

การออกแบบและสร้างขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว สำหรับวงกักเก็บอิเล็กตรอนพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน - ประเทศไทย

Winding Design and Construction for a Sextupole Magnet of 1.2 GeV Storage Ring of the Synchrotron Light Source - Thailand

ศุภชัย ประวันตา¹, สราวุธ สุจิตจร¹, ศุภกร รักใหม่^{2,3}

Supachai Prawanta, Sarawut Sujitjorn, Supagorn Rugmai

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

โทร. 0-4421-7040 ต่อ 517 โทรสาร 0-4421-7047

E-mail supachai@nsrc.or.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอการออกแบบและสร้างขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว สำหรับวงกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนของประเทศไทย ที่มีชื่อเรียกว่าเครื่องกำเนิดแสงสยาม ได้ปรับปรุงเพิ่มพลังงานจาก 1.0 GeV เป็น 1.2 GeV เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตแสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอ็กซ์ โดยออกแบบให้สามารถรับพิกัดแรงเคลื่อนแม่เหล็กได้ 2,200 A.Turns และอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กไม่เกินค่าพิกัดที่ 60 °C ขดลวดแม่เหล็กได้รับการพันลงบนโครงสร้างแม่เหล็กหกขั้วเดิม การออกแบบได้อาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณโปรแกรม Accelerator Toolbox ใช้คำนวณพิกัดกระแสขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว ที่จะทำให้การกักเก็บอิเล็กตรอนเกิดความเสถียร โปรแกรม POISSON ใช้คำนวณสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ โปรแกรม RADIA ใช้คำนวณสนามแม่เหล็กแบบสามมิติ และโปรแกรม COSMOSWorksTM ใช้คำนวณอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็ก มีการเปรียบเทียบผลคำนวณกับผลทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วที่ออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ และการวัดสนามแม่เหล็กใช้ชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกนที่พัฒนาขึ้น ขดลวดแม่เหล็กที่สร้างขึ้นใหม่สามารถใช้งานได้ตามพิกัดที่ต้องการ

Abstract

This article presents the winding design and construction for a sextupole magnet of the synchrotron light source storage ring on Thailand (Siam Photon Source) upgraded from 1.0 GeV to 1.2 GeV to produce an x-ray emission. It is designed to absorb magnetomotive force of 2,200 ratings while maintaining the coil temperature below 60 °C. The design utilizes various software packages: Accelerator Toolbox was used for sextupole excitation current calculation, POISSON and

RADIA for 2D and 3D magnetic field calculations, and COSMOSWorksTM for coil temperature calculation. The calculated and measured results are compared. The magnetic field measurement was carried out by the automatic three-axis magnetic field measurement system developed in-house. The new winding functions well according to the required ratings

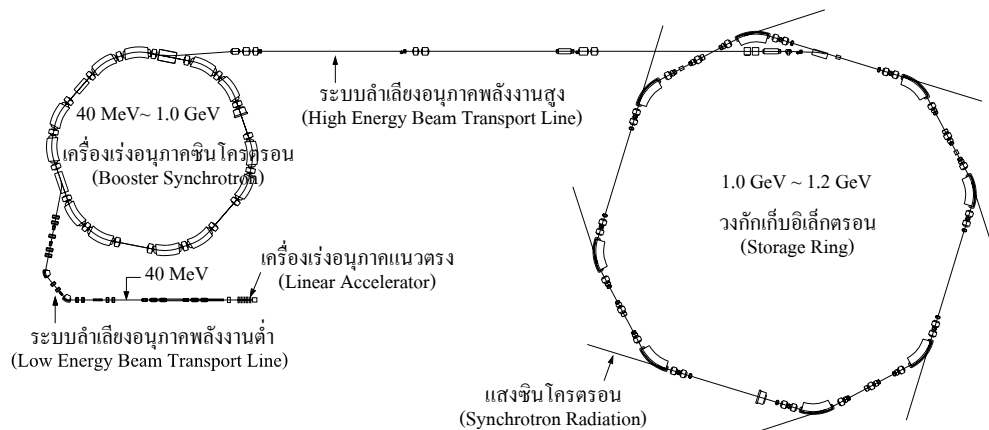
1. บทนำ

แสงซินโครตรอน คือ แสงที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นแสงที่มีคุณลักษณะพิเศษที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีความสว่างจ้ามาก ความเข้มแสงสูงและมีลำแสงที่คม มีสเปกตรัมต่อเนื่องโดยให้แสงที่มีความถี่ตั้งแต่ย่านรังสีอินฟราเรดจนถึงรังสีเอ็กซ์ ทำให้เป็นแหล่งกำเนิดแสงชนิดเดียวที่สามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นหรือพลังงานที่ต้องการใช้งานได้ แสงมีคุณสมบัติโพลาไรเซชัน และมีความเป็นพัลส์ที่สั้นมาก

เครื่องกำเนิดแสงสยามเป็นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเครื่องเดียวในประเทศไทย ตั้งอยู่ที่ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ (ภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) จังหวัดนครราชสีมา ผลิตแสงซินโครตรอนที่เป็นลำขนาดเล็กความเข้มสูงและมีช่วงพลังงานถึงระดับรังสีเอ็กซ์พลังงานสูง สำหรับงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์พื้นฐานและวิทยาศาสตร์ประยุกต์ เช่น ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา วัสดุ การแพทย์ และอุตสาหกรรม ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงทำหน้าที่ผลิตและเร่งอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าความถี่ 2,856 MHz จากโคลสตรอน (klystron) ในท่อเร่งอนุภาคแนวตรง 2 ท่อ ใต้ระดับพลังงานเป็น 40 MeV ส่งผ่านระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำเข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน ซึ่งจะเร่งอิเล็กตรอนอีกครั้งด้วยสนามไฟฟ้าความถี่ 118 MHz จากโพรงอาร์เอฟ

(RF cavity) ได้ระดับพลังงานเป็น 1.0 GeV และมีความเร็วใกล้เคียงความเร็วของแสง แล้วส่งผ่านระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูงเข้าสู่วงกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่เก็บอิเล็กตรอนไว้เพื่อผลิตแสงซินโครตรอน การเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ และอยู่ภายในท่อสุญญากาศระดับความดัน 10^{-10} Torr เมื่อลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร่งผ่านสนามแม่เหล็กเลี้ยวโค้ง อิเล็กตรอน

จะปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในแนวสัมผัสกับวงโคจร ที่เรียกว่าแสงซินโครตรอน ขณะที่อิเล็กตรอนสร้างแสงจะเกิดการสูญเสียพลังงานไปบางส่วน ซึ่งได้มีการชดเชยพลังงานให้อิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าความถี่ 118 MHz จากโพรงอาร์เอฟ เพื่อให้สามารถเก็บอิเล็กตรอนไว้สำหรับผลิตแสงซินโครตรอนได้เป็นระยะเวลา 6-10 ชั่วโมง โดยประมาณ แผนภาพเครื่องกำเนิดแสงสยามแสดงดังรูปที่ 1

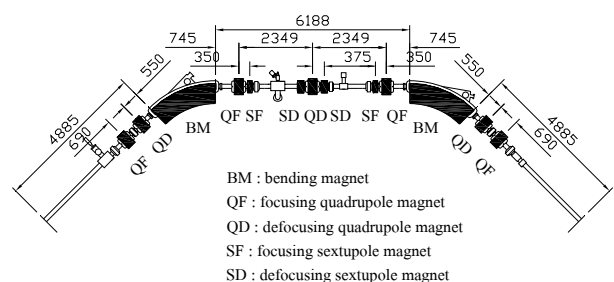


รูปที่ 1 แผนภาพเครื่องกำเนิดแสงสยาม

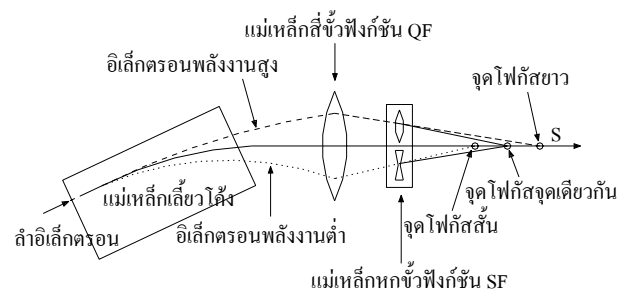
วงกักเก็บอิเล็กตรอนมีโครงสร้างของระบบแม่เหล็กเป็นแบบสมมาตรกัน 4 ชุด มีความยาวของเส้นรอบวงโคจรของลำอิเล็กตรอนเท่ากับ 81.3 เมตร แม่เหล็กแต่ละชุดประกอบด้วย แม่เหล็กเลี้ยวโค้ง (bending magnet, BM) 2 ตัว แม่เหล็กสี่ขั้ว (quadrupole magnet, QF และ QD) 7 ตัว และแม่เหล็กหกขั้ว (sextupole magnet, SF และ SD) 4 ตัว แผนภาพของโครงสร้างชุดแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2 การเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนตามเส้นรอบวงโคจร เมื่อผ่านแม่เหล็กเลี้ยวโค้งอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงจะเลี้ยวโค้งได้น้อยกว่าอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ และเมื่อผ่านแม่เหล็กสี่ขั้วซึ่งทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดจุดโฟกัสที่ตำแหน่งต่างกันหรือเกิดปรากฏการณ์ การเลือนของเลนส์ (chromatic aberration) ซึ่งมีผลต่อความเสถียรของลำอิเล็กตรอน โดยสามารถชดเชยการเลือนของเลนส์ได้ด้วยการใช้แม่เหล็กหกขั้ว ซึ่งแม่เหล็กหกขั้วจะช่วยโฟกัสอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงให้ระยะการโฟกัสสั้นลง และจะคลายโฟกัสอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำให้ระยะการโฟกัสยาวขึ้น เพื่อทำให้เกิดจุดโฟกัสที่ตำแหน่งเดียวกัน การชดเชยการเลือนของเลนส์ด้วยแม่เหล็กหกขั้ว สามารถอธิบายได้ดังแผนภาพรูปที่ 3

การปรับปรุงวงกักเก็บอิเล็กตรอนเพิ่มระดับพลังงานจาก 1.0 GeV เป็น 1.2 GeV เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตแสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอ็กซ์[1] แม่เหล็กหกขั้วซึ่งทำหน้าที่ชดเชยการเลือนของเลนส์เพื่อให้เกิดความเสถียรในการกักเก็บอิเล็กตรอน ได้รับการจ่ายแรงเคลื่อนแม่เหล็กสูงเกินค่าพิกัดที่ 1,320 A.Turns และอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กมีค่าสูงเกินค่าพิกัดที่ 60 °C ซึ่งเป็นอันตรายต่อการใช้งาน การแก้ปัญหาสามารถทำได้ด้วยการออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่โดยใช้โครงสร้าง

แม่เหล็กหกขั้วเดิม อาจดูได้จากรูปที่ 4 และ 10 การออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ต้องสามารถรับพิกัดแรงเคลื่อนแม่เหล็กได้ 2,200 A.Turns ขณะที่อุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กต้องไม่เกินค่าพิกัด 60 °C ขดลวดจะได้รับการพันลงบนโครงสร้างแม่เหล็กหกขั้วเดิม แล้วทำการทดสอบคุณสมบัติ



รูปที่ 2 แผนภาพโครงสร้างชุดแม่เหล็กของวงกักเก็บอิเล็กตรอน



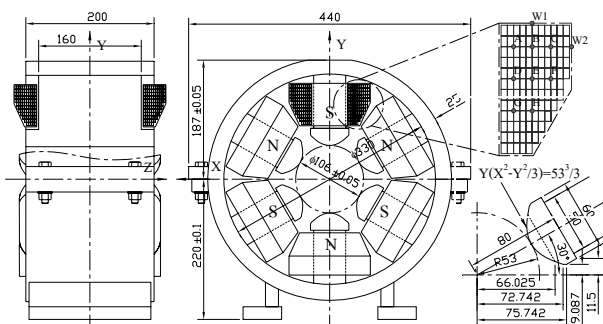
รูปที่ 3 แผนภาพการชดเชยการเลือนของเลนส์ด้วยแม่เหล็กหกขั้ว

โดยการวัดสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิของขดลวด แม่เหล็กหกขั้วที่ได้รับ การออกแบบขดลวดใหม่จะนำไปติดตั้งใช้งานในวงกักเก็บอิเล็กตรอน ร่วมกับแม่เหล็กหกขั้วตัวอื่นในฟังก์ชันเดียวกัน การออกแบบได้อาศัย โปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณ ได้แก่ โปรแกรม Accelerator Toolbox (version 1.2)[2] ใช้งานร่วมกับ MATLAB™ (version 7) ใช้คำนวณพิกัด กระแสขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว ที่จะทำการกักเก็บอิเล็กตรอนเกิดความ เสถียร โปรแกรม POISSON (version 7.16)[3] ใช้คำนวณสนามแม่เหล็ก แบบสองมิติ โปรแกรม RADIA (version 4.1)[4] ใช้งานร่วมกับ MATHEMATICA™ (version 5.1) ใช้คำนวณสนามแม่เหล็กแบบสามมิติ และโปรแกรม COSMOSWorks™ (version 2006)[5] ใช้งานร่วมกับ SolidWorks™ (version 2006) ใช้คำนวณอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็ก

2. การออกแบบและสร้างขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว

การออกแบบได้ดำเนินงานขึ้นแรกด้วยการสร้างแบบจำลอง วงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV เพื่อคำนวณค่ากระแสขดลวด แม่เหล็กหกขั้วที่ใช้สำหรับชดเชยการเลือนของเลนส์ เพื่อให้เกิดความ เสถียรในการกักเก็บอิเล็กตรอน โดยใช้โปรแกรม Accelerator Toolbox ซึ่งผลคำนวณให้ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กขนาด 2,200 A.Turns ที่มีความ เหมาะสมต่อการใช้งานในวงกักเก็บอิเล็กตรอน

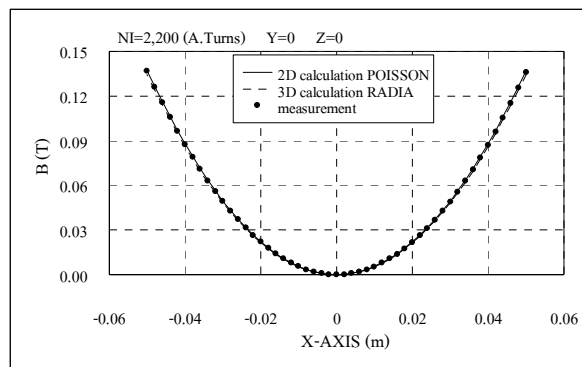
ขั้นตอนที่สองการคำนวณสนามแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม POISSON คำนวณค่าสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ และโปรแกรม RADIA คำนวณค่าสนามแม่เหล็กแบบสามมิติ โดยการคำนวณทั้งสองโปรแกรม ได้กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้ พิกัดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก 2,200 A.Turns ขนาดเส้นลวดที่ใช้พันขดลวดแม่เหล็ก $2.8 \times 5.0 \text{ mm}^2$ และจำนวนรอบการ พันขดลวดแม่เหล็ก 110 รอบ โดยแม่เหล็กหกขั้วที่พิจารณามีรูปทรงทาง เรขาคณิต แสดงได้ดังแผนภาพรูปที่ 4



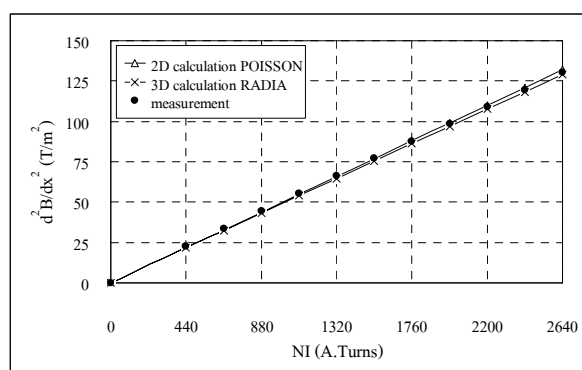
รูปที่ 4 แผนภาพแม่เหล็กหกขั้วที่ออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่

ผลที่ได้จากการคำนวณให้ความสัมพันธ์ระหว่างความ หนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density หรือ B) กับแกน X แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็ก (sextupole strength หรือ d^2B/dx^2) กับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก แสดงได้ดัง กราฟรูปที่ 6 และความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับ

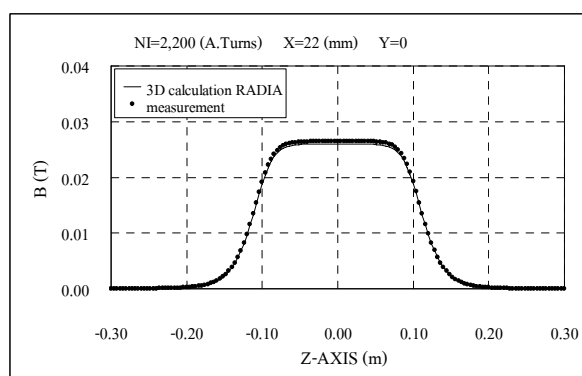
แกน Z แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 7 ซึ่งผลจากกราฟที่แสดงไว้ในรูปที่ 7 ใช้ คำนวณค่าความยาวสนามแม่เหล็ก (magnetic length) จะสังเกตเห็นได้ว่า โปรแกรมทั้งสองให้ผลลัพธ์ของการคำนวณที่ใกล้เคียงกัน จะมีแต่เพียง ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กดังกราฟในรูปที่ 7 เท่านั้น ที่โปรแกรม POISSON ไม่อาจคำนวณให้ได้ จึงมีผลคำนวณที่ได้จากโปรแกรม RADIA แสดงผลไว้เท่านั้น



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับแกน X



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก



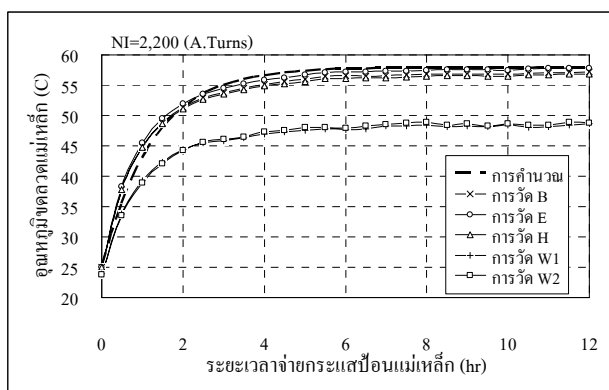
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับแกน Z

ขั้นตอนที่สามการคำนวณอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กเมื่อรับการจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็กเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณจะเป็นตัวชี้วัดว่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้กำหนดตั้งอธิบายไว้ในข้างต้นมีความเหมาะสมหรือไม่ โดยใช้โปรแกรม COSMOSWorks™ ผลที่ได้จากการคำนวณให้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 8 อาจสังเกตเห็นว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กเท่ากับ 58 °C มีค่าน้อยกว่าค่าที่กักอยู่ถึง 2 °C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่ได้กำหนดไว้ในข้างต้นมีความเหมาะสมต่อการออกแบบ และคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วที่ได้รับการออกแบบขดลวดใหม่ ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วที่ได้รับการออกแบบขดลวดใหม่

พิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก (A)	20
พิกัดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (A.Turns)	2,200
พิกัดความแรงสนามแม่เหล็ก (T/m^2)	109
จำนวนรอบการพันขดลวดต่อขั้ว (รอบ)	110
ความยาวสนามแม่เหล็ก (m)	0.230
ขนาดเส้นลวด (mm)	PEW 2.8x5.0
การระบายความร้อน	อากาศ
พิกัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็ก (°C)	60
วัสดุที่ใช้ทำแกนแม่เหล็ก	S10C

PEW : polyester enameled copper wire, S10C : JIS S10C carbon steel



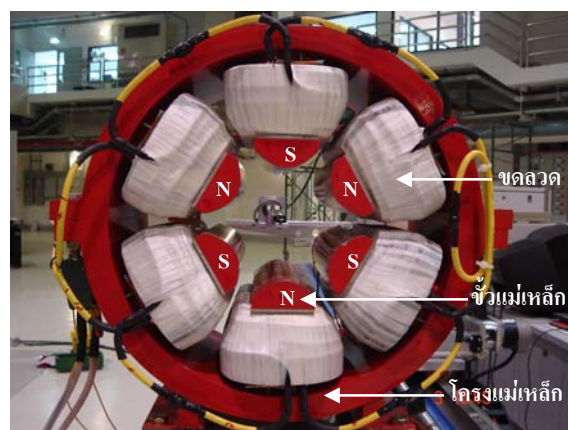
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับระยะเวลาจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก

การจัดสร้างขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่จำนวน 6 ชุด ผู้วิจัยได้ดำเนินการพันขดลวดแม่เหล็กและติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลไว้จำนวน 10 จุด โดยจุดติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 จุด W1 และ W2 เป็นการวัดอุณหภูมิที่ผิวนอกขดลวดแม่เหล็ก จุด A-H เป็นการวัดอุณหภูมิภายในขดลวดแม่เหล็กตามตำแหน่งต่าง ๆ

รูปที่ 9 แสดงการพันขดลวดแม่เหล็กและมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ และรูปที่ 10 แสดงการติดตั้งขดลวดแม่เหล็กใหม่เข้ากับ โครงสร้างแม่เหล็กหกขั้วเดิม สำหรับทำการทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้ว



รูปที่ 9 การพันขดลวดแม่เหล็กและการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

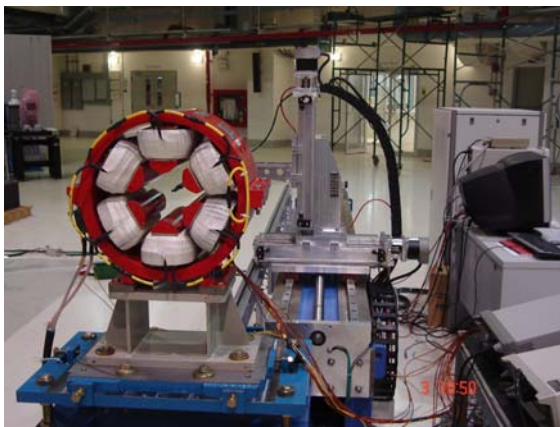


รูปที่ 10 การติดตั้งขดลวดใหม่เข้ากับโครงสร้างแม่เหล็กหกขั้วเดิม

3. การทดสอบแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กใหม่

การวัดสนามแม่เหล็ก[6] ได้ดำเนินการเริ่มต้นด้วยการวางแผนแม่เหล็กหกขั้วให้เข้ากับชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน ที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับใช้วัดสนามแม่เหล็ก โดยมีลักษณะของการวัดแกน X, Y และ Z เท่ากับ 0.24, 0.24 และ 2.80 เมตร ตามลำดับ และมีความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ทั้งสามแกนอยู่ในช่วง ± 0.03 มิลลิเมตร โดยการสร้างชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กดังกล่าว ได้ใช้เครื่องมือวัดระยะทางแบบสามมิติ FARO Laser Tracker Xi[7] ที่มีค่าความแม่นยำของการวัดระดับ 10 ไมโครเมตร ประกอบการสร้าง การวัดสนามแม่เหล็กใช้เครื่องมือวัดแบบฮอลล์โพรบ Group3 DTM-151 Digital Teslameter และใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบคงค่ากระแส

เป็นตัวจ่ายกระแสป้อนให้แม่เหล็กหกขั้ว ซึ่งแสดงการวัดสนามแม่เหล็กได้ดังรูปที่ 11 ผลที่ได้จากการวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้แสดงผลไว้ในกราฟรูปที่ 5 และ 7 ผลการวัดที่แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 7 ให้ค่าความยาวสนามแม่เหล็กเท่ากับ 230.6 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นว่าค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณ และค่าความแรงสนามแม่เหล็กได้แสดงผลไว้ในกราฟรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความแรงสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวัดมีค่าใกล้เคียงกันมากกับผลการคำนวณ โดยการคำนวณด้วยโปรแกรม POISSON ให้ค่าความแรงสนามแม่เหล็กมากกว่าการวัดประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ และการคำนวณด้วยโปรแกรม RADIA ให้ค่าความแรงสนามแม่เหล็กน้อยกว่าการวัดประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์



รูปที่ 11 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกนที่พัฒนาขึ้น

การวัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กโดยทำการจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็กที่ 20 A เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ภายในห้องที่มีอุณหภูมิ 24 °C โดยประมาณ และใช้เครื่องมือ Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit เป็นตัวอ่านค่าอุณหภูมิให้กับเซนเซอร์ ผลการวัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง จุดติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ W1, W2, C, A, F, H, B, D, G และ E มีค่าเท่ากับ 48.6, 48.7, 55.5, 56.4, 56.5, 56.8, 57.2, 57.4, 57.8 และ 57.9 °C ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงผลไว้ในกราฟรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 8 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่วัดได้ที่ผิวนอกของขดลวดแม่เหล็กต่ำกว่าที่ชั้นในสุดของขดลวดแม่เหล็กอยู่ถึง 10 °C โดยประมาณ ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กยังมีค่าน้อยกว่าค่าพิกัดการออกแบบอยู่ถึง 2 °C

4. สรุป

การออกแบบและสร้างขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณ และดำเนินการทดสอบคุณสมบัติของ

แม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กออกแบบใหม่ การดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสรุปผลได้ดังต่อไปนี้ การคำนวณสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม POISSON ให้ผลใกล้เคียงกับการวัดมากกว่าการคำนวณด้วยโปรแกรม RADIA แต่มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถคำนวณสนามแม่เหล็กแบบสามมิติได้ ซึ่งต้องอาศัยโปรแกรม RADIA ร่วมในการคำนวณในมิติที่สาม การคำนวณอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม COSMOSWorks™ ให้ผลใกล้เคียงกับการวัดมาก ซึ่งสามารถนำมาใช้ประมาณค่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กได้เป็นอย่างดี เมื่อนำแม่เหล็กหกขั้วที่ออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ติดตั้งใช้งานในวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยามร่วมกับแม่เหล็กหกขั้วในฟังก์ชันเดียวกัน ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกันได้เป็นอย่างดีเยี่ยม เมื่อพิจารณาถึงการใช้งานจริงของแม่เหล็กหกขั้ว ทำให้การออกแบบโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปมีความน่าเชื่อถือสูง

งานวิจัยที่จะเป็นประโยชน์ต่อการสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับบังคับลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง เช่น การสร้างแกนแม่เหล็กที่ใช้วัสดุเฉพาะทางวิศวกรรมและมีความละเอียดของการสร้างสูง การพันขดลวดแม่เหล็กโดยใช้เส้นลวดที่มีการหล่อเย็นทำให้สามารถรับกระแสป้อนแม่เหล็กได้สูง ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้จะช่วยให้ประโยชน์อย่างสูงในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

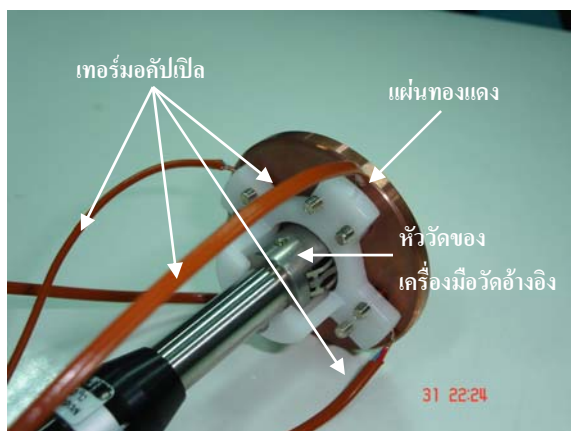
- [1] S. Rugmai, et al, "Energy Upgrade of the Siam Photon Source", AIP2007 Conference Proceedings, Vol. 879, January 2007, pp. 58-61.
- [2] A. Terebilo, "Accelerator Toolbox for MATLAB", Stanford Linear Accelerator Center, SLAC-PUB-8732, May 2001.
- [3] J. H. Billen, L. M. Young, "POISSON SUPERFISH", Los Alamos National Laboratory report LA-UR-96-1834, January 2004.
- [4] P. Elleaume, O. Chubar, J. Chavanne, "Computing 3D Magnetic Field from Insertion Devices", PAC97 Conference Proceedings, Vol.3 May 1997, pp.3509-3511.
- [5] SolidWorks™, "COSMOSWorks™ 2006".
- [6] T. Koseki, et al., "Quadrupole and Sextupole Magnet for the SUPER SOR Storage Ring", EPAC 2002 Conference Proceedings, June 2002, pp. 2355-2357.
- [7] FARO Technologies, "FARO laser tracker Xi".
- [8] H. Wiedemann, "Particle Accelerator Physics I", New York: Springer-Verlag 1993.

ภาคผนวก

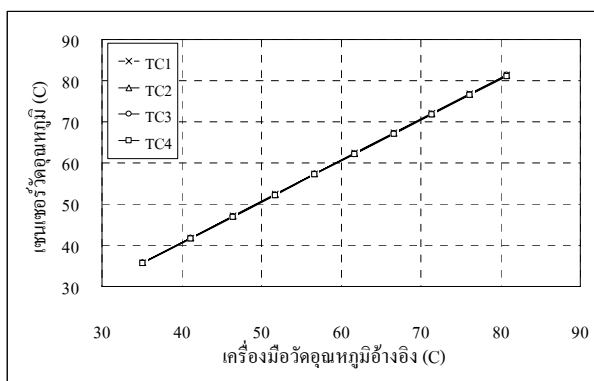
ก. การเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล

เซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่นำมาใช้งานวิจัยนี้เป็นแบบเทอร์มอคัปเปิลชนิด T ซึ่งการนำเซนเซอร์วัดอุณหภูมิมาใช้งานผู้วิจัยได้

คำนึงถึงความน่าเชื่อถือในการอ่านค่าอุณหภูมิที่แท้จริงของเซนเซอร์ จึงได้ทำการปรับเทียบกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิงที่มีความน่าเชื่อถือ ด้วยการนำเทอร์มอคัปเปิลมาทดสอบจำนวน 4 ชุด คือ TC1, TC2, TC3 และ TC4 จากที่ใช้งานจริงจำนวน 10 ชุด โดยติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลไว้กับแผ่นโลหะทองแดง และติดเครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิง ANRITSU HA-350K Digital Thermometer ที่ใช้ปรับเทียบไว้ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 12 และใช้เครื่องมืออ่านค่าอุณหภูมิให้กับเซนเซอร์ Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit แล้วนำชุดทดสอบเข้าตู้ให้ความร้อนเพื่อปรับค่าอุณหภูมิทดสอบจาก 30 ถึง 80 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการใช้งานจริง ผลการปรับเทียบแสดงไว้ดังกราฟในรูปที่ 13 ซึ่งจะเห็นถึงความเป็นเชิงเส้น และไม่ปรากฏฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 12 ชุดปรับเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิลกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิง

ข. ความสัมพันธ์ทางฟลักซ์ของแม่เหล็กหกซ์

แม่เหล็กหกซ์ประกอบไปด้วยขั้วเหนือสามขั้วและขั้วใต้สามขั้ว สร้างสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ และสมการของสนามแม่เหล็กสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1), (2) และ (3) และ

ความยาวสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นระยะที่สนามแม่เหล็กมีผลต่อการบังคับทิศทางของลำอิเล็กตรอน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4)[8]

$$B_x = g'xy \quad (1)$$

$$B_y = \frac{1}{2}g'(x^2 - y^2) \quad (2)$$

$$g' = \frac{\partial B_y}{\partial x^2} \quad (3)$$

โดยที่ B_x คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก แกน x (T)

B_y คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก แกน y (T)

g' คือ ความแรงสนามแม่เหล็ก (T/m²)

$$L_{eff} = \frac{\int Bdz}{B_0} \quad (4)$$

โดยที่ L_{eff} คือ ความยาวสนามแม่เหล็ก (m)

B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

B_0 คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ที่ตำแหน่ง $z=0$ (T)

dz คือ ระยะทางแกน z (m)