



โครงการการพัฒนาระบบการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประกอบระบบประเมิน
คุณลักษณะเชิงผิวของวัสดุ โดยวิธีกระดอนกลับของไอออนพลังงานกลางๆ

โดย ดร. สมศักดิ์ แดงดีบ และคณะ

มิถุนายน ๒๕๔๖



โครงการการพัฒนากระบวนการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประกอบระบบประเมิน
คุณลักษณะเชิงผิวของวัสดุ โดยวิธีกระดอนกลับของไอออนพลังงานกลางๆ

โดย ดร. สมศักดิ์ แดงดีบ และคณะ

มิถุนายน ๒๕๔๖

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาระบบการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประกอบระบบประเมิน
คุณลักษณะเชิงผิวของวัสดุ โดยวิธีกระดอนกลับของไอออนพลังงานกลางๆ

คณะผู้วิจัย

- 1) อ. ดร. สมศักดิ์ แดงดี
- 2) ศ. ดร. ถิรพัฒน์ วิสัยทอง
(นักวิจัยพี่เลี้ยง)

สังกัด

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพัฒนาระบบการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประกอบระบบประเมินคุณลักษณะเชิงผิวของวัสดุ โดยวิธีกระดอนกลับของไอออนพลังงานกลาง ๆ ได้ดำเนินไปด้วยดีด้วยความร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณ ขอบคุณ ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

รศ. ดร. สมพร สิงขรัตน์ และ คุณสมใจ ชื่นเจริญ ที่ได้ให้โอกาสเข้าร่วมการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประกอบระบบประเมินคุณลักษณะเชิงผิวของวัสดุโดยวิธีกระดอนกลับของไอออนไอวเทอร์อนพลังงาน 140 keV ด้วยเทคนิค TOF-RBS และ พร้อมด้วยคุณโหม ทองเหลือง และคุณธีระศักดิ์ คำวรรณะ สำหรับการเก็บข้อมูลของการประเมินคุณลักษณะเชิงผิวของวัสดุโดยวิธีกระดอนกลับของไอออนฮีเลียม (He^{++}) พลังงาน 2.1 MeV ด้วยเทคนิค RBS แบบฉบับ

อ.ดร.คุณฤ สุวรรณขจร Dr. Laszlo Bartha ผศ. ดร.ธีรวรรณ บุญญวรรณ อ.ชาญชัย เศรษฐธรรมศักดิ์ คุณพิมพ์พร จันทร์ผง และคุณบัญญัติ เล็กประเสริฐ สำหรับการร่วมงานเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเครื่องเร่งอนุภาค ขนาด 150 kV ให้เป็น 350 kV และพร้อมด้วย Mr. Michael Rhodes คุณวิฑูร จินะมูล และคุณ "กานต์" คำสุข สำหรับการประเมินคุณลักษณะแหล่งกำเนิดไอออนแบบ กลีบมะเฟือง การร่วมพัฒนาระบบ Beam Profile การเชื่อมต่อกับระบบ คอมพิวเตอร์

คุณพีระพงษ์ มั่นหมาย ที่ได้ช่วยเก็บข้อมูลการทดลองศึกษาปรากฏการณ์ Doppler ในระบบไอวเคลียร์ จากแหล่งกำเนิดนิวตรอน Am-Be

Mr. Michael Rhodes คุณเสนีย์ มาลีพัตร และ คุณปิยะ ผ่านศึก สำหรับการดูแลเรื่องระบบคอมพิวเตอร์ ตลอดถึงการติดตั้งโปรแกรมที่จำเป็นต้องใช้ในเก็บและการวิเคราะห์ข้อมูล

คุณสุภัทนา ปิงประเสริฐ (ธารารักษ์) เจ้าหน้าที่การเงินของโครงการ ที่ได้ดูแลการเงินและบัญชีของโครงการให้เป็นไปด้วยความเรียบร้อย คุณกุศมาลย์ เศรษฐธรรมรงค์ ที่ช่วยดูแลงานเอกสารและการจัดต่อประสานงาน คุณสาริกา จันดา สำหรับงานพัสดุ และการสั่งซื้อของ

คุณสุวิชา รัตนรินทร์ และคุณวิฑูร อะโน สำหรับงานด้านเทคนิคและงานช่างระหว่างการเดินเครื่องเร่งอนุภาคและการประเมินคุณลักษณะแหล่งกำเนิดไอออนแบบกลีบมะเฟือง

คุณราเชนทร์ เจริญนุกูล คุณทองสุข กลัดภิรมย์ และคุณสันติศักดิ์ คำสุข สำหรับการขึ้นรูป และการกลึงวัสดุอุปกรณ์และชิ้นงาน

บทคัดย่อ

ระบบเก็บข้อมูลจัดเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญของการทดลองทางฟิสิกส์นิวเคลียร์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สนใจ และนำไปวิเคราะห์ต่อไป การเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองประเมินคุณลักษณะเชิงผิวของวัสดุโดยวิธีกระดอนกลับ (Rutherford Backscattering Spectrometry, RBS) ที่อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ได้นำเอาระบบเก็บข้อมูลแบบหลายตัวแปร MPA-3 Multi-parameter System มาใช้ ข้อมูลที่ดี จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยชุดโปรแกรมเฉพาะเช่น PAW หรือ ROOT

การพัฒนาการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลในโครงการฯ นี้ รวมการออกแบบระบบเก็บข้อมูลและการทดสอบแบบหลายตัวแปร โดยใช้ (ก) การศึกษาปรากฏการณ์ Doppler Effect จากแหล่งกำเนิดรังสี Am-Be (ข) การเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลจากการใช้เครื่องเร่งอนุภาคผลิตไอออนดิวเทรอนพลังงาน 140 keV ทดลองกระดอนกลับจากผิวของซิลิกอน ที่มีฟิล์มบางของทองและทองแดงเคลือบฝัง เพื่อประเมินคุณลักษณะเชิงผิวของซิลิกอน และ (ค) การทดลอง RBS ของไอออนฮีเลียม (He^{++}) พลังงาน 1 MeV บนผิวของซิลิกอน ที่มีฟิล์มบางของทอง เงิน ทองแดงหรือ นิกเกิล เคลือบอยู่ พบว่าระบบเก็บข้อมูลสามารถทำงานได้ดีทั้งสามกรณี เอื้อต่อการวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นตอนถัดไปเป็นอย่างดี นอกจากนี้วิจัยยังได้เข้าร่วมปรับปรุงแหล่งกำเนิดไอออนแบบกัลลิยมเพื่อที่จะมาทดแทนแหล่งกำเนิดไอออนดิวเทรอนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน อันเป็นส่วนหนึ่งของการเพิ่มพลังงานของดิวเทรอนให้สูงขึ้น

Abstract

Data acquisition system is an important part in Nuclear Physics experiments. It is necessary for acquiring data for further detailed off-line analyses. At Fast Neutron Research Facility, Chiang Mai University, we have employed the MPA-3 multi-parameter system for acquiring data in surface analysis experiments with Rutherford backscattering spectrometry (RBS) technique. Experimental data are further analyzed with some specific programmes such as PAW or ROOT.

Development of data acquisitions and analyses in this project includes to design and to test the multi-parameter acquisition system in (i) a study of Doppler effect in an Am-Be source, (ii) an acquisition and analysis of TOF-RBS experiments with 140-keV deuterons on Au-Cu thin-film coated on silicon substrates (iii) RBS experiment with 2.1-MeV He^{++} on Au-Ag-Cu or Ni coated on silicon substrates. It has been found that MPA-3 has worked well in all cases and has well facilitated for further analyses. Besides, the researcher has also participated in characterization of a multi-cusp ion source, which will replace the current RF-ion source. The new ion source will be used in a new 350 kV accelerator to increase energy of deuterons.

Keywords: Multi-parameter Acquisition system MPA-3, TOF-RBS, Multicusp Ion-source

Executive Summary

ในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูงได้นำระบบเก็บข้อมูลแบบหลายตัวแปร IPA-3 Multiparameter System ของบริษัท FAST ComTec แห่งประเทศเยอรมันเพื่อนำมาใช้ประกอบระบบประเมินคุณลักษณะเชิงผิวของวัสดุโดยวิธีกระดอนกลับของไอออนพลังงานกลาง ๆ หรือเทคนิค Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS)

การกระดอนกลับแบบรัทเธอร์ฟอร์ด (RBS) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน อาจใช้เครื่องเร่งชนิดแวน จอร์กราฟ ทำหน้าที่เร่งอนุภาคกระสุนมวลหนัก เช่น ^4He ให้มีพลังงานไม่น้อยกว่า 1 MeV ที่รู้จักกันว่า เทคนิค RBS แบบฉบับ (Conventional RBS) หรืออาจใช้อนุภาคกระสุนที่พลังงานต่ำกว่า 1 MeV แต่มีลักษณะที่เป็นพัลส์ (pulsed beam) เป็นการนำเทคนิค RBS ร่วมกับเทคนิค TOF ที่รู้จักกันในนาม TOF-RBS โครงการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลฯ เลือกใช้วิธีการที่สอง

การดำเนินการของโครงการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลฯ ประกอบด้วยออกแบบวิธีการเก็บข้อมูล โดยใช้ระบบเก็บข้อมูล MPA-3 ที่มีอยู่แล้ว ณ อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูงและทดสอบโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีและไม่ใช่เครื่องเร่งอนุภาคซึ่งได้เสร็จสิ้นตามที่วางไว้

การดำเนินการขั้นถัดไปของโครงการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลฯ นั้น คือการทดสอบระบบเก็บข้อมูลกับคิวเทอรอนที่หลากหลาย ๆ ค่าพลังงาน โดยเริ่มต้นที่พลังงาน 140 keV การดำเนินการได้เสร็จสิ้นตามที่วางไว้ ส่วนการผลิตคิวเทอรอนที่พลังงานที่สูงขึ้นนั้นจำเป็นต้องอาศัยผลสำเร็จจากโครงการปรับปรุงเครื่องเร่งอนุภาคขนาด 150 kV ให้เป็น 350 kV (โครงการนี้เป็นอีกโครงการหนึ่งที่แยกอิสระจากโครงการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลฯ นี้) ความคาดหวังเมื่อเริ่มต้นโครงการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลฯ ว่าโครงการปรับปรุงเครื่องเร่งอนุภาคจะเสร็จสิ้นภายในหัวปีแรกของโครงการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลฯ นี้ แต่โครงการปรับปรุงเครื่องเร่งอนุภาคได้ล่าช้าไปกว่าที่คาดหมาย จึงต้องอาศัย การประเมินคุณลักษณะแบบเชิงผิวของวัสดุ โดยวิธีกระดอนกลับของไอออน He^{++} พลังงาน ที่ค่อนข้างสูงขึ้นคือ 2.1 MeV เป็นแบบทดสอบ แทนซึ่งพบว่าระบบการเก็บข้อมูล MPA-3 สามารถทำงานได้เป็นอย่างดี

โครงการปรับปรุงขสมรรถนะ เครื่องเร่งอนุภาคขนาด 150 kV ให้เป็น 350 kV (ซึ่งผู้วิจัยได้มีส่วนร่วมในการปรับปรุง) จะผนวกส่วนที่ต้องทำขึ้นใหม่ ได้แก่ ภาคการผลิตไอออน ภาคการเร่งไอออนให้มีพลังงาน 350 keV ภาคระบบสุญญากาศ ภาคคัดแยกอนุภาคด้วยแม่เหล็ก และส่วนอื่นที่สามารถใช้ของเดิม การปรับปรุงได้ดำเนินไปล่าช้ากว่ากำหนดการที่วางไว้ อย่างไรก็ตามปัจจุบันได้ดำเนินถึงภาคการเร่งไอออน ๆ ให้มีพลังงานสูงกว่า 150 keV แล้ว

งานวิจัย

หลักการการวิเคราะห์โดยการกระดอนกลับ สามารถย้อนกลับไปยังต้นคริสต์ศตวรรษนี้ ถึงการเสนอแบบโครงสร้างอะตอม โดย Ernest Rutherford [1] แบบจำลองนี้ได้รับการยืนยันโดยการทดลองเพื่อวิเคราะห์ วัสดุของ H. Geiger และ E. Marsden ในปี พ.ศ. ๒๔๕๖ [2] อย่างไรก็ตาม ๔๐ ปีหลังจากนั้น เทคนิคนี้กลับได้เลือนหายไป จนกระทั่ง ในช่วงเปลี่ยนของปีทศวรรษที่ ๔๐ หรือ ๕๐ เมื่อ ฟิสิกส์นิวเคลียร์ และวิทยาศาสตร์ ได้รุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว ทุกวันนี้ วิธีการที่รู้จักกันในนาม Rutherford back scattering (RBS) ได้ถูกประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมืออันทรงประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผิวของแข็งและฟิล์มบาง [3,4]

หลักการของ RBS สามารถจะอธิบายได้ง่าย ๆ ว่าเมื่ออนุภาคกระสุนชนกับอะตอมของธาตุในเป้า และนำไปสู่การกระดอนกลับของอนุภาคกระสุน สเปกตรัมทางพลังงานของอนุภาคกระสุนที่กระดอนกลับและปริมาณของอนุภาคกระสุนที่นับได้ จะนำข้อมูลเช่น ชนิดและปริมาณของอะตอมในเป้าที่อนุภาคกระสุนวิ่งชน ตำแหน่งของอะตอมในเป้าจากผิวหน้าของอนุภาคกระสุนวิ่งชน เกี่ยวกับอะตอมของเป้าได้

การกระดอนกลับแบบรัทเธอร์ฟอร์ด (RBS) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน อย่างน้อยจะต้องใช้เครื่องเร่งชนิดแวนเดอร์กราฟ ทำหน้าที่เร่งอนุภาคกระสุนมวลหนัก เช่น ^4He ให้มีพลังงานไม่น้อยกว่า 1 MeV เนื่องจากการวิเคราะห์จำนวนปริมาณ และการกระจายด้านลึกของธาตุในสารตัวอย่างแบบไม่ทำลายรวดเร็ว มีความไวสูง และไม่ยุ่งยาก [5] โดยทั่วไปแล้วพลังงานของอนุภาคกระสุนในการวิเคราะห์แบบ RBS ถูกจำกัดอยู่ที่ย่าน 1-3 MeV ส่วนใหญ่เนื่องมาจากอำนาจการจําแนกทางพลังงานของหัววัดซิลิกอนแบบ Surface Barrier ตัวอย่างของระบบสเปกโตรเมตรีแบบนี้ในปัจจุบัน มีใช้งานอยู่ใน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมี เครื่องเร่งอนุภาคชนิดแวนเดอร์กราฟ แบบ Tandetron ขนาด 1.7 MV

ในความเป็นจริงแล้วสำหรับการทดลองบางอย่างการใช้อนุภาคกระสุนที่พลังงานต่ำลงจะมีข้อได้เปรียบกว่าหากเปรียบเทียบการกระดอนกลับของอนุภาคแอลฟาพลังงาน 2 MeV และ 200 keV ในกรณีเช่นนี้จะพบว่าค่า Cross section ในกรณีหลังจะสูงกว่ากรณีแรกเกือบร้อยเท่าในขณะที่การสูญเสียพลังงานจำเพาะจะใกล้เคียงกัน [6] ค่า Cross section ที่สูงขึ้นช่วยให้ความไวของการวัดที่ความเข้มของลำไอออนเท่ากันดีขึ้น เมื่อรวมกับค่าอำนาจจําแนกของระบบหัววัดแบบ Micro channel Plate (MCP) จะช่วยให้อำนาจจําแนกด้านลึก (depth resolution) ดีขึ้น

อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูงได้รับบริจาคเครื่องเร่งอนุภาคที่มีระบบผลิตหัวอนุภาคจาก AEA เพื่อผลิตรังสีนิวตรอนมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2527 ระบบผลิตหัวอนุภาคที่มีนั้น อาศัยการลับ (chop) แล้ว

บับห้วง (bunch) ตามความเร็ว ให้ลำอนุภาคคิวเทอรอนพลังงาน 140 keV ออกเป็นห้วงๆ (pulses) ที่ความกว้างในเรื่อนนาโนวินาที ที่พลั มาณต่ำ อนุภาคใช้เวลาในการเคลื่อนที่ค่อนข้างมากเพื่อผ่านระยะทางที่กำหนดทำให้เราสามารถใช้นิเทศนึ Time-of-flight (TOF) เข้ามาช่วยในการเพิ่มอำนาจจำแนกของระบบได้ ปัจจุบันอาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูงกำลังพัฒนาเครื่องกำเนิดอนุภาคนิวตรอนนี้ เพื่อปรับมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิค RBS ร่วมกับเทคนิค TOF ที่รู้จักกันในนาม TOF-RBS

เมื่อหัววัดถูกอนุภาคที่กระดอนกลับป้อน หัววัดจะสร้างสัญญาณทางไฟฟ้าขึ้น ซึ่งจะถูกขยายและแปลงค่า โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และถูกส่งต่อไปเครื่องวิเคราะห์ (Multichannel Analyzer MCA) เพื่อแปลงไปเป็นสเปกตรัม จนจัดได้เป็นระบบสเปกโตรเมตรีแบบหนึ่ง ทำให้กระบวนการนี้มีชื่อเรียกว่า Backscattering Spectrometry

การแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าจากหัววัดเพื่อนำแสดงในเครื่อง MCA ในขณะที่ทำการทดลองเป็นสิ่งที่จำเป็นไม่ว่าจะในแง่ของการปรับแต่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือเพื่อควบคุมความถูกต้องและความเสถียรของระบบการวัด (online monitoring) ขณะทำการทดลอง รวมถึงเพื่อบันทึกข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ในภายหลังด้วย การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นแบบง่าย ๆ ไม่ซับซ้อนก็สามารถจะกระทำได้ด้วย ในขณะที่เก็บข้อมูล อย่างไรก็ดี การวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายเพื่อการตีความในเชิงฟิสิกส์ในที่สุดนั้น จะต้องอาศัยกระบวนการที่ซับซ้อนมากขึ้น โดยทั่วไปมักจะเกินกำลังของระบบเก็บข้อมูล โปรแกรมคอมพิวเตอร์พิเศษหรือเฉพาะ จึงมักถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อการนี้

สำหรับระบบเก็บข้อมูลแบบหลายตัวแปร ที่มีใช้งานอยู่ ณ อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูงนั้น คือระบบ MPA-3 Multiparameter System ของบริษัท FAST ComTec แห่งประเทศเยอรมัน [6] จัดเป็นระบบ MCA ที่มีขีดความสามารถสูง ทั้งในเทอมของความไวในการรับส่งข้อมูล และความสามารถในการรองรับสัญญาณเข้า ที่สูงถึง ๑๖ ช่อง จากทั้ง อุปกรณ์ Analog-to-Digital Converter, อุปกรณ์ นับแบบหลายช่อง (Multiscalers) หรืออุปกรณ์ วัดเวลาบิน (Time-of-flight unit)

ข้อมูลที่ถูกบันทึกในรูปแบบของแฟ้มคอมพิวเตอร์นั้นจะประกอบด้วย ๒ แบบหลักคือ

๑) ข้อมูลแบบสเปกตรัม นั่นคือข้อมูลจะถูกคัดแยก จัดเรียงและนับตามตัวแปรที่เก็บ ตัวอย่างเช่นสเปกตรัมทางพลังงาน ระบบจะให้ข้อมูลทางด้านจำนวนของเหตุการณ์ที่พลังงานต่าง ๆ ข้อมูลแบบนี้ถือว่ามิใช่ข้อมูลดิบอีกต่อไป ด้วยว่าในการจัดการข้อมูลทีกล่าวนำแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในเหตุการณ์เดียวกันจะถูกไล่ไป ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จำเป็นสำหรับการตรวจสอบว่าเหตุการณ์ที่บันทึกนั้น เป็นสิ่งที่เราสนใจหรือไม่ การวิเคราะห์แบบละเอียดมากขึ้น จึงกระทำได้อย่างมาก

๒) ข้อมูลแบบทีละเหตุการณ์ (Event-by-event data or list file format) ข้อมูลนี้จัดเป็นข้อมูลดิบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใด ๆ ในระบบเก็บข้อมูล ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในเหตุการณ์เดียวกัน

ยังคงอยู่ การวิเคราะห์แบบละเอียดจึงเกิดขึ้นได้และสามารถจะกระทำซ้ำไปซ้ำมาได้ ข้อยุ่งยากในการจัดการข้อมูลประเภทนี้คือจำเป็นจะต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ต้องพัฒนามาก่อนข้างเฉพาะ

ด้วยเหตุที่ข้อมูลดิบถูกคัดจากระบบเดิม และถูกผ่านการจัดการโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นอีกต่อหนึ่ง การนำย้อนกลับไปที่เพื่อนำเสนอในรูปแบบที่ ๑ โดยใช้ระบบ MPA-3 จึงซับซ้อนมากเกินไป ปัญหาดังกล่าวเป็นที่ตระหนักกันเป็นอย่างดี ศูนย์กลางการวิจัยทางนิวเคลียร์ของยุโรป (CERN) จึงได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อรับมือกับปัญหานี้ ชุดแรกที่ได้พัฒนาขึ้นมาคือ Physics Analysis Workstation (PAW) [7] และชุดถัดมาคือ ROOT [8] โปรแกรมดังกล่าวมีขีดความสามารถที่จะให้ผู้ใช้คัดแยก หรือเลือกเอาเฉพาะเหตุการณ์ที่สนใจ (Graphical cuts) ได้เป็นอย่างดี รวมไปถึงความสามารถในการเปรียบเทียบกับการคำนวณ และการใช้งานแบบป्लอตค่าใช้จ่าย จึงส่งผลให้โปรแกรมดังกล่าวเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่นในงานของ Dangtip et al [9] โครงการวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บในแบบที่สอง รวมถึงโปรแกรมที่เชื่อมต่อกับโปรแกรมมาตรฐานที่กล่าวมา เช่น PAW หรือ ROOT

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาก่อนการใช้งานจริงนั้น สามารถจะกระทำได้โดยอาศัยตัวอย่าง การเก็บข้อมูลแบบหลายตัวแปร เช่น การวัดพลังงานและเวลาในการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐาน โดยใช้หัววัดสารอินทรีย์เรืองแสง หรือการวัดการจำแนกรังสีแกมมาออกจากนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดรังสีที่มีใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไป แบบฝึกหัดเหล่านี้จะเป็นตัวอย่างที่สำคัญ ประกอบกับระบบ RBS และหัววัดที่ใช้ใช้งานจริงนั้น ยังอยู่ในระหว่างการพัฒนาซึ่งจะต้องใช้เวลาอีกพอสมควร การใช้แบบฝึกหัดข้างต้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น

การดำเนินการขั้นแรกของโครงการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลฯ นั้นเพื่อออกแบบวิธีการเก็บข้อมูล โดยใช้ครุภัณฑ์หรือระบบเก็บข้อมูล MPA-3 ที่มีอยู่แล้ว ณ อาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูงและทดสอบ โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีและไม่ใช้เครื่องเร่งอนุภาคซึ่งได้เสร็จสิ้นตามที่วางไว้ รายละเอียดแสดงในหัวข้อที่ 1

การดำเนินการขั้นถัดไปของโครงการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลฯ นั้น เพื่อทดสอบระบบเก็บข้อมูลกับนิวตรอนที่หลาย ๆ ค่าพลังงาน โดยเริ่มต้นที่พลังงาน 140 keV การดำเนินการได้เสร็จสิ้นตามที่วางไว้ รายละเอียดแสดงดังหัวข้อที่ 2 การทดสอบระบบเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประกอบระบบประเมินคุณลักษณะเชิงผิวของวัสดุ โดยวิธีการคอนทักซ์ของไอออนพลังงานกลางๆ จึงต้องอาศัย การประเมินคุณลักษณะแบบเชิงผิวของวัสดุ โดยวิธีการคอนทักซ์ของไอออน He^{++} พลังงาน ที่ค่อนข้างสูงขึ้น คือ 2.1 MeV แทนซึ่งพบว่าระบบการเก็บข้อมูล MPA-3 ได้เป็นอย่างดี ดังรายละเอียดแสดงในหัวข้อที่ 3

ส่วนการผลิติวเทอรอนที่พลังงานที่สูงขึ้นนั้นจำเป็นต้องปรับปรุงเครื่องเร่งอนุภาคขนาด 150 kV ให้เป็น 350 kV (ซึ่งเป็นงานที่อยู่ในความรับผิดชอบของโครงการอื่น) ได้เคยหมายเมื่อเริ่มต้นโครงการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลว่าจะเสร็จสิ้นภายในห้วงปีแรกของโครงการนี้ แต่ได้ประสบปัญหาเรื่องความทรุดโทรมในหลาย ๆ ส่วนของเครื่องเร่งอนุภาคขนาด 150 kV ที่ต้องนำไปใช้งานต่อเนื่องไปในเครื่องที่ปรับปรุงแล้วด้วย อุปกรณ์เหล่านี้มีอายุการใช้งานมานานกว่า 10 ปี จึงต้องการอะไหล่ และการบำรุงรักษามาก แต่อะไหล่เหล่านั้นค่อนข้างจะหายากในปัจจุบัน (ปัญหานี้ได้กล่าวไว้ในรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 และ 3 แล้ว) จึงให้ลำไอออนที่มีคุณภาพไม่เสถียรนัก การปรับปรุง ขกสมรรถนะเครื่องเร่งนั้น ประกอบด้วยส่วนที่ต้องทำขึ้นใหม่ และส่วนที่สามารถใช้ของเดิม ส่วนแรกได้แก่ ภาคการผลิตไอออน ภาคการเร่งไอออนให้มีพลังงาน 350 keV ภาคระบบสุญญากาศ ภาคคัดแยกอนุภาคด้วยแม่เหล็ก การปรับปรุงได้ดำเนินถึงภาคที่สอง ด้วยกัน ซึ่งผู้วิจัยได้มีส่วนร่วมในการปรับปรุงด้วยดังรายละเอียดเสนอในส่วนที่ 4

1. การทดสอบระบบเก็บข้อมูลโดยใช้การทดลองศึกษาปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect)

(รายละเอียดและผลการวัดได้แสดงดังในภาคผนวกที่ 1)

การศึกษาการจำแนกรังสีแกมมาออกจากนิวตรอน ยังสามารถใช้เป็นแบบการทดลองเพื่อศึกษาเรื่องของ ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect) ในนิวเคลียสได้ด้วย [10] ระบบการวัดเพื่อการศึกษา ดังกล่าวนี้นี้คาดว่าจะสามารถจะประกอบขึ้นในห้องปฏิบัติการระดับโรงเรียนมัธยมศึกษาได้

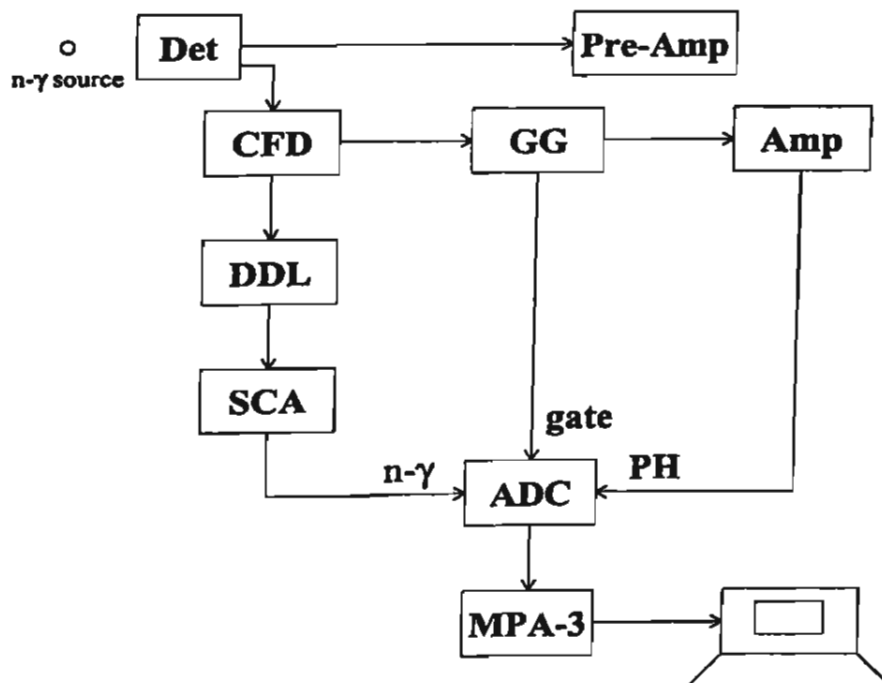
ในการทดลองทั่วไปที่ต้องอาศัยข้อมูลการทดลองปริมาณมากพอสมควร เพิ่มข้อมูลที่ใช้บันทึกผลการทดลอง จึงมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากเก็บข้อมูลในรูปรหัส ASCII ความพยายามทางหนึ่งเพื่อลดขนาดของข้อมูลที่เก็บคือการจัดเก็บข้อมูลในรูปรหัสฐานสอง (binary) และมีการกระบวนการถอดรหัสฐานสองกลับออกมาเป็นข้อมูลธรรมดา (text file) ในขั้นตอนการวิเคราะห์หลังการทดลอง (off-line analysis) ซึ่งมักรวมการจัดเรียง (sort) และการคัดเลือกเบื้องต้น (cut) เอาเฉพาะเหตุการณ์ที่สนใจ อันจะช่วยลดขนาดของเพิ่มข้อมูลลงได้

โดยอาศัยหลักความจริงที่สัญญาณที่เกิดจากรังสีแกมมากับนิวตรอนในหัววัดสารเรืองแสงเหลว มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน ความแตกต่างนี้จะถูกแยกแยะได้ด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วย อุปกรณ์เช่น Double Delay Line (DDL) และ Single Channel Analyzer (SCA) ผลของความแตกต่างของสัญญาณจากรังสีทั้งสองก่อให้เกิดการพาดผ่านเส้นศูนย์ (Zero cross-over) ของสัญญาณจากรังสีทั้งสอง ที่ตำแหน่งต่างกัน

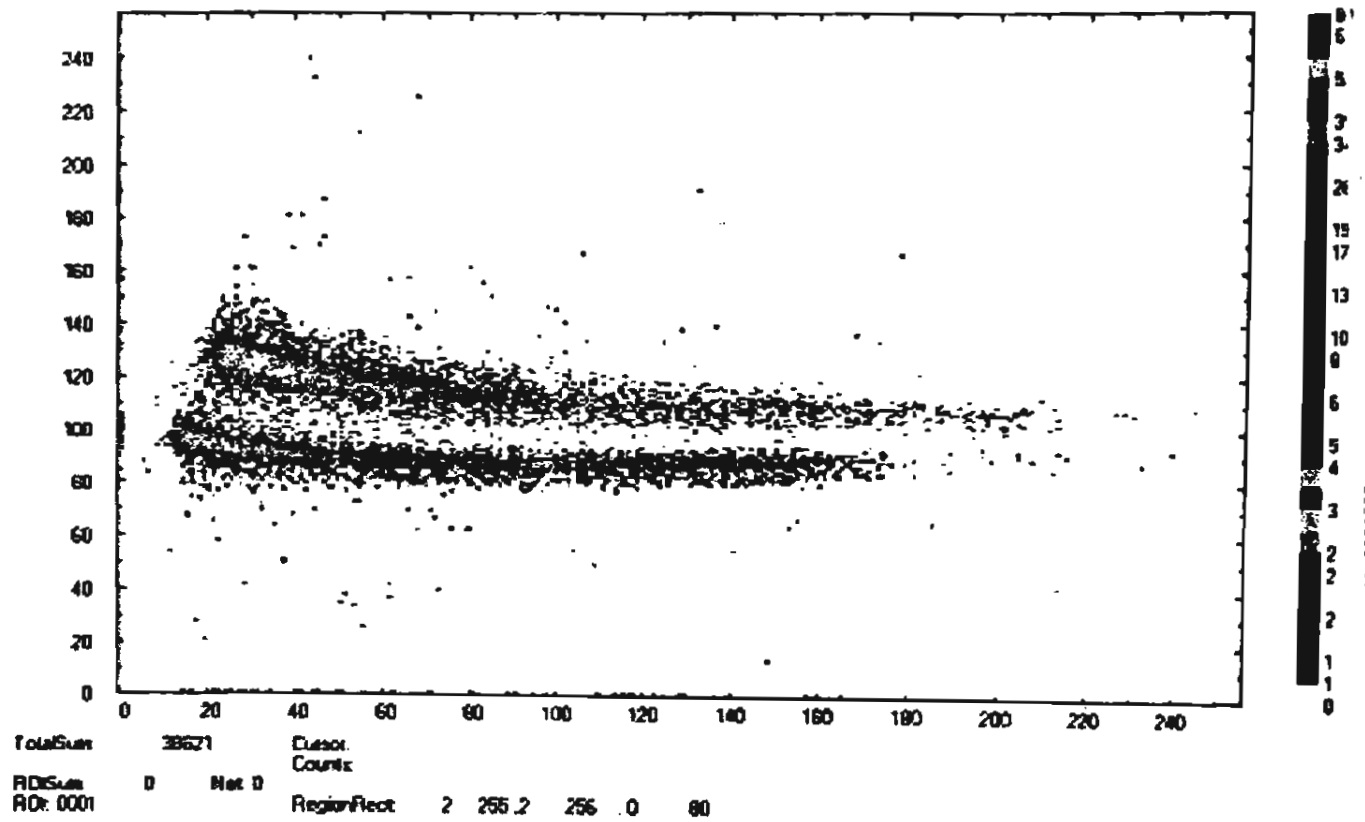
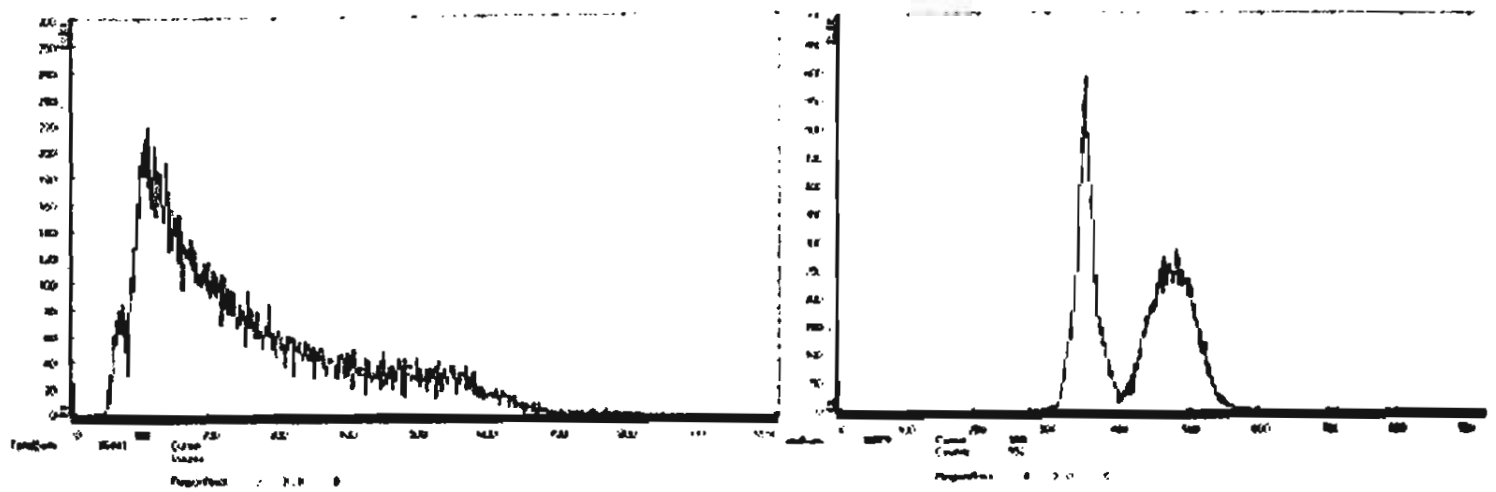
ผลดังกล่าวนี้ทำให้เราสามารถเลือกศึกษานิวตรอนหรือแกมมา อย่างใดอย่างหนึ่งได้ เทคนิคนี้สามารถเรียกกันว่า pulse shape discrimination หากต้องการศึกษาพลังงานของรังสี (ที่มีความสัมพันธ์กับวสูงของสัญญาณจากหัววัด) ไปควบคู่กันด้วย ก็จะสามารถกระทำได้โดยศึกษา pulse height spectrum

การทดลองที่ต้องการศึกษาการกระจายตัวทางพลังงานของนิวตรอน ในหัววัดสารอินทรีย์เรืองแสงจะต้องบันทึกข้อมูลที่มีตัวแปรประกอบอย่างน้อยสองตัวแปร ได้แก่ ตัวแปร $n-\gamma$ และตัวแปร pulse-height และความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองนี้ ทำให้เราสามารถเลือกศึกษาการกระจายตัวทางพลังงานของนิวตรอนได้

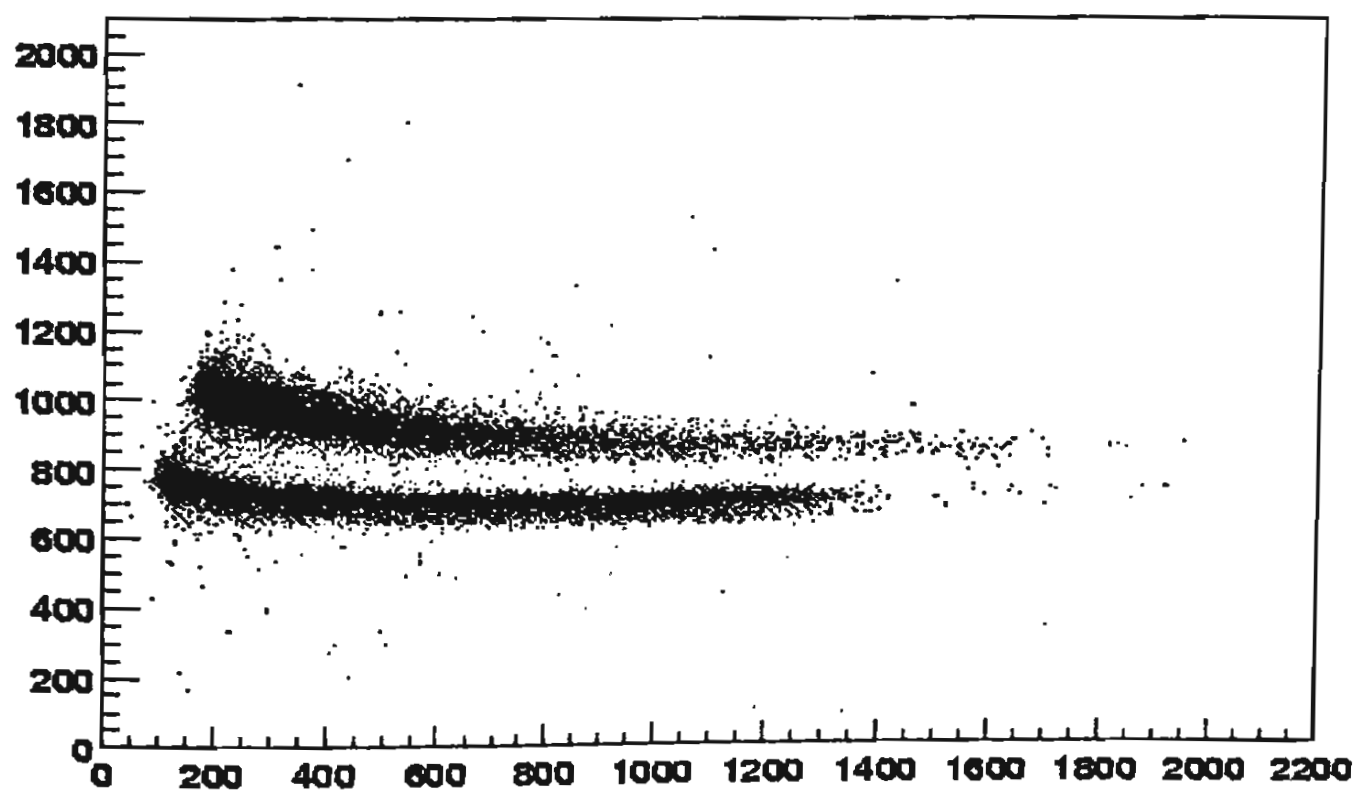
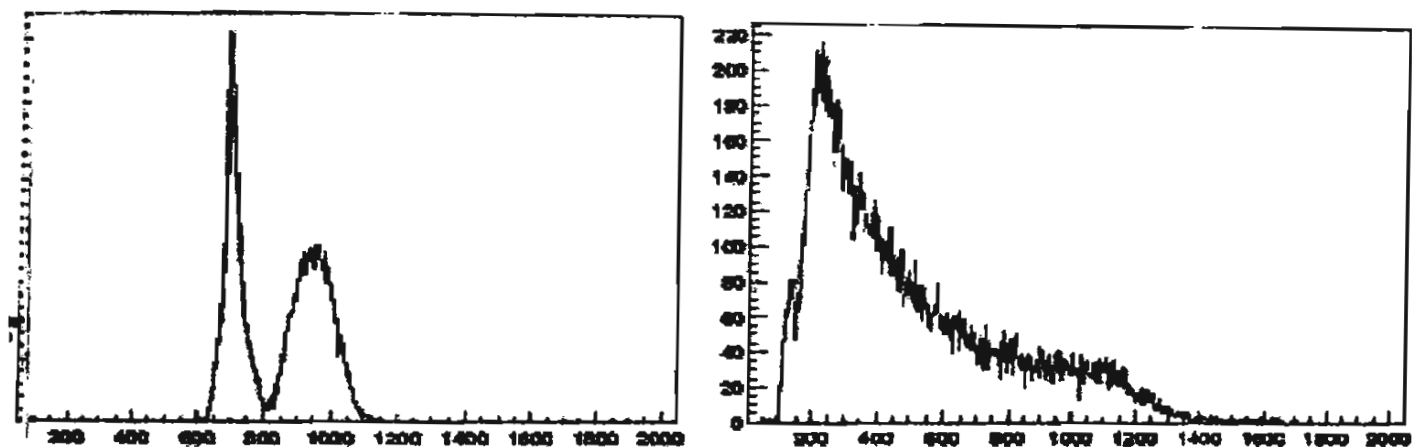
วงจรอิเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 1 แสดงผังวงจรที่เก็บข้อมูล เพื่อการศึกษาข้างต้น ข้อมูลจาก ADC ถูกบันทึกโดยใช้ระบบ MPA-3 ผลการทดลองระหว่างทำการทดลองจะสามารถแสดงผลได้บนจอคอมพิวเตอร์ ที่มีระบบ MPA-3 ติดตั้งอยู่ ดังรูปที่ 2 ในขณะเดียวกันข้อมูลจะถูกบันทึกแบบที่ละเหตุการณ์ (list file mode) ที่มีลักษณะเป็นข้อมูลฐานสอง (Binary) เมื่อสิ้นสุดการทดลองข้อมูลฐานสองนี้จะถูกนำป้อนรหัส ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาและออกแบบขึ้น (เอกสารประกอบหมายเลข 1) ผลการถอดรหัสข้อมูล ร่วมกับการคัดเลือกและแยกข้อมูลขั้นต้น จะได้ข้อมูลออกที่จะถูกนำไปเชื่อมต่อกับโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล ROOT ที่พัฒนามาจาก CERN โดยใช้ Script ที่สร้างขึ้น (ตัวอย่างแสดงไว้ในเอกสารประกอบหมายเลข 2) ข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์จาก ROOT แสดงไว้ในรูปที่ 3 และรูปที่ 4(ก) แสดงการเลือกเฉพาะเหตุการณ์ที่เกิดจากนิวตรอน (graphical cut on neutron) และการกระจายตัวทางพลังงานที่สังสรรค์กัน (pulse height)



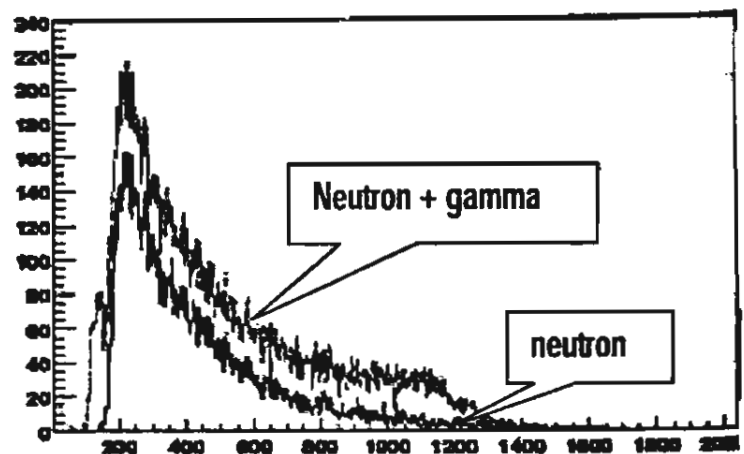
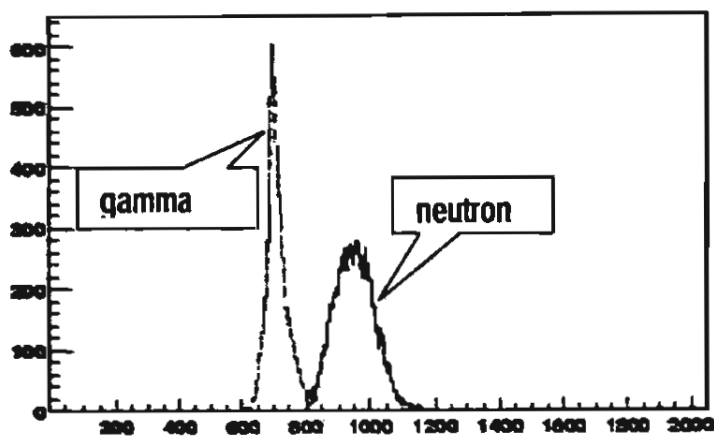
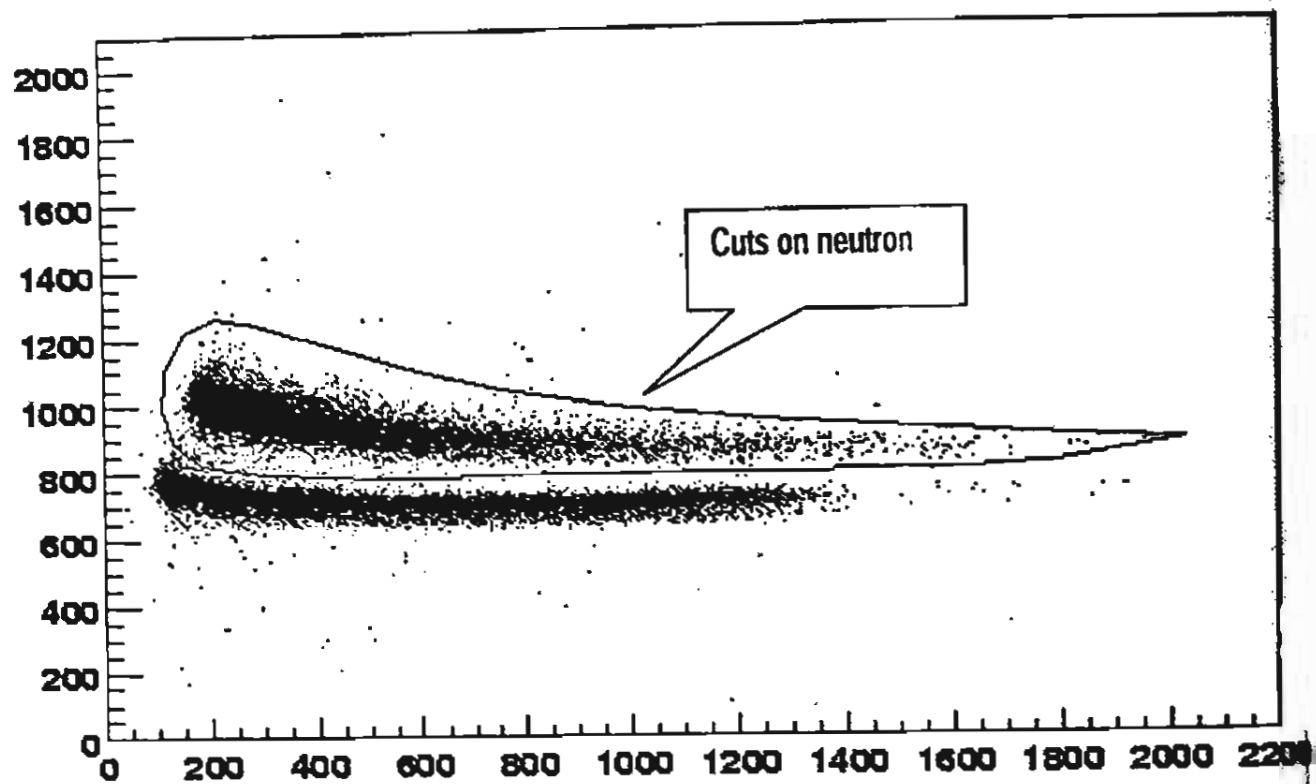
ที่ 1 แสดงผังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $n-\gamma$ และพลังงานในหัววัด NE-213 ด้วยระบบ MPA-3 (Det = หัววัด NE - 213, Pre-Amp = Preamplifier, Amp = main amplifier, CFD = constant fraction discriminator SCA=single channel analyzer, GG = gate and delay generator, ADC = analog to digital converter MPA = multiparameter system)



รูปที่ 2 แสดงสเปกตรัม แบบธรรมดาของสัญญาณ $n-\gamma$ และสัญญาณพลังงานและ การแบบ 2 มิติ จากสัญญาณทั้งสอง ที่ได้จากการหว่านการเก็บข้อมูลจากระบบ MPA-3



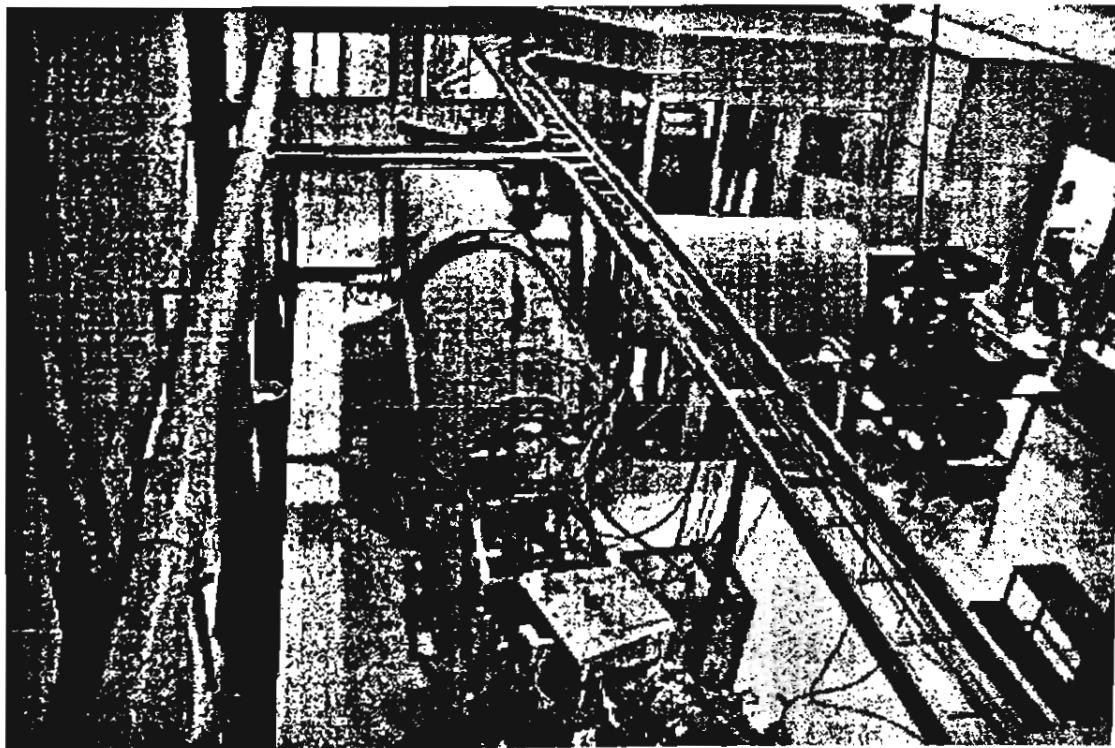
รูปที่ 3 เหมือนรูปที่ 2 แต่ได้จากการวิเคราะห์หลังเก็บข้อมูลโดยอาศัยโปรแกรม ROOT



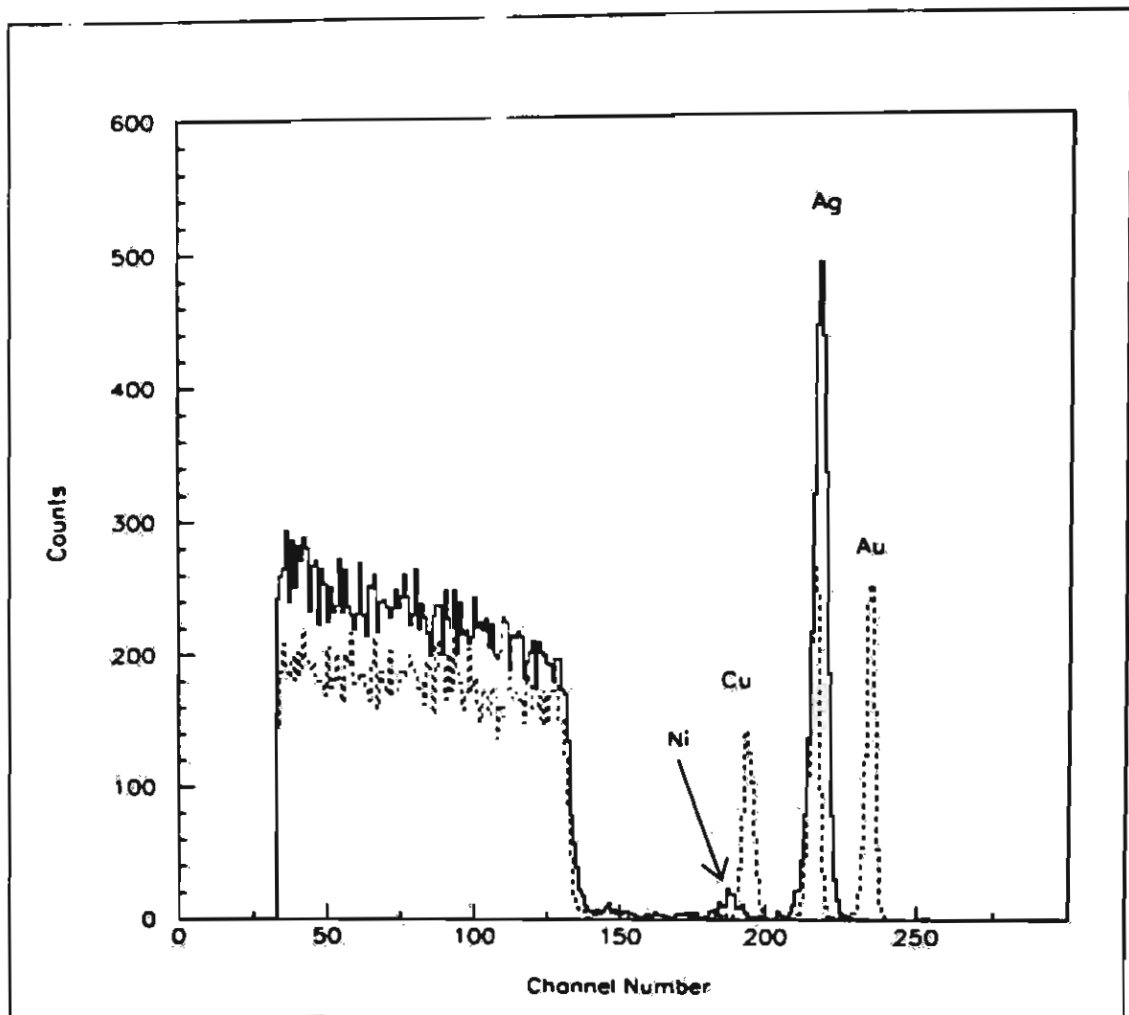
รูปที่ 4 แสดงการคัดเลือกสัญญาณที่ได้จากนิวตรอน ในกราฟแบบ 2 มิติ และสเปกตรัมของสัญญาณ $n-\gamma$ และพลังงานที่สัมพันธ์กัน (เปรียบเทียบกับสัญญาณก่อนการคัดเลือกที่แสดงแบบเส้นประ)

การนำระบบเก็บข้อมูล MPA-3 ไปประยุกต์ใช้ในการเก็บข้อมูล RBS จากเครื่อง Tandetron ขนาด 1.7 MV

นอกเหนือจากเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานต่ำ ๆ แล้ว ศูนย์วิจัยนิวตรอนยังได้ดำเนินการงานวิจัยที่
องใช้เครื่องเร่งแบบอื่น ๆ ไปพร้อมกันด้วย งานด้านหนึ่งคือการติดตั้งเครื่องเร่งอนุภาคแบบ Tandetron
ขนาด 1.7 MV ซึ่งจะช่วยให้มีความสามารถทางด้านการวิเคราะห์หรือประเมินคุณลักษณะเชิงผิวของ
วัสดุ เช่น เทคนิค Rutherford backscattering แบบฉบับ (Conventional RBS) หรือ เทคนิค Particle
Induced X-ray Emission (PIXE) การติดตั้งเครื่องเร่งนี้ ได้สำเร็จลงเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 5 และชุดการ
ทดลอง RBS ใช้หัววัดแบบ Silicon Surface Barrier วางที่มุม 170 องศา ได้รับการติดตั้งแล้วเรียบร้อยเช่น
เดียวกัน ระบบเก็บข้อมูลแบบ MPA-3 ได้รับความไว้วางใจให้เป็นระบบเก็บข้อมูลและเพื่อวิเคราะห์ข้อ
มูลเบื้องต้น



รูปที่ 5 แสดงเครื่องเร่งอนุภาคแบบ tandetron ขนาด 1.7 MV ที่ติดตั้งเสร็จ



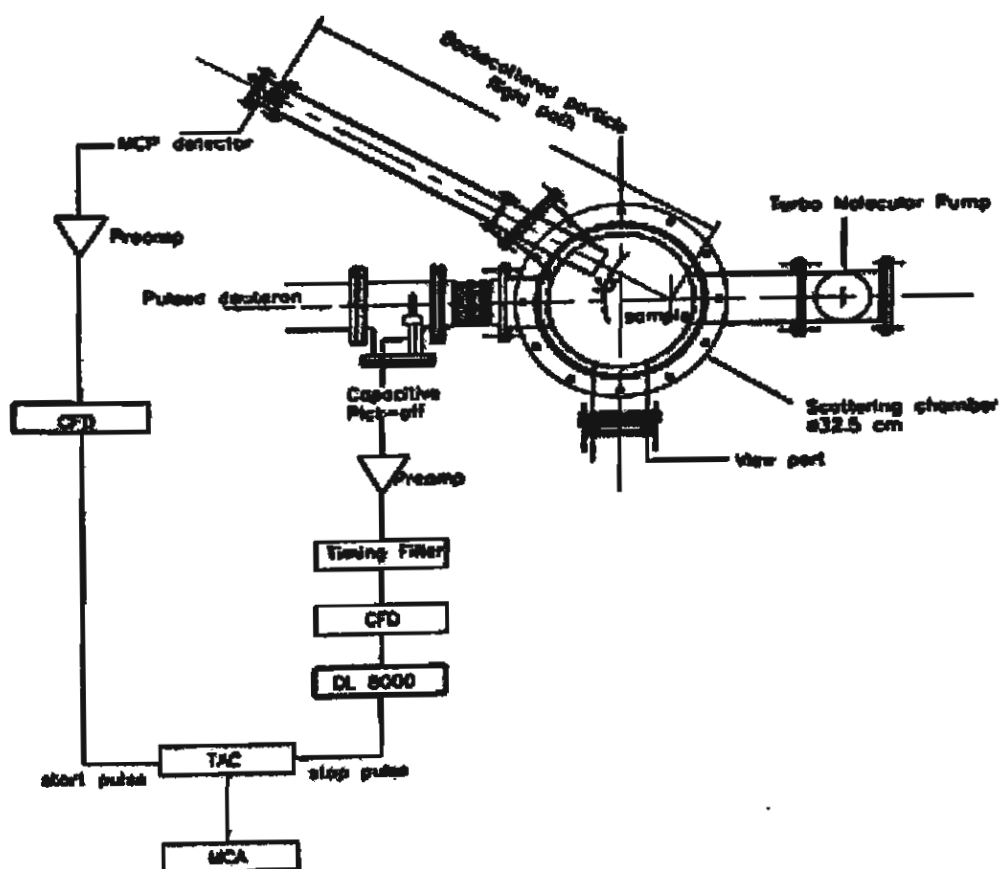
รูปที่ 6 แสดงสเปกตรัม RBS วิเคราะห์ผิวของซิลิกอนที่มีเงินและนิกเกิล (เส้นทึบ) และ ซิลิกอนที่มี ทอง เงินและทองแดง เคลือบฝังอยู่ (เส้นประ) โดยใช้ ไอออนฮีเลียม (He^{++}) พลังงาน 2.1 MeV เป็นอนุภาคกระสุน

เร็ว ๆ นี้ เครื่องเร่งอนุภาค Tandemtron นี้สามารถเร่งไอออน He^{++} สู่พลังงาน 2.1 MeV เพื่องานทางด้าน RBS ในการนี้ทางกลุ่มวิจัย RBS แบบฉบับ นำโดย รศ. ดร. สมสร สิงขรณ์ ได้ทำการทดลองวิเคราะห์ พื้นผิวของสารตัวอย่าง ซิลิกอน ที่มี เงินและนิกเกิล (Ag-Ni/Si) เคลือบฝังอยู่ และ ซิลิกอน ที่มี ทอง เงิน และทองแดง (Au-Ag-Ni/Si) เคลือบฝังอยู่ ผลการทดลองเบื้องต้นที่ได้จากการใช้ระบบเก็บข้อมูลแบบ MPA-3 จากโครงการวิจัยนี้ ไปเป็นส่วนหนึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6 กลุ่มวิจัยข้างต้นจะได้ทำการวิเคราะห์โดยละเอียดต่อไป เนื่องจากในการทดลองจากกลุ่มวิจัยข้างต้นนี้ชุดการทดลอง RBS ที่ใกล้เคียงกับชุดการทดลองในโครงการพัฒนาระบบการเก็บ ฯ มาก จึงเป็นที่คาดหวังว่า เมื่อนำระบบเก็บข้อมูลแบบ MPA-3 นี้ไปใช้งานตามที่ได้เสนอในโครงการพัฒนาระบบการเก็บ ฯ ไว้ จะประสบความสำเร็จเช่นเดียวกัน

3. การประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาคขนาด 150 kV เร่งไอออนดิวเทรอนเพื่อการวิเคราะห์ผิวและฟิล์มบางบนผิวของวัสดุ

เพื่อการพัฒนาเทคนิค RBS ขึ้นมาจากเครื่องเร่งอนุภาคนี Scatterng Chamber ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32.5 ซม. ได้ถูกสร้างขึ้นแล้วนำไปติดตั้งที่ปลาย beam line ซึ่งเดิมเคยเป็นที่อยู่ของเป้า TiT ที่เป็นจุดกำเนิดของรังสีนิวตรอนพลังงาน 14 MeV แต่เนื่องจากในกรณีนี้อนุภาคกระสุนมีมวลน้อยและมีพลังงานต่ำด้วย คือ เป็นอนุภาคดิวเทรอน ($^2\text{H}^+$ หรือ D^+) ที่มีพลังงานเพียง 140 keV เมื่อเกิดการกระเจิงกลับหลังจากผิวของวัตถุตัวอย่าง อิงจะมีพลังงานต่ำกว่านี้ ซึ่งไม่อาจวัดได้ด้วยหัววัด SSB เพราะสัญญาณ noise ของหัววัดเองไม่ได้ เทคนิค RBS แบบฉบับจึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ ในกรณีของเรา

เทคนิค Time-of-Flight (TOF) ได้ถูกนำมาใช้แก้ปัญหานี้ สเปกตรัมพลังงานของพวกอนุภาคกระเจิงกลับหลัง จะได้มาจากการวิเคราะห์เวลาบินของพวกอนุภาคเหล่านี้เอง สำหรับระยะทางระหว่างผิวหน้าของวัตถุตัวอย่างถึงหัววัด ซึ่งรู้ค่าที่แน่นอน จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าในขั้นตอนนี้ได้เลือกใช้ค่า 192.3 ซม. ส่วนหัววัดคือ Microchannel Plate Assembly (MCP) เพราะมีการตอบสนองเร็วมาก ซึ่งจะช่วยให้ระบบมีความแม่นยำดีขึ้น

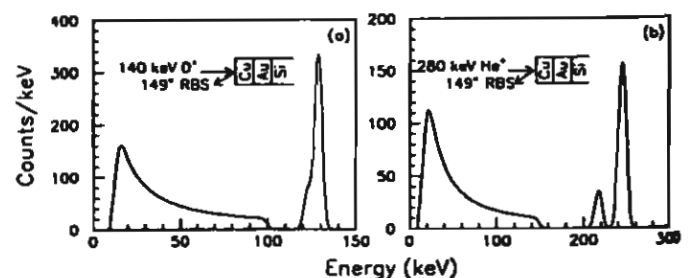
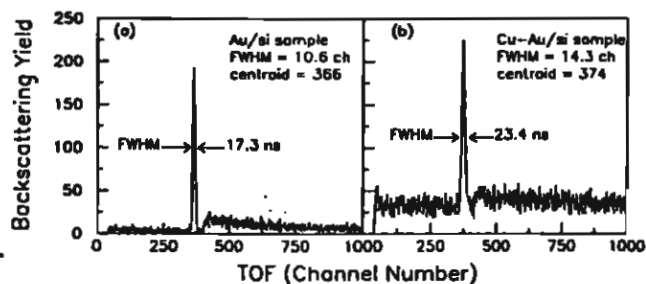


รูปที่ 7 แสดงชุดการทดลอง TOF-RBS และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เก็บข้อมูล

สัญญาณอ้างอิงของวิธีการนี้ได้ใช้สัญญาณจาก Capacitive pick-off ซึ่งแปลว่าถ้าอนุภาคกระสุนคิวเทอรอนต้องมีลักษณะเป็นห้วง(pulse) และเพื่อความแม่นยำด้วยแล้ว จำเป็นต้องเป็นห้วงที่แคบมากที่สุด ซึ่งเครื่องเร่งอนุภาคนิวเคลียร์ที่มีความกว้างเพียง 2 ns ได้ถูกพัฒนาสำเร็จที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่มาตั้งแต่เมื่อปี พ.ศ. 2534

เมื่อยิงห้วงอนุภาควิวเทอรอนที่มีความกว้างประมาณ 2 ns ความถี่ 0.5 MHz กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 0.1 μ A และพลังงาน 140 keV ไปชนวัตถุตัวอย่างสองตัวอย่าง โดยวัตถุตัวอย่างแรกมีธาตุทอง วัตถุตัวอย่างที่สองมีธาตุทองและทองแดง เคลือบบาง ๆ บนฐาน (substrate) ซึ่งหนาประมาณ 2 mm ทำจากซิลิกอน จะเกิด TOF spectrum ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งสามารถเห็นได้ว่าการแยกตัวระหว่างทองและทองแดงนั้นไม่ค่อนัก แต่โลหะทั้งสองแยกตัวออกจากซิลิกอนซึ่งเป็นฐานอย่างชัดเจน

แม้จะเป็นเพียงการทดลองเบื้องต้น แต่ผลการทดลอง TOF-RBS นี้ก็ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่น่าสนใจ และมีความเป็นไปได้ที่จะใช้อนุภาคกระสุนมวลเบาและพลังงานต่ำในการวิเคราะห์ฟิล์มบาง แต่ timing resolution ของระบบควรจะได้ปรับปรุงให้ดีขึ้น เช่น โดยการเพิ่มเสถียรภาพของการผลิตห้วงคิวเทอรอนที่มีความกว้างไม่เกิน 2 ns และเพิ่ม flight path ให้ยาวขึ้น และปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่ออำนาจการจำแนกของระบบ เช่น สภาพสุญญากาศ ซึ่งจะส่งผลให้อำนาจการจำแนกของระบบเลวลงจากการศึกษาต่อไปโดยโปรแกรมจำลอง SIMNRA จำลองผลการทดลองจากการกระดอนกลับของไอออนกระสุนคิวเทอรอนพลังงาน 140 keV ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้วัสดุที่มีทองและทองแดงเคลือบอยู่ และทำนายผลการทดลอง ที่น่าจะเกิดขึ้นจากการ กระดอนกลับของไอออนกระสุนแอลฟา พลังงาน 280 keV ดังในรูปที่ 9 ทำให้เราเชื่อมั่นว่าการดำเนินการยกสมรรถนะของเครื่องเร่งอนุภาคนิวเคลียร์ 150 kV สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มอำนาจการแยกแยะมวลของระบบได้



รูปที่ 8 แสดงสเปกตรัม TOF-RBS ที่วัดได้เมื่อใช้ ห้วงอนุภาควิวเทอรอนพลังงาน 140 keV และ (a) วัตถุตัวอย่างแรกที่มีธาตุทอง (b) วัตถุตัวอย่างที่สองมีธาตุทองและทองแดง เคลือบบาง ๆ บนซิลิกอน

รูปที่ 9 แสดงผลการทำนายจากโปรแกรมจำลอง SIMNRA ใช้ (a) ห้วงอนุภาควิวเทอรอน (D^+) พลังงาน 140 keV และ (b) ห้วงอนุภาคแอลฟา (He^+) พลังงาน 280 keV ชนกับวัตถุตัวอย่างที่มี ธาตุทองและทองแดง เคลือบบาง ๆ บนซิลิกอน

ในงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดเก็บข้อมูลการทดลองประเมินคุณลักษณะเชิงผิวของวัสดุ โดยวิธีกระดอนกลับของคิวเทอรอนพลังงาน 140 keV ร่วมกับ รศ. ดร. สมศร สิงขรัตน์ และ คณะ ผลการทดลองที่ได้ได้นำเสนอแบบบรรยายในการประชุมวิชาการ International Symposium on Utilization of Accelerators 26 — 30 November 2001, Sao Paulo, Brazil ดังภาคผนวกที่ 2

เพื่อให้อำนาจจำแนกเชิงข้อมูลที่ดีขึ้น และเพื่อให้สามารถใช้อุปกรณ์ส่วนใหญ่ของเครื่องเร่งอนุภาคที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ พยายามกับการสนับสนุนครุภัณฑ์ Power Supply ขนาด 350 kV และท่อเร่งขนาด 400 kV การพัฒนาที่กำลังดำเนินการอยู่ในขณะนี้จึงเลือกใช้ไอออนฮีเลียม (He^+) ที่พลังงาน 280 keV เป็นตัวทดสอบ

4. การปรับปรุงเครื่องเร่งอนุภาคขนาด 150 kV ให้มีสมรรถนะสูงขึ้นเป็น 350 kV

การปรับสมรรถนะของเครื่องเร่งอนุภาค 150 kV ให้เป็น 350 kV มีส่วนงานที่เกี่ยวข้องกันดังนี้

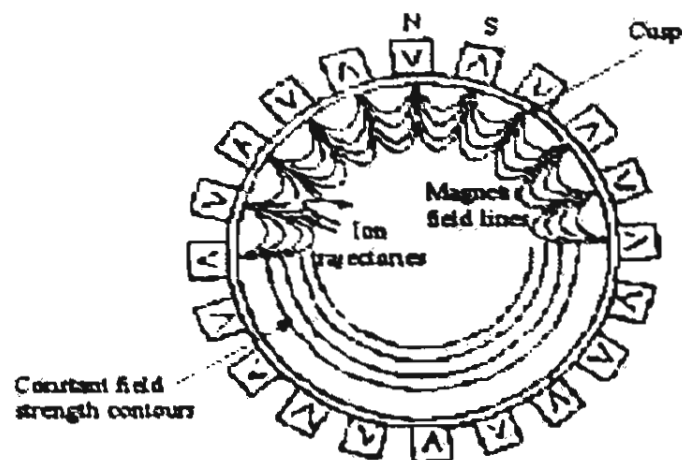
- ก) การศึกษาคุณลักษณะและทดสอบแหล่งกำเนิดไอออนแบบกลีบมะเฟือง (multicusp ion source)
- ข) การติดตั้งแหล่งกำเนิดไอออนและ อุปกรณ์อื่น ๆ ใน Top Terminal
- ค) การเชื่อมต่อ Top Terminal ท่อเร่ง และ ส่วนอื่น ๆ ของ Beam line
- ง) การทดสอบหัววัด และระบบเก็บข้อมูล
- จ) การทดลองและเก็บข้อมูลจริง

ในปัจจุบันการปรับสมรรถนะยังอยู่ระหว่างขั้นตอน ข) และคาดว่า คงจะแล้วเสร็จร่วมอีก 2 ขั้นตอน (ค และ ง) ในช่วงปลายปี 2546 นี้ ตามขั้นตอน (ก)-(ค) นั้นเป็นส่วนที่อยู่ในโครงการอื่น และจะเป็นส่วนที่ต้องเสร็จก่อนขั้นตอน (ง)-(จ) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เข้าไปมีส่วนร่วมทำงานวิจัยนี้ด้วย ในรายงานฉบับนี้ จึงขอกล่าวถึง การศึกษาคุณลักษณะและทดสอบแหล่งกำเนิดไอออนแบบกลีบมะเฟือง ผลการทดลองขั้นต้นได้ส่งเข้าร่วมแบบโปสเตอร์ในการประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีครั้งที่ 9 ซึ่งจัดขึ้นเมื่อวันที่ 19-21 มิถุนายน 2546 ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ โดยสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย สมาคมเวชศาสตร์แห่งประเทศไทย และราชวิทยาลัยรังสีแพทย์แห่งประเทศไทย (เอกสารแสดงในภาคผนวกที่ 3)

ในปัจจุบันเรากำลังพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนแบบกลีบมะเฟืองชนิดเผาไส้ขนาดเล็กเพื่อทดแทนแหล่งกำเนิดไอออนแบบ RF-discharge ที่ใช้อยู่ แหล่งกำเนิดไอออนที่กำลังพัฒนานี้รองรับก๊าซได้หลายชนิดทำให้สามารถเปลี่ยนชนิดของไอออนที่จะผลิตได้โดยไม่ยุ่งยาก ในรายงานฉบับนี้จะได้นำเสนอผลการวัดคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดไอออนแบบกลีบมะเฟืองขนาดเล็กที่ได้ศึกษาทดลองมาเมื่อเร็ว ๆ นี้ งานวิจัยนี้ได้รับการตอบรับให้นำเสนอในการประชุมนานาชาติ The 10th International Conference on

ION SOURCES (ICIS2003) ที่สถาบัน Joint Institute for Nuclear Research เมือง Dubna ประเทศ Russia ที่จัดขึ้นระหว่าง วันที่ 8 -13 กันยายน 2546 มี ดังภาคผนวกที่ 4

แหล่งกำเนิดไอออนจัดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในห้องปฏิบัติการวิจัยต่าง ๆ เพราะความสามารถของแหล่งกำเนิดไอออนเป็นตัวตัดสินคุณลักษณะที่ดีที่สุกหลาย ๆ ประการของลำไอออนที่จะมีได้ เช่น กระแสลำไอออน, ค่า emittance, การกระจายทางพลังงาน, ชนิดของไอออน, อายุขัยและเสถียรภาพของลำไอออน[11] แหล่งกำเนิดไอออนแบบกัลลิยมะเหียง ได้ชื่อตามแม่เหล็กถาวรที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กแบบกัลลิยมะเหียงให้สามารถกักอิเล็กตรอนปฐมภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ [12] จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัว และสร้างพลาสมาที่มีความหนาแน่น และปริมาณขนาดใหญ่เอื้อต่อการผลิตและลำเลียงด้วยระบบคังแบบช่องเคียว หรือหลาย ๆ ช่องได้ [13] ลำไอออนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแบบนี้ มีบทบาททางด้านวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ธาตุที่พบในสารตัวอย่าง [11]



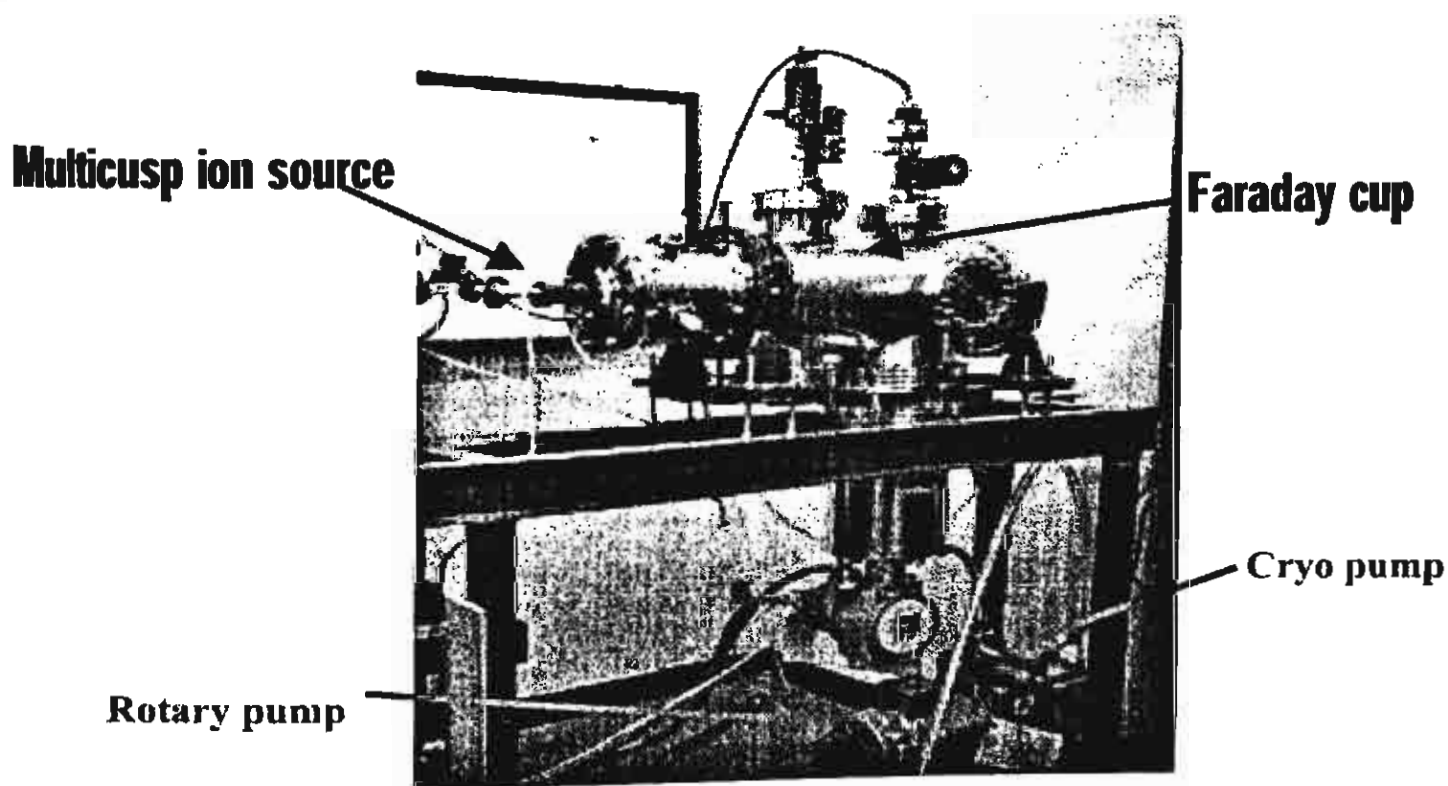
รูปที่ 10 แผนภาพภาคตัดขวางของห้องกำเนิดไอออนแบบกัลลิยมะเหียง แสดงการวางแม่เหล็กถาวร และขั้วแม่เหล็กสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่มีลักษณะคล้ายกัลลิยมะเหียง และทิศทางของการเคลื่อนที่ของไอออน

แหล่งกำเนิดไอออนแบบกัลลิยมะเหียงชนิดเผาได้ขนาดเล็กที่ใช้ มีห้องผลิตลำไอออนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรและยาว 10 เซนติเมตร ด้านนอกรอบๆ ห้องผลิตลำไอออนจะมีแม่เหล็กถาวร SmCo ขนาด 3.5x3.5x38 มิลลิเมตร จำนวน 2 แถว ๆ ละ 16 ชิ้น ติดตั้งอยู่ดังรูปที่ 11 ปลายด้านหนึ่งของห้องสูญญากาศจะมี feed trough สำหรับฉีดได้หลอด ใต้หลอดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 75 มิลลิเมตร ที่ด้านเคียวกันนี้จะมีช่องสำหรับปล่อยก๊าซเข้าและช่องสำหรับความดันสูญญากาศในห้องผลิตไอออนติดตั้งด้วย ก๊าซที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ไนโตรเจน (N_2) ก๊าซอาร์กอน (Ar) และฮีเลียม (He) จากห้องผลิตไอออนจะมีอิเล็กโทรดดึงไอออน (extraction electrode) อี

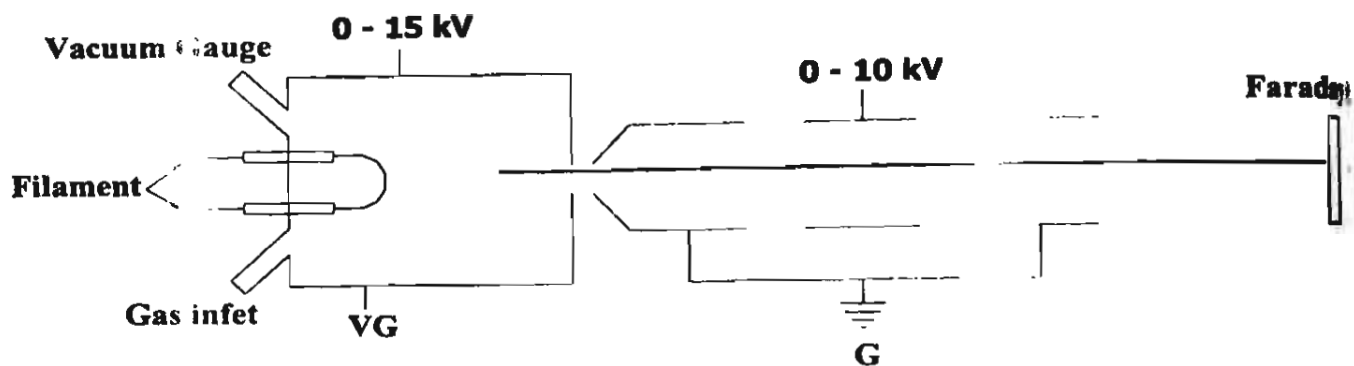
อิเล็กโตรดอันเดียวกันนี้ใช้ร่วมกับอิเล็กโตรดอีกสองชิ้นเพื่อเป็นระบบเลนส์ไฟฟ้า (electrostatic lens) แบบ Einzel จากนั้นมีชุดวัดกระแสไอออนแบบฟาราเดย์ (Faraday cup) รูปที่ 12 แสดงโครงสร้างของแหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้

ปั๊มสุญญากาศโรตารี (Rotary Pump) และแบบ Cryogenic (Cryogenic Pump) ถูกใช้เพื่อลดความดันอากาศในห้องผลิตไอออนและ มีมาตรความดันอากาศ (gauge) ที่ด้านท้ายห้องผลิตไอออนและด้านบนห้องสุญญากาศใหญ่หลังชุดตรวจวัดกระแสแบบฟาราเดย์เพื่อตรวจวัดความดันอากาศที่ตำแหน่งดังกล่าวตามลำดับ

ก่อนทำการทดลองจะต้องทำการอุ่นไส้หลอดโดยการปล่อยกระแสประมาณ 10 แอมแปร์ ให้กับไส้หลอดเป็นเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นจึงปล่อยก๊าซเข้าไปในห้องผลิตไอออนให้มีความดันในห้องผลิตไอออนในช่วง $8 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$ mbar ต่อมาไส้หลอดจะถูกเผาให้ร้อนขึ้นไปอีกเพื่อให้ปลดปล่อยอิเล็กตรอน โดยใช้กระแสในเรือน 15 แอมแปร์ อิเล็กตรอนที่ได้จะเคลื่อนที่เข้าหาผนังห้องผลิตไอออนที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าไส้หลอดประมาณ 0-100 โวลต์ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะช่วยกระตุ้นให้ก๊าซเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมาซึ่งจะถูกกักด้วยสนามไฟฟ้าแบบกליบมะเฟืองที่จุดดังกล่าว กระแสระหว่างไส้หลอดกับห้องผลิตไอออนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ความต่างศักย์จะลดลง กระแสคิซาร์จที่ได้อาจสูงถึง 5 แอมแปร์



รูปที่ 12 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบของแหล่งกำเนิดไอออนแบบกליบมะเฟือง



รูปที่13 ผังอุปกรณ์ประกอบการทดสอบคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดไอออนแบบกลีบมะเฟือง

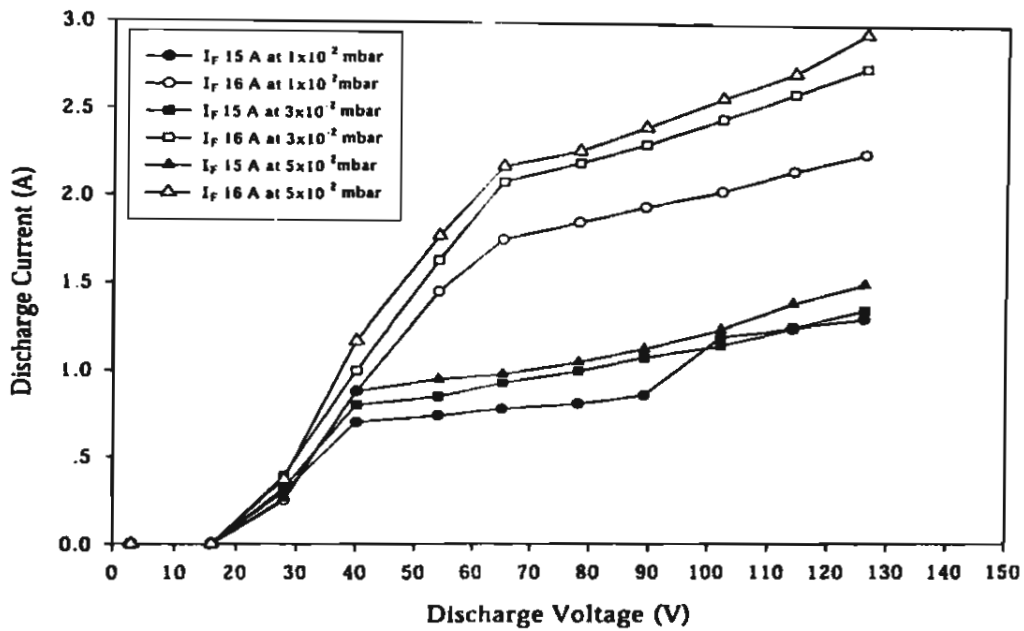
เมื่อให้ความต่างศักย์ระหว่าง 0-15 kV แก่ห้องผลิตไอออนเทียบกับอิเล็กโตรดดึง ไอออนที่ผลิตได้จะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าออกจากห้องไอออนสู่ระบบเลนส์ไฟฟ้าที่อิเล็กโตรดปลายทั้งสองข้างมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ขณะที่อิเล็กโตรดตัวกลางมีศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 0-10 kV ระบบเลนส์ไฟฟ้าจะทำหน้าที่ปรับลำไอออนให้ไปโฟกัสที่ชุดวัดกระแสแบบฟาราเดย์

ชุดวัดกระแสแบบฟาราเดย์ประกอบด้วยวงแหวนทองแดงสามชั้น วงแหวนสองวงแรกมีช่องกลวงรัศมี 2.5 เซนติเมตร ซ้อนกับแผ่นทองแดงตันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ในระหว่างการทดลองวงแหวนที่สองจะได้รับความต่างศักย์ขนาด -40 โวลต์

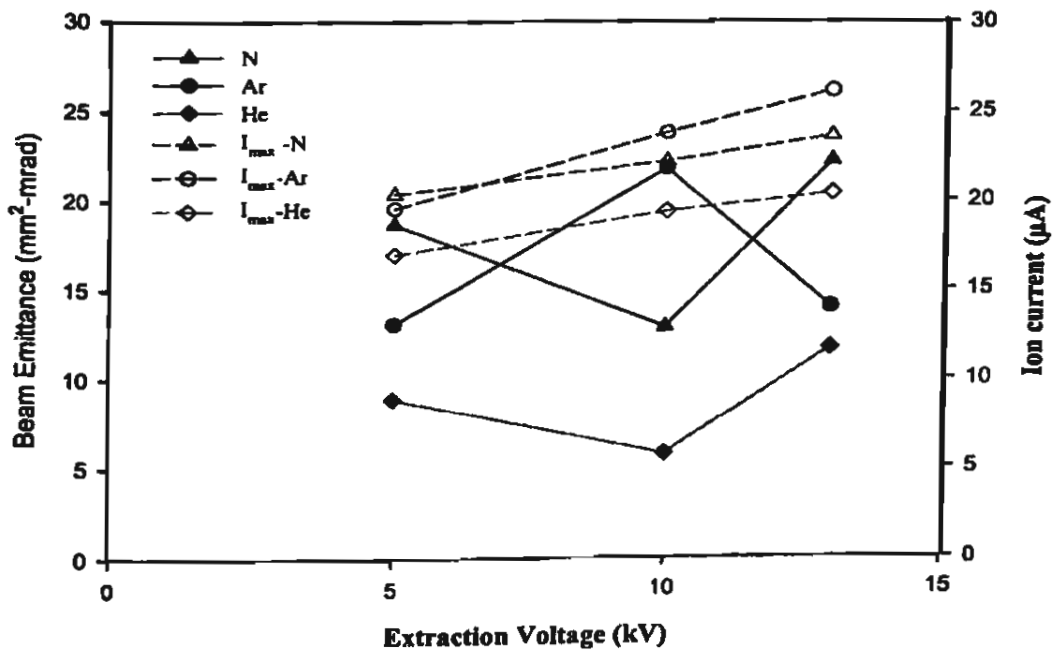
หลังจากนั้นการวัดกระแสไอออนที่ดึงได้แล้ว จึงได้ทำการติดตั้งแม่เหล็กสี่ขั้วและชุดวัดภาคตัดขวางลำอนุภาคแบบตาข่าย (multiwire beam monitor) แทรกกระหว่างระบบเลนส์ไฟฟ้าและชุดวัดกระแสเพื่อทำการวัด beam emittance ของลำอนุภาค

เมื่อทดลองใช้ก๊าซไนโตรเจนเข้าไปห้องผลิตไอออนที่ความดันต่าง ๆ กัน และที่กระแสเผาไส้หลอดหลาย ๆ ค่า ผลการทดลองบางส่วนแสดงดังรูปที่ 12 กระแสไอออนที่ผลิตได้ สามารถปรับเปลี่ยนให้มีค่าตั้งแต่ 1-5 แอมแปร์ เพื่อให้ความหนาแน่นไอออน ไม่ต่ำเกินไปและเพื่อยืดอายุไส้หลอดเราจึงเลือกใช้กระแสไอออน 2 แอมแปร์ เมื่อทดลองให้ความต่างศักย์ต่าง ๆ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนที่ดึงออกมาได้และความต่างศักย์ดึง เป็นไปดังรูปที่ 14 จากผลที่ได้พบว่าเมื่อใช้ความต่างศักย์ดึงเพิ่มขึ้นจะได้กระแสไอออนเพิ่มขึ้นแต่เมื่อความต่างศักย์ดึงเป็น 13 kV หรือสูงกว่ากระแสไอออนจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จากนั้นทดลองเปลี่ยนก๊าซเป็นอาร์กอน (Ar) และฮีเลียม (He) ได้ผลการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 15 ในขอบเขตของศักย์ดึงที่ใช้กระแสไอออนที่ได้เพิ่มตามศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ดึง ในขณะที่ค่า beam emittance มีแนวโน้มที่จะลดค่าลงเมื่อใช้ค่าศักย์ดึงที่สูงขึ้น

Discharge current & Discharge Voltage
(Nitrogen gas)



รูปที่ 14 เปรียบเทียบกระแสสวดิสชาร์จ ของก๊าซไนโตรเจนที่ศักย์ไฟฟ้าดิสชาร์จ ค่าต่าง ๆ เมื่อใช้กระแสไส้หลอด 15 และ 16 แอมแปร์และที่ความดันค่าต่าง ๆ



รูปที่ 15 แสดงกระแสไอออนไนโตรเจน ฮีเลียม และ อาร์กอน และ ค่า beam emittance ของไอออนทั้งสามชนิด ที่วัดได้เมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าดึงเป็น 5 10 และ 13 kV และ เมื่อใช้ ศักย์ไฟฟ้าโฟกัส 2 8 และ 10 kV ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

1. E. Rutherford, Phil. Mag. 21(1911) 669.
2. H. Geiger and E. Marsden, Phil. Mag. 25 (1913) 606.
3. W.K. Chu, J.W. Mayer and M.A. Nicolet, Backscattering Spectroscopy, Academic Press, New York, 1978.
4. Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis, Editors: J.R. Tesmer, M. Nastasi, J.C. Barbour, C.J. Maggiore, and J.W. Mayer, Materials Research Society, Pennsylvania, USA, 1995.
5. MPA-3 Multiparameter Data Acquisition System User's Manual, FAST ComTec GmbH Germany 2000
6. M.H. Mendenhall and R.A. Weller, Nucl. Instr. Meth. B47(1990)193.
7. <http://wwwinfo.cern.ch/asd/paw/index.html>
8. <http://root.cern.ch>
9. S. Dangtip et al, A facility for measurements of Nuclear cross sections for fast-neutron cancer therapy, Nucl. Instr. Meth. A 452 (2000) 484-504.
10. บัญญัติ เล็กประเสริฐ การทดสอบสมมติฐานปรากฏการณ์ Doppler Broadening, การค้นคว้าอิสระระดับปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พ.ศ. ๒๕๔๓.
11. H. Zhang, Ion Source, Science Press, Beijing, Springer, Heidelberg (1999).
12. K.N. Leung, characterization of Ion Sources, in Handbook of Ion sources, edited by B. Wolf, CRC Press, Boca Raton, 1995 p. 93.
13. P. Spadtke, Rev. Sci. Instr. 63 (1992) 2647.

Output ที่ได้จากโครงการ

การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

1. บทความส่งเข้าร่วมการประชุมวิชาการนานาชาติ The 10th International Conference on ION SOURCES (ICIS2003) ที่สถาบัน Joint Institute for Nuclear Research เมือง Dubna ประเทศ Russia ระหว่างวันที่ 8 –13 กันยายน 2546 เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ Review of Scientific instruments
2. บทความส่งเข้าร่วมการประชุมวิชาการนานาชาติ International Symposium on Utilization of Accelerators 26 – 30 November 2001, Sao Paulo, Brazil

การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการในประเทศ

1. บทความส่งเข้าร่วมการประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีครั้งที่ 9 ซึ่งจัดขึ้นเมื่อวันที่ 19-21 มิถุนายน 2546 ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ โดยสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย สมาคมเวชศาสตร์แห่งประเทศไทย และราชวิทยาลัยรังสีแพทย์แห่งประเทศไทย

ผลงานด้านการพัฒนาความรู้และอุปกรณ์วิทยาศาสตร์

1. ได้พัฒนาระบบการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลให้ดีขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการเรียน การศึกษาและการวิจัยทางฟิสิกส์นิวเคลียร์และวัสดุศาสตร์
2. ได้ร่วมพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออน และปรับปรุงเครื่องเร่งอนุภาคขนาด 150 kV ให้เป็น 350 kV เพื่อประยุกต์ใช้เป็นระบบประเมินคุณลักษณะเชิงผิวของวัสดุ โดยวิธีกระดอนกลับของไอออนย่านพลังงานกลาง ๆ หลายชนิด

ผลงานด้านอื่น ๆ

1. รายงานผลการทดลองศึกษาปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect) ในระบบนิวเคลียร์

ภาคผนวก

รายการเอกสารประกอบ

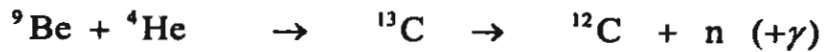
- 1) รายงานผลการทดลองศึกษาปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect)
- 2) บทความส่งเข้าร่วมการประชุมวิชาการ International Symposium on Utilization of Accelerators 26 – 30 November 2001, Sao Paulo, Brazil
- 3) บทความส่งเข้าร่วมการประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีครั้งที่ 9 ซึ่งจัดขึ้นเมื่อวันที่ 19-21 มิถุนายน 2546 ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ โดยสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย สมาคมเวชศาสตร์แห่งประเทศไทย และราชวิทยาลัยรังสีแพทย์แห่งประเทศไทย
- 4) บทความส่งเข้าร่วมการประชุมวิชาการนานาชาติ The 10th International Conference on ION SOURCES (ICIS2003) ที่สถาบัน Joint Institute for Nuclear Research เมือง Dubna ประเทศ Russia ระหว่างวันที่ 8 –13 กันยายน 2546

ภาคผนวกที่ 1.

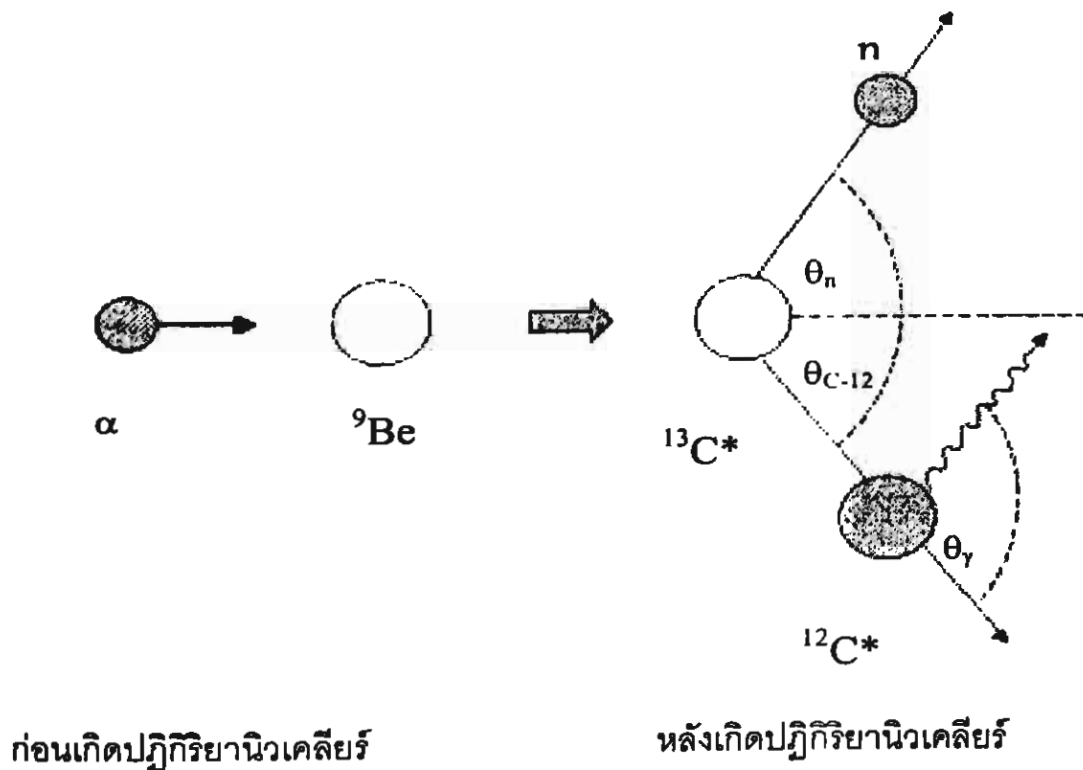
รายงานผลการทดลองศึกษาปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect)

การทดลองศึกษา Doppler Broadening จากแหล่งกำเนิดรังสี Am-Be

โดยทั่วไปต้นกำเนิดไอโซโทปกัมมันตรังสี Am-Be จะประกอบด้วยผง $^{241}\text{AmO}_2$ และ ผง Be ผสมกัน ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นภายในเกิดจาก ^{241}Am ซึ่งเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี มีค่าครึ่งชีวิต 432 ปี สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา อนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของ ^{241}Am เมื่อวิ่งไปชนผง Be ที่ผสมอยู่ด้วยกัน จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ชนิดที่สอง ดังนี้



ผลดังกล่าวทำให้เกิด compound nucleus ^{13}C เมื่อสลายตัวจะปลดปล่อยรังสีนิวตรอนพลังงานต่างๆ ออกมา เพื่อเปลี่ยนไปสู่สถานะที่สัมพันธ์กันของ ^{12}C และหากสถานะของ ^{12}C นั้นมีพลังงานสูงกว่าสถานะสามัญ จะมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาอีกต่อหนึ่ง เพื่อเปลี่ยนสู่สถานะสามัญที่เสถียรกว่า จากการศึกษ โดย Vijaya และ Kumar (1973) , ^{13}C ที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนสู่สถานะโลดที่ 1 ของ ^{12}C เป็นส่วนใหญ่ แล้วจึงคายรังสีแกมมาพลังงาน 4.439 MeV ออกมาอีกต่อหนึ่ง



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของรังสีแกมมาและรังสีนิวตรอน

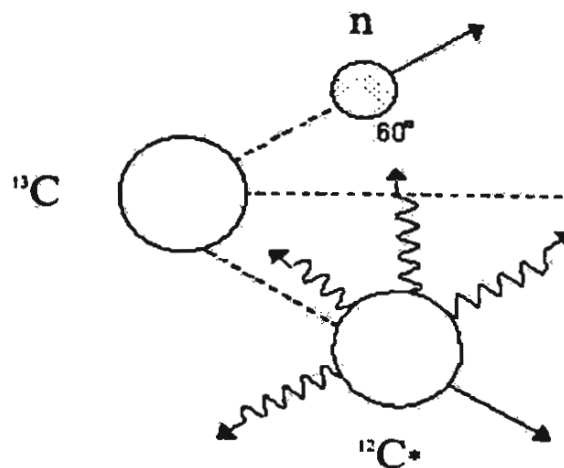
เมื่อเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ภายในต้นกำเนิด Am-Be แล้วนิวตรอนจะได้รับพลังงานจลน์และเคลื่อนที่ไปในทิศทางจำเพาะค่าหนึ่ง อาศัยการพิจารณาตาม kinematics ทำให้เราสามารถคำนวณค่าพลังงานจลน์และมุม

กระเจิงของ $^{12}\text{C}^*$ ได้จากมุมกระเจิงของนิวตรอนและ $^{12}\text{C}^*$ ที่ได้นั้นทำให้เราสามารถหาทิศทางของการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมา (θ_γ) ที่สนใจ (0° , 60° , 120° และ 180°) และพลังงานของรังสีแกมมาที่มุนั้นๆ ได้

Krane (1988) ได้กล่าวถึงการสลายตัวให้รังสีแกมมาว่านอกเหนือจากพลังงานของรังสีแกมมาที่วัดได้ จะมีการแจกแจง (ΔE) ตามหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์กจากครึ่งชีวิตของสถานะ $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$ แต่ผลเนื่องจากการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสทางความร้อน (thermal motion) มีบทบาทสำคัญทำให้การแจกแจงมีการที่กระจายมากขึ้น ที่เรียกว่า Doppler broadening รังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยหรือดูดกลืนจะมีการเคลื่อนที่ของพลังงานตามปรากฏการณ์ดอปเปลอร์เป็นไปตามสมการ $\Delta E = E_\gamma (1 \pm \frac{V_x}{c})$

เมื่อ V_x คือ องค์ประกอบความเร็วของนิวเคลียสตามทิศทางของการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมา เมื่อประยุกต์ผลดังกล่าวเข้ากับการศึกษานี้ V_x นั้นคือองค์ประกอบความเร็วของนิวเคลียส $^{12}\text{C}^*$ ในทิศทางของการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมา 4.439 MeV นั้น หากองค์ประกอบ V_x มีมากจะทำให้มีการแจกแจงที่กว้างมากขึ้นไปด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก $^{12}\text{C}^*$ นั้นมีพลังงานจลน์ที่สูงกว่าพลังงานที่ได้จากการเคลื่อนที่ทางความร้อนมาก ดังนั้นทิศทางกาเคลื่อนที่ของ $^{12}\text{C}^*$ ดังกล่าว จึงให้ผล Doppler broadening มากกว่า

หากพิจารณาในทางปฏิบัติที่ทำการวัดทิศทางของการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมาสัมพันธ์กับทิศทางกาเคลื่อนที่ของรังสีนิวตรอนที่มุมต่างๆ ได้แก่ 0° , 60° , 120° และ 180° ตามลำดับ หากเปรียบเทียบมุมดังกล่าวก็ทิศทางของการเคลื่อนที่ของ $^{12}\text{C}^*$ จะได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงทิศทางของการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมาเทียบกับทิศทางของ $^{12}\text{C}^*$

พิจารณาจากรูปจะ เห็นว่า มุม 120° นั้นจะมีค่าองค์ประกอบความเร็วของนิวเคลียส $^{12}\text{C}^*$ ในทิศทางกาเคลื่อนที่ของรังสีแกมมาหรือ V_x มากที่สุด ขณะที่มุม 180° , 0° และ 60° จะได้องค์ประกอบ V_x น้อยลงตามลำดับ

การวัดการสังสรรค์กันระหว่างรังสีแกมมาและรังสีนิวตรอน

การทดลองเพื่อวัดการสังสรรค์กันระหว่างรังสีแกมมาพลังงาน 4.438 MeV และรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดไอโซโทปกันมันตรังสี Am-Be มีรายละเอียดของการทดลองและอุปกรณ์สำหรับการทดลองดังต่อไปนี้

ก. อุปกรณ์การทดลองและการจัด

อุปกรณ์สำหรับการทดลองนี้ ประกอบด้วย ต้นกำเนิดไอโซโทปกันมันตรังสี Am-Be หัววัดรังสี 2 ชนิด คือ หัววัด NE-213 สำหรับวัดรังสีนิวตรอน และหัววัด HPGe สำหรับวัดรังสีแกมมา การจัดอุปกรณ์การทดลอง แสดงดังรูปที่ 3 หัววัด NE-213 ติดตั้งกับแกนเหล็กในแนวดิ่ง พันด้วยเทปขาว วางห่างจากต้นกำเนิด Am-Be 15 เซนติเมตร ซึ่งติดตั้งอยู่บนแกนเหล็กเช่นเดียวกัน วางในแนวดิ่ง โดยใช้ทิศทางของรังสีนิวตรอนที่วิ่งออกจากต้นกำเนิด Am-Be เข้าสู่หัววัด NE-213 เป็นทิศทางอ้างอิง ส่วนหัววัด HPGe นั้นวางอยู่ห่างจากต้นกำเนิด Am-Be เป็นระยะทาง 1 เมตร ในทิศทางทำมุม 0° , 60° , 120° และ 180° เทียบกับทิศทางของรังสีนิวตรอนตามลำดับ

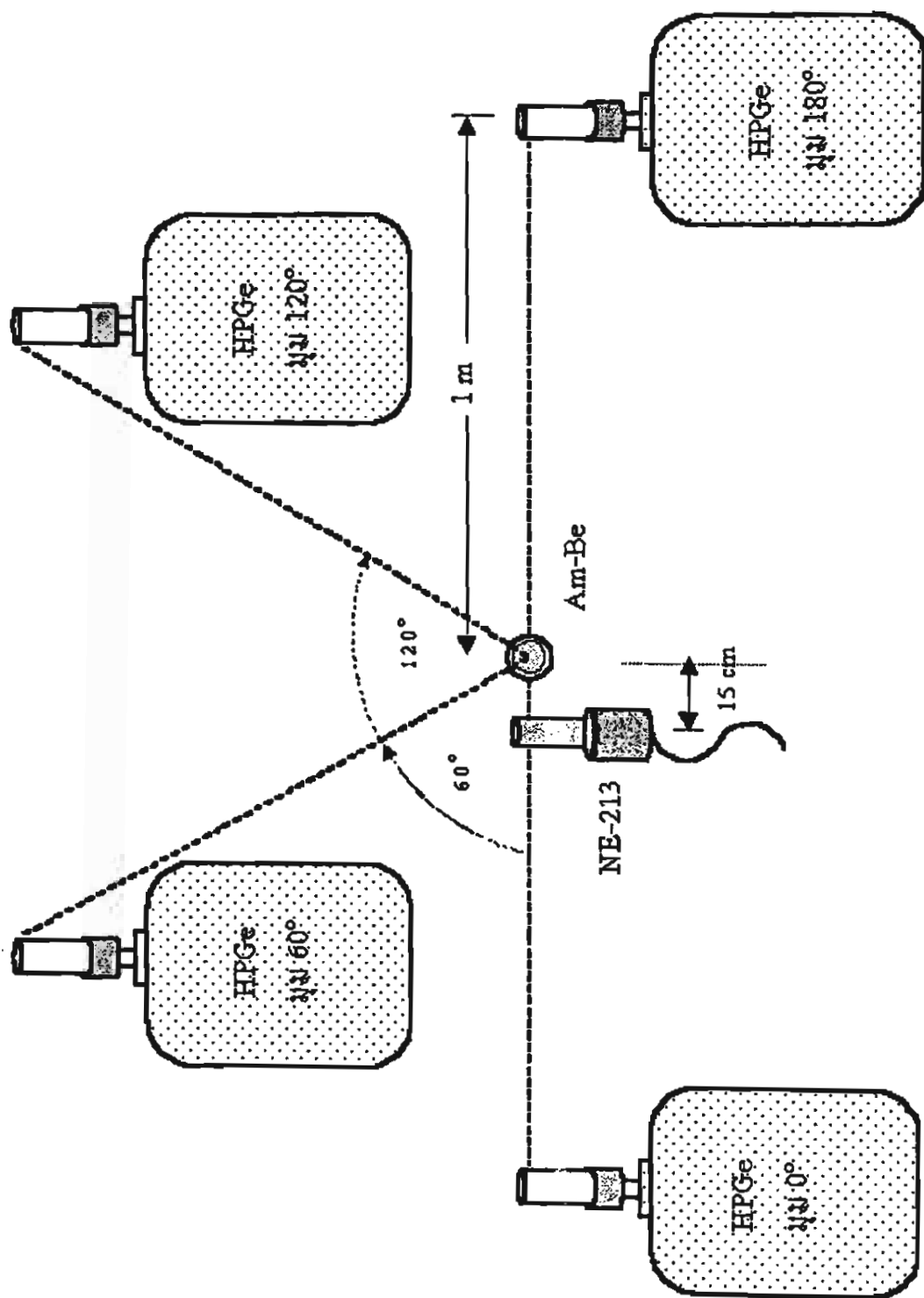
ข. ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในการทดลอง

การทดลองนี้จัดวงจรเพื่อการบันทึกข้อมูลด้วยระบบจัดเก็บข้อมูลแบบหลายตัวแปร MPA-3 ตามรูปที่ 3.19 ประกอบด้วย 4 พารามิเตอร์ ดังนี้

พารามิเตอร์ที่ 1 คือสัญญาณจากหัววัด HPGe วัดพลังงานของรังสีแกมมา โดยเมื่อรังสีแกมมาชนหัววัด HPGe หัววัดจะผลิตสัญญาณไฟฟ้าออกมา นำสัญญาณ out put 1 ต่อเข้ากับ Spectroscopy Amp (Model 2021) เพื่อขยายสัญญาณ out put ที่ได้จะผ่านเข้า Delay Amp (Model 427A) เพื่อทำการหน่วงเวลาของสัญญาณให้เข้ากับเงื่อนไขของสัญญาณ master gate สัญญาณที่ผ่านการ delay แล้วต่อเข้า ADC (Model 7074) ของระบบบันทึกข้อมูล MPA-3

พารามิเตอร์ที่ 2 คือสัญญาณจากหัววัด NE-213 วัด pulse height ของรังสีนิวตรอน ที่ปลดปล่อยจากต้นกำเนิด Am-Be เพื่อใช้ในการเลือก pulse height ของนิวตรอน โดยนำสัญญาณ out put จากขั้ว dynode ของหัววัด NE-213 ต่อเข้ากับ Research Amp (Model 450) เพื่อขยายสัญญาณ จากนั้นนำ out put ที่ได้ต่อเข้ากับ Delay Amp (Model 427A) เพื่อทำการหน่วงเวลาของสัญญาณให้เข้ากับเงื่อนไขของสัญญาณ master gate สัญญาณที่ผ่านการ delay แล้วต่อเข้า ADC (Model 7074) ของ MPA-3

พารามิเตอร์ที่ 3 คือ Time Spectrum ระหว่างสัญญาณของรังสีนิวตรอนจากหัววัด NE-213 และสัญญาณของรังสีแกมมาจากหัววัด HPGe โดยนำสัญญาณจากขั้ว Anode ของหัววัด NE-213 ผ่านเข้า CFD1 (Model 473A) เพื่อตัดสัญญาณรบกวน (background) ออกโดยตั้งค่าของ CFD ไว้ต่ำสุดที่ 2 มิลลิโวลต์ out put ที่ได้ผ่านตัว delay เพื่อหน่วงเวลา แล้วต่อเข้าขั้ว Stop ของ TAC (Model 567) ส่วนหัววัด HPGe นั้น นำสัญญาณจากขั้ว out put 2 ต่อเข้ากับ Timing Filter Amp (Model 2111) เพื่อขยายสัญญาณ out put แล้วผ่านเข้า CFD2 (Model 473A) ตัดสัญญาณรบกวน (background) ออกโดยตั้งค่าของ CFD ที่ 30 มิลลิโวลต์ out put ที่ได้ผ่านตัว delay หน่วงเวลาจากนั้นต่อเข้าขั้ว Start ของ TAC (Model 7072T) แล้วนำ out put ต่อเข้ากับ MPA-3



รูปที่ 3 แสดงการจัดวางอุปกรณ์การทดลอง

พารามิเตอร์ที่ 4 คือ สัญญาณ n- γ PSD เป็นการแยกสัญญาณของรังสีนิวตรอนและแกมมาออกจากกัน ด้วยหัววัด NE-213 ซึ่งใช้ TADC (Model: 7072T) สร้างสัญญาณ out put ที่มี amplitude แตกต่างกัน โดยสัญญาณ Start ของ TADC ได้จากการแยกสัญญาณ out put จากขั้ว anode ที่ผ่าน CFD1 ในพารามิเตอร์ที่ 2 แล้วต่อเข้ากับขั้ว Start ส่วนสัญญาณ Stop ได้จากการนำสัญญาณ out put จากขั้ว anode ผ่านเข้า DDL Amp (Model 1411A) เพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณ bipolar และขยายความแตกต่างกันของสัญญาณจากรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมา จากนั้นนำ out put ที่ได้ต่อเข้ากับ Timing SCA (Model 2037A) เพื่อสร้างเป็นสัญญาณ logic pulse จาเวลาที่สัญญาณทั้งสองตัด base line ต่อสัญญาณ out put เข้ากับ TADC แล้วต่อเข้ากับ MPA-3

สัญญาณ Gate คือ สัญญาณที่คัดเลือกเฉพาะเหตุการณ์ที่สังสรรค์กัน (coincidence) เท่านั้น คือ สัญญาณรังสีแกมมาที่สังสรรค์กับสัญญาณรังสีนิวตรอน สร้างขึ้นจากเทคนิค TOF (Time of Flight) ของ TAC/SCA (Model 567) โดยสัญญาณ Start ได้จากการนำสัญญาณ out put ของ CFD1 จากหัววัด HPGe ในพารามิเตอร์ที่ 1 แล้วต่อเข้ากับขั้ว Start ของ TAC/SCA ส่วนสัญญาณ Stop นั้นได้จากการแยกสัญญาณ out put ของ CFD2 จากหัววัด NE-213 ในพารามิเตอร์ที่ 3 ต่อเข้ากับขั้ว Stop ของ TAC/SCA ตั้ง TAC range ที่ 500 นาโนเมตร แล้วนำสัญญาณ out put ของ SCA ต่อเข้ากับขั้ว AUX1 ของระบบ MPA-3 เพื่อทำหน้าที่เป็น Master Gate ควบคุมการปิด-เปิดรับสัญญาณจากทั้ง 4 พารามิเตอร์ ซึ่งเป็นสัญญาณ logic positive unipolar

การเก็บข้อมูลจากระบบจัดเก็บข้อมูลแบบหลายตัวแปร MPA-3 นั้นเลือกบันทึกข้อมูลแบบ coincidence mode รูปแบบ list mode (*.LST) โดยใช้ AUX1 เป็นตัว Master Gate ทั้งนี้เพื่อสะดวกในการนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลการทดลองร่วมกับโปรแกรม ROOT โดยบันทึกข้อมูลที่มุม 0° , 60° , 120° และ 180° เป็นเวลาโดยประมาณมุมละ 50 ชั่วโมง

ค. ผลการทดลอง

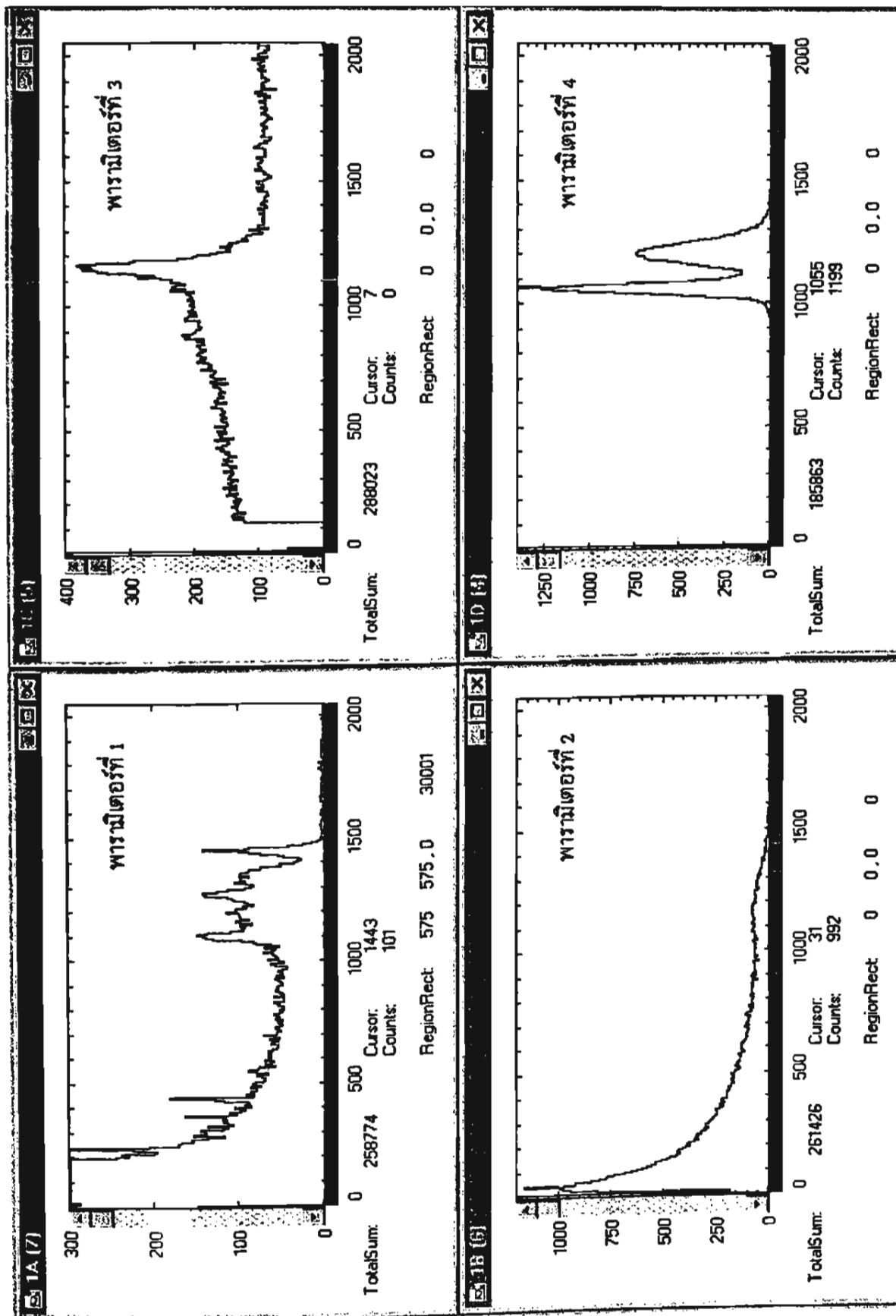
ข้อมูลการทดลองแสดงข้อมูลทั้ง 4 พารามิเตอร์ ที่มุม 60° ที่บันทึกด้วยระบบจัดเก็บข้อมูลแบบหลายตัวแปร MPA-3 มีลักษณะดังรูปที่ 5

- รูปที่ 5(ก) ลักษณะข้อมูลพารามิเตอร์ที่ 1 ช่วงที่สนใจ คือตั้งแต่ channel ที่ 1000 ขึ้นไป ประกอบด้วย double escape peak, single escape peak และ full energy peak (4.439 MeV)

- รูปที่ 5(ข) ลักษณะข้อมูลพารามิเตอร์ที่ 2 pulse height ของหัววัด NE-213 จากทั้งรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมามีลักษณะที่เหมือนกับการทอดตัวลงมาตามฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล และปรากฏใหญ่ประมาณ channel ที่ 1200

- รูปที่ 5(ค) ลักษณะข้อมูลพารามิเตอร์ที่ 3 time spectrum ของสัญญาณจากรังสีนิวตรอนและสัญญาณรังสีแกมมา ปรากฏยอดหลักประมาณ channel ที่ 1150

- รูปที่ 5(ง) ลักษณะข้อมูลพารามิเตอร์ที่ 4 n- γ PSD โดยปรากฏรังสีแกมมาประมาณ channel ที่ 1054 และ รังสีนิวตรอนประมาณ channel ที่ 1195



รูปที่ 5 แสดงลักษณะของข้อมูลทั้ง 4 พารามิเตอร์ จักรระบบบันทึกข้อมูลแบบหลายตัวแปร MPA-3

จ. การสร้างเงื่อนไขคัดเลือกรังสีนิวตรอนจาก scatter plot

การคัดเลือกรังสีนิวตรอนนั้น ได้จากการนำข้อมูลการทดลองมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์แบบ 2 มิติ หรือเรียกว่า scatter plot ระหว่างข้อมูลจากพารามิเตอร์ที่ 2 สเปกตรัม pulse height ของรังสีนิวตรอน (หัววัด NE-213) และพารามิเตอร์ที่ 4 สเปกตรัมของสัญญาณรังสีนิวตรอน-แกมมา ($n\text{-}\gamma$ PSD) ลักษณะข้อมูลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6 แกนตั้ง (Y) คือ ข้อมูลจากพารามิเตอร์ที่ 2 ส่วนแกนนอน (X) คือ ข้อมูลจากพารามิเตอร์ที่ 4 ความสัมพันธ์ของทั้งสองพารามิเตอร์นี้จะแสดงด้วยจุด แต่ละจุดจะแทนความสัมพันธ์ของเหตุการณ์ที่สังสรรกัน (coincidence events) 1 เหตุการณ์ ดังนั้นบริเวณที่มีจำนวนจุดเข้ามา ก็จะมีเหตุการณ์ที่สังสรรกันมาด้วย จากรูปที่ 6 ความเข้มของจุดแบ่งเป็น 2 แถบอย่างชัดเจน แถบล่างคือรังสีแกมมา ส่วนแถบบนคือรังสีนิวตรอน จากนั้นใช้โปรแกรม ROOT สร้างขอบเขตคัดเลือกเฉพาะรังสีนิวตรอน ตามรูปที่ 7 เพื่อนำไปสร้างเงื่อนไขสำหรับศึกษาพลังงานของรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาคู่กันและสังสรรกันกับ pulse height ของรังสีนิวตรอนในช่วงที่คัดเลือกนี้