

## สารบัญ

|                                                          | หน้า |
|----------------------------------------------------------|------|
| กิตติกรรมประกาศ                                          | ค    |
| บทคัดย่อภาษาไทย                                          | จ    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                                       | ฉ    |
| สารบัญ                                                   | ช    |
| สารบัญตาราง                                              | ณ    |
| สารบัญภาพ                                                | ญ    |
| บทที่ 1 บทนำ                                             | 1    |
| บทที่ 2 ทฤษฎี                                            | 3    |
| 2.1 สมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแม่เหล็กแบบอัลฟา | 5    |
| 2.2 การคำนวณ bunch length ของลำอิเล็กตรอน                | 12   |
| 2.3 แม่เหล็กแบบอัลฟา                                     | 17   |
| 2.4 การเลือกวัสดุมาทำแกนแม่เหล็ก                         | 20   |
| 2.4.1 การสูญเสียฮิสเตอร์เรซิส                            | 20   |
| 2.4.2 สนามแม่เหล็กตกค้าง                                 | 22   |
| บทที่ 3 การออกแบบแม่เหล็กแบบอัลฟา                        | 23   |
| 3.1 คุณสมบัติเฉพาะของแม่เหล็กแบบอัลฟา                    | 24   |
| 3.2 การปรับแต่งขั้วแม่เหล็ก                              | 25   |
| 3.2.1 ลักษณะของขั้วแม่เหล็ก                              | 25   |
| 3.2.2 การปรับแต่งขั้วแม่เหล็ก                            | 26   |
| 3.2.3 การใช้รูปหลายเหลี่ยมแทนเส้นโค้งไฮเปอร์โบลา         | 30   |
| 3.3 การแก้ไขสนามแม่เหล็กอิมดัว                           | 32   |
| 3.4 การออกแบบขดลวด                                       | 37   |
| 3.4.1 ลักษณะของขดลวดที่ใช้                               | 37   |
| 3.4.2 กระแสสูงสุดที่ป้อนให้กับขดลวด                      | 37   |
| 3.4.3 ความยาวของขดลวด                                    | 38   |

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 3.4.4 ความต้านทานของขดลวด                                | 38  |
| 3.4.5 อัตราการไหลของน้ำที่ต้องใช้ในการระบายความร้อน      | 39  |
| บทที่ 4 การสร้างแม่เหล็กแบบอัลฟา                         | 41  |
| 4.1 การสร้างขั้วแม่เหล็ก                                 | 41  |
| 4.2 การพันขดลวดของแม่เหล็กแบบอัลฟา                       | 48  |
| 4.3 การประกอบขดลวดเข้ากับขั้วแม่เหล็ก                    | 58  |
| บทที่ 5 การทดสอบแม่เหล็กแบบอัลฟา                         | 62  |
| 5.1 ความต้านทานของขดลวด                                  | 62  |
| 5.2 ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ                             | 64  |
| 5.3 เครื่องมือวัดค่าสนามแม่เหล็ก                         | 66  |
| 5.4 การติดตั้งอุปกรณ์ช่วยวัดค่าสนามแม่เหล็ก              | 67  |
| 5.5 ตำแหน่งของการวัดค่าสนามแม่เหล็กภายในแม่เหล็กแบบอัลฟา | 67  |
| 5.6 การวัดค่าสนามแม่เหล็กที่กระแสไฟฟ้าต่ำ                | 69  |
| 5.7 การวัดค่าสนามแม่เหล็ก                                | 71  |
| 5.8 การอิมตัวของสนามแม่เหล็ก                             | 76  |
| บทที่ 6 บทสรุป                                           | 78  |
| เอกสารอ้างอิง                                            | 79  |
| ภาคผนวก ก                                                | 80  |
| ภาคผนวก ข                                                | 83  |
| ภาคผนวก ค                                                | 89  |
| ภาคผนวก ง                                                | 110 |
| ภาคผนวก จ                                                | 112 |
| ประวัติผู้เขียน                                          | 114 |

## สารบัญตาราง

| ตาราง                                                         | หน้า |
|---------------------------------------------------------------|------|
| 3.1 แสดงคุณสมบัติของลวดทองแดงที่เลือกมาใช้                    | 37   |
| 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กที่นำมาสร้างขั้วแม่เหล็ก     | 41   |
| 5.1 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมของขดลวดทองแดง | 63   |
| 5.2 แสดงอัตราการไหลของน้ำที่ขาออกของขดลวดทองแดง               | 65   |
| 5.3 แสดงค่าเกรเดียนต์ที่ได้จากการวัดและการคำนวณ               | 76   |

สารบัญภาพ

| รูป                                                                                                                          | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 แสดงการกระจายของอิเล็กตรอนที่ผลิตออกมาจาก rf-gun                                                                         | 3    |
| 2.2 (ก) แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่างกัน<br>ในสนามแม่เหล็กคงที่                                             | 4    |
| (ข) แสดงชั่วแม่เหล็กที่ให้ค่าสนามแม่เหล็กคงที่                                                                               | 4    |
| 2.3 (ก) แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่างกัน<br>ภายในสนามของแม่เหล็กสี่ขั้ว                                     | 4    |
| (ข) แสดงชั่วแม่เหล็กที่ให้ค่าสนามแม่เหล็กเหมือนกับแม่เหล็กสี่ขั้ว                                                            | 4    |
| 2.4 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแม่เหล็กแบบอัลฟา                                                               | 11   |
| 2.5 แสดงส่วนประกอบหลักของ beam line                                                                                          | 12   |
| 2.6 แสดงการกระจายของพลังงานกับเวลาของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจาก<br>แม่เหล็กแบบอัลฟา                                     | 14   |
| 2.7 แสดงการกระจายของพลังงานกับเวลาของอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งสุดท้ายของ<br>beam line                                             | 15   |
| 2.8 แสดงการกระจายของพลังงานกับเวลาของอิเล็กตรอนที่ใช้ในการเคลื่อนที่<br>ใน beam line โดยที่เกรเดียนมีค่าเท่ากับ 397 Gauss/cm | 16   |
| 2.9 แสดงภาคตัดขวางของแม่เหล็กแบบอัลฟาที่ได้การหั่นส่วนของ<br>pole profile เพื่อใส่ขดลวด                                      | 17   |
| 2.10 เส้นทางที่ใช้อินทิเกรตของแม่เหล็กสี่ขั้วในพิกัด x,y                                                                     | 18   |
| 2.11 แสดงกราฟฮิสเตอร์เรซิส                                                                                                   | 21   |
| 2.12 แสดงกราฟฮิสเตอร์เรซิสของเหล็กอ่อนและเหล็กแข็ง                                                                           | 21   |
| 3.1 แสดงภาคตัดขวางของ pole face ของแม่เหล็กแบบอัลฟาในอุดมคติ                                                                 | 23   |
| 3.2 แสดงภาคตัดขวางของแม่เหล็กแบบอัลฟาอย่างง่าย                                                                               | 24   |
| 3.3 แสดงรูปวาดของแม่เหล็กแบบอัลฟาที่สร้างขึ้น                                                                                | 25   |
| 3.4 แสดง pole profile ของแม่เหล็กที่ป้อนให้กับโปรแกรม POISSON                                                                | 26   |
| 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเกรเดียนกับระยะทางในแนวแกน x                                                                   | 27   |

|      |                                                                                             |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.6  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง gradient error กับระยะทางในแนวแกน x                             | 27 |
| 3.7  | แสดงลักษณะของการ shimming ณ จุดสัมผัส                                                       | 28 |
| 3.8  | กราฟแสดงค่าเกรเดียนต์ ซึ่งทำการ shimming ที่จุดสัมผัส T ต่างๆกัน                            | 29 |
| 3.9  | กราฟแสดง gradient error ซึ่งทำการ shim ที่จุดสัมผัส T ต่างๆกัน                              | 29 |
| 3.10 | ลักษณะของ pole profile แบบไฮเปอร์โบล่าและ polygon                                           | 30 |
| 3.11 | แสดงการเปรียบเทียบค่าเกรเดียนต์ระหว่างกรณีของไฮเปอร์โบล่ากับ polygon                        | 31 |
| 3.12 | ตำแหน่งของจุดต่างๆของ pole face ที่ใช้ในการสร้างแม่เหล็ก                                    | 31 |
| 3.13 | กราฟของ permeability ของเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำและค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก                   | 32 |
| 3.14 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเกรเดียนต์กับกระแสไฟฟ้า (NI)                                      | 33 |
| 3.15 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า (NI)                                | 33 |
| 3.16 | แสดงบริเวณที่เพิ่มเนื้อเหล็กเข้าไปให้กับแม่เหล็ก                                            | 34 |
| 3.17 | แสดงลักษณะของ pole profile หลังจากเพิ่มเนื้อเหล็กเข้าไป                                     | 34 |
| 3.18 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเกรเดียนต์กับกระแสไฟฟ้า (NI) หลังจากเพิ่มเนื้อเหล็ก           | 35 |
| 3.19 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า (NI) หลังจากเพิ่มเนื้อเหล็ก | 36 |
| 3.20 | แสดงภาคตัดขวางของหลอดทองแดง                                                                 | 37 |
| 3.21 | แสดงภาพวาดของคอล์ยที่ทำการออกแบบสำหรับแม่เหล็กแบบอัลฟา                                      | 38 |
| 4.1  | แสดงแบบสำหรับการตัดที่ทำจากกระดาดแข็ง                                                       | 42 |
| 4.2  | แสดงการทำงานของชุด EYE TRASOR                                                               | 42 |
| 4.3  | แสดงการตัดเหล็กของชุดหัวตัดแก๊ส                                                             | 43 |
| 4.4  | แสดงชิ้นงานที่ได้จากการตัดด้วยชุด EYE TRASOR CUTTING M/C                                    | 43 |
| 4.5  | แสดงการเช็คขนาดของชิ้นงานที่ตัดแล้ว                                                         | 44 |
| 4.6  | แสดงการ machine ชิ้นงานในแนวแกน X = 0                                                       | 44 |
| 4.7  | แสดงการ machine ชิ้นงานในแนว Y = 0                                                          | 45 |
| 4.8  | แสดงการ machine และการเจาะรูชิ้นงานในแนวตั้ง                                                | 45 |
| 4.9  | แสดงการ machine ผิวข้างของชิ้นงาน                                                           | 46 |
| 4.10 | แสดงการ machine ผิวรอบนอกของชิ้นงาน                                                         | 46 |
| 4.11 | แสดงลักษณะของหัวแม่เหล็กที่ทำการ machine เสร็จเรียบร้อยแล้ว                                 | 47 |

|      |                                                                              |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.12 | แสดงการประกอบชิ้นส่วนของข้าวแม่เหล็ก                                         | 47 |
| 4.13 | แสดงโตะหมุนและวงจรควบคุมการหมุน                                              | 48 |
| 4.14 | แสดงการใช้กระดาษทรายขัดทำความสะอาดขดลวดทองแดง                                | 49 |
| 4.15 | แสดงการพันฉนวนรอบขดลวดทองแดง                                                 | 49 |
| 4.16 | แสดงลักษณะของขดลวดทองแดงที่ลาดเอียงตามความเอียงของลิ้ม                       | 50 |
| 4.17 | แสดงการบีบขดลวดและลิ้มไว้กับโตะก่อนเริ่มต้นการพัน                            | 50 |
| 4.18 | แสดงการบีบขดลวดไว้กับโตะ                                                     | 51 |
| 4.19 | แสดงขดลวดเมื่อพันชั้นแรกเสร็จแล้ว                                            | 52 |
| 4.20 | แสดงการสอดท่อทองแดงเข้าไประหว่างขดลวดทองแดง                                  | 52 |
| 4.21 | แสดงการเชื่อมขดลวดทองแดงเข้าด้วยกัน                                          | 53 |
| 4.22 | แสดงขดลวด 1 double pancake ที่ตัดปลายขดลวดแล้ว                               | 53 |
| 4.23 | แสดงขดลวด 1 double pancake                                                   | 54 |
| 4.24 | แสดงขดลวด 7 double pancake ( 70 รอบ )                                        | 54 |
| 4.25 | แสดงขดลวดที่ตัดปลายและเจาะรูเพื่อเตรียมใส่ขั้วต่อ                            | 55 |
| 4.26 | แสดงขดลวดที่ใส่ขั้วต่อเข้าไปที่ปลายขดลวด                                     | 55 |
| 4.27 | แสดงขดลวดที่พร้อมจะนำไปใช้งานจริง                                            | 56 |
| 4.28 | แสดงการทดสอบหารอยร้าวบริเวณขั้วต่อ                                           | 57 |
| 4.29 | แสดงแผ่นของข้าวแม่เหล็กที่ประกอบเข้าด้วยกัน                                  | 58 |
| 4.30 | แสดงการใส่ขดลวดเข้าไปในข้าวแม่เหล็ก                                          | 59 |
| 4.31 | แสดงการประกบข้าวแม่เหล็ก 2 อันเข้าด้วยกัน                                    | 59 |
| 4.32 | แสดงการประกอบ front plate เข้ากับข้าวแม่เหล็ก                                | 60 |
| 4.33 | แสดงการเชื่อมต่อขดลวด 2 ขดเข้าด้วยกัน                                        | 60 |
| 4.34 | แม่เหล็กแบบอัลฟาที่พร้อมจะใช้งาน                                             | 61 |
| 5.1  | แสดงวงจรไฟฟ้าสำหรับหาความต้านทานของขดลวดทองแดง                               | 62 |
| 5.2  | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์<br>ที่วัดได้จากขดลวดทองแดง | 63 |
| 5.3  | แสดงปั้มน้ำและระบบทำความเย็นของระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ                      | 64 |
| 5.4  | แสดงการต่อสายยางของระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเข้ากับคอยล์<br>ของแม่เหล็ก       | 65 |
| 5.5  | เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก                                                    | 66 |

|      |                                                                                                          |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.6  | แสดงอุปกรณ์ช่วยในการวัดค่าสนามแม่เหล็ก                                                                   | 67 |
| 5.7  | แสดงตำแหน่งของการวัดในแนวแกน x                                                                           | 68 |
| 5.8  | แสดงตำแหน่งการวัดค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน y                                                               | 68 |
| 5.9  | กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ตำแหน่ง $y=0$ ที่ได้จากการวัดโดยใช้กระแส 3 แอมแปร์ | 69 |
| 5.10 | กราฟแสดงค่าเกรเดียนในแนวแกน x ที่ตำแหน่ง $y=0$ โดยใช้กระแส 3 แอมแปร์                                     | 70 |
| 5.11 | กราฟแสดงค่า gradient error ในแนวแกน x ที่ตำแหน่ง $y=0$ โดยใช้กระแส 3 แอมแปร์                             | 71 |
| 5.12 | กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัดโดยใช้กระแส 12 แอมแปร์                 | 72 |
| 5.13 | กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัดโดยใช้กระแส 24 แอมแปร์                 | 72 |
| 5.14 | กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัดโดยใช้กระแส 48 แอมแปร์                 | 73 |
| 5.15 | กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัดโดยใช้กระแส 79.2 แอมแปร์               | 73 |
| 5.16 | กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัดโดยใช้กระแส 96 แอมแปร์                 | 74 |
| 5.17 | กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัดโดยใช้กระแส 120 แอมแปร์                | 74 |
| 5.18 | กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัดโดยใช้กระแส 150 แอมแปร์                | 75 |
| 5.19 | กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัดโดยใช้กระแส 168 แอมแปร์                | 75 |
| 5.20 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเกรเดียนต์ที่ได้จากการวัดและการคำนวณ                                 | 77 |