

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ที่เหมาะสม  
Optimal Design of EI- Inductor



โดย  
นายวิโรจน์ ชิวหากาญจน์ 39013100  
นายธีรารัง ตันภูมิประเทศ 39013122  
นายสมชาย สืบศักดิ์วงศ์ 39013138

11  
11  
11

เลขหม.....  
เลขทะเบียน..... 34188  
วัน, เดือน, ปี..... 6 ต.ค. 2542

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2541 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรปี การศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ที่เหมาะสม

ผู้จัดทำ

- |                           |          |
|---------------------------|----------|
| 1. นายวิโรจน์ ชิวหากาญจน์ | 39013100 |
| 2. นายธำรง คັນภูมิประเทศ  | 39013122 |
| 3. นายสมชาย สืบศักดิ์วงศ์ | 39013138 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(ก)
บทคัดย่อ	(ค)
ABSTRACT	(ง)
สารบัญรูป	(จ)
สารบัญตาราง	(ฉ)
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็ก EI	2
2.1 บทนำ	2
2.2 แบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำแกน EI	3
2.3 ข้อพิจารณาในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกน EI	4
2.4 ข้อกำหนดในการออกแบบ	5
2.5 หลักในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยทั่วไป	8
บทที่ 3 ทฤษฎีที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม	12
3.1 บทนำ	12
3.2 General Optimization Statement	12
บทที่ 4 การทำงานของ โปรแกรมในการหาค่าที่เหมาะสม	20
4.1 แผนภูมิแสดงการทำงานของ โปรแกรม	21
4.2 หน้าจอการทำงานของ โปรแกรมการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	23
4.3 ผลที่ได้จากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	26
บทที่ 5 การทดสอบตัวเหนี่ยวนำ	27
5.1 การหาคุณสมบัติของแกนเหล็ก	27
5.2 การหาค่าตัวเหนี่ยวนำ	28
5.3 การหาค่าความต้านทานในขดลวด	28
5.4 การสร้างตัวเหนี่ยวนำเปรียบเทียบกับ โปรแกรม	29
5.5 การสร้างตัวเหนี่ยวนำเปรียบเทียบกับวิธี Area Product	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักพิมพ์ ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์

56

	หน้า
ภาคผนวก	59
ภาคผนวก ก การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธี Area Product	60
ภาคผนวก ข Minimization or Maximization of Function	78
ภาคผนวก ค Magnetic Circuit and Magnetic Materials	114
ภาคผนวก ง ส่วนประกอบของตัวเหนี่ยวนำ	146
ภาคผนวก จ ตารางแสดงค่าต่างๆ	155
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	167
กิตติกรรมประกาศ	172
เอกสารอ้างอิง	173



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ที่เหมาะสม

วิโรจน์ ชิวหากาญจน์

ช่าง คำนวณประเทศ

สมชาย สืบศักดิ์วงศ์

ผศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา ๒๕๕๑

### บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้กล่าวถึงวิธีการ และหลักการการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้แกน EI ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และทางด้าน ไฟฟ้ากำลัง ตัวอย่างเช่น เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์, PWM อินเวอร์เตอร์ และ ฟิวเตอร์ โดยแกนที่ใช้ สามารถดูรายละเอียดและคุณสมบัติได้จากแคตตาล็อก ในการออกแบบนี้ได้ใช้ทฤษฎีเชิงตัวเลข (Numerical) โดยวิธี Optimization เพื่อให้ได้ตัวเหนี่ยวนำที่มี น้ำหนัก, ราคา และประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุดและจะต้องได้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ถูกต้องตามที่กำหนด ซึ่งผลการออกแบบโดยวิธีนี้ จะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดที่เหมาะสมและประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิต

Optimal Design of EI-Inductor

Wirote Chivhakan  
 Thamrong Tunpoomprataed  
 Somchai Supsakvong  
 Asst.Prof. Chaiwut Chat-uthai  
 Lecturer. Veerasak Vongvivat

1998

ABSTRACT

This project presents a method and principle of designing for inductors by using EI core which are beneficial for electronics and electrical power application such as power converter and pulse-width – modulated (PWM) inverter and filter. The details and characteristic of EI core can be found from the catalogues . Numerical technique combined with optimization method are used in order to get the inductors that have the most appropriate weights , prices or degree of efficiencies and furthermore the inductance value that we get should be correct the desired value. Refer to this designed method , we will finally obtain the inductor with optimum size that can also save cost of production.

## สารบัญญภาพ

ลำดับที่	หน้า
1. รูปที่ 2-1 E-I Core configuration	3
2. รูปที่ 2-2 Magnetic Circuit	4
3. รูปที่ 2-3 แสดงลักษณะของแกน EI	6
4. รูปที่ 3-1 แผนผังแสดงอัลกอริทึมของการ OPTimization	14
5. รูปที่ 3-2 Rosenbrock's function	15
6. รูปที่ 3-3 Performance of the Rosenbrock's function using unconstrained minimization methodes	16
7. รูปที่ 3-4 Iterative process of design variable using unconstrained minimization methodes	16
8. รูปที่ 3-5 แสดงค่าต่ำสุดโดยวิธี Numerical Optimization Techniques	17
9. รูปที่ 3-6 a แสดงค่า Function ในรูป 3 มิติ	17
10. รูปที่ 3-6 b แสดง Contour ของ Function	18
11. รูปที่ 3-7 แสดงค่าต่ำสุดโดยวิธี Numerical Optimization Techniques	18
12. รูปที่ 3-8 a แสดงค่า Function ในรูป 3 มิติ	19
13. รูปที่ 3-8 b แสดง Contour ของ Function	19
14. รูปที่ 4-1 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรม	21
15. รูปที่ 4-2 รายละเอียดของ INPUT DATA	21
16. รูปที่ 4-3 แผนภูมิแสดงการทำงานของ NUMERICAL OPTIMIZATION ECHNIQUES	22
17. รูปที่ 4-4 รายละเอียดของ OUTPUT DATA	23
18. รูปที่ 4-5 หน้าจอรับข้อมูล	23
19. รูปที่ 4-6 หน้าจอแสดงข้อมูลก่อนปรับแกน	24
20. รูปที่ 4-7 หน้าจอการปรับแกน	24
21. รูปที่ 4-8 หน้าจอแสดงข้อมูลหลังปรับแกน	25
22. รูปที่ 4-9 หน้าจอแสดง โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำ	25
23. รูปที่ 5-1 วงจรทดสอบคุณสมบัติของแกนเหล็ก	27

24. รูปที่ 5-2 วงจรทดสอบในการหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

25. รูปที่ 5-3 วงจรทดสอบในการหาค่าความต้านทานในขดลวด

ลำดับที่	หน้า
26. รูปที่ 5-4 ข้อมูล Optimization ที่ตัวเหนี่ยวนำค่า 12 mH กระแส 6 A	29
27. รูปที่ 5-5 ข้อมูลหลังจากทำการปรับแกนที่ตัวเหนี่ยวนำค่า 12 mH กระแส 6 A	29
28. รูปที่ 5-6 ข้อมูล Optimization ที่ตัวเหนี่ยวนำค่า 53 mH กระแส 5 A	32
29. รูปที่ 5-7 ข้อมูลหลังจากทำการปรับแกนที่ตัวเหนี่ยวนำค่า 53 mH กระแส 5 A	32
30. รูปที่ 5-8 AC. Excitation curve ที่ตัวเหนี่ยวนำค่า 12 mH กระแส 6 A	35
31. รูปที่ 5-9 Core loss curve ที่ตัวเหนี่ยวนำค่า 12 mH กระแส 6 A	35
32. รูปที่ 5-10 AC. Excitation curve ที่ตัวเหนี่ยวนำค่า 53 mH กระแส 5 A	36
33. รูปที่ 5-11 Core loss curve ที่ตัวเหนี่ยวนำค่า 53 mH กระแส 5 A	36
34. รูปที่ 5-12 ข้อมูล Optimization ที่ตัวเหนี่ยวนำค่า 42 mH กระแส 5 A	40
35. รูปที่ 5-13 ข้อมูลหลังจากทำการปรับแกนที่ตัวเหนี่ยวนำค่า 42 mH กระแส 5 A	40
36. รูปที่ 5-14 ข้อมูล Optimization ที่ตัวเหนี่ยวนำค่า 68 mH กระแส 5 A	46
37. รูปที่ 5-15 ข้อมูลหลังจากทำการปรับแกนที่ตัวเหนี่ยวนำค่า 68 mH กระแส 5 A	46
38. รูปที่ 6-1 แสดงการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ 12 mH. กระแส 6 A. ที่ช่องว่างอากาศต่างๆ	58

## ภาคผนวก

ลำดับที่	หน้า
1. รูป ก-1 แสดงการเกิด fringing flux	62
2. รูป ข-1 แสดงจุดต่างๆ ของฟังก์ชัน	78
3. รูป ข-2 แสดงค่า step เพื่อหา minimum bracket	83
4. รูป ข-3 แสดงการเข้าสู่จุดต่ำสุด โดย inverse parabolic interpolation	84
5. รูป ข-4 แสดงวิธีในการ Step โดยใช้ทฤษฎี Downhill simplex	86
6. รูป ข-5 การเข้าสู่ของฟังก์ชันที่ N มิติ	88
7. รูป ข-6 การเข้าสู่จุดต่ำสุด โดย steepest Descent	92
8. รูป ข-7 Constraint status at design a, b, c, and d	98
9. รูป ข-8 Usable and feasible search direction	99
10. รูป ข-9 Relative Optimum of constrained function	100
11. รูป ข-10 Geometric interpretation of the Kuhn-Tucker condition	102
12. รูป ข-11 Graphical representation of optimum point	102
13. รูป ข-12 Finite difference intervals	105

ลำดับที่	หน้า
14. รูป ข-13 อัลกอริทึมของการคำนวณหาค่าของ h	106
15. รูป ข-14 ความถูกต้องของการประมาณค่าแบบ Finite difference ของ $\partial F(x) / \partial x_1$ ในตารางที่ ข-2 เมื่อ $\Delta x_1$ มีค่ามาก	108
16. รูป ข-15 ความถูกต้องของการประมาณค่าแบบ Finite difference ของ $\partial F(x) / \partial x_1$ ในตารางที่ ข-2 เมื่อ $\Delta x_1$ มีค่าน้อย	108
17. รูป ข-16 Classification of search methods	109
18. รูป ข-17 Step size determination algorithm	111
19. รูป ข-18 Classification of the transformation methods	112
20. รูป ค-1 แสดงวงจรแม่เหล็กที่พันด้วยขดลวด 1 ขด และไม่มีช่องว่างอากาศ	116
21. รูป ค-2 แสดงวงจรแม่เหล็กที่พันด้วยขดลวด 1 ขด และมีช่องว่างอากาศ	118
22. รูป ค-3 แสดงผลของ fringing flux ในช่องอากาศ	119
23. รูป ค-4 แสดงการเปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กด้วยวงจรไฟฟ้า	120
24. รูป ค-5 แสดงวงจรแม่เหล็กที่มีการหมุนเหนี่ยวนำ	122
25. รูป ค-6 แสดงวงจรแม่เหล็กที่พันด้วยขดลวด 2 ขด และมีช่องว่างอากาศ	124
26. รูป ค-7 แสดงค่าแรงดัน และ กระแสที่เกิดจาก Hysteresis loop	128
27. รูป ค-8 แสดงค่า Excitoin curve ของ M5 grain-oriented electrical steel	129
28. รูป ค-9 แสดง Hysteresis loop	130
29. รูป ค-10 แสดงค่า coreloss curve ของ M5 grain-oriented electrical steels	131
30. รูป ค-11 แสดงถึงพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแส eddy	134
31. รูป ค-12 วงจรสำหรับแสดง hysteresis loop บน Oscilloscope	134
32. รูป ค-13 แสดงลักษณะของ Hysteresis loop curve	139
33. รูป ค-14 แสดงการเพิ่มขึ้นของ Permeability สำหรับ Ferrite แบบแมงกานีส-สังกะสี	141
34. รูป ค-15 แสดงข้อมูลการเพิ่มของ Permeability	141
35. รูป ง-1 แสดงชิ้นส่วนของแผ่น Lamination	149
36. รูป ง-2 แสดงการวางแผ่น Lamination ซ้อนทับกัน โดยการวางสลับระหว่างแกน E กับแกน I	149
37. รูป ง-3 แสดงแกนแบบ C- core	150
38. รูป ง-4 แสดงแกนแบบ E- core	150
39. รูป ง-5 แสดงรูปร่างของ Bobbin	152

ลำดับที่	หน้า
40. รูป ง-6 แสดงการผันลวดลักษณะต่างๆ	154
41. รูป ฉ-1 D.C. Magnetization Curve และ D.C. Permeability Curve	167
42. รูป ฉ-2 Core loss Curve	168
43. รูป ฉ-3 A.C. Excitation Curve	169
44. รูป ฉ-4 Exciting Power Curve	169
45. รูป ฉ-5 D.C. hysteresis loops Curve	171



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ลำดับที่	หน้า
1. ตารางที่ 2-1 ลักษณะเฉพาะของแกนแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2. ตารางที่ 3-1 การแสดงคำตอบต่างๆ ของ <b>Rosenbrock' s function</b> ที่แก้ปัญหาโดยใช้วิธี <b>POWELL, PR</b> และ <b>BFGS</b>	15
3. ตารางที่ 4-1 ผลทดสอบ โปรแกรมหาค่าตัวเหนี่ยวนำ 20 mH ที่ค่ากระแส 10	26
4. ตารางที่ 4-2 ผลทดสอบ โปรแกรมหาค่าตัวเหนี่ยวนำ 10 mH ที่ค่ากระแส 1 A	26
5. ตารางที่ 4-3 ผลทดสอบ โปรแกรมหาค่าตัวเหนี่ยวนำ 80 mH ที่ค่ากระแส 20 A	26
6. ตารางที่ 5-1 ตารางการทดสอบความต้านทานในขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ 12 mH.6A	30
7. ตารางที่ 5-2 ตารางการทดสอบคุณสมบัติแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ 12 mH.6A	30
8. ตารางที่ 5-3 ตารางการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ 12 mH.6A	31
9. ตารางที่ 5-4 ตารางการทดสอบคุณสมบัติแกนเหล็ก 53 mH.5 A	33
10. ตารางที่ 5-5 ตารางการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 53 mH.5 A	33
11. ตารางที่ 5-6 แสดงการเปรียบเทียบการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ ระหว่าง 12 mH.5A และ 53 mH.5 A	34
12. ตารางที่ 5-7 การทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 42 mH.5 A โดยวิธี Area product	41
13. ตารางที่ 5-8 การทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 42 mH.5 A โดยวิธี Optimum design	42
14. ตารางที่ 5-9 การทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 42 mH.5 A โดยวิธี Optimum design	42
15. ตารางที่ 5-10 การทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 68 mH.5 A โดยวิธี Area product	47
16. ตารางที่ 5-11 การทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 68 mH.5 A โดยวิธี Optimum design	48
17. ตารางที่ 5-12 การทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 68 mH.5 A โดยวิธี Optimum design	48
18. ตารางที่ 5-13 แสดงการเปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ 42 mH. 5 A ที่ Minimum weight	50
19. ตารางที่ 5-14 แสดงการเปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ 42 mH. 5 A ที่ Minimum cost	51
20. ตารางที่ 5-15 แสดงการเปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ 42 mH. 5 A ที่ Minimum loss	52
21. ตารางที่ 5-16 แสดงการเปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ 42 mH. 5 A ที่ Minimum weight	53
22. ตารางที่ 5-17 แสดงการเปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ 68 mH. 5 A ที่ Minimum cost	54

ลำดับที่	หน้า
23. ตารางที่ 5-18 แสดงการเปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ 68 mH. 5 A ที่ Minimum loss	55
24. ตารางที่ 6-1 รูปร่างแกนเหล็กที่มีผลกระทบต่อช่องว่างอากาศ	56
25. ตารางที่ 6-2 แสดงขนาดของแกนเหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขของราคา	57
26. ตารางที่ 6-3 แสดงขนาดของแกนเหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขของค่าสูญเสียในแกนเหล็ก	57

## ภาคผนวก

ลำดับที่	หน้า
1. ตาราง ก-1 Gap loss coefficient	63
2. ตาราง ก-2 ค่าคงที่ของโครงสร้างแกน	68
3. ตาราง ก-3 คุณสมบัติของแผ่น laminate	69
4. ตาราง ก-4 คุณสมบัติของลวดตัวนำ	71
5. ตาราง ก-5 แผ่น laminate ชนิด EI และ EE	74
6. ตาราง ข-1 First derivative of $F(x) = 100(x_2 - x_1^2) + (1 - x_1)^2$	107
7. ตาราง ข-2 First derivative of $2x_1^2 + 2x_2^2 + x_3^2 + 2x_1x_2 - x_1x_3 - 0.8x_2x_3$	107
8. ตาราง ค-1 คุณสมบัติของวัสดุพวก Soft magnetic	142
9. ตาราง ง-1 แสดง Dimensions ของแผ่น Lamination ทั้ง 4 Style	147
10. ตาราง ง-2 Stacking factor for lamination core	149
11. ตาราง จ-1 มาตรฐานการวัด	155
12. ตาราง จ-2 อัตราส่วนความต้านทาน DC / AC	164
13. ตาราง จ-3 ความต้านทานของตัวนำ	165

# บทที่ 1

## บทนำ

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้วิธี Area product [6] และวิธีอื่นๆ โดยทั่วไปผู้ออกแบบจะไม่คำนึงถึงความเหมาะสมในการเลือกแกนเหล็ก โดยจะเผื่อขนาดของแกนเหล็กเอาไว้เพื่อให้สามารถทำการพันลวดได้ ซึ่งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองโดยใช่เหตุ เพื่อแก้ไขข้อเสียดังกล่าวเราสามารถออกแบบตัวเหนี่ยวนำให้มีขนาดที่ Optimum โดยนำหลักการ Optimization มาประยุกต์ใช้ซึ่งเนื้อหาของปริิญญาณิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 5 บท ดังนี้

**บทที่ 2** เป็นการแนะนำการออกแบบเบื้องต้นที่จำเป็นต้องใช้, แสดงแบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็ก EI และบอกข้อกำหนดของปัญหาของการออกแบบ

**บทที่ 3** หลังจากทราบการออกแบบเบื้องต้นแล้ว บทนี้จะแนะนำถึงทฤษฎีโดยทั่วไปของการ Optimization ซึ่งจะนำมาใช้ในการออกแบบ

**บทที่ 4** แสดงลำดับการทำงานของโปรแกรมโดยใช้ Flow chart เพื่อให้สามารถเข้าใจการทำงานได้ง่ายขึ้น และมีตัวอย่างแสดงรายละเอียดในการทำงานของโปรแกรม

**บทที่ 5** แสดงผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบ โดยใช้โปรแกรมเทียบกับตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยวิธี Area product

**บทที่ 6** เป็นการสรุปการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ และผลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด

## บทที่ 2

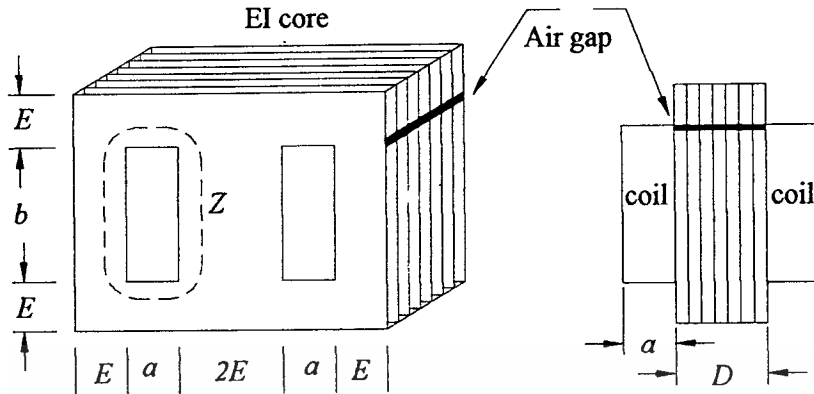
### การออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมด้วยแกนเหล็ก EI

#### 2.1 บทนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำมีอยู่หลายวิธีการเพื่อพัฒนาการสร้างความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่น Power-Converter, Power-inverter และ Pulse-width-modulated (PWM) inverter เราสามารถออกแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยปรับปรุงทางภาคปฏิบัติ ดังแสดงให้เห็นในหนังสือการออกแบบของ Mclyman [1988] เพื่อคำนวณหาข้อมูลของแกนเหล็กให้ได้ตามต้องการ เช่น iron, powder, ferrite และ ferro ซึ่งใน Catalogue จะมีตาราง, กราฟ สำหรับงานออกแบบที่ต่างๆ การปรับปรุงเหล่านี้บางครั้งอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับงานเฉพาะอย่างเพราะมันมีข้อจำกัดในการใช้ออกแบบ

ในส่วนนี้การใช้ numerical จะเหมาะสมกับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกน EI ซึ่งการเหนี่ยวนำของแกนเหล็กมีค่าสูงมาก และในการออกแบบจะสามารถปรับขนาดเหล็กได้ง่ายเพราะสามารถปรับช่องอากาศได้ตามต้องการ จุดประสงค์ของการออกแบบนี้คือ ให้น้ำหนักรวมนี้น้อยที่สุด โดยได้กำหนดให้ [4] พื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านเป็น  $A_w$  กระแสสูงสุดของขดลวดเป็น  $I_p$  และค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการเป็น  $L_d$  ค่าคงที่ควรรู้ในการออกแบบเช่น ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของแกนเหล็ก คือ  $B_{max}$  ความหนาแน่นของตัวนำไฟฟ้าคือ  $D_w$  ความหนาแน่นของแกนเหล็ก คือ  $D_i$

รูปร่างของตัวเหนี่ยวนำแกน EI (ได้แสดงในรูปที่ (2-1)) ซึ่ง  $a$  คือความกว้างของช่องว่าง  $b$  คือความยาวของช่องว่าง  $2E$  คือความกว้างของ tongue และ  $D$  คือความหนาของแกนเหล็กจุดมุ่งหมายในการออกแบบนี้คือให้ได้รูปร่างของตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมและมีน้ำหนักเบาที่สุด ดังนั้นจึงต้องหาค่า  $a, b, 2E$  และ  $D$  ด้วยวิธีต่างๆ



รูป 2-1 E-I core configuration

## 2.2 แบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำแกน EI

ค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้า ( $L$ ) จะเป็นอัตราส่วนระหว่าง จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคดล้อมทั้งหมดในขดลวด (Flux linkage) กับกระแสในขดลวด ซึ่งมีหน่วยทางไฟฟ้าเป็น เฮนรี (Henry, H) เขียนเป็นสมการได้ คือ

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} = \frac{NB_m A_w F_s}{I} \quad (2-1)$$

เมื่อกำหนดให้

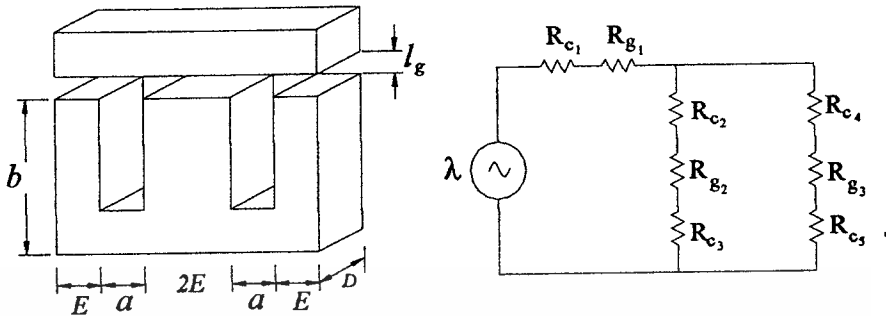
$N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

$\lambda$  คือ Flux เกี่ยวคดล้อม

$B_{max}$  คือ ความหนาแน่น Flux แม่เหล็ก

$I$  คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2-2 Magnetic circuit

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (2-2)$$

$$= \frac{N^2(\mu_1\mu_2ED)}{(2E+a+b)\mu_2 + \mu_1l_g} \quad (2-3)$$

$$= \frac{\mu_0 N^2 ED}{l_g} \quad (2-4)$$

เมื่อ  $b = 3E, a = E, \mu_1 \gg \mu_2, \mu_2 = \mu_0$

จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศ  $l_g$  กับค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) จะแปรผกผันกัน

### 2.3 ข้อพิจารณาในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกน EI

นักออกแบบจำเป็นต้องสังเกตในการออกแบบของตัวเหนี่ยวนำในส่วนของ การออกแบบมีสิ่งจำเป็นที่จะต้องพิจารณาอยู่ 2 อย่าง เพื่อให้ได้รูปร่างของตัวเหนี่ยวนำแกน EI ที่เหมาะสม คือ

- 1) ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

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

ได้เลือก Magnesil (Si 3%, Fe 97%) เป็นแกนแม่เหล็กซึ่งถูกใช้ในการออกแบบตามตารางที่ (2.1) จะสังเกตได้ว่าลักษณะเฉพาะของ Magnesil คือมีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูง และความหนาแน่นวัตต์ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2-1 ลักษณะเฉพาะของแกนแม่เหล็กไฟฟ้า

Material	Percentage	$B_{max}$ (tesla)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Magnesil	3%Si, 97%Fe	1.6	7.63
Orthonol	50%Ni, 50%Fe	1.5	8.24
48 Alloy	48%Ni, 50%Fe	1.2	8.19

## 2) พื้นที่ช่องว่าง

$$\frac{A_w N}{F_w} = ab \quad (2-6)$$

ซึ่ง  $F_w$  (Window Utilization Factor) คือ พื้นที่ช่องว่างของขดลวดที่เกิดขึ้นบนแกนเหล็กที่นำมาพัน

ปัจจัยที่มีผลมีอยู่ 4 อย่างคือ อนุวนของขดลวด, ขดลวดที่วางพาดกัน, พื้นที่กระสวย (bobbin area) และอนุวนที่ป้องกันระหว่างขดลวดที่พันกันอยู่แต่ละชั้น

ตัวอย่างของค่านี้นี้ประมาณ 0.4 ซึ่งค่านี้ทำให้แน่ใจได้ว่าค่าของประสิทธิภาพของช่องว่างแกนเหล็กเพียงพอในการพัน

## 2.4 ข้อกำหนดในการออกแบบ

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำของโปรแกรมนี จะอาศัยสมการ 2 ลักษณะอันได้แก่ สมการเป้าหมาย และ สมการเงื่อนไข ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 3

สมการเป้าหมาย (Objective Function)

ในโปรแกรมนีได้พิจารณาเป้าหมาย 3 ประการ คือ

1. น้ำหนักเบาที่สุด
2. ราคาถูกที่สุด
3. ประสิทธิภาพดีที่สุด หรือ มีการสูญเสียค่าน้อยที่สุด

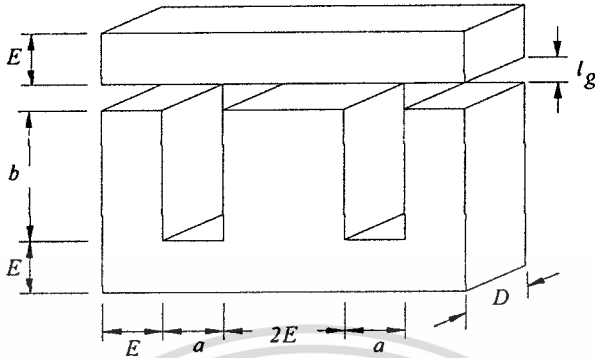
ซึ่งจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$f_{(weight)} = \text{น้ำหนักแกนเหล็ก} + \text{น้ำหนักลวดตัวนำ}$$

$$f_{(cost)} = \text{ราคาแกนเหล็ก} + \text{ราคาลวดตัวนำ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$f_{(loss)}$  = ค่าสูญเสียแกนเหล็ก+ค่าสูญเสียลวดตัวนำ  
ดังนั้น



รูป 2-3 แสดงลักษณะของแกน EI

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรแกนเหล็ก} &= 2\{(2ED)(2E+a) + (2bED)\} & (2-7) \\ &= 2(2ED)(2E+a+b) \end{aligned}$$

$$\text{น้ำหนักแกนเหล็ก} = 2D_i F_s \{2ED(2E+a+b)\} \quad (2-8)$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักลวดตัวนำ} &= A_w N D_w F_c \times (\text{เส้นรอบวงของแกนเหล็ก}) & (2-9) \\ &= A_w N D_w F_c [2(2E + D)] \end{aligned}$$

$$\text{ให้ } MLT = F_c [2(2E + D)] \quad (2-10)$$

$$\text{ดังนั้น จะได้ น้ำหนักลวดตัวนำ} = D_w N A_w (MLT) \quad (2-11)$$

เมื่อ  $D_i$  คือ ความหนาแน่นของแกนเหล็ก

$D_w$  คือ ความหนาแน่นของตัวนำ

$F_c$  คือ (Pitch factor) อัตราส่วนตัวนำต่อเส้นรอบวง

$N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด

$MLT$  คือ เส้นรอบวงเฉลี่ยของตัวนำที่พัน

$A_w$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

$F_s$  คือ stacking factor

ถ้า  $a = E$  และ  $b = 3E$  จะได้

$$Wt_{(a,b,E,D)} = [2D_i F_s (2ED)(2E + a + b)] + \{2D_w F_c F_w a b (2E + D)\} \quad (2-12)$$

$$Wt_{(E,D)} = [24 D_i F_s E^2 D] + [6 D_w F_c F_w E^2 (2E + D)] \quad (2-13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันจะได้

$$\begin{aligned} f_{(weight)} &= \text{น้ำหนักแกนเหล็ก} + \text{น้ำหนักลวดตัวนำ} \\ &= [24 D_i F_s E^2 D] + [6 D_w F_c F_w E^2 (2E D)] \end{aligned} \quad (2-14)$$

$$\begin{aligned} f_{(cost)} &= (\text{ราคาแกนเหล็กต่อน้ำหนัก} \times \text{น้ำหนักเหล็ก}) + \\ &\quad (\text{ราคาลวดทองแดงต่อน้ำหนัก} \times \text{น้ำหนักลวดทองแดง}) \\ &= [C_{core} \times (24 D_i F_s E^2 D)] + [C_{copper} \times \{6 D_w F_c F_w E^2 (2E D)\}] \end{aligned} \quad (2-15)$$

$$\begin{aligned} f_{(loss)} &= (\text{กระแสยกกำลังสอง} \times \text{ความต้านทานลวดทองแดง}) + \\ &\quad (\text{กำลังสูญเสียค่อน้ำหนัก} \times \text{น้ำหนักเหล็ก}) + \text{ค่าสูญเสียที่ช่องอากาศ} \\ &= I^2 R + [P_{core} \times (24 D_i F_s E^2 D)] + P_{gap} \end{aligned} \quad (2-16)$$

เมื่อ

$C_{core}$  คือ ราคาของแกนเหล็กต่อกิโลกรัม

$C_{copper}$  คือ ราคาของลวดตัวนำต่อกิโลกรัม

$P_{core}$  คือ ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก

$P_{gap}$  คือ ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก

**สมการเงื่อนไข (Constrain Function)**

จากสมการ (2-5) และ (2-6) เราสามารถกำจัดตัวแปร  $N$  ได้ คือ

$$N = \frac{LI}{B_{\max} A_m F_s} = \frac{abF_s}{A_c} \quad (2-17)$$

$$\frac{B_{\max} A_m F_s abF_s}{A_c} - LI = 0 \quad (2-18)$$

$$\frac{B_{\max} (2ED) 3E^2 F_w F_s}{A_c} - LI = 0 \quad (2-19)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ inequality constraint คือ

$$\frac{B_{\max} F_s F_w D 6E^3}{A_c} - LI = 0 \quad (2-20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0.002 < E < 0.3 \quad (2-21)$$

$$0.0005 < D < 0.3 \quad (2-22)$$

โดยที่ค่า  $D$  และค่า  $E$  จะกำหนดให้อยู่ในช่วง Feasible เพื่อให้สามารถหาซื้อแกนเหล็กได้ตามท้องตลาด

## 2.5 หลักการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยทั่วไป

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductor Design) สิ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบก็คือ การเลือกอุปกรณ์

1. ชนิด ลักษณะ โครงสร้าง และ ขนาดของแกนเหล็ก
2. ชนิด รูปร่าง ขนาด และ จำนวนรอบที่ใช้ในการพันของลวดตัวนำ
3. ชนิด และ ลักษณะของฉนวน
4. ลักษณะ โครงสร้างของ case ตลอดจนการระบายความร้อน
5. คุณสมบัติทางไฟฟ้า และ เชิงกลอื่นๆ

### ข้อกำหนด

1. ค่าความเหนี่ยวนำ
2. ขนาดและรูปร่างรวมทั้งความถี่ของกระแสแรงดัน
3. กำลังสูญเสีย ประสิทธิภาพ หรือ อุณหภูมิเพิ่ม ( $T_{rise}$ )
4. คุณสมบัติทางไฟฟ้า และ เชิงกลอื่นๆ

### ขีดจำกัด

1. ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก
2. กำลังสูญเสียในลวดทองแดงหรือแกนเหล็ก
3. คุณสมบัติอื่นๆ เช่น Permeability ( $\mu$ ), Break down voltage ( $V_b$ )

### สมการของการออกแบบ

จากขีดจำกัดของแกนแม่เหล็ก (Saturation or Coreloss)

$$B_{max} = \frac{\phi_{max}}{S} = \frac{\lambda_{max}}{S.N} = \frac{LI_{peak}}{S.N} \quad (2-23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ:  $\frac{LI_{peak}}{S.N}$  ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 1. สนามแม่เหล็กแปรตามกระแส  $\phi_{max} = \frac{LI_{peak}}{N}$  (2-24)  
 2. ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k.W = N.A_w \text{ จีคจํากัดของหน้าตําง } ; k = 0.3 - 0.9 \quad (2-25)$$

จากจีคจํากัดของลวดทองแดง โดยคํานึงถึงการสูญเสีย (Cu loss :  $P_{cu}$ )

$$P_{cu} = I_{rms}^2 \cdot R \quad (2-26)$$

$$R = \frac{\rho l}{A_w} \quad (2-27)$$

$$J = \frac{I_{rms}}{A_w} \quad (2-28)$$

โดยที่  $J = 100 - 1000 \text{ (A/cm}^2\text{)}$   
 $P = 1.724 \times 10^{-8} \text{ (}\Omega\text{-m)}$

จากคุณสมบัติของวงจรแม่เหล็กและตัวเหนี่ยวนำ

$$L = N^2 P_c = \frac{N^2}{R_c} \quad (2-29)$$

$$R_c = R_m + R_g ; R_g = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot S} \quad (2-30)$$

$$l_g = \frac{N^2 \mu_0 \cdot S}{L} \quad (2-31)$$

## 2.5.1 การออกแบบโดยใช้วิธีการคำนวณแบบ Area product (รายละเอียดดูภาคผนวก ก)

## 2.5.2 การออกแบบ inductor โดยทั่วไป

ในการออกแบบ inductor เราจะต้องกำหนดค่าหรือทราบค่าดังต่อไปนี้

1. ค่ากระแสที่ต้องการใช้งาน ( $A$ )
2. ค่า inductor ที่ต้องการในการออกแบบ ( $L$ )

ขั้นตอนในการออกแบบ

### 1. หาค่าของโวลต์เตจ จากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก  $V = 2\pi f L I$  และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้ (2-32) ใช้

2. หาค่าพื้นที่หน้าตัด ( $A_i$ ) และขนาดของแกนเหล็ก ( $2I$ ) โดยนำค่า  $V$  จากข้อ 1. และค่า กระแส ( $A$ ) ที่กำหนดมาแทนในสูตร

$$A_i = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} \quad (2-33)$$

$$(2I) = \sqrt{A_i} \quad (2-34)$$

โดยที่  $A_i$  พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีหน่วยเป็นตารางนิ้ว  
( $2I$ ) มีหน่วยเป็นนิ้ว

3. หลังจากนั้นนำค่าโวลต์เตจที่ได้จากข้อ 1. และพื้นที่หน้าตัด ( $A_i$ ) จากข้อ 2. ไปหาจำนวนรอบของลวด ( $N$ ) ที่ใช้ในการพัน จากสูตร

$$V = 4.44 f N B A_i \times (2.54)^2 \times 10^{-4} \quad (2-35)$$

4. หาขนาดของลวดที่ใช้ในการพัน ( $A_w$ ) จากสูตร

$$A_w = \frac{I}{J} \quad (2-36)$$

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

$A_w$  คือ พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำ มีหน่วยเป็น ( $mm^2$ )

$I$  คือ กระแส มีหน่วยเป็น (A)

5. จากนั้นจึงมาหาค่าพื้นที่หน้าตัดรวมของลวด ( $A_{w(total)}$ ) จากสูตร

$$A_{w(total)} = N \times A_w \quad (2-37)$$

โดยที่  $A_{w(total)}$  มีหน่วยเป็น  $mm^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. หาค่าพื้นที่ใช้งานจริงหรือเรียกว่าพื้นที่หน้าตัด ( $A_R$ ) จากสูตร

$$A_R = (31) \times (1) \times 25.4^2 \quad (2-38)$$

โดยที่  $A_R$  มีหน่วยเป็น  $\text{mm}^2$

7. ตรวจสอบพื้นที่หน้าตัดรวมของลวด ( $A_{w(total)}$ ) และพื้นที่ใช้งานจริง ( $A_R$ ) ว่าสามารถพันลวดลงไปได้ หรือไม่จากเงื่อนไข

$$(A_{w(total)}) < 0.5 (A_R) \quad (2-39)$$

หมายเหตุ : ถ้าหากตรวจสอบแล้วไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจะต้องปรับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ( $A_i$ ) โดยที่เรา fix ขนาดของแกนเหล็ก ( $2I$ ) และเปลี่ยนความหนาของแกนเหล็กเพิ่มขึ้นแทน แล้วกลับไปคำนวณหาจำนวนรอบ ( $N$ ) ตามข้อ 3. เสียใหม่ โดยแทนค่า ( $A_i$ )<sub>new</sub> ในสูตรแทนและทำตามขั้นตอนต่อไป

8. หาค่าของช่องว่างอากาศ ( gap ) จากสูตร

$$g = \frac{N^2 \mu_0 A_i}{2L} \quad (2-40)$$

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม

#### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการของการ Optimization ซึ่ง หลักการ Optimization จะมีอยู่ 2 วิธีการดังนี้

1. Linear programming
2. Non-linear programming

ซึ่ง โปรแกรมที่ใช้เขียนจะใช้หลักการของ Non-linear programming เพียงอย่างเดียว เพราะฉะนั้นในส่วนของ Linear programming จะไม่ขอกล่าวถึง

Non-linear programming โดยจะมีอัลกอริทึมดังแสดงในรูป 3-1 และได้พูดถึงทฤษฎีต่างๆ ที่จะต้องใช้ เช่น การหาค่า gradient ซึ่งใช้วิธี Finite Difference Approximation การ optimization โดยการแปลงให้อยู่ในรูป unconstrained, ทฤษฎีในการหาทิศทาง , ทฤษฎี Conjugate Gradient , ทฤษฎี Variable Metric และยังได้กล่าวถึงทฤษฎี Transformation ในการแก้ปัญหาในกรณีที่เงื่อนไขมีลักษณะเป็น non-linear โดยจะทำการเปลี่ยนรูปของ objective และ constraint functions ซึ่งมีเทคนิคต่างๆ ดังนี้ เทคนิคแรกคือ Sequential Unconstrained Minimization ซึ่งแบ่งได้อีก 3 วิธี คือ

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

เทคนิคที่สองคือ Augmented Lagrangian Multiplier Method ซึ่งเทคนิคนี้จะไม่ได้นำมาใช้ในการทำ Project นี้ ซึ่งสามารถศึกษาได้จากหนังสือที่เกี่ยวกับ Optimization [4, 7, 11]

#### 3.2 General Optimization Statement

โดยมาจากการออกแบบการแก้ปัญหของ Optimization สามารถจัดให้อยู่ในสูตรทางคณิตศาสตร์ของเงื่อนไขทั่วไปการ Optimization ได้ตามนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนบุคคลเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยประการ  
Minimise  $F(x)$  objective function (3-1)  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Subject to

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

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

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

เมื่อ  $X=(X_1, \dots, X_n)$  เป็น vector ของการออกแบบตัวแปร (design variable) และ side constraints เป็นขอบเขตที่ชัดเจนของการออกแบบตัวแปร  $x_i^L$  และ  $x_i^U$  โดยเป็นค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของขอบเขตตามลำดับ

ฟังก์ชันหลัก (Objective function) และฟังก์ชันเงื่อนไข (constraint functions) อาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้ ในการออกแบบตัวแปร  $x$  ฟังก์ชันเหล่านี้จะทราบค่า  $x$  อย่างแน่นอนหรือรู้เป็นนัยและต้องการค่าโดยการใช้เทคนิค analytical หรือ numerical วิธีแบบ numerical ซึ่งสามารถหาค่าได้ถ้ามีเงื่อนไขในการเท่ากัน (equality constraints) เป็นจำนวน  $m$  และจะต้องรู้ค่า  $x$  อย่างแน่นอน ซึ่งเป็นไปได้ที่จะใช้เงื่อนไขในการเท่ากันเหล่านั้นเพื่อที่จะลดตัวแปรที่ออกแบบ หลังจากนั้นปัญหาจะถูกลดลงเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไข ด้วยตัวแปรไม่ทราบค่า  $n - m$  ตัวเงื่อนไขขอบเขตในสมการที่ (3-4) ถูกกำหนดให้เป็นขอบเขตของตัวแปรที่ออกแบบเพื่อที่จะป้องกันจากการเข้าสู่ค่าที่เป็นไปไม่ได้ทางกายภาพ (non - physical values) รูปแบบที่แสดงไว้ในสมการที่ (3-1) ถึง (3-4) ไม่ได้แสดงไว้ในรูปแบบเดียว ยกตัวอย่างเช่นปัญหาที่ต้องจัดอยู่ในรูปค่าสูงสุด (maximization) สามารถจัดใหม่โดยการทำ สมการที่ (3-1) เปลี่ยนเป็น  $-F(x)$  และยังขึ้นอยู่กับสมการเงื่อนไขเดิมในสมการที่ (3-2) ถึง (3-4)

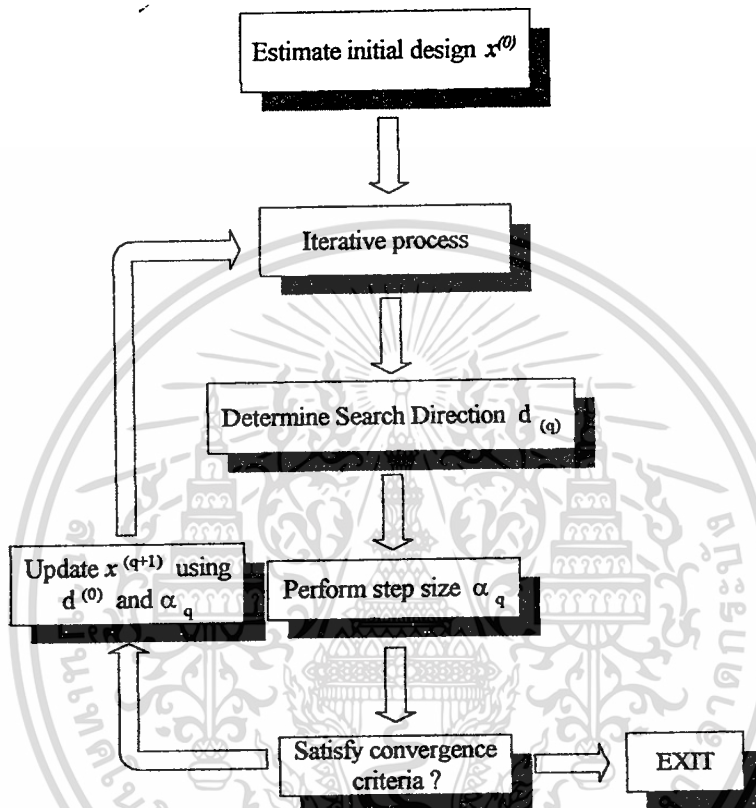
ปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขอาจกำหนดจากสมการที่ (3-1) โดยปราศจากเงื่อนไขในการหาตัวแปร  $x$  ดังเช่นปัญหาที่ไม่ได้ใช้ในการปฏิบัติจริงทางวิศวกรรม ปัญหาที่มีเงื่อนไขด้วยเงื่อนไขในการเท่ากันอาจจะถูกแปลงไปเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไข โดยการลดจำนวนของตัวแปรที่ออกแบบลง บางทีปัญหาที่มีทั้งเงื่อนไขในการเท่ากันและไม่เท่ากันสามารถแก้ไขเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขโดยใช้ทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (Transformation Method) เพราะฉะนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะเข้าใจอย่างเพียงพอเกี่ยวกับทฤษฎี unconstrained Optimization

แผนผังทั่วไปของอัลกอริทึม Optimization แสดงในรูปที่ (3-1) กระบวนการของ Optimization ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 3 ขั้นตอน

### 1. การดำเนินการหาทิศทางของ vector $|d|$ ใน space

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสำนักพิมพ์วิศวกรรมไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระทำการค้นหาหาระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทาง vector  $|d|$  โดยการกำหนดทีละขั้น (Step size)
3. แสดงผลได้เมื่อกระบวนการมีการพุ่งเข้ามาหาค่าที่ยอมรับได้



รูป 3-1 แผนผังแสดงอัลกอริทึมของการ Optimization

โดยมากอัลกอริทึม Optimization จะมีการเซตค่าเริ่มต้นของการออกแบบตัวแปร  $(x^{(0)})$  จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากจุดเริ่มต้นและ update ค่าโดยการออกแบบข้อมูลซ้ำๆ ดังรูปแบบนี้

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

เมื่อ  $q$  เป็นจำนวนการทำซ้ำ อยู่ในส่วนที่ติดตามในในอัลกอริทึมต่างๆ ใช้สำหรับแสดงผลสถานะปัจจุบันของการค้นหาทิศทางของ vector  $|d|$  และ Step size  $\alpha$  (รายละเอียดเพิ่มเติมดูภาคผนวก ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

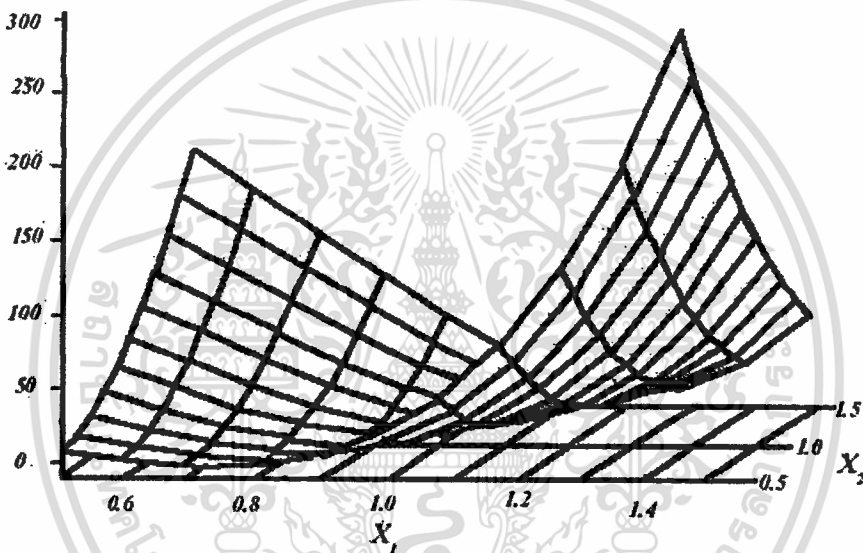
## ตัวอย่าง Numerical

ปัญหาทดสอบ I

ตัวอย่างที่เลือกมาทดสอบคือ Rosenbrock's function

$$\text{Minimise } F(x) = 100(x_2 - x_1^2) + (1 - x_1)^2 \quad (3-6)$$

ค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนี้จะอยู่ที่จุด  $[1, 1]^T$  ซึ่งเป็นรูป banana-shaped เทคนิคของ unconstrained method ทั้ง 3 ถูกเลือกเพื่อมาแก้ปัญหานี้ โดยมีจุดเริ่มต้นที่  $[0.6, 0.6]^T$



รูป 3-2 Rosenbrock's function

ตาราง 3-1 การแสดงคำตอบต่างๆ ของ Rosenbrock's function

ที่แก้ปัญหามาโดยใช้วิธี POWELL, PR และ BFGS

	Method				
	POWELL	PR (FD)	PR (AD)	BFGS (FD)	BFGS(AD)
$F(x^{(0)})$	5.9200	5.9200	5.9200	5.9200	5.9200
$F(x^*)$	1.15-4E-07	1.06E-07	4.28E-09	1.94E-07	4.28E-09
$x_1^*$	0.99977	0.99969	0.99998	1.00003	0.99998
$x_2^*$	0.99957	0.99940	0.99995	1.00001	0.99995
$N_f$	230	343	113	245	128
$N_I$	7	11	10	8	10

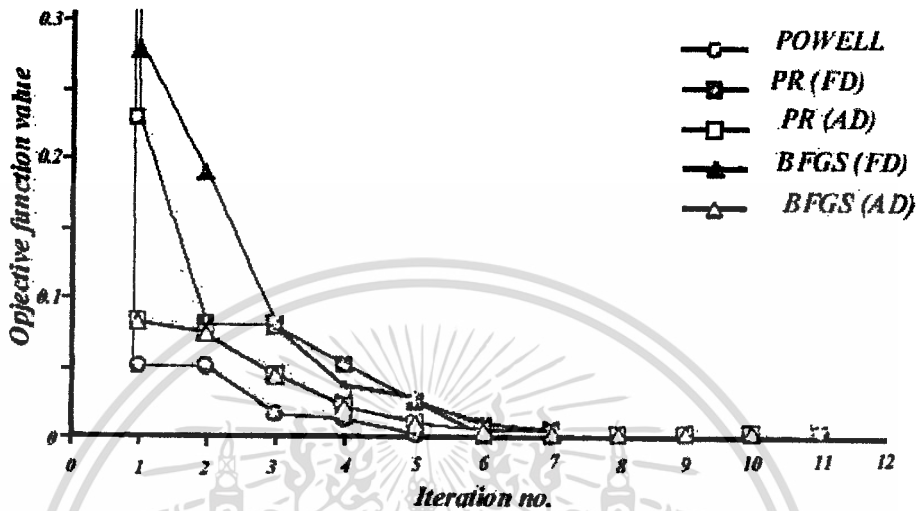
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาขอ

หมายเหตุ FD: finite difference approximations

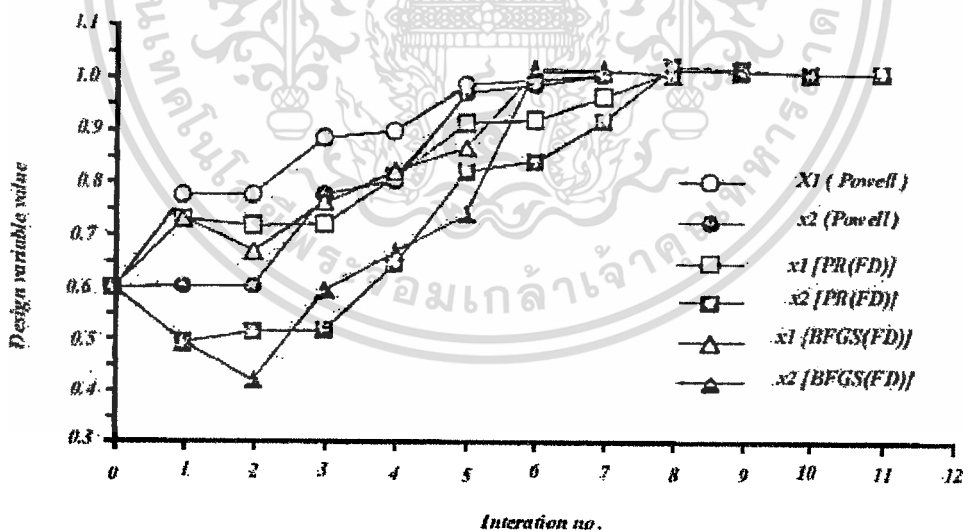
$N_i$  : number of iterations

$N_f$  : number of function evaluations

AD: analytical first derivatives



รูป 3-3 Performance of the Rosenbrock 's function using unconstrained minimization methods



รูป 3-4 Iterative process of design variable using unconstrained minimization methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

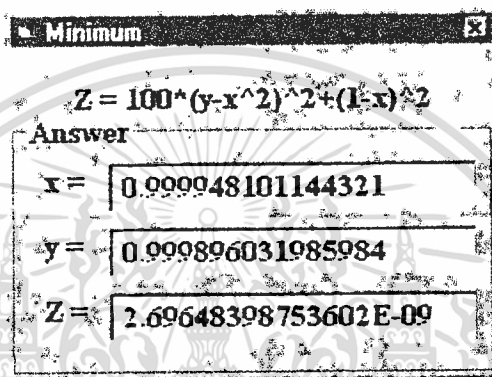
ตัวอย่างการทดสอบโปรแกรม

ตัวอย่างที่ 1

เลือก Function เดียวกับสมการ 3-27 คือ

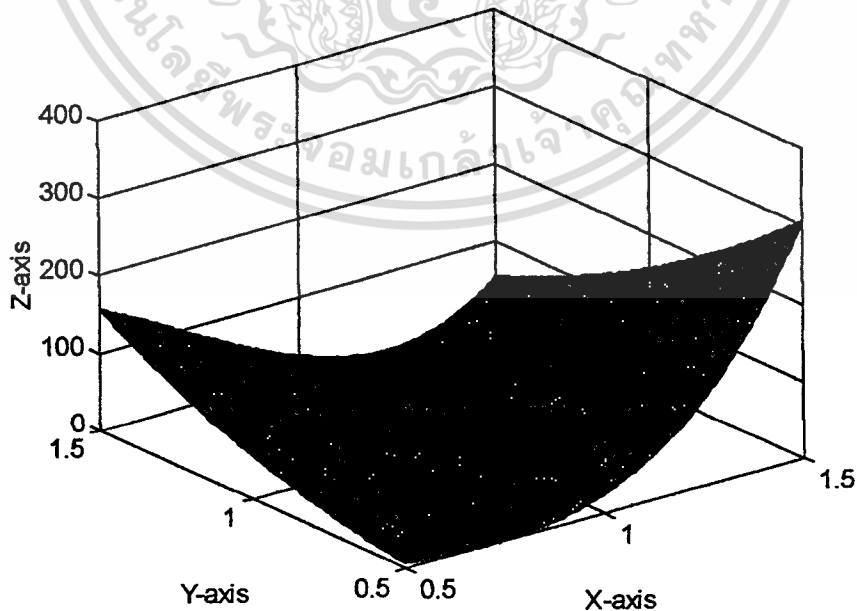
$$\text{Minimise } Z(x, y) = 100(y - x^2)^2 + (1 - x)^2$$

จะได้ผลการทดสอบดังนี้

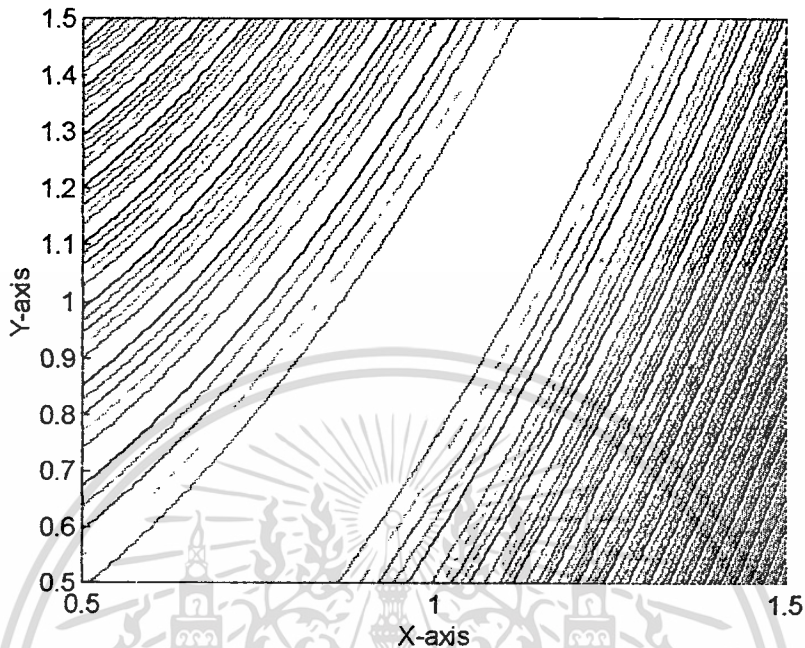


รูปที่ 3-5 แสดงค่าค่าสุดโดยวิธี Numerical Optimization Techniques

เมื่อใช้ โปรแกรม MATLAB จะแสดงได้ดังรูป 3-6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3-6 a แสดงค่า Function ในรูป 3 มิติ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

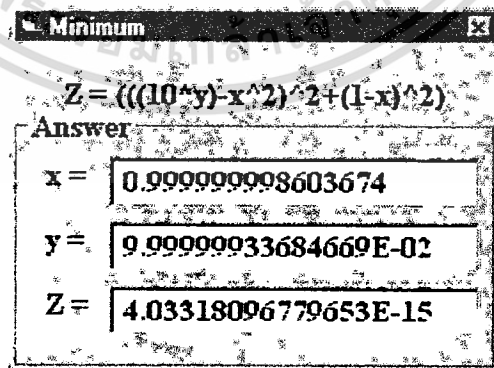


รูปที่ 3-6 แสดง Contour ของ Function

ตัวอย่างที่ 2

Minimise  $Z(x, y) = (10y - x^2)^2 + (1 - x)^2$

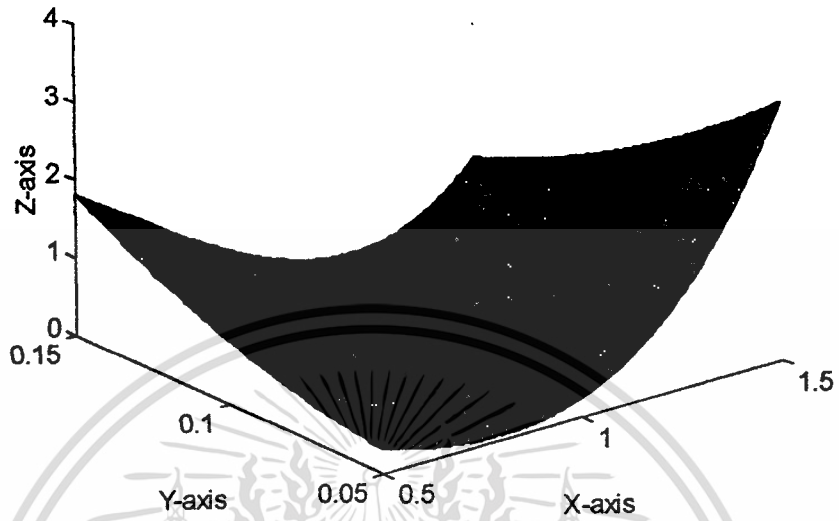
จะได้ผลการทดสอบดังนี้



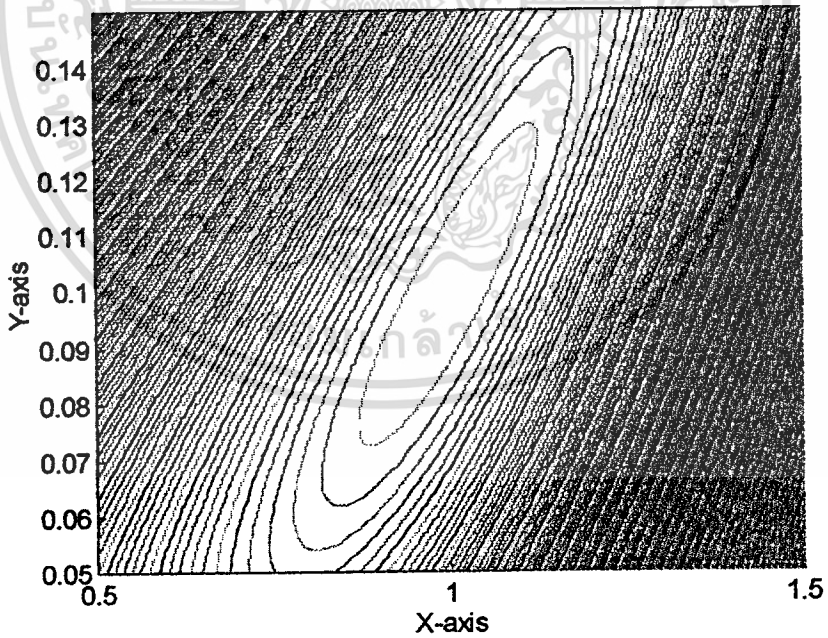
รูปที่ 3-7 แสดงค่าต่ำสุดโดยวิธี Numerical Optimization Techniques

เมื่อใช้ โปรแกรม MATLAB จะแสดงได้ดังรูป 3-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-8 a แสดงค่า Function ในรูป 3 มิติ



รูปที่ 3-8 b แสดง Contour ของ Function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทำงานของโปรแกรมในการหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสม

โปรแกรมที่ออกแบบนี้ใช้หลักการวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Techniques) ของการหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสม โดยจะนำมาประยุกต์ใช้กับฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นได้

ในการออกแบบเขียนโปรแกรมจำเป็นต้องมีแผนผังของการดำเนินงาน เพื่อให้เข้าใจการทำงานได้ง่าย และสะดวกต่อการเขียนโปรแกรม

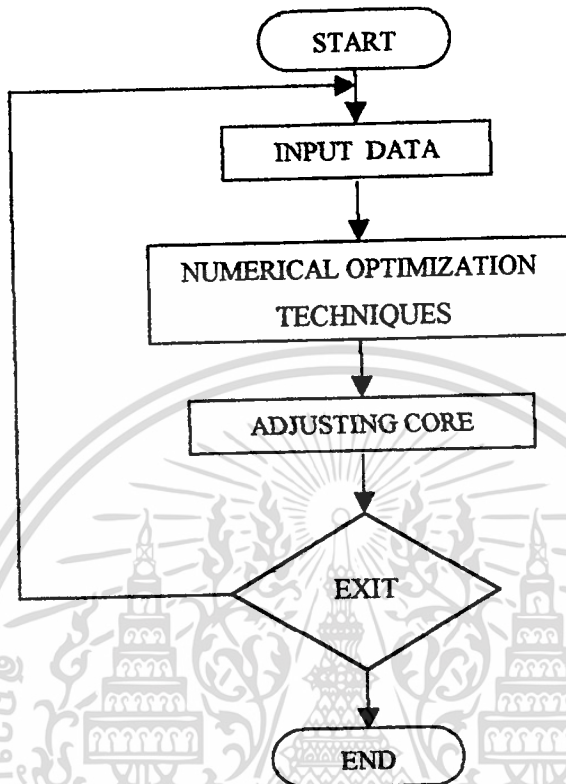
การทำงานของโปรแกรมแบ่งได้ 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะหาค่าที่เหมาะสมจริงตามเป้าหมาย (Objective) ที่เราเลือกไว้ และในส่วนที่สองจะหาค่าที่เหมาะสมในส่วนของทางปฏิบัติเนื่องจากแกนเหล็กที่จะทำการพันลวดมีขนาดตามมาตรฐาน แต่จะเป็นสาเหตุให้ค่าที่ได้แปรเปลี่ยนไปเนื่องจากโปรแกรมนี้หาค่าเหมาะสมมาจากพื้นที่หน้าตัด ( $A_m$ )

ในส่วนรับข้อมูล (Input process) จะรับค่าตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) กระแส (Current) ค่าความหนาแน่นของกระแส (Current density) และอื่นๆ ซึ่งอาจได้มาจากการทดลอง แคลคูล็อก หนังสือ หรือ ตามท้องตลาด มาเป็นข้อมูล หากไม่มีก็จะมี Default ไว้ให้

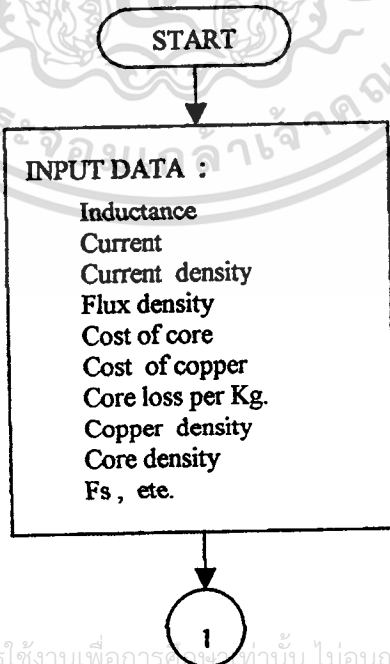
ในส่วนของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม (Optimum process) จะนำข้อมูลที่ได้ออกไปหาค่าที่เหมาะสมตามเป้าหมาย และแสดงออกมาโดยมีรายละเอียดต่างๆ

ในส่วนการปรับแกน (Adjust value process) ค่าที่ออกมาอาจไม่มีขายในท้องตลาด จึงต้องทำการปรับแกน และจะแสดงค่าเปรียบเทียบกับค่าที่ Optimum ในการปรับแกนควรปรับแกนให้ได้ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุด

#### 4.1 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรม

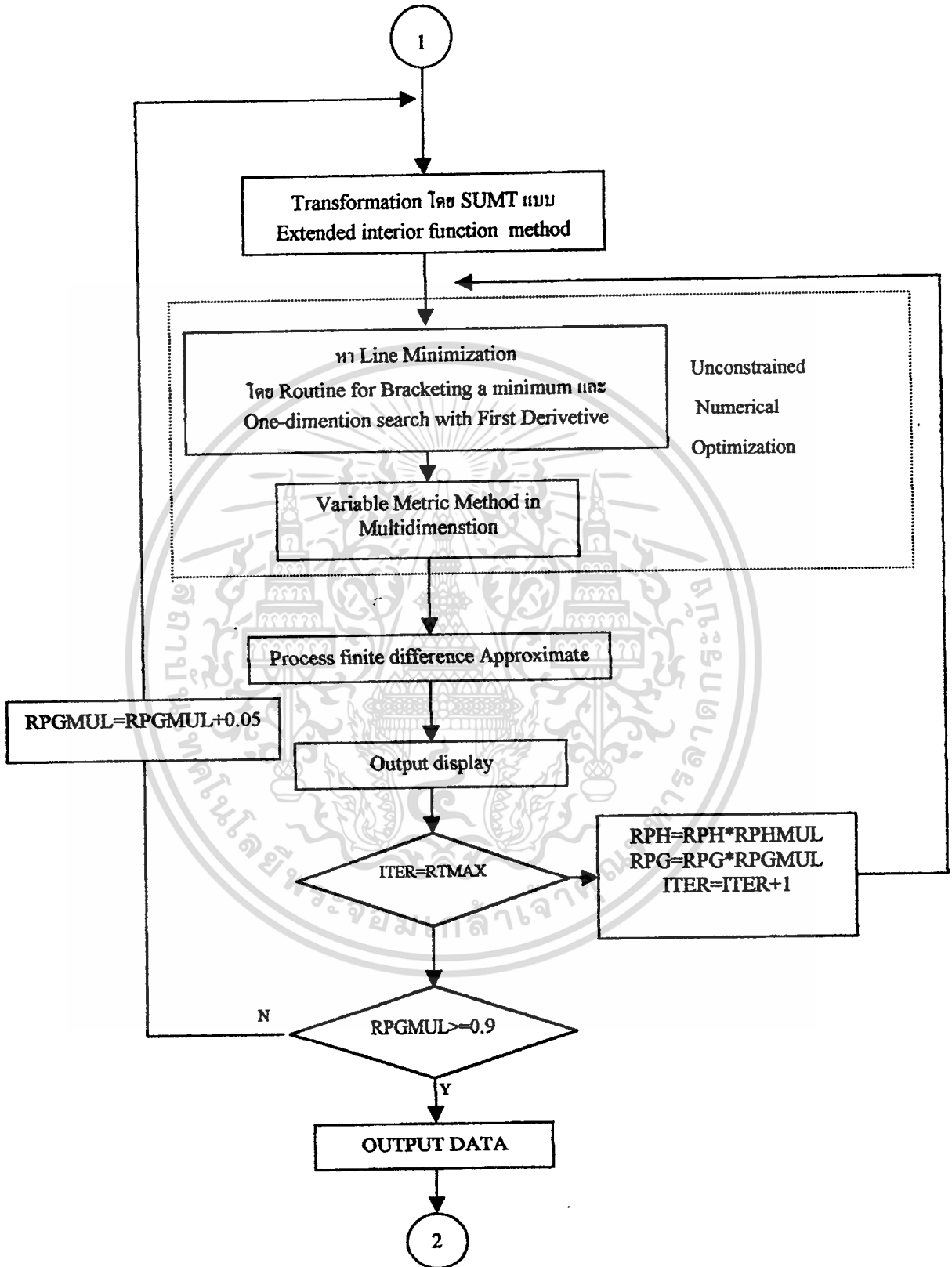


รูปที่ 4-1 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรม

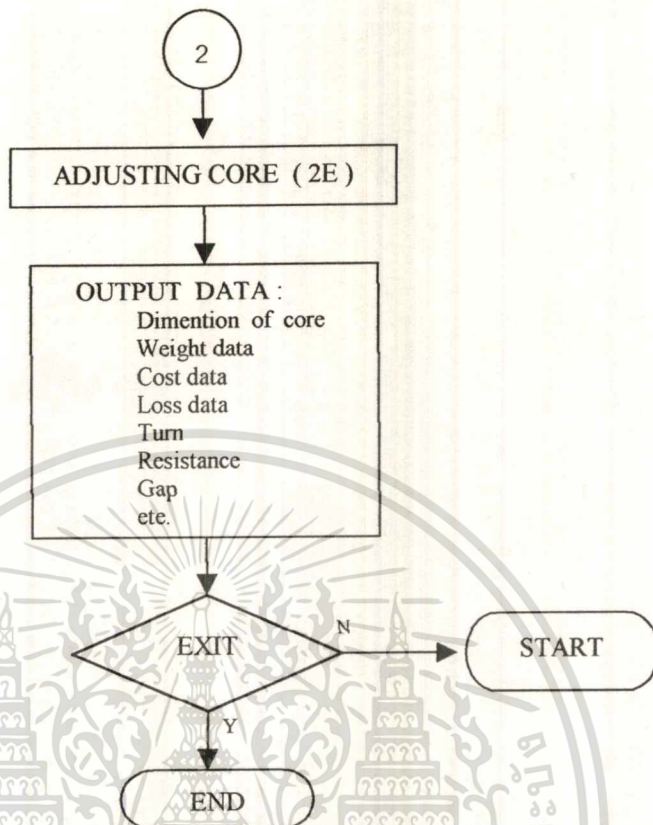


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงข้อมูลหรือข้อมูลใดๆ ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-2 รายละเอียดของ INPUT DATA

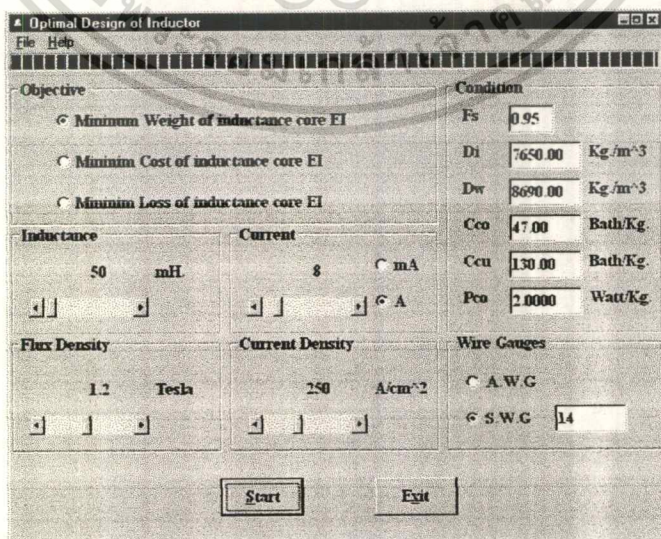


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4-3 แผนภูมิแสดงการทำงานของ NUMERICAL OPTIMIZATION TECHNIQUES การการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-4 รายละเอียดของ OUTPUT DATA

#### 4.2 หน้าจอการทำงานของโปรแกรมการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบรูปที่ 4-5 หน้าจอรับข้อมูล เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optimum of Inductor

Mode Minimum Weight

Dimension		Detail		Detail	
2E	4.944 cm	N	260.982 Turn	Ldt	0.05000 H
D	3.846 cm	Lg	1.546 mm	Ipt	8.000 A
a	2.472 cm	Lt	66.146 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	0.950
Wt	5.963 Kg	Pt	47.762 Watt	Fc	1.442
Wi	4.099 Kg	Pco	8.198 Watt	Fw	0.462
Ww	1.864 Kg	Pcu	22.505 Watt	Bmax	1.200 Tesla
Cost		Pgp	17.060 Watt	SWG	14
Ct	434.981 Bath				
Cco	192.646 Bath				
Ccu	242.335 Bath				

Change core    Exit    Picture

รูปที่ 4-6 หน้าจอแสดงข้อมูลก่อนปรับแกน

Change of core

Change core with automatic

Change core with manual

Next

Change value E

value 2E (old) 4.944 cm

value 2E (new) 5.086 cm

OK

รูปที่ 4-7 หน้าจอการปรับแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Change core of Inductor

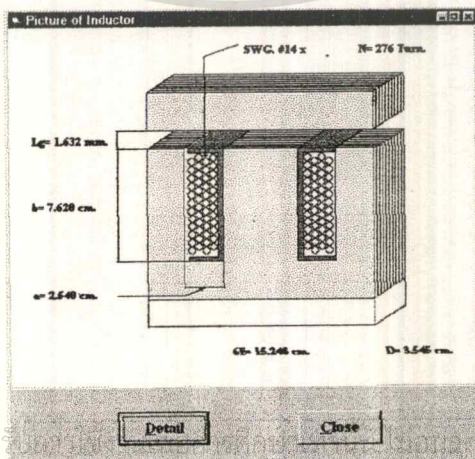
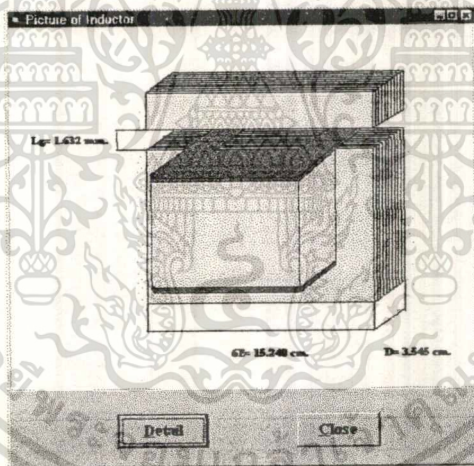
Mode

Minimum Weight

Dimension		Detail		Detail	
2E	5.080 cm	N	275.554 Turn	Ldt	0.05000 H
D	3.545 cm	Lg	1.632 mm	Ipt	8.000 A
a	2.540 cm	Lt	68.931 m	Jt	250.000 A/cm <sup>2</sup>
b	7.620 cm	Rt	0.366 ohm	Act	3.243 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Fst	0.950
Wt	5.932 Kg	Pt	49.939 Watt	Fct	1.450
Wi	3.980 Kg	Peo	7.078 Watt	Fwt	0.462
Ww	1.943 Kg	Pcu	23.452 Watt	Bmax	1.200 Tesla
Cast		Pcp	18.508 Watt	SWG	14
Ct	440.021 Bath				
Cco	187.483 Bath				
Ccu	252.538 Bath				

Man Exit Picture

รูปที่ 4-8 หน้าจอแสดงข้อมูลหลังปรับแกน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ให้พนักงาน... หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-9 หน้าจอแสดงโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำ

### 4.3 ผลที่ได้จากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

จากการทดสอบ โปรแกรม เพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ และกระแสที่ค่าต่างๆ จะสรุปได้ดังนี้

1. หากเราเลือกเป้าหมาย Minimum weight เราจะได้ตัวเหนี่ยวนำที่มีน้ำหนักต่ำสุด
  2. หากเราเลือกเป้าหมาย Minimum cost เราจะได้ตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาต่ำสุด
  3. หากเราเลือกเป้าหมาย Minimum loss เราจะได้ตัวเหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพสูงสุด
- สำหรับผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4-1, 4-2, และ 4-3

L=20 mH I=10 A	ผลที่ได้		
	Weight(Kg.)	Cost(Bath)	Loss(Watt)
Minimum weight	<b>5.271</b>	393.500	31.044
Minimum cost	5.529	<b>371.885</b>	24.973
Minimum loss	6.226	385.938	<b>22.174</b>

ตารางที่ 4-1 ผลทดสอบ โปรแกรมหาค่าตัวเหนี่ยวนำ 20 mH ที่ค่ากระแส 10 A

L=10 mH I=1 A	ผลที่ได้		
	Weight(Kg.)	Cost(Bath)	Loss(Watt)
Minimum weight	<b>0.096</b>	7.135	0.597
Minimum cost	0.102	<b>6.731</b>	0.465
Minimum loss	0.121	7.276	<b>0.412</b>

ตารางที่ 4-2 ผลทดสอบ โปรแกรมหาค่าตัวเหนี่ยวนำ 10 mH ที่ค่ากระแส 1 A

L = 80 mH I = 20 A	ผลที่ได้		
	Weight(Kg.)	Cost(Bath)	Loss(Watt)
Minimum weight	<b>40.694</b>	3048.104	252.999
Minimum cost	43.601	<b>2857.142</b>	189.023
Minimum loss	47.986	2974.603	<b>67.534</b>

ตารางที่ 4-3 ผลทดสอบ โปรแกรมหา ค่าตัวเหนี่ยวนำ 80 mH ที่ค่ากระแส 20 A

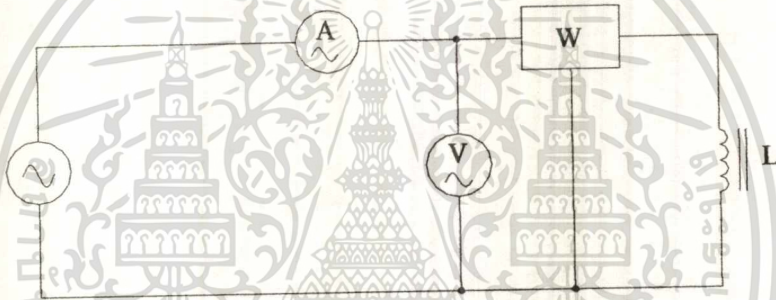
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 การทดสอบตัวเหนี่ยวนำ

ในบทนี้จะกล่าวการทดสอบ คุณสมบัติของแกนเหล็ก การหาค่าความเหนี่ยวนำ การสร้างตัวเหนี่ยวนำเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรมซึ่งได้ทำการปรับแกน และสร้างตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากโปรแกรมซึ่งได้ทำการปรับแกน เทียบกับวิธีการของ Area Product

### 5.1 การหาค่าคุณสมบัติของแกนเหล็ก

การทดสอบนี้ เพื่อจะหาค่าของ B-H curve ของแกนเหล็ก และ core loss curve



รูปที่ 5-1 วงจรทดสอบคุณสมบัติของแกนเหล็ก

ต่อวงจรดังรูปที่ 5.1 ทำการปรับค่าแรงดัน ที่เครื่องปรับระดับแรงดันไฟฟ้า บันทึกค่าแรงดัน กระแส และ กำลังงาน ที่ค่าต่างๆจนแกนเหล็กอิ่มตัว นำค่าที่ได้มาหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) จากสูตรที่ (5-1)

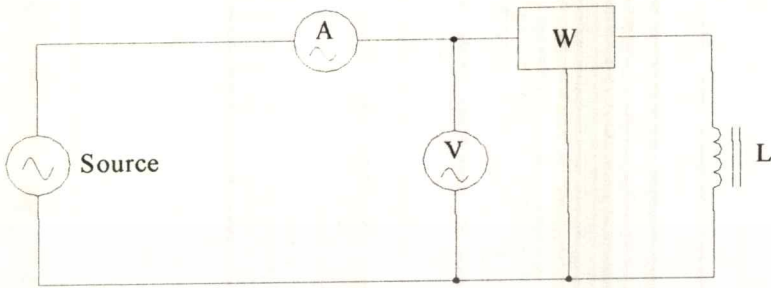
$$V = 4.44 f N B A_m F_s \quad (5-1)$$

หาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) จากสูตร(5-2)

$$H_{av} = N I \quad (5-2)$$

เอกสารนี้เป็น และค่าที่ได้จากวัดคัมมิเตอร์ นั้นจะประมาณเป็น core loss เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การหาค่าตัวเหนี่ยวนำ



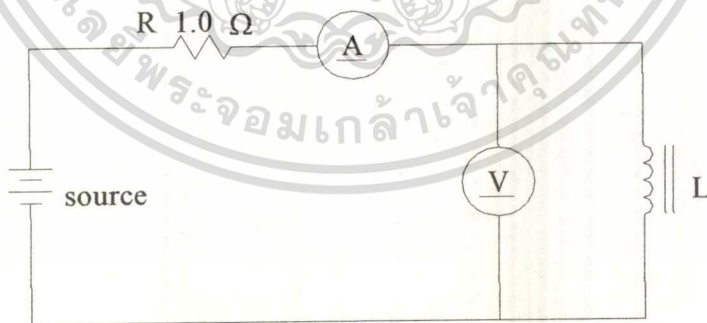
รูปที่ 5-2 วงจรทดสอบในการหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

ต่อวงจรดังรูปที่ 5.2 ทำการปรับค่าแรงดัน ที่เครื่องปรับระดับแรงดันไฟฟ้า บันทึกค่าแรงดัน กระแส และ กำลังงานที่ค่าต่างๆจนแกนเหล็กอิ่มตัว นำค่าที่ได้มาหาค่าตัวเหนี่ยวนำจากสูตรที่ (5-3)

$$V = 2\pi f L I$$

(5-3)

## 5.3 การหาค่าความต้านทานในขดลวด



รูปที่ 5-3 วงจรทดสอบในการหาค่าความต้านทานในขดลวด

ทำการปรับค่าแรงดัน ที่เครื่องปรับระดับแรงดันไฟฟ้า บันทึกค่าแรงดัน กระแส บันทึก ประมาณ 5 ค่าอย่างต่ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ยหาค่าความต้านทานในขดลวด จากสูตรที่ (5-4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (5-4) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 ผลการทดสอบตัวต้นแบบ

### 5.4.1 การสร้างตัวเหนี่ยวนำ 12 mH ที่กระแส 6 A

#### ข้อมูลตามโปรแกรม

จากข้อมูลภาคผนวก ฉ. เลือกค่าความหนาแน่นของแกนเหล็กคือ 1 Tesla จะได้ ค่าสูญเสียในแกนเหล็กเท่ากับ 1.4 วัตต์ต่อกิโลกรัม

**Optimum of Inductor**

Exit  
Mode

Minimum Weight

Dimension	Detail	Detail	Detail
2F 4.132 cm	N 158.124	Trun Ldt 0.01200 H	
D 1.640 cm	Lg 0.843 mm	Ipt 6.000 A	
a 2.066 cm	Lt 2.7384 m	Jt 200.000 A/cm <sup>2</sup>	
b 6.199 cm	Rt 0.156 ohm	Act 3.243 mm <sup>2</sup>	
Weight	Loss	Fs 0.950	
Wt 1.992 Kg	Pt 12.708 Watt	Fc 1.500	
Wi 1.221 Kg	Pco 1.710 Watt	Fw 0.400	
Ww 0.771 Kg	Pcu 5.598 Watt	Bmax 1.000 Tesla	
Cost	Pgp 5.400 Watt	SWG 14 x 1	
Ct 157.632 Bath			
Cco 57.406 Bath	Change core	Exit	Picture
Ccu 100.226 Bath			

รูปที่ 5-4 ข้อมูล Optimum ที่ตัวเหนี่ยวนำ 12 mH, กระแส 6 A

**Change core of Inductor**

Exit  
Mode

Minimum Weight

Dimension	Detail	Detail	Detail
2F 5.810 cm	N 134.416	Trun Ldt 0.01200 H	
D 2.093 cm	Lg 0.717 mm	Ipt 6.000 A	
a 1.905 cm	Lt 23.803 m	Jt 200.000 A/cm <sup>2</sup>	
b 5.715 cm	Rt 0.135 ohm	Act 3.243 mm <sup>2</sup>	
Weight	Loss	Fst 0.950	
Wt 1.996 Kg	Pt 10.953 Watt	Fct 1.500	
Wi 1.325 Kg	Pco 1.855 Watt	Fwt 0.400	
Ww 0.671 Kg	Pcu 4.866 Watt	Bmax 1.000 Tesla	
Cost	Pgp 4.232 Watt	SWG 14 x 1	
Ct 149.470 Bath	Run	Exit	Picture
Cco 62.263 Bath			
Ccu 87.206 Bath			

รูปที่ 5-5 ข้อมูลหลังจากทำการปรับแกนที่ตัวเหนี่ยวนำ 12 mH, กระแส 6 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวัดน้ำหนัก

น้ำหนักลวดมีค่า 0.680 Kg.

น้ำหนักแกนเหล็กมีค่า 1.300 Kg.

น้ำหนักรวมมีค่า 1.980 Kg.

## หาค่าความต้านทานในขดลวด

จะได้ข้อมูลดังนี้

V ( Volt)	I ( Amp)	R(Ohm ),ค่ารวม
0.075	0.5	0.15
0.15	1	0.15
0.23	1.5	0.153
0.3	2	0.15
0.38	2.5	0.152
0.45	3	0.15
0.54	3.5	0.154
R (Average)		0.151

ตารางที่ 5-1 ตารางการทดสอบความต้านทานในขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ 12 mH.6A

## การทดสอบคุณสมบัติของแกนเหล็ก

V(Volt)	I (Amp)	W(watt)	B(Tesla)	H(A/m)	Pcore/Kg.
2.0	0.05	0.2	0.087	29.52	0.153
11.0	0.10	0.8	0.482	59.05	0.615
18.5	0.15	1.8	0.812	88.58	1.384
22.5	0.20	2.6	0.987	118.11	2.000
24.8	0.25	3.2	1.088	147.63	2.461
26.5	0.30	3.6	1.163	177.16	2.769
28.0	0.35	4.0	1.229	206.69	3.077
29.2	0.40	4.3	1.281	236.22	3.307
30.0	0.45	4.4	1.317	265.75	3.384
31.0	0.50	4.6	1.360	295.27	3.538
31.5	0.55	4.9	1.382	324.80	3.769

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามให้ตัดแปลง, ใช้อ้างอิง และต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

**Optimum of Inductor**

Mode: Minimum Weight

Dimension		Detail		Detail	
2E	5.089 cm	N	295.775 Turn	Ldt	0.05300 H
D	2.621 cm	Lg	1.314 mm	Ipt	5.000 A
a	2.545 cm	Lt	68.412 m	Jt	200.000 A/cm <sup>2</sup>
b	7.634 cm	Rt	0.480 ohm	Act	2.627 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Fst	
Wt	4.522 Kg	Pt	26.500 Watt	Fc	1.500
Wi	2.960 Kg	Pco	4.144 Watt	Fw	0.400
Ww	1.562 Kg	Pcu	11.990 Watt	Bmax	1.000 Tesh
Cost		Pgp	10.366 Watt	SWG	15 x 1
Ct	342.139 Bath	Change core		Exit	
Cco	139.110 Bath			Picture	
Ccu	203.028 Bath				

รูปที่ 5-6 ข้อมูล Optimum ที่ตัวเหนี่ยวนำ 53 mH กระแส 5 A

**Change core of Inductor**

Mode: Minimum Weight

Dimension		Detail		Detail	
2E	5.080 cm	N	294.706 Turn	Ldt	0.05300 H
D	2.635 cm	Lg	1.309 mm	Ipt	5.000 A
a	2.540 cm	Lt	68.210 m	Jt	200.000 A/cm <sup>2</sup>
b	7.620 cm	Rt	0.478 ohm	Act	2.627 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Fst	
Wt	4.522 Kg	Pt	26.416 Watt	Fc	1.500
Wi	2.965 Kg	Pco	4.151 Watt	Fw	0.400
Ww	1.557 Kg	Pcu	11.955 Watt	Bmax	1.000 Tesh
Cost		Pgp	10.310 Watt	SWG	15 x 1
Ct	341.791 Bath	Main		Exit	
Cco	139.362 Bath			Picture	
Ccu	202.428 Bath				

รูปที่ 5-7 ข้อมูลหลังจากทำการปรับแกนที่ตัวเหนี่ยวนำ 53 mH กระแส 5 A

## การวัดน้ำหนัก

น้ำหนักลวดมีค่า 1.620 Kg.

น้ำหนักแกนเหล็กมีค่า 3.020 Kg.

น้ำหนักรวมมีค่า 4.640 Kg.

## หาค่าความต้านทานในขดลวด

เมื่อทดสอบจะได้ค่าความต้านทานเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$R_{(average)} = 0.490 \Omega$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบคุณสมบัติของแกนเหล็ก

V(Volt)	I (Amp)	W(watt)	B(Tesla)	H(A/m)	Pcore/Kg.
9	0.03	0.2	0.107	29.03	0.0662
28.5	0.06	0.6	0.340	58.07	0.198
48.5	0.09	2.0	0.579	87.10	0.662
83	0.12	5.0	0.991	116.14	1.656
94	0.15	6.2	1.122	145.17	2.053
102	0.18	7.4	1.217	174.21	2.450
109	0.21	8.3	1.301	203.24	2.748
113	0.24	9.1	1.349	232.28	3.013
118	0.27	9.6	1.408	261.31	3.178
121	0.30	10.2	1.444	290.35	3.377
126	0.35	11.0	1.504	338.74	3.642
129	0.40	11.8	1.540	387.14	3.907
137	0.60	13.2	1.635	580.70	4.370
141	0.80	14.6	1.683	774.27	4.834

ตารางที่ 5-4 ตารางการทดสอบคุณสมบัติแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ 53 mH.5A  
การหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

Gap(mm.)	V(Volt)	I (Amp)	W(watt)	L(mH.),ค่ารวม
CLOSE	176	5	34	112.04
2.0	108	5	22	68.75
2.4	95	5	20.5	60.47
3.0	86	5	19	54.75
3.1	83	5	19	52.84
3.2	81	5	19	51.56
3.5	77	5	18	49.02
OPEN	46	5	15	29.28

ตารางที่ 5-5 ตารางการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 53 mH.5A

## สรุปการทดสอบตัวต้นแบบ

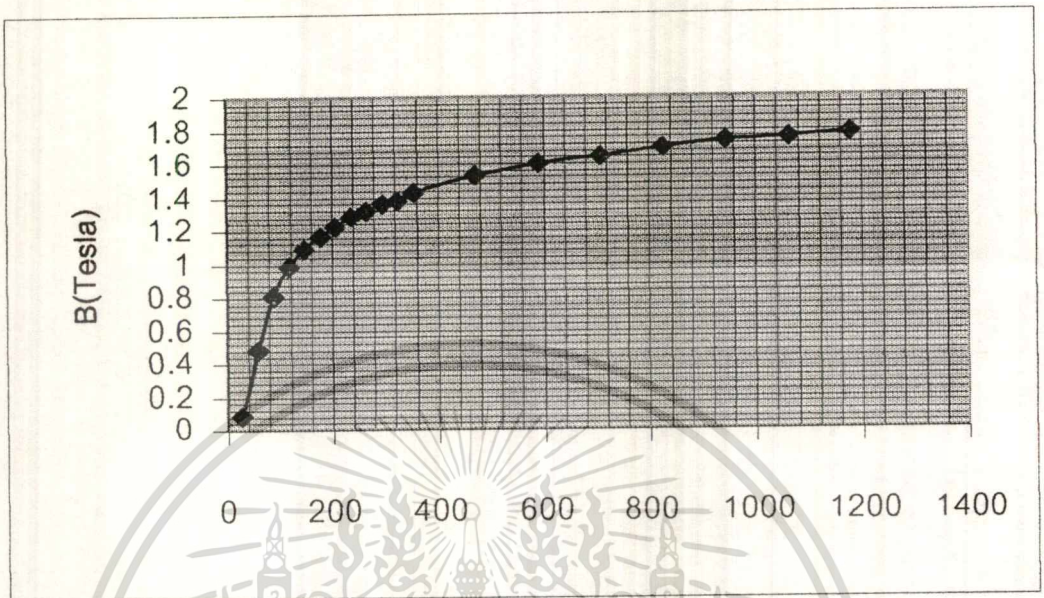
	ตัวที่ 1 ( 12 mH. 6A.)			ตัวที่ 2 ( 53 mH. 5A. )		
	optimum	ปรับแกน	ทดสอบ	optimum	ปรับแกน	ทดสอบ
ค่าตัวเหนี่ยวนำ ( mH. )	12	12	12.46	53	53	52.84
2E ( cm. )	4.132	3.81	3.81	5.089	5.08	5.08
D ( cm. )	1.640	2.09	2.10	2.621	2.635	2.65
จำนวนรอบ (Turn)	158	135	135	295	295	295
ช่องอากาศ ( mm. )	0.843	0.717	1.1	1.314	1.309	3.1
ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )	0.156	0.135	0.151	0.480	0.478	0.490
น้ำหนักขดลวด ( Kg. )	0.771	0.671	0.680	1.562	1.557	1.620
น้ำหนักแกนเหล็ก ( Kg. )	1.221	1.325	1.300	2.960	2.965	3.020
น้ำหนักรวม ( Kg. )	1.992	1.996	1.980	4.522	4.522	4.640
ค่าสูญเสียรวม ( Watt )	12.71	10.95	11	26.50	26.41	19

ตารางที่ 5-6 แสดงการเปรียบเทียบการทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำระหว่าง 12 mH.6A และ 53 mH.5A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

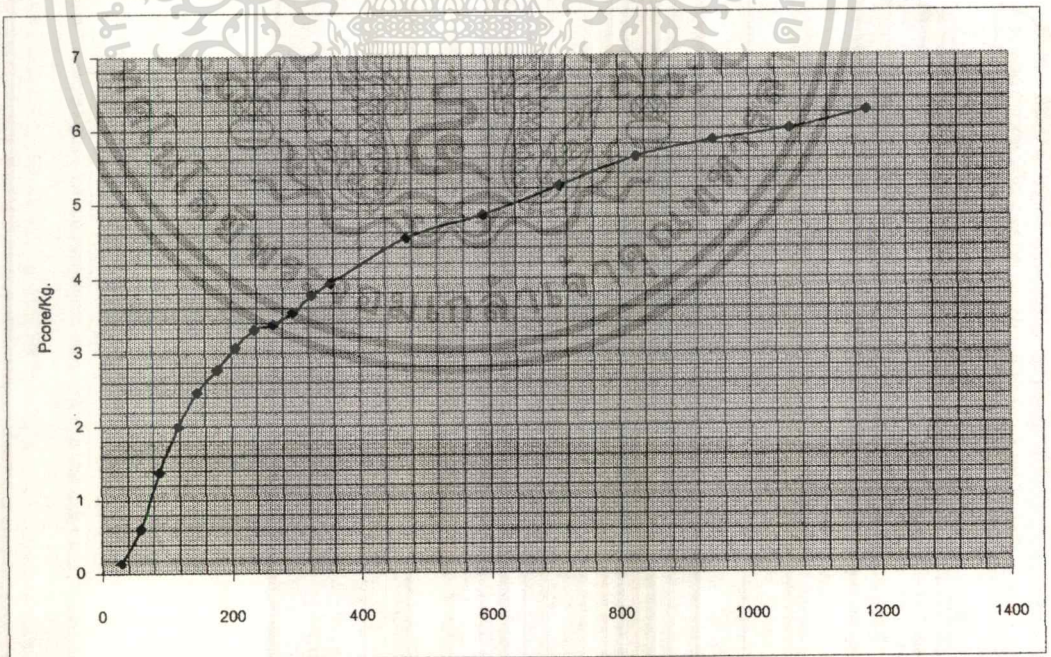
-จากผลทดสอบที่ค่าตัวเหนี่ยวนำ 12 mH. 6 A

1. สร้าง AC. Excitation Curve (B-H Curve)



รูปที่ 5-8 AC. Excitation Curve ที่ตัวเหนี่ยวนำ 12 mH กระแส 6 A

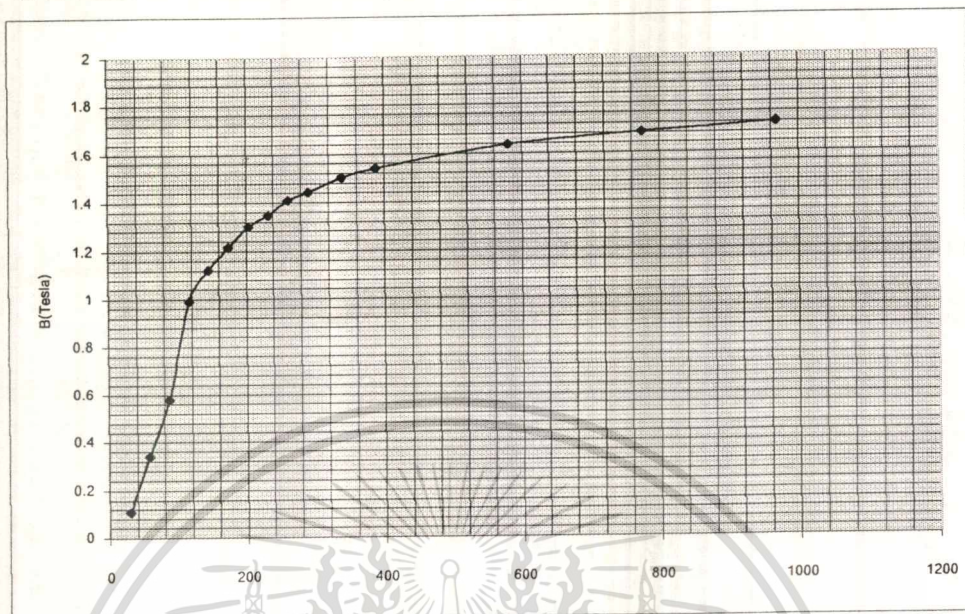
2. สร้าง Core loss Curve (Pcore - H Curve)



รูปที่ 5-9 Core loss Curve ที่ตัวเหนี่ยวนำ 12 mH กระแส 6 A

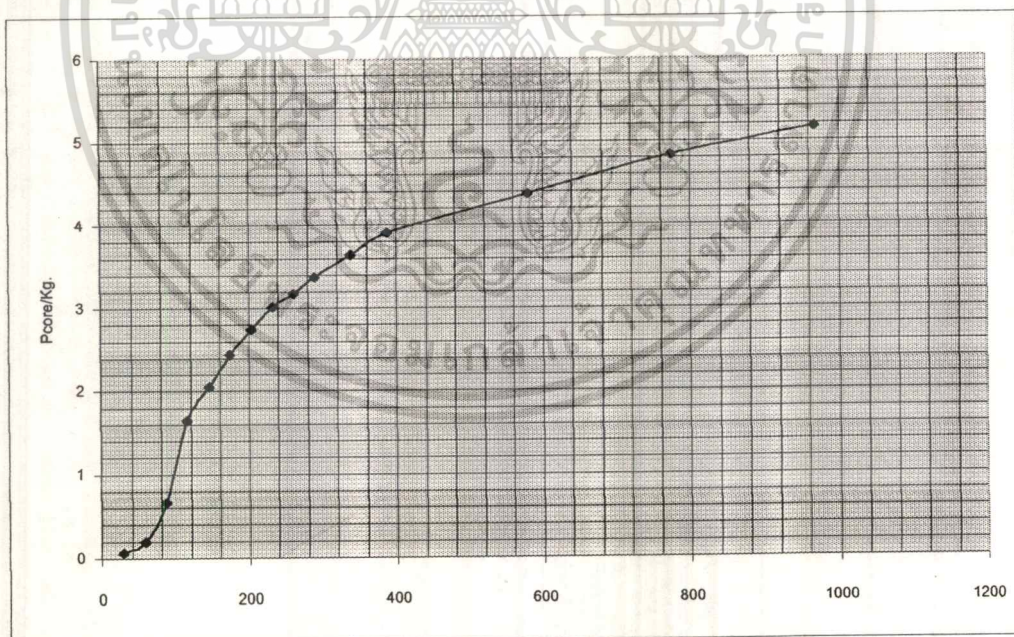
-จากผลทดสอบที่ค่าตัวเหนี่ยวนำ 53 mH. 5 A  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้เฉพาะกรณีศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. สร้าง AC. Excitation Curve (B-H Curve)



รูปที่ 5-10 AC. Excitation Curve ที่ตัวเหนี่ยวนำ 53 mH กระแส 5 A

## 2. สร้าง Core loss Curve (Pcore – H Curve)



รูปที่ 5-11 Core loss Curve ที่ตัวเหนี่ยวนำ 53 mH กระแส 5 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 การสร้างตัวเหนี่ยวนำเปรียบเทียบกับวิธี Area product

5.5.1 เปรียบเทียบในส่วนของน้ำหนักค่าสูงสุดเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ 42 mH กระแส 5 A และเลือกค่าจากข้อมูลภาคผนวก จ. เลือกความหนาแน่นของแกนเหล็กคือ 1.2 Tesla จะได้ ค่าสูญเสียในแกนเหล็กเท่ากับ 2 วัตต์ต่อกิโลกรัม

การคำนวณวิธี Area product ที่ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH กระแส 5 A

Step 1 หากำลังที่เกิดขึ้น (apparent power)  $P$ ,

$$V = 2\pi f L I$$

$$V = 2\pi(50)(42 \times 10^{-3})(5)$$

$$V = 65.97 \text{ V}$$

$$P = VA$$

$$P = (65.97)(5)$$

$$P = 329.85 \text{ W}$$

Step 2 หาพื้นที่  $A_p$  จากสมการ

$$A_p = \left( \frac{VA \times 10^4}{4.44 B_m f K_u K_j} \right)^{1.14}$$

$$B_m = 1.2 \text{ T}$$

$$K_u = 0.4$$

$$K_j = 366$$

$$A_p = \left( \frac{329.85 \times 10^4}{(4.44)(1.2)(50)(0.4)(366)} \right)^{1.14}$$

$$A_p = 157.42$$

Step 3 จะได้แกนเหล็ก จากตาราง ก.3

$$EI-150, A_p = 158.04$$

Step 4 หาจำนวนขดลวดจากกฎ faraday คั่งสมการ

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

$$A_c = 14.52 \text{ ตามตาราง}$$

$$N = \frac{65.97 \times 10^4}{(4.44)(1)(50)(14.52)}$$

$$N = 171 \text{ Turn}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Step 5** หาค่าอิมพีแดนซ์

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

$$X_L = \frac{65.97}{5}$$

$$X_L = 13.194 \ \Omega$$

**Step 6** หาค่าตัวเหนี่ยวนำ

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

$$L = \frac{(13.194)}{(6.28)(50)}$$

$$L = 0.042 \ \text{H}$$

**Step 7** หาคความกว้างช่องว่างอากาศจาก สมการ

$$l_g = \frac{0.4\pi N^2 A_c \times 10^4}{L}$$

$$l_g = \frac{(1.26)(171)^2 (14.52) \times 10^4}{(0.042)}$$

$$l_g = 0.127 \ \text{cm.}$$

**Step 8** หาจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั่ว จากสมการ

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

$$G = 5.715$$

$$F = 1 + \frac{0.127}{\sqrt{14.52}} \ln \left( \frac{(2)(5.715)}{(0.127)} \right)$$

$$F = 1.15$$

หลังจากหา  $F$  แทนค่ากลับในสมการเพื่อหาค่าจำนวนรอบใหม่

$$N = \left( \frac{l_g L}{0.4\pi A_c F \times 10^4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$N = \left( \frac{(0.127)(0.042)}{(1.26)(14.52)(1.15) \times 10^4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$N = 160 \ \text{Turn}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Step 9** หาค่าความหนาแน่นของกระแสโดยใช้ตาราง ก.2

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

$$J = (366)(14.52)^{-0.12}$$

$$J = 200 \text{ A/mm.}^2$$

**Step 10** หาขนาดของเส้นลวด  $A_{w(B)}$  ได้โดย

$$A_{w(B)} = \frac{I}{J}$$

$$A_{w(B)} = \frac{5}{200}$$

$$A_{w(B)} = 2.5 \text{ mm.}^2$$

**Step 11** เลือกขนาดของลวด SWG. จากตาราง ก.4

$$\text{SWG. No. 15} = 2.5 \text{ mm.}^2$$

**Step 12** หาค่าความต้านทานจากสูตร โดยค่า MLT ได้จากตาราง ก.2

$$R = \frac{\text{MLT} \times N \times \rho \times \zeta}{A_w}$$

$$R = \frac{(22)(160)(1.724 \times 10^{-6})(1.08)}{(2.627 \times 10^{-2})}$$

$$R = 0.249 \text{ } \Omega$$

**Step 13** หาค่ากำลังสูญเสียในขดลวด

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

$$P_{cu} = (5)^2 (0.249)$$

$$P_{cu} = 6.237 \text{ W}$$

จากกราฟกำลังงานสูญเสีย มีค่า 2 Watt /Kg.

$$P_{fe} = (2)(2.5385)$$

$$P_{fe} = 5.077 \text{ W}$$

**Step 14** หาค่าสูญเสียในช่องว่างอากาศ โดยค่า  $E$  ได้จากตาราง ก.5 แทนในสมการ

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

$$P_g = (0.155)(3.81)(0.127)(1.2)^2$$

$$P_g = 5.4 \text{ W}$$

**Step 15** จะได้อัตราสูญเสียรวมคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่  $P_L = P_{cu} + P_{fe} + P_g$  านเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น  $P_L = 6.237 + 5.077 + 5.4$   
 $P_L = 16.714 \text{ W}$

## ข้อมูลตามโปรแกรม ที่ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH กระแส 5 A

Dimension		Detail		Detail	
2E	4.332 cm	N	214.291 Turn	Ldt	0.04200 H
D	2.666 cm	Lg	0.793 mm	Ipt	5.000 A
a	2.160 cm	Lt	43.188 m	Jt	200.000 A/cm <sup>2</sup>
b	6.498 cm	Rt	0.303 ohm	Act	2.627 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Fv	
Wt	3.282 Kg	Pt	10.833 Watt	Fc	1.440
Wi	2.296 Kg	Pco	4.593 Watt	Fw	0.400
Ww	0.986 Kg	Pcu	7.569 Watt	Bmax	1.200 Tesla
Cost		Pgp		SWG	
Ct	236.098 Bath	7.671 Watt		15 x 1	
Cco	107.927 Bath	<input type="button" value="Change core"/> <input type="button" value="Exit"/> <input type="button" value="Picture"/>			
Ccu	128.171 Bath				

รูปที่ 5-12 ข้อมูล Optimum ที่ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH กระแส 5 A

Dimension		Detail		Detail	
2E	5.080 cm	N	204.707 Turn	Ldt	0.04200 H
D	1.653 cm	Lg	1.091 mm	Ipt	5.000 A
a	2.540 cm	Lt	57.148 m	Jt	200.000 A/cm <sup>2</sup>
b	7.620 cm	Rt	0.401 ohm	Act	2.627 mm <sup>2</sup>
Weight		Loss		Fv	
Wt	3.263 Kg	Pt	26.304 Watt	Fc	1.440
Wi	1.958 Kg	Pco	3.916 Watt	Fw	0.400
Ww	1.305 Kg	Pcu	10.016 Watt	Bmax	1.200 Tesla
Cost		Pgp		SWG	
Ct	261.630 Bath	12.372 Watt		15 x 1	
Cco	92.032 Bath	<input type="button" value="Print"/> <input type="button" value="Exit"/> <input type="button" value="Picture"/>			
Ccu	169.598 Bath				

รูปที่ 5-13 ข้อมูลหลังจากทำการปรับแกนที่ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH กระแส 5 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบวิธี Area product ที่ตัวเหนี่ยวนำ 42 mH กระแส 5 A

การวัดน้ำหนัก

น้ำหนักลวดมีค่า 0.820 Kg.

น้ำหนักแกนเหล็กมีค่า 2.500 Kg.

น้ำหนักรวมมีค่า 3.320 Kg.

หาค่าความต้านทานในขดลวด

เมื่อทดสอบจะได้ค่าความต้านทานเฉลี่ย

$$R_{(average)} = 0.247 \Omega$$

การหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

Gap(mm.)	V(Volt)	I (Amp)	W(watt)	L(mH.),คำนวณ
CLOSE	102	5	28	64.93
0.5	76	5	20	48.38
0.6	65	5	17	41.38
0.7	58	5	15	36.92
OPEN	14	5	9	8.91

ตารางที่ 5-7 การทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 42 mH. 5A โดยวิธี Area product

การทดสอบวิธี Optimum design

การวัดน้ำหนัก

น้ำหนักลวดมีค่า 1.440 Kg.

น้ำหนักแกนเหล็กมีค่า 1.920 Kg.

น้ำหนักรวมมีค่า 3.360 Kg.

หาค่าความต้านทานในขดลวด

เมื่อทดสอบจะได้ค่าความต้านทานเฉลี่ย

$$R_{(average)} = 0.428 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gap(mm.)	V(Volt)	I (Amp)	W(watt)	L(mH.),คำนวณ
CLOSE	116	5	29	73.84
0.7	101	5	25	64.29
1.2	90	5	23	57.29
2.0	75	5	19.5	47.74
2.7	67	5	18.5	42.65
2.8	65	5	18	41.38
2.9	64	5	18	40.74
OPEN	37	5	14.5	23.55

ตารางที่ 5-8 การทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 42 mH.5A โดยวิธี Optimum design

### การเปรียบเทียบในส่วนของน้ำหนักต่ำสุด

	Optimum design			Area product	
	Optimum	ปรับแกน	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ
ค่าตัวเหนี่ยวนำ (mH.)	42	42	41.38	42	41.38
2E (cm.)	4.33	5.08	5.08	3.81	3.81
D (cm.)	2.66	1.653	1.65	3.81	3.81
จำนวนรอบ (Turn)	214	295	295	160	160
น้ำหนักขดลวด (Kg.)	0.986	1.305	1.440	0.799	0.820
น้ำหนักแกนเหล็ก (Kg.)	2.296	1.958	1.920	2.541	2.500
น้ำหนักรวม (Kg.)	3.282	3.263	3.600	3.340	3.320
ช่องอากาศ (mm.)	0.793	1.09	2.8	0.635	0.6
ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )	0.303	0.401	0.428	0.249	0.247
ค่าสูญเสียรวม (Watt)	19.83	26.30	18	16.71	17

ตารางที่ 5-9 การทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 42 mH.5A

### โดยวิธี Optimum design

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 เปรียบเทียบในส่วนของค่าสูญเสีย เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ 68 mH กระแส 5 A และเลือกค่าจากข้อมูลภาคผนวก จ. เลือกความหนาแน่นของแกนเหล็กคือ 1.2 Tesla จะได้ ค่าสูญเสียในแกนเหล็กเท่ากับ 2 วัตต์ต่อกิโลกรัม

การคำนวณวิธี Area product ที่ค่าตัวเหนี่ยวนำ 68 mH กระแส 5 A

Step 1 หากำลังที่เกิดขึ้น (apparent power)  $P_t$

$$\begin{aligned} V &= 2\pi f L I \\ V &= 2\pi(50)(68 \times 10^{-3})(5) \\ V &= 106.8 \text{ V} \\ P &= VA \\ P &= (106.8)(5) \\ P &= 534 \text{ W} \end{aligned}$$

Step 2 หาพื้นที่  $A_p$  จากสมการ

$$A_p = \left( \frac{VA \times 10^4}{4.44 B_m f K_u K_j} \right)^{1.14}$$

$B_m = 1 \text{ T}$   
 $K_u = 0.4$   
 $K_j = 366$

$$A_p = \left( \frac{534 \times 10^4}{(4.44)(1)(50)(0.4)(366)} \right)^{1.14}$$

$$A_p = 335.6$$

Step 3 จะได้แกนเหล็ก จากตาราง ก.3

$$\text{EI-200, } A_p = 525$$

Step 4 หาจำนวนขดลวดจากกฎ faraday ตั้งสมการ

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

$A_c = 25.8064$  ตามตาราง

$$N = \frac{106.8 \times 10^4}{(4.44)(1)(50)(25.806)}$$

$$N = 191.8 \text{ Turn}$$

Step 5 หาค่าอิมพีแดนซ์

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

$$X_L = \frac{106.8}{5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัด 5 ปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_L = 21.36 \Omega$$

**Step 6** หาค่าตัวเหนี่ยวนำ

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

$$L = \frac{(21.36)}{(6.28)(50)}$$

$$L = 0.068 \text{ H}$$

**Step 7** หาคความกว้างช่องว่างอากาศจาก สมการ

$$l_g = \frac{0.4\pi N^2 A_c \times 10^4}{L}$$

$$l_g = \frac{(1.26)(192)^2 (25.806) \times 10^4}{(0.068)}$$

$$l_g = 0.171 \text{ cm.}$$

**Step 8** หาคจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่รั้ว จากสมการ

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

$$G = 7.62$$

$$F = 1 + \frac{0.171}{\sqrt{25.806}} \ln \left( \frac{(2)(7.62)}{(0.171)} \right)$$

$$F = 1.153$$

หลังจากหา  $F$  แทนค่ากลับในสมการเพื่อหาค่าจำนวนรอบใหม่

$$N = \left( \frac{l_g L}{0.4\pi A_c F \times 10^4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$N = \left( \frac{(0.171)(0.068)}{(1.26)(25.806)(1.153) \times 10^4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$N = 178 \text{ Turn}$$

**Step 9** หาค่าความหนาแน่นของกระแสโดยใช้ตาราง ก.2

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

$$J = (366)(25.806)^{-0.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $J = 172.6 \text{ A/mm.}^2$  เลือกใช้  $J = 200 \text{ A/mm.}^2$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Step 10** หาขนาดของเส้นลวด  $A_{w(B)}$  ได้โดย

$$A_{w(B)} = \frac{I}{J}$$

$$A_{w(B)} = \frac{5}{200}$$

$$A_{w(B)} = 2.5 \text{ mm.}^2$$

**Step 11** เลือกขนาดของลวด SWG. จากตาราง ก.4

$$\text{SWG. No. 15} = 2.5 \text{ mm.}^2$$

**Step 12** หาค่าความต้านทานจากสูตร โดยค่า MLT ได้จากตาราง ก.2

$$R = \frac{\text{MLT} \times N \times \rho \times \zeta}{A_w}$$

$$R = \frac{(29.18)(178)(1.724 \times 10^{-6})(1.08)}{(2.627 \times 10^{-2})}$$

$$R = 0.370 \text{ } \Omega$$

**Step 13** หากำลังสูญเสียในขดลวด

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

$$P_{cu} = (5)^2 (0.370)$$

$$P_{cu} = 9.242 \text{ W}$$

จากกราฟกำลังงานสูญเสีย มีค่า 2 Watt /Kg.

$$P_{fe} = (1.4)(6.959)$$

$$P_{fe} = 8.076 \text{ W}$$

**Step 14** หาค่าสูญเสียในช่องว่างอากาศ โดยค่า  $E$  ได้จากตาราง ก.5 แทนในสมการ

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

$$P_g = (0.155)(5.08)(0.171)(1)^2$$

$$P_g = 6.638 \text{ W}$$

**Step 15** จะได้ค่าสูญเสียรวมคือ

$$P_L = P_{cu} + P_{fe} + P_g$$

$$P_L = 9.242 + 8.076 + 6.638$$

$$P_L = 24.0 \text{ W}$$

ข้อมูลตามโปรแกรม ที่ค่าตัวเหนี่ยวนำ 68 mH กระแส 5 A

Optimum of Inductor										
Mode										
Minimum Loss										
Dimension			Detail			Detail				
2E	3.588	cm.	N	146.955	Turn	Ldt	0.06800	H		
D	9.120	cm.	Lg	0.653	mm	Ipt	5.000	A		
a	1.794	cm.	Lt	53.783	in	Jt	200.000	A/cm <sup>2</sup>		
b	5.381	cm.	Rt	0.377	ohm	Act	2.627	mm <sup>2</sup>		
Weight			Loss							
Wt	6.616	Kg	Pt	20.600	Watt	Fs	1.000			
Wi	5.388	Kg	Pco	7.543	Watt	Fc	1.440			
Ww	1.228	Kg	Pcu	9.426	Watt	Fw	0.400			
Cost			Pgp			Bmax				
Ct	412.884	Bath	Pgp	5.631	Watt	Bmax	1.000	Tesla		
Cco	253.237	Bath								SWG
Ccu	159.647	Bath								15 x 1
<input type="button" value="Change core"/> <input type="button" value="Exit"/> <input type="button" value="Picture"/>										

รูปที่ 5-14 ข้อมูล Optimum ที่ตัวเหนี่ยวนำ 68 mH กระแส 5 A

Change core of Inductor										
Mode										
Minimum Loss										
Dimension			Detail			Detail				
2E	5.810	cm.	N	165.738	Turn	Ldt	0.06800	H		
D	7.615	cm.	Lg	0.736	mm	Ipt	5.000	A		
a	1.905	cm.	Lt	54.532	in	Jt	200.000	A/cm <sup>2</sup>		
b	5.715	cm.	Rt	0.382	ohm	Act	2.627	mm <sup>2</sup>		
Weight			Loss							
Wt	6.318	Kg	Pt	21.009	Watt	Fs	1.000			
Wi	5.074	Kg	Pco	7.103	Watt	Fc	1.440			
Ww	1.245	Kg	Pcu	9.558	Watt	Fw	0.400			
Cost			Pgp			Bmax				
Ct	400.293	Bath	Pgp	4.349	Watt	Bmax	1.000	Tesla		
Cco	238.456	Bath								SWG
Ccu	161.837	Bath								15 x 1
<input type="button" value="Main"/> <input type="button" value="Exit"/> <input type="button" value="Picture"/>										

รูปที่ 5-15 ข้อมูลหลังจากทำการปรับแกนที่ตัวเหนี่ยวนำ 68 mH กระแส 5 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบวิธี **Area product** ที่ค่าตัวเหนี่ยวนำ 68 mH กระแส 5 A

การวัดน้ำหนัก

น้ำหนักลวดมีค่า 1.140 Kg.

น้ำหนักแกนเหล็กมีค่า 6.000 Kg.

น้ำหนักรวมมีค่า 7.400 Kg.

หาค่าความต้านทานในขดลวด

เมื่อทดสอบจะได้ค่าความต้านทานเฉลี่ย

$$R_{(average)} = 0.236 \Omega$$

การหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

Gap(mm.)	V(Volt)	I (Amp)	W(watt)	L(mH.),คำนวณ
CLOSE	192	5	50	122.22
0.7	128	5	29	81.48
0.8	113	5	24.5	71.93
0.9	106	5	23	67.47
1.0	94.5	5	20.5	60.15
OPEN	26.5	5	16	29.28

ตารางที่ 5-10 การทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 68 mH. 5A โดยวิธี Area product

การทดสอบวิธี **Optimum design** ที่ค่าตัวเหนี่ยวนำ 68 mH กระแส 5 A

การวัดน้ำหนัก

น้ำหนักลวดมีค่า 1.160 Kg.

น้ำหนักแกนเหล็กมีค่า 4.980 Kg.

น้ำหนักรวมมีค่า 6.300 Kg.

หาค่าความต้านทานในขดลวด

เมื่อทดสอบจะได้ค่าความต้านทานเฉลี่ย

$$R_{(average)} = 0.343 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

Gap(mm.)	V(Volt)	I (Amp)	W(watt)	L(mH.),จำนวน
CLOSE	200	5	50	112.04
0.5	150	5	33	95.48
0.7	107	5	22	68.10
0.9	92.5	5	19.5	58.88
OPEN	22	5	11	14.00

ตารางที่ 5-11 การทดสอบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 68 mH.5A โดยวิธี Optimum design

## การเปรียบเทียบในส่วนของค่าสูญเสีย

	Optimum design			Area Product	
	Optimum	ปรับแกน	ทดสอบ	จำนวน	ทดสอบ
ค่าตัวเหนี่ยวนำ (mH.)	68	68	68.1	68	67.47
2E (cm.)	3.588	3.81	3.81	5.08	5.08
D (cm.)	9.120	7.62	7.62	5.08	5.08
จำนวนรอบ (Turn)	147	165.7	165	178	175
น้ำหนักขดลวด (Kg.)	1.228	1.245	1.160	1.191	1.140
น้ำหนักแกนเหล็ก (Kg.)	5.388	5.074	4.980	5.769	6.000
น้ำหนักรวม (Kg.)	6.616	6.318	6.140	6.959	7.140
ช่องอากาศ (mm.)	0.653	0.736	0.7	0.855	0.9
ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )	0.377	0.382	0.343	0.370	0.326
ค่าสูญเสียรวม (Watt)	20.6	21.00	22	24	23

ตารางที่ 5-12 การทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ 68 mH.5A

โดยวิธี Optimum design

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.6 การปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม

จากการทดสอบตัวเหนียวที่ทำขึ้นมาจำนวน 6 ตัว ทั้งในส่วนเปรียบเทียบกับโปรแกรม และเปรียบเทียบกันระหว่างการปรับแก้กับวิธีการของ Area Product

จะสรุปได้ว่า มีข้อควรแก้ไขดังนี้

1. เกิดจากค่าตัวประกอบรอบเฉลี่ยผิดพลาด ( $F_c$  Error) ทำให้เกิดการคำนวณน้ำหนักของขดลวดไม่เป็นไปตามความเป็นจริง ซึ่งค่า  $F_c$  ไม่สามารถกำหนดค่าตายตัวลงไปได้ เนื่องจากหากพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีค่าเท่ากัน แต่ขนาด  $2E$  กับ  $D$  ไม่เท่ากัน ค่าของ  $F_c$  ที่ได้ก็จะแตกต่างกัน โดย  $2E$  มีค่ามากกว่า  $D$  ค่าของ  $F_c$  ที่ได้จะมาก ถ้า  $2E$  มีค่าน้อยกว่า  $D$  ค่าของ  $F_c$  ที่ได้จะน้อย เข้าใกล้หนึ่ง

การแก้ไขคือ จะต้องคำนวณค่าของ  $F_c$  ทุกค่าที่ search เพื่อนำไปเป็นตัวประกอบใน constraint function ค่าของ  $F_c$  จะมีค่า

$$F_c = \frac{(4E + 2D + \pi E)}{(4E + 2D)} \quad (5-5)$$

2. เกิดจากค่าตัวประกอบพื้นที่หน้าตัด ( $F_w$ ) กล่าวคือ การที่กำหนดค่า  $F_w$  เาะจงลงไปทำให้ค่าที่ได้อาจไม่เหมาะสม (Optimum) ก็ได้เช่น ในกรณีของประสิทธิภาพสูงสุด หากเปิดเงื่อนไขของ  $F_w$  จะทำให้ค่า  $F_w$  ที่เหมาะสม อาจไม่ถึง 0.4 ก็เป็นไปได้

การแก้ไขคือ ทุกค่าที่ search จะต้องทำการเช็คค่าระหว่างจำนวนรอบที่ต้องการใช้ กับจำนวนรอบสูงสุดที่สามารถใช้พันได้ โดยจำนวนรอบสูงสุดจะดูจาก การใช้จำนวนรอบต่อเลเยอร์ (Turn per Layer) และจำนวนเลเยอร์ที่ใช้งาน พื้นที่ที่สามารถใช้พันลวดจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์คือ ถ้าเป็นด้าน  $b$  จะคิดเป็น 75% ของด้าน  $b$  ถ้าเป็นด้าน  $a$  จะคิดเป็น 85% ของด้าน  $a$  ส่วนจำนวนรอบจะหาจากเส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำ ดังสมการ

$$\text{จำนวนรอบต่อเลเยอร์} = \frac{(2.55E - 2d)}{d} \quad (5-6)$$

$$\text{จำนวนเลเยอร์สูงสุด} = \frac{0.75E}{d} \quad (5-7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสาร จำนวนรอบสูงสุด = จำนวนรอบต่อเลเยอร์ x จำนวนเลเยอร์สูงสุด (5-8)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.6.1 เปรียบเทียบกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 42 mH. 5 A จะได้ผลดังนี้

#### 5.6.1.1 เปรียบเทียบในส่วน Minimum weight

	Optimum design		Area Product
	ก่อนแก้ไข	หลังแก้ไข	คำนวณ
ค่าตัวเหนี่ยวนำ (mH.)	42	42	42
2E (cm.)	4.332	4.394	3.81
D (cm.)	2.666	2.210	3.81
จำนวนรอบ (Turn)	214	254.86	160
Windows Factor ( $F_w$ )	0.400	0.462	0.384
ช่องอากาศ (mm.)	0.739	0.944	0.635
ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )	0.303	0.336	0.249
น้ำหนักขดลวด (Kg.)	0.986	1.170	0.799
น้ำหนักแกนเหล็ก (Kg.)	2.296	1.959	2.541
น้ำหนักรวม (Kg.)	3.282	3.129	3.340
ราคารวม (Bath)	236.09	244.16	223.18
ค่าสูญเสียรวม (Watt)	19.83	21.58	16.71

ตารางที่ 5-13 แสดงการเปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ 42 mH. 5 A ที่ Minimum weight

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.6.1.2 เปรียบเทียบในส่วน Minimum cost

	Optimum design		Area Product
	ก่อนแก้ไข	หลังแก้ไข	คำนวณ
ค่าตัวเหนี่ยวนำ (mH.)	42	42	42
2E (cm.)	3.881	3.418	3.81
D (cm.)	3.707	4.767	3.81
จำนวนรอบ (Turn)	172.04	151.89	160
Windows Factor ( $F_w$ )	0.400	0.455	0.384
ช่องอากาศ (mm.)	0.637	0.562	0.635
ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )	0.264	0.217	0.249
น้ำหนักขดลวด (Kg.)	0.858	0.754	0.799
น้ำหนักแกนเหล็ก (Kg.)	2.563	2.556	2.541
น้ำหนักรวม (Kg.)	3.421	3.310	3.340
ราคารวม (Bath)	231.99	218.12	223.18
ค่าสูญเสียรวม (Watt)	17.23	14.82	16.71

ตารางที่ 5-14 แสดงการเปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ 42 mH. 5 A ที่ Minimum cost

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.6.1.3 เปรียบเทียบในส่วน Minimum loss

	Optimum design		Area Product
	ก่อนแก้ไข	หลังแก้ไข	คำนวณ
ค่าตัวเหนี่ยวนำ (mH.)	42	42	42
2E (cm.)	2.932	2.567	3.81
D (cm.)	8.599	12.162	3.81
จำนวนรอบ (Turn)	98.15	79.26	160
Windows Factor ( $F_w$ )	0.400	0.421	0.384
ช่องอากาศ (mm.)	0.363	0.293	0.635
ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )	0.229	0.174	0.249
น้ำหนักขดลวด (Kg.)	0.744	0.606	0.799
น้ำหนักแกนเหล็ก (Kg.)	3.394	3.680	2.541
น้ำหนักรวม (Kg.)	4.138	4.286	3.340
ราคารวม (Bath)	256.27	251.72	223.18
ค่าสูญเสียรวม (Watt)	14.88	13.39	16.71

ตารางที่ 5-15 แสดงการเปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ 42 mH. 5 A ที่ Minimum loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.6.2 เปรียบเทียบกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 68 mH. 5 A จะได้ผลดังนี้

### 5.6.2.1 เปรียบเทียบในส่วน Minimum weight

	Optimum design		Area Product
	ก่อนแก้ไข	หลังแก้ไข	คำนวณ
ค่าตัวเหนี่ยวนำ (mH.)	68	68	68
2E (cm.)	5.593	4.880	5.08
D (cm.)	2.406	3.077	5.08
จำนวนรอบ (Turn)	357.35	320.18	178
Windows Factor ( $F_w$ )	0.400	0.471	0.242
ช่องอากาศ (mm.)	1.588	1.423	0.855
ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )	0.577	0.149	0.370
น้ำหนักขดลวด (Kg.)	1.879	1.724	1.191
น้ำหนักแกนเหล็ก (Kg.)	3.454	3.364	5.769
น้ำหนักรวม (Kg.)	5.333	5.088	6.960
ราคารวม (Bath)	406.62	382.18	437.49
ค่าสูญเสียรวม (Watt)	33.03	21.01	24.29

ตารางที่ 5-16 แสดงการเปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ 42 mH. 5 A ที่ Minimum weight

### 5.6.2.2เปรียบเทียบในส่วน Minimum cost

	Optimum design		Area Product
	ก่อนแก้ไข	หลังแก้ไข	คำนวณ
ค่าตัวเหนี่ยวนำ (mH.)	68	68	68
2E (cm.)	4.600	4.045	5.08
D (cm.)	4.326	5.697	5.08
จำนวนรอบ (Turn)	241.64	208.64	178
Windows Factor ( $F_w$ )	0.400	0.447	0.242
ช่องอากาศ (mm.)	1.074	0.927	0.855
ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )	0.435	0.354	0.370
น้ำหนักขดลวด (Kg.)	1.418	1.231	1.191
น้ำหนักแกนเหล็ก (Kg.)	4.201	4.279	5.769
น้ำหนักรวม (Kg.)	5.619	5.509	6.960
ราคารวม (Bath)	381.75	361.08	437.49
ค่าสูญเสียรวม (Watt)	24.42	20.64	24.29

ตารางที่ 5-17 แสดงการเปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ 68 mH. 5 A ที่ Minimum cost

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.6.2.3. เปรียบเทียบในส่วน Minimum loss

	Optimum design		Area Product
	ก่อนแก้ไข	หลังแก้ไข	คำนวณ
ค่าตัวเหนี่ยวนำ (mH.)	68	68	68
2E (cm.)	3.588	2.968	5.08
D (cm.)	9.120	14.68	5.08
จำนวนรอบ (Turn)	146.95	110.35	178
Windows Factor ( $F_w$ )	0.400	0.439	0.242
ช่องอากาศ (mm.)	0.653	0.49	0.855
ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )	0.377	0.289	0.370
น้ำหนักขดลวด (Kg.)	1.228	1.007	1.191
น้ำหนักแกนเหล็ก (Kg.)	5.388	5.936	5.769
น้ำหนักรวม (Kg.)	6.616	6.942	6.960
ราคารวม (Bath)	412.88	409.84	437.49
ค่าสูญเสียรวม (Watt)	20.60	17.80	24.29

ตารางที่ 5-18 แสดงการเปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ 68 mH. 5 A ที่ Minimum loss

จากที่ได้ทดสอบเปรียบเทียบจะสรุปได้ว่า การที่ได้ปรับปรุงโปรแกรมเป็นผลให้โปรแกรมสามารถเลือกค่าที่เหมาะสมกว่าเดิมได้ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 6

## บทที่ 6 สรุปผลและวิจารณ์

### สรุปผล

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ มีวิธีการออกแบบต่างๆ มากมาย แต่ในปริมาณงานขั้นนี้จะขอเสนอเพียง 2 วิธี คือ วิธีการ Area Product และวิธี Optimization ที่ได้กล่าวไป ในบทที่ 2 และภาคผนวก ก. ซึ่งจะพอสรุปผลได้ดังนี้

1.วิธีการของ Area Product จะแตกต่างจากวิธี Optimization คือ วิธีการของ Area product จะออกแบบให้แกนเหล็ก(  $A_c$  ) มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส กำหนดค่าต่างๆ เช่น  $F_w$  (  $K_u$  ) เพื่อนำไปหาขนาดของแกนเหล็ก จากนั้นจะคำนวณหาจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นค่า  $F_w$  จึงถูกเปลี่ยนไป

แต่วิธีการ Optimization จะนำหลักการ Optimization เข้ามาแก้ไขจะทำให้การหาค่าที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไข โดยจะให้จุดมุ่งหมายมีค่าต่ำที่สุด ภายใต้ค่า error ที่พอจะยอมรับได้

2. จากการทดสอบตัวเหนี่ยวนำจำนวน 6 ตัว จะพบว่า หาก  $2E$  มากกว่า  $D$  มากเท่าใด การปรับช่องว่างอากาศเพื่อให้ได้ค่าตัวเหนี่ยวนำตามต้องการก็จะยิ่งมากขึ้น ตามตารางที่ 6-1

ตัวที่	$2E$ (cm.)	$D$ (cm.)	Ratio ( $\frac{2E}{D}$ )	Lg (mm.) ที่ต้องการ	Lg (mm.) ที่วัดได้	% Error
1	3.81	7.62	0.5	0.653	0.701	7.35
2	3.81	3.81	1	0.635	0.614	-3.30
3	5.08	5.08	1	0.855	0.888	3.86
4	3.81	2.1	1.814	0.717	1.158	61.50
5	5.08	2.65	1.917	1.309	3.091	136.13
6	5.08	1.65	3.078	1.091	2.751	152.15

ตารางที่ 6-1 รูปร่างแกนเหล็กที่มีผลกระทบต่อช่องว่างอากาศ

3. รูปร่างของตัวเหนี่ยวนำที่จุดมุ่งหมาย ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ดังในบทที่ 5

-ที่ Minimum weight จะได้แกนเหล็กที่มีรูปร่าง  $2E$  มากกว่า  $D$

-ที่ Minimum cost จะได้แกนเหล็กที่มีรูปร่าง  $2E$  ใกล้เคียงกับ  $D$

-ที่ Minimum loss จะได้แกนเหล็กที่มีรูปร่าง  $2E$  น้อยกว่า  $D$

4. จากข้อที่ 3 . ถ้าเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขจากราคาของแกนเหล็กจาก 47 บาทต่อกิโลกรัมเป็น 500 บาทต่อกิโลกรัม และ ราคาของลวดทองแดงจาก 130 บาทต่อกิโลกรัมเป็น 50 บาทต่อกิโลกรัม และราคาของแกนเหล็กจาก 47 บาทต่อกิโลกรัมเป็น 50 บาทต่อกิโลกรัม และ ราคาของลวดทองแดงจาก 130 บาทต่อกิโลกรัมเป็น 500 บาทต่อกิโลกรัม จะพบว่าค่าที่ได้จะถูกเปลี่ยนไปตามตารางที่ 6-2

	Minimum cost (ที่ $L= 42 \text{ mH}$ , $I= 5 \text{ A.}$ )		
	Ccore = 47 Bath/Kg. Ccu = 130 Bath/Kg.	Ccore = 500 Bath/Kg. Ccu = 50 Bath/Kg	Ccore = 50 Bath/Kg. Ccu = 500 Bath/Kg.
$2E(\text{cm.})$	3.418	6.411	2.939
$D(\text{cm.})$	4.767	0.696	7.646
$F_w$	0.455	0.473	0.447

ตารางที่ 6-2 แสดงขนาดของแกนเหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขของราคา

5. จากข้อที่ 3 ถ้าเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขจากค่าสูญเสียในแกนเหล็กจาก 0.5 วัตต์ต่อกิโลกรัมเป็น 10 วัตต์ต่อกิโลกรัมและ 2 วัตต์ต่อกิโลกรัมจะพบว่าค่าที่ได้จะถูกเปลี่ยน ไปตามตารางที่ 6-3

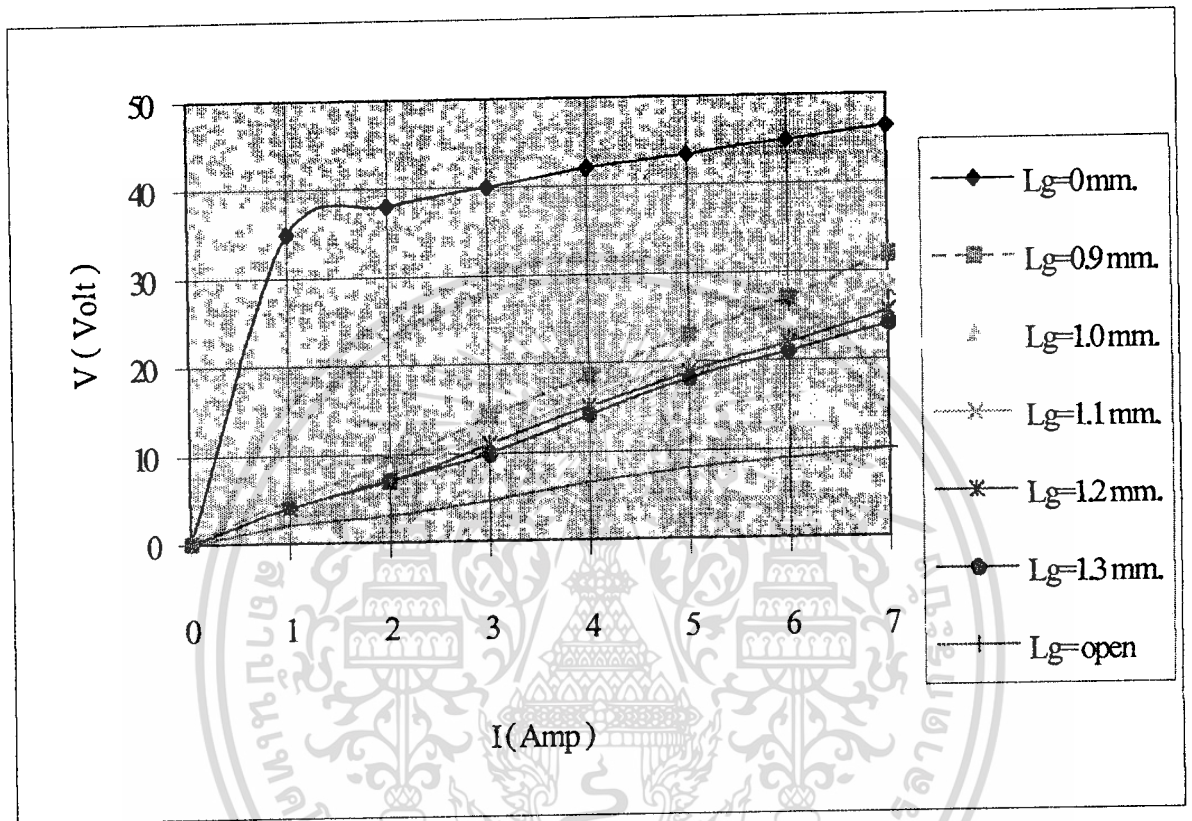
	Minimum loss (ที่ $L= 42 \text{ mH}$ , $I= 5 \text{ A.}$ )		
	Pco = 0.5 Watt/Kg.	Pco = 2 Watt/Kg	Pco = 10 Watt/Kg.
$2E(\text{cm.})$	2.258	2.567	3.915
$D(\text{cm.})$	20.064	12.162	3.141
$F_w$	0.375	0.421	0.460

ตารางที่ 6-3 แสดงขนาดของแกนเหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขของค่าสูญเสียในแกนเหล็ก

6. จาก ข้อ 4. และ ข้อ 5. จะพบว่าค่า Dimension กำหนดได้ด้วย เงื่อนไขต่างๆ เพื่อให้เกิดความเหมาะสมที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จะพบว่า ค่า Inductor เปลี่ยนได้ด้วย ช่องว่างอากาศ แต่ค่า Flux Density ก็จะเปลี่ยนไปด้วย



รูปที่ 6-1 แสดงการทดสอบตัวเหนี่ยวนำ 12 mH. กระแส 6 A. ที่ช่องว่างอากาศต่างๆ

เมื่อค่า Flux Density แปรผันกับ Voltage จึงสรุปได้ว่าหากช่องว่างอากาศมีค่ามาก จะมีค่า Flux Density น้อย และ หากช่องว่างอากาศมีค่าน้อย Flux Density จะมีค่ามาก การออกแบบจึงควรปรับช่องว่างอากาศให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด

## ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การออกแบบ Inductor โดยวิธี Area Product

#### ก.1 บทนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ (AC inductor) ก็เหมือนกับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งถ้าหากว่าไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรง การคำนวณในการออกแบบก็จะถูกต้อง

กำลังงานที่ได้ (Apparent power  $P_r$ ) ของตัวเหนี่ยวนำก็คือค่า Volt-Ampere ซึ่งเป็นผลมาจากกระแสกระตุ้น และแรงดันกระตุ้นที่ใส่ให้ตัวเหนี่ยวนำ

$$P_r = VA \quad [W] \quad (ก-1)$$

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

ค่า  $A_p$  ขึ้นอยู่กับค่า Volt-Ampere ของแกนเหล็ก เขียนด้วยสมการ

$$A_p = \left( \frac{VA \times 10^4}{4.444 B_m f K_u K_j} \right)^{1.14} \quad (ก-2)$$

เมื่อ  $K_j$  เป็น ค่าสัมประสิทธิ์ความหนาแน่นกระแส

$K_u$  เป็น window utilization factor

$f$  เป็น ความถี่ (Hz)

$B_m$  เป็น ความหนาแน่นฟลักซ์ (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 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
2. แรงดันไฟฟ้า

## 3. ความถี่

## 4. ความหนาแน่นฟลักซ์

ข้อกำหนดต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นได้ ผู้ออกแบบต้องหาค่าสูงสุดของ  $B_{ac}$  ที่ไม่ทำให้แม่เหล็กอิ่มตัวและ make tradeoffs ที่จะทำให้เกิดความล่าช้าสูงสุดสำหรับปริมาณที่กำหนดให้วัสดุที่ใช้ทำแกน เป็นตัวกำหนดค่าสูงสุดของความหนาแน่น flux ซึ่งสามารถทนทานได้ จำนวนรอบของขดลวดที่ใช้สามารถคำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ ดังนี้

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

ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็กที่มี air gap แสดงดังนี้

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

ค่าความเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับผลของความยาวของเส้นทางแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลรวมของความยาวของ air gap ( $l_g$ ) และอัตราส่วนของความยาวเฉลี่ยของแกนกับ Relative permeability  $l_m / \mu_r$

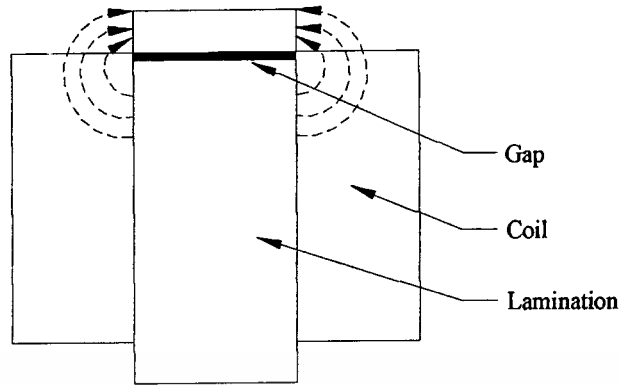
เมื่อค่า  $l_g$  มีค่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่า  $l_m / \mu_r$  เนื่องจาก  $\mu_r$  มีค่าสูง การเปลี่ยนแปลงของค่า  $\mu_r$  ไม่มีผลต่อความยาวของเส้นทางแม่เหล็กหรือค่าความเหนี่ยวนำ

สมการค่าความเหนี่ยวนำสามารถลดรูปได้เป็น

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

การคำนวณครั้งสุดท้ายของช่องอากาศเป็นตัวพิจารณาผลของ fringing flux ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงของช่องอากาศ รูปทรงของขั้ว และรูปร่างขนาดที่ตั้งของลวดตัวนำ

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



รูป 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 ค่า  
ของความเหนี่ยวนำ ( $L'$ ) จึงรวม fringing flux ไว้ด้วย

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

ความสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำกระแสสลับประกอบด้วย

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

copper loss และความสูญเสียจากแกนเหล็กได้กล่าวไปแล้ว [ภาคผนวก ค.] ความ  
สูญเสียของ gap ไม่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของแกน และค่า  $\mu$

ประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อ copper loss เท่ากับ core loss เหมือนในหม้อแปลง  
ไฟฟ้าเมื่อช่องอากาศเป็นศูนย์ ความสูญเสียจะไม่เกิดขึ้นในช่องว่างอากาศ แต่ถ้าช่องอากาศเพิ่มขึ้น  
จะเกิด fringing flux เพิ่มขึ้น และ fringing flux บางส่วนจะทำให้เกิดกระแสไหลวน ทำให้เกิด  
ความสูญเสียเพิ่มขึ้นอีก และลักษณะทางเรขาคณิตของแกนเหล็กก็มีผลต่อ fringing flux

ค่าความสูญเสียจากช่องอากาศขึ้นอยู่กับจำนวน fringing flux

$$P_g = K_i E l_g f B_m^2 \quad [H] \quad (ก-8)$$

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

ตาราง ก-1 Gap loss coefficient

Configuration	$K_I$
Two-coil C core	0.0388
Single-coil C core	0.0775
Lamination	0.155

### ขั้นตอนการออกแบบ

1. หาค่ากำลังที่เกิดขึ้น (apparent power)  $P_i$  จาก (ก-1)

$$P_i = VA \quad [W]$$

$$P_i = (115)(0.5)$$

$$P_i = 57.5 \quad [W]$$

2. หาพื้นที่  $A_p$  จากสมการ (ก-2)

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

$$P_i = 1.2 \quad [T]$$

$$K_u = 0.4$$

$$K_j = 366$$

3. เลือกขนาดของ lamination จากตาราง ก.3 ด้วยค่า  $A_p$  โดยค่าในตารางที่ใกล้กับ  $A_p$  ที่หาได้ต่างกัน 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $EI-87, A_p = 16.5$  นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4. หาจำนวนของขดลวดจากกฎ faraday สมการ (ก-3)

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

พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก  $A_c$  ดูจากตาราง ก.3

$$A_c = 4.45 \text{ [cm}^2\text{]}$$

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

$$N = 808 \text{ [turns]}$$

## 5. หาค่าอิมพีแดนซ์

$$X_L = \frac{E}{I} \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$X_L = \frac{115}{2\pi f}$$

$$X_L = 230 \text{ [}\Omega\text{]}$$

## 6. หาค่าความเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \text{ [H]}$$

$$L = \frac{230}{(6.28)(60)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $L = 0.610$  [H] ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. หาค่าความกว้างของช่องอากาศจากค่าของความเหนียวมาจากสมการ (ก-5)

$$l_g = \frac{0.4\pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{L} \quad [\text{cm}]$$

$$l_g = \frac{(1.26)(808)^2 (4.45)(10^{-8})}{0.610}$$

$$l_g = 0.060 \quad [\text{cm}]$$

ส่วนมากจะใช้กระดาษสีน้ำตาลกั้นเป็นช่องอากาศแต่กระดาษโดยส่วนมากหนาเป็นมิลลิเมตร ดังนั้นความกว้างช่องอากาศซึ่งหาได้เป็น cm ต้องเปลี่ยนเป็นมิลลิเมตรก่อน

แทนค่าจะได้ว่า

$$\text{cm} \times 393.7 = \text{mils}$$

$$0.060 [\text{cm}] \times 393.7 = 2306 \quad [\text{mils}]$$

การออกแบบตัวเหนียวที่ไม่มีฟลักซ์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC flux)

ในการออกแบบตัวเหนียวโดยใช้ lamination จะใช้วัสดุแทนที่ช่องอากาศระหว่างคู่ E กับ I เมื่อใช้วิธี gapping นี้ทำให้ใช้วัสดุเพียงครั้งหนึ่ง โดยในกรณีนี้ใช้ความหนาประมาณ 10 mil และ 2 mil

8. หาจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กรั่วจากสมการ (ก-6), ค่า G ดูได้จากตาราง ก.5

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

$$F = 1 + \frac{0.060}{\sqrt{4.45}} \ln\left(\frac{2(3.33)}{0.060}\right)$$

$$F = 1.13$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากหาฟลักซ์ซึ่ง  $F$  แทนค่าในสมการ (ก-7) จัดรูปสมการใหม่และหาจำนวนรอบ

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

$$N = \left( \frac{(0.060)(0.610)}{(1.26)(4.45)(1.13) \times 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$N = 760 \quad [\text{turns}]$$

สำหรับการออกแบบที่ดีนั้นควรจะเชื่อกถึงความถูกต้องว่าการลดลงของจำนวนรอบจะไม่ทำให้เกิดการอึดตัวแกนเหล็ก

9. หาคความหนาแน่นของกระแสโดยใช้ตาราง ก.2

$$J = K_j A_p^{-0.12} \quad [\text{A / cm}^2]$$

$$J = (366)(16.5)^{-0.12}$$

$$J = 261 \quad [\text{A / cm}^2]$$

10. หาขนาดของเส้นลวด  $A_{W(B)}$

$$A_{W(B)} = \frac{I}{J} \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{W(B)} = \frac{0.5}{261}$$

$$A_{W(B)} = 0.00192 \quad [\text{cm}^2]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AWG \text{ No.24} = 0.00205 \quad [\text{cm}^2]$$

กฎของการหาขนาดเส้นลวดไม่ได้แสดงในตารางครเลือกลวดที่มีขนาดที่เล็กกว่าที่เลือก

12. หาคความต้านทานของขดลวดในตาราง ก.4 หลัก C และหา  $MLT$  จากตาราง ก.3

$$R = MLT \times (\text{column } C) \times \xi \times 10^{-6} \quad [\Omega]$$

$$R = (12.3)(760)(842.1)(1.098) \times 10^{-6} \quad [\Omega]$$

$$R = 8.64 \quad [\Omega]$$

13. หากำลังสูญเสียในขดลวด

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

$$P_{cu} = (0.5)^2 (8.64)$$

$$P_{cu} = 2.16 \quad [\text{W}]$$

จากกราฟการสูญเสียในแกนเหล็กซิลิกอน 12 mil ที่ความหนาแน่น Flux 1.2T มีความสูญเสียในแกนเหล็กในแกนเหล็กประมาณ 1.0 mw/g Lamination EI-87 มีน้ำหนัก 481 g

$$P_{fe} = (0.001)(481)$$

$$P_{fe} = 0.481 \quad [\text{W}]$$

14. หาคความสูญเสียในช่วงจากสมการ (ก-8) ค่า E ดูจากตาราง ก.5

$$P_g = K_f E_l E_g f B_m^2 \quad [\text{W}]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_g = (0.155)(2.22)(0.060)(60)(1.2)^2$$

$$P_g = 1.78 \quad [\text{W}]$$

15.หาค่าความสูญเสียของทองแดง, เหล็ก, และช่องอากาศ

$$P_{\Sigma} = P_{cu} + P_{fe} + P_g \quad [\text{W}]$$

$$P_{\Sigma} = 2.16 + 0.481 + 1.78$$

$$P_{\Sigma} = 4.42 \quad [\text{W}]$$

ในการทดสอบเฟ็งพิสูงนี้ตัวอย่างเหล่านี้การวัดค่าความเหนี่ยวนำมีค่า 0.592 H กระแส 0.515 A ที่ 115 V 60 KG และตัวเหนี่ยวนำมีความต้านทานของขดลวดมีค่า 8.08  $\Omega$

ตารางที่ ก-2

ค่าคงที่ของโครงสร้างแกน

Core	Losses	$K_j$ (25°C)	$K_j$ (50°C)	$(x)$	$K_s$	$K_w$	$K_v$
Pot core	$P_{cu} = P_{fe}$	433	632	-0.17	33.8	48	14.5
Powder core	$P_{cu} \gg P_{fe}$	403	590	-0.12	32.5	58.8	13.1
Lamination	$P_{cu} = P_{fe}$	366	534	-0.12	4.3	68.2	19.7
C core	$P_{cu} = P_{fe}$	323	468	-0.14	39.2	66.6	17.9
Single-core	$P_{cu} \gg P_{fe}$	395	569	-0.14	44.5	76.6	25.6
Tape-wound core	$P_{cu} = P_{fe}$	250	365	-0.13	50.9	82.3	25

$$J = K_j A_p^{(x)}$$

$$A_t = K_s A_p^{0.50}$$

$$W_t = K_w A_p^{0.75}$$

$$Vol = K_v A_p^{0.75}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3  
คุณสมบัติของแผ่น laminate

1	2	3	4	5	6	7	8	
Core	$A_p$ cm <sup>2</sup>	$A_p$ cm <sup>4</sup>	MLT,cm	N		$\Omega(50^\circ C)$	$p_\Sigma$	$I = \sqrt{\frac{W}{\Omega}}$
				AWG				
1. EE-3031	4.07	0.0088	1.72	90	30	0.58	0.123	0.323
2. EE-2829	6.53	0.0228	2.33	147	30	1.30	0.199	0.276
3. EI-187	14.2	0.108	3.20	314	30	3.82	0.432	0.237
4. EE-2425	23.3	0.293	5.08	498	30	9.61	0.714	0.192
5. EE-2627	38.5	0.906	5.79	245	25	1.68	1.22	0.602
6. EI-375	46.2	1.23	6.30	350	25	2.62	1.43	0.522
7. EI-50	53.2	1.75	7.09	263	25	2.21	1.73	0.625
8. EI-21	62.1	2.36	7.57	372	25	3.34	1.98	0.544
9. EI-625	83.2	4.29	8.84	503	25	5.27	2.70	0.505
10. EI-75	120.0	8.85	10.6	211	20	0.826	3.90	1.54
11. EI-87	163.0	16.50	12.3	296	20	1.34	5.28	1.40
12. EI-100	213.0	28.10	14.5	386	20	2.07	6.90	1.29
13. EI-112	270.0	44.90	16.0	492	20	2.91	8.76	1.23
14. EI-125	333.0	68.70	17.7	625	20	4.09	10.8	1.15
15. EI-138	403.0	107.0	19.5	740	20	5.33	13.0	1.10
16. EI-150	473.0	143.0	21.2	893	20	6.99	15.5	1.05
17. EI-175	742.0	263.0	24.7	1080	20	9.85	21.1	1.034
18. EI-36	649.0	324.0	26.5	1701	20	16.6	23.3	0.836
19. EI-19	1069.0	601.0	31.7	2886	20	33.8	32.8	0.690

Copper loss = Iron loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)  
คุณสมบัติของแผ่น laminate

9	10	11	12	13	14	15	16	
$\Delta T(25^{\circ}C)$ $J = I/cm^2$	$\Omega(75^{\circ}C)$	$P_{\Sigma}$	$I = \sqrt{\frac{W}{\Omega}}$	$\Delta T(25^{\circ}C)$ $J = I/cm^2$	Weight Fe	cu	Volume $cm^2$	$A_c$ $cm^2$
638	0.645	0.228	0.472	932	1.02	1.02	0.651	0.0502
546	1.43	0.464	0.403	795	2.19	1.59	1.35	0.0907
469	4.19	1.01	0.347	685	7.09	3.08	4.34	0.204
380	10.5	1.67	0.281	555	15.5	9.06	9.22	0.363
371	1.85	2.84	0.876	540	45.8	15.5	19.1	0.816
322	2.87	3.34	0.762	470	49.7	24.7	25.3	0.816
385	2.43	4.04	0.912	562	90.6	31.7	36.8	1.45
335	3.66	4.62	0.793	489	99.3	41.0	39.2	1.45
312	5.79	6.30	0.737	455	179	44.4	60.0	2.27
296	0.906	9.10	2.24	432	312	105	104.0	3.27
270	1.48	12.3	2.04	393	481	135	164.0	4.45
249	2.27	16.1	1.88	363	712	241	246.0	5.81
237	3.19	20.4	1.79	344	1029	342	350.0	7.34
222	4.49	25.3	1.68	324	1414	460	481.0	9.07
213	5.85	30.2	1.61	310	1 880	680	629.0	11.6
203	7.67	36.3	1.54	296	2457	906	829.0	13.1
199	10.8	49.3	1.51	291	3906	1273	1312.0	17.8
161	18.3	54.5	1.22	235	3575	2355	1654.0	15.3
134	37.1	76.5	1.015	196	4889	3805	2875.0	17.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4

คุณสมบัติของลวดตัวนำ

AWG Wire Size	Bare Area		Resistance	Heavy Synthetics								
	Cm <sup>2</sup> 10 <sup>-3</sup> (footnote b)	CIR-MIL <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> Ω	Area		Diameter		Turns per		Turns per		Weight
			cm at 20 <sup>o</sup> C	Cm <sup>2</sup> 10 <sup>-3</sup>	CIR-MIL <sup>2</sup>	cm	Inch <sup>2</sup>	cm	Inch <sup>2</sup>	Cm <sup>2</sup>	Inch <sup>2</sup>	g/cm
10	52.61	10384	32.70	55.9	11046	0.267	0.1051	3.87	9.5	10.73	69.20	0.468
11	41.68	8226	41.37	44.5	8798	0.238	0.0938	4.36	10.7	13.48	89.95	0.3750
12	33.08	6529	52.09	35.64	7022	0.213	0.0838	4.85	11.9	16.81	108.4	0.2977
13	26.26	5184	65.64	28.36	5610	0.190	0.0749	5.47	13.4	21.15	136.4	0.2367
14	20.82	4109	82.80	22.95	4556	0.171	0.0675	6.04	14.8	26.14	168.6	0.1879
15	16.51	3260	104.3	18.37	3624	0.153	0.0602	6.77	16.6	32.66	210.6	0.1492
16	13.07	2581	131.8	14.73	2905	0.137	0.0539	7.32	18.6	40.73	262.7	0.1184
17	10.39	2052	165.8	11.68	2323	0.122	0.0482	8.18	20.8	51.36	331.2	0.0943
18	8.228	1624	209.5	9.326	1857	0.109	0.0431	9.13	23.2	64.33	414.9	0.07472
19	6.531	1289	263.9	7.539	1490	0.0980	0.0386	10.19	25.9	79.85	515.0	0.05940
20	5.188	1024	332.3	6.065	1197	0.0879	0.0346	11.37	28.9	98.93	638.1	0.04726
21	4.116	812.3	418.9	4.837	954.8	0.0785	0.0309	12.75	32.4	124.0	799.8	0.03757

ตารางที่ ก-4 (ต่อ)  
คุณสมบัติของลวดตัวนำ

AWG Wire Size	Bare Area		Resistance	Heavy Synthetics								
	Cm <sup>2</sup> 10 <sup>-3</sup> (footnote b)	CIR-MIL <sup>2</sup>	10 <sup>-6</sup> Ω	Area		Diameter		Turns per		Turns per		Weight
			cm at 20° C	Cm <sup>2</sup> 10 <sup>-3</sup>	CIR-MIL <sup>2</sup>	cm	Inch <sup>2</sup>	cm	Inch <sup>2</sup>	Cm <sup>2</sup>	Inch <sup>2</sup>	g/cm
22	3.243	640.1	531.4	3.857	761.7	0.0701	0.0276	14.25	36.2	155.5	1003	0.02965
23	2.588	510.8	666.0	3.135	620.0	0.0632	0.0249	15.82	40.2	191.3	1234	0.02372
24	2.047	404.0	842.1	2.514	497.3	0.0566	0.0223	17.63	44.8	238.6	1539	0.01884
25	1.623	320.4	1062.0	2.002	396.0	0.0505	0.0199	19.80	50.3	299.7	1933	0.01498
26	1.280	252.8	1345.0	1.603	316.8	0.0452	0.0178	22.12	56.2	374.2	2414	0.01185
27	1.021	201.6	1687.6	1.313	259.2	0.0409	0.0161	24.44	62.1	456.9	2947	0.00945
28	0.8046	158.8	2142.7	1.0515	207.3	0.0366	0.0144	27.32	69.4	570.6	3680	0.00747
29	0.6470	127.7	2664.3	0.8548	169.0	0.0330	0.0130	30.27	76.9	701.9	4527	0.00602
30	0.5067	100.0	3402.2	0.6785	134.5	0.0294	0.0116	33.93	86.2	884.3	5703	0.00472
31	0.4013	79.21	4294.6	0.5596	110.2	0.0267	0.0105	37.48	95.2	1072	6914	0.00372
32	0.3242	64.00	5314.9	0.4559	90.25	0.0241	0.0095	41.45	105.3	1316	8488	0.00305
33	0.2554	50.41	6748.6	0.3662	72.25	0.0216	0.0085	46.33	117.7	1638	10565	0.00241

ตารางที่ ก-4 (ต่อ)  
คุณสมบัติของลวดตัวนำ

AWG Wire Size	Bare Area		Resistance $10^{-6}\Omega$ cm at 20° C	Heavy Synthetics								
	$\text{Cm}^2 10^{-3}$ (footnote b)	CIR-MIL <sup>2</sup>		Area		Diameter		Turns per		Turns per		Weight g/cm
			$\text{Cm}^2 10^{-3}$	CIR-MIL <sup>2</sup>	cm	Inch <sup>2</sup>	cm	Inch <sup>2</sup>	Cm <sup>2</sup>	Inch <sup>2</sup>		
34	0.2011	39.69	8572.8	0.2863	56.25	0.0191	0.0075	52.48	133.3	2095	13512	0.00189
35	0.1589	31.36	10849	0.2268	44.89	0.0170	0.0067	58.77	149.3	2545	17060	0.00150
36	0.1266	25.00	13608	0.1813	36.00	0.0152	0.0060	65.62	166.7	3309	21343	0.00119
37	0.1026	20.25	168/01	0.1538	24.01	0.0140	0.0055	71.57	181.8	3901	25161	0.000977
38	0.08107	16.00	21266	0.1207	24.01	0.0124	0.0049	80.35	204.1	4971	32062	0.000773
39	0.06207	12.25	27775	0.0932	18.49	0.0109	0.0043	91.57	232.6	6437	41518	0.000593
40	0.04869	9.61	35400	0.0723	14.44	0.0096	0.0038	103.6	263.2	8298	53522	0.000464
41	0.03972	7.84	43405	0.0584	11.56	0.00863	0.0034	115.7	294.1	10273	66260	0.000379
42	0.03166	6.25	55428	0.04558	9.00	0.00762	0.0030	131.2	333.3	13163	84901	0.000299
43	0.02452	4.84	70308	0.03683	7.29	0.00685	0.0027	145.8	370.4	16291	105076	0.000233
44	0.02020	4.00	85072	0.03165	6.25	0.00635	0.0025	157.4	400.0	18957	122272	0.000195

ตารางที่ ก-5  
แผ่น laminate ชนิด EI และ EE

Cat. No	D	E	F	G	MPL	HT	WHT	LT
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
	1	2	3	4	5	6	7	8
1-94EI	0.236	0.236	0.239	0.396	1.7	0.6	0.7	1.0
1-31-31EE	0.236	0.236	0.239	0.714	2.4	1.0	0.7	1.0
1-28-29 EE	0.317	0.317	0.317	0.795	2.9	1.1	1.0	1.3
1-32-33 EE	0.356	0.356	0.381	0.698	2.9	1.1	1.1	1.5
1-186 EI	0.478	0.478	0.478	0.635	3.2	1.1	1.4	1.9
1-185 EI	0.478	0.478	0.478	0.874	3.7	1.3	1.4	1.9
1-187 EI	0.478	0.478	0.478	1.113	4.1	1.6	1.4	1.9
1-188 EI	0.478	0.478	0.478	1.587	5.1	2.1	1.4	1.9
1-186-187 EE	0.478	0.478	0.478	1.748	5.4	2.2	1.4	1.9
1-186-188 EE	0.478	0.478	0.478	2.222	6.4	2.7	1.4	1.9
1-187-188 EE	0.478	0.478	0.478	2.697	7.3	3.2	1.4	1.9
1-25 EI	0.635	0.635	0.635	0.952	4.4	1.6	1.6	1.9
1-24-25 EE	0.635	0.635	0.635	1.270	5.1	1.9	1.9	2.5
1-26-38 EE	0.952	0.952	0.635	1.321	5.8	2.3	2.2	3.2
1-312 EI	0.795	0.795	0.952	1.984	7.5	2.8	2.7	3.5
1-26-27 EE	0.952	0.952	0.635	1.748	6.7	2.7	2.2	3.2
1-27-38 EE	0.952	0.952	0.635	2.113	7.4	3.1	2.2	3.2
1-375 EI	0.952	0.952	0.795	1.905	7.3	2.9	2.5	3.5
1-50 EI	1.270	1.270	0.635	1.905	7.6	3.2	2.5	3.8
1-21 EI	1.270	1.270	0.795	2.065	8.3	3.3	2.9	4.1
1-625 EI	1.587	1.587	0.795	2.383	9.5	4.0	3.2	4.8
1-68 EI	1.748	1.748	0.874	2.619	10.5	4.4	3.5	5.2
1-202 EI	1.905	1.905	1.270	2.286	10.9	3.9	4.4	7.0
1-75 EI	1.905	1.905	0.952	2.857	11.4	4.8	3.8	5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)  
แผ่น laminate ชนิด EI และ EE

Cat. No	D	E	F	G	MPL	HT	WHT	LT
	(cm) 1	(cm) 2	(cm) 3	(cm) 4	(cm) 5	(cm) 6	(cm) 7	(cm) 8
1-100 EI	2.540	2.540	1.270	3.810	15.2	6.3	5.1	7.6
1-112 EI	2.857	2.857	1.430	4.288	17.2	7.1	5.7	8.6
1-125 EI	3.175	3.175	1.587	4.762	19.0	7.9	6.3	9.5
1-138 EI	3.492	3.492	1.748	5.24	21.0	8.7	7.0	10.5
1-150 EI	3.810	3.810	1.905	5.715	22.9	9.5	7.6	11.4
1-145 EI	3.683	3.683	2.349	7.620	27.3	11.4	8.4	12.1
1-36 EI	4.127	4.127	3.175	6.667	27.9	10.8	10.5	14.6
1-175 EI	4.445	4.445	2.222	6.680	26.7	11.1	8.9	13.3
1-19 EI	4.445	4.445	4.445	7.620	33.0	12.1	13.3	17.8
1-212 EI	5.397	5.397	2.700	8.098	32.4	13.5	10.8	16.2
1-225 EI	5.713	5.713	2.857	8.572	34.3	14.3	11.4	17.1
1-20 EI	6.350	6.350	4.762	9.525	41.3	15.9	15.9	22.2
1-3 EI	7.620	7.620	3.810	11.430	45.7	19.0	15.2	22.9
1-301 EI	7.620	7.620	5.715	11.430	49.5	19.0	19.0	26.7
1-4EI	10.160	10.160	5.080	15.240	61.0	25.4	20.3	30.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)  
แผ่น laminate ชนิด EI และ EE

Gross WTFE (kg) 9	WTCU (kg) 10	MLT (cm) 11	Gross $A_c$ ( $cm^2$ ) 12	Gross $W_a$ ( $cm^2$ ) 13	Gross $A_p$ ( $cm^4$ ) 14	Gross $K_g$ ( $cm^5$ ) 15	$A_t$ ( $cm^2$ ) 16
0.001	0.001	2.1	0.06	0.09	0.01	0.000056	3.0
0.001	0.001	2.1	0.06	0.17	0.01	0.000101	4.1
0.002	0.002	2.7	0.10	0.25	0.03	0.000384	6.6
0.003	0.003	3.0	0.13	0.27	0.03	0.000563	7.7
0.006	0.004	3.8	0.23	0.30	0.07	0.001652	11.0
0.006	0.006	3.8	0.23	0.42	0.10	0.002274	12.6
0.007	0.07	3.8	0.23	0.53	0.12	0.002895	14.2
0.009	0.010	3.8	0.23	0.76	0.17	0.004131	17.4
0.009	0.011	3.8	0.23	0.83	0.19	0.004547	18.5
0.011	0.014	3.8	0.23	1.06	0.24	0.005783	21.7
0.013	0.017	3.8	0.23	1.29	0.29	0.007019	24.8
0.014	0.011	4.9	0.40	0.60	0.24	0.007960	20.6
0.016	0.014	4.9	0.40	0.81	0.33	0.010614	23.4
0.040	0.019	6.2	0.91	0.84	0.76	0.44456	33.8
0.036	0.004	6.6	0.63	1.89	1.19	0.045893	47.2
0.046	0.025	6.2	0.91	1.11	1.01	0.058819	38.4
0.051	0.030	6.2	0.91	1.34	1.22	0.071129	42.4
0.051	0.036	6.7	0.91	1.51	1.37	0.074266	46.2
0.094	0.033	7.7	1.61	1.21	1.95	0.163800	53.2
0.102	0.048	8.2	1.61	1.64	2.65	0.298652	62.1
0.183	0.064	9.5	2.52	1.89	4.77	0.508804	83.2
0.244	0.084	10.3	3.05	2.29	6.99	0.825090	100.7
0.302	0.126	12.2	3.63	2.90	10.54	1.251557	131.7
0.316	0.109	11.2	3.63	2.72	9.88	1.277636	119.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)  
แผ่น laminate ชนิด EI และ EE

Gross WTFE (kg) 9	WTCU (kg) 10	MLT (cm) 11	Gross $A_c$ ( $\text{cm}^2$ ) 12	Gross $W_a$ ( $\text{cm}^2$ ) 13	Gross $A_p$ ( $\text{cm}^4$ ) 14	Gross $K_{g_3}$ ( $\text{cm}^5$ ) 15	$A_t$ ( $\text{cm}^2$ ) 16
0.503	0.171	13.0	4.94	3.71	18.33	2.786457	163.0
0.750	0.254	14.8	6.45	4.84	31.22	5.458068	212.9
1.068	0.360	16.5	8.17	6.13	50.06	9.890285	269.5
1.465	0.492	18.3	10.08	7.56	76.21	16.795435	332.7
1.951	0.654	20.1	12.20	9.16	111.69	27.152304	402.5
2.532	0.853	22.0	14.52	10.89	158.04	41.638281	479.0
2.826	1.447	22.7	13.56	17.90	242085	57.985265	600.5
3.632	2.055	27.3	17.04	21.90	360.65	90.027224	742.7
4.024	1.350	25.6	19.76	14.85	293.34	90.642741	652.0
4.978	3.992	32.6	19.76	33.87	669.22	162.443682	1066.9
7.200	2.401	30.9	29.13	21.86	636.95	240.316839	961.6
8.545	2.844	32.7	32.66	24.50	800.07	320.126244	1077.8
12.699	6.708	41.6	40.32	45.36	1829.14	709.478561	1673.4
20.255	6.763	43.7	58.06	43.55	2528.61	1344.824692	1916.1
21.943	11.534	49.7	58.06	65.32	3792.91	1774.078934	2409.7
48.013	15.918	57.8	103.23	77.42	7991.64	5706.912170	3406.4
48.013	15.918	57.8	103.23	77.42	7991.64	5706.912170	3406.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### Minimization or Maximization of Function

#### ข.1 บทนำ

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

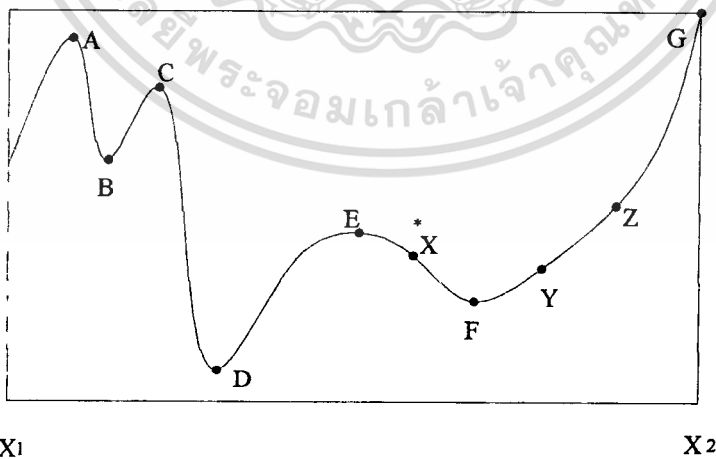
จุดสูงสุด และจุดต่ำสุดที่จะกล่าวในที่นี้แบ่งเป็น 2 แบบคือ

1. Global ซึ่งเป็นจุดที่ค่าที่สุดจริงๆ ของฟังก์ชัน และ
2. Local ซึ่งเป็นจุดที่ค่าที่สุดในช่วงหรือในขอบเขตที่กำหนด

ดังแสดงในรูปที่ (ข-1) มีวิธีเฮอริสติกอยู่ 2 วิธี คือ

1. หาจุดที่เป็นค่าสูงสุด ต่ำสุดที่เป็น local โดยเริ่มจากการเปลี่ยนค่าทางด้านกว้างและเก็บค่าที่สูงสุด ต่ำสุดของเหล่านั้น หรือ

2. ในการหาค่าสูงสุด ต่ำสุดที่เป็น local โดยการนำค่า amplitude ในขั้นตอนสุดท้ายมาจากมันและถ้าเส้นทางเดินราก็มีอยู่กลับมา เพื่อให้ได้จุดที่ดีกว่าสำหรับวิธี annealing methodes จะใช้แก้ปัญหาค่าสูงสุด ต่ำสุดที่เป็น global



รูป ข-1 แสดงจุดต่างๆ ของฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นที่นี้จะกล่าวถึง optimization ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้หาผลลัพธ์ในกรณีที่มีตัวแปรจำนวนมาก ค่าในส่วนสำคัญที่จะพัฒนาขอบเขตของวิธี constrained optimization คือ โปรแกรมเชิงเส้นเมื่อใช้

ฟังก์ชันเป็นค่าที่เหมาะสมและมีข้อบังคับ เกิดขึ้นกับฟังก์ชันเชิงเส้นของค่าที่เป็นอิสระโดยเราไม่สนใจในส่วนที่เหลือซึ่งได้รวมไว้ในบทนี้แล้ว ถูกเรียกว่า Simplex algorithm สำหรับปัญหาที่เป็นโปรแกรมเชิงเส้นจุดสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันจากรูปคือจุด A, C และ E เป็น local ไม่เป็น global maxima จุด B และ F เป็น local คือจุด G ซึ่งอยู่ที่ขอบเขตของช่วงที่พิจารณาของฟังก์ชัน global minima คือจุด D

Annealing methods ที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่เราได้ว่าในทางปฏิบัติจะแก้ไม่ตกและมันจะสนับสนุนปัญหาของการหาค่าสูงสุด ต่ำสุดที่เป็น global ซึ่งมีจำนวนมากโดยไม่ต้องการหาค่าสูงสุด ต่ำสุดที่เป็น local ดังนั้นวิธีการนี้จึงถูกเลือกเพื่อสรุปข้อพิจารณาของพื้นที่ใหม่นี้

ในส่วนนี้จะแก้ปัญหาโดยหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการหาค่าต่ำสุด ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับค่าตัวต่อไปและจะขึ้นอยู่กับค่าตัวก่อนหน้านั้น ถ้าจะหา Algorithm ที่สมบูรณ์แบบในการแก้ปัญหาในส่วนที่นำมาประยุกต์ใช้ อาจจะบอกอะไรหลายสิ่งซึ่งมากกว่าที่ต้องการจะรู้ แต่มันมี Algorithm ที่ไม่สมบูรณ์แบบ ในการหาค่าที่เหมาะสม ในกรณีนี้อาจกระตุ้นให้หาวิธีมากกว่า 1 วิธี เพื่อเป็นแบบในการเปรียบเทียบ

วิธีการเลือกสำหรับใช้ในการพิจารณามีดังต่อไปนี้

# เลือกกระหว่างวิธีที่ใช้หาค่าฟังก์ชันที่ต่ำที่สุดเท่านั้น และ วิธีที่หาค่าส่วนที่แยกออกมา (derivative) ของฟังก์ชันในกรณีที่มีขนาดหลายมิติ (multidimensional) ส่วนที่แยกย่อย (derivative) นี้เป็นขนาดเวกเตอร์เกรเดียน

# สำหรับการหาค่าต่ำสุดขนาด 1 มิติ (ค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ 1 ตัวแปร) โดยไม่คำนวณค่าของส่วนที่แยกออกมา (derivative) ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ ๖.3 แล้ว และได้ใช้วิธีของ Berent อธิบายในหัวข้อ ๖.4 ถ้าฟังก์ชันที่มีอยู่มีค่าของส่วนที่แยกออกมามีอันดับสองไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงทำให้สมการพาราโบลาของวิธีการ Berent ก็ไม่มีประโยชน์ และใช้รูปแบบที่ง่ายที่สุดของ golden section search ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ ๖.3

# สำหรับการหาค่าต่ำสุดที่คำนวณส่วนที่แยกออกมาด้วย (derivative) ในหัวข้อ ๖.5 ได้แปลงวิธีการ Berent ออกไป ซึ่งทำให้จำกัดขอบเขตการใช้ข้อมูลส่วนที่แยกออก (derivative) อันดับแรก ทางเลือกในการใช้ข้อมูล (derivative) เพื่อให้ได้โพลีโนเมียล ที่มีลำดับสูงในการปรับปรุง convergence ให้มีค่าเรียบมากๆ วิเคราะห์ค่าต่ำสุดที่ไม่ทำให้โพลีโนเมียลในขั้นตอนคั้นๆ มีค่าผิดพลาดมากๆ โดยเฉพาะฟังก์ชันที่อาจจะเป็นฟังก์ชัน exponential ในภายหน้า

กลับไปพิจารณาหลายมิติ (multidimensional) ทั้งที่มีและ ไม่มีการคำนวณในอันดับแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

# ในหัวข้อ ข. 5 ได้ละเอียดอะไรบ้างอย่าง วิธีการ downhill simplex ของ Nelder และ Mead (Simplex ที่ใช้ในหัวข้อนี้ จะไม่ซับซ้อนเหมือนวิธีการ Simplex ของ Nelder โปรแกรมเชิงเส้น) วิธีการ downhill ที่ตรงไปตรงมา อาจจะทำให้เกือบไม่มีข้อสมมุติฐานพิเศษเกี่ยวกับฟังก์ชันที่มีอยู่ในกรณีนี้สามารถชะลอขั้นตอนสุดท้าย แต่ในบางกรณีก็ต้องจริงจังกับขั้นตอนสุดท้าย ที่จริงแล้วจะรวบรัดหลักเกณฑ์และบรรจุด้วยตัวมันเองให้เรียบร้อย : โดยทั่วไปโปรแกรมหาค่าต่ำสุดที่มีขนาด  $N$  ภายใต้อายุ 100 โปรแกรม วิธีนี้จะมีประโยชน์มาก เมื่อการคำนวณหาค่าต่ำสุดเป็นส่วนหนึ่งของปัญหาทั้งหมดที่มีอยู่แล้ว ในเนื้อหาการเก็บข้อมูลลำดับที่  $N^2$  และการคำนวณในส่วนที่แยกออกมาไม่มีความจำเป็น

# ในหัวข้อ ข. 6 ใช้วิธีการ direction-set ซึ่งเป็นแบบเดียวกับวิธีการของ Powell วิธีการเหล่านี้จะเลือกเมื่อไม่สามารถคำนวณค่าที่แยกออกมาอย่างง่ายได้ และไม่จำเป็นที่จะต้องไปดูถูกรวบรวมว่าสามารถทำได้ถึงแม้ว่าค่าที่แยกออกมาไม่มีความจำเป็น วิธีการนั้นต้องการหาค่าต่ำสุดของอัลกอริทึมย่อยใน 1 มิติ เช่นเดียวกับวิธีการของ Brent

มีอัลกอริทึมอยู่ 2 หลักใหญ่ในการหาค่าต่ำสุดที่มีขนาดหลายมิติ ด้วยการคำนวณของการแยกส่วนอันดับแรก (first derivative) ทั้ง 2 วิธีต้องการอัลกอริทึมย่อย ในการหาค่าต่ำสุดใน 1 มิติ ซึ่งสามารถใช้ข้อมูลที่แยกออกมา (derivative) ของแต่ละอันด้วยตัวมันเองหรือไม่ใช้ก็ได้ตามแต่สมควร (ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของการคำนวณฟังก์ชัน และ เวกเตอร์เกรเดียนของมันเอง) มีวิธีให้เลือกดังนี้

# อันดับแรกโดยวิธี Conjugate gradient ของอัลกอริทึม Fletcher-Reeves และบางทีครอบคลุมไปถึงอัลกอริทึม Polak-Ribiere วิธีการ Conjugate gradient ต้องการเก็บข้อมูล  $N$  ครั้งเพื่อคำนวณหาค่าที่แยกออกมา (derivative) และการหาค่าต่ำสุดในส่วนย่อยขนาด 1 มิติ กลับไปที่หัวข้อ ข.7 สำหรับการอธิบายรายละเอียด

# อันดับที่สองโดยวิธี quasi - newton หรือ variable metric ของ Davidon-Fletcher-Powell (DFP) (บางครั้งอาจจะอ้างถึงแค่ Fletcher-Powell) หรือมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับอัลกอริทึม Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) วิธีการเหล่านี้ต้องการเก็บลำดับข้อมูล  $N^2$  คำนวณค่าที่แยกออกมา (derivative) และค่าต่ำสุดย่อยๆ ขนาด 1 มิติ ดูรายละเอียดหัวข้อ ข.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ๗.2 Golden Section Search in One Dimension

วิธีการแบ่งครึ่งรากของฟังก์ชันที่อยู่ใน one-dimension (1 ตัวแปร) ซึ่งค่ารากจะอยู่ในช่วงของ  $(a, b)$  การคำนวณการหารากของฟังก์ชันจะใช้จุดกึ่งกลางคือ จุด  $x$  และ จุด  $a$  เป็นช่วงเล็กๆ จะได้  $(a, x)$  หรือ  $(x, b)$  กระบวนการต่อเนื่องจนช่วงเล็กๆ นั้นเป็นจริง ถ้า optimal เลือก  $x$  เป็นจุดกึ่งกลางของ  $(a, b)$  ก็จะลดช่วงความยาวสูงสุด

เพื่อความแม่นยำตลอดการเปลี่ยนไปตามหลักของ optimization problem ; bracket minimum ใช้ หารากของฟังก์ชันโดยใช้จุดที่เป็นคู่  $a < b$  เมื่อฟังก์ชันมีเครื่องหมายตรงข้ามกันทั้ง 2 จุด ค่าต่ำสุดโดยการเปรียบกับค่า bracket เมื่อมีอยู่ 3 จุด  $a < b < c$  ดังนั้น  $f(b)$  จะ น้อยกว่าและ  $f(c)$  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 (๗-2) 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) แต่โดยทั่วไปฟังก์ชัน  $f(x)$  ใกล้โดยใช้อนุกรม Taylor

$$f(x) \approx f(b) + \frac{1}{2} f''(b)(x-b)^2 \quad (๗-1)$$

เทอมที่ 2 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบเทอมแรกจะได้

$$|x-b| < (\sqrt{\varepsilon b}) \sqrt{\frac{2|f(b)|}{b^2 f''(b)}} \quad (๗-2)$$

จากสมการเมื่อเราเขียนให้อยู่ในรูปทางขวามือ เราจะได้อยู่ในรูปของรากที่ 2 ทำให้เราได้รับความกว้างของช่วงของ 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  $w$  ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{b-a}{c-a} = w ; \frac{c-b}{c-a} = 1-w \quad (๗-3)$$

สมมติว่าที่จุด  $x$  มีการรวม  $z/b$

$$\frac{x-b}{c-a} = z \quad (๗-4)$$

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

$$z = 1 - 2w \quad (๗-5)$$

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

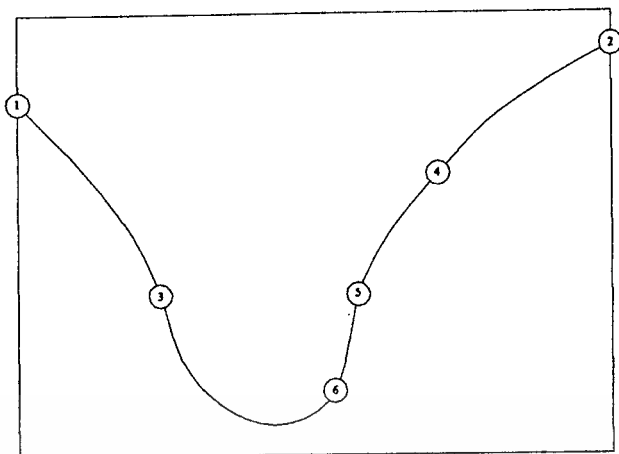
แต่ถ้าส่วนมีขนาดใหญ่มากค่าของ  $w$  ควรเป็นเท่าไร จากไหนถึงไหน โดยเราต้องออกแบบว่าถ้า  $z$  ถึงถูกเลือกเป็น optimum ซึ่งต้องมีค่าก่อน  $w$  scale similarity implies ของ  $x$  นั้นจะเท่ากับ เศษส่วนของระยะทางจาก  $b$  ถึง  $c$  และผลต่างของ  $b$  กับ  $a$  ถึง  $c$  เขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{z}{1-w} = w \quad (๗-6)$$

2. จากสมการ (๗-5) และ (๗-6) จะได้สมการควอดราติก

$$w^2 - 3w + 1 = 0 \quad \text{จะได้} \quad w = \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \approx 0.38197 \quad (๗-7)$$

โดยทั่วไปนั้น optimal bracketing interval  $a < b < c$  จะมีจุดกึ่งกลางเป็นจุด  $b$  ซึ่งจะมีระยะระหว่าง 0.38197 จากจุด  $a$  และ 0.61803 จากจุด  $b$  ซึ่งเศษส่วนนี้จะเรียกว่า golden mean หรือ golden section วิธี minimization ของฟังก์ชัน optimal ซึ่งความต่อเนื่องของวิธีแบ่งครึ่งเพื่อที่จะหาค่าศูนย์ ซึ่งจะเรียกว่า วิธีการหา golden section ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข- 2 แสดงค่า step เพื่อหา minimum bracket

การมี bracketing ของ minimum ต่อไป ค่าต่ำสุดเริ่มต้นของ bracket ที่จุด 1, 3, 2 คำนวณจากฟังก์ชันได้จุดที่ 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

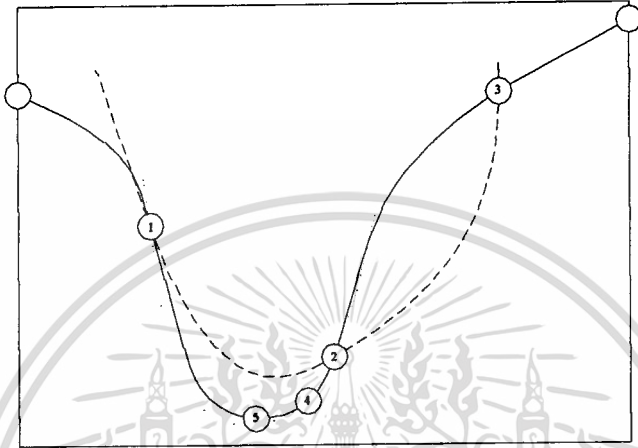
(Parabolic Interpolation and Brent's Method in One-dimension)

วิธี Golden Section Search เป็นวิธีที่ไม่ดีในกรณีการทำ minimization function เนื่องจากไม่มีการร่วมกันในการทำ minimum ให้ลดค่าลงเรื่อย ๆ และค่า minimum ที่จุดมุมทำไมถึงว่าวิธีนี้ไม่ดีก็คือจะต้องใช้ฟังก์ชันที่คล้ายกับรูป Parabolic ดังนั้นเราจึงใช้วิธี "inverse parabolic" แทนการใช้ Golden Section Search ซึ่งสูตรในการหาค่า  $x$  ที่เป็นจุดต่ำสุดของ parabola ของ 3 จุดของ function ที่ให้มา คือ

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

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) การดูเข้าของ

จุดต่ำสุดโดยใช้วิธี inverse parabolic interpolation ของ function แทนด้วยเส้นทึบซึ่งจุดเริ่มต้นคือจุด 1, 2, 3 และเราจะวาดรูป Parabola ได้ตั้งเส้นประ จุดต่ำสุดจะอยู่ที่จุด 4 ซึ่งจะแทนที่จุด 3 เราจะได้ Parabola ใหม่ตามเส้นจุดๆ ซึ่งวาดผ่าน 1, 4, 2 จุดต่ำสุดของ Parabola นี้จะอยู่ที่จุด 5 ซึ่งเป็นจุดต่ำสุดของฟังก์ชันนี้



รูป 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 การหาทิศทางในหนึ่งมิติโดยใช้อ่อนพันธ์อันดับหนึ่ง (One-dimensional Search with First Derivatives)

หลักในการหาก็คือจะพยายามหาค่าศูนย์ของอนุพันธ์โดยไม่สนใจข้อมูลของ function ซึ่งการใช้อ่อนพันธ์จะช่วยให้เราในการเลือกจุด 3 จุดใหม่ๆ ที่อยู่ในขอบเขต

การใช้อ่อนพันธ์จะต้องเป็นไปตามนี้เท่านั้นคือ สัญลักษณ์ของอนุพันธ์ที่จุดตรงกลางของขอบเขตทั้ง 3 จุดคือ  $a < b < c$  ที่กำหนดไว้อย่างชัดเจนว่า จุดทดสอบต่อไปจะต้องอยู่ในเส้นทาง  $(a, b)$  หรืออยู่ในเส้นทาง  $(b, c)$  ซึ่งในวิธีของ Brent เราจะมีคามยุ่งยากในการเรียงจุดทั้ง 3 ใหม่แต่ถ้าเรามาใช้วิธีอนุพันธ์ในการทำ minimization ในหนึ่งมิติ จะช่วยให้เราจัดจุดทั้ง 3 ได้ดีขึ้น แต่ถ้าฟังก์ชันมีความยุ่งยากการใช้อ่อนพันธ์จะให้ค่าฟังก์ชันไม่สมบูรณ์และจุดต่ำสุดที่ได้จะไม่ถูกต้องเท่าที่ควร อันเนื่องมาจาก round off errors บางทีอาจมาจาก function error ในทฤษฎีของการหาอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.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 ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่มีประสิทธิภาพดีเมื่อเทอมของฟังก์ชันมีจำนวนมากวิธี Powell (ในหัวข้อ ข. 6) เป็นวิธีที่ประสิทธิภาพสูงในการใช้งาน แต่อย่างไรวิธี downhill simplex ก็ยังมีการใช้อยู่ ทั้งนี้เพราะเป็นวิธีที่ใช้ง่าย

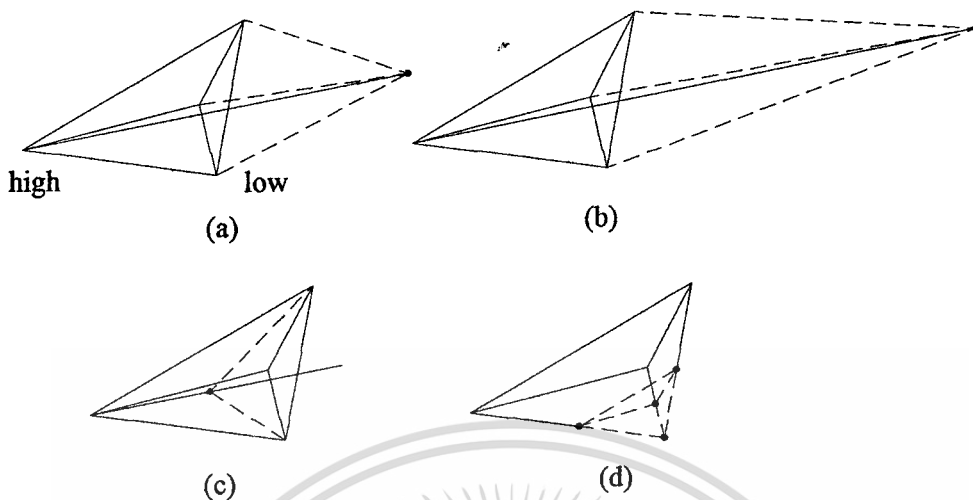
ซึ่งวิธีนี้จะสร้างรูปทางเรขาคณิตที่ไม่เป็นธรรมชาติ โดยที่รอบรูปจะมีการสร้างรูปเข้มนั้นจนเสร็จ

Simplex เป็นรูปทางเรขาคณิตโดยอยู่ใน  $N$  มิติ ของ  $N+1$  จุด (Vertices) และมีการเชื่อมถึงกันโดยใช้เส้นที่ทำให้เกิดพื้นผิวของรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) ใน 2 มิติ Simplex จะเป็นรูปสามเหลี่ยมใน 3 มิติจะเป็นรูปสี่เหลี่ยม (tetrahedron) ไม่จำเป็นว่าจะจะเป็น regular tetrahedron (วิธี Simplex เป็น linear program ที่สร้างโดยใช้หลักการทางเรขาคณิตของ) โดยทั่วไปเราจะใช้ Simplex ที่มีประโยชน์เท่านั้น ซึ่งจะเป็นรูปปิด โดยภายในเป็นปริมาตร  $N$  มิติ ถ้าทุกจุดของ nondegenerate simplex อยู่ที่จุดกำเนิดและจุด  $N$  จะกำหนดเวกเตอร์ทิศทางใน  $N$  มิติ

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

$$P_i = P_0 + \lambda e_i \quad (\text{ข-9})$$

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



รูป ข-4 แสดงวิธีในการ Step โดยใช้ทฤษฎี Downhill simplex

วิธี downhill simplex เป็นกระบวนการต่อเนื่องทีละ step การเคลื่อนที่จุดของ simplex มาก เมื่อฟังก์ชันมีขนาดใหญ่ (มีจุดมาก) และจะตรงกันข้ามกัน เมื่อ simplex มีจุดน้อยโดยแต่ละ step จะเรียกว่า การสะท้อนกลับ (reflection) และ โครงสร้างจะรักษาปริมาณของ simplex ไว้โดยการขยายตัวของ simplex ในหนึ่งทิศทางและทิศทางอื่นๆ เพื่อค้นหา Valler 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 มิติแล้ว ดำเนินการจุดที่ direction vector  $n$  จำนวนหนึ่ง ดังนั้นทุกๆ ฟังก์ชัน N ตัวแปร  $f(p)$  ซึ่งจะสามารถทำให้ต่ำสุดตลอดแนว  $n$  โดยวิธีที่เป็น one dimension ทำให้ค่าต่ำสุดของ N มิติได้โดยประกอบด้วยค่าต่ำสุดหลายๆ 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  $\lambda n$*

วิธีการหาค่าต่ำสุดในส่วนนี้ทั้งหมด และอีก 2 ส่วนต่อจากนี้เป็นแบบแผนทั่วไปในการหาแนวของค่าต่ำสุด ในส่วนแรกนี้จะพิจารณาวิธีที่สามารถเลือกมิติได้อย่างถูกต้อง โดยยังไม่รวมถึงการคำนวณค่าของฟังก์ชันเกรเดียนต์ และสำหรับ 2 ส่วนที่เหลือต้องใช้การคำนวณส่วนประกอบของฟังก์ชันเกรเดียนต์และบันทึกค่าไว้ โดยไม่จำเป็นต้องเจาะจงว่าจะต้องใช้ LINMIN ที่ประกอบด้วยฟังก์ชันเกรเดียนต์หรือไม่ ในการคัดเลือกความเหมาะสมกับส่วนของฟังก์ชันนั้น ซึ่งอาจสลับกันโดยใช้เกรเดียนต์ที่อยู่ใน LINMIN หรือ ไม่ก็ได้ การเลือกทิศทางที่ใช้เกรเดียนต์จะช่วยลดเวลาในการคำนวณลงได้อย่างมาก

แต่สามารถจะนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไร การคำนวณเกรเดียนต์จะถูกตัดออกจากคำถามซึ่งจะต้องคิดวิธีธรรมดาก่อนโดยใช้ unit vector  $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$  ซึ่งถือว่าเป็นเซตของทิศทางแล้วใช้ LINMIN เคลื่อนไปตลอดทิศทางแรกไปยังค่าต่ำสุด แล้วเริ่มจากจุดเดิมเคลื่อนไปยังทิศทางที่ 2 เพื่อจะได้ค่าต่ำสุดแล้วทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งฟังก์ชันไม่ลดลงอีก

วิธีง่ายๆ เช่นนี้เพียงพอสำหรับหลายๆ ฟังก์ชัน แต่สำหรับอีกหลายๆ ฟังก์ชันก็ใช้ไม่ได้ผลพิจารณาฟังก์ชัน 2 มิติ เช่น แผนที่ contour (ระดับเส้น) ที่เกิดขึ้นตาม Long narrow valley ที่ทำมุมกับเวกเตอร์คู่ลำดับในรูปที่ (ข-5) ดังนั้นวิธีการลดความยาวของ valley เท่านั้น ที่เป็นไปตามเวกเตอร์ในแต่ละขั้นตอน โดยอนุกรมขั้นตอนน้อยจำนวนมาก ส่วนมากใน  $N$  มิติ ถ้าฟังก์ชันที่แยกมาครั้งที่ 2 มีทิศทางที่มีขนาดใหญ่กว่าทิศทางอื่น ดังนั้นจึงต้องการเวกเตอร์จำนวนทั้งหมด  $N$  ที่วนรอบหลายครั้งเพื่อจะได้ค่าในทุกที่

จะสังเกตได้ว่าเราจำเป็นต้องมีการเซตทิศทางที่ดีกว่าของ  $e_1$  วิธีการเซตทิศทางประกอบด้วยคำแนะนำสำหรับการเปลี่ยนแปลงวิธีการเซตทิศทาง วิธีการเซตทิศทางเป็นวิธีดำเนินการความพยายามที่จะให้เท่าเทียมกับการเซตซึ่งมีดังนี้

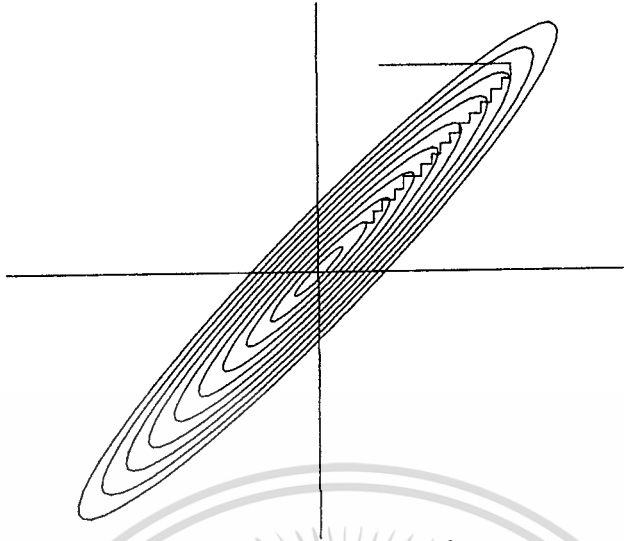
(I) รวมทิศทางที่ดีไว้ เพื่อจะนำไปใช้ใน narrow valley

(II) รวมจำนวนทิศทางที่ไม่ได้แทรกแซงกับคุณภาพพิเศษ ซึ่งการหาค่าต่ำสุดหนึ่งๆ ไม่เกิดความเสียหาย โดยการแยกย่อยค่าต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงการเซตทิศทางที่จะเกิดการวนรอบไม่รู้จบ แนวความคิดของทิศทางที่ไม่มีการรบกวนนี้ ตามธรรมดาจะเรียกว่า ทิศทางคอนจูเกต มีความสำคัญต่อความแน่นอนอนทางคณิตศาสตร์

อันดับแรก สังเกตว่าการหาฟังก์ชันต่ำสุดตามทิศทาง  $u$  ดังนั้นเกรเดียนต์ของฟังก์ชันต้องตั้งฉากกับ  $u$  ที่เส้นชั้นค่าต่ำสุดนั้น ถ้าไม่ใช่ ดังนั้นยังมีทิศทางที่แยกออกมาไม่เป็นศูนย์ตามทิศ  $u$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข-5 การลู่เข้าของฟังก์ชันที่ N มิติ

การต่อเนื่องของ coordinate ของ minimization ในทิศทางของ narrow valley (แสดงเส้น) ยกเว้นแต่ที่ valley ของ optimally เริ่มต้น ซึ่งไม่สามารถทำให้ดีได้เพราะว่าจะมีการ step เพื่อหาค่า minimum ซึ่งอาจจะข้ามหรือ ไม่ข้ามเกณฑ์ที่สำคัญทิศทางคอนจูเกต

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

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 แยกออกมาจากเมตริกซ์ของฟังก์ชันที่เรียกว่าเมตริกซ์เฮสเซียน ของฟังก์ชันที่ P

ในการประมาณค่าของสมการ (ข-10) เกรเดียนท์ของ f คำนวณได้ง่ายๆ ดังนี้

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

เราเปลี่ยนทิศทางของเกรเดียนท์  $\nabla f$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 $\partial(\nabla f) = A \cdot (\partial x)$  (ข-13)  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าเคลื่อนที่ในทิศทาง  $u$  ให้เป็นค่าต่ำสุด และ สมมติว่าในขณะนี้ได้เคลื่อนที่ทิศทางใหม่เป็น  $v$  สภาพการเคลื่อนที่ตาม  $v$  ไม่ได้ทำให้การหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันในทิศทาง  $u$  เสียหาย ซึ่งค่าเกรเดียนท์จะตั้งฉากกับ  $u$  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 การที่จะใช้วิธีเซตทิศทางให้สำเร็จต้องเซตค่า  $N$  เซตเส้นที่ไม่ขึ้นกับทิศทางคอนจูเกตทั้งสองทิศทาง ดังนั้นหนึ่งเส้นทางของเซตค่าต่ำสุด  $N$  จะมีค่าต่ำสุดที่แน่นอนที่ทอมควอคราติกเหมือนกับสมการ (ข-10) สำหรับฟังก์ชัน  $f$  ซึ่งไม่มีรูปแบบควอคราติกที่แน่นอน 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  $U_i$  ที่ต่ำสุดและ เรียกจุดนี้ว่า  $P_i$
- สำหรับ  $i = 1, 2, \dots, N-1$  เซต  $U_i < - - U_{i+1}$
- เซต  $U < - - P - P_0$
- ย้าย  $P_N$  เป็นทิศทาง  $U_N$  และเรียกจุดนี้ว่า  $P_0$

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

อัลกอริทึมจะไม่ใช้รูปแบบที่นำมา

จำนวนของวิธีที่จะแก้ไขปัญหอัลกอริทึมของ Powell ที่มีลักษณะเชิงเส้นมีดังนี้

1. สามารถเซททิศทางของ  $U_i$  ใหม่เพื่อให้ได้เวกเตอร์หลัก  $e_i$  หลังจากที่ทำซ้ำทุกๆ  $N$  หรือ  $N+1$  ครั้ง วิธีการนี้แนะนำให้ไปประยุกต์สมการควอดราติก

2. เบนที่ได้ชี้ให้เห็นว่า การเซททิศทางสามารถทำได้ดีพอๆ กับการเริ่มต้นในแนวตั้งของเมทริกซ์ใดๆ เบนที่ได้เริ่มต้นทิศทางใหม่เพื่อกำหนดทิศทางหลักของเมทริกซ์  $A$  การคำนวณอัลกอริทึมที่มีค่าแยกกันเป็นพิเศษ การขยายความของเบนที่ได้สนับสนุนวิธีการของ Powell เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามมันค่อนข้างละเอียดเกินไป

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

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

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

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

มีแนวความคิดอีก 2 อย่างที่เสนอที่ยอมรับบางครั้งมันไม่ดีไปกว่าการเพิ่มทิศทางใหม่ทั้งหมดจะได้

$$f_0 \equiv f(P_0) \quad f_N \equiv f(P_N) \quad f_E \equiv f(2P_N - P_0) \quad (ข-16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$f_E$  คือ ค่าฟังก์ชันที่เป็นจุดขั้วภายนอก ซึ่งสมบัติทิศทางใหม่กำหนด  $f$  เป็นขนาดของทิศทางที่ลดลงมากที่สุดของการทำซ้ำกัน ดังนั้น

1. ถ้า  $f_E \leq f_O$  ดังนั้นเก็บค่าทิศทางเก่าที่เซตไว้สำหรับการทำครั้งต่อไป เพราะทิศทางเฉลี่ย  $P_N - P_O$  โดดห่มคเต็มที

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

(i) ทิศทางเฉลี่ยที่ลดลง ไม่ใช่ทิศทางที่ลดลงทางด้านปรุมภูมิ

(ii) มีใจความของส่วนที่แยกครั้งที่ 2 ตามทิศทางเฉลี่ยและใกล้เคียงกับค่าต่ำสุด

### ข.7 วิธี Conjugate Gradient ในหลายมิติ

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

สมมติว่าฟังก์ชัน  $f$  ถูกประมาณให้เป็นรูปแบบควอคราติกเช่นเดียวกับสมการ (ข-10)

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

ดังนั้นจำนวนตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าใน  $f$  มีค่าเท่ากับจำนวนตัวแปรอิสระใน  $A$  และ  $B$  ซึ่งก็คือ  $\frac{1}{2} N(N+1)$  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  $N$  อย่างไรก็ตามในความมียู่ด้วย

(i) คำนวณส่วนประกอบแต่ละค่าจะไม่ได้ช่วยหาค่าฟังก์ชันหนึ่ง ๆ แต่จำนวนที่คล้าย

กับว่าทั้งหมดเป็นค่าขั้นต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

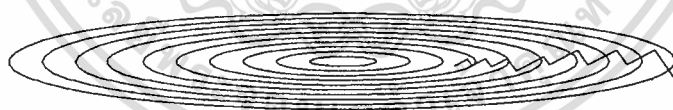
(ii) มีรูปแบบที่มากเกินไปสำหรับส่วนประกอบต่างๆ ของฟังก์ชันของเกรเดียนท์ เมื่อเป็นไปตามที่ใช้ที่นี่ เมื่อมีการคำนวณฟังก์ชันที่ซ้ำซ้อน ดังนั้นคำนวณเกรเดียนท์ที่อาจจะมีความสำคัญน้อยกว่า การหาค่าฟังก์ชัน  $N$

ปกติความผิดพลาดของผู้เริ่มต้น คือ สมมติว่าวิธีการรวมข้อมูลเกรเดียนท์น่าจะดีพอๆ กับอีกวิธีหนึ่ง การนำความคิดนี้เพื่อไปดำเนินการต่อไป ไม่ใช่อัลกอริทึมที่มีมากนัก

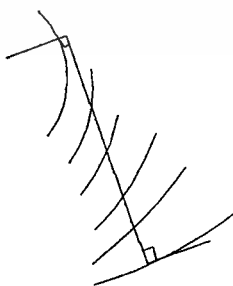
### วิธี Steepest Descent:

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

ปัญหาของวิธี Steepest Descent เหมือนกับปัญหาที่แสดงในรูป (ข-5) วิธีการนั้นจะแสดงขั้นตอนขนาดเล็กจำนวนมากที่กำลังลดลงตาม narrow valley ราวกับว่า valley นั้นเป็นรูปแบบของควอคราติกที่สมบูรณ์ ซึ่งอาจจะหวังไว้ใน 2 มิติ ขั้นตอนแรก ควรจะนำพื้นของ valley มาใช้ ขั้นตอนที่ 2 สถิติศทางตามแกนยาวแต่นำไว้ว่า เกรเดียนท์ใหม่ที่จะต่ำสุดของเส้นชั้นค่าต่ำสุด เป็นเส้นตั้งฉากกับทิศทางเส้นทแยง ดังนั้นวิธี Steepest Descent ต้องปรับปรุงให้ตรงทำให้ได้ค่าต่ำสุด (ดูรูป (ข-6))



(a)



รูป ข-6 การเข้าสู่จุดต่ำสุดโดย steepest Descent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 (a) วิธี Steepest Descent ตาม narrow valley ขณะที่ประสิทธิภาพดีกว่าวิธีในรูป (ข-5)  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้อ่านห้ามนำข้อความใดๆ ไปใช้ในทางอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
 Steepest Descent ไม่มีประสิทธิภาพดีพอเท่ากับการทำหลายขั้นตอน เพื่อให้ได้ถึง valley

(b) ภาพขยายของ 1 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก เริ่มหยุดลงในทิศทางเกรเดียนต์ (local) เส้นโค้งฉากกับเส้นแสดงความสูงต่ำ และเส้นตรงขวางจนกระทั่งถึงจุดต่ำสุด (local) เมื่อเส้นขวางขนานกับเส้นแสดงความสูงต่ำ

ในสมการที่ (ข-14) ต้องการวิธีการของกระบวนการที่ไม่ได้ลดค่าเกรเดียนต์ใหม่ แต่เพื่อที่จะผูกความหมายกับคอนจูเกตเกรเดียนต์อันเก่า และเป็นไปได้ว่า จะทำนายทิศทางเส้นทแยงทั้งหมดได้ วิธีการที่จะประสบความสำเร็จในที่นี้คือ วิธีคอนจูเกตเกรเดียนต์

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

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

ขณะที่  $\lambda_i, \gamma_i$  ถูกเลือกที่ทำให้  $g_{i+1} \cdot g_i = 0$  และ  $h_{i+1} \cdot A h_i = 0$   
(ไม่ใช่ส่วนที่มีค่าเท่ากับศูนย์, ในกรณีนี้  $\lambda_i, \gamma_i$  ดังนั้นสำหรับ  $i = j$ )

$$g_i \cdot g_j = 0, \quad h_i \cdot A h_j = 0 \quad (\text{ข-19})$$

จากสมการ (ข-20) สามารถอธิบายสมการ (ข - 18) และพิสูจน์ว่า สำหรับ  $\lambda_i$  และ  $\gamma_i$  เหมือนกับสมการ (ข-19)

$$\gamma_i = \frac{g_{i+1} \cdot g_{i+1}}{g_i \cdot g_i} = \frac{(g_{i+1} - g_i) \cdot g_{i+1}}{g_i \cdot g_i} \quad (\text{ข-21})$$

$$\lambda_i = \frac{g_i \cdot h_i}{h_i \cdot A h_i} \quad (\text{ข-22})$$

การที่จะประยุกต์ปัญหาของการประมาณค่าต่ำสุด โดยรูปแบบควอดราติก (ข-17) สมมติว่าใช้เฮสเซียนเมตริกซ์  $A$  ดังนั้นควรใช้ (ข-18) เพื่อหาทิศทางคอนจูเกต  $h_i$  ตามเส้นขั้นค่าต่ำสุดหลังจาก  $N$  เป็นเช่นนั้นจะได้ค่าต่ำสุดของสมการควอดราติก แต่ยังไม่รู้จักค่า  $A$

มีบทพิสูจน์อีกอย่างหนึ่งซึ่งช่วยประหยัดเวลา : ให้  $g_i$  และ  $h_i$  เป็นเวกเตอร์ลำดับที่เหมือนกัน สมมติว่าเรามี  $g_i = -\nabla f(P_i)$  สำหรับจุด  $P_i$  ขณะที่  $f$  คือ รูปแบบของสมการ (ข-17) สมมติไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าได้จาก  $P_i$  ตามทิศทาง  $h_i$  ค่าต่ำสุดของ  $f$  ที่ตั้งบางจุด  $P_{i+1}$  และคั้งนั้นเซต  $g_i = -\nabla f(P_{i+1})$  คั้งนั้น  $g_{i+1}$  เป็นเวกเตอร์ที่สร้างจากสมการ (ข-18)

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

$$g_{i+1} = -A.[P_i + \lambda.h_i] + b = g_i - \lambda.A.h_i \quad (\text{ข-23})$$

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

เมื่อต้องการใช้วิธีของเฮสเซียน ไม้อันใดก็อันหนึ่ง แม้ว่าจำเป็นที่จะต้องสะสมข้อมูลในเมตริกซ์ลำดับของทิศทาง  $h_i$  ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เส้นชั้นค่าต่ำสุดเท่านั้น หากค่าของเกรเดียนท์-เวกเตอร์และเวกเตอร์ช่วยเพื่อเก็บค่าต่ำสุดในลำดับของ  $g$

คั้งนั้นที่กล่าวมาถูกประยุกต์ทั้งวิธีของ Fletcher-Reeves และ Polak-Ribiere บางครั้งความแตกต่างที่สำคัญ 2 วิธี Fletcher และ Reeves เริ่มต้นใช้การแสดงความหมายในครั้งแรกสำหรับ  $\lambda_i$  ของสมการ (ข-21) Polak และ Ribiere ได้สมมติการใช้การแสดงความหมายครั้งที่ 2 ในสมการที่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามฟังก์ชันไม่ได้เป็นสมการควอควอดราติกที่มีค่าแน่นอน การสมมติค่าต่ำสุดของสมการควอควอดราติก อาจจำเป็นที่จะต้องดำเนินการกับการเซตค่าอีกอันหนึ่งของการทำซ้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Polak-Ribiere ประสบความสำเร็จในการเปลี่ยนค่าเพื่อทำซ้ำ

## ข.8 วิธี Variable Metric ในลายมิตี

วิธี Variable Metric บางครั้งจะถูกเรียกว่า วิธี Quasi-Newton มันไม่ต่างจากวิธีคอนจูเกต-เกรเดียนท์เพื่อนะสมค่าต่ำสุดอย่างต่อเนื่อง ค่า  $N$  ซึ่งเป็นขอบเขตต่ำสุดจะทำให้ได้ค่าต่ำสุดที่แน่นอนของสมการควอควอดราติกจาก  $N$  มิตี ในกรณีนี้วิธีการนั้นจะถูกรวมเป็นควอควอดราติกเพื่อให้ฟังก์ชันมีความราบเรียบมากขึ้น

ทั้งวิธี Variable Metric และ Conjugate gradient จะต้องใช้เพื่อสามารถคำนวณฟังก์ชันเกรเดียนท์หรือตัวที่แยกออกมารั้งแรก Variable Metric แตกต่างจาก Conjugate gradient ตรงที่ว่า มันจะสะสมและเปลี่ยนค่าของข้อมูลที่ถูกคำนวณได้

ในทางกลับกันวิธี Conjugate gradient มีประโยชน์มากกว่าวิธี Conjugate gradient การ

พัฒนาตัวจุดและการกระจายไปอย่างกว้างขวาง วิธี Variable Metric ได้ถูกพัฒนาให้เป็นที่น่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอใจแก้ไข เช่นเดียวกันสิ่งที่ช่วยสนับสนุนวิธีการนี้ได้ถูกพัฒนาให้มีระดับที่ดีกว่าเมื่อนำออกมาใช้ และให้ค่าผิดพลาดน้อยกว่า ส่วนใหญ่เราจะใช้วิธี Variable Metric มากกว่าวิธี Conjugate - gradient

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

ได้ถูกพิสูจน์ความสำคัญแล้ว โคซอนได้แสดงให้เห็นว่า DFP และ BFGS มีลักษณะต่างกัน ที่ค่าความผิดพลาด ลักษณะการรวมเข้าด้วยกัน อย่างไรก็ตามจากการสังเกตโดยทั่วไป BFGS จะมีรายละเอียดเหล่านี้จำนวนมาก จึงสนับสนุน BFGS ในส่วนนี้

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

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

$$\lim_{i \rightarrow \infty} H_i = A^{-1} \quad (๗-24)$$

ถ้าเราทำในสมการ (๗-24) แล้วค่านั้นสามารถใช้ H ต่อไปดังนี้  
จุดต่ำสุด  $X_m$

$$A \cdot x_m = b \quad (๗-25)$$

ที่จุด  $X_i$  จะได้ว่า

$$A \cdot x_i = f(x_i) + b \quad (๗-26)$$

ลบสมการทั้งสองแล้วคูณด้วยเมตริกซ์  $A^{-1}$

$$x_m - x_i = A^{-1}[-f(x_i)] \quad (๗-27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เราไม่จริงจังกับค่าอัลกอริทึม DFP สำหรับ  $H_i$  ถึง  $H_{i+1}$  ลบสมการ (ข-27) ที่  $x_{i+1}$  จากสมการที่เหมือนกันที่  $x_i$

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

ขณะที่  $\nabla f_j \equiv \nabla f(x_j)$  ซึ่งทำจาก  $x_i$  ถึง  $x_{i+1}$  ซึ่งอาจจะต้องการค่าประมาณ  $H_{i+1}$  ใหม่ราวกับว่ามันคือ  $A^{-1}$  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 ค่าทิศทางผลคูณทั้งสองเวกเตอร์ เมตริกซ์  $ij$  ของ  $u \otimes v$  คือ  $u_i v_j$  ตัว BFGS มีค่าที่แน่นอนเหมือนกันแต่มีอยู่หนึ่งเทอม

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

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  $H$ , มีแนวโน้มว่าจะเป็น Singular ในภายหลัง

ในกรณีของข้อสงสัยก็ได้มีการอ้างอิงในหัวข้อ ข.5 ควรเริ่มอัลกอริทึมที่จุดค่าสุดท้ายก่อนและจะพบในที่ต่างๆ ธรรมดาไม่ดูดีมากนัก ส่วนที่ช่วยสนับสนุนวิธี Variable Metric ในสมัยใหม่นี้จริงๆ แล้วจะชักชวนในทางที่ผิดมากกว่า

การประมาณค่า  $A^{-1}$  อาจจะประมาณจากค่า  $A$  ก็ได้ ดังนั้นแทนค่าคำนวณทางด้านซ้ายมือของสมการ (ข-27) โดยตรง แก่สมการเส้นตรง

$$A(x_m - x_i) = -\nabla f(x_i) \quad (\text{ข-33})$$

ในตอนแรกดูเหมือนจะเป็นความคิดที่แย่มากเพราะการแก้สมการ (ข-33) ยังมีค่าของ  $N^3$  ทำอย่างไรจะช่วยแก้ปัญหาความผิดพลาดได้ คำแนะนำคือ อย่าเก็บค่าของเมตริกซ์  $A$  แต่จำแนกค่าของ  $A$  ได้ 3 ส่วน การพัฒนารูปแบบสำหรับจำแนกเมตริกซ์เป็นการประกันได้ว่า เมตริกซ์นั้นยังเป็น Positive และ non-singular แม้ว่าจะมีค่าแกว่งในช่วงสุดท้าย อีกวิธีที่น่าออกมาใช้ คือ คำถามของความแน่นอนที่จำเป็นจำเป็นในการเก็บรวบรวมวิธีที่ครอบคลุมทั้งหมดได้อย่างไร ดูไว้ประโยชน์ที่จะรวบรวมค่าค่าสุดท้ายแต่ละค่า ซึ่งไม่ใช่ส่วนสำคัญกับฟังก์ชันขนาด  $N$  มันเป็นความจริงว่า BFGS นั้นมีความทนทานต่อค่าค่าสุดท้ายที่ไม่ตรงไปตรงนามากกว่า DSP ที่เหลือดูเหมือนว่าไม่รู้จักรหัสค่าค่าสุดท้ายที่มีประสิทธิภาพพอที่จะใช้กับฟังก์ชันทั้งหมดหรือหาค่าเกรเดียนท์ซึ่งได้จากค่าค่าสุดท้ายแต่ละค่า เป็นทางหนึ่งซึ่งหวังว่าจะนำไปใช้ในอนาคค

## ข.9 Status of Constraints

ใน Constrained Optimization มีการกำหนดสถานะของการบังคับการออกแบบจุดซึ่งมีความจำเป็นในการได้เพียงของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พิจารณาในรูปที่ (ข-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  $g_k(x^{(q)}) < 0$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

### 3. Violated Constraint

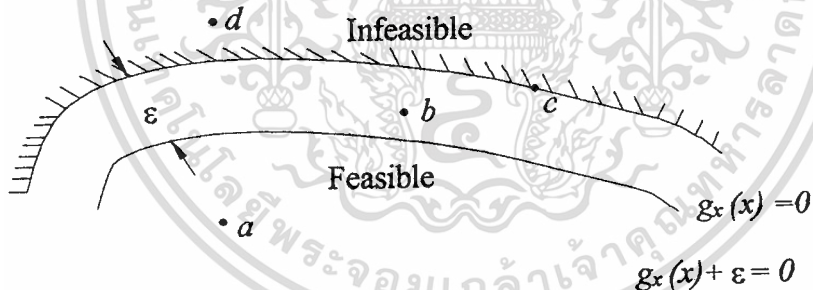
ไม่ผ่านการเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

inequality constraint  $g_k(x^{(q)}) \leq 0$  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  $g_k(x) \leq 0$  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 active สำหรับการออกแบบที่จุด  $d$ ,  $g_k(x)$  มีค่ามากกว่าศูนย์ ดังนั้น constraint เป็นแบบ violated



รูป ข-7 Constraint status at design a, b, c and d

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

#### (เงื่อนไขที่จำเป็นของ Constrained Optimization)

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

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

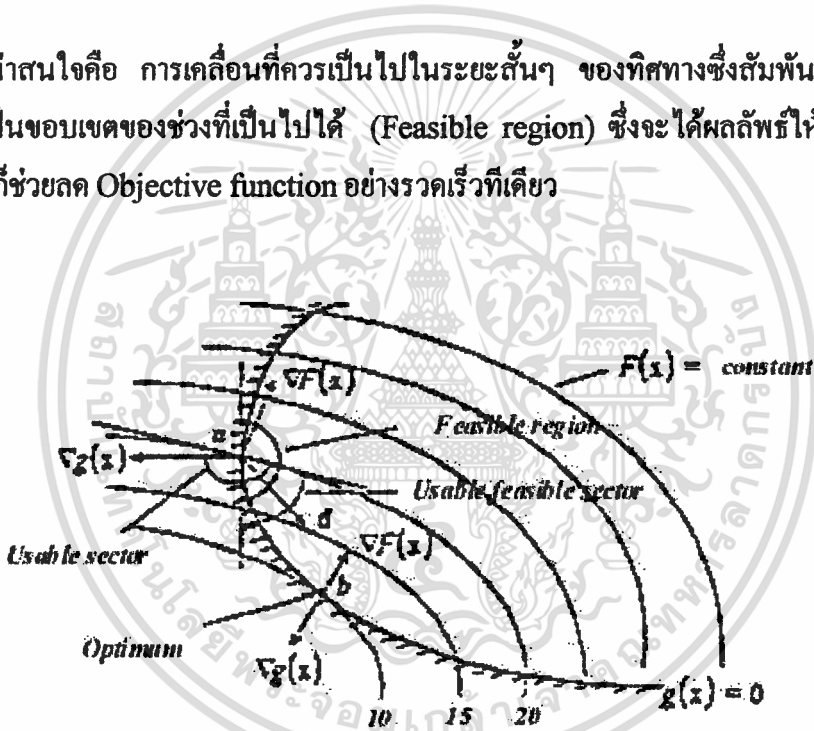
หาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Usable direction  $d^T \nabla F(x) \leq 0$  (ข-34)

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

Feasible direction  $d^T \nabla g_k(x) \leq 0$  เมื่อทุกค่าของ  $K$  ทำให้  $g_k(x) = 0$  (ข-35)

จุดที่น่าสนใจคือ การเคลื่อนที่ควรเป็นไปในระยะสั้นๆ ของทิศทางซึ่งสัมพันธ์กับ hyper-plane ซึ่งเป็นขอบเขตของช่วงที่เป็นไปได้ (Feasible region) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ให้ constraint-violate แต่ก็ช่วยลด Objective function อย่างรวดเร็วทีเดียว



รูป ข-8 Usable and feasible search direction

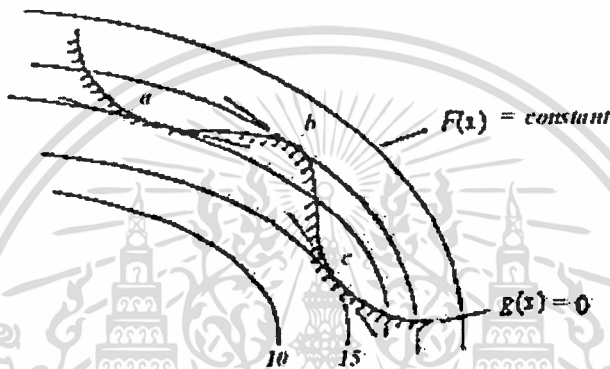
ให้จุด  $b$  เป็นจุดที่ Optimization จากการออกแบบเพื่อใช้ในการอธิบายรูปที่ (ข-8) แสดงถึง gradient ของ object และ gradient ของ constraint ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับ vector  $|S|$  จะมีความปลอดภัยในการ usability และ feasibility โดยเป็นเส้นสัมผัสกับขอบเขตของค่า constraint และเส้นคงที่ของ Objective function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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่  $\nabla F(x) + \sum_{k=1}^l \lambda_k \nabla g_k(x) + \sum_{j=1}^m \lambda_{1+j} \nabla h_j(x) = 0$  อดให้นำไปใช้ประโยชน์ (ข-36) การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ  $\lambda$  เป็น Lagrange multiplier

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



รูป 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 ที่พอใจทุกๆ constraint

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

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

Lagrange ที่มากกว่าศูนย์

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

$\lambda_k \geq 0 ; \lambda_{1+j}$  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 ของ constraint ที่วิกฤต  $g_1(x^*)$  และ  $g_2(x^*)$  ซึ่งคูณโดย Lagrange multiplier แล้วผลรวมของ vector นั้นจะเท่ากับค่าลบของ gradient ของ objective function จากรูปที่

(ข-10) จะได้ว่า

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

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

เริ่มต้น  $g_1(x^*) = 0$  และ  $g_2(x^*) = 0$  เงื่อนไขที่สองถูกต้องสำหรับ ดังนั้นก็จะได้ว่าเงื่อนไขของ 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 แต่จะมีอยู่จุดหนึ่งซึ่งฟังก์ชันมีค่าต่ำสุด เรียกว่า global minimum ซึ่งจะอธิบายให้เข้าใจยิ่งขึ้น

#### 1) Global Minimum

$F(x)$  เป็นฟังก์ชันที่มี  $n$  ตัวแปร มี global minimum คือ  $x^*$  ถ้า  $F(x^*) \leq F(x)$

ทุกค่าของ  $x$  ในช่วงที่เป็นไปได้ (Feasible region) ถ้า strict inequality ทุก  $x$  นั้น ๆ แล้ว  $x^*$  จะเป็น  $x^*$  ที่เรียกว่า strict global minimum

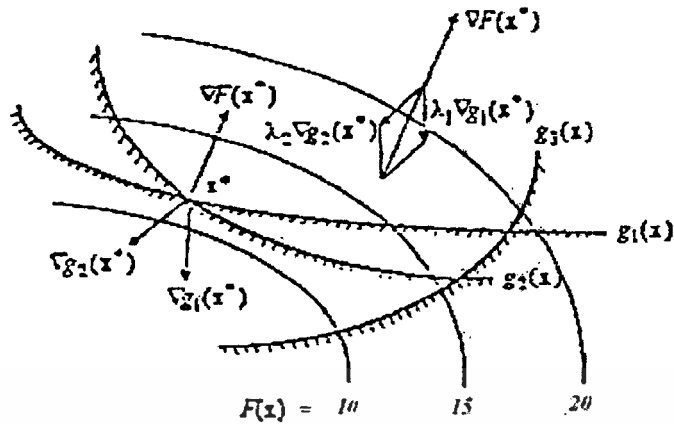
#### 2) Local Minimum

$F(x)$  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  $\delta > 0$  จะได้ว่า เป็นช่วงเล็กๆ ที่เป็นไปได้ small feasible region ที่อยู่ของจุด  $x^*$

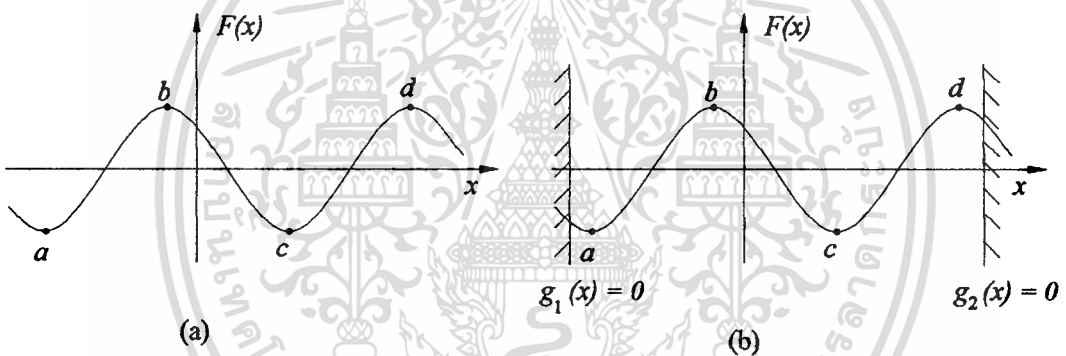
รูปที่ (ข-11 (a))  $a$  และ  $c$  เป็น local minimum เริ่มเป็นฟังก์ชันที่มีค่าน้อยที่สุดซึ่งเกิดใน neighborhood จุด  $b$  และ  $d$  เป็นจุด local maximum ของ function ซึ่งใน case นี้จะไม่มี global minimum or maximum ของ function เพราะ domain และ function  $F(x)$  ไม่มีขอบเขต  $x$  และ  $F(x)$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง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

(restricted) ที่แสดงโดยรูปที่ (ข-11(b)) จะได้จุด  $c$  เป็น global minimum และจุด  $d$  เป็น global maximum ของ function

ัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข-10 Geometric interpretation of the Kuhn - Tucker condition



รูป ข-11 Graphical representation of optimum point

### ข-11 Convergence Criteria (การเข้าสู่จุดวิกฤต)

เส้นทางวิกฤตของ optimization สามารถหาได้เมื่อหยุดกระบวนการค้นหา optimum การสิ้นสุดของจุดวิกฤต เราสามารถเลือกจาก ปฏิกริยาที่สำคัญของประสิทธิภาพและความแน่นอนของกระบวนการ optimization ซึ่งการลู่อื่นวิกฤตหาได้จาก

#### 1) Maximum number of iteration (จำนวนสูงสุดของกระบวนการซ้ำ)

ถ้าจำนวนของกระบวนการซ้ำ  $q$  มีค่ามาก จำนวน  $q_{\max}$  นั้นแล้วกระบวนการค้นหา จะจบลงถ้ากระบวนการซ้ำเพราะ numerical หรือ algorithmic ยากหรือง่ายอันเนื่อง มาจากโปรแกรมผิดพลาดทำให้โปรแกรมนั้นไม่ต่อเนื่องถึง iterate indefinitely

#### 2) การเปลี่ยนแปลง Objective function ซึ่งมี 2 วิธี ถ้าหากกระบวนการนั้นซ้ำมากจน

ไม่มีทางจะหาค่าได้  
ไม่ช้าเกินไป ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เป็นการเปรียบเทียบ ค่าสัมบูรณ์ของ  $F(x)$  มีผลต่อกระบวนการทำซ้ำ การลู่เข้านั้นได้ แสดงดังนี้

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

เมื่อ  $\varepsilon_A$  เป็น specified tolerance (ค่าผิดพลาด) ซึ่งเป็นค่าคงที่ หรือเป็นค่าคงที่

ของ objective function ที่ค่า  $x^{(0)}$  จากตัวอย่าง set  $\varepsilon_A = 0.001 |F(x^{(0)})|$

2. การตรวจความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนในระหว่างการเป็นไปได้ของกระบวนการซ้ำในการลู่เข้าที่เป็นไปได้อคือ

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

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 เป็นหัวข้อสำคัญในการขบวนการปฏิบัติของ numerical optimization ของการประมาณค่าของ derivative จาก a simple function ที่ทำได้โดยการวิเคราะห์ (Calculate analytically) และสามารถหาได้โดยใช้ gradient หรือ Hessian Evaluation โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical method) อย่างไรก็ตามบางฟังก์ชันนั้น มีความยากในการวิเคราะห์หรือความลำบากมากในการคำนวณ เพื่อความสะดวกในการหาคำตอบ จะใช้วิธี finite difference ในการหาคำตอบโดยประมาณของ derivative ปัญหาส่วนใหญ่ในการปฏิบัติในทางวิศวกรรมส่วนมากจะเป็น implicit model for function evaluation จากตัวอย่างของฟังก์ชัน อาจจะได้มาจากการหาคำตอบทางการวิเคราะห์เชิงตัวเลขซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ของแบบจำลองระบบ electromagnetic โดยวิธี finite element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ๗-13 Finite Difference Approximations

คำตอบจากการวิเคราะห์ที่ใช้ใน optimization เสมอๆ นั้นมาจากอนุกรม Taylor ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวมีความสำคัญเพราะเป็นการแสดงลักษณะ derivative ที่จุดจุดหนึ่ง ของฟังก์ชันจากการประมาณค่าของฟังก์ชันสามารถคำนวณทุกจุดที่อยู่กึ่งกลางของจุดขอบเขตได้ ในรูปที่ (๗-12) เป็นฟังก์ชัน 1 ตัวแปรอย่างง่าย ๆ ซึ่งใช้ออนุกรมของ Taylor ที่รอบจุด  $x_0$  เขียนอธิบายได้ดังนี้

$$F(x_0 + h) = F(x_0) + hF'(x_0) + (1/2)h^2 F''(x_0) + \dots + (1/(r-1)!)h^{(r-1)}F^{(r-1)}(x_0) + o(h^r) \quad (๗-43)$$

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

ในการคำนวณเพื่อนำมาใช้ เราสนใจใน 3 เทอมแรกของสมการเท่านั้น

$$F(x_0 + h) = F(x_0) + hF'(x_0) + (1/2)h^2 F''(x_0) + o(h^3) \quad (๗-44)$$

การหาคำตอบของ  $F'(x_0)$  และไม่คิดถึงเทอมอันดับสูงกว่า เราได้

$$F'(x_0) = \frac{F(x_0 + h) - F(x_0)}{h} + o(h) \quad (๗-45)$$

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

$$F(x_0 - h) = F(x_0) - hF'(x_0) + (1/2)h^2 F''(x_0) - o(h^3) \quad (๗-46)$$

การกระจายสมการนี้เป็นการประมาณค่าแบบ *backward differance*

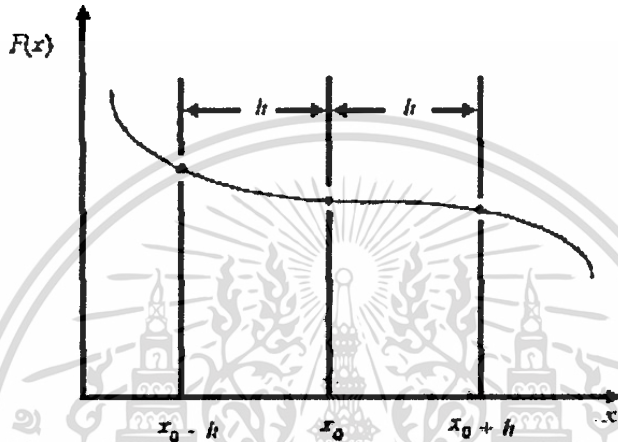
$$F'(x_0) = \frac{F(x_0) - F(x_0 - h)}{h} + o(h) \quad (๗-47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (๗-47) การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

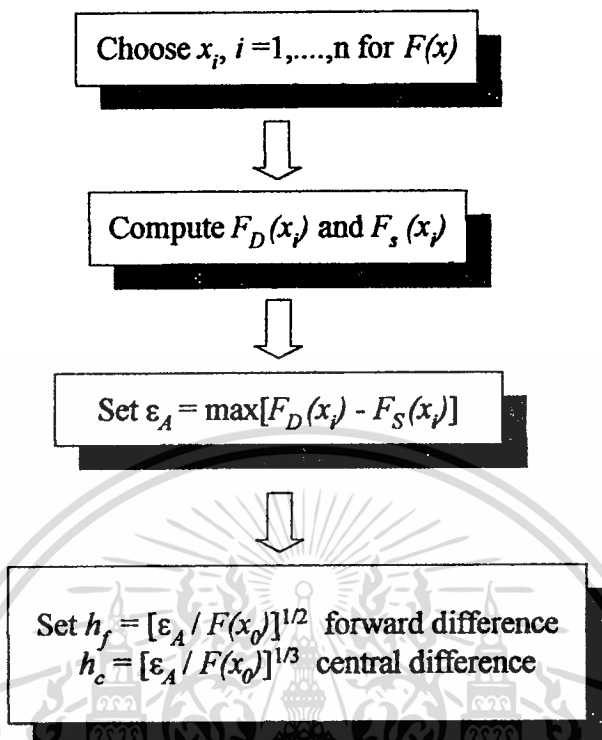
$$F'(x_0) = \frac{F(x_0 + h) - F(x_0 - h)}{2h} + o(h^2) \quad (\text{ข-48})$$

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



รูป ข-12 Finite difference intervals

ในการคำนวณด้วย finite difference มีความผิดพลาดอื่นๆ ที่อยู่ในการคำนวณหาค่าของฟังก์ชันของตัวเลข ความผิดนี้ปกติเรียกว่า เส้นใยหรือการยกเลิกข้อผิดพลาดซึ่งเป็นคุณสมบัติโดยตรงกับ  $1/h$  โดยที่ค่าผิดพลาดทั้งหมดนั้นเราจะประมาณให้อยู่ในรูปของ 2 เทอมเท่านั้น คือ ค่าจริง (truncation) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $h$  และการยกเลิกค่าผิดพลาด (cancellation) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $1/h$  การคำนวณหาค่า  $h$  โดยใช้โพธิ์เตอร์ตามรูป (ข-13)



รูป ข-13 อัลกอริทึมของการคำนวณหาค่าของ  $h$

การแนะนำความถูกต้องของการประมาณ finite difference โดยการทดสอบฟังก์ชันสองสมการ โดยใช้การคำนวณวิเคราะห์และการประมาณค่าแบบ 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 ค่าผิดพลาดของผลลัพธ์โดยการใช้ forward - derivative และ central derivative เหมาะสำหรับการนำมาใช้งานที่เดียว อย่างไรก็ตามค่าความผิดพลาดอาจแตกต่างกัน เพราะว่าฟังก์ชันต่างกันและอาจมีค่าแตกต่างกันมากเพราะเป็นฟังก์ชันแบบ non-linear

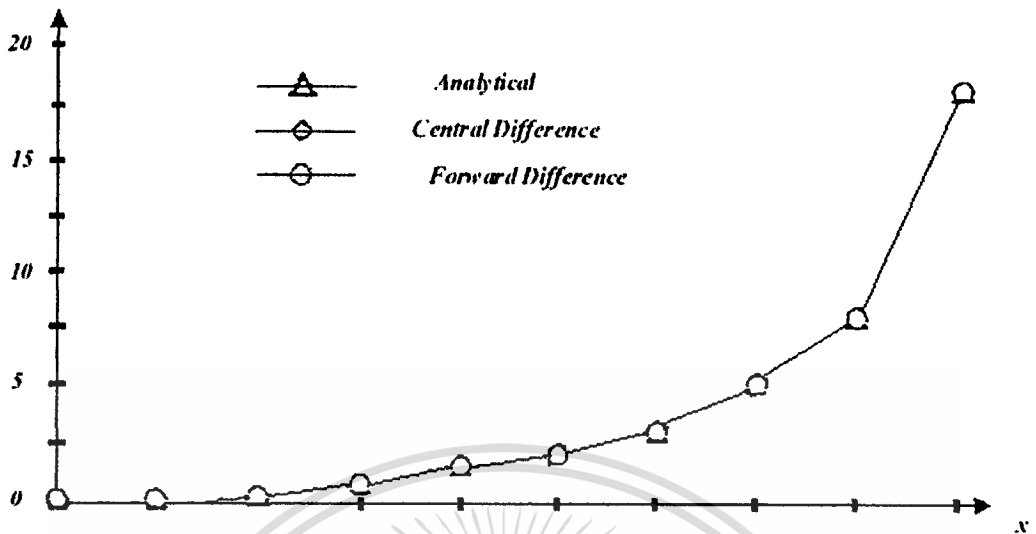
ตารางที่ ๗-1 First derivative of  $F(x) = 100(x_2 - x_1^2) + (1 - x_1)^2$

Test		I	II	III
Design	$x_1$	0.0005	0.5000	5.0000
Variables	$x_2$	0.0005	0.5000	5.0000
	$F(x)$	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

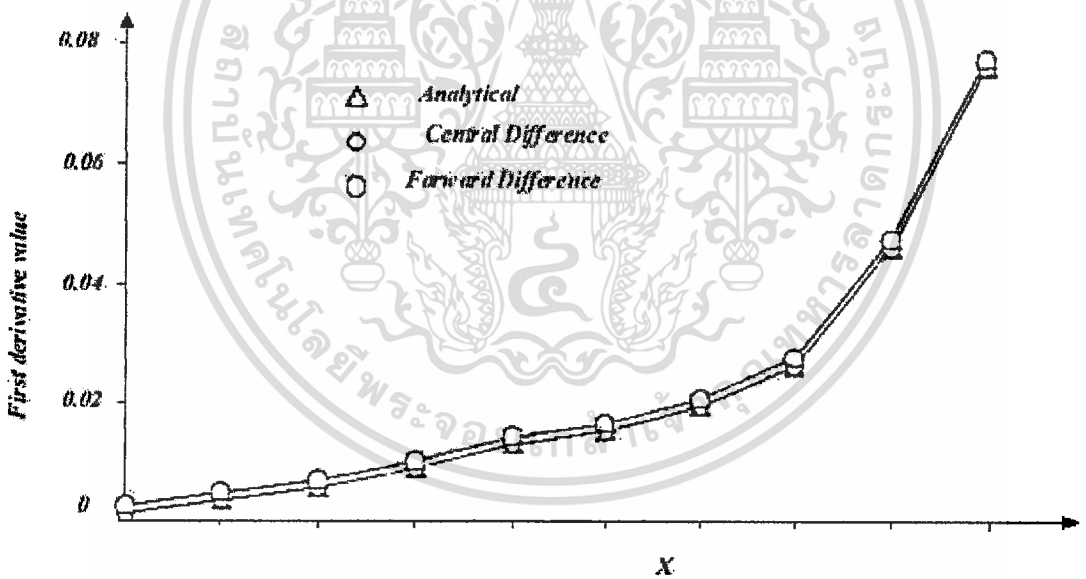
ตารางที่ ๗-2 First derivative of  $2x_1^2 + 2x_2^2 + x_3^2 + 2x_1x_2 - x_1x_3 - 0.8x_2x_3$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ข้อมูลใดๆ จากเอกสารชุดนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต



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



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

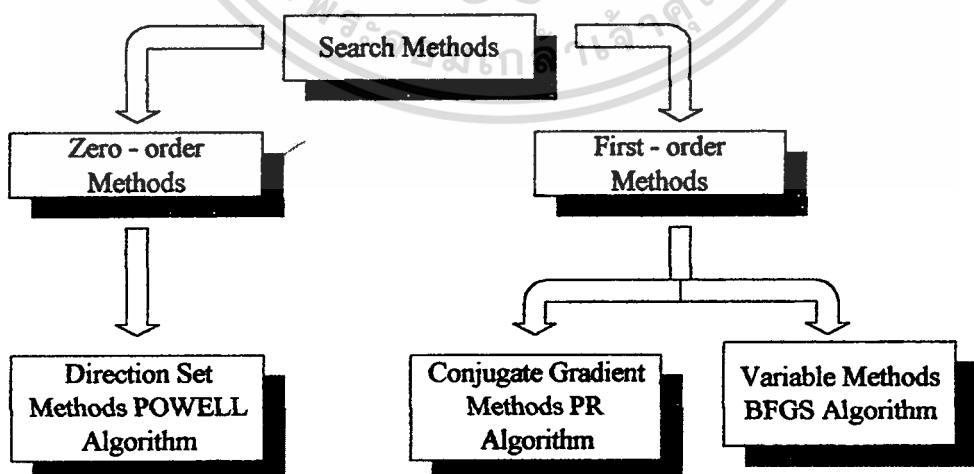
### ข-13 การ Optimization โดยใช้วิธี Unconstrained Numerical

การ Optimization โดยใช้วิธี Unconstrained Numerical เป็นการใช้พื้นฐานของสูตรการวนซ้ำอัลกอริทึมของการ Optimization ส่วนมากจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือการหาทิศทาง (search direction) และการกำหนดขนาดที่ขยับ (step size -determination) สำหรับ

ปัญหาของการ Optimization ด้วยตัวแปรหลายตัวก็คือปัญหาในการหาทิศทางที่ใช้ในการแก้ปัญหาเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นจึงกำหนดขนาดที่จะกระโดด โดยการหาฟังก์ชันที่น้อยที่สุดตามทิศทางที่กำหนดในพื้นที่ที่ออกมาซึ่งเรียกว่าการหาในหนึ่งมิติ (one -dimensional search) ในการเลือกทฤษฎีที่นำมาใช้ในการ Optimization อยู่บนพื้นฐานของคุณสมบัติของฟังก์ชันสนใจ (objective function) และ ฟังก์ชันเงื่อนไข (constraint function) ยิ่งไปกว่านั้นทฤษฎีเปลี่ยนไปขึ้นกับวิธีการใช้ในการแก้ปัญหา เช่น อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first -derivative) ซึ่งการใช้อนุพันธ์จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการหาค่าโดยใช้ฟังก์ชันทั่วไป ถ้าหากการใช้อนุพันธ์ไม่สามารถนำมาใช้ได้ ทฤษฎีที่ไม่ใช้อนุพันธ์ (non-derivative) จะต้องถูกนำมาใช้ แต่ควรจะตระหนักถึงกระบวนการที่ยู่ยากจะเพิ่มขึ้นและ ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ลดลงจากการที่ไม่ได้ใช้วิธีการอนุพันธ์

### ข-13.1 การกำหนดวิธีหาทิศทางและ ขนาดของการขยับ (Step)

การหาทิศทางสามารถจะหาโดยใช้อนุพันธ์หรือไม่ใช้อนุพันธ์ก็ได้ดังแสดงในรูป (ข-16) ซึ่งการใช้อนุพันธ์สามารถแบ่งได้เป็นอีก 2 วิธีที่วันนี้ต้องการวิธีหาค่าน้อยที่สุดในหนึ่งมิติ (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)”



รูป ข-16 Classification of search methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ทฤษฎีนี้เริ่มต้นด้วยการกำหนดเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector)  $e_1, e_2, \dots, e_N$  ซึ่งเป็นเวกเตอร์ทิศทาง การใช้ทฤษฎี Golden Section Search จะเคลื่อนที่ไปตามเวกเตอร์ทิศทางแรกที่กำหนดไปสู่ค่าน้อยที่สุดของทิศทางนั้น หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่สอง เพื่อไปสู่ค่าน้อยที่สุดของทิศทางที่สองนั้น และจะเป็นลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ ขบวนการที่จะวนไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าของฟังก์ชันไม่สามารถลดค่าลงได้อีก ซึ่งเทคนิคนี้จะเห็นว่าจำเป็นต้องกำหนดทิศทางเริ่มต้นให้ดี Powell ค้นพบทฤษฎีในการจัดทิศทาง ซึ่งเป็นพื้นฐานของ conjugate direction โดยที่ทิศทาง  $d^i$  และ  $d^j$  เป็น conjugate กัน ถ้า

$$(d^i)^T S d^j = 0 \quad (ข-49)$$

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 ทฤษฎีการหาทิศทางนั้นสิ่งที่จำเป็นจะต้องถูกจัดเก็บไว้จากการ minimization ในหนึ่งมิติและต้องการฟังก์ชันที่ใช้ในการหาจำนวนมาก การใช้ gradient จะช่วยให้ข้อมูลใหม่ๆ ที่มีประโยชน์สำหรับการกำหนดการจัดหาทิศทางและขนาด 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

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

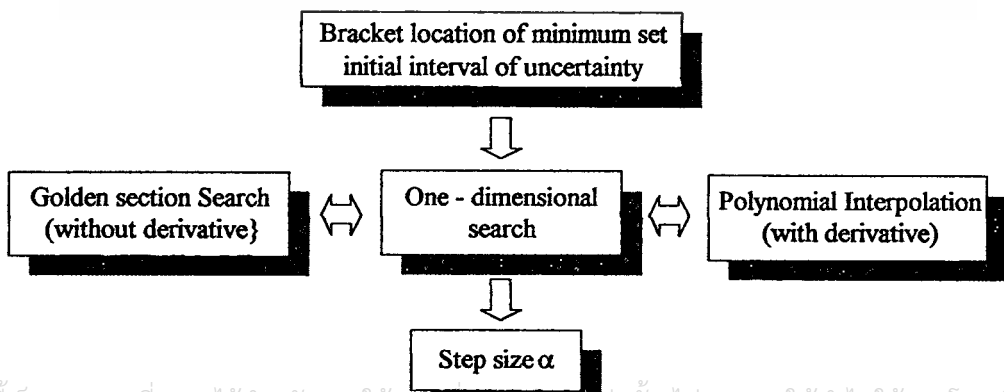
$$H^{(q)}d^{(q)} = -C^{(q)} \quad (\text{ข-53})$$

ซึ่ง H คือการประมาณสำหรับ Hessian เมตริกซ์ของฟังก์ชันที่เราสนใจระหว่างขบวนการ optimization ซึ่งสามารถสร้างได้จากการใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่งเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีเหล่านี้จะมีลักษณะการลู่เข้าเหมือนกับ second order ที่จุดเริ่มต้นเมตริกซ์ H จะถูกกำหนดเป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์  $H=I$  หลังจากนั้นในการวนซ้ำที่  $q$  ค่า H ใหม่จะได้เป็น

$$H^{(q+1)} = H^{(q)} + D^{(q)} + E^{(q)} \quad (\text{ข-54})$$

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

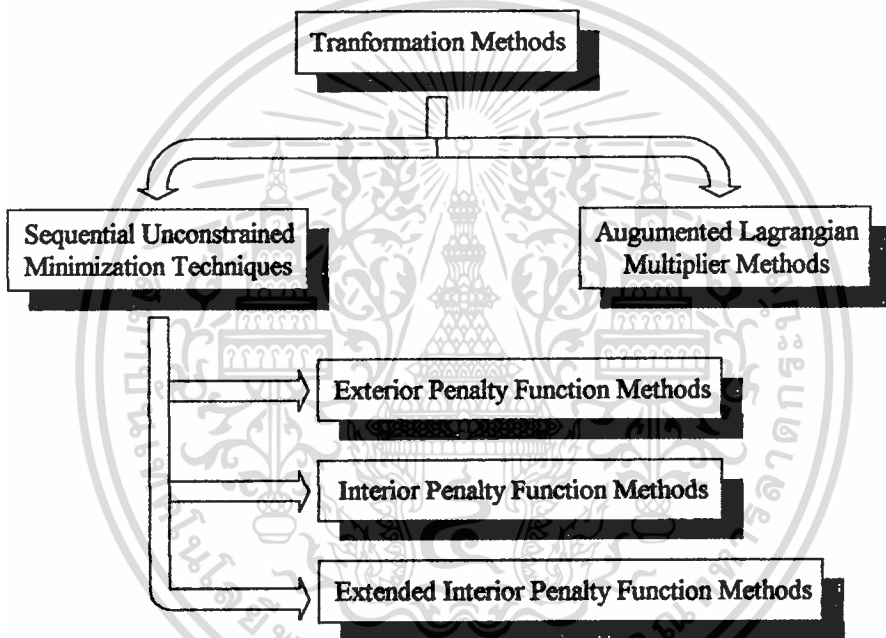
ขบวนการเบื้องต้นของการหาขนาดการกระโดด (step size) โดยอาศัยอัลกอริทึม (algorithms) ในรูปที่ (ข-17) ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน โดยในขั้นแรกจะแบ่งขอบเขตของเส้นทางเริ่มต้นในการหาจุดต่ำสุด ส่วนในขั้นตอนที่สอง ในเส้นทางที่กำหนดจะถูกปรับ โดยการตัดพื้นที่ในส่วนที่ไม่ได้ให้ค่าต่ำสุดออก ในที่สุดก็จะได้ขนาดการกระโดดที่เหมาะสม สิ่งที่น่าสังเกตคือวิธี Golden Section เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับ non derivative แต่วิธีนี้ต้องการฟังก์ชันเป็นจำนวนมากในการคำนวณ ซึ่งวิธีนี้จะไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติของการ design แต่ทว่าวิธี polynomial interpolation จะมีประสิทธิภาพดีกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งรูป ข-17 Step size determination algorithm เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ข-14 วิธีการเปลี่ยนรูป

ในส่วนนี้จะเป็นเทคนิคในการแก้ค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้ได้ผลดีที่สุด ซึ่งจะใช้วิธีการเปลี่ยนรูปโดยปรับปรุงค่าและฟังก์ชันที่เป็นจุดเริ่มต้นของปัญหาซึ่งสามารถแก้ปัญหาที่ไม่จำเป็นได้ โดยพื้นฐานเพื่อที่จะสร้างคู่โดยฟังก์ชัน (Pseudo function) และคอนสเตรนทฟังก์ชัน (constraint function) วิธีการเปลี่ยนรูปสามารถแยกออกเป็น 2 ชนิด ซึ่งแสดงในรูปที่ (ข-18) วิธีแรกเกี่ยวกับวิธีการภายนอก (penalty) และภายใน (barrier) ซึ่งอ้างถึง Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT) อย่างที่ 2 คือ การปรับปรุงฟังก์ชัน Lagrangian ที่เรียกว่า วิธีการ Augmented Lagrangian Multiplier Methods (ALMM)



รูป ข-18 Classification of the transformation methods

จากสมการ (3-1) ถึง (3-4) ในบทที่ 3 วิธีการเปลี่ยนแปลงรูปฟังก์ชันเหล่านี้เข้ากับปัญหาที่ไม่จำเป็นสำหรับชุดฟังก์ชัน จะได้ว่า

$$\phi(x, r) = F(x) + P[h(x), g(x), r] \quad (\text{ข-55})$$

ขณะที่  $r$  คือเวกเตอร์ทั่วไปของตัวแปรควบคุม และ  $P[h(x), g(x), r]$  คือ ค่าฟังก์ชันจริง ซึ่งแปรตามค่า  $r$  รูปแบบของ  $P$  ขึ้นกับวิธีการที่ใช้ ฟังก์ชัน  $\phi(x, r)$  เป็นค่าของ Unconstrained ที่ต่ำที่สุดโดยการเก็บค่า  $r$  ในระหว่างที่ทำซ้ำแต่ละครั้ง ค่าพารามิเตอร์  $r$  จะถูกไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนใหม่และกระบวนการจะถูกทำซ้ำจนกระทั่งไม่สามารถปรับปรุงค่าได้อีกแล้ว สำหรับค่า  $P$  และ  $r$  ที่เหมาะสมควรใช้วิธี Unconstrained แก้ปัญหา

#### ข-14.1 Sequential Unconstrained Minimization Techniques

วิธีการเหล่านี้ถูกพัฒนาและอธิบายรายละเอียดโดยเฟียคโก และแมคคอนิก (1968) วิธีลำดับค่าจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือ ลักษณะคุณสมบัติของการรักษาค่า Constraint ทั้งหมดที่เป็นไปได้ จากการออกแบบค่าที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีที่ดีกว่า ถ้าตัดสินใจใช้ Penally เพราะถ้าหากว่ามันไม่รวมกัน มันยังคงออกแบบค่าที่เป็นไปได้ ในส่วนที่ 2 ใช้ลำดับค่าที่เป็นไปไม่ได้และเป็นไปได้ที่มีค่าเหมาะสมเท่านั้นมีนัยถึงวิธีการฟังก์ชัน exterior penalty หรือ penalty เพื่อให้ได้ลักษณะวิธีการภายนอกและภายในที่ดีที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### Magnetic circuit and Magnetic Materials

ในส่วนนี้เราจะศึกษาการแปลงพลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล ความสำคัญของตำแหน่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ขณะที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน ซึ่งเป็นขนาดของพลังงานที่แปลงมา พิจารณาพลังงานที่จ่ายให้กับหม้อแปลง ซึ่งไม่ใช่พลังงานจักรกลไฟฟ้าที่แปลงมาแต่สำคัญตรงที่การแก้ปัญหาค่าพลังงานที่แปลงมา

ในทางปฏิบัติทั้งหม้อแปลงและเครื่องจักรกลไฟฟ้า ใช้วัสดุที่เป็นแม่เหล็กทั้งขนาดและทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งมีการเคลื่อนย้ายและเปลี่ยนแปลงพลังงาน ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์และอธิบายปริมาณฟลักซ์แม่เหล็ก โดยเฉพาะเครื่องมือช่วยประกอบความเข้าใจค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงเหล่านี้ วัสดุที่เป็นแม่เหล็กมีกฎเกณฑ์มากมายในการกำหนดคุณสมบัติของชิ้นส่วนอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้า ผลของขนาดและประสิทธิภาพของมัน

ในส่วนนี้จะพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและจะแนะนำคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในทางปฏิบัติ เหตุผลเหล่านี้จะมาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์หม้อแปลง ในส่วนต่อไปจะวิเคราะห์การหมุนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

#### ก.1 Introduction to magnetic circuits

ในทางปฏิบัติแล้วเกี่ยวกับวิศวกรรมจะสนใจตำแหน่งของสนามแม่เหล็กมากที่สุดที่เกี่ยวข้องกับผลลัพธ์ของสมการ Maxwell ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ มีความสัมพันธ์กับการอธิบายคุณสมบัติวัสดุ ถึงแม้ว่าในทางปฏิบัติผลลัพธ์ ที่ได้ไม่สามารถทำได้สำเร็จตามต้องการ แต่ข้อสมมติฐานต่างๆ ก็เป็นที่ยอมรับเพื่อให้ประโยชน์ในการหาผลลัพธ์ทางวิศวกรรม

ข้อสมมติฐานข้อแรก เป็นชนิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า ความถี่และขนาดที่เกี่ยวข้องในเทอมของกระแสที่แทนที่ในสมการของ Maxwell สามารถละเลยได้ในส่วนนี้จะนับรวมกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในช่องว่างโดยสนามไฟฟ้าที่เวลาต่างกันและรวมไปถึงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจาก Magneto-quasi-static ในรูปแบบของสมการ Maxwell

$$\oint_{\mathcal{C}} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint_{\mathcal{S}} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a} \quad (\text{ก-1})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\oint_{\mathcal{S}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = 0 \quad (\text{ก-2})$$

จากสมการที่ ค-1 อินทิเกรตเชิงเส้นของความเข้มของสนามแม่เหล็ก  $H$  รอบเส้นปิดเท่ากับ กระแสทั้งหมดที่ผ่านบนพื้นผิว  $S$  ที่เชื่อมกับเส้นทางผ่าน จากสมการ ค-1 จะเห็นได้ว่าแหล่งกำเนิดของ  $H$  คือ ความหนาแน่นกระแส  $J$  จากสมการ ค-2 ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  ซึ่งไม่ใช่ฟลักซ์ที่เข้าไปหรือออกจากพื้นผิวปิด จากสมการเหล่านี้จะพบว่าขนาดของสนามแม่เหล็กสามารถกำหนดได้จากค่าของแหล่งจ่ายกระแสและเวลาที่เปลี่ยนไปของสนามแม่เหล็กตามทิศทางของเวลาที่เปลี่ยนไปของแหล่งจ่าย

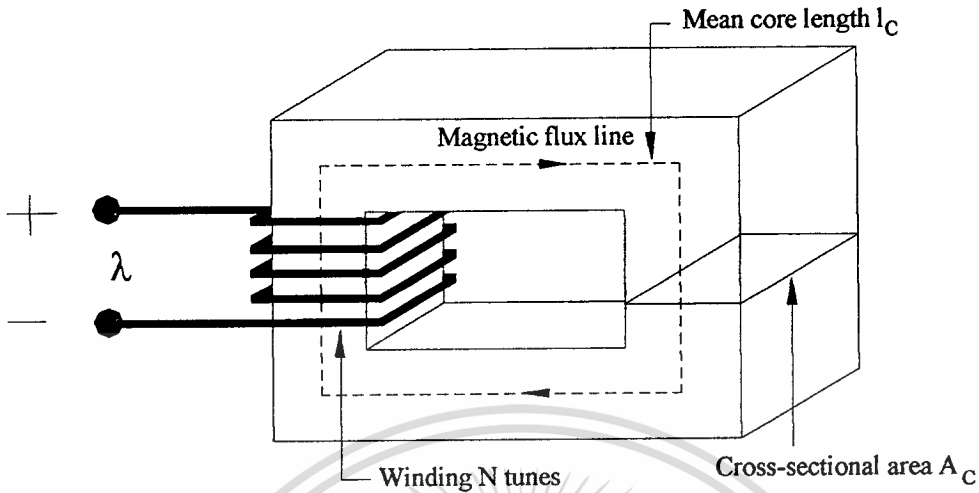
ข้อสมมติฐานข้อที่สองเกี่ยวข้องกับวงจรแม่เหล็ก ผลลัพธ์โดยทั่วไปสำหรับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก  $H$  และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  ในโครงสร้างของเรขาคณิตเชิงซ้อนซึ่งยากมาก อย่างไรก็ตามปัญหาสนามแม่เหล็กขนาดสามมิติสามารถทำให้ลดลงเป็นวงจรมิติหนึ่งมิติ แต่ทั้งนี้ผลลัพธ์ก็ยังเป็นที่ยอมรับในทางวิศวกรรม

โครงสร้างวงจรแม่เหล็กประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าเพอร์เมียบิลิตีสูงสุด วัสดุที่มีค่าเพอร์เมียบิลิตีสูงทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กโดยมีขอบเขตตามเส้นทาง โดยโครงสร้างจะมีกระแสที่ถูกจำกัดโดยตัวนำของวงจรไฟฟ้า ข้อคิดเห็นของวงจรแม่เหล็กนี้ได้แสดงให้เห็นในบทความนี้และเพื่อนำไปประยุกต์ค่าตำแหน่งต่าง ๆ

วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างง่ายได้แสดงในรูป ค-1 สมมติให้แกนเหล็กประกอบด้วยวัสดุที่เป็นแม่เหล็ก ซึ่งค่าเพอร์เมียบิลิตีสูงกว่าของอากาศรอบ ๆ ( $\mu_r \gg \mu_0$ ) แกนเหล็กมีพื้นที่หน้าตัดคงที่และถูกกระตุ้นโดยขดลวดจำนวน  $N$  รอบ มีกระแส  $i$  แอมแปร์ (A) ขดลวดนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก ซึ่งแสดงในรูป

เพราะว่าแกนแม่เหล็กมีค่าเพอร์เมียบิลิตีสูง (high permeability) ฟลักซ์แม่เหล็กจึงถูกจำกัดภายในแกนเหล็กเกือบทั้งหมด เส้นทางสนามแม่เหล็กถูกจำกัดโดยแกนเหล็กและความหนาแน่นฟลักซ์จะอยู่เหนือแกนตัดขวางเพราะพื้นที่ภาคตัดขวางมีค่าคงที่ สนามแม่เหล็กสามารถดูได้ในเทอมของเส้นทางเดินฟลักซ์ซึ่งเป็นวงปิดที่พันขดลวดไว้

ในการประยุกต์วงจรแม่เหล็กของรูป ค-1 แหล่งจ่ายสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กมีค่ากระแส - รอบ เป็น  $Ni$  ในวงจรแม่เหล็ก คือ magnetomotive force (mmf) ในรูป ค-1 แสดงขดลวดแกนเดี่ยวเท่านั้น หม้อแปลงไฟฟ้าและแกนหมุนเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีอย่างน้อย 2 ขด และ  $Ni$  เป็นผลรวมของค่ากระแส - รอบของขดลวดทั้งหมด



รูป ค-1 แสดงวงจรแม่เหล็กที่พันด้วยขดลวด 1 ขด และ ไม่มีช่องว่างอากาศ  
ฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi$  ที่อยู่บนพื้นผิว  $S$  คือ พื้นที่ผิวรวมของส่วนประกอบของ  $B$  ดังนั้น

$$\phi = \oint_S B \cdot da \quad (\text{ค-3})$$

ในหน่วย SI หน่วยของ คือ  $\phi$  เวเบอร์ (Wb)

ในสมการที่ ค-3 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกพื้นผิว (เท่ากับผลรวมของพื้นผิวของ  $B$  ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ปิด) มีค่าเป็นศูนย์ ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมดภายในพื้นที่ผิวที่มีปริมาตรปิดต้องละทิ้งไป ซึ่งเป็นปริมาตรที่เกินมาในส่วนพื้นนั้นเพราะเส้นทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กเป็นวงปิด (Closed loops)

จากข้อสมมติฐานที่ว่าฟลักซ์แม่เหล็กจะเกิดขึ้นบนภาคตัดขวางของแกนเหล็กในกรณี สมการ ค-3 ลดรูปแบบสมการให้ง่ายขึ้น

$$\phi_c = B_c A_c \quad (\text{ค-4})$$

ขณะที่  $\phi_c =$  ฟลักซ์ในแกนเหล็ก

$B_c =$  ความหนาแน่นฟลักซ์ในแกนเหล็ก

$A_c =$  พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก

จากสมการที่ ค-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง mmf และ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลต่อผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข (ค-5)

$$\mathcal{F} = Ni = \oint H \cdot dl$$

ขนาดแกนเหล็ก, ความยาวทางเดินของเส้นทางเดินฟลักซ์เป็นแบบปิด ซึ่งความยาวหลักของแกนเหล็กเป็น  $l_c$ , ผลรวมของเส้นทางในสมการ ค-5 เปลี่ยนเป็น  $H_c l_c$  ของขนาด  $H$  และความยาวของเส้นทางเดินฟลักซ์  $l_c$  ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง mmf กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสามารถเขียนใหม่เป็น

$$\mathcal{R} = Ni = H_c l_c \quad (\text{ค-6})$$

เมื่อ  $H_c$  เป็นขนาดเฉลี่ยของ  $H$  ในแกนเหล็ก

ทิศทางของ  $H_c$  ในแกนเหล็ก สามารถได้จากกฎมือขวา ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี

(1) ตัวนำที่มีกระแสอยู่ ใช้มือขวา นิ้วหัวแม่มือจะชี้ไปในทิศทางของกระแสและนิ้วที่ เหลือชี้ไปในทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส

(2) ถ้าเป็นขดลวดในรูป ค-1 กำมือขวา นิ้วจะชี้ในทิศทางไหลของกระแส, นิ้วหัวแม่มือจะชี้ในทิศทางของสนามแม่เหล็ก

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่มีสนามแม่เหล็กอยู่ ดังนั้น

$$B = \mu H \quad (\text{ค-7})$$

เมื่อ  $\mu$  คือ ค่า permeability ในหน่วย  $B$  มีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร หรือ เรียกว่า เทสลา ( T ) และ  $\mu$  มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อกระแส - รอบ - เมตร หรือ เฮนรี ต่อ เมตร ในหน่วย SI ค่า ของ permeability ของช่องว่างเป็น  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  ค่า permeability ของวัสดุที่เป็น ferromagnetic สามารถแสดงได้ในเทอมของ  $\mu$ , ค่าของมันมีความสัมพันธ์ในช่องว่าง หรือ  $\mu = \mu_0 \mu_r$  สำหรับวัสดุที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าและแกนหมุนเครื่องจักรกลไฟฟ้า มีค่า  $\mu_r$  ประมาณ 2,000 ถึง 80,000 ลักษณะของวัสดุที่เป็น ferromagnetic ได้อธิบายในรูป ค-3 และ ค-4 ในปัจจุบันสมมติให้  $\mu_r$  เป็นค่าคงที่ ถึงแม้ว่ามันจะเปลี่ยนแปลงค่าตามขนาดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

หม้อแปลงไฟฟ้าในแกนเหล็กปิด ดังรูป ค-1 การรักษาดังงานซึ่งจะต้องมีช่องอากาศในวงจรมแม่เหล็กด้วย วงจรมแม่เหล็กที่มีช่องอากาศดัง ในรูป ค-2 เมื่อความยาวของช่องอากาศเป็น  $g$  มีค่าน้อยกว่าระยะห่างแกนเหล็ก หรือ ฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi$  ถูกจำกัดขอบเขตเพื่อให้อยู่ในแกนแม่เหล็กช่อง

เอก... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

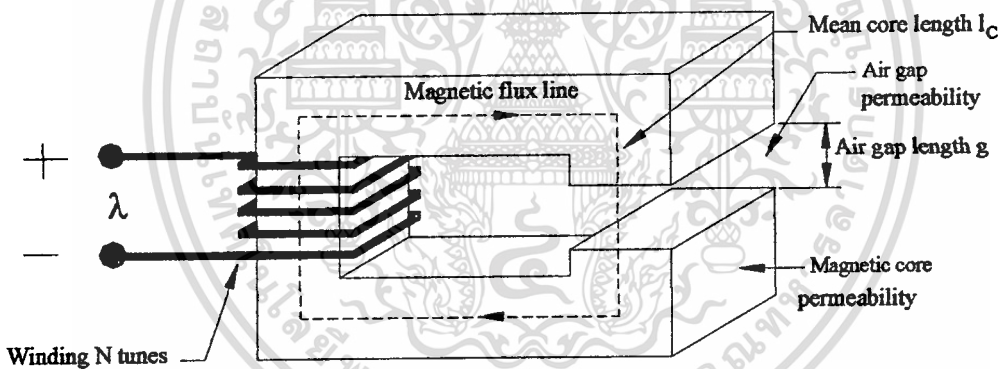
อากาศและตลอดทั้งวงจรแม่เหล็ก ดังนั้น จากรูป ค-2 สามารถวิเคราะห์วงจรแม่เหล็กด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วน : ค่า permeability ของแกนเหล็ก, ความยาวแกนเหล็ก  $l_c$ , ค่า permeability ของช่องอากาศ, พื้นที่หน้าตัดขวาง  $A_g$  และความยาว  $g$  ในแกนเหล็กที่มีความหนาแน่นฟลักซ์คงที่ และพื้นที่หน้าตัดขวาง  $A_c$ : ดังนั้นในแกนเหล็ก

$$B_c = \frac{\phi}{A_c} \quad (\text{ค-8})$$

และในอากาศ

$$B_g = \frac{\phi}{A_g} \quad (\text{ค-9})$$

ขณะที่  $\phi$  = ฟลักซ์แม่เหล็กในอากาศ



รูป ค-2 แสดงวงจรแม่เหล็กที่พันด้วยขดลวด 1 ขด และมีช่องว่างอากาศ

เส้นทางแม่เหล็กจะข้ามช่องอากาศ ดังรูป ค-2 ผลของ fringing field ทำให้เพิ่มพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A_g$  ของช่องอากาศ วิธี Various empirical ได้พัฒนาเพื่อทำให้คำนวณผลที่เกิดขึ้นนี้ได้ ค่า fringing fields ที่ถูกต้องในช่องอากาศสั้นๆ สามารถทำได้โดยการบวกความยาวช่องอากาศทั้ง 2 ด้าน บนพื้นที่ภาคตัดขวาง ถ้าไม่คิดค่า fringing,  $A_g = A_c$  และ

$$B_g = B_c = \frac{\phi}{A_c} \quad (\text{ค-10})$$

$$\mathfrak{R} = Ni = H_c l_c + H_g l_g \quad (\text{ค-11})$$

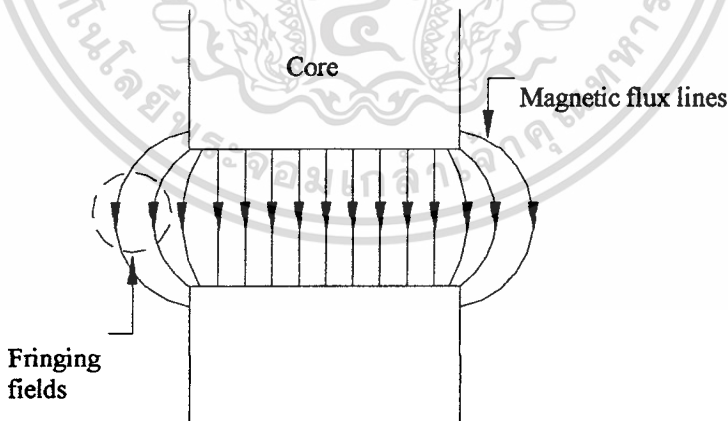
$$\mathfrak{J} = \frac{B_c l_c}{\mu} + \frac{B_g l_g}{\mu_0} \quad (\text{ค-12})$$

$N_i$  เป็นผลรวมของกระแส – รอบ ที่ประยุกต์ใช้กับวงจรแม่เหล็ก ดังนั้นในส่วนของค่า mmf ที่ต้องการเพื่อกระตุ้นสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก ขณะที่ส่วนที่เหลืออยู่ยังกระตุ้นสนามแม่เหล็กในช่องอากาศอยู่

ในทางปฏิบัติวัสดุที่เป็นแม่เหล็ก (อธิบายในรูป ค-3)  $B_c$  และ  $H_c$  หาค่าความสัมพันธ์ไม่มากนัก ถึงแม้จะรู้ค่าคงที่ permeability ที่จริงแล้ว  $B$  เป็นค่าไม่เป็นเชิงเส้น  $H_c$  เป็นฟังก์ชันที่มีหลายค่า ดังนั้นถึงจะนำเอาสมการ ค-11 มาใช้ ก็ไม่สามารถจะแก้ค่าความสัมพันธ์ mmf และความหนาแน่นฟลักซ์ ดังเช่นในสมการ ค-12 ข้อสรุปของค่าคงที่ permeability แกนเหล็กเห็นเหตุผลที่ยอมรับทางวิศวกรรมและความบ่อยครั้งที่น่าไปใช้

จากสมการ ค-10, ค-12 สามารถเขียนใหม่ในเทอมของฟลักซ์ทั้งหมด เป็น

$$\mathfrak{J} = \phi \frac{l_c}{\mu A_c} + \phi \frac{g}{\mu_0 A_c} \quad (\text{ค-13})$$



รูป ค-3 แสดงผลของ fringing flux ในช่องอากาศ

ไม่คิดค่า fringing ที่ช่องอากาศ และ ฟลักซ์สมมติให้ข้ามช่องอากาศเป็นเส้นตรง ในเทอมที่ฟลักซ์เพิ่มขึ้นในสมการนี้ ที่รู้จักกันคือ ค่า Reluctance ( $\mathfrak{R}$ ) ของแกนเหล็กและช่องอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathfrak{R}_c = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad (\text{ค-14})$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_c} \quad (\text{ค-15})$$

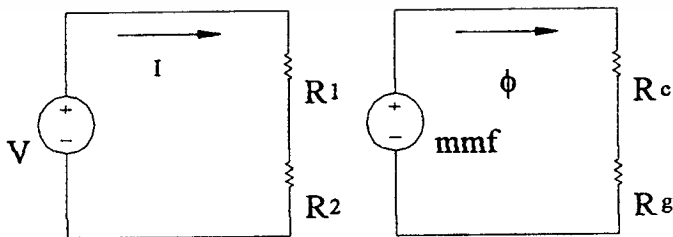
และคังนั้น

$$\mathfrak{F} = \phi(\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g) \quad (\text{ค-16})$$

สุดท้าย สมการ ค-16 สามารถกลับเพื่อแก้ค่าฟลักซ์

$$\phi = \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g} \quad (\text{ค-17})$$

ในสมการ ค-16 และ ค-17 ได้เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในวงจรไฟฟ้า การเปรียบเทียบนี้แสดงในรูป ค-4 ในรูป ค-4a แสดงวงจรไฟฟ้าที่มีแรงดัน  $V$  จ่ายกระแส  $I$  ผ่านความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ในรูป ค-4b แสดงรูปวงจรแม่เหล็กซึ่งแปลงมาจากรูป ค-2 จะพบว่า mmf ( $\mathfrak{F}$ ) (เปรียบเทียบแรงดันในวงจรไฟฟ้า) จ่ายค่าฟลักซ์  $\phi$  (เปรียบเทียบกระแสในวงจรไฟฟ้า) ผ่านค่า Reluctance ที่ต่ออนุกรมของแกนเหล็ก  $R_c$  และช่องอากาศ  $R_g$  การเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ของวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็กช่วยให้หาผลลัพธ์ของฟลักในวงจรแม่เหล็กที่เป็นค่าเชิงซ้อน



รูป ค-4 แสดงการเปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กด้วยวงจรไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเศษส่วนของ mmf ทั้งหมดที่ต้องการในแต่ละส่วนของวงจรแม่เหล็กเปลี่ยนค่ากลับเป็นค่า Reluctance จากสมการ ค-14 ค่า Reluctance แกนเหล็กมีค่าน้อยขณะที่ค่า permeability ของมันมีค่าเพิ่มขึ้นและสามารถทำให้มีค่าน้อยกว่าของช่องอากาศมากๆ ได้ สำหรับ  $\mu \gg \mu_0$ ,  $\mathcal{R}_c \ll \mathcal{R}_g$  ในกรณีนี้ค่าฟลักซ์และ B สามารถหาได้จากสมการ ค-17 ในเทอมของ  $\mathcal{I}$  และช่องอากาศดังนี้

$$\phi \approx \frac{\mathcal{I}}{\mathcal{R}_g} = \frac{\mathcal{I} \mu_0 A_c}{g} = Ni \frac{\mu_0 A_c}{g} \quad (\text{ค-18})$$

ในเทอมนี้ซึ่งมีค่า mmf เพิ่มมากขึ้น ที่เรียกว่า permmance ดังนั้นค่า permmance ของช่องอากาศเป็น

$$\phi_g = \frac{I}{\mathcal{R}_g} = \frac{\mu_0 A_c}{g} \quad (\text{ค-19})$$

จากรูป ค-3 ทางปฏิบัติวัสดุแม่เหล็กมีค่า permeability ไม่คงที่แต่เปลี่ยนค่าตามขนาด ฟลักซ์ ในสมการ ค-14 ถึง ค-17 ค่า permeability มากเพียงพอ การเปลี่ยนแปลงค่าของมันไม่มีผลกระทบต่อองค์ประกอบของวงจรแม่เหล็ก

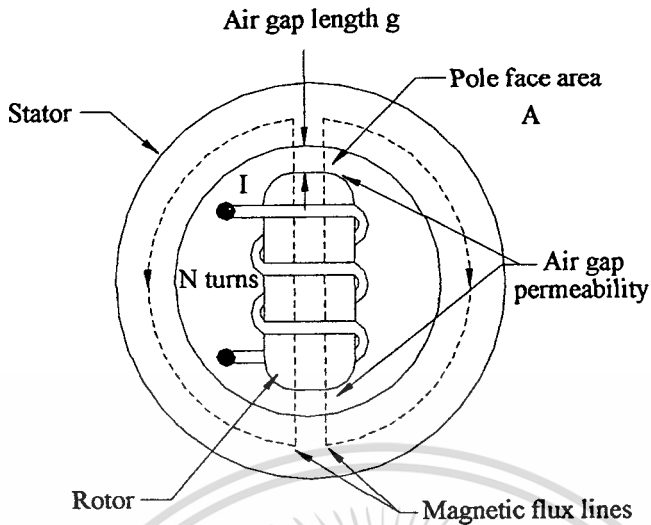
พื้นฐานสำคัญในการลดค่าสนามแม่เหล็กกึ่งคงที่ (magneto-quasi-static) ด้วยเรขาคณิตง่ายๆ เพื่อเป็นแบบจำลองวงจรแม่เหล็ก จุดประสงค์ในหัวข้อนี้เพื่อแนะนำข้อคิดเห็นบางอย่างและการใช้รูปแบบซึ่งวิศวกรใช้แก้ปัญหาในการออกแบบ แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับความตัดสินใจของผู้ออกแบบด้วย ตัวอย่างเช่น สมมติว่าค่า permeability ของเหล็ก ในส่วนของวงจรแม่เหล็ก ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่รูขนาด ถึงแม้ว่ามันจะไม่เป็นจริง (ดังรูป ค-3) และสนามแม่เหล็กถูกจำกัดขอบเขตแกนเหล็กและช่องอากาศ

## ค.2 Flux Linkage, Inductance, and Energy

เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แปรผันกับเวลา, สนามอิเล็กทรอนิกส์จะถูกสร้างขึ้น ซึ่งอธิบายได้โดยกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d}{dt} \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (\text{ค-20})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ค-5 แสดงวงจรแม่เหล็กที่มีการหมุนเหนี่ยวนำ

สมการที่ (ค-20) เป็นการอินทิเกรตของสนามอิเล็กทรอนิกส์  $E$  รอบวงปิดเส้นทาง  $C$  ซึ่งเท่ากับ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่พื้นที่นั้นต่อเวลา

ในโครงสร้างของแม่เหล็กกับขดลวด ดังในรูปที่ (ค-2) สนาม ในเส้นลวดมีขนาดน้อยมาก และสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นทางซ้ายมือของสมการที่ (ค-20) มีค่าลดลงเป็นลบของค่า Induce Voltage ที่ขั้วขดลวด นอกจากนี้ค่าฟลักซ์ค้ำวนขวามือของสมการ (ค-20) ใช้ค่าฟลักซ์แกนเหล็ก  $\phi$  เป็นหลัก เพราะจำนวนรอบของขดลวดรอบแกนเหล็กเป็น  $N$  รอบ, สมการ (ค-20) จึงลดลงเป็น

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (\text{ค-21})$$

เมื่อ  $\lambda = N\phi$  เป็นค่า Flux linking ของขดลวด สัญลักษณ์  $\phi$  ถูกใช้แสดงค่าของ Time-varying flux

โดยปกติค่า flux linkage ของขดลวด เท่ากับพื้นที่โดยรวมขององค์ประกอบทั่วไป คุณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่คลุมเหนือพื้นที่ผิวขดลวด สังเกตว่าทิศทางของแรงดัน  $e$  หาได้ โดยสมการ (ค-20) ดังนั้นถ้าขั้วสายขดลวดถูก Short-circuit แล้ว กระแสจะไหลในทิศทางที่ขวางทางการเปลี่ยนแปลงของ flux linkage

สำหรับวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง  $\phi$  และ  $I$  เนื่องจากค่าคงที่ permeability ของโลหะหรือช่องอากาศหาค่าความสัมพันธ์  $\lambda - i$  โดยค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L \frac{\lambda}{i} \quad (\text{ค-22})$$

เมื่อ  $\lambda = N\phi$ , flux linkage มีหน่วยเป็นเวเบอร์-รอบ ( Wb-turn ) ตัวอย่างจากสมการ (ค-18);

$$L = \frac{NB_c A_c}{i} = \frac{N^2 \mu_0 A_c}{g} \quad (\text{ค-23})$$

สำหรับวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าในรูป (ค-2) เป็นการสมมติค่า permeability ของแกนเหล็ก ค่าความเหนี่ยวนำเป็นหน่วยเฮนรี หรือ เวเบอร์-รอบ ต่อแอมแปร์ ในสมการ (ค-23) แสดงรูปแบบ ขนาดของค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบกำลังสอง ค่า permeability ของวงจรแม่เหล็ก, พื้นที่ภาคตัดขวาง และ ความยาวของมัน

ความยุ่งยากในการประยุกต์ค่าความเหนี่ยวนำในการคำนวณวิธี Numerical เกิดจากความ ไม่เป็นเชิงเส้นของค่า permeability  $\mu$  ในแกนแม่เหล็ก ดังอธิบายในรูป (ค-3) และ (ค-4) สังเกตว่า การใช้ประโยชน์ของค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งพาราเมเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าสมมติฐานของค่าเชิงเส้น ระหว่างฟลักซ์และ mmf ความหมายโดยนัย ซึ่งผลของความไม่เชิงเส้นของสารแม่เหล็กในแกน สามารถประมาณเลือกส่วนของความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงหรือผลของแกนเหล็กทางด้าน Secondary เปรียบเทียบกับผลของช่องอากาศ

รูป (ค-6) แสดงวงจรแม่เหล็ก ซึ่งมีช่องอากาศและขดลวด 2 ขด อ้างอิงทิศทางกระแส ซึ่ง ฟลักซ์มีทิศทางเดียวกัน ค่า mmf โดยรวมเป็น

$$F = Ni = N_1 i_1 + N_2 i_2 \quad (\text{ค-24})$$

และจากสมการ (ค-18) ค่า Reluctance ของแกนเหล็กตัดทิ้งได้ ค่าฟลักซ์แกนเหล็ก  $\phi$  เป็น

$$\phi = (N_1 i_1 + N_2 i_2) \frac{\mu_0 A_c}{g} \quad (\text{ค-25})$$

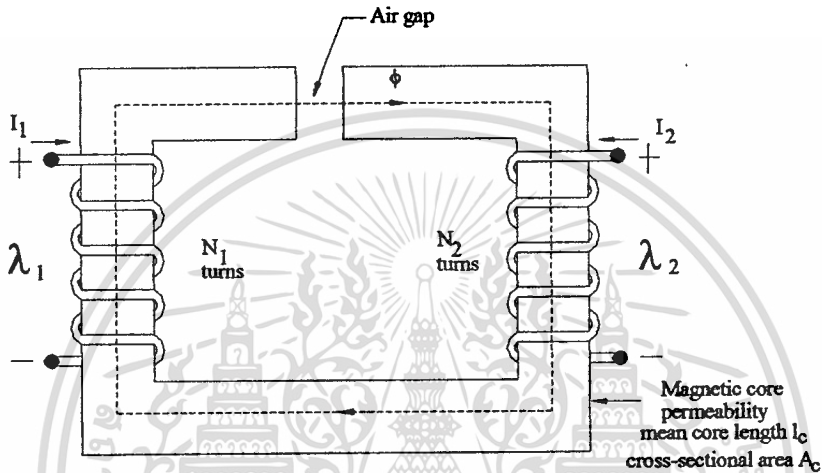
ในสมการ (ค-25),  $\phi$  คือ ค่า resultant core flux สร้างโดย simultaneous action ของค่า mmf ของทั้งคู่

เอกสารนี้ได้นำสมการ (ค-25) ใส่ในตอนที่อ้างถึงเฉพาะกระแส, ค่าในขดลวดที่ 1 สามารถแสดงได้ การคำนวณเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_1 = N_1 \phi = N_1^2 \frac{\mu_0 A_c}{g} i_1 + N_1 \frac{N_2 \mu_0 A_c}{g} i_2 \quad (\text{ค-26})$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็น

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \quad (\text{ค-27})$$



รูป ค-6 แสดงวงจรแม่เหล็กที่พันด้วยขดลวด 2 ขด และมีช่องว่างอากาศ

$$\text{เมื่อ } L_{11} = N_1^2 \frac{\mu_0 A_c}{g} \quad (\text{ค-28})$$

เป็นค่า self - inductance ของขดลวดที่ 1 และ  $L_{11} i_1$  เป็น flux linkage ในขดลวดที่ 1 เนื่องจากกระแส  $i_1$  ค่า mutual inductances ระหว่างขด 1 และ 2 เป็น

$$L_{12} = N_1 N_2 \frac{\mu_0 A_c}{g} \quad (\text{ค-29})$$

และ  $L_{12} i_2$  คือ flux linkage ในขด 1 เนื่องจากกระแส  $i_2$  ในขดลวดอีกขดในทางเดียวกันค่า flux linkage ในขดลวดที่ 2 เป็น

$$\text{เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (ค-30)}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_2 = L_{21}i_1 + L_{22}i_2 \quad (\text{ค-31})$$

เมื่อ  $L_{21} = L_{12}$  เป็นค่า mutual inductance และ

$$L_{22} = N_2^2 \frac{\mu_0 A_c}{g} \quad (\text{ค-32})$$

คือค่า Self – inductance ของขด 2

ค่า Resultant flux linkage มี  $i_1$  และ  $i_2$  เป็นส่วนประกอบโดยพื้นฐาน ซึ่งก็หมายความว่า ลักษณะ flux – mmf เป็นเชิงเส้น (ค่า permeability คงที่)

แทนค่าของสมการ (ค-22) ใน (ค-21) จะได้

$$e = \frac{d}{dt}(Li) \quad (\text{ค-33})$$

สำหรับวงจรแม่เหล็กที่มีขดลวดเดียว ค่าความเหนี่ยวนำจะถูกกำหนดไว้ที่ค่าๆ หนึ่งและ สมมติให้วัสดุที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ไม่เป็นสาเหตุต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ ดังนั้น สมการ (ค-33) ก็ยู่ได้เป็น

$$e = L \frac{di}{dt} \quad (\text{ค-34})$$

แต่อย่างไรก็ตาม การอนุรักษ์พลังงานทางกลศาสตร์ไฟฟ้า (Electromechanical) ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงตามเวลา และจะทำให้สมการ(ค-33) ถูกเขียนเป็น

$$e = L \frac{di}{dt} + \frac{dL}{dt} i \quad (\text{ค-35})$$

ซึ่ง flux linkage ทั้งหมดของขดลวดแต่ละขดต้องถูกใช้ในสมการ (ค-21) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวด

สำหรับค่ากำลังงานที่ขั้วของขดลวดในวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดค่าอัตราพลังงานที่ไหลเข้ามาในวงจรผ่านขดลวด ค่ากำลังงาน  $P$  ถูกกำหนดจากผลคูณของค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

$$P = ie = i \frac{d\lambda}{dt} \quad (\text{ค-36})$$

และมีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt) หรือ จูลต่อวินาที ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานแม่เหล็ก  $\Delta W$  ในวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า จากเวลา  $t_1$  ถึง  $t_2$  เป็น

$$\Delta W = \int_{t_1}^{t_2} pdt = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} id\lambda \quad (\text{ค-37})$$

(ในหน่วย SI พลังงานสะสม  $W$  วัตต์เป็นจูล)

สำหรับระบบขดลวดเดี่ยวของค่าความเหนี่ยวนำคงที่ การเปลี่ยนแปลงในพลังงานแม่เหล็กสะสมสามารถเขียนได้เป็น

$$\Delta W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} id\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda}{L} d\lambda = \frac{1}{2L} (\lambda_2^2 - \lambda_1^2) \quad (\text{ค-38})$$

ค่าพลังงานแม่เหล็กที่สะสมทั้งหมดที่ให้ค่า  $\lambda$  สามารถหาได้จากการกำหนด  $\lambda$  เท่ากับศูนย์

$$W = \frac{1}{2L} \lambda^2 = \frac{L}{2} i^2 \quad (\text{ค-39})$$

### ค.3 AC EXCITATION

ระบบกำลังไฟฟ้า ac ลักษณะคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและฟลักซ์ให้ประมาณว่าเป็นฟังก์ชัน sine ของเวลา ในหัวข้อนี้จะอธิบายลักษณะการกระตุ้นและการสูญเสียของสารแม่เหล็กที่ทำงานในสถานะคงที่ (Steady - stage) ac จากแบบจำลองของวงจรแม่เหล็กแกนปิด (ไม่มีช่องอากาศ) ซึ่งแสดงในรูป (ค-1) ความยาวเส้นทางเดินแม่เหล็กคือ  $l_c$  และ พื้นที่ภาคตัดขวาง  $A_c$  ตามความยาวของแกนเหล็ก สมมติว่าค่า Sine เปลี่ยนแปลงตามฟลักซ์แกนเหล็ก  $\phi(t)$  ดังนั้น

$$\phi(t) = \phi_{\max} \sin \omega t = A_c B_{\max} \sin \omega t \quad (\text{ค-40})$$

เมื่อ  $\phi_{\max}$  ขนาดของฟลักซ์แกนเหล็ก  $\phi$  สำหรับการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
แม้ว่ากรณี  $B_{\max}$  คือ อีกหนึ่งขนาดของความหนาแน่นฟลักซ์อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega = \text{มุมความถี่} = 2\pi f$$

$$f = \text{ความถี่ (Hz)}$$

จากกฎของฟาราเดย์, สมการ (ค-21), แรงดันเหนี่ยวนำในขดลวด  $N$  รอบเป็น

$$e(t) = \omega N \phi_{\max} \cos \omega t = E_{\max} \cos \omega t \quad (\text{ค-41})$$

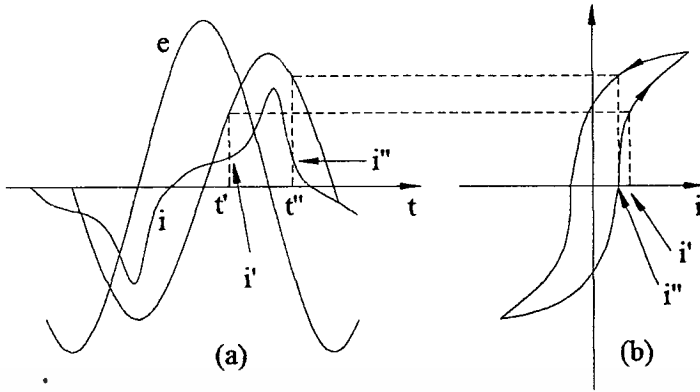
$$\text{เมื่อ } E_{\max} = \omega N \phi_{\max} = 2\pi f N A_c B_{\max} \quad (\text{ค-42})$$

ในสภาวะการทำงานคงที่, เราสนใจว่า rms ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามากกว่าค่าสูงสุด, ค่า rms ของคลื่น sine เป็น  $1/\sqrt{2}$  เท่าของค่าสูงสุด ดังนั้นค่า rms ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็น

$$E_{rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N A_c B_{\max} = \sqrt{2} \pi f N A_c B_{\max} \quad (\text{ค-43})$$

เพื่อที่จะสร้างสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก มีความต้องการกระแสในขดลวด Exciting ที่เรียกว่า Exciting current  $i_\phi$  คุณสมบัติไม่เชิงเส้นของสารแม่เหล็กของแกนเหล็ก หมายความว่า ลักษณะคลื่นของ ต่างจากลักษณะคลื่นของ Exciting current ต่างจากลักษณะคลื่น Sine ของ ฟลักซ์เส้นโค้งของ Exciting current เป็นฟังก์ชันของเวลาสามารถหาได้จากลักษณะแม่เหล็ก ดังแสดงในรูป (ค-7a) เพราะว่า B และ H มีความสัมพันธ์กับ  $\phi$  และ  $i_\phi$  ซึ่งรู้ได้จากค่าคงที่ที่เราคาดคิด, ค่า ac hysteresis loop ของ รูป (ค-7b) ถูกเขียนอยู่ในเทอมของ  $\phi = B_c A_c$  และ  $i_\phi = H J_c / N$  คลื่นรูป Sine ของแรงดันเหนี่ยวนำ  $e$  และฟลักซ์  $\phi$  ตามสมการ (ค-40) และ (ค-41) ซึ่งแสดงไว้ในรูป (ค-10a) ณ เวลาใดๆ ค่าของ  $i_\phi$  จะมีค่าขึ้นกับค่าฟลักซ์ซึ่งสามารถพบได้โดยตรงจาก hysteresis loop ตัวอย่างเช่น, เมื่อเวลาเป็น  $t$  ฟลักซ์เป็น  $\phi'$  และกระแสเป็น  $i_j'$  เมื่อเวลาเป็น  $t''$  จะมีค่าตรงกับ  $\phi''$  และ  $i_\phi''$  สังเกตว่าเพราะ hysteresis loop ถูกทำให้มีหลายค่ามันจำเป็นที่จะต้องมีความระมัดระวังในการเก็บค่าฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้น ( $\phi'$  ในรูป) จากอัตราส่วนฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นของ hysteresis loop; ซึ่งเหมือนกันสำหรับค่าฟลักซ์ที่ลดลง ( $\phi'$  ในรูป) และเป็นที่สังเกตด้วยว่ารูปคลื่นของ Exciting current คือยอดที่แหลมที่สุด ค่า rms  $I_\phi rms$  ถูกนิยามในรูปของ  $\sqrt{i_\phi^2}$  เฉลี่ยในหนึ่งรอบค่า rms ซึ่งตรงกับ  $H_{rms}$  ของ  $H_c$  ถูกทำให้สัมพันธ์กับค่า rms ของ  $I_\phi rms$  กระแสกระตุ้นคั้งนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ค-7 แสดงค่าแรงดัน และ กระแสที่เกิดจาก Hysteresis loop

ลักษณะพิเศษของ ac excitation ของวัสดุที่ใช้ทำแกนปกติจะอยู่ในรูป rms ของ volt-amperes ซึ่งค่อนข้างมากกว่า Magnetization curve ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H โดยทฤษฎีที่แสดงไว้นี้สามารถอธิบายได้โดยการรวมสมการ (ค-43) และ (ค-44) ดังนั้นค่า rms volt-amperes ต้องการที่จะกระตุ้นแกนเป็นความหนาแน่นของฟลักซ์ (Specified flux density) คือ

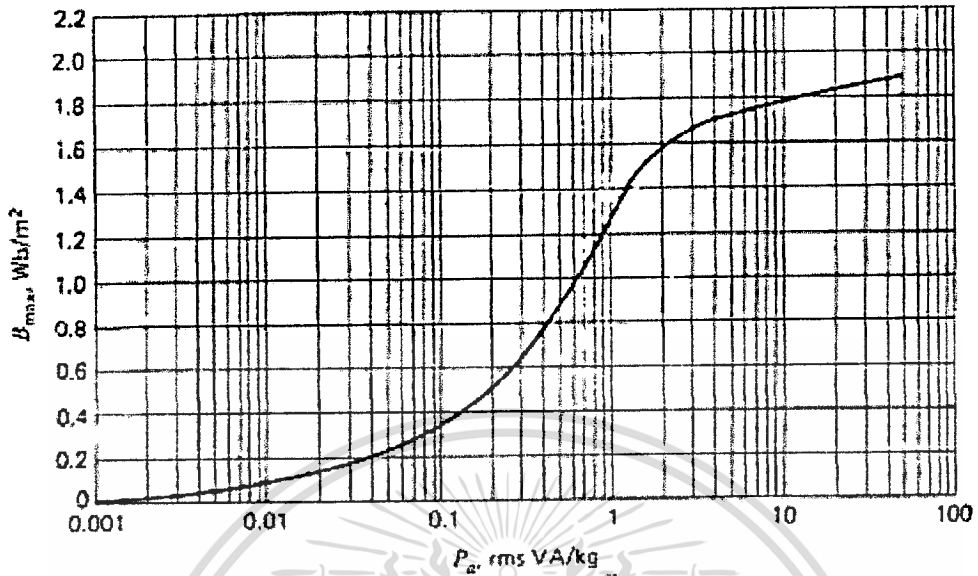
$$E_{rms} I_{rms} = \sqrt{2} \pi f N A_c B_{max} \frac{l_c H_{rms}}{N} \quad (\text{ค-45})$$

$$= \sqrt{2} \pi f N A_c l_c B_{max} H_{rms} \quad (\text{ค-46})$$

สำหรับความหนาแน่นโดยมวลของวัสดุแม่เหล็ก  $\rho_c$  น้ำหนักของแกนคือ  $A_c l_c \rho_c$  และค่า rms volt-ampere  $P_a$  ต่อน้ำหนักคือ

$$P_a = \frac{\sqrt{2}}{\rho_c} \pi f B_{max} H_{rms} \quad (\text{ค-47})$$

ค่า volt-amperes กระตุ้น  $P_a$  (The excitation volt-amperes) ภายใต้อัตราความถี่  $f$  จะขึ้นอยู่กับค่า  $B_{max}$  เท่านั้นเพราะ  $H_{rms}$  เป็นฟังก์ชันค่าคงตัวกับค่า  $B_{max}$  และเป็นอิสระต่อจำนวนรอบและลักษณะทางเรขาคณิต ผลจากการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าของวัสดุทางแม่เหล็กมีก็จะให้มาในรูปของ rms ต่อน้ำหนักกำหนดตามผลการทดลองในห้องปฏิบัติการบนวัสดุตัวอย่างซึ่งเป็นแกนวงปิดการคำนวณซึ่งผลเหล่านี้ถูกแสดงไว้ในรูป (ค-8) สำหรับ M5 grain-oriented electrical steel กรณีที่มีการนำไปใช้



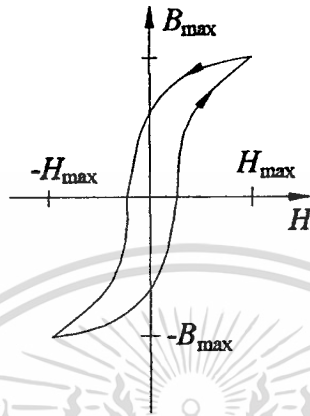
รูป ค-8 แสดงค่า Excitoin curve ของ M5 grain-oriented electrical steel

กระแสกระตุ้นได้จากความต้องการ mmf ที่จะสร้างฟลักซ์บนแกนและกำลังอินพุท (Power input) มีความสัมพันธ์กับพลังงานในสนามแม่เหล็กในแกนส่วนของพลังงานซึ่งกระจายซึ่งสูญหาย และเกิดขึ้นในรูปของความร้อนในแกนลวด การปรากฏคงอยู่ในรูปของ reactive power สัมพันธ์กับวัฏจักรการแปรผันพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็ก Reactive power จะไม่กระจายไปจากแกน และรูปแต่จะวนและดูดซับโดยแหล่งกระตุ้น (Excitation source) และก่อตัวเป็นกระแสในแหล่งจ่าย ก่อให้เกิด losses ในรูปของ  $I^2R$  และเกิด Voltage drop ในระบบของ Supply

Loss ทางกล 2 ตัว ซึ่งมีความสัมพันธ์กับฟลักซ์ตามเวลาในวัสดุทางแม่เหล็ก ตัวแรกคือ ความร้อนจาก  $I^2R$ , ซึ่งสัมพันธ์กับ eddy current จากกฎของ Faraday เราจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กแปรผันตามเวลาจะเพิ่มขึ้นตามสนามไฟฟ้า ในวัสดุทางแม่เหล็กสนามไฟฟ้านี้เป็นผลจาก eddy current ซึ่งวนอยู่ในวัสดุซึ่งทำเป็นแกนและด้านการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นฟลักซ์ เมื่อหักล้างกับ demagnetizing effect นี้ กระแสกระตุ้นในขดลวดจึงต้องเพิ่มขึ้น ดังนั้น dynamic B-H loop ของไฟ ac ค่อนข้าง "อ้วนกว่า" Hysteresis loop สำหรับสภาพการแปรผันอย่างช้าๆ เพื่อการลดลงของผลของ eddy current โครงสร้างทางแม่เหล็กปกติจะถูกสร้างขึ้นจากแผ่นบางๆ ของวัสดุทางแม่เหล็กโดยแผ่นบางนี้จะถูกวางให้ตรงอยู่ในทิศทางของเส้นสนาม (fieldlines) ซึ่งจะถูกลดลงจากแต่ละแผ่น โดยแผ่นออกไซด์บนผิวหรือโดยผิวบางๆ ของผิวเคลือบฉนวนหรือน้ำมัน

วานิช การลดลงสูงสุดของขนาด eddy current เพราะฉนวนแผ่นบางๆ จะขวางส่วนของกระแส เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ โดยแผ่นที่บางกว่าจะทำให้เกิด loss น้อยกว่า Power loss จะเกิด โดย eddy current ซึ่งกระจายไป ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นความร้อนในแกน eddy current loss เพิ่มขึ้นในรูปของกำลังสองของความถี่ของฟลักซ์เปลี่ยนแปลงและในรูปกำลังสองของความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด



รูป ค-9 แสดง Hysteresis loop

Loss ทางกลในส่วนที่สองจะเกิดขึ้นด้วย hysteretic nature ของวัสดุทางแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กดังในรูป (ค-1) หรือในหม้อแปลงดังรูป (ค-4), การกระตุ้นด้วยไฟฟ้าซึ่งแปรตามเวลาจะเป็นเหตุให้วัสดุทางแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นวงรอบ ดังเช่น hysteresis loop ดังแสดงในรูป (ค-9)

จากสมการที่ (ค-37) สามารถใช้ในการคำนวณพลังงานอินพุตแก่แกนแม่เหล็กของรูป (ค-1) เช่นการเปลี่ยนแปลงวัสดุในวงรอบเดียว สำหรับวงรอบเดียว

$$w = \oint i_{\phi} dx = \oint \left( \frac{H_c l_c}{N} \right) (A_c N dB_c) = A_c l_c \oint H_c dB_c \quad (\text{ค-48})$$

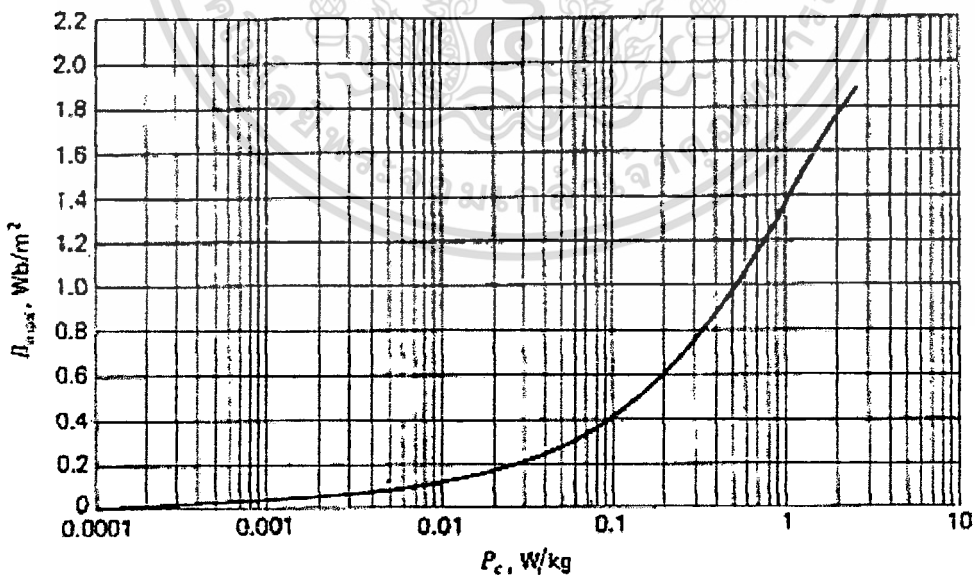
จาก  $A_c l_c$  คือปริมาตรของแกนและอินทิกรัลนั้นคือพื้นที่ของ ac hysteresis loop เราจะเห็นว่าแต่ละเวลาวัสดุทางแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงเป็นวงรอบ, โดยมีพลังงานอินพุตสุทธิภายในวัสดุพลังงานเหล่านี้ต้องการมาเพื่อเคลื่อนขั้วแม่เหล็กเป็นวงรอบวัสดุและกระจายเป็นความร้อนดังนั้นสำหรับการให้ระดับฟลักซ์, hysteresis losses คืออัตราส่วนของพื้นที่ของ hysteresis loop และปริมาตรทั้งหมดของวัสดุ เพราะว่ามีพลังงานสูญเสียต่อวงรอบ hysteresis power loss คืออัตราส่วนของความถี่ของการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าซึ่งใส่เข้ามา (applied excitation)

โดยทั่วไป losses จะขึ้นกับการผสมโลหะเช่นเดียวกับขึ้นกับความหนาแน่นฟลักซ์และความถี่ ข้อความเรื่อง core loss คือ การแสดงในรูปแบบของกราฟ มันเป็นการพลอตจุดในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น โปรดอย่าได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวัสดุต่อหน่วยน้ำหนัก เช่น ฟังก์ชันของความหนาแน่นฟลักซ์; บ่อยครั้งที่กลุ่มของโค้งผลต่างความถี่ซึ่งแสดงในรูปที่ (ค-10) แสดงถึง core loss สำหรับ M5 grain Orient electrical Steel ที่ 60 Hz

หม้อแปลงเกือบทุกตัวและเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีรอยตัดที่แน่นอนใช้เหล็กแผ่นซึ่งมีทิศทางสนับสนุนแรงทางแม่เหล็กซึ่งจะทำให้มี core loss ต่ำ และมี Permeability สูง วัสดุนี้จะอยู่ในรูปของ grain Orient electrical Steel เหตุผลของคุณสมบัติเหล่านี้คือในโครงสร้างอะตอมของผลึกปกติของ siticon ironalogy ซึ่งมี body-centered Cube โดยในแต่ละลูกบาศก์จะมีอะตอมในแต่ละมุมซึ่งจะดีเท่ากับอีกหนึ่งอะตอม ณ จุดศูนย์กลางของลูกบาศก์ในลูกบาศก์แกนที่ง่ายที่สุดของแกนแม่เหล็กคือขอบลูกบาศก์ในแนวทแยงมุมของผิวลูกบาศก์จะเกิดได้ยากและในแนวทแยงมุมของลูกบาศก์จะเกิดขึ้นยากที่สุดเทคนิคการประดิษฐ์ที่เหมาะสมที่สุดคือการวางแนวบริเวณขอบของลูกบาศก์ในการหมุนเปลี่ยนทิศทางเพื่อทำให้มันมีทิศทางในแนวแม่เหล็ก ลักษณะในทิศทางนี้คือทิศทางที่ดีในด้านของ core loss และ Permeability ของ Non-Oriented steels ดังนั้น Oriented steels สามารถปฏิบัติการ ณ ที่ความหนาแน่นฟลักซ์มากกว่า Non-Oriented ได้ Non-Orient electrical Steel จะถูกใช้ในงานประยุกต์ซึ่งฟลักซ์ไม่สามารถไปตามทางเดินได้ซึ่งสามารถถูกกลับทิศโดยการหมุนทิศทางหรือ ใช้ในเวลาซึ่งมีราคาถูกเป็นสำคัญ ในเหล็กชนิดนี้ losses บางอย่างจะมีค่าสูงกว่าและ Permeability จะมีค่าต่ำกว่า grain-Oriented steels มาก



รูป ค-10 แสดงค่า core loss curve ของ M5 grain-oriented electrical steels

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ก.4 Core loss (ความสูญเสียในแกนเหล็ก)

ความสูญเสียในแกนเหล็กเป็นกำลังงานที่ถูกกระจายในเหล็ก การสูญเสียนั้นมีอยู่ 2 ชนิดในแกนเหล็กคือ ฮิสเทอริซิส (Hysteresis) และกระแสเอ็ดดี้ (Eddy current)

ความสูญเสียจากฮิสเทอริซิส (Hysteresis) เป็นพลังงานที่ใช้ทำให้สนามแม่เหล็กหมุนวนเป็นแฉวงตามแกนเหล็ก พลังงานนี้จะถูกส่งไปยังขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก ferromagnetic ตามเส้นทาง ซึ่งเวลาถูกใช้ในหนึ่งลูป (loop) ของฮิสเทอริซิสจะเป็น

$$J = \int_0^T ei(dt) \quad (\text{ก-49})$$

ในสมการข้างต้น  $e$  อยู่ในหน่วยโวลต์,  $i$  อยู่ในหน่วยแอมแปร์,  $J$  อยู่ในหน่วยวินาที และ  $J$  อยู่ในหน่วยจูล เพื่อที่จะอธิบายค่า  $J$  ในรูปปริมาณแม่เหล็ก จะใช้สมการ 2 สมการในการอ้างอิงคือ

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \quad (\text{ก-50})$$

$$H = \frac{0.4\pi Ni}{l_i} \quad (\text{ก-51})$$

ฟลักซ์ในวงจรมแม่เหล็กประมาณค่าอยู่ในรูปของฟลักซ์ที่ข้ามพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจะ

$$\phi = BA \quad (\text{ก-52})$$

จัดรูปสมการ (ก-51) จะได้เป็น

$$i = \frac{Hl_i}{0.4\pi N} \quad (\text{ก-53})$$

แทนสมการ (ก-50), (ก-51) และ (ก-54) ในสมการ (ก-49)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้มีการนำเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้ (ก-54) ไปใช้

$$J = \int_0^T NA \frac{dB}{dt} \times 10^{-8} \times \frac{Hl_i}{0.4\pi N} dt \quad (\text{ก-54})$$

$$= \frac{Al_i \times 10^{-8}}{0.4\pi} \int_0^B H(dB)$$

ส่วนของอินทิกรัลในสมการ (ค-54) อาจจะแบ่งออกได้ดังนี้ โดยอาศัยรูปที่ ค-10 ช่วย

$$\int_0^B H(dB) = \int_0^{B_1} H(dB) - \int_{B_1}^{B_2} H(dB) + \int_{B_2}^0 H(dB) + \int_0^{B_3} H(dB) - \int_{B_3}^{B_4} H(dB) + \int_{B_4}^0 H(dB) \quad (\text{ค-55})$$

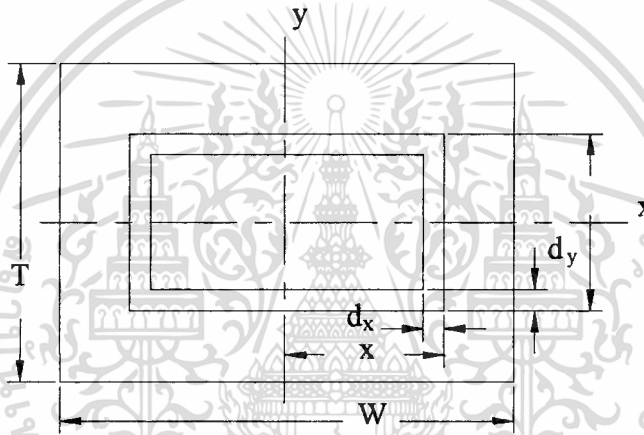
ในสมการ (ค-55) เทอมที่เป็นบวกจะแสดงถึงพลังงานที่จ่ายให้แก่ขดลวด และเทอมที่เป็นลบจะแสดงถึงพลังงานที่ได้กลับมาจากวงจร พลังงานสุทธิที่ถูกดูดซับโดยแกนเหล็กจะเป็นสัดส่วนกันกับพื้นที่ปิดโดย รูป ผลคูณของ  $Al_i$  ในสมการ (ค-54) คือปริมาตรของแกนเหล็ก (V) ถ้ากระบวนการสร้างแม่เหล็กในแกนเหล็กถูกป้อนด้วยไฟความถี่ ( $f$ ) ดังนั้นสมการ (ค-54) อาจจะเขียนในรูปกำลังสูญเสีย (Power loss)

$$P = \frac{fV \times 10^{-8}}{0.4\pi} \int H dB \quad (\text{ค-56})$$

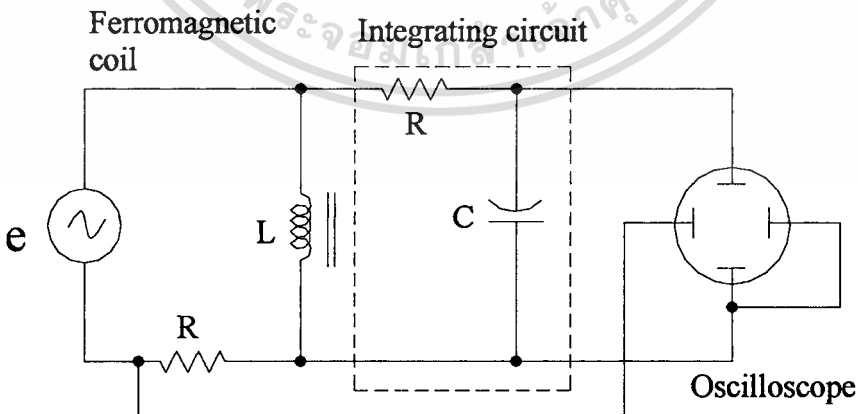
ในสมการ (ค-56)  $P$  มีหน่วยเป็นวัตต์ ,  $f$  มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ ,  $V$  มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร ,  $H$  มีหน่วยเป็นเออร์สเตด (Oersteds) และ  $B$  มีหน่วยเป็นเกาส์ (gauss)

พลังงานสูญเสียอันเนื่องมาจากความต้านทาน ในแกนเหล็กและการพันของขดลวดจะไม่ได้พิจารณาในสมการ (ค-56) สมมติฐานก็คือว่าจะไม่มีโวลต์เดจตกคร่อมความต้านทานในขดลวดที่พันและกระแสทั้งหมดจะผลิตฟลักซ์แม่เหล็ก ความผิดพลาดจากการไม่คิดความต้านทานของขดลวดที่นำมาพันจะสามารถตัดทิ้งไปได้ สมมติฐานที่ว่ากระแสทั้งหมดใช้ในการผลิตฟลักซ์ทำให้ตัดกระแส eddy ทิ้งได้ เราสามารถที่จะดู hysteresis รูปที่เคลื่อนไหวได้บน Oscilloscope โวลต์เดจที่ป้อนให้แก่ขดลวดจะเท่ากับที่ป้อนให้แก่วงจร Intergrate ซึ่งโวลต์เดจจะเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของฟลักซ์เป็นไปตามกฎฟาราเดย์ โวลต์เดจที่ป้อนให้นี้จะอยู่ในแนวตั้งของ Oscilloscope ส่วนกระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะให้ เป็นกระแสที่ผ่านความต้านทานค่าน้อย ๆ ที่อนุกรมอยู่กับขดลวด ซึ่งโวลต์เดจที่คร่อมความต้านทานน้อย ๆ นี้จะอยู่ในแนวนอนของ Oscilloscope ในรูป ซึ่งโวลต์เดจที่อยู่ในแนวนอนนี้จะเป็นสัดส่วนกับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf.) ซึ่งวงจรแสดงอยู่ในรูปที่ ค-11 และเพื่อป้องกันความผิดพลาดอันเนื่องมาจากกระแส eddy ความถี่จะต้องใช้ที่ค่าต่ำๆ ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูญเสียเนื่องมาจากกระแส eddy เป็นเหตุให้เกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็กกระแสทำให้เกิดโวลต์เตจโดยการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ในแกนในลักษณะเดียวกันกับโวลต์เตจที่ถูกเหนี่ยวนำในขด secondary ในหม้อแปลง เพื่อที่จะคำนวณค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแส eddy พิจารณารูปที่ ค-12  $W$  เป็นค่าความกว้าง และ  $T$  เป็นค่าความหนาของพื้นที่หน้าตัดของแกน เหล็กให้ฟลักซ์ 1 หน่วยพุ่งเข้าสู่กระดาษโดยมีพื้นที่ตั้งฉากเท่ากับ  $W \times T$  พิจารณาเส้นทางเบี่ยงตันที่ทำให้เกิดกระแส eddy เป็น  $2x$ ,  $2y$  ซึ่งเส้นทางนี้จะมีจำนวนรอบที่สั้น ( $N = 1$ ) ซึ่งฟลักซ์จะผ่านพื้นที่  $4xy$  โดยกฎฟาราเดย์โวลต์เตจที่เกิดขึ้นในเส้นทางนี้คือ



รูป ค-11 แสดงถึงพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแส eddy



รูป ค-12 วงจรสำหรับแสดง hysteresis loop บน Oscilloscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตาม การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้นิพนธ์ถือเป็นการนำไปใช้

รูป ค-11 แสดงถึงพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแส eddy

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} & (\text{ค-57}) \\
 &= 4xy \frac{dB}{dt} \times 10^{-8}
 \end{aligned}$$

อิมพีแดนซ์ของวงจรจะแทนโดยค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวในเส้นทาง  $2x$ ,  $2y$  และพลังงานที่ปล่อยออกในเส้นทางนี้คือ

$$p = \frac{e^2}{R} \quad (\text{ค-58})$$

ซึ่ง  $p$  และ  $e$  เป็นกำลังงานที่ปล่อยออกและ โวลต์เตจที่ถูกเหนี่ยวนำชั่วขณะตามลำดับความต้านทานของเส้นทางนี้คือ

$$R = \rho \left( \frac{4y}{dx} + \frac{4x}{dy} \right) \quad (\text{ค-59})$$

ซึ่ง  $\rho$  เป็นความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยความยาว ถ้าสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัด เราทราบว่าความสัมพันธ์ข้างต้น อาจจะลดจำนวนตัวแปร ได้โดยให้

$$y = kx$$

ดังนั้นพื้นที่  $4xy$  จะกลายเป็น  $4kx^2$  และสมการ (ค-59) จะได้เป็น

$$R = \rho \left( \frac{4kx}{dx} + \frac{4x}{kdx} \right) \quad (\text{ค-60})$$

สมการ (ค-57) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$e = 4kx^2 \frac{dB}{dt} \times 10^{-8} \quad (\text{ค-61})$$

แทนสมการ (ค-60) และ (ค-61) ในสมการ (ค-58) จะได้ความแตกต่างของกำลังงานชั่วขณะดังนี้ เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dp = \frac{\left(4kx^2 \frac{dB}{dt} \times 10^{-8}\right)}{\rho \left(\frac{4kx}{dx} + \frac{4x}{kdx}\right)} = \frac{4k^2 \times 10^{-16} \left(\frac{dB}{dt}\right) x^3 dx}{\rho \left(k + \frac{1}{k}\right)} \quad (\text{ค-62})$$

สมการ (ค-62) อาจอินทิเกรตเหนือพื้นที่  $W \times T = KW^2$

$$p = \frac{4k^2 \times 10^{-16} \left(\frac{dB}{dt}\right)}{\rho \left(k + \frac{1}{k}\right)} \int_0^{W/2} x^3 dx = \frac{k^2 \times 10^{-16} \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 W^4}{16\rho \left(k + \frac{1}{k}\right)} \quad (\text{ค-63})$$

ปริมาตรของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวเท่ากับ  $KW^2$  กำลังงานชั่วขณะที่จ่ายออกมาโดยกระแส eddy ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร คือ

$$p = \frac{k^2 W^2 \times 10^{-16} \left(\frac{dB}{dt}\right)^2}{16\rho(k^2 - 1)} \quad (\text{ค-64})$$

กำลังงานเฉลี่ยที่จ่ายออกต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรจะเป็น

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (\text{ค-65})$$

กรณีของอินพุตโวลต์เตจที่น่าสนใจทั้ง 3 คือ sine wave ,square wave และ pulse wave สำหรับอินพุตแต่ละแบบนี้ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นฟลักซ์ ( $B$ ) จะต้องถูกกำหนดโดยสมการ (ค-64) ส่วนสำหรับ sine wave อาจกำหนดจากกฎของฟาราเดย์ในรูปการอินทิเกรตดังนี้

$$B = \frac{E}{A} \times 10^8 \int \sin \omega t dt$$

จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $B = -B_{\max} \cos \omega t$   
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\frac{dB}{dt} = \omega B_{\max} \sin \omega t$$

และ

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)^2 = \omega^2 B_{\max}^2 \sin^2 \omega t \quad (\text{ค-66})$$

แทนค่าสมการ (ค-66) ในสมการ (ค-64) จะได้

$$p = \frac{k^2 W^2 \omega^2 B_{\max}^2 \sin^2 \omega t}{16\rho(k+1)} \times 10^{-16} \quad (\text{ค-67})$$

สมการ (ค-67) เป็นกำลังงานชั่วขณะ ซึ่งกำลังงานเฉลี่ยจะหาได้โดยการอินทิเกรตระหว่าง 0 ถึง  $1/2f$

$$\begin{aligned} P_{av} &= \frac{2fk^2W^2\omega^2B_{\max}^2 \times 10^{-16}}{16\rho(k^2+1)} \int_0^{1/(2f)} \sin^2 \omega t dt \quad (\text{ค-68}) \\ &= \frac{\pi^2 k^2 W^2 \omega^2 B_{\max}^2 f^2}{8\rho(k^2+1)} \times 10^{-16} \end{aligned}$$

ในกรณีที่โวลต์เดจเป็น square wave โดยกฎฟาราเดย์อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะคงที่ เมื่อควลต์เดจมีค่าคงที่ ความหนาแน่นฟลักซ์จะได้ triangle wave ซึ่งความหนาแน่นฟลักซ์จะเปลี่ยนจากลบมากที่สุดถึงบวกมากที่สุดระหว่างครึ่งคาบ

$$\frac{dB}{dt} = \frac{2B_{\max}}{1/2T} = 4B_{\max}f \quad (\text{ค-69})$$

ซึ่ง  $f$  เป็นความถี่ของ square wave เนื่องจากโวลต์เดจมีค่าที่ทั้งซีกบวกและลบ ดังนั้นกำลังงานชั่วขณะจะเท่ากับกำลังงานเฉลี่ย กำลังงานเฉลี่ยที่จ่ายออกมาต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร อันเนื่องมาจากกระแส eddy จาก square wave นี้จะหาได้โดยแทนสมการ (ค-69) ในสมการ(ค-64)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้วงไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{av} = \frac{k^2 W^2 B_{max}^2 f^2}{\rho(k^2 + 1)} \times 10^{-16} \quad (ค-70)$$

สำหรับโวลต์ที่เป็น pulse wave กำลังงานสูงสุดที่จ่ายออกมาต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเนื่องจากกระแส eddy จะได้

$$P = \frac{k^2 W^2 B_{max}^2}{16\rho(k^2 + 1)\tau^2} \times 10^{-16} \quad (ค-71)$$

เพื่อที่จะหาค่ากำลังงานเฉลี่ย  $p$  จะต้องคูณด้วย duty cycle ซึ่งได้จากผลคูณของความกว้างของ pulse กับความถี่ ( $f$ )

$$P_{av} = \frac{k^2 W^2 B_{max}^2}{16\rho(k^2 + 1)\tau^2} f\tau \times 10^{-16} \quad (ค-72)$$

ในสมการที่ (ค-68), (ค-70) และ (ค-71)  $P_{av}$  อยู่ในหน่วย วัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  $W$  อยู่ในหน่วยเซนติเมตร,  $k$  อยู่ในรูปที่ไม่มีขนาด,  $B$  อยู่ในหน่วยเกาส์,  $f$  อยู่ในหน่วยเฮิรตซ์ และ  $\rho$  อยู่ในหน่วยโอห์มต่อตารางเซนติเมตรต่อเซนติเมตร ในสมการ (ค-72)  $\tau$  คือความกว้างของ pulse ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาทีและ  $f$  แทนความถี่ของ สมการเหล่านี้จะไม่คิดถึง

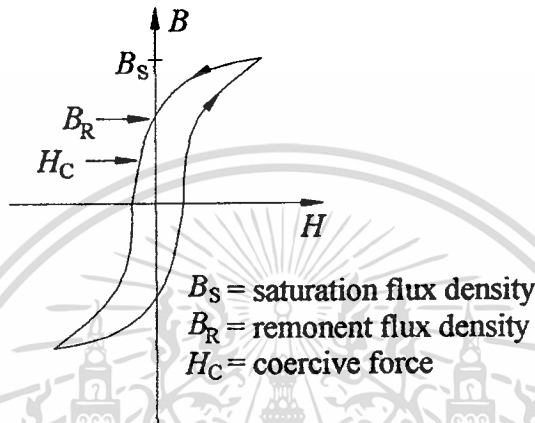
เทอมของ  $k^2/(1+k)$  ปรากฏอยู่ทุกๆ สมการสำหรับการคำนวณหาความสูญเสียจากกระแส eddy เพื่อที่จะลดค่าความสูญเสียนี้ แกนเหล็กอาจจะทำจากเหล็กบาง ๆ หรือ laminante มาวางซ้อนๆ กันให้ได้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กตามที่ต้องการ บางครั้งอาจจะเลือกแกนเหล็กพิเศษที่มีค่าความต้านทานสูงๆ เพื่อลดค่า core loss

### ค.5 วัสดุสารแม่เหล็กสำหรับหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำ

คุณสมบัติของวัสดุสารแม่เหล็กขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่นำมาทำวัสดุแม่เหล็กนั้น เหล็ก, นิกเกิล และโคบอลต์ เป็นสาร Ferromagnetic ที่น่าสนใจทางด้านการค้าเหล็ก ซึ่งส่วนใหญ่มีอยู่มาก จะถูกนำมาผสมกับสารอื่นเพื่อผลิตสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติสูงขึ้น สารผสมนิกเกิลจะใช้กับอุปกรณ์คุณสมบัติสูงซึ่งต้องการคุณสมบัติพิเศษของสารผสมนั้นมาใช้โดยราคาสูงขึ้นตามมาด้วยสำหรับสารผสมโคบอลต์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว แต่ว่าโคบอลต์นี้หายากและราคาแพงจึงไม่ค่อยนำมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับเอกสารที่นำมาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค-13 แสดงลักษณะของ Hysteresis curve วัสดุที่ใช้เป็นแม่เหล็กถาวรควรมี Remanent ฟลักซ์สูงและมีแรง coereive สูง วัสดุซึ่งมีคุณสมบัติที่กล่าวมานี้เรียกว่า “hard” สำหรับอุปกรณ์ซึ่งให้สนามแม่เหล็กกระแสสลับกับวัสดุที่มีแรง coereive ต่ำ วัสดุนี้เรียกว่า “soft” อุปกรณ์ที่ป้อนสนามแม่เหล็กกระแสสลับต้องการภาวะที่มีค่า Permeability สูงและมีค่า core loss ต่ำ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กที่ต้องการ Remanance ฟลักซ์สูง



รูป ค-13 แสดงลักษณะของ Hysteresis loop curve

แม่เหล็กผสมจะถูกแบ่งเป็นชิ้น sheet บางๆ ความหนาของชิ้นและขบวนการกลึง ซึ่งใช้ในการกำหนดรูปแบบของ sheet ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติแม่เหล็กแกนของ sheet ถูกมันวอดอกและตัด ขบวนการเหล่านี้ทำให้คุณสมบัติของสารผสมเสียไป การรักษาความร้อนหลังจากการประดิษฐ์สารผสมต่างๆ จะช่วยให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กดีขึ้น แผ่นเหล็กซิลิกอนถูกใช้กันมากที่สุดในวัสดุแม่เหล็กแบบ soft ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกอนระหว่าง 0.5-3.25% เมื่อใช้สารผสมในเหล็กซิลิกอนจะมีผลต่อโครงสร้างรูปร่างทำให้ค่า Anisotropy สูงขึ้นในกระบวนการกลึงและผสมสารและการรักษาความร้อนจะเพิ่มค่า permeability และลดค่า core loss ในทิศทางการกลึงเหล็กผสมซิลิกอนจะมีเกรด , ความหนา , การรักษาพื้นผิวที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับการกลึง และ การอบที่แตกต่างกัน เหล็กผสมซิลิกอนมีหลายชนิดซึ่งกำหนดโดยอักษรที่นำหน้าคือ “M-” เป็นมาตรฐานที่ความถี่และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมาตรฐาน ขบวนการกลึงและการผสมจะกำหนดเกรดของเหล็กผสมซิลิกอน สำหรับลักษณะต่างๆ ที่ผู้ออกแบบต้องการ ข้อมูลที่แสดงส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป curve ที่แสดงคุณสมบัติในรูปฟังก์ชันของตัวแปรของความถี่ , ความหนาแน่นฟลักซ์ , อุณหภูมิเหล็กผสมซิลิกอน ใช้กันมากสำหรับ power frequency

เหล็กผสมนิเกิลมีค่า permeability สูงกว่าซิลิกอน แต่จะอึดตัวที่ความหนาแน่นฟลักซ์ต่ำ ที่ 50% ของนิเกิลที่มาผสมจะทำให้อึดตัวประมาณ 13 กิโลเกาส์ (kG) และที่ 80% ของนิเกิลจะอึดตัวที่ประมาณ 8 kG ซึ่งที่ส่วนผสมนี้จะมีค่า permeability สูงสุดของวัสดุที่นำมาใช้ทางการค้า

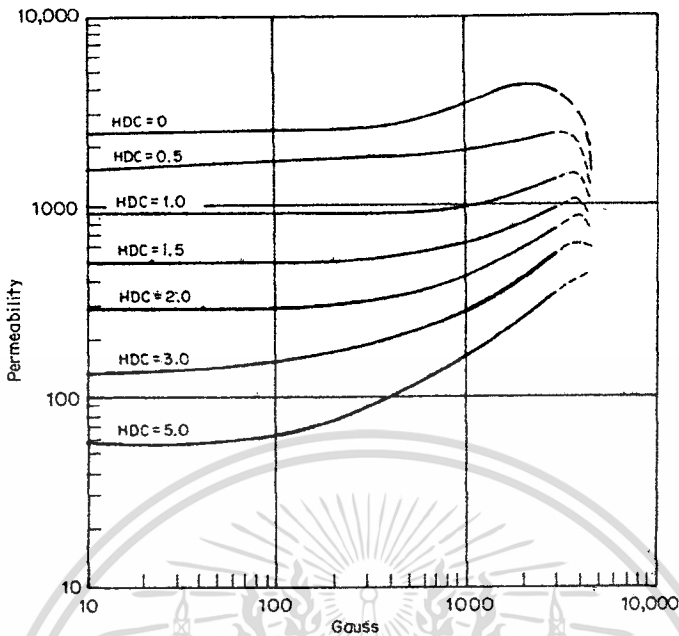
การรักษาความร้อนเป็นพิเศษและใช้แกนเหล็กที่เป็นรูปทรงทางเรขาคณิตโดยทั่วไปจะเป็นคุณสมบัติของเหล็กผสมนิเกิลนี้ Hyteresis ที่เป็นรูป Square ซึ่งจะใช้แกนเป็นแบบ toroidal ของเหล็กผสมนิเกิล ซึ่งจะใช้ในอุปกรณ์ saterating และ switching ด้วยคุณสมบัติของค่า permeability ทำให้ใช้กับอุปกรณ์ที่มี wide band และทำงานกับวงจรที่มี Impedance สูงได้ เหล็กผสมนี้จะเอาเข้าไปใช้กับวงจรที่ต้องการคุณสมบัติสูงในความถี่สัญญาณเสียงและภาพ

เหล็กผสมโคบอลท์จะอึดตัวที่ความหนาแน่นฟลักซ์ที่สูงกว่าเหล็กผสมอื่นที่เป็นแบบ soft ส่วนใหญ่จะใช้เป็นแบบ toroidal หรือ แบบตัด(cut) เหล็กผสมนี้ราคาจึงสูงและหาได้ยาก

Magnetic Matalic Glasses เป็นโลหะผสมของเหล็ก, โบรอน, และ ซิลิกอน ซึ่งมีค่า Resistivity สูงกว่าโลหะผสมแบบ Crystalline magnetic และมีค่า core loss ต่ำกว่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่อึดตัวจะสูง แถบ metallic glasses เพียง 1 mil สามารถนำไปประยุกต์ใช้ที่ความถี่สูง ๆ ซึ่งจะมีค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงกว่า ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีกว่า Ferrite magnetic glasses นี้จะอยู่ในรูปแบบ toroidal และแบบตัด (Cut)

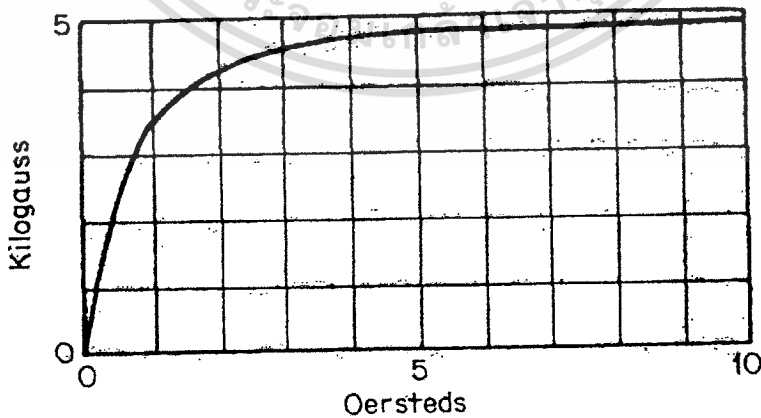
โลหะผสมแบบ Powdered magnetic จะใช้ในวงจรที่ความถี่สูงซึ่งมีค่าของ Q สูง ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบ Toroidal และ Slug ความหนาแน่นฟลักซ์ที่อึดตัวใกล้เคียงกับโลหะผสมนิเกิล 80 % ค่า Permeability ต่ำกว่าโลหะผสมแบบ Solid Metallic หรือ Ferrite ช่องว่างอากาศที่มาก จะช่วยให้ทนต่อ DC Manetiration ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้ภายในย่าน 200 kHz

Ferrite เป็นสารแม่เหล็กชนิดหนึ่งที่สำคัญในการใช้ที่ความถี่ย่านสัญญาณเสียงที่สูงจนถึงย่าน MHz Ferrite นี้ประกอบไปด้วยออกไซด์ของ Feric และอาจประกอบด้วยออกไซด์ของแมงกานีส สังกะสี และนิเกิล เฟอร์ไรท์ที่ผสมด้วยแมงกานีส - สังกะสี จะมีค่า permeability สูงกว่าที่ความถี่ต่ำและอึดตัวที่ความหนาแน่นฟลักซ์ที่สูงกว่า Ferrite แบบนิเกิลแต่ว่า Ferrite แบบนิเกิลจะใช้งานที่ค่า  $\mu$  ของมันได้ที่ความถี่กว้างกว่า และมี Loss ต่ำที่ความถี่สูง ส่วนที่สำคัญของ Ferrite คือค่า Resistivity ที่สูง ซึ่งอยู่ในย่านของพวกสารกึ่งตัวนำและใช้ได้ที่ความถี่สูงกว่าพวกโลหะผสม Ferrite จะไม่มีมาตรฐานขึ้นอยู่กับแต่ละผู้ผลิต ข้อมูลคุณสมบัติจะมีน้อยมากที่จะนำมาใช้งาน Ferrite เป็นพวกเซรามิกชนิดหนึ่งซึ่งมีรูปแบบจากแม่พิมพ์และขบวนการหลอม ซึ่งผลที่ได้คือจะมีความแข็งแต่จะมีความเปราะ แตกง่าย ความจำเป็นของช่องว่างสำหรับแต่ละรูปร่างเฉพาะ ซึ่งจะไปจำกัดความหลากหลายของชนิด Ferrite จากวัสดุที่ใช้และขบวนการสร้างรูปแบบของแกนทำให้ขนาดของแกนสูงสุดถูกจำกัด ข้อจำกัดของ Ferrite ที่สำคัญก็คือ low curie temperature ในอุปกรณ์ทางแม่เหล็กโดยทั่วไป อุณหภูมิจะถูกพิจารณาเป็นอันดับแรกเพราะว่าการทำงานจะจำกัดควมของขดลวด เมื่อนำแกนเฟอร์ไรท์มาใช้ อุณหภูมิจะถูกจำกัดอยู่ที่ค่า curie temperature ค่าหนึ่ง ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ค-14 แสดงการเพิ่มขึ้นของ Permeability สำหรับ Ferrite แบบแมงกานีส-สังกะสี

ผู้ผลิต Ferrite จะไม่พิมพ์ข้อมูลการเพิ่มขึ้นของ Permeability ให้ การแสดงผลอันเนื่องจาก DC Magnetization รูปที่ ค-14 แสดงการเพิ่มขึ้นของ Permeability สำหรับ Ferrite แบบแมงกานีส - สังกะสี ซึ่งได้มาจากข้อมูลของผู้เขียนในรูปที่ ค-15 เราอาจจะสงสัยว่า Ferrite มีส่วนประกอบของเซรามิกซึ่งมีสารแม่เหล็กและสารที่ไม่ใช่แม่เหล็ก แต่รูป Curve ของ Ferrite จะคล้ายโลหะผสมแบบ Soft Magnetic ทั่วๆ ไปแม้ว่า Ferrite สามารถนำไปใช้ในย่านคลื่นเสียงและคลื่นภาพที่มีความถี่สูง



รูป ค-15 แสดงข้อมูลการเพิ่มของ Permeability

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับความลับเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไปลงแต่ให้เข้าไปในประโยชน์ด้วยการค้า  
 วิจารณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกถ้ายังมีให้ตัดแปลงนี้จนและอย่างไรถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 วัสดุรายละเอียดอื่น ๆ ที่ใช้ในการออกแบบจะ ได้จากผู้ผลิต

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติของวัสดุพวก Soft magnetic

Material	Properties							Application Notes
	Approximate Composition %	$B_V$ kG	$B_R$ kG	$H_C$ Oe	Core Loss W/lb	Permeability		
						Initial	Maximum	
<i>Silicon Steels</i>								
0.014 in thick AISI M-6	Fe 97 Si 3	19	14	0.1	0.66 at 15 kG 60 Hz	350	50,000	Widely used for laminations and I bars at power and audio frequencies. Most effective when flux path is in direction of rolling
0.0185 in thick AISI M-19	Fe 97 Si 3	19	-	0.5	0.8 at 10 kG 60 Hz	300	10,000	Used for laminations when higher core loss is ceptable. Less costly.
0.025 in thick AISI M-22	Fe 97 Si 3	19	-	0.6	0.9 at 10 kG 60 Hz	300	10,000	Higher losses and less costly than M-19
0.004 in thick Grain-oriented	Fe 97 Si 3	19	14	0.4	10.0 at 15 kG 400 Hz	350	50,000	Widely used in wound cores cut and uncut at 400 Hz and higher frequencies.

ตารางที่ ค-1(ต่อ) คุณสมบัติของวัสดุพวก Soft magnetic

Material	Properties							Application Notes
	Approximate Composition %	$B_v$ kG	$B_R$ kG	$H_C$ Oe	Core Loss W/lb	Permeability		
						Initial	Maximum	
0.002 in thick Grain-oriented	Fe 97 Si 3	19	14	0.5	14.0 at 10 kG 1.0 kHz	350	50,000	Used in wound cores cut and uncut for high-frequency and pulse use.
<i>Nickel-Iron Alloys</i>								
0.014 in thick 50 % Ni	Fe 50 Ni 50	13	11	0.15	3.0 at 10 kG 400 Hz	5,000	40,000	Used in laminations to provide high permeability at high flux densities at audio frequencies.
0.006 in thick 50 % Ni	Fe 50 Ni 50	13	11	0.15	2.0 at 10 kG 400 Hz	5,000	100,000	Application similar to 0.014-in-thick material but lower losses at high frequencies. Labor cost of stacking laminations very high.
0.004 in thick 80 % Ni	Fe 20 Ni 80	7.5	6	0.05	8.0 at 6 kG 5 kHz	30,000	60,000	Used in wound cores cut and uncut to provide high permeability and low losses at high frequencies.

ตารางที่ ค-1(ต่อ) คุณสมบัติของวัสดุพวก Soft magnetic

Material	Properties							Application Notes
	Approximate Composition %	$B_v$ kG	$B_R$ kG	$H_C$ Oe	Core Loss W/lb	Permeability		
						Initial	Maximum	
0.004 in thick Square loop Ni-Fe	Fe 50 Ni 50	15	14.5	0.11	1.3 at 10 kG 400 kHz	-	-	used in saturating and switching devices. Square hysteresis loop realizable only in toroidal cores.
<i>Supermendur*</i>								
0.004 in thick	Fe 51 Ni 49	22	21	0.2	14.0 at 20 kG 400 Hz	800	27,000	Used in wound cores providing highest saturation flux density. Very costly.
<i>Metallic Glass</i>								
0.001 in thick 0.001 in thick	Fe 81 B 13 Si 3.5	16	11	0.06	10.0 at 6 kG 10 kHz	2,500	100,000	Has low losses at high frequencies and high flux densities. Available in cut cores and toroids. Very costly. Under development.

ตารางที่ ค-1(ต่อ) คุณสมบัติของวัสดุพวก Soft magnetic

Material	Properties							Application Notes
	Approximate Composition %	$B_v$ KG	$B_R$ kG	$H_C$ Oe	Core Loss W/lb	Permeability		
						Initial	Maximum	
<i>Powdered Alloys</i>								
	Variable Fe Ni Mo	8	-	-	10.0 at 6 kG 10 kHz	200	210	Used in high-frequency high-Q applications. Available in cut toroids and slugs.
<i>Ferrites</i>								
Mn-Zn	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MnO	4.5	1	0.2	0.05	2,700	4,800	Used in high-frequency and relatively high flux density Applications. Available in pot cores and proprietary shapes. Available in pot cores for use at frequencies into megahertz range.
Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ZnO	3.2	2.6	4	W/cm <sup>3</sup>	120	150	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> NiO				-			

## ภาคผนวก ง

### ส่วนประกอบของตัวเหนี่ยวนำ

#### ง.1 ชนิดของแกน ( Type of core)

คุณสมบัติของ Magnetic core ที่ดี ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติวัสดุคืบที่ใช้และรูปร่างของแกนซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไข คือ รูปร่างและวัสดุคืบที่ใช้ทำแกนสามารถนำ magnetic flux ได้ดี การเลือกชนิดของแกนที่จะนำมาใช้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของค่าใช้จ่าย, การพันขดลวด, วิธีทำแกน, grain orientation, ความหนาของ lamination, ขนาดและน้ำหนัก รวมทั้งช่องอากาศที่ใช้ด้วย

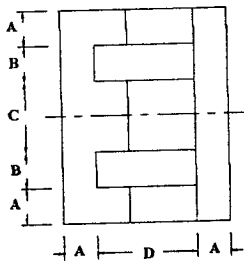
##### ง.1.1 Lamination

แกนเหล็กแบบ lamination จะช่วยลด eddy current loss พื้นผิวของแผ่น lamination จะเคลือบด้วยฉนวนไว้ การทำแกนเหล็ก lamination จะทำโดยแผ่นเหล็กมาเรียงเป็นรูป 3 มิติตามที่ต้องการ สำหรับเทคโนโลยีในการผลิตแผ่น lamination ถูกพัฒนา โดยจะใช้ Magnetic Alloy (ที่เป็นแผ่น) ผ่านเข้าเครื่องเจาะและเครื่องกดด้วยความเร็วสูง โดยการกดเพื่อให้ได้รูปร่างของแผ่นเหล็กที่ต้องการ ซึ่งเป็นกระบวนการโดยอัตโนมัติ โดยจะมีรูปร่างหรือขนาดที่แตกต่างกัน โดยจะขึ้นอยู่กับมาตรฐานทางอุตสาหกรรม

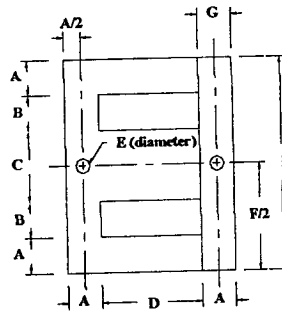
โดยทั่วไปแผ่น lamination จะใช้ทำหม้อแปลงขนาดเล็ก ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ ง.1 แผ่น lamination ที่มีรูปร่างหรือชิ้นส่วนแบบ EI ซึ่งการผลิตชิ้นส่วน EI แสดงในรูปที่ ง-1

รูปที่ ง-2 เป็นการเรียงแผ่น lamination เป็นแกนเพื่อลด ปฏิกิริยาการรั่ว จากช่องอากาศโดยขดลวดจะถูกพันที่ขากลางของแกนโดย flux ทั้งหมดจะผ่านแกนกลางแล้วจึงแบ่งครึ่งไปที่ขาแกนข้าง ๆ

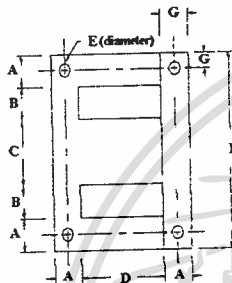
การทำแกนจาก lamination จะพบว่าในการใช้งานแต่ละชนิดจะใช้แผ่น lamination ที่มีความหนาของแผ่นแตกต่างกัน เช่น แผ่น lamination ที่มีความหนาดั้งแต่ 0.5 จนถึง 5 mm จะใช้ในอุปกรณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในงานทางด้านไฟฟ้ากำลัง ส่วนในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์จะใช้แผ่น lamination ที่มีความหนาประมาณ 0.01 จนถึง 0.5 mm



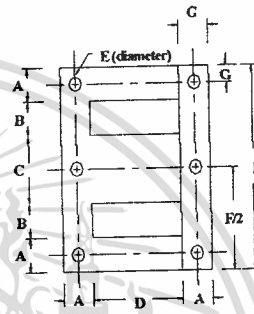
Style 1



Style 2



Style 3



Style 4

ตารางที่ ง-1 แสดง Dimensions ของแผ่น Lamination ทั้ง 4 Style

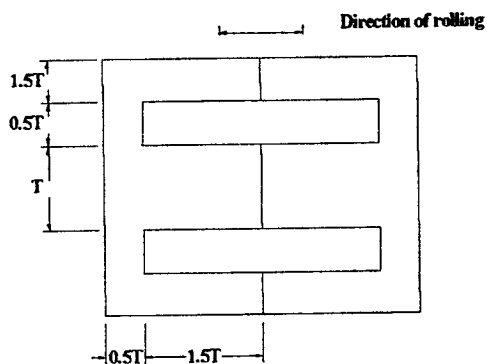
Lamination	Style	Units	Dimensions						
			A	B	C	D	E	F	G
EE 2425	1	in mm	1/8 3.2	1/4 6.4	1/4 6.4	1/2 12.7	-	-	-
EE 2627	1	in mm	3/16 4.8	1/4 6.4	3/8 9.5	11/16 17.5	-	-	-
EI- 3/8	2	in mm	3/16 4.8	5/16 7.9	3/8 9.5	3/4 19.1	3/32 2.4	1 3/8 34.9	-
EI- 1/2	2	in mm	1/4 6.4	5/16 7.9	1/2 12.7	13/16 20.6	1/8 3.2	1 5/8 41.3	-
EI- 5/8	2	in mm	5/16 7.9	5/16 7.9	5/8 15.8	11/16 23.8	5/32 4.0	1 7/8 47.6	-
EI- 3/4	2	in mm	3/8 9.5	3/8 9.5	3/4 19.1	1 1/8 28.6	0.132 3.4	2 1/4 57.2	-
EI- 7/8	3	in mm	7/16 11.1	7/16 11.1	7/8 22.2	1 5/16 33.3	5/32 4.0	2 5/8 66.7	7/32 5.6
EI-1	3	in mm	1/2 12.7	1/2 12.7	1 25.4	1 1/2 38.1	7/32 5.6	3 76.2	1/4 6.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1(ต่อ) แสดง Dimensions ของแผ่น Lamination ทั้ง 4 Style

Lamination	Style	Units	Dimensions						
			A	B	C	D	E	F	G
EI-1 $\frac{1}{8}$	3	in	9/16	9/16	1 $\frac{1}{8}$	1 $\frac{11}{16}$	7/32	3 $\frac{3}{8}$	$\frac{9}{32}$
			14.3	14.3	28.6	42.9	5.6	95.3	7.1
EI-1 $\frac{1}{4}$	3	in	5/8	5/8	1 $\frac{1}{4}$	1 $\frac{11}{16}$	7/32	3 $\frac{3}{8}$	$\frac{9}{32}$
			15.9	15.9	31.8	47.6	5.6	85.7	7.1
EI-1 $\frac{3}{8}$	3	in	11/16	11/16	1 $\frac{3}{8}$	2 $\frac{11}{16}$	7/32	3 $\frac{3}{4}$	$\frac{5}{16}$
			17.5	17.5	34.9	52.4	5.6	104.8	8.7
EI-1 $\frac{1}{2}$	3	in	3/4	3/4	1 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{4}$	7/32	4 $\frac{1}{2}$	$\frac{3}{8}$
			19.1	19.1	38.1	57.2	5.6	114.3	9.5
EI-1 $\frac{3}{4}$	3	in	7/8	7/8	1 $\frac{3}{4}$	2 $\frac{5}{8}$	9/32	5 $\frac{1}{4}$	$\frac{7}{16}$
			22.2	22.2	44.4	66.7	7.1	133.4	11.1
EI-19	3	in	7/8	1 $\frac{3}{4}$	1 $\frac{3}{4}$	3	17/64	7	$\frac{7}{16}$
			22.2	44.4	44.4	76.2	6.7	177.8	11.1
EI-2	3	in	1	1	2	3	5/16	6	$\frac{5}{16}$
			25.4	25.4	50.8	76.2	7.9	152.4	7.9
EI-2 $\frac{1}{4}$	4	in	1 $\frac{1}{8}$	1 $\frac{1}{8}$	2 $\frac{1}{4}$	3 $\frac{3}{8}$	5/16	6	$\frac{5}{16}$
			28.6	28.6	57.2	85.7	7.9	171.5	7.9
EI-2 $\frac{1}{2}$	4	in	1 $\frac{1}{4}$	1 $\frac{1}{4}$	2 $\frac{1}{2}$	3 $\frac{3}{4}$	25/64	7 $\frac{1}{2}$	$\frac{3}{8}$
			31.8	31.8	63.5	95.3	9.9	190.5	9.5
EI-3	3	in	1 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{2}$	3	4 $\frac{1}{2}$	3/8	9	$\frac{3}{8}$
			38.1	38.1	76.2	114.3	9.5	228.6	9.5
EI-4	4	in	2	2	4	6	13/32	12	$\frac{7}{16}$
			50.8	50.8	101.6	152.4	10.3	304.8	11.1
EI-5	4	in	2 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{2}$	5	7 $\frac{1}{2}$	35/64	15	$\frac{9}{16}$
			63.5	63.5	127	190.5	13.9	381	14.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



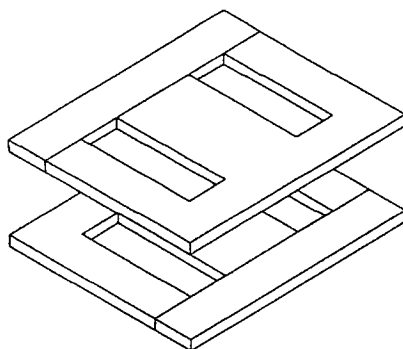
รูปที่ ง-1 แสดงชิ้นส่วนของแผ่น Lamination

อัตราส่วนของปริมาณจริงของ magnetic material กับปริมาณทั้งหมด เรียกว่า stacking factor ( $F_s$ ) โดยแฟกเตอร์ดังกล่าวมีความสำคัญมากในการคำนวณหา flux density ในเส้นทางแม่เหล็ก ตารางที่ ง.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า stacking factor กับความหนาของแผ่น lamination

ค่า stacking factor สามารถที่จะสมมติให้มีค่าเป็น 1.0 ถ้าความหนามีค่ามาก

ตารางที่ ง-2 Stacking factor for lamination core

Lamination Thickness (mm)	Stacking Factor
0.0127	0.50
0.0254	0.75
0.0508	0.85
0.1-0.25	0.90
0.27-0.36	0.95



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ง-2 แสดงการวางแผ่น Lamination ซ้อนทับกัน โดยการวางสลับระหว่างแกน E กับแกน I ไปใช้

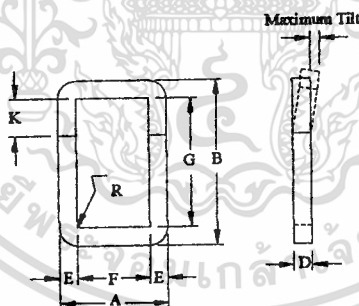
### ง.1.2 Wound Core

แกนแบบ Wound จะมีขนาดความหนาขึ้นอยู่กับการใช้งาน แผ่นที่มีขนาดบางจะมี eddy น้อยทำให้ได้ดีในงานที่มีความถี่สูงๆ และประหยัดค่าใช้จ่าย

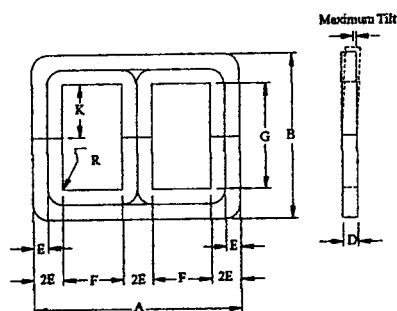
แกนแบบ Wound มี 2 แบบ คือ Cut และ Uncut แกนแบบ Cut จะใช้ในงานทั่วไปแกนแบบ Uncut จะต้องมีการพันขดลวดแบบพิเศษ

แกนแบบ Cut Wound จะเรียกว่า "C" core เพราะแกนแบบนี้จะประกอบด้วยชิ้นส่วนของแกนที่มีรูปร่างเป็นตัว C ซึ่งมีช่องอากาศตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 ตัวประกอบเข้าด้วยกัน แกนแบบนี้ได้รับการพัฒนาโดยบริษัท Westinghouse Electric Corporation ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Hipersit ซึ่งย่อมาจาก High PERmeability SITicon ซึ่งมี core loss ต่ำ แกนแบบ Cut ที่ใช้ใน 3-phase จะมีรูปร่างหรือโครงสร้างแบบ E core ( C core อธิบายในรูปที่ ง.3 และ E core ในรูปที่ ง.4 )

แกนแบบ Cut มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ดี ทำให้ flux density สูงกว่าแกนแบบ Lamination ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ C core ที่ผลิตจาก high-nicket-alloy จะมีความหนาแน่นมากกว่าแบบที่ผลิตจาก Silicon stell alloy และยังมี loss ที่ใช้ในความถี่สูงน้อยกว่า แต่มีค่า flux แม่เหล็กที่อิ่มตัวต่ำ



รูปที่ ง-3 แสดงแกนแบบ C-core



รูปที่ ง-4 แสดงแกนแบบ E-core

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ๖.2 ชนิดของการพันลวด

ความเข้มของสนามแม่เหล็กต้องการการวางจำนวนรอบของลวดจำนวนหลายรอบใน ปริมาตรเล็ก ๆ ทฤษฎีการพันต่าง ๆ กันจะถูกพัฒนาเพื่อความต้องการที่กล่าวมา แต่ละวิธีจะมี ประโยชน์และข้อจำกัด แต่ละการประยุกต์ใช้งานคือการเลือกพันที่เหมาะสมที่สุดจะเกี่ยวข้องกับ การประหยัดและคุณลักษณะที่ได้

ในการพันทฤษฎีการพันส่วนมากจะเกี่ยวกับเครื่องจักรกล ไฟฟ้าที่หมุนได้ซึ่งนำมาใช้ช่วยใน การพัน ขณะที่เครื่องจักรหมุนจำนวนรอบจะเพิ่มขึ้น เครื่องนับจะนับจำนวนรอบในการพัน

ลวดที่ใช้ในการพันจะอยู่บนแกนลวด ขนาดของแกนที่ใช้เก็บลวดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง กลางของลวดเพิ่มขึ้น การใช้แกนนี้เป็นมาตรฐานเพื่อที่จะทำให้สะดวกในการจะใช้อุปกรณ์ในการ ดึงลวด เพื่อควบคุมในการพันลวด ซึ่งอุปกรณ์ที่ดึงนี้จะเป็นเครื่องจักร servo ที่รักษาแรงดึง ลวดให้คงที่โดยที่ความเร็วจะเป็นเชิงเส้น

### การพันขดลวดเป็นชั้น ๆ

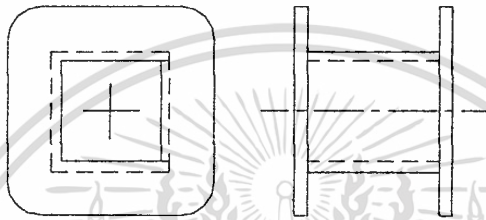
ลวดจะถูกพันเป็นเกลียวกับแผ่นฉนวนที่ระหว่างแต่ละชั้น ชั้นของฉนวนจะกว้างกว่าความ ยาวในการพัน อนุญาตให้ของอยู่ที่ปลายแต่ละด้าน ของและชั้นของฉนวนมีผลต่อการออกแบบ ที่ ว่างของลวดจะต้องเผื่อไว้มากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลวดเพื่อให้แน่ใจว่าสามารถพันลงได้ ที่ ปลายของลวดแต่ละชั้นฉนวนจะถูกสอดเอาไว้

การพันลวดแต่ละชั้นจะนิยมพันเป็นรูปสี่เหลี่ยม ที่มีความหนาเพียงพอเพื่อป้องกันการขูดข ากแรงดึงของลวด รูปร่างของสี่เหลี่ยมจะมีผลต่อการขูด ความแข็งแรงจะลดลงตามความยาว ของด้านสี่เหลี่ยมที่ยาวเพิ่มขึ้น

### การพันขดลวดโดยใช้ Bobbin

จะใช้เป็นตัวรองรับขดลวดที่พัน ซึ่งแกนเหล็กจะสอดเข้าไปใน Bobbin หลังจากได้รอบของ ขดลวดตามที่ต้องการ ตัวอย่างของ Bobbin แสดงตามรูปที่ ๖.5 ขนาดของ Bobbin จะใช้กำหนด ขนาดของแกนเหล็กและค่า Stack ของแกนเหล็กที่วางแบบ จะทำมาโดยการใช้แม่พิมพ์หล่อแบบ นิติ การพันโดยใช้ lamination Bobbin จะคล้ายกับการพันทีละชั้นๆ แต่วาระยะของรอบแต่ละ รอบจะประมาณไม่เท่ากันทุกรอบ เมื่อลวดถูกพันลงใน Bobbin และได้จำนวนรอบต่อชั้นการพัน ของขดลวดจะดูเหมือนเบียดกันหลังจากพันไป 2-3 ชั้น Bobbin จะมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อใช้ พันที่หน้าตาต่างสำหรับให้แกนเหล็กสอดซึ่งคิดว่าการพันแบบเป็นชั้นๆ เนื่องจากมีความหนาของผนัง แทนการพันแบบเป็นชั้น ๆ และไม่มีฉนวนระหว่างชั้นต่าง ๆ ขั้วของสายไฟออกของปัญหาในการ

นำขั้วไฟออกซึ่งการนำเอาออกมาจะตามผนังของ Bobbin ซึ่งจะพันด้วยเทปซึ่งเป็นฉนวน วิธีที่พันนี้จะจำกัด Induce voltage ที่สามารถทนได้เพราะลวดที่พันเริ่มต้นจะอยู่ใกล้ซิกกับรอบของลวดที่พันเสร็จแล้ว ถ้าลวดถูกพันอยู่ในผนังของ Bobbin ปัญหานี้จะไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดการ Breakdown ในแกนเหล็กเพิ่มขึ้น ระยะทางที่ไม่แน่นอนในแต่ละรอบและการไม่มีฉนวนในแต่ละชั้น จะเพิ่มความผิดพลาดภายในลวดหายไปจากค่า Induce voltage ฉนวนระหว่างลวดที่พันและกราวด์จะถูกแบ่งโดย Bobbin การใช้ Bobbin ในการพันจะเป็นการประหยัดด้วย



รูปที่ 5-5 แสดงรูปร่างของ Bobbin

### การพันขดลวดแบบ Universal

การพันแบบนี้จะใช้ที่ความถี่ย่าน 20kHz ถึง 5kHz ซึ่งค่า capacitance และค่า skin effect ที่กระจายอยู่ซึ่งดูเหมือนเป็นปัญหาสำคัญ การจัดรอบของขดลวดจะช่วยลด dielectric และ ความเข้มความหนาแน่นกระแส ซึ่งจะช่วยในการปรับปรุงค่า Q การจัดรอบของขดลวดจะลดค่า capacitance และ โวลต์เตจระหว่างรอบที่อยู่ใกล้ซิกกัน ซึ่งจะลดค่า capacitance ที่ขั้วต่อรอบของการพันแบบ universal เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการพันแบบเกลียวต่างๆ ไป คือ จะไม่วางซิกติดกันในแต่ละรอบ ไม่มีฉนวนกันระหว่างรอบ นอกจากฉนวนที่อยู่บนลวด ลักษณะของลวดจะอยู่ที่การจัดวางของแต่ละรอบ ซึ่งสามารถคงตัวได้ด้วยตนเอง ไม่ยุบตัว ลวดที่นำมาใช้พันซึ่งนิยมนั้นมากคือ Textile Fiber ซึ่งช่วยเพิ่มทั้งแรงเสียดทานและฉนวน

ทางเดินของลวดที่พันจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง เรียกว่า “crossover” ระยะทางของความกว้างของขดลวดและขนาดของ cam กำหนดเป็น  $c$  จำนวนของ crossover ต่อรอบกำหนดเป็น  $n$  มุมระหว่างลวดกับแนวแกนของขดลวดจะพยายามรักษาให้แคบเพื่อให้ลวดอยู่คงตัวได้จากจุดเริ่มต้นที่พันไปจนครบรอบเรียกว่า “winding cycle” จำนวนของ crossover ที่ต้องการต่อ 1 winding cycle ให้เป็น  $q$  ซึ่ง  $q$  จะเป็นเลขจำนวนเต็มคู่ ถ้า  $n$  เป็นจำนวนเต็มคู่  $q$  จะมีค่าเท่ากับ  $n$  ถ้า  $n$  เป็นเลขจำนวนเต็มคี่  $q$  จะมีค่าเท่ากับ  $2n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าคัมทั้งหมดของการพันลวดมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่าศูนย์กลางรวมทั้งหมดของลวด ซึ่งจะกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดนี้ยังช่วยในการกำหนดมุมระหว่างลวดกับแนวแกนของขดลวด ซึ่งกำหนดเป็น  $d$  โดยเราจะใช้สมการต่อไปนี้ในการคำนวณหาค่า  $n$  ก่อน

$$n = \frac{2d}{3c} \quad (\text{ง-1})$$

ในสมการนี้ค่า  $d$  และ  $c$  ต้องอยู่ในหน่วยเดียวกันและค่า  $n$  และ  $q$  ที่หาได้ จะสามารถไปหาค่าของ gear ratio ซึ่งใช้ในการกำหนดจำนวนเส้นทางของลวดที่จะพันในแต่ละรอบ เพื่อทำเกลียวได้จากสมการ

$$r = \frac{2}{n} \left( 1 + \frac{1.25\varnothing}{qc} \right) \quad (\text{ง-2})$$

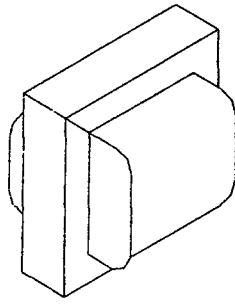
ปริมาณต่างๆ จะอยู่ในหน่วยเดียวกัน และ gear ratio ( $r$ ) เป็นจำนวนของซี่ใน cam ที่สูงกว่าจำนวนของซี่ฟันใน drive gear

### วิธีพันแบบ Toroidal

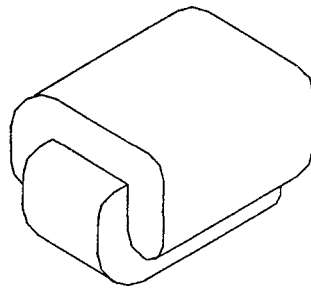
ลักษณะทางอุดมคติของ Toroidal สามารถประมาณได้ดีที่สุด แต่ว่าโครงสร้างของมันจะราคาสูงที่สุดในการใช้งาน การพันแบบ Toroidal จะทำได้ยากเพราะมันเป็นไปไม่ได้ที่จะหมุนลวดระหว่างการทำเกลียว และเราสามารถพันมากกว่า 1 ขดลวดในแกน toroidal เดียวกัน Voltage ระหว่างรอบที่อยู่ติดกันสามารถควบคุมได้ดีกว่าวิธีพันแบบใช้ Bobbin แต่ก็ไม่เท่าแบบการพันเป็นชั้น ๆ และการพันแบบ toroidal นี้จะใช้ได้ไม่ดีในการใช้งานกับ High-Voltage การจัดลวดที่พันแล้วในรูปแบบต่าง ๆ

การจัดลวดที่พันแล้วจะใช้ในงานเฉพาะ โดยแทนที่จะพันเป็นหลาย ๆ ชั้นในทิศทางสลับไปมา แต่จะใช้การอนุกรมกันของการพันแบบชั้นเดียวกันเข้าด้วยกันในทิศทางเดียวกัน ซึ่งวิธีนี้จะมีค่าการกระจายของ capacitance ที่ต่ำ และ วิธีนี้จะราคาสูงและมีปัญหาในการเชื่อมต่อนุกรมกันที่ High-Voltage ตัวอย่างที่นำไปใช้ได้แก่ saturable reactor และเราอาจจะจัดให้อยู่ในรูปแบบ shell type, core type ดังแสดงในรูป

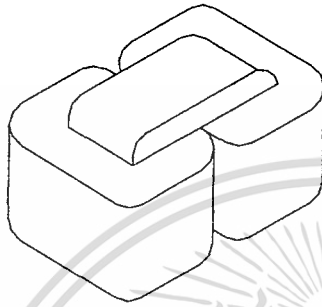
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



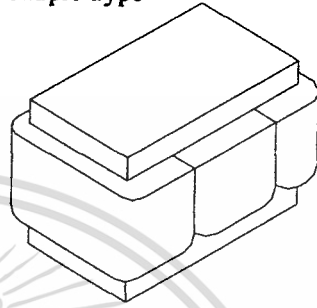
Shell Type



Simple Type

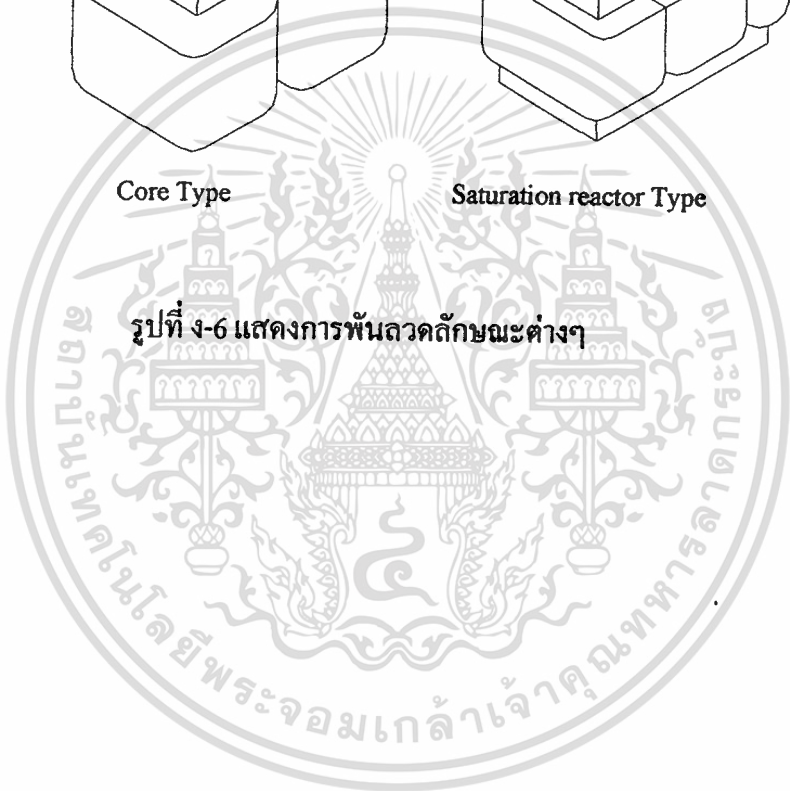


Core Type



Saturation reactor Type

รูปที่ ง-6 แสดงการพันลวดลักษณะต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ-1  
มาตรฐานการวัด

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	In <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
5	-	7/0	-	500	12.700	250000	0.1964	126.7	756.9	1,126
-	-	-	12	472.4	12.00	233,162	0.1753	113.1	675.6	1,005
-	-	6/0	-	464	11.786	215,296	0.1691	109.1	651.7	969.9
-	4/0	-	-	460	11.684	211600	0.1662	107.2	640.5	953
4	-	-	-	454	11.532	206100	0.1619	104.4	624	928.1
-	-	5/0	-	432	10.973	186,624	0.1466	94.56	565	840.6
3	-	-	-	425	10.795	180600	0.1419	91.52	546.9	813.6
-	3/0	-	-	409.6	10.404	167,772	0.1318	85.03	508	755.9
-	-	4/0	-	400	10.160	160000	0.1257	81.07	484.5	720.7
-	-	-	10	393.7	10.000	155000	0.1217	78.54	468	698.2
2	-	-	-	380	9.652	144400	0.1134	73.17	437.1	650.5
-	-	3/0	-	372	9.440	138,384	0.1087	70.12	418.9	623.4
-	2/0	-	-	364.8	9.266	133,079	0.1045	67.42	402.7	599.4
-	-	-	9	354.3	9.000	125,528	0.09859	63.62	380	565.6
-	-	2/0	-	348	8.839	121,104	0.09512	61.36	366.6	545.5
0	-	-	-	340	8.636	115600	0.09079	58.58	349.9	520.8
-	0	-	-	324.9	8.250	105560	0.08291	53.49	319.5	475.5
-	-	0	-	324	8.230	104,976	0.08245	53.19	317.8	472.8
-	-	-	8	315	8.000	99,225	0.07793	50.27	300.3	446.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ จ-1(ต่อ)

## มาตรฐานการวัด

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	In <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
1	-	1	-	300	7.629	90000	0.07069	45.60	272.4	405.4
-	1	-	-	289.3	7.348	83,694	0.06573	42.41	253.3	377
2	-	-	-	284	7.214	80,660	0.06335	40.87	244.2	363.3
-	-	2	-	276	7.010	76,176	0.05983	39.60	230.6	343.2
-	-	-	7	275.6	7.000	75,955	0.05966	38.48	229.9	342.1
3	-	-	-	259	6.579	67,080	0.05269	33.99	203.1	302.2
-	2	-	-	257.6	6.544	66,358	0.05212	33.63	200.9	299.0
-	-	-	6.5	255.9	6.500	65,485	0.05143	22.18	189.2	295
-	-	3	-	252	6.401	63,504	0.04988	32.18	192.2	286.1
4	-	-	-	238	6.045	56640	0.04449	28.70	171.5	255.1
-	-	-	6.0	236.2	6.000	55790	0.04382	28.27	168.9	251.1
-	-	4	-	232	5.893	53,824	0.04227	27.27	162.9	242.4
-	3	-	-	229.4	5.827	52,624	0.04133	26.66	159.3	237
5	-	-	-	220	5.588	48400	0.03801	24.52	146.5	218
-	-	-	5.5	216.5	5.500	46,872	0.03681	23.72	141.9	210.9
-	-	5	-	212	5.385	44,944	0.0353	22.77	136	202.4
-	4	-	-	204.3	5.189	41,738	0.03278	21.15	126.3	188
6	-	-	-	203	5.156	41210	0.03237	20.88	124.8	185.6
-	-	-	5.0	196.9	5.000	38770	0.03045	19.63	117.4	174.5
-	-	6	-	192	4.877	36,864	0.02895	18.68	111.6	166.3
-	5	-	-	181.9	4.621	33,088	0.02599	16.77	100.2	149.1
7	-	-	-	180	4.572	32400	0.02545	16.42	98.08	146
-	-	-	4.5	177.2	4.500	31400	0.02466	15.90	95.04	141.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 มีวากณิโดยทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดูแบบลงมือทำและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ จ-1(ต่อ)

## มาตรฐานการวัด

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	In <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
-	-	7	-	176	4.470	30,976	0.02433	15.70	93.77	139.6
8	-	-	-	165	4.191	27220	0.02138	13.80	82.40	122.7
-	6	-	-	162	4.115	26,244	0.02061	13.300	79.43	118.2
-	-	8	-	160	4.064	25,600	0.02011	12.97	77.50	115.30
-	-	-	4.0	157.5	4.000	24,806	0.01948	12.57	75.08	111.30
9	-	-	-	148	3.759	21,900	0.0172	11.10	66.29	98.68
-	7	-	-	144.3	3.665	20,822	0.01635	10.55	63.01	93.79
-	-	9	-	144	3.658	20,736	0.01629	10.52	62.78	93.52
-	-	-	3.5	137.8	3.500	18,989	0.01491	9.621	57.46	85.53
10	-	-	-	134	3.404	17,960	0.0141	9.098	54.34	80.88
-	8	-	-	128.5	3.264	16,512	0.01297	8.368	49.99	74.39
-	-	10	-	128	3.251	16,384	0.01287	8.302	49.6	73.81
-	-	-	3.2	126	3.200	15,876	0.01247	8.042	48.06	71.49
11	-	-	-	120	3.048	14,400	0.01131	7.297	43.59	64.87
-	-	11	-	116	2.946	13,456	0.01057	6.818	40.74	60.61
-	9	-	-	114.4	2.906	13,087	0.01028	6.632	39.62	58.96
-	-	-	2.9	114.2	2.900	13,042	0.01024	6.605	39.47	58.72
12	-	-	-	109	2.769	11,880	0.009331	6.020	35.96	53.52
-	-	12	-	104	2.642	10,816	0.008495	5.481	32.74	48.73
-	-	-	2.6	102.4	2.600	10,486	0.008246	5.309	31.78	47.29
-	10	-	-	101.9	2.588	10,384	0.008156	5.262	31.43	46.78
13	-	-	-	95	2.413	9,025	0.007088	4.573	27.32	40.65
-	-	13	-	92	2.337	8,464	0.006648	4.289	25.62	38.13

## ตารางที่ ๑-1(ต่อ)

## มาตรฐานการวัด

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	In <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
-	11	-	-	90.74	2.305	8,234	0.006467	4.172	24.92	37.09
-	-	-	2.3	90.55	2.300	8,199	0.006439	4.155	24.82	36.94
14	-	-	-	83	2.108	6,889	0.005411	3.491	20.85	31.04
-	12	-	-	80.81	2.053	6,530	0.005129	3.309	19.77	29.42
-	-	14	-	80	2.032	6,400	0.005027	3.243	19.37	28.83
-	-	-	2.0	78.74	2.000	6,200	0.004869	3.142	18.77	27.93
15	-	15	-	72	1.829	5,184	0.004072	2.637	18.46	27.36
-	13	-	-	71.96	1.828	5,178	0.004067	2.624	15.67	23.33
-	-	-	1.8	70.87	1.800	5,023	0.003945	2.545	15.20	22.63
16	-	-	-	65	1.651	4,225	0.003318	2.141	12.79	19.03
-	14	-	-	64.08	1.628	4,106	0.003225	2.081	12.43	18.50
-	-	16	-	64	1.626	4,096	0.003217	2.075	12.40	18.45
-	-	-	1.6	62.99	1.600	3,968	0.003116	2.011	12.01	17.88
17	-	-	-	58	1.473	3,364	0.002642	1.705	10.18	15.16
-	15	-	-	57.07	1.450	3,257	0.002558	1.650	9.859	14.67
-	-	17	-	56	1.422	3,136	0.002463	1.589	9.493	14.13
-	-	-	1.4	55.12	1.400	3,038	0.002386	1.539	9.196	13.68
-	16	-	-	50.82	1.291	2,583	0.002029	1.309	7.82	11.64
18	-	-	-	49	1.245	2,401	0.001886	1.217	7.269	10.82
-	-	18	-	48	1.219	2,304	0.00181	1.167	6.976	10.38
-	-	-	1.2	47.24	1.200	2,232	0.001753	1.131	6.756	10.06
-	17	-	-	45.26	1.150	2,048	0.001608	1.037	6.197	9.219
19	-	-	-	42	1.067	1,764	0.001385	0.8938	5.388	7.946

ตารางที่ จ-1(ต่อ)  
มาตรฐานการวัด

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	In <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
-	18	-	-	40.30	1.024	1,624	0.001275	0.8226	4.914	7.313
-	-	19	-	40	1.016	1,600	0.001257	0.8107	4.845	7.207
-	-	-	1.0	39.37	1.000	1550	0.001217	0.7854	4.690	6.982
-	-	20	-	36	0.9144	1,296	0.001018	0.6576	3.923	5.838
-	19	-	-	35.89	0.9116	1,288	0.001012	0.6529	3.900	5.804
-	-	-	0.90	35.43	0.9000	1,255	0.0009857	0.6362	3.799	5.656
20	-	-	-	35	0.8890	1,225	0.0009621	0.6207	3.708	5.518
21	-	21	-	32	0.8128	1,024	0.0008042	0.5189	3.099	4.613
-	20	-	-	31.96	0.8118	1,021	0.0008019	0.5174	3.091	4.600
-	-	-	0.30	31.50	0.8000	992.3	0.0007794	0.5027	3.004	4.469
-	21	-	-	28.46	0.7229	810	0.0006362	0.4105	2.452	3.649
22	-	22	-	28	0.7112	784	0.0006158	0.3973	2.373	3.532
-	-	-	0.70	27.56	0.7000	759.6	0.0005966	0.3848	2.299	3.421
-	-	-	0.65	25.59	0.6500	654.8	0.0005143	0.3318	1.982	2.950
-	22	-	-	25.35	0.6438	642.6	0.0005047	0.3256	1.945	2.895
23	-	-	-	25	0.6350	625	0.0004909	0.3167	1.892	2.816
-	-	23	-	24	0.6096	576	0.0004524	0.2919	1.744	2.595
-	-	-	0.60	23.62	0.6000	557.9	0.0004382	0.2827	1.689	2.513
-	23	-	-	22.57	0.5733	509.4	0.0004001	0.2581	1.542	2.295
24	-	24	-	22	0.5583	484	0.0003801	0.2452	1.465	2.180
-	-	-	0.55	21.65	0.5500	468.7	0.0003681	0.2376	1.419	2.112
-	24	-	-	20.10	0.5106	404	0.0003173	0.2047	1.223	1.820
25	-	25	-	20	0.5080	400	0.0003142	0.2027	1.211	1.802

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 มีค่าธรรมเนียมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดที่ผู้จัดทำขอสงวนสิทธิ์ไว้ และผู้ใช้งานจะต้องแจ้งไปยังเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-1(ต่อ)  
มาตรฐานการวัด

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	In <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
-	-	-	0.50	19.69	0.5000	387.7	0.0003045	0.1963	1.174	1.745
26	-	26	-	18	0.4572	324	0.0002545	0.1642	0.9809	1.460
-	25	-	-	17.90	0.4547	320.4	0.0002516	0.1623	0.9697	1.443
-	-	-	0.45	17.72	0.4500	314	0.0002466	0.1590	0.9504	1.414
-	-	27	-	16.40	0.4166	269	0.0002113	0.1363	0.1844	1.212
27	-	-	-	16	0.4064	256	0.0002011	0.1297	0.7750	1.153
-	26	-	-	15.94	0.4049	254.1	0.0001996	0.1288	0.7693	1.145
-	-	-	0.40	15.75	0.4000	248.1	0.0001949	0.1257	0.7512	1.118
-	-	28	-	14.80	0.3759	219	0.000172	0.1110	0.6629	0.9868
-	27	-	-	14.20	0.3606	201.6	0.0001583	0.1021	0.6101	0.9077
28	-	-	-	14	0.3556	196	0.0001539	0.09932	0.5931	0.8330
-	-	-	0.35	13.78	0.35	189.9	0.0001491	0.09621	0.5746	0.8553
-	-	29	-	13.60	0.3454	185	0.0001453	0.09372	0.5600	0.8332
29	-	-	-	13	0.3302	169	0.0001327	0.08563	0.5114	0.7613
-	28	-	-	12.64	0.3211	159.3	0.0001255	0.08097	0.4837	0.7198
-	-	-	0.30	12.60	0.3200	158.8	0.0001246	0.08042	0.7806	0.7149
-	-	30	-	12.40	0.3150	153.8	0.0001208	0.07791	0.4656	0.6926
30	-	-	-	12	0.3048	144	0.0001131	0.07297	0.4359	0.6487
-	-	31	-	11.60	0.2946	134.6	0.0001057	0.06818	0.4074	0.6061
-	-	-	0.29	11.42	0.2900	130.4	0.0001024	0.06605	0.3947	0.5872
-	29	-	-	11.26	0.2859	126.3	0.00009959	0.06425	0.3838	0.5712
-	-	32	-	10.80	0.2743	116.6	0.00009158	0.05913	0.3530	0.5257
-	-	-	0.26	10.24	0.2600	104.9	0.00008239	0.05309	0.3175	0.4720

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นให้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดและต้องขออนุญาตจากสำนักงานมาตรฐานการวัด

ตารางที่ จ-1(ต่อ)  
มาตรฐานการวัด

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	In <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
-	30	-	-	10.03	0.2546	100.6	0.00007901	0.05097	0.3045	0.4531
31	-	33	-	10	0.2540	100	0.00007954	0.05067	0.3027	0.4504
-	-	34	-	9.2	0.2337	84.064	0.00006648	0.04289	0.2562	0.3812
-	-	-	0.23	9.055	0.2300	81.99	0.00006440	0.04155	0.2482	0.3693
32	-	-	-	9	0.2286	81.102	0.00006362	0.04104	0.2452	0.3648
-	31	-	-	8.928	0.2238	79.71	0.00006260	0.04039	0.2413	0.3590
-	-	35	-	8.4	0.2134	70.56	0.00005542	0.03575	0.2136	0.3178
33	-	-	-	8	0.2032	64	0.00005027	0.03243	0.1937	0.2882
-	32	-	-	7.95	0.20	65.20	0.00004964	0.03203	0.1913	0.2846
-	-	-	0.20	7.874	0.2000	62	0.00004869	0.03142	0.1877	0.2793
-	-	36	-	7.6	0.1930	57.76	0.00004536	0.02927	0.1748	0.2601
-	-	-	0.18	7.087	0.1800	50.23	0.00003945	0.02545	0.1520	0.2262
-	33	-	-	7.08	0.1798	50.13	0.00003937	0.0254	0.1517	0.2257
34	-	-	-	7	0.1778	49	0.00003848	0.02483	0.1483	0.2207
-	-	37	-	6.8	0.1727	46.24	0.00003632	0.02343	0.1400	0.2083
-	34	-	-	6.305	0.1601	39.75	0.00003122	0.02014	0.1203	0.1790
-	-	-	0.16	6.299	0.1600	39.68	0.00003116	0.02011	0.1201	0.1787
-	-	38	-	6	0.1524	36	0.00002827	0.01824	0.1090	0.1622
-	35	-	-	5.615	0.1426	31.53	0.00002476	0.01597	0.09543	0.14201
-	-	-	0.14	5.512	0.1400	30.38	0.00002386	0.01539	0.09196	0.13684
-	-	39	-	5.2	0.1321	27.04	0.00002124	0.01370	0.08186	0.12181
35	36	-	-	5.000	0.1270	25	0.00001963	0.01267	0.07565	0.11257
-	-	40	-	4.8	0.1219	23.04	0.0000181	0.01167	0.06976	0.10381

ตารางที่ จ-1(ต่อ)  
มาตรฐานการวัด

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	In <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
-	-	-	0.12	4.724	0.1200	22.32	0.00001753	0.01131	0.06756	0.10053
-	37	-	-	4.453	0.1131	19.83	0.00001557	0.01005	0.06001	0.08930
-	-	41	-	4.4	0.1118	19.36	0.00001521	0.009810	0.05812	0.08649
36	-	42	-	4	0.1016	16.00	0.00001257	0.008107	0.04845	0.07210
-	38	-	-	3.965	0.1007	15.72	0.00001235	0.007968	0.0476	0.07083
-	-	-	0.10	3.937	0.1000	15.50	0.00001217	0.007854	0.04690	0.06979
-	-	43	-	3.6	0.09114	12.96	0.00001018	0.006567	0.03923	0.05838
-	39	-	-	3.531	0.08969	12.47	9.794E-06	0.006319	0.03775	0.05617
-	-	44	-	3.2	0.08138	10.24	8.042E-06	0.005819	0.03099	0.04612
-	40	-	-	3.145	0.07987	9.891	7.768E-06	0.005012	0.02994	0.04455
-	41	45	-	3.800	0.07113	7.842	6.159E-06	0.003973	0.02374	0.03533
-	42	-	-	2.494	0.06334	6.219	4.884E-06	0.003151	0.01882	0.02801
-	-	46	-	2.4	0.06096	5.76	4.528E-06	0.002929	0.01744	0.02595
-	43	-	-	2.221	0.05641	4.932	3.873E-06	0.002495	0.01498	0.02292
-	-	47	-	2	0.05080	4.000	3.142E-06	0.002027	0.01211	0.01802
-	44	-	-	1.987	0.05023	3.911	3.072E-06	0.001982	0.01184	0.01762
-	-	-	0.05	1.969	0.05000	3.877	3.045E-06	0.001963	0.01174	0.01747
-	45	-	-	1.761	0.04473	3.102	2.436E-06	0.001572	0.009383	0.000164
-	-	48	-	1.6	0.04064	2.560	2.011E-06	0.001297	0.007750	0.000135
-	46	-	-	1.568	0.03984	2.460	1.931E-06	0.001246	0.007446	0.000130
-	47	-	-	1.397	0.03547	1.951	1.532E-06	0.0009884	0.005904	0.000103
-	48	-	-	1.244	0.03159	1.547	1.215E-06	0.0007838	0.004683	0.000082
-	-	49	-	1.2	0.03048	1.440	1.131E-06	0.0007297	0.004359	0.000076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-1(ต่อ)  
มาตรฐานการวัด

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	In <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
-	49	-	-	0.108	0.02813	1.227	9.635E-07	0.0006216	0.003713	0.005526
-	-	50	-	1	0.02540	1.000	7.854E-07	0.0005067	0.003027	0.004505
-	50	-	-	0.986	0.02505	0.9728	7.641E-07	0.0004929	0.002945	0.004382

Note :

B.W.G. - Birmingham Iron Wire Gauge

A.W.G. - American Wire Gauge

S.W.G. - British Standard Wire Gauge

mm.G. - Millimeter Gauge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-2  
อัตราส่วนความต้านทาน DC / AC

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

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

Where :

$K_2$  = DC/AC resistance ratio of conductor

$\lambda_s$  = skin effect factor

$\lambda_p$  = proximity effect factor

The skin effect factor is given by :

$$\lambda_s = \frac{X^4}{192 + 0.8X^4}$$

Where :

$$X = \sqrt{\frac{8\pi f}{R_0 k_1 \times 10^4}}$$

$f$  = supply frequency. Hz

$R_0$  = DC resistance of conductor at 20°C  $\Omega / \text{km}$

$k_1$  = reciprocal factor of temperature correction factor

The proximity effect factor is given by :

$$\lambda_p = \frac{X^4}{192 + 0.8X^4} \left( \frac{d_1}{S} \right)^2 \left\{ 0.312 \left( \frac{d_1}{S} \right)^2 \times \frac{1.18}{\frac{X^4}{192 + 0.8X^4} + 0.27} \right\}$$

Where :

$$X^1 = \sqrt{0.8X}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $d^1$  = diameter of conductor, mm. ก่อนอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$S$  = distance between conductor axes, mm.

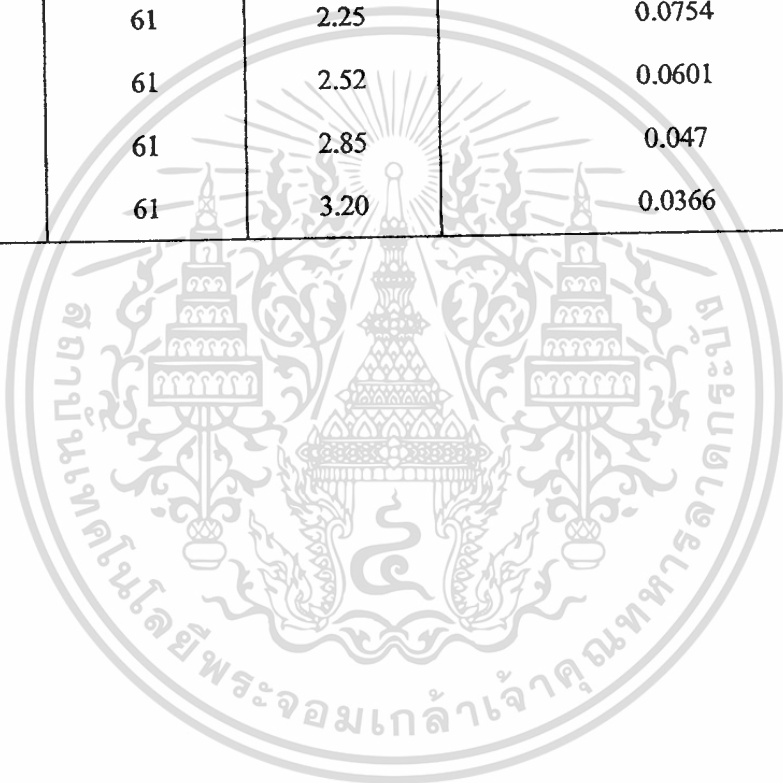
ตารางที่ จ-3  
ความต้านทานของตัวนำ

Nominal cross-sectional area (mm <sup>2</sup> )	Number of wires in conductor	Diameter Of wires in conductor (mm)	Maximum resistance of conductor of 20°C (ohms / km)
			Single core & Multi core
0.5	1	0.30	36.0
1	1	1.13	18.1
1	7	0.40	18.1
1.5	1	1.38	12.1
1.5	7	0.50	12.1
2.5	1	1.78	7.41
2.5	7	0.67	7.41
4	1	2.25	4.61
4	7	0.85	4.61
6	7	1.04	3.08
10	7	1.35	1.83
16	7	1.70	1.15
25	7	2.14	0.727
35	19	1.53	0.524
50	19	1.78	0.387
70	19	2.14	0.268
95	19	2.52	0.193
120	37	2.03	0.153
150	37	2.25	0.124
185	37	2.52	0.0991

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คุ้มครองเมื่อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-3 (ต่อ)  
ความต้านทานของตัวนำ

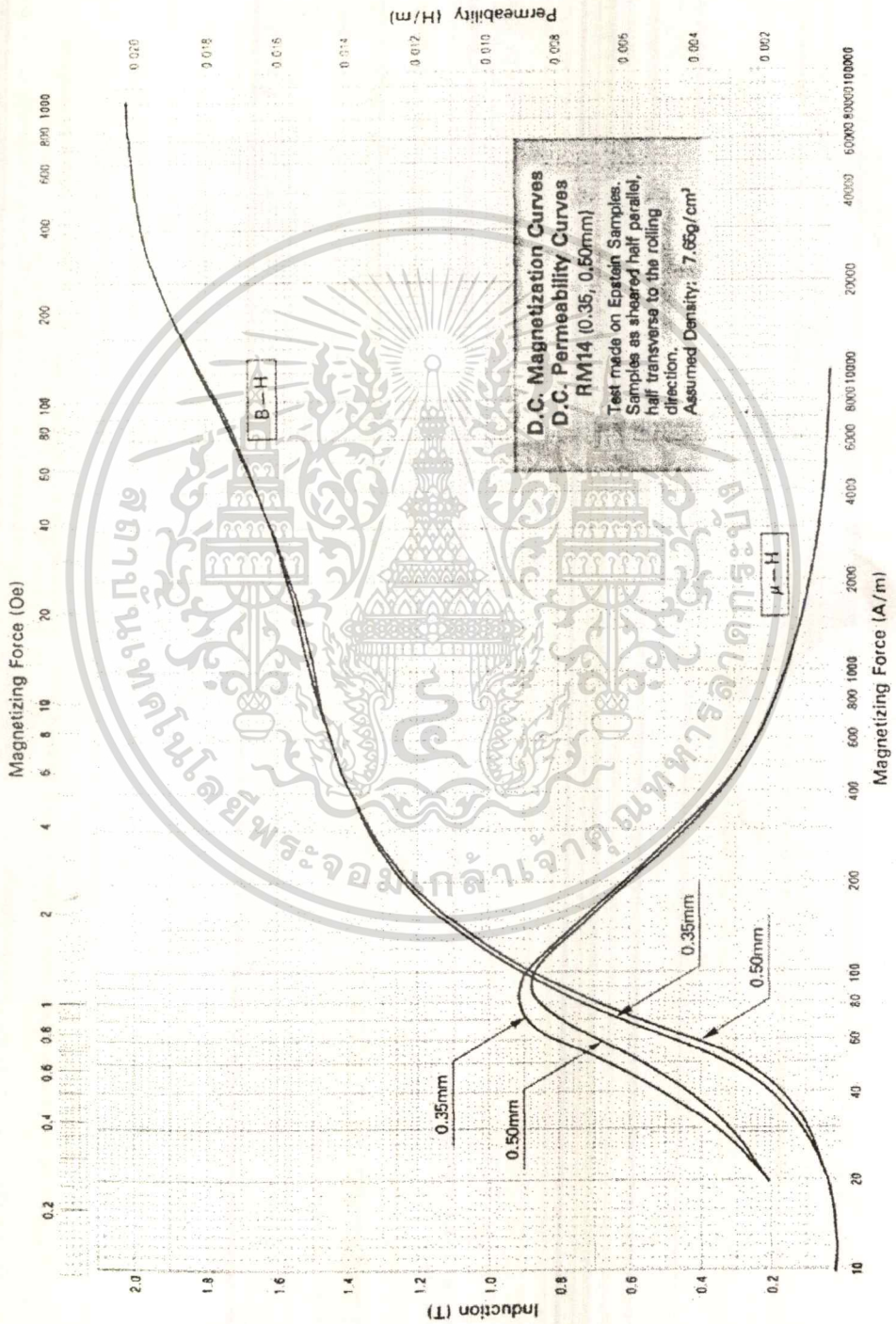
Nominal cross-sectional area (mm <sup>2</sup> )	Number of wires in conductor	Diameter Of wires in conductor (mm)	Maximum resistance of conductor of 20°C (ohms / km)
			Single core & Multi core
240	61	2.25	0.0754
300	61	2.52	0.0601
400	61	2.85	0.047
500	61	3.20	0.0366



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

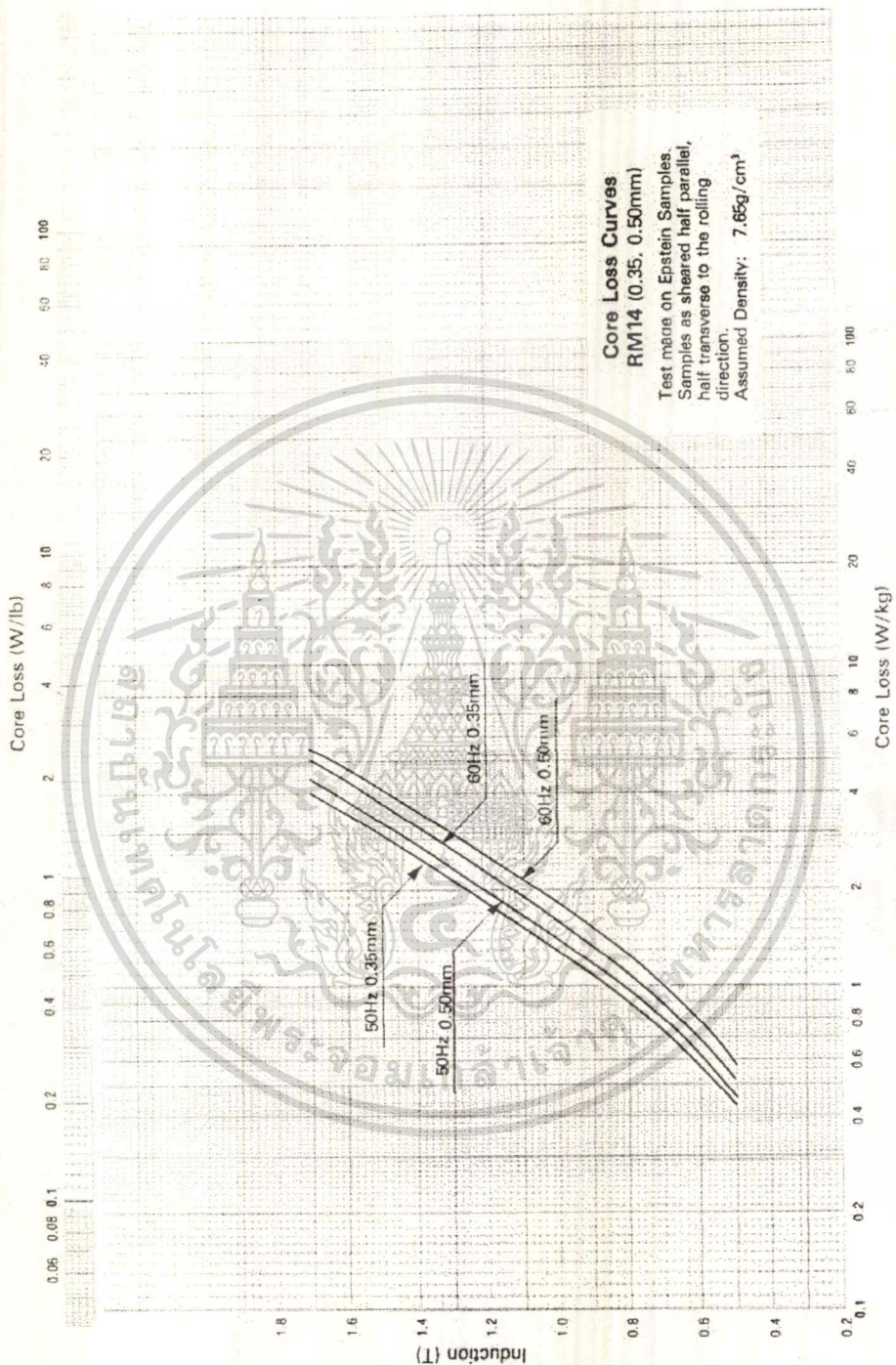
ภาคผนวก จ

ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ



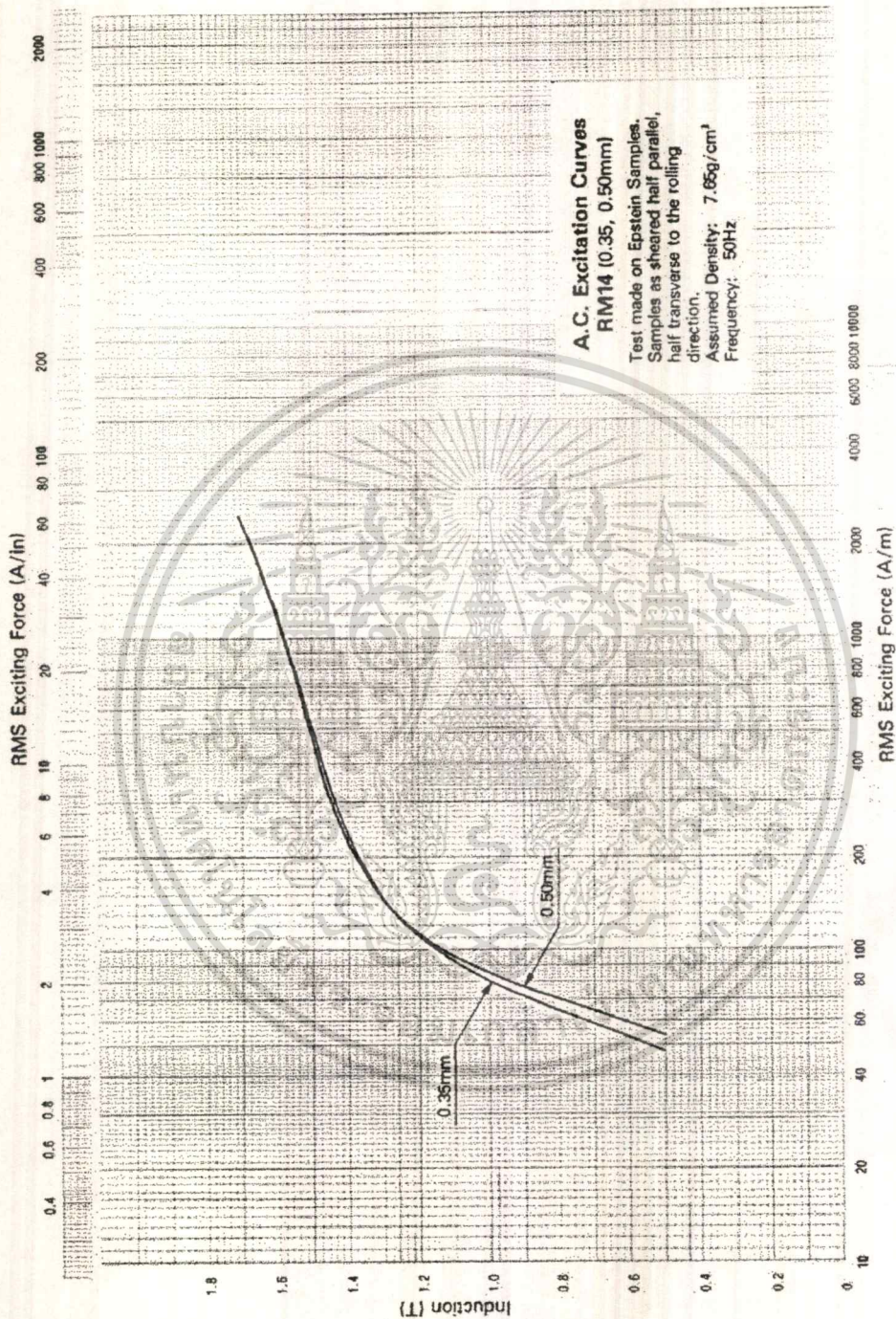
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ๑-1 D.C. Magnetization Curve และ D.C. Permeability Curve

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



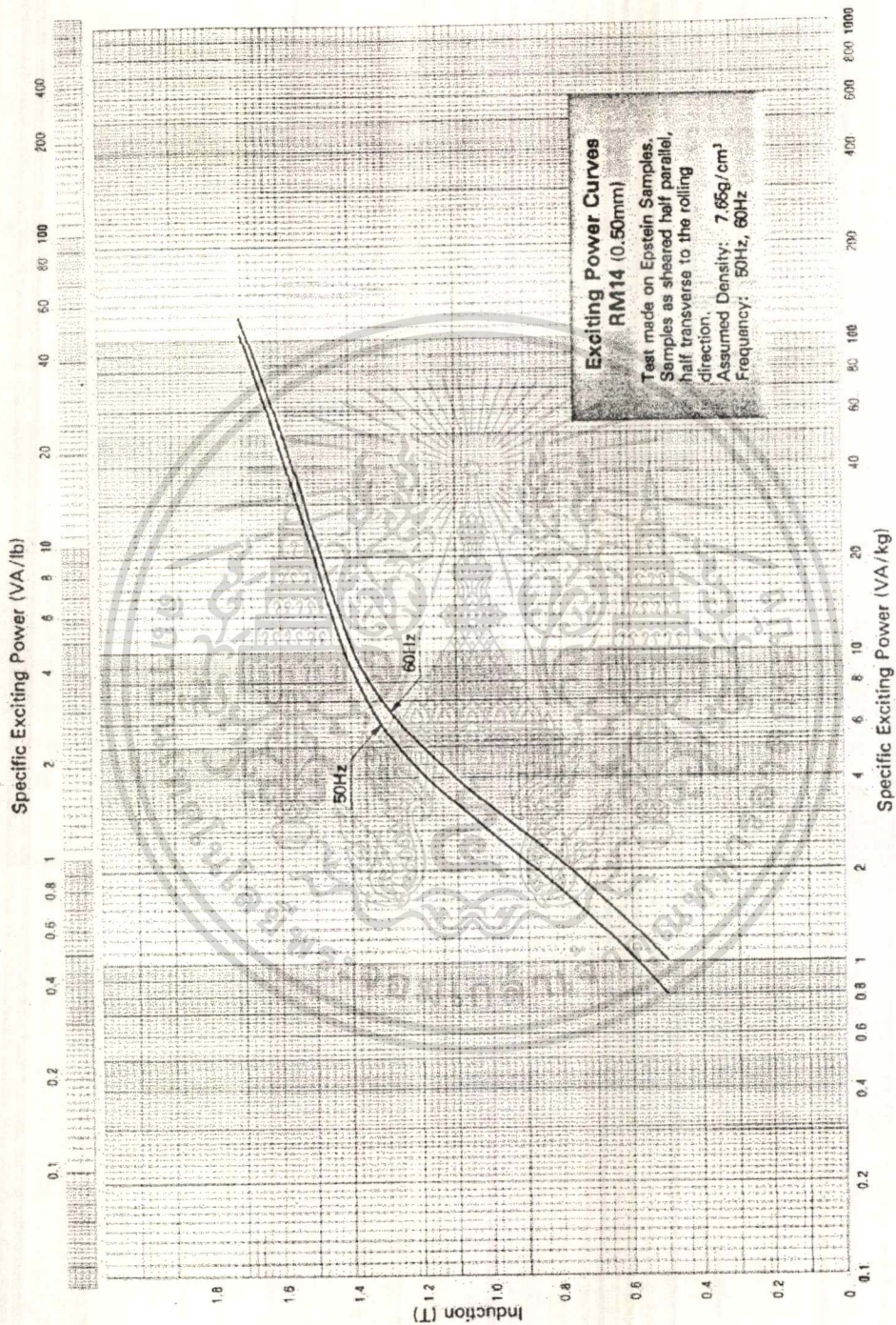
รูป ๓-2 Core loss curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



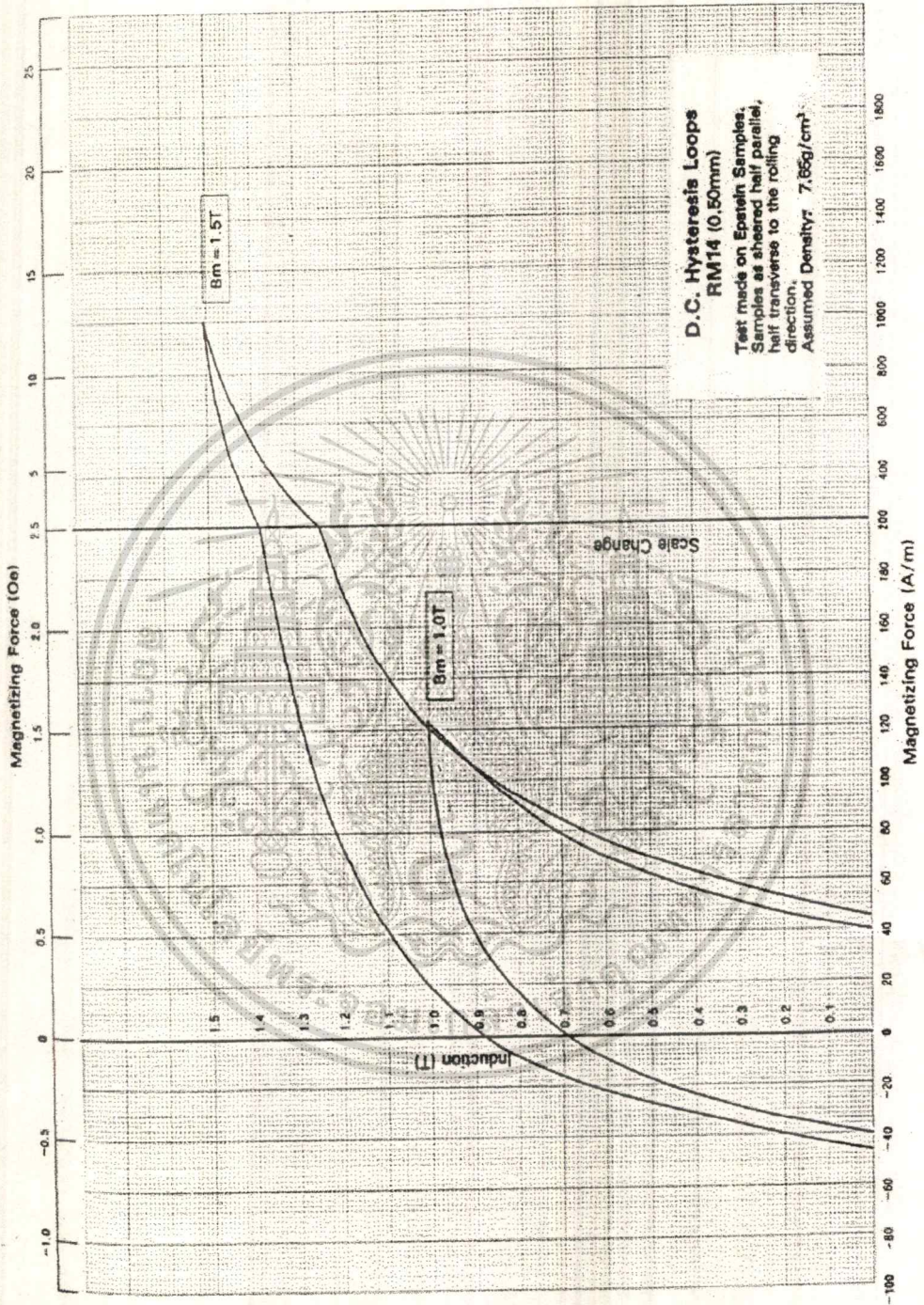
รูป จ-3 A.C. Excitation Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ฃ-4 Exciting Power Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ๕-5 D.C. Hysteresis Loops curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, อาจารย์วีระศักดิ์ วงศ์วิวัติ อาจารย์ที่ปรึกษา และ  
คุณต่อพงศ์ ยวงพานิช ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1]. ต่อพงษ์ ยวงพานิช, ณัฐติพล ทันจิตรวิวัฒน์, อนุชิต ศรีสมบูรณ์สกุล, “การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก EI”, วิทยานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538.
- [2]. ยุทธนา กุลวิฑิต, “เอกสารประกอบการสอนวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง”, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- [3]. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, “เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำขนาด 12 กิโลวัตต์-แอมแปร์ ที่ใช้เอสซีอาร์”, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [4]. Arora, J.S.; “Introduction to Optimum Design”, Mc Graw-Hill, New York, 1989.
- [5]. A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr. Stephen D. Umans, “Electric Machinery fifth Edition”, Mc Graw-Hill, 1990.
- [6]. Colonel Wm. T. Mclyman “Transformer and Inductor Handbook”, Marcel Dekker, Inc., 1990.
- [7]. Murray, W. “Numerical Methodes for Unconstrained Optimization” Academic Press, London, 1972.
- [8]. Slobodan Cuk and R.D. Middle Brook, “Advances in Switched-Mode Power Conversion, Vol 1., 1981.
- [9]. Syed A. Nasar, “Electric Machines and Power system Vol 1”, Mc Graw-Hill, 1995.
- [10]. THAI YAZAKI ELECTRIC WIRE COMPANY LIMITED, “Technical information and specification for electric wires and cables”, First edition, october 1991.
- [11]. Vanderplaats, G.N., “Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications”, Mc Graw-Hill, New York, 1984.
- [12]. Wu, C.J.; Lee, F.C.; Davis, R.K., “Minimum Weight EI Core and Pot Core Inductor and Transformer Design”, IEEE.Trans. on Mag, Vol. Mag-16, No.5, September, 1980.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้