \quad (ข.50)$$

$$\beta_q = \frac{|\nabla F(x^{(q)})|^2}{|\nabla F(x^{(q-1)})|^2} \quad (ข.51)$$

### ข.13.1.3 ทฤษฎี Variable Metric Methods

ทฤษฎี variable metric methods บางทีอาจจะเรียกว่า quasi-newton method โดยไม่แตกต่างไปจาก conjugate gradient แทนที่ข้อมูลจะอยู่ในรูป single scalar ข้อมูลจะถูกเก็บในรูป array  $n$  มิติ การหาทิศทางที่ลำดับ  $q$  ของการวนซ้ำ จะได้เป็น

$$C^{(q)} = \nabla F(x^{(q)}) \quad (ข.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

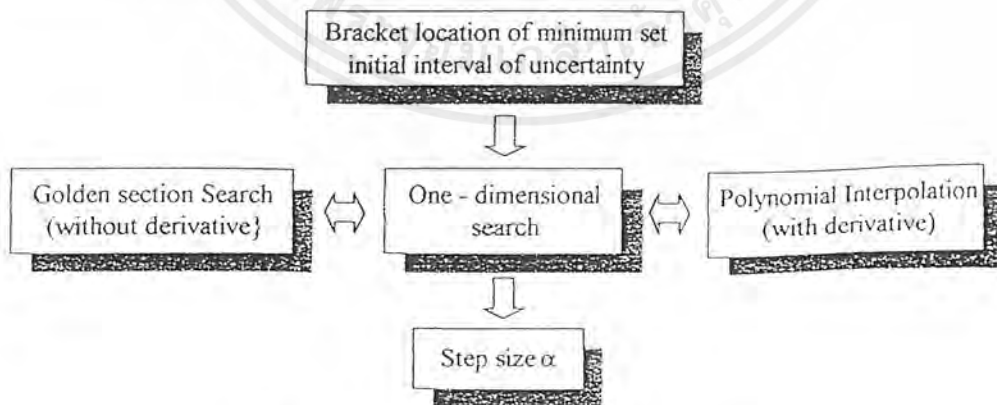
$$H^{(q)}d^{(q)} = -C^{(q0)} \tag{จ.53}$$

ซึ่ง H คือการประมาณสำหรับ Hessian เมตริกซ์ที่เราสนใจระหว่างขบวนการ optimization ซึ่งสามารถสร้างได้จากการใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่งเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีเหล่านี้จะมีลักษณะการลู่เข้าเหมือนกับ second order ที่จัดเริ่มต้นเมตริกซ์ H จะถูกกำหนดเป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ H=I หลังจากนั้นในการวนซ้ำที่ q ค่า H ใหม่จะได้เป็น

$$H^{(q+1)} = H^{(q)} + D^{(q)} + E^{(q)} \tag{จ.54}$$

ซึ่ง D และ E เป็นเมตริกซ์ symmetric correction มี 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการเปลี่ยนเมตริกซ์ คือ Davidin – fletcher – Powell (DFP code) และ Broyden – Fletcher – Goldfarb – shanno ซึ่งทฤษฎีทั้งสองแตกต่างกันในรายละเอียดเท่านั้น คือค่า round-off error และ convergence tolerances

ขบวนการเบื้องต้นของการหาขนาดการกระโดด (step size) โดยอาศัยอัลกอริทึม (algorithms) ในรูปที่ (จ.17) ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ตอน โดยในขั้นแรกจะแบ่งขอบเขตของเส้นทางเริ่มต้นในการหาจุดต่ำสุด ส่วนในขั้นตอนที่สอง ในเส้นทางที่กำหนดจะถูกปรับ โดยการตัดพื้นที่ในส่วนที่ไม่ได้ให้ค่าต่ำสุดออก ในที่สุดก็จะได้ขนาดการกระโดดที่เหมาะสม สิ่งที่น่าสังเกตคือ วิธี Golden Section เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับ non derivative แต่วิธีนี้ต้องการฟังก์ชันเป็นจำนวนมากในการคำนวณ ซึ่งวิธีนี้จะไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติของการ design แต่ทว่าวิธี polynomial interpolation จะมีประสิทธิภาพดีกว่า



รูปที่ จ.17 Step size determination algorithm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

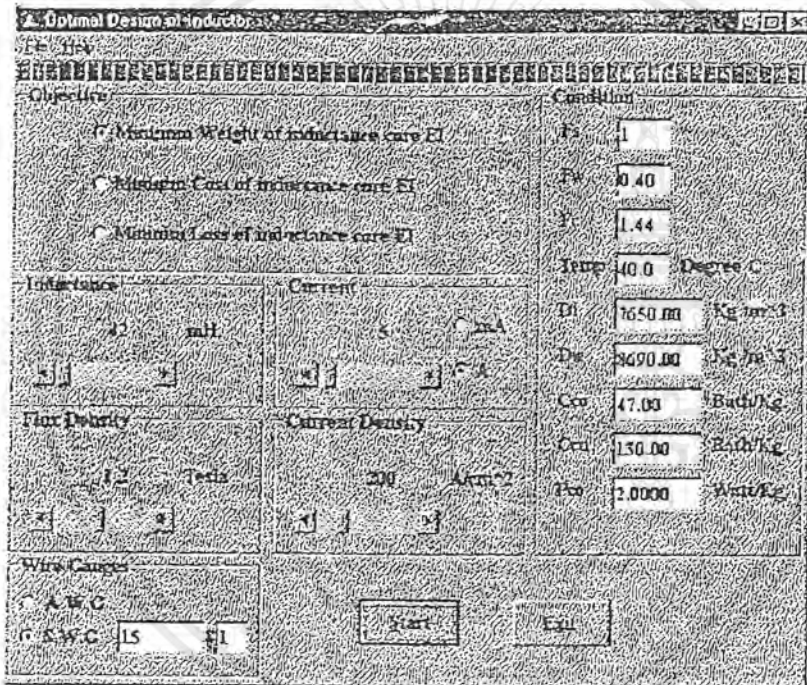
ภาคผนวก ก.

ข้อมูลออกแบบและผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ

ก.1 ข้อมูลออกแบบและรูปร่างของตัวเหนี่ยวนำ

ก.1.1 ข้อมูลตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยโปรแกรม Numerical Optimization ก่อนการแก้ไข

ข้อมูลตามโปรแกรมตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A ออกแบบโดยวิธี Optimization : Minimum Weight



รูปที่ ก.1 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)

Optimum of Inductor									
Minimum Weight									
Dimension			Detail			Detail			
H	4.332	cm	H	214.291	Turn	Ldt	0.04200	HL	
D	2.666	cm	Lg	0.793	mm	lpt	5.000	SL	
a	2.166	cm	Ll	43.188	mm	Jl	200.000	ALcm <sup>2</sup>	
b	6.498	cm	Rl	0.303	mm	Act	2.627	mm <sup>2</sup>	
Weight			Loss						
Wt	3.282	Kg	Pl	19.833	Watt	Fst	1.440		
Wd	1.296	Kg	Pst	4.593	Watt	Fwt	0.400		
Ww	0.986	Kg	Pwt	7.569	Watt	Bmax	1.200	Tests	
			Pgw	7.671	Watt	SWG	15	xl	1
Cost									
Ct	236.098	Bath							
Crs	107.927	Bath							
Ccu	128.171	Bath							

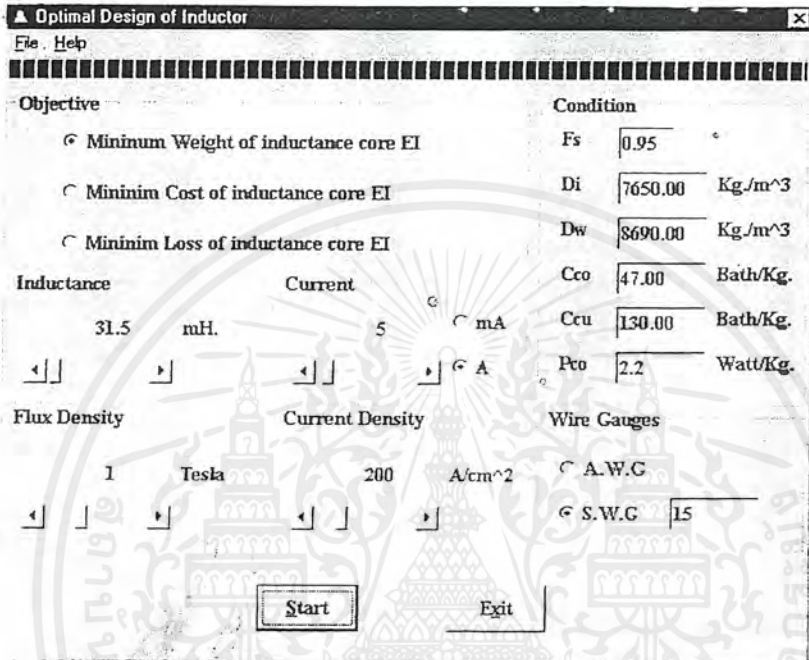
รูปที่ ค.2 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)

Optimum of Inductor									
Minimum Weight									
Dimension			Detail			Detail			
H	5.030	cm	H	294.707	Turn	Ldt	0.04200	HL	
D	1.653	cm	Lg	1.091	mm	lpt	5.000	SL	
a	1.540	cm	Ll	57.148	mm	Jl	200.000	ALcm <sup>2</sup>	
b	7.620	cm	Rl	0.401	mm	Act	2.627	mm <sup>2</sup>	
Weight			Loss						
Wt	3.263	Kg	Pl	26.304	Watt	Fst	1.440		
Wd	1.958	Kg	Pst	3.916	Watt	Fwt	0.400		
Ww	1.305	Kg	Pwt	10.016	Watt	Bmax	1.200	Tests	
			Pgw	12.372	Watt	SWG	15	xl	1
Cost									
Ct	261.630	Bath							
Crs	121.032	Bath							
Ccu	169.508	Bath							

รูปที่ ค.3 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลตามโปรแกรมตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5 A ออกแบบ โดยวิธี Optimization : Minimum Weight



รูปที่ ค.4 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**▲ Optimum of Inductor** [Print] [X]

Mode

Minimum Weight

Dimension	Detail	Detail
2E 3.905 cm.	N 201.582 Trun	L 0.03150 H.
D 2.978 cm.	Lg 0.896 mm.	I 5.000 A.
a 1.953 cm.	Lt 40.118 m.	J 200.000 A/cm <sup>2</sup>
b 5.858 cm.	R 0.263 ohm	Aw 2.627 mm <sup>2</sup>
Weight	Loss	Fs 0.950
Wt 2.896 Kg.	Pt 16.360 Watt	Fc 1.446
Wi 1.981 Kg.	Pco 4.357 Watt	Fw 0.463
Ww 0.916 Kg.	Pcu 6.582 Watt	Bmax 1.000 Tesla
Cost	Pgp 5.421 Watt	SWG. 15
Ct 212.147 Bath		
Cco 93.089 Bath		
Ccu 119.058 Bath		

Change core Exit Picture

รูปที่ ค.5 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A (Optimization : Minimum weight)

**▲ Change core of Inductor** [Print] [X]

Mode

Minimum Weight

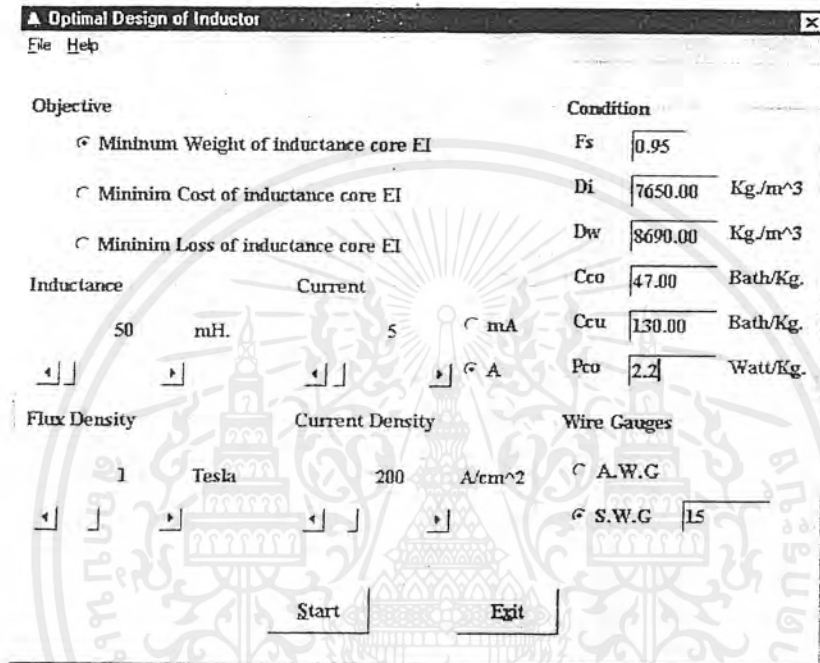
Dimension	Detail	Detail
2E 5.810 cm.	N 191.872 Trun	L 0.03150 H.
D 3.207 cm.	Lg 0.852 mm.	I 5.000 A.
a 1.905 cm.	Lt 38.698 m.	J 200.000 A/cm <sup>2</sup>
b 5.715 cm.	R 0.254 ohm	Aw 2.627 mm <sup>2</sup>
Weight	Loss	Fs 0.950
Wt 2.914 Kg.	Pt 15.850 Watt	Fc 1.437
Wi 2.030 Kg.	Pco 4.466 Watt	Fw 0.463
Ww 0.883 Kg.	Pcu 6.349 Watt	Bmax 1.000 Tesla
Cost	Pgp 5.034 Watt	SWG. 15
Ct 210.262 Bath		
Cco 95.416 Bath		
Ccu 114.846 Bath		

Main Exit Picture

รูปที่ ค.6 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลตามโปรแกรมตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5 A ออกแบบ โดยวิธี Optimization : Minimum Weight



รูปที่ ค.7 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optimum of Inductor									
Print									
Mode									
Minimum Weight									
Dimension			Detail			Detail			
2E	4.893	cm.	N	319.736	Trun	L	0.05000	H.	
D	2.379	cm.	Lg	1.421	mm.	I	5.000	A.	
a	2.446	cm.	Lt	71.075	m.	J	200.000	A/cm <sup>2</sup>	
b	7.339	cm.	R	0.466	ohm	Aw	2.627	mm <sup>2</sup>	
Weight			Loss			Fs			
Wt	4.106	Kg.	Pt	27.898	Watt	Fc	1.528		
Wi	2.483	Kg.	Pco	5.463	Watt	Fw	0.468		
Ww	1.623	Kg.	Pcu	11.661	Watt	Bmax	1.000	Tesla	
Cost			Pgp			SWG.			
Ct	327.648	Bath				15			
Cco	116.718	Bath							
Ccu	210.930	Bath							
			Change core			Exit		Picture	

รูปที่ ค.8 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5A (Optimization : Minimum weight)

Change core of Inductor									
Print									
Mode									
Minimum Weight									
Dimension			Detail			Detail			
2E	5.080	cm.	N	344.660	Trun	L	0.05000	H.	
D	2.126	cm.	Lg	1.531	mm.	I	5.000	A.	
a	2.540	cm.	Lt	76.159	m.	J	200.000	A/cm <sup>2</sup>	
b	7.620	cm.	R	0.500	ohm	Aw	2.627	mm <sup>2</sup>	
Weight			Loss			Fs			
Wt	4.130	Kg.	Pt	29.815	Watt	Fc	1.533		
Wi	2.392	Kg.	Pco	5.262	Watt	Fw	0.468		
Ww	1.739	Kg.	Pcu	12.495	Watt	Bmax	1.000	Tesla	
Cost			Pgp			SWG.			
Ct	338.438	Bath				15			
Cco	112.419	Bath							
Ccu	226.019	Bath							
			Main			Exit		Picture	

รูปที่ ค.9 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลตาม โปรแกรมตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A ออกแบบ โดยวิธี Optimization : Minimum Weight

**Optimal Design of Inductor**

File Help

**Objective**

Minimum Weight of inductance core EI

Minimum Cost of inductance core EI

Minimum Loss of inductance core EI

**Condition**

Fs 0.95

Di 7650.00 Kg/m<sup>3</sup>

Dw 8690.00 Kg/m<sup>3</sup>

Cco 47.00 Bath/Kg.

Ccu 130.00 Bath/Kg.

Pco 1.4 Watt/Kg.

**Inductance** 60 mH

**Current** 5 A

**Flux Density** 1 Tesla

**Current Density** 200 A/cm<sup>2</sup>

**Wire Gauges**

A.W.G

S.W.G 15

Start Exit

รูปที่ ค.10 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

▲ Optimum of Inductor									
Print									
Mode									
Minimum Weight									
Dimension			Detail			Detail			
2E	4.878	cm.	N	319.866	Trun	L	0.06000	H.	
D	2.862	cm.	Lg	1.421	mm.	I	5.000	A.	
a	2.439	cm.	Lt	74.022	m.	J	200.000	A/cm <sup>2</sup>	
b	7.316	cm.	R	0.486	ohm	Aw	2.627	mm <sup>2</sup>	
Weight			Loss			Fs			
Wt	4.659	Kg.	Pt	27.046	Watt	Fc	1.495		
Wi	2.969	Kg.	Pco	4.157	Watt	Fw	0.471		
Ww	1.690	Kg.	Pcu	12.145	Watt	Bmax	1.000	Tesla	
Cost			Pgp			SWG.			
Ct	359.244	Bath	10.744			15			
Cco	139.566	Bath							
Ccu	219.678	Bath							
			Change core			Exit		Picture	

รูปที่ ค.11 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)

▲ Change core of Inductor									
Print									
Mode									
Minimum Weight									
Dimension			Detail			Detail			
2E	5.080	cm.	N	346.971	Trun	L	0.06000	H.	
D	2.534	cm.	Lg	1.542	mm.	I	5.000	A.	
a	2.540	cm.	Lt	79.418	m.	J	200.000	A/cm <sup>2</sup>	
b	7.620	cm.	R	0.521	ohm	Aw	2.627	mm <sup>2</sup>	
Weight			Loss			Fs			
Wt	4.664	Kg.	Pt	29.160	Watt	Fc	1.503		
Wi	2.851	Kg.	Pco	3.992	Watt	Fw	0.471		
Ww	1.813	Kg.	Pcu	13.030	Watt	Bmax	1.000	Tesla	
Cost			Pgp			SWG.			
Ct	369.695	Bath	12.138			15			
Cco	134.004	Bath							
Ccu	235.692	Bath							
			Main			Exit		Picture	

รูปที่ ค.12 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลตามโปรแกรมตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5 A ออกแบบ โดยวิธี Optimization : Minimum Loss

**Optimal Design of Inductor**

File Edit View Help

Objective

Minimum Weight of inductance core EI

Minimum Cost of inductance core EI

Minimum Loss of inductance core EI

Conditions

Fr 1

Pw 0.40

Fc 1.44

Temp 40.0 Degree C

Dc 7650.00 Kg/m<sup>3</sup>

Dw 3690.00 Kg/m<sup>3</sup>

Cco 47.00 Bath/Kg

Ccu 150.00 Bath/Kg

Pco 1.4 Watt/Kg

Inductance 68 mH

Current 5 A

Flux Density 1 Tesla

Current Density 200 A/cm<sup>2</sup>

Wire Compex

A.W.G. 15

S.W.G. 1

Start Exit

รูปที่ ค.13 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5 A (Optimization : Minimum Loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A Optimum of Inductor**

Post Mode Minimum Loss

Dimension		Detail		Detail	
RE	3.588 cm	N	146.955 Turn	Lst	0.06500 H
D	9.120 cm	Lg	0.653 mm	lpt	5.000 A
a	1.704 cm	Ll	53.783 mm	st	200.000 A/cm <sup>2</sup>
b	5.381 cm	Rl	0.377 ohm	Act	2.127 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Est	
Wt	6.616 Kg	Pt	20.600 Watt	Fst	1.440
Wl	5.388 Kg	Pcb	7.543 Watt	Fwt	0.400
Ww	1.228 Kg	Pcu	9.426 Watt	Rmax	1.000 Tesla
Cost		Pgp		SWG	
Ct	412.884 Bath	3.631 Watt		15 x 1	
Cco	253.337 Bath	Change rate Exit Picture			
Ccu	159.647 Bath				

รูปที่ ค.14 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5 A (Optimization : Minimum Loss)

**A Change core of Inductor**

Post Mode Minimum Loss

Dimension		Detail		Detail	
RE	6.810 cm	N	155.738 Turn	Lst	0.06800 H
D	7.615 cm	Lg	0.736 mm	lpt	5.000 A
a	1.905 cm	Ll	54.532 mm	st	200.000 A/cm <sup>2</sup>
b	5.715 cm	Rl	0.382 ohm	Act	2.627 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Est	
Wt	6.318 Kg	Pt	21.000 Watt	Fst	1.440
Wl	5.074 Kg	Pcb	7.103 Watt	Fwt	0.400
Ww	1.245 Kg	Pcu	9.558 Watt	Rmax	1.000 Tesla
Cost		Pgp		SWG	
Ct	400.293 Bath	4.349 Watt		15 x 1	
Cco	238.456 Bath	Main Exit Picture			
Ccu	161.837 Bath				

รูปที่ ค.15 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 68 mH 5 A (Optimization : Minimum Loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลตาม โปรแกรมตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3 A ออกแบบ โดยวิธี Optimization : Minimum Loss

**Optimal Design of Inductor**

File Help

**Objective**

- Minimum Weight of inductance core EI
- Minimum Cost of inductance core EI
- Minimum Loss of inductance core EI

**Inductance** 54.5 mH **Current** 3 mA

Unit: A

**Flux Density** 1 Tesla **Current Density** 200 A/cm<sup>2</sup>

**Condition**

Fs 0.95

Di 7650.00 Kg./m<sup>3</sup>

Dw 8690.00 Kg./m<sup>3</sup>

Cco 47.00 Bath/Kg.

Ccu 130.00 Bath/Kg.

Pcu 2.2 Watt/Kg.

**Wire Gauges**

- A.W.G.
- S.W.G. 17

Start Exit

รูปที่ ค.16 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3 A (Optimization : Minimum Loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**▲ Optimum of Inductor**

Print

Mode

Minimum Loss

Dimension		Detail		Detail	
2F	2.407 cm.	N	115.663	Trun	L 0.05450 H.
D	8.742 cm.	Lg	0.308	mm.	I 3.000 A.
a	1.204 cm.	Lt	30.164	m.	J 200.000 A/cm <sup>2</sup>
b	3.611 cm.	R	0.327	ohm	Aw 1.589 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Fs 0.950	
Wt	2.625 Kg.	Pt	8.955	Watt	Fc 1.170
Wi	2.209 Kg.	Pco	4.859	Watt	Fw 0.423
Ww	0.417 Kg.	Pcu	2.945	Watt	Bmax 1.000 Tesla
Cost		Pgp	1.150	Watt	SWG. 17
Ct	157.961 Bath				
Cco	103.814 Bath				
Ccu	54.148 Bath				

Change core      Exit      Picture

รูปที่ ค.17 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3 A (Optimization : Minimum Loss)

**▲ Change core of Inductor**

Print

Mode

Minimum Loss

Dimension		Detail		Detail	
2E	2.540 cm.	N	128.780	Trun	L 0.05450 H.
D	7.441 cm.	Lg	0.343	mm.	I 3.000 A.
a	1.270 cm.	Lt	30.576	m.	J 200.000 A/cm <sup>2</sup>
b	3.810 cm.	R	0.332	ohm	Aw 1.589 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Fs 0.950	
Wt	2.515 Kg.	Pt	8.942	Watt	Fc 1.189
Wi	2.093 Kg.	Pco	4.605	Watt	Fw 0.423
Ww	0.422 Kg.	Pcu	2.986	Watt	Bmax 1.000 Tesla
Cost		Pgp	1.352	Watt	SWG. 17
Ct	153.272 Bath				
Cco	98.385 Bath				
Ccu	54.887 Bath				

Main      Exit      Picture

รูปที่ ค.18 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3 A (Optimization : Minimum Loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลตาม โปรแกรมตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A ออกแบบ โดยวิธี Optimization : Minimum Loss

Objective		Condition	
<input type="radio"/>	Minimum Weight of inductance core EI	fs	0.95
<input type="radio"/>	Minimum Cost of inductance core EI	Di	7650.00 Kg/m <sup>3</sup>
<input type="radio"/>	Minimum Loss of inductance core EI	De	6600.00 Kg/m <sup>3</sup>
Inductance		Ccu	47.00 Bath/Kg.
60	mH	Ccu	130.00 Bath/Kg.
Current		Pcu	7.7 Wat/Kg.
3	mA	Wire Gauges	
Flux Density		<input type="radio"/>	A.W.G.
1	Tesla	<input checked="" type="radio"/>	S.W.G. 17
Current Density		Start Exit	
200	A/cm <sup>2</sup>		

รูปที่ ค.19 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum Loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

▲ Optimum of Inductor									
First Mode									
Minimum Loss									
Dimension			Detail			Detail			
2E	2.441	cm.	N	116.010	Trun	L	0.05000	H.	
D	9.462	cm.	Lg	0.309	mm.	I	3.000	A.	
a	1.221	cm.	Lt	32.066	m.	J	200.000	A/cm <sup>2</sup>	
b	3.662	cm.	R	0.348	ohm	Aw	1.589	mm <sup>2</sup>	
Weight			Loss			Fr			
Wt	2.901	Kg.	Pt	9.710	Watt	Fc			
Wi	2.459	Kg.	Pco	5.409	Watt	Fw			
Ww	0.443	Kg.	Pcu	3.131	Watt	Bmax		1.000 Tesla	
Cost			Pgp			SWG.		17	
Ct	173.115	Bath							
Cco	115.553	Bath							
Ccu	57.562	Bath							
			Change core		Exit		Picture		

รูปที่ ค.20 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum Loss)

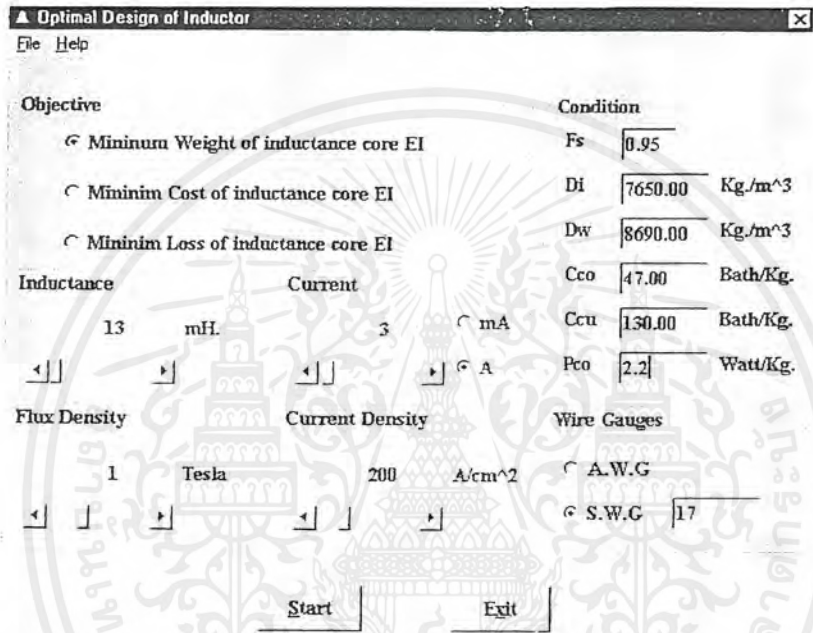
▲ Change core of Inductor									
First Mode									
Minimum Loss									
Dimension			Detail			Detail			
2E	5.540	cm.	N	125.605	Trun	L	0.06000	H.	
D	8.399	cm.	Lg	0.335	mm.	I	3.000	A.	
a	1.270	cm.	Lt	32.296	m.	J	200.000	A/cm <sup>2</sup>	
b	3.810	cm.	R	0.350	ohm	Aw	1.589	mm <sup>2</sup>	
Weight			Loss			Fr			
Wt	2.809	Kg.	Pt	9.670	Watt	Fc			
Wi	2.363	Kg.	Pco	5.198	Watt	Fw			
Ww	0.446	Kg.	Pcu	3.154	Watt	Bmax		1.000 Tesla	
Cost			Pgp			SWG.		17	
Ct	169.026	Bath							
Cco	111.052	Bath							
Ccu	57.974	Bath							
			Main		Exit		Picture		

รูปที่ ค.21 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum Loss)

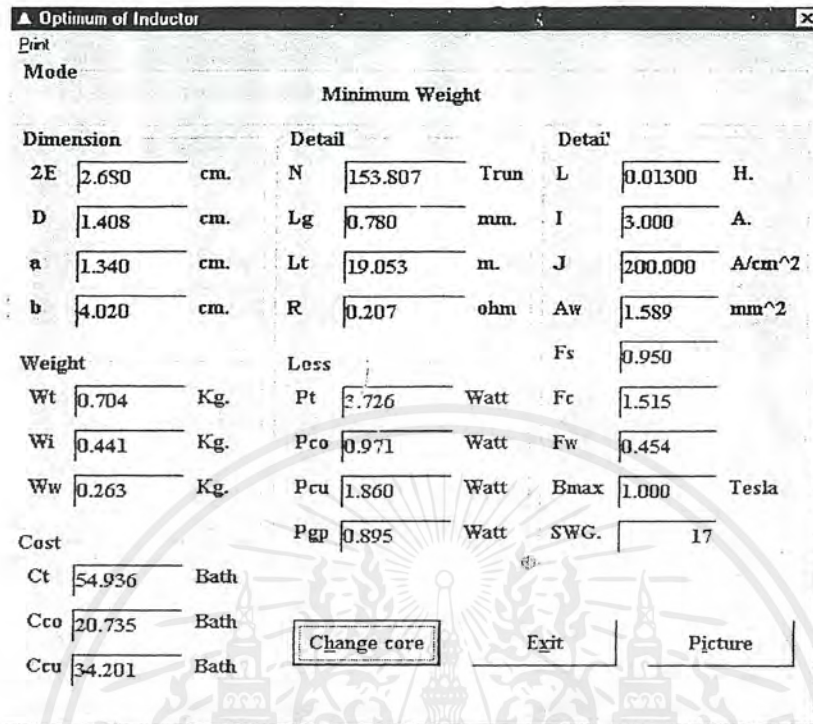
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1.2 ข้อมูลตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยโปรแกรม Numerical Optimization หลังจากทำการแก้ไขโปรแกรมแล้ว

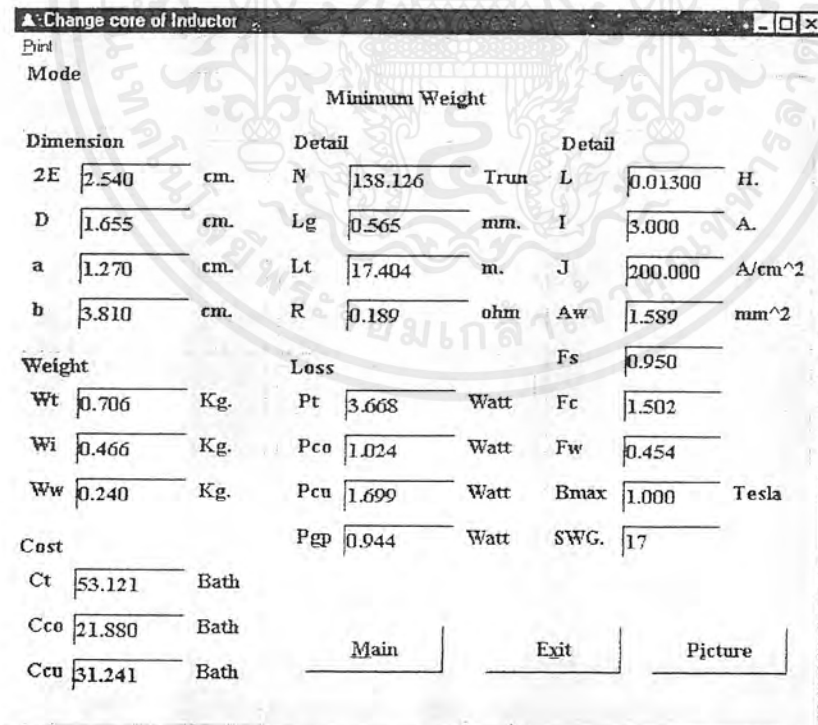
ข้อมูลตามโปรแกรมตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A ออกแบบโดยวิธี Optimization : Minimum Weight



รูปที่ ค.22 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A (Optimization : Minjimum weight)



รูปที่ ค.23 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)



รูปที่ ค.24 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลตาม โปรแกรมค้วเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A ออกแบบ โดยวิธี Optimization : Minimum Weight

Objective		Condition	
<input checked="" type="radio"/> Minimum Weight of inductance core EI		Fe	0.95
<input type="radio"/> Minimum Cost of inductance core EI		Di	7650.00 Kg/m <sup>3</sup>
<input type="radio"/> Minimum Loss of inductance core EI		Dw	8690.00 Kg/m <sup>3</sup>
		Ccu	47.00 Bath/Kg
		Ccu	130.00 Ba.h/Kg
		Pcu	2.2 Watt/Kg
Inductance		Current	
75	mH	3	<input type="radio"/> mA <input checked="" type="radio"/> A
Flux Density		Current Density	
1	Tesla	200	A/cm <sup>2</sup>
Wire Gauges			
		<input type="radio"/> A.W.G.	
		<input checked="" type="radio"/> S.W.G.	17

รูปที่ ค.25 ข้อมูลที่เลือกในการออกแบบ ค้วเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A (Optimization : Minjimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Optimum of Inductor**

Print

Mode

Minimum Weight

Dimension		Detail		Detail	
2E	3.826 cm	N	322.889 Turn	L	0.07500 H
D	2.711 cm	Lg	1.215 mm	I	3.000 A
a	1.913 cm	Lt	61.624 m	J	200.000 A/cm <sup>2</sup>
b	5.740 cm	R	0.669 ohm	Aw	1.589 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Fs	0.950
Wt	2.582 Kg	Pt	13.442 Watt	Pc	1.460
Wi	1.731 Kg	Pco	3.808 Watt	Fw	0.467
Ww	0.851 Kg	Pcu	6.017 Watt	Bmax	1.000 Tesla
		Pgp	3.617 Watt	SWG	17
Cost					
Ct	191.968 Bath	<input type="button" value="Change core"/> <input type="button" value="Exit"/> <input type="button" value="Picture"/>			
Cco	81.347 Bath				
Ccu	110.621 Bath				

รูปที่ ค.26 ข้อมูลที่ได้ก่อนทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)

**Change core of Inductor**

Print

Mode

Minimum Weight

Dimension		Detail		Detail	
2E	3.810 cm	N	320.130 Turn	L	0.07500 H
D	2.746 cm	Lg	1.184 mm	I	3.000 A
a	1.905 cm	Lt	61.218 m	J	200.000 A/cm <sup>2</sup>
b	5.715 cm	R	0.664 ohm	Aw	1.589 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Fs	0.950
Wt	2.584 Kg	Pt	13.434 Watt	Pc	1.458
Wi	1.738 Kg	Pco	3.824 Watt	Fw	0.467
Ww	0.845 Kg	Pcu	5.978 Watt	Bmax	1.000 Tesla
		Pgp	3.632 Watt	SWG	17
Cost					
Ct	191.588 Bath	<input type="button" value="Main"/> <input type="button" value="Exit"/> <input type="button" value="Picture"/>			
Cco	81.697 Bath				
Ccu	109.891 Bath				

รูปที่ ค.27 ข้อมูลที่ได้หลังทำการปรับแกน ตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.2 ข้อมูลผลการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ

### ก.2.1 ข้อมูลผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A ออกแบบโดยวิธี Optimization : Minimum Weight

1. ผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำโดยการปรับค่าความกว้างช่องอากาศ แสดงในบทที่ 3
2. ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Optimization : Minimum Weight) โดยคงค่าความกว้างช่องอากาศ 2.8 mm. แสดงในบทที่ 3
3. ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 42mH 5A (Optimization : Minimum Weight)

I(A)	V(Volt)	R(Ohm)
1	0.460	0.460
1.4	0.590	0.421
1.8	0.770	0.428
2.2	0.950	0.432
2.6	1.100	0.423
3	1.280	0.427
ค่า R เฉลี่ย		<b>0.432</b>

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลการทดสอบการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ระดับแรงดันต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)

V(Volt)	I(A)	P(W)	P <sub>cu</sub> (W)	P <sub>co</sub> (W)
104.80	5	25.2	10.8000	14.4000
113.50	4.98	25.4	10.7138	14.6862
94.30	1.45	12.4	0.9083	11.4917
84.30	0.6	9.75	0.1555	9.5945
75.5	0.34	7.5	0.0499	7.4501
69.2	0.26	6.2	0.0292	6.1708
66.1	0.24	5.62	0.0249	5.5951
63.3	0.22	5.15	0.0209	5.1291
58.8	0.20	4.42	0.0173	4.4027
36.8	0.13	1.9	0.0073	1.8927

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ 42 mH 5 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.2.2 ข้อมูลผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5 A ออกแบบโดยวิธี Optimization : Minimum

### Weight

1. ผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำโดยการปรับค่าความกว้างช่องอากาศ

GAP	V(Volt)	I(A)	P(W)	L(mH)
Close	104.9	5	30.33	66.670
1	58.75	5	14.5	37.109
1.25	52.75	5	13.4	33.325
1.35	49.8	5	13.8	31.655
1.55	45.5	5	12.1	28.925
Open	17.25	5	8.75	10.926

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A

2. ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5 A (Optimization : Minimum Weight) โดยคงค่าความกว้างช่องอากาศ 1.35 mm.

I(A)	V(Volt)	P(W)	L(mH)
1.5	15	1.4	31.769
2	20	2.33	31.777
2.5	25	3.75	31.774
3	30	5.1	31.780
3.5	35	7	31.779
4	40	9	31.781
4.5	44.75	11.4	31.603
5	49.75	14.1	31.621

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A (Optimization : Minimum Weight)

I(A)	V(Volt)	R(Ohm)
1	0.285	0.285
1.4	0.391	0.279
1.8	0.521	0.289
2.2	0.615	0.280
2.6	0.731	0.281
3	0.854	0.285
ค่า R เฉลี่ย		0.283

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5A

4. ผลการทดสอบการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ระดับแรงดันต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)

V(Volt)	I(A)	P(W)	P <sub>cu</sub> (W)	P <sub>co</sub> (W)
104.80	5	25.2	7.0750	18.1250
58.80	0.4	6.1	0.0453	6.0547
52.80	0.34	4.95	0.0327	4.9173
49.80	0.31	4.44	0.0272	4.4128
45.5	0.27	3.76	0.0206	3.7394
17.25	0.11	0.7	0.0034	0.6966

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ 31.5 mH 5 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.2.3 ข้อมูลผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5 A ออกแบบโดยวิธี Optimization : Minimum Weight

#### 1. ผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำโดยการปรับค่าความกว้างช่องอากาศ

GAP	V(Volt)	I(A)	P(W)	L(mH)
Close	170	5	38.4	108.115
3.7	91.5	5	23.9	58.171
5	81.25	5	23.1	51.642
5.2	78.75	5	22.2	50.054
5.3	77.9	5	22	49.513
6	75.7	5	22.25	48.109
7.1	72.5	5	21.9	46.071
Open	53.5	5	19.5	33.969

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5A

#### 2. ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5 A (Optimization : Minimum Weight) โดยคงค่าความกว้างช่องอากาศ 5.2 mm.

I(A)	V(Volt)	P(W)	L(mH)
2	31.75	3.8	50.441
2.5	39.8	5.8	50.589
3	47.25	8.2	50.050
3.5	55.25	11.1	50.165
4	63	14.4	50.052
4.5	71	18.2	50.141
5	78.75	22.2	50.054

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5A (Optimization : Minimum Weight)

I(A)	V(Volt)	R(Ohm)
1	0.550	0.550
1.4	0.784	0.560
1.8	1.000	0.556
2.2	1.229	0.559
2.5	1.432	0.551
3	1.656	0.552
ค่า R เฉลี่ย		0.554

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5A

4. ผลการทดสอบการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ระดับแรงดันต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5 A (Optimization : Minimum weight)

V(Volt)	I(A)	P(W)	Pcu(W)	Pco(W)
170.00	4.71	32	12.2900	19.7100
91.6	0.190	6.760	0.0200	6.7400
81.2	0.17	5.34	0.0160	5.3240
78.8	0.16	5.04	0.0142	5.0258
77.8	0.16	4.932	0.0142	4.9178
75.8	0.150	4.700	0.0125	4.6875
53.5	0.110	2.532	0.0067	2.5253

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ 50 mH 5 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2.4 ข้อมูลผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A ออกแบบโดยวิธี Optimization : Minimum Weight

1. ผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำโดยการปรับค่าความกว้างช่องอากาศ

GAP	V(Volt)	I(A)	P(W)	L(mH)
Close	117	3	22	123.897
1	73.8	3	13.25	78.164
1.45	58.75	3	12.6	62.176
1.5	58.5	3	11.2	61.944
1.6	57	3	10.9	60.356
1.7	54.2	3	10.66	57.384
2	50.5	3	10.33	53.457
Open	24.25	3	7.9	25.578

ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A

2. ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum Weight) โดยคงค่าความกว้างช่องอากาศ 1.6 mm.

I(A)	V(Volt)	P(W)	L(mH)
1	18.8	2.9	59.126
1.5	28.25	3.2	59.764
2	37.6	5.75	59.667
2.5	47	8.75	59.676
3	56.8	10.8	60.144

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum Weight)

I(A)	V(Volt)	R(Ohm)
1	0.67	0.620
1.4	0.99	0.656
1.8	1.24	0.640
2.2	1.53	0.646
2.6	1.81	0.644
3	2.087	0.646
ค่า R เฉลี่ย		0.642

ตารางที่ ค.13 ผลการทดสอบค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A

4. ผลการทดสอบการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ระดับแรงดันต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)

V(Volt)	I(A)	P(W)	P <sub>cu</sub> (W)	P <sub>co</sub> (W)
117	2.91	20.4	5.4365	14.9635
74	0.28	6.25	0.0503	6.1997
58.75	0.18	4.33	0.0208	4.3092
58.5	0.20	4.1	0.0257	4.0743
57	0.18	3.54	0.0208	3.5192
54.25	0.17	3.42	0.0186	3.4014
50.5	0.16	2.98	0.0164	2.9636
24.25	0.14	2.35	0.0126	2.3374

ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2.5 ข้อมูลผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A ออกแบบโดยวิธี Optimization : Minimum Weight

1. ผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำโดยการปรับค่าความกว้างช่องอากาศ

GAP	V(Volt)	I(A)	P(W)	L(mH)
Close	23.5	3	3.6	24.902
0.35	15.8	3	4.5	16.689
0.46	13.8	3	3.8	14.580
0.5	11.75	3	3.6	12.402
0.55	11.7	3	3.75	12.343
0.65	10.6	3	2.9	11.200
Open	3.28	3	2.8	3.336

ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3A

2. ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A (Optimization : Minimum Weight) โดยคงค่าความกว้างช่องอากาศ 0.5 mm.

I(A)	V(Volt)	P(W)	L(mH)
1	4.1	0.4	12.988
1.5	5.9	1.1	12.423
2	7.9	1.6	12.509
2.5	9.8	2.4	12.418
3	11.8	3.7	12.452

ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A (Optimization : Minimum Weight)

I(A)	V(Volt)	R(Ohm)
1	0.211	0.211
1.4	0.292	0.209
1.8	0.385	0.214
2.2	0.458	0.208
2.6	0.538	0.207
3	0.634	0.211
ค่า R เฉลี่ย		0.210

ตารางที่ ค.17 ผลการทดสอบค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A

4. ผลการทดสอบการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ระดับแรงดันต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำ 13mH 3A (Optimization : Minimum weight)

V(Volt)	I(A)	P(W)	Pcu(W)	Pco(W)
23.5	2.92	5.02	1.7905	3.2295
16	0.76	1.7	0.1213	1.5787
14	0.60	1.3	0.0756	1.2244
11.75	0.47	0.9	0.0464	0.8536
11.7	0.46	0.866	0.0444	0.8216
10.5	0.42	0.75	0.0370	0.7130

ตารางที่ ค.18 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ 13 mH 3 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ค.2.6 ข้อมูลผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A ออกแบบโดยวิธี Optimization : Minimum Weight**

1. ผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำโดยการปรับค่าความกว้างช่องอากาศ

GAP	V(Volt)	I(A)	P(W)	L(mH)
Close	144	3	26.5	152.501
1	81.1	3	15	85.886
1.2	79.2	3	13.9	83.890
<b>1.35</b>	<b>69.25</b>	<b>3</b>	<b>13.6</b>	<b>73.319</b>
1.4	68.1	3	12.9	72.112
1.6	64.8	3	12.5	68.613
Open	26.5	3	8.2	27.968

ตารางที่ ค.19 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 5A

2. ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A (Optimization : Minimum Weight) โดยคงค่าความกว้างช่องอากาศ 1.35 mm.

I(A)	V(Volt)	P(W)	L(mH)
1	23.5	2	74.531
1.5	34.75	4.1	73.513
2	47.25	7.1	74.988
2.5	57.5	10.8	73.005
3	69.25	13.6	73.319

ตารางที่ ค.20 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A (Optimization : Minimum Weight)

I(A)	V(Volt)	R(Ohm)
1	0.760	0.760
1.4	1.035	0.739
1.8	1.325	0.736
2.2	1.620	0.736
2.6	1.924	0.740
3	2.208	0.736
ค่า R เฉลี่ย		0.741

ตารางที่ ค.21 ผลการทดสอบค่าความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A

4. ผลการทดสอบการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ระดับแรงดันต่างๆ ของตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A (Optimization : Minimum weight)

V(Volt)	I(A)	P(W)	P <sub>cu</sub> (W)	P <sub>co</sub> (W)
144.00	2.99	20.2	6.6246	13.5754
81.10	0.24	5.44	0.0427	5.3973
79.2	0.23	5.2	0.0392	5.1608
69.20	0.19	4.04	0.0268	4.0132
64.8	0.19	3.6	0.0268	3.5732
26.5	0.08	0.76	0.0047	0.7553

ตารางที่ ค.22 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ 75 mH 3 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.7 ข้อมูลผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3 A ออกแบบโดยวิธี Optimization : Minimum loss

1. ผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำโดยการปรับค่าความกว้างช่องอากาศ

GAP	V(Volt)	I(A)	P(W)	L(mH)
Close	93	3	22	98.368
0.2	66.5	3	11.8	70.435
<b>0.3</b>	<b>51</b>	<b>3</b>	<b>8.4</b>	<b>54.031</b>
0.4	42.5	3	7.1	45.024
Open	6.8	3	3.33	7.118

ตารางที่ ค.23 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3 A

2. ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3 A (Optimization : Minimum loss) โดยคงค่าความกว้างช่องอากาศ 0.3 mm.

I(A)	V(Volt)	P(W)	L(mH)
1	17	1.1	53.999
1.5	25	2.2	52.963
2	33.75	4	53.620
2.5	42.5	6.1	54.023
3	51	3.8	54.096

ตารางที่ ค.24 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนี่ยวนำ 54.5 mH 3 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.8 ข้อมูลผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A ออกแบบโดยวิธี Optimization : Minimum loss

1. ผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำโดยการปรับค่าความกว้างช่องอากาศ

GAP	V(Volt)	I(A)	P(W)	L(mH)
Close	103.3	3	25.75	109.173
0.2	73.8	3	14.1	78.145
<b>0.3</b>	<b>56.75</b>	<b>3</b>	<b>9.66</b>	<b>60.117</b>
0.4	47.2	3	7.4	50.012
Open	7.5	3	3.66	7.852

ตารางที่ ค.25 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A

2. ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A (Optimization : Minimum loss) โดยคงค่าความกว้างช่องอากาศ 0.3 mm.

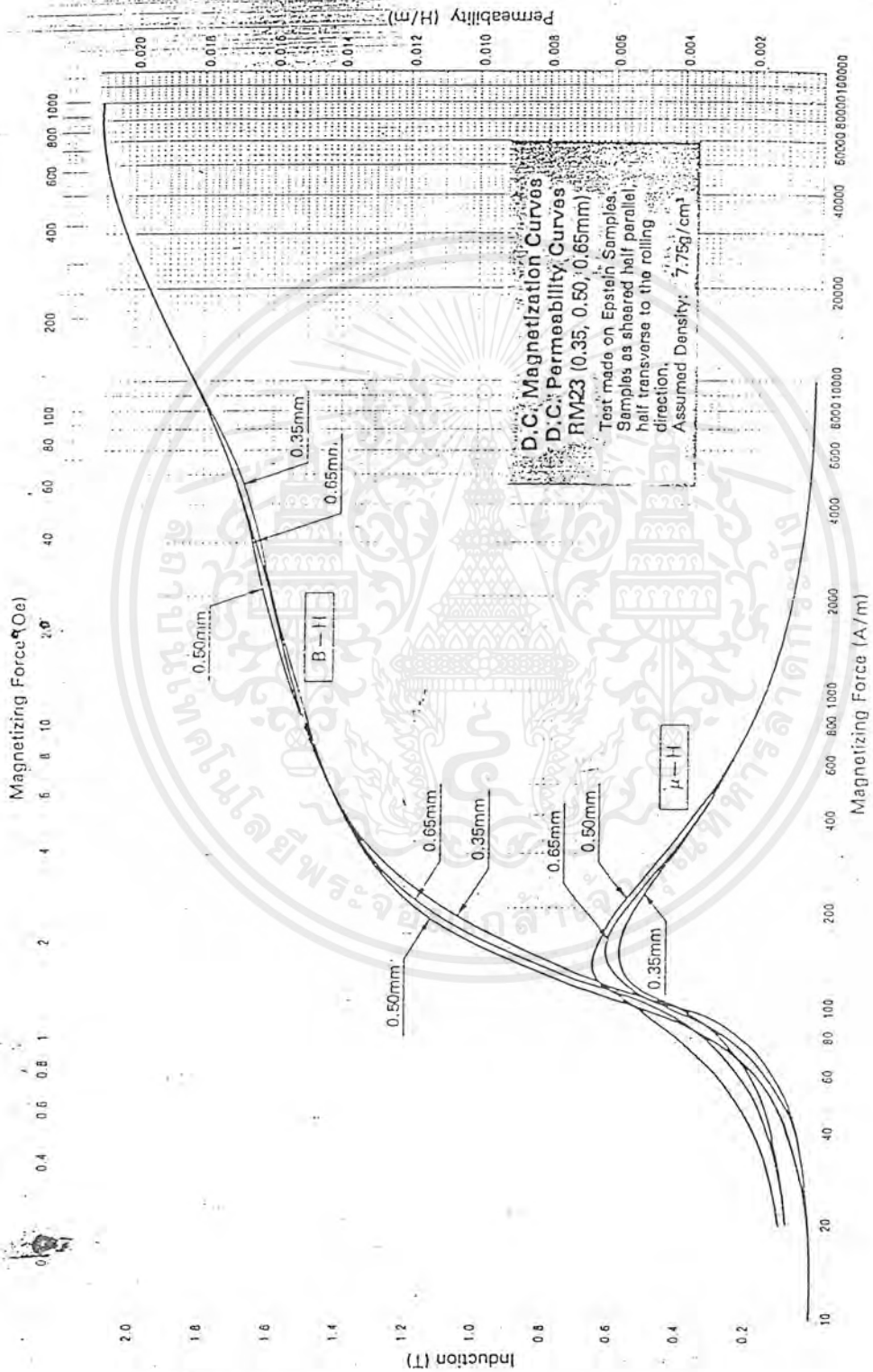
I(A)	V(Volt)	P(W)	L(mH)
1	19	1.2	60.358
1.5	28	2.66	59.299
2	38.1	4.5	60.532
2.5	47.8	7	60.756
3	57.5	9.9	60.909

ตารางที่ ค.26 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นตัวเหนี่ยวนำ 60 mH 3 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

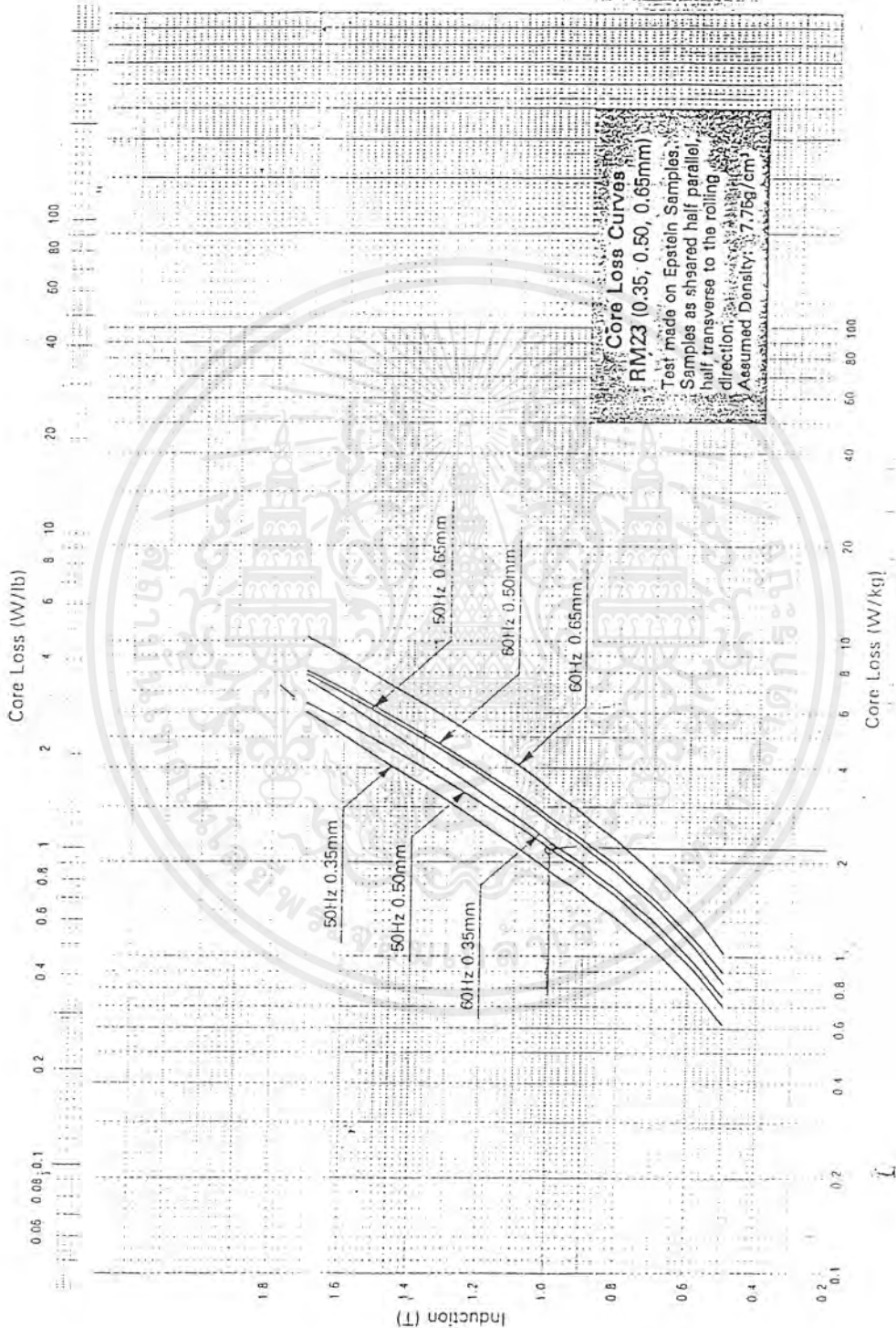
ภาคผนวก ง

ข้อมูลที่ใช้ออกแบบตัวเหนี่ยวนำ



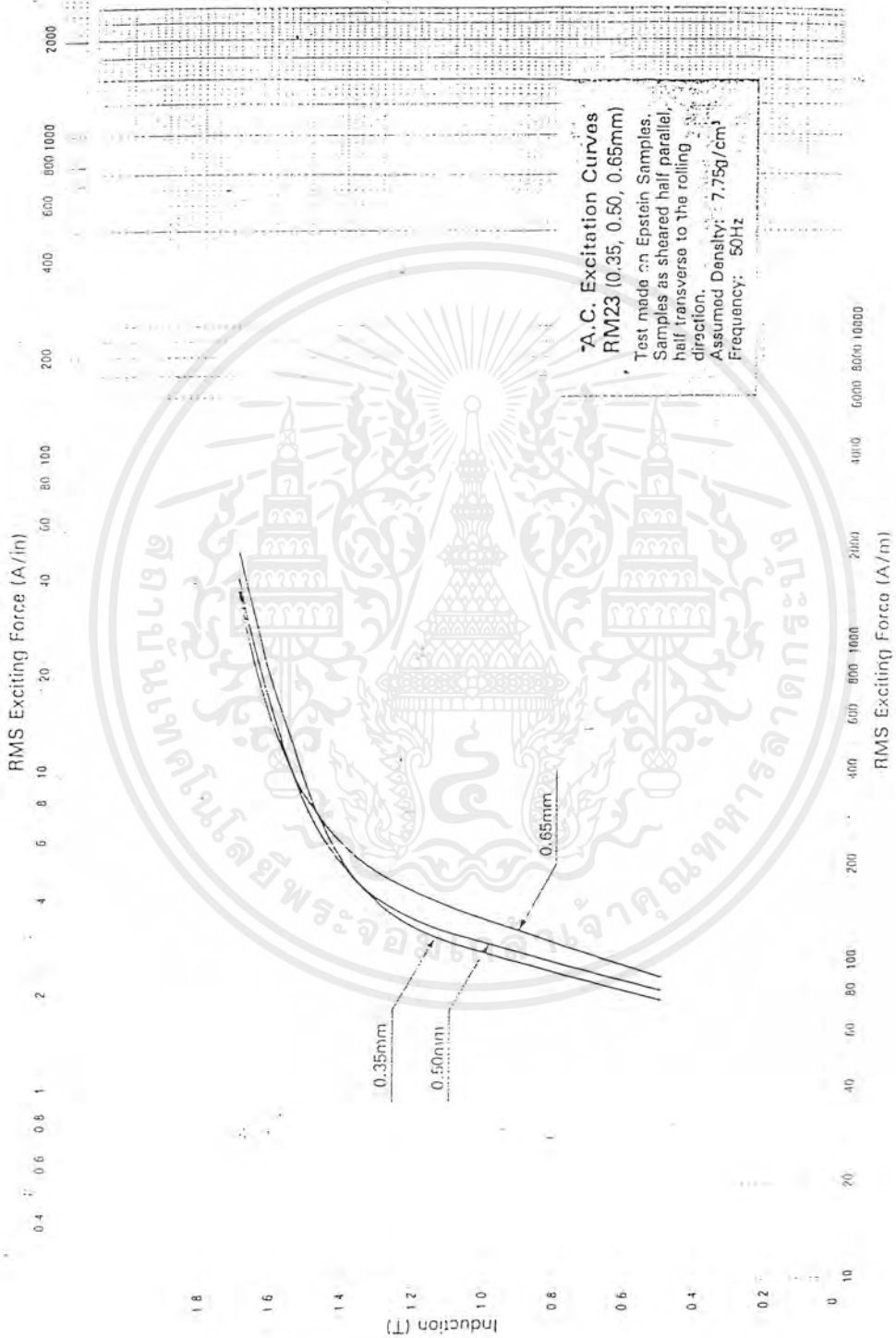
รูปที่ ง.1 Magnetizing curve และ D.C. Permeability Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



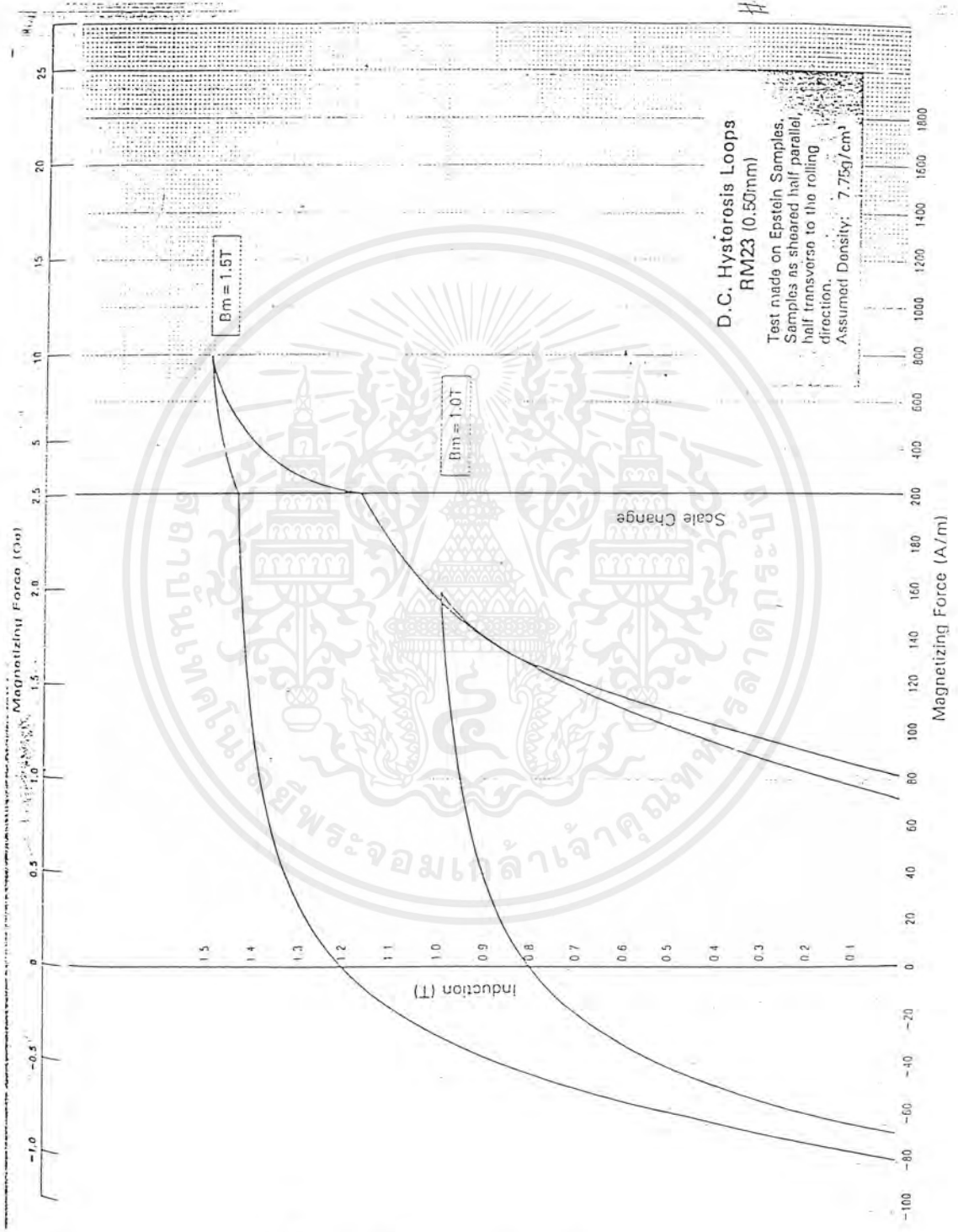
รูปที่ ง.2 Core loss Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 A.C. Excitation Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 D.C. Hysteresis Loops Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, อาจารย์วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาและคุณธำรง ต้นภูมิประเทศ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Colonel Wm. T. Mcllyman, "Transformer and Inductor Handbook", Marcel Dekker, Inc., 1990
- [2] Arora, J.S., "Introduction to Optimum Design", Mc Graw-Hill, New York, 1989
- [3] Murray, W., "Numerical Methods for Unconstrained Optimization", Academic Press, London, 1972
- [4] Vanderplaats, G.N., "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications", Mc Graw-Hill, New York, 1984.
- [5] วิโรจน์ ชิวหากาญจน์, ธำรง ต้นภูมิประเทศ, สมชาย สืบศักดิ์วงศ์, "การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ที่เหมาะสม" ปรินฤญาติพันธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541
- [6] พิชิต ถ้ายอง, "เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539
- [7] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr Stephen D. Umans, "Electrical Machinery fifth edition", Mc Graw-Hill, 1990

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้