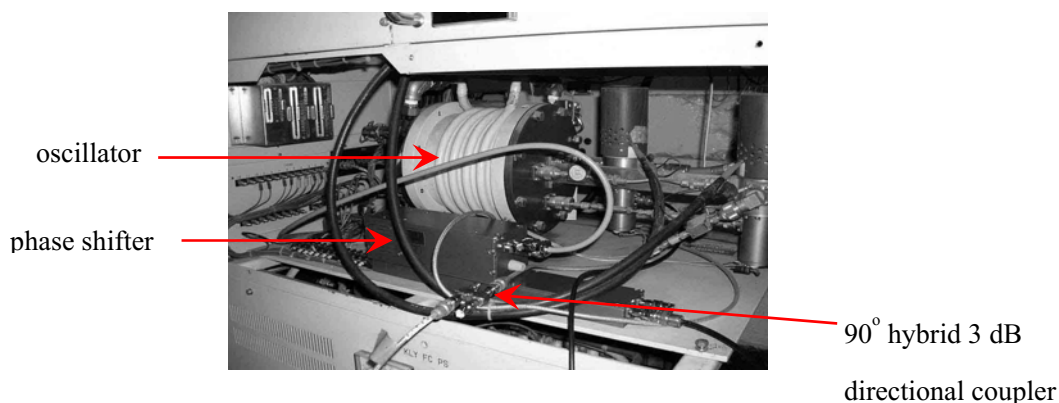




ภาพประกอบที่ 2.3.8 แสดง oscillator, 90° hybrid 3 dB directional coupler และ phase shifter ของระบบผลิตและแบ่งสัญญาณ RF

2.3.5 การประกอบ ติดตั้งและทดสอบ Cathode

คาโทดของปืนอิเล็กตรอนมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกกลมที่มีผิวหน้าเป็นวงกลมรัศมี 3 ซม. ทำจากทั้งสแตนที่มีผิวเรียบแล้วเคลือบด้วย $\text{BaO}_3\text{-Sr}_2\text{O}_3$ จะมีส่วนที่ปกคลุมส่วนของคาโทดคือ cathode holder เป็นทรงกระบอกกลวงทำมาจาก stainless steel ผิวเรียบ ใช้สำหรับจับยึดคาโทดกับผนังของปืนอิเล็กตรอน ส่วน filament connection เป็นลวดที่ยื่นออกมาจากคาโทดทำมาจากทองคำขาว (Platinum) และต่อไปยังสายไฟที่ต่อเข้ากับ AC power supply สำหรับใช้ heat คาโทด นอกจากนี้ยังมีชิ้นส่วนสำคัญชิ้นหนึ่งจะมีลักษณะเป็นฝาครอบคาโทดที่เรียกว่า cathode heat dam ภายในจะมีขดลวดสปริงซึ่งขดรอบคาโทด เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจากกระแสไฟฟ้าที่เราป้อนเข้าไป heat คาโทด รั่วออกไปยังผนังโดยรอบของปืนอิเล็กตรอนมากเกินไป ภาพประกอบที่ 2.3.9 (ก) แสดงภาพคาโทดและส่วนประกอบ

คาโทดจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนเมื่อได้รับความร้อนประมาณ 900-1000 องศาเซลเซียส จากการให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปสู่คาโทดผ่าน filament ของคาโทด จนกระทั่งอิเล็กตรอนมีพลังงานมากกว่าฟังก์ชันงาน (work function) ของสารที่ฉาบผิวคาโทด เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวคาโทดแล้วจะถูกเร่งให้หลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนโดยคลื่น RF จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากคาโทดและออกมาจากปืนอิเล็กตรอนจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เราป้อนให้กับ filament ของคาโทดและคลื่น RF ที่ป้อนเข้าสู่ปืนอิเล็กตรอน

ทุกครั้งที่ทำการประกอบและติดตั้ง Cathode อันใหม่ ต้องมีการ optimize จำนวนขดลวดที่ใช้พันรอบก้านคาโทด (ภายใน cathode heat dam) ครั้งล่าสุดได้ทำการประกอบชุดคาโทดเมื่อ เดือน กรกฎาคมพบว่าจำนวนขดลวดที่เหมาะสมคือ 19 รอบ หลังจากประกอบชุดคาโทดเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการติดตั้งคาโทดนี้ ณ บริเวณตรงกลางของผนังด้าน half-cell ของปืนอิเล็กตรอน เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อสนามของคลื่น RF ที่ส่งผ่านเข้าไปเร่งอิเล็กตรอน (ภาพประกอบที่ 2.3.9 (ก)) ข้อสำคัญ ในการประกอบชิ้นส่วนของคาโทด คือ ส่วนประกอบ เครื่องมือที่ใช้และขั้นตอน ต่าง ๆ ต้องสะอาด สำหรับงานสุญญากาศ

การที่จะทำให้คาโทดปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาได้ดีนั้น จะต้องทำการ process คาโทด ก่อนใช้งานจริง โดยหลังจากที่เราติดตั้งคาโทดในปืนอิเล็กตรอนแล้ว เราจะค่อยๆป้อนกระแสไฟฟ้า ให้แก่ filament ของคาโทดช้าๆ ในขณะที่มีสภาพสุญญากาศภายในปืนอิเล็กตรอนสูง นั่นคือมีความดัน (pressure) ต่ำกว่า 10^{-8} Torr จากนั้นจะทำการวัดอุณหภูมิของคาโทดโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า pyrometer โดยการเทียบสีของคาโทดที่ร้อนขึ้นกับอุณหภูมิที่ทำการเทียบวัดมาแล้วของ pyrometer เรียกวิธีการวัดแบบนี้ว่า pyrometric measurement คาโทดที่จะใช้งานได้ดีนั้นต้องสามารถทำให้ร้อน ได้จนมีอุณหภูมิมากกว่า 1050 องศาเซลเซียส โดยที่ไม่ใช้ กระแสไฟฟ้ามากเกินไป ผลจากการวัด อุณหภูมิของคาโทดที่เราติดตั้งใหม่นี้พบว่าคาโทดสามารถทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงประมาณ 1120 องศาเซลเซียส ได้ที่ power ประมาณ 24-25 W จึงถือว่าผ่านการทดสอบโดยวิธีนี้ ภาพประกอบที่ 2.3.9 แสดงผลการวัดอุณหภูมิของคาโทดที่ติดตั้งใหม่เทียบกับกำลังของไฟฟ้าที่ให้แก่คาโทด

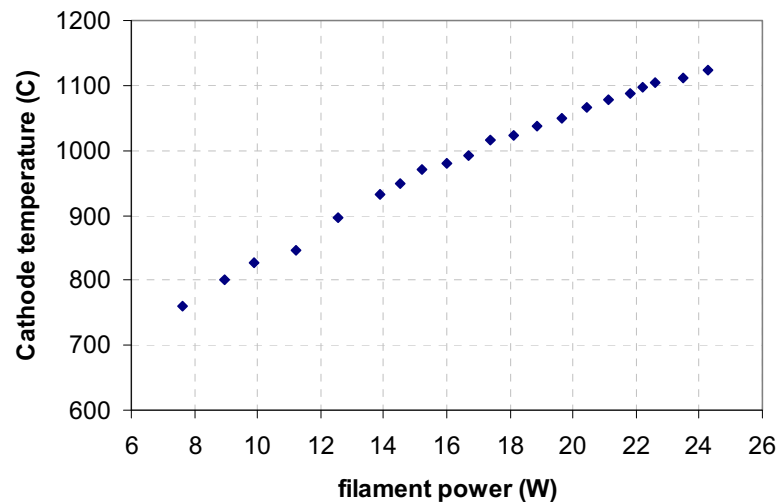


(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 2.3.9 แสดง (ก) ชุดคาโทด และ (ข) คาโทดที่ติดตั้งภายในปืนอิเล็กตรอนเรียบร้อยแล้ว



ภาพประกอบที่ 2.3.10 ผลการ process คาโทด เพื่อวัดอุณหภูมิของคาโทด (cathode temperature) ที่ติดตั้งเมื่อ เดือนกรกฎาคม 2548 เทียบกับกำลังไฟฟ้า (power) ที่ให้แก่คาโทด

2.3.6 การทำ RF-Processing สำหรับ RF-Gun และเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น

RF-processing สำหรับ RF-Gun ทำได้โดยการปรับ กำลังของ Incident RF ที่เข้าสู่ RF-gun ให้เพิ่มขึ้นทีละน้อย โดยที่ความดันภายใน RF-gun ยังคงน้อยกว่า 10^{-6} Torr ซึ่งการทำ RF-processing นี้ ต้องทำทุกครั้งที่มีการเปิดส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบให้สัมผัสกับอากาศ (ความชื้นในอากาศ) เช่นเดียวกับการทำ RF-Processing สำหรับ เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น เพียงแต่การทำ Processing ของ เครื่องเร่งอนุภาคจะใช้เวลานานกว่าเนื่องจากมีปริมาตรและพื้นที่ผิวของ cavity มากกว่า

2.3.7 การวัดพารามิเตอร์สำหรับการผลิตอิเล็กตรอนและของลำอิเล็กตรอนที่ผลิตได้

2.3.7.1 การวัด Incident RF Power และ Reflected RF power

Incident RF-Power แสดงถึง RF-power ที่ส่งออกจาก Klystron เพื่อไปสู่ระบบ ส่วน Reflected RF-power แสดงถึง RF-power สะท้อนกลับจากระบบ เพื่อให้การส่งผ่านพลังงานเป็นไป อย่างมีประสิทธิภาพ Reflected power ควรจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ Incident power ซึ่งการวัด

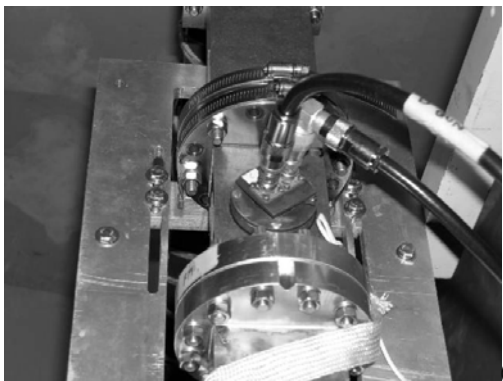
Incident RF-Power และ Reflected RF-power ทั้งของ RF-Gun และของ เครื่องเร่งอนุภาค จะต้องทำ ควบคู่ไปกับการทดสอบระบบโดยตลอด เพื่อทดสอบการส่งถ่ายพลังงานของระบบไปสู่อิเล็กตรอน

การวัด Incident และ Reflected RF-power จะวัดโดยอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่า crystal detector (HP 423B) โดยได้ทำการสอบเทียบ (calibrate) Crystal Detector ที่ความถี่ 2856 MHz ด้วย Network Analyzer เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง input RF-power และ output voltage ในระบบ waveguide คลื่น Incident และ Reflected RF ส่วนหนึ่ง (ซึ่งเป็นสัดส่วนที่น้อยมาก) จะถูกแบ่งโดย Directional Coupler (แผนผังระบบวัดแสดงในภาพประกอบที่ 2.3.7) ผ่าน RG222 coaxial cable และ RF attenuators สำหรับลดทอนกำลังของสัญญาณ เพื่อเข้าสู่ Crystal Detector ในภาพประกอบที่ 2.3.11 แสดง Directional Coupler ที่ติดตั้งในระบบ waveguide ของ RF-gun และของเครื่องเร่งอนุภาค จาก ค่า coupling coefficients ของ Direction Coupler, attenuation ของ cable และ attenuation ของ attenuators เมื่อวัดสัญญาณจาก Crystal Detector จะสามารถคำนวณหา RF-power ได้ ภาพประกอบที่ 2.3.11 แสดงสัญญาณ Incident และ Reflected RF power ของ RF-gun และ ของ เครื่องเร่งอนุภาค (linac)

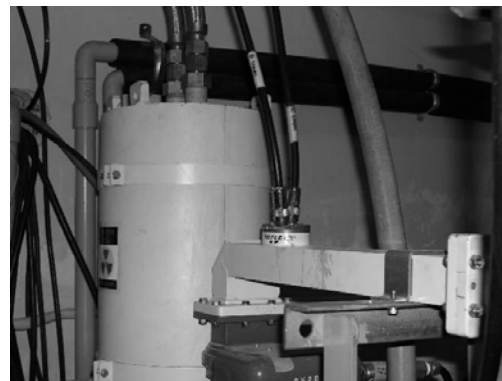
จากภาพประกอบที่ 2.3.12 พบว่า Incident RF-power signal ที่วัดได้โดยใช้ Crystal detector ของ RF-gun และของ linac มีค่าเท่ากับ 140mV และ 270 mV ตามลำดับ เมื่อใช้ค่า voltage output ที่วัดได้โดย ใช้ crystal detector มาใช้คำนวณหาค่า RF-power จากความสัมพันธ์

$$P = 10^{\text{attenuation(dB)}/10} P_{\text{crystal detector}} \quad (2.3.1)$$

พบว่าค่า Incident RF-power ที่ klystron ป้อนให้กับ RF-gun และ linac มีค่าประมาณ 3 และ 5 W ตามลำดับ ส่วนสัญญาณ Reflected RF-power ของ RF-gun นั้น แสดงให้เห็นถึงการ absorb พลังงานของคลื่น RF ของลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้เป็นพลังงานในการเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ออกจาก

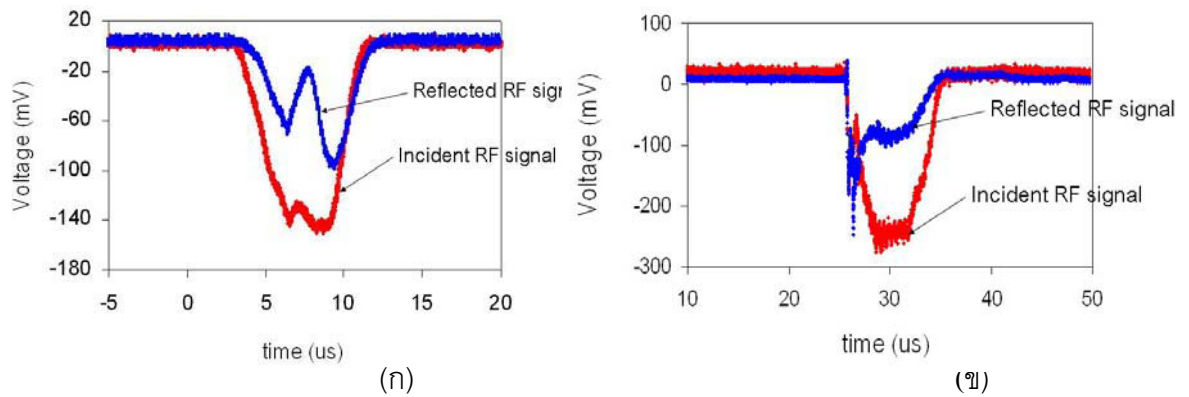


(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 2.3.11 Directional Coupler ในระบบท่อนำคลื่น ของ (ก) RF-gun และ (ข) Linac



ภาพประกอบที่ 2.3.12 แสดงสัญญาณ Incident และ Reflected power ของ

(ก) RF-gun และ (ข) linac

cathode และเคลื่อนที่ผ่าน RF-gun จึงมองเห็นสัญญาณ RF บางส่วนหายไป และแสดงสัญญาณ Reflected RF-power เป็นรูปร่างคล้ายหูกระต่าย (Rabbit shape) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.3.12

2.3.7.2 การวัดค่ากระแสของอิเล็กตรอนที่ผลิตได้จาก RF-Gun

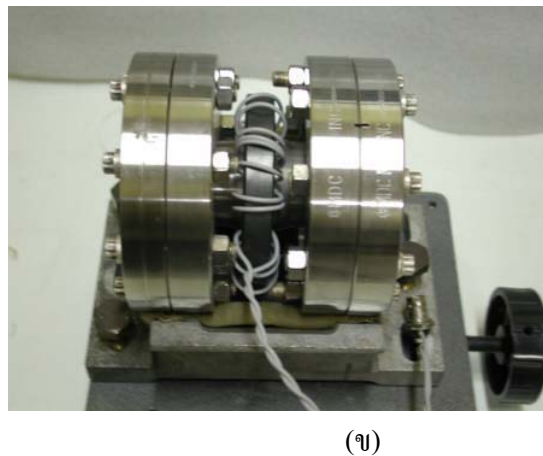
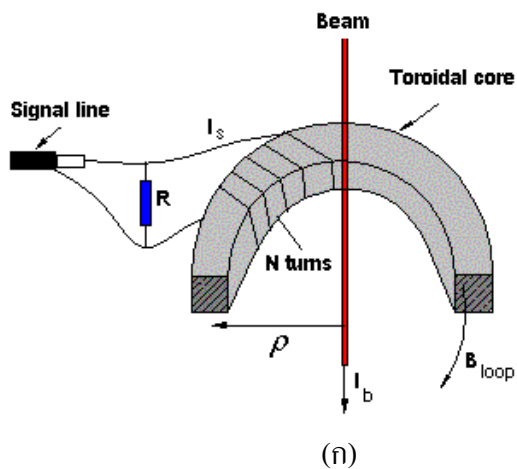
การวัดค่ากระแสของอิเล็กตรอนสามารถทำได้โดยใช้ Current Monitor ซึ่งติดตั้งอยู่ใน Beamline ประกอบด้วยวงแหวนที่ทำจากสาร ferromagnetic (Toroidal ferromagnetic core) ที่มีขดลวดพัน โดย Toroidal core ติดตั้งภายนอกส่วนของ Beamline ที่เป็นเซรามิกซึ่งเป็นฉนวน เพื่อไม่ให้มี image current เนื่องจาก image current จะมีผลหักล้างกับกระแสของอิเล็กตรอนเมื่อมองจากนอก Beamline ทั่วไป การทำงานของ Current Monitor จะเป็นลักษณะเดียวกับ Current Transformer (ภาพประกอบที่ 2.3.13) โดยที่ล่ออิเล็กตรอนทำหน้าที่เสมือนกระแสในเป็นขดลวดปฐมภูมิที่มีจำนวนรอบ $N_1=1$ รอบ และขดลวดของ Current Monitor ทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิ (ในระบบใช้ $N_2=8$ รอบ)

กระแสของล่ออิเล็กตรอน (I_1) ที่ผ่าน Current Monitor มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (2.3.2)$$

โดยกระแสของ Current Monitor สามารถวัดในรูปของความต่างศักย์คร่อม $R = 50$ โอห์ม ซึ่ง

$$I_2 = \frac{V_2}{R} = \frac{V_2}{50\Omega} \quad (2.3.3)$$



ภาพประกอบที่ 2.3.13 แสดงภาพจำลองของ Current Monitor (ก) และภาพถ่ายของ Current Monitor (ข) ในภาพจะเห็น Toroidal core ที่มีขดลวดพัน ติดตั้งอยู่นอก vacuum piece ที่เป็นเซรามิก

ดังนั้น เราสามารถคำนวณหากระแสของอิเล็กตรอนได้จากความสัมพันธ์

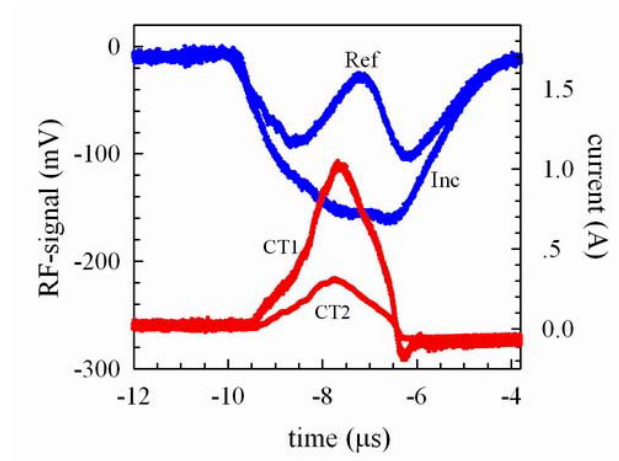
$$I_{electron}(mA) = \frac{8}{50} V(mV) \quad (2.3.4)$$

เมื่อป้อนสัญญาณจาก Current Monitor เข้าสู่ Oscilloscope จะได้ผลของกระแสอิเล็กตรอน ในรูปของ Macropulse ยาวประมาณ $2 \mu s$ ซึ่งความยาวของ pulse กำหนดโดย RF pulse ทั้งนี้ไม่สามารถเห็นโครงสร้างภายในของ pulse ซึ่งประกอบด้วย microbunch ห้วงเฟมโตวินาที โดยใช้ Oscilloscope ตัวอย่างผลการวัดค่ากระแสของลำอิเล็กตรอนที่ผลิตได้จาก RF-Gun แสดงดังภาพประกอบที่ 2.3.14 เมื่อใช้กำลังของคลื่น RF ที่สำหรับป้อนอิเล็กตรอนประมาณ 3.5 MW โดยกระแสสูงสุดที่ผลิตได้จาก RF-gun (สัญญาณ CT1) มีค่าประมาณ 1 A และเมื่อส่งลำอิเล็กตรอนนี้ผ่านแม่เหล็กแบบแอลฟาแล้วพบว่ากระแสของลำอิเล็กตรอน (สัญญาณ CT2) ลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง เนื่องจากการกรองเอาเฉพาะอิเล็กตรอนพลังงานสูงออกมา ดังนั้นกระแสของลำอิเล็กตรอนหลังจากผ่านแม่เหล็กแบบแอลฟาแล้วมีค่าประมาณ 300-500 mA

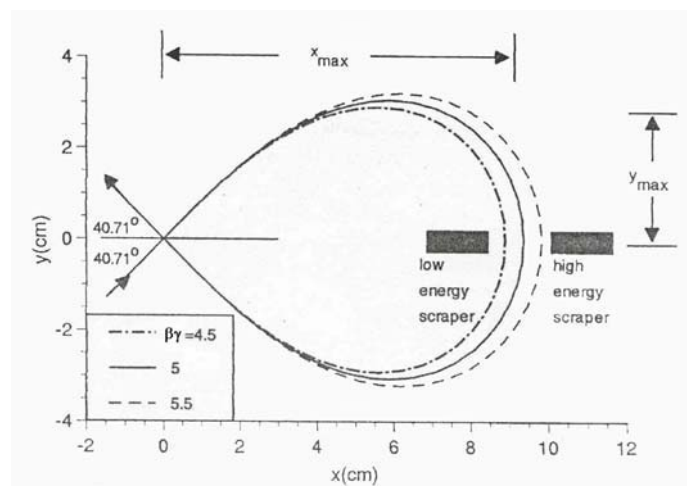
2.3.7.3 การวัดพลังงานของลำอิเล็กตรอนที่ผลิตได้จาก RF-Gun

เนื่องจากอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์ต่างกัน จะเคลื่อนที่ด้วยวงโคจรที่ต่างกัน ภายในสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กแบบแอลฟา โดยที่วงโคจรของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากกว่าจะเป็นวงโคจรที่

กว้างกว่า (ภาพประกอบที่ 2.3.15) ดังนั้นเมื่อใช้ Energy slits คัดกรองพลังงานของอิเล็กตรอน เราจะสามารถวัดค่าพลังงานของลำอิเล็กตรอนที่ผลิตได้จาก RF-Gun ได้ โดยการคำนวณจากตำแหน่งของ Energy Slits ภายใน Vacuum Chamber ของแม่เหล็กแบบแอลฟา



ภาพประกอบที่ 2.3.14 แสดงสัญญาณของกระแสของลำอิเล็กตรอนที่ผลิตได้จากปืนอิเล็กตรอน (CT1) และที่ผ่านออกจากแม่เหล็กแบบแอลฟา (CT2) (Inc หมายถึง Incident RF-power และ Ref หมายถึง Reflected RF-power



ภาพประกอบที่ 2.3.15 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแม่เหล็กแบบแอลฟา

ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของอิเล็กตรอนในแนวแกน x กับพลังงานของอิเล็กตรอนคือ

$$x(cm) = 75.05 \sqrt{\frac{cp}{mc^2 g}} \quad (2.3.5)$$

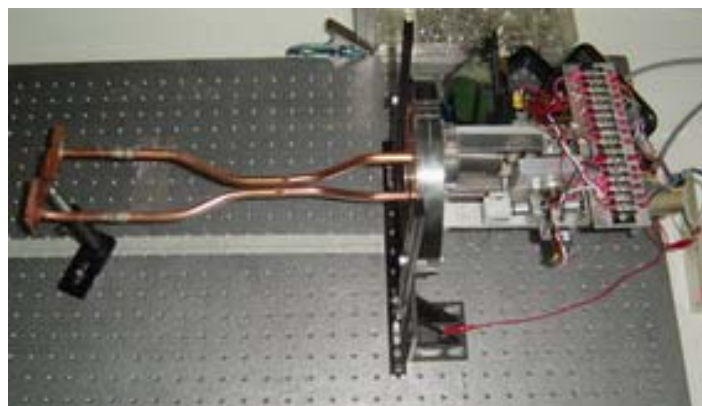
เมื่อ x คือตำแหน่งของอิเล็กตรอนในแนวแกน x

cp คือ โมเมนตัมของอิเล็กตรอน

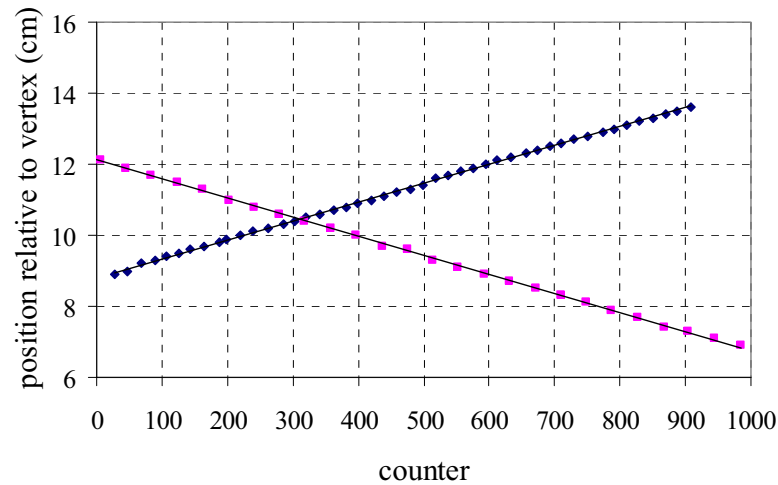
mc^2 คือพลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอน (~ 0.511 MeV)

g คือ gradient ของแม่เหล็กแบบแอลฟา

จากความสัมพันธ์ข้างต้นนี้เราสามารถหาค่าพลังงานของอิเล็กตรอนได้ถ้าเรารู้ค่า gradient ของแม่เหล็กแบบแอลฟา และรู้ตำแหน่งในแกน x ของอิเล็กตรอน ดังนั้นก่อนที่จะติดตั้ง Energy Slits เข้าไปใน Vacuum Chamber นั้น เราได้ทำการสอบเทียบ (calibration) ตำแหน่งของ Energy Slits กับ Counter ของ Motor ภาพประกอบที่ 2.3.16 แสดง Energy slits และ Motors ที่ใช้ขับเคลื่อน และภาพประกอบที่ 2.3.17 แสดงผลของการ Calibration (พฤษภาคม 2548) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งในแกน x ของอิเล็กตรอน และ Counter ของ Motor ที่ใช้ขับเคลื่อน Energy Slits ผลของการวัดค่าพลังงานของอิเล็กตรอนพบว่า อิเล็กตรอนมีค่าพลังงานสูงสุดประมาณ 3 MeV



ภาพประกอบที่ 2.3.16 แสดงการ calibrate energy slits ของแม่เหล็กแบบแอลฟา



ภาพประกอบที่ 2.3.17 แสดงผลการ calibrate ค่าของ motor counter
เทียบกับระยะทางในแกน x ของ energy slits

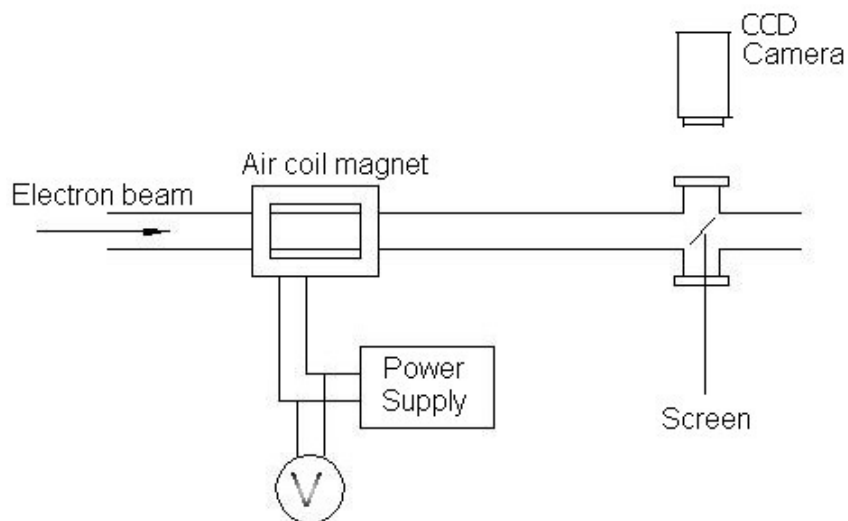
2.3.7.4 การวัดพลังงานของลำอิเล็กตรอนหลังการเร่งอนุภาค

เบื้องต้นใช้แม่เหล็กสองขั้วขนาดเล็กแบบ air-coil ในการประเมินค่าพลังงานของอิเล็กตรอน ภาพประกอบที่ 2.3.18 แสดงไดอะแกรมชุดวิเคราะห์พลังงานของลำอิเล็กตรอนประกอบด้วยแม่เหล็กแบบ air-coil พร้อม power supply, fluorescent screen และ กล้อง CCD เมื่อลำอิเล็กตรอนวิ่งผ่านสนามแม่เหล็ก ลำอิเล็กตรอนจะถูกเบนออกจากเส้นทางเดิม ซึ่งมุมที่ลำอิเล็กตรอนถูกเบนไป จะขึ้นกับพลังงานของลำอิเล็กตรอนและความเข้มของสนามแม่เหล็กทั้งหมดที่อิเล็กตรอนวิ่งผ่าน ดังนั้นถ้าเราทราบมุมที่ลำอิเล็กตรอนเบนไปและค่าสนามแม่เหล็ก เราจะสามารถทราบพลังงานของลำอิเล็กตรอนได้

แม่เหล็กที่ใช้ นั้นเป็นแม่เหล็กแบบ Air coil มีความต้านทาน 7.5 โอห์ม มีขนาด 15×5 ซม. จำนวน 2 ขด ประกบบน ท่อสุญญากาศเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว ผลการวัดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กตามแกน z ซ้ำอยู่ในทิศของการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน ทำให้ได้ความสัมพันธ์ ของกระแสกับสนามรวมคือ

$$B_z(\text{gauss} \cdot \text{cm}) = 780.74 \times I(A) \quad (2.3.6)$$

ในการวัดพลังงาน จะปรับค่ากระแสที่ไหลผ่านแม่เหล็ก เพื่อให้ภาพของลำอิเล็กตรอนตกที่ขอบด้านหนึ่งของ screen จากนั้นปรับกระแสอีกครั้ง ให้ภาพของลำอิเล็กตรอนไปสุดที่ขอบอีกด้านหนึ่ง คิดเป็นมุมเบน $\phi = 17.68 \text{ mrad}$ จากนั้นทำการวัดความต่างศักย์ที่ทำให้ลำอิเล็กตรอนเบนใน



ภาพประกอบที่ 2.3.18 ไดอะแกรมของชุดวิเคราะห์พลังงานอิเล็กตรอนด้วยแม่เหล็กแบบ Air coil

ลักษณะดังกล่าว แล้วคำนวณหาค่าพลังงานต่อไป ทั้งนี้เมื่อพิจารณาระบบจ่ายไฟของแม่เหล็ก พบว่า มีความต้านทานรวมของ Load เป็น 8.8 โอห์ม (รวมความต้านทานของแม่เหล็กกับสายไฟ) ทำให้ได้ สนามรวมในรูปของความต่างศักย์ เป็น

$$B_z(\text{gauss} \cdot \text{cm}) = 88.72 \times V(\text{Volt}) \quad (2.3.7)$$

เมื่อ V คือ ความต่างศักย์ที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์เมื่อต่อคร่อมจุดจ่ายไฟของแม่เหล็ก

สำหรับการคำนวณพลังงานใช้ความสัมพันธ์ ที่อิเล็กตรอนพลังงาน cp จะเบนด้วย มุมเบน ϕ ในสนามแม่เหล็ก B_z

$$cp(\text{GeV}) = \frac{0.2998 \times B_z(\text{Tesla} \cdot \text{m})}{\phi(\text{rad})} \quad (2.3.8)$$

โดย
$$E = \sqrt{(cp)^2 + (mc^2)^2} \quad (2.3.9)$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงไปจะได้

$$E(\text{MeV}) = \sqrt{2.263 \cdot \Delta V^2 + 0.261} \quad (2.3.10)$$

เมื่อ ΔV คือผลต่างของศักย์ไฟฟ้าเมื่อลำอิเล็กตรอนอยู่ที่ขอบทั้งสองของ screen ในการวัดพลังงานครั้งล่าสุดนั้น พบว่าสามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงาน 15 – 17 MeV โดยได้ค่ากระแสของอิเล็กตรอนหลังการเร่งพลังงานประมาณ 160 mA

2.3.8 การตรวจวัดรังสีบริเวณใกล้เคียง

เมื่อมีการผลิตและเร่งพลังงานลำอิเล็กตรอน จะต้องมีการตรวจวัดรังสี (radiation survey) บริเวณใกล้เคียง ผลการตรวจวัดรังสีครั้งล่าสุดโดยใช้ victoreen 471 survey meter แสดงในตารางที่ 2.3.1 และภาพประกอบที่ 2.3.19 ตามลำดับ

2.4 การติดตั้งระบบลำเลียงอิเล็กตรอนสำหรับสถานีทดลองผลิตรังสีเอกซ์

สถานีทดลองผลิตรังสีเอกซ์จะอยู่ตรงปลายสุดของ beam line อย่างไรก็ดีตอนปลายของ beam line จะมีการติดตั้งแม่เหล็กสองขั้ว เพื่อใช้เป็น energy spectrometer สำหรับวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอนภายหลังที่ถูกเร่งจาก linac และใช้ในการบังคับให้ลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปใน เกือบยัง Faraday cup เพื่อความสะดวกต่อการกำบังรังสี (radiation shielding) เมื่อต้องการนำลำอิเล็กตรอนไปยังสถานีทดลองผลิตรังสีเอกซ์จะปิดแม่เหล็กสองขั้วดังกล่าว และต้องมีการให้สนามแม่เหล็กชดเชยจากคอยล์ชดเชยที่ได้เตรียมไว้เพื่อหักล้างกับสนามตกค้างของแม่เหล็กสองขั้ว ภาพประกอบที่ 2.4.1 แสดงแผนผังของระบบลำเลียงอิเล็กตรอนจนถึงส่วนปลายของ beam line โดยจะมีการติดตั้งระบบวัดกระแสและ beam profile ของอิเล็กตรอนเพิ่มเติมอีกหนึ่งสถานี ติดตั้งปั๊มสุญญากาศแบบไอออนขนาด 500 ลิตรต่อวินาที 1 ชุด และจะทำการติดตั้งแม่เหล็กสองขั้ว

2.4.1 การออกแบบ สร้าง และ ทดสอบ แม่เหล็กสองขั้ว

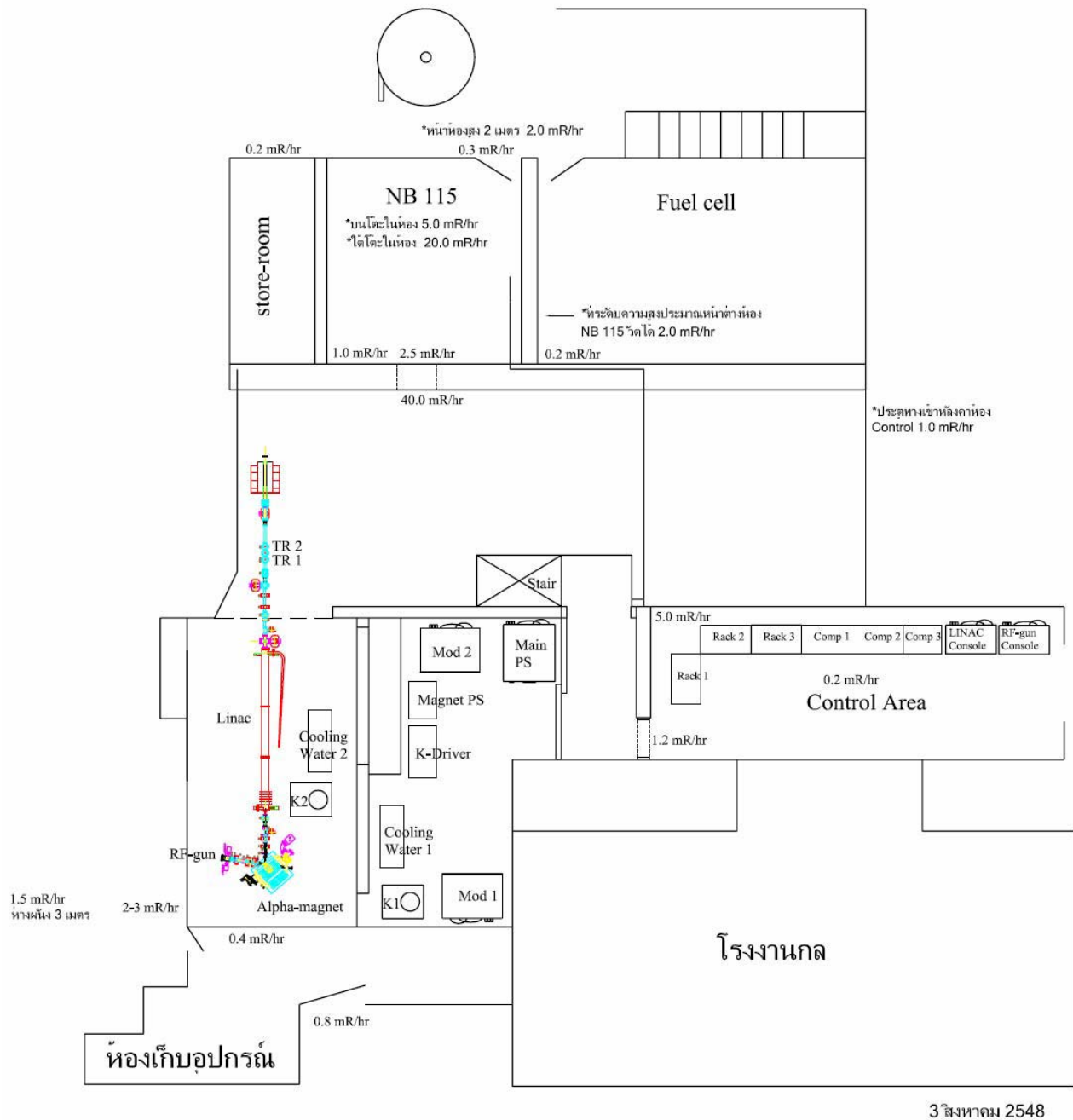
ต้องการแม่เหล็กสองขั้วที่สามารถเบนลำอิเล็กตรอนพลังงาน 20-30 MeV ไปยัง Faraday Cup ซึ่งเป็น beam collector และแม่เหล็กดังกล่าวยังเป็นส่วนประกอบสำคัญ ในระบบวิเคราะห์พลังงานของลำอิเล็กตรอน (electron energy spectrometer) ที่ผลิตได้อีกด้วย ได้ออกแบบเพื่อดัดแปลงแม่เหล็กสองขั้วที่ได้มาพร้อมระบบเครื่องเร่งสำหรับรังสีรักษาของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ หลังจากประมาณค่าสนามแม่เหล็กและพารามิเตอร์เบื้องต้น ได้ทำการออกแบบขั้วแม่เหล็กเพื่อคำนวณค่า

ตารางที่ 2.3.1 แสดงผลการตรวจวัดรังสีบริเวณใกล้เคียง (3 สิงหาคม 2548)

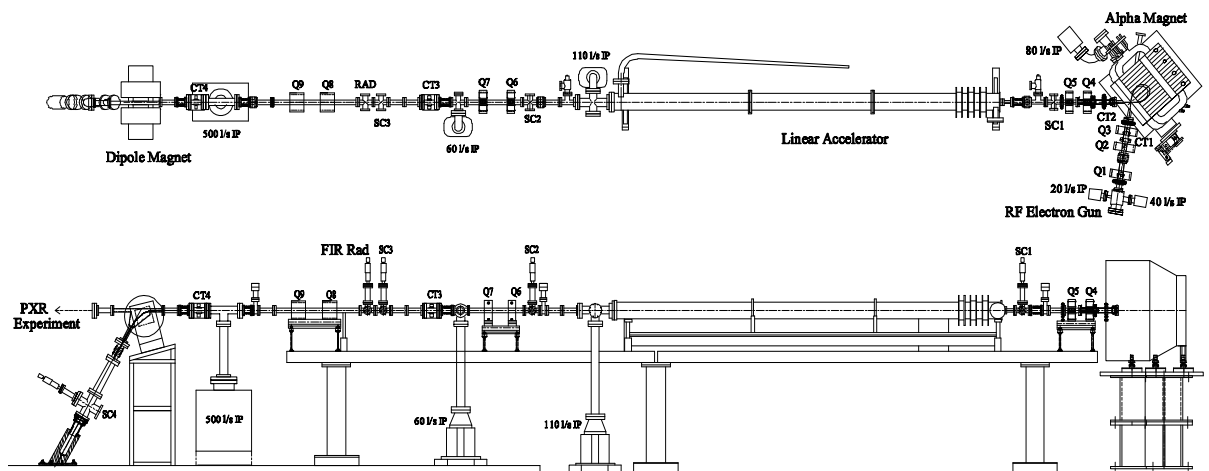
ลำดับที่	ตำแหน่งที่ทำการวัดรังสี	ปริมาณรังสีที่วัดได้ ($\frac{mR}{hr}$)
1	กลางห้อง control	0.2
2	หน้าประตูเหล็กในห้อง control	1.2
3	ชิดมุมห้อง control	5.0
4	หน้าห้อง store	0.2
5	หน้าห้อง NB115 (บนพื้น)	0.3
6	หน้าห้อง NB115 (สูง 2 เมตร)	2.0
7	บนโต๊ะในห้อง NB115 *	5.0
8	ใต้โต๊ะในห้อง NB115 *	20.0
9	ในห้อง NB115 (หลัง คอนกรีต) *	1.0
10	ขอบหน้าต่างด้านในห้อง NB115 *	2.5
11	ขอบหน้าต่างด้านนอกห้อง NB115 *	40.0
12	หน้ารั้วกันหลังคาห้องใต้ดิน	1.0
13	หลังคาห้องใต้ดิน *	-
14	ประตูทางออกไประเบียง	0.2
15	ขอบระเบียง (ห่างประตูไป 5 เมตร) *	10.0
16	ห้องเก็บอุปกรณ์ (หลัง คอนกรีต)	0.4
17	หน้าห้องเก็บอุปกรณ์	0.8
18	ข้างห้องเก็บอุปกรณ์ **	3.0
19	ข้างห้องเก็บอุปกรณ์ (ห่างออกไป 3 เมตร)	1.5
20	กลางห้องเก็บอุปกรณ์ (สูง 1 เมตร)	1.0
21	กลางห้องเก็บอุปกรณ์ (สูง 2.5 เมตร)	3.0

* ปิดกั้นไม่ให้เข้าขณะมีการเดินเครื่องเร่งอิเล็กตรอน

** กำลังทำการปิดกั้นรอบบริเวณโดยรอบเพื่อไม่ให้เข้าขณะเดินเครื่องเร่งอิเล็กตรอน



ภาพประกอบที่ 2.3.19 แสดงแผนที่และผลการตรวจวัดรังสี



ภาพประกอบที่ 2.4.1 แสดงแผนผังของระบบลำเลียงอิเล็กตรอน

(บน) แสดงแผนผังของ beamline แบบ top view (ล่าง) แสดงแผนผังของ beamline แบบ side view

สนามแม่เหล็กโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการสร้างและทดสอบแม่เหล็กสองขั้ว ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.4.1.1 การออกแบบแม่เหล็กสองขั้ว

ก). เงื่อนไขในการออกแบบ

ในการออกแบบจะทำการกำหนดเงื่อนไขตั้งต้นดังนี้ มุมเลี้ยวเบนสูงสุดของอิเล็กตรอนเท่ากับ 60 องศา ความกว้างของขั้วแม่เหล็กตามแนวบีมเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กเท่ากับ 3 เซนติเมตร

ข). การประมาณค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด

จากเงื่อนไขข้างต้น สามารถที่จะประมาณค่าแม่เหล็กสูงสุดที่ต้องใช้ได้ดังนี้

$$\alpha(rad) = \frac{0.3 \int \vec{B} \cdot d\vec{z} [T \cdot m]}{\beta E [GeV]} = \frac{0.3 B [T] \int dz [m]}{\beta E [GeV]} \quad (2.4.1)$$

โดยการสมมุติให้ค่าสนามแม่เหล็กตามมีค่าคงที่ตลอดความกว้างแม่เหล็ก $\int dz = 0.125 \text{ m}$

และ $\beta \approx 1$ สำหรับอิเล็กตรอนพลังงาน 30 MeV เมื่อแทนค่า จะได้ $B_{\max} [T] \approx 0.84 \text{ T}$

ค). การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของคอยล์แม่เหล็ก

สำหรับคอยล์ของแม่เหล็กนั้น จะใช้คอยล์ที่ของตัวดั้งเดิมที่ได้มาจากโรงพยาบาล จากการวัดค่าสนามแม่เหล็ก(เดิม) ทำให้สามารถประมาณจำนวนขดลวดในคอยล์ของแม่เหล็กได้ว่า มีขดลวดประมาณ 600 รอบ เพื่อให้ได้สนามแม่เหล็กสูงสุดตามต้องการ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องใช้ประมาณจากกฎของแอมแปร์หรือ $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI$ เมื่ออินทิเกรตตามเส้นทางที่เหมาะสม จะได้สมการสำหรับกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้

$$I = \frac{BG}{\mu_0 N} \quad (2.4.2)$$

โดยที่ N คือ จำนวนรอบของขดลวด

B คือ ค่าสนามแม่เหล็ก (Tesla)

G คือ ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก (m)

μ_0 คือ permeability ของสุญญากาศ ($4\pi \times 10^{-7} \text{ W/A} \cdot \text{m}$)

แทนค่าตามเงื่อนไขข้างต้นจะได้ว่า

$$I = \frac{0.84 \times 0.03}{4\pi \times 10^{-7} (2 \times 600)} = 16.7 \text{ Ampere}$$

ง). การออกแบบขั้วแม่เหล็ก

ในการออกแบบขั้วแม่เหล็กจะใช้โปรแกรม Radia ช่วยในการคำนวณค่าสนามแม่เหล็ก ซึ่งโปรแกรม Radia เป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติ โดยลักษณะของ pole profile ของแม่เหล็กที่ป้อนให้กับโปรแกรมมีลักษณะดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.4.2 ผลจากการคำนวณนั้นสามารถแสดงค่าสนามแม่เหล็กได้ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.4.3

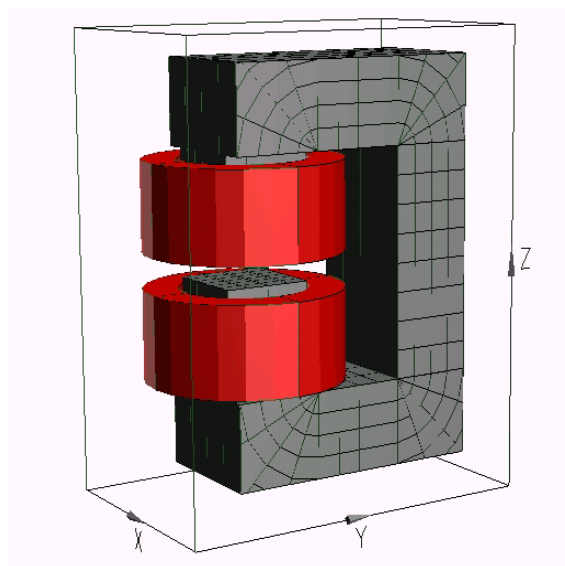
2.4.1.2 การสร้างแม่เหล็กสองขั้ว

ภายหลังจากการออกแบบขั้วแม่เหล็ก ได้ส่งแบบของขั้วแม่เหล็กที่ไปสร้างที่ โรงงานกล ของ ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง โดยอาศัยเครื่อง CNC Machine Center ช่วยในการสร้าง ซึ่งขั้วแม่เหล็กที่สร้างเสร็จแล้วแสดงดังภาพประกอบที่ 2.4.4(ก) ต่อจากนั้นได้ทำการพ่นสีของขั้วแม่เหล็กรวมทั้งชิ้น

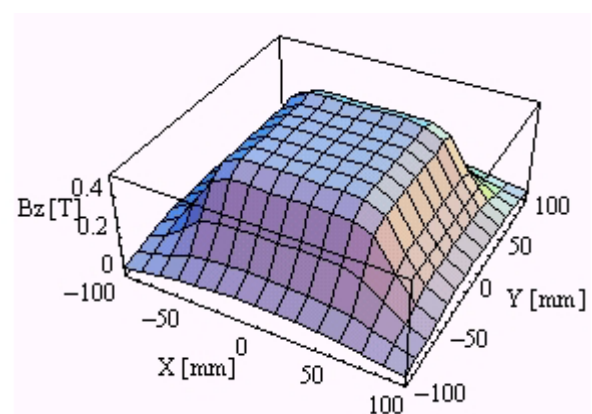
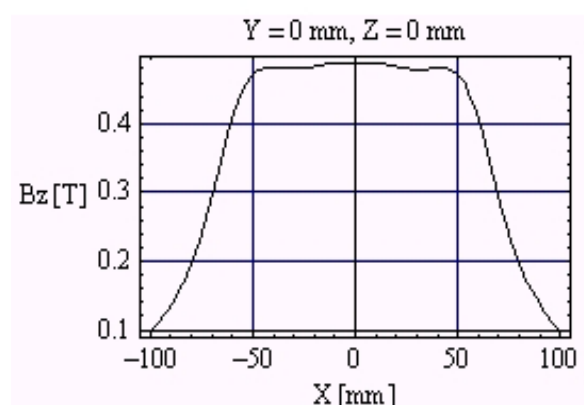
ส่วนเดิมของแม่เหล็กดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.4.4(ข) เมื่อได้ชิ้นงานครบแล้วจึงทำการประกอบชิ้นส่วนของแม่เหล็กเข้าด้วยกัน (ภาพประกอบที่ 2.4.5) เพื่อรอการทดสอบในขั้นตอนต่อไป

2.4.1.3 การทดสอบแม่เหล็กสองขั้ว

ในการวัดค่าสนามแม่เหล็ก ใช้เครื่องมือวัดค่าสนามแม่เหล็ก GMW Group3 Digital Hall Effect Teslameter รุ่น DMT-130-PS ซึ่งอาศัยกระบวนการ Hall Effect ที่เกิดขึ้นเมื่อ probe ของเครื่อง



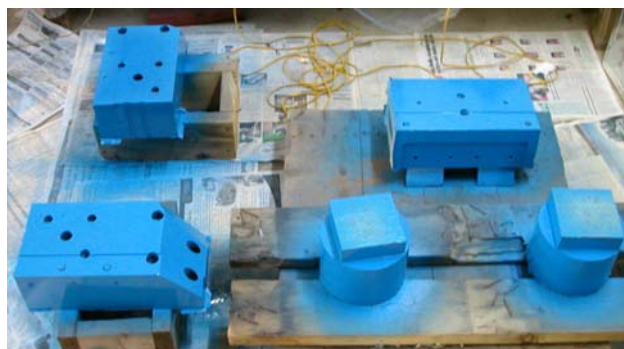
ภาพประกอบที่ 2.4.2 แสดงลักษณะของ pole profile ที่ป้อนให้กับโปรแกรม Radia



ภาพประกอบที่ 2.4.3 แสดงผลการคำนวณสนามแม่เหล็ก จากโปรแกรม แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 2.4.4 แสดง (ก) ขั้วแม่เหล็ก และ (ข) ชิ้นส่วนทั้งหมดของแม่เหล็ก



ภาพประกอบที่ 2.4.5 แสดงแม่เหล็กสองขั้วที่พร้อมจะใช้งาน

มีอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก โดยในการวัดค่าสนามแม่เหล็กจะติดตั้ง probe เข้ากับอุปกรณ์ช่วย เพื่อช่วยในการกำหนดตำแหน่งที่แน่นอนและทำให้ probe อยู่นิ่งกับที่ ในการวัดนั้นจะวัดค่าของ สนามแม่เหล็กเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าต่างๆ กัน เพื่อหา excitation curve และ วัดการกระจายตัวของ สนามแม่เหล็กเพื่อนำไปคำนวณหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนต่อไป

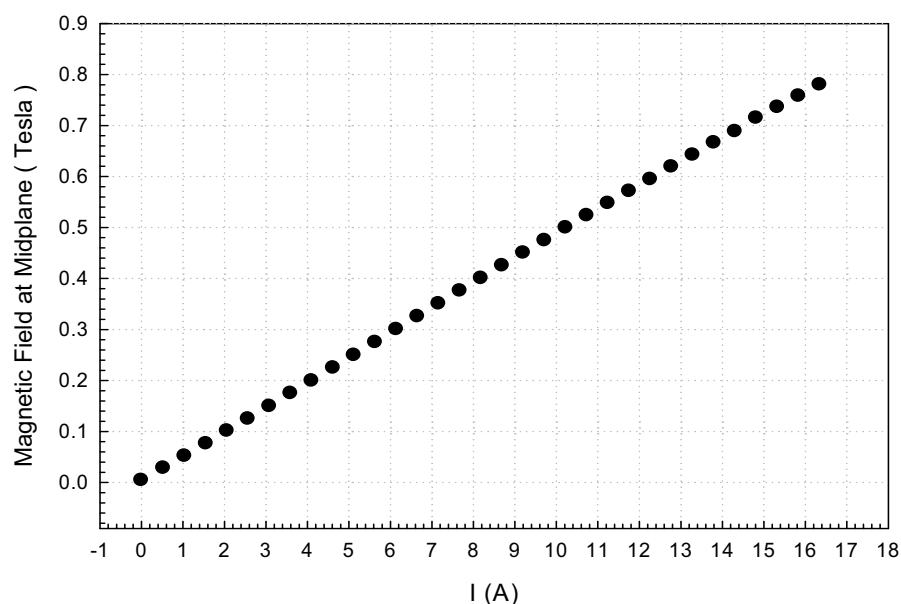
ก). การทดสอบหา excitation curve

การทดสอบเพื่อหา excitation curve ของแม่เหล็ก ทำได้โดยการวัดค่าสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่ง ตรงจุดกึ่งกลางระหว่างขั้วทั้งสอง ที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ กัน โดยผลที่ได้จากการวัด แสดง ดัง ภาพประกอบที่ 2.4.6 จากผลการวัดจะเห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กที่ค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 14.5 A

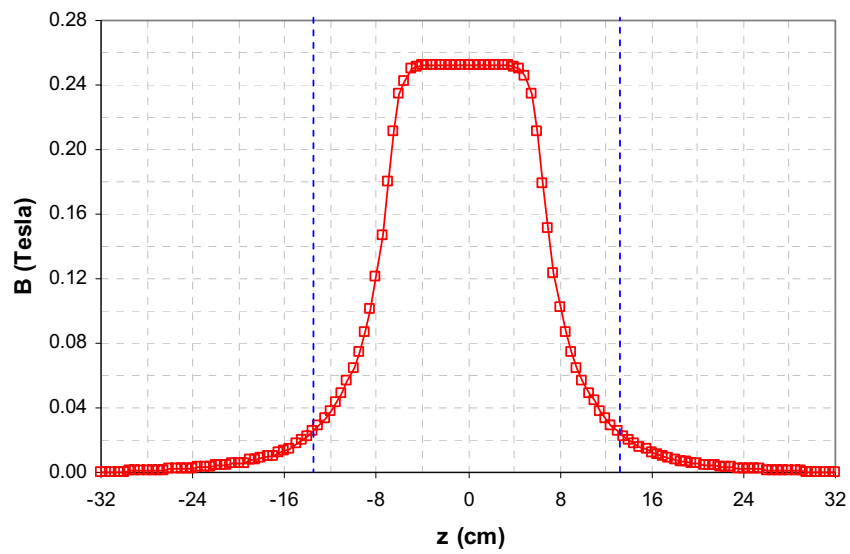
จะให้ค่าสนามแม่เหล็กประมาณ 0.7 Tesla ซึ่งเป็นค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการเลี้ยวเบนลำอิเล็กตรอนพลังงาน 30 MeV ด้วยมุม 60 องศา และยังไม่เกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก

ข). การวัดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก

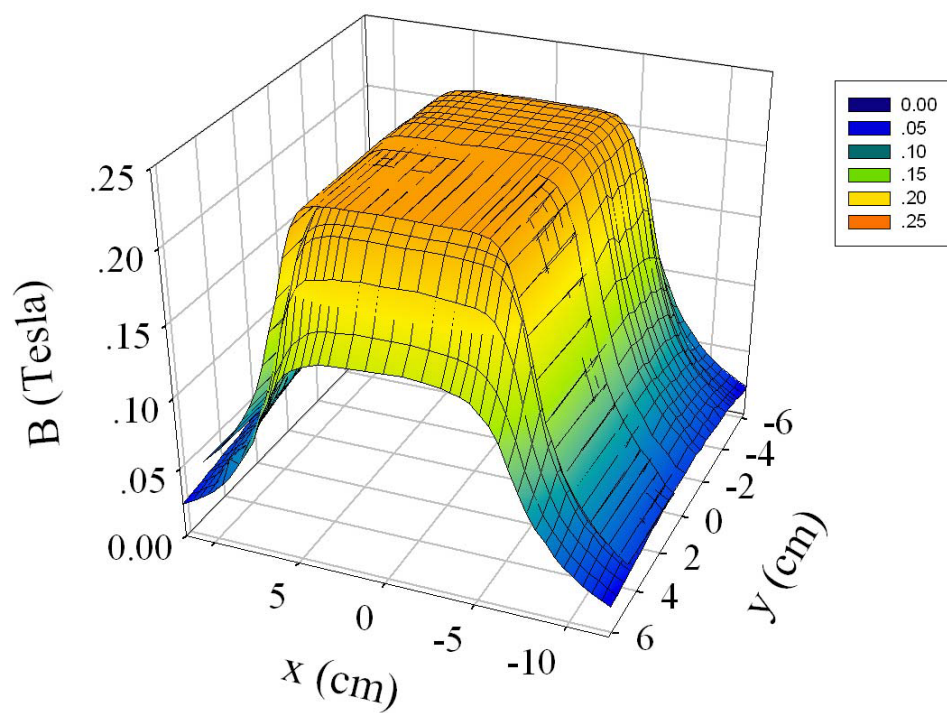
การวัดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก สำคัญต่อการวิเคราะห์พลังงานของลำอิเล็กตรอน เนื่องจาก โดยแท้จริงแล้ว ผลของสนามแม่เหล็กจะไม่กระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงความกว้างของขั้ว และภายนอกบริเวณขั้ว สนามแม่เหล็กจะไม่เป็นศูนย์อย่างทันทีทันใด ได้ทำการวัดค่าของสนามแม่เหล็กในแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งผลการวัดแสดงในภาพประกอบที่ 2.4.7 สามารถใช้อธิบายลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในแนวแกน z ซึ่งเป็นแนวแกนในทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ที่ตำแหน่ง $x = 3.0$ cm จากจุดกึ่งกลางของขั้วแม่เหล็ก และ $y = 0$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะส่งผ่านลำอิเล็กตรอนไปใน chamber ของแม่เหล็กสองขั้ว ส่วนภาพประกอบที่ 2.4.8 แสดงลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กสองขั้ว แบบ 3 มิติ ซึ่งเมื่อเราทราบค่าของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเบนลำอิเล็กตรอน เราจะทราบค่าสนามแม่เหล็กจาก excitation curve และลักษณะการกระจายตัว ทำให้สามารถที่จะนำไปคำนวณหาพลังงานของอิเล็กตรอนได้



ภาพประกอบที่ 2.4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้า ณ จุดกึ่งกลางของแม่เหล็ก



ภาพประกอบที่ 2.4.7 กราฟแสดงผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กตามแนวแกน z
(เมื่อใช้กระแส 5 แอมแปร์)



ภาพประกอบที่ 2.4.8 แสดงลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กสองขั้ว แบบ 3 มิติ

2.4.2 การติดตั้งแม่เหล็กสองขั้ว Beam collector และระบบลำเลียง

2.4.2.1 สร้าง 60° bending chamber

ได้ออกแบบ chamber สำหรับแม่เหล็กสองขั้วเพื่อรองรับการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนตามแนวโค้งทำมุม 60° กับแนวการเคลื่อนที่เดิม การสร้าง chamber ทำโดยแก้ไข chamber ที่มีอยู่แล้วดังภาพประกอบที่ 2.4.9



ภาพประกอบที่ 2.4.9 การออกแบบ และสร้างประกอบ 60° bending chamber

2.4.2.2 สร้างประกอบ support สำหรับแม่เหล็กสองขั้ว

เนื่องจากแม่เหล็กสองขั้วที่จะใช้ ได้ทำการดัดแปลงมาจากแม่เหล็กที่มีอยู่ ความยาวของแม่เหล็กไม่สามารถให้สนามแม่เหล็กที่เพียงพอสำหรับการเบนลำอิเล็กตรอนพลังงาน 15 – 20 MeV เป็นมุม 60° อย่างไรก็ดี ผลจากการวัดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก และการคำนวณเพื่อวิเคราะห์แนวการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็ก (รวมทั้งสนามแม่เหล็กของ fringe field) พบว่าเมื่อวางแม่เหล็กทำมุม 15° จะทำให้สนามตามแนวการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนเพียงพอสำหรับการเบน 60° ดังนั้น support ของแม่เหล็กสองขั้วจึงต้องทำมุม 15° (ภาพประกอบที่ 2.4.10)

2.4.2.3 ติดตั้งแม่เหล็กสองขั้ว Beam collector และ Beam transport

เมื่องานสร้างประกอบ แม่เหล็ก support และ chamber แล้วเสร็จ ได้ทำการ ติดตั้งแม่เหล็กสองขั้ว ติดตั้ง Beam collector และติดตั้ง Beam transport ซึ่งระบบสุญญากาศสำหรับส่วนปลายของ

beam line นี้จะใช้ ปัมสุญญากาศแบบไอออนขนาด 500 ลิตรต่อวินาที ซึ่งได้รับการอนุเคราะห์ให้ยืม
จากศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ภาพประกอบที่ 2.4.11 แสดงการดำ

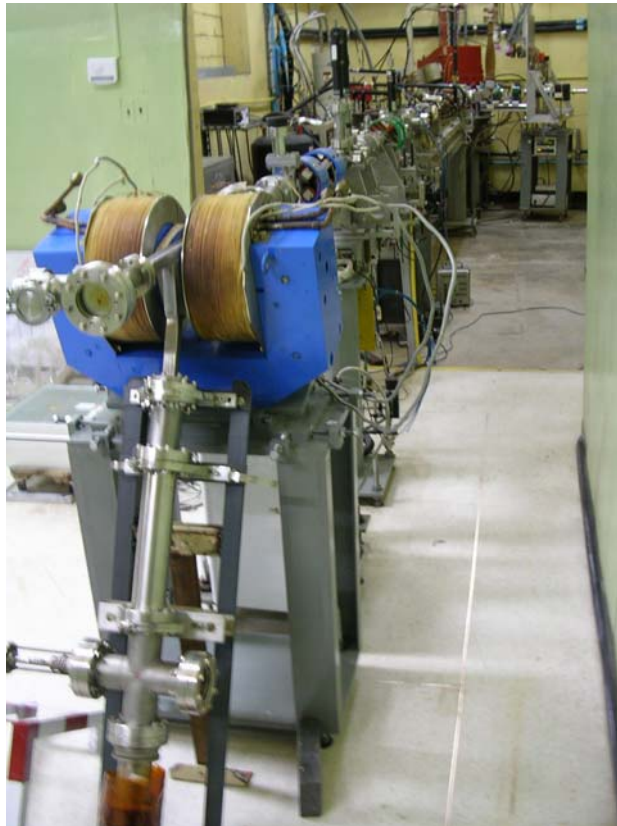


ภาพประกอบที่ 2.4.10 แสดง support ของแม่เหล็กสองขั้ว ซึ่งเอียงแม่เหล็กเป็นมุม 15°



ภาพประกอบที่ 2.4.11 การติดตั้งแม่เหล็กสองขั้ว Beam collector และ Beam transport

เนินการในช่วงติดตั้ง และ ภาพของ beam line ภายหลังการ ติดตั้งแม่เหล็กสองขั้ว Beam collector และ Beam transport แสดงใน ภาพประกอบที่ 2.4.12



ภาพประกอบที่ 2.4.12 Beam line ภายหลังการติดตั้งแม่เหล็กสองขั้ว และ Beam collector

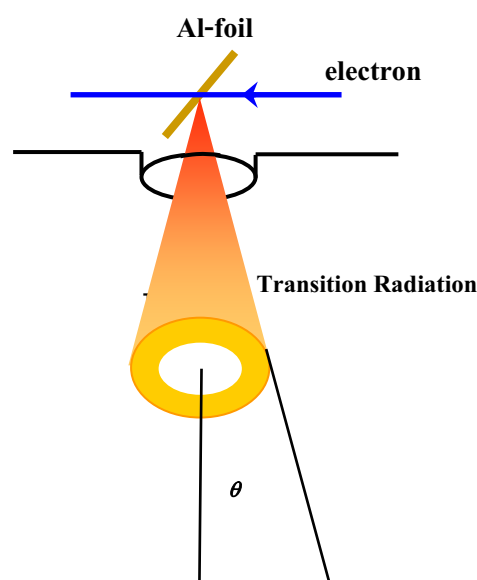
2.5 การติดตั้งสถานีผลิตและตรวจวัดรังสีได้แดงย่านไกล

ได้ทำการผลิตรังสีอาพันธ์ความถี่ได้แดงย่านไกล (coherent far-infrared radiation) จากอิเล็กตรอนหัวสั้นในรูปของรังสีทรานสิชั่น (transition radiation) ซึ่งกระบวนการผลิตรังสีสามารถอธิบายพอสังเขปได้ว่า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นและถูกเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นประมาณ 15-20 MeV แล้ว จะทำการยิงลำอิเล็กตรอนนี้ผ่านตัวกลางสองชนิดที่มีค่าคงที่ไดอิเล็ก

ตริก (dielectric constant) ต่างกัน ซึ่งเราจะใช้แผ่นอลูมิเนียมบางทำหน้าที่เป็นตัว radiator และเป็นการเคลื่อนที่ผ่านแนวแบ่งเขตระหว่างตัวกลางสุญญากาศและตัวกลางนำไฟฟ้า กรณีวางแผ่นอลูมิเนียมทำมุม 45 องศา เทียบกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านแผ่นอลูมิเนียม จะแผ่รังสีทรานส์ชันในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน และรังสีจะเคลื่อนที่ออกจากระบบสุญญากาศโดยผ่าน polyethylene window ดังภาพประกอบที่ 2.5.1 ซึ่งแสดงแผนผังการผลิตรังสีได้แก่แสงย่านไกลในรูปของ transition radiation ทั้งนี้การเป็นอาพันธ์ หรือ coherence ของรังสี อธิบายถึงลักษณะของการแผ่รังสีของแต่ละอิเล็กตรอนในพัลส์ สำหรับรังสีที่มีความยาวคลื่นซึ่งมีค่ามากกว่าความยาวพัลส์ของอิเล็กตรอน รังสีนั้นจะถูกรวมกันแบบ in-phase และทำให้เหมือนกับว่าอิเล็กตรอนทุกตัวแผ่รังสีพร้อม ๆ กันเมื่อรวมสนามไฟฟ้าเข้าด้วยกันแล้วคิดในเทอมของความเข้มจะพบว่า

$$I_{coherent} \propto N_e^2 \quad (2.5.1)$$

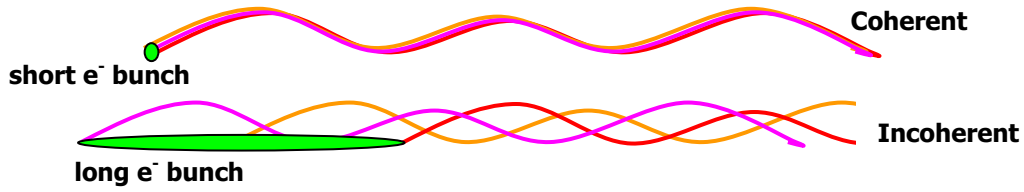
ส่วนรังสีที่มีความยาวคลื่นซึ่งมีค่าน้อยกว่าความยาวพัลส์ของอิเล็กตรอน รังสีนั้นจะถูกรวมกันแบบ random phase และส่งผลให้ความเข้มขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนในพัลส์



ภาพประกอบที่ 2.5.1 แผนผังแสดงวิธีการผลิตรังสีความถี่ได้แก่แสงย่านไกล
ในรูปของ transition radiation

$$I_{incoherent} \propto N_e \quad (2.5.2)$$

แผนภาพจำลองการเกิดรังสีทั้งสองแบบ (coherent และ incoherent) แสดงในภาพประกอบที่ 2.5.2



ภาพประกอบที่ 2.5.2 แผนภาพจำลองการเกิดรังสีแบบ coherent เมื่อความยาวคลื่นยาวกว่าอิเล็กตรอนพัลส์ และ แบบ incoherent เมื่อความยาวคลื่นสั้นกว่าอิเล็กตรอนพัลส์

ทั้งนี้สามารถแสดงรังสี coherent และ incoherent ในลักษณะการรวมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ โดยให้ $\vec{r}_j$ เป็นตำแหน่งของอิเล็กตรอน ที่ j ในพัลส์เทียบกับศูนย์กลาง รังสีที่แผ่ออกจากอิเล็กตรอนพัลส์ ซึ่งประกอบด้วย N อิเล็กตรอน คือ

$$\vec{E}_{total}(\omega) = \sum_{j=1}^N \vec{E}_j(\omega) e^{i(\omega t - \vec{k}_j \cdot \vec{r}_j)} = \sum_{j=1}^N \vec{E}_j(\omega) e^{i(\omega t - k\hat{n}_j \cdot \vec{r}_j)} \quad (2.5.3)$$

ในขอบเขตของ far field approximation จะได้ว่า $\hat{n}_j = \hat{n}$ และ $\vec{E}_j(\omega) = E_j(\omega)\hat{n}$

ส่วนความเข้มของรังสีหาได้จากสนามไฟฟ้ายกกำลังสอง

$$\begin{aligned} I(\omega) &\propto |\vec{E}_{total}(\omega)|^2 \\ &\propto \left| \sum_{j=1}^N E_j(\omega) e^{ik\hat{n} \cdot \vec{r}_j} \right|^2 \\ &= \sum_{j=1}^N E_j(\omega) e^{ik\hat{n} \cdot \vec{r}_j} \sum_{m=1}^N E_m^*(\omega) e^{-ik\hat{n} \cdot \vec{r}_m} \\ &= \sum_{j=1}^N |E_j(\omega)|^2 + \sum_{\substack{j,m=1 \\ j \neq m}}^N E_j(\omega) E_m^*(\omega) e^{ik\hat{n} \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_m)} \end{aligned}$$

ให้ ความเข้มของรังสีจากอิเล็กตรอน 1 ตัว เป็น $I_e(\omega) = |E_j(\omega)|^2$ สำหรับอิเล็กตรอนพัลส์ที่มีอิเล็กตรอนพลังงานเท่ากัน ความเข้มของรังสีรวม คือ

$$I(\omega) = NI_e(\omega) + I_e(\omega) \sum_{\substack{j,m=1 \\ j \neq m}}^N e^{ik\hat{n} \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_m)} \quad (2.5.3)$$

สำหรับรังสีที่มีความยาวคลื่นซึ่งมีค่ามากกว่าความยาวพัลส์ของอิเล็กตรอนมาก สมการ (2.5.3) จะมีผลต่างของเฟสน้อยมากและจะได้ $I(\omega) = NI_e(\omega) + N(N-1)I_e(\omega) = N^2I_e(\omega)$ เช่นเดียวกับข้อสรุปในสมการ (2.5.1) ส่วนกรณีที่รังสีที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวพัลส์ของอิเล็กตรอนมาก การรวมกันของ random phase จะทำให้เทอมที่สองในสมการ (2.5.3) หายไป ผลที่ได้คือ $I(\omega) = NI_e(\omega)$ ดังข้อสรุปในสมการ (2.5.2)

การแสดงผลดังกล่าวเมื่อให้พัลส์ของอิเล็กตรอนมีการกระจายตัวแบบต่อเนื่อง (continuum) จะได้ว่า

$$I_{total}(\omega) \approx NI_e(\omega)[1 + (N-1)f(\omega)] \quad (2.5.4)$$

โดยนิยาม *form factor* $f(\omega)$ ด้วยความสัมพันธ์กับฟังก์ชันการกระจายตัวของอิเล็กตรอน $S(\vec{r})$

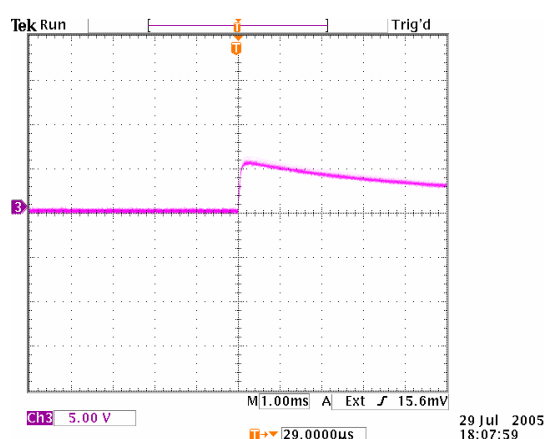
$$f(\omega) = \left| \int e^{ik\hat{n} \cdot \vec{r}} S(\vec{r}) d^3r \right|^2 \quad (2.5.4)$$

ซึ่งผลของ coherent limit และ incoherent limit ให้ข้อสรุปเช่นเดียวกับสมการ (2.5.1) และ (2.5.2)

ได้มีการตรวจวัดรังสี coherent ในรูปของรังสีซินโครตรอนในปี 1989 [15] โดย Nakazato และคณะ ซึ่งผลิตรังสีซินโครตรอนแบบ coherent จากอิเล็กตรอนพลังงาน 180 MeV ที่มีความยาวห้วง 8.3 พิโควินาที จากนั้น ในปี 1991 Blum และ คณะ สามารถตรวจวัดรังสีซินโครตรอนแบบ coherent ได้เช่นเดียวกัน โดยผลิตรังสีดังกล่าวจากจากอิเล็กตรอนพลังงาน 300 MeV ความยาวห้วง 6.7 พิโควินาที [16] สำหรับระบบผลิตอิเล็กตรอนห้วงสั้นของโครงการ SUNSHINE (1992 – 2003) มหาวิทยาลัย Stanford ซึ่งใช้หลักการบีบห้วงอิเล็กตรอน ในลักษณะเดียวกับ ระบบผลิตอิเล็กตรอนของอาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ได้รายงานผลการผลิตและตรวจวัดรังสี coherent ในรูปรังสีซินโครตรอน [17] และรังสีทรานสิชัน [17-18] จากอิเล็กตรอนพลังงาน 30 MeV ที่มีห้วงประมาณ

100 เฟมโตวินาที โดยพบว่าสามารถผลิตรังสีทรานส์ชันแบบ coherent ที่มีความถี่ในรูปเลขคลื่น (wavenumber) ในช่วง 5 cm^{-1} ถึง 200 cm^{-1}

การผลิตรังสีทรานส์ชันแบบ coherent จากระบบผลิตอิเล็กตรอนของอาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง เบื้องต้นสามารถตรวจวัดสัญญาณของรังสีดังกล่าว (ภาพประกอบที่ 2.5.3) ที่ผ่านออกมาจาก polyethylene window ได้ โดยใช้ pyroelectric detector ทำหน้าที่เป็นหัววัดรังสี ณ อุณหภูมิห้อง



ภาพประกอบที่ 2.5.3 แสดงสัญญาณของรังสีได้แก่งาน โกลที่ตรวจวัดได้
โดยใช้ pyroelectric detector

ผลจากการตรวจวัดสัญญาณของรังสีได้แก่งาน โกลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความยาวของหัวพัลส์ที่เป็นแหล่งกำเนิดของรังสีจะต้องสั้นพอ (น้อยกว่า 10 picosecond) ที่จะผลิตรังสีย่านดังกล่าวในลักษณะ coherent อย่างไรก็ตามการตรวจวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีที่ผลิตได้จะสามารถให้ข้อมูลลำอิเล็กตรอนเกี่ยวกับความยาวพัลส์ได้ชัดเจนมากขึ้น

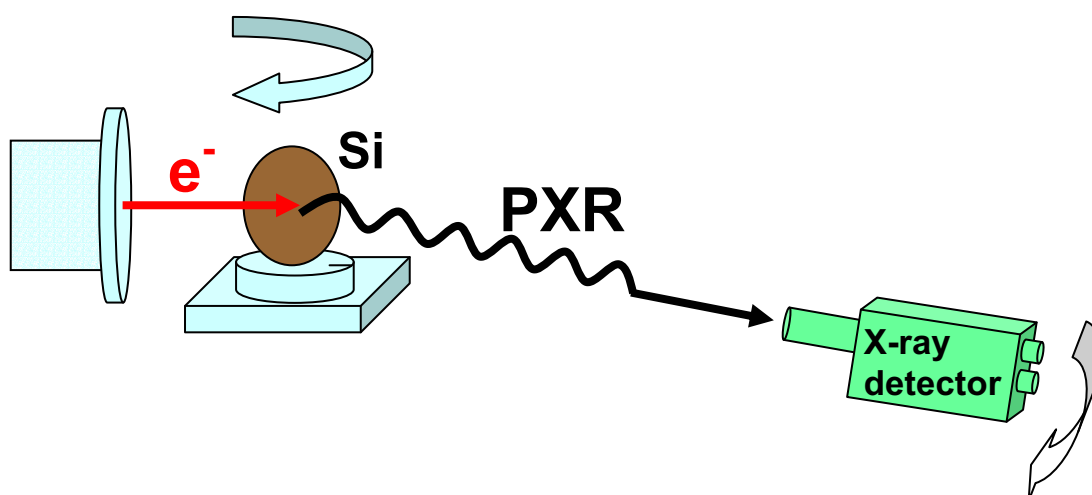
2.6 สถานีทดลองและการทดลองผลิตรังสีเอ็กซ์จากลำอิเล็กตรอนหัวสั้น

รังสีเอ็กซ์สามารถผลิตได้โดยบังคับให้อนุภาคมีประจุวิ่งเข้าชนเป้า เป้าลักษณะต่างๆจะให้รังสีเอ็กซ์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน สำหรับโครงการสุริยา จะใช้อิเล็กตรอนที่ผลิตได้จากเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นในการผลิต โดยพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผลิต จะอยู่ในช่วงประมาณ 15 - 20 MeV ซึ่งเพียงพอที่จะใช้ผลิตรังสีเอ็กซ์

สำหรับกระบวนการที่เลือกใช้ผลิตรังสีเอ็กซ์นั้น เลือกใช้กระบวนการผลิตรังสีพาราเมตริกซ์เอ็กซ์ Parametric X-ray Radiation (PXR) เนื่องจากรังสีเอ็กซ์ที่ผลิตได้ สามารถปรับค่าพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง รังสีเอ็กซ์ที่แผ่ออกมา มีการกระจายเชิงมุมแคบ และไม่ต้องการอนุภาคพลังงานสูงในการผลิต เนื่องจากพลังงานของรังสีเอ็กซ์ไม่ขึ้นกับพลังงานของอนุภาคที่วิ่งเข้าชนเป้า แต่ขึ้นกับการจัดวางเป้าและหัววัด

2.6.1 การออกแบบชุดทดลอง

ได้ออกแบบชุดทดลองสำหรับผลิตรังสีเอ็กซ์จากลำอิเล็กตรอน ในรูปแบบของรังสีพาราเมตริกซ์เอ็กซ์ ภาพประกอบที่ 2.6.1 แสดงผังไออะแกรมของชุดทดลอง ซึ่งจะผลิตรังสีดังกล่าวในความดันบรรยากาศโดยใช้อิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านแผ่นสแตนเลสบางออกจากระบบสุญญากาศ ณ ส่วนปลายสุดของ Beam line เข้าชนเป้าที่เป็น ผลึกซิลิกอนที่วางอยู่บนฐานซึ่งสามารถปรับมุมได้



ภาพประกอบที่ 2.6.1 ไออะแกรมของชุดทดลองสำหรับผลิตรังสีพาราเมตริกซ์เอ็กซ์จากลำอิเล็กตรอน

2.6.2 อุปกรณ์และสถานีทดลอง

เบื้องต้น ได้จัดเตรียม อุปกรณ์ต่อไปนี้ เพื่อสร้างสถานีทดลอง

ก). ชุดหัววัดรังสีเอ็กซ์

ประกอบด้วย หัววัดรังสี Amptek XR-100CR เป็นหัววัดแบบ Si-PIN วัดพลังงานได้ในช่วง 1.5-30 keV มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณ Amptek PX2CR ซึ่งจ่ายไฟให้หัววัดด้วย ในส่วนของการเก็บ

ข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ใช้ Amptek MCA8000A เป็นตัวส่งข้อมูลสู่คอมพิวเตอร์ และใช้โปรแกรมของ Amptek ในการเก็บบันทึกข้อมูล (ภาพประกอบ 2.6.2 ก)

ข). ชุดกำบังรังสีของหัววัดและอุปกรณ์ขยายสัญญาณ

บริเวณเครื่องเร่งอนุภาคจะมีรังสีเอกซ์พลังงานสูงเกิดขึ้นมาก ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อชุดหัววัดรังสีเอกซ์จึงได้เตรียมชุดกำบังรังสีสำหรับหัววัด โดยเจาะก้อนตะกั่วเป็นโพรงขนาดพอดีแล้วนำมากครอบหัววัดได้โดยมีรูเปิดในตำแหน่งที่จะวัดรังสี ส่วนอุปกรณ์ขยายสัญญาณป้องกันรังสีโดยใช้ตะกั่วก้อนก่อนเป็นกำบัง (ภาพประกอบ 2.6.2 ข)

ค). ตัวจับเป้า

ตัวล็อกเป้านั้นทำจากอลูมิเนียมตัดเป็นวงแหวนสองวงสำหรับยึดเป้าที่มีลักษณะเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ตัวล็อกจะวางบนพลาสติกกรุปครึ่งวงกลมซึ่งยึดอยู่กับฐานใน Rotation stage (ภาพประกอบ 2.8.2 ค)

ง). Rotation stage และ ชุดควบคุมการหมุนของเป้า

ตัวจับจะยึดเป้าอยู่บน Rotation stage ซึ่งหมุนได้เป็นมุมประมาณ 20 องศา ขับเคลื่อนด้วย stepping มอเตอร์ผ่านชุดควบคุม (ภาพประกอบ 2.6.2 ง)

จ). ชุด Support แบบหมุนด้วยเฟือง และ ชุดควบคุมการหมุนของหัววัด

ชุด Support ทำจากเหล็กมีคานยาวประมาณ 1 เมตร ปลายคานจะเป็นที่วางหัววัด ในการหมุนขับเคลื่อนด้วย stepping มอเตอร์ โดยมีเฟืองและตัวหนอนเพื่อทดกำลังให้กับมอเตอร์

ฉ). โปรแกรมควบคุมตำแหน่งของเป้าและหัววัด

การหมุนของเป้าและหัววัด ควบคุมผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในชุดควบคุม stepping มอเตอร์ ทั้งสอง

ช). Current transformer

อุปกรณ์สำหรับวัดกระแสของอิเล็กตรอน มีลักษณะเช่นเดียวกับอุปกรณ์วัดกระแสสำหรับส่วนอื่น ๆ ของ beam line (ดังรายละเอียดใน 2.3.7.2) ตัวแกนผลิตจากสารเฟอร์ไรต์ พันด้วยสายทองแดงหุ้มฉนวน 16 รอบ ติดตั้งอยู่ท้าย Beam line ต่อจากแผ่นสแตนเลส



ภาพประกอบที่ 2.6.2 อุปกรณ์ สำหรับสถานีทดลองผลิตรังสีรังสีเอ็กซ์ (ก) ชุดหัววัดรังสีเอ็กซ์ Amptek XR-100CR (ข) ชุดก้ามบังรังสีของหัววัด (ค) Rotation stage และ stepping มอเตอร์1 (ง) ชุดควบคุมการหมุนของเป้า (จ) Rotation stage และ ชุดควบคุมการหมุนของเป้า ที่ติดตั้งบน Support แบบหมุนด้วยเฟือง และ ชุดควบคุมการหมุนของหัววัด (ฉ) โปรแกรมควบคุมตำแหน่งของเป้าและหัววัด

ซ). ฉากเรืองแสง

อุปกรณ์สำหรับวัดตำแหน่งของลำอิเล็กตรอนและรังสีเอกซ์ โดยทำจากแผ่นอลูมิเนียมฉาบด้วยสารเรืองแสง เมื่อลำอิเล็กตรอนหรือรังสีเอกซ์ตกกระทบฉากจะเกิดการเรืองแสงขึ้น ภาพของฉากจะถูกจับด้วยกล้องวงจรปิดและแสดงผลบนจอภาพหรือคอมพิวเตอร์ในห้อง control

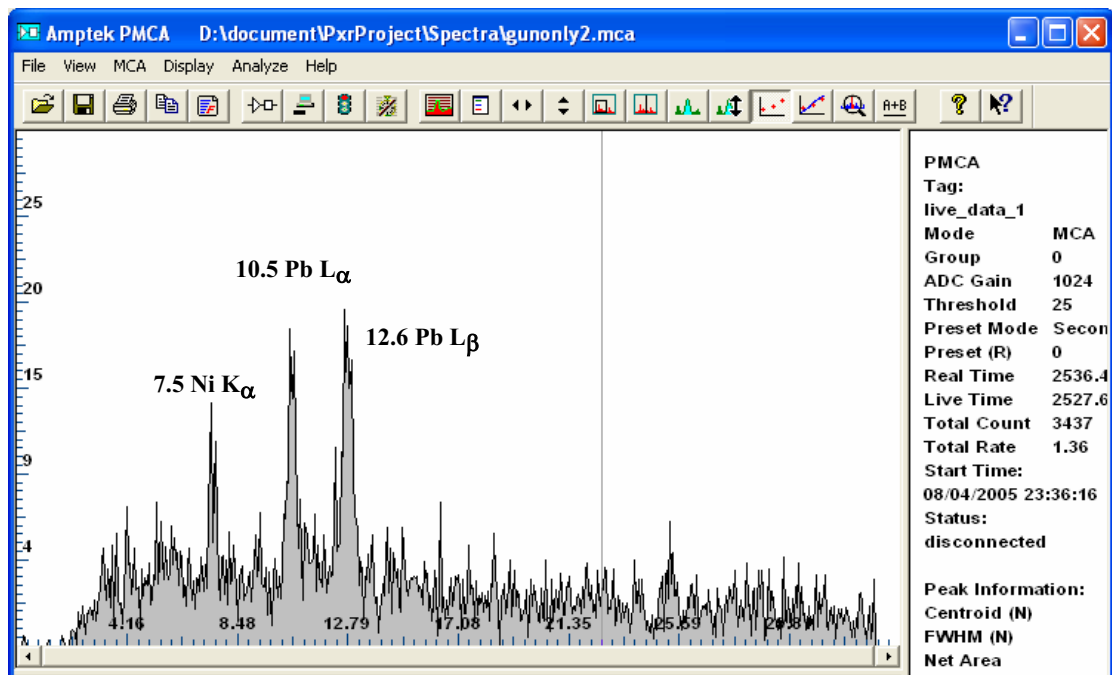


ภาพประกอบที่ 2.6.3 สถานีทดลองผลิตรังสีรังสีเอกซ์ที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว
(ในภาพไม่ได้แสดงส่วนของหัววัด)

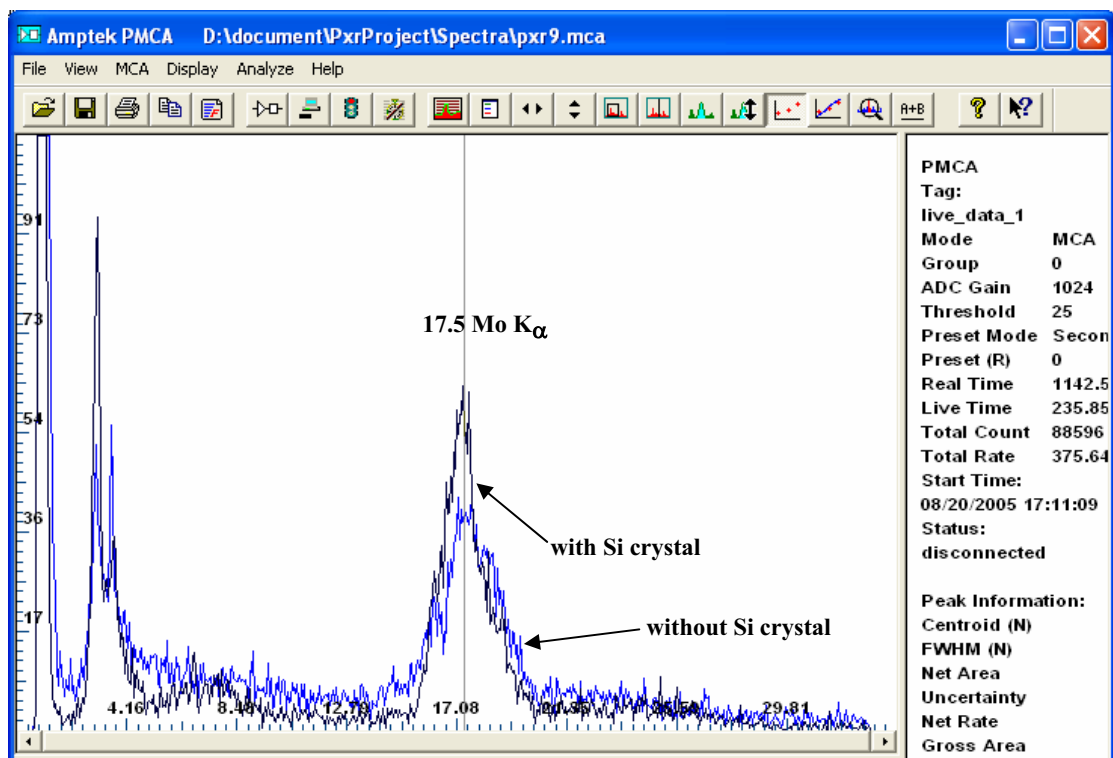
2.6.3 ผลการทดลองผลิตรังสีเอกซ์

เมื่อนำลำอิเล็กตรอนพุ่งตรงออกมาจากหน้าต่างสแตนเลส ตรวจพบการเรืองแสงของฉากเรืองแสง โดยตำแหน่งที่เกิดการเรืองแสงอยู่ห่างจากตำแหน่งของลำอิเล็กตรอน มากกว่า 7 เซนติเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการผลิตรังสีเอกซ์จากลำอิเล็กตรอน

หากวิเคราะห์ถึงการเกิดของรังสีเอกซ์จากลำอิเล็กตรอนดังกล่าว พบว่า น่าจะเป็นรังสีเอกซ์จาก Bremsstrahlung ซึ่งเกิดขณะอิเล็กตรอนชนวัสดุต่าง ๆ (vacuum chamber, accelerating structure, window, etc.) โดยรังสีเอกซ์ Bremsstrahlung จะมีพลังงานลิมิตที่พลังงานของอิเล็กตรอน (15 -20 MeV) ได้ทำการวัดสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ด้วย หัววัดรังสีเอกซ์ Amptek XR-100CR ซึ่งสามารถวัดได้เฉพาะช่วงพลังงาน 1-30 keV โดยวัดสเปกตรัมขณะที่ไม่ได้เร่งพลังงานอิเล็กตรอนด้วยเครื่อง linac ซึ่งจะให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงสุดไม่เกิน 3 MeV (ภาพประกอบที่ 2.6.4) และวัดสเปกตรัมขณะเร่งพลังงานอิเล็กตรอนด้วยเครื่อง linac (ภาพประกอบที่ 2.6.5)



ภาพประกอบที่ 2.6.4 สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ขณะผลิตอิเล็กตรอนพลังงาน 3 MeV



ภาพประกอบที่ 2.6.5 สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ขณะผลิตอิเล็กตรอนพลังงาน 15-20 MeV

การวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีทำได้ยากเนื่องจากมีรังสีเอ็กซ์พลังงานสูงจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม ก็ดี สเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ในช่วง 1-30 keV ที่ตรวจวัดได้พบว่าเป็นรังสีเอ็กซ์ characteristic [19] ที่น่าจะเกิดจากการกระตุ้นวัสดุที่มีอยู่ในบริเวณห้องเครื่องเร่งให้อยู่ในสถานะกระตุ้น ด้วยรังสีเอ็กซ์ Bremsstrahlung พลังงานสูง โดยพบรังสีเอ็กซ์ characteristic K_{α} ของ นิกเกิล L_{α} และ L_{β} ของ ตะกั่ว เมื่อผลิตอิเล็กตรอนพลังงานต่ำกว่า 3 MeV เมื่อผลิตและเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงาน 15-20 MeV จะพบรังสีเอ็กซ์ characteristic K_{α} ของ โมลิบดีนัม ทั้งขณะมีและไม่มีผลึกของซิลิกอนวางไว้ตรงปลายของ Beamline ทั้งนี้ยังไม่สามารถจำแนกรังสี พารามเมตริกซ์เอ็กซ์จากสเปกตรัมที่วัดได้

3 สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการผลิตรังสีเอ็กซ์จากลำอิเล็กตรอน พบว่ารูปแบบของรังสีพาราเมตริกซ์เอ็กซ์ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนความเร็วสูงเคลื่อนที่ผ่านผลึก เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตรังสีเอ็กซ์ห้วงสั้น เนื่องจากความยาวพัลส์ของรังสีจากปรากฏการณ์ดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยความยาวพัลส์ของลำอิเล็กตรอน อีกทั้งพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับทิศทางของลำอิเล็กตรอนและระนาบของผลึก ไม่ได้ขึ้นอยู่กับพลังงานของลำอิเล็กตรอน ทำให้สามารถผลิตรังสีเอ็กซ์ที่เลือกความถี่ได้ (tunable) สำหรับลำอิเล็กตรอนพลังงาน 15-20 MeV ผลการคำนวณ แสดงให้เห็นว่า สามารถที่จะผลิตรังสีพาราเมตริกซ์เอ็กซ์ช่วงพลังงาน 10 - 35 keV ได้ ที่มุมสังเกตในช่วง 10 - 45 องศา

ระบบผลิตลำอิเล็กตรอนห้วงสั้น (ห้วงเฟมโตวินาที) ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก คือ ปืนอิเล็กตรอนแบบ RF (RF-gun), แม่เหล็กบีบแบบแอลฟา, เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น, ระบบจ่าย RF สำหรับ RF-gun และเครื่องเร่ง linac , ระบบโฟกัสลำอิเล็กตรอน และ ระบบสุญญากาศ ใช้หลักการควบคุมและบีบการกระจายตัวของลำอิเล็กตรอนตามแนวยาวด้วย สนาม RF ใน RF-gun และสนามแม่เหล็กในแม่เหล็กแบบแอลฟา พบว่า กระแสสูงสุดที่ผลิตได้จาก RF-gun มีค่าประมาณ 1 A เมื่อใช้กำลังของคลื่น RF ที่สำหรับปืนอิเล็กตรอนประมาณ 3.5 MW และเมื่อส่งลำอิเล็กตรอนนี้ผ่านแม่เหล็กแบบแอลฟาแล้วพบว่ากระแสของลำอิเล็กตรอน ลดลงเหลือประมาณ 300-500 mA เนื่องจากมีการกรองเอาเฉพาะอิเล็กตรอนพลังงานที่ต้องการออกมา โดยอิเล็กตรอนที่ออกมาจาก RF-gun มีค่าพลังงานสูงสุดประมาณ 3 MeV ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นสามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงาน 15-17 MeV โดยมีค่ากระแสของอิเล็กตรอนหลังการเร่งพลังงานประมาณ 100-160 mA ผลการวัดปริมาณรังสีบริเวณข้างเคียง (radiation survey) ยืนยันผลการเร่งอนุภาคเนื่องจากบางบริเวณตรวจพบปริมาณรังสีมาก สามารถตรวจวัดสัญญาณของรังสีได้แดงย่านไกลที่ผลิตจากลำอิเล็กตรอนในรูปของรังสี

ทรานสิชัน ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความยาวของห้วงอิเล็กตรอนที่เป็นแหล่งกำเนิดของรังสีจะต้องสั้นพอ (น้อยกว่า 10 picosecond) ที่จะผลิตรังสีย่านดังกล่าวในลักษณะ coherent ได้

สถานีทดลองรังสีเอ็กซ์ประกอบด้วย ชุดหัววัดรังสีเอ็กซ์ Amptek XR-100CR พร้อมชุดกำลังรังสีของหัววัด ระบบควบคุมการหมุนของเป้าและหัววัด อุปกรณ์สำหรับวัดกระแสของอิเล็กตรอน และฉากเรืองแสง เมื่อนำลำอิเล็กตรอนพุ่งตรงออกมาจากหน้าต่างสแตนเลส ตรวจพบการเรืองแสงของฉากเรืองแสงจากรังสีเอ็กซ์ การวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ ตรวจพบ characteristic K_{α} ของ นิกเกิล L_{α} และ L_{β} ของ ตะกั่ว เมื่อผลิตอิเล็กตรอนพลังงานต่ำกว่า 3 MeV เมื่อ

ผลิตและเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงาน 15-20 MeV จะพบรังสีเอ็กซ์ characteristic K_{α} ของโมลิบดีนัม ยังไม่สามารถจำแนกรังสีฟาราเมตริกซ์เอ็กซ์จากสเปกตรัมที่วัดได้ รังสีเอ็กซ์จาก Bremsstrahlung และ characteristic ต่างๆ ที่ปรากฏในสเปกตรัมนี้จะกำจัดได้โดยการเพิ่มระบบ gate เข้าไปในระบบ อิเล็กทรอนิกส์ของหัววัด ทั้งนี้การที่ไม่สามารถตรวจพบรังสีฟาราเมตริกซ์เอ็กซ์ อาจจะมีสาเหตุมาจากการที่ลำอิเล็กตรอนกระเจิงผ่านหน้าต่างสแตนเลสทำให้มีมุมกระเจิงและมีขนาดตามขวางของลำอิเล็กตรอนใหญ่ มุมของรังสีฟาราเมตริกซ์เอ็กซ์ที่เกิดขึ้นไม่ตรงกับมุมของหัววัด ควรจะมีการวิเคราะห์คุณสมบัติของลำอิเล็กตรอนขณะตกกระทบเป้าเพิ่มเติม

บรรณานุกรม

- [1] Y. Muroya et. al., “Ultra-fast Pulse Radiolysis System Combined with a Laser Photocathode RF Gun and a Femtosecond laser.”, Nucl. Inst. Meth. A **489** (2002) 554-562.
- [2] A. H. Zewail et. al., “Direct Imaging of Transient Molecular Structures with Ultrafast Diffraction.”, Science **291**(2001) 462.
- [3] X. Qu et. al., “ The Anticancer Drug-DNA Complex: Femtosecond Primary Dynamics for Anthracycline Antibiotics Function.”, PNAS **98**(25) (2001) 14212-14217.
- [4] S. K. Pal et. al., “ Biological water at the protein surface: Dynamical Solvation Probed Directly with Femtosecond Resolution.”, PNAS **99**(4) (2002) 14212-14217.
- [5] A.H. Chin et. al., “ Ultrafast Structural Dynamics in InSb Probed by Time-Resolved X-Ray Diffraction.”, Phys. Rev. Lett. **83**(2) (1999) 336-339.
- [6] P. Rullhusen, X. Artru and P. Dhez., “*Novel Radiation Sources Using Relativistic Electrons*”, World Scientific, Singapore, 1998.
- [7] A.V. Schagin, et.al., “Parametric X-Ray Radiation from Relativistic electrons in a crystal.”, Nucl. Inst. Meth. B **99** (1995) 277-280.
- [8] R.B. Fiorito, et.al., “ Obseravtion of Higer Order Parametric X-Ray Spectra in Mosaic Graphite and Single Silicon Crystals.”, Phys. Rev. Lett. **71**(5) (1993) 704-707.
- [9] T. Akimoyo et. al., “Generation and Use of Parametric X-rays with an electron linear accelerator.” Nucl. Inst Meth. A **459** (2001) 18-86.
- [10] B. Sones et. al., “Advances in Parametric X-ray Production at the RPI Linear Accelerator.”, Proceedings of ANS Annual Meeting, San Diego, California, June 2003.
- [11] A. V. Shchagin et.al., Phys. Lett. A, **148** (1990)485.
- [12] X-ray Fluorescence, Amptek Application Note, <http://www.amptek.com/appnotes.html>, 2004.
- [13] S. Rimjaem et. al., “Femtosecond Electron Bunches from an RF-gun.”, Nucl. Inst. Meth. A **533** (2004) 258-269.
- [14] Jatuporn Saisut, “ *Design and Construction of Alpha Magnet.*”, Ph.D. thesis, Chiang Mai University , 2001.
- [15] T. Nakazato et. al., Phys. Rev. Lett. **63** (1989) 1245.
- [16] E. Blum, U. Happek, and A. J. Sievers, Nucl. Inst Meth A **307** (1991) 568.

- [17] P. Kung et al, Proceeding SPIE **2118** (1994) 191
- [18] C. Settakorn et.al., "Coherent Far-Infrared Radiation From Electron Bunches", Proceeding of the First Asian Particle Accelerator Conference (APAC98) Tsukuba, Japan, 1998.
- [19] X-Ray data booklet , LBNL/PUB-490 Rev.2, January 2001.

ภาคผนวก

Output ที่ได้จากโครงการ

1. S. Rimjaem, R. Farias, C. Thongbai, T. Vilaithong and H. Wiedemann.
“Femtosecond Electron Bunches from an RF-gun.”,
Nuclear Instruments and Methods A, Vol. 533 , 2004, pp. 258-269.
2. C. Thongbai, V. Jinamoon, N. Kangrang, K. Kusoljariyakul, S. Rimjaem, J. Saisut,
T. Vilaithong, M.W. Rhodes, P. Wichaisirimongkol and S. Chumphongphan.,
“Radiation Production Using Femtosecond Electron Bunches.”,
Solid State Phenomena, Vol.107, 2005, pp. 11-14
3. C. Thongbai, V. Jinamoon, N. Kangrang, K. Kusoljariyakul, S. Rimjaem, J. Saisut,
T. Vilaithong, M.W. Rhodes, P. Wichaisirimongkol and H. Wiedemann.,
“Generation of Femtosecond Electron and Photon Pulses.”,
Presented at Particle Accelerator Conference (Pac2005), May 17-21, 2005, Tennessee, USA.