

การพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่สำหรับการออกแบบ
รูปร่างที่เหมาะสมของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า

DEVELOPMENT OF MOVING NODES TECHNIQUE FOR
SHAPE DESIGN OPTIMIZATION OF ELECTROMAGNET

วุฒิสักดิ์หวังดี
WUTTISAK WANGDEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-621-7

การพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่สำหรับการออกแบบ
รูปร่างที่เหมาะสมของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า

DEVELOPMENT OF MOVING NODES TECHNIQUE FOR
SHAPE DESIGN OPTIMIZATION OF ELECTROMAGNET

นายวุฒิศักดิ์ หวังดี

WUTTISAK WANGDEE

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 43276
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-648-621-7

**DEVELOPMENT OF MOVING NODES TECHNIQUE FOR
SHAPE DESIGN OPTIMIZATION OF ELECTROMAGNET**

WUTTISAK WANGDEE

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-648-621-7

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่สำหรับการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า
นักศึกษา	นายวุฒิสักดิ์ หวังดี
รหัสประจำตัว	41061155
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่สำหรับการประยุกต์ใช้งานในการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีลักษณะรูปทรงแนวขั้วแม่เหล็กที่เรียบและโค้งมนซึ่งจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากันตามที่ต้องการในบริเวณช่องว่างอากาศที่พิจารณา ปัญหาที่ออกแบบจะกำหนดให้เป็นสนามแม่เหล็กแบบสแตติก 2 มิติ หลักการที่ใช้เป็นการพัฒนาโปรแกรมออกแบบที่ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขในการคำนวณหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการคำนวณหารูปร่างที่เหมาะสมจะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมินิสติกและสโตชาสติกซึ่งจะใช้งานร่วมกับวิธีโหนดเคลื่อนที่ตามแนวแกนต่าง ๆ 3 แนวแกนคือ ในแนวแกนนอน ในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง และในแนวแกนนอนพร้อมกับแนวแกนตั้ง วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่ 2 แบบคือ วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกโพล์ร่วมกับการเปลี่ยนรูปร่างเอลิเมนต์ใหม่ และวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสโพล์ร่วมกับการสร้างโครงตาข่ายเอลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ การเคลื่อนที่โหนดแบบคิวบิกสโพล์จะทำให้แนวขั้วแม่เหล็กที่ได้มีลักษณะที่เรียบและโค้งมน การเปลี่ยนรูปร่างเอลิเมนต์ใหม่เป็นการจัดเรียงโครงสร้างเอลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วให้เหมาะสม และการสร้างโครงตาข่ายเอลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติจะเป็นวิธีการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับต้นแบบต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ยังมีการแสดงผลการเปรียบเทียบวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้น และแสดงผลการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมินิสติกและสโตชาสติกในการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กค่าต่าง ๆ และรวมทั้งนำเสนอการออกแบบโดยพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้นของสารแม่เหล็กด้วย

Thesis Title	Development of Moving Nodes Technique for Shape Design Optimization of Electromagnet
Student	Mr. Wuttisak Wangdee
Student ID.	41061155
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. CHAIWUT CHAT-UTHAI

ABSTRACT

The objective of this thesis is to propose the development of the moving nodes technique for applications in the shape design optimization of an electromagnet having a smooth pole face in order to maintain the magnetic flux density constant in a specified air gap region. The design problem is defined as the two-dimensional magnetostatic problem. The concept is to develop the design program based on a combination of numerical methods. The magnetic flux density is calculated by using the finite element method, the optimal shape is calculated by using the deterministic and stochastic optimization methods combined with the moving nodes technique along three axes, e.g. moving in x axis, x and y axes, xy axis. In this thesis, two developed techniques of moving nodes are proposed, the cubic spline moving node technique combined with the triangle reshaped mesh algorithm and the cubic spline moving node technique combined with the automatic mesh generation algorithm. The smooth pole face can be obtained by using the cubic spline moving node technique. The appropriate triangle mesh at pole face can be gained by using the triangle reshaped mesh algorithm. The automatic mesh generation algorithm can be applied for the various models. The comparison of the optimal pole shape with various values of magnetic flux density using the developed techniques of moving nodes and the use of deterministic and stochastic optimization methods are also illustrated. Moreover, the design results including the effect of nonlinear characteristic of magnetic materials are also presented.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ ผ.ศ. ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ผู้ซึ่งทำให้ผู้เขียนได้มีโอกาสได้เรียนและเขียนวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นครูอาจารย์ที่มีคุณค่าแห่งความเป็นอาจารย์ที่ดีมาก เป็นอาจารย์ที่ผู้เขียนประทับใจมากที่สุดในชีวิตผู้เขียน และขอขอบคุณอาจารย์ต่อพงศ์ ยวงพานิช จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในการให้คำแนะนำและแนวทางในการพัฒนาวิทยานิพนธ์ของผู้เขียน เพื่อนร่วมงานวิจัย คุณธีรพล โปธิพงศ์วิวัฒน์ คุณสุนัน หนองเหล็ก ขอขอบคุณบรรชาติ แซ่ก๊ก ในการจัดพิมพ์ภาพสี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อเสทือนและคุณแม่ฉนวน หวังดี ที่ให้กำลังใจและเป็นที่ให้คำปรึกษาในการศึกษาและการดำเนินชีวิตเสมอมา

วุฒิสักดิ์ หวังดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม.....	6
2.3 หลักการพื้นฐานการหาค่าที่เหมาะสม.....	7
2.3.1 การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาวนกลับ.....	8
2.3.2 ตัวแปรออกแบบ (Design variables).....	10
2.3.3 เงื่อนไขบังคับ (Constraints).....	11
2.3.4 ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function).....	11
2.3.5 จุดเหมาะสมที่สุด (Optimal Point).....	12
2.3.6 การจำแนกกลุ่มของวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการหาค่าที่เหมาะสม.....	12
2.4 การหาค่าที่เหมาะสมแบบ Quadratic Extended Penalty Function (QUAP).....	13
2.5 การหาค่าที่เหมาะสมแบบเจเนติก.....	18
2.5.1 การคัดเลือก (Reproduction หรือ Selection).....	19
2.5.2 การสร้างโครโมโซมลูก (Crossover).....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2.1 One-point Crossover.....	20
2.5.2.2 Two-point Crossover.....	21
2.5.2.3 Uniform Crossover.....	21
2.5.3 การกลายพันธุ์ (Mutation).....	22
2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของวิธีเจเนติก.....	23
2.5.4.1 จำนวนโครโมโซมทั้งหมด (Population size ,Popsiz)e.....	23
2.5.4.2 ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูก.....	23
2.5.4.3 ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์.....	23
2.6 ทฤษฎีไฟไนท์อิลิเมนต์.....	25
2.6.1 การประมาณฟังก์ชันของศักย์แม่เหล็กในแต่ละอิลิเมนต์.....	27
2.6.2 การกำหนดขอบเขตของปัญหา.....	29
2.7 ทฤษฎีคิวบิกสไปไลน์.....	30
2.7.1 การประมาณค่าในช่วงกำลังหนึ่ง.....	31
2.7.2 การประมาณค่าในช่วงกำลังสอง.....	32
2.7.3 การประมาณค่าในช่วงกำลังสาม (cubic spline).....	33
2.7.4 การทดสอบโปรแกรมโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปไลน์.....	34
2.8 การสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ.....	35
2.8.1 การทดสอบโปรแกรมการสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ.....	37
บทที่ 3 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่.....	40
3.1 บทนำ.....	40
3.2 วิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบเดิม.....	41
3.3 วิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบ 1.....	44
3.4 วิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบ 2.....	47
3.5 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น.....	50
3.6 เงื่อนไขการออกแบบ.....	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า.....	53
4.1 บทนำ.....	53
4.2 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x	55
4.2.1 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.33$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x	55
4.2.2 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.34$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x	56
4.2.3 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.35$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x	57
4.2.4 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.36$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x	58
4.2.5 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.37$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x	59
4.3 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$	60
4.3.1 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.33$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$	60
4.3.2 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.34$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$	61
4.3.3 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.35$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$	62
4.3.4 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.36$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$	63
4.3.5 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.37$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$	64
4.4 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy	65
4.4.1 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.33$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.34$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy	66
4.4.3 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.35$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy	67
4.4.4 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.36$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy	68
4.4.5 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.37$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy	69
4.5 การเปรียบเทียบวิธีการดิเทอมินิสติกและสโตซาสติกสำหรับการ ออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า.....	70
4.5.1 เปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็ก ของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่า $B_d = 0.33$ T	70
4.5.2 เปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็ก ของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่า $B_d = 0.34$ T.....	71
4.5.3 เปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็ก ของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่า $B_d = 0.35$ T.....	72
4.5.4 เปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็ก ของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่า $B_d = 0.36$ T.....	73
4.5.5 เปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็ก ของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่า $B_d = 0.37$ T.....	74
4.6 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดย วิธีการโหนดเคลื่อนที่ตามแนวแกน x	75
4.6.1 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.33$ T	75
4.6.2 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.34$ T.....	76
4.6.3 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.35$ T.....	77
4.6.4 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.36$ T.....	78
4.6.5 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.37$ T	79

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุป.....	80
เอกสารอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลแกนเหล็ก RM14 0.35mm.....	86
ภาคผนวก ข ข้อมูลการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิม.....	88
ภาคผนวก ค ข้อมูลการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1.....	91
ภาคผนวก ง ข้อมูลการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2.....	94
ภาคผนวก จ เปรียบเทียบผลการออกแบบกับโปรแกรม Femm Editor Version 3.1.....	100
ภาคผนวก ฉ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	123

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลของการประมาณค่าในช่วง.....	31
4.1 การเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องอากาศ D ที่ค่า $B_d = 0.33$ T.....	70
4.2 การเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องอากาศ D ที่ค่า $B_d = 0.34$ T.....	71
4.3 การเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องอากาศ D ที่ค่า $B_d = 0.35$ T.....	72
4.4 การเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องอากาศ D ที่ค่า $B_d = 0.36$ T.....	73
4.5 การเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องอากาศ D ที่ค่า $B_d = 0.37$ T.....	74
5.1 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเป้าหมายของการออกแบบทั้ง 2 วิธี.....	81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 (ก) โครงสร้างต้นแบบชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิจารณา.....	2
(ข) ขอบเขตของต้นแบบ 2 มิติขนาดเศษหนึ่งส่วนสี่ของโครงสร้างขั้วแม่เหล็ก.....	2
2.1 แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม.....	7
2.2 แผนผังขั้นตอนการออกแบบรูปร่างของอุปกรณ์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ระบบ CAD....	7
2.3 การแก้ปัญหาโดยตรง.....	8
2.4 การแก้ปัญหาวนกลับ.....	8
2.5 แผนผังลำดับของการหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	9
2.6 กราฟค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ $f(x)$ บนโดเมน x	12
2.7 การจำแนกกลุ่มวิธีการหาค่าที่เหมาะสม.....	13
2.8 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการหาค่าที่เหมาะสม.....	14
2.9 สถานะของฟังก์ชันเงื่อนไขที่จุดออกแบบ a, b, c และ d	15
2.10 วิธีการแบบต่าง ๆ สำหรับการหาทิศทางของการพุ่งเข้า.....	16
2.11 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขด้วย SUMT code.....	17
2.12 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ One-point Crossover.....	20
2.13 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ Two-point Crossover.....	21
2.14 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ Uniform Crossover.....	22
2.15 การกลายพันธุ์ (Mutation).....	22
2.16 ปัญหาขอบเขตของวัตถุที่เป็นฉนวน 2 ชนิด โดยกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าให้กับขอบเขต.....	25
2.17 การสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์สามเหลี่ยมบนขอบเขตที่มีศักย์ไฟฟ้าที่ขอบเขตทั้งสองด้าน.....	25
2.18 โครงตาข่ายอิลิเมนต์ที่ถูกต้องโดยอิลิเมนต์ทั้งหมดมีความสอดคล้องกัน.....	26
2.19 โครงตาข่ายอิลิเมนต์ที่ไม่ถูกต้องโดยอิลิเมนต์บางส่วนมีความไม่สอดคล้องกัน.....	26
2.20 โครงตาข่ายอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม.....	27
2.21 ต้นแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 2 มิติ.....	29
2.22 ต้นแบบสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าสมมาตรแบบที่ 1.....	30
2.23 ต้นแบบสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าสมมาตรแบบที่ 2.....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 ทฤษฎีคูบิกสไปลน์ (ก) การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น	31
(ข) การประมาณค่าในช่วงกำลังสอง	31
(ค) การประมาณค่าในช่วงกำลังสาม.....	31
2.25 เส้นกราฟการประมาณค่าในช่วงกำลังสอง.....	32
2.26 การทดสอบโปรแกรมโหนดเคลื่อนที่แบบคูบิกสไปลน์ตามแนวแกน x	34
2.27 การทดสอบโปรแกรมโหนดเคลื่อนที่แบบคูบิกสไปลน์ตามแนวแกน xy	35
2.28 (ก) Convex Hull.....	36
(ข) Voronoi Diagram.....	36
2.29 Delaunay Triangulation.....	36
2.30 ตำแหน่งขอบเขตการสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม.....	37
2.31 ขอบเขตของต้นแบบก่อนสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมด โดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม.....	37
2.32 โครงตาข่ายอิลิเมนต์สามเหลี่ยมที่สร้างด้วยโปรแกรมอัตโนมัติจากรูปที่ 2.30.....	38
2.33 โครงตาข่ายอิลิเมนต์สามเหลี่ยมที่สร้างด้วยโปรแกรมอัตโนมัติ (node 488, element 884).....	38
2.34 โครงตาข่ายอิลิเมนต์สามเหลี่ยมที่สร้างด้วยโปรแกรมอัตโนมัติ (node 718,element 1336).....	39
2.35 โครงตาข่ายอิลิเมนต์สามเหลี่ยมที่สร้างด้วยโปรแกรมอัตโนมัติ (node 452, element 801).....	39
3.1 โครงสร้างต้นแบบชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิจารณา.....	41
3.2 ขอบเขตของต้นแบบ 2 มิติขนาดเศษหนึ่งส่วนสี่ของโครงสร้างขั้วแม่เหล็ก.....	41
3.3 รูปขยายโครงตาข่ายสามเหลี่ยมของต้นแบบที่พิจารณาวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิม.....	42
3.4 (ก) รูปขยายโครงตาข่ายอิลิเมนต์บริเวณช่องอากาศและขั้วแม่เหล็กของต้นแบบ.....	43
(ข) รูปขยายโครงตาข่ายอิลิเมนต์วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิมตามแนวแกนอน x	43
3.5 (ก) รูปขยายโครงตาข่ายอิลิเมนต์โดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิมตามแนวแกนอนและ แนวแกนตั้ง $x - y$	43
(ข) รูปขยายโครงตาข่ายอิลิเมนต์โดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิมตามแนวแกนอนพร้อม กับแนวแกนตั้ง xy	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 (ก) ตำแหน่งโหนดทั้ง 6 ของแนวขั้วก่อนการเคลื่อนที่โหนด.....	44
(ข) ตำแหน่งโหนดทั้ง 6 ของแนวขั้วโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิม.....	44
(ค) ตำแหน่งโหนดทั้ง 6 ของแนวขั้วโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1.....	44
3.7 (ก) รูปขยายโครงตาข่ายบริเวณช่องอากาศและขั้วแม่เหล็กวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิม.....	45
(ข) รูปขยายโครงตาข่ายบริเวณช่องอากาศและขั้วแม่เหล็กวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ	45
3.8 (ก) รูปขยายโครงตาข่ายอิเลิเมนต์วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 ตามแนวแกน $x - y$	45
(ข) รูปขยายโครงตาข่ายอิเลิเมนต์วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 ตามแนวแกน xy	45
3.9 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1.....	46
3.10 โครงตาข่ายที่ได้มาจากโปรแกรมสร้างโครงตาข่ายอิเลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ.....	47
3.11 (ก) รูปขยายโครงตาข่ายอิเลิเมนต์บริเวณช่องอากาศและขั้วแม่เหล็กของต้นแบบ.....	48
(ข) รูปขยายโครงตาข่ายอิเลิเมนต์วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกนนอน x	48
3.12 (ก) รูปขยายโครงตาข่ายอิเลิเมนต์วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกนนอน $x - y$	48
(ข) รูปขยายโครงตาข่ายอิเลิเมนต์วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกนนอน xy	48
3.13 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2.....	49
3.14 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมออกแบบรูปทรงขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	50
4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ของต้นแบบ ที่พิจารณาก่อนที่จะเคลื่อนที่โหนด.....	54
4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D เปรียบเทียบ การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นก่อนที่จะเคลื่อนที่โหนด.....	54
4.3 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.33$ T โดยวิธีการโหนด เคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่าง ๆ.....	55
4.4 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนว แกน x แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.33$ T.....	55
4.5 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.34$ T โดยวิธีการโหนด เคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่าง ๆ.....	56
4.6 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนว แกน x แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.34$ T.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.35$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่าง ๆ.....	57
4.8 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.35$ T.....	57
4.9 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.36$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่าง ๆ.....	58
4.10 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.36$ T.....	58
4.11 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.37$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่าง ๆ.....	59
4.12 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.37$ T.....	59
4.13 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.33$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่าง ๆ.....	60
4.14 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.33$ T.....	60
4.15 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.34$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่าง ๆ.....	61
4.16 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.34$ T.....	61
4.17 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.35$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่าง ๆ.....	62
4.18 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.35$ T.....	62
4.19 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.36$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่าง ๆ.....	63
4.20 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.36$ T.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 เปรียบเทียบรูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.37$ T.....	74
4.38 รูปขยายการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.33$ T.....	75
4.39 ค่า B_c บริเวณช่องอากาศ D ของการออกแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.33$ T	75
4.40 รูปขยายการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.34$ T.....	76
4.41 ค่า B_c บริเวณช่องอากาศ D ของการออกแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.34$ T.....	76
4.42 รูปขยายการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.35$ T.....	77
4.43 ค่า B_c บริเวณช่องอากาศ D ของการออกแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.35$ T	77
4.44 รูปขยายการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.36$ T.....	78
4.45 ค่า B_c บริเวณช่องอากาศ D ของการออกแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.36$ T	78
4.46 รูปขยายการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.37$ T.....	79
4.47 ค่า B_c บริเวณช่องอากาศ D ของการออกแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.37$ T	79
5.1 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.34$ T โดยวิธีการโทนด เคลื่อนที่ในแนวแกน x	81
5.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ของต้นแบบที่ พิจารณาก่อนที่จะเคลื่อนที่โทนด.....	82
5.3 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ linear และ non-linear ของต้นแบบ.....	82

บทที่ 1

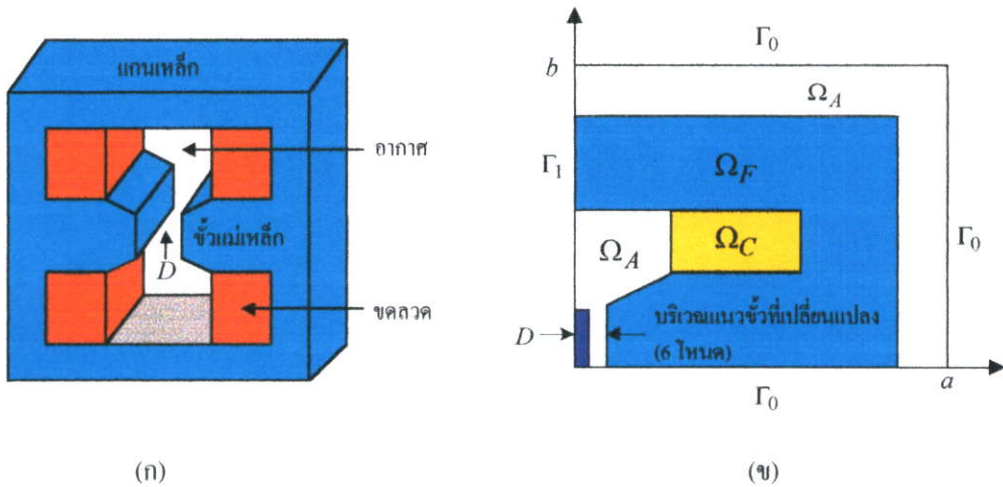
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่สำหรับการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นงานวิจัยที่พัฒนามาอย่างต่อเนื่อง [1-5] ปัญหาที่ออกแบบกำหนดให้เป็นสนามแม่เหล็กแบบสแตติก 2 มิติ ใช้หลักการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอร์มินิสติก (deterministic) เพื่อออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnet) โดยจะทำงานร่วมกับวิธีโหนดเคลื่อนที่ 3 แนวทางคือ ในแนวแกนนอน x (เคลื่อนที่โหนดในแกน x) ในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง $x-y$ (เคลื่อนที่โหนดในแกน x ก่อนและเคลื่อนที่โหนดในแกน y) และในแนวแกนนอนพร้อมกับแนวแกนตั้ง xy (เคลื่อนที่โหนดในแกน x และ y พร้อมกัน) ซึ่งจะทำให้รูปทรงขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบมีลักษณะเป็นฟันเลื่อยเล็กใหญ่ปะปนกัน (jagged shape) และโครงสร้างเอลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วที่ได้ไม่สมดุลย์กันทั้งสามด้านส่งผลให้การประมาณค่าศักย์แม่เหล็กในแต่ละเอลิเมนต์มีความคลาดเคลื่อน [6] ทั้งนี้เพราะการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โครงสร้างของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ดีและเหมาะสมจะต้องค่อนข้างสมดุลย์กันทั้งสามด้าน ในการใช้วิธีเชิงตัวเลขสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอร์มินิสติกจะทำให้ได้ผลเฉลยออกมาเป็น local คือยังไม่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด และในงานวิจัยที่ผ่านมากำหนดให้ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) คงที่ในการออกแบบ ซึ่งในความเป็นจริงค่า μ ของแกนเหล็กจะไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) โดยจะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเส้นโค้งกำหนดแม่เหล็ก ($B-H$ Curve) และโปรแกรมที่ใช้ออกแบบจะใช้ได้เฉพาะต้นแบบ วิทยานิพนธ์นี้ต้องการนำเสนอการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่เพื่อแก้ปัญหาดังที่กล่าวมา

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้เสนอแนวทางการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่เพื่อแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาแล้ว เป้าหมายของการออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้คือ การคำนวณหารูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะรูปทรงแนวขั้วราบ โคง์มนซึ่งจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B มีค่าเท่ากันตามที่ต้องการ ในบริเวณช่องว่างอากาศ D ที่พิจารณา รูปที่ 1.1 (ก) แสดงโครงสร้างต้นแบบชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิจารณา ในการออกแบบสามารถที่จะพิจารณาเพียงเศษหนึ่งส่วนสี่ของโครงสร้างโดยอาศัยคุณสมบัติแกนสมมาตรแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 (ข) โครงสร้างต้นแบบประกอบด้วย $\Omega = (0, a) \times (0, b) = (0, 0.12) \times (0, 0.10) \text{ mm}^2$



รูปที่ 1.1 (ก) โครงสร้างต้นแบบชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิจารณา

(ข) ขอบเขตของต้นแบบ 2 มิติขนาดเศษหนึ่งส่วนสี่ของ โครงสร้างขั้วแม่เหล็ก

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวทางการพัฒนาวิธี โหนดเคลื่อนที่เพื่อแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาคือ

1. รูปทรงของขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบในงานวิจัยที่อ้างถึง [1-5] จะมีลักษณะเป็นพื้นผิวเรียบใหญ่ไม่สมดุลปะปนกัน วิทยานิพนธ์นี้เสนอการออกแบบให้รูปทรงขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบมีลักษณะแนวขั้วราบโค้งมน (smooth shape)

2. โครงสร้างของอิเลเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วที่ได้จากการออกแบบในงานวิจัยที่อ้างถึง [1-5] มีลักษณะที่ไม่สมดุลทั้งสามด้าน ทำให้การประมาณค่าศักย์แม่เหล็ก [6] เกิดการผิดพลาด วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนออัลกอริทึม Triangle Reshape Mesh และ Automatic Mesh Generation มาจัดโครงสร้างอิเลเมนต์บริเวณแนวขั้วให้เหมาะสมทั้งสามด้าน

3. โปรแกรมที่นำเสนอในงานวิจัยที่อ้างถึง [1-5] ใช้ได้เฉพาะกับต้นแบบชุดแม่เหล็กไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนออัลกอริทึม Automatic Mesh Generation ในการสร้างอิเลเมนต์สามเหลี่ยมทั้งหมดโดยอัตโนมัติทำให้โปรแกรมสามารถประยุกต์ใช้ได้กับต้นแบบที่หลากหลาย

4. แนวการเคลื่อนที่โหนดบริเวณขั้วแม่เหล็กตามแนวแกน x หรือ y จากงานวิจัยที่อ้างถึง [1-5] มีขอบเขตที่ถูกกำหนดให้ไม่เปลี่ยนแปลงเพราะมีฉะนั้นอิเลเมนต์จะเกิดการทับซ้อนกัน ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอแนวทางการพัฒนาแก้ไขขอบเขตทุกครั้งที่มีการเคลื่อนที่โหนดในแนวแกน x หรือ y ซึ่งจะต้องมีการสร้างอิเลเมนต์ใหม่หมดทั้งต้นแบบ โดยนำอัลกอริทึม Automatic Mesh Generation มาใช้

5. วิธีเชิงตัวเลขสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัยที่อ้างถึง [1-5] มีลักษณะเป็นแบบคิโทมินิสติกซึ่งอาจจะทำให้ได้คำตอบออกมาเป็นลักษณะ local คือยังไม่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติก (stochastic) ซึ่งจะช่วยให้ได้คำตอบที่มีความเป็น global มากขึ้น

6. จากการออกแบบในงานวิจัยที่อ้างถึง [1-5] เป็นการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นโดยการกำหนดค่าความซึมซาบแม่เหล็กคงที่ ($\mu = 1000$) แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่า μ จะไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) โดยจะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเส้นโค้งก้านนิคมแม่เหล็ก ดังนั้นแนวทางการพัฒนาคือ การเพิ่มอัลกอริทึมในการปรับแต่งค่า μ ให้เหมาะสม

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่สำหรับการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพัฒนาโปรแกรมการออกแบบต่อมาจากงานวิจัยที่อ้างถึง [1-5] โดยมีสมมติฐานที่ต้องการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถที่จะออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่มีลักษณะแนวขั้วราบโค้งมนได้ การพัฒนาให้โปรแกรมมีความแม่นยำในการออกแบบและประยุกต์ใช้ได้กับต้นแบบที่มีความหลากหลาย ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอแนวทางการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่ 2 แบบคือ

1. วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปไลน์ (cubic spline) ใช้งานร่วมกับวิธีการเปลี่ยนรูปร่างอิทธิเมนท์ใหม่ (triangle reshape mesh)
2. วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปไลน์ (cubic spline) ใช้งานร่วมกับวิธีการสร้างโครงตาข่ายอิทธิเมนท์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ (automatic mesh generation)

การเคลื่อนที่โหนดแบบคิวบิกสไปไลน์จะทำให้แนวขั้วแม่เหล็กที่ได้มีลักษณะราบโค้งมน และการเปลี่ยนรูปร่างอิทธิเมนท์ใหม่เป็นการจัดเรียงโครงสร้างอิทธิเมนท์สามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วแม่เหล็กใหม่ให้มีลักษณะที่ค่อนข้างสมดุลกันทั้งสามด้าน ซึ่งจะทำให้การประมาณค่าศักย์แม่เหล็กมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และวิธีการสร้างโครงตาข่ายอิทธิเมนท์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติทุกครั้งที่มีการเคลื่อนที่โหนดจะทำให้ได้โครงตาข่ายอิทธิเมนท์ที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับต้นแบบได้อย่างหลากหลาย วิทยานิพนธ์นี้ยังได้นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบคิโทมินิสติกและสโตชาสติก (เจเนติก genetic) ว่าวิธีใดจะให้คำตอบที่แม่นยำกว่ากันในการออกแบบรูปร่างของขั้วแม่เหล็ก นอกจากนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้น

1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพัฒนาวิธีโทนครเคลื่อนที่ 2 แบบ โดยอาศัยทฤษฎีของการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิทอมินิสติก และสโตชาสติก มาใช้ในการหาค่าตำแหน่งในการเคลื่อนที่โทนครที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศตามที่ต้องการ วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก วิธีโทนครเคลื่อนที่แบบควิบิกสโพล์จะทำให้ได้รูปทรงของขั้วแม่เหล็กมีลักษณะที่ราบโค้งมน อัลกอริธึม triangle reshape mesh เป็นการจัดเรียงโครงสร้างอิลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วแม่เหล็กใหม่ให้ค่อนข้างสมดุลงทุกสามด้าน อัลกอริธึม automatic mesh generation เป็นการสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์สามเหลี่ยมทั้งหมดของต้นแบบโดยอัตโนมัติใช้หลักการของ voronoi diagram และ delaunay triangle ในการสร้างอิลิเมนต์สามเหลี่ยม

1.5 ขอบเขตการวิจัย

เป้าหมายของการออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้คือการหารูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B มีค่าที่เท่ากัน (ใกล้เคียงกัน) ในบริเวณช่องอากาศ D ที่พิจารณา โดยที่กำหนดให้ใช้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า $J = 3.3445 \text{ A/mm}^2$ และค่าความซึมซาบแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็ก $\mu = 1000\mu_0$ โดยจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบของวิธีโทนครเคลื่อนที่แบบเดิม [1-5] กับวิธีโทนครเคลื่อนที่ใหม่ทั้ง 2 แบบที่วิทยานิพนธ์นี้แนะนำเสนอตามแนวแกนการเคลื่อนที่ 3 แนวแกนคือ ในแนวแกนอน x ในแนวแกนอนและแนวแกนตั้ง $x-y$ และในแนวแกนอนพร้อมกับแนวแกนตั้ง xy มีการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิทอมินิสติกและสโตชาสติก และสุดท้ายจะเป็นการออกแบบรูปทรงขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) โดยการกำหนดค่า μ ให้ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยโดยมีการกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่าง ๆ เป็นลำดับดังนี้

บทที่ 2 จะกล่าวถึงแนวความคิดการออกแบบทางวิศวกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิธีโทนครเคลื่อนที่ทั้ง 2 แบบที่วิทยานิพนธ์นี้แนะนำเสนอ ทฤษฎีของการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิทอมินิสติก และสโตชาสติก (เจเนติก) ทฤษฎีวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ วิธีโทนครเคลื่อนที่แบบควิบิกสโพล์ และทฤษฎีการสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์สามเหลี่ยมทั้งหมดโดยอัตโนมัติ

บทที่ 3 จะกล่าวถึงวิธีโทนครเคลื่อนที่แบบเดิมซึ่งใช้ในงานวิจัยที่อ้างถึง [1-5] และหลักการของวิธีโทนครเคลื่อนที่ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอทั้ง 2 แบบคือ วิธีโทนครเคลื่อนที่แบบ 1 (วิธี

โหนดเคลื่อนที่แบบควิกสโพลน์ใช้งานร่วมกับวิธีการเปลี่ยนรูปร่างอิมเม้นท์ใหม่) และวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2 (วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบควิกสโพลน์ใช้งานร่วมกับวิธีการสร้างโครงตาข่ายอิมเม้นท์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ) การออกแบบรูปทรงของขั้วแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น และต้นแบบที่พิจารณารวมทั้งเงื่อนไขต่าง ๆ ในการออกแบบ

บทที่ 4 จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงผลการเปรียบเทียบรูปทรงของขั้วแม่เหล็กที่ได้ และค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศที่พิจารณาโดยใช้วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิม วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 และวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2 และการออกแบบรูปทรงของขั้วแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น

บทที่ 5 จะกล่าวถึงการสรุปผลการวิเคราะห์ผลงานวิจัยที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งเป็นการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่ใหม่มีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติมากยิ่งขึ้น และมีข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพิ่มเติมเพื่อเป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยที่ต่อเนื่องในอนาคต

บทที่ 2

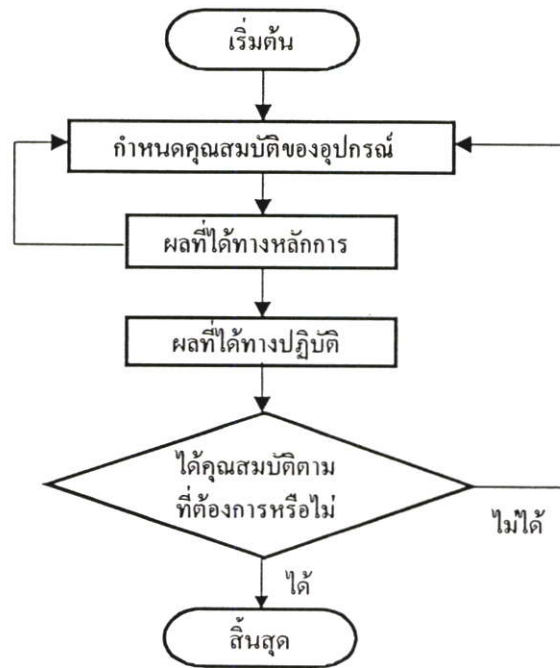
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

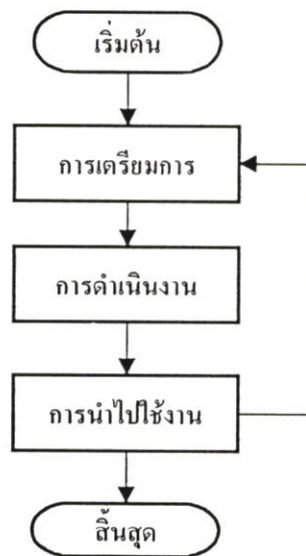
บทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่สำหรับการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า ปัญหาที่ใช้พิจารณาในการออกแบบกำหนดให้เป็นสนามแม่เหล็กแบบสเตติก 2 มิติ หลักการที่ใช้เป็นการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการออกแบบโดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในการคำนวณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ในการคำนวณหารูปร่างที่เหมาะสมจะใช้วิธีดิฟเฟอเรนเชียลและสโตชาสติก ส่วนวิธีการเคลื่อนที่โหนดจะใช้เทคนิคของคูบิกสไปลน์เพื่อให้แนวขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบมีลักษณะราบและโค้งมน และในที่สุดท้ายจะเป็นการกล่าวถึงการเปลี่ยนรูปร่างอิลิเมนต์ใหม่และการสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ

2.2 ขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม

แนวความคิดโดยทั่วไปของการออกแบบทางด้านวิศวกรรมจะมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยข้อกำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ต้องการออกแบบ (device specification) การพิจารณาผลที่ได้จากหลักการทางทฤษฎี (conceptual solution) การพิจารณาผลที่ได้จากทางปฏิบัติ (practical solution) และการตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบแล้ว จะเห็นได้ว่าผู้ออกแบบสามารถพิจารณาเปลี่ยนแปลงแก้ไขแนวทางการออกแบบได้ระหว่างขั้นตอนของการออกแบบจนทำให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ [1] ในปัจจุบันการออกแบบอุปกรณ์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะนิยมใช้ระบบ CAD (Computer Aided Design) เข้ามาช่วยในกระบวนการออกแบบ จากรูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการออกแบบรูปร่างของอุปกรณ์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ระบบ CAD ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ ขั้นตอนแรกเรียกว่าการเตรียมการ (pre-processing) ซึ่งเป็นส่วนที่กำหนดรูปแบบคุณลักษณะของอุปกรณ์เช่น รูปร่าง และขนาดของอุปกรณ์ วัสดุที่ใช้ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ เป็นต้น ในขั้นตอนที่สองเรียกว่าการดำเนินงาน (processing) ซึ่งเป็นส่วนที่กำหนดสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของอุปกรณ์ซึ่งสามารถแก้สมการหาค่าต่าง ๆ ได้โดยวิธีเชิงตัวเลขเช่น วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ เป็นต้น ในขั้นตอนสุดท้ายเรียกว่าการนำไปใช้งาน (post-processing) ซึ่งเป็นส่วนที่นำผลลัพธ์ที่ได้ไปพิจารณาหาค่าต่าง ๆ เช่น ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก การกระจายของสนามแม่เหล็ก แรงที่เกิดขึ้น เป็นต้น ในกรณีที่ถ้าผลที่ได้จากการออกแบบยังไม่ได้ตามความต้องการ ผู้ออกแบบสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในขั้นตอนการเตรียมการได้ใหม่จนทำให้ได้ตามเป้าหมายที่กำหนด



รูปที่ 2.1 แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม



รูปที่ 2.2 แผนผังขั้นตอนการออกแบบรูปร่างของอุปกรณ์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ระบบ CAD

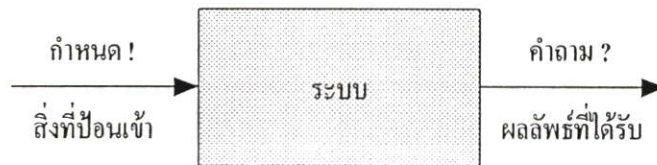
2.3 หลักการพื้นฐานการหาค่าที่เหมาะสม

การหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นเนื้อหาวิชาในสาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์ที่มีความสำคัญ [7] ในการวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาต่าง ๆ ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์มักจะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ คำว่าระบบในที่นี้หมายถึง สิ่งที่ต้องการทำการศึกษา หรืออาจจะ

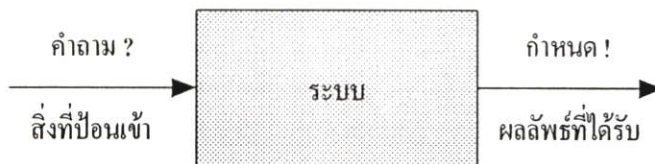
กล่าวว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นจะถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนของระบบเพื่อศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ของระบบ โดยที่เราไม่ต้องทำการศึกษากับระบบจริง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีข้อจำกัดบางอย่างหรือเป็นไม่ได้ในกรณีที่ต้องทำการศึกษากับระบบจริง

2.3.1 การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาวนกลับ

การแก้ปัญหาโดยตรง (direct problem solving) คือการพิจารณาปัญหาเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อสิ่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป หรือในภาวะคงตัวว่าผลลัพธ์ที่ได้รับจะเป็นอย่างไร เมื่อสิ่งที่ป้อนเข้าถูกกำหนด ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.3 พิจารณาตามทิศทางของลูกศรจะพบว่าสิ่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะถูกกำหนด จากนั้นเราต้องการทราบอะไรคือสิ่งที่ได้จากระบบ และเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ สมมติว่าระบบในรูปที่ 2.3 สามารถอธิบายได้โดยสมการง่าย ๆ คือ $z = x + y$ จะเห็นว่า สิ่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบคือ x และ y ในขณะที่ผลลัพธ์ที่ได้รับจากระบบคือ z ถ้าเรากำหนดให้ $x=10$ และ $y=20$ เราสามารถคำนวณหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ได้รับจากระบบคือ $z = 30$



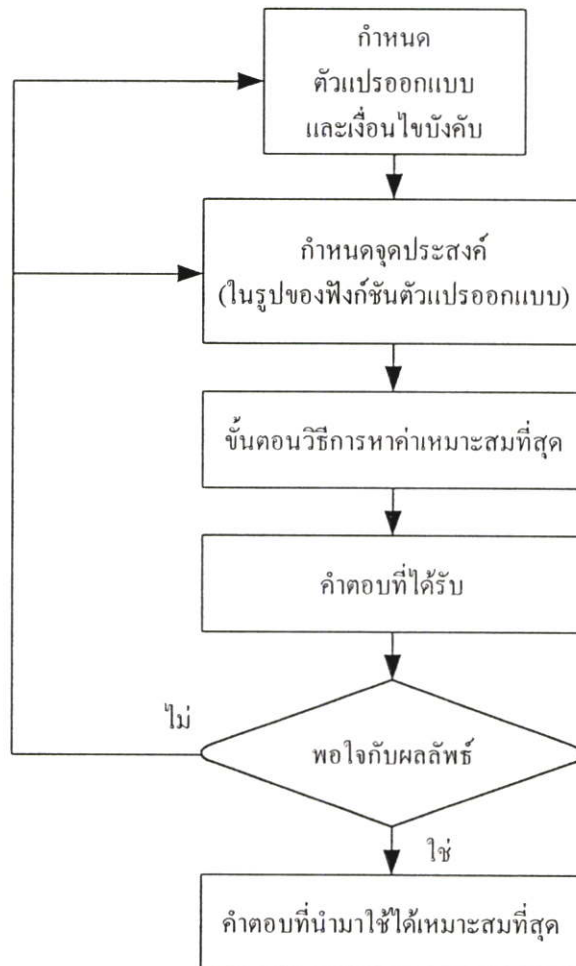
รูปที่ 2.3 การแก้ปัญหาโดยตรง



รูปที่ 2.4 การแก้ปัญหาวนกลับ

การแก้ปัญหาวนกลับ (inverse problem solving) ในทางตรงกันข้ามกับการแก้ปัญหาโดยตรง การแก้ปัญหาวนกลับเป็นการพิจารณาโจทย์ปัญหาโดยที่จะกำหนดสิ่งที่ต้องการออกจากระบบ คำถามก็คืออะไรคือสิ่งที่ต้องป้อนเข้าสู่ระบบ เพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจให้พิจารณาจากรูปที่ 2.4 โดยสมมุติอีกครั้งว่าถ้าระบบคือ $z = y + x$ ถ้าเรากำหนดให้ $z=30$ เราจะมีคำถามว่า x และ y ควรจะเป็นอย่างไร ในกรณีนี้คำตอบที่เป็นไปได้มีมากกว่าหนึ่งคำตอบ ไม่ใช่เพียงคำตอบ $x = 10$

และ $y = 20$ เท่านั้น โดยถ้าเรากำหนดเงื่อนไขที่ว่า $y = 5$ เราจะได้รับ $x = 25$ การแก้ปัญหาในลักษณะนี้มักจะท้าทายในการหาคำตอบกว่าการแก้ปัญหาโดยตรง ด้วยสาเหตุที่ว่าปัญหาเหล่านี้มักมีความยุ่งยากกว่าขณะเดียวกันมักจะเป็นระบบที่ถูกอธิบายด้วยฟังก์ชันเป็นแบบไม่เชิงเส้น แนวทางหนึ่งของการแก้ปัญหาเหล่านี้เพื่อบรรลุผลลัพธ์ของระบบที่ต้องการ โดยเหมาะสมที่สุด ในขณะเดียวกันก็ต้องสอดคล้องเงื่อนไขบางอย่างที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งเรานิยมเรียกกันว่า การหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization) ของผลลัพธ์



รูปที่ 2.5 แผนผังลำดับของการหาค่าเหมาะสมที่สุด

การตัดสินใจในปัญหาการออกแบบเพื่อกำหนดปัจจัยป้อนเข้าต่าง ๆ ให้เหมาะสมที่สุดนั้นก็ เป็นลักษณะหนึ่งของการแก้ปัญหาวนกลับ บ่อยครั้งที่ต้องประสบกับปัญหาที่จะพยายามทำความเข้าใจในขั้นตอนวิธีการ การหาค่าความเหมาะสมที่สุด ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากขั้นตอนหนึ่ง เพื่อใช้ในการตัดสินใจในการบรรลุจุดประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ โดยขณะที่มีเงื่อนไขบังคับไม่มากก็น้อย

ที่ต้องทำให้มีความสอดคล้องกับระบบด้วย เช่น วิศวกรผู้หนึ่งต้องการออกแบบชิ้นงานอันหนึ่งโดยที่ต้องการให้ต้นทุนสำหรับการผลิตต่ำที่สุด ซึ่งถ้าพิจารณาปัญหาในเชิงวิศวกรรมแล้วพบว่า ถ้าขนาดของชิ้นงานเล็กเกินไปอาจก่อให้เกิดความเสียหาย แต่ถ้าพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า ถ้าให้ขนาดของชิ้นงานใหญ่เกินไปก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงสำหรับขนาดที่เกินความจำเป็นนี้ คำถามก็คือ อะไรเป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าของต้นทุนต่ำที่สุด (อาจจะกำหนดให้เป็นจุดประสงค์ที่ต้องการ) โดยที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย (อาจจะกำหนดให้เป็นเงื่อนไขบังคับที่ต้องสอดคล้อง) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าปัจจัยป้อนเข้าสู่ระบบที่เรากำลังอยู่ในปัญหาการออกแบบนั้นมักมีมากกว่าหนึ่งตัวแปร ซึ่งไม่เหมือนปัญหาที่ยกมาข้างต้นนี้ที่เราอาจจะใช้การเขียนกราฟระหว่างขนาดของชิ้นงานกับต้นทุนในการแก้โจทย์นี้ได้ แต่การแก้ปัญหาด้วยวิธีการเชิงกราฟนี้ หรือแม้แต่การใช้ความชำนาญในการคาดเดาคำตอบ อาจจะไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะแก้โจทย์ปัญหาการออกแบบสำหรับหลายตัวแปรพร้อมทั้งมีเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย ดังนั้นการใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยระเบียบขั้นตอนวิธีการจะใช้หลักการของการคำนวณอย่างมีระบบแบบแผนและมีประสิทธิภาพ และเมื่อถูกนำไปใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก็จะได้รับคำตอบที่รวดเร็วและคล่องตัวมาก จากรูปที่ 2.5 แสดงแผนผังลำดับของการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยทั่วไปก่อนที่จะดำเนินการขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด จะเริ่มจากการพิจารณาและทำความเข้าใจปัญหาเสียก่อน เมื่อจุดประสงค์ของปัญหาถูกกำหนดขึ้นอย่างคร่าว ๆ การตั้งโจทย์ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดก็จะเริ่มขึ้น โดยเริ่มจากการกำหนดตัวแปรออกแบบ และเงื่อนไขบังคับ ต่อจากนั้นจะเป็นการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์

2.3.2 ตัวแปรออกแบบ (Design variables)

ตัวแปรออกแบบหมายถึง ตัวแปรที่สามารถใช้ในการปรับเปลี่ยน หรือควบคุมในขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแล้วทำให้เป้าหมายหรือจุดประสงค์เกิดการเปลี่ยนแปลงได้เช่น ตัวอย่างข้างต้น ขนาดของชิ้นงานจะเป็นตัวแปรออกแบบ จะเห็นได้ว่าขนาดของชิ้นงานจะมีผลต่อต้นทุน โดยทำให้ค่าของต้นทุนลดลงหรือเพิ่มขึ้นได้ โดยปกติปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดมักเกี่ยวข้องกับตัวแปรออกแบบมากกว่าหนึ่งตัวแปร ดังนั้นสิ่งที่สำคัญคือการคัดเลือกตัวแปรออกแบบที่มีผลต่อฟังก์ชันจุดประสงค์ของการออกแบบให้มากที่สุด โดยอาจจะกำจัด หรือให้ตัวแปรออกแบบที่ไม่สำคัญเป็นค่าคงที่ตลอดการดำเนินการหาค่าเหมาะสมที่สุด แต่การกำหนดนี้ได้ต้องขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ออกแบบว่าเข้าใจปัญหามากน้อยเพียงใด โดยควรลดจำนวนตัวแปรออกแบบให้น้อยที่สุดเนื่องจากประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการได้มาซึ่งคำตอบในขั้นตอนวิธีการมักจะลดลงและยังเพิ่มความยุ่งยากเป็นทวีคูณ เมื่อจำนวนตัวแปรออกแบบเพิ่มมากขึ้น

2.3.3 เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

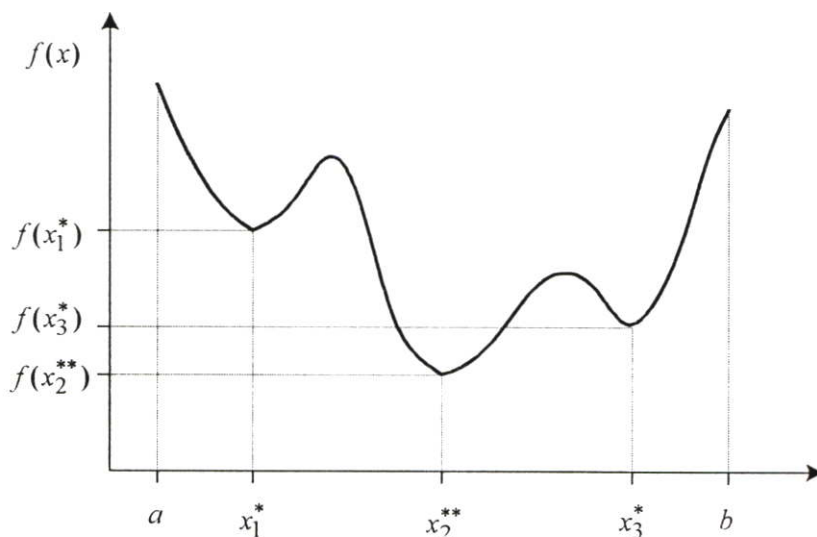
หลังจากที่ได้ทำการเลือกตัวแปรออกแบบของปัญหาได้แล้วจะพบว่าตัวแปรออกแบบจะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันหรือกับตัวพารามิเตอร์อื่น ๆ โดยมากจะมาจากการที่ต้องสอดคล้องกับข้อเท็จจริงต่าง ๆ ทางกายภาพ ทางเคมี หรือพฤติกรรมอื่น ๆ ของระบบแล้วแต่กรณี ดังตัวอย่างที่นำเสนอมาข้างต้น ชิ้นงานที่มีขนาดต่างกันจะมีความสามารถในการรับภาระของแรงแตกต่างกันไป เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุ สิ่งเหล่านี้ถูกเรียกว่าเงื่อนไขบังคับในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้การจำกัดด้วยทรัพยากรต่าง ๆ เป็นต้น คนงาน เวลา วัสดุ ก็มักสร้างเป็นเงื่อนไขบังคับของปัญหาได้ด้วยเช่นกัน ในการกำหนดเงื่อนไขบังคับนี้จะขึ้นอยู่กับความชำนาญเฉพาะด้านของผู้ออกแบบที่จะพิจารณาว่าสิ่งใดเป็นเงื่อนไข ในบางกรณีเงื่อนไขบังคับสามารถถูกเขียนในรูปของสมการ หรืออสมการได้โดยง่าย แต่บางกรณีก็อาจจะไม่สามารถที่จะเขียนสมการ หรืออสมการได้โดยตรง เงื่อนไขบังคับประกอบด้วยเงื่อนไขบังคับแบบสมการ และแบบอสมการ (อาจจะเป็นอสมการแบบมากกว่าหรือเท่ากับ หรืออสมการแบบน้อยกว่าหรือเท่ากับ)

2.3.4 ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function)

หลังจากการกำหนดตัวแปรออกแบบและเงื่อนไขบังคับแล้ว จะเป็นการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ในเทอมของตัวแปรออกแบบและพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยส่วนใหญ่แล้วฟังก์ชันจุดประสงค์จะเกี่ยวข้องกับการหาค่าต่ำสุด หรือการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชันจุดประสงค์ เช่นการหาค่าต่ำสุดของขนาดชิ้นงานในตัวอย่างข้างต้น จุดประสงค์อาจจะแสดงเป็นปริมาณ หรือเป็นจำนวนตัวเลขได้ง่าย แต่ก็มีบางจุดประสงค์ที่ไม่สามารถจำแนกให้เห็นออกเป็นปริมาณได้ เช่น การออกแบบระบบช่วงล่างเพื่อความรู้สึกสบายที่สุดขณะที่กำลังนั่งบนรถยนต์โดยสาร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้การประมาณค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์จำเป็นต้องมีตัวแทนเป็นต้นว่าอาจจะกำหนดขนาดของการสิ้นเปลืองให้ฟังก์ชันจุดประสงค์แทน นอกจากนี้ในกรณีที่มีฟังก์ชันจุดประสงค์หลายฟังก์ชันที่ต้องถูกดำเนินการหาค่าเหมาะสมที่สุดเนื่องจากหลายเป้าหมายที่ต้องการ กรณีเหล่านี้จะค่อนข้างยุ่งยากอาจจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคและประสบการณ์ในการแก้ปัญหาเฉพาะหน้าเป็นกรณี ๆ ไปในการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นเพียงเครื่องมือในการออกแบบเท่านั้น ดังนั้นฟังก์ชันจุดประสงค์ควรที่จะถูกเลือกในทางที่จะทำให้วัตถุประสงค์บรรลุตามเป้าหมายที่วางไว้ในทิศทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดด้วย หลังจากได้รับคำตอบจากการดำเนินการขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแล้ว เราต้องทำการตรวจสอบคำตอบที่ได้รับก่อนนำไปใช้งานเป็นต้นว่าเป็นไปได้หรือไม่ที่จะนำไปปฏิบัติจริง เหมาะสมกับจุดประสงค์อื่นที่ไม่ได้มาพิจารณาด้วยหรือไม่ ถ้าคำตอบไม่สามารถนำไปใช้งานได้วิธีทางที่ง่ายต่อการแก้ไขคือควรกลับไปเปลี่ยนแปลงตัวแปรออกแบบ เงื่อนไขบังคับ ฟังก์ชันจุดประสงค์ หรือทั้งหมด จะพบว่าการกำหนดตัวแปรออกแบบ เงื่อนไขบังคับ และฟังก์ชันจุดประสงค์นั้นไม่มีข้อปฏิบัติที่แน่นอนตายตัวสำหรับปัญหาทุกปัญหา

2.3.5 จุดเหมาะสมที่สุด (Optimal Point)

ความหมายของจุดเหมาะสมที่สุดสามารถถูกกำหนดได้ดังนี้ สมมติว่ามีโดเมนที่กำลังพิจารณาของตัวแปร x โดยที่ x^* และ x^{**} เป็นจุดในโดเมน x นั้นด้วย จุด x^* จะถูกกล่าวว่าเป็นจุดเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ (local optimal point) ถ้าไม่มีจุดใดเลยในย่านใกล้เคียงที่ดีกว่าจุด x^* ขณะที่จุด x^{**} จะถูกกล่าวว่าเป็นจุดเหมาะสมที่สุดวงกว้าง (global optimal point) ถ้าไม่มีจุดใดเลยในโดเมน x นั้นที่ดีกว่า x^{**} สังเกตว่าในปัญหาการหาจุดต่ำสุดนั้น จุด x^* จะเป็นจุดต่ำสุดเฉพาะที่ ถ้าไม่มีจุดใดเลยในย่านใกล้เคียงกับจุด x^* นั้นซึ่งให้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์น้อยกว่าจุด x^* เช่นเดียวกันกับจุด x^{**} เป็นจุดต่ำสุดวงกว้าง ถ้าไม่มีจุดใดเลยในโดเมน x ซึ่งให้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์น้อยกว่าจุด x^{**} ให้พิจารณารูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ $f(x)$ บนโดเมน $x \in [a, b]$ เราจะเห็นว่า จุด x_1^* , x_2^{**} และ x_3^* เป็นจุดต่ำสุดเฉพาะที่ เพราะเมื่อพิจารณาค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์รอบ ๆ จุดเหล่านี้แต่ละจุดแล้วจะมีค่ามากกว่าค่าฟังก์ชันของจุดทั้งสามนั่นเอง ขณะที่จุด x_2^{**} ก็ยังเป็นจุดต่ำสุดวงกว้างด้วย เพราะค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่จุด x_2^{**} ในโดเมน x

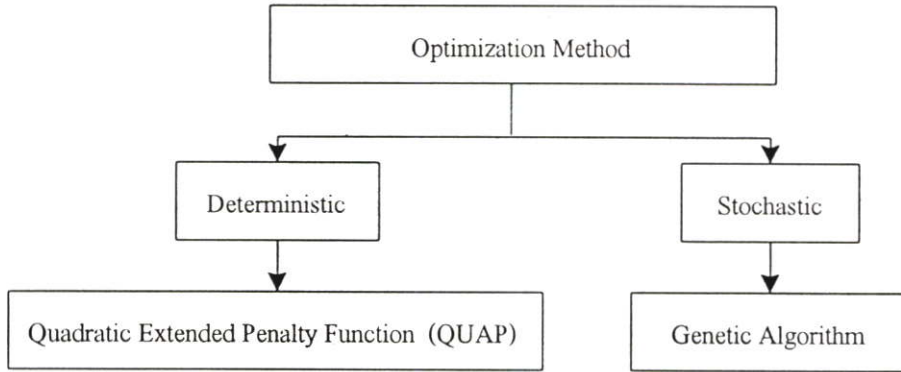


รูปที่ 2.6 กราฟค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ $f(x)$ บนโดเมน x

2.3.6 การจำแนกกลุ่มของวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการหาค่าที่เหมาะสม

วิธีเชิงตัวเลขสำหรับการหาค่าที่เหมาะสม (numerical optimization techniques) แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบคิโทมินิสติก และสโโคซาสติก ดังรูปที่ 2.7 วิธีเชิงตัวเลขทั้ง 2 แบบมีความแตกต่างกันโดยที่แบบคิโทมินิสติกจะเป็นการใช้พื้นฐานของเกรเดียน (gradient) ซึ่งเกรเดียนของ

ฟังก์ชันหลักจะเป็นข้อมูลในการเคลื่อนที่สู่จุดที่เหมาะสม สำหรับแบบสโตชาสติกเป็นการใช้ความน่าจะเป็น (probabilistic rules) เป็นพื้นฐานในการเข้าหาจุดที่เหมาะสม ในทางทฤษฎีแล้ววิธีแบบสโตชาสติกจะใช้หลักการที่ตรงกันข้ามกับแบบดิเทอมนิสติก แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะใช้เวลาสำหรับการประมวลผลมากกว่าแบบดิเทอมนิสติก [8]



รูปที่ 2.7 การจำแนกกลุ่มวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

2.4 การหาค่าที่เหมาะสมแบบ Quadratic Extended Penalty Function (QUAP)

โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข (constrained optimization techniques) สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } F(\mathbf{x}) \quad \text{Objective function} \quad (2.1)$$

Subject to

$$h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad \text{equality constraints} \quad (2.2)$$

$$g_k(\mathbf{x}) \leq 0 \quad k = 1, \dots, l \quad \text{inequality constraints} \quad (2.3)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, \dots, n \quad \text{side constraints} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ เป็นตัวแปรออกแบบ และเงื่อนไขตัวแปร (side constraints) เป็นขอบเขตที่ชัดเจนของตัวแปรออกแบบ โดยที่ x_i^L และ x_i^U เป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดของขอบเขตตามลำดับ ฟังก์ชันจุดประสงค์ และฟังก์ชันเงื่อนไข อาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (linear) หรือไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ก็ได้ ฟังก์ชันในสมการที่ 2.2 และ 2.3 เป็นสภาพเงื่อนไขต่าง ๆ ของตัวแปร และคุณลักษณะของระบบ และเงื่อนไขขอบเขตในสมการที่ 2.4 ถูกกำหนดให้เป็นขอบเขตของตัวแปรที่

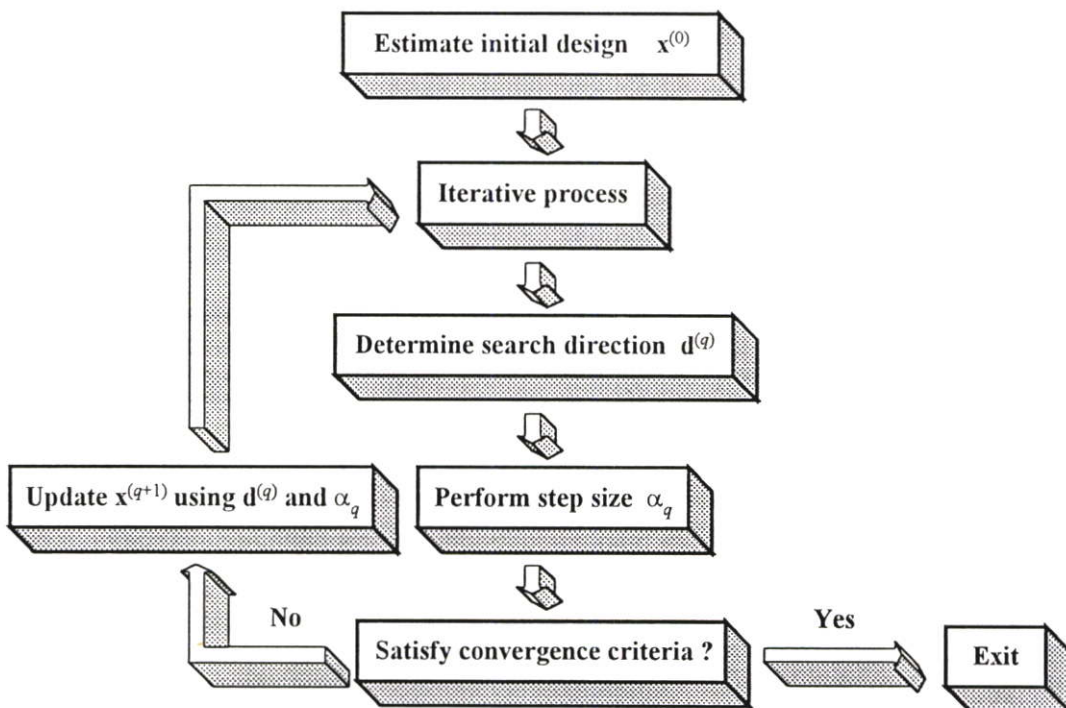
ออกแบบเพื่อที่จะป้องกันการได้ค่าตัวแปรที่เป็นไปไม่ได้ทางกายภาพ (non-physical values) การแก้ปัญหาที่มีเงื่อนไขอาจจะสามารถแปลงไปเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไข (unconstrained problem) ได้ โดยใช้ทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (transformation method) ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการหาค่าที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การหาทิศทางของการพุ่งเข้า d (search direction)
2. การกำหนดขนาดระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทาง d (step size)
3. พิจารณาการสิ้นสุดกระบวนการเมื่อได้คำตอบที่ยอมรับได้ (convergence criteria)

ขั้นตอนวิธีการเริ่มต้นจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรออกแบบ $x^{(0)}$ และอาศัยข้อมูลจากจุดเริ่มต้นทำการปรับเปลี่ยนค่าใหม่โดยการทำซ้ำ ๆ ดังรูปแบบสมการ

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

เมื่อ q เป็นลำดับการทำซ้ำ d เป็นทิศทางของการพุ่งเข้า และ α เป็นค่าขนาดระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทาง d



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

ในการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขจำเป็นต้องพิจารณาถึงสถานะของฟังก์ชันเงื่อนไข (status of constraints) ที่จุดออกแบบ จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันเงื่อนไข $g_k(x)$ จะแบ่งบริเวณที่ออกแบบเป็นบริเวณที่เป็นไปได้ (feasible region) และบริเวณที่เป็นไปไม่ได้ (infeasible region) ดังนั้นสถานะของฟังก์ชันเงื่อนไขสามารถกำหนดได้ดังนี้

1. ฟังก์ชันเงื่อนไขแอคทีฟ (active constraint)

ฟังก์ชันเงื่อนไข $g_k(x) \leq 0$ เรียกว่ามีสถานะแอคทีฟที่จุดออกแบบ $x^{(q)}$
ถ้า $g_k(x^{(q)}) = 0$

2. ฟังก์ชันเงื่อนไขอินแอคทีฟ (inactive constraint)

ฟังก์ชันเงื่อนไข $g_k(x) \leq 0$ เรียกว่ามีสถานะอินแอคทีฟที่จุดออกแบบ $x^{(q)}$
ถ้า $g_k(x)$ มีค่าเป็นลบ นั่นคือ $g_k(x^{(q)}) < 0$

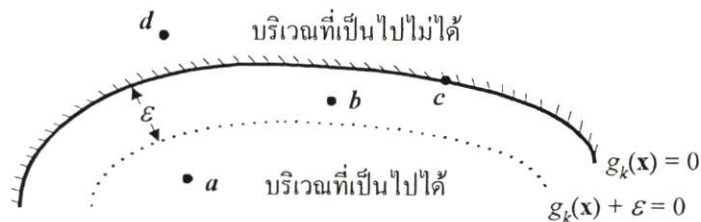
3. ฟังก์ชันเงื่อนไขไวโอลेट (violated constraint)

ฟังก์ชันเงื่อนไข $g_k(x) \leq 0$ เรียกว่ามีสถานะไวโอลेटที่จุดออกแบบ $x^{(q)}$
ถ้า $g_k(x)$ มีค่าเป็นบวก นั่นคือ $g_k(x^{(q)}) > 0$

4. ฟังก์ชันเงื่อนไข ε -แอคทีฟ (ε -active constraint)

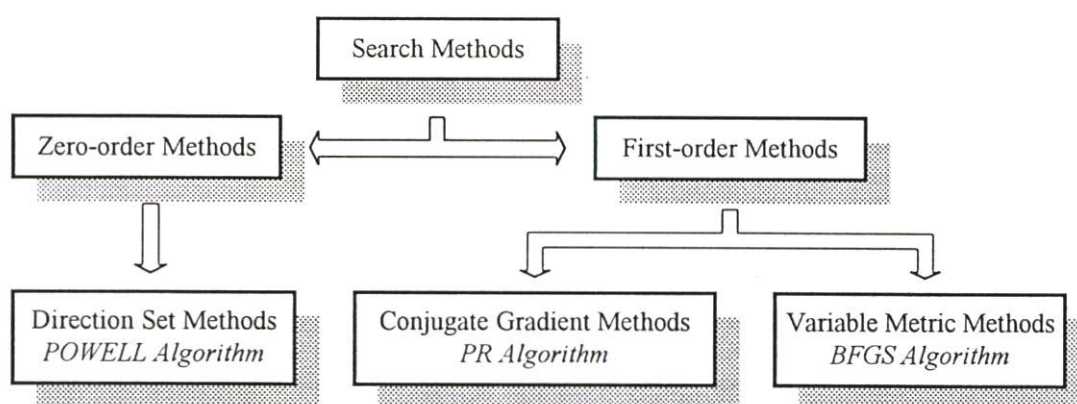
ฟังก์ชันเงื่อนไข $g_k(x) \leq 0$ เรียกว่ามีสถานะ ε -แอคทีฟที่จุดออกแบบ $x^{(q)}$
ถ้า $g_k(x^{(q)}) < 0$ แต่ $g_k(x^{(q)}) + \varepsilon \geq 0$ เมื่อ $\varepsilon > 0$ เป็นค่าน้อย ๆ
ซึ่งแสดงว่าจุดออกแบบอยู่ใกล้กับขอบเขตของบริเวณที่เป็นไปได้

สถานะของฟังก์ชันเงื่อนไข $g_k(x) \leq 0$ ที่จุดออกแบบต่าง ๆ สามารถอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.9 ดังนี้ ที่จุดออกแบบ a $g_k(x) < 0$ และ $g_k(x) + \varepsilon < 0$ จะมีสถานะอินแอคทีฟ ที่จุดออกแบบ b $g_k(x) < 0$ แต่ $g_k(x) + \varepsilon > 0$ จะมีสถานะ ε -แอคทีฟ ที่จุดออกแบบ c $g_k(x) = 0$ จะมีสถานะแอคทีฟ ที่จุดออกแบบ d $g_k(x) > 0$ จะมีสถานะไวโอลेट



รูปที่ 2.9 สถานะของฟังก์ชันเงื่อนไขที่จุดออกแบบ a, b, c และ d

ในวิทยานิพนธ์นี้การหาค่าที่เหมาะสมแบบดิทอมินิสติกเลือกวิธีการเปลี่ยนรูปแบบ (transformation) ซึ่งเป็นการใช้พื้นฐานของเกรเดียนเป็นข้อมูลในการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดที่เหมาะสม ขั้นตอนการทำงานของวิธีการนี้เป็นการนำเอาฟังก์ชันจุดประสงค์และฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับมารวมกันเป็นฟังก์ชันจุดประสงค์แปลง (pseudo objective function) ซึ่งจะมีการกำหนดฟังก์ชันพินอลตี้ P (penalty function) ที่อยู่ในเทอมของฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับ การกำหนดรูปแบบของฟังก์ชันพินอลตี้ P จะเลือกใช้หลักการที่เรียกว่า *SUMT* (sequential unconstrained minimization techniques) แบบ *QUAP* (quadratic extended penalty function) โดยมีรายละเอียดดังนี้ การหาทิศทางของการพุ่งเข้าและขนาดระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ ขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งของการหาค่าที่เหมาะสมคือ การหาทิศทางของการพุ่งเข้า และการกำหนดขนาดระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทางนั้น ในการหาทิศทางของการพุ่งเข้ามีวิธีการต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วิธีการแบบต่าง ๆ สำหรับการหาทิศทางของการพุ่งเข้า

วิธีการเปลี่ยนรูปแบบโดยหลักการ *SUMT* นี้เป็นการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขโดยการเปลี่ยนรูปแบบสมการเดิมให้เป็นแบบไม่มีเงื่อนไขซึ่งขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม *SUMT* code แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าเป็นวิธีการนำเอาฟังก์ชันจุดประสงค์ (สมการที่ 2.1) และฟังก์ชันเงื่อนไข (สมการที่ 2.2 และ 2.3) มารวมเป็นฟังก์ชันจุดประสงค์แปลงซึ่งจะมีการกำหนดฟังก์ชันพินอลตี้ P ที่อยู่ในเทอมของฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับดังสมการ

$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = F(\mathbf{x}) + P[\mathbf{h}(\mathbf{x}), \mathbf{g}(\mathbf{x}), \mathbf{r}] \quad (2.5)$$

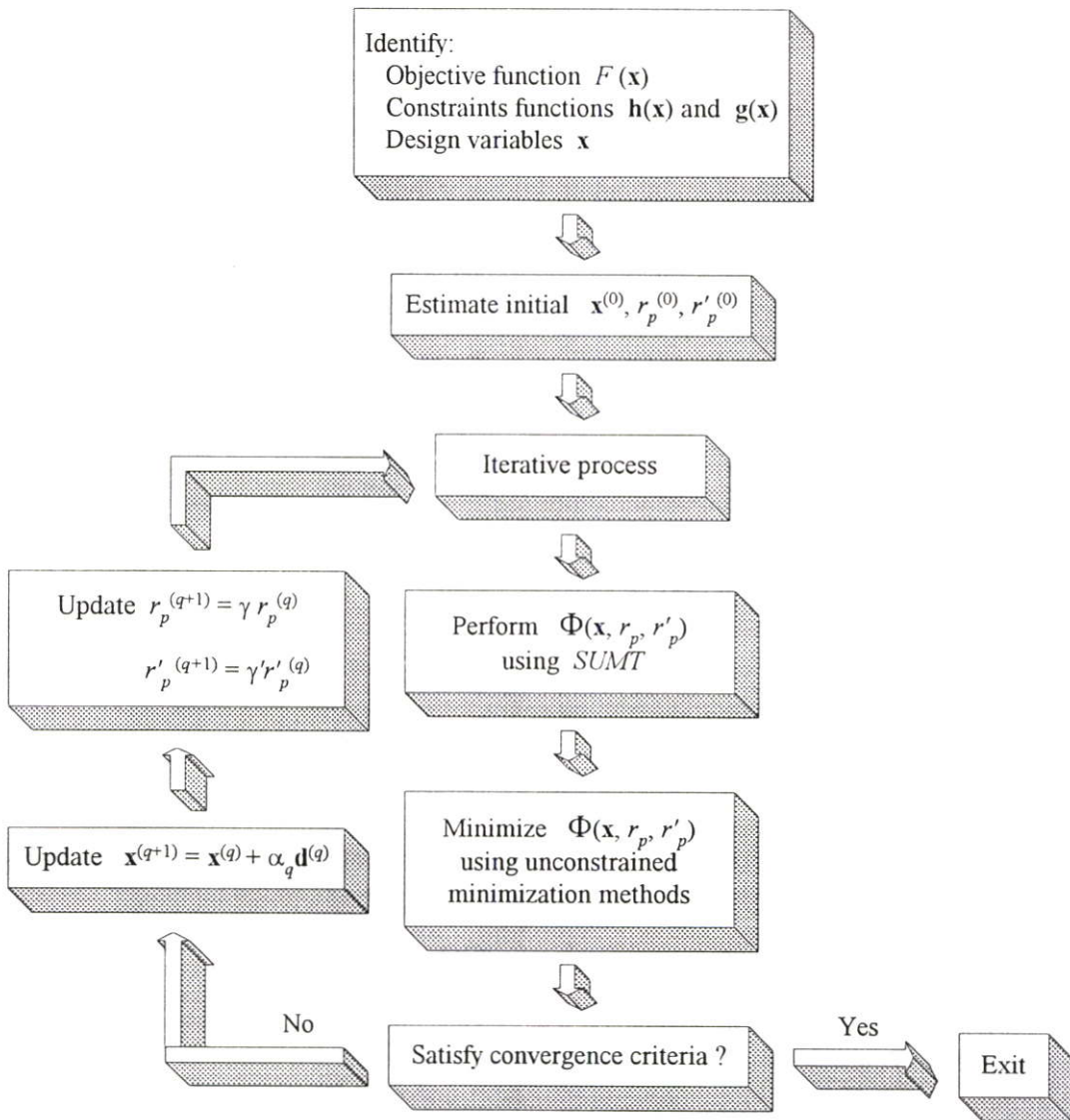
เมื่อ \mathbf{r} เป็นค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันพินอลตี้ ซึ่งต้องมีปรับเปลี่ยนค่าใหม่ในทุกลำดับการทำซ้ำ การกำหนดรูปแบบของฟังก์ชันพินอลตี้สามารถทำได้หลายลักษณะดังแสดงรูปที่ 2.6 ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้แบบ *QUAP* ซึ่งเป็นวิธีที่มีการใช้งานกันมากโดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$P[\mathbf{h}(\mathbf{x}), \mathbf{g}(\mathbf{x}), r_p, r'_p] = r'_p \sum_{k=1}^l \tilde{g}_k(\mathbf{x}) + r_p \sum_{j=1}^m [h_j(\mathbf{x})]^2 \quad (2.6)$$

$$\bar{g}_k(\mathbf{x}) = -\frac{1}{g_k(\mathbf{x})} \quad \text{if } g_k(\mathbf{x}) \leq \varepsilon_e \quad (2.7)$$

$$\bar{g}_k(\mathbf{x}) = -\frac{1}{\varepsilon_e} \left\{ \left[\frac{g_k(\mathbf{x})}{\varepsilon_e} \right]^2 - 3 \left[\frac{g_k(\mathbf{x})}{\varepsilon_e} \right] + 3 \right\} \quad \text{if } g_k(\mathbf{x}) > \varepsilon_e \quad (2.8)$$

กำหนดให้ r_p เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เริ่มต้นด้วยค่าน้อย ๆ และเพิ่มขึ้นทุกลำดับการทำซ้ำโดยใช้ค่าตัวคูณ γ ($\gamma > 1$) r'_p เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เริ่มต้นด้วยค่ามาก ๆ และลดลงทุกลำดับการทำซ้ำโดยใช้ค่าตัวคูณ γ' ($\gamma' < 1$) และกำหนดให้ ε_e เป็นค่าลบค่าน้อย ๆ



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขด้วย SUMT code

2.5 การหาค่าที่เหมาะสมแบบเจเนติก

การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบคิโทมิเนติก ขั้นตอนวิธีการมักประยุกต์ใช้หลักการที่ได้มาจากบทนิยามหรือความรู้พื้นฐานทางคณิตศาสตร์ในการหาจุดเหมาะสมที่สุดเคลื่อนจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งที่ดีกว่า แต่การหาค่าเหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีเจเนติก [9-10] ใช้หลักการที่ได้มาจากการสังเกตปรากฏการณ์ของกระบวนการในธรรมชาติแล้วมาประยุกต์ใช้บนพื้นฐานความเป็นไปได้ของจุดต่างๆ ในโดเมนของการหา ขั้นตอนวิธีการเจเนติกไม่ใช้ค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันประสงค์ในการเป็นข้อมูลเพื่อค้นหาจุดเหมาะสมที่สุด แต่ขั้นตอนวิธีการเจเนติกนี้จะใช้วิธีการเชิงความเป็นไปได้ในการอยู่รอดของสิ่งที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งกล่าวในหลักการของพันธุศาสตร์ (principles of genetics) โดยในราว ๆ ค.ศ 1960-1970 จอร์จ ฮอลแลนด์ เป็นผู้พัฒนาขั้นตอนวิธีการเจเนติก วิธีการเจเนติกเหมาะสำหรับการค้นหาค่าตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่บางครั้งอาจไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องแม่นยำ (exact optimum) แต่มีนักวิจัยหลายคนได้ใช้วิธีเจเนติกช่วยในการหาค่าให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงที่สุดแล้วจึงใช้วิธีการอื่นเพื่อหาค่าตอบที่ถูกต้องแม่นยำ วิธีเจเนติกมีการทำงานแบบนำเอากลุ่มตัวแปรมาทำเป็นรหัสโดยจะไม่รบกวนรูปแบบสมการฟังก์ชันและตัวแปรโดยตรงและยังมีการค้นหาคำตอบจากจำนวนโครโมโซมทั้งหมด ซึ่งเป็นโครโมโซมที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว ดังนั้นโอกาสของการค้นหาคำตอบได้จะมีมากขึ้นเทคนิคการค้นหาคำตอบอื่น เช่น gradient techniques ต้องใช้ผลการคำนวณหรือผลจากการวิเคราะห์หัดัดแปลงแล้ว เพื่อหาจุดอ้างอิงให้ช่วยค้นหาคำตอบต่อไป แต่วิธีการเจเนติกค้นหาคำตอบโดยการสุ่มตัวอย่างจากข้อมูลหรือค่าผลลัพธ์ที่ได้มาโดยไม่มีการดัดแปลง ซึ่งใช้เป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบต่อไปและนอกจากนี้วิธีเจเนติกยังใช้กระบวนการค้นหาทางสถิติใช้เป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบ หลักการพื้นฐานของวิธีเจเนติกเราจะกำหนดเซตของจุดเริ่มต้นจำนวนหนึ่งซึ่งอยู่ในโดเมนของการค้นหา เราเรียกเซตของจุดเหล่านี้ว่าประชากร (population) หรือเขียนในรูปสั้น ๆ ของเซตของจุดเริ่มต้นในรูป $P(0)$ จากนั้นเราคำนวณค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ของแต่ละจุดใน $P(0)$ โดยใช้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ได้จากการคำนวณนี้เราจะดำเนินการคัดเลือก (selection) จุดจำนวนหนึ่งจาก $P(0)$ โดยจุดที่มีค่าฟังก์ชันจุดประสงค์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับบรรดาจุดใน $P(0)$ มักจะถูกคัดเลือกและจัดให้อยู่ในแมตติงพูล (mating pool) $M(0)$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งจุดที่มีค่าฟังก์ชันจุดประสงค์สูงจะมีความเป็นไปได้สูงที่จะถูกคัดเลือก ขณะที่จุดที่มีค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ต่ำจะมีความเป็นไปได้น้อยที่จะถูกคัดเลือกตามลำดับนั่นเอง จากนั้นเราจะสร้างประชากรต่อไป $P(1)$ ด้วยการดำเนินการที่เรียกว่า crossover และ mutation ต่อ $M(0)$ การดำเนินการข้างบนนี้จะถูกกระทำซ้ำไปเรื่อย ๆ เพื่อก่อกำเนิดประชากรลูกหลานต่อไป $P(2), P(3), P(4), \dots$ จนกระทั่งเกณฑ์ที่ใช้ในการหยุดการกระทำซ้ำเป็นที่น่าพอใจ จุดประสงค์ของการดำเนินการคัดเลือก crossover และ mutation เพื่อสร้างประชากรใหม่ด้วยค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันจุดประสงค์สูงกว่าประชากรก่อนหน้านั้น แบบจำลองทางพันธุกรรมที่นำมาใช้ในวิธีเจเนติกถูกเรียกว่า

โครโมโซม (chromosome) ในโครโมโซมประกอบด้วยบิตจำนวน n บิต ค่าของบิตในแต่ละโครโมโซมที่นิยมใช้มี 3 แบบ คือ

1. บิต 0 หรือ 1 (binary coding)
2. บิตจำนวนเต็ม (integer coding)
3. บิตจำนวนจริง (real number coding)

ค่าบิตในแต่ละแบบนี้มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน ค่าบิตแบบบิต 0 หรือ 1 เป็นทฤษฎีที่ยอมรับและถูกพัฒนามานานแล้ว ข้อดีของแบบบิต 0 หรือ 1 คือ ลดขนาดของช่วงของการหาค่าที่เหมาะสม (optimization space) ลง แต่การใช้งานในบางอย่างทำให้เกิดการสูญเสียค่าความละเอียดของผลลัพธ์ได้ ความมีประสิทธิภาพของวิธีเจเนติกขึ้นอยู่กับตัวดำเนินการทางอัลกอริธึมพันธุซึ่งตัวดำเนินการทางอัลกอริธึมพันธุประกอบด้วย

1. การคัดเลือก (reproduction หรือ selection)
2. การสร้างโครโมโซมลูก (crossover)
3. การกลายพันธุ์ (mutation)
4. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของอัลกอริธึมพันธุ

2.5.1 การคัดเลือก (Reproduction หรือ Selection)

การคัดเลือกเป็นกระบวนการที่จะตัดสินว่าโครโมโซมใดจะคงอยู่ในรุ่น (generation) เพื่อนำไปคัดเลือกเป็นรุ่นต่อไป โดยจะตัดสินจากค่าฟังก์ชันของแต่ละโครโมโซม ความน่าจะเป็น (probability) ของแต่ละโครโมโซมที่จะถูกคัดเลือกซึ่งจะแทนด้วย $P_{select(i)}$ หาได้จากสมการที่ 2.9

$$P_{select(i)} = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^k f_j} \quad (2.9)$$

โดยที่ $f(i)$ คือค่าของฟังก์ชันของแต่ละโครโมโซม ส่วนจำนวนของโครโมโซมที่จะถูกคัดเลือก (num_i) เพื่อนำไปจับคู่และสร้างเป็นโครโมโซมลูกสามารถหาได้จากค่าสมการที่ 2.10

$$num_i = N * P_{select(i)} \quad (2.10)$$

โดยที่ N คือ จำนวนโครโมโซมทั้งหมด (population size) ในกระบวนการของการคัดเลือกนี้ บางครั้งอาจมีวิธีการบางส่วนที่แตกต่างกันไป เช่น จำนวนโครโมโซมที่จะถูกคัดเลือก (num_i) ซึ่งใน

งานวิจัยของ Randy L. Haupt ได้ใช้วิธีการคัดเอา 50% ของจำนวนโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันที่ดีที่สุดที่สุดของทั้งหมดมาเป็นโครโมโซมพ่อ-แม่ ส่วนในงานวิจัยของ Koji Shimojima , Yasuhisa Hasegawa และ Toshio Fukuda ได้ใช้วิธีการคัดเอาโครโมโซมจากโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันสูงกว่าค่าฟังก์ชันที่กำหนดไว้เท่านั้นแล้วจึงทำการสุ่มคัดเอาเพื่อเป็นโครโมโซมพ่อ-แม่ เป็นต้น

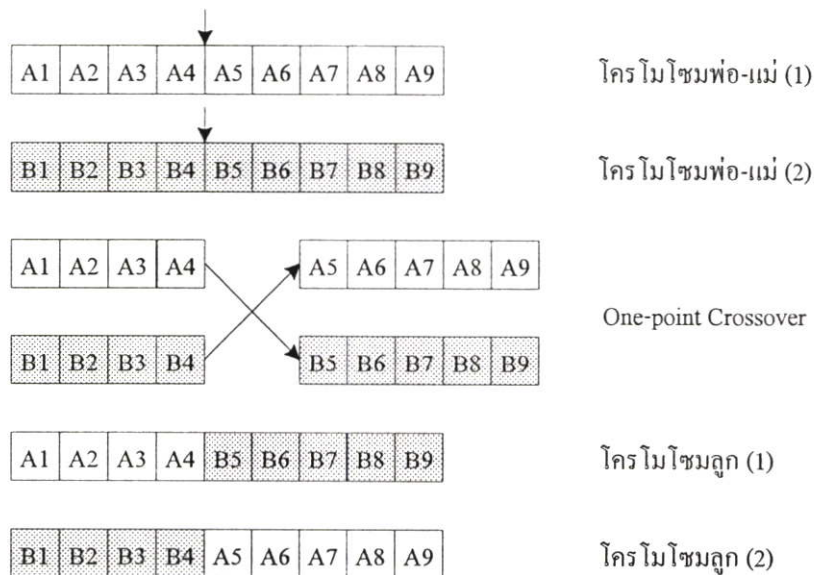
2.5.2 การสร้างโครโมโซมลูก (Crossover)

หลังจากกระบวนการคัดเลือกได้โครโมโซมพ่อ-แม่แล้ว การสร้างโครโมโซมลูกหรือการ crossover เป็นกระบวนการขั้นต่อไป ซึ่งโดยทั่วไปมี 3 แบบคือ

1. One-point Crossover
2. Two-point Crossover
3. Uniform Crossover

2.5.2.1 One-point Crossover

วิธีการของ One-point Crossover คือ ทำการสุ่มค่าตั้งแต่ 1 ถึง $n-1$ เพื่อหาตำแหน่งในการ crossover โดยที่ n คือค่าจำนวนบิตทั้งหมดในโครโมโซมดังตัวอย่างรูปที่ 2.12

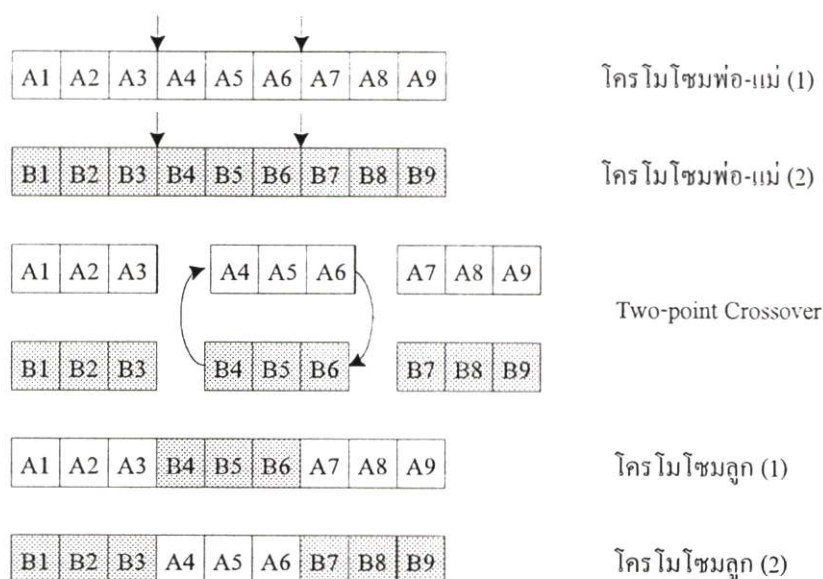


รูปที่ 2.12 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ One-point Crossover

จากรูปที่ 2.12 โครโมโซมพ่อ-แม่ (1) และโครโมโซมพ่อ-แม่ (2) นำมาสร้างโครโมโซมลูกแบบ One-point Crossover โดยมีตำแหน่งสำหรับการ Crossover ที่สุ่มได้คือ 4 ทำให้ได้โครโมโซมลูก 2 โครโมโซมที่มีการสลับกันของโครโมโซมพ่อ-แม่ ณ ตำแหน่งบิตที่ 4

2.5.2.2 Two-point Crossover

วิธี Two-point Crossover คือ ทำการสุ่มค่า 2 ค่า ตั้งแต่ 1 ถึง $n-1$ เพื่อหาค่าตำแหน่ง 2 ตำแหน่งในการ Crossover แล้วทำการสลับบิต โดยนำเอาบิตที่อยู่ระหว่างค่าตำแหน่งบิตที่สุ่มได้ 2 ตำแหน่งมาสลับกันระหว่างโครโมโซมพ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซมพ่อ-แม่ (2) เพื่อให้ได้โครโมโซมลูก 2 โครโมโซมดังตัวอย่างรูปที่ 2.13

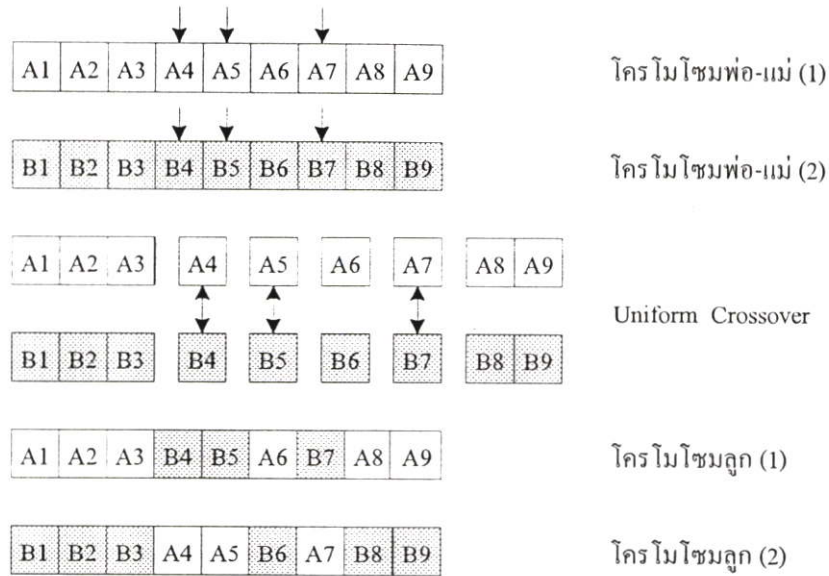


รูปที่ 2.13 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ Two-point Crossover

จากตัวอย่างรูปที่ 2.13 เป็นการสร้างโครโมโซมลูกแบบ Two-point Crossover ค่าตำแหน่งบิตที่สุ่มได้คือ 3 และ 6 โดยการสลับค่าบิตที่อยู่ระหว่าง 3 กับ 6 ของโครโมโซมพ่อ-แม่ ทั้ง 2 โครโมโซมจะได้โครโมโซมลูก 2 โครโมโซม

2.5.2.3 Uniform Crossover

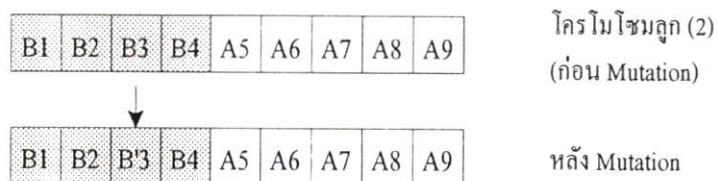
วิธี Uniform Crossover คือ กำหนดจำนวนบิตที่ต้องการแลกเปลี่ยนกันระหว่างโครโมโซมพ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซมพ่อ-แม่ (2) แล้วสุ่มตำแหน่งบิตที่ได้ โดยทั่วไปจำนวนบิตที่จะแลกเปลี่ยนกันจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 % ถึง 50 % ดังตัวอย่างรูปที่ 2.14 กำหนดให้จำนวนบิตที่ต้องการแลกเปลี่ยนมีค่าเท่ากับ 30 % ดังนั้น 30 % ของจำนวนบิตทั้งหมดคือ 9 บิต มีค่าเท่ากับ 3 บิต แล้วสุ่มตำแหน่งบิต 3 ตำแหน่ง โดยมีค่าที่สุ่มได้คือ 4, 5 และ 7 ดังนั้นโครโมโซมลูกที่ได้จะมีการแลกเปลี่ยนบิตกันระหว่างบิตที่ 4, 5 และ 7 ของโครโมโซมพ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซมพ่อ-แม่ (2)



รูปที่ 2.14 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ Uniform Crossover

2.5.3 การกลายพันธุ์ (Mutation)

หลังจากได้โครโมโซมลูกแล้วยังมีตัวดำเนินการอีกชนิดหนึ่งคือการกลายพันธุ์ โดยมีวิธีการคือทำการสุ่มโครโมโซมลูกแล้วสุ่มตำแหน่งบิตในโครโมโซมนั้นเพื่อเปลี่ยนค่าของบิตในโครโมโซมดังกล่าว เนื่องจากโครโมโซมลูกที่ได้จากการสร้างโครโมโซมลูกของโครโมโซมพ่อแม่มีส่วนประกอบของพันธุกรรมที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง การกลายพันธุ์จึงสามารถป้องกันข้อบกพร่องดังกล่าวได้ วิธีการกลายพันธุ์ของโครโมโซมลูกแสดงดังตัวอย่างรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การกลายพันธุ์ (Mutation)

จากรูปที่ 2.15 ตำแหน่งที่ถูกสุ่มมาให้มีการกลายพันธุ์ คือตำแหน่งบิตที่ 3 โดยมีค่าบิตเปลี่ยนจาก B3 เป็น B'3 โดยที่ถ้าค่าของบิตโครโมโซมที่ใช้เป็นแบบบิต 0 หรือ 1 ค่าของ B'3 เปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 หรือ 0 เป็น 1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าของ B3 แต่สำหรับค่าบิตที่เป็นแบบจำนวนเต็มหรือจำนวนจริง ค่าของ B'3 จะเป็นค่าที่เกิดจากการสุ่มค่าจำนวนเต็มสำหรับโครโมโซมที่มีค่าบิตเป็นจำนวนเต็มและเป็นจำนวนจริง

2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของวิธีเจเนติก

ในการใช้อัลกอริทึมพันธุซึ่งประกอบด้วยตัวดำเนินการต่าง ๆ ตามที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่าตัวดำเนินการที่ถือว่าเป็นตัวดำเนินการหลักของอัลกอริทึมพันธุได้แก่ ตัวดำเนินการสร้างโครโมโซมลูกและตัวดำเนินการกลายพันธุ์ เนื่องจากการสร้างโครโมโซมลูกเป็นการสร้างโครโมโซมขึ้นมาใหม่โดยจากโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกแล้ว ส่วนการกลายพันธุ์เป็นการเพิ่มโอกาสในการเปลี่ยนค่าของบิต ดังนั้น ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดผลการทำงานของอัลกอริทึมพันธุ ได้แก่ จำนวนโครโมโซมทั้งหมด (Population size, Popsiz) ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูก (Crossover rate หรือ Crossover Probability, P_c) และค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (Mutation rate หรือ Mutation Probability, P_m)

2.5.4.1 จำนวนโครโมโซมทั้งหมด (Population size, Popsiz)

จำนวนโครโมโซมทั้งหมดหรือ Popsiz คือ ค่าของจำนวนโครโมโซมทั้งหมดที่กำหนดขึ้นในกระบวนการของอัลกอริทึมพันธุ ยิ่งมีค่า Popsiz มากจะช่วยให้มีตัวเลือกมากขึ้นแต่ทั้งนี้การกำหนดค่า Popsiz ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดผู้ใช้เองหรือความซับซ้อนของงานที่จะนำมาค้นหาคำตอบ

2.5.4.2 ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูก (Crossover Probability, P_c)

ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูกหรือค่า P_c คือค่าความน่าจะเป็นที่จะทำให้เกิดการ Crossover ของโครโมโซมพ่อ-แม่ โดยทั่วไปจะกำหนดให้ P_c มีค่าอยู่ในช่วง 0.75 ถึง 0.95 ได้มีการเสนอแนะการหาจำนวนโครโมโซมที่จะถูกสร้างโครโมโซมลูก ไว้ดังสมการที่ 2.11

$$N_x = P_c * Popsiz \quad (2.11)$$

โดยที่ N_x คือจำนวนโครโมโซมที่จะถูกสร้างโครโมโซมลูก Popsiz คือ จำนวนโครโมโซมทั้งหมดหรืออีกวิธีหนึ่งของการคัดเลือกโครโมโซมที่ใช้ค่า P_c มาเป็นแนวทาง โดยในแต่ละโครโมโซมจะสุ่มค่า r โดยที่ r มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีเงื่อนไขว่า $r < P_c$ โครโมโซมนั้นจะถูกสร้างโครโมโซมลูก แล้วทำการจับคู่โครโมโซมแบบสุ่มเพื่อทำการสร้างโครโมโซมลูก

2.5.4.3 ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (Mutation Probability, P_m)

ความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ P_m เป็นปัจจัยอีกค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ ซึ่งทุกบิตในโครโมโซมลูกจะมีในการเกิดการกลายพันธุ์ โดยทั่วไปจะกำหนดให้ P_m มีค่าอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.1 และค่า P_m มักจะกำหนดให้มีค่าน้อย ๆ เพื่อให้โครโมโซมมีโอกาสถูกทำลายน้อยลง DeJong ได้เสนอแนะว่าค่า P_m ควรมีค่าแปรผกผันกับ Popsiz และ Hessner และ Manner ได้เสนอแนะการหาค่า P_m โดยประมาณดังสมการที่ 2.12 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกค่า P_m

$$P_m = \frac{1}{\text{Popsizem} * \sqrt{m}} \quad (2.12)$$

โดยที่ m คือ จำนวนบิตใน 1 โครโมโซมนอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะในการหาจำนวนบิตที่จะถูกกลายพันธุ์ดังสมการที่ 2.13

$$N_m = P_m * m * \text{Popsizem} \quad (2.13)$$

โดยที่ N_m คือ จำนวนบิตทั้งหมดที่จะถูกกลายพันธุ์ m คือ จำนวนบิตใน 1 โครโมโซม

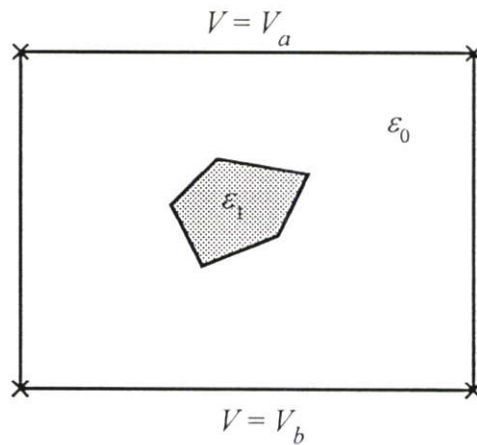
เมื่อได้ค่า P_m แล้ว ในแต่ละโครโมโซมลูกจะสุ่มค่า r โดยที่ r มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีเงื่อนไขว่า ถ้า $r < P_m$ โครโมโซมนั้นถูกเลือกให้มีบิตที่จะถูกกลายพันธุ์ จากที่กล่าวมาแล้วว่าตัวดำเนินการสร้างโครโมโซมลูก และการกลายพันธุ์ เป็นตัวดำเนินการหลักของอัลกอริธึมพันธุ การสร้างโครโมโซมลูกจึงถือว่าเป็นกระบวนการหลักที่ทำให้อัลกอริธึมพันธุเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง ดังนั้นค่า P_c จึงมักจะถูกกำหนดให้มีค่าสูง แต่วิธีการสร้างโครโมโซมลูกจะนำเอาโครโมโซมพ่อ-แม่ ที่อยู่ติดกันมาสร้างโครโมโซมลูกกัน หรือจะกระทำโดยการสุ่มเอาโครโมโซมพ่อ-แม่ มาสร้างโครโมโซมลูกกันก็ได้ และเช่นเดียวกันกับการกลายพันธุ์ ผู้ใช้อาจสุ่มเอาโครโมโซมลูกขึ้นมาเพื่อทำการกลายพันธุ์ หรือสุ่มจากค่า r ของแต่ละโครโมโซมเพื่อเปรียบเทียบกับค่า P_m ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของผู้ใช้เอง เนื่องจากการใช้อัลกอริธึมพันธุในการหาค่าบางครั้งผลที่ได้ อาจได้คำตอบที่ดีและรวดเร็ว แต่บางครั้งอาจใช้เวลานานและคำตอบที่ได้ ในแต่ละครั้งจะให้ค่าที่ต่างกัน Randy L.Haupt ได้เสนอแนะการใช้อัลกอริธึมเพื่อให้เกิดการลู่เข้าสู่คำตอบอย่างได้ผลมากขึ้น โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้คือ

1. เพิ่มจำนวนการกลายพันธุ์
2. เพิ่มจำนวนโครโมโซม (*Popsizem*)
3. เพิ่มเดิมเงื่อนไขหรือข้อบังคับ (Constraints) ของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์

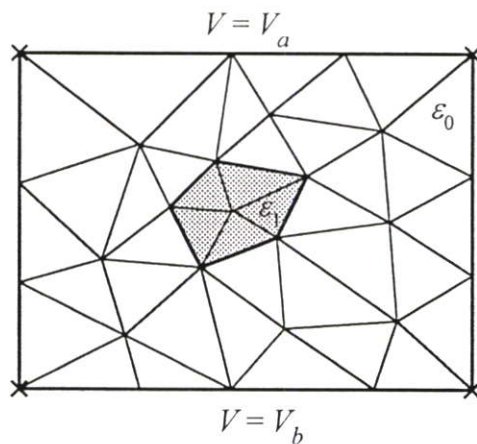
จากข้อแนะนำดังกล่าวอาจช่วยให้สามารถหาคำตอบได้ดีหรือเร็วขึ้นแต่ Randy L.Haupt ได้กล่าวถึงปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการเกิดการลู่เข้าสู่คำตอบ เช่นจำนวนบิตในโครโมโซม ยิ่งถ้ามีจำนวนบิตมาก ค่าความถูกต้องแม่นยำ (accuracy) ของคำตอบจะมีค่ามาก แต่การเกิดการลู่เข้าสู่คำตอบจะช้า หรือแม้แต่จำนวนโครโมโซม ถ้าจำนวนโครโมโซมมีค่ามากการหาค่าที่เหมาะสมจะมีตัวเลือกเพื่อค้นหาคำตอบได้มากขึ้น แต่จะทำให้เกิดการลู่เข้าสู่คำตอบช้า และต้องใช้หน่วยความจำในการทำงานของอัลกอริธึมดังกล่าวมาก

2.6 ทฤษฎีไฟไนต์อิลิเมนต์

วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เป็นวิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้ในการหาคำตอบของระบบที่เป็นสมการอนุพันธ์ของปัญหาที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตดังรูปที่ 2.16 โดยการแบ่งขอบเขตที่มีขนาดใหญ่ไปสู่ขอบเขตที่มีขนาดเล็กที่เรียกว่าอิลิเมนต์ ซึ่งประกอบขึ้นด้วยโหนดต่าง ๆ รูปแบบของอิลิเมนต์จะเป็นการสร้างโครงตาข่าย (mesh) บนขอบเขตที่ต้องการพิจารณาแสดงดังรูปที่ 2.17 การหาคำตอบระบบที่จะได้คำตอบที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นจะต้องทำให้อิลิเมนต์มีขนาดเล็ก โดยการสร้างโครงตาข่ายให้มีจำนวนอิลิเมนต์หนาแน่นมากขึ้น [11-12]



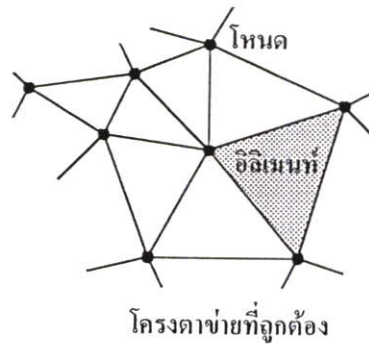
รูปที่ 2.16 ปัญหาขอบเขตของวัตถุที่เป็นฉนวน 2 ชนิด โดยกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าให้กับขอบเขต



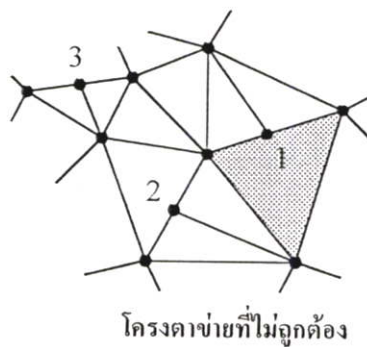
รูปที่ 2.17 การสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์สามเหลี่ยมบนขอบเขตที่มีศักย์ไฟฟ้าที่ขอบเขตทั้งสองด้าน

พิจารณาปัญหาของรูปที่ 2.16 กำหนดให้มีวัตถุที่เป็นฉนวนชนิดที่หนึ่ง (ϵ_0) ที่มีขอบเขตระหว่างระนาบทั้งสองมีศักย์ไฟฟ้าเป็น V_a และ V_b วัตถุที่เป็นฉนวนชนิดที่สอง (ϵ_1) อยู่

ขอบเขตมีขนาดเล็กลงเป็นส่วนย่อย ๆ ในกรณีนี้กำหนดให้สร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ที่มีรูปร่างเป็นรูปสามเหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 2.17 ให้สังเกตว่าในหนึ่งอิลิเมนต์ไม่สามารถมีวัตถุต่างชนิดกันได้ ขอบเขตระหว่างวัตถุสองชนิดจะต้องเป็นขอบเขตของอิลิเมนต์ด้วย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้อิลิเมนต์ที่มีรูปร่างเป็นรูปสามเหลี่ยมจะสามารถปรับแต่งรูปร่างของอิลิเมนต์ให้เข้ากับขอบเขตของปัญหาได้ง่ายขึ้น การสร้างโครงตาข่ายของอิลิเมนต์จะต้องมีการจัดเรียงอิลิเมนต์ที่มีความสอดคล้องกันดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 โครงตาข่ายอิลิเมนต์ที่ถูกต้องโดยอิลิเมนต์ทั้งหมดมีความสอดคล้องกัน



รูปที่ 2.19 โครงตาข่ายอิลิเมนต์ที่ไม่ถูกต้องโดยอิลิเมนต์บางส่วนมีความไม่สอดคล้องกัน

โครงตาข่ายอิลิเมนต์ในรูปที่ 2.19 มีลักษณะที่อิลิเมนต์บางส่วนมีความไม่สอดคล้องกัน โดยพิจารณาได้จากโหนดเป็นจุดที่ต่อระหว่างด้านของสามเหลี่ยม จะเห็นได้ว่าจะมีโหนดที่ไม่ตรงกันพอดีกับจุดยอดของสามเหลี่ยม (โหนดที่ 1, 2 และ 3) ตำแหน่งของโหนดในลักษณะนี้จำเป็นต้องหลีกเลี่ยงเพราะจะทำให้กระบวนการหาคำตอบด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ได้ผลที่ไม่ถูกต้อง ในบทนี้จะใช้วิธีการพื้นฐานที่เรียกว่าไฟไนต์อิลิเมนต์อันดับที่หนึ่ง ในอิลิเมนต์ชนิดนี้ฟังก์ชันของอิลิเมนต์ภายในจะแปรตามสมการ โพลีโนเมียล (polynomial) ดังนี้

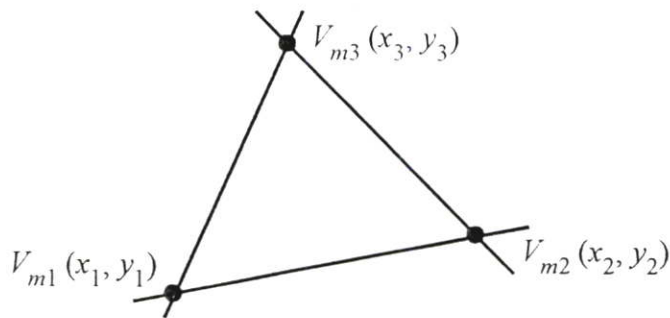
$$V_m(x, y) = a + bx + cy \quad (2.14)$$

เมื่อ V_m เป็นค่าศักย์แม่เหล็ก (magnetic potential) ที่โหนดใด ๆ

โพลีโนเมียลอันดับที่หนึ่งนี้เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากเพราะจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและสะดวก เหมาะสมสำหรับปัญหาที่ซับซ้อน เช่น การพิจารณาผลที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศที่มีขนาดเล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะหาคำตอบได้เนื่องจากต้องกระทำให้อิเล็กเมนต์มีความเหมาะสมและพอดีกัน

2.6.1 การประมาณฟังก์ชันของศักย์แม่เหล็กในแต่ละอิเล็กเมนต์

จากการแบ่งขอบเขตของปัญหาเป็นโครงตาข่ายอิเล็กเมนต์รูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 2.20 จะเห็นว่าอิเล็กเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้จะสามารถประมาณฟังก์ชันของศักย์แม่เหล็ก (magnetic potential) ที่จุดใด ๆ ในอิเล็กเมนต์ได้โดยการใช้สมการ 2.14 ดังนี้



รูปที่ 2.20 โครงตาข่ายอิเล็กเมนต์รูปสามเหลี่ยม

$$\text{โหนดที่ 1} \quad V_{m1}(x_1, y_1) = a + bx_1 + cy_1 \quad (2.15)$$

$$\text{โหนดที่ 2} \quad V_{m2}(x_2, y_2) = a + bx_2 + cy_2 \quad (2.16)$$

$$\text{โหนดที่ 3} \quad V_{m3}(x_3, y_3) = a + bx_3 + cy_3 \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.15 ถึง 2.17 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ V_{m3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.18 สามารถหาค่าของ a, b และ c ในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (x_2y_3 - x_3y_2) & (x_3y_1 - x_1y_3) & (x_1y_2 - x_2y_1) \\ (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ V_{m3} \end{Bmatrix} \quad (2.19)$$

เมื่อ $2A$ แทนค่า $\det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}$ และ A คือพื้นที่ของอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม

จากสมการที่ 2.19 นำไปแทนค่าในสมการที่ 2.18 จะได้เป็น

$$V_m(x, y) = [N_1(x, y) \quad N_2(x, y) \quad N_3(x, y)] \begin{Bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ V_{m3} \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

โดยที่ $[N]$ เรียกว่าเมตริกซ์ของการประมาณภายในอิลิเมนต์ (element interpolation matrix)

$$N_i(x, y) = \frac{1}{2A} (a_i + b_i x + c_i y) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3 \quad (2.21)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_1 &= (x_2y_3 - x_3y_2) & b_1 &= (y_2 - y_3) & c_1 &= (x_3 - x_2) \\ a_2 &= (x_3y_1 - x_1y_3) & b_2 &= (y_3 - y_1) & c_2 &= (x_1 - x_3) \\ a_3 &= (x_1y_2 - x_2y_1) & b_3 &= (y_1 - y_2) & c_3 &= (x_2 - x_1) \end{aligned} \quad (2.22)$$

โดยทั่วไปแล้ววิธีไฟไนต์อิลิเมนต์สามารถแสดงในรูปสมการดังนี้ [7]

$$[K] \{A\} = \{R\} \quad (2.23)$$

เมื่อ $[K]$ เป็นเมตริกซ์ $n \times n$ ของฟังก์ชันรูปร่าง (shape function) ซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับจำนวนโหนดทั้งหมด (n) ภายในขอบเขตพิจารณา $\{A\}$ เป็นค่าศักย์เวกเตอร์ (vector potential) และ $\{R\}$ เป็นเวกเตอร์ฟังก์ชันกระตุ้นที่กำหนด จากนั้นทำการแก้สมการเชิงเส้นในสมการที่ 2.23 แล้วนำค่า $\{A\}$

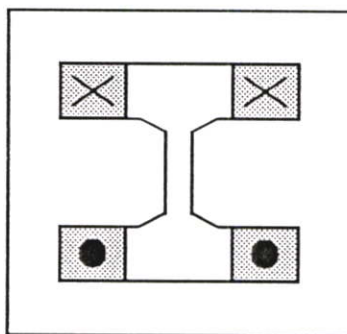
ที่ได้มาคำนวณค่าต่าง ๆ เช่น ค่าสนามแม่เหล็ก สมการของสนามแม่เหล็กแบบสแตติก 2 มิติ สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการ Poisson 2 มิติได้ดังนี้

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = \mu_0 J_z \quad (2.24)$$

เมื่อ J เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า μ_r เป็นค่าซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของตัวกลาง

2.6.2 การกำหนดขอบเขตของปัญหา

ในการวิเคราะห์ปัญหาสองมิติโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีลักษณะแกนสมมาตร สำหรับรูปร่างทางเรขาคณิตที่มีลักษณะเป็นแกนสมมาตรสามารถอธิบายหลักการดังนี้ ถ้ามองต้นแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังรูปที่ 2.21 ในแนวพื้นที่หน้าตัดโดยที่มีแกนความยาวมีค่าเป็นอนันต์ เมื่อหมุนรอบแกนหนึ่ง ๆ แล้วไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างจะเรียกว่ารูปร่างดังกล่าวมีความสมมาตร ดังนั้นในการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ของรูปร่างที่มีความสมมาตรนั้นสามารถที่จะลดจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ลงได้จะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณน้อยลง

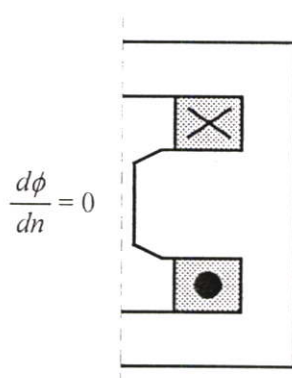


รูปที่ 2.21 ต้นแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 2 มิติ

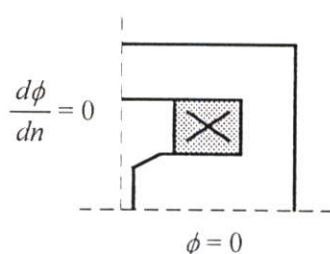
ในการกำหนดเงื่อนไขของขอบเขต (boundary conditions) สำหรับปัญหารูปร่างที่มีแกนสมมาตรสามารถใช้เงื่อนไขขอบเขตดิริชเลท (Dirichlet) หรือ นิวแมน (Neumann) ในการพิจารณาได้ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีดังนี้ สมมาตรแบบที่ 1 จากรูปที่ 2.22 จะเห็นว่าต้นแบบมีความสมมาตรกันทั้งหมดทั้งรูปร่างและทิศทางของฟังก์ชันกระตุ้น (function excitation) ซึ่งขอบเขตที่เกิดจากแกนสมมาตรจะใช้ขอบเขตนิวแมน $\frac{d\phi}{dn} = 0$

สมมาตรแบบที่ 2 จากรูปที่ 2.23 จะเห็นว่าต้นแบบมีความสมมาตรกันเฉพาะรูปร่าง แต่จะมีทิศทางของฟังก์ชันกระตุ้นของส่วนแกนสมมาตรข้างล่างตรงกันข้ามกับด้านบน ดังนั้นในการ

กำหนดขอบเขตที่เกิดแกนสมมาตรจะใช้ทั้งขอบเขตนิวแมนและดิริชเลท โดยที่แกนสมมาตรด้านซ้ายมือจะใช้ขอบเขตนิวแมนส่วนแกนสมมาตรด้านล่างจะใช้ขอบเขตดิริชเลทโดยกำหนดให้ $\phi = 0$



รูปที่ 2.22 ต้นแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสมมาตรแบบที่ 1



รูปที่ 2.23 ต้นแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสมมาตรแบบที่ 2

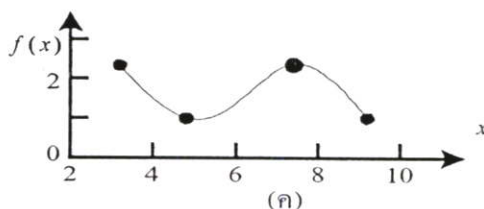
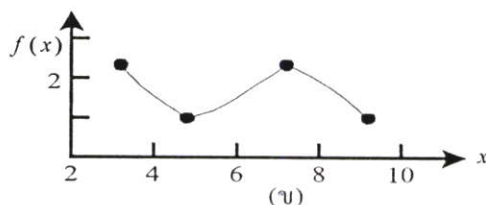
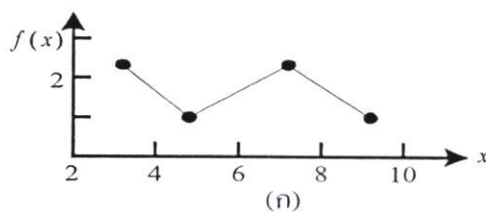
2.7 ทฤษฎีคูบิกสไปลน์

คูบิกสไปลน์เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ในการหาฟังก์ชันความสัมพัทธ์ของการประมาณค่าในช่วงกำลังสาม [13-15] จากปัญหาเรื่องรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่เป็นพื้นเลื่อยเล็กใหญ่ปะปนกัน ในการแก้ไขทำให้ขั้วแม่เหล็กมีลักษณะเรียบโค้งมนจะนำหลักการทางคณิตศาสตร์ การประมาณค่าในช่วงกำลังสามมาใช้งานร่วมกับวิธีโหนดเคลื่อนที่ 3 แนวแกนคือ ในแนวแกนนอน x (เคลื่อนที่โหนดในแกน x) ในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง $x-y$ (เคลื่อนที่โหนดในแกน x ก่อนและเคลื่อนที่โหนดในแกน y) และในแนวแกนนอนพร้อมกับแนวแกนตั้ง xy (เคลื่อนที่โหนดในแกน x และ y พร้อมกัน) เพื่อให้แนวขั้วแม่เหล็กที่ได้มีลักษณะราบโค้งมน ซึ่งแบ่งออกเป็นการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น การประมาณค่าในช่วงกำลังสอง การประมาณค่าในช่วงกำลังสาม (Cubic spline)

จากตารางที่ 2.1 แสดงการประมาณค่าในช่วงที่ระดับต่าง ๆ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.24

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลของการประมาณค่าในช่วง

x	$f(x)$
3.0	2.5
4.5	1.0
7.0	2.5
9.0	0.5



รูปที่ 2.24 ทฤษฎีคูบิกสไปไลน์ (ก) การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น
 (ข) การประมาณค่าในช่วงกำลังสอง
 (ค) การประมาณค่าในช่วงกำลังสาม

2.7.1 การประมาณค่าในช่วงกำลังหนึ่ง

การประมาณค่าในช่วงกำลังหนึ่งสามารถประมาณได้จากการเชื่อมต่อข้อมูลสองข้อมูลโดยใช้สมการเส้นตรงสมการที่ 2.24 และนำสมการเส้นตรงไปใช้ในการประมาณค่าที่ตำแหน่ง x ใดๆ ของ $f(x)$ ตามรูปที่ 2.24 (ก)

$$f(x) = f(x_1) + m_1(x - x_1) \quad (2.24)$$

$$\text{เมื่อ } x_1 \leq x \leq x_2$$

สมการที่ 2.25 จัดให้อยู่ในรูปทั่วไปได้โดยที่ $f(x)$ เป็นฟังก์ชันที่ต้องการทราบค่า

$$f(x) = f(x_{n-1}) + m_{n-1}(x - x_{n-1}) \quad (2.25)$$

$$m_i = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (2.26)$$

โดยที่ $f(x_i)$ และ $f(x_{i+1})$ เป็นฟังก์ชันของช่วงที่ต้องการ $f(x)$

x_i และเป็นค่าของ และ $f(x_{i+1})$ ตามลำดับ

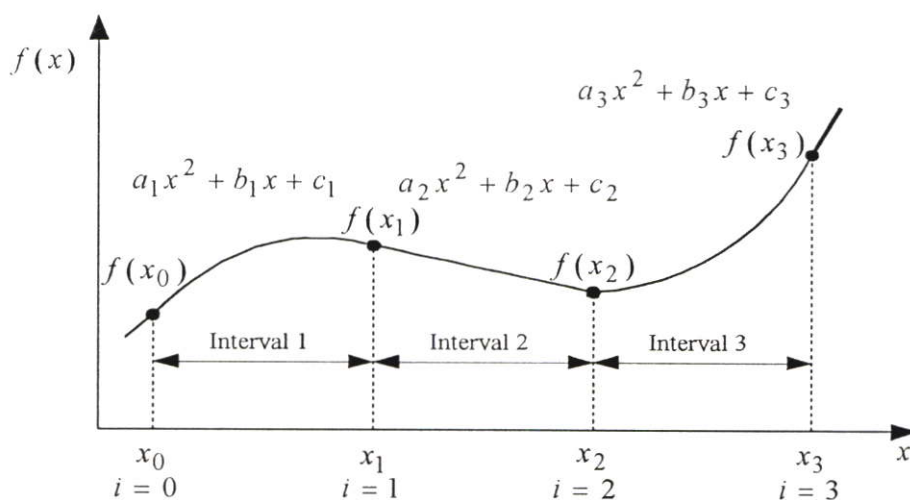
m_i ความชันของเส้นตรง

จากตารางที่ 2.1 ถ้าใช้ความสัมพันธ์ของการประมาณค่าในช่วงกำลังหนึ่ง ในการแทนค่าที่ $x = 5$ ในสมการจะได้ $f(x) = 1.3$

2.7.2 การประมาณค่าในช่วงกำลังสอง

การประมาณค่าในช่วงกำลังสองจะมีวิธีการในการประมาณค่าคล้ายกับการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นแต่จะใช้ข้อมูล 3 ข้อมูลในการเชื่อมต่อกันแล้วหาฟังก์ชันกำลังสองของข้อมูลที่ได้เชื่อมต่อกันเพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าที่ตำแหน่ง x ใด ๆ ของ $f(x)$ ดังรูปที่ 2.24 (จ) ตามสมการที่ 2.27 ถึง 2.31

$$f_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.25 เส้นกราฟการประมาณค่าในช่วงกำลังสอง

ในรูปที่ 2.25 จะมีความชัดเจนมากขึ้นในการอธิบาย การประมาณค่าในช่วงกำลังสองเมื่อ n จะเป็นจำนวนช่วงที่ต้องการหาฟังก์ชัน $n+1$ จะเป็นจำนวนข้อมูล ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) โดยที่ $3n$ จะเป็นจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (a, b, c) และจำนวนเงื่อนไขทั้งหมดจะมี $3n$ เงื่อนไข

เงื่อนไขในการหาการประมาณค่ากำลังสอง นิยามสมการโพลิโนเมียลของจุดต่อฟังก์ชันจะต้องมี $n+1$ สมการ ในรูปที่ 2.25 จะได้ $f(x_0), f(x_1), f(x_2), f(x_3)$ จะได้สมการ

$$a_{i-1}x_{i-1}^2 + b_{i-1}x_{i-1} + c_{i-1} = f(x_{i-1}) \quad (2.28)$$

$$a_i x_{i-1}^2 + b_i x_{i-1} + c_i = f(x_{i-1}) \quad (2.29)$$

โดยที่ $i = 2$ ถึง n ตามรูปที่ 2.25 จำนวนเงื่อนไข $2n - 2$ ต่อไปจะเป็นสมการที่ผ่านฟังก์ชันจุดเริ่มต้นและสมการผ่านฟังก์ชันจุดสุดท้าย

$$a_1 x_0^2 + b_1 x_0 + c_1 = f(x_0) \quad (2.30)$$

$$a_n x_n^2 + b_n x_n + c_n = f(x_n) \quad (2.31)$$

จะพบว่าจำนวนสมการทั้งหมดของ $2n$ สมการ ถ้านำค่าในตารางที่ 2.1 (ก) มาแทนในสมการ 2.28 ถึง 2.31 จะได้ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของการประมาณค่าในช่วงกำลังสองตามรูปที่ 2.24 (ข)

2.7.3 การประมาณค่าในช่วงกำลังสาม (cubic spline)

การประมาณค่าในช่วงกำลังสามมีข้อดีคือ มีลักษณะการกระจายแบบเว้าเข้า และเว้าออกที่ต่อเนื่องกันในช่วงระหว่างข้อมูลที่กำหนดให้สามารถเขียนในรูปสมการได้ต่อไปนี้

$$f_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \quad (2.32)$$

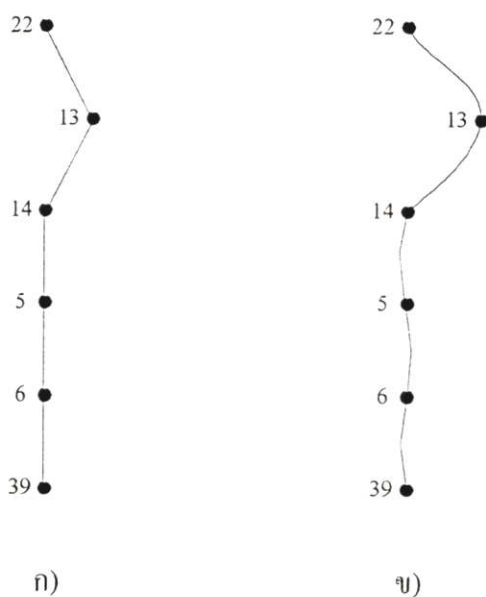
$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{f_i''(x_{i-1})}{6(x_i - x_{i-1})} (x_i - x)^3 + \frac{f_i''(x_i)}{6(x_i - x_{i-1})} (x - x_{i-1})^3 \\ &+ \left[\frac{f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} - \frac{f''(x_{i-1})(x_i - x_{i-1})}{6} \right] (x_i - x) \\ &+ \left[\frac{f(x_i)}{x_i - x_{i-1}} - \frac{f''(x_i)(x_i - x_{i-1})}{6} \right] (x - x_{i-1}) \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} & (x_i - x_{i-1}) f''(x_{i-1}) + 2(x_{i+1} - x_{i-1}) f''(x_i) + (x_{i+1} - x_i) f''(x_{i+1}) \\ & = \frac{6}{x_{i+1} - x_i} [f(x_{i+1}) - f(x_i)] + \frac{6}{x_i - x_{i-1}} [f(x_{i-1}) - f(x_i)] \end{aligned} \quad (2.34)$$

สมการที่ 2.33 เป็นสมการที่ใช้สำหรับหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ของการประมาณค่าในช่วงกำลังสามในแต่ละช่วง ส่วนสมการที่ 2.34 เป็นสมการที่ใช้หาการประมาณค่าในช่วงกำลังสองของแต่ละช่วง จากตารางที่ 2.1 นำมาแทนค่าในสมการที่ 2.33 จะได้ตามรูปที่ 2.24 (ค)

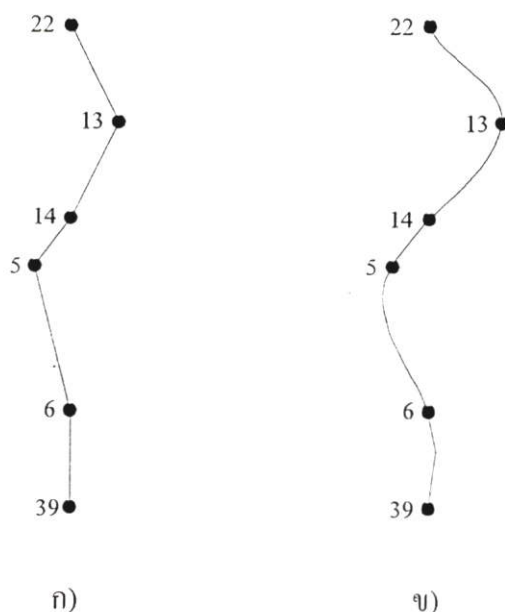
2.7.4 การทดสอบโปรแกรมโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปลอน

จากรูปที่ 2.26 โหนดที่จะทำการเคลื่อนที่ทั้ง 6 โหนดประกอบไปด้วยโหนดที่ 22, 13, 14, 5, 6 และ 39 จากรูปที่ 2.26 ก) เราจะทำการเคลื่อนที่โหนดที่ 13 ไปขวามือ 1 หน่วยตามแนวแกน x ส่วนรูปที่ 2.26 ข) เราจะทำการเคลื่อนที่โหนดที่ 13 แบบคิวบิกสไปลอนไปขวามือ 1 หน่วยตามแนวแกน x



รูปที่ 2.26 การทดสอบโปรแกรมโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปลอนตามแนวแกน x

จากรูปที่ 2.27 ก) เราจะทำการเคลื่อนที่โหนด 13 ไปขวามือ 1 หน่วยหลังจากนั้นจะทำการเคลื่อนที่โหนด 5 ไปซ้ายมือ 1 หน่วยและขึ้นบน 1 หน่วยตามแนวแกน xy ส่วนรูปที่ 2.27 ข) ผลที่ได้จากการเคลื่อนที่โหนดแบบคิวบิกสไปลอนตามแนวแกนดังกล่าว



รูปที่ 2.27 การทดสอบโปรแกรมโทนครเคลื่อนที่แบบคูบิกสไปลน์ตามแนวแกน xy

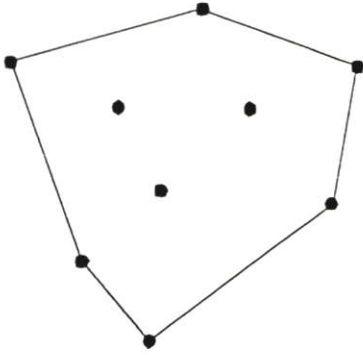
2.8 การสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ

การสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ [16-17] กำหนดให้ S คือเซตของจุดในเนื้อที่บนมิติใด ๆ [6-7] “Convex Hull” ของเซต S หรือ $CH(S)$ คือ Convex Polygon ของพื้นที่ที่เล็กที่สุดซึ่งได้บรรจุจุดทุกจุดของเซต S ไว้ภายในเมื่อกำหนดเป็น 2 มิติดังรูปที่ 2.28

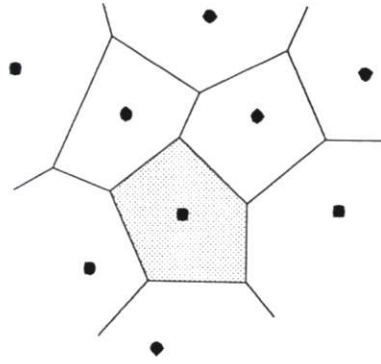
“Voronoi Polygon” จะถูกกำหนดโดยการลากเส้นตรงผ่านจุดกึ่งกลางของเส้นตรงซึ่งเชื่อมระหว่างจุด 2 จุด โดยเส้นตรงทั้งสองเส้นตั้งฉากกันซึ่งกันและกัน เมื่อใช้วิธีการนี้กับจุดทุกจุดพื้นที่ทั้งหมดก็จะถูกปกคลุมด้วยรูปหลายเหลี่ยมย่อย ๆ เรียงติดกัน (adjacent) เต็มพื้นที่ดังรูปที่ 2.28 (ข)

โครงสร้างพื้นฐานของ Voronoi Diagram มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างของ “Delaunay Triangulation” โดยเมื่อลากเส้นตรงระหว่างจุด 2 จุดของรูปหลายเหลี่ยมซึ่งใช้ขอบ (edge) ร่วมกันจะได้โครงตาข่ายสามเหลี่ยมแบบ Delaunay ดังรูปที่ 29 (ก) Delaunay Triangulation ของพื้นที่คือโครงตาข่ายรูปสามเหลี่ยมซึ่งใช้เส้นตรงเชื่อมต่อระหว่างจุดทุกจุดภายใน $CH(S)$ โดยที่ไม่มีการซ้อนทับกัน (non-overlapping) ของเส้นตรง รูปสามเหลี่ยมทุกรูปที่ประกอบขึ้นจากจุด 3 จุด เมื่อทดสอบให้จุดทั้ง 3 จุดนี้สัมผัสอยู่บนเส้นรอบรูปของวงกลมเดียวกันจะต้องไม่มีจุดอื่นใดบรรจุอยู่ภายในวงกลมทดสอบนี้เลยดังรูปที่ 29 (ข) การสร้างโครงตาข่ายสามเหลี่ยมโดยอาศัยแนวคิดแบบ step-by-step เริ่มต้นการทำงานจากมุมใดมุมหนึ่งของขอบเขต $CH(S)$ ก่อนเสมอโดยการกำหนด “ขอบเริ่มต้น” ระหว่างจุด 2 จุดซึ่งอยู่ใกล้กันมากที่สุดและเริ่มทำการหาจุดที่สาม เพื่อนำมาประกอบกันให้เป็นรูปสามเหลี่ยมที่สมบูรณ์แบบมากที่สุดตรงตามคุณสมบัติของ Delaunay จาก

นั่นเมื่อพบจุดที่เหมาะสมแล้วก็จะเชื่อมต่อกับจุดเดิมทั้ง 2 จุดของขอบเริ่มต้น จึงทำให้เกิดขอบเริ่มต้นใหม่ 2 ขอบทดแทนขอบเริ่มต้นอันเก่าเพื่อใช้เป็นขอบเขตเริ่มต้นในการค้นหาจุดใหม่ที่เหมาะสมต่อไป รอบการทำงานจะกระทำซ้ำๆ เช่นนี้ต่อไปเรื่อย ๆ เพื่อขยายอาณาเขตของโครงข่ายสามเหลี่ยมออกไปจนกระทั่งเต็มพื้นที่ $CH(S)$ ของจุดทั้งหมด

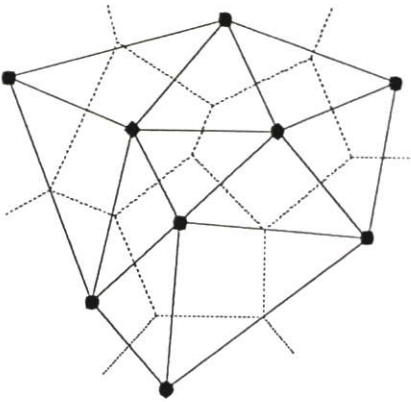


(ก)

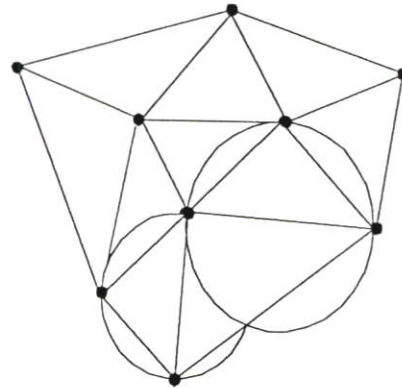


(ข)

รูปที่ 2.28 (ก) Convex Hull (ข) Voronoi Diagram



(ก)

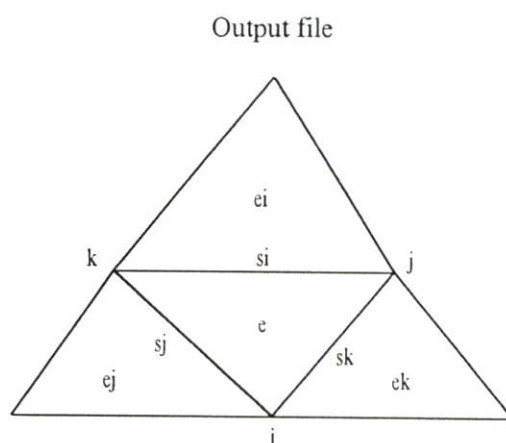


(ข)

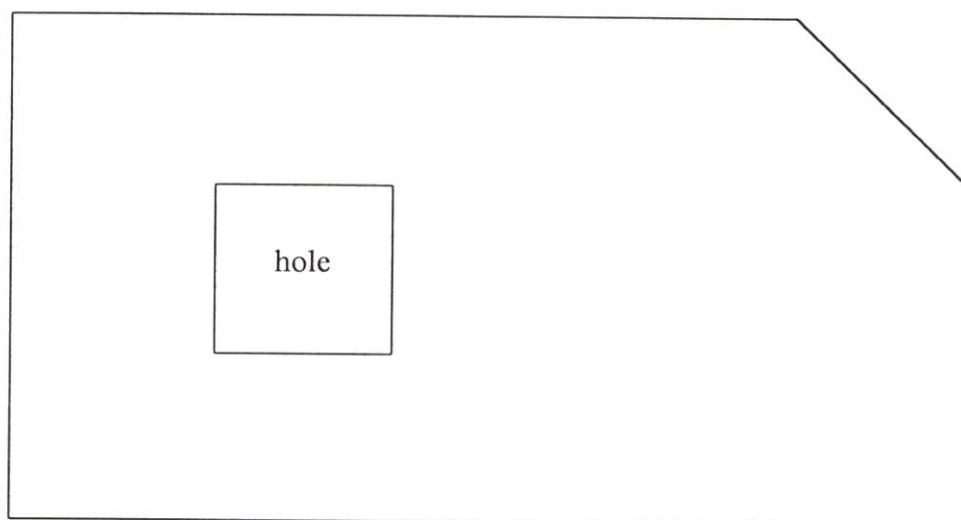
รูปที่ 2.29 Delaunay Triangulation

2.8.1 การทดสอบโปรแกรมการสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ

จากรูปที่ 2.30 แสดงตำแหน่งของขอบเขตของอิลิเมนต์และโหนดที่ได้จาก Output file ของโปรแกรมสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ โดยที่ e คืออิลิเมนต์ที่พิจารณาประกอบไปด้วยชื่อเรียกโหนดทิศทางทวนเข็มนาฬิกาคือ i, j, k ส่วน s_i, s_j, s_k ชื่อเรียกด้านทั้งสามของอิลิเมนต์ และ e_i, e_j, e_k คือชื่อเรียกอิลิเมนต์ข้างเคียง marker เป็นการกำหนดมุมาร์ของอิลิเมนต์ รูปที่ 2.31 แสดงขอบเขตของต้นแบบก่อนสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม ซึ่งเป็นวัตถุชนิดเดียวกันโดยที่มีช่องว่างเป็นรูปสี่เหลี่ยม

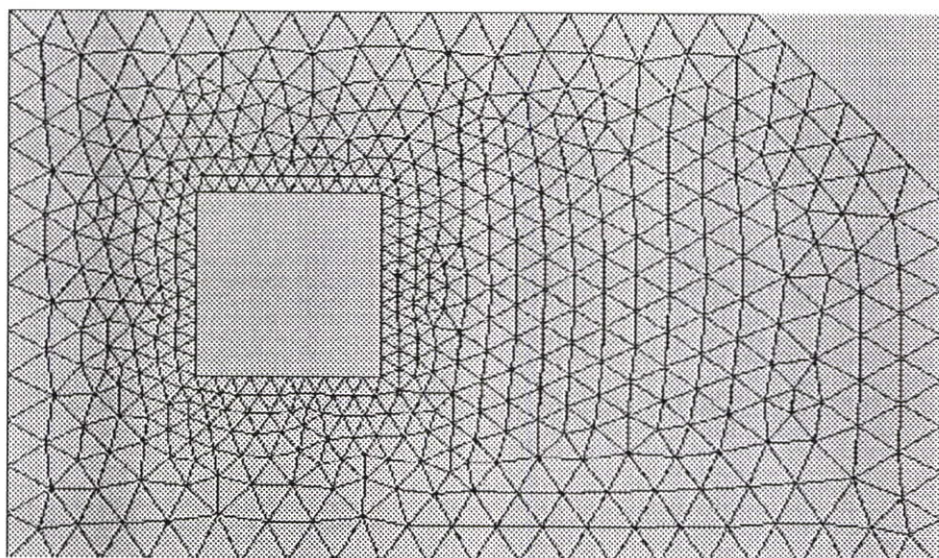


รูปที่ 2.30 ตำแหน่งขอบเขตการสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม

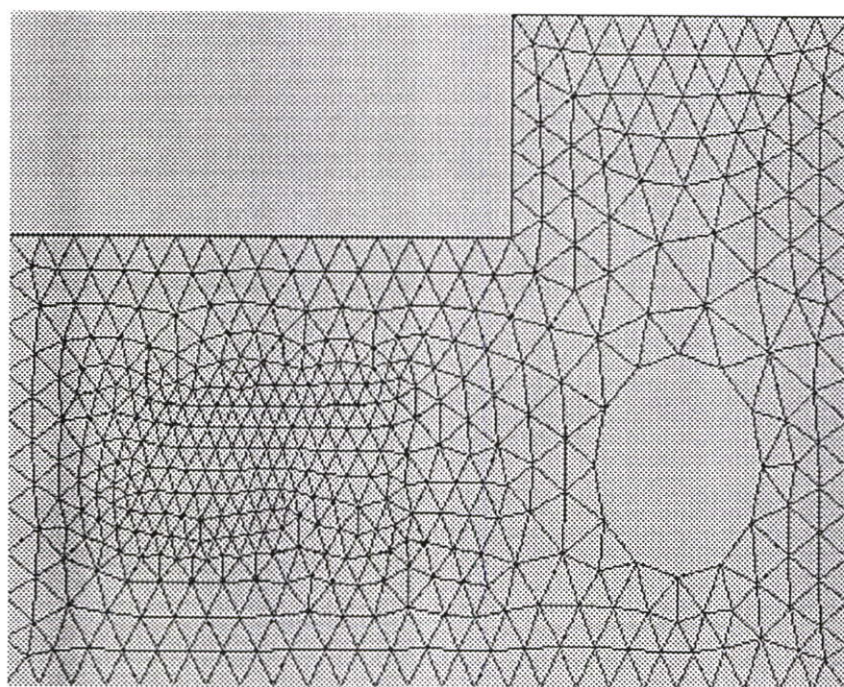


รูปที่ 2.31 ขอบเขตของต้นแบบก่อนสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม

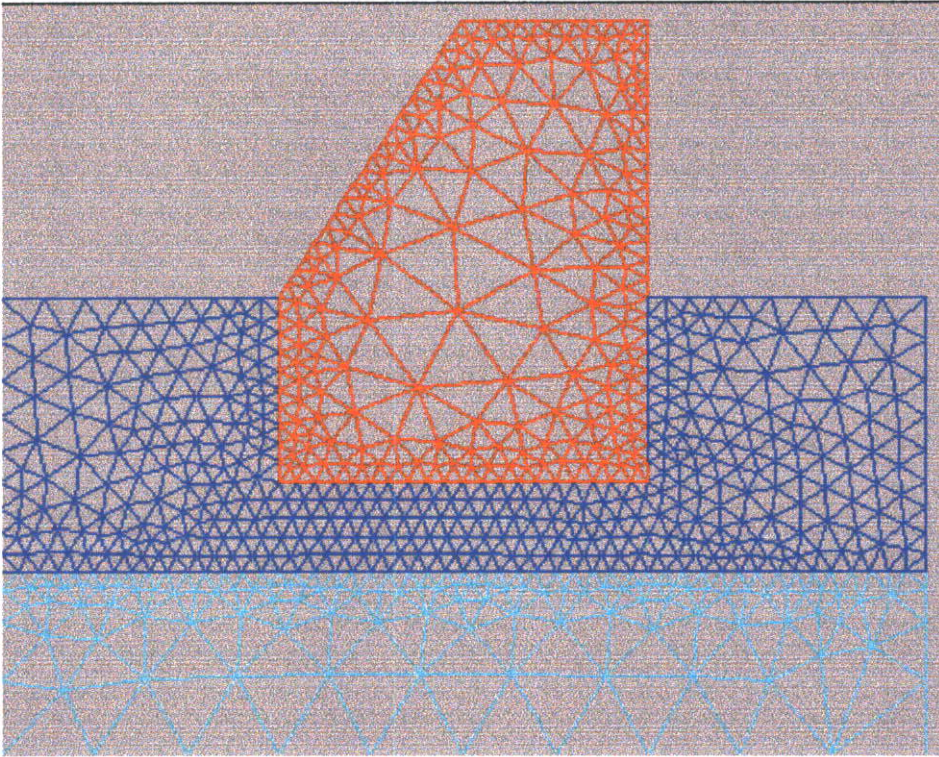
จากรูปที่ 3.32 แสดงให้เห็นผลที่ได้จากโปรแกรมการสร้างโครงตาข่ายอิเลิเมนต์สามเหลี่ยม โดยอัตโนมัติของต้นแบบในรูปที่ 2.31 และจากรูปที่ 2.33 ถึง 2.35 เป็นผลการทดสอบโปรแกรมการสร้างโครงตาข่ายอิเลิเมนต์สามเหลี่ยมโดยอัตโนมัติที่ประกอบด้วยวัตถุมากกว่าสองชนิดขึ้นไป



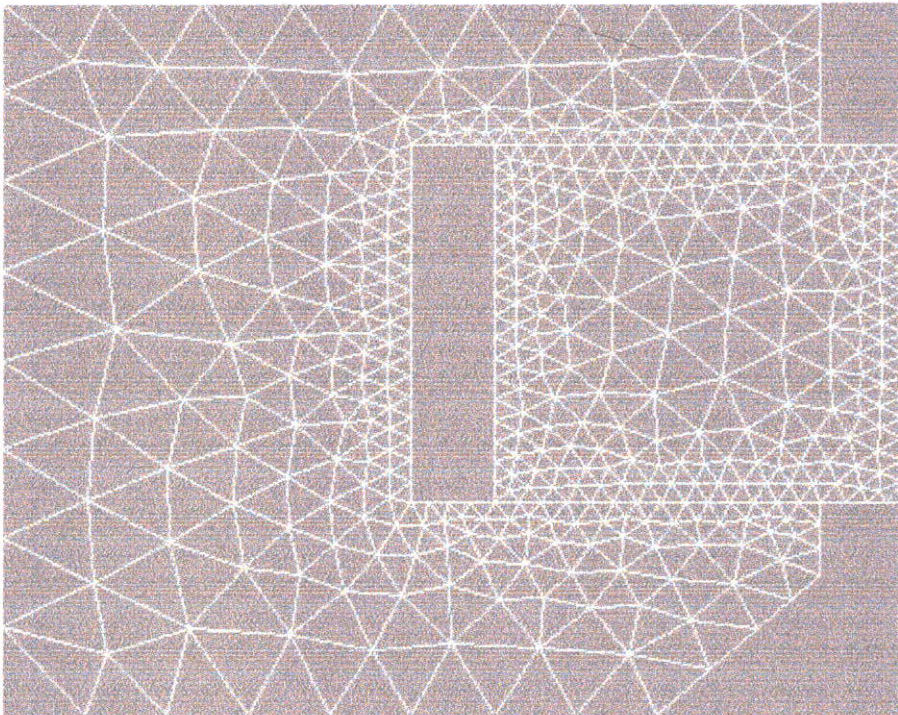
รูปที่ 2.32 โครงตาข่ายอิเลิเมนต์สามเหลี่ยมที่สร้างด้วยโปรแกรมอัตโนมัติจากรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.33 โครงตาข่ายอิเลิเมนต์สามเหลี่ยมที่สร้างด้วยโปรแกรมอัตโนมัติ (node 488, element 884)



รูปที่ 2.34 โครงตาข่ายอิเลิเมนต์สามเหลี่ยมที่สร้างด้วยโปรแกรมอัตโนมัติ (node 718,element 1336)



รูปที่ 2.35 โครงตาข่ายอิเลิเมนต์สามเหลี่ยมที่สร้างด้วยโปรแกรมอัตโนมัติ (node 452, element 801)

บทที่ 3

การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่

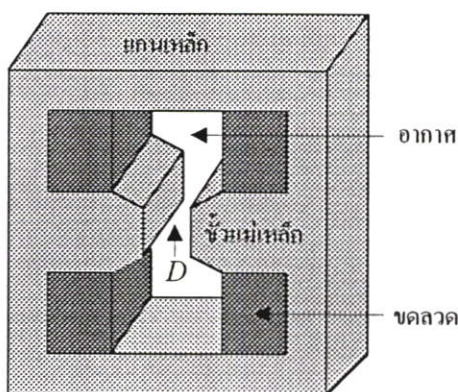
3.1 บทนำ

การออกแบบอุปกรณ์ทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในงานวิจัยที่ผ่านมา [1-5] ใช้หลักการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบคิโธมินิสติกเพื่อออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะทำงานร่วมกับวิธีโหนดเคลื่อนที่ที่แบบต่าง ๆ ซึ่งจะทำได้รูปร่างขั้วแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นพื้นเลื่อยเล็กใหญ่ปะปนกัน และรูปทรงของขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบมีความคลาดเคลื่อนสูงเพราะโครงสร้างเอลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วไม่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

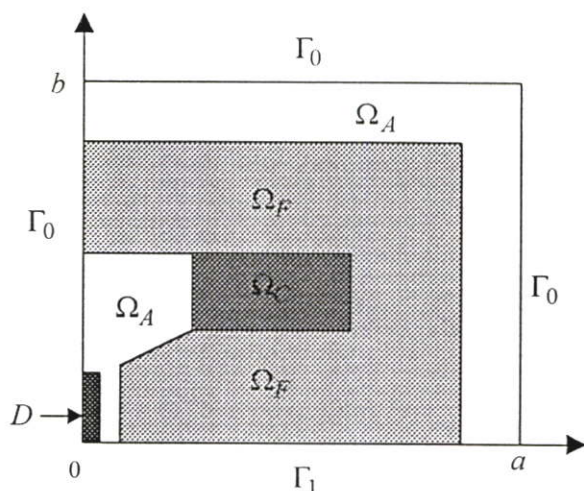
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบเดิมที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [1-5] เพื่อแสดงให้เห็นปัญหาที่เกิดขึ้นของวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิม และจะมีการนำเสนอแนวความคิดที่ใช้ในการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่เพื่อแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาแล้วสองแนวทางคือ วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสโพลน์ร่วมกับการเปลี่ยนรูปร่างเอลิเมนต์ใหม่ (โหนดเคลื่อนที่แบบ 1) และโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสโพลน์ร่วมกับการสร้างโครงข่ายเอลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ (โหนดเคลื่อนที่แบบ 2) วิธีการโหนดเคลื่อนที่แต่ละแบบประกอบไปด้วยแนวแกนการเคลื่อนที่ 3 แนวแกนคือ ในแนวแกนนอน x (เคลื่อนที่โหนดในแกน x) ในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง $x-y$ (เคลื่อนที่โหนดในแกน x ก่อนและเคลื่อนที่โหนดในแกน y) และในแนวแกนนอนพร้อมกับแนวแกนตั้ง xy (เคลื่อนที่โหนดในแกน x และ y พร้อมกัน) เป้าหมายของการออกแบบในงานวิจัยนี้คือการเคลื่อนที่โหนดตามแนวแกนที่กล่าวถึงเพื่อหาดำแหน่งของโหนดที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะราบโค้งมนซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B มีค่าเท่ากันตามที่ต้องการ ในบริเวณช่องอากาศ D ที่พิจารณา

จากรูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างต้นแบบของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิจารณา ในการออกแบบสามารถพิจารณาเพียงเศษหนึ่งส่วนสี่ของโครงสร้างโดยอาศัยคุณสมบัติแกนสมมาตรแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าขอบเขตที่พิจารณาประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ ส่วนแกนเหล็ก Ω_F ส่วนขดลวด Ω_C ส่วนอากาศ Ω_A และช่องอากาศบริเวณขั้วแม่เหล็กที่พิจารณา D ซึ่งค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากันตามที่ต้องการ Γ_0 เป็นเงื่อนไขดิริชเลท Γ_1 เป็นเงื่อนไขนิวแมน μ_F เป็นค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็ก μ_C เป็นค่าความซึมซาบแม่เหล็กของขดลวด และ μ_A เป็นค่าซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ ผลการทดสอบที่ได้จากการออกแบบทั้งหมดจะแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 4 ซึ่งในการออกแบบนี้จะกำหนดให้ใช้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

$J = 3.3445 \text{ A/mm}^2$, $\mu_C = \mu_A = \mu_0$, $\mu_F = 1000\mu_0$ และกำหนดขอบเขตที่พิจารณา
 $\Omega = (0, a) \times (0, b) = (0, 0.12) \times (0, 0.10) \text{ mm}^2$



รูปที่ 3.1 โครงสร้างต้นแบบขดแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิจารณา

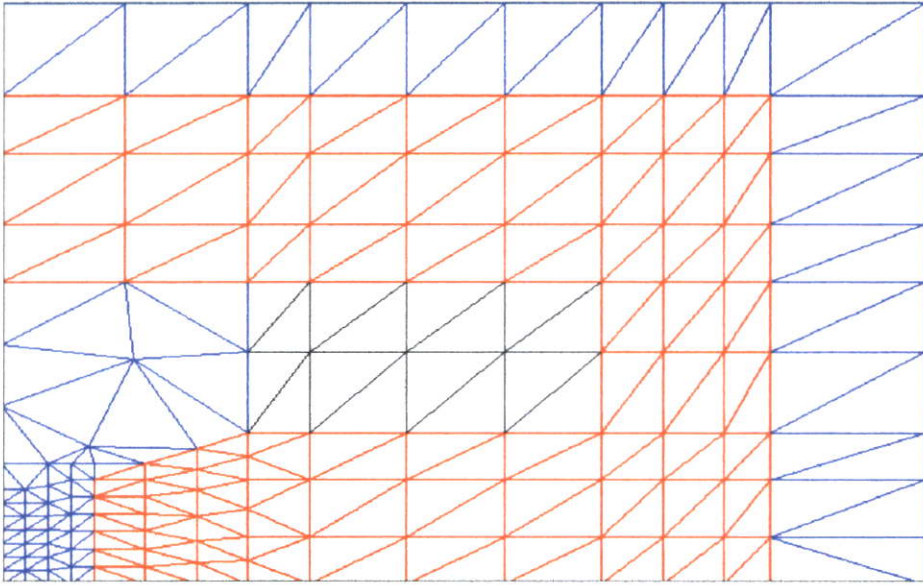


รูปที่ 3.2 ขอบเขตของต้นแบบ 2 มิติขนาดเศษหนึ่งส่วนสี่ของโครงสร้างขั้วแม่เหล็ก

3.2 วิธีการหาค่าที่แบบเดิม

จากงานวิจัยที่กล่าวถึง [1-5] ได้ทำการออกแบบรูปทรงขั้วแม่เหล็กของขดแม่เหล็กไฟฟ้าให้ได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ D ตามต้องการโดยวิธีหาค่าที่แบบเดิม 3 แนวทางคือ ในแนวแกนนอน x ในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง $x-y$ และในแนวแกนนอนพร้อมกับแนวแกนตั้ง xy จากรูปที่ 3.3 เป็นรูปโครงตาข่ายอิลิเมนต์สามเหลี่ยมของต้นแบบที่พิจารณาของวิธีหาค่าที่แบบเดิมโครงตาข่ายอิลิเมนต์สามเหลี่ยมได้มาจากการนำต้นแบบรูปที่ 3.2 ไปขยายในกระดาศกราฟแล้วใช้วิธีเรขาคณิตในการสร้างอิลิเมนต์สามเหลี่ยมหลังจากนั้นนำ

ข้อมูลของตำแหน่งอิเลิเมนต์และ โหนดทั้งหมดป้อนเข้าโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเป็นฐานข้อมูลใช้ในการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า

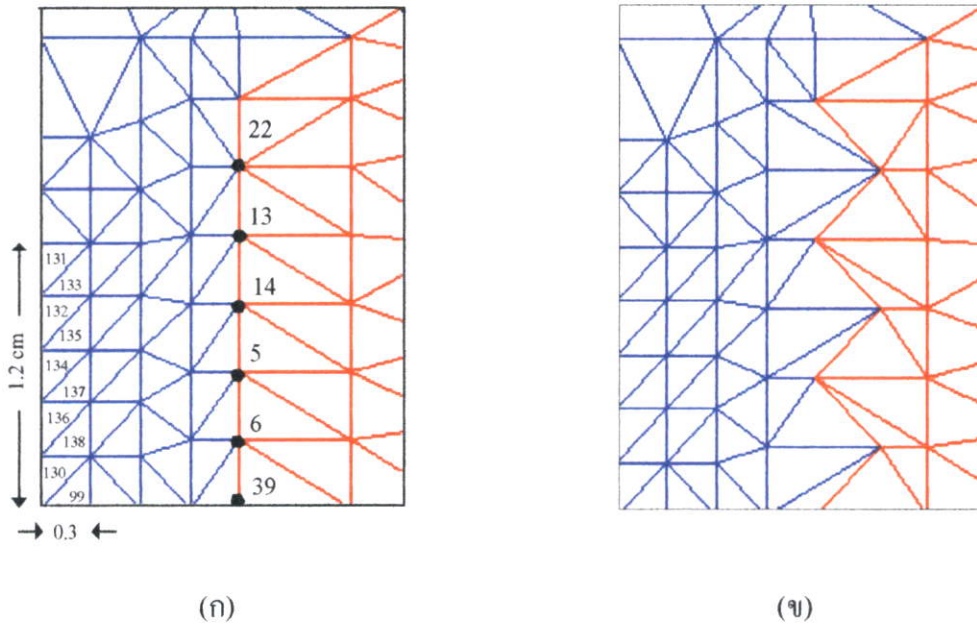


รูปที่ 3.3 รูปโครงตาข่ายสามเหลี่ยมของต้นแบบที่พิจารณาวิธี โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

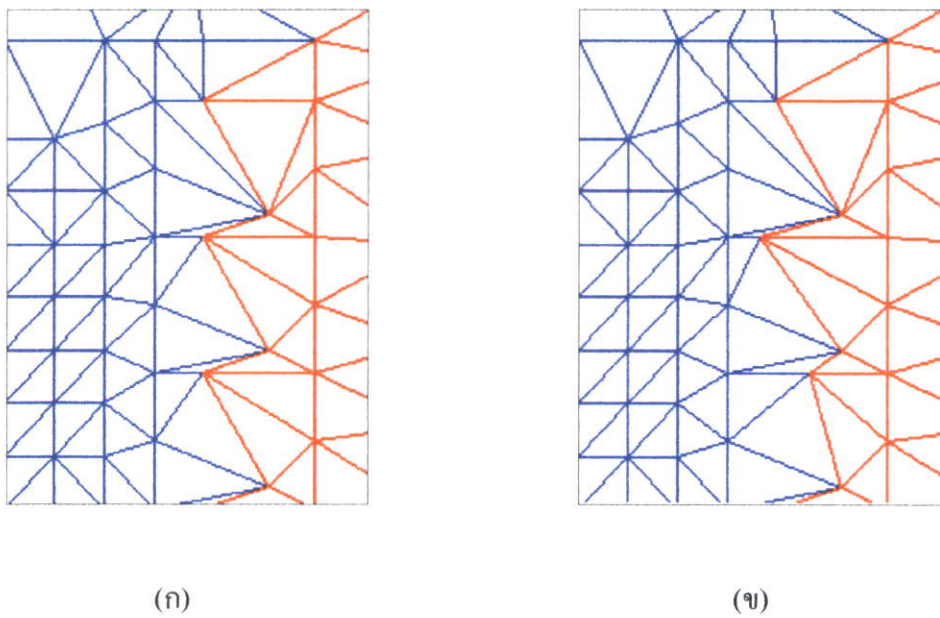
รูปขยายโครงตาข่ายอิเลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณช่องอากาศและขั้วแม่เหล็กของต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.4 (ก) ในงานวิจัยที่กล่าวถึง [1-5] กำหนดให้โหนดที่เคลื่อนที่ในการออกแบบจำนวน 6 โหนดคือ โหนดที่ 22, 13, 14, 5, 6 และ 39 และอิเลิเมนต์บริเวณช่องอากาศ D ที่พิจารณาจำนวน 10 อิเลิเมนต์ให้ได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากันตามต้องการคือ อิเลิเมนต์ที่ 99, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137 และ 138 ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.4 (ข) แสดงรูปขยายโครงตาข่ายอิเลิเมนต์บริเวณช่องอากาศและแนวขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการเคลื่อนที่โหนด 22, 14 และ 6 ไปทางขวา 3 หน่วยตามแนวแกน x จากรูปจะพบว่าวิธี โหนดเคลื่อนที่แบบเดิมตามแนวแกน x ซึ่งจะทำให้ได้รูปร่างขั้วแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อยเล็กใหญ่ปะปนกัน และโครงสร้างอิเลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วเริ่มจะมีแนวโน้มที่ไม่เหมาะสมเพราะมีลักษณะที่ไม่ค่อยสมดุลย์กันทั้งสามด้านส่งผลให้ขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนท์อิเลิเมนต์เกิดการผิดพลาด

จากรูปที่ 3.5 จะพบว่าวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิมแนวแกน $x-y$ และแนวแกน xy จะทำให้ได้รูปร่างขั้วแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อยเล็กใหญ่ปะปนกันเหมือนแนวแกน x และโครงสร้างอิเลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วเริ่มจะมีแนวโน้มที่ไม่เหมาะสมมากกว่าแนวแกน x



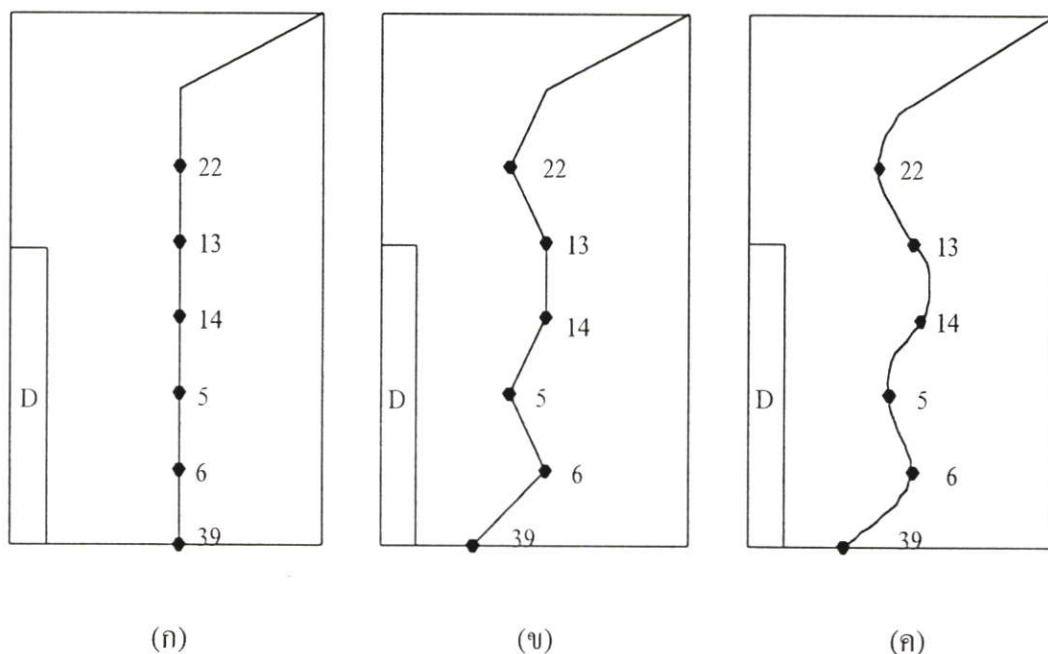
รูปที่ 3.4 (ก) รูปขยายโครงตาข่ายอิเลเมนต์บริเวณช่องอากาศและขั้วแม่เหล็กของต้นแบบ (cm)
 (ข) รูปขยายโครงตาข่ายอิเลเมนต์วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิมตามแนวแกนอน x



รูปที่ 3.5 (ก) รูปขยายโครงตาข่ายอิเลเมนต์โดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิมตามแนวแกนอนและ
 แนวแกนตั้ง $x-y$
 (ข) รูปขยายโครงตาข่ายอิเลเมนต์โดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิมตามแนวแกนอนพร้อม
 กับแนวแกนตั้ง xy

3.3 วิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบ 1

วิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 เรียกว่าวิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบคูบิกสโพลน์ร่วมกับการเปลี่ยนรูปร่างอิลิเมนต์ใหม่ซึ่งเป็นการพัฒนามาจากวิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบเดิมโดยจะใช้โครงสร้างต้นแบบอิลิเมนต์เหมือนกันทุกอย่างการเคลื่อนที่โหนดแบบคูบิกสโพลน์จะทำให้แนวข้อแม่เหล็กที่ได้มีลักษณะราบโค้งมนส่วนการเปลี่ยนรูปร่างอิลิเมนต์ใหม่เป็นการจัดโครงสร้างอิลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวข้อใหม่ให้ค่อนข้างสมดุลทั้งสามด้าน ทำให้การประมาณค่าศักย์แม่เหล็กแม่นยำมากขึ้นจากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าวิธีการเคลื่อนที่โหนดแบบคูบิกสโพลน์ทำให้ได้รูปทรงแนวข้อแม่เหล็กที่มีลักษณะราบโค้งมนและรูปที่ 3.7 เปรียบเทียบรูปขยายโครงตาข่ายอิลิเมนต์บริเวณช่องอากาศและข้อแม่เหล็กของวิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบเดิมและวิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 ก่อนการเคลื่อนที่โหนด

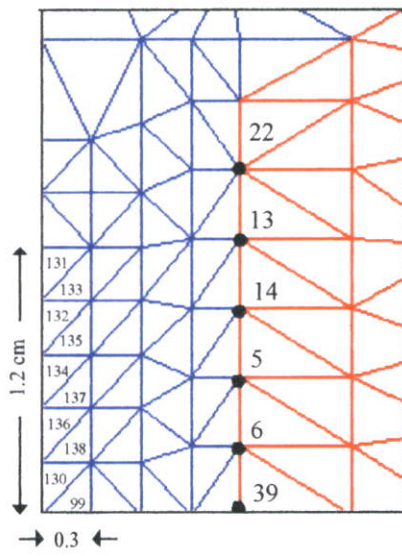


รูปที่ 3.6 (ก) ตำแหน่งโหนดทั้ง 6 ของแนวข้อก่อนการเคลื่อนที่โหนด

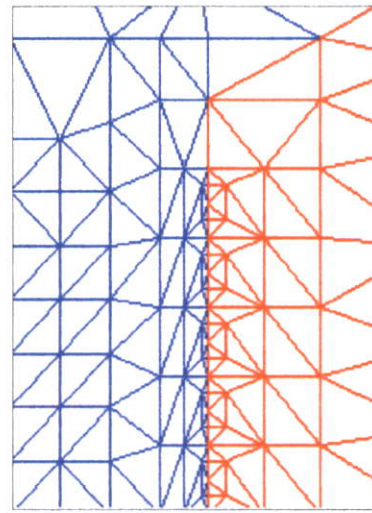
(ข) ตำแหน่งโหนดทั้ง 6 ของแนวข้อโดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

(ค) ตำแหน่งโหนดทั้ง 6 ของแนวข้อโดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบ 1

จากรูปที่ 3.7 ถึง 3.8 พบว่าวิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบคูบิกสโพลน์ร่วมกับการเปลี่ยนรูปร่างอิลิเมนต์ใหม่ที่น่าเสนอ (วิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบ 1) สามารถแก้ปัญหาเรื่องรูปร่างข้อแม่เหล็กที่เป็นฟันเลื่อยเล็กใหญ่ปะปนกัน ทำให้มีลักษณะแนวข้อที่ราบโค้งมนและรูปทรงข้อแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นเพราะโครงสร้างอิลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวข้อแม่เหล็กของวิธีการที่น่าเสนอจะมีความสมดุลทั้งสามด้านมากกว่า

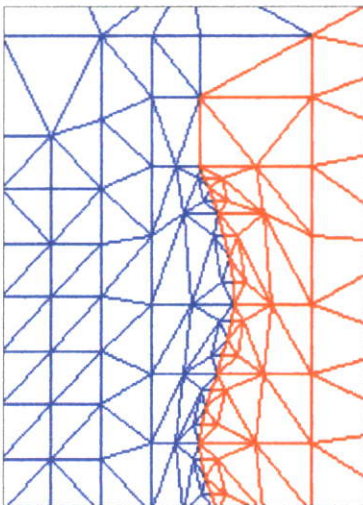


(ก)

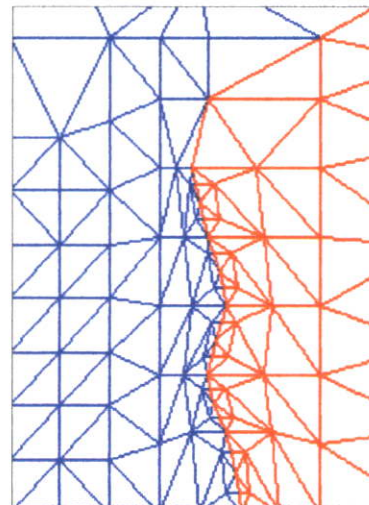


(ข)

รูปที่ 3.7 (ก) รูปขยายโครงตาข่ายบริเวณช่องอากาศและขั้วแม่เหล็กของวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิม
(ข) รูปขยายโครงตาข่ายบริเวณช่องอากาศและขั้วแม่เหล็กของวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1

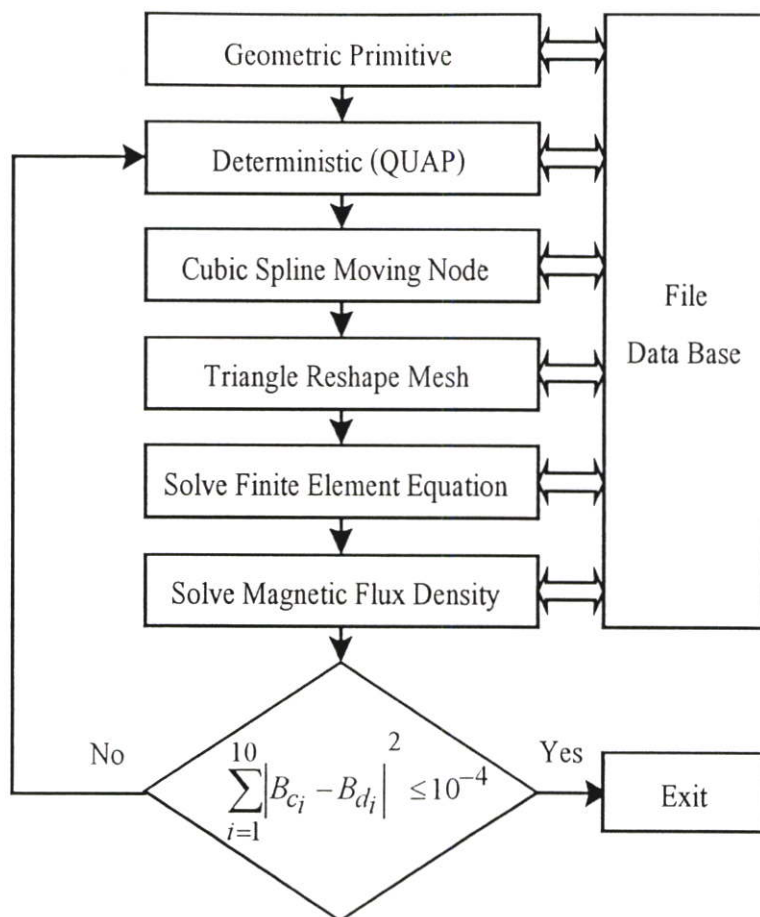


(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 (ก) รูปขยายโครงตาข่ายอิทธิเมนที่วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 ตามแนวแกน $x - y$
(ข) รูปขยายโครงตาข่ายอิทธิเมนที่วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 ตามแนวแกน xy



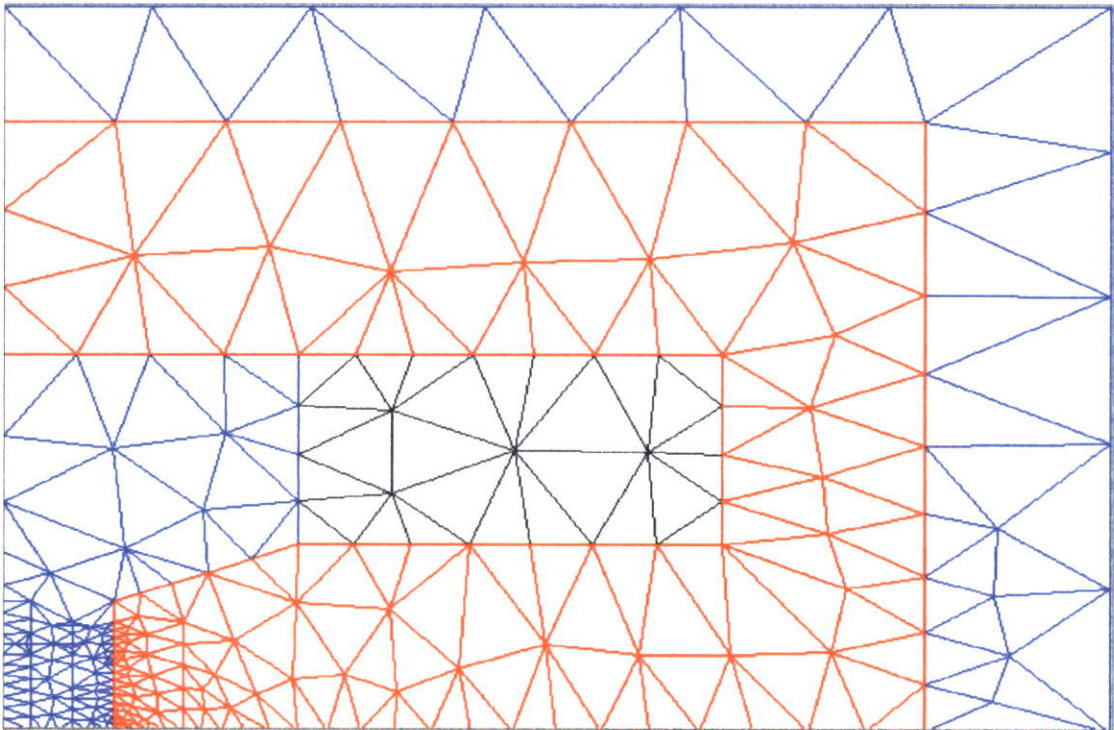
รูปที่ 3.9 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1

หลักการออกแบบเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมจะเป็นกระบวนการทำซ้ำจนกว่าจะได้คำตอบที่ยอมรับได้หรือครบจำนวนรอบการทำซ้ำ ขั้นตอนต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทำงานของ Geometric Primitive เป็นการกำหนดขอบเขตของต้นแบบที่จะพิจารณาทำการสร้างอิลิเมนต์ภายในขอบเขต โดยการกำหนดตำแหน่งของโหนดต่าง ๆ จากนั้นกำหนดคุณสมบัติของตัวกลางต่าง ๆ โดยแยกออกเป็นส่วน ๆ เช่น อากาศ เหล็ก เป็นต้น พร้อมทั้งกำหนดเงื่อนไขของขอบเขตได้แก่ ขอบเขตดิริชเลท (dirichlet) และขอบเขตนิวแมน (neuman) ขั้นตอน Deterministic เป็นการหาตำแหน่งในการเคลื่อนที่โหนดไปยังจุดที่เหมาะสมของแต่ละโหนด ขั้นตอน Cubic Spline Moving Node เป็นการเคลื่อนโหนดทั้ง 6 โหนดให้ราบโค้งมน ขั้นตอน Triangle Reshape Mesh เป็นการจัดโครงสร้างอิลิเมนต์ใหม่ให้ค่อนข้างสมดุลกับรูปร่างข้อที่เปลี่ยนไป ขั้นตอน Solve Finite Element Equation เป็นการสร้างเมทริกซ์ $[K]$ เวกเตอร์ $\{A\}$ และ $\{R\}$ จากนั้นทำการแก้สมการที่ (2.23) เพื่อหาค่า $\{A\}$ ขั้นตอน Solve Magnetic Flux Density เป็นการนำเอาค่า $\{A\}$ ที่ได้มาคำนวณหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการตรวจสอบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

ในช่วงว่างอากาศยอมรับได้หรือไม่ ถ้ายอมรับได้จะจบกระบวนการออกแบบ ถ้าไม่ได้จะกลับไป ที่ขั้นตอน Deterministic ใหม่เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมใหม่ของแต่ละโหนด กระบวนการจะทำซ้ำจนกว่าจะได้คำตอบที่ยอมรับได้หรือครบจำนวนรอบการทำซ้ำ

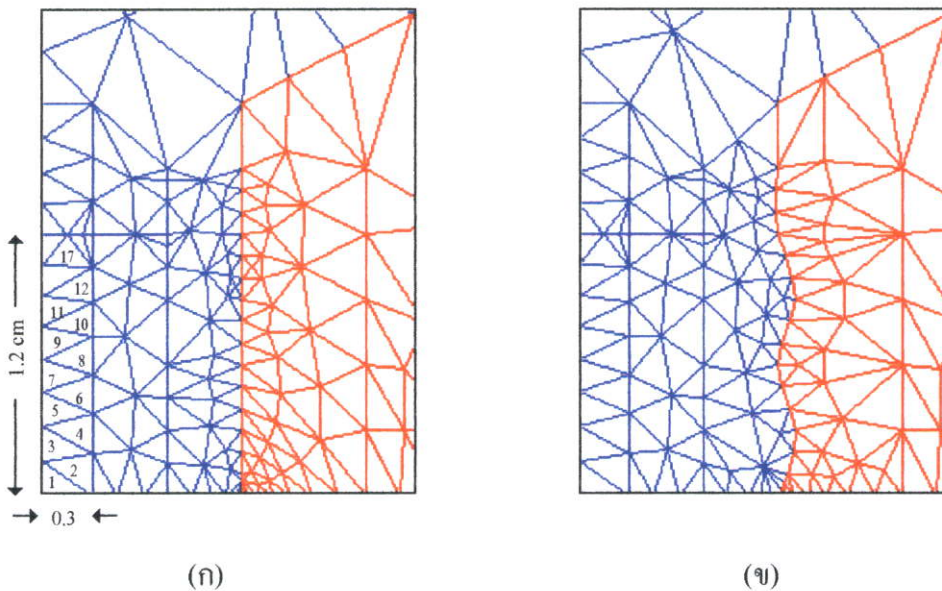
3.4 วิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบ 2

วิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบ 2 หรือเรียกว่าวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสโพล์นร่วมกับการสร้างโครงค้ำยอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ ถึงแม้ว่าวิธีเคลื่อนที่โหนดแบบ 1 จะสามารถแก้ปัญหาเรื่องรูปทรงขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วได้แต่มีข้อจำกัดใช้ได้เฉพาะต้นแบบ ถ้าจะนำวิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 ไปใช้กับต้นแบบอื่นจะต้องมีการจัดทำฐานข้อมูลอิลิเมนต์สามเหลี่ยมและโหนดใหม่ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนต้นแบบ วิธีการโหนดเคลื่อนที่แบบ 2 จึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้โปรแกรมสามารถใช้ได้กับต้นแบบที่หลากหลาย โดยการสร้างโครงค้ำยอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ และจะทำการสร้างโครงค้ำยอิลิเมนต์สามเหลี่ยมโดยอัตโนมัติทุกครั้งที่มีการเคลื่อนที่โหนดแบบคิวบิกสโพล์นทำให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุกต้นแบบ จากรูปที่ 3.10 แสดงโครงค้ำยอิลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ได้มาจากโปรแกรมการสร้างโครงค้ำยอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติต้นแบบที่พิจารณาในการสร้างรูปที่ 3.2

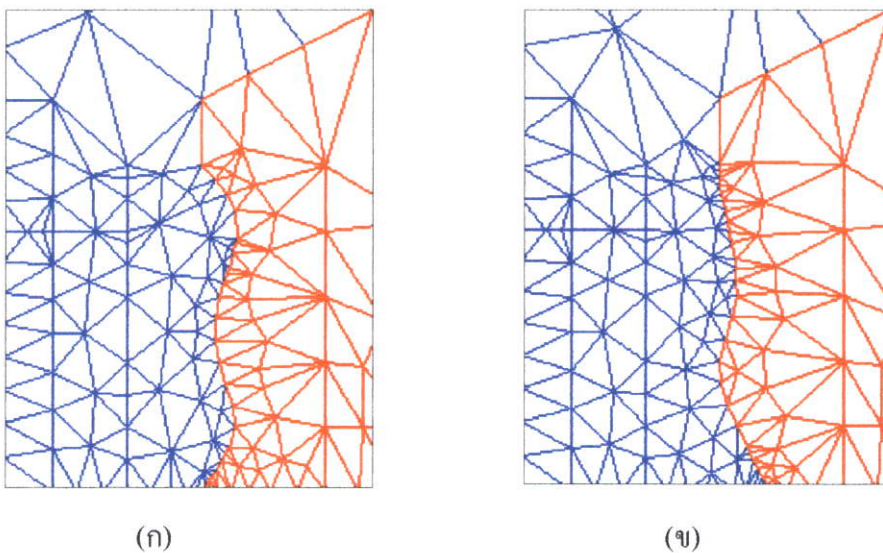


รูปที่ 3.10 โครงค้ำยที่ได้มาจากโปรแกรมสร้างโครงค้ำยอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ

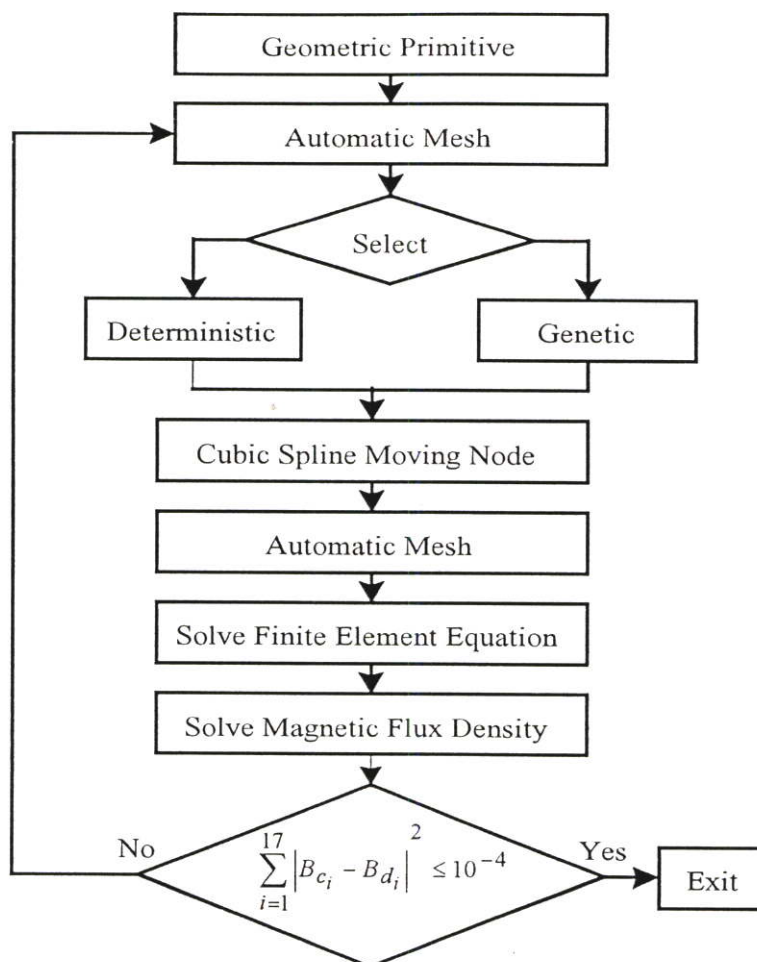
จากรูปที่ 3.11 (ก) แสดงให้เห็นถึงรูปขยายโครงตาข่ายอิลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณช่องอากาศและซี่แม่เหล็กของต้นแบบที่สร้างด้วยโปรแกรมการสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ รูปที่ 3.11 (ข) แสดงรูปขยายโครงตาข่ายอิลิเมนต์วิธี โหนดเคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกนนอน x ได้จากการเคลื่อนที่ที่ โหนด 14, 6 ไปทางขวา 1 หน่วย และรูปที่ 3.12 แสดงรูปขยายโครงตาข่ายอิลิเมนต์วิธี โหนดเคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกนนอน $x - y$ และ xy ตามลำดับ



รูปที่ 3.11 (ก) รูปขยายโครงตาข่ายอิลิเมนต์บริเวณช่องอากาศและซี่แม่เหล็กของต้นแบบ (cm)
 (ข) รูปขยายโครงตาข่ายอิลิเมนต์วิธี โหนดเคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกนนอน x



รูปที่ 3.12 (ก) รูปขยายโครงตาข่ายอิลิเมนต์วิธี โหนดเคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกนนอน $x - y$
 (ข) รูปขยายโครงตาข่ายอิลิเมนต์วิธี โหนดเคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกนนอน xy

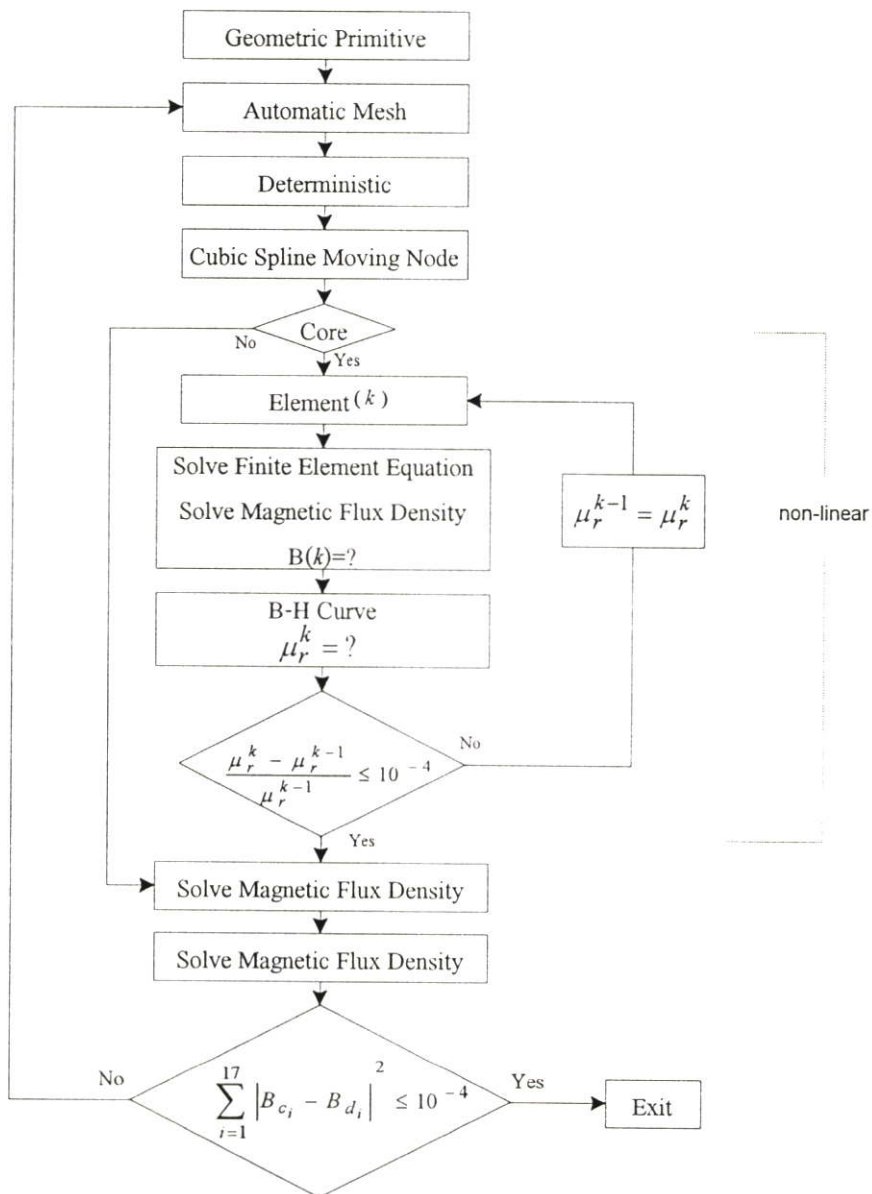


รูปที่ 3.13 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2

รูปที่ 3.13 แสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ขั้นตอน Geometric Primitive เป็นการกำหนดขอบเขตของต้นแบบ กำหนดคุณสมบัติของตัวกลางต่างๆ ขั้นตอน Automatic Mesh เป็นการสร้างโครงตาข่ายอิเลเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ ขั้นตอน Select เป็นการเลือกว่าจะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติกหรือสโตชาสติก ขั้นตอน Cubic Spline Moving Node เป็นการเคลื่อนที่โหนดทำให้มีลักษณะที่โค้งมน ขั้นตอน Solve Finite Element Equation เป็นการสร้างเมตริกซ์ตามสมการที่ 2.23 ขั้นตอน Solve Magnetic Flux Density เป็นการคำนวณหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและขั้นตอนสุดท้ายเป็นการตรวจสอบค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศว่ายอมรับได้หรือไม่ ถ้าได้จบกระบวนการออกแบบ ถ้ายอมรับไม่ได้กลับไปกระบวนการ Select ใหม่ กระบวนการจะทำซ้ำจนกว่าจะได้คำตอบที่ยอมรับได้หรือครบจำนวนรอบการทำงานแล้วจึงออกจากโปรแกรม

3.5 การออกแบบรูปทรงขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ในหัวข้อนี้ต้องการแสดงให้เห็นการเปรียบเทียบวิธีการออกแบบรูปทรงขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นเชิงเส้น (linear) และไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) เนื่องจากการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่ในงานวิจัยที่อ้างถึง [1-5] เป็นการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่เป็นเชิงเส้นโดยการกำหนดค่าความซึมซาบแม่เหล็ก μ ($\mu_r = 1000$) คงที่แต่ในความเป็นจริงค่า μ จะไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเส้นโค้งกำหนดแม่เหล็กของแกนเหล็กแต่ละชนิด ดังนั้นการกำหนดค่า μ ให้คงที่ตามงานวิจัยที่อ้างถึงจะให้ผลไม่เป็นไปตามทางปฏิบัติ



รูปที่ 3.14 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมออกแบบรูปทรงขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น

แนวทางในการพัฒนาคือการเพิ่มอัลกอริทึมในการปรับแต่งค่า μ ในแต่ละอิลิเมนต์ให้เหมาะสม การทดสอบในการออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้แกนเหล็กเบอร์ RM14 ความหนา 0.35 mm (ภาคผนวก ก) การออกแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นข้อมูลเส้นโค้งกำหนดแม่เหล็กของแกนเหล็ก RM14 ความหนา 0.35 mm จะถูกเก็บในรูปของฐานข้อมูลการประมาณค่าในช่วงกำลังสาม (cubic spline) เพราะมีลักษณะการกระจายแบบเว้าเข้าและเว้าออกที่ต่อเนื่องกันในช่วงระหว่างข้อมูลตามแผนผังการทำงานรูปที่ 3.14

การทำงานของโปรแกรม ขั้นตอน Geometric Primitive เป็นการกำหนดขอบเขตของต้นแบบ กำหนดคุณสมบัติของตัวกลางต่าง ๆ ขั้นตอน Automatic Mesh เป็นการสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ ขั้นตอน Deterministic เป็นการหาตำแหน่งในการเคลื่อนที่โหนดไปยังจุดที่เหมาะสมของแต่ละโหนด ขั้นตอน Cubic Spline Moving Node เป็นการเคลื่อนโหนดทั้ง 6 โหนดให้ราบโค้งมน ขั้นตอน Core เป็นการเลือกอิลิเมนต์ที่เป็นแกนเหล็กเพื่อหาค่า μ ที่แท้จริงของแกนเหล็กแต่ละอิลิเมนต์ ขั้นตอน Solve Finite Element Equation เป็นการสร้างเมตริกซ์ตามสมการที่ 2.23 ขั้นตอน Solve Magnetic Flux Density เป็นการคำนวณหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ขั้นตอน B-H Curve เป็นการนำค่า $B(k)$ ไปหาค่า μ_r^k ขั้นตอนต่อมาเป็นการตรวจสอบว่าค่า μ_r^k ยอมรับได้หรือไม่ถ้าไม่ได้กลับไปทำซ้ำใหม่จนกว่าจะยอมรับได้ ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการตรวจสอบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศว่ายอมรับได้หรือไม่ถ้ายอมรับได้จะจบกระบวนการออกแบบถ้าไม่ได้จะกลับไปขั้นตอน Deterministic ใหม่เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมใหม่ของแต่ละโหนด กระบวนการจะทำซ้ำจนกว่าจะได้คำตอบที่ยอมรับได้หรือครบจำนวนรอบการทำซ้ำที่กำหนดไว้

3.6 เงื่อนไขการออกแบบ

เป้าหมายของการออกแบบในงานวิจัยที่กล่าวถึงคือการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของโหนดที่เคลื่อนที่ทั้ง 6 โหนด เพื่อทำให้เกิดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B_c ในอิลิเมนต์ต่าง ๆ บริเวณช่องอากาศ (10 อิลิเมนต์) ให้มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B_d ตามความต้องการที่จะออกแบบ ซึ่งการแก้ปัญหาในลักษณะนี้สามารถกระทำได้โดยการจัดให้อยู่ในรูปสมการการหาค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชันหลักดังนี้

$$F[\{p_x, p_y\}, A(\{p_x, p_y\})] = \sum_{i=1}^{10} |B_{c_i} - B_{d_i}|^2 \quad (3.1)$$

โดยมีเงื่อนไขของขอบเขต ($j = 1, \dots, 6$)

$$g_{x_j}(\{p_x\}) = \frac{p_{x_j}^2 - p_{x_j}(p_{x_j}^L - p_{x_j}^R) + p_{x_j}^L p_{x_j}^R}{(p_{x_j}^R - p_{x_j}^L)^2} \leq 0 \quad (3.2)$$

$$g_{y_j}(\{p_y\}) = \frac{p_{y_j}^2 - p_{y_j}(p_{y_j}^L - p_{y_j}^R) + p_{y_j}^L p_{y_j}^R}{(p_{y_j}^R - p_{y_j}^L)^2} \leq 0 \quad (3.3)$$

เมื่อ $p_{x_j}^L$ และ $p_{x_j}^R$ เป็นขอบเขตแนวแกน x ทางด้านซ้ายและทางด้านขวาตามลำดับ และตำแหน่งแนวแกน x กำหนดให้มามีค่าดังนี้

$$0.105 \leq p_{x_j} \leq 0.175 \text{ cm} \quad (3.4)$$

เมื่อ $p_{y_j}^L$ และ $p_{y_j}^R$ เป็นขอบเขตแนวแกน y ทางด้านล่างและทางด้านบนตามลำดับ และตำแหน่งแนวแกน y กำหนดให้มามีค่าดังนี้

$$0.125 \leq p_{y_1} \leq 0.150 \text{ cm}$$

$$0.095 \leq p_{y_2} \leq 0.120 \text{ cm}$$

$$0.065 \leq p_{y_3} \leq 0.09 \text{ cm}$$

$$0.035 \leq p_{y_4} \leq 0.06 \text{ cm}$$

$$0.005 \leq p_{y_5} \leq 0.03 \text{ cm}$$

$$p_{y_6} = 0 \text{ cm} \quad (3.5)$$

สมการที่ 3.2 ถึง 3.5 เป็นค่าเงื่อนไขขอบเขตของโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x และในแนวแกน y ตามลำดับ ซึ่งถ้าเป็นการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีสโตชาสติก (เจเนติก) ไม่จำเป็นต้องใช้เงื่อนไขในสมการที่ 3.2 และ 3.3

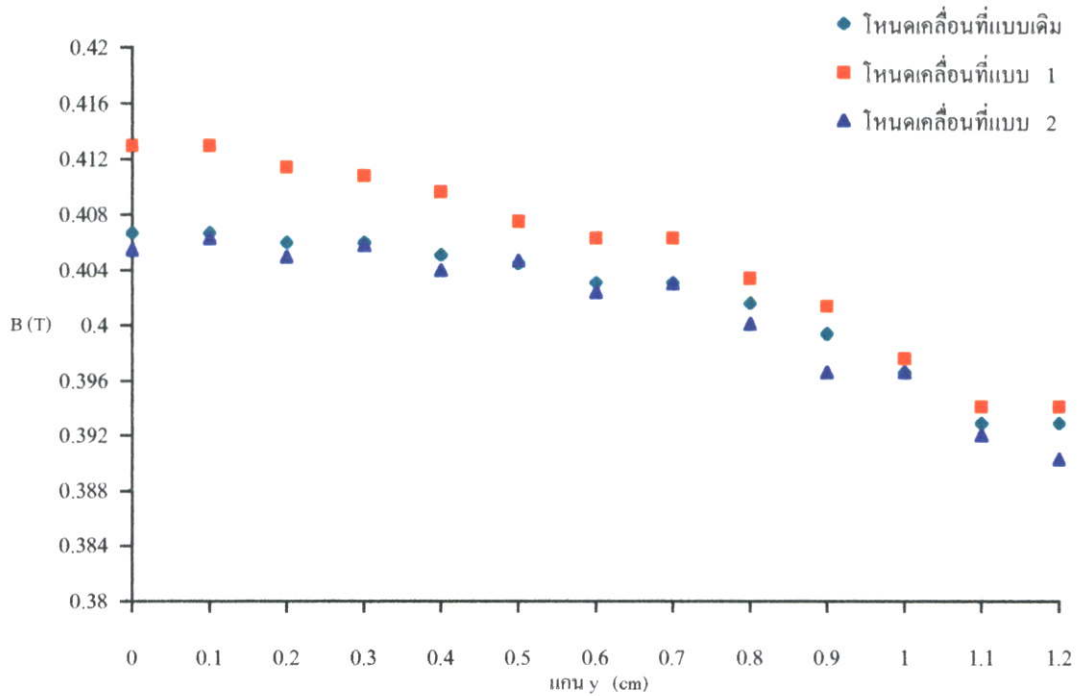
บทที่ 4

ผลการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า

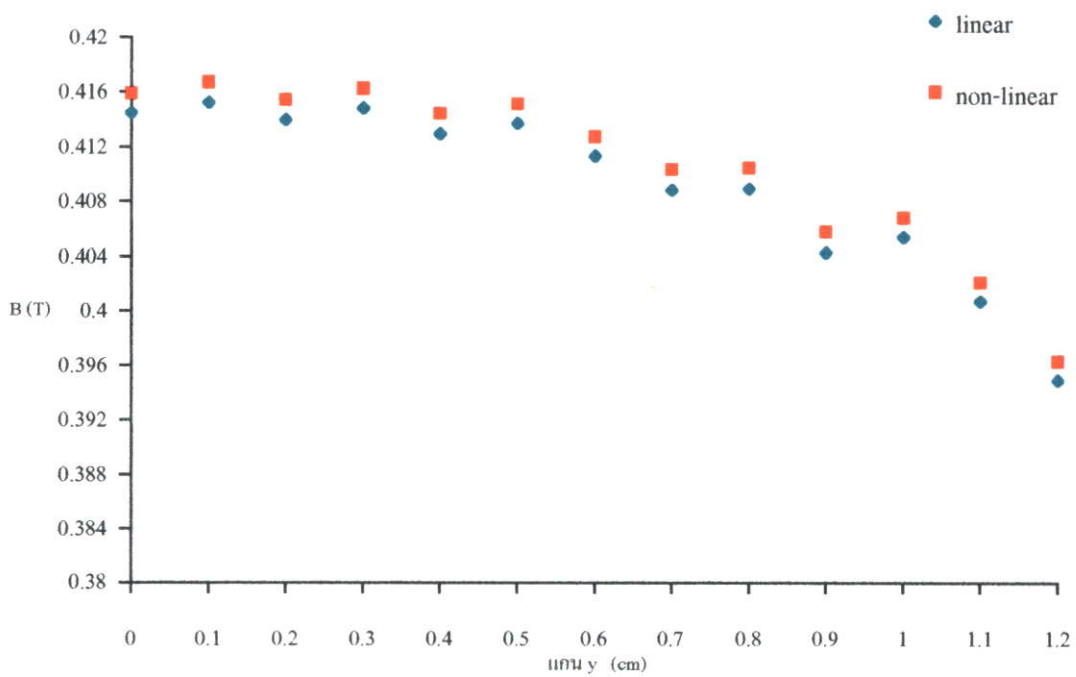
4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบต่าง ๆ ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ปัญหาที่ออกแบบกำหนดให้เป็นสนามแม่เหล็กแบบสเตติก 2 มิติ ผลการออกแบบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการเปรียบเทียบ วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิม วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2 ในแต่ละแนวแกนการเคลื่อนที่ ประกอบไปด้วย 3 แนวแกนการเคลื่อนที่ แนวแกนนอน x (เคลื่อนที่โหนดในแกน x) แนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง $x-y$ (เคลื่อนที่โหนดในแกน x ก่อนและเคลื่อนที่โหนดในแกน y) และแนวแกนนอนพร้อมกับแนวแกนตั้ง xy (เคลื่อนที่โหนดในแกน x และ y พร้อมกัน) โดยจะทำงานร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก และการคำนวณหารูปร่างที่เหมาะสมจะใช้วิธีดิเทอมีนิสติกตามแผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมออกแบบรูปที่ 3.9 ในส่วนที่สองจะเป็นการเปรียบเทียบความแม่นยำของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติกและสโตชาสติกโดยทำงานร่วมกับวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกน x ร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตามแผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมออกแบบรูปที่ 3.13 ในส่วนที่สามจะเป็นการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยการกำหนดค่าความซึมซาบแม่เหล็กให้ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กของแกนเหล็ก แกนเหล็กที่ใช้เบอร์ RM14 ความหนา 0.35 mm (ภาคผนวก ก) โดยจะทำงานร่วมกับวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกน x ซึ่งวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติกและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะเป็นไปตามแผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมออกแบบรูปที่ 3.14

รูปที่ 4.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ของต้นแบบที่พิจารณารูปที่ 3.2 (ก่อนที่จะเคลื่อนที่โหนด) จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ของต้นแบบที่พิจารณาชุดแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าไม่เท่ากัน ส่วนรูปที่ 4.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ของต้นแบบที่พิจารณารูปที่ 3.2 เป็นการเปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น (การออกแบบที่เป็นเชิงเส้นกำหนดค่าความซึมซาบแม่เหล็ก μ คงที่ $\mu_r = 7245$ ซึ่งเป็นค่า μ_r สูงสุดของแกนเหล็กที่ใช้เบอร์ RM14 ความหนา 0.35 mm) ก่อนที่จะเคลื่อนที่โหนด



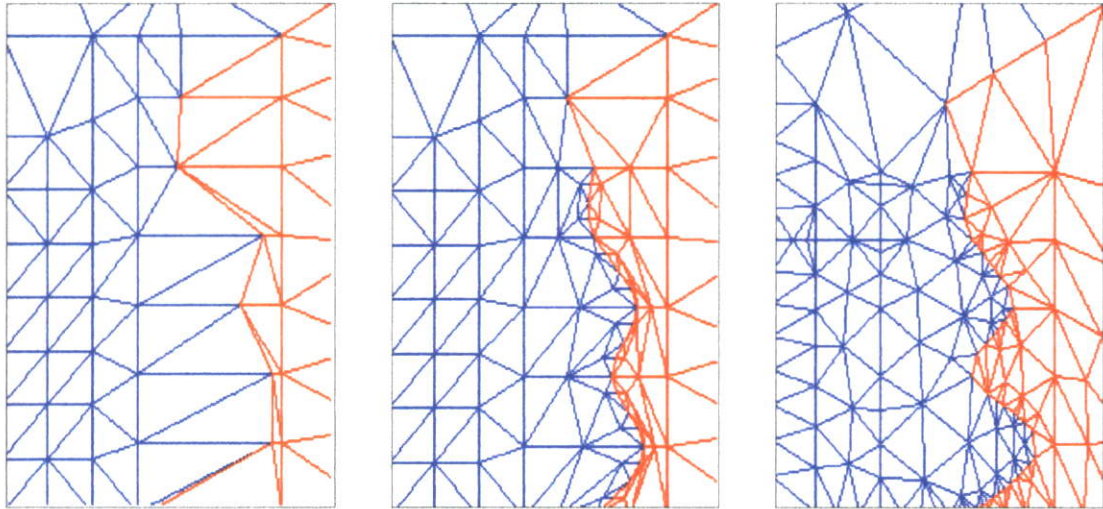
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ของต้นแบบที่พิจารณาก่อนที่จะเคลื่อนที่โหนด



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ซึ่งเปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นก่อนที่จะเคลื่อนที่โหนด

4.2 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x

4.2.1 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.33$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x

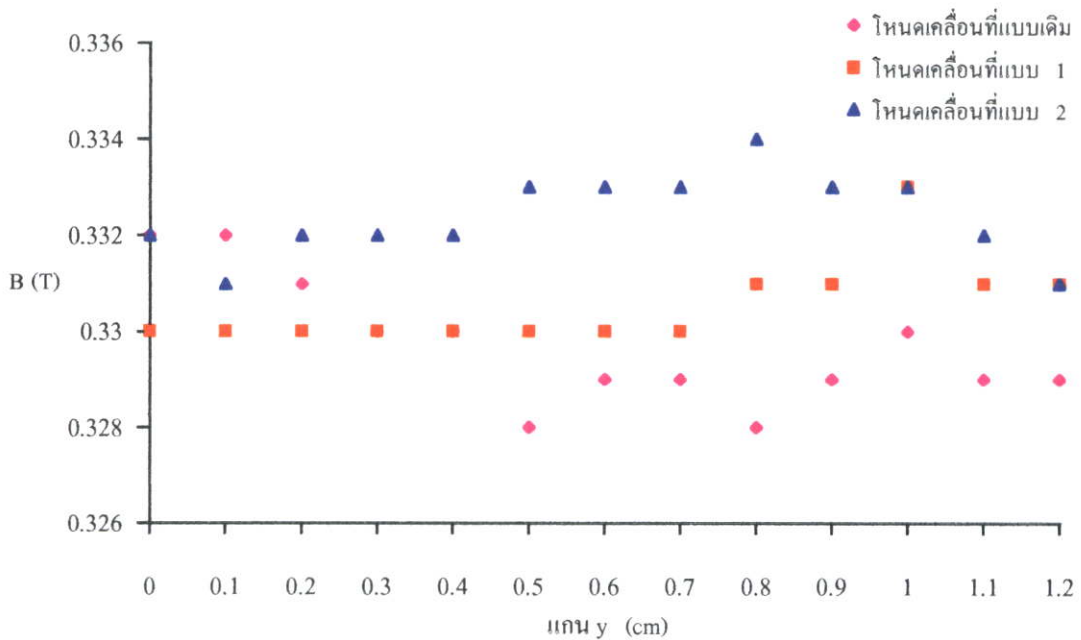


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

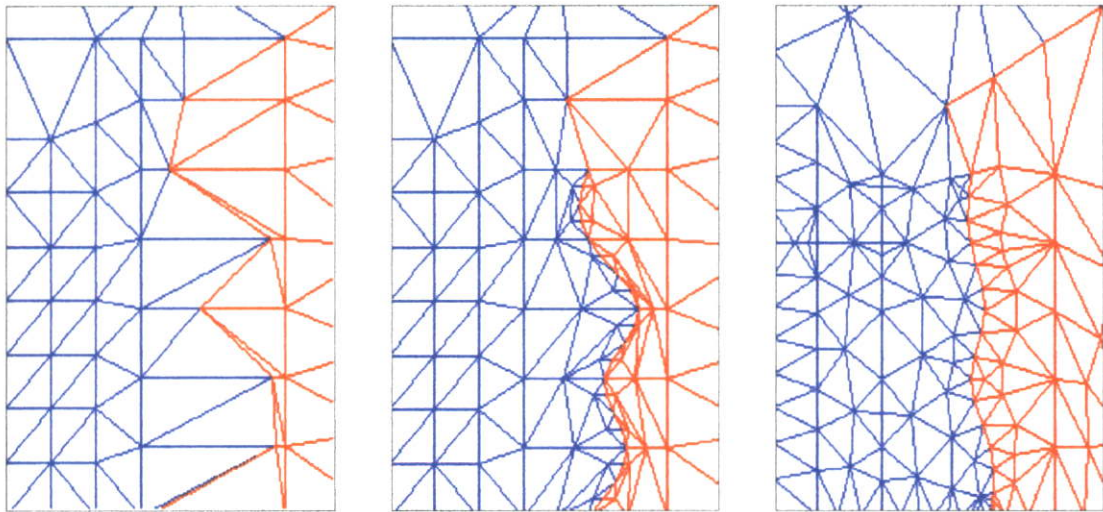
โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

รูปที่ 4.3 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.33$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่างๆ



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่างๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.33$ T

4.2.2 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.34$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x

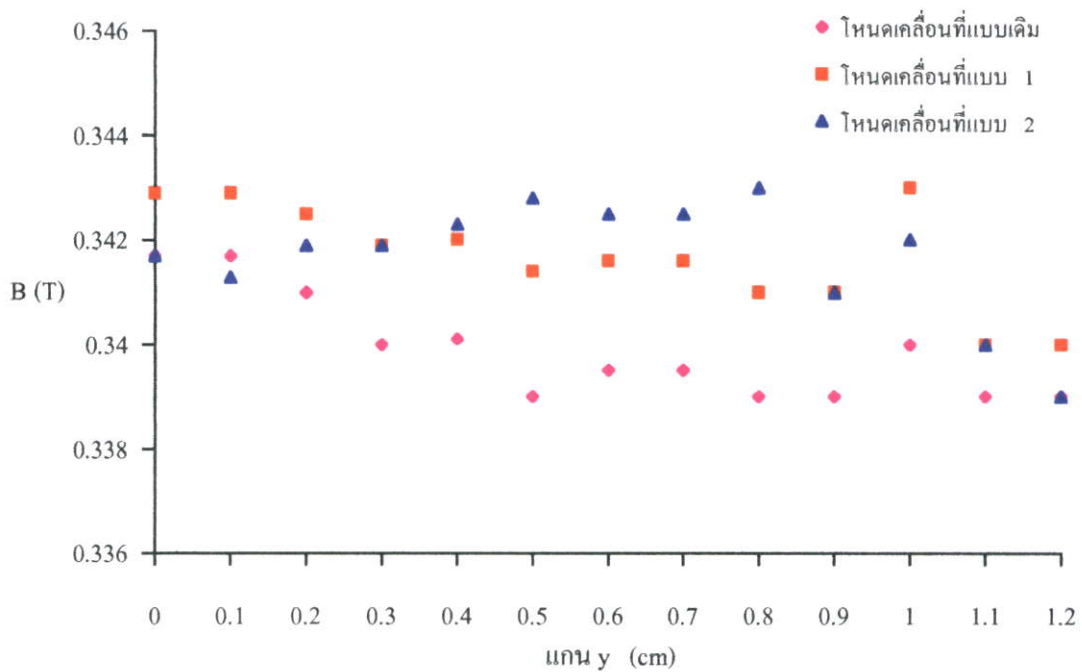


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

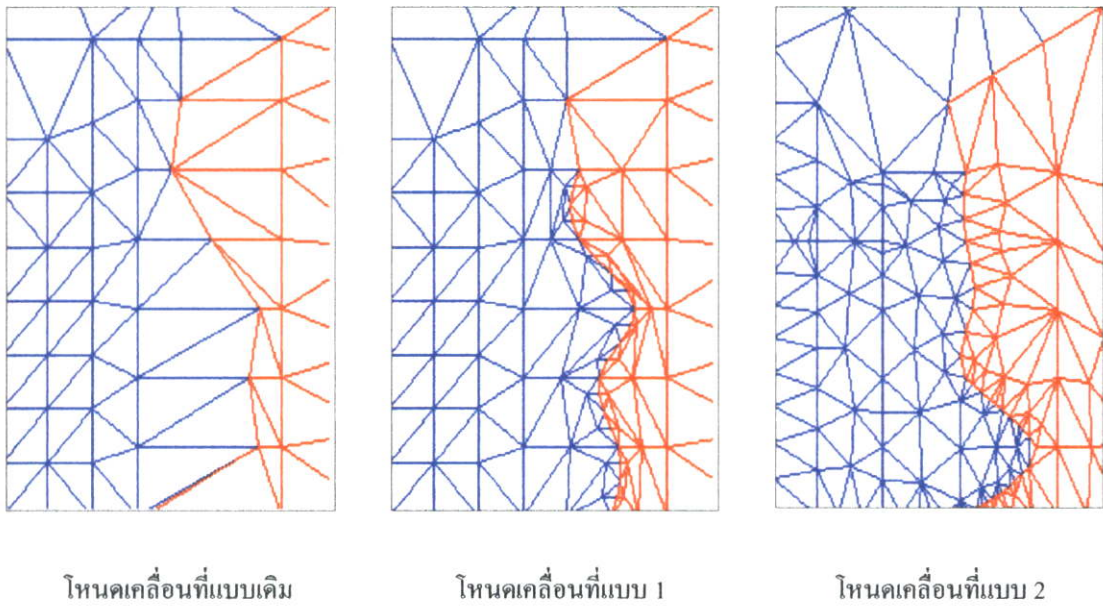
โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

รูปที่ 4.5 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.34$ T โดยวิธีการ โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่างๆ

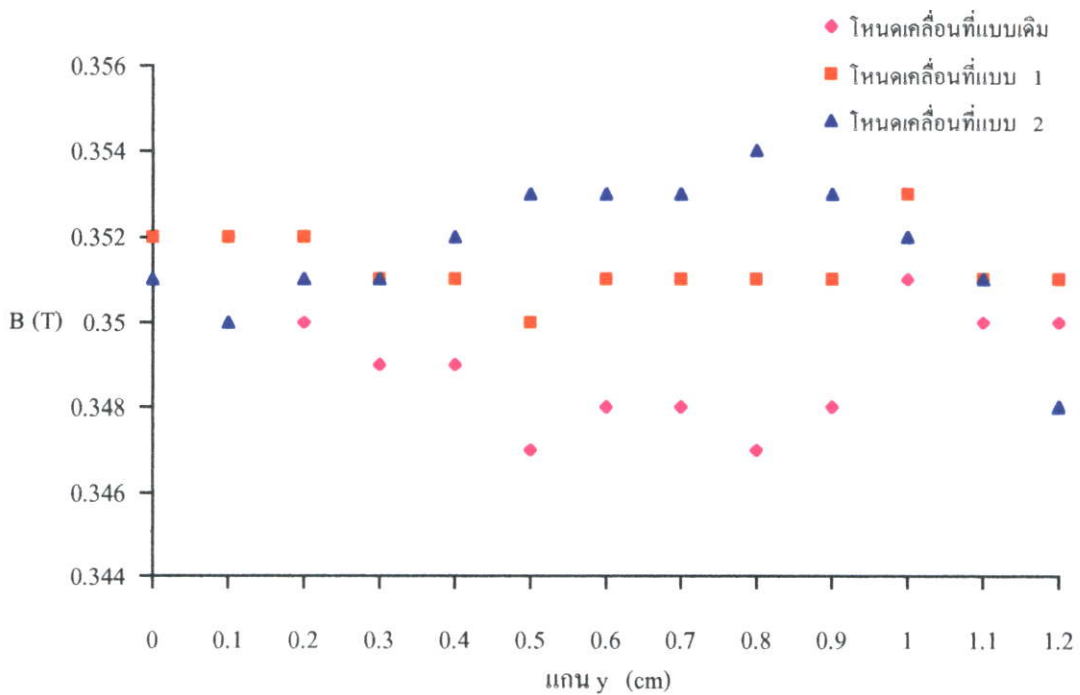


รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการ โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่างๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.34$ T

4.2.3 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.35$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x

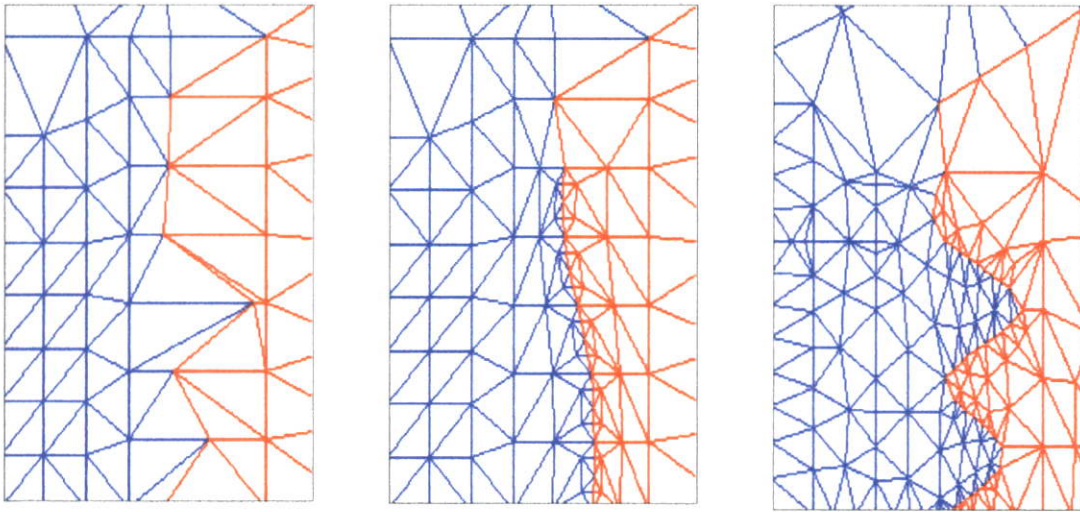


รูปที่ 4.7 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิติเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.35$ T โดยวิธีการ โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่างๆ



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการ โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่างๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.35$ T

4.2.4 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.36$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x

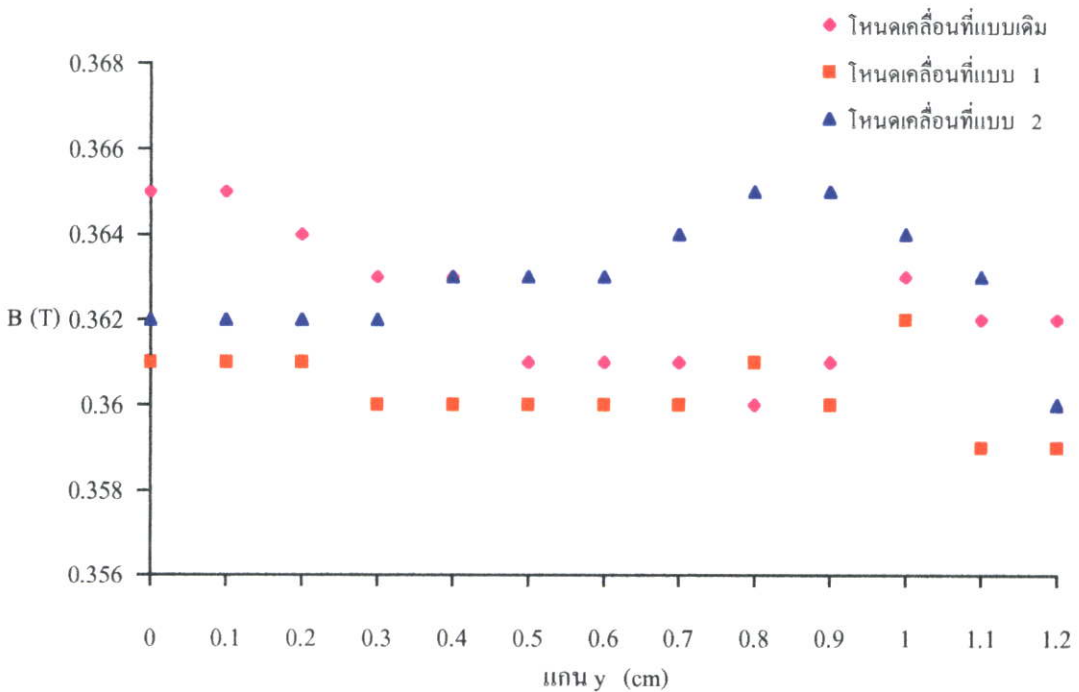


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

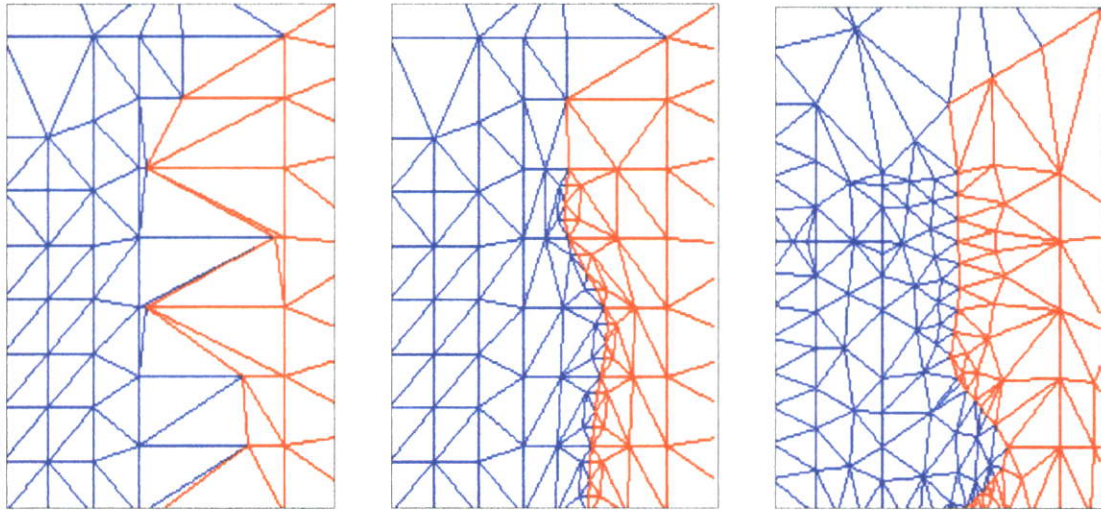
โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

รูปที่ 4.9 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.36$ T โดยวิธีการ โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการ โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.36$ T

4.2.5 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.37$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x

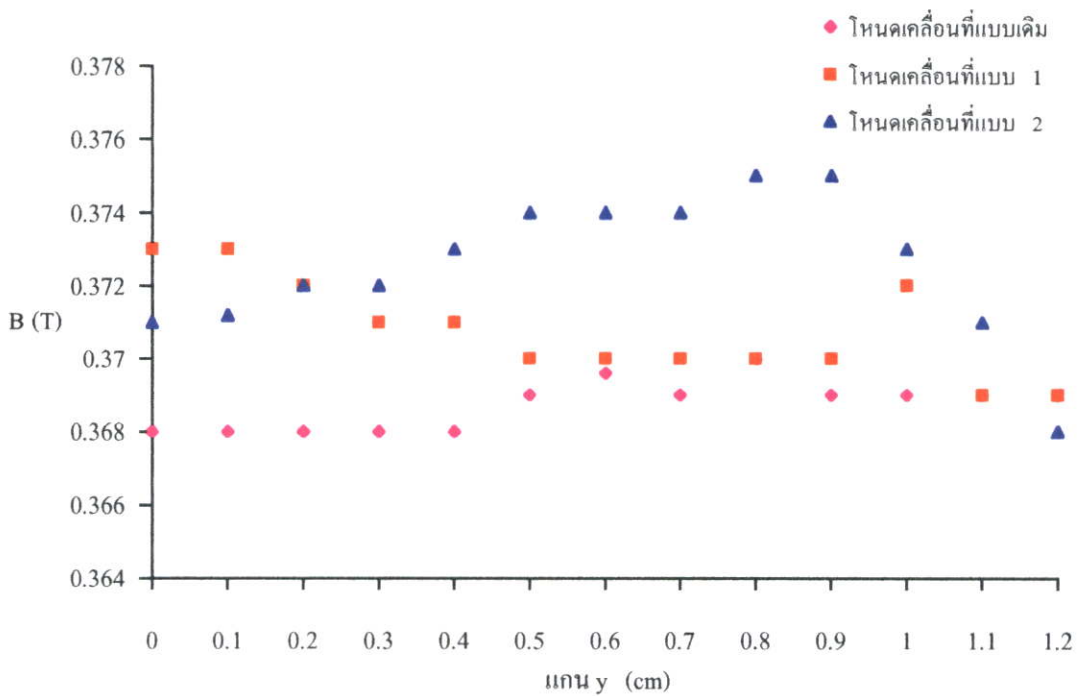


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

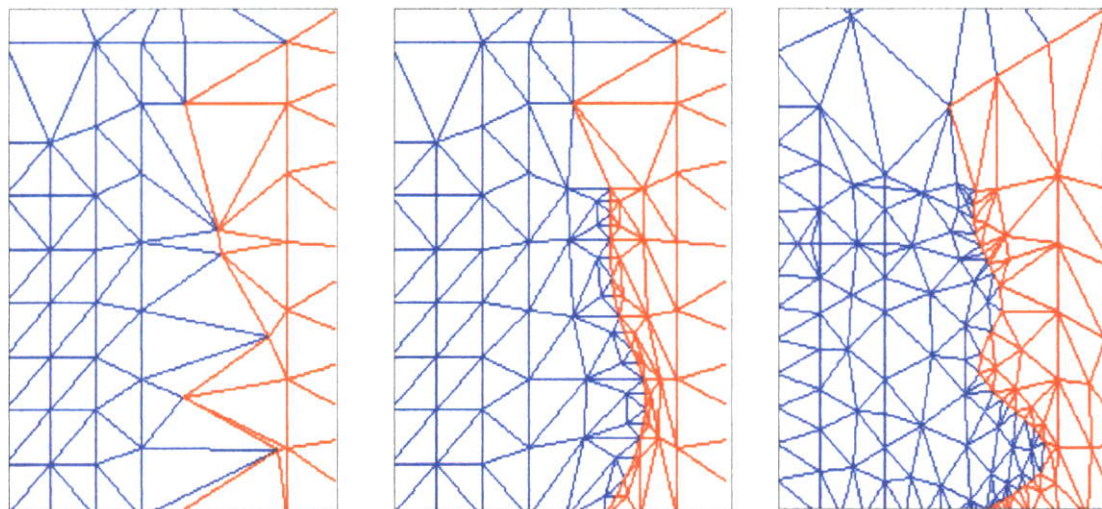
รูปที่ 4.11 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.37$ T โดยวิธีการ โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่างๆ



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แบบต่างๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.37$ T

4.3 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x-y$

4.3.1 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.33$ T วิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x-y$

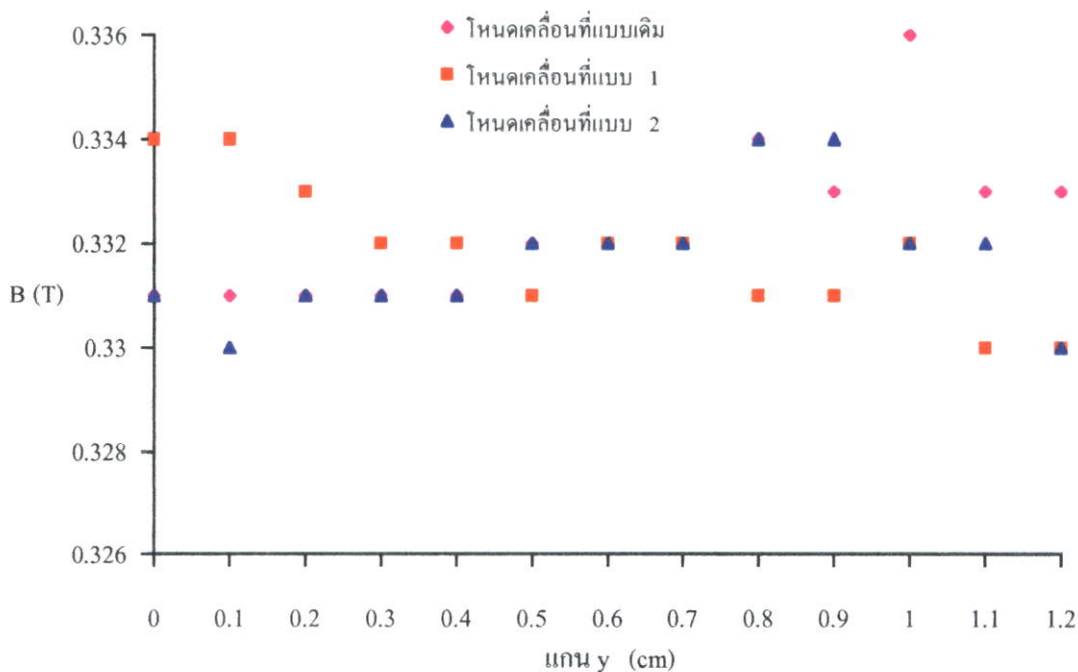


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

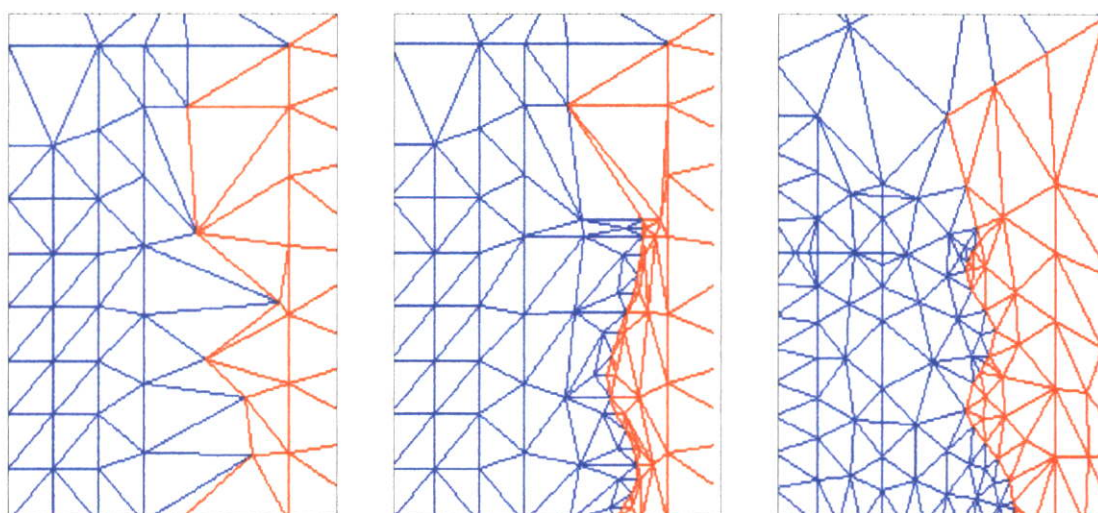
โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

รูปที่ 4.13 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิติเมนท์ที่ค่า $B_d = 0.33$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x-y$ แบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x-y$ แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.33$ T

4.3.2 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.34$ T วิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x-y$

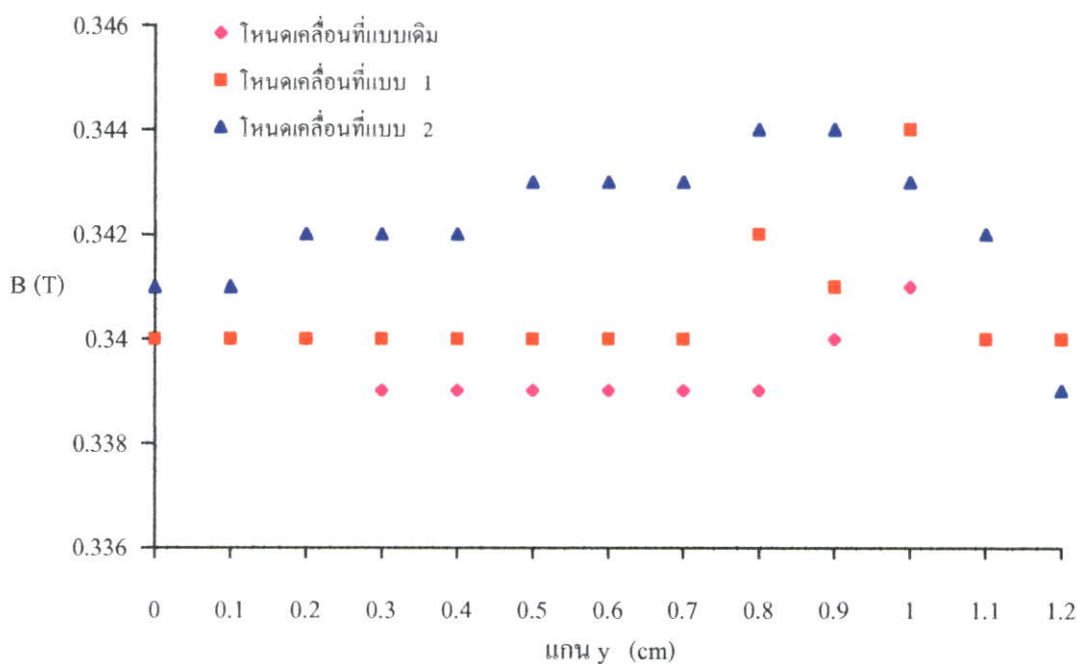


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

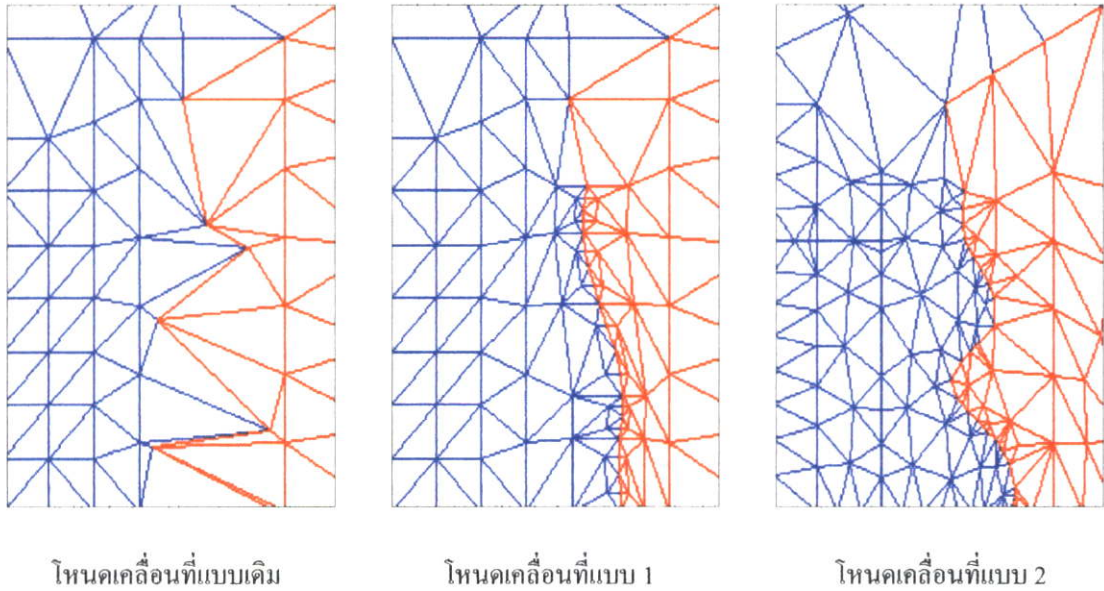
โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

รูปที่ 4.15 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิติเมนที่ค่า $B_d = 0.34$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x-y$ แบบต่างๆ

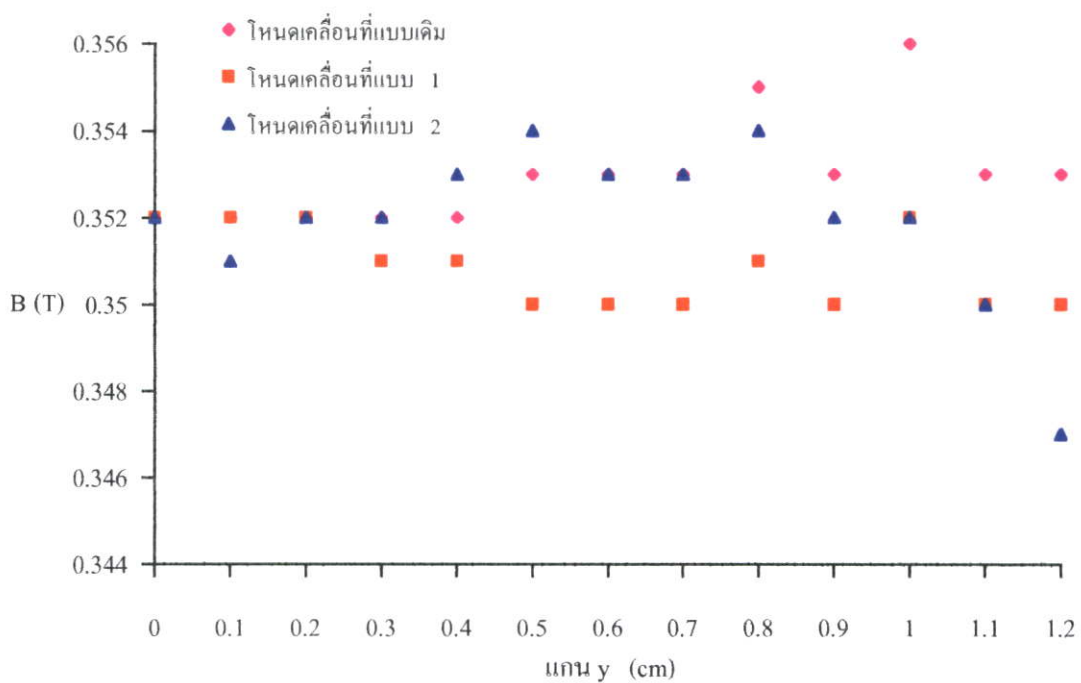


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x-y$ แบบต่างๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.34$ T

4.3.3 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.35$ T วิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$

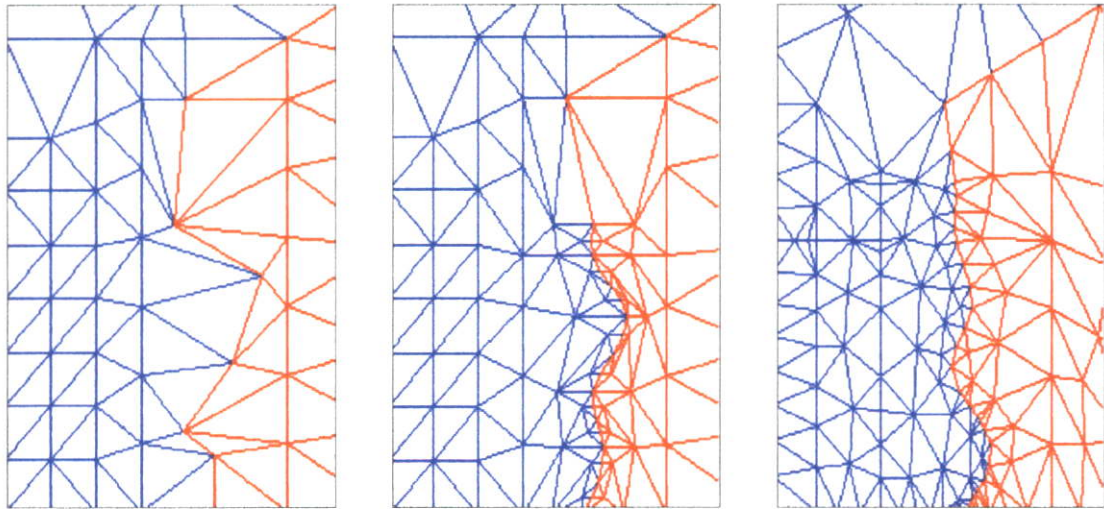


รูปที่ 4.17 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิเลเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.35$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.35$ T

4.3.4 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.36$ T วิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$

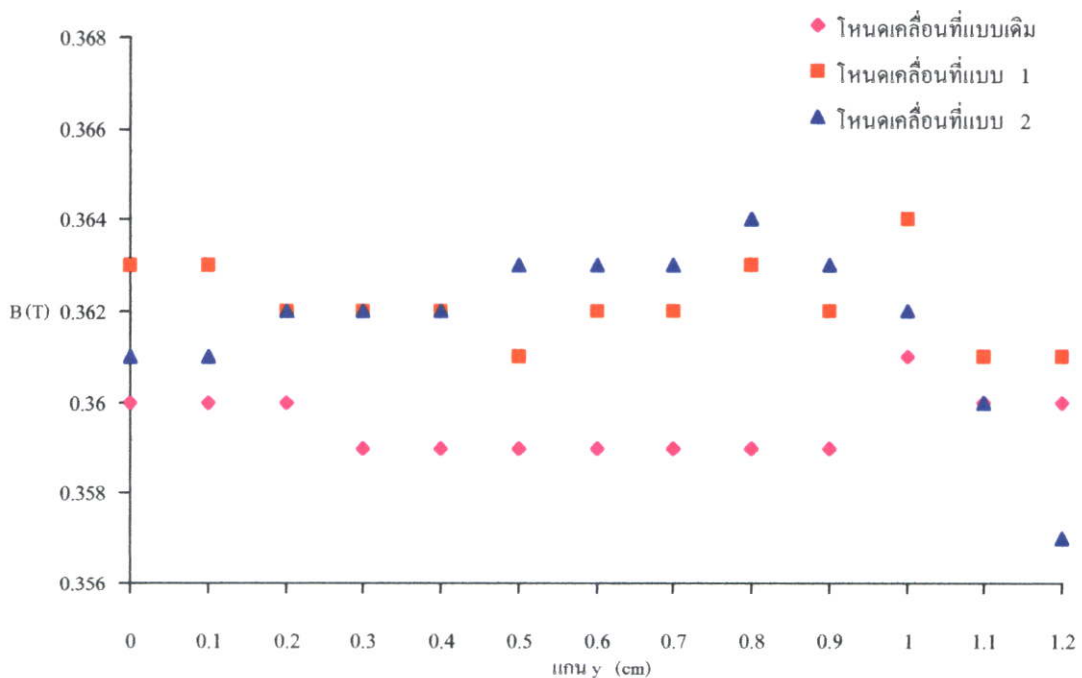


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

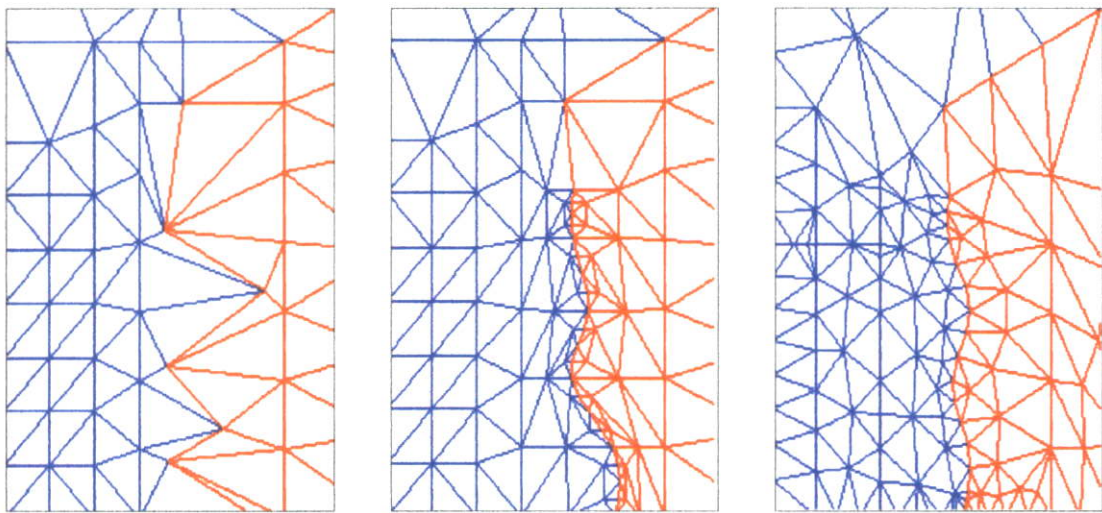
โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

รูปที่ 4.19 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.36$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่างๆ



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่างๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.36$ T

4.3.5 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.37$ T วิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$

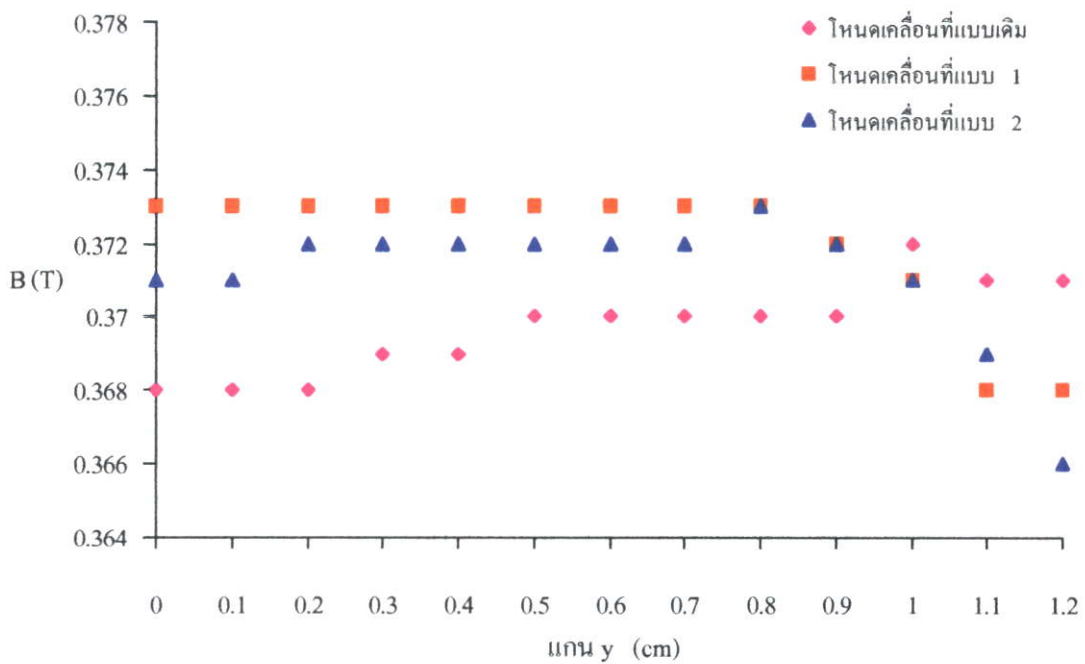


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

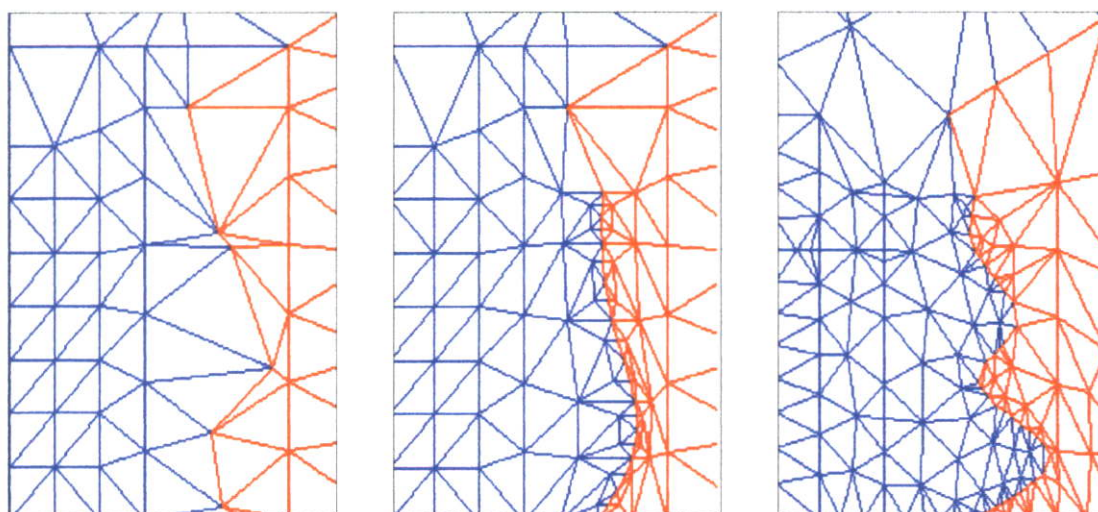
รูปที่ 4.21 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิติเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.37$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่างๆ



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x - y$ แบบต่างๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.37$ T

4.4 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy

4.4.1 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.33$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy

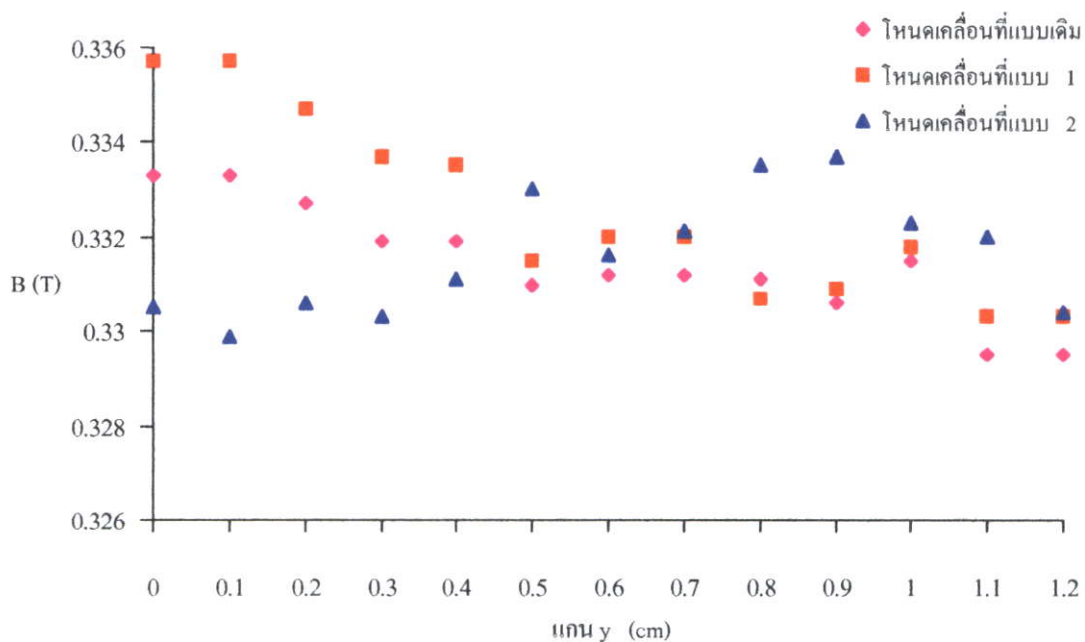


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

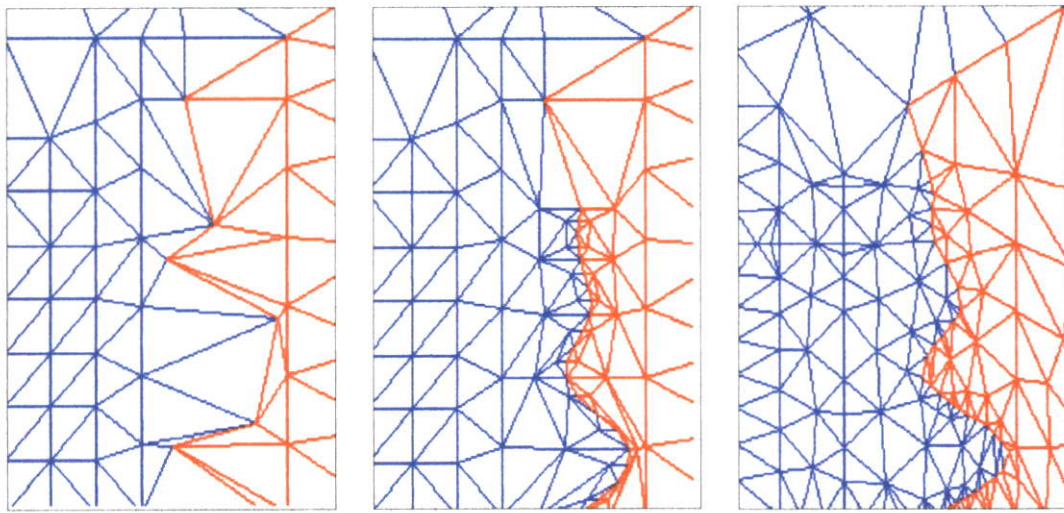
โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

รูปที่ 4.23 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิทธิมันท์ที่ค่า $B_d = 0.33$ T โดยวิธีการ โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy แบบต่างๆ



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการ โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy แบบต่างๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.33$ T

4.4.2 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.34$ T วิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy

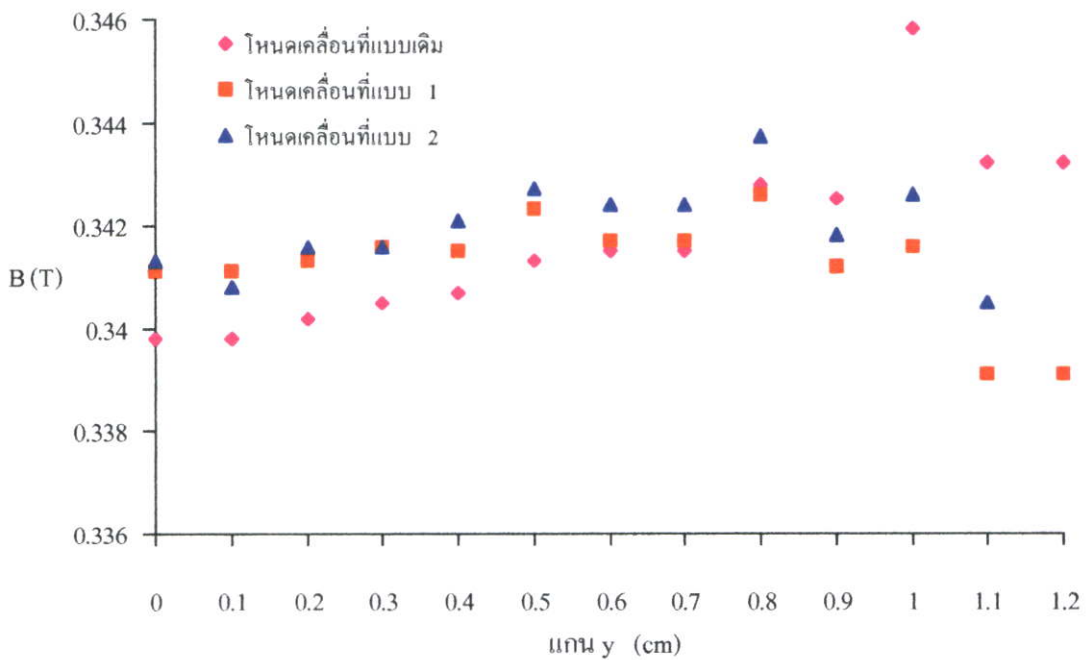


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

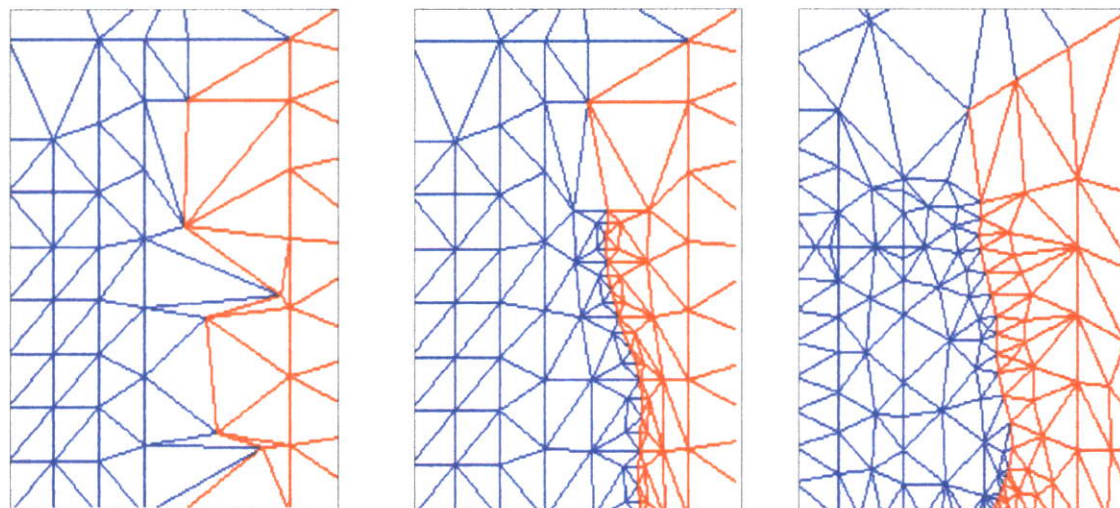
โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

รูปที่ 4.25 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิติเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.34$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy แบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy แบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.34$ T

4.4.3 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.35$ T วิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy

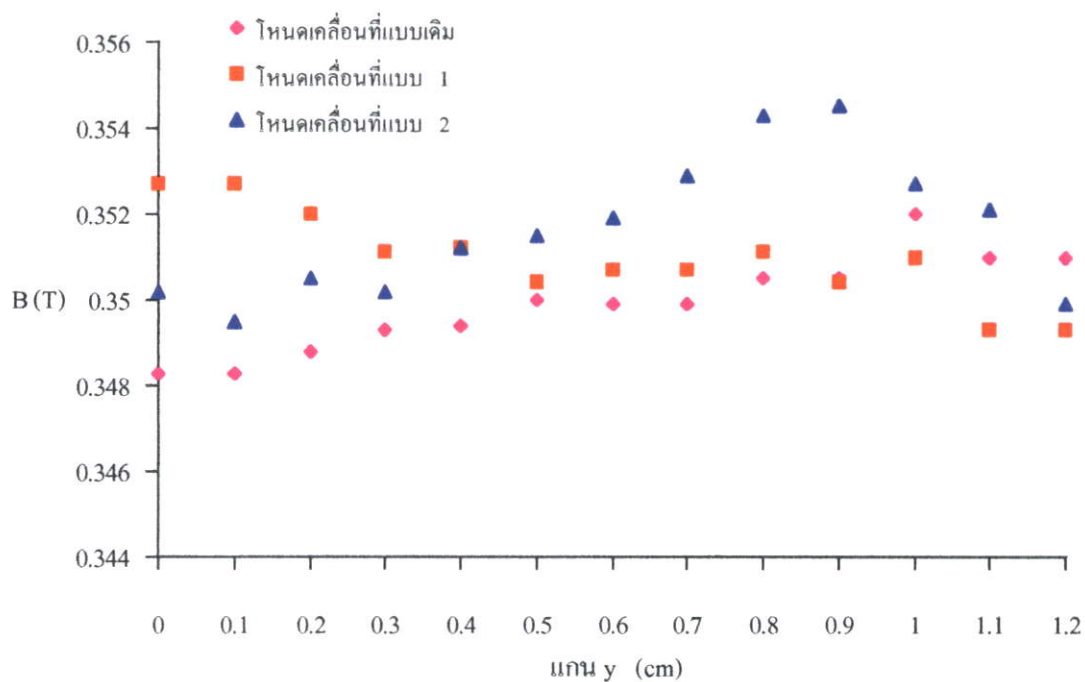


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

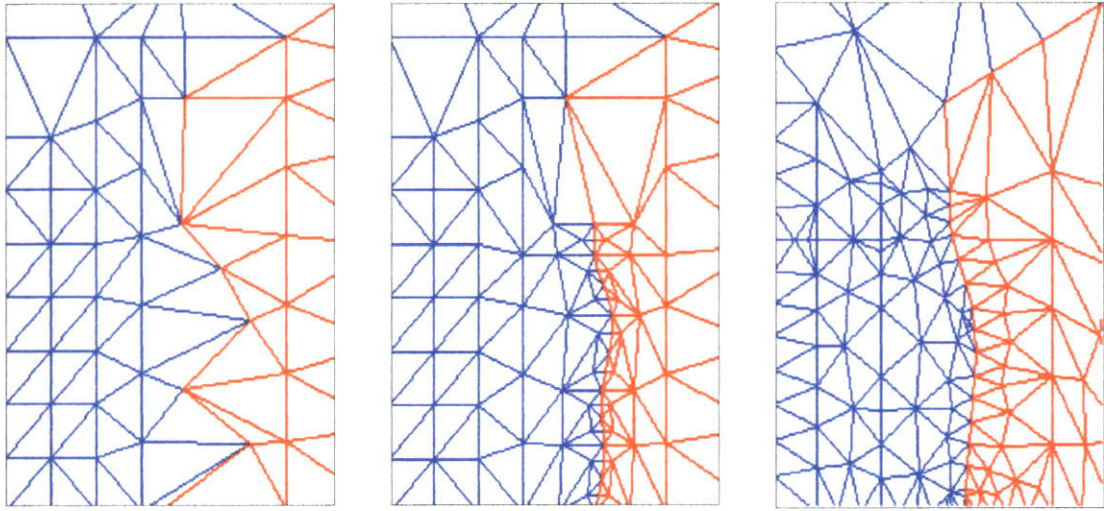
โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

รูปที่ 4.27 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิทธิเมนที่ค่า $B_d = 0.35$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy แบบต่างๆ



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy แบบต่างๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.35$ T

4.4.4 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.36$ T วิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy

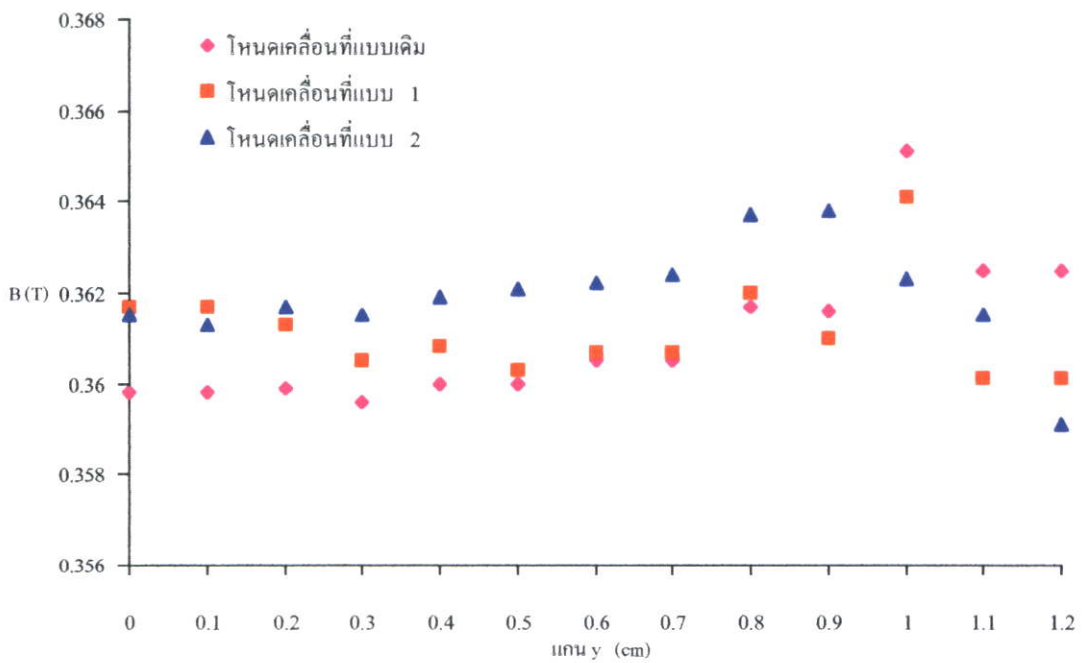


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

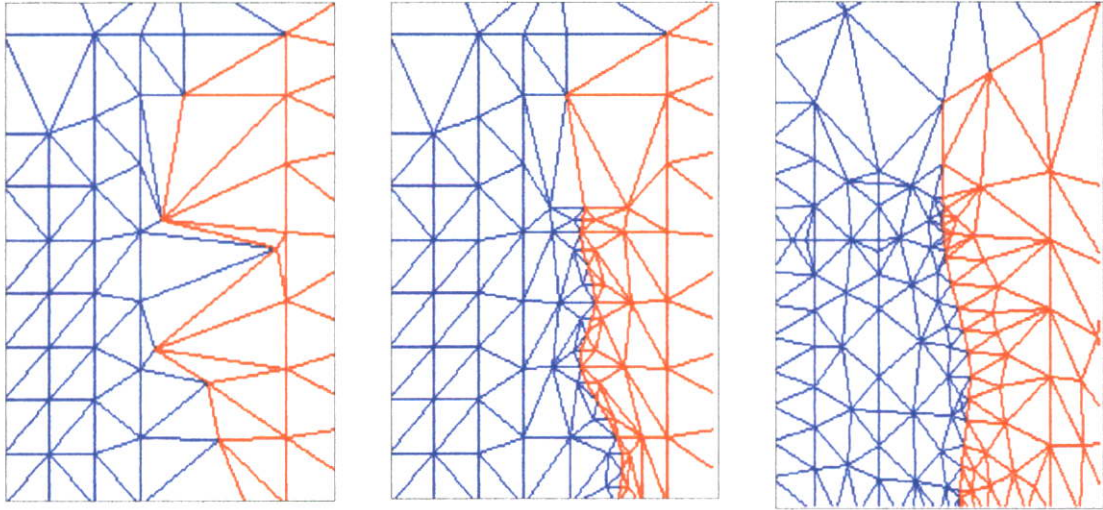
โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

รูปที่ 4.29 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.36$ T โดยวิธีการ โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy แบบต่างๆ



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy แบบต่างๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.36$ T

4.4.5 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ค่า $B_d = 0.37$ T วิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy

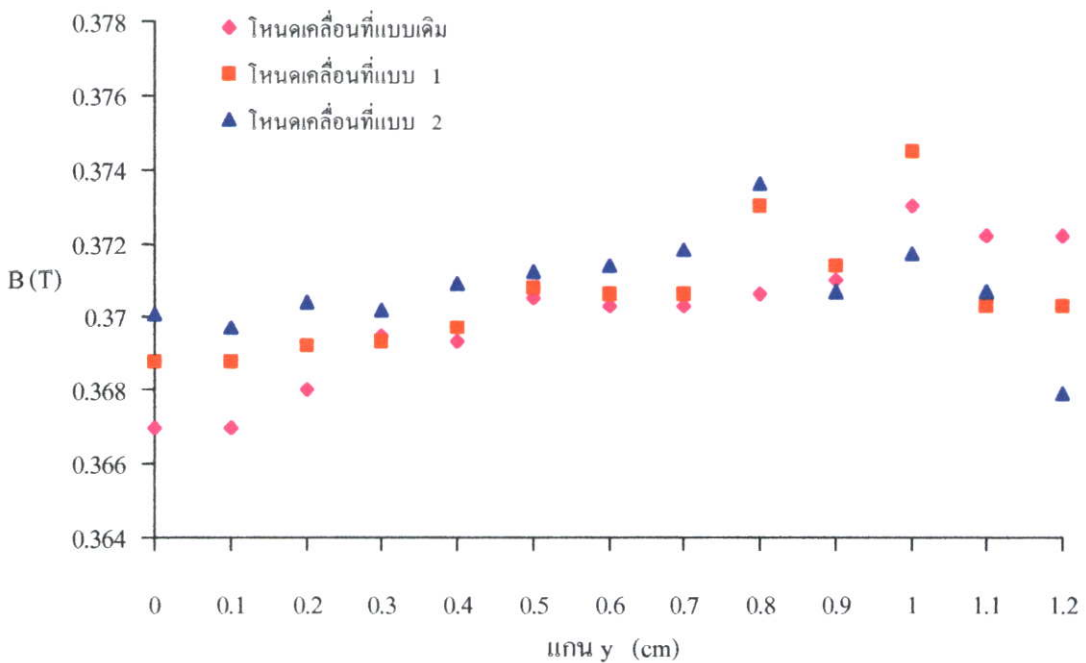


โหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

โหนดเคลื่อนที่แบบ 1

โหนดเคลื่อนที่แบบ 2

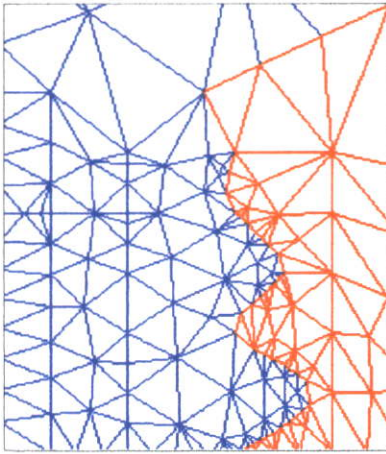
รูปที่ 4.31 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.37$ T โดยวิธีการ โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy แบบต่างๆ



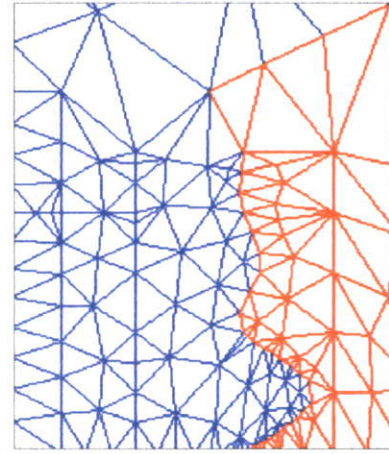
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบค่า B_c ที่เกิดขึ้นบริเวณช่องอากาศ D โดยวิธีการ โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy แบบต่างๆ เมื่อกำหนดค่า $B_d = 0.37$ T

4.5 การเปรียบเทียบวิธีการดิทอมินิสติกและสโตชาสติกสำหรับการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าตามแนวแกน x

4.5.1 เปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่า $B_d = 0.33 \text{ T}$



ดิทอมินิสติก



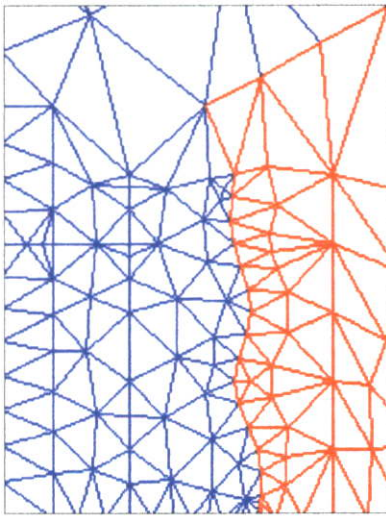
สโตชาสติก

รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบรูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอีลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.33 \text{ T}$

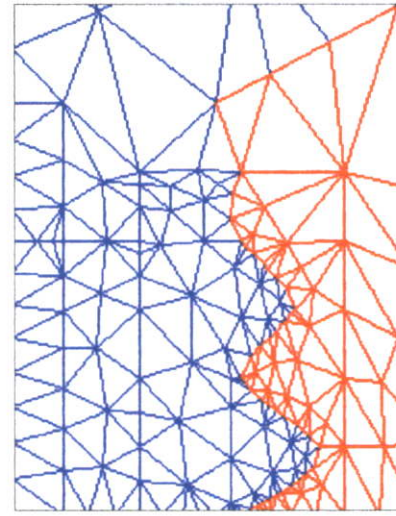
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ค่า $B_d = 0.33 \text{ T}$

อีลิเมนต์ลำดับที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ $B_d = 0.33 \text{ T}$		
	ค่าเริ่มต้น	ดิทอมินิสติก	สโตชาสติก
1	0.4055357	0.3321229	0.3321202
2	0.4063035	0.3317214	0.3316653
3	0.4050456	0.3327797	0.3327764
4	0.4058628	0.3321725	0.3325801
5	0.4040449	0.3327982	0.3302638
6	0.4047820	0.3330694	0.3331001
7	0.4024203	0.3332522	0.3333741
8	0.4030458	0.3339784	0.3327079
9	0.4000192	0.3335802	0.3332972
10	0.4001547	0.3348405	0.3354031
11	0.3966458	0.3335834	0.3331800
12	0.3956524	0.3348353	0.3349433
13	0.3920823	0.3329991	0.3328941
14	0.3919003	0.3320636	0.3304968
15	0.3903081	0.3349991	0.3346298
16	0.3863823	0.3345749	0.3340827
17	0.3861561	0.3312015	0.3307818
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		0.0001966	0.0001719

4.5.2 เปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่า $B_d = 0.34$ T



ดิทอมนิสติก



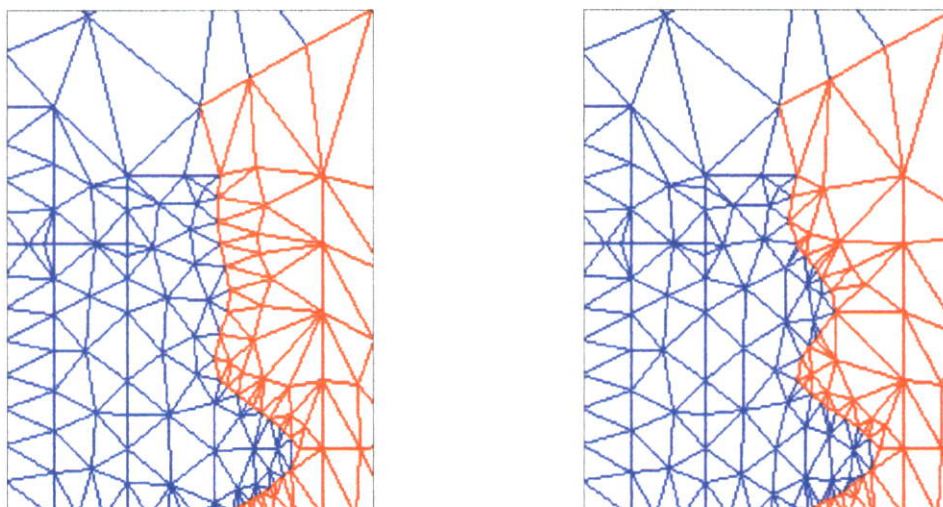
สโตชาสติก

รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบรูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิเลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.34$ T

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ค่า $B_d = 0.34$ T

อิเลิเมนต์ลำดับที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ $B_d = 0.34$ T		
	ค่าเริ่มต้น	ดิทอมนิสติก	สโตชาสติก
1	0.4055357	0.3417214	0.3415059
2	0.4063035	0.3413246.	0.3410835
3	0.4050456	0.3419751	0.3417760
4	0.4058628	0.3419132	0.3416027
5	0.4040449	0.3423197	0.3421948
6	0.4047820	0.3428301	0.3425949
7	0.4024203	0.3425729	0.3420135
8	0.4030458	0.3435250	0.3434399
9	0.4000192	0.3425270	0.3420499
10	0.4001547	0.3437615	0.3411652
11	0.3966458	0.3419653	0.3406907
12	0.3956524	0.3428345	0.3419077
13	0.3920823	0.3406501	0.3418664
14	0.3919003	0.3387606	0.3406122
15	0.3903081	0.3421309	0.3418530
16	0.3863823	0.3414903	0.3413462
17	0.3861561	0.3381561	0.3397630
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		0.0000892	0.0000554

4.5.3 เปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่า $B_d = 0.35$ T



คิโทมินิสติก

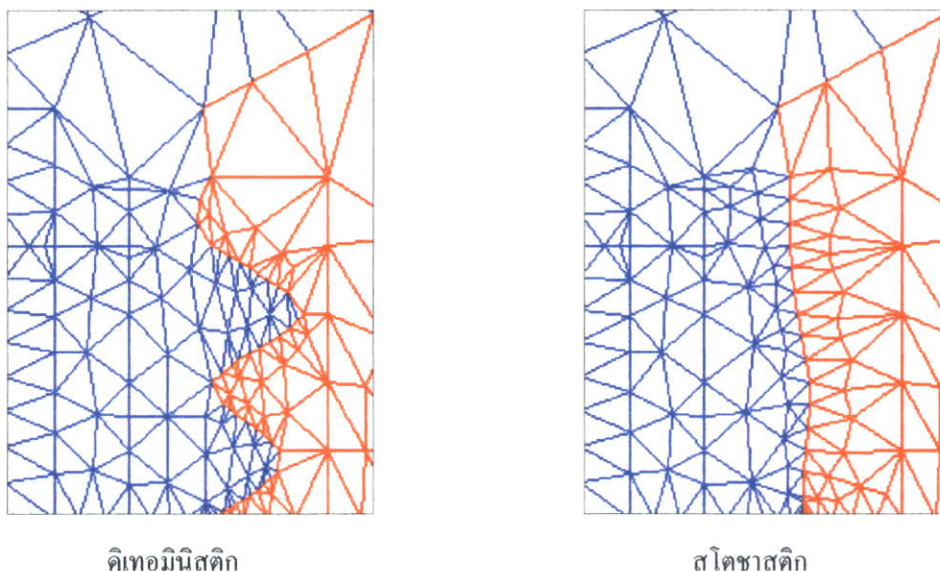
สโตชาสติก

รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบรูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.35$ T

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องอากาศ D ที่ค่า $B_d = 0.35$ T

อิลิเมนต์ลำดับที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ $B_d = 0.35$ T		
	ค่าเริ่มต้น	คิโทมินิสติก	สโตชาสติก
1	0.4055357	0.3513990	0.3510001
2	0.4063035	0.3507124	0.3505647
3	0.4050456	0.3518382	0.3512786
4	0.4058628	0.3516281	0.3511266
5	0.4040449	0.3524845	0.3516974
6	0.4047820	0.3531961	0.3521442
7	0.4024203	0.3530623	0.3528021
8	0.4030458	0.3544811	0.3530441
9	0.4000192	0.3532604	0.3522133
10	0.4001547	0.3550850	0.3536418
11	0.3966458	0.3527730	0.3518555
12	0.3956524	0.3539931	0.3530545
13	0.3920823	0.3512977	0.3507178
14	0.3919003	0.3490729	0.3490301
15	0.3903081	0.3530678	0.3526961
16	0.3863823	0.3522619	0.3520598
17	0.3861561	0.3483925	0.3482078
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		0.0001341	0.0000759

4.5.4 เปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่า $B_d = 0.36$ T

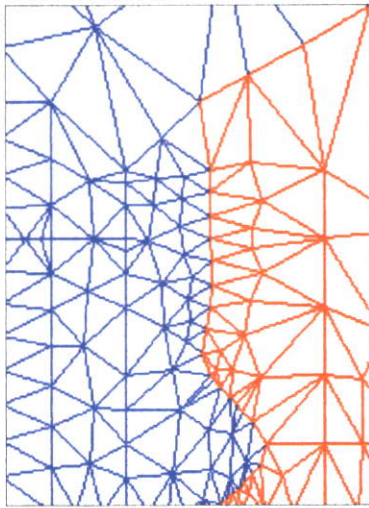


รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบรูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.36$ T

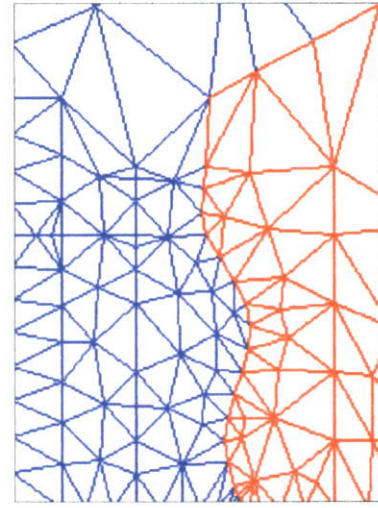
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องอากาศ D ที่ค่า $B_d = 0.36$ T

อิลิเมนต์ลำดับที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ $B_d = 0.36$ T		
	ค่าเริ่มต้น	ดิเทอมนิสติก	สโตซาสติก
1	0.4055357	0.3627277	0.3628446
2	0.4063035	0.3623118	0.3626388
3	0.4050456	0.3629936	0.3629762
4	0.4058628	0.3627865	0.3629466
5	0.4040449	0.3634235	0.3631537
6	0.4047820	0.3637262	0.3635811
7	0.4024203	0.3638803	0.3632273
8	0.4030458	0.3646964	0.3641004
9	0.4000192	0.3641823	0.3629978
10	0.4001547	0.3656729	0.3643313
11	0.3966458	0.3640894	0.3622127
12	0.3956524	0.3657016	0.3632207
13	0.3920823	0.3632592	0.3605470
14	0.3919003	0.3619864	0.3581719
15	0.3903081	0.3660286	0.3623976
16	0.3863823	0.3654501	0.3615550
17	0.3861561	0.3607932	0.3574511
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		0.0002723	0.0001439

4.5.5 เปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่า $B_d = 0.37$ T



คิเทอมินิสติก



สโตชาสติก

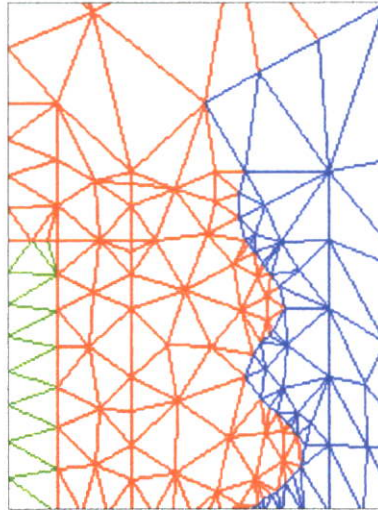
รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบรูปร่างขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิเลเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.37$ T

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ค่า $B_d = 0.37$ T

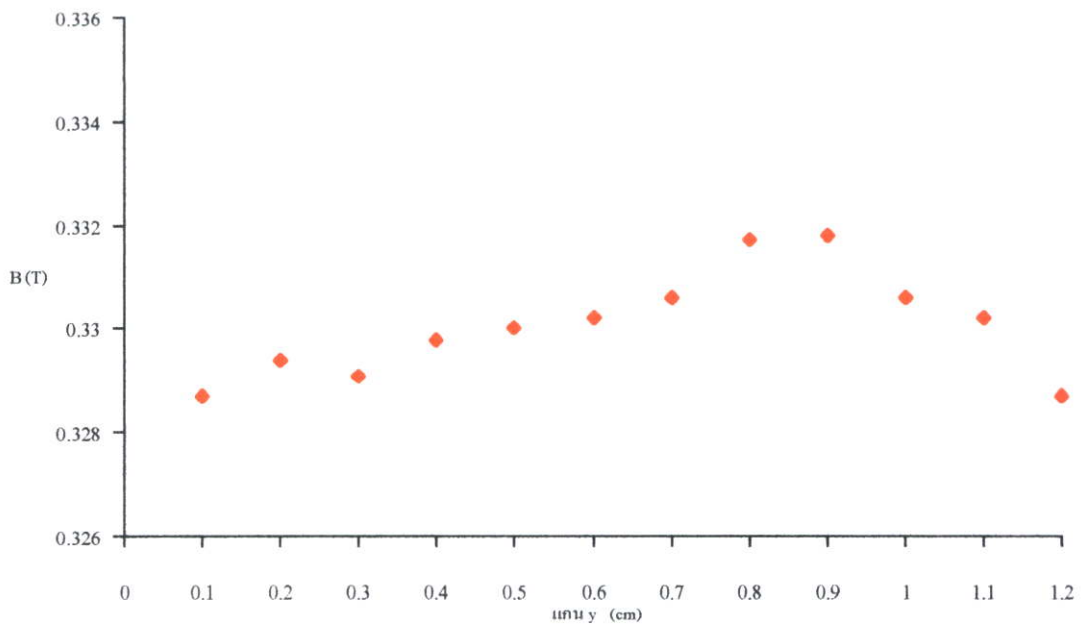
อิเลเมนต์ลำดับที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ $B_d = 0.37$ T		
	ค่าเริ่มต้น	คิเทอมินิสติก	สโตชาสติก
1	0.4055357	0.3719163	0.3721941
2	0.4063035	0.3710601	0.3718878
3	0.4050456	0.3724642	0.3723900
4	0.4058628	0.3721821	0.3721368
5	0.4040449	0.3732801	0.3727552
6	0.4047820	0.3742025	0.3728037
7	0.4024203	0.3740044	0.3732308
8	0.4030458	0.3758593	0.3737129
9	0.4000192	0.3742267	0.3735140
10	0.4001547	0.3765823	0.3751410
11	0.3966458	0.3735467	0.3737831
12	0.3956524	0.3750214	0.3757863
13	0.3920823	0.3715801	0.3732687
14	0.3919003	0.3686203	0.3724058
15	0.3903081	0.3736696	0.3727598
16	0.3863823	0.3726188	0.3722137
17	0.3861561	0.3678360	0.3708973
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		0.0002228	0.0001746

4.6 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ตามแนวแกน x

4.6.1 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.33$ T

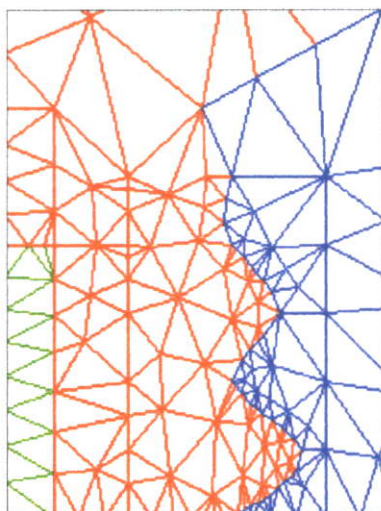


รูปที่ 4.38 รูปขยายการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.33$ T

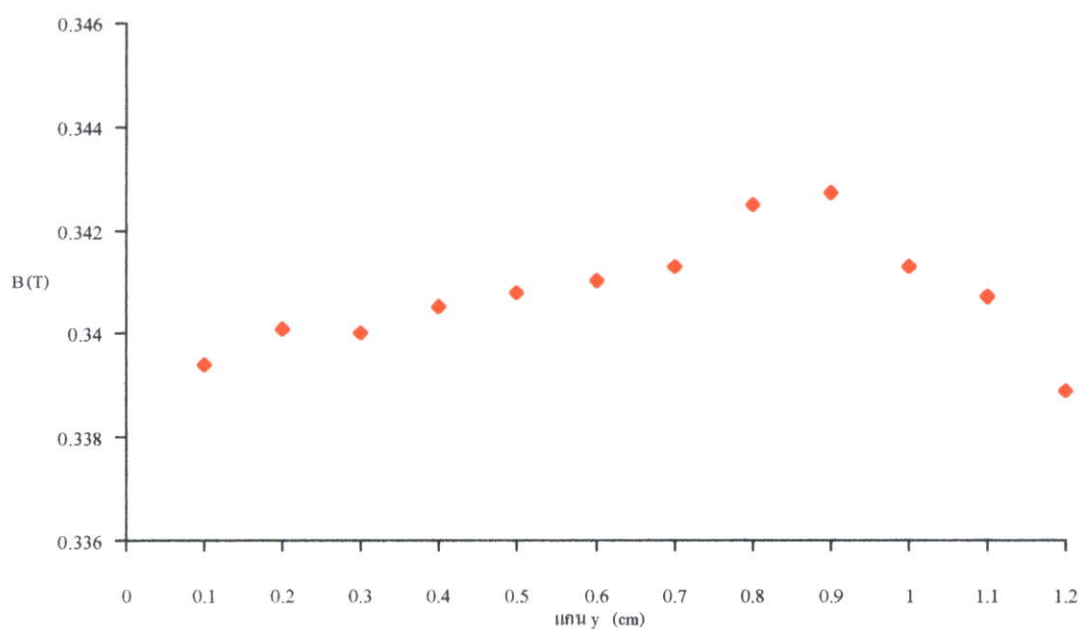


รูปที่ 4.39 ค่า B_c บริเวณช่องอากาศ D ของการออกแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.33$ T

4.6.2 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.34$ T

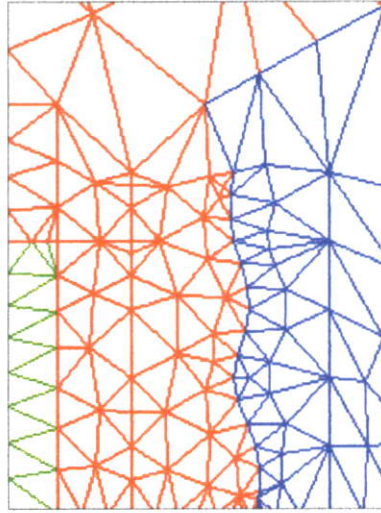


รูปที่ 4.40 รูปขยายการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.34$ T

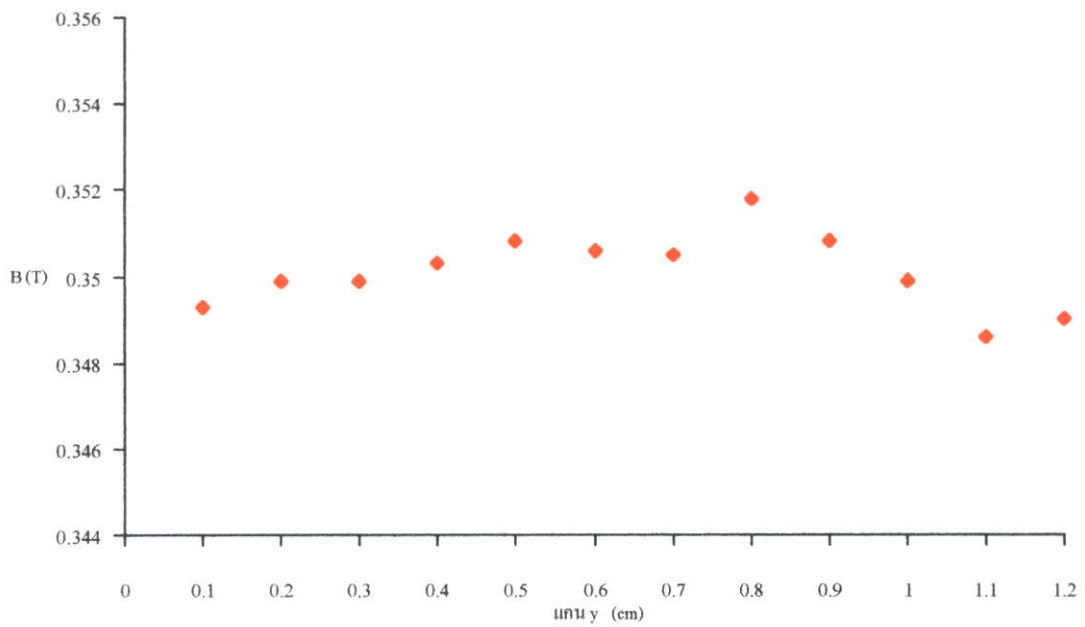


รูปที่ 4.41 ค่า B_c บริเวณช่องอากาศ D ของการออกแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.34$ T

4.6.3 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.35$ T

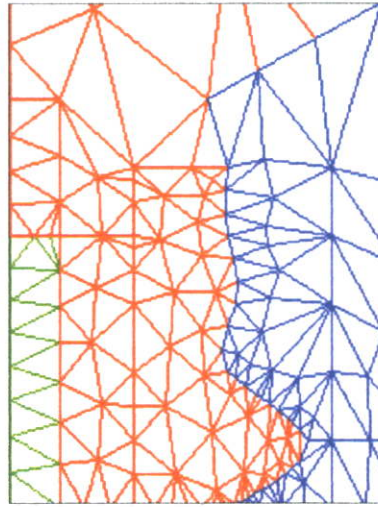


รูปที่ 4.42 รูปขยายการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.35$ T

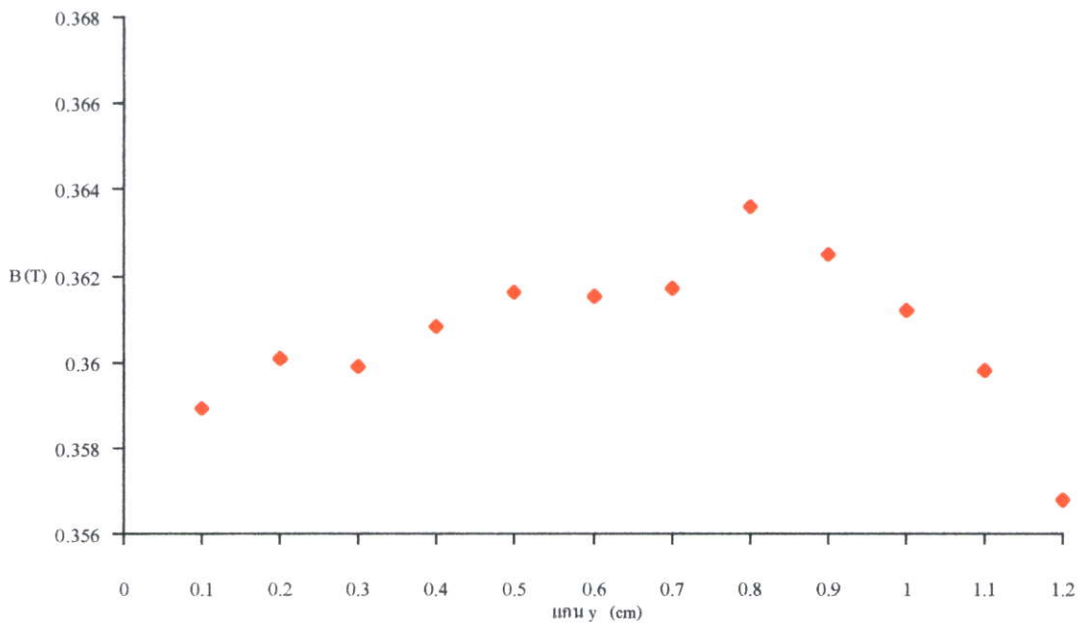


รูปที่ 4.43 ค่า B_c บริเวณช่องอากาศ D ของการออกแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.35$ T

4.6.4 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.36$ T

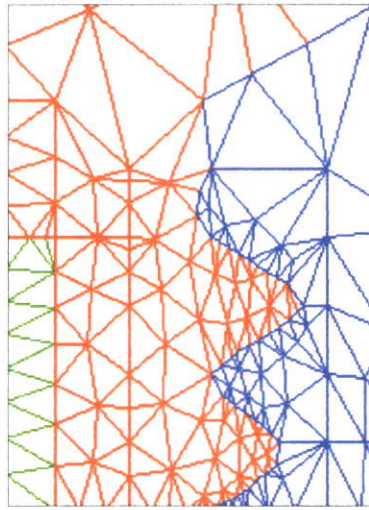


รูปที่ 4.44 รูปขยายการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.36$ T

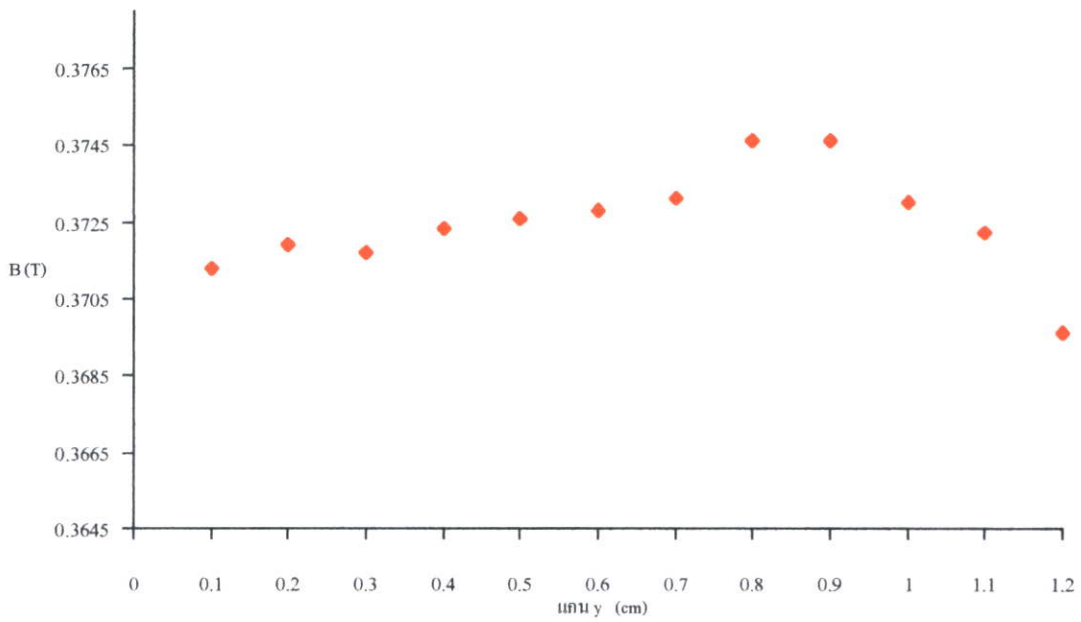


รูปที่ 4.45 ค่า B_c บริเวณช่องอากาศ D ของการออกแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.36$ T

4.6.5 การออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.37$ T



รูปที่ 4.46 รูปขยายการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.37$ T



รูปที่ 4.47 ค่า B_c บริเวณช่องอากาศ D ของการออกแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ค่า $B_d = 0.37$ T

บทที่ 5

บทสรุป

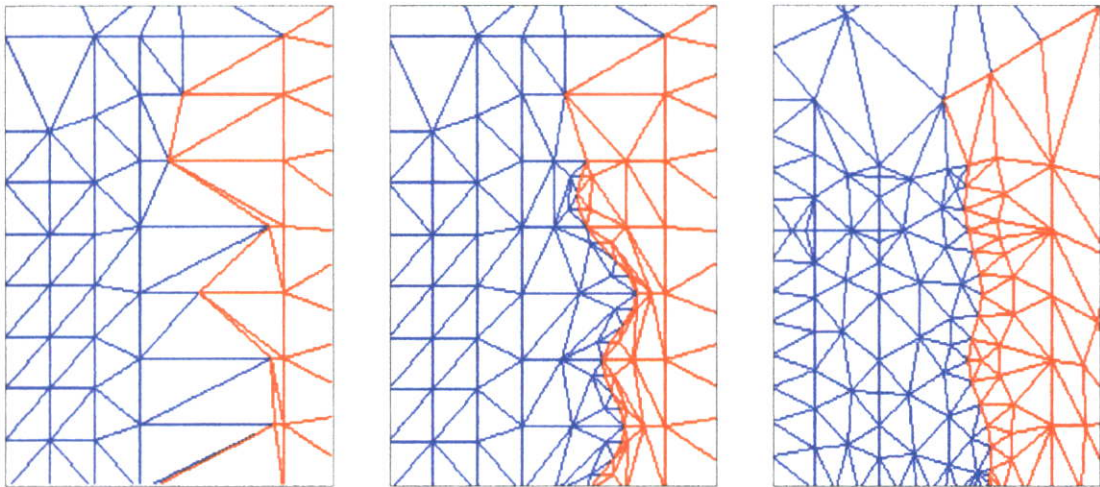
วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่สำหรับการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นงานวิจัยที่พัฒนาอย่างต่อเนื่อง [1-5] เพื่อแก้ปัญหาที่ตั้งกล่าวมาในบทที่ 1 ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่ 2 แบบ คือ

1. วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปลน์ (cubic spline) ร่วมกับการเปลี่ยนรูปร่างอิลิเมนต์ใหม่ (triangle reshape mesh)
2. วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปลน์ (cubic spline) ร่วมกับการสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ (automatic mesh generation)

การเคลื่อนที่โหนดแบบคิวบิกสไปลน์จะทำให้แนวขั้วแม่เหล็กที่ได้มีลักษณะราบโค้งมน และการเปลี่ยนรูปร่างอิลิเมนต์ใหม่เป็นการจัดเรียงโครงสร้างอิลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วใหม่ให้ค่อนข้างสมดุลกันทั้งสามด้านทำให้การประมาณค่าศักย์แม่เหล็กมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และการสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติทุกครั้งที่มีการเคลื่อนที่โหนดจะทำให้ได้โครงตาข่ายอิลิเมนต์ที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับต้นแบบอื่น ๆ วิทยานิพนธ์นี้ยังได้มีการนำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิทอมินิสติกและสโตชาสติก (เจเนติก) ในการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า และรวมทั้งมีการนำเสนอการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยพิจารณาถึงความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของสารแม่เหล็กด้วย

จากผลการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่ทั้ง 2 แบบที่งานวิจัยนี้แนะนำเสนอตามแนวแกน 3 แนวแกนคือ ในแนวแกนอน x ในแนวแกนอนและแนวแกนตั้ง $x-y$ และในแนวแกนอนพร้อมกับแนวแกนตั้ง xy เพื่อทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศมีค่าในช่วง $0.33 - 0.37$ tesla ตามที่ต้องการดังที่แสดงผลการออกแบบในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่าแนวทางที่วิทยานิพนธ์นำเสนอสามารถแก้ปัญหาที่ตั้งกล่าวมาในบทที่ 1 ได้ จากรูปที่ 5.1 แสดงรูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.34$ T โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x จะเห็นได้ว่ารูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ได้จากวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิมจะมีลักษณะแนวขั้วที่เป็นฟันเลื่อยเล็กใหญ่ปะปนกัน และโครงสร้างของอิลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วไม่สมดุลกันมากทั้งสามด้าน ส่วนรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ได้จากวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 และวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2 ที่วิทยานิพนธ์นี้แนะนำจะมีลักษณะรูป

ทรงแนวขั้วที่เรียบโค้งมน และ โครงสร้างอิลิเมนต์สามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วมีความสมดุลกันทั้งสามด้านมากกว่าวิธีโทนครเคลื่อนที่แบบเดิม ส่งผลให้การประมาณค่าศักย์แม่เหล็กในแต่ละอิลิเมนต์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์มีความแม่นยำมากขึ้น และนอกจากนี้วิธีโทนครเคลื่อนที่แบบที่ 2 (วิธีโทนครเคลื่อนที่แบบคิวบิกสโพลาร์ร่วมกับการสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับต้นแบบที่หลากหลายทั้งนี้เพราะ โปรแกรมสามารถสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดได้โดยอัตโนมัติ



โทนครเคลื่อนที่แบบเดิม

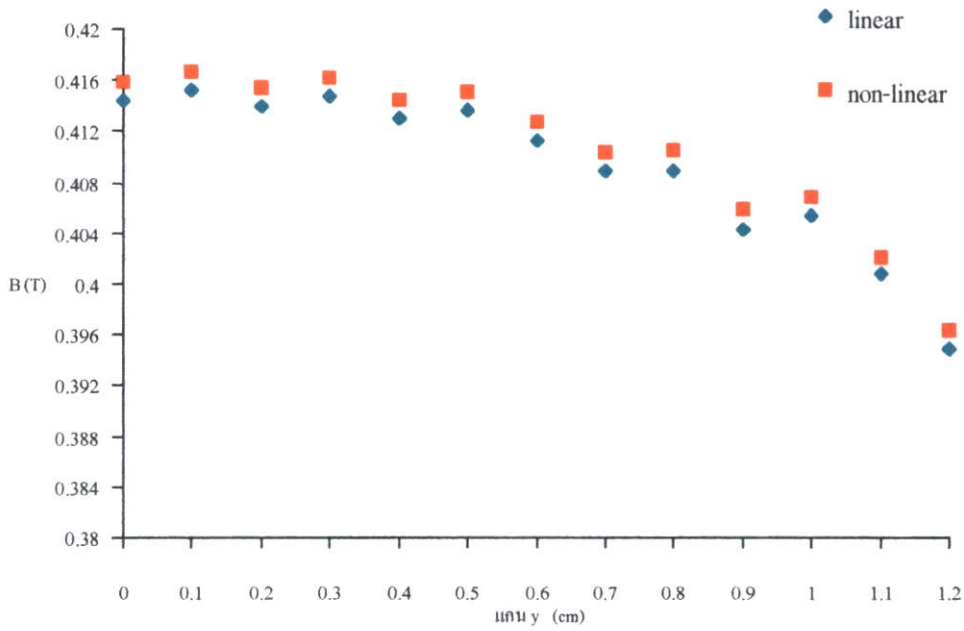
โทนครเคลื่อนที่แบบ 1

โทนครเคลื่อนที่แบบ 2

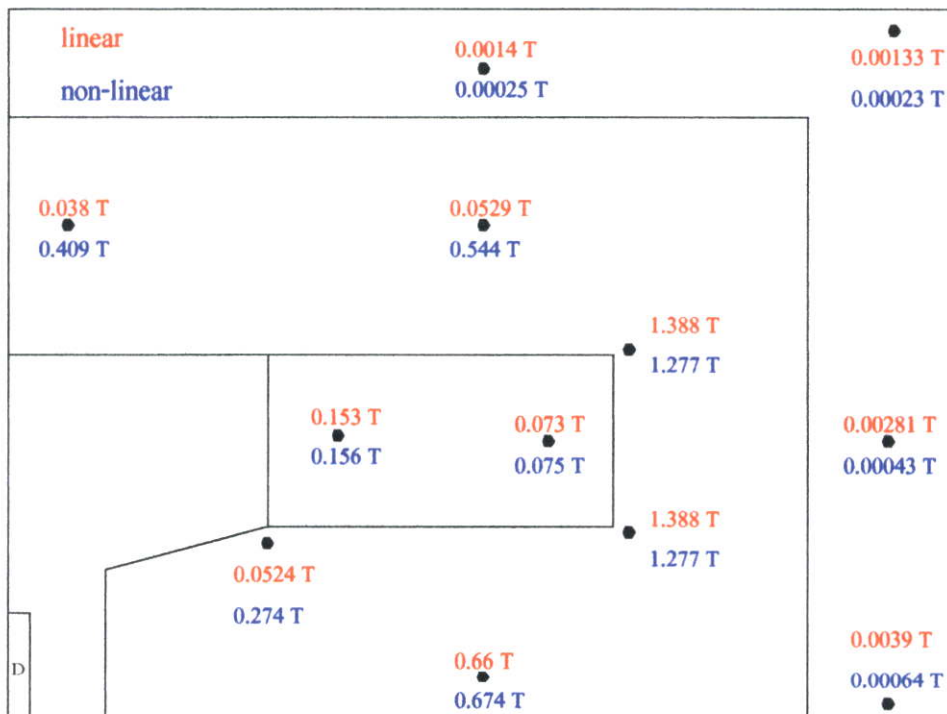
รูปที่ 5.1 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิลิเมนต์ที่ค่า $B_d = 0.34$ T โดยวิธีการโทนครเคลื่อนที่ในแนวแกน x

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเป้าหมายของการออกแบบทั้ง 2 วิธี

B_d (T)	ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด	
	สโตชาสติก	คิโทมินิสติก
0.33	0.0001719	0.0001966
0.34	0.0000554	0.0000892
0.35	0.0000759	0.0001341
0.36	0.0001439	0.0002724
0.37	0.0001746	0.0002228



รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ของต้นแบบที่พิจารณาก่อนที่จะเคลื่อนที่โน้ด



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ linear และ non-linear ของต้นแบบ

จากตารางที่ 4.1 - 4.5 ในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิทอมินิสติก และสโตซาสติก ทั้ง 2 วิธีจะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B_c มีค่าใกล้เคียงกันในบริเวณช่องอากาศ D ที่พิจารณาที่ B_d ค่าต่าง ๆ ตามต้องการ และตารางที่ 5.1 เป็นการสรุปให้เห็นถึงการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันน้อยที่สุดของการออกแบบทั้ง 2 วิธีซึ่งจะเห็นได้ว่าการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีสโตซาสติกมีแนวโน้มที่จะได้ค่าผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าวิธีดิทอมินิสติก ส่วนรูปที่ 5.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ของต้นแบบที่พิจารณาในรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นก่อนที่จะเคลื่อนที่โหนดจะพบว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ของการออกแบบที่เป็น non-linear จะสูงกว่า linear และรูปที่ 5.3 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ linear และ non-linear ของต้นแบบที่จุดต่าง ๆ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแนวทางที่วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอสามารถนำไปใช้ในการออกแบบให้รูปทรงขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบมีลักษณะแนวขั้วราบโค้งมน (smooth shape) อัลกอริทึม Triangle Reshape Mesh และ Automatic Mesh Generation สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดโครงสร้างอิลิเมนต์บริเวณแนวขั้วให้เหมาะสมทั้งสามด้าน และอัลกอริทึม Automatic Mesh Generation ในการสร้างอิลิเมนต์สามเหลี่ยมทั้งหมดโดยอัตโนมัติสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับต้นแบบที่หลากหลาย

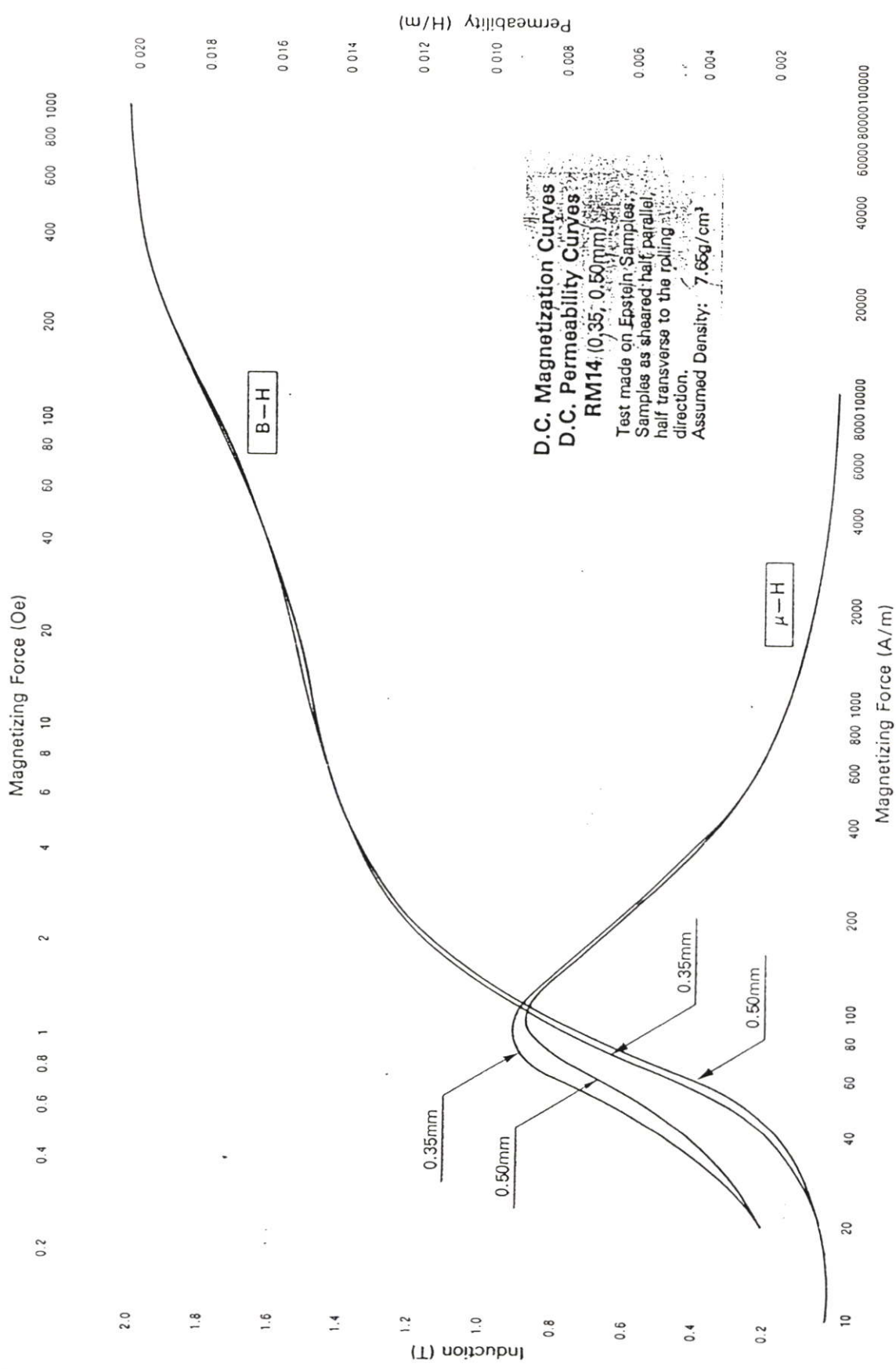
นอกจากนี้วิทยานิพนธ์นี้ยังแสดงให้เห็นถึงแนวทางการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิทอมินิสติกอาจจะทำให้ได้คำตอบออกมาเป็นลักษณะ local คือยังไม่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด โดยได้มีการนำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตซาสติก (stochastic) ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้ได้คำตอบที่มีความเป็น global มากขึ้น และการเพิ่มอัลกอริทึมในการปรับแต่งค่า μ ให้เหมาะสมในทางปฏิบัติ (ค่า μ จะไม่เป็นเชิงเส้น) โดยสามารถกำหนดให้ค่า μ ที่ใช้ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กของแกนเหล็ก จะเห็นได้ว่าการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่ดังที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบงานลักษณะอื่น ๆ ได้เช่น การออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของฉนวนลูกถ้วยเพื่อลดค่าความเครียดของสนามไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.A. Ramirez and E.M. Freeman, "SHAPE OPTIMISATION OF POWER FREQUENCY ELECTROMAGNETIC DEVICE", Printed and published by the IEE, Savoy Place, London WC2R OBL, UK, 1994.
- [2] C. Chat-uthai, J.A. Ramirez, and E.M. Freeman, "Comparison of Deterministic methods for the Shape Optimisation of Electromagnetic Devices", Congressional Brazilian in Eletromagnetics, Cbmag'95, Florianopolis, Brazil, May 1995, pp.72-75
- [3] C. Chat-uthai, J.A. Ramirez, and E.M. Freeman, "An Improved Constrained Quasi Newton Method fo theSolution of Inverse Electromagnetic Problems" IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 3, May 1996, pp.1318-1321.
- [4] Topong Yungpanich and Chaiwut Chat-uthai, "Structural Moving Nodes Techniques for Shape Design Optimization of Electromagnet" Proceeding of the 21st Electrical Engineering Conference, EECON-21, Thailand, November 1998, pp. PW027-PW030.
- [5] ต่อพงศ์ ขวงพานิช, "การออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของอุปกรณ์สนามแม่เหล็กโดยวิธีการโทนดเคลื่อนที่" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2543
- [6] Matthew N. O. Sadiku, "A Simple Introduction to Finite Element Analysis of Electromagnetic Problems", IEEE Transactions on Education, Vol.32, No.2, May 1989.
- [7] ธนัญชัย ลีศักดิ์ปรีดา, "การหาค่าเหมาะสมที่สุด : หลักการพื้นฐานและขั้นตอนวิธีการ" สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี
- [8] Vanderplaats, G.N. Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Application. New York. McGraw-Hall. 1984
- [9] อุกฤษณ์ มารังค์ และ ชม กิมปาน "การรู้จำตัวเลขโดยใช้พีชชีจีโอเมทริกและเจนเนติกอัลกอริธึม" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 กรุงเทพมหานคร 2541 หน้า 569-571
- [10] ธวัช เกิดชื่น ธนชาติ นุ่นนนท์ และ กิตติพงษ์ ดันมิตร "การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดใช้วิธีเจเนติก" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 กรุงเทพมหานคร 2540 หน้า 38-43

- [11] Matthew N.O. Sadiku. Numerical Techniques in Electromagnetics. CRC Press Inc. 1992
- [12] ต่อพงษ์ ขวงพานิช และ ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย “การเปรียบเทียบวิธีการแก้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กสแตติกและสนามไฟฟ้าสแตติกแบบ 2 มิติ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 กรุงเทพมหานคร 2540 หน้า 380-285
- [13] Sidney Yakowitz, “An Introduction to Numerical Computation”, New York, Macmillan, 1989.
- [14] Peter R. Turner, “Guide To Numerical Analysis”, London, Macmillan, 1989.
- [15] John H. Mathews, “Numerical Method for Mathematics Science, and Engineering ” Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ Prentice Hall, 1992.
- [16] สุลักษณ์ สุ่มมาตย์ และ กิตติ โพธิ์จรรย์วัฒนกิจ “การจำลองภูมิประเทศแบบดิจิทัลโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยมแบบไม่เป็นระเบียบ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 กรุงเทพมหานคร 2541 หน้า 573-576
- [17] <http://www-dinma.univ.trieste.it/%7Eninftc/research/easymesh /using.html>

ภาคผนวก ก
ข้อมูลแกนเหล็ก RM14 0.35mm



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิม

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณช่องอากาศ D ของวิธีโหนด
เคลื่อนที่แบบเดิมตามแนวแกน x

อิติเม้นท์ที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ (T)					
	ค่าเริ่มต้น	$B_d = 0.33$	$B_d = 0.34$	$B_d = 0.35$	$B_d = 0.36$	$B_d = 0.37$
131	0.3941	0.3298	0.3398	0.3502	0.3621	0.3696
133	0.3976	0.3303	0.3402	0.3518	0.3639	0.3699
132	0.4014	0.3294	0.3395	0.3488	0.3614	0.3699
135	0.4034	0.3289	0.3392	0.3478	0.3604	0.3704
134	0.4063	0.3296	0.3395	0.3485	0.3618	0.3695
137	0.4075	0.3289	0.3390	0.3473	0.3611	0.3697
136	0.4096	0.3306	0.3401	0.3496	0.3632	0.3689
138	0.4108	0.3305	0.3400	0.3494	0.3635	0.3686
130	0.4114	0.3318	0.3410	0.3509	0.3642	0.3685
99	0.4130	0.3327	0.3417	0.3520	0.3651	0.3683
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		1.42E-05	6.12E-06	2.44E-05	9.23E-05	8.99E-06

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณช่องอากาศ D ของวิธีโหนด
เคลื่อนที่แบบเดิมตามแนวแกน $x - y$

อิติเม้นท์ที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ (T)					
	ค่าเริ่มต้น	$B_d = 0.33$	$B_d = 0.34$	$B_d = 0.35$	$B_d = 0.36$	$B_d = 0.37$
131	0.3941	0.3300	0.3409	0.3497	0.3610	0.3687
133	0.3976	0.3321	0.3444	0.3525	0.3649	0.3719
132	0.4014	0.3313	0.3415	0.3506	0.3621	0.3720
135	0.4034	0.3318	0.3424	0.3513	0.3630	0.3737
134	0.4063	0.3320	0.3408	0.3506	0.3620	0.3731
137	0.4075	0.3318	0.3406	0.3504	0.3617	0.3739
136	0.4096	0.3328	0.3404	0.3510	0.3624	0.3734
138	0.4108	0.3328	0.3400	0.3508	0.3622	0.3735
130	0.4114	0.3336	0.3404	0.3516	0.3629	0.3734
99	0.4130	0.3342	0.3404	0.3521	0.3634	0.3734
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		6.29E-05	2.97E-05	1.752E-05	7.59E-05	9.47E-05

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณช่องอากาศ D ของวิธีโหนด
เคลื่อนที่แบบเดิมตามแนวแกน xy

อิติเม้นท์ที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ (T)					
	ค่าเริ่มต้น	$B_d = 0.33$	$B_d = 0.34$	$B_d = 0.35$	$B_d = 0.36$	$B_d = 0.37$
131	0.3941	0.3303	0.3432	0.3510	0.3625	0.3722
133	0.3976	0.3318	0.3458	0.3520	0.3651	0.3730
132	0.4014	0.3309	0.3425	0.3505	0.3616	0.3710
135	0.4034	0.3307	0.3428	0.3505	0.3617	0.3706
134	0.4063	0.3320	0.3415	0.3499	0.3605	0.3703
137	0.4075	0.3315	0.3413	0.3500	0.3600	0.3705
136	0.4096	0.3335	0.3407	0.3494	0.3600	0.3693
138	0.4108	0.3337	0.3405	0.3493	0.3596	0.3695
130	0.4114	0.3347	0.3402	0.3488	0.3599	0.3680
99	0.4130	0.3357	0.3398	0.3483	0.3598	0.3670
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		9.14E-05	6.27E-05	1.069E-05	3.82E-05	2.93E-05

ภาคผนวก ค
ข้อมูลการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณช่องอากาศ D ของวิธีโหนด เคลื่อนที่แบบ 1 ตามแนวแกน x

อิติเม้นท์ที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ (T)					
	ค่าเริ่มต้น	$B_d = 0.33$	$B_d = 0.34$	$B_d = 0.35$	$B_d = 0.36$	$B_d = 0.37$
131	0.3941	0.3315	0.3409	0.3511	0.3592	0.3691
133	0.3976	0.3337	0.3433	0.3537	0.3624	0.3721
132	0.4014	0.3315	0.3415	0.3514	0.3603	0.3700
135	0.4034	0.3319	0.3419	0.3518	0.3612	0.3704
134	0.4063	0.3309	0.3416	0.3513	0.3603	0.3704
137	0.4075	0.3306	0.3414	0.3509	0.3601	0.3700
136	0.4096	0.3306	0.3420	0.3516	0.3605	0.3715
138	0.4108	0.3303	0.3419	0.3514	0.3603	0.3714
130	0.4114	0.3306	0.3425	0.3521	0.3610	0.3726
99	0.4130	0.3306	0.3429	0.3526	0.3614	0.3735
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		2.41E-05	4.43E-05	3.829E-05	1.13E-05	2.88E-05

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณช่องอากาศ D ของวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 ตามแนวแกน $x - y$

อิติเม้นท์ที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ (T)					
	ค่าเริ่มต้น	$B_d = 0.33$	$B_d = 0.34$	$B_d = 0.35$	$B_d = 0.36$	$B_d = 0.37$
131	0.3941	0.3300	0.3409	0.3497	0.3610	0.3687
133	0.3976	0.3321	0.3444	0.3525	0.3649	0.3719
132	0.4014	0.3313	0.3415	0.3506	0.3621	0.3720
135	0.4034	0.3318	0.3424	0.3513	0.3630	0.3737
134	0.4063	0.3320	0.3408	0.3506	0.3620	0.3731
137	0.4075	0.3318	0.3406	0.3504	0.3617	0.3739
136	0.4096	0.3328	0.3404	0.3510	0.3624	0.3734
138	0.4108	0.3328	0.3400	0.3508	0.3622	0.3735
130	0.4114	0.3336	0.3404	0.3516	0.3629	0.3734
99	0.4130	0.3342	0.3404	0.3521	0.3634	0.3734
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		6.29E-05	2.97E-05	1.752E-05	7.59E-05	9.47E-05

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณช่องอากาศ D ของวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 ตามแนวแกน xy

อิติเม้นท์ที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ (T)					
	ค่าเริ่มต้น	$B_d = 0.33$	$B_d = 0.34$	$B_d = 0.35$	$B_d = 0.36$	$B_d = 0.37$
131	0.3941	0.3295	0.3391	0.3493	0.3601	0.3703
133	0.3976	0.3315	0.3416	0.3521	0.3641	0.3745
132	0.4014	0.3306	0.3412	0.3504	0.3610	0.3714
135	0.4034	0.3311	0.3426	0.3511	0.3620	0.3730
134	0.4063	0.3312	0.3417	0.3507	0.3607	0.3706
137	0.4075	0.3310	0.3423	0.3504	0.3603	0.3708
136	0.4096	0.3319	0.3415	0.3512	0.3608	0.3697
138	0.4108	0.3319	0.3416	0.3511	0.3605	0.3693
130	0.4114	0.3327	0.3413	0.3520	0.3613	0.3692
99	0.4130	0.3333	0.3411	0.3527	0.3617	0.3688
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		3.19E-05	2.75E-05	2.086E-05	2.79E-05	3.5E-05

ภาคผนวก ง
ข้อมูลการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณช่องอากาศ D ของวิธีโหนด
เคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกน x

อิติเม้นท์ที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ (T)					
	ค่าเริ่มต้น	$B_d = 0.33$	$B_d = 0.34$	$B_d = 0.35$	$B_d = 0.36$	$B_d = 0.37$
1	0.4055	0.3321	0.3417	0.3513	0.3627	0.3719
2	0.4063	0.3317	0.3413	0.3507	0.3623	0.3710
3	0.4050	0.3323	0.3419	0.3518	0.3629	0.3724
4	0.4058	0.3321	0.3419	0.3516	0.3627	0.3721
5	0.4040	0.3327	0.3423	0.3524	0.3634	0.3732
6	0.4047	0.3330	0.3428	0.3531	0.3637	0.3742
7	0.4024	0.3332	0.3425	0.3530	0.3638	0.3740
8	0.4030	0.3339	0.3435	0.3544	0.3646	0.3758
9	0.4000	0.3335	0.3425	0.3532	0.3641	0.3742
10	0.4001	0.3348	0.3437	0.3550	0.3656	0.3765
11	0.3966	0.3335	0.3419	0.3527	0.3640	0.3735
12	0.3956	0.3348	0.3428	0.3539	0.3657	0.3750
13	0.3920	0.3329	0.3406	0.3512	0.3632	0.3715
14	0.3861	0.3320	0.3387	0.3490	0.3619	0.3686
15	0.3919	0.3349	0.3421	0.3530	0.3660	0.3736
16	0.3903	0.3345	0.3414	0.3522	0.3654	0.3726
17	0.3863	0.3312	0.3381	0.3483	0.3607	0.3678
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		0.000187	8.68E-05	0.0001286	0.000265	0.000218

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณช่องอากาศ D ของวิธีโหนด
เคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกน $x - y$

อิเลิเมนต์ที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ (T)					
	ค่าเริ่มต้น	$B_d = 0.33$	$B_d = 0.34$	$B_d = 0.35$	$B_d = 0.36$	$B_d = 0.37$
1	0.4055	0.3310	0.3417	0.3524	0.3618	0.3719
2	0.4063	0.3306	0.3411	0.3518	0.3612	0.3715
3	0.4050	0.3313	0.3422	0.3527	0.3622	0.3721
4	0.4058	0.3311	0.3403	0.3528	0.3621	0.3721
5	0.4040	0.3319	0.3428	0.3532	0.3627	0.3723
6	0.4047	0.3321	0.3434	0.3540	0.3634	0.3729
7	0.4024	0.3324	0.3434	0.3534	0.3630	0.3724
8	0.4030	0.3332	0.3446	0.3547	0.3644	0.3734
9	0.4000	0.3328	0.3436	0.3531	0.3630	0.3722
10	0.4001	0.3342	0.3452	0.3544	0.3646	0.3735
11	0.3966	0.3329	0.3434	0.3521	0.3621	0.3713
12	0.3956	0.3342	0.3446	0.3526	0.3631	0.3713
13	0.3920	0.3324	0.3423	0.3502	0.3603	0.3722
14	0.3861	0.3316	0.3406	0.3475	0.3577	0.3695
15	0.3919	0.3345	0.3441	0.3512	0.3619	0.367
16	0.3903	0.3341	0.3435	0.3504	0.3610	0.371
17	0.3863	0.3307	0.3399	0.3471	0.3571	0.370
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		0.000126	0.000169	0.0001405	0.000124	8.16E-05

ตารางที่ ง.3 ข้อมูลค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณช่องอากาศ D ของวิธีโหนด
เคลื่อนที่แบบ 2 ตามแนวแกน xy

อิติเม้นท์ที่	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ (T)					
	ค่าเริ่มต้น	$B_d = 0.33$	$B_d = 0.34$	$B_d = 0.35$	$B_d = 0.36$	$B_d = 0.37$
1	0.4055	0.3303	0.3413	0.3502	0.3615	0.3701
2	0.4063	0.3299	0.3408	0.3495	0.3613	0.3697
3	0.4050	0.3306	0.3416	0.3505	0.3617	0.3704
4	0.4058	0.3303	0.3416	0.3502	0.3615	0.3702
5	0.4040	0.3311	0.3421	0.3512	0.3619	0.3709
6	0.4047	0.3313	0.3427	0.3515	0.3621	0.3712
7	0.4024	0.3316	0.3424	0.3519	0.3622	0.3714
8	0.4030	0.3324	0.3435	0.3529	0.3628	0.3724
9	0.4000	0.3321	0.3424	0.3525	0.3624	0.3718
10	0.4001	0.3335	0.3437	0.3543	0.3637	0.3736
11	0.3966	0.3323	0.3418	0.3527	0.3623	0.3717
12	0.3956	0.3337	0.3426	0.3545	0.3638	0.3735
13	0.3920	0.3320	0.3405	0.3521	0.3615	0.3707
14	0.3861	0.3313	0.3386	0.3511	0.3603	0.3691
15	0.3919	0.3341	0.3418	0.3549	0.3642	0.3737
16	0.3903	0.3338	0.3412	0.3543	0.3637	0.3730
17	0.3863	0.3304	0.3380	0.3499	0.359	0.3679
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด		8.45E-05	7.75E-05	0.0001167	0.000104	7E-05

ตารางที่ ง.4 ข้อมูลการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมินิสติกและสโตชาสติก
สำหรับการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า

No	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ (T)									
	$B_d = 0.33$		$B_d = 0.34$		$B_d = 0.35$		$B_d = 0.36$		$B_d = 0.37$	
1	0.3321	0.3321	0.3417	0.3415	0.3513	0.3510	0.3627	0.3628	0.3719	0.3721
2	0.3317	0.3316	0.3413	0.3410	0.3507	0.3505	0.3623	0.3626	0.3710	0.3718
3	0.3327	0.3327	0.3419	0.3417	0.3518	0.3512	0.3629	0.3629	0.3724	0.3723
4	0.3321	0.3325	0.3419	0.3416	0.3516	0.3511	0.3627	0.3629	0.3721	0.3721
5	0.3327	0.3302	0.3423	0.3421	0.3524	0.3516	0.3634	0.3631	0.3732	0.3727
6	0.3330	0.3331	0.3428	0.3425	0.3531	0.3521	0.3637	0.3635	0.3742	0.3728
7	0.3332	0.3333	0.3425	0.3420	0.3530	0.3282	0.3638	0.3632	0.3740	0.3732
8	0.3339	0.3327	0.3435	0.3434	0.3544	0.3530	0.3646	0.3641	0.3758	0.3737
9	0.3335	0.3332	0.3425	0.3420	0.3532	0.3522	0.3641	0.3629	0.3742	0.3735
10	0.3348	0.3354	0.3437	0.3411	0.3550	0.3536	0.3656	0.3643	0.3765	0.3751
11	0.3335	0.3331	0.3419	0.3406	0.3527	0.3518	0.3640	0.3622	0.3735	0.3737
12	0.3348	0.3349	0.3428	0.3419	0.3539	0.3530	0.3657	0.3632	0.3750	0.3757
13	0.3329	0.3328	0.3406	0.3418	0.3512	0.3507	0.3632	0.3605	0.3715	0.3732
14	0.3320	0.3304	0.3387	0.3406	0.3490	0.3490	0.3619	0.3581	0.3686	0.3724
15	0.3349	0.3346	0.3421	0.3418	0.3530	0.3526	0.3660	0.3623	0.3736	0.3727
16	0.3345	0.3340	0.3414	0.3413	0.3522	0.3520	0.3654	0.3615	0.3726	0.3722
17	0.3312	0.3307	0.3381	0.3397	0.3483	0.3482	0.3607	0.3574	0.3678	0.3708

ตารางที่ ง.5 ข้อมูลค่าฟังก์ชันเป้าหมายของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติกและดิเทอมินิสติก

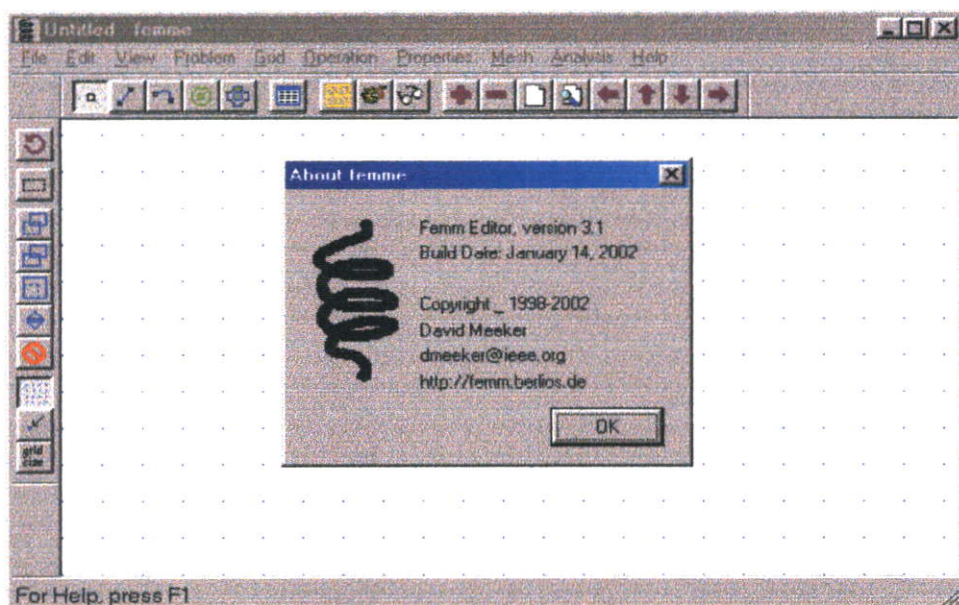
B_d (T)	ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด	
	สโตชาสติก	ดิเทอมินิสติก
0.31	0.0001643	0.0003033
0.32	0.0001086	0.0001489
0.33	0.0001719	0.0001966
0.34	0.0000554	0.0000892
0.35	0.0000759	0.0001341
0.36	0.0001439	0.0002724
0.37	0.0001746	0.0002228

ตารางที่ ง.6 ข้อมูลการออกแบบรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่ตาม
แนวแกน x

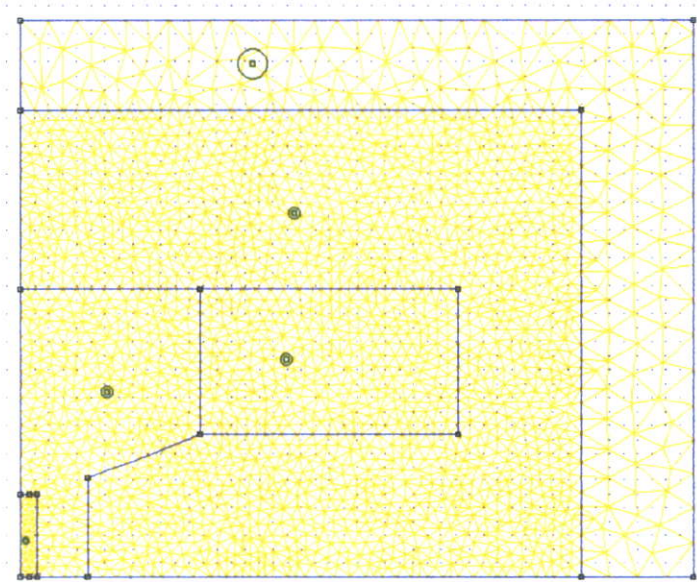
No	ค่าเริ่มต้น		ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ (T)				
	linear	Non-linear	$B_d = 0.33$	$B_d = 0.34$	$B_d = 0.35$	$B_d = 0.36$	$B_d = 0.37$
1	0.4055	0.4159	0.3291	0.3398	0.3497	0.3597	0.3716
2	0.4063	0.4167	0.3287	0.3394	0.3493	0.3589	0.3713
3	0.4050	0.4154	0.3294	0.3401	0.3499	0.3601	0.3719
4	0.4058	0.4162	0.3291	0.3400	0.3499	0.3599	0.3717
5	0.4040	0.4144	0.3298	0.3405	0.3503	0.3608	0.3723
6	0.4047	0.4151	0.3300	0.3408	0.3508	0.3616	0.3726
7	0.4024	0.4127	0.3302	0.3410	0.3506	0.3615	0.3728
8	0.4030	0.4134	0.3309	0.3416	0.3516	0.3629	0.3736
9	0.4000	0.4103	0.3306	0.3413	0.3505	0.3617	0.3731
10	0.4001	0.4104	0.3317	0.3425	0.3518	0.3636	0.3746
11	0.3966	0.4068	0.3306	0.3413	0.3499	0.3612	0.3730
12	0.3956	0.4058	0.3318	0.3427	0.3508	0.3625	0.3746
13	0.3920	0.4021	0.3302	0.3407	0.3486	0.3598	0.3722
14	0.3861	0.3961	0.3295	0.3398	0.3467	0.3575	0.3709
15	0.3919	0.4020	0.3321	0.3428	0.3501	0.3616	0.3750
16	0.3903	0.4003	0.3317	0.3424	0.3495	0.3608	0.3744
17	0.3863	0.3963	0.3287	0.3389	0.3490	0.3568	0.3696
ค่าฟังก์ชันน้อยที่สุด			2.07E-05	3.71E-05	0.0000225	5.85E-05	0.000155

ภาคผนวก จ
เปรียบเทียบผลการออกแบบกับโปรแกรม Femm Editor Version 3.1

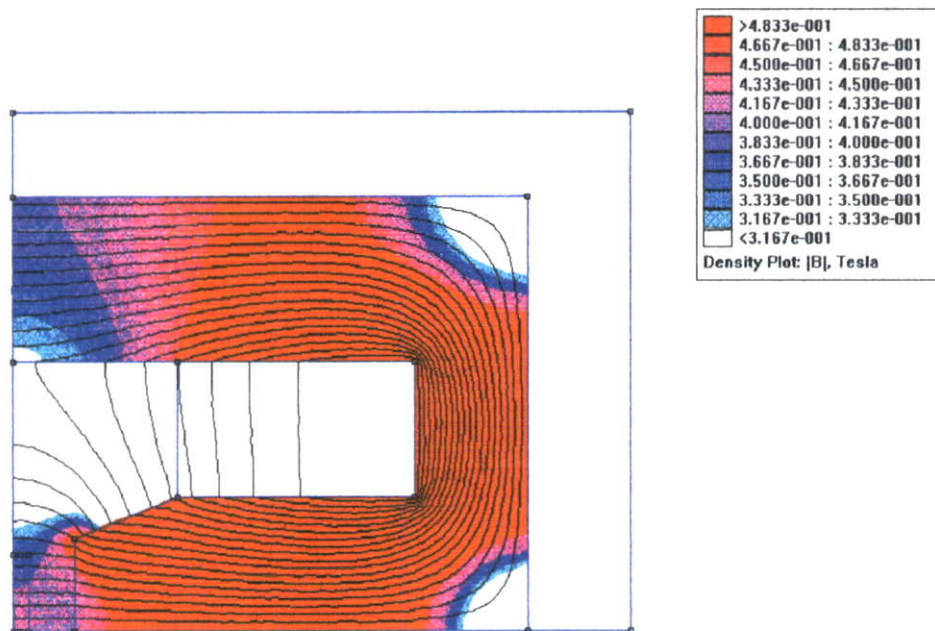
เพื่อเป็นการยืนยันความแม่นยำของผลการออกแบบรูปทรงขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่ทั้งสองแบบที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอในบทที่ 4 วิทยานิพนธ์นี้จะนำผลการออกแบบในบทที่ 4 บางส่วนมาให้โปรแกรม Femm Editor Version 3.1 (รูปที่ ง.1) ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของโปรแกรมที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ



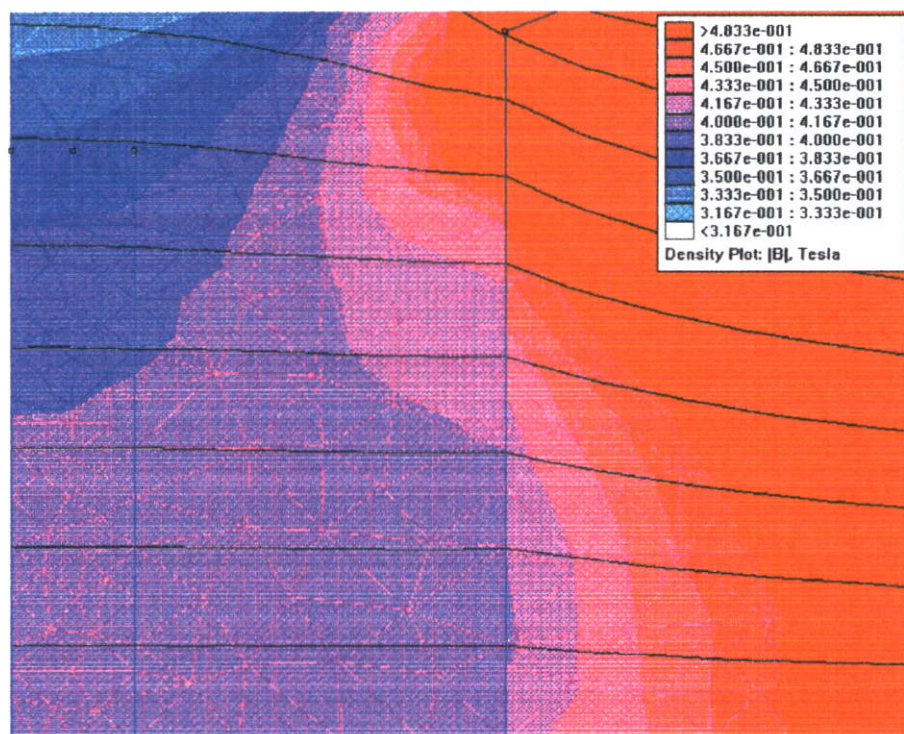
รูปที่ ง.1 แสดงรูปหน้าจอของโปรแกรม Femm



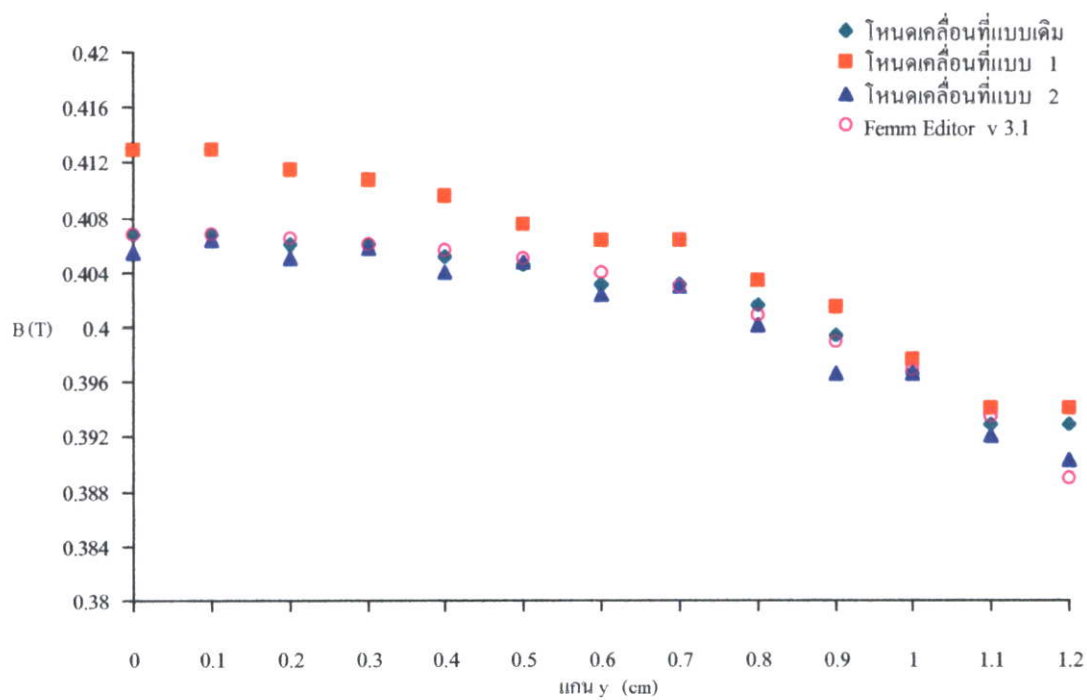
รูปที่ ง.2 โครงสร้างอิลิเมนต์และ โหนดของต้นแบบก่อนการเคลื่อนที่โหนดสร้างด้วย
โปรแกรม Femm Editor Version 3.1 (4604 Elements ,2378 Nodes)



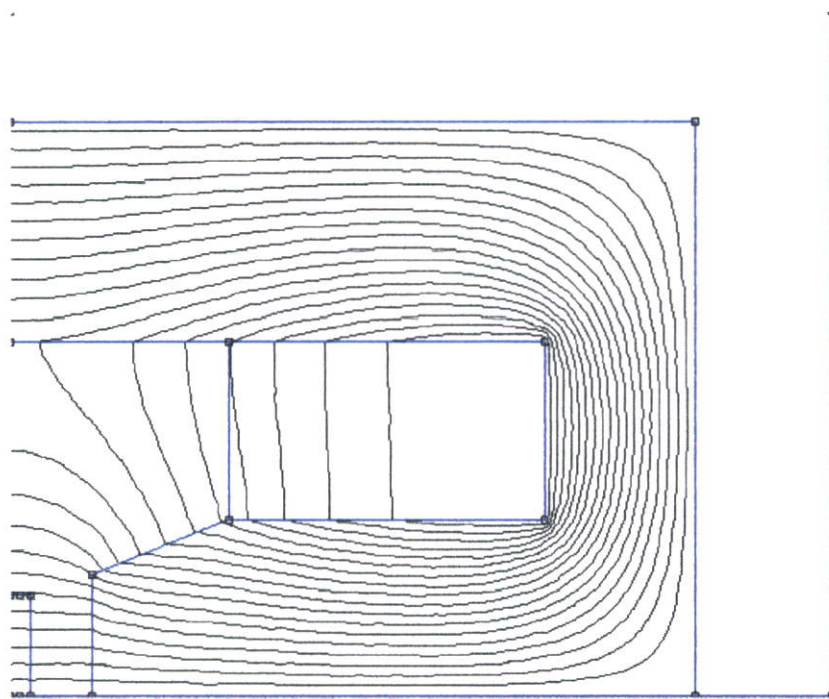
รูปที่ ๓.3 แสดงเส้นศักย์แม่เหล็กและค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของคั่นแบบ



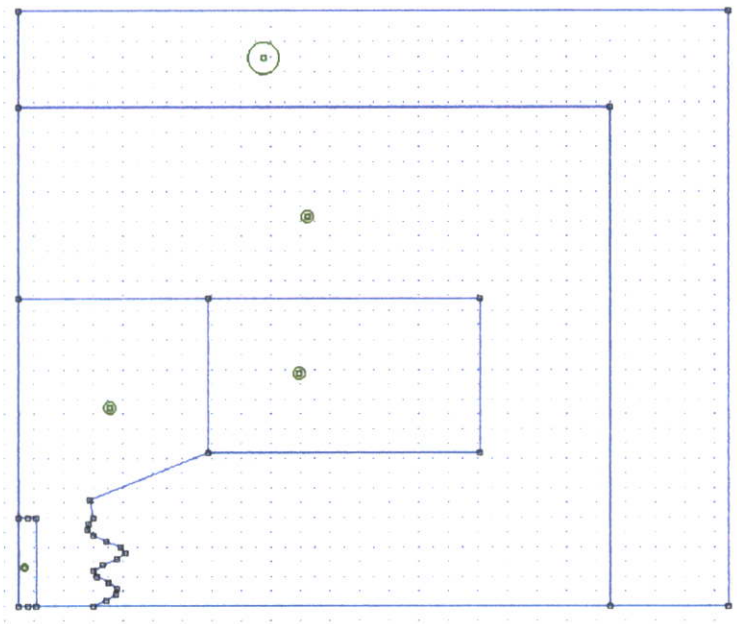
รูปที่ ๓.4 รูปขยายบริเวณช่องอากาศ D ของคั่นแบบก่อนการเคลื่อนที่โหนดแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศมีค่าไม่เท่ากัน



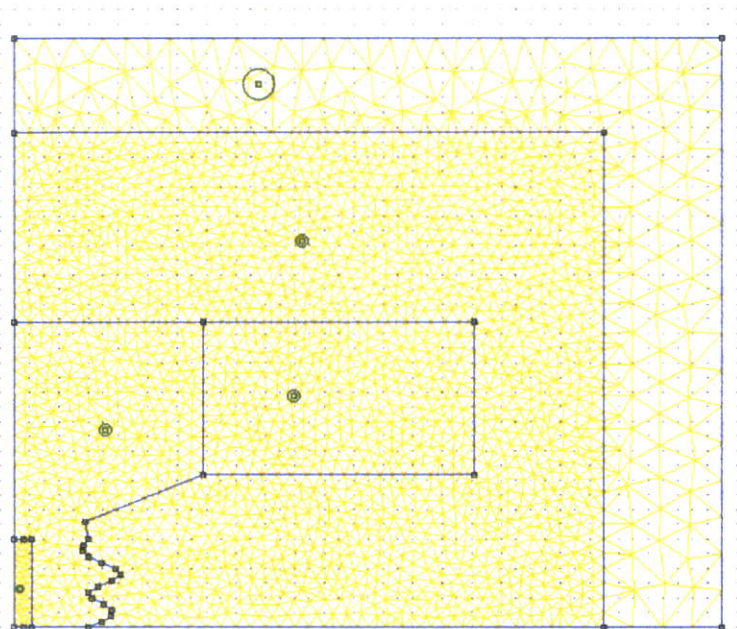
รูปที่ 3.5 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ของต้นแบบ



รูปที่ 3.6 การกระจายเส้นศัักย์แม่เหล็กของต้นแบบก่อนการเคลื่อนที่โทหนด

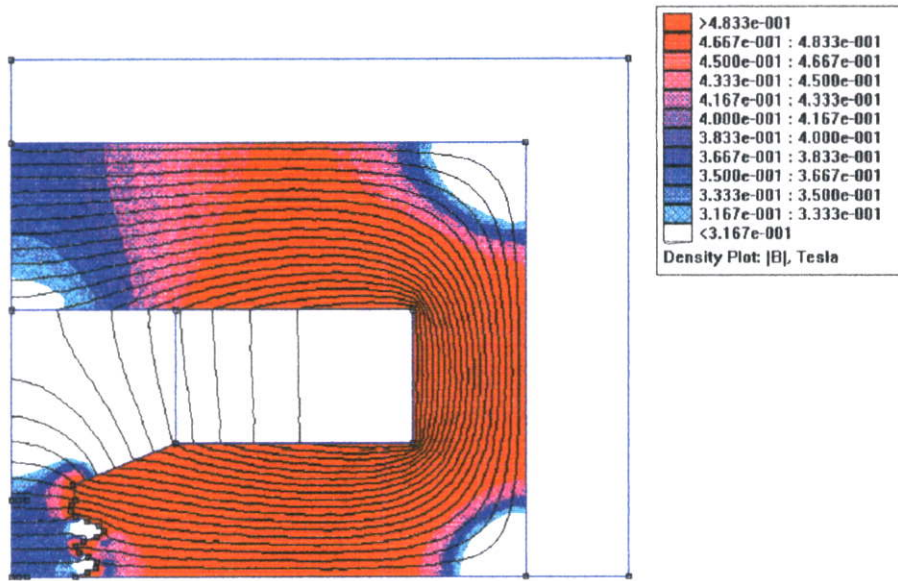


รูปที่ ๗.๗ รูปทรงขั้วแม่เหล็กของต้นแบบที่ได้จากการออกแบบโดยวิธี โหนดเคลื่อนที่แบบ 2
วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบคิเทอมินิสติก ออกแบบที่ค่า 0.36 T ตามแนวแกน x

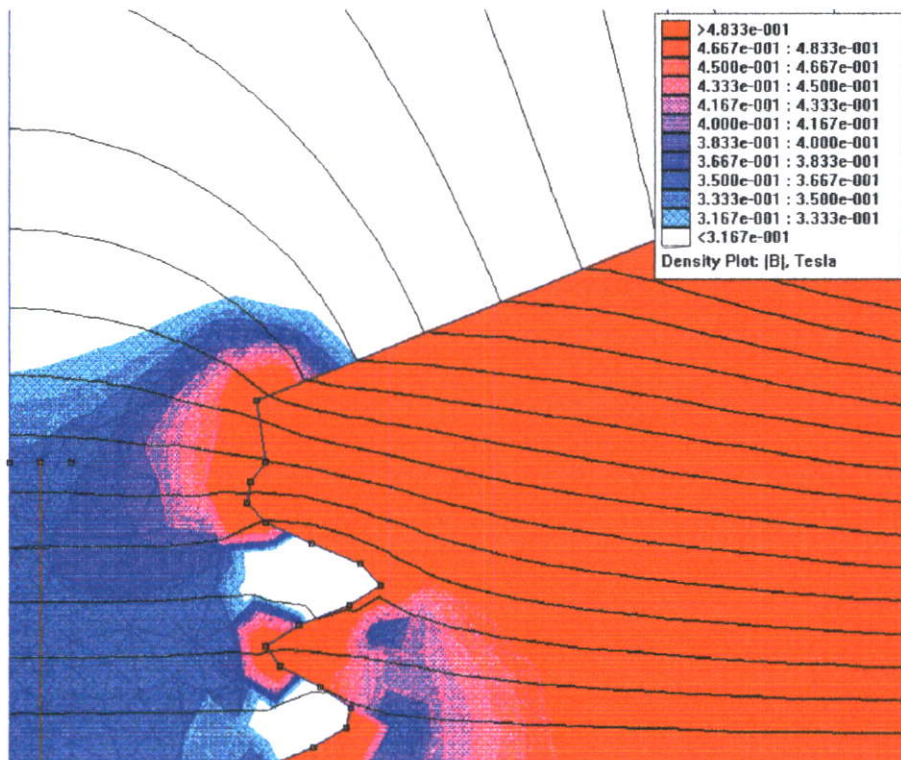


รูปที่ ๗.๘ โครงสร้างอิเลเมนต์และ โหนดของต้นแบบรูปที่ (๗.๗) สร้างด้วยโปรแกรม Femm

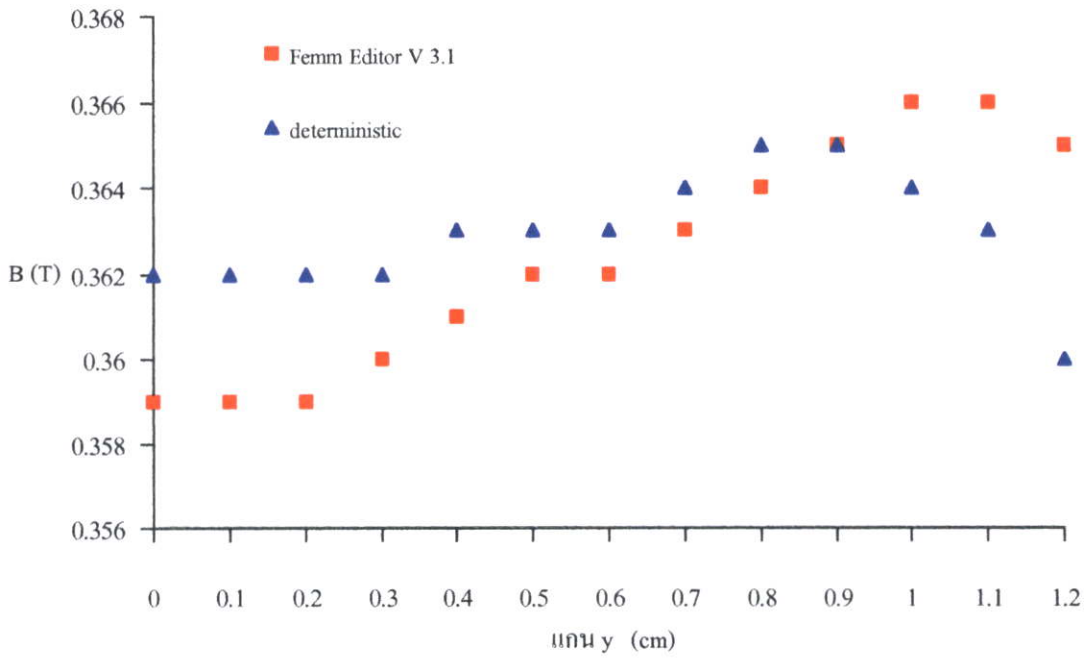
Editor Version 3.1 (4636 Elements ,2393 Nodes)



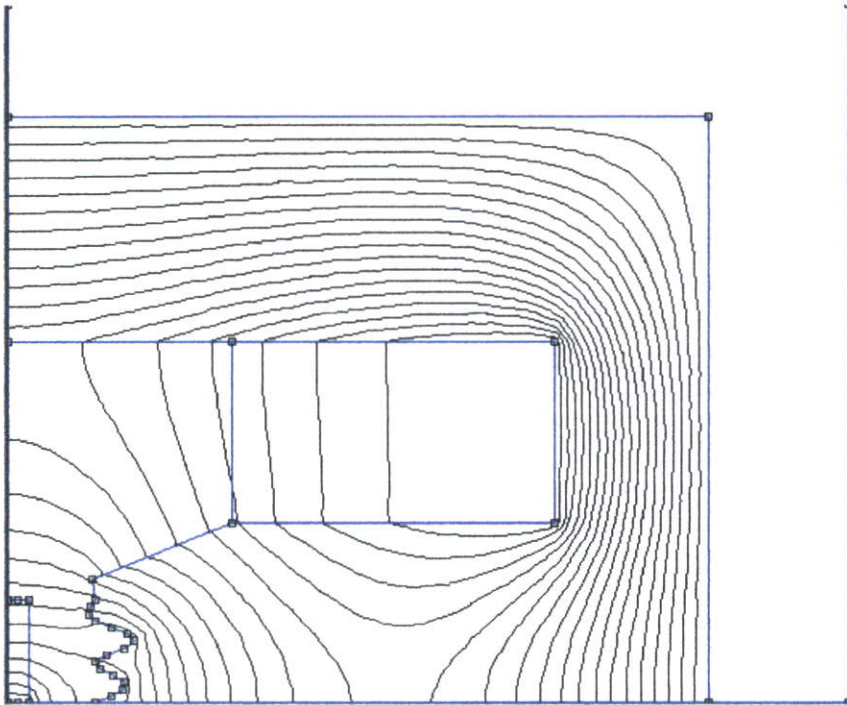
รูปที่ ๙.๑ เส้นศักย์แม่เหล็กและค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของคั่นแบบ (๙.๗)



รูปที่ ๙.๑๐ รูปขยายบริเวณช่องอากาศ D ของคั่นแบบ (๙.๗) แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศมีเท่ากัน



รูปที่ ง.11 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ของต้นแบบ (ง.7) แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศมีค่าเท่ากัน (ใกล้เคียงกัน) 0.36 T



รูปที่ ง.12 การกระจายเส้นศักย์แม่เหล็กของต้นแบบ (ง.7)

วิเคราะห์ต้นแบบก่อนการเคลื่อนที่โหนดจากรูปที่ ๓.2 แสดงโครงสร้างอิลิเมนต์และโหนดของต้นแบบก่อนการเคลื่อนที่โหนดสร้างด้วยโปรแกรม Femm Editor Version 3.1 ประกอบไปด้วย 4604 Elements , 2378 Nodes รูปที่ ๓.3 แสดงเส้นศักย์แม่เหล็กและค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของต้นแบบจะพบว่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่เท่ากันทั้งต้นแบบ รูปที่ ๓.4 รูปขยายบริเวณช่องอากาศ D ของต้นแบบแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศมีค่าไม่เท่ากันก่อนการเคลื่อนที่โหนด รูปที่ ๓.5 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ของต้นแบบก่อนการเคลื่อนที่โหนดประกอบด้วย วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบเดิม วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 1 วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบ 2 และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Femm Editor version 3.1 จะพบว่าทั้งสี่แนวทางให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ในย่านเดียวกัน รูปที่ ๓.6 การกระจายเส้นศักย์แม่เหล็กของต้นแบบก่อนการเคลื่อนที่โหนด

วิเคราะห์ต้นแบบหลังการเคลื่อนที่โหนดโดยการนำรูปทรงขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบที่ 2 วิเคราะห์ที่เหมาะสมแบบดิเทอมินิสติกออกแบบตามแนวแกน x ที่ค่า $B_d = 0.36$ T แสดงตามรูปที่ ๓.7 ส่วนรูปที่ ๓.8 โครงสร้างอิลิเมนต์และโหนดของต้นแบบรูปที่ (๓.7) สร้างด้วยโปรแกรม Femm Editor Version 3.1 ประกอบไปด้วย 4636 Elements , 2393 Nodes รูปที่ ๓.9 แสดงเส้นศักย์แม่เหล็กและค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของต้นแบบ (๓.7) รูปที่ ๓.10 และรูปที่ ๓.11 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D ที่ได้จากการนำผลการออกแบบในบทที่ 4 (รูปที่ ๓.7) มาให้โปรแกรม Femm Editor version 3.1 วิเคราะห์สรุปได้ว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศ D อยู่ในย่านเดียวกันกับที่ออกแบบคือ 0.36 T เป็นการยืนยันความถูกต้องของโปรแกรมที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ แต่ความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยอาจจะมีอยู่บ้างเพราะโครงสร้างอิลิเมนต์แตกต่างกันมาก (สับหกเท่า) และรูปที่ ๓.12 การกระจายเส้นศักย์แม่เหล็กของต้นแบบ (๓.7)

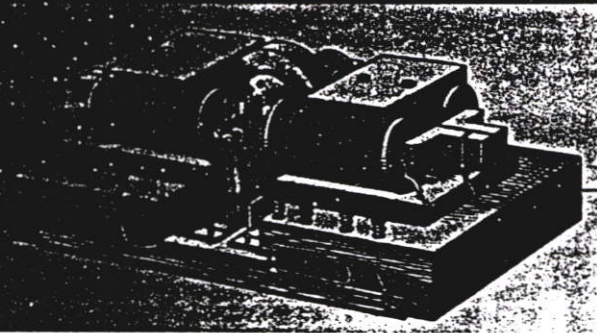
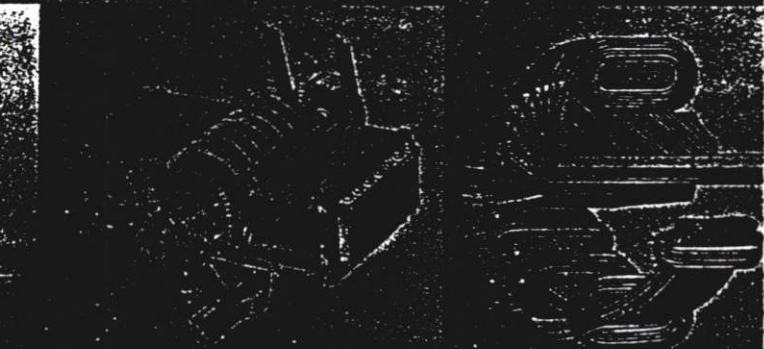
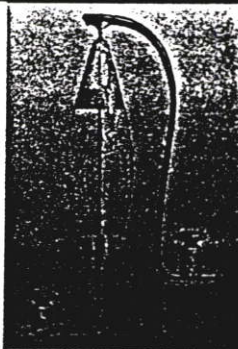
ภาคผนวก จ
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



กระทรวงศึกษาธิการ
กรมส่งเสริมการศึกษานานาชาติ



Volume 1

สาขาบทความ

- ☉ ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- ☉ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ☉ ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- ☉ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

ดำเนินการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

22-23 พฤศจิกายน 2544

โทร : 0-2739-2359 โทรสาร : 0-2326-9965

<http://www.ladkrabang.com>

การพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่สำหรับการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขูดแม่เหล็กไฟฟ้า

Development of Moving Nodes Technique for Shape Design Optimization of Electromagnet

วุฒิสักดิ์ หวังดี* ต่อพงษ์ ขวงพานิช** ชัยวุฒิ ฉัตรฤทัย*

* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10530

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่เพื่อออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขูดแม่เหล็กของขูดแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีลักษณะแนวขั้วราบโค้งมนโดยใช้วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปน์ (cubic spline) ร่วมกับการเปลี่ยนรูปร่างโหนดใหม่ (triangle reshape mesh) ปัญหาที่ออกแบบกำหนดให้เป็นสนามแม่เหล็กแบบสเตติก 2 มิติ หลักการที่ใช้เป็นการพัฒนาโปรแกรมการออกแบบโดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในการคำนวณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก และการคำนวณหาขูดแม่เหล็กที่เหมาะสมจะใช้วิธีคิโตนิตติก บทความนี้นำเสนอวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปน์ 3 แนวทางคือ ในแนวแกนนอน ในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง และในแนวแกนนอนพร้อมกับแนวแกนตั้ง จากผลการออกแบบพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถได้รูปร่างที่เหมาะสมของขูดแม่เหล็กที่มีลักษณะแนวขั้วราบโค้งมนและได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าใกล้เคียงกันในบริเวณช่องอากาศที่พิจารณาตามค่าที่ต้องการ

Abstract

This paper presents the development of the moving nodes technique for the shape design optimization of an electromagnet which has a smooth pole face using the cubic spline moving nodes technique combined with the triangle reshaped mesh. The design problem is defined as the two-dimensional magnetostatic problem. The concept is to develop the design program based on a combination of numerical methods, e.g. the magnetic flux density is calculated by using the finite element method, the optimal shape is calculated by using the deterministic methods. This paper illustrates three techniques of cubic spline moving nodes, e.g. moving in X axis, X and Y axis and XY axis. The results show that the shape design optimization of an electromagnet having a smooth pole face and the desired magnetic flux density in air gap region can be obtained by using this proposed technique.

Keywords : shape design optimization, finite element method,

cubic spline, deterministic methods

1. บทนำ

การออกแบบอุปกรณ์ทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในงานวิจัยที่ผ่านมา [1-5] ใช้หลักการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบคิโตนิตติกเพื่อออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขูดแม่เหล็กของขูดแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะทำงานร่วมกับวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบต่าง ๆ ซึ่งจะทำได้รูปร่างขูดแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นพื้นเลื้อยเล็กใหญ่ปะปนกัน (jagged shape) และรูปร่างที่ได้จากการออกแบบมีความคลาดเคลื่อนสูงเพราะโครงสร้างอิลิเมนต์ตามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วจะไม่สมดุลกันส่งผลให้การประมาณค่าศักย์แม่เหล็กในแต่ละอิลิเมนต์คลาดเคลื่อนสูง [6] เพราะการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์โครงสร้างของอิลิเมนต์ตามเหลี่ยมที่คิดและเหมาะสมจะต้องค่อนข้างสมดุลกันทั้งสามด้าน บทความนี้ต้องการนำเสนอการพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปน์ร่วมกับการเปลี่ยนรูปร่างอิลิเมนต์ การเคลื่อนที่โหนดแบบคิวบิกสไปน์จะทำให้แนวขั้วแม่เหล็กที่ได้มีลักษณะราบและโค้งมน และการเปลี่ยนรูปร่างอิลิเมนต์เป็นการจัดเรียงโครงสร้างอิลิเมนต์ตามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วใหม่ให้ค่อนข้างสมดุลทั้งสามด้านทำให้การประมาณค่าศักย์แม่เหล็กมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ในบทความนี้จะเป็นการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขูดแม่เหล็กของขูดแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณช่องอากาศที่พิจารณามีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน โดยใช้วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปน์จะพิจารณาใน 3 แนวทางคือ ในแนวแกนนอน x (เคลื่อนที่โหนดในแกน x) ในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง $x-y$ (เคลื่อนที่โหนดในแกน x ก่อนและเคลื่อนที่โหนดในแกน y) และในแนวแกนนอนพร้อมกับแนวแกนตั้ง xy (เคลื่อนที่โหนดในแกน x และ y พร้อมกัน)

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีไฟไนต์อิลิเมนต์

วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับหาค่าของสมการอนุพันธ์โดยเริ่มต้นจากการกำหนดขอบเขตที่ต้องการพิจารณา จากนั้นทำการแบ่งขอบเขตนั้นออกเป็นช่วงย่อย ๆ เรียกว่าอิลิเมนต์ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมประกอบด้วย 3 โหนด อิลิเมนต์ลักษณะนี้จะมี

ใช้กันมากเพราะสามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุกรูปทรง โดยทั่วไปแล้ววิธีไฟไนท์ออลิเมนต์สามารถแสดงในรูปสมการดังนี้ [7]

$$[K] \{A\} = \{R\} \quad (1)$$

$[K]$ เป็นเมทริกซ์ $n \times n$ ของฟังก์ชันรูปร่าง (shape function) ซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับจำนวนโนดทั้งหมด (n) ภายในขอบเขตพิจารณา $\{A\}$ เป็นค่าศักย์เวกเตอร์ (vector potential) และ $\{R\}$ เป็นเวกเตอร์ฟังก์ชันกระตุ้นที่กำหนด จากนั้นทำการแก้สมการเชิงเส้นในสมการที่ (1) แล้วนำค่า $\{A\}$ ที่ได้มามีค่าตัวเลขต่าง ๆ เช่น ค่าสนามแม่เหล็ก สนามของสนามแม่เหล็กแบบสแตติก 2 มิติ สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการ Poisson 2 มิติได้ดังนี้

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = \mu_0 J_z \quad (2)$$

เมื่อ J เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า μ_r เป็นค่าซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของตัวกลาง

2.2 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสม

โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข (constrained optimization techniques) สามารถแสดงในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

Minimize $F = F[p, A(p)] \quad (3)$

Subject to $g_j[p, A(p)] \leq 0 \quad j = 1, \dots, J \quad (4)$

$h_k[p, A(p)] = 0 \quad k = 1, \dots, m \quad (5)$

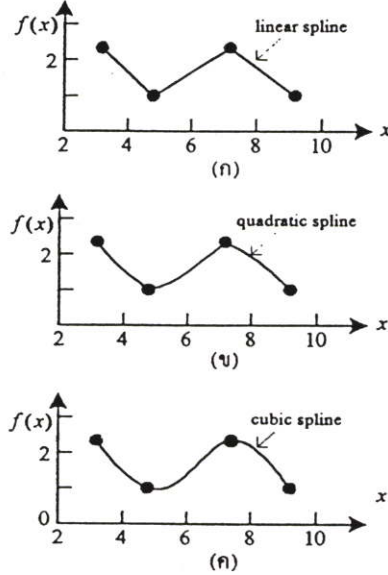
$p_i^L \leq p_i \leq p_i^U \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$

เมื่อ F เป็นฟังก์ชันเป้าหมายการออกแบบ (objective function), g_j เป็นฟังก์ชันเงื่อนไขที่ไม่เท่ากัน (inequality constraints), h_k เป็นฟังก์ชันเงื่อนไขที่เท่ากัน (equality constraints) p เป็นตัวแปรการออกแบบ (design variables) และเงื่อนไขขอบเขต (side constraints) เป็นขอบเขตที่ชัดเจนของตัวแปรการออกแบบโดยที่ p_i^L และ p_i^U เป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดของขอบเขตตามลำดับ สำหรับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขแบบบทความนี้จะเลือกใช้วิธีเทคนิคอนิติกแบบ Quadratic Extended Penalty Function (QEP) ซึ่งเป็นการใช้พื้นฐานของเกรเดียนต์ (gradient) เป็นข้อมูลในการเคลื่อนที่สู่จุดที่เหมาะสม

2.3 ทฤษฎีคิวบิกสไปน์

สไปน์เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ในการหาฟังก์ชันความสัมพัทธ์ของแนวเส้นที่แบ่งจุดต่าง ๆ ของชุดข้อมูลที่กำหนดให้ [8-10] ซึ่งสามารถ

แบ่งได้เป็น 3 ระดับตามลักษณะของแนวเส้น คือ ลิเนียร์สไปน์ (linear spline) ควอดราติกสไปน์ (quadratic spline) และคิวบิกสไปน์ (cubic spline) แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 (ก) แบบลิเนียร์สไปน์ (ข) แบบควอดราติกสไปน์ (ค) แบบคิวบิกสไปน์

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าแบบคิวบิกสไปน์แนวเส้นจะมีความโค้งมนมากกว่าเหมาะที่จะนำมาใช้ในการปรับแต่งแนวขั้วแม่เหล็กที่ออกแบบให้มีลักษณะราบโค้งมนตามต้องการซึ่งสามารถนิยามในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (7) สมการที่ (8) เป็นสมการที่ใช้หาฟังก์ชันความสัมพัทธ์ของแนวเส้นโค้งมนในแต่ละช่วงของคิวบิกสไปน์ และสมการที่ (9) เป็น second derivative ที่นำมาแทนในสมการที่ (8)

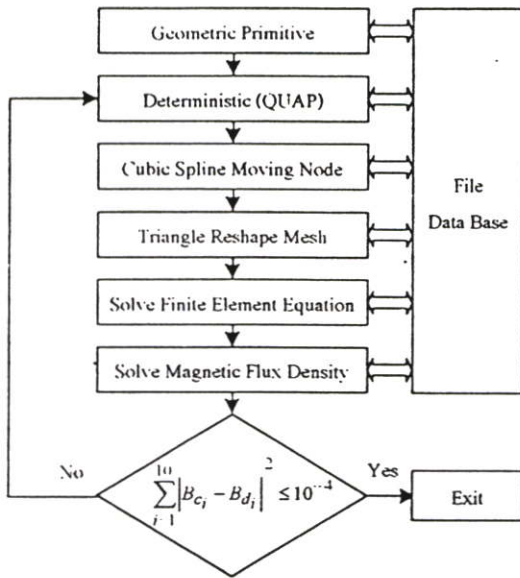
$$f_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \quad (7)$$

$$f(x) = \frac{f_i''(x_{i-1})}{6(x_i - x_{i-1})} (x_i - x)^3 + \frac{f_i''(x_i)}{6(x_i - x_{i-1})} (x - x_{i-1})^3 + \left[\frac{f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} - \frac{f''(x_{i-1})(x_i - x_{i-1})}{6} \right] (x_i - x) + \left[\frac{f(x_i)}{x_i - x_{i-1}} - \frac{f''(x_i)(x_i - x_{i-1})}{6} \right] (x - x_{i-1}) \quad (8)$$

$$(x_i - x_{i-1}) f''(x_{i-1}) + 2(x_{i+1} - x_{i-1}) f''(x_i) + (x_{i+1} - x_i) f''(x_{i+1}) = \frac{6}{x_{i+1} - x_i} [f(x_{i+1}) - f(x_i)] + \frac{6}{x_i - x_{i-1}} [f(x_{i-1}) - f(x_i)] \quad (9)$$

3. วิธีการเปลี่ยนรูปร่างอิเลิเมนต์ใหม่

วิธีการนี้เป็นอัลกอริทึม (algorithm) ที่ใช้สำหรับจัดเรียงโครงสร้างอิเลิเมนต์บริเวณแนวข้อั้วให้เหมาะสมหลังจากผ่านการใช้วิธีโหนดเคลื่อนที่ที่ควิกพิทโพล์ทุกครั้งของกระบวนการทำซ้ำ (iterative process) โคลจะอเพ็แควบสั้มห้้้งของแนวเส้นโค้งคิวกพิทโพล์ในแต่ละช่วงเพื่อหาตำแหน่งของอิเลิเมนต์และโหนดที่เพิ่มขึ้นใหม่ จากนั้นทำการจัดเรียงอิเลิเมนต์ให้ก่อนข้างสมคูลข้างสมคูลเดิม หลักการออกแบบเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมจะเป็นกระบวนการทำซ้ำจนกว่าจะได้ค่าคอบที่ขอมรับได้หรือครบจำนวนรอบการทำซ้ำ ขั้นตอนต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2



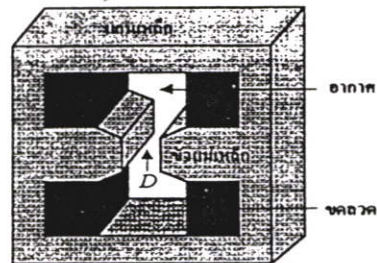
รูปที่ 2 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

ขั้นตอนการทำงานของ Geometric Primitive เป็นการกำหนดขอบเขตของดัมแบบที่จะพิจารณา ทำการสร้างอิเลิเมนต์ภายในขอบเขตโดยการกำหนดตำแหน่งของโหนดต่าง ๆ จากนั้นกำหนดคุณสมบัติของตัวกลางต่าง ๆ โดยแยกออกเป็นช่วง ๆ เช่น อากาศ เหล็ก เป็นต้น พร้อมทั้งกำหนดเงื่อนไขของขอบเขตได้แก่ ขอบเขตดิริชเลท (dirichlet) และขอบเขตนิวแมน (neuman) ขั้นตอน Deterministic เป็นการหาตำแหน่งโหนดเคลื่อนที่โหนดไปยังจุดที่เหมาะสมของแต่ละโหนด ขั้นตอน Cubic Spline Moving Node เป็นการเคลื่อนโหนดทั้ง 6 โหนดให้ราบโค้งมน ขั้นตอน Triangle Reshape Mesh เป็นการจัดโครงสร้างอิเลิเมนต์ใหม่ให้ก่อนข้างสมคูลข้างรูปร่างข้อั้วที่เปลี่ยนไป ขั้นตอน Solve Finite Element Equation เป็นการสร้างเมตริกซ์ $[K]$ เวกเตอร์ $\{F\}$ และ $\{R\}$ จากนั้นทำการแก้สมการที่ (1) เพื่อหาค่า $\{F\}$ ขั้นตอน Solve Magnetic Flux Density เป็นการหาค่า $\{F\}$ ที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการตรวจสอบค่าความหนาแน่น

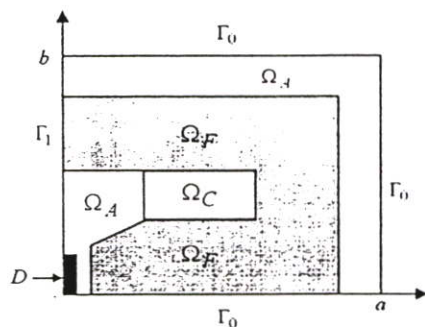
เส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศว่าขอมรับได้หรือไม่ ถ้าขอมรับได้จะจบกระบวนการออกแบบ ถ้าไม่ได้จะกลับไปขั้นตอน Deterministic ใหม่เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมใหม่ของแต่ละโหนด กระบวนการจะทำซ้ำจนกว่าจะได้ค่าคอบที่ขอมรับได้หรือครบจำนวนรอบการทำซ้ำ

4. ผลการทดสอบ

เป้าหมายของการออกแบบในงานวิจัยนี้คือการหารูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของขดแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะราบโค้งมนซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B มีค่าเท่ากันตามที่ต้องการในบริเวณช่องอากาศ D ที่พิจารณา รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างต้นแบบขดแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิจารณา ในการออกแบบสามารถพิจารณาเพียงเศษหนึ่งส่วนสี่ของโครงสร้างโดยอาศัยคุณสมบัติแกนสมมาตรแสดงได้ดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าขอบเขตที่พิจารณาประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ แกนเหล็ก Ω_F ขดลวด Ω_C อากาศ Ω_A และช่องอากาศบริเวณขั้วแม่เหล็กที่พิจารณา D Γ_0 เป็นเงื่อนไขดิริชเลท Γ_1 เป็นเงื่อนไขนิวแมน μ_F เป็นค่าซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็ก μ_C เป็นค่าซึมซาบแม่เหล็กของขดลวด และ μ_A เป็นค่าซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ ในการออกแบบกำหนดให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $J = 3.3445 \text{ A/mm}^2$ $\mu_C = \mu_A = \mu_0$ $\mu_F = 1000\mu_0$ และกำหนดขอบเขตที่พิจารณา $\Omega = (0, a) \times (0, b) = (0, 0.12) \times (0, 0.10) \text{ mm}^2$ โครงสร้างต้นแบบที่พิจารณาประกอบด้วย 164 โหนด และ 277 อิเลิเมนต์

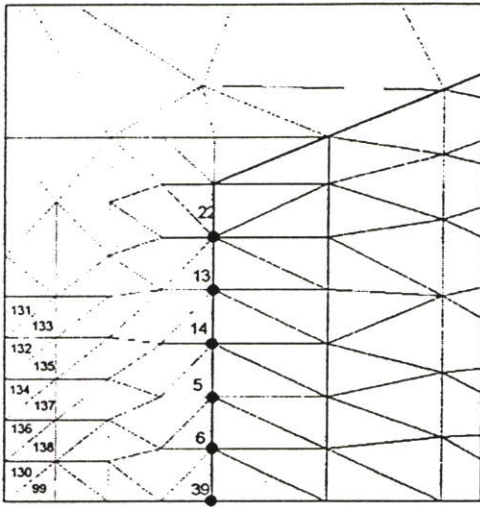


รูปที่ 3 โครงสร้างต้นแบบขดแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 4 ขอบเขตของต้นแบบ 2 มิติขนาดเศษหนึ่งส่วนสี่

รูปขยายโครงคาน้ำของคาน้ำแบบแสดงดังรูปที่ 5 จากรูปกำหนดให้โหนดที่เคลื่อนที่ในการออกแบบจำนวน 6 โหนดคือ โหนดที่ 22, 13, 14, 5, 6 และ 39 และอิเลเมนต์บริเวณช่องอากาศ D ที่พิจารณาจำนวน 10 อิเลเมนต์คือ อิเลเมนต์ที่ 99, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137 และ 138 ตามลำดับ



รูปที่ 5 รูปขยายโครงคาน้ำของอิเลเมนต์บริเวณช่องอากาศและขั้วแม่เหล็ก

เป้าหมายของการออกแบบคือการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของโหนดที่เคลื่อนที่ทั้ง 6 โหนด เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B_c ในอิเลเมนต์ต่าง ๆ บริเวณช่องอากาศ (10 อิเลเมนต์) ให้มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B_d ตามความต้องการที่จะออกแบบ ซึ่งการแก้ปัญหาในลักษณะนี้สามารถกระทำได้โดยการจัดให้อยู่ในรูปสมการการหาค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชันหลักดังนี้

$$\text{Min } F[\{p_x, p_y\}, A(\{p_x, p_y\})] = \sum_{i=1}^{10} |B_{c_i} - B_{d_i}|^2 \quad (10)$$

โดยมีเงื่อนไขของขอบเขต ($j = 1, \dots, 6$)

$$g_{x_j}(\{p_x\}) = \frac{p_{x_j}^2 - p_{x_j}(p_{x_j}^L - p_{x_j}^R) + p_{x_j}^L p_{x_j}^R}{(p_{x_j}^R - p_{x_j}^L)^2} \leq 0 \quad (11)$$

$$g_{y_j}(\{p_y\}) = \frac{p_{y_j}^2 - p_{y_j}(p_{y_j}^L - p_{y_j}^R) + p_{y_j}^L p_{y_j}^R}{(p_{y_j}^R - p_{y_j}^L)^2} \leq 0 \quad (12)$$

เมื่อ $p_{x_j}^L$ และ $p_{x_j}^R$ เป็นขอบเขตแนวแกน x ทางด้านซ้ายและทางด้าน

ขวาตามลำดับ และตำแหน่งแนวแกน x กำหนดให้มีค่าดังนี้

$$0.105 \leq p_{x_j} \leq 0.175 \text{ cm} \quad (13)$$

เมื่อ $p_{y_j}^L$ และ $p_{y_j}^R$ เป็นขอบเขตแนวแกน y ทางด้านล่างและทางด้านบนตามลำดับ และตำแหน่งแนวแกน y กำหนดให้มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} 0.125 \leq p_{y_1} \leq 0.150 \text{ cm} & \quad 0.095 \leq p_{y_2} \leq 0.120 \text{ cm} \\ 0.065 \leq p_{y_3} \leq 0.09 \text{ cm} & \quad 0.035 \leq p_{y_4} \leq 0.06 \text{ cm} \\ 0.005 \leq p_{y_5} \leq 0.03 \text{ cm} & \quad p_{y_6} = 0 \text{ cm} \end{aligned} \quad (14)$$

สมการที่ 13 ถึง 14 เป็นค่าเงื่อนไขขอบเขตของโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x และในแนวแกน y ตามลำดับ

ผลการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการพัฒนาโปรแกรมการออกแบบโดยใช้ Microsoft Visual Basic 6.0 เมื่อกำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก $B_d = 0.36$ T บริเวณช่องอากาศ D ที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องอากาศของวิธีการเดิม [1-5] กับวิธีการที่นำเสนอ จะเห็นได้ว่ามีค่า B_c ที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องอากาศ D ที่ $B_d = 0.36$ T

Ele. No.	B_c (T)						
	ค่าเริ่มต้น	วิธีการเดิม			วิธีการที่นำเสนอ		
		x	$x-y$	xy	x	$x-y$	xy
131	0.3941	0.3621	0.3605	0.3605	0.3592	0.3614	0.3614
133	0.3976	0.3639	0.3616	0.3616	0.3624	0.3655	0.3655
132	0.4014	0.3614	0.3598	0.3598	0.3603	0.3627	0.3627
135	0.4034	0.3604	0.3594	0.3594	0.3612	0.3639	0.3639
134	0.4063	0.3618	0.3596	0.3595	0.3603	0.3626	0.3626
137	0.4075	0.3611	0.3590	0.3590	0.3601	0.3623	0.3623
136	0.4096	0.3632	0.3599	0.3599	0.3605	0.3627	0.3627
138	0.4108	0.3635	0.3598	0.3598	0.3603	0.3624	0.3624
130	0.4114	0.3642	0.3604	0.3604	0.3610	0.3632	0.3632
99	0.4130	0.3651	0.3608	0.3609	0.3614	0.3636	0.3636

Ele. No. หมายถึงอิเลเมนต์ที่พิจารณาในช่องอากาศ

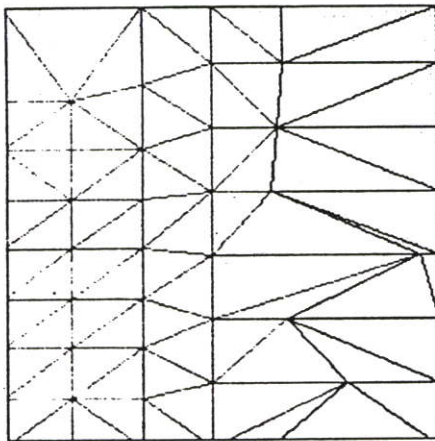
รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีการเดิมและวิธีการที่นำเสนอโดยโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x แสดงดังรูปที่ 6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากรูปที่ 6 (ก) จะเห็นได้ว่ารูปร่างขั้วแม่เหล็กจะมีลักษณะเป็นพื้นเหลี่ยมเล็กใหญ่ปะปนกัน และโครงสร้างอิเลเมนต์บริเวณแนวขั้วมีลักษณะเล็กแหลมไม่สมดุลทำให้การประมาณค่าเสถียรแม่เหล็กโดยวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์เกิดการคลาดเคลื่อน ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบควิสิกส์พลัมซึ่งจะทำให้รูปร่างแนวขั้ว

แม่เหล็กมีลักษณะราบและโค้งมน และใช้วิธีการเปลี่ยนรูปร่างอิมเมทใหม่มาจัดโครงสร้างอิลิเมนต์ตามเหลี่ยมให้เหมาะสมกับรูปร่างขั้วที่เปลี่ยนไปแสดงดังรูปที่ 6 (ข) รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีการเดิม และวิธีการที่นำเสนอโดยโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x-y$ แสดงดังรูปที่ 7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ และรูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีการเดิม และวิธีการที่นำเสนอโดยโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy แสดงดังรูปที่ 8 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

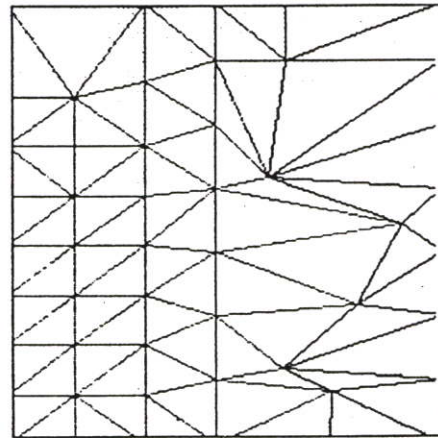
5. บทสรุป

จากผลการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบควิกสโพลน์ร่วมกับวิธีการ

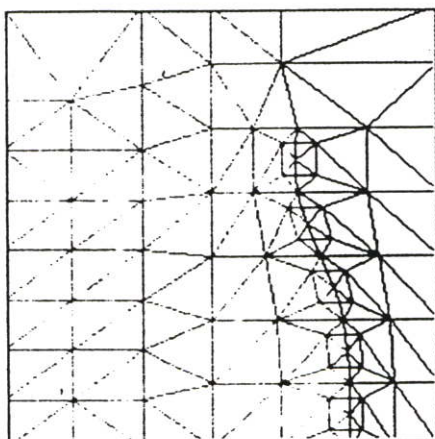
เปลี่ยนรูปร่างอิมเมทใหม่ที่นำเสนอ ดังรูปที่ 6 (ข) รูปที่ 7 (ข) และรูปที่ 8 (ข) สรุปได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถแก้ปัญหาเรื่องรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่เป็นพื้นเหลี่ยมเล็กใหญ่ปะปนกัน ทำให้มีลักษณะแนวขั้วที่ราบโค้งมนได้ และรูปร่างขั้วแม่เหล็กที่ได้จากการออกแบบมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เพราะโครงสร้างอิลิเมนต์ตามเหลี่ยมบริเวณแนวขั้วแม่เหล็กของวิธีการที่นำเสนอจะมีความสมดุลทั้งทางด้านมากกว่า วิธีโหนดเคลื่อนที่แบบควิกสโพลน์ร่วมกับการเปลี่ยนรูปร่างอิมเมทใหม่ที่นำเสนอนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับการออกแบบทางวิศวกรรมไฟฟ้า เช่น การออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของอิเล็กทรอนิกส์โครงค การออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของถูกด้วยไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น



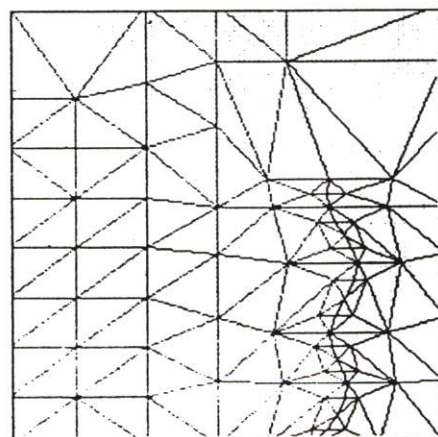
(ก) วิธีการเดิม



(ข) วิธีการเดิม



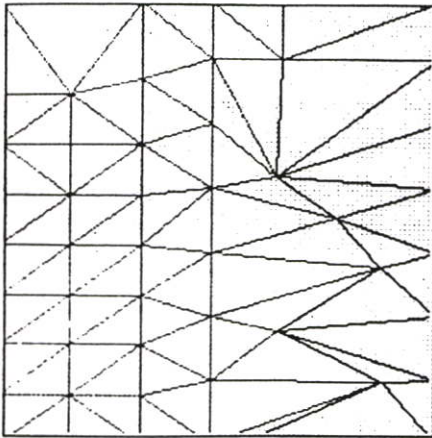
(ข) วิธีการที่นำเสนอ



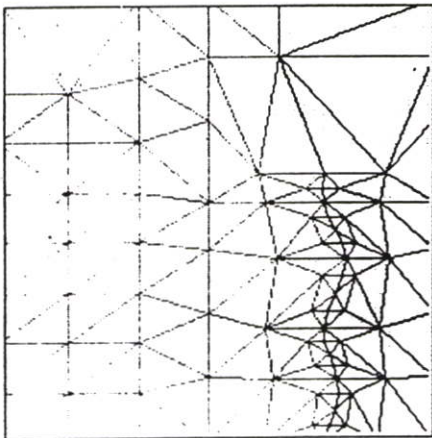
(ข) วิธีการที่นำเสนอ

รูปที่ 6 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิลิเมนต์โดยโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน x ที่ $B_d = 0.36$ T

รูปที่ 7 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและ โครงสร้างอิลิเมนต์โดยโหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน $x-y$ ที่ $B_d = 0.36$ T



(ก) วิธีการเดิม



(ข) วิธีการที่นำเสนอ

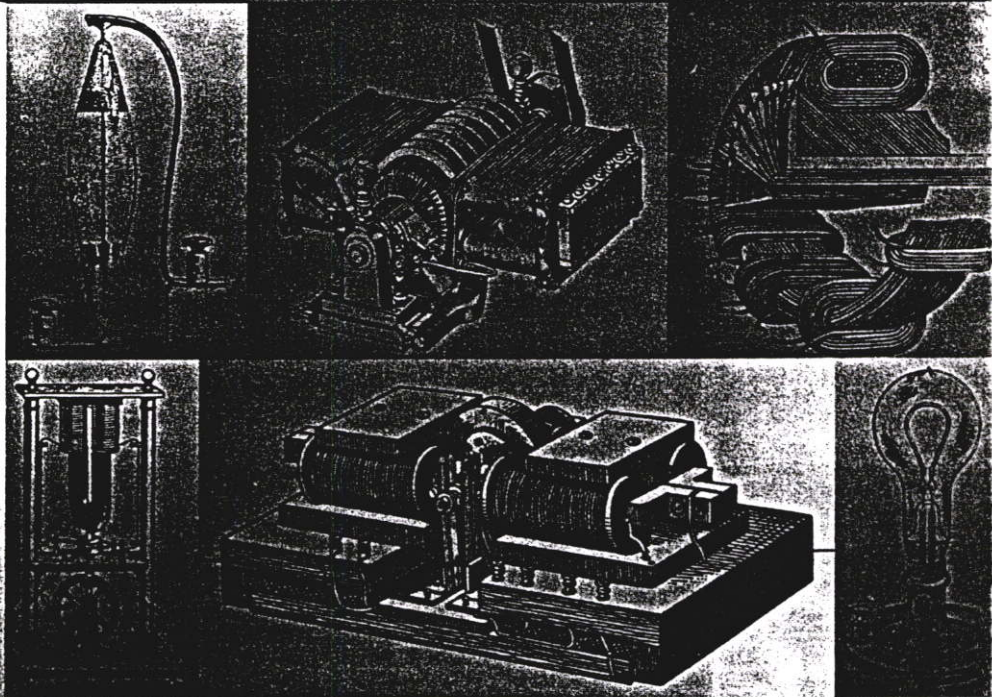
รูปที่ 8 รูปขยายแนวขั้วแม่เหล็กและโครงสร้างอิทธิพันธ์โดย
โหนดเคลื่อนที่ในแนวแกน xy ที่ $B_J = 0.36$ T

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.A. Ramirez and E.M. Freeman. "SHAPE OPTIMISATION OF POWER FREQUENCY ELECTROMAGNETIC DEVICE". Printed and published by the IEE, Savoy Place, London WC2R 0BL, UK, 1994.
- [2] C. Chat-uthai, J.A. Ramirez, and E.M. Freeman. "Comparison of Deterministic methods for the Shape Optimisation of Electromagnetic Devices". Congressional Brazilian in Eletromagnetics, Cbmag'95, Florianopolis, Brazil, May 1995, pp.72-75
- [3] C. Chat-uthai, J.A. Ramirez, and E.M. Freeman. "An Improved Constrained Quasi Newton Method fo theSolution of Inverse Electromagnetic Problems" IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 3, May 1996, pp.1318-1321.
- [4] Topong Yungpanich and Chaiwut Chat-uthai, " Structural Moving Nodes Techniques for Shape Design Optimization of Electromagnet" Proceeding of the 21st Electrical Engineering Conference, EECON-21, Thailand, November 1998, pp. PW027-PW030.
- [5] ค้อพงษ์ ขวงพานิช, "การออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของอุปกรณ์สนามแม่เหล็กโดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2543
- [6] Matthew N. O. Sadiku. "A Simple Introduction to Finite Element Analysis of Electromagnetic Problems". IEEE Transactions on Education, Vol.32, No.2, May 1989.
- [7] ค้อพงษ์ ขวงพานิช และ ชัยวุฒิ จีครุฑย์ "การเปรียบเทียบวิธีการแก้สมการไฟไนต์อิเลิเมนต์สำหรับการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กสแตติกและสนามไฟฟ้าสแตติกแบบ 2 มิติ" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 กรุงเทพมหานคร 2540 หน้า 380-285
- [8] John H. Mathews. "Numerical Method for Mathematics Science, and Engineering " Prentice HallEnglewood Cliffs, NJ Prentice Hall, 1992.
- [9] Sidney Yakowitz. "An Introduction to Numerical Computation". New York, Macmillan, 1989.
- [10] Peter R. Turner."Guide To Numerical Analysis". London, Macmillan, 1989.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



Volume 1

สาขาบทความ

- ⊗ ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- ⊗ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ⊗ ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- ⊗ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

ดำเนินการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

22-23 พฤศจิกายน 2544

โทร : 0-2739-2359 โทรสาร : 0-2326-9965

<http://www.ladkrabang.com>

การเปรียบเทียบวิธีการดิเทอร์มินิสติกและสโตคาสติกสำหรับการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสม

Comparison of Deterministic and Stochastic Methods for Shape Design Optimization

วุฒิสักดิ์ หวังคี* คอพงษ์ ขวงพานิช** ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย*

* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร 10530

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการหารูปร่างที่เหมาะสมแบบดิเทอร์มินิสติกและสโตคาสติกของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีลักษณะแนวขั้วที่โค้งมนโดยวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปไลน์ (cubic spline) ร่วมกับการสร้างโครงตาข่ายโหนดอัตโนมัติโดยอัตโนมัติ (automatic mesh generation) ในการคำนวณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์แบบ 2 มิติ และในการคำนวณหารูปร่างที่เหมาะสมจะทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธีดิเทอร์มินิสติกแบบ quadratic extended penalty method (QUAP) และวิธีสโตคาสติกแบบเจเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm) จากผลการออกแบบพบว่าทั้งสองวิธีสามารถทำให้ได้รูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กที่มีลักษณะแนวขั้วที่โค้งมน และได้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณช่องอากาศใกล้เคียงกันที่ต้องการออกแบบ นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีการที่เหมาะสมโดยวิธีสโตคาสติกจะได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่า

Abstract

This paper presents the comparison of the deterministic and stochastic methods for shape design optimization of an electromagnet which has a smooth pole face using the cubic spline moving nodes technique combined with the automatic mesh generation. The magnetic flux density is calculated by using the two-dimensional finite element method. The optimal shape is calculated by using the deterministic method (quadratic extended penalty method QUAP) compare with the stochastic method (genetic algorithm). The results show that the optimal shape of an electromagnet having a smooth pole face and the desired magnetic flux density in an gap region can be obtained by using both methods. Furthermore, the results show that the shape design optimization using the stochastic method is more accurate.

Keywords : shape design optimization, deterministic, stochastic, genetic algorithm, finite element method.

1. บทนำ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1-3] การออกแบบอุปกรณ์ทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้หลักการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอร์มินิสติกเพื่อออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะทำงานร่วมกับวิธีโหนดเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทางที่แตกต่างกัน คือ ดิเทอร์มินิสติกและสโตคาสติก วิธีดิเทอร์มินิสติกจะเป็นการใช้พื้นฐานของเกรเดียนต์ (gradient) ซึ่งเกรเดียนต์ของฟังก์ชันหลักจะเป็นข้อมูลในการเคลื่อนที่เข้าหาจุดที่เหมาะสม สำหรับวิธีสโตคาสติกจะเป็นการใช้ความน่าจะเป็น (probabilistic rules) เป็นพื้นฐานในการเข้าหาจุดที่เหมาะสม ในบทความนี้ ปัญหาที่พิจารณากำหนดให้เป็นสนามแม่เหล็กแบบสเตติก 2 มิติ โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์คำนวณหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ในการคำนวณหารูปร่างที่เหมาะสมจะใช้วิธีดิเทอร์มินิสติกและสโตคาสติก ร่วมกับวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบคิวบิกสไปไลน์ซึ่งจะทำให้แนวขั้วแม่เหล็กที่ได้มีลักษณะที่โค้งมน และการสร้างโครงตาข่ายโหนดอัตโนมัติโดยอัตโนมัติทุกครั้งที่มีการเคลื่อนที่โหนดจะทำให้ได้โครงตาข่ายโหนดที่ละเอียดมากขึ้นซึ่งวิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับต้นแบบได้อย่างหลากหลาย โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\text{Minimize } F = F[p, A(p)] \quad (1)$$

$$\text{Subject to } g_j[p, A(p)] \leq 0 \quad j = 1, \dots, l \quad (2)$$

$$h_k[p, A(p)] = 0 \quad k = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$p_i^L \leq p_i \leq p_i^U \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

เมื่อ F ฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function), g_j เป็นฟังก์ชันเงื่อนไขที่ไม่เท่ากัน (inequality constraints), h_k เป็นฟังก์ชันเงื่อนไขที่เท่ากัน (equality constraints) p เป็นตัวแปรการออกแบบ (design variables) และเงื่อนไขขอบเขต (side constraints) เป็นขอบเขตที่ชัดเจนของตัวแปร โดยที่ p_i^L และ p_i^U เป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดของขอบเขตตามลำดับ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีดิเทอมีนิตติก

แนวความคิดพื้นฐานของดิเทอมีนิตติก [3] เป็นกระบวนการทำซ้ำของขั้นตอนในการหาทิศทาง (line search) เพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบ (design parameter) $\{x\}$ จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสม ซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\{x\}^q = \{x\}^{q-1} + \alpha \{d\}^q \tag{5}$$

เมื่อ q เป็นจำนวนกระบวนการทำซ้ำ α เป็นค่าตัวคูณสเกลลา d เป็นค่าทิศทางที่พุ่งเข้า (search direction) วิธีการหาทิศทางที่พุ่งเข้า d หาได้จากเกรเดียนของฟังก์ชันหลักดังสมการ

$$\{d\}^q = \left\{ \frac{dF}{dx} \right\}^q + \beta^q \{d\}^{q-1} \tag{6}$$

จะเห็นได้ว่าค่าสเกลลา β เป็นตัวกำหนดที่สำคัญในวิธีการนี้ ซึ่งเมื่อ $\beta = 0$ ทิศทางที่พุ่งเข้าหา d จะได้จากข้อมูลเกรเดียนของฟังก์ชันหลักเพียงอย่างเดียวซึ่งสามารถอ้างอิงอิงจากการใช้วิธี steepest descent และเมื่อ $\beta \neq 0$ ข้อมูลทิศทางที่พุ่งเข้าหา $\{d\}^{q-1}$ สามารถคำนวณหา $\{d\}^q$ ได้โดยวิธีการเปลี่ยนรูปแบบ (transformation) ซึ่งเป็นการนำเอาฟังก์ชันหลักและฟังก์ชันเงื่อนไขมารวมกันเป็นฟังก์ชันหลักแปลง (pseudo objective function) ซึ่งจะมีการกำหนดฟังก์ชันพิณอลตี P (penalty function) ที่อยู่ในเทอมของฟังก์ชันเงื่อนไขโดยมีสมการดังนี้

$$\phi[\{x\}, r_p] = F(\{x\}) + r_p P(\{x\}) \tag{7}$$

เมื่อ ϕ เป็นฟังก์ชันหลักแปลง F เป็นฟังก์ชันหลัก r_p เป็นค่าตัวคูณสเกลลา P เป็นฟังก์ชันพิณอลตี การกำหนดรูปแบบของฟังก์ชัน P สามารถทำได้หลายรูปแบบในบทความนี้จะเลือกใช้วิธีการแบบ QUAP (quadratic extended penalty function) ซึ่งเป็นวิธีที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายโดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$P[h(x), g(x), r_p, r_p'] = r_p' \sum_{k=1}^l g_k(x) + r_p \sum_{j=1}^m [h_j(x)]^2 \tag{8}$$

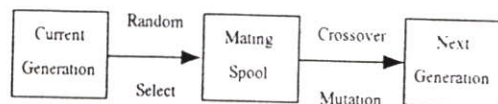
$$\bar{g}_k(x) = -\frac{1}{g_k(x)} \cdot g_k(x) \leq \epsilon_e \tag{9}$$

$$\bar{g}_k(x) = -\frac{1}{\epsilon_e} \left\{ \left[\frac{g_k(x)}{\epsilon_e} \right]^2 - 3 \left[\frac{g_k(x)}{\epsilon_e} \right] + 3 \right\} \cdot g_k(x) > \epsilon_e \tag{10}$$

กำหนดให้ r_p เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เริ่มต้นด้วยค่าน้อย ๆ และเพิ่มขึ้นทุกลำดับการทำซ้ำโดยใช้ค่าตัวคูณ γ ($\gamma > 1$) r_p' เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เริ่มต้นด้วยค่ามาก ๆ และลดลงทุกลำดับการทำซ้ำโดยใช้ค่าตัวคูณ γ' ($\gamma' < 1$) และกำหนดให้ ϵ_e เป็นค่าลบค่าน้อย ๆ

2.2 วิธีสโตชาสติก (เจนนิตติกอัลกอริธึม)

เจนนิตติกอัลกอริธึมมีพื้นฐานอยู่บนการเลือกแบบธรรมชาติของพันธุกรรม [4-5] วิธีการนี้จะใช้หลักการทางธรรมชาติที่ว่าสิ่งมีชีวิตที่สามารถมีชีวิตต่อไปได้จะต้องเป็นสิ่งมีชีวิตที่แข็งแรงที่สุดในกลุ่ม โดยการพิจารณาจากโครโมโซม (chromosome) และยีน (gene) ในแต่ละรุ่น (generation) ซึ่งมีขั้นตอนพื้นฐานในการให้กำเนิดประชากรรุ่นต่อไปแสดงดังรูปที่ 1 เจนนิตติกอัลกอริธึมจะมีการทำงานประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ การผลิตประชากรรุ่นต่อไป (reproduction) การข้ามฟาก (crossover) การสลับตำแหน่งหรือการเปลี่ยนแปลงค่า (mutation)



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงานของเจนนิตติกอัลกอริธึม

การผลิตประชากรรุ่นต่อไปเป็นกระบวนการที่ผลิตโครโมโซมรุ่นต่อไปโดยการคัดลอกโครโมโซมตามค่าความเหมาะสม (fitness value) โดยที่โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมสูงจะมีโอกาสที่จะให้กำเนิดประชากรในรุ่นต่อไปได้มากกว่า ซึ่งการกระทำแบบนี้จะสอดคล้องตามหลักธรรมชาติ การข้ามฟากเป็นกระบวนการเปลี่ยนยีนระหว่างโครโมโซม 2 ตัว เพื่อให้ได้ยีนซึ่งโครโมโซมใหม่ที่มีคุณลักษณะแตกต่างไปจากโครโมโซมของพ่อแม่ทั้งสอง การข้ามฟากนั้นประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ จับคู่ยีนโครโมโซมที่จะทำการข้ามฟากโดยการสุ่มจาก mating spool และการเลือกตำแหน่งที่จะทำการข้ามฟากโดยวิธีการสุ่ม ระยะเวลา 1 ถึงความยาวโครโมโซม 1 ด้วยยีนซึ่งมีโครโมโซมที่ต้องการดัดแปลงค่าไป

โครโมโซมที่ 1	0 1 1 0	1 1 0
โครโมโซมที่ 2	0 1 0 1	0 1 1

ถ้าทำการกระโดดข้ามตั้งแต่ยีนที่ 5 เป็นต้นไป จะได้โครโมโซมออกมาใหม่ 1 คู่มีค่าเป็น

โครโมโซมที่ 1	0 1 1 0	0 1 1
โครโมโซมที่ 2	0 1 0 1	1 1 0

ทุกการสร้างโครโมโซมคู่ใหม่ไม่จำเป็นจะต้องมีการกระโดดทุกครั้ง แต่ขึ้นอยู่กับความเป็นไปได้ และค่าบิตที่จะเริ่มต้นในการกระโดดข้ามหาได้จากกรุป การสลับตำแหน่งหรือเปลี่ยนแปลงค่า ถึงแม้ว่าในการผลิตโครโมโซมรุ่นต่อไปและการข้ามเฟลทั้น จะมีแนวโน้มที่จะได้โครโมโซมรุ่นต่อไปที่มีคุณลักษณะที่ดีขึ้น แต่ในบางครั้งผลลัพธ์ที่ได้อาจทำให้แนวโน้มที่ดีขึ้นสูญเสียไป จึงต้องมีการสลับตำแหน่งหรือเปลี่ยนแปลงค่าเพื่อป้องกันการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น ถ้ามีโครโมโซมมีค่าเป็น

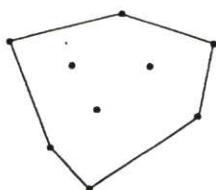
0	1	1	0	0	1	0
---	---	---	---	---	---	---

ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงที่จุดสุดท้ายจะได้โครโมโซมใหม่เป็น

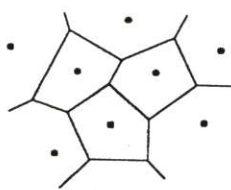
0	1	1	0	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---

2.3 การสร้างโครงตาข่ายอิลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ

กำหนดให้ S คือเซตของจุดในเนื้อที่บนมิติใดๆ [6-7] "Convex Hull" ของเซต S หรือ CH(S) คือ Convex Polygon ของพื้นที่ที่เล็กที่สุดซึ่งได้บรรจุจุดทุกจุดของเซต S ไว้ภายในเมื่อกำหนดเป็น 2 มิติ ดังรูปที่ 2

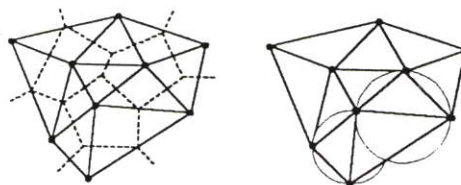


รูปที่ 2 Convex Hull



รูปที่ 3 Voronoi Diagram

กำหนด "ขอบเริ่มต้น" ระหว่างจุด 2 จุดซึ่งอยู่ใกล้กันมากที่สุดและเริ่มทำการหาจุดที่สาม เพื่อนำมาประกอบกันให้เป็นรูปสามเหลี่ยมที่สมบูรณ์แบบมากที่สุดตรงตามคุณสมบัติของ Delaunay จากนั้นเมื่อพบจุดที่เหมาะสมแล้วก็จะเชื่อมต่อกับจุดใหม่กับจุดเดิมทั้ง 2 จุดของขอบเริ่มต้น จึงทำให้เกิดขอบเริ่มต้นใหม่ 2 ขอบทดแทนขอบเริ่มต้นอันเก่าเพื่อใช้เป็นขอบเขตเริ่มต้นในการค้นหาจุดใหม่ที่เหมาะสมต่อไป รอบการทำงานจะกระทำซ้ำๆ เช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ เพื่อขยายอาณาเขตของโครงข่ายสามเหลี่ยมออกไปจนกระทั่งเต็มพื้นที่ที่ CH(S) ของจุดทั้งหมด



(ก) (ข)

รูปที่ 4 Delaunay Triangulation

2.4 การคำนวณโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับหาค่าตอบของสมการอนุพันธ์โดยเริ่มต้นจากการกำหนดขอบเขตที่ต้องการพิจารณา จากนั้นทำการแบ่งขอบเขตนั้นออกเป็นช่วงย่อย ๆ เรียกว่าอิลิเมนต์ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมประกอบด้วย 3 โหนด อิลิเมนต์ลักษณะนี้นิยมใช้กันมากเพราะสามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุกรูปทรง โดยทั่วไปแล้ววิธีไฟไนต์อิลิเมนต์สามารถแสดงในรูปสมการดังนี้ [3]

$$[K] \{A\} = \{R\} \tag{11}$$

$[K]$ เป็นเมตริกซ์ $n \times n$ ของฟังก์ชันรูปร่าง (shape function) ซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับจำนวนโหนดทั้งหมด (n) ภายในขอบเขตพิจารณา $\{A\}$ เป็นค่าศักย์เวกเตอร์ (vector potential) และ $\{R\}$ เป็นเวกเตอร์ฟังก์ชันกระตุ้นที่กำหนด จากนั้นทำการแก้สมการเชิงเส้นในสมการที่ (11) แล้วนำค่า $\{A\}$ ที่ได้มาคำนวณค่าต่าง ๆ เช่น ค่าสนามแม่เหล็ก สมการของสนามแม่เหล็กแบบสแตติก 2 มิติ สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการ Poisson 2 มิติได้ดังนี้

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = \mu_0 J_z \tag{12}$$

เมื่อ J เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า μ_r เป็นค่าซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของตัวกลาง

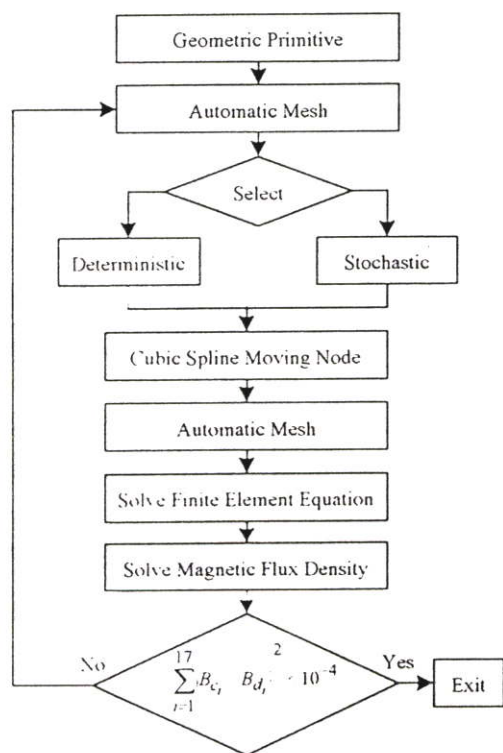
2.5 ทฤษฎีคิวบิกสโพล์

สโพล์เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ในการหาฟังก์ชันความสัมพัทธ์ของแนวเส้นโค้งผ่านจุดของจุดข้อมูลที่กำหนด [8] บทความนี้นำเสนอหลักการของคิวบิกสโพล์มาปรับแต่งแนวทั่วไปให้มีรูปร่างโค้งมนตามการเคลื่อนที่โหนดสามารถนิยามในรูปสมการได้ดังสมการที่ (8)

$$f(x) = \frac{f''_i(x_{i-1})}{6(x_i - x_{i-1})} (x_i - x)^3 + \frac{f''_i(x_i)}{6(x_i - x_{i-1})} (x - x_{i-1})^3 + \left[\frac{f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} - \frac{f''(x_{i-1})(x_i - x_{i-1})}{6} \right] (x_i - x) + \left[\frac{f(x_i)}{x_i - x_{i-1}} - \frac{f''(x_i)(x_i - x_{i-1})}{6} \right] (x - x_{i-1}) \quad (8)$$

$$(x_i - x_{i-1}) f''(x_{i-1}) + 2(x_{i+1} - x_{i-1}) f''(x_i) + (x_{i+1} - x_i) f''(x_{i+1}) = \frac{6}{x_{i+1} - x_i} [f(x_{i+1}) - f(x_i)] + \frac{6}{x_i - x_{i-1}} [f(x_{i-1}) - f(x_i)] \quad (9)$$

สมการ (8) เป็นสมการที่ใช้หาฟังก์ชันความสัมพัทธ์ของแนวเส้นโค้งมนในแต่ละช่วงของคิวบิกสโพล์ สมการที่ (9) เป็น second derivative นำมาแทนในสมการที่ (8)



รูปที่ 5 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

รูปที่ 5 แสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ขั้นตอน Geometric Primitive เป็นการกำหนดขอบเขตของต้นแบบ กำหนดคุณสมบัติของตัวกลางต่างๆ ขั้นตอน Automatic Mesh เป็นการสร้างโครงตาข่ายอิเลิเมนต์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ ขั้นตอน Select เป็นการเลือกที่จะใช้วิธีการแก้ที่เหมาะสมแบบใดคือวิธีมิตติคหรือวิธีลาซาลิก ขั้นตอน Cubic Spline Moving Node เป็นการเคลื่อนที่โหนดทำให้มีลักษณะที่โค้งมน ขั้นตอน Solve Finite Element Equation เป็นการสร้างเมตริกซ์ตามสมการที่ 11 ขั้นตอน Solve Magnetic Flux Density เป็นการคำนวณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและขั้นตอนสุดท้ายเป็นการตรวจสอบค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศว่ายอมรับได้หรือไม่ ถ้าได้จบกระบวนการออกแบบ ถ้ายอมรับไม่ได้กลับไปกระบวนการ Select ใหม่ กระบวนการจะทำซ้ำจนกว่าจะได้ค่าตอบที่ยอมรับได้หรือครบจำนวนรอบการทำงานแล้วจึงออกจากโปรแกรม

3. ผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบวิธีมิตติคและวิธีลาซาลิกในการหารูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กของขดแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B มีค่าเท่ากับตามที่ต้องการ ในบริเวณช่องอากาศ D ที่พิจารณา รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างต้นแบบขดแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิจารณา ในการออกแบบสามารถพิจารณาเพียงส่วนหนึ่ง ส่วนสี่ของโครงสร้างโดยอาศัยคุณสมบัติแกนสมมาตรแสดงได้ดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าขอบเขตที่พิจารณาประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ แกนเหล็ก Ω_F ขดลวด Ω_C อากาศ Ω_A และช่องอากาศบริเวณขั้วแม่เหล็กที่พิจารณา D Γ₀ เป็นเงื่อนไขดิริชเลท Γ₁ เป็นเงื่อนไขนิวแมน μ_F เป็นค่าซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็ก μ_C เป็นค่าซึมซาบแม่เหล็กของขดลวด และ μ_A เป็นค่าซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ ในการออกแบบกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า J = 3,3445 A/mm² μ_C = μ_A = μ₀ μ_F = 1000μ₀ และกำหนดขอบเขตที่พิจารณา Ω = (0, a) × (0, b) = (0, 0.12) × (0, 0.10) mm² ผลการทดสอบได้จากการพัฒนาโปรแกรมการออกแบบโดย Microsoft Visual Basic 6.0 กราฟวิเคราะห์ปัญหาของการออกแบบคือการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของแนวขั้วแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B_C ในอิเลิเมนต์ต่าง ๆ บริเวณช่องอากาศ D (17 อิเลิเมนต์) ให้มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B_D ตามความต้องการที่จะออกแบบ ซึ่งการแก้ปัญหาในลักษณะนี้สามารถกระทำได้โดยการจัดให้อยู่ในรูปสมการการหาค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชันหลักดังนี้

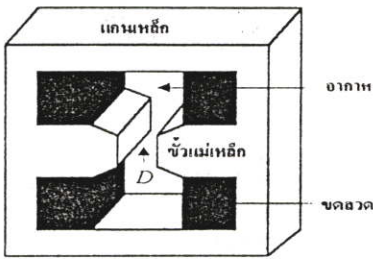
$$\text{Min } F [\{ p_x, p_y \}, A(\{ p_x, p_y \})] = \sum_{i=1}^{17} | B_{C_i} - B_{D_i} |^2 \quad (10)$$

โดยมีเงื่อนไขของขอบเขต (j = 1, ..., 6)

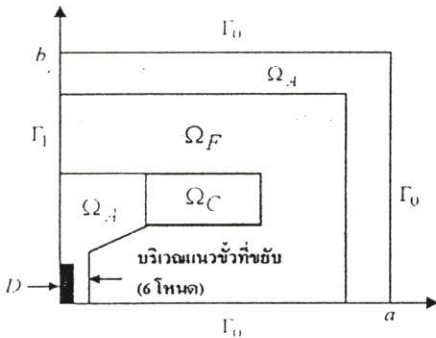
$$g_{v_j}(\{p_x\}) = \frac{p_{x_j}^2 - p_{x_j} (p_{x_j}^L - p_{x_j}^R) + p_{x_j}^L p_{x_j}^R}{(p_{x_j}^R - p_{x_j}^L)^2} \leq 0 \quad (11)$$

เมื่อ $p_{x_j}^L$ และ $p_{x_j}^R$ เป็นขอบเขตแนวแกน x ทางด้านซ้ายและทางด้านขวาตามลำดับ และตำแหน่งแนวแกน x กำหนดให้มีค่าดังนี้

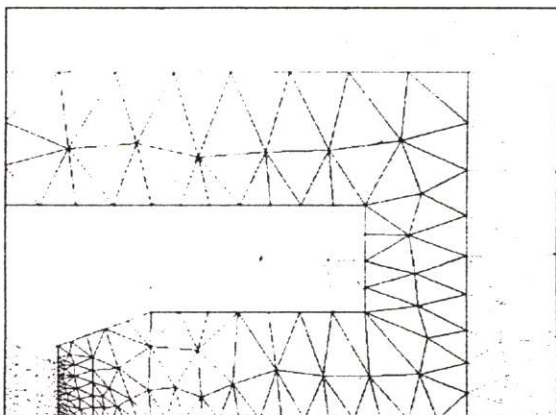
$$0.105 \leq p_{x_j} \leq 0.175 \text{ cm} \quad (12)$$



รูปที่ 6 โครงสร้างคานขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 7 ขอบเขตของคานแบบ 2 มิติในเขตหนึ่งส่วนสี่



รูปที่ 8 โครงสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้มาจากการสร้างโครงสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดโดยอัตโนมัติ

โครงสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดของต้นแบบที่ได้จากโปรแกรมการสร้างโครงสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดโดยอัตโนมัติแสดงดังรูปที่ 8 จากผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าทั้ง 2 วิธีสามารถทำให้ได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B_c มีค่าใกล้เคียงกันในบริเวณช่องอากาศ D ที่พิจารณาที่ B_d ค่าต่าง ๆ ตามต้องการ และจากรูปที่ 9 ถึง 11 จะพบว่าการใช้วิธีโทคนดเคลื่อนที่แบบควิกพิกสโพลาร์ร่วมกับวิธีการสร้างโครงสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดโดยอัตโนมัติทำให้ได้รูปร่างที่เหมาะสมของขั้วแม่เหล็กที่มีลักษณะแนวขั้วที่โค้งมน เมื่อพิจารณาถึงผลของค่าฟังก์ชันเป้าหมาย จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเป้าหมายของการออกแบบทั้ง 2 วิธี จะพบว่าการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีสโตชาสติกจะได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าวิธีดิเทอร์มินิสติก

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบค่า B_c ในช่องอากาศ D ที่ B_d ค่าต่างๆ

No.	ค่า B_c ในช่องว่างอากาศ D ที่ได้จากการออกแบบ (T)						
	ค่าเริ่มต้น	$B_d = 0.31 \text{ T}$		$B_d = 0.32 \text{ T}$		$B_d = 0.36 \text{ T}$	
		*Gen	**Der	*Gen	**Der	*Gen	**Der
1	0.4055	0.3098	0.3122	0.3237	0.3216	0.3628	0.3627
2	0.4001	0.3130	0.3154	0.3221	0.3241	0.3643	0.3656
3	0.4063	0.3094	0.3117	0.3241	0.3212	0.3626	0.3623
4	0.3966	0.3129	0.3146	0.3215	0.3231	0.3622	0.3640
5	0.4050	0.3100	0.3125	0.3234	0.3218	0.3629	0.3629
6	0.3956	0.3144	0.3158	0.3218	0.3243	0.3632	0.3657
7	0.4058	0.3097	0.3122	0.3236	0.3216	0.3629	0.3627
8	0.3920	0.3136	0.3145	0.3206	0.3227	0.3605	0.3632
9	0.4040	0.3105	0.3130	0.3230	0.3222	0.3631	0.3634
10	0.3861	0.3145	0.3142	0.3196	0.3220	0.3581	0.3619
11	0.4047	0.3105	0.3132	0.3229	0.3224	0.3635	0.3637
12	0.3919	0.3159	0.3163	0.3218	0.3245	0.3623	0.366
13	0.4024	0.3112	0.3136	0.3226	0.3227	0.3632	0.3638
14	0.3903	0.3160	0.3161	0.3215	0.3242	0.3615	0.3654
15	0.4030	0.3115	0.3143	0.3224	0.3233	0.3641	0.3646
16	0.3863	0.3134	0.3134	0.3191	0.3212	0.3574	0.3607
17	0.4000	0.3121	0.3142	0.3221	0.3230	0.3629	0.3641

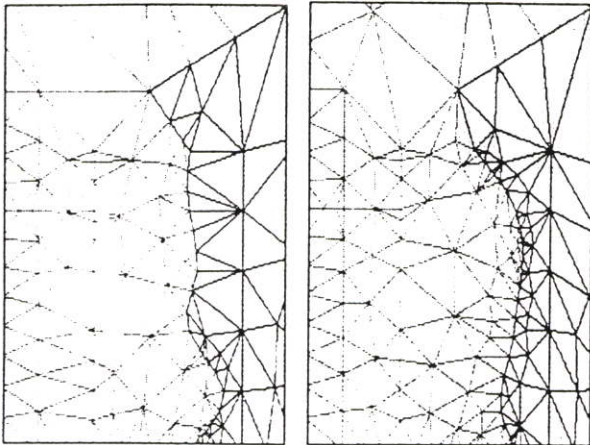
No. หมายถึงอิลิเมนต์ลี้เคบซี่

*Gen หมายถึงวิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติก

**Der หมายถึงวิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอร์มินิสติก

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเป้าหมายของการออกแบบทั้ง 2 วิธี

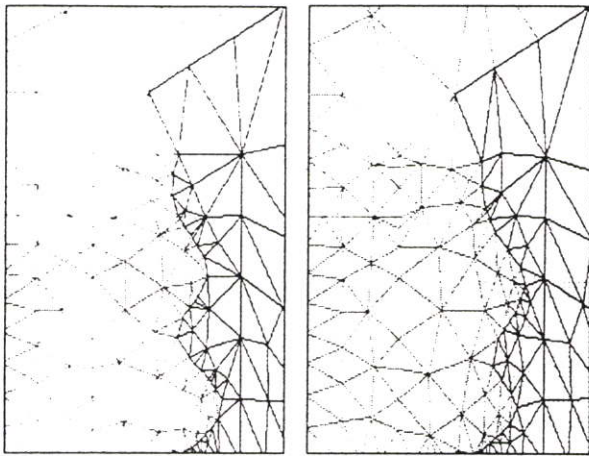
B_d (T)	Objective function	
	Stochastic	Deterministic
0.31	0.0001643	0.0003033
0.32	0.0001086	0.0001489
0.35	0.0000724	0.0001341
0.36	0.0001439	0.0002724



ดิวเทอมินิตติก

สโตซาทติก

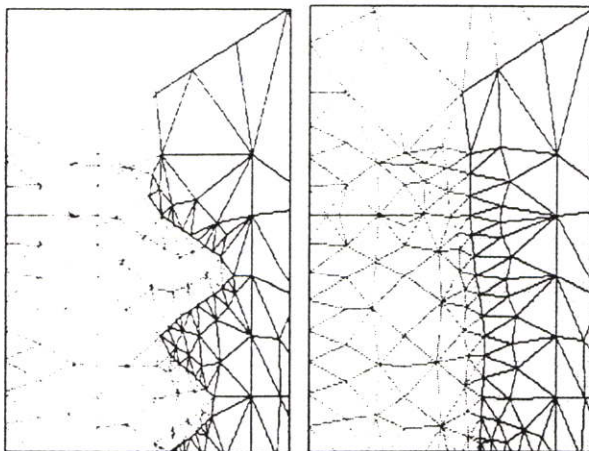
รูปที่ 9 รูปขยขยแนวข้วเม่เหล็กและ โครงสร้างอิลิมนท์ที่ $B_d = 0.31 T$



ดิวเทอมินิตติก

สโตซาทติก

รูปที่ 10 รูปขยขยแนวข้วเม่เหล็กและ โครงสร้างอิลิมนท์ที่ $B_d = 0.32 T$



ดิวเทอมินิตติก

สโตซาทติก

รูปที่ 11 รูปขยขยแนวข้วเม่เหล็กและ โครงสร้างอิลิมนท์ที่ $B_d = 0.36 T$

4. บทสรุป

จากผลกรออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของข้วเม่เหล็กของชุดเม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วิธีดิวเทอมินิตติกและสโตซาทติกร่วมกับวิธีโหนดเคลื่อนที่แบบควิกวิคไฟลน์ และโปรแกรมการสร้างโครงตาข่ายอิลิมนท์ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ จะเห็นได้ว่าทั้ง 2 วิธีนี้สามารถทำให้ได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงเม่เหล็ก B_c มีค่าใกล้เคียงกันในบริเวณช่องอากาศ D ที่พิจารณาที่ B_d ค่าต่าง ๆ ตามต้องการ และได้รูปร่างที่เหมาะสมของข้วเม่เหล็กที่มีลักษณะแนวข้วโค้งมน จะเห็นได้ว่ากรหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีสโตซาทติกจะได้ค่าผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าวิธีดิวเทอมินิตติก

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Chat-uthai, J.A. Ramirez, and E.M. Freeman, "Comparison of Deterministic methods for the Shape Optimisation of Electromagnetic Devices", Congressional Brazilian in Eletromagnetics, Cbmag'95, Florianopolis, Brazil, May 1995, pp.72-75
- [2] C. Chat-uthai, J.A. Ramirez, and E.M. Freeman, "An Improved Constrained Quasi Newton Method fo the Solution of Inverse Electromagnetic Problems" IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 3, May 1996, pp.1318-1321.
- [3] ต่อพงษ์ ขวงพานิช, "การออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของอุปกรณ์สนามแม่เหล็กโดยวิธีการโหนดเคลื่อนที่" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2543
- [4] อุกฤษณ์ มารังค์ และ ชม กิ่งปาน "การรู้จำตัวเลขโดยใช้พีชชีง์ไอเมทริกและเจนเนติกอัลกอริทึม" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 กรุงเทพมหานคร 2541 หน้า 569-571
- [5] ชวิช เกิดชื่น ธนชาติ นุ่นนนท์ และ กิตติพงษ์ ตันมิตร "การแก้ปัญหาการจ่ายไหลอย่างประหยัดใช้วิธีเอนิตติก" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 กรุงเทพมหานคร 2540 หน้า 38-43
- [6] สุกฤษณ์ สุ่มมาตย์ และ กิตติ ไพฑูรย์วัฒน์กิจ "การจำลองภูมิประเทศแบบดิจิตอลโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยมแบบไม่เป็นระเบียบ" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 กรุงเทพมหานคร 2541 หน้า 573-576
- [7] <http://www.dinma.univ.trieste.it/~e7Eninfic/research/easymesh/using.html>
- [8] John H. Mathews, "Numerical Method for Mathematics Science, and Engineering " Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ Prentice Hall, c1992"

ประวัติผู้เขียน

นายวุฒิสักดิ์ หวังดี เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม 2518 จังหวัดปทุมธานี สำเร็จการศึกษา อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร มีผลงานวิจัยทางวิชาการทางด้านการวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์ทางด้านสนามแม่เหล็กโดยวิธี ฟิไนท์อีลิเมนต์และออฟทิโมเซชัน ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ และได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ผลงานวิจัยทางวิชาการขณะกำลังศึกษามีดังนี้

1. “ การพัฒนาวิธีโหนดเคลื่อนที่สำหรับการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 , 2544.
2. “ การเปรียบเทียบวิธีการคิเทอมินิสติกและสโตชาสติกสำหรับการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสม ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 , 2544.