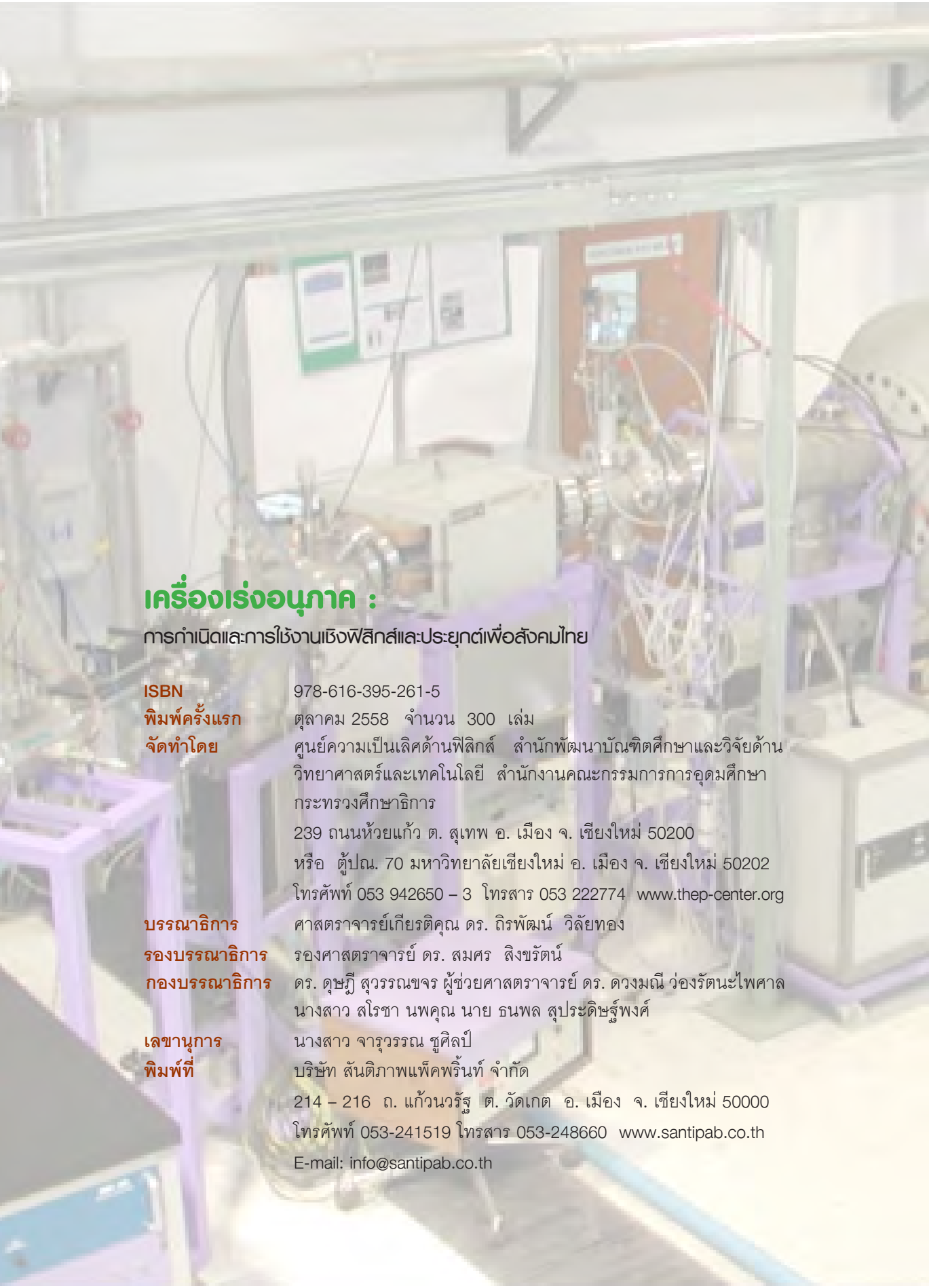


เครื่องเร่งอนุภาค :

การกำเนิดและการใช้งานเชิงฟิสิกส์ และประยุกต์เพื่อสังคมไทย

สนว PERDO

ThEP



เครื่องเร่งอนุภาค :

การกำเนิดและการใช้งานเชิงฟิสิกส์และประยุกต์เพื่อสังคมไทย

ISBN 978-616-395-261-5

พิมพ์ครั้งแรก ตุลาคม 2558 จำนวน 300 เล่ม

จัดทำโดย ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ
239 ถนนห้วยแก้ว ต. สุเทพ อ. เมือง จ. เชียงใหม่ 50200
หรือ ตู้ปณ. 70 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ. เมือง จ. เชียงใหม่ 50202
โทรศัพท์ 053 942650 – 3 โทรสาร 053 222774 www.thep-center.org

บรรณาธิการ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง

รองบรรณาธิการ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศร สิงขรัตน์

กองบรรณาธิการ ดร. ดุษฎี สุวรรณขจร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงมณี ว่องรัตนะไพศาล
นางสาว สโรชา นพคุณ นาย ธนพล สุประดิษฐ์พงศ์

เลขานุการ นางสาว จารุวรรณ ชูศิลป์

พิมพ์ที่ บริษัท สันติภาพแพ็คพริ้นท์ จำกัด
214 – 216 ถ. แก้วนวรัฐ ต. วัดเกต อ. เมือง จ. เชียงใหม่ 50000
โทรศัพท์ 053-241519 โทรสาร 053-248660 www.santipab.co.th
E-mail: info@santipab.co.th



กระแสพระราชดำรัส ณ รัฐสภาอเมริกัน
วันที่ ๒๔ มิถุนายน พุทธศักราช ๒๕๐๓

"...มีหลักการอยู่ประการหนึ่งที่จำเป็นต้องเน้นหนัก นั่นคือ
การช่วยของอเมริกา เป็นการช่วยให้ไทยได้บรรลุผลตามความมุ่งหมาย
ด้วยความพากเพียรของตนเอง ข้าพเจ้าเห็นว่า
ไม่จำเป็นที่จะต้องกล่าวว่า หลักการอันนี้เป็นสิ่งที่เราเห็นด้วยอย่างจริงจัง
ความจริงพระพุทธโอวาทของสมเด็จพระสัมมาสัมพุทธเจ้าของเราก็มีอยู่แล้ว
ตนนั่นแหละเป็นที่พึ่งของตน
เราขอขอบคุณ ในความช่วยเหลือของอเมริกา แต่เราตั้งใจไว้ว่า
วันหนึ่งข้างหน้า เราคงจะทำกันเองได้ โดยไม่พึ่งความช่วยเหลือนี้..."

สารบัญ

กระแสพระราชดำรัส ณ รัฐสภาอเมริกัน ก

คำนำ ฆ

บทที่ 1 การกำเนิดของเครื่องเร่งอนุภาค 1

1.1 เครื่องเร่งอนุภาคเครื่องแรกของโลก 1

1.2 เครื่องเร่งอนุภาคเพื่องานวิจัยเครื่องแรกของประเทศไทย 6

1.3 เครื่องเร่งอนุภาครุ่นแรกที่สร้างขึ้นในประเทศไทย 7

1.4 บทบาทที่เพิ่มขึ้นของเครื่องเร่งอนุภาค 11

1.5 สรุป 16

บทที่ 2 เครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มขนาด 1.7 ล้านโวลต์เครื่องแรกของประเทศไทย 25

2.1 ความเป็นมา 25

2.2 หลักการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคแทนเดอตรอนโดยสังเขป 29

2.3 ฟิสิกส์พื้นฐานของอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับวัตถุ 32

2.4 การใช้ประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์และตรวจสอบธาตุด้วยลำไอออน 38

2.5 การใช้ประโยชน์ด้านการทำไมโครลิโธกราฟีด้วยลำไอออน 46

2.6 สรุป 50

บทที่ 3 เทคโนโลยีลำไอออนกับการใช้งานด้านการวิเคราะห์และปรับปรุงคุณภาพพลอยธรรมชาติ 55

3.1 พลอยธรรมชาติกับการปรับปรุงคุณภาพ 55

3.2 เครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย 60

3.3 การคัดแยกพลอยก่อนการปรับปรุง 64

3.4 การปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมด้วยลำไอออน 69

3.5 งานวิจัยนำร่องเชิงพาณิชย์ 80

3.6 แผนการในอนาคต 83

บทที่ 4 เทคโนโลยีลำไอออนเพื่องานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ 89
4.1 อารัมภบท 89
4.2 เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์เพื่องานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ 91
4.3 การชักนำการกลายพันธุ์ด้วยลำไอออนเพื่อการปรับปรุงพืช 97
4.4 การชักนำการส่งถ่ายยีนด้วยลำไอออนพลังงานต่ำ 105
4.5 สรุป 111
บทที่ 5 เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นแบบอาร์เอฟและการประยุกต์ 117
5.1 ประเภทและความเป็นมาของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น 117
5.2 หลักการของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นแบบอาร์เอฟ 119
5.3 การประยุกต์เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นแบบอาร์เอฟ 124
5.4 เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นแบบอาร์เอฟ ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 130
5.5 แผนการในอนาคต 140
บทที่ 6 เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน 145
6.1 อารัมภบท 145
6.2 ประวัติเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน 147
6.3 คุณสมบัติเฉพาะของแสงซินโครตรอน 151
6.4 อนุภาคที่มีประจุสำหรับการผลิตแสงซินโครตรอน 154
6.5 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 2 และ 3 155
6.6 ระบบลำเลียง 161
6.7 เครื่องกำเนิดแสงสยาม 163
6.8 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอน 175
6.9 สถิติการใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม 184
6.10 สรุป 185
ภาคผนวก
ก. ข้อมูลคณะผู้เขียน 192
ข. ข้อมูลเพื่อการเปรียบเทียบ 194

คำนำ

เครื่องเร่งอนุภาคเครื่องแรกของโลกถูกสร้างขึ้นเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2474 โดยมีจุดประสงค์ในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง (อนุภาคกระสุน) เพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างของนิวเคลียสของอะตอม นับจากนั้นเป็นต้นมา เทคโนโลยีด้านเครื่องเร่งอนุภาคก็ได้กลายเป็นหัวขบวนของการพัฒนาในทุกแขนงของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อย่างไรก็ตาม บทบาทของเครื่องเร่งอนุภาคมิได้ถูกจำกัดอยู่แต่เพียงในห้องปฏิบัติการวิจัยเท่านั้น แต่ได้ขยายเข้ามาในแวดวงงานอุตสาหกรรม และการใช้งานแบบต่อยอด เพื่อยังประโยชน์ต่อการดำรงชีพของมนุษย์ จนถึงกับมีคำกล่าวเปรียบเทียบว่า หากต้องการดูศักยภาพของการพึ่งพาตนเองได้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศใด ก็ให้ดูที่ความสามารถของประเทศนั้นในการสร้างและการใช้งานเครื่องเร่งอนุภาคแบบต่าง ๆอย่างมีประสิทธิผล

ลักษณะเด่นที่สำคัญของศาสตร์ของเครื่องเร่งอนุภาค คือธรรมชาติการเป็นสหวิทยาการ นักวิทยาศาสตร์ในแวดวงนี้ต่างตระหนักดีถึงความเชื่อมโยงระหว่างฟิสิกส์ อิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมไฟฟ้า และแม้แต่วิศวกรรมโยธา ในกระบวนการสร้างและใช้งานเครื่องเร่งอนุภาค

เครื่องเร่งอนุภาคทำให้นักวิทยาศาสตร์ มีข้อสนเทศระดับจุลภาค ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับความเข้าใจ และการประยุกต์ในทุกแขนงของความรู้ จากชีววิทยาถึงวิทยาศาสตร์การแพทย์ จากวัสดุศาสตร์ถึงโลหะวิทยา และจากอนุภาคมูลฐานถึงจักรวาลวิทยา

- เราใช้เครื่องเร่งอนุภาคในการ *“มอง”* โครงสร้างส่วนที่เล็กที่สุดขององค์ประกอบสิ่งมีชีวิต และองค์ประกอบของสสาร

- เราใช้เครื่องเร่งอนุภาคในการผลิตลำแสงที่มีความสว่างกว่าลำแสงจากดวงอาทิตย์เป็นล้าน ๆ เท่า และผลิตห้วงแสงที่มีความแคบในเรือนเฟมโตวินาที (10^{-15} วินาที) ซึ่งทำให้เราสามารถบันทึกภาพปฏิกิริยาเคมีและชีวเคมีระดับโมเลกุลได้

- เราใช้เครื่องเร่งอนุภาคในการสร้างนิวตรอน ไอออน และรังสีเอกซ์ (โฟตอน) เพื่อฆ่าเซลล์มะเร็ง และผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีสำหรับงานรังสีวินิจฉัยทางการแพทย์

- เราใช้เครื่องเร่งอนุภาคในการตรวจวิเคราะห์ธาตุและปรับเปลี่ยนสมบัติเชิงกายภาพและชีวภาพของวัสดุและเซลล์สิ่งมีชีวิต รวมทั้งการทำสารกึ่งตัวนำ และไมโครชิปความจุสูง

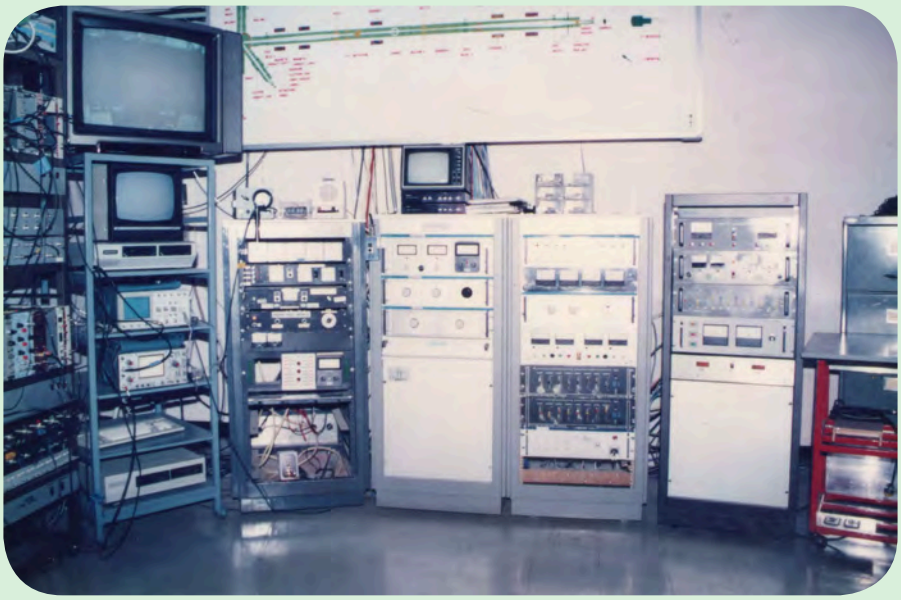
ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่า เครื่องเร่งอนุภาคคือศูนย์รวมของเทคโนโลยีระดับสูงทุกรูปแบบในโลกยุคปัจจุบัน การออกแบบสร้างเครื่องเร่งอนุภาคตั้งแต่ระดับพลังงาน keV ขึ้นไปจนถึง GeV จึงเป็นความพยายามในการไต่บันไดเทคโนโลยียุคใหม่นั่นเอง

ประเทศไทยได้เริ่มไต่บันไดเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาคเมื่อประมาณ 40 ปีที่ผ่านมา และประสบผลสำเร็จในการสร้างเครื่องกำเนิดอนุภาคกระสุนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ อิเล็กตรอน ไอออน นิวตรอน และโฟตอน จนสามารถนำมาใช้งานในด้านต่าง ๆ ทั้งด้านการแพทย์ การเกษตร อุตสาหกรรม และการวิจัย ซึ่งในปัจจุบัน ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ได้ให้การสนับสนุนคณาจารย์และนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยในการพัฒนา ปรับปรุง และใช้ประโยชน์เครื่องเร่งอนุภาคแบบต่าง ๆ ทั้งแบบเชิงเส้นและเชิงวงมาอย่างต่อเนื่อง

เพื่อประโยชน์และเป็นเอกสารอ้างอิงสำหรับผู้ที่สนใจ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์จึงได้ดำริจัดทำหนังสือ *"เครื่องเร่งอนุภาค"* นี้ขึ้น เนื้อหาหลักของหนังสือเป็นการรวบรวมรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับตัวเครื่องเร่งอนุภาคและการใช้งานในด้านต่าง ๆ โดยคณะบุคคลซึ่งเป็นผู้บุกเบิกศาสตร์แขนงนี้ขึ้นในประเทศไทย หวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ และเป็นแรงบันดาลใจให้ นักเรียน นิสิต นักศึกษา มาเป็นกำลังสำคัญในการออกแบบสร้างเครื่องเร่งอนุภาครุ่นใหม่ อันจะนำมาซึ่งการอยู่ดี กินดี พลานุภาพ และความมั่นคงของประเทศต่อไป

ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง

ศาสตราจารย์เกียรติคุณ สาขาวิชาฟิสิกส์
ผู้อำนวยการศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์





รูปบนคือระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อผลิต 2-ns Pulsed 14 MeV Neutron ในห้องควบคุม (control room) ซึ่งอยู่หลังกำแพงคอนกรีตหนา 1 เมตร ส่วนรูปล่างคือระบบอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์สำหรับการวัดพลังงานของอนุภาคนิวตรอนพลังงานสูงด้วยเทคนิค Time-of-Flight คือการวัดเวลาบินของอนุภาคนิวตรอนพลังงานต่าง ๆ สำหรับระยะทางวิ่ง 10 เมตร ซึ่งเป็นวิธีการวัดพลังงานของอนุภาคนิวตรอนที่แม่นยำที่สุด ระบบทั้งสองได้ถูกใช้งานอย่างเต็มที่ในช่วงปีพ.ศ. 2532 – 2545

๑

การกำเนิดของเครื่องเร่งอนุภาค

สมศร สิงขรัตน์ ดุษฎี สุวรรณขจร และ ถิรพัฒน์ วิลัยทอง

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

1.1 เครื่องเร่งอนุภาคเครื่องแรกของโลก

อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่เกิดจากมันสมองของนักฟิสิกส์ และต้องอาศัยพื้นฐานความรู้ทางฟิสิกส์ที่มีการใช้งานอยู่จริงในสังคมมีอยู่มากมายหลายชิ้น ยกตัวอย่าง เช่น เทอร์โมมิเตอร์ (Galileo Galilei : พ.ศ. 2136) มอเตอร์ไฟฟ้า (William Sturgeon : พ.ศ. 2375) เครื่องเอกซเรย์ (William Coolidge : พ.ศ. 2456) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Ernst Ruska และ Max Knoll : พ.ศ. 2474) เครื่องถ่ายเอกสาร (Chester Carlson : พ.ศ. 2481) ทรานซิสเตอร์ (William Shockley, Walter Brattain และ John Bardeen : พ.ศ. 2490) เลเซอร์ (Theodore Maiman : พ.ศ. 2503) ฯลฯ แต่ยังมีเครื่องมืออีกชิ้นหนึ่งที่ก็ใช้กันอยู่ในงานหลายประเภทในทุกวันนี้ แต่ไม่เป็นที่รู้จักกันมากนัก เพราะบางครั้งก็ซ่อนรูปอยู่ในชื่ออื่น สิ่งนั้นก็คือเครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator)

เหมือนกับเครื่องมืออีกหลายอย่างที่มีประโยชน์ในปัจจุบัน ที่มีจุดกำเนิดมาจากความสนใจใคร่รู้ในทางวิชาการล้วน ๆ ของนักฟิสิกส์ กรณีเครื่องเร่งอนุภาคก็เช่นเดียวกัน กล่าวคือที่ห้องปฏิบัติการวิจัย Cavendish ของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ ประเทศสหราชอาณาจักร เมื่อปีพ.ศ. 2462 มีลอร์ด Ernest Rutherford เป็นผู้อำนวยการ ซึ่งมีชื่อเสียงระบือลือเลื่องอยู่แล้วว่าเป็นนักฟิสิกส์นิวเคลียร์ชั้นนำของโลก ท่านเป็นผู้ค้นพบนิวเคลียสของอะตอมเมื่อปีพ.ศ. 2454 สมัยที่ยังเป็นศาสตราจารย์อยู่ที่ University of Manchester วิธีการศึกษานิวเคลียสในเชิงทดลอง

ของท่านก็คือการใช้อนุภาคอัลฟา (ท่านเป็นคนตั้งชื่อ) เป็นกระสุน ยิงใส่นิวเคลียสของธาตุต่าง ๆแล้วสังเกตและวิเคราะห์ผลที่เกิดตามมาหลังการชนกันนั้น เช่นยิงอนุภาคอัลฟาใส่แผ่นทองคำเปลวที่ผลการทดลองได้ยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองอะตอมที่ท่านคิดขึ้น (Rutherford Atomic Model) หรือยิงอนุภาคอัลฟาใส่ก๊าซไนโตรเจนที่ทำให้ไนโตรเจนเปลี่ยนไปเป็นออกซิเจน และยังมีอนุภาคใหม่เกิดขึ้นอีกหนึ่งตัวด้วย การทดลองนี้ได้กลายเป็นการแปรธาตุ (nuclear transmutation) ด้วยน้ำมือมนุษย์เป็นครั้งแรก พร้อมทั้งยังเป็นการค้นพบอนุภาคโปรตอนที่ลอร์ด Rutherford ก็เป็นคนตั้งชื่อให้อีกเช่นกัน ในตอนนั้นอนุภาคอัลฟาที่ท่านใช้คือกัมมันตรังสีที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากสารไอโซโทปกัมมันตรังสีเรเดียม-226 หรือบิสมัธ-214 เป็นต้น ท่านจึงมีอนุภาคกระสุนใช้เพียงชนิดเดียวและยังมีพลังงานค่าจำกัด เปลี่ยนแปลงอะไรตามใจชอบไม่ได้ ในการบรรยายที่ Royal Society of London เมื่อปีพ.ศ. 2470 *[1]* ท่านได้ท้าชวนให้มีการประดิษฐ์เครื่องมือที่สามารถผลิตลำอนุภาคที่สามารถปรับเปลี่ยนพลังงานได้และมีค่าสูงกว่าที่ผลิตได้จากสารไอโซโทปกัมมันตรังสี ผู้ที่ทำได้สำเร็จ และนำไปใช้งานจริงเป็นรายแรกของโลกเมื่อตอนกลางปีพ.ศ. 2474 ก็คือลูกศิษย์ปริญญาเอกของท่านนั่นเอง มีด้วยกันสองคนที่ร่วมแรงแข็งขัน คนหนึ่งถนัดด้านทฤษฎี ส่วนอีกคนถนัดด้านปฏิบัติ คือ John Cockcroft กับ Ernest Walton ขณะนั้นมีอายุ 35 ปีและ 29 ปี ตามลำดับ ในเดือนเมษายน พ.ศ. 2475 ทั้งสองได้ใช้เครื่องเร่งอนุภาคที่ประดิษฐ์กันขึ้นเองนี้ผลิตและเร่งอนุภาคโปรตอนด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้ามากกว่า 100,000 โวลต์ (ทำให้อนุภาคโปรตอนมีความเร็วอยู่ในเรือน 5 x 10^6 เมตร/วินาที) แล้วยิงเข้าใส่เป้านิ่งคือนิวเคลียสของธาตุลิเธียม ได้ผลลัพธ์เป็นอนุภาคอัลฟา (หรือก็คือนิวเคลียสของธาตุฮีเลียม) 2 ตัวตามสมการที่ 1.1 *[2]*



รูปที่ 1.1 *(ก) Cockcroft (ขวา) และ Walton (ซ้าย) ถ่ายภาพร่วมกับอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาเอกคือ ลอร์ด Rutherford หลังประสบความสำเร็จหมาด ๆ ในการทดลองที่กลายเป็นการสร้างประวัติศาสตร์โลกทางด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์ในปีพ.ศ. 2475 [3]*

$$^{1}H + {}^{7}Li \text{ ----------} > {}^{4}He + {}^{4}He \qquad (1.1)$$

ซึ่งได้กลายเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ของการแปรธาตุที่กระตุ้นด้วยอนุภาคกระสุนจากเครื่องเร่งอนุภาคปฏิกิริยาแรกของโลก ความสำเร็จของการทดลองนี้ยังมีผลพลอยได้ที่สำคัญมาก กล่าวคือ เป็นการทดลองแรกที่ยืนยันถึงความถูกต้องของสมการ $E = mc^2$ อันเลื่องชื่อของไอน์สไตน์ (คิดขึ้นเมื่อปีพ.ศ. 2448) กล่าวคือถ้าดูที่มวลรวมก่อนเกิดปฏิกิริยา (มวลของอนุภาคโปรตอนรวมกับมวลของไอโซโทปลิเธียม-7) จะมีค่าเท่ากับ 8.02328 u ส่วนมวลรวมหลังเกิดปฏิกิริยา (มวลรวมของอนุภาคอัลฟาทั้งสองตัว) มีค่าเท่ากับ 8.00301 u จะเห็นได้ว่ามีมวลลดลงไป 0.02027 u แต่ตามหลักฟิสิกส์แล้วมวลไม่สามารถหายไปได้เฉย ๆ ตรงนี้เองที่ Cockcroft กับ Walton นำสมการของไอน์สไตน์มาช่วยตอบว่ามวล 0.02027 u นั้นไม่ได้หายไปไหน แต่ได้เปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานจลน์ของอนุภาคอัลฟาทั้งสองที่พุ่งออกไปในทิศตรงกันข้ามด้วยความเร็วตัวละ 2.14×10^{7} เมตร/วินาที ซึ่งเป็นค่าความเร็วที่สูงกว่าของอนุภาคกระสุนเกือบ 10 เท่า ทั้ง ๆที่อนุภาคอัลฟาแต่ละตัวหนักกว่าอนุภาคโปรตอนถึง 4 เท่า



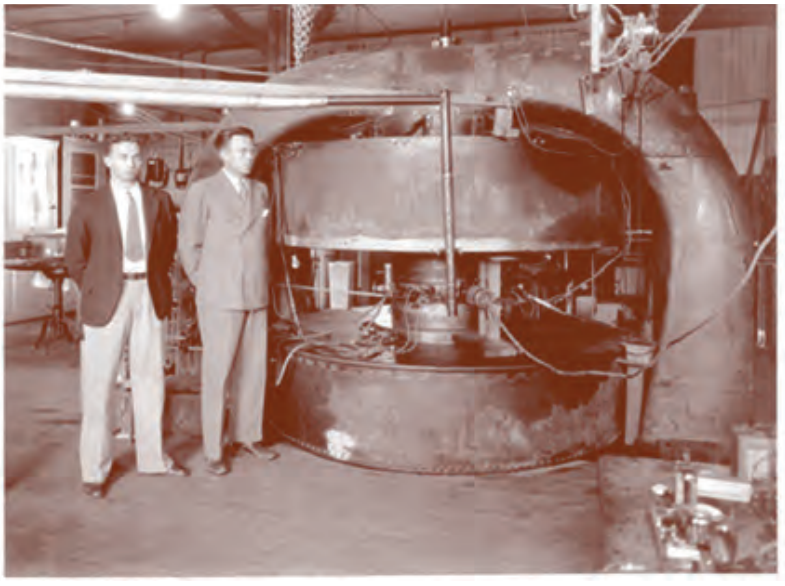
รูปที่ 1.1 *(ข) ภาพถ่ายเครื่องเร่งอนุภาคของ Cockcroft กับ Walton ที่ Cavendish Laboratory ของ University of Cambridge ในภาพจะเห็นว่าเครื่องเร่งอนุภาครุ่นบุกเบิกนี้ถูกจัดตั้งให้อยู่ในแนวดิ่ง (ปัจจุบันเครื่องเร่งอนุภาคส่วนใหญ่จะวางตัวอยู่ในแนวนอน) โดยปลายที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงจะอยู่ด้านบน อนุภาคโปรตอนจะถูกผลิตในบริเวณนี้จากก๊าซไฮโดรเจน แล้วถูกเร่งให้วิ่งเร็วขึ้นเป็นเส้นตรงในแนวดิ่งภายในท่อสุญญากาศ (ทำด้วยท่อแก้วที่ภายในมีท่อเร่ง หรือ accelerating tube ทำด้วยโลหะอยู่ร่วมแกนสมมาตรเดียวกัน) ยาวประมาณ 2.5 เมตร ลงมาที่ปลายด้านล่าง ซึ่งมีสถานีทดลอง (experimental chamber) ติดตั้งอยู่ บุคคลที่เห็นนั่งอยู่ในลังไม้ที่ครอบสถานีทดลองไว้เพื่อใช้ทำเป็นห้องมืด คือตัว Walton นั่นเอง (ในภาพได้เปิดผ้าคลุมสีดำขึ้นเพื่อให้เห็นลักษณะภายใน) ด้วยลักษณะคล้ายกันนี้ Walton เป็นคนแรกที่ได้พบเห็นการเกิดขึ้นของปฏิกิริยานิวเคลียร์ดังสมการที่ 1.1 เมื่อวันที่ 14 เมษายน พ.ศ. 2475 [4]*

ผลงานนี้ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร Nature เมื่อวันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2475 Cockcroft กับ Walton ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์จากผลงานนี้ในปีพ.ศ. 2494

ส่วนการพยายามคิดค้นพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคเครื่องแรกดังกล่าวขึ้นมาก็เกิดผลพลอยได้ที่มีประโยชน์ต่อวงการวิศวกรรมไฟฟ้าด้วย กล่าวคือเทคนิคการสร้างศักย์ไฟฟ้าสูงชนิดไฟตรง นับเป็นหมื่นเป็นแสนโวลต์ตามแบบของ Cockcroft และ Walton (เรียกกันต่อมาว่า Cockcroft-Walton Generator หรือ CW Voltage Multiplier) ยังถูกนำมาใช้กันแม้จนถึงปัจจุบันนี้ในเครื่องมือต่าง ๆที่ต้องอาศัยศักย์ไฟฟ้าสูง เช่นเครื่องเร่งอนุภาครุ่นหลัง ๆ เครื่องเลเซอร์ เครื่องเอกซเรย์ เครื่องถ่ายเอกสาร เครื่อง air ionizer ปั๊มสุญญากาศชนิด ion pump หรือโทรทัศน์ (ชนิดที่จอภาพเป็นหลอดรังสีแคโทด) เป็นต้น เพราะสามารถทำให้มีขนาดเล็กกะทัดรัดได้ ไม่มีส่วนใดที่มีการเคลื่อนไหวเลย มีเสถียรภาพสูง และยังสามารถให้กระแสไฟฟ้าได้สูงอีกด้วย

ข้อเสนอแนะของลอร์ด Rutherford ได้จุดประกายความคิดให้กับนักฟิสิกส์ในที่อื่น ๆด้วย รวมถึงนักฟิสิกส์ในประเทศสหรัฐอเมริกา คือ Ernest Lawrence ที่ University of California ณ เมือง Berkeley (UC Berkeley) Lawrence กับลูกศิษย์ปริญญาเอกที่เป็นเรี่ยวแรงสำคัญ ชื่อ Milton Livingston ได้ช่วยกันสร้างเครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้หลักการที่แตกต่างอย่างมากจากเครื่องเร่งอนุภาคของ Cockcroft กับ Walton โดยทำได้สำเร็จในปีพ.ศ. 2474 เช่นกัน เรียกกันต่อมาว่าเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอน (cyclotron) เพราะแทนที่อนุภาคจะถูกเร่งในแนวเส้นตรง แต่วิธีของ Lawrence ใช้สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กไฟฟ้าบังคับให้อนุภาควิ่งวนเป็นวงกลมในแนวระนาบที่ถูกเร่งซ้ำ ๆด้วยสนามไฟฟ้ารอบละ 2 ครั้ง ทำให้อนุภาคค่อย ๆมีพลังงานสูงขึ้นพร้อม ๆกับที่วงโคจรมีรัศมีเพิ่มขึ้น ๆ

ต่อมาก็ได้มีการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคตามมาอีกหลายเครื่อง หลายรูปแบบ ซึ่งส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นด้วยเหตุผลเพื่อใช้ในงานค้นคว้าวิจัยทางวิชาการด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์เป็นสำคัญ เฉกเช่นเดียวกับเครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้เทคโนโลยีที่สลับซับซ้อนที่สุด มีขนาดใหญ่ที่สุด (เส้นรอบวงยาว 27 กิโลเมตร) และทรงพลังที่สุดในโลก (สามารถเร่งอนุภาคโปรตอนให้มีพลังงานสูงสุดได้ถึง 7,000,000 MeV) ในปัจจุบันนี้ ซึ่งมีชื่อว่า



รูปที่ 1.2 *Ernest Lawrence (ขวา) และ Milton Livingston (ซ้าย) กับเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอนขนาด 27 นิ้ว ซึ่งส่วนนี้จะมองเห็นไม่ชัดในภาพเพราะถูกหนีบอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กบน-ล่าง ที่มองเห็นเป็นส่วนใหญ่ในภาพก็คือขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กบน-ล่าง และแกนโย้ก (yoke) เพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กวนได้ครบรอบ เครื่องเร่งอนุภาคนี้สามารถผลิตลำอนุภาคโปรตอนที่มีพลังงานสูงสุด 3.6 MeV Lawrence ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์จากผลงานการคิดค้นพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอนในปีพ.ศ. 2482 [5]*

Large Hadron Collider (LHC) ที่ศูนย์วิจัยนานาชาติ CERN* ของยุโรป ก็ถูกสร้างขึ้นด้วยวัตถุประสงค์หลักเพื่อการวิจัยเกี่ยวกับฟิสิกส์ของอนุภาคมูลฐานล้วน ๆ แต่ผลพลอยได้ของการพัฒนาโครงการนี้ได้เกิดมีเทคนิคและเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่มีคุณค่าต่อสังคมและเศรษฐกิจมากมาย เช่น ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ World Wide Web เทคนิค medical imaging เทคโนโลยีสุญญากาศ เทคโนโลยีเซนเซอร์ (sensor) เทคโนโลยีหัววัดแสง (photodetector) เทคโนโลยีแม่เหล็ก และเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาคทางการแพทย์ เป็นต้น

การเริ่มต้นขึ้นของเครื่องเร่งอนุภาคในประเทศไทยก็ด้วยวัตถุประสงค์เพื่อการค้นคว้าวิจัยทางด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์เช่นกัน

** ย่อมาจากชื่อเต็มในภาษาฝรั่งเศสว่า Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire ซึ่งตรงกับภาษาอังกฤษว่า European Council for Nuclear Research*

1.2 เครื่องเร่งอนุภาคเพื่องานวิจัยเครื่องแรกของประเทศไทย

เครื่องเร่งอนุภาคถูกนำมาใช้ในงานวิจัยเป็นครั้งแรกในประเทศไทยโดย ศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ เจริญขวัญ เมื่อปีพ.ศ. 2513 ที่ภาควิชาฟิสิกส์* คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เป็นเครื่องเร่งอนุภาคขนาดกะทัดรัดเพื่อผลิตรังสีนิวตรอนพลังงานสูง (fast neutron) ที่มีค่า 14 MeV เรียกว่าเครื่อง Sealed Tube Neutron Generator (รูปที่ 1.4) เพื่อใช้ในงานการเรียนการสอนและการวิจัยในสาขาวิชาฟิสิกส์นิวเคลียร์ที่เกี่ยวข้องกับ Fast Neutron Induced Reaction เป็นเครื่องที่ผลิตโดยบริษัท Karman Nuclear ประเทศสหรัฐอเมริกา ราคาในสมัยนั้นประมาณ 5,000 เหรียญสหรัฐ เครื่องเร่งอนุภาคนี้ถูกใช้งานจนถึงประมาณปีพ.ศ. 2528 ตลอดระยะเวลาประมาณ 15 ปี ได้ถูกใช้ในการผลิตผลงานวิจัยและนักศึกษาทางสายวิชาฟิสิกส์นิวเคลียร์ทั้งระดับปริญญาตรีและปริญญาโทเป็นจำนวนมาก หนึ่งในผลงานวิจัยเด่นก็คือการค้นพบแบบแผนการสลายตัว (decay scheme) ของไอโซโทปกัมมันตรังสีโคบอลต์-64 เป็นครั้งแรกโดยศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ เจริญขวัญ เมื่อปีพ.ศ. 2520 *[6]*



รูปที่ 1.3 *ศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ เจริญขวัญ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกด้านวิชาฟิสิกส์นิวเคลียร์จาก University of California ณ เมือง Los Angeles (UCLA) ประเทศสหรัฐอเมริกา เริ่มเข้ารับราชการที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อปีพ.ศ. 2508 หลังการก่อตั้งมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ประมาณ 1 ปี และเกษียณอายุราชการเมื่อปีพ.ศ. 2541*

** ในปีพ.ศ. 2551 ได้เปลี่ยนชื่อเป็นภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์*

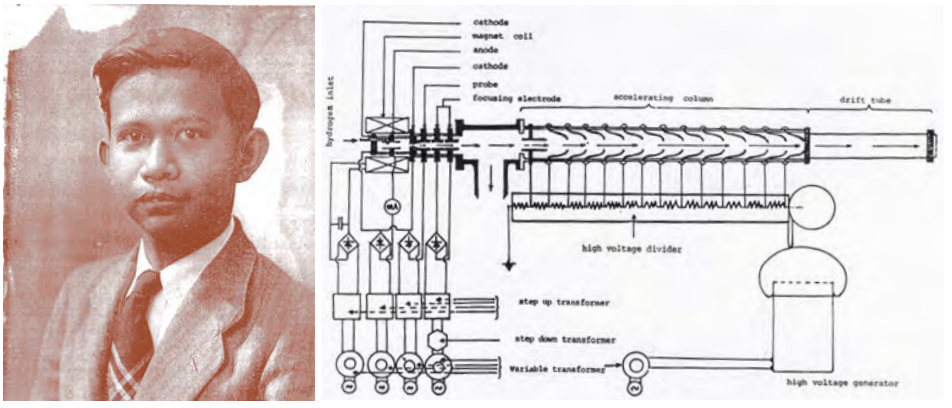


รูปที่ 1.4 *เครื่องเร่งอนุภาคเครื่องแรกที่ถูกนำมาใช้งานในประเทศไทย ถ่ายเปรียบเทียบกับไม้บรรทัดยาว 1 ฟุต หลักการทำงานสำคัญของเครื่องนี้ก็คืออนุภาคดิวเทอรอน (^{2}H) ที่ผลิตจากก๊าซดิวเทอเรียม (deuterium ซึ่งเป็นไอโซโทปตัวที่ 2 ของธาตุไฮโดรเจน) จะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงให้มีพลังงานระดับ 150 keV (หรือ 0.15 MeV) เพื่อยิงใส่เป้าที่เป็นตริเตียม (tritium หรือ ^{3}H เป็นไอโซโทปตัวที่ 3 ของธาตุไฮโดรเจน) ทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบ nuclear fusion กล่าวคือ ^{2}H กับ ^{3}H หลอมรวมเข้าด้วยกัน แล้วเกิดเป็นอนุภาคใหม่ 2 ตัวคืออนุภาคอัลฟากับอนุภาคนิวตรอน พลังงาน 14 MeV แต่ที่สามารถทะลุออกมาจากเครื่องได้มีแต่อนุภาคนิวตรอนเท่านั้น โดยจะออกมาทางปลายบนเป็นส่วนใหญ่ (ภาพนี้ไม่ได้รวมแหล่งจ่ายไฟศักย์สูงและตู้ควบคุม)*

1.3 เครื่องเร่งอนุภาครุ่นแรกที่สร้างขึ้นในประเทศไทย

ระหว่างปีพ.ศ. 2527-2532 มีการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคขึ้นสองเครื่องในเมืองไทย เครื่องหนึ่งสร้างขึ้นที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยรองศาสตราจารย์ ดร. ภิยโย ปันยารชุน กับลูกศิษย์ปริญญาโทของท่าน (นาย ชัชวาลย์ สักกะวงศ์) เป็นเครื่องเร่งอนุภาคผลิตลำอนุภาคโปรตอนพลังงาน 150 keV (รูปที่ 1.5) โดยนอกเหนือจากระบบปั๊มสุญญากาศแล้ว (ใช้ diffusion pump และ rotary pump ของบริษัท Edwards) ชิ้นส่วนอื่น ๆของเครื่องเร่งอนุภาคนี้ล้วนสร้างขึ้นเองจากสิ่งของที่หาได้รอบ ๆตัวทั้งสิ้น เช่น ตรงส่วนของท่อเร่งอนุภาคนั้น ขั้วไฟฟ้าทั้ง 13 ขั้ว ทำจากถ้วยน้ำจิ้มสเตนเลสตราหัวม้าลาย ส่วนฉนวนทรงกระบอกกลวงสำหรับแยกแต่ละขั้วไฟฟ้าออกจากกัน ทำจากโป๊ะแก้วของตะเกียงเจ้าพายุ แล้วติดเข้าด้วยกันเป็นท่อสุญญากาศยาว 90 เซนติเมตรโดยใช้กาวอีพ็อกซี สำหรับแหล่งจ่ายไฟศักย์สูง (HV power supply) ก็ใช้ทรานสฟอร์เมอร์ของหลอดไฟนีออน แปลงไฟบ้าน 220 V(ac) ขึ้นไปเป็น 30 kV(ac) แล้วใช้เทคนิคของ Cockcroft-Walton เพิ่มศักย์ไฟฟ้าขึ้นเป็น 150 kV(dc) ถึงแม้เครื่องเร่งอนุภาคนี้

ไม่ได้ถูกนำไปใช้ในโครงการอื่นใดอีก นอกจากการนำไปแสดงในงานวันวิทยาศาสตร์ครั้งหนึ่ง แต่ก็สามารถลบคำปรามาสที่เคยมีคนพูดให้อาจารย์ได้ยินว่าคนไทยไม่มีทางสร้างเครื่องเร่งอนุภาคได้เอง



(ก) *(ข)*

รูปที่ 1.5 *(ก) ภาพถ่ายของรองศาสตราจารย์ ดร. ภิยโย ปันยารชุน เมื่อปีพ.ศ. 2496 ขณะกำลังจะเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่ Manchester University ประเทศสหราชอาณาจักร ท่านสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกทางด้าน High Energy Particle Physics จาก University of California ณ เมือง Riverside ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อปีพ.ศ. 2518 เกษียณอายุราชการจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปีพ.ศ. 2536 ปัจจุบันมีอายุ 82 ปี (ข) แผนภาพเครื่องเร่งอนุภาคที่สร้างสำเร็จเมื่อปีพ.ศ. 2530 โดยใช้เวลาในการสร้างประมาณ 1 ปี [7, 8]*

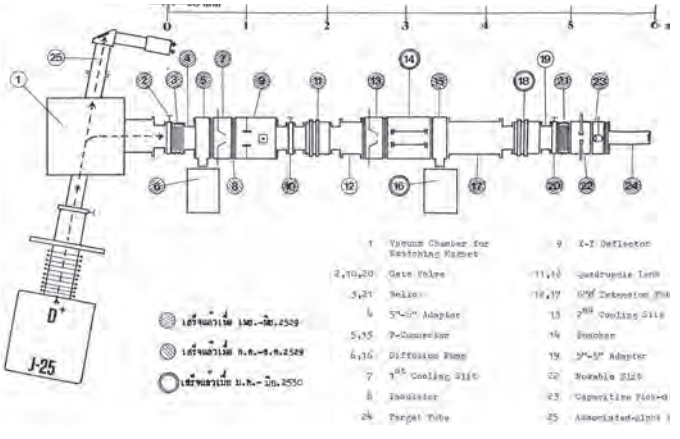
ในช่วงเวลาดังกล่าว เครื่องเร่งอนุภาคอีกเครื่องหนึ่งก็กำลังถูกสร้างขึ้นที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยคณะนักวิจัยของศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง* ที่นำทีมโดยศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง โดยมีศาสตราจารย์ ดร. Akito Takahashi แห่งมหาวิทยาลัยโอซากา ประเทศญี่ปุ่น เป็นที่ปรึกษาในการออกแบบและการสร้าง *[9]* เป้าประสงค์ของเครื่องเร่งอนุภาคนี้ก็เพื่อผลิตลำอนุภาคดิวเทอรอนพลังงาน 150 keV ที่เป็นห้วงมีความกว้างเพียง 2×10^{-9} วินาที หรือ 2 นาโนวินาที (รูปที่ 1.7) สำหรับใช้ผลิตรังสีนิวตรอนพลังงาน 14 MeV แบบเป็นห้วง ด้วยทุนรอนที่จำกัดจำเขี่ย (ส่วนใหญ่ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ หรือ วช.) ในสภาวะที่ขาดแคลนปัจจัย

** ในปีพ.ศ. 2550 ได้เปลี่ยนชื่อเป็นศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค*

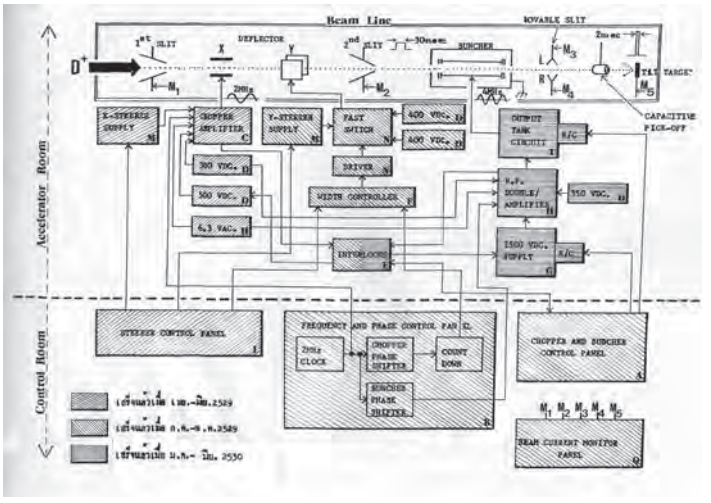


รูปที่ 1.6 ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์จาก Kent State University มลรัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา เริ่มเข้ารับราชการที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อปีพ.ศ. 2512 เกษียณอายุราชการเมื่อปีพ.ศ. 2549 ดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ตั้งแต่พ.ศ. 2550 จนถึงปัจจุบัน

เกื้อหนุนที่มีคุณภาพ เช่นโรงกลึงและเครื่องเชื่อมโลหะสเตนเลส หรือเสถียรภาพของไฟฟ้า (ไฟฟ้าดับบ่อยโดยไม่มีการแจ้งเตือนล่วงหน้า) เป็นต้น แต่งานสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ของท่อนำลำอนุภาค (beamline) ยาวกว่า 6 เมตรก็ล้วนถูกสร้างขึ้นภายในจังหวัดเชียงใหม่ทั้งสิ้น โดยใช้บริการของโรงกลึงชื่อ “ก. ท่าแพ” (ปัจจุบันเลิกกิจการแล้ว) ที่มีคุณกวี กรโกวิท เป็นเจ้าของกิจการ ต้องนับว่าเรื่องนี้เป็นความโชคดีเพราะทีมช่างของคุณกวียอมอดทนกับการขอแก้งานแล้วแก้งานอีกโดยไม่เคยปริปากบ่นให้ได้ยินเลย ด้วยในเวลานั้นยังไม่มีเครื่องเชื่อมทิก (TIG welding) เหมือนเช่นในปัจจุบันนี้ การเชื่อมโลหะสเตนเลสในเวลานั้นยังคงต้องใช้เครื่องเชื่อมเพียงระดับพื้นฐานทั่วไปคือเครื่องเชื่อมแบบธูป นอกจากรอยเชื่อมจะไม่สวยแล้ว ยังมักเกิดรูตามมาขึ้นเสมอ ๆ ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ในงานสุญญากาศได้ คณะนักวิจัยกลุ่มนี้จึงได้ใช้เวลาถึง 5 ปีในการออกแบบและสร้าง จนกระทั่งสำเร็จเมื่อปีพ.ศ. 2532



รูปที่ 1.7 (ก) ต้นฉบับแผนผังการติดตามงานการสร้างและทดสอบระบบตัด (chopper) และบีบอัด (buncher) ลำอนุภาคดิวเทอรอน (D^+ หรือ ^2H) เพื่อให้มีห้วงกว้างเพียง 2 นาโนวินาที ที่ได้พัฒนาต่อเติมจากเครื่องเร่งอนุภาคดิวเทอรอนรุ่น J-25 ของบริษัท Assistance Industrielle Dauphinoise ประเทศฝรั่งเศส ที่ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency หรือ IAEA) บริจาคให้เมื่อปีพ.ศ. 2526



รูปที่ 1.7 *(ข) ต้นฉบับแผนผังการติดตามงานการสร้างและการทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคในรูปที่ 1.7 (ก) ที่สร้างขึ้นเองอีกเช่นกัน [10,11]*



รูปที่ 1.7 *(ค) ภาพถ่ายเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อผลิต 2-ns Pulsed 14 MeV Fast Neutron ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว ขณะติดตั้งอยู่ที่ห้องใต้ดินของอาคารวิจัยนิวตรอน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*

เครื่องเร่งอนุภาคนี้ถูกนำไปใช้งานในการศึกษาวิจัยด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลาถึง 13 ปี โดยภารกิจหลักของเครื่องเร่งอนุภาคนี้ก็คือการวัดหาค่า double differential cross-section ของอันตรกิริยาระหว่างรังสีนิวตรอนพลังงาน 14 MeV กับธาตุเหล็กและบิสมัธ-208 ที่จะนำมาใช้ทำเตาปฏิกรณ์ปรมาณูแบบฟิวชัน แหล่งพลังงานของโลกในอนาคต ซึ่งเป็นโครงการที่ทำร่วมกับ IAEA และใช้ในการวิเคราะห์ธาตุในระเบิดชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคนิค Prompt Gamma Analysis (PGA) เพื่อหาลักษณะ “finger print” ของระเบิด โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ *[12]*

จากความสำเร็จในการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคดังกล่าว ทำให้คณะนักวิจัยกลุ่มนี้ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่เกิดมีทักษะและประสบการณ์เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ต่อมาจึงได้สร้างเครื่องเร่งอนุภาคขึ้นเองอีกหลายเครื่องเพื่อใช้ในงานเชิงประยุกต์ด้านต่าง ๆ *[13]*

1.4 บทบาทที่เพิ่มขึ้นของเครื่องเร่งอนุภาค

นายแพทย์ John H. Lawrence เป็นแพทย์คนแรกที่ริเริ่มนำลำอนุภาคโปรตอนที่ผลิตจากเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอนมาใช้ในการบำบัดรักษามะเร็งในคนไข้ โดยได้เริ่มต้นขึ้นประมาณในปีพ.ศ. 2478 คือเพียง 4 ปีหลังนักฟิสิกส์สร้างเครื่องสำเร็จ อันที่จริงเรื่องนี้นอกจากจะเป็นการบูรณาการที่มีคุณค่าระหว่างวิชาฟิสิกส์กับแพทยศาสตร์แล้ว ยังเป็นการประสานพลังที่น่าประทับใจระหว่างสองศรีพี่น้อง เพราะนายแพทย์ John Lawrence ก็คือน้องชายแท้ ๆ ของศาสตราจารย์ Ernest Lawrence นั่นเอง มีอายุอ่อนกว่า 3 ปี และไม่ได้จำกัดอยู่แต่เพียงการใช้ประโยชน์ลำอนุภาคโปรตอนดังกล่าวแล้วเท่านั้น นายแพทย์ John Lawrence ยังสนใจในการใช้รังสีเอกซ์ รังสีนิวตรอนและสารไอโซโทปกัมมันตรังสีในการบำบัดรักษามะเร็งอีกด้วย นายแพทย์ John Lawrence เป็นคนแรกอีกเช่นกันที่เล็งเห็นถึงศักยภาพที่สำคัญอีกประการหนึ่งของเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอน นั่นคือการนำไปใช้ในการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีที่จำเป็นต่อวงการแพทย์ (ก่อนหน้านี้การผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีดังกล่าวจะใช้เตาปฏิกรณ์ปรมาณู (nuclear reactor) ซึ่งมักตั้งอยู่ห่างจากชุมชนและโรงพยาบาล) ในปีพ.ศ. 2480 เครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอน



รูปที่ 1.8 *นายแพทย์ John H. Lawrence (พ.ศ. 2447-2534) จบการศึกษาจาก Harvard Medical School ได้รับการยกย่องว่าเป็นบิดาของเวชศาสตร์นิวเคลียร์ (Nuclear Medicine) [14]*

ที่ห้องแล็บของพี่ชายที่ UC Berkeley ต้องทำงานวันละ 24 ชั่วโมงเพื่อผลิตสารไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุต่าง ๆ เช่น โซเดียมและไอโอดีน แจกจ่ายให้กับโรงพยาบาลต่าง ๆทั่วโลก ต่อมาเพื่อเป็นเกียรติกับสองพี่น้องตระกูล Lawrence ห้องแล็บแห่งนั้นของ UC Berkeley ได้ถูกตั้งชื่อให้อย่างเป็นทางการว่า Lawrence Berkeley Laboratory และยังอยู่มาตราบจนถึงปัจจุบันนี้ที่ได้รับการยกฐานะขึ้นเป็น Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) ส่วนมรดกด้านรังสีรักษาที่สองพี่น้อง Lawrence ได้ช่วยบุกเบิกไว้ให้นั้น ปัจจุบันนี้ใช้กันแพร่หลายไปทั่วโลก มีการบำบัดรักษาคนไข้อยู่ทุกวันด้วยเครื่องเร่งอนุภาคในโรงพยาบาลมากมายหลายแห่ง มีทั้งที่ใช้ลำอนุภาคมวลเบาอย่างอนุภาคอิเล็กตรอน และลำอนุภาคมวลหนักอย่างอนุภาคโปรตอน (หนักกว่าอิเล็กตรอน 1,836 เท่า) (รูปที่ 1.9) และอนุภาคคาร์บอน (หนักกว่าอิเล็กตรอนประมาณสองหมื่นเท่า) เป็นต้น

เมื่อประมาณสิบปีที่แล้วได้มีการประเมินไว้ว่าเครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้งานกันอยู่ทั่วโลกมีไม่ต่ำกว่า 15,000 เครื่อง (ตารางที่ 1.1) แต่ปัจจุบันตัวเลขรวมกลับเพิ่มขึ้นเป็นไม่ต่ำกว่า 30,000 เครื่อง *[17]* เครื่องเร่งอนุภาคได้ถูกนำไปประยุกต์อย่างกว้างขวางในหลากหลายวงการ นอกเหนือจากวงการฟิสิกส์ เช่น ใช้ในวงการชีววิทยา วงการเคมี วงการเภสัชกรรม วงการแพทย์ทั้งในแง่ของการบำบัดรักษา



รูปที่ 1.9 *การรักษามะเร็งของนัยน์ตาด้วยลำอนุภาคโปรตอน (ที่ผลิตจากเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอน) ที่ Paul Scherrer Institute (PSI) ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ แต่ละครั้งมะเร็งจะถูกยิงด้วยลำอนุภาคโปรตอนเป็นเวลาน้อยกว่า 1 นาที วันละครั้ง ติดต่อกัน 4 วัน ซึ่งได้เริ่มใช้งานเป็นครั้งแรกที่ศูนย์วิจัยแห่งนี้ตั้งแต่เมื่อปีพ.ศ. 2527 นับถึงวันนี้ได้บำบัดรักษาคนไข้ที่เป็นมะเร็งชนิดนี้ไปแล้วไม่ต่ำกว่า 5,000 ราย [15]*

(therapy) และในแง่ของการวินิจฉัย (diagnosis) วงการธรณีวิทยา และในวงการอุตสาหกรรมเช่นอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมการทำไร้เชื้อ (sterilization) ฯลฯ ปัจจุบันประเทศไทยก็มีเครื่องเร่งอนุภาคอยู่หลายเครื่อง ถูกนำมาใช้ทั้งในเชิงวิชาการและในเชิงประยุกต์เช่นกัน โดยเฉพาะเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนเชิงเส้น (linear accelerator หรือ Linac) สำหรับการบำบัดรักษามะเร็งด้วยรังสีเอกซ์และลำอนุภาคอิเล็กตรอนนั้นมีกระจายอยู่ตามโรงพยาบาลต่าง ๆ ทั่วประเทศถึง 31 แห่ง (บางแห่งมีมากกว่า 1 เครื่อง) เช่นที่โรงพยาบาลศิริราช โรงพยาบาลรามาธิบดี โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ (รูปที่ 1.10) โรงพยาบาลจุฬาภรณ์ สถาบันมะเร็งแห่งชาติ โรงพยาบาลสุรินทร์ โรงพยาบาลพระมงกุฎเกล้า โรงพยาบาลพุทธชินราช (พิษณุโลก) โรงพยาบาลบำรุงราษฎร์ โรงพยาบาลมะเร็งชลบุรี โรงพยาบาลศูนย์มะเร็งลำปาง โรงพยาบาลมหาราชนครเชียงใหม่ โรงพยาบาลขอนแก่น และโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ เป็นต้น *[18]* ส่วนที่นอกเหนือจากการใช้งานในทางรังสีรักษาได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 1.2 หน้า 17-21

ตารางที่ 1.1 *ประมาณการจำนวนเครื่องเร่งอนุภาคที่มีใช้งานอยู่ทั่วโลก แบ่งตามประเภทของการใช้งาน [16]*

ประเภทของการใช้งาน	จำนวนที่มีใช้งานอยู่
เครื่องเร่งอนุภาคสำหรับการยิงฝังไอออนและการดัดแปลงสมบัติของวัตถุ	ประมาณ 7,000 เครื่อง
เครื่องเร่งอนุภาคใช้ในวงการอุตสาหกรรม	มากกว่า 1,500 เครื่อง
เครื่องเร่งอนุภาคใช้ในการวิจัยนอกวงการนิวเคลียร์	ประมาณ 1,000 เครื่อง
เครื่องเร่งอนุภาคใช้ในงานรังสีรักษา	มากกว่า 5,000 เครื่อง
เครื่องเร่งอนุภาคใช้ผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีทางการแพทย์	ประมาณ 200 เครื่อง
เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อการบำบัดรักษาด้วยอนุภาคโปรตอนหรืออนุภาคที่หนักกว่า	ประมาณ 20 เครื่อง
เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อผลิตแสงซินโครตรอน	ประมาณ 70 เครื่อง
เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อการวิจัยด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์และด้านฟิสิกส์ของอนุภาคมูลฐาน	ประมาณ 110 เครื่อง



รูปที่ 1.10 *เครื่อง Varian Clinac 23EX Linear Accelerator สำหรับรักษาโรคมะเร็ง (malignant tumor) และรอยโรคที่ไม่ใช่โรคมะเร็ง (benign tumor) ด้วยรังสีเอกซ์ระดับ 6 MV และ 10 MV กับลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 4, 6, 9, 12, 16 และ 20 MeV ของสาขารังสีรักษาและมะเร็งวิทยา โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ บริษัทผู้ผลิตคือ Varian Medical System ประเทศสหรัฐอเมริกา [19]*



รูปที่ 1.11 *เครื่อง NISSIN NH-20SR Ion Implanter ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center หรือ TMEC) ของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ซึ่งตั้งอยู่ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา ใช้ในการผลิตไอออนฟอสฟอรัส (P) ที่มีประจุ P^+ ถึง P^{++} (พลังงานสูงสุด 200 keV สำหรับไอออน P^+ และ 400 keV สำหรับไอออน P^{++}) และ ผลิตไอออนโบรอน (B) ที่มีประจุ B^+ ถึง B^{++} (พลังงานสูงสุด 200 keV สำหรับไอออน B^+ และ 400 keV สำหรับไอออน B^{++}) และไอออนอาร์เซนิค (As) ที่มีประจุ As^+ ถึง As^{++} (พลังงานสูงสุด 200 keV สำหรับไอออน As^+ และ 400 keV สำหรับไอออน As^{++}) ช่วงพลังงานที่ใช้งาน 35 keV ถึง 200 keV เพื่อยิงฝัง (implantation) ประจุไอออนฟอสฟอรัสและโบรอนลงในเนื้อผลึกซิลิกอนเพื่อสร้างชนิดของสารกึ่งตัวนำในซิลิกอน เช่นสร้างซิลิกอนชนิดพี (positive type หรือ p-type) โดยการยิงฝังประจุโบรอน และสร้างซิลิกอนชนิดเอ็น (negative type หรือ n-type) โดยการยิงฝังประจุฟอสฟอรัส เป็นต้น และเพื่อกำหนดค่าความต้านทาน (resistance) ให้กับผลึกซิลิกอนนั้น เมื่อนำซิลิกอนชนิด p-type และ n-type มาต่อกัน สามารถกำหนดทิศทางการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor device) ได้ ซึ่งก็คือไดโอด (diode) นั่นเอง (ภาพนี้ได้รับความเอื้อเฟื้อจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์)*



รูปที่ 1.12 *เครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอนรุ่น Sumitomo HM-20 Cyclotron ที่คล้ายกับเครื่องของคณะแพทยศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่และคณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาลมหาวิทยาลัยมหิดล ข้อดีประการหนึ่งของเครื่องเร่งอนุภาคแบบไซโคลตรอนก็คือใช้พื้นที่น้อย เช่นเครื่องนี้มีขนาด กว้าง x ยาว x สูง = 2.6 เมตร x 1.7 เมตร x 2.0 เมตร เท่านั้น (แบบไม่มีผนังป้องกันรังสีในตัว) จึงสามารถติดตั้งไว้ภายในโรงพยาบาลได้เพื่อจะได้อยู่ใกล้ ๆกับเครื่อง PET/CT Scan นอกจากเพื่อความสะดวกแบบ one-stop service แล้วยังเป็นเพราะว่าไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ต้องใช้กับเทคนิค PET (Positron Emission Tomography) ที่ผลิตด้วยเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอนมักมีค่าครึ่งชีวิตสั้น เช่นไอโซโทปกัมมันตรังสีคาร์บอน-11 มีค่าครึ่งชีวิตเพียง 20.334 นาทีเท่านั้น [20]*

1.5 สรุป

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ในช่วง 84 ปีที่ผ่านมา สมรรถนะและศักยภาพทั้งในเชิงวิชาการและเชิงประยุกต์ของเครื่องเร่งอนุภาคได้พัฒนาขึ้นอย่างมาก จากแต่เดิมที่ศักย์ไฟฟ้าสูงสำหรับเร่งอนุภาคไม่สามารถทำได้เกิน 1 ล้านโวลต์ เพราะจะเกิด voltage breakdown แต่ปัจจุบันสามารถขึ้นไปได้สูงกว่านี้หลายเท่า จากแต่เดิมที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์ ปัจจุบันเป็นเครื่องมือมาตรฐานหนึ่งของวงการแพทย์และอุตสาหกรรม เชื่อว่าเครื่องเร่งอนุภาคจะถูกนำมาใช้งานมากยิ่งขึ้นในอนาคต ทั้งในต่างประเทศและในประเทศไทย เพราะเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาคมีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลา เครื่องเร่งอนุภาครุ่นใหม่ ๆ จะให้กระแสและพลังงานของลำอนุภาคที่สูงขึ้น มีขนาดกะทัดรัดมากขึ้น ใช้งานสะดวกขึ้นเพราะควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์มากขึ้น ผนวกด้วยแนวคิดใหม่ ๆในการผลิตและเร่งอนุภาคที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพกว่าเดิม ด้วยเหตุนี้ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์จึงได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเร่งอนุภาคตลอดมา ด้วยหวังที่จะให้งานวิจัยทางด้านนี้ยังคงได้รับการสืบทอดต่อไปอย่างต่อเนื่องในประเทศไทยเพื่อเป็นแหล่งองค์ความรู้ และรู้เท่าทันเทคโนโลยี รวมทั้งเกิดการพัฒนาต่อยอดที่มีประโยชน์ทั้งในเชิงวิชาการและการประยุกต์ที่จะมีผลกระทบเชิงสร้างสรรค์ต่อสังคมและผู้ประกอบการไทย

ตารางที่ 1.2 *เครื่องเร่งอนุภาคที่ปัจจุบันมีการใช้งานอยู่ในประเทศไทย (นอกเหนือจากด้านรังสีรักษา)*

ชนิดเครื่องเร่งอนุภาค	ผู้ผลิต	ปีที่เริ่มใช้งานในประเทศไทย	สมรรถนะ	ภารกิจหลัก	หน่วยงาน	หมายเหตุ
1) Bioengineering Ion Implanter (รูปที่ 4.3)	สร้างเอง	พ.ศ. 2543	ผลิตลำอนุภาคที่เป็นไอออนของธาตุได้หลายชนิด และเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ 30 kV ลำไอออนวิ่งลงในแนวดิ่ง หลังผ่านการคัดกรองด้วยแม่เหล็ก	เพื่อการประยุกต์ใช้ลำไอออนในการค้นคว้าวิจัยทางด้านชีววิทยา	ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	
2) 1.7 MV Tandetron Accelerator (รูปที่ 2.5)	High Voltage Engineering Europa B.V. (HVEE) ประเทศเนเธอร์แลนด์	พ.ศ. 2545	ผลิตลำไอออนของธาตุได้เกือบทุกชนิดด้วยพลังงานสูงสุด 3.4 MeV (สำหรับไอออนประจุเดี่ยว) มีแม่เหล็กคัดกรองค่าประจุและ/หรือชนิดของไอออน	วิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค RBS, PIXE และ IL และการสังเคราะห์/การปรับคุณสมบัติวัตถุด้วยเทคนิคยิงฝังไอออน (Ion Implantation)	ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ได้รับบริจาคจาก Department of Physics, Chalmers University of Technology เมือง Gothenburg ประเทศสวีเดน

ตารางที่ 1.2 เครื่องเร่งอนุภาคที่ปัจจุบันมีการใช้งานอยู่ในประเทศไทย (นอกเหนือจากด้านรังสีรักษา) (ต่อ)

ชนิดเครื่องเร่งอนุภาค	ผู้ผลิต	ปีที่เริ่มใช้งานในประเทศไทย	สมรรถนะ	ภารกิจหลัก	หน่วยงาน	หมายเหตุ
3) 200 DF4/DF5 Extrion Ion Implanter (เรียกสั้นๆว่า Varian Ion Implanter) (รูปที่ 3.3)	Varian Semiconductor Equipment ประเทศสหรัฐอเมริกา	พ.ศ. 2545	ผลิตลำอนุภาคที่เป็นไอออนจากก๊าซหลายชนิด ที่พลังงานสูงสุด 200 keV (สำหรับไอออนประจุเดี่ยว) มีแม่เหล็กคัดกรองค่าประจุและ/หรือชนิดของไอออน	ผลิตลำไอออนไนโตรเจน เพื่อการปรับปรุงคุณภาพพลอย ธรรมชาติ และข้าว	ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ได้รับบริจาคจากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ร่วมกับบริษัท RadioMed ประเทศสหรัฐอเมริกา
4) Synchrotron Light Source (มีชื่อเฉพาะว่า “เครื่องกำเนิดแสงสยาม หรือ Siam Photon Source”) (รูปที่ 6.10)	วงแหวนกักเก็บ (storage ring) ดัดแปลงจากเครื่องเดิมที่ได้รับบริจาค โดยชิ้นส่วนหลักผลิตโดยบริษัท Mitsubishi เครื่องเร่งซินโครตรอนผลิตโดยบริษัท Toshiba และเครื่องเร่ง Linac ผลิตโดยบริษัท Mitsubishi	พ.ศ. 2548	เครื่องเร่ง Linac สร้างลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงาน 40 MeV เพื่อส่งต่อไปเร่งในเครื่องเร่งซินโครตรอนให้มีพลังงานเป็น 1.0 GeV (= 1,000 MeV) และถูกลำเลียงไปเร่งต่อในวงแหวนกักเก็บให้มีพลังงานเป็น 1.2 GeV และกักไว้ในวงแหวนกักเก็บ	ลำอิเล็กตรอนในวงแหวนกักเก็บปลดปล่อยแสงซินโครตรอน ซึ่งถูกลำเลียงไปใช้ในงานตรวจวิเคราะห์วัสดุชนิดต่างๆ เช่น การวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติของโปรตีน องค์ประกอบของธาตุในวัสดุ หรือการจัดเรียงตัวของอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุ เป็นต้น	สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี	ได้รับบริจาคจาก SORTEC Corporation ประเทศญี่ปุ่น

ตารางที่ 1.2 *เครื่องเร่งอนุภาคที่ปัจจุบันมีการใช้งานอยู่ในประเทศไทย (นอกเหนือจากด้านรังสีรักษา) (ต่อ)*

ชนิดเครื่องเร่งอนุภาค	ผู้ผลิต	ปีที่เริ่มใช้งานในประเทศไทย	สมรรถนะ	ภารกิจหลัก	หน่วยงาน	หมายเหตุ
5) NH-20SR Ion Implanter (รูปที่ 1.11)	Nissin Ion Equipment ประเทศญี่ปุ่น	พ.ศ. 2548	ผลิตไอออนสารเจือฟอสฟอรัส ประจุ P^{+} ถึง P^{2+} ไอออนโบรอน ประจุ B^{+} ถึง B^{2+} และไอออนอาร์เซนิค ประจุ As^{+} ถึง As^{2+} ช่วงพลังงานที่ใช้งานคือ 35 - 200 keV	การเจือสาร (doping) ด้วยเทคนิคการยิงฝังประจุไอออนสารเจือลงบนผลึกฐานซิลิกอนเพื่อสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เช่น ไดโอด หรือ IC เป็นต้น	ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี	
6) Electron Linac สำหรับ THz Radiation (รูปที่ 5.14)	ประกอบสร้างเอง	พ.ศ. 2548	ผลิตลำอนุภาคอิเล็กตรอนที่พลังงานสูงสุด 15 MeV	การใช้ลำอิเล็กตรอนห้วงสั้นในการผลิตรังสีเทราเฮิรตซ์สำหรับงานด้านสเปกโตรสโกปีในย่านเทราเฮิรตซ์ และด้านการสร้างภาพด้วยรังสีเทราเฮิรตซ์	ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	อุปกรณ์บางส่วนได้รับบริจาคจาก Stanford University ประเทศสหรัฐอเมริกา และจากโรงพยาบาลมหาราช นครเชียงใหม่ กับโรงพยาบาลศิริราช กรุงเทพมหานคร

ตารางที่ 1.2 เครื่องเร่งอนุภาคที่ปัจจุบันมีการใช้งานอยู่ในประเทศไทย (นอกเหนือจากด้านรังสีรักษา) (ต่อ)

ชนิดเครื่องเร่งอนุภาค	ผู้ผลิต	ปีที่เริ่มใช้งานในประเทศไทย	สมรรถนะ	ภารกิจหลัก	หน่วยงาน	หมายเหตุ
7) ACSI TR-19 PET Cyclotron	Ebco Industries ประเทศแคนาดา	พ.ศ. 2548	ผลิตและเร่งอนุภาคโปรตอนพลังงานสูงสุด 19 MeV	ไม่มีข้อมูล	โรงพยาบาลวัฒโนสถ (โรงพยาบาลกรุงเทพ)	
8) PETtrace 800 Cyclotron รุ่น P5220JD	General Electric (GE) ประเทศสหรัฐอเมริกา	พ.ศ. 2552	ผลิตและเร่งอนุภาคโปรตอนด้วยพลังงานสูงสุด 16.5 MeV	ผลิตสารเภสัชรังสีคลอรีน-11 ฯลฯ ใช้ในการตรวจวินิจฉัยด้วยเทคนิค PET	ศูนย์ไซโคลตรอนและเพทสแกนแห่งชาติ โรงพยาบาลจุฬาภรณ์	
9) Genus 1520 Ion Implanter	Varian Semiconductor Equipment ประเทศสหรัฐอเมริกา	พ.ศ. 2553	ผลิตไอออนสารเจือฟอสฟอรัส ประจุ P^{+} ถึง P^{4+} และโบรอน ประจุ B^{+} ถึง B^{3+} ช่วงพลังงานที่ใช้งานคือ 40 keV ถึง 3 MeV	การเจือสารด้วยเทคนิคการยิงฝังประจุไอออนสารเจือลงบนผลึกฐานซิลิกอนเพื่อสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เช่น ไดโอด หรือ IC เป็นต้น	ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี	
10) MB 20/16 Electron Beam Accelerator	Mevex Corporation ประเทศแคนาดา	พ.ศ. 2554	ผลิตลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานช่วง 8-21.5 MeV ที่กำลังงานสูงสุด 10 kW ด้วยปริมาณรังสีสูงสุดต่อรอบ 25 kGy	การปรับปรุงคุณภาพอัญมณีเช่น โทแพซ ทัวร์มารีน และไข่มุก ฯลฯ	สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)	

ตารางที่ 1.2 *เครื่องเร่งอนุภาคที่ปัจจุบันมีการใช้งานอยู่ในประเทศไทย (นอกเหนือจากด้านรังสีรักษา) (ต่อ)*

ชนิดเครื่องเร่งอนุภาค	ผู้ผลิต	ปีที่เริ่มใช้งานในประเทศไทย	สมรรถนะ	ภารกิจหลัก	หน่วยงาน	หมายเหตุ
11) Compact Ion Implanter (รูปที่ 3.4)	สร้างเอง	พ.ศ. 2555	ขนาดเครื่องกะทัดรัด ผลิตลำไอออนของไนโตรเจน ที่พลังงานสูงสุด 90 keV ในแนวดิ่ง แบบไม่กรองไอออน	การชักนำให้เกิดการกลายพันธุ์ในพืชและการปรับปรุงคุณภาพพลอยธรรมชาติ	ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	
12) Sumitomo HM-20S Cyclotron (รูปที่ 1.12)	Sumitomo Heavy Industry ประเทศญี่ปุ่น	พ.ศ. 2557	ผลิตและเร่งอนุภาคโปรตอนและ ดิวเทอรอนที่มีพลังงานสูงสุด 20 MeV และ 10 MeV และกระแส 150 และ 50 ไมโครแอมแปร์ ตามลำดับ	ผลิตสารไอโซโทปกัมมันตรังสี F-18, C-11, O-15, N-13 ใช้ในการตรวจวินิจฉัยด้วยเทคนิค PET และอื่น ๆ	PET/CT & Cyclotron Center คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	
13) Sumitomo HM-20S Cyclotron	Sumitomo Heavy Industry ประเทศญี่ปุ่น	พ.ศ. 2558	ผลิตและเร่งอนุภาคโปรตอนและ ดิวเทอรอนที่มีพลังงานสูงสุด 20 MeV และ 10 MeV และกระแส 150 และ 50 ไมโครแอมแปร์ ตามลำดับ	ผลิตสารไอโซโทปกัมมันตรังสีF-18, C-11, O-15, N-13ใช้ในการตรวจวินิจฉัยด้วยเทคนิค PET และอื่น ๆ	ศูนย์ไซโคลตรอน คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล	

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณข้อมูลที่มีค่าจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ภิยโย ปันยารชุน ศาสตราจารย์ ดร. วิชิต ศรีตระกูล ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาจารย์ ดร. นิสา ชวพันธ์ หน่วยรังสีรักษาและมะเร็งวิทยา ภาควิชารังสีรักษา คณะแพทย์ศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, คุณการุณ แซ่จอก ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

บรรณานุกรม

[1] A. R. Steere, *"A Timeline of Major Particle Accelerators"*, Master Degree Thesis, 2005, Dept. of Physics and Astronomy, Michigan State University.

[2] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, *"Experiment with High Velocity Positive Ions. II. –The Disintegration of Elements by High Velocity Protons"*, Proceedings of the Royal Society A, Vol. 137, 1932, pp. 229–242.

[3] จากเว็บไซต์ http://www.aip.org/history/lawrence/epa.html.

[4] จากเว็บไซต์ http://www.hcc.mnscu.edu/chem/abomb/page_id_91509.html.

[5] จากเว็บไซต์ https://www.physics.rutgers.edu/cyclotron/cyc_history.shtml.

[6] P. Charoenkwan, *"Fast Neutron Bombardment of Ni–64 and Decay of Co–64"*, J. Sci. Soc. Thailand 3(1977)102–117.

[7] B. Panyarjun and C. Sakkawong, *"The Acceleration of Protons at 150 Kilovolts"*, Thai Journal of Physics, Vol. 4, No. 1, June 1987, 31–39.

[8] ชัชวาลย์ สักกะวงศ์, *"การเร่งโปรตอนด้วยศักย์ 150 kV"*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2529.

[9] ถิรพัฒน์ วิลัยทอง, *"มองผ่านจาน : Through the Hanging Plates"*, พ.ศ. 2549, บริษัท สันติภาพแพ็คพริ้น จำกัด.

[10] ไพรัช สร้อยอำพรกุล, *"ระบบอิเล็คทรอนิกส์สำหรับการสร้างนาโนเซคกันต์พัลส์ของลำอนุภาค"*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2530.

[11] ธีรวรรณ บุญญวรรณ, *"การศึกษาบันชิ่งแฟคเตอร์ของเครื่องกำเนิดนิวตรอนแบบห้วงที่เชียงใหม่"*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2532.

[12] T. Vilaithong, S. Singkarat and U. Tippawan, *"Utilization of a Pulsed D–T Neutron Generator"*, http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/030/31030529.pdf.

[13] สมศร สิงขรัตน์, *"แหล่งกำเนิดเครื่องเร่งอนุภาคไทย"*, ในหนังสือที่ระลึก 50 ปี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ISBN 978–974–672–869–0, พ.ศ. 2557, หน้า 104 – 113.

[14] จากเว็บไซต์ http://ihm.nlm.nih.gov/luna/servlet/view/all/who/University+of+California.+School+of+Medicine.+1955.+San+Francisco,+California.?sort=Title%2CSubject_MeSH_Term%2CCreator_Person%2CCreator_Organization .

[15] จากเว็บไซต์ http://www.psi.ch/info/MediaBoard/Protonentherapie_e.pdf.

[16] J. A. Rubio, *"Overview of the Education and Technology Transfer Activities at CERN"*, March 2004, http://ific.uv.es/imfp04/talks/rubio–techtrans.pdf.

[17] S. Witman, *"Ten Things You Might Not Know About Particle Accelerators"*, Symmetry Magazine, Fermi National Accelerator Laboratory, Retrieved 21 April 2014.

[18] ข้อมูลการสำรวจระหว่างปีพ.ศ. 2556–2557 ของสมาคมรังสีรักษาและมะเร็งวิทยา (Thai Society of Therapeutic Radiology and Oncology), Website : www.thastro.org.

[19] จากเว็บไซต์ http://www.chulacancer.net/services–list–page.php?id=363.

[20] จากเว็บไซต์ http://www.shi.co.jp/english/products/medical/cyclotron/index.html.



พิธีรับมอบและเปิดใช้งานเครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มอย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ. 2546 ระหว่าง Dr. Lennart Hasselgren ผู้อำนวยการของ International Science Programme (ISP) แห่ง Uppsala University ประเทศสวีเดน (ซ้าย) กับ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ ตุวานนท์ อธิการบดีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (ขวา) สักขีพยานในพิธี คือ (เรียงจากซ้ายไปขวา) ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ทวี ตันฑศิริ รองศาสตราจารย์ ดร. เจษฎา เกษมเศรษฐ์ (ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่) รองศาสตราจารย์ บุญรักษา สุนทรธรรม (คณบดีคณะวิทยาศาสตร์) และศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง (ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง)

๒

เครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มขนาด 1.7 ล้านโวลต์ เครื่องแรกของประเทศไทย

อุดมรัตน์ ทิพวรรณ[๑] และ สมศร สิงขรัตน์[๒]

[๑] *ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*

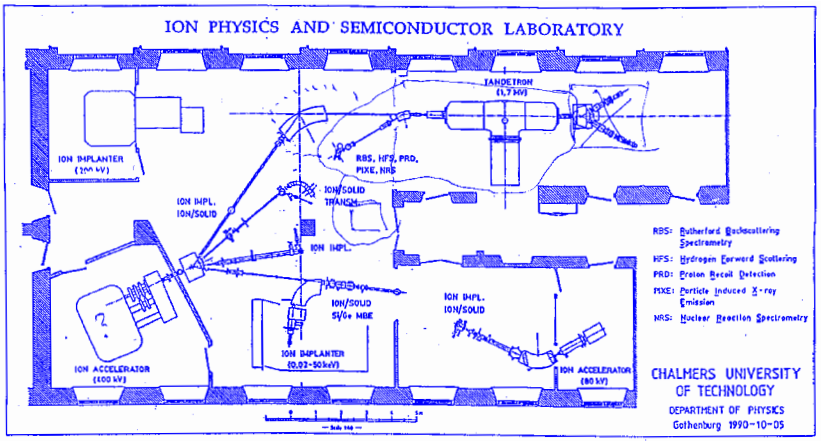
[๒] *ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ*

2.1 ความเป็นมา

โดยหลักการพื้นฐานแล้ว การจะเร่งให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าหรือไอออน (มีวิธีสร้างไอออนของธาตุต่าง ๆหลายวิธี อะตอมที่ถูกทำให้สูญเสียอิเล็กตรอนไปจะเรียกว่าไอออนบวก ส่วนอะตอมที่ได้รับอิเล็กตรอนเกินมาจะเรียกว่าไอออนลบ) มีพลังงานจลน์สูงมาก ๆ ก็จะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงมากด้วยเช่นกัน แต่แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าที่สูงมากขึ้นก็มีแนวโน้มที่จะมีความยุ่งยากทางเทคนิคมากขึ้นเป็นเงาตามตัว รวมทั้งมีขนาดที่ใหญ่โตขึ้นและมีราคาแพงขึ้นด้วย ทางออกของปัญหานี้ก็คือการใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงเพียงค่าเดียวแต่สามารถใช้เร่งอนุภาคตัวเดียวกันได้สองครั้ง ด้วยวิธีการนี้อนุภาคตัวนั้นก็จะมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า เครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้หลักการนี้เรียกกันว่า เครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็ม (tandem accelerator)

เครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มเครื่องแรกและเครื่องเดียวของประเทศไทยขณะนี้เป็นเครื่องที่ผลิตโดยบริษัท High Voltage Engineering Europa B.V. (HVEE) ที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ เร่งอนุภาคด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.7 ล้านโวลต์ (MV) โดยใช้หลักการสร้างศักย์ไฟฟ้าสูงตามแบบของ John Cockcroft กับ Ernest Walton

ทางบริษัท HVEE จึงกำหนดชื่อทางการค้าให้กับเครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มของตนว่า Tandetron accelerator (บริษัทยักษ์ใหญ่ในการผลิตเครื่องเร่งอนุภาคอีกราย คือ บริษัท National Electrostatics Corporation หรือ NEC ของสหรัฐอเมริกา ใช้เทคนิคการสร้างศักย์ไฟฟ้าสูงอีกแบบที่ดัดแปลงมาจากวิธีการของ Robert Van de Graaff นักฟิสิกส์ชาวอเมริกันที่ประดิษฐ์ขึ้นเมื่อปีพ.ศ. 2472 บริษัท NEC ได้ตั้งชื่อทางการค้าให้กับเครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มของตนว่า Pelletron accelerator เช่น เครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้อยู่ที่ Tandem Laboratory ของ Uppsala University ประเทศสวีเดน เป็นต้น) เครื่องเร่งอนุภาคแทนเดอตรอนดังกล่าวเดิมถูกใช้งานอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัย Ion Physics and Semiconductor Laboratory ของ Dr. Gillis Holmén แห่งภาควิชาฟิสิกส์ ของ Chalmers University of Technology ที่เมือง Gothenburg ประเทศสวีเดน (รูปที่ 2.1) ก่อนที่ท่านจะเกษียณอายุงานในปีพ.ศ. 2544 Dr. Lennart Hasselgren ผู้อำนวยการของ International Science Programme (ISP) แห่ง Uppsala University ประเทศสวีเดน ได้ช่วยประสานงานให้ท่านและ Chalmers University of Technology เลือกบริจาคเครื่องเร่งอนุภาคนี้ให้กับมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งในเวลานั้นมีมูลค่าประมาณ 50 ล้านบาท



รูปที่ 2.1 *แผนผังห้องปฏิบัติการวิจัยทางด้านฟิสิกส์ของไอออนและสารกึ่งตัวนำของ Dr. Gillis Holmén ซึ่งอยู่บนชั้น 2 ของอาคารหลังแรกของภาควิชาฟิสิกส์ Chalmers University of Technology ในภาพจะเห็นว่ามีเครื่องเร่งอนุภาคอยู่หลายเครื่อง โดยเครื่องที่ทางมหาวิทยาลัยฯ ขีดวงไว้ตอนบนของภาพคือเครื่องใหม่ที่สุดและดีที่สุดที่มอบให้กับมหาวิทยาลัยเชียงใหม่*





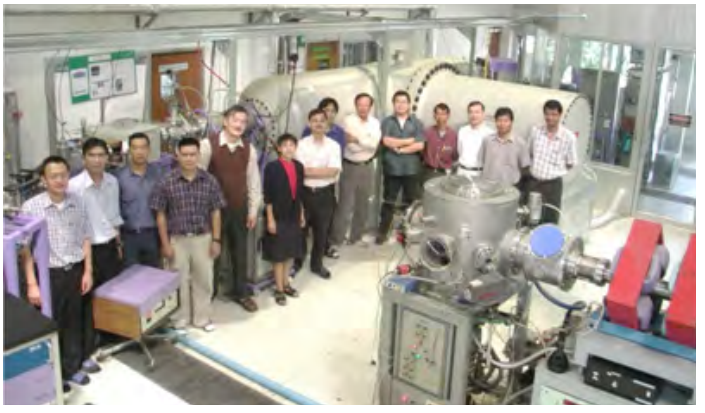
รูปที่ 2.2 *เจ้าหน้าที่ของบริษัทขนส่งกำลังพยายามเคลื่อนย้ายชิ้นส่วนที่ใหญ่ที่สุด คือถังเหล็ก pressure tank ที่มีความยาว 4.4 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ของเครื่องเร่งอนุภาคแทนเดอตรอนออกจากห้องปฏิบัติการวิจัยที่อยู่บนชั้น 2 ซึ่งต้องมีการรื้อหน้าต่างออกบานหนึ่ง เมื่อวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2544 (ภาพทั้งสองถ่ายโดย Docent Gudmar Grosshoeg ที่กรุณาช่วยเป็นผู้ประสานงานเรื่องการรื้อถอนและการขนส่ง)*

ระหว่างวันที่ 9-24 ธันวาคม พ.ศ. 2543 ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง ขณะนั้นดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้มอบหมายให้ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศร สิงขรัตน์ และรองศาสตราจารย์ ดร. ธีรวรรณ บุญญวรรณ เดินทางไปทำการรื้อถอน และบรรจุชิ้นส่วนประกอบของเครื่องเร่งอนุภาคนี้ลงกล่องด้วยตัวเอง ส่วนที่เป็นชิ้นใหญ่ใส่กล่องไม้ได้ก็ปิดผนึกรูทั้งหมดเพื่อป้องกันความชื้นและความเค็มจากน้ำทะเล รวมทั้งสิ้นมี 20 ชิ้น/กล่องใหญ่ การขนส่งขึ้นเรือที่ท่าเรือเมือง Gothenburg เพื่อจัดส่งมายังประเทศไทยได้ว่าจ้างบริษัทท้องถิ่นดำเนินการให้ โดยการประสานงานของ Docent Gudmar Grosshoeg (รูปที่ 2.2) ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) โดยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตุวานนท์ อธิการบดีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่และรองศาสตราจารย์ ดร. ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์ ผู้อำนวยการ MTEC ในเวลานั้น สัมภาระดังกล่าวเดินทางมาถึงมหาวิทยาลัยเชียงใหม่เมื่อวันที่ 11 เมษายน พ.ศ. 2544 ในระหว่างวันที่ 19-30 สิงหาคม พ.ศ. 2545 ชิ้นส่วนต่าง ๆ ถูกประกอบกลับคืนสภาพเดิมโดยทีมงานของศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ร่วมกับ Mr. Nils Dobbe วิศวกรจากบริษัท HVEE (รูปที่ 2.3) ระบบ

ทั้งหมดสามารถใช้ทำการทดลองเรื่อง Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS) ได้ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2545 และได้มีพิธีรับมอบและเปิดใช้งานอย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ. 2546

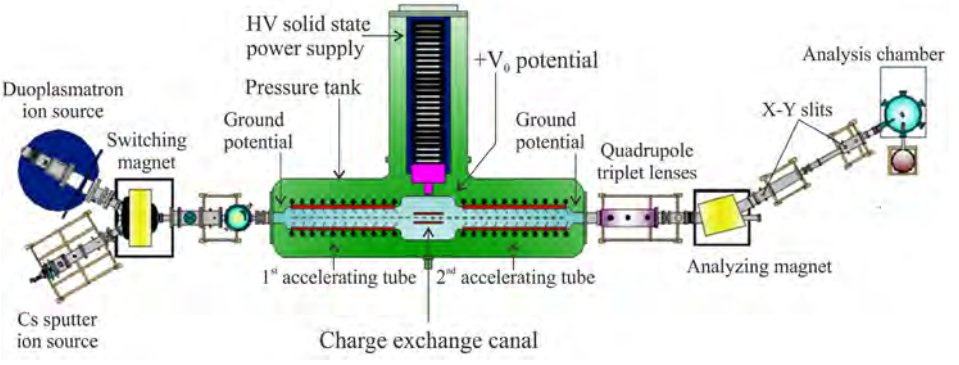


รูปที่ 2.3 *คณะทำงานของศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูงนำโดยรองศาสตราจารย์ ดร. สมศร สิงขรัตน์ ร่วมกับ Mr. Dobbe (กำลังถือปุ่มควบคุมเครนรางเลื่อนไฟฟ้า) กำลังพยายามสอดแกนท่อเร่งแบบแทนเด็มเข้าไปภายใน pressure tank ที่อาคารเทคโนโลยีไอออนบีม-1 ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ดังในภาพ ส่วนที่กำลังถูกคล้องอยู่ด้วยแถบเชือกไนลอนสีส้มคือส่วนของ HV terminal ซึ่งคั่นกลางอยู่ระหว่างท่อเร่งอนุภาคทั้งสอง ที่ยังสามารถเห็นได้บางส่วน*



รูปที่ 2.4 *ทีมงานของศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ได้ร่วมกันดำเนินการให้เครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มเครื่องแรกของประเทศไทย (ที่อยู่ด้านหลัง) สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ที่จังหวัดเชียงใหม่*

2.2 หลักการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคแทนเดอตรอนโดยสังเขป



รูปที่ 2.5 *แสดงรายละเอียดของระบบเครื่องเร่งอนุภาคแทนเดอตรอนดังแสดงในรูปที่ 2.4 [1]*

รูปที่ 2.5 คือ ระบบของเครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งอาจแยกออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้ ส่วนตรงกลางเป็นถังเหล็ก pressure tank ที่ภายในประกอบด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์สร้างศักย์ไฟฟ้าสูง (HV power supply) ที่เลียนแบบหลักการของ Cockcroft-Walton ดังกล่าวแล้วในบทที่ 1 ศักย์ไฟฟ้าสูงขั้วบวก ($+V_0$ ดังในภาพ) ที่สร้างขึ้นมาจะจ่ายให้กับส่วนที่เรียกว่า HV terminal ซึ่งส่วนนี้ต่ออยู่กับท่อเร่งอนุภาค (accelerating tube) 2 ตัว ปลายข้างที่เหลือของท่อเร่งทั้งสองตัวจะต่ออยู่กับคนละปลายของถังเหล็ก ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์เพราะตัวถังเหล็กต่ออยู่กับสายดิน (earth ground) ภายในถังเหล็กจะอัดเต็มไว้ด้วยก๊าซฉนวนไฟฟ้าคุณภาพสูงคือก๊าซ sulfur hexafluoride (SF_6) ที่ความดันประมาณ 9 เท่าของความดันบรรยากาศเพื่อป้องกันการเกิดการสปาร์ค (spark) เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ขึ้นไปสูงได้ถึง 1.7 MV นอกถังเหล็กด้านขวามือของภาพจะเป็นระบบลำเลียงและคัดกรองลำไอออนด้วย quadrupole triplet lens และ analyzing magnet เพื่อนำส่งชนิดของลำไอออนบวกที่เลือกแล้วไปให้ถึงสถานีวิเคราะห์ (analysis chamber) ส่วนด้านซ้ายมือของถังเหล็กต่ออยู่กับระบบแหล่งกำเนิดไอออน 2 ชนิด คือ cesium sputter ion source และ duoplasmatron ion source โดยชนิดแรกสามารถผลิตไอออนได้จากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง จึงสามารถผลิตไอออนของธาตุได้แทบทุกตัวในตารางธาตุ ยกเว้นไอออนของธาตุฮีเลียม (He) เพราะที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ในรูปของก๊าซเท่านั้น แต่ก็เป็นไอออนที่มีความสำคัญจึงต้องมีแหล่งกำเนิดไอออน

ชนิดที่สอง คือ duoplasmatron ion source เพื่อใช้สำหรับผลิตลำไอออนของฮีเลียม จากสารตั้งต้นที่อยู่ในรูปของก๊าซ ซึ่งแหล่งกำเนิดไอออนทั้งสองชนิดนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) การจะเลือกใช้แหล่งกำเนิดไอออนชนิดใดในสองชนิดดังกล่าวจะใช้ switching magnet ทำหน้าที่เป็นตัวสลับ

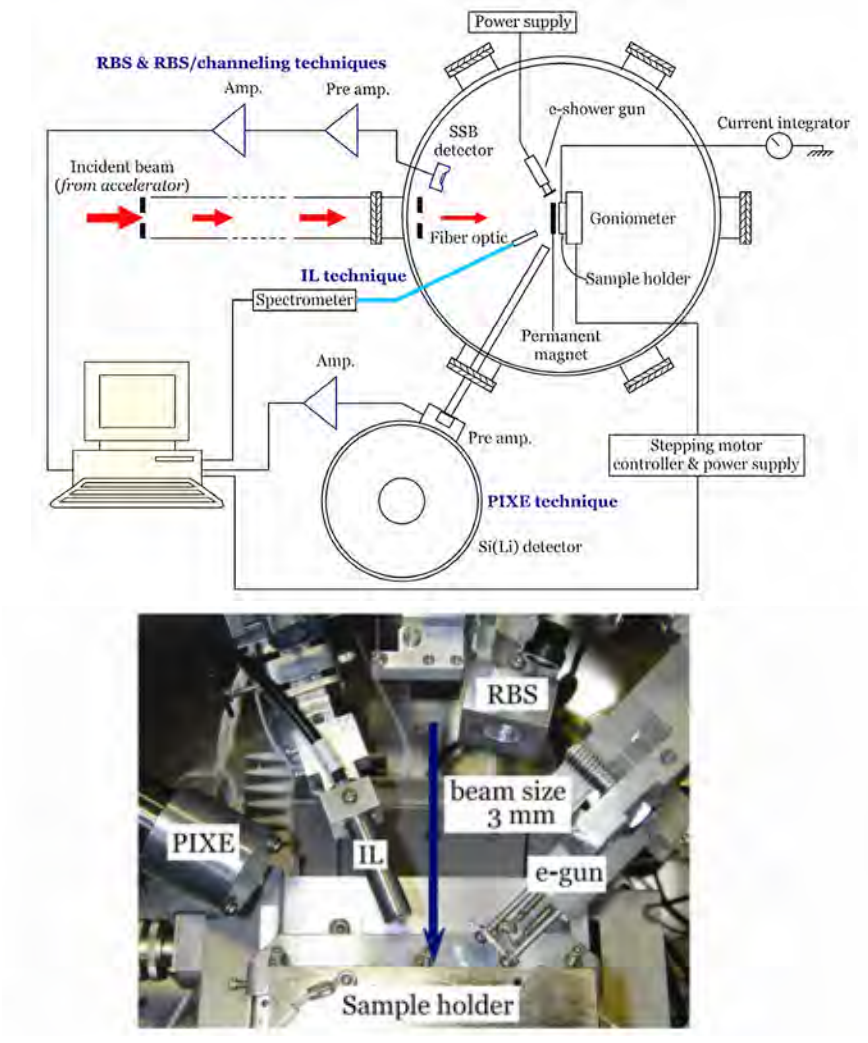
จากการจัดสรรศักย์ไฟฟ้าสูงภายในถังเหล็กดังที่กล่าวมา ทำให้ไอออนจากแหล่งกำเนิดที่จะวิ่งเข้าทางด้านซ้ายมือของเครื่องเร่งจำเป็นต้องมีประจุไฟฟ้าลบในตอนเริ่มแรก กรณีของ cesium sputter ion source นั้นจะตรงไปตรงมา เพราะแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้สร้างไอออนที่มีประจุลบอยู่แล้ว แต่ในกรณีของ duoplasmatron ion source จะแตกต่างออกไปเพราะไอออนที่ถูกผลิตออกมาจะมีประจุบวกเป็นส่วนใหญ่ จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนให้เป็นประจุลบเสียก่อน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า charge exchange canal เมื่อลำไอออนที่มีประจุไฟฟ้าลบวิ่งเข้าสู่ท่อเร่งตัวที่หนึ่ง เป็นการวิ่งจากจุดเริ่มต้นที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ไปสู่อีกปลายของท่อเร่งที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงขั้วบวก ธรรมชาติของไอออนลบคือชอบวิ่งเข้าหาศักย์ไฟฟ้าบวก ไอออนลบจึงมีพลังงานจลน์สูงขึ้น หรือก็คือมีความเร็ว (v) สูงขึ้นตามสมการที่ (2.1)

$$v = (2q\,\Delta V / m)^{1/2} \qquad (2.1)$$

โดยที่ q และ m คือค่าประจุไฟฟ้าและมวลของไอออน ตามลำดับ ส่น ΔV เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างจุดเริ่มต้นที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์กับจุดปลายที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า เช่นสมมุติไอออนฮีเลียมชนิด He^{-1} ที่มีค่าประจุไฟฟ้า q = -1e หรือ -1.602×10^{-19} คูลอมบ์และมีมวล m = 6.646×10^{-17} กิโลกรัม เมื่อเข้าไปอยู่ใต้อิทธิพลของค่าความต่างศักย์ ΔV = 1 MV หรือ 1×10^{6} โวลต์ จากที่มีความเร็วต้นเป็นศูนย์ จะมีความเร็วปลายได้ถึงประมาณ 7,000 กิโลเมตร / วินาที (ความเร็วแสงในสุญญากาศคือ 300,000 กิโลเมตร / วินาที) แต่ถ้าเป็นไอออนไฮโดรเจนชนิด H^{-1} ซึ่งมีมวลน้อยกว่าไอออนฮีเลียมประมาณ 4 เท่า ก็จะมีความเร็วปลายสูงกว่าของไอออนฮีเลียมประมาณ 2 เท่า เมื่อถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ 1 ล้านโวลต์เท่ากัน

เมื่อวิ่งไปถึงส่วน HV terminal ไอออนลบนี้จะถูกเปลี่ยนสภาพประจุไฟฟ้าจากลบให้กลายเป็นบวกด้วยส่วนที่เรียกว่า gas stripping canal ซึ่งก็ทำหน้าที่คล้ายกับส่วน charge exchange canal นั่นเอง เพียงแต่ใช้สารตัวกลาง (เฉพาะในบริเวณนั้น) ต่างกัน โดยกรณีแรกใช้ไอของโพแทสเซียม ส่วนกรณีหลังใช้ก๊าซไนโตรเจน

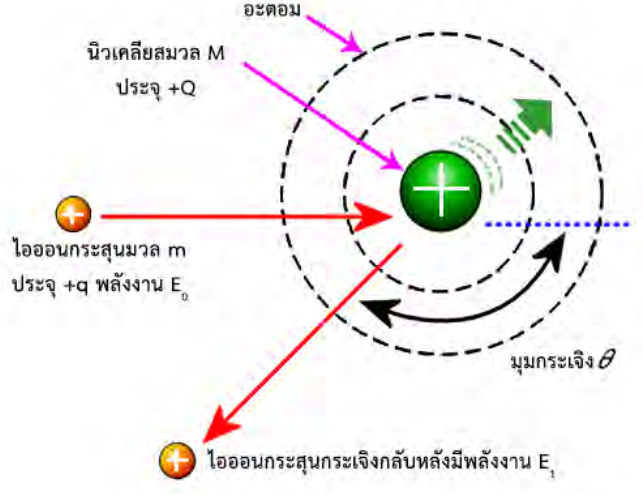
ทำให้บริเวณนี้ที่ก่อนหน้านี้ทำหน้าที่ดึงดูดไอออนลบเข้าหา แต่ตอนนี้เปลี่ยนบทบาทเป็นทำหน้าที่ผลักไสให้ไอออนบวกวิ่งเข้าไปในท่อเร่งตัวที่สองเพื่อมุ่งไปยังอีกปลายของท่อเร่งที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ด้วยเหตุนี้ไอออนชนิดนี้จึงถูกเร่งสองครั้งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงที่ HV terminal เพียงค่าเดียว สุดท้ายแล้วก็จะมีอัตราเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของตัวอย่างที่ยกมา



รูปที่ 2.6 *แสดงรายละเอียดภายในของสถานีวิเคราะห์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 44 ซม. [2] ซึ่งต้องอยู่ในสภาพสุญญากาศที่ความดันต่ำระดับ $5x10^{-6}$ mbar ตลอดเวลาที่ทำการทดลอง (ความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเลคือ 1.0×10^{3} mbar)*

เมื่อลำไอออนหลุดผ่านปลายขวามือสุดของเครื่องเร่งอนุภาคแล้วจะถูกนำส่งไปยังสถานีวิเคราะห์ที่อยู่ตรงปลายสุดของท่อนำลำอนุภาค / ไอออน (beamline) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยตรงจุดศูนย์กลางจะเป็นแท่นจับวัตถุตัวอย่างที่สามารถเลื่อนซ้าย-ขวา หมุน หรือเอียง ที่ควบคุมด้วย stepper motor ความละเอียดสูง 4 ตัว ทางด้านหน้าของวัตถุตัวอย่าง (ด้านที่ถูกลำไอออนพุ่งชน) หรือซีกซ้ายของสถานีวิเคราะห์ดังในภาพจะมีหัววัดอยู่ 3 ชนิด คือ silicon surface barrier detector (SSB) เพื่อใช้ตรวจวัดอนุภาคหรือไอออนที่กระเจิงกลับออกมาจากวัตถุตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RBS และ RBS/Channeling หัววัดชนิดที่สองคือ Si(Li) detector เพื่อใช้วัดรังสีเอกซ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากวัตถุตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Particle Induced X-ray Emission (PIXE) และหัววัดชนิดที่สามประกอบด้วยเส้นใยนำแสง (optical fiber) ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมแสงในย่านที่ตามองเห็นที่เปล่งออกมาจากวัตถุตัวอย่างเมื่อถูกชนด้วยลำไอออนเพื่อนำส่งออกมาวิเคราะห์ด้วย spectrometer ที่อยู่ภายนอกสถานีวิเคราะห์ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Ionoluminescence (IL)

2.3 ฟิสิกส์พื้นฐานของอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับวัตถุ



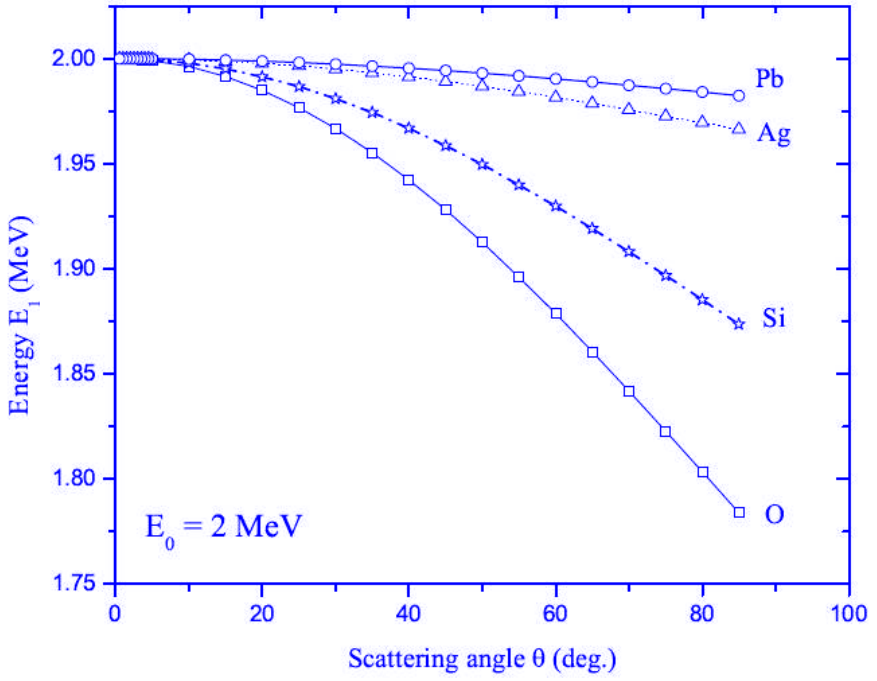
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการชนกันแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ระหว่างไอออนกระสุนกับนิวเคลียสของอะตอมที่อยู่นิ่ง ซึ่งเป็นกลไกสำคัญหนึ่งที่นักฟิสิกส์เข้าใจดีแล้วและเทคนิค RBS อาศัยใช้ประโยชน์ [3]

เมื่อลำไอออนที่มีประจุไฟฟ้าบวกถูกยิงเข้าใส่วัตถุ (ซึ่งเพื่อความกระชับและชัดเจน ต่อไปจะเรียกว่าอนุภาคกระสุนหรือไอออนกระสุน) ย่อมมีโอกาสที่ไอออนกระสุนเหล่านี้จะเกิดการชนเข้ากับอนุภาคอิเล็กตรอน และ/หรือนิวเคลียสของอะตอมทั้งหลายที่มีอยู่มากมายในวัตถุนั้น ทั้งที่อยู่ในรูปของอะตอมที่เป็นองค์ประกอบหลักหรือเป็นเพียงอะตอมมลทินที่ปะปนอยู่ ในกรณีของการชนระหว่างไอออนกระสุนกับนิวเคลียสเหมือนดังรูปที่ 2.7 จะเป็นการชนในแบบประจุไฟฟ้าบวกตัวหนึ่งวิ่งเข้าหาประจุไฟฟ้าบวกอีกตัวหนึ่งที่อยู่นิ่ง และปรกติจะมีมวลมากกว่าไอออนกระสุน เมื่อเข้าไปใกล้ถึงระดับหนึ่ง ด้วยเพราะมีประจุไฟฟ้าที่เหมือนกัน จะเกิดแรงผลักคูลอมบ์เพิ่มสูงขึ้นมากจนไอออนกระสุนวิ่งต่อไปไม่ได้ แต่จะกระเจิง (scatter) ไปทางหนึ่ง นิวเคลียสกระเด็นถอยหลัง (recoil) ไปอีกทางหนึ่ง นอกจากไอออนกระสุนจะเปลี่ยนแนววิ่งไปจากเดิมแล้ว ยังมีพลังงานจลน์ลดลงด้วย ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าเหล่านี้ได้จากสมการ *[2]*

$$E_1 = kE_0 \qquad (2.2)$$

เมื่อ E_0 และ E_1 คือพลังงานจลน์ของไอออนกระสุนก่อนและหลังการชน k คือค่า kinematic factor โดยทั่วไป k จะมีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับมุมกระเจิง θ และมวลของไอออนกระสุน (m) กับมวลของนิวเคลียส (M) ดังนั้น E_1 จึงมีค่าน้อยกว่า E_0 พลังงานจลน์ปริมาณ $(E_0 - E_1)$ ที่หายไปจากไอออนกระสุน จะกลายไปเป็นพลังงานจลน์ของนิวเคลียส ซึ่งอาจมีค่ามากพอจนบางครั้งหลุดออกจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างของวัตถุไปได้หรือเกิดการชนต่อ ๆกันอีกหลายทอด ด้วยเหตุนี้เองจึงสามารถประยุกต์ลำไอออนไปในการดัดแปลงสมบัติของวัตถุ (materials modification) ได้ รายละเอียดของอันตรกิริยา (interaction) นี้สามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำ ในที่นี้จะแสดงผลลัพธ์เพียงบางประการ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่ามุมและพลังงานกระเจิงของไอออนกระสุนจะขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่ถูกชน ด้วยเหตุนี้จึงสามารถประยุกต์ลำไอออนไปในการวิเคราะห์ธาตุได้ ดังเช่นกรณีของเทคนิค RBS เป็นต้น

แต่ภายในวัตถุมีอนุภาคอิเล็กตรอนอยู่เป็นจำนวนมากกว่านิวเคลียส เช่น ในหนึ่งลูกบาศก์มิลลิเมตรของวัตถุอย่างอลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide หรือ Al_2O_3) มีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่าจำนวนนิวเคลียสของธาตุอลูมิเนียมและ

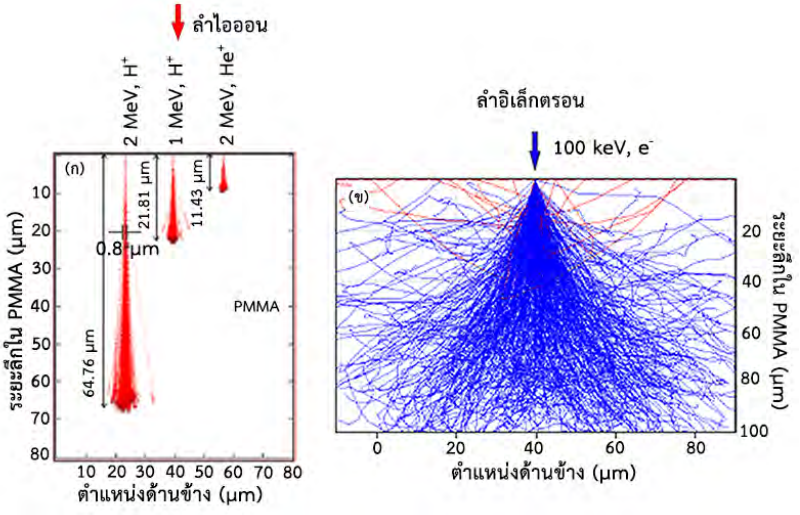


รูปที่ 2.8 *กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกระเจิง (scattering angle) กับพลังงานกระเจิง (E_1) ของไอออน H^+ ที่ถูกเร่งให้มีพลังงาน 2 MeV แล้วนำไปยิงใส่นิวเคลียสของธาตุ 4 ชนิดคือออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) เงิน (Ag) และตะกั่ว (Pb) ที่มีมวลมากกว่าไอออน H^+15.9, 27.9, 107.1 และ 205.7 เท่าตามลำดับ [4]*

ออกซิเจน 25 เท่าและ 17 เท่าตามลำดับ ไอออนกระสุนทั้งหลายที่วิ่งทะลวงเข้าไปจึงมีโอกาสสูงมากที่จะไปกระทบกระทั่งกับอิเล็กตรอนเหล่านั้นด้วย แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าไอออนกระสุนตั้งแต่ 1,836 เท่าหรือมากกว่านั้น การชนกันจึงอุปมาคล้ายกับการที่ลูกโบว์ลิ่งวิ่งชนพินโบว์ลิ่ง (มีมวลต่างกันระหว่าง 2.5 – 5 เท่า แล้วแต่ขนาดของลูกโบว์ลิ่ง) ในขณะที่พินโบว์ลิ่งกระเด็นไปไกลแต่ลูกโบว์ลิ่งสูญเสียพลังงานจลน์ไปเพียงเล็กน้อย และยังวิ่งต่อไปแทบจะในแนวทิศเดิม สิ่งที่เกิดขึ้นกับไอออนและอิเล็กตรอนก็คล้ายกัน ไอออนกระสุนสูญเสียพลังงานจลน์ไปเรื่อย ๆ คราวละเล็กละน้อยจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนของอะตอม (ionization) และ/หรือกระตุ้นอิเล็กตรอนของอะตอมให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะโลด (excitation) ตลอดเวลาที่เคลื่อนที่อยู่ในวัตถุโดยมีแนววิ่งต่อไปที่ไม่ได้เบนออกไปจากแนวเดิมตอนขาเข้ามากนัก ค่าพลังงานจลน์ที่ไอออนกระสุนสูญเสียไปในแต่ละหนึ่งหน่วยความยาว

ของเส้นทางวิ่งในวัตถุ ซึ่งนักฟิสิกส์ทั่ว ๆไปเรียกว่าค่า stopping power (มีหน่วยเป็นพลังงานต่อระยะทาง เช่น keV/μm หรือ MeV/cm เป็นต้น) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการเพียงสมการเดียว แต่ต้องรู้ข้อมูลต่าง ๆที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของทั้งไอออนกระสุนและตัววัตถุ *[2]*

รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบเส้นทางวิ่งของไอออน H^+ ไอออน He^+ และอิเล็กตรอนในวัตถุที่เป็นพอลิเมอร์ poly (methyl methacrylate) หรือ PMMA จะเห็นได้ว่าเส้นทางวิ่งของไอออนทั้งหลายใน PMMA จะค่อนข้างเป็นเส้นตรงและเกาะกลุ่มกันแบบที่ระยะทางลึกสุดที่ไอออนสูญเสียพลังงานจนน็อปจนหมดในเนื้อของวัตถุมีค่าใกล้เคียงกันมาก ไอออนที่มีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าหรือเบากว่าจะวิ่งเข้าไปในวัตถุได้ลึกกว่า ส่วนลำอิเล็กตรอนนั้นเนื่องจากมีมวลเบามากไม่ว่าจะชนกับอิเล็กตรอนด้วยกันเอง หรือนิวเคลียสที่หนักกว่ามากก็มีโอกาสสูงจะเกิดการกระเจิงเป็นมุมโต ทำให้เส้นทางวิ่งของอิเล็กตรอนแต่ละตัวเบนออกจากแนวเดิมมาก เช่นในกรณีของลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเริ่มต้น 100 keV ที่เส้นทางวิ่งกระจัดกระจายออกจากแนวเดิมมากจนค่าระยะลึกเฉลี่ยไม่มีความหมาย

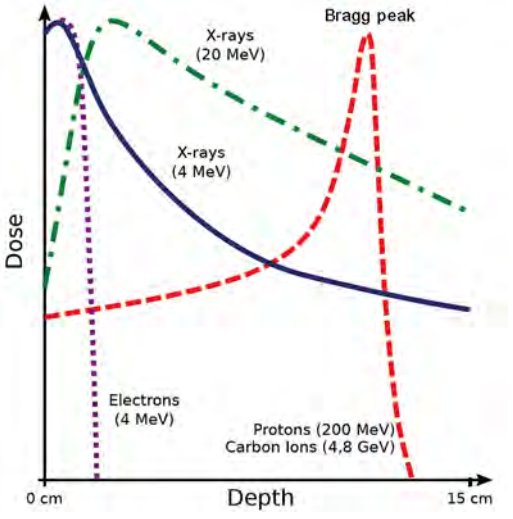


รูปที่ 2.9 *ผลการคำนวณแสดงแนวทางวิ่งของอนุภาคอิเล็กตรอน (e^-) ไอออนไฮโดรเจน (H^+) และไอออนฮีเลียม (He^+) ที่พลังงานเริ่มต้นค่าต่าง ๆกัน ในพอลิเมอร์ PMMA ($(C_5H_8O_2)_n$) โปรดสังเกตุว่าในกรณีนี้ระยะลึกที่สุดนับจากผิวหน้าของ PMMA ที่ไอออนไฮโดรเจนและฮีเลียมวิ่งเข้าไปมีค่าอยู่ในเรือนไมโครเมตรเท่านั้น ถึงแม้ว่าตัววัตถุจะเป็นเพียงสารประกอบของธาตุเบา ๆ เช่นไฮโดรเจน คาร์บอนและออกซิเจนก็ตาม [4]*

แต่สำหรับผู้ที่อยู่ในวงการรังสีรักษาจะคุ้นเคยกับอีกคำมากกว่า คือคำว่า LET (linear energy transfer) โดยถ้าคำนึงถึงแต่อันตรกิริยาระหว่างไอออนกระสุนกับอิเล็กตรอนในวัตถุ ค่า stopping power ก็จะเท่ากับค่า LET แน่นอนว่าค่า LET จะขึ้นอยู่กับพลังงานของไอออนกระสุน โดยสำหรับไอออนกระสุนชนิดเดียวกัน ตัวที่มีพลังงานสูงกว่าจะมีค่า LET ต่ำกว่า เช่นอนุภาคโปรตอนพลังงาน 150 MeV มีค่า LET ต่ำกว่าอนุภาคโปรตอนพลังงาน 10 MeV ประมาณ 9 เท่า เพราะไอออนที่มีพลังงานสูงกว่าจะใช้เวลาอยู่ในช่วงระยะทางหนึ่ง ๆสั้นกว่าไอออนที่มีพลังงานต่ำกว่า แต่ที่สำคัญก็คือค่า LET ขึ้นกับชนิดของอนุภาค /ไอออนด้วย เช่นอนุภาคโปรตอนพลังงาน 10 MeV มีค่า LET มากกว่าอนุภาคโฟตอนพลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV (คือรังสีแกมมาจากไอโซโทปกัมมันตรังสีโคบอลต์-60) ประมาณ 16 เท่า ส่วนอนุภาคอัลฟา (หรือไอออน He^{2+}) พลังงาน 2.5 MeV มีค่า LET สูงกว่าอนุภาคโฟตอนดังกล่าวประมาณ 553 เท่า ทั้งนี้เพราะอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกระสุนแต่ละชนิดกับวัตถุมีรายละเอียดที่ไม่เหมือนกัน

ค่า LET นั้นสัมพันธ์โดยตรงกับค่าพลังงานที่หนึ่งหน่วยมวลของวัตถุได้รับจากไอออนกระสุน ซึ่งเรียกว่าค่า absorbed dose แต่นิยมเรียกกันสั้น ๆว่าค่าโดส (dose) หน่วยของค่าโดสที่กำหนดให้ใช้กันในปัจจุบันคือ gray (Gy) ซึ่งตั้งขึ้นตามชื่อของ Louis H. Gray นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ โดยกำหนดว่า 1 Gy = 1 จูล / กิโลกรัม (หน่วยดั้งเดิมที่ใช้กันมาก่อนคือ rad โดย 1 rad เทียบเท่ากับ 0.01 Gy) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าลักษณะเส้นกราฟของค่าโดสตามความลึกในเนื้อเยื่อของอนุภาคโปรตอนจะแตกต่างจากของอนุภาคโฟตอน (หรือรังสีเอกซ์) และอิเล็กตรอนมาก โดยของโฟตอน (ไม่ว่าจะเป็นของรังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา) และอิเล็กตรอนจะคล้ายกันในลักษณะที่ว่าจะมีแต่ลดค่าลงตามความลึกในเนื้อเยื่อเท่านั้น แต่ของอนุภาคโปรตอนและไอออนของธาตุอื่น ๆ จะกลับตรงกันข้าม ค่าโดสที่เนื้อเยื่อได้รับจะพุ่งสูงขึ้นอย่างพรวดพราดเมื่อถึงช่วงระยะสุดท้ายก่อนที่อนุภาคโปรตอนหรือไอออนจะหยุดการเคลื่อนที่ (เพราะหมดพลังงานจลน์) โดยสูงกว่าค่าโดสที่เนื้อเยื่อบริเวณผิวได้รับมากกว่า 2 เท่า

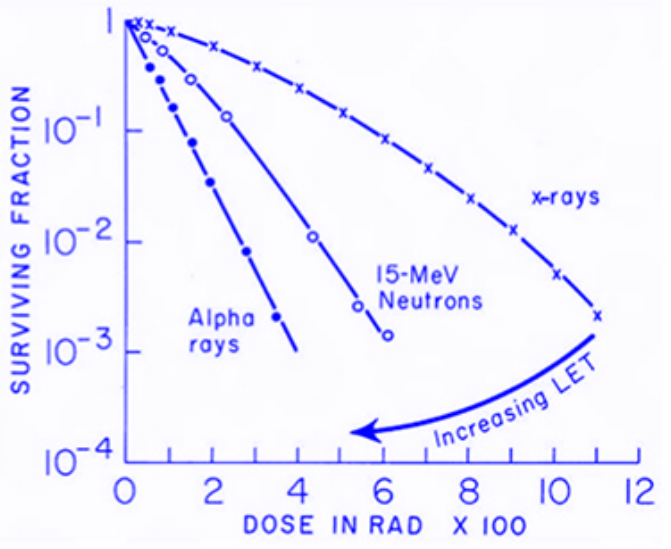
ในกรณีที่วัตถุเป็นวัสดุชีวภาพเช่นเซลล์มีชีวิต ผลลัพธ์ของการถูกยิงด้วยลำไอออน (หรือรังสีอื่น ๆ) ที่จะต้องให้ความสำคัญก็คือค่าเศษส่วนการอยู่รอด (surviving fraction หรือ SF) รูปที่ 2.11 แสดงเปรียบเทียบกราฟ SF ของเซลล์สัตว์เลี้ยงลูก



รูปที่ 2.10 *เปรียบเทียบค่าโดสที่ระยะต่าง ๆในเนื้อเยื่อที่ได้รับจากรังสี / อนุภาคกระสุน 4 ชนิด คือ อนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 4 MeV รังสีเอกซ์พลังงาน 4 และ 20 MeV และอนุภาคโปรตอนพลังงาน 200 MeV กับไอออนคาร์บอนพลังงาน 4.8 GeV จะเห็นได้ว่าเฉพาะอนุภาคโปรตอนและไอออนคาร์บอนเท่านั้นที่ค่าโดสพุ่งขึ้นสูงมากช่วงปลายทางของอนุภาค ยอดที่พุ่งสูงขึ้นเรียกว่า Bragg peak (ตั้งตามชื่อของ Sir William H. Bragg นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ) [5]*

ด้วยนม หลังถูกยิงด้วยอนุภาค/รังสีที่มีค่า LET ต่างกัน 3 ชนิดคือรังสีเอกซ์ อนุภาคนิวตรอนพลังงาน 15 MeV และอนุภาคอัลฟาพลังงาน 4 MeV ที่ระดับค่าโดสต่าง ๆ กัน จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า LET เพิ่มขึ้น ความชันของเส้นกราฟก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่ออนุภาคอัลฟามีค่า LET สูงสุด เซลล์ที่ถูกยิงด้วยอนุภาคอัลฟาจึงมีโอกาสรอดชีวิตน้อยที่สุด (ค่า SF ต่ำที่สุด) ถึงแม้ว่าเซลล์จะถูกยิงด้วยรังสี/อนุภาคทั้ง 3 ชนิดในระดับโดสที่เท่ากันก็ตาม

ด้วยเหตุนี้ อนุภาคเช่นโปรตอน อัลฟา หรือไอออนของธาตุต่าง ๆ จึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดรักษามะเร็งสูงกว่าอนุภาคอิเล็กตรอนหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นรังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา เพราะมีค่า LET สูงกว่า จึงมีอำนาจการทำร้ายสูงกว่า สามารถกำหนดระยะลึกได้แม่นยำกว่าและมี Bragg peak คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อดีสำหรับการบำบัดรักษามะเร็ง เพราะสามารถกำหนดได้อย่างแม่นยำให้เฉพาะก้อนเนื้อร้ายได้รับพลังงานสูงสุดจนถูกทำลายโดยไม่สามารถกลับฟื้นคืนสภาพได้ ส่วนเนื้อดีที่อยู่ด้านหน้าและด้านข้างได้รับพลังงานไม่สูงพอที่จะเป็นอันตรายอย่าง

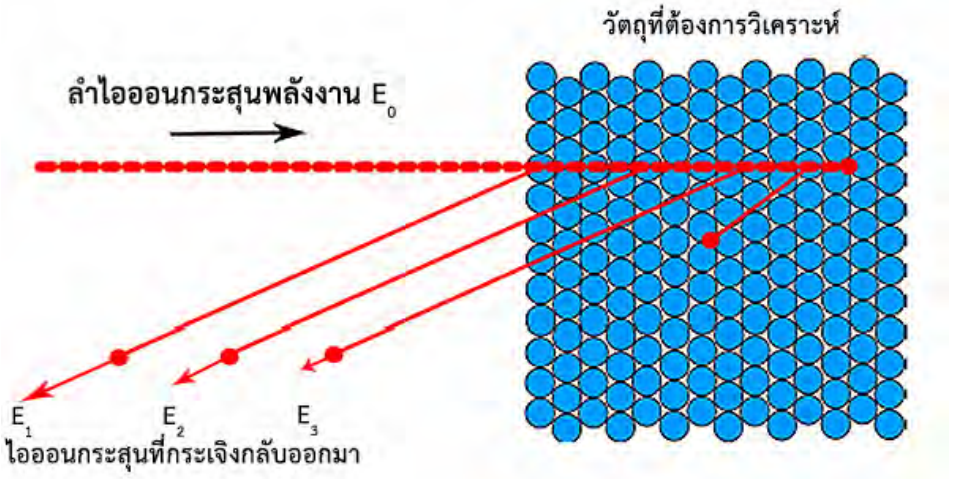


รูปที่ 2.11 *เปรียบเทียบค่าเศษส่วนการอยู่รอด (แกนตั้ง) ของเซลล์สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมหลังได้รับรังสีเอกซ์พลังงาน 250 keV อนุภาคนิวตรอนพลังงาน 15 MeV และอนุภาคอัลฟาพลังงาน 4 MeV ที่ค่าโดสต่าง ๆ (แกนนอน) ค่า SF เท่ากับ 1 หมายถึงเซลล์รอดชีวิตทั้งหมด ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อค่าโดสเท่ากับศูนย์หรือก็คือเซลล์ไม่ได้ถูกยิงด้วยรังสี / อนุภาคแต่อย่างใด [6]*

ถาวร

2.4 การใช้ประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์และตรวจสอบธาตุด้วยลำไอออน

จากการที่พฤติกรรมของไอออนกระสุนเมื่อวิ่งไปชนและทะลวงเข้าไปเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนและนิวเคลียสในวัตถุได้รับการศึกษามาอย่างดี นักฟิสิกส์เข้าใจแล้วอย่างถ่องแท้ จึงสามารถประยุกต์องค์ความรู้ที่สมบูรณ์แล้วนั้นมาใช้ในการวิเคราะห์วัตถุด้วยเทคนิคที่รวมเรียกว่า Ion Beam Analysis (IBA) ซึ่งเป็นกลุ่มของเทคนิควิเคราะห์ที่ไม่ทำลายวัตถุตัวอย่าง (nondestructive testing) ประกอบด้วยเทคนิค RBS, RBS/Channeling, PIXE, IL, EBS (Elastic (non-Rutherford) Backscattering Spectrometry), ERD (Elastic Recoil Detection), NRA (Nuclear Reaction Analysis) และ PIGE (Particle Induced Gamma-ray Emission) ระบบเครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่สามารถทำได้ 4 เทคนิคแรก ดังกล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.2 ซึ่งจะอธิบายหลักการสำคัญของเทคนิคทั้งสี่พอเป็น

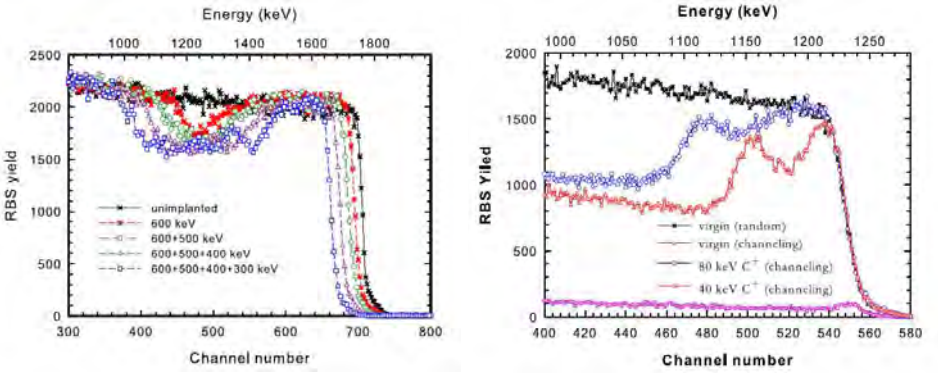


รูปที่ 2.12 *แผนภาพแสดงหลักการพื้นฐานของเทคนิค RBS โดยสมมุติให้วัตถุประกอบด้วยอะตอมชนิดเดียวเท่านั้น ไอออนกระสุนที่มีพลังงานจลน์เริ่มต้น E_0 เมื่อชนกับนิวเคลียสของอะตอมวัตถุที่ผิวบางตัวจะกระเจิงกลับหลัง มีพลังงานจลน์ลดลงเหลือเป็น E_1 (จากสมการที 2.2) แต่ถ้าเกิดชนกับนิวเคลียสของอะตอมที่อยู่ลึกกว่านั้น ถ้ากระเจิงกลับออกมาได้ จะมีพลังงานเหลือเป็น E_2 หรือ E_3 แล้วแต่ความลึก โดย $E_3 < E_2 < E_1$ ถึงแม้จะมีมุมกระเจิงกลับหลังเท่ากัน ทั้งนี้เพราะไอออนมีการสูญเสียพลังงาน.ให้กับอิเล็กตรอนตามรายทางทั้งตอนขาเข้าและขาออก ยิ่งอยู่ลึกก็ยิ่งสูญเสียพลังงานส่วนนี้มาก ด้วยเหตุนี้เทคนิค RBS จึงสามารถใช้วัดความหนาของฟิล์มบางได้ด้วย [7]*

สังเขปดังต่อไปนี้ *[2]*

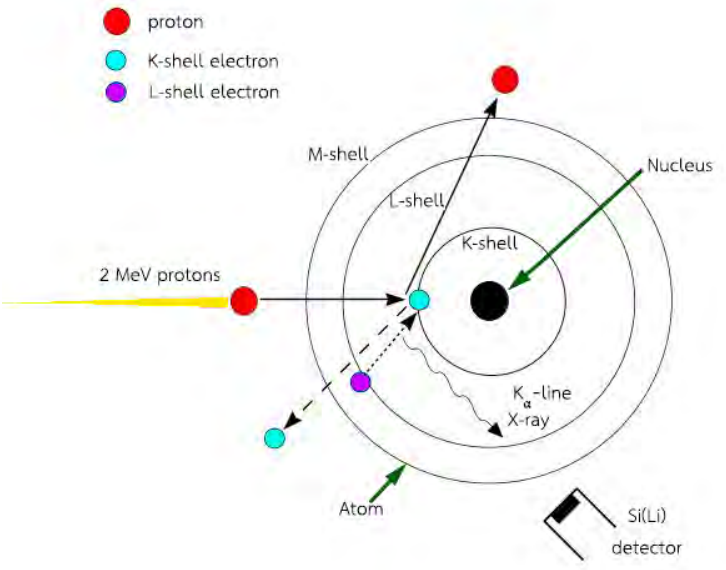
โดยทั่วไปเทคนิค RBS (รูปที่ 2.12) จะใช้ไอออนฮีเลียมเป็นไอออนกระสุนเร่งให้มีพลังงานในเรือน 2 MeV ยิงไปยังบริเวณผิวหน้าของวัตถุตัวอย่างที่กินความลึกในเรือนไมโครเมตร (ดูรูปที่ 2.9 ประกอบ) แล้วคอยวัดทั้งจำนวนและพลังงานของไอออนฮีเลียมที่กระเจิงกลับหลังออกมาจากวัตถุ (backscattering เป็นมุมประมาณ 170 องศา เมื่อเทียบกับทิศทางตอนพุ่งชนของลำไอออนกระสุน) ด้วยหัววัด SSB เนื่องจากฟิสิกส์ของอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับวัตถุที่มันวิ่งเข้าชนเป็นที่ทราบอย่างดีดังกล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.3 จึงทำให้สามารถคำนวณย้อนกลับได้อย่างแม่นยำว่า ไอออนกระสุนนั้นวิ่งไปชนกับอะตอมชนิดใดบ้าง ที่มีประชากรหนาแน่นมากน้อยเพียงใด และ อยู่ที่ระดับลึกจากผิวหน้าเท่าใด เทคนิคนี้มีประโยชน์ใช้ในการวิเคราะห์หาความหนาและองค์ประกอบของฟิล์มบาง (thin film) ในเรือนไมโครเมตรหรือต่ำกว่า ที่ฉาบอยู่บนฐานรอง (substrate) หรือวิเคราะห์ลักษณะ

การกระจายตัวของอะตอมของธาตุอีกชนิดที่อาจจะหนักกว่าหรือเบากว่าที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อของฐานรองที่เป็นธาตุอีกชนิด ที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแพร่ (diffusion) หรือกระบวนการยิงฝัง (implantation) ส่วนเทคนิค RBS / Channeling ใช้ระบบการวัดชุดเดียวกับของเทคนิค RBS สิ่งที่เพิ่มเติมขึ้นมาก็คือ goniometer ที่สามารถเลื่อน หมุน และเอียงวัตถุตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยความละเอียดสูง เทคนิคนี้มีประโยชน์ใช้ศึกษาสภาพการเป็นผลึกของวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น วิธีทั้งสองจึงมีความสำคัญต่อการศึกษาวิจัยในเรื่องฟิล์มบางและสารกึ่งตัวนำเพื่อพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือเซนเซอร์ ฯลฯ (รูปที่ 2.13)



(ก) (ข)

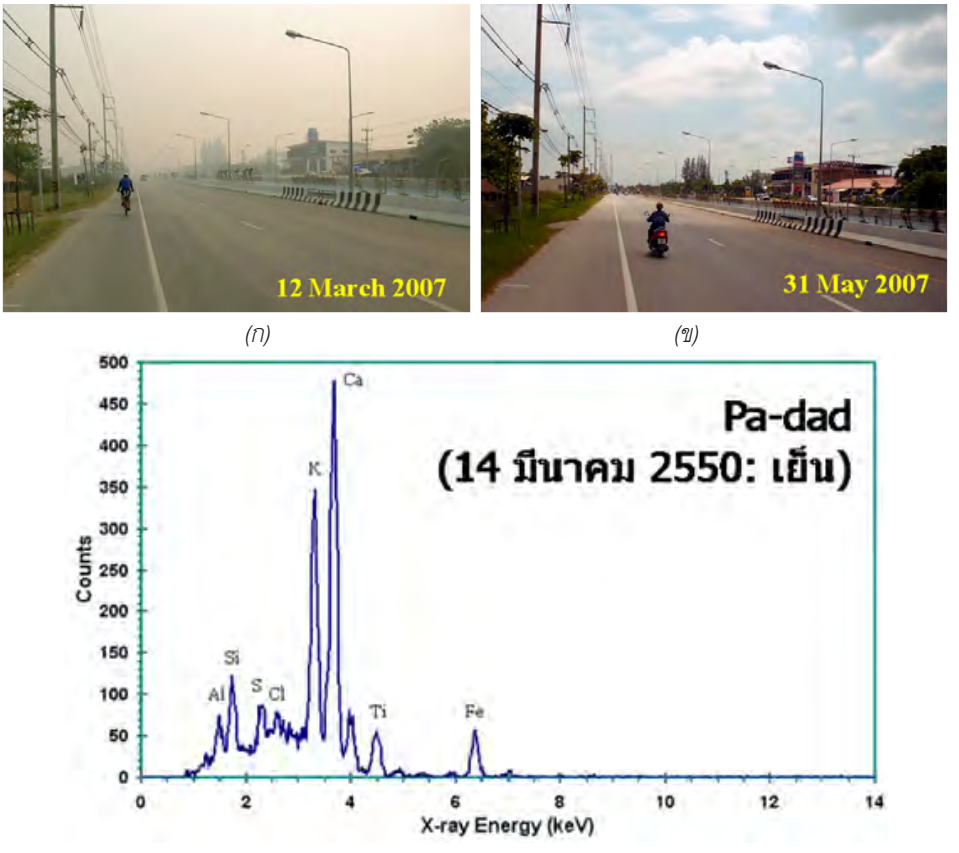
รูปที่ 2.13 *ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RBS (ก) และ RBS/Channeling (ข) เพื่อศึกษาลักษณะการเกิดขึ้นของชั้นซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยการยิงไอออนของธาตุคาร์บอนด้วยพลังงานต่าง ๆกันเข้าไปฝังตัวอยู่ในฐานรองที่เป็นผลึกซิลิกอน (แผ่น silicon wafer) แกนพลังงานตรงขอบบนของทั้งสองรูปคือค่าพลังงานของไอออนฮีเลียมชนิด He^{2+} ที่กระเจิงกลับหลังออกมาจากแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ โดยพลังงานของไอออนกระสุน He^{2+} ที่วิ่งเข้าชนแผ่นซิลิกอน มีค่า 2.1 MeV เนื่องจากซิลิกอนมีมวลมากกว่าคาร์บอน 2.3 เท่า เทคนิค RBS จึงให้ข้อมูลเรื่องลักษณะการกระจายตัวของคาร์บอนในโครงสร้างของซิลิกอนซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการยิงฝัง ส่วนเทคนิค RBS/Channeling จะให้ข้อมูลเรื่องคุณภาพการเป็นผลึกของวัตถุตัวอย่างทั้งก่อนและหลังการถูกยิงฝังด้วยไอออนคาร์บอนที่มีพลังงานต่างกันคือ 40 และ 80 keV จะเห็นได้ว่าเมื่อไอออนคาร์บอนมีพลังงานสูงขึ้น จะฝังตัวเข้าไปได้ลึกขึ้น (นับจากผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน) แต่ก็ทำลายความเป็นผลึกของบริเวณนั้นลงมากกว่าด้วยเช่นกัน ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นสารประกอบที่หาได้ยากมากในธรรมชาติ แต่สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ เป็นสารประกอบที่ได้รับความสนใจในหลายวงการ เช่นในวงการอิเล็กทรอนิกส์ เพราะสามารถนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีสมบัติพิเศษได้ เช่น ทนความร้อนสูง และทนศักย์ไฟฟ้าสูง เป็นต้น [8]*



รูปที่ 2.14 *แผนภาพแสดงกระบวนการเกิด Characteristic X-ray ของเทคนิค PIXE ในภาพแสดงเฉพาะกรณีของรังสีเอกซ์ชนิด K_α ซึ่งหมายถึงรังสีเอกซ์ที่อิเล็กตรอนในชั้น L-shell ปล่อยออกมาเมื่อต้องลงไปแทนที่อิเล็กตรอนในชั้น K-shell ที่ถูกอนุภาคโปรตอน (หรือไอออน H^+) พลังงาน 2 MeV ชนหลุดกระเด็นออกไป ทำให้เกิดที่ว่างใน K-shell (ถ้าเป็นอิเล็กตรอนในชั้น M-shell ลงไปแทนที่จะเรียกรังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมาว่าเป็นชนิด K_β ทั้งหมดรวมเรียกว่า K X-ray lines ส่วนกลุ่มรังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมาโดยอิเลกตรอนในชั้นอื่น ๆที่ลงไปแทนที่ว่างในชั้น L-shell จะเรียกว่า L X-ray lines) [9]*

เทคนิค PIXE จะใช้วิธีเร่งอนุภาคโปรตอนให้มีพลังงานในเรือน 2 MeV แล้วยิงใส่วัตถุตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่อยู่วงในที่สุดของอะตอม คือที่ K-shell มักจะถูกอนุภาคโปรตอนชนให้หลุดกระเด็นออกไป อิเล็กตรอนจากวงนอก ๆที่มีพลังงานสูงกว่าจะวิ่งลงมาแทนที่ตำแหน่งที่ว่างนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ในการนี้ต้องมีการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกไปในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีค่าพลังงานเจาะจงที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวของอะตอมแต่ละชนิด เรียกว่า Characteristic X-rays คล้ายกับเป็นลายพิมพ์นิ้วมือของอะตอมแต่ละชนิด รังสีเอกซ์เหล่านี้จะถูกวัดด้วยหัววัด Si(Li)ที่ถูกทำให้เย็นอยู่ตลอดเวลาด้วยไนโตรเจนเหลวในถัง Dewar ที่อยู่นอกสถานีวิเคราะห์ เทคนิคนี้มีความไว (sensitivity) สูงมาก มีประโยชน์ใช้ในการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุปะปนที่มีระดับหนึ่งในล้านส่วน (parts per million หรือ ppm) ของธาตุหลัก ๆของวัตถุ โดยเป็นเทคนิควิเคราะห์ที่กินเวลาสั้นในระดับ 10 นาทีเท่านั้นและสามารถวัดธาตุองค์ประกอบต่าง ๆในวัตถุตัวอย่างได้ในคราว

เดียวกัน (multi-elemental analysis) โดยไม่จำเป็นต้องรู้ล่วงหน้าถึงข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับธาตุองค์ประกอบของวัตถุนั้น ๆมาก่อน (รูปที่ 2.15 และ 2.16)



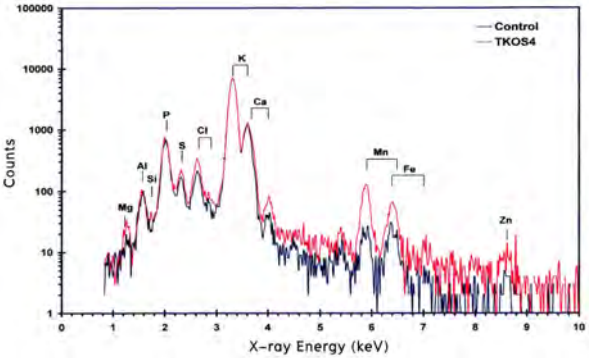
(ก) *(ข)*

(ค)

รูปที่ 2.15 *(ก) สภาพปัญหาหมอกควันรุนแรงครั้งแรกที่จังหวัดเชียงใหม่ในช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2550 เปรียบเทียบกับสภาพอากาศของเดือนพฤษภาคมของปีเดียวกันเมื่อวิกฤติการณ์ได้ผ่านพ้นไปแล้ว (ข) ภาพทั้งสองถ่ายที่ตำบลแม่เหียะ ในประมาณเวลาเดียวกัน (ค) ด้วยผลการวิเคราะห์ฝุ่นละอองที่ติดค้างอยู่บนกระดาษกรองจากการดูดอากาศของอำเภอป่าแดดเมื่อวันที่ 14 มีนาคม พ.ศ. 2550 โดยใช้เทคนิค PIXE เป็นเวลาเพียง 15 นาที ก็สามารถรู้ชนิดของธาตุองค์ประกอบได้ทั้งหมด โดยเห็นยอด (peak) ของรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของธาตุแคลเซียม (Ca) และโพแทสเซียม (K) ที่โดดเด่นมาก คือมีปริมาณ K/Ca = 1.51/2.25 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตรของอากาศ แสดงให้เห็นว่าปัญหาหมอกควันที่เชียงใหม่ครั้งนั้น มีสาเหตุมาจากทั้งการเผาชีวมวล (biomass burning) โดยดูจากยอดของโพแทสเซียม และจากฝุ่นละอองของดิน หิน ปูน (soil dust) โดยดูจากยอดของแคลเซียม การวิเคราะห์ในครั้งนี้น่าจะเป็นการวิเคราะห์ฝุ่นละอองขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ (atmospheric aerosols) ด้วยระบบ PIXE ของคนไทยเองเป็นครั้งแรก [10]*



(ก)

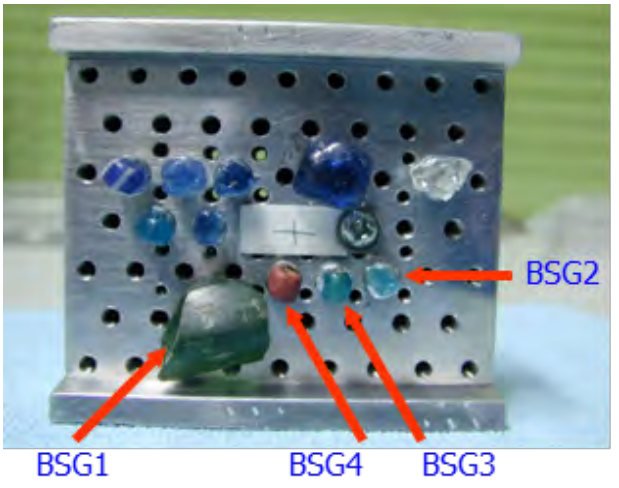


(ข)

รูปที่ 2.16 *เนื่องจากสามารถทำให้ลำอนุภาคโปรตอนมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กประมาณ 1 มิลลิเมตรได้โดยไม่ยาก จึงสามารถใช้ในการตรวจสอบปริมาณแร่ธาตุในเมล็ดข้าวแบบทีละเม็ดได้ (ก) คือตลับใส่เมล็ดข้าวเพื่อการตรวจสอบด้วยเทคนิค PIXE ที่ออกแบบและสร้างขึ้นเอง ซึ่งได้รับเลือกเป็นรูปปกของ IAEA Bulletin ฉบับที่ 55-2 ประจำเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2557 [11] (ข) แสดงตัวอย่างสเปกตรัม PIXE จากเมล็ดข้าวสองสายพันธุ์คือข้าวขาวหอมมะลิ 105 (Control หรือที่แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน) และสายพันธุ์กลายจากการชักนำการกลายพันธุ์ด้วยลำไอออน (ดูบทที่ 4) ที่ตั้งชื่อให้ว่า TKOS4 (เส้นสีแดง) เมื่อเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่าเมล็ดข้าวสายพันธุ์ TKOS4 มีธาตุแมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) และสังกะสี (Zn) ในปริมาณที่สูงกว่า*

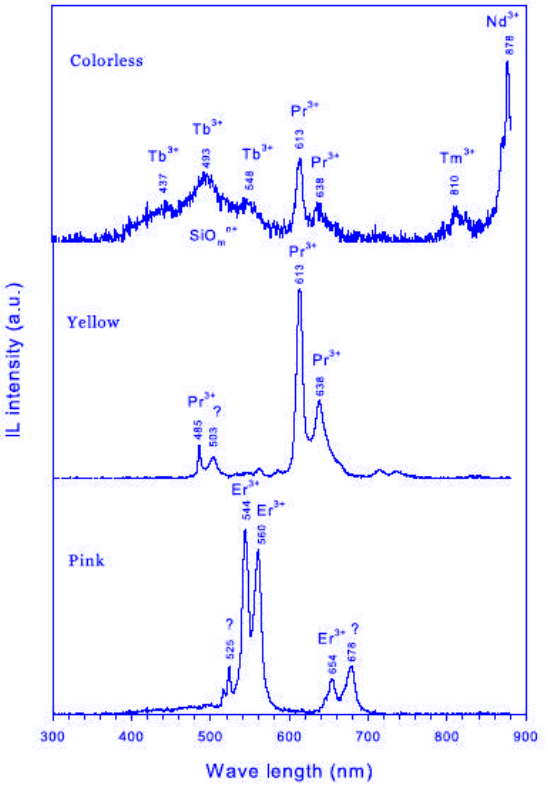
นอกจากนั้นได้มีการนำเทคนิค PIXE มาวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบในโบราณวัตถุของไทยเป็นครั้งแรกด้วย โดยอาศัยจุดเด่นของเทคนิค PIXE ที่เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่ไม่ทำลายวัตถุตัวอย่าง อาทิ การวิเคราะห์ลูกปัดแก้วจากชุมชนโบราณเขาสามแก้ว ตำบลนาซะอัง อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร จากแหล่งโบราณคดีหอเอก เมืองนครปฐมโบราณ และจากแหล่งโบราณคดีคลองท่อม (ควนลูกปัด) อำเภอคลองท่อม จังหวัดกระบี่ (รูปที่ 2.17) เครื่องประดับแก้วจากวัดเก่าแก่บางแห่งเช่นวัดพระศรีรัตนศาสดาราม (วัดพระแก้ว) กรุงเทพมหานคร และวัดเกตการาม อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ *[12]* หรือ การวิเคราะห์ข้าวโบราณจากแหล่งโบราณคดีบ้านดงละคร อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก *[13]* เป็นต้น

เทคนิค IL จะคล้ายกับเทคนิค Cathodoluminescence (CL) ที่ใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานในเรือน keV ยิงใส่สารตัวอย่าง กระตุ้นให้เกิดการเปล่งแสง (luminescence) แบบที่ไม่เกี่ยวข้องกับความร้อน แต่เทคนิค IL จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเพราะอนุภาคกระสุนที่ใช้กระตุ้นสารตัวอย่างเป็นอนุภาคที่มีมวลมากกว่า



รูปที่ 2.17 *โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PIXE พบว่าลูกปัดแก้วที่ชุมชนโบราณเขาสามแก้วมีองค์ประกอบของเนื้อแก้วที่เป็น LMHK (low-magnesia, high-potash glasses) ซึ่งต่อมาพบว่ามีความคล้ายคลึงกับลูกปัดแก้วจากแหล่งโบราณคดีหอเอก และแหล่งโบราณคดีคลองท่อม ได้พบทองแดงทั้งในลูกปัดแก้วสีแดงและสีน้ำเงิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณของทองแดงในลูกปัดแก้วสีแดงขุ่น (red opaque) ที่มีค่าใกล้เคียงกับของลูกปัดแก้วในยุคโรมัน และพบตะกั่วปริมาณมากในทุกตัวอย่าง สันนิษฐานว่าถูกเติมเพื่อใช้สำหรับลดอุณหภูมิในการหลอมแก้ว ซึ่งวิธีการนี้มีการใช้กันมาในตะวันออกใกล้ และอียิปต์ ตั้งแต่ประมาณ 1,500 ปีก่อนคริสตกาล จนถึงยุคโรมัน โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนหลักจากคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ [14]*

อนุภาคอิเล็กตรอนหลายเท่า เช่นอนุภาคโปรตอน ซึ่งมีค่า LET สูงกว่ามาก (ค่า LET ในน้ำของอนุภาคโปรตอนพลังงาน 1 MeV สูงกว่าของอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 1 MeV ประมาณ 150 เท่า) เนื่องจากการเปล่งแสงเกิดจากการที่เวเลนซ์อิเล็กตรอนของอะตอมมลทินถูกกระตุ้น (ไม่ใช่เป็นอิเล็กตรอนตัวที่อยู่ใกล้กับนิวเคลียสเหมือนอย่างกรณีของรูปที่ 2.12) ซึ่งระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเหล่านี้มักจะผิดปรกติไปเพราะได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมเช่น จากอะตอมข้างเคียง หรือ จุดตำหนิ (defect) ต่าง ๆที่มีอยู่ในผลึกสารตัวอย่างเป็นต้น ดังนั้นลักษณะการเปล่งแสงจึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งของอะตอมมลทินในโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างด้วย ซึ่งต่างจากกรณีของ PIXE ที่กระบวนการปลดปล่อย characteristic X-rays จากอะตอมหนึ่ง ๆจะเป็นอิสระจากสิ่งแวดล้อมโดยสิ้นเชิง จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของอะตอมตัวนั้น ๆเท่านั้น (แต่ก็มีข้อยกเว้นสำหรับกรณีเทคนิค IL โดยเฉพาะกับพวกธาตุในกลุ่ม rare earth elements) เทคนิค IL ซึ่งเป็นเทคนิควิเคราะห์ที่มีความไวกว่าเทคนิค PIXE มีประโยชน์ใช้ในการศึกษาทางด้านนาโนวิทยา ทางด้านธรณีวิทยาและทางด้านอัญมณีวิทยา (รูปที่ 2.18)



รูปที่ 2.18 *ลักษณะสเปกตรัม IL ของแสงในย่านที่ตามองเห็นที่เปล่งออกมาจากก้อนเพทาย (zircon) ที่มีลักษณะสีต่างกัน 3 ชนิด คือใส (colorless) สีเหลือง (yellow) และสีชมพู (pink) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยลำอนุภาคโปรตอนพลังงาน 2 MeV ยอดต่าง ๆที่เห็นมีต้นตอมาจากอะตอมของธาตุหายาก (rare earth element) 5 ชนิดที่เป็นมลทินปะปนอยู่ในโครงสร้างผลึกหลักที่เป็นเซอร์โคเนียมซิลิเกต (Zirconium Silicate หรือ $ZrSiO_4$) ธาตุมลทินเหล่านี้คือ Terbium (Tb^{3+}) Praseodymium (Pr^{3+}) Thulium (Tm^{3+}) Neodymium (Nd^{3+}) และ Erbium (Er^{3+}) ซึ่งมักอยู่ในสถานะ trivalent cation เหมือนกันเมื่ออยู่ร่วมกับอะตอมอื่น ๆ [15]*

ทั้งเทคนิควิเคราะห์ PIXE และ IL เป็นกำลังสำคัญหนึ่งในการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีธรรมชาติด้วยลำไอออนที่คิดค้นขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ไทยล้วน ๆ รวมถึงการพยายามที่จะเข้าใจฟิสิกส์ของกลไกต่าง ๆที่เกี่ยวข้องกับเรื่องนี้ (ดูบทที่ 4)

2.5 การใช้ประโยชน์ด้านการทำไมโครลิโธกราฟีด้วยลำไอออน

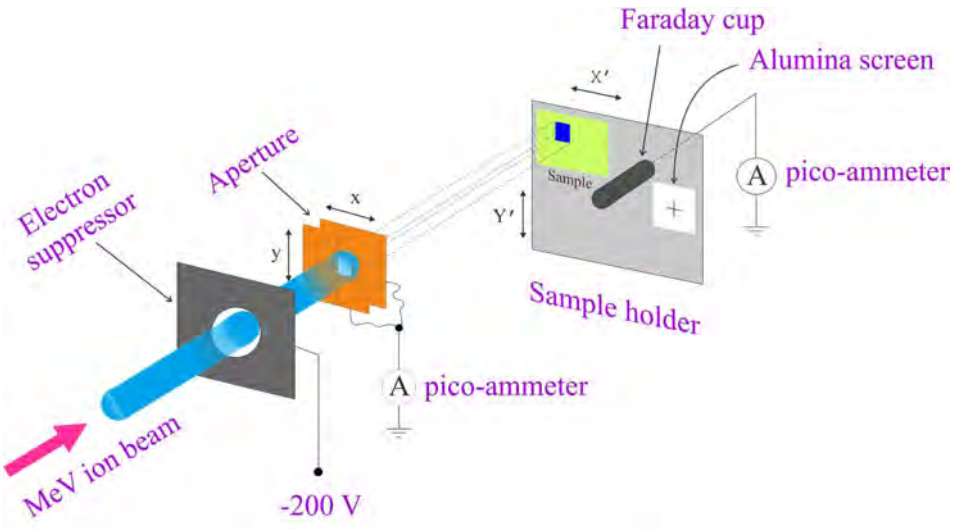
นอกเหนือจากประโยชน์ 2 ด้านดังที่กล่าวมา คือด้านการวิเคราะห์ธาตุแบบไม่ทำลายชนิดต่าง ๆ และ การสังเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิค Ion Implantation แล้ว ลำไอออนที่มีพลังงานในย่าน MeV ยังมีศักยภาพที่จะนำไปใช้ในการแกะสลักโครงสร้างจิ๋วในระดับไมโครเมตรได้ โดยมีชื่อเฉพาะเรียกกระบวนการนี้ว่า Ion Beam Lithography (IBL)

แต่ก่อนอื่นต้องมีวิธีลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำไอออนในเรือนมิลลิเมตรให้เล็กลง เหลือเป็นระดับไมโครเมตร ทั้งนี้เพราะโดยทั่วไปลำไอออนที่ผลิตโดยเครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร อุปกรณ์เสริมเพื่อการลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำไอออนมีทั้งแบบไฮเอ็นด์ราคาหลายสิบล้านบาทและแบบโลว์เอ็นด์ราคาในเรือนหมื่นบาทหรือต่ำกว่า ประเทศมหาเศรษฐีอย่างสิงคโปร์ย่อมเลือกใช้แบบไฮเอ็นด์ที่ซื้อทั้งระบบมาจากบริษัท Oxford Microbeams Ltd. ประเทศสหราชอาณาจักร เพื่อนำมาใช้กับเครื่องเร่งอนุภาคของศูนย์วิจัย Centre for Ion Beam Applications (CIBA) ที่ภาควิชาฟิสิกส์ ของ National University of Singapore แต่ในกรณีของเราได้ยึดแนวทาง *“Small is Beautiful”* จึงเลือกใช้แบบโลว์เอ็นด์ ที่สามารถสร้างได้เอง

คณะนักวิจัยของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้สร้างระบบลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำไอออนขึ้นมา 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งติดตั้งเสริมเข้าไปภายในสถานีวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

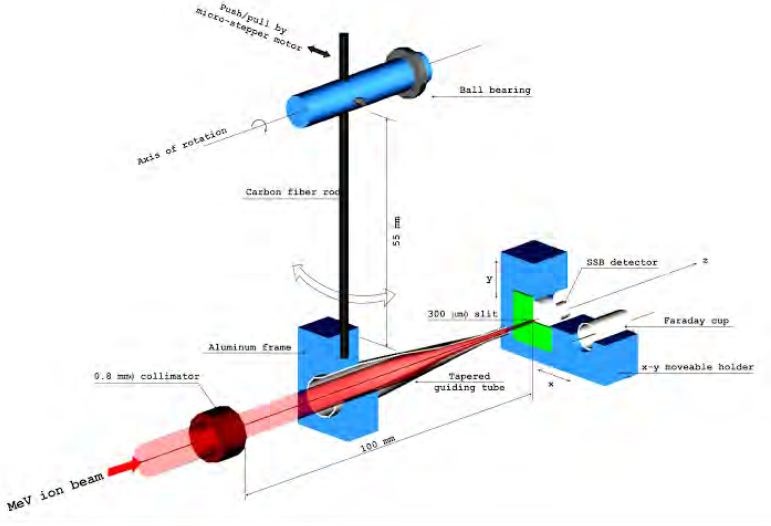
ตัวอย่างของการใช้ลำไอออนจิ๋วที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในเรือนไมโครเมตรแกะลวดลายจิ๋วบนพอลิเมอร์ไวแสง/ลำไอออน PMMA ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการ IBL นี้สามารถนำไปใช้ทำร่อง microchannel ของแม่พิมพ์สำหรับผลิตชิปของไหลจุลภาค (microfluidic chip) ได้

ส่วนรูปที่ 2.21 คือชิปของไหลจุลภาคที่ทำหน้าที่สร้างหยดของเหลวจิ๋ว เรียกกันว่า micro-droplet generator (μDG) ซึ่งทำขึ้นด้วยเทคนิค soft-lithography ที่ใช้พอลิเมอร์ PDMS (poly(dimethylsiloxane)) ถอดแบบจากแม่พิมพ์ที่แกะร่อง micro-channel ด้วยลำไอออน H^+ จิ๋วพลังงาน 2 MeV



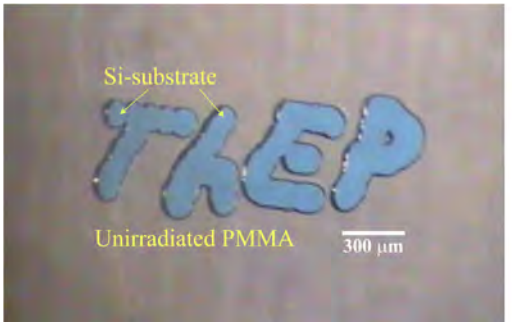
CMU MeV-IBL based on PPAL system

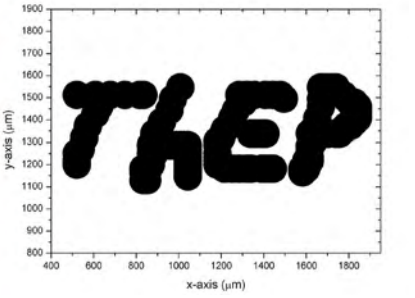
รูปที่ 2.19 *(ก) แผนภาพระบบลดขนาดลำไอออนแบบสลิตคู่ที่สามารถปรับขนาดรูในระดับไมโครเมตรได้อย่างละเอียด โดยการควบคุมด้วย micro-stepper motor 2 ตัวที่สั่งการผ่านทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งคณะผู้วิจัยตั้งชื่อว่า Programmable Proximity Aperture Lithography หรือ PPAL [16]*



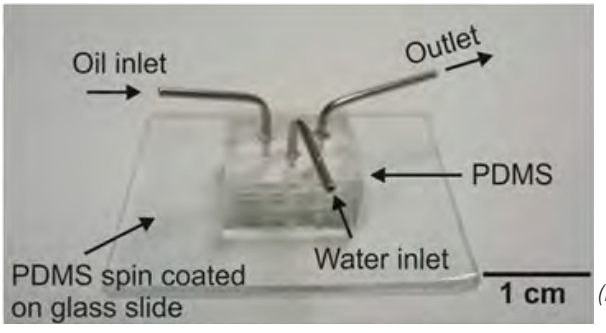
CMU MeV-IBL based on tapered glass capillary

รูปที่ 2.19 *(ข) แผนภาพระบบลดขนาดลำไอออนแบบที่ใช้หลอดแก้วรูปกรวยปลายแคปิลลารี (tapered glass capillary) ที่มีราคาย่อมเยากว่าแบบ (ก) เพราะไม่ต้องใช้ micro-stepper motor แต่ความสะดวกในการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำไอออนจิ๋วมีน้อยกว่า [4,17]*

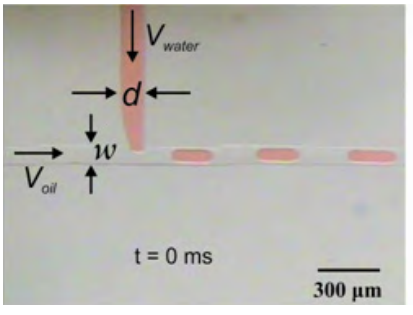


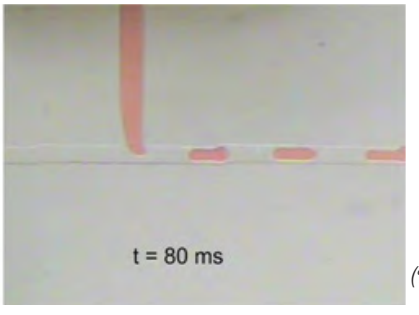


รูปที่ 2.20 *ภาพซ้ายมือเป็นภาพที่ถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์เพื่อขยายให้เห็นร่องจิ๋วรูปตัวอักษร ThEP ซึ่งเป็นชื่อย่อของศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (Thailand Center of Excellence in Physics) ที่จารึกลายด้วยลำอนุภาคโปรตอนจิ๋วพลังงาน 2 MeV โดยคอมพิวเตอร์สั่งให้เขียนตามแบบในภาพขวามือ ที่เขียนขึ้นแบบ free-hand ด้วย mouse จะเห็นได้ว่าสามารถเลียนแบบต้นฉบับได้เหมือนมาก โดยอักษรแต่ละตัวของภาพซ้ายมือมีขนาดเพียงประมาณ 300 ไมโครเมตรเท่านั้น ระบบที่เกี่ยวข้องทั้งหมดทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์ได้พัฒนาขึ้นเองทั้งสิ้น โดยการสนับสนุนของศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ [4]*



(ก)



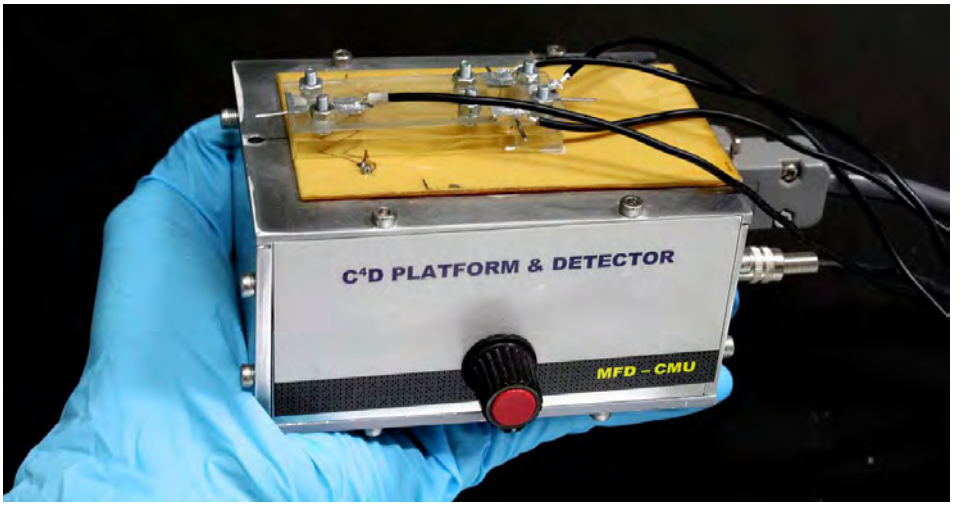


(ข)

รูปที่ 2.21 *(ก) ภาพถ่ายของ micro-droplet generator ที่พัฒนาขึ้นเอง จะเห็นได้ว่ามีขนาดกว้าง x ยาวเพียงประมาณ 1 x 1 เซนติเมตรเท่านั้น (ข) ภาพขยายถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่สาธิตหลักการทำงานของอุปกรณ์จิ๋วนี้ ที่สามารถผลิตหยดสารละลายสีแดงได้ด้วยขนาดและอัตราที่มีความแม่นยำสูง ตัวอักษร w และ d ในภาพคือความกว้างของ microchannel หลัก และแขนง ซึ่งในที่นี้มีค่า 95 และ 150 ไมโครเมตร ตามลำดับ [18]*

ระบบลดขนาดลำไอออนดังที่กล่าวมา นอกจากจะมีประโยชน์ใช้ในการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ microfluidic chip หรือ Lab-on-a-Chip แบบต่าง ๆแล้ว ยังมีประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยทางด้านชีววิทยารังสี (Radiobiology) ที่น่าสนใจอีกด้วย ทั้งนี้เพราะขนาดรูของปลายหลอดแก้วสามารถถูกทำให้มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรได้ จึงสามารถใช้ปลายหลอดแก้วที่แหลมและเล็กจิ๋วนี้นำลำอนุภาคไปเลือกยิงเฉพาะออร์แกเนลล์ที่ต้องการศึกษาได้ เช่น การเลือกระดมยิงนิวเคลียสของเซลล์ ดังเช่นที่ทำอยู่ที่ศูนย์วิจัยแห่งชาติ RIKEN ของประเทศญี่ปุ่น *[17,19]* เป็นต้น

โดยการสนับสนุนของศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ องค์ความรู้และประสบการณ์ที่เกิดขึ้นจากการศึกษาพัฒนาในเรื่องนี้ได้รับการต่อยอด โดยนำไปประดิษฐ์อุปกรณ์แยกสารเคมีแบบที่เรียกว่าไมโครชิปแคปิลลารีอิเล็กโทรฟอรีซีส (Microchip Capillary Electrophoresis หรือ MCE) (รูปที่ 2.22) ซึ่งเป็นการวางรากฐานการพัฒนาอุปกรณ์ชนิดพกพาสำหรับการวิเคราะห์สารละลายทางเคมีและทางการแพทย์ที่มีต้นทุนต่ำแบบพึ่งพาตนเอง



รูปที่ 2.22 *อุปกรณ์ MCE ต้นแบบที่ใช้เทคนิคการตรวจวัดแบบ Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection (C^4D) ที่พัฒนาขึ้นเองทุกส่วน จะเห็นได้ว่ามีขนาดกะทัดรัดมาก สามารถพกพาไปได้ทุกแห่ง [20]*

2.6 สรุป

ที่กล่าวมาเป็นตัวอย่างของการใช้งานเครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มในประเทศไทยที่ได้รับบริจาคมาจากประเทศสวีเดน ถึงแม้จะมีข้อจำกัด แต่สามารถประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ได้หลายด้านด้วยกัน กล่าวคือไม่แต่เพียงการวิเคราะห์ธาตุด้วยหลายเทคนิคที่มีลักษณะเด่นเฉพาะตัว ซึ่งเรียกรวม ๆว่า Ion Beam Analysis (IBA) หรือการดัดแปลงและการสังเคราะห์วัสดุ (Ion Beam Modification and Synthesis of Materials) เท่านั้น แต่ยังได้แสดงตัวอย่างให้เห็นว่ามีประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการย่อส่วน (Miniaturization Technology) ด้วย (การพัฒนาในประการหลังนี้โดยทั่วไปหมายรวมถึงการพัฒนา miniaturized optical sensor technology, miniaturized detection technology, miniaturized analysis system ฯลฯ) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่จะมีบทบาทมากในอนาคต ประเทศสิงคโปร์ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญ จึงได้ลงทุนจัดตั้งศูนย์วิจัยทางด้านนี้โดยเฉพาะที่ National University of Singapore ตั้งแต่เมื่อประมาณ 20 ปีที่แล้ว ชื่อว่า Centre for Ion Beam Applications (CIBA) ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่าเป็นศูนย์วิจัยที่มีอุปกรณ์และการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีโปรตอน (Proton Technology) ที่ก้าวหน้ามากที่สุดแห่งหนึ่งของโลกใน 4 ด้านด้วยกัน คือด้านจุลทรรศนศาสตร์ด้วยลำโปรตอน (Proton Microscopy) ประดิษฐกรรมสามมิติขนาดนาโน (3D Nano-fabrication) โปรตอนสเปกโทรสโกปี (Proton Spectroscopy) และ การดัดแปลงวัสดุในระดับนาโนด้วยลำอนุภาคโปรตอน (Proton Beam Modification of Materials at the Nanoscale)

อาจด้วยศักยภาพที่น่าสนใจและหลากหลายเช่นนี้กระมังที่ทำให้รัฐบาลประเทศเวียดนามยอมลงทุนซื้อเครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มเครื่องแรกของประเทศไว้ที่มหาวิทยาลัย Hanoi University of Science เมื่อปีพ.ศ. 2554 เป็นเครื่อง 1.7 MV tandem Pelletron รุ่น 5SDH-2 ที่ซื้อจากบริษัท NEC ประเทศสหรัฐอเมริกา *[21, 22, 23]* ที่เพียบพร้อมด้วยระบบสนับสนุนที่เหมาะสำหรับการค้นคว้าวิจัยโดยเฉพาะทางด้านการพัฒนาอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต้นน้ำและเทคโนโลยีสารสนเทศ ซึ่งเป็นยุทธศาสตร์พัฒนาประเทศที่สำคัญเรื่องหนึ่งของเวียดนาม ระบบสนับสนุนเหล่านั้นได้แก่ เครื่องกวาดลำไอออนเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ขนาดเท่ากับแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว และเทคนิค IBA อีก 5 ชนิดได้แก่

RBS, RBS/Channeling, PIXE, NRA และ ERD ซึ่งระบบของเทคนิคหลังนี้มีราคาแพง เมื่อรัฐบาลเวียดนามมีแนวทางที่จะพัฒนาสังคมและเศรษฐกิจฐานความรู้ (knowledge-based economy & society) ที่มุ่งมั่นเช่นนี้ ผลสัมฤทธิ์และผลกระทบของระบบเครื่องเร่งอนุภาคเพลเลตรอนดังกล่าวจึงเป็นเรื่องที่น่าเฝ้ามอง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณข้อมูลที่มีค่าจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีรศักดิ์ คำวรรณะ แห่งภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ดร. นิธิพนธ์ พุทธรักษา แห่ง Atomic Physics Laboratory ศูนย์วิจัย RIKEN ประเทศญี่ปุ่น อาจารย์ ดร. สมฤทธิ์ อุ่นอ้าย แห่งภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา และ พ.ท. ดร. พิศุทธิ์ ดารารัตน์ กองวิทยาการ กรมวิทยาศาสตร์ทหารบก กับ อาจารย์ ดร. กฤษณ์ วันอินทร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับโบราณวัตถุและข้อมูลทางโบราณคดี

บรรณานุกรม

[1] Teerasak Kamwanna, *"Developments of Ion Beam Analysis Techniques for Micro and Nanoscale Materials"*, Ph.D. Thesis, Chiang Mai University, November 2008.

[2] สมศร สิงขรัตน์ และ ธีรศักดิ์ คำวรรณะ, *"คู่มือแนะนำเทคนิค RBS, RBS/Channeling, PIXE และ IL : 4 เทคนิควิเคราะห์ธาตุด้วยลำไอออนในระดับไมโครและนาโนเมตร"*,ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พ.ศ. 2553, ISBN 978-974-672-479-1.

[3] ดัดแปลงจากรูปในเว็บไซต์ http://www.kobelco.co.jp/english/machinery/products/function/hrbs/analysis/principle/index.html.

[4] Somrit Unai, *"Focusing and Flux / Fluence Optimization of 2 MeV Proton Microbeam for Ion Beam Lithography Applications"*, Ph.D. Thesis, Chiang Mai University, April 2013.

[5] ดัดแปลงจากรูปในเว็บไซต์ https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_therapy.

[6] จากเว็บไซต์ http://www.slideshare.net/radiotherapist90/dose-rate-effect-in-brachytherapy.

[7] ดัดแปลงจากรูปในเว็บไซต์ http://web.mit.edu/aeroastro/labs/spl/pmi_research.html.

[8] Y. Liangdeng, S. Intarasiri, T. Kamwanna and S. Singkarat, *"Ion Beam Synthesis and Modification of Silicon Carbide",* Ion Beam Applications in Surface and Bulk Modification of Insulators, IAEA-TECDOC-1607 (ISBN 978-92-0-112008-3, ISSN 1011-4289), December 2008, pp. 63-92.

[9] ดัดแปลงจากรูปในเว็บไซต์ https://www.ikp.uni-koeln.de/research/pixe/.

[10] ธีรศักดิ์ คำวรรณะ, โฉม ทองเหลื่อม และ สมศร สิงขรัตน์, *"เทคนิค PIXE กับปัญหาหมอกควันที่เชียงใหม่",* วารสารฟิสิกส์ไทย ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 : กันยายน-พฤศจิกายน 2550, หน้า 10-14.

[11] จากเว็บไซต์ https://www.iaea.org/publications/magazines/bulletin/55-2.

[12] P. Dararutana, K. Won-In, S. Intarasiri, T. Kamwanna, S. Tancharakorn, N. Sirikulrat, C. A. Hauzenberger, *"X-Ray Spectrometry Study on Historical Decorative Glasses in Thailand: Lanna-Style Glass*", Advanced Materials Research, 620 (2013) 330-334.

[13] K. Won-in, T. Sako, C. Thongleurm, S. Intarasiri, U. Tippawan, T. Kamwanna, W. Pattanasiriwisana, S. Tancharakorn, N. Kamonsutthipaijit, *"Nuclear Analytical Methods on Ancient Thai Rice*", J Radioanal Nucl Chem, 297 (2013) 285-290.

[14] K. Won-in, Y. Thongkam, T. Kamwanna and P. Dararutana, *"Characterization of Prehistorical Glass Beads Excavated from Khao Sam Kaeo (Chumphon, Thailand) Using PIXE and SEM-EDS"*, J. Radioanal Nucl Chem., 294 (2012) 247-250.

[15] T. Kamwanna, U. Tippawan, S. Intarasiri and S. Singkarat, *"The Combined PIXE and IL Investigations of Gemstones",* Thai Journal of Physics, Series 6, 2010, 1-4.

[16] N. Puttaraksa, S. Gorelick, T. Sajavaara, M. Laitinen, S. Singkarat and H. J. Whitlow, *"Programmable Proximity Aperture Lithography with MeV Ion Beams",* J. Vac. Sci. Technol. B 26(5) (2008) 1732-1739.

[17] S. Unai, M. W. Rhodes, C. Sriprom, K. Singkarat, N. Pussadee, and S. Singkarat, "A Tapered Glass Microcapillary Processing System for Focusing a MeV H^+ Ion Beam", Chiang Mai Journal of Science 40(4) (2013) 789-797.

[18] N. Puttaraksa, S. Unai, M. W. Rhodes, K. Singkarat, H. J. Whitlow and S. Singkarat, *"Fabrication of a Negative PMMA Master Mold for Soft-lithography by MeV Ion Beam Lithography",* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 272 (2011)149-152.

[19] N. Puttaraksa, V. Mackel, T. Kobayashi, T. M. Kojima, M. Hamagaki, N. Imamoto and Y. Yamazaki, *"Irradiation of Fucci-expressing HeLa Cells Using a Tapered Glass Capillary Microbeam"*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 348(2015)127-130.

[20] M. Jitvisate, *"Developments of Compact System of Microchip Capillary Electrophoresis with Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection for the Detection of Caffeine in Beverages",* M.S. Thesis, Chiang Mai University, September 2013.

[21] NEC News จากเว็บไซต์ www.pelletron.com/news11.11html, Dec. 2009 – Nov. 2011.

[22] Nguyen The Nghia, Vu Thanh Mai and Bui Van Loat, *"The Model 5SDH-2 Pelletron Accelerator and Application",* VNU Journal of Science, Mathematics-Physics, Vol. 27 (2011) 180-184.

[23] Nguyen The Nghia, Nguyen Thi Lan, Le Hong Khiem, Vi Ho Phong, Bui Van Loat and Tran The Anh, "Using Resonant Nuclear Reaction $^{27}Al(p,\gamma)^{28}Si$ to Calibrate Beam Energy for Pelletron Accelerator 5SDH-2 at Hanoi University of Science", Nuclear Science and Technology, Vol. 3, No. 3 (2013) 50-55.



ภาพถ่ายตะแกรงใส่พลอยก่อนที่จะนำไปยิงด้วยลำไอออนจากเครื่องเร่งอนุภาคในรูปที่ 3.4 พลอยชุดนี้ประกอบด้วย พลอยแซฟไฟร์ดิบสีน้ำเงินอมเขียวจากแหล่งประเทศออสเตรเลีย จำนวน 29 เม็ด (มุมซ้ายบน) พลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงิน เจียระไนขึ้นรูปร่าง (โกน) แล้วจากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี จำนวน 97 เม็ด (ด้านขวามือ) พลอยแซฟไฟร์ดิบสีขาวจากแหล่งประเทศศรีลังกา จำนวน 44 เม็ด (มุมซ้ายล่าง) และ (ตรงกลาง) พลอยทับทิมสีแดงอมชมพูเจียระไนแล้วจากแหล่งสาธารณรัฐโมซัมบิก จำนวน 5 เม็ด

(ภาพถ่ายโดย ชัยพิพัฒน์ แพ่งเกษร)

๓

เทคโนโลยีลำไอออนกับการใช้งานด้านการวิเคราะห์และปรับปรุงคุณภาพพลอยธรรมชาติ

เสวต อินทรศิริ[๑] และ ดวงแข บุตรกูล[๒]

[๑] *หน่วยวิจัยเทคโนโลยีลำอนุภาคและพลาสมา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*

[๒] *สาขาอัญมณีและเครื่องประดับ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*

3.1 พลอยธรรมชาติกับการปรับปรุงคุณภาพ

ประเทศไทยมีชื่อเสียงเลื่องลือไปทั่วโลกเรื่องเป็นแหล่งพลอยทับทิมสวยมาช้านานแล้ว เช่นที่มีการล่ำลือกันถึงความงดงามของพลอย “ทับทิมสยาม (Siamese ruby)” ซึ่งเป็นพลอยคอรันดัม (corundum) สีแดงเข้มที่เคยมีแหล่งใหญ่อยู่ที่จังหวัดตราด แต่ถึงแม้พรวิเศษจากผืนแผ่นดินดังกล่าวได้เสื่อมสลายไปตามกาลเวลา พลอยทับทิมสยามกลายเป็นหาได้ยากกว่าพลอยทับทิมพม่าสีแดงสดไปเสียแล้ว แต่พรนี้ก็ดำรงอยู่นานพอที่จะเสริมส่งให้คนไทยมีความเชี่ยวชาญในเรื่องของพลอยที่ไม่เป็นสองรองใคร ทั้งในแง่ของการค้าขายและงานช่างอัญมณี ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับสามารถนำเงินตราเข้าประเทศอยู่ในลำดับต้น ๆ กล่าวคือมีมูลค่าการส่งออกสูงอยู่ใน 10 อันดับแรกของสินค้าส่งออกของไทยและมีการเติบโตอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด

ในอุตสาหกรรมนี้พลอยที่มีความสวยงามตามธรรมชาติ โดยไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพใด ๆ ซึ่งเรียกว่า “พลอยดิบ” หรือ “พลอยสด” จะเป็นที่นิยมของผู้บริโภคสูงสุด แต่ปัจจุบันพลอยสดน้ำงามหาได้ค่อนข้างยากและมีราคาแพงมาก จึงทำให้ผู้บริโภคยอมรับพลอยที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพมาแล้ว วิธีการ

ปรับปรุงคุณภาพพลอยที่ใช้กันเป็นส่วนใหญ่ในประเทศไทยก็คือการเผาหรือการหุง ซึ่งเป็นวิทยาการที่เรียกได้ว่าเป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นของไทยที่ค้นพบโดยบังเอิญ มีเรื่องเล่าว่าได้เกิดไฟไหม้บ้านพ่อค้าพลอยบริเวณตลาดน้ำพุ จังหวัดจันทบุรี ประมาณเมื่อปีพ.ศ. 2510 พลอยคุณภาพต่ำที่สีไม่สวย เนื้อทึบ ๆ ที่เก็บใส่ปี๊บไว้ กลับมีสีสวยงามขึ้นและมีเนื้อใสขึ้นหลังจากถูกไฟไหม้ การเผาพลอยจึงเป็นที่นิยมกันนับตั้งแต่นั้นมา *[1]* หลังจากนั้นอีกหลายปีจึงได้มีฝรั่งเขียนออกมาเป็นตำรา *[2, 3]* พลอยที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแบบนี้ ซึ่งอาศัยประสบการณ์ของชาวบ้านล้วน ๆ เรียกกันว่า “พลอยเผาเก่า” สิ่งนี้เป็นเรื่องของการใช้ “เทคโนโลยีชาวบ้าน” เพิ่มมูลค่า (value added) ให้กับทรัพยากรธรรมชาติที่ชัดเจนมากเรื่องหนึ่ง เพราะสามารถทำให้พลอยธรรมชาติที่เป็นเพียงแค่พลอยราคาถูก ๆ ที่ก่อนหน้านี้ยังไม่รู้ว่าจะเอาไปทำอะไรดี มีพ่อค้าพลอยบางรายเอาไปถมที่ด้วยซ้ำ กลับมีราคาแพงขึ้นมาได้ แม้จะมีราคาไม่เท่ากับพลอยสด แต่ก็ได้ราคาที่ดีขึ้นหลายร้อยเท่า



รูปที่ 3.1 *ธุรกิจค้าพลอยที่จังหวัดจันทบุรี [4, 5]*

แต่เมื่อทรัพย์ในดินที่มีค่านี้ได้ร่อยหรอลง เกิดความจำเป็นต้องนำเข้าพลอยสดจากต่างประเทศ ต้นทุนการผลิตจึงสูงขึ้นตามอุปสงค์ของผู้บริโภค แต่การนำพลอยธรรมชาติคุณภาพต่ำมาเพิ่มคุณภาพก็มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น พลอยที่มีราคาถูก คุณภาพต่ำ ทึบแสง มีมลทินมาก แต่มีขนาดใหญ่ ไม่สามารถปรับปรุงโดยการใช้กลไกทางความร้อนเพียงอย่างเดียวได้ เพราะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น แหล่งกำเนิด โครงสร้างผลึก ชนิดของมลทิน ปริมาณธาตุเจือ (trace element) ฯลฯ จึงเกิดมีการเผาแบบที่ผิดไปจากธรรมเนียมดั้งเดิมดังที่กล่าวมาตอนต้น กล่าวคือได้มีการพัฒนารายละเอียดของเทคนิคการเผาพลอยขึ้นเรื่อย ๆ เช่นการเผาพลอย

ทับทิมที่มีการใส่สารบอแรกซ์ (borax) และซิลิกา (silica) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า “น้ำยา” เพื่อไปประสานรอยร้าวของพลอย โดยสารเคมีพวกนี้จะเข้าไปประสานรอยแตกในเนื้อพลอยได้ในระดับหนึ่ง จะยังคงมองเห็นรอยแตกได้บ้าง นอกจากนั้น ยังมีการเผาแบบซ่านสี นั่นคือ การเผาร่วมกับสารเคมีที่ความร้อนสูง สารเคมีซึมเข้าไปในเนื้อพลอยได้อย่างช้า ๆ และจะเคลือบเฉพาะบริเวณผิวพลอยเท่านั้น เมื่อมองดูภายนอก จะเห็นมีสีสันอันสวยงาม แต่เนื้อพลอยที่แท้จริงยังคงมีสีที่ไม่สวย จนในภายหลังมีคนค้นพบว่า การผสมเบริลเลียม (beryllium) เข้าไปในสารเคมีเดิม ทำให้สารเคมีเข้าไปในเนื้อพลอยได้มากขึ้น พลอยมีการเปลี่ยนแปลงทั่วทั้งก้อน จนกระทั่งล่าสุดมีการผสมแก้วตะกั่ว (lead glass) ลงในสูตรสารเคมี เพื่อให้แก้วตะกั่วเชื่อมประสานรอยแตกของพลอย คนในวงการเรียกพลอยที่ผ่านกระบวนการในลักษณะนี้ว่า “พลอยเผาใหม่” ซึ่งความพยายามเหล่านี้โดยหลัก ๆ ก็เพื่อหาวิธีที่จะทำให้พลอยสวยขึ้น ราคาจะได้ดีขึ้น



รูปที่ 3.2 *พลอยเพิ่งขึ้นจากเตาเผา [6]*

การเผาพลอยจึงเป็นการปรับปรุงคุณภาพพลอยอย่างหนึ่ง สามารถทำได้ทั้งในพลอยเนื้ออ่อนและพลอยเนื้อแข็ง การเผาทำให้พลอยมีสีสวยขึ้น เช่น พลอยมีสีเข้มเกินไป ก็เผาลดสีลง หรือภาษาคนเผาพลอยจะเรียกว่า “เผาถอยสี” หากพลอยสีอ่อนไปก็สามารถเผาให้สีเข้มขึ้น เรียกว่า “เผาเพิ่มสี” การเผาให้พลอยใสขึ้นก็สามารถทำได้เช่นกัน ซึ่งไม่ใช่พลอยทุกเม็ดที่เผาแล้วสวยขึ้น พลอยแต่ละชนิดและพลอยจากแต่ละแหล่งจะใช้กรรมวิธีแตกต่างกัน ผู้เผาพลอยจึงต้องมีความชำนาญในการดูชนิดของมลทิน หรือ คนเผาพลอยเรียกว่า “หม่า” ว่าควรเผาแบบใดจึงจะเหมาะสม

พลอยเผาเก่า ยังรวมถึงพลอยทับทิมที่เผารวมกับแก้ว ที่เรียกกันว่า “การอุดแก้ว (glass filling)” ด้วย แม้ว่าวิธีนี้จะทนทานต่อสารเคมีได้ดี แต่จะทำปฏิกิริยากับกรดกัดแก้ว (HF) ได้ง่าย ส่วนพลอยเผาใหม่ ในตลาดจะหมายถึงพลอยสองประเภท คือ ประเภทที่ 1 เป็นการเผาโดยใส่สารเบริลเลียม ซึ่งมักทำกันในพลอยแซฟไฟร์ (sapphire) เช่น บุษราคัม เขียวส่อง แซฟไฟร์สีส้มอมชมพูหรือพัดพารัดชา (padparadscha) พลอยทับทิมและแซฟไฟร์จากตำบลซองเจีย (Songea) ในประเทศแทนซาเนีย เป็นต้น สารเบริลเลียมเป็นสารไม่มีสี แต่เบริลเลียมจะไปทำปฏิกิริยากับธาตุที่มีอยู่ภายในพลอย ทำให้พลอยสีสวยขึ้นและสีก็คงทนถาวร ส่วนประเภทที่ 2 เป็นการเผาแบบใส่แก้วตะกั่วลงไปในกระบวนการเผาพลอย เนื่องจากปัจจุบันนี้ พลอยทับทิมน้ำงามขนาดใหญ่สีแดงสดหาได้ยากมาก พลอยขนาดใหญ่จำนวนมากที่พบ มักจะมีตำหนิที่เป็นรอยแตก การเพิ่มมูลค่าด้วยวิธีการเผาแบบดั้งเดิมจะทำให้พลอยแตกเสียหายมากขึ้น ไม่สามารถเจียระไนให้เป็นรูปเหลี่ยมหรือหลังเบี้ยได้ เพราะสามารถมองเห็นรอยแตกค่อนข้างชัดเจน อีกทั้งสีค่อนข้างซีดจาง หากมีสีเข้มจะมีมลทินสีดำเป็นหย่อม ๆ สีโดยรวมไม่สวย ก็จะถูกทิ้งเป็น “กากพลอย” หรือไม่ก็เก็บไว้ขายในราคาถูก ๆ พลอยที่นำมาเผาวิธีนี้มักจะเป็นพลอยทับทิมที่มีรอยแตกร้าวมาก การใส่แก้วตะกั่วลงไปก็เพื่อประสานรอยแตกให้เรียบเนียนขึ้น ซึ่งต่างจากการเผาเก่าที่ไม่ได้มีการผสมตะกั่วลงไป บางครั้งอาจมีการใส่โลหะหนักอื่น ๆ เช่น บิสมัท (bismuth) ลงไปด้วย

การเผาแบบผสมแก้วตะกั่วนี้พบมากในพลอยทับทิมจากทวีปแอฟริกา โดยการเผาแบบนี้พัฒนามาจากการเผาแบบเก่า แต่การเผาแบบเก่าไม่สามารถทำให้รอยแตกที่มีอยู่ในเนื้อพลอยหายไปได้ จึงมีการเพิ่มสารประกอบตะกั่วเข้าไปในสารเคมีเดิม เพื่อทำให้เนื้อสารเคมีเข้าไปอุดในรอยแตกได้ลึกขึ้น เพราะตะกั่วจะช่วยให้แก้วไหลเข้าไปในรอยแตกเล็ก ๆได้ และได้ความใสใกล้เคียงหรือมากกว่าเนื้อพลอย ทำให้มองไม่เห็นรอยแตกในเนื้อพลอย ทำให้พลอยมีความใสมากขึ้น แต่สารเคมีที่นำมาอุดนี้ ก็มีความทนทานต่อสารเคมีน้อยลงเช่นกัน ทำให้เวลาใช้ไปนาน ๆ พลอยมีความหมองเกิดขึ้น หรือเกิดด้านที่ผิวได้ง่าย และที่สำคัญพลอยที่นำมาเผาวิธีนี้มักจะเป็นพลอยที่มีรอยแตกจำนวนมาก จนบางครั้งเมื่อมองภายใต้กล้องจุลทรรศน์จะเห็นเนื้อพลอยกับเนื้อแก้วที่นำมาอุดมีอยู่ประมาณครึ่งต่อครึ่งเลยทีเดียว มีการ

ต่อต้านการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยวิธีการแบบนี้ ที่เป็นสิ่งต้องห้ามตามข้อบัญญัติของสถาบันอัญมณีศาสตร์ที่มีความน่าเชื่อถือสูงสุดในระดับสากล เช่น Gemological Institute of America หรือ GIA ด้วยเกรงว่า จะมีอันตรายจากพิษของสารตะกั่วทั้งต่อผู้บริโภคและผู้ที่เกี่ยวข้อง (ตัวผู้เผาใหม่ ช่างเจียระไน ช่างฝัง) แต่น่าเป็นห่วงว่าพลอยแบบนี้พบมากในตลาดพลอยประเทศไทย ซึ่งมีผลกระทบทำให้พลอยมีราคาลดลงมากเพราะผู้บริโภคเกิดการระแวง

นอกเหนือจากเทคโนโลยีชาวบ้านดังที่กล่าวมาแล้ว ยังมีการใช้เทคนิคขั้นสูงในการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีที่เริ่มให้บริการตั้งแต่เมื่อปีพ.ศ. 2554 นั่นคือวิธีปรับปรุงคุณภาพสีของอัญมณีด้วยลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงและความเข้มสูง ที่ผลิตจากเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนบีมพลังงานสูง ราคาประมาณสองร้อยล้านบาท ที่ศูนย์ฉายรังสีอัญมณี ของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อ. องครักษ์ จ. นครนายก *[7]* อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ใช้ได้ผลดีกับพลอยเนื้ออ่อน เช่น โทแพซ เนื่องจากลำอนุภาคอิเล็กตรอน หรือ แม้กระทั่งการฉายรังสีเป็นการทำให้โครงสร้างพลอยชำรุด เกิดศูนย์กลางสี (color center) ในพลอย สีพลอยจึงเปลี่ยนไป แต่มักใช้ไม่ได้ผลกับพลอยประเภททับทิม หรือ ไพลิน ที่มีโครงสร้างที่เสถียรกว่า

แต่ก่อนหน้านั้น คือประมาณปีพ.ศ. 2539 ได้มีการริเริ่มใช้ลำไอออนในการปรับปรุงคุณภาพพลอยธรรมชาติ โดยเป็นส่วนหนึ่งของโครงการการปรับปรุงคุณภาพวัสดุด้วยลำไอออน ซึ่งได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ในฐานะเป็นศูนย์วิจัยในเครือข่าย ที่มีศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง เป็นหัวหน้าโครงการ ใช้เครื่องเร่งอนุภาคที่สร้างขึ้นเองโดยอาจารย์ ดร. ดุษฎี สุวรรณขจรและทีมงานของศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (ดูรูปที่ 4.1 ในบทที่ 4) การทดลองในระยะเริ่มต้น ส่วนใหญ่เป็นไปแบบลองผิดลองถูก ทำให้ต้องเสียเวลาไปไม่น้อยกับข้อผิดพลาดต่าง ๆ เนื่องจากพลอยธรรมชาติมีข้อจำกัดและปัจจัยที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก จนเมื่อประมาณปีพ.ศ. 2543 (ถึงปัจจุบัน) ได้มีคณะทำงานของ สาขาวิชาอัญมณีและเครื่องประดับ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เข้ามาร่วมจัดการทดลองให้เป็นระบบ ทำให้ได้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพ สามารถเพิ่มมูลค่าพลอยได้หลายเท่า ผลการทดลองสามารถทำซ้ำได้

ส่งผลให้หาข้อสรุปได้ในที่สุด *[8]* ทั้งนี้ได้มีการจดสิทธิบัตรกระบวนการเพิ่มมูลค่าพลอยด้วยเทคนิคลำไอออนนี้ไว้แล้ว เพื่อเป็นสมบัติของชาติไทยต่อไป

ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง* ร่วมกับภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป สาขาอัญมณีและเครื่องประดับ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และหน่วยวิจัยเทคโนโลยีลำอนุภาคและพลาสมา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ทำการทดลองอย่างต่อเนื่องในการใช้ลำไอออนปรับปรุงคุณภาพพลอยตระกูลคอรันดัม ซึ่งนอกจากจะสนใจในแง่วิชาการที่เกี่ยวกับอันตรกิริยาระหว่างไอออนที่มีพลังงานจลน์กับระบบผลึกที่มีความซับซ้อนสูงแล้ว ยังมุ่งหวังเพื่อประโยชน์เชิงพาณิชย์ด้วย ซึ่งถือเป็นแห่งแรกของโลก จนได้รับการกล่าวถึงในรายงานของสถาบัน GIA ประเทศสหรัฐอเมริกาว่าเป็นเทคนิคใหม่ที่น่าสนใจ *[9]*

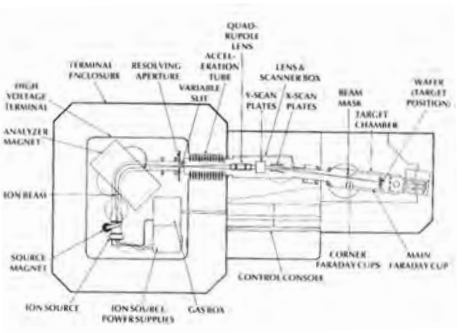
3.2 เครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย

เครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย ทั้งในแง่ของการศึกษาวิจัยและการให้บริการ ปัจจุบันมีอยู่เพียง 2 เครื่องเท่านั้น ซึ่งติดตั้งอยู่ที่อาคารเทคโนโลยีไอออนบีม-1 ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค เครื่องแรกมีลักษณะดังแสดงใน รูปที่ 3.3 มีชื่อเรียกเฉพาะว่า “เครื่องแวเรียนไอออนอิมพลานเตอร์ (Varian Ion Implanter)” เพราะผลิตโดยบริษัท Varian Semiconductor Equipment ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีจุดมุ่งหมายในการนำไปใช้งานในการดัดแปลง (modification) สมบัติของวัสดุผ่านทางกระบวนการ “การยิงฝังไอออน (Ion Implantation)” ด้วยลำไอออนหลายชนิด ที่ถูกเร่งให้มีพลังงานจลน์สูงขึ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 25 – 200 กิโลโวลต์ เช่นใช้ในการวิจัยและ/หรือผลิตอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เหมือนดังที่เครื่องเร่งอนุภาคนี้เคยถูกใช้งานมาก่อนที่บริษัท RadioMed ในประเทศสหรัฐอเมริกา แต่ต่อมา จากการติดต่อประสานงานของศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง ทางบริษัทได้ตกลงที่จะขายในราคาถูกให้กับศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค โดยมีทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) สนับสนุนค่าใช้จ่ายทั้งหมด ทีมนักวิจัยและช่าง

** ในปีพ.ศ. 2550 ได้เปลี่ยนชื่อเป็นศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค*



(ก)



(ข)





(ค)

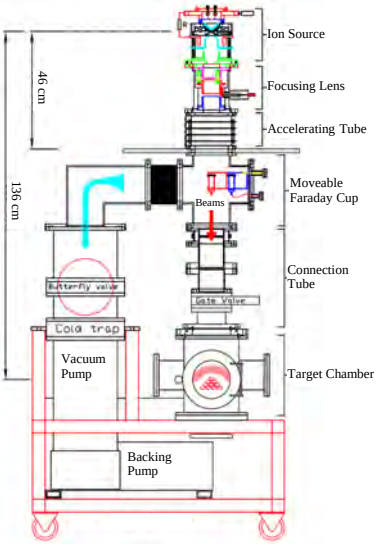
รูปที่ 3.3 *(ก) ภาพถ่ายเครื่องแวเรียนไอออนอิมพลานเตอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในห้องปรับอากาศที่มีขนาด กว้าง x ยาว x สูง = 4 x 6 x 2.5 เมตร (ข) แผนภาพแสดงให้เห็นระบบการทำงานของเครื่องที่แหล่งกำเนิดไอออน (ion source) สามารถผลิตไอออนได้หลายชนิดจากสารตั้งต้นทั้งที่เป็นก๊าซและวัตถุที่เป็นผง ลำไอออนที่ถูกผลิตออกมาในแนวนอนจะวิ่งผ่านแม่เหล็กคัดกรอง (analyzer magnet) แล้ววิ่งต่อไปเข้าสู่ท่อเร่งอนุภาค (acceleration tube) ที่สามารถปรับเปลี่ยนพลังงานของไอออนได้ด้วยศักย์ไฟฟ้าในช่วง 25-200 กิโลโวลต์ ต่อจากนั้นลำไอออนจะวิ่งผ่านระบบกวาดลำไอออน (x-scan และ y-scan) ทำให้พื้นที่ที่ถูกยิงด้วยไอออนตรงตำแหน่งเป้า (target position) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. และมีความเข้มไอออนกระสุนสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่ [10, 11, 12] และ (ค) รูปซ้ายแสดงวิธีการจับยึดเม็ดพลอยต่อการยิงไอออน 1 ครั้ง พลอยแต่ละเม็ดติดอยู่กับฐานรองด้วยเทปสองหน้า ส่วนรูปขวามือแสดงลักษณะการติดตั้งฐานรองบนแท่นเป้าภายในห้องเป้า (target chamber) ที่ถูกพับตั้งขึ้นเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการยิงด้วยลำไอออน*

เทคนิคของศูนย์วิจัยฯ ได้ประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ถูกส่งมาถึงจังหวัดเชียงใหม่กันเอง และสามารถทำได้สำเร็จสมบูรณ์ในปีพ.ศ. 2545 การปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องนี้ในเวลาต่อมาได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากแหล่งทุนหลายแห่ง เช่น ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เป็นต้น ภารกิจหลักของเครื่องเร่งอนุภาคนี้ในตอนต้นก็คือการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงผิวของโลหะ เช่น ความแข็งและความลื่นด้วยกระบวนการ Nitrogen Ion Implantation *[13]* และการสังเคราะห์ชั้น SiC ในแผ่น

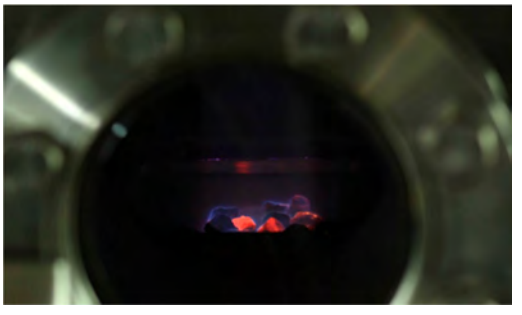
ซิลิกอนเวเฟอร์ (ดูบทที่ 2) ต่อมาได้ถูกใช้มากในโครงการการชักนำการกลายพันธุ์ของพืชด้วยลำไอออนไนโตรเจน (ดูบทที่ 4) และการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยลำไอออนไนโตรเจน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.4 *(ก) ภาพถ่ายเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ต้นแบบสำหรับการปรับปรุงคุณภาพพลอยในเชิงพาณิชย์ที่สร้างเสร็จแล้ว (ข) แผนภาพแสดงโครงสร้างภายในของเครื่องเร่งอนุภาคนี้ [14, 15] จะเห็นได้ว่าใช้ระบบปั๊มสุญญากาศ (diffusion pump กับ rotary pump) เพียงชุดเดียวเท่านั้น โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด จากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ส่วนงบประมาณหลักในการสร้างตัวเครื่องเร่งอนุภาคได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และได้รับงบประมาณเสริมจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ และ (ค) ภาพถ่ายเม็ดพลอยชนิดต่าง ๆ บนตะแกรงภายในห้องเป้า ขณะกำลังถูกระดมยิงด้วยไอออนที่วิ่งเป็นลำลงมาจากด้านบน พลอยแต่ละชนิดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยลำไอออนจะเปล่งแสง (luminescence) ให้เห็นสีไม่เหมือนกันได้ ภาพนี้ถ่ายจากด้านนอกผ่านแผ่นแก้วใสของประตูสำหรับนำพลอยเข้า-ออกของห้องเป้า*

เครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยเครื่องที่สอง ได้ถูกสร้างขึ้นประมาณในปีพ.ศ. 2552 แล้วเสร็จในปีพ.ศ. 2555 โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยลำไอออนแบบครบวงจร กล่าวคือพัฒนาขึ้นทั้งด้านเทคนิค องค์ความรู้และอุปกรณ์หลักภายในประเทศ ก่อนหน้านี้เสียงสะท้อนเชิงลบที่ได้รับจากพ่อค้าพลอยที่เคยมาใช้บริการกับเครื่องแวเรียนไอออนอิมพลานเตอร์ มักจะออกมาในทำนองที่ว่าตัวเครื่องมีขนาดใหญ่ เปลืองที่และดูแลยาก มีความซับซ้อนสูง ใช้งานลำบาก ต้องใช้ช่างที่มีความรู้หรือความเชี่ยวชาญสูง ซึ่งมีน้อยมากในประเทศ และต้องซื้อจากต่างประเทศ มีราคาแพง (ราคาในปัจจุบันไม่ต่ำกว่า 2 ล้านยูโร) ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาคจึงได้สร้างเครื่องเร่งอนุภาคนี้ขึ้น โดยตั้งใจแก้ไขข้อจำกัดทั้งปวงดังที่กล่าวมา จึงเกิดเป็นเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์สำหรับปรับปรุงคุณภาพพลอยโดยเฉพาะ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

เครื่องเร่งอนุภาคนี้มีขนาดกะทัดรัด สามารถติดตั้งอยู่ในห้องที่มีขนาดเพียง 3 x 3.7 x 3 เมตรได้ ตัวเครื่องตั้งอยู่ในแนวดิ่ง แหล่งกำเนิดไอออนเป็นชนิด duoplasmatron ความเข้มไอออนสูง อยู่ที่ปลายบนสุด ลำไอออนวิ่งดิ่งลงมาผ่านท่อเร่งอนุภาคที่มีความยาวเพียง 14.5 ซม. ที่สามารถเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับไอออนด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 90 กิโลโวลต์ ปลายล่างสุดเป็นห้องเป้าที่มีตะแกรงใส่พลอยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 x 7.5 ซม.อยู่ภายใน ตัวตะแกรงอยู่ในแนวระนาบจึงมีความสะดวกในการจัดวางเม็ดพลอย ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดไอออนถึงตำแหน่งตะแกรงใส่พลอยมีความยาวเพียง 70 ซม. เท่านั้น ด้วยการที่เครื่องถูกลดขนาดลงมากเช่นนี้ทำให้สามารถลดชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆลงได้มากเช่นกัน ได้แก่ ระบบปั๊มสุญญากาศ แม่เหล็กกรองลำอนุภาค ระบบกวาดลำอนุภาค เป็นต้น ซึ่งล้วนมีราคาสูงทั้งสิ้น เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ขนาดกะทัดรัดนี้จึงมีราคาประเมินขั้นต้นเพียงประมาณ 5 ล้านบาทเท่านั้น แต่ที่สำคัญไม่ยิ่งหย่อนกว่ากันก็คือสามารถสร้างได้เองในประเทศไทย

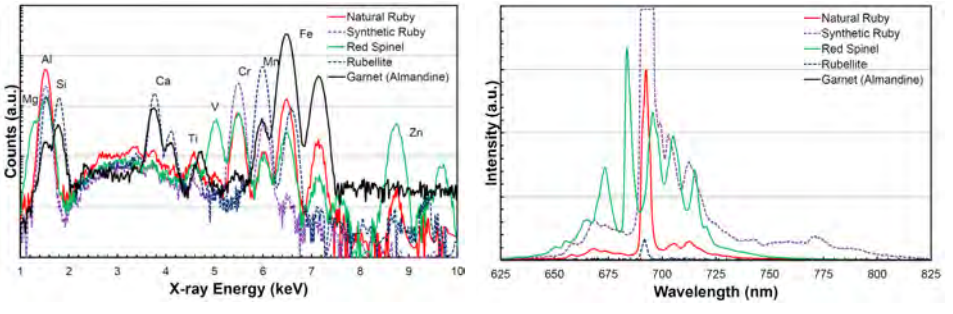
ปัจจุบันเครื่องเร่งอนุภาคนี้ ถูกใช้งานทั้งในการวิจัยทดลองและในการให้บริการการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยลำไอออนไนโตรเจนเช่นเดียวกับเครื่องแวเรียนไอออนอิมพลานเตอร์ นอกจากนั้นยังถูกใช้ในการวิจัยการปรับปรุงพันธุ์ข้าวด้วยลำไอออนด้วย (ดูบทที่ 4)

3.3 การคัดแยกพลอยก่อนการปรับปรุง

พลอยทับทิมเป็นพลอยสีแดงเนื้อแข็งตระกูลคอรันดัม เป็นอัญมณีที่มีความต้องการของตลาดสูงและโดยเฉลี่ยมีราคาสูงที่สุดเมื่อเทียบกับพลอยสีอื่น ๆ คณะทำงานจึงได้มุ่งเน้นการศึกษาวิจัยไปที่พลอยทับทิมเป็นประเดิม พลอยธรรมชาติที่ใช้เป็นตัวอย่างได้เลือกซื้อหามาจากตลาดพลอยในเมืองไทย แต่คณะทำงานได้พบปัญหาสำคัญ 3 ประการด้วยกัน กล่าวคือ (ก) การปะปนของพลอยชนิดอื่นในตัวอย่างที่ได้มา (ข) ความไม่ชัดเจนในเรื่องแหล่งกำเนิดของพลอย และ (ค) การปนเปื้อนของตะกั่วในพลอยแดงในปริมาณที่สูงผิดธรรมชาติ จึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อคัดแยกพลอยทั้งหลายให้ชัดเจนเสียก่อน

3.3.1. การคัดแยกพลอยอื่นที่คล้ายพลอยทับทิม

มีพลอยหลายชนิดที่เมื่อดูลักษณะภายนอกแล้วคล้ายกับพลอยทับทิมมาก พ่อค้าพลอยบางรายจะแอบนำมาขายปะปนกับพลอยทับทิม ลูกค้าที่ไม่ชำนาญจึงมักถูกหลอกอยู่บ่อยครั้ง ในที่นี้จะนำเสนอการตรวจสอบพลอยที่มีลักษณะคล้ายพลอยทับทิม 4 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ พลอยทับทิมสังเคราะห์ พลอยสปิเนล (spinel) สีแดง พลอยรูเบลไลท์ (rubellite) และพลอยการ์เน็ตอัลมานดีน (garnet almandine) เปรียบเทียบกับพลอยทับทิมธรรมชาติ *[16]*



(ก) (ข)

รูปที่ 3.5 *(ก) สเปกตรัม PIXE และ (ข) สเปกตรัม IL ของพลอยทับทิมสด และพลอยคล้ายทับทิมชนิดต่าง ๆ ได้แก่ พลอยทับทิมสังเคราะห์ พลอยสปิเนลสีแดง พลอยรูเบลไลท์ และพลอยการ์เน็ตอัลมานดีน*

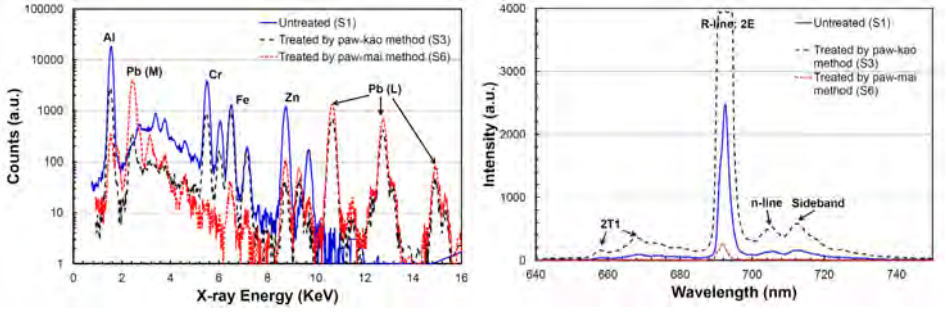
รูปที่ 3.5 (ก) แสดงสเปกตรัม PIXE (ดูบทที่ 2) ของพลอยหลากหลายชนิด เหล่านั้น จะเห็นว่าในสเปกตรัมของพลอยแต่ละชนิดจะประกอบด้วยยอด (peak) หลัก ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของพลอยชนิดนั้น และยอดรอง ซึ่งเป็นยอดของธาตุเจือ (trace elements) ตัวอย่างเช่น พลอยทับทิมธรรมชาติ ที่มีโครงสร้างผลึกหลักเป็น Al_2O_3 จึงมีอลูมิเนียม (Al) เป็นธาตุหลัก มีโครเมียม (Cr) และเหล็ก (Fe) เป็นธาตุเจือที่ให้สี พลอยสปิเนลสีแดง มีโครงสร้างผลึกหลักเป็น $MgAl_2O_4$ จึงมี Al และแมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุหลัก มี Cr และ Fe เป็นธาตุเจือที่ให้สีเหมือนพลอยทับทิม พลอยรูเบลไลท์ หรือ ทัวร์มาลีน (tourmaline) สีแดง $(Na(Mg,Fe,Mn,Li,Al)_3Al_6(BO_3)Si_6O_{18}(OH,F)_4)$ มี Al และซิลิกอน (Si) เป็นธาตุหลัก และแมงกานีส (Mn) เป็นธาตุเจือที่ให้สี และพลอยการ์เน็ตอัลมานดีน $(Fe_3Al_2(SiO_4)_3)$ มี Al, Fe และ Si เป็นธาตุหลักเป็นต้น ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุหลักและธาตุเจือในพลอย ก็จะทราบได้ว่าพลอยนั้นเป็นพลอยชนิดใด ในกรณีของพลอยทับทิมธรรมชาติและพลอยทับทิมสังเคราะห์ ความแตกต่างจะอยู่ที่จำนวนชนิดของธาตุเจือและปริมาณของธาตุเจือ โดยที่พลอยทับทิมธรรมชาติจะมีจำนวนชนิดธาตุเจือมากกว่าพลอยทับทิมสังเคราะห์ ส่วนพลอยทับทิมสังเคราะห์จะมีปริมาณ Cr ที่สูงกว่าพลอยทับทิมธรรมชาติ แต่มีปริมาณเหล็กที่ต่ำกว่าพลอยทับทิมธรรมชาติอย่างเห็นได้ชัด

รูปที่ 3.5 (ข) แสดงสเปกตรัม IL (ดูบทที่ 2) ของพลอยทับทิมธรรมชาติ และพลอยคล้ายทับทิม ซึ่งจะเห็นว่า สเปกตรัมการเปล่งแสงของพลอยทับทิม แตกต่างจากสเปกตรัมการเปล่งแสงของพลอยชนิดอื่นอย่างเด่นชัด โดยมียอดหลักอยู่ที่ความยาวคลื่น 694 นาโนเมตร (nm) และมียอดรองขนาบทั้งซ้ายและขวาของยอดหลัก ซึ่งก็คือ R-line ของ Cr^{3+} ที่เข้าไปแทนที่ Al^{3+} ในกรณีของพลอยทับทิมสังเคราะห์จะมีความเข้มของการเปล่งแสงที่สูงกว่าพลอยทับทิมธรรมชาติมาก เนื่องจาก พลอยทับทิมสังเคราะห์มีการเจือปนของ Cr ในปริมาณที่สูงกว่าพลอยทับทิมธรรมชาติ และมีปริมาณของ Fe ที่ต่ำกว่าในพลอยทับทิมธรรมชาติ สำหรับพลอยสปิเนลสีแดง แม้ว่าการเปล่งแสงจะเกิดจากการที่ Cr^{3+} เข้าไปแทนที่ Al^{3+} เหมือนพลอยทับทิมก็ตาม แต่เนื่องจากการมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นองค์ประกอบหลักอีกส่วนหนึ่ง ทำให้ระดับพลังงานของการย้ายตำแหน่ง (transition energy level) ของ Cr^{3+} แตกต่างจากพลอยทับทิม โดยมีจำนวนระดับชั้นที่มากกว่าในพลอยทับทิม ดังนั้นสเปกตรัมการเปล่งแสงจึงมีจำนวนยอดมากกว่าในพลอยทับทิม ในกรณีของพลอย

รูเบลไลท์ สเปกตรัมการเปล่งแสงจะต่ำกว่าพลอยทับทิมมาก และยอดจะอยู่ที่ความยาวคลื่น 692 nm ซึ่งเกิดจากการที่ Mn^{3+} เข้าไปแทนที่ Al^{3+} เป็นที่น่าสังเกตว่าพลอยการ์เน็ตอัลมานดีนไม่มีการเปล่งแสง เมื่อถูกกระตุ้นด้วยลำไอออน เนื่องจากพลอยชนิดนี้เป็นชนิดที่เรียกว่า idiochromatic ที่การให้สีเกิดจากโครงสร้างหลักของตัวพลอยเอง ซึ่งแตกต่างจากพลอยชนิดอื่น ๆที่ได้ทำการศึกษาวิจัยในการทดลองนี้ ที่เป็นชนิด allochromatic ที่การให้สีเกิดจากธาตุเจือที่อยู่ภายในโครงสร้างหลักของพลอย

ดังนั้นด้วยการผสานพลังกันระหว่างเทคนิค PIXE และ IL ทำให้สามารถคัดเลือกพลอยทับทิมสดจากธรรมชาติออกมาจากพลอยสีแดงชนิดอื่น ๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3.2 การคัดแยกพลอยทับทิมเผาใหม่ออกจากพลอยทับทิมธรรมชาติและพลอยทับทิมเผาเก่า



(ก) *(ข)*

รูปที่ 3.6 *(ก) สเปกตรัม PIXE และ (ข) สเปกตรัม IL ของพลอยทับทิมตัวอย่างจาก 3 กลุ่ม คือ พลอยทับทิมธรรมชาติ (untreated) พลอยทับทิมเผาเก่า (paw-kao) และพลอยทับทิมเผาใหม่ (paw-mai)*

รูปที่ 3.6 (ก) แสดงสเปกตรัม PIXE ของพลอยทับทิมตัวอย่าง 3 เม็ดที่มีประวัติที่มาต่างกัน คือ พลอยทับทิมสด พลอยทับทิมเผาเก่า และพลอยทับทิมเผาใหม่ จะเห็นว่าในสเปกตรัมของพลอยทับทิมสด จะประกอบด้วยยอดของ Al ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของพลอยทับทิม และยอดของธาตุที่ให้สีของพลอยทับทิม คือ Cr และ Fe นอกจากนั้น ยังมียอดของธาตุเจืออื่น ๆ ซึ่งเจือปนตามธรรมชาติในพลอยทับทิม ในปริมาณมากน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของพลอย ธาตุเหล่านี้ได้แก่

วาเนเดียม (V) นิกเกิล (Ni) สังกะสี (Zn) และ แกลเลียม (Ga) เป็นต้น โดยที่ไม่มียอดของตะกั่ว (Pb) จึงยืนยันได้ว่าไม่มีตะกั่วอยู่ในพลอยทับทิมสดจากธรรมชาติแต่อย่างใด ในกรณีของทับทิมเผาเก่า จะเห็นยอดของตะกั่วจากทั้งชั้นแอลและชั้นเอ็ม (Pb L, Pb M) ในสเปกตรัม ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยแล้ว พบว่ามีปริมาณตะกั่วประมาณ 1-5% คาดว่าตะกั่วเหล่านี้คงมาพร้อมกับซิลิกา ซึ่งผู้เผาพลอยอาจจะเลือกมาจากแหล่งที่มีการเจือปนของตะกั่วโดยไม่รู้มาก่อน ในส่วนของพลอยทับทิมเผาใหม่ จะพบว่ามียอดของตะกั่วเพิ่มสูงขึ้นมามาก จนแทบจะบดบังยอดที่มาจากธาตุเจืออื่น ๆโดยสิ้นเชิง จึงนับได้ว่า ตะกั่วเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของพลอยทับทิมชนิดนี้ไปแล้ว และเมื่อดูลักษณะภายนอกก็เปลี่ยนแปลงไปจนมีลักษณะคล้ายแก้ว ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยแล้ว พบว่ามีปริมาณตะกั่วสูงถึง 5-80% เลยทีเดียว

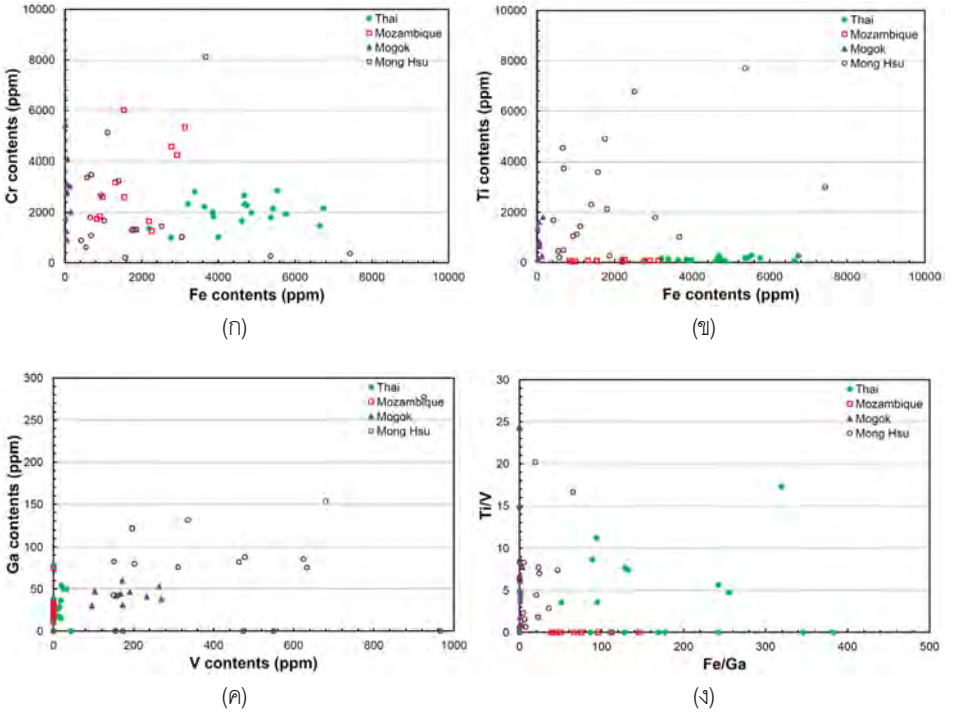
รูปที่ 3.6 (ข) แสดงสเปกตรัม IL ของพลอยทับทิม ซึ่งจะเปล่งแสงในย่านสีแดงที่บริเวณความยาวคลื่นประมาณ 600 – 800 nm โดยมียอดหลักอยู่ที่ความยาวคลื่น 694 nm และมีแบน (band) เล็ก ๆ อยู่ทั้งฝั่งซ้ายและขวาของยอดหลัก ซึ่งทั้งหมดนี้เกิดจากการเปล่งแสงของ Cr^{3+} ที่เข้าไปแทนที่ Al^{3+} ในโครงสร้างของพลอยทับทิม ดังนั้น ความเข้มของการเปล่งแสงจึงขึ้นกับปริมาณของ Cr ในพลอย ในกรณีของพลอยเผาเก่า ปริมาณของตะกั่วมีไม่มาก ความเข้มของการเปล่งแสงจึงไม่ต่างกับพลอยสดมากนัก (ในกรณีของงานวิจัยนี้ ตัวอย่างพลอยสด ที่นำมาวิเคราะห์ เป็นพลอยคุณภาพต่ำที่มีสีสันไม่สวยงาม และมีปริมาณของ Cr ค่อนข้างต่ำ ความเข้มของการเปล่งแสงจึงต่ำกว่าพลอยเผาเก่า) แต่ในกรณีของพลอยเผาใหม่ มีตะกั่วเจือปนในปริมาณที่สูงมาก ทำให้ปริมาณ Cr สัมพัทธ์ลดลง จึงทำให้เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IL แล้วแทบจะไม่เห็นการเปล่งแสงเลย

3.3.3 การคัดแยกพลอยทับทิมตามแหล่งกำเนิด

ปริมาณธาตุร่องรอยหลัก 5 ธาตุ ในพลอยทับทิมจากแหล่งต่าง ๆ ที่ตรวจวัดได้โดยเทคนิค PIXE ได้รวบรวมไว้ดังแสดงในตารางที่ 3.1 การจัดหมวดหมู่พลอยทับทิม ทำได้โดยการนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณธาตุเจือ (trace elements) ที่สำคัญในพลอยทับทิมแต่ละแหล่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.1 *แสดงค่าเฉลี่ยของธาตุเจือหลัก 5 ธาตุ ที่พบในพลอยทับทิมธรรมชาติแต่ละแหล่ง คิดเป็นหน่วยในล้านส่วน (part per million หรือ ppm)*

แหล่ง \ ธาตุ	Fe	Cr	Ti	V	Ga
บ่อไร่ (อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด)	4520.3	1989.2	142.6	10.9	28.7
โมซัมบิก	1850.3	3184.7	60.6	0	28.6
โมกก (เมือง Mogok ในประเทศเมียนมาร์)	56.5	2711.6	828.0	182.5	43.2
มองซู (เมือง Mong Hsu ในประเทศเมียนมาร์)	2615.0	2178.5	140.0	450	101.0



(ก) (ข)

(ค) (ง)

รูปที่ 3.7 *ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของ (ก) Fe กับ Cr (ข) Fe กับ Ti (ค) V กับ Ga และ (ง) อัตราส่วน Fe/Ga กับอัตราส่วน Ti/V ในพลอยทับทิมจากแหล่งที่สำคัญ 4 แหล่งของโลก*

ซึ่งจะเห็นว่า พลอยในแต่ละแหล่งจะมีคุณลักษณะเฉพาะตัว เมื่อพิจารณาปริมาณธาตุเจือ และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุเจือ ตัวอย่าง เช่น ปริมาณของเหล็กและโครเมียมที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การวิจัยในลักษณะนี้ต้องดำเนินการกับพลอยในปริมาณที่มาก จึงจะหาความแม่นยำทางสถิติได้ ดังเช่นประสบการณ์ที่ได้พบจากการศึกษาพลอยแซฟไฟร์ *[17]* ซึ่งคณะทำงานจะดำเนินการต่อไป

3.4 การปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมด้วยลำไอออน

คณะทำงานได้เน้นปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม 2 ชนิดด้วยกัน ตามข้อเสนอของผู้ประกอบการ คือ พลอยสดและพลอยเผาใหม่ ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

3.4.1 การปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมสด

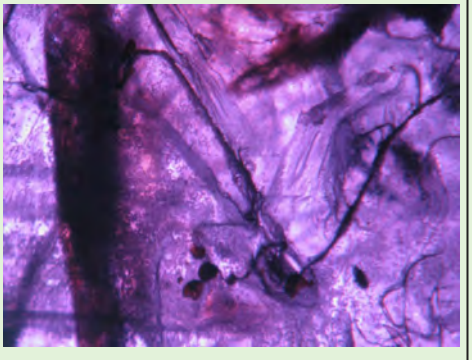
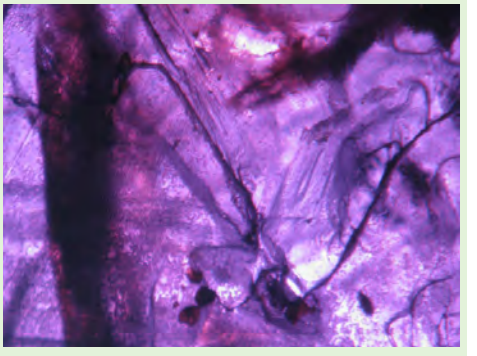
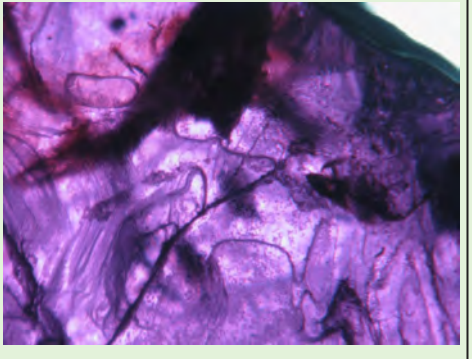
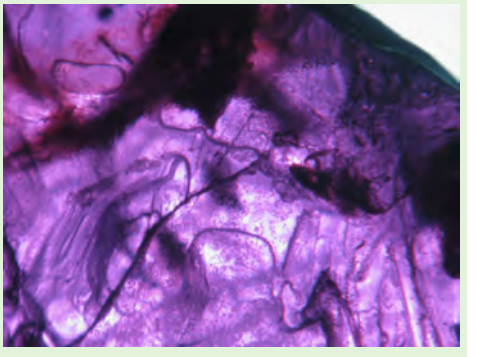
ตัวอย่างที่น่าสนใจที่พบ เมื่อทดลองปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมสดด้วยลำไอออน แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.2 *ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของพลอยทับทิมสดหลังถูกยิงด้วยลำไอออนออกซิเจน (ภาพถ่ายโดยอัมพร จันทร์คำมา)*

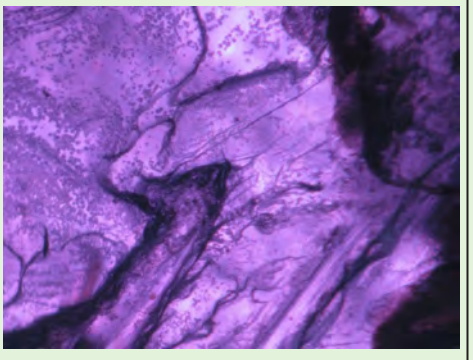
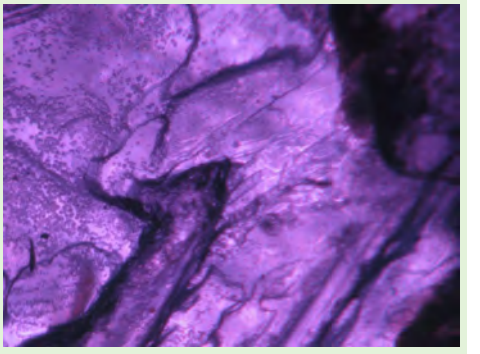
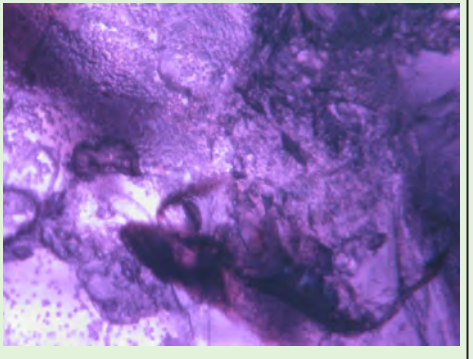
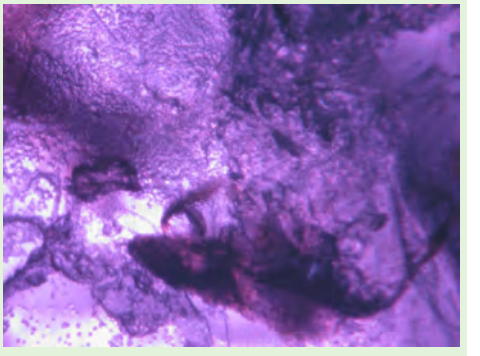
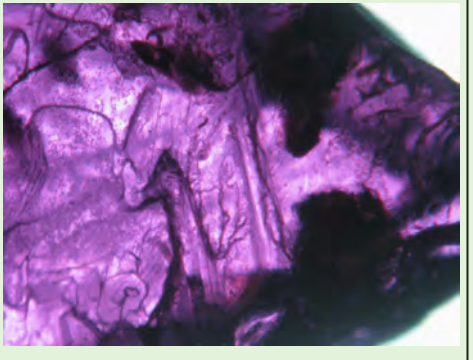
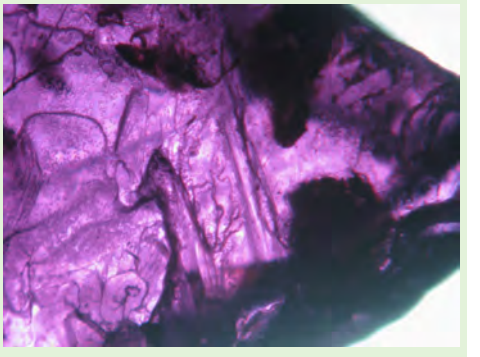
ตัวอย่างพลอยหมายเลข 2 : *ขนาดประมาณ 2.5 x 7.3 x 8.7 มิลลิเมตร*

ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน
	

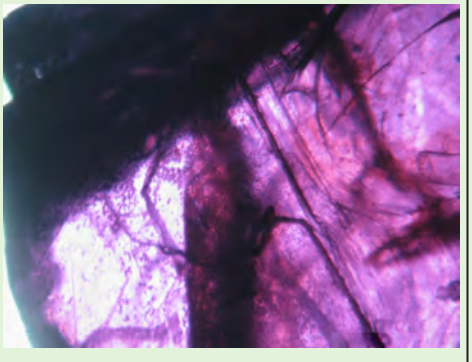
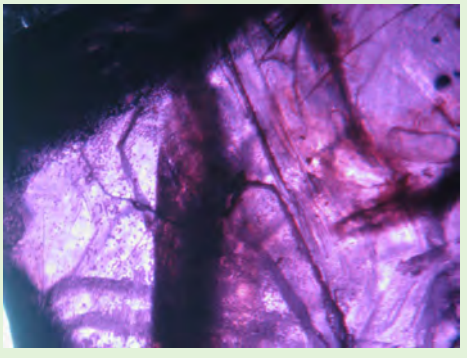
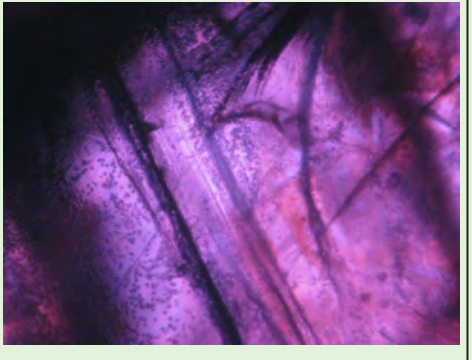
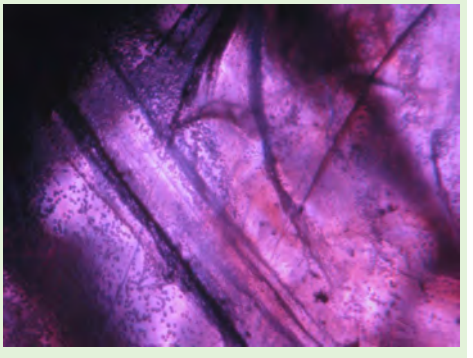
ตัวอย่างพลอยหมายเลข 2 : *ขนาดประมาณ 2.5 x 7.3 x 8.7 มิลลิเมตร* (ต่อ)

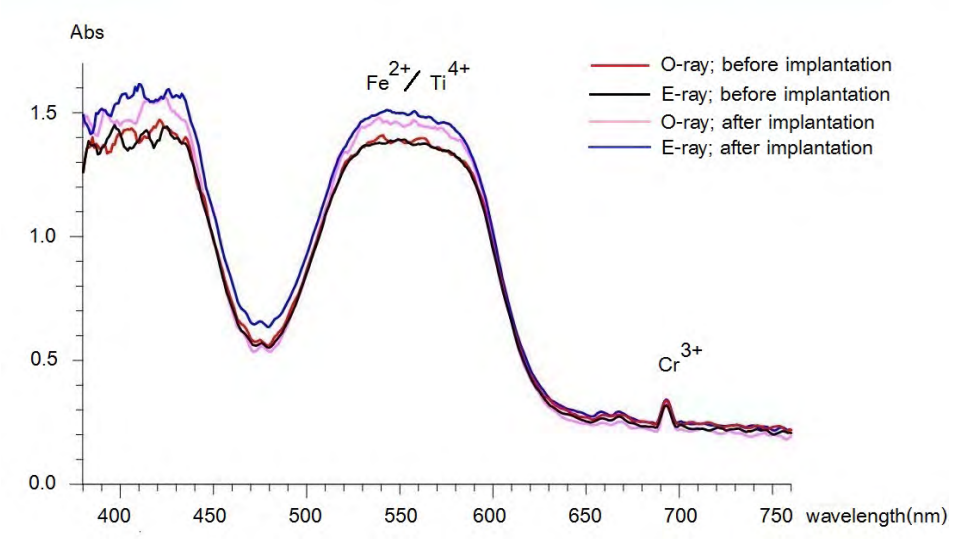
ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน
	
	
	ตำหนิภายใน (inclusions) หายไป
	
	ตำหนิภายในหายไป สีแดงเพิ่มและกระจายมากขึ้น

ตัวอย่างพลอยหมายเลข 2 : *ขนาดประมาณ 2.5 x 7.3 x 8.7 มิลลิเมตร* (ต่อ)

ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน
	
	มีสีแดงเข้มขึ้น
	
	มีสีแดงเข้มมากขึ้น
	
	มีสีแดงเข้มขึ้น

ตัวอย่างพลอยหมายเลข 2 : *ขนาดประมาณ 2.5 x 7.3 x 8.7 มิลลิเมตร* (ต่อ)

ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน
	
	ตำหนิภายใน (ในวงสีเหลือง) หายไป
	
	



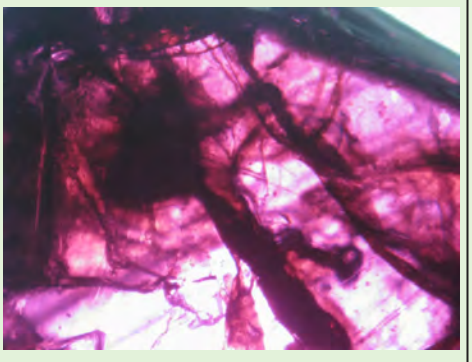
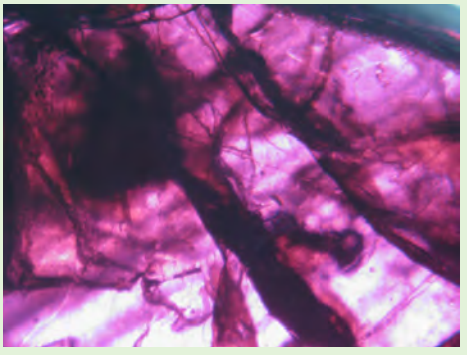
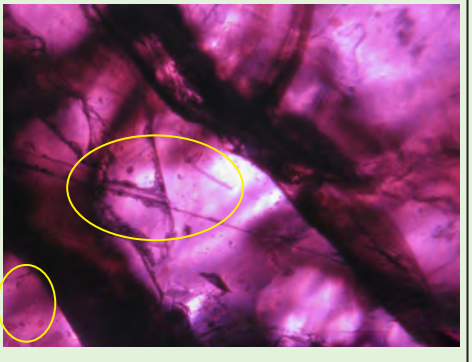
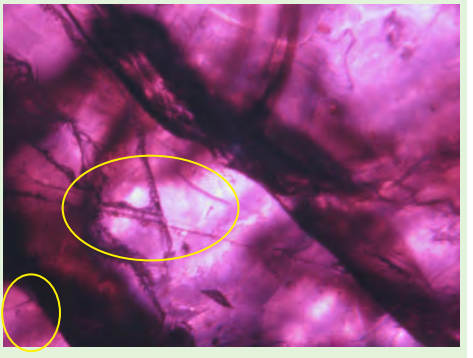
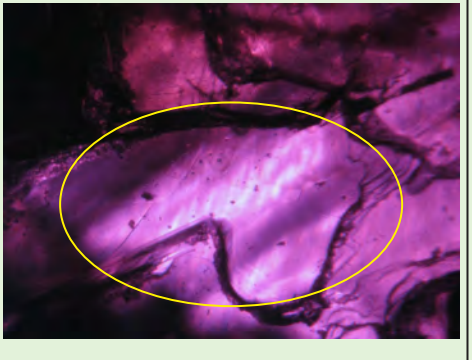
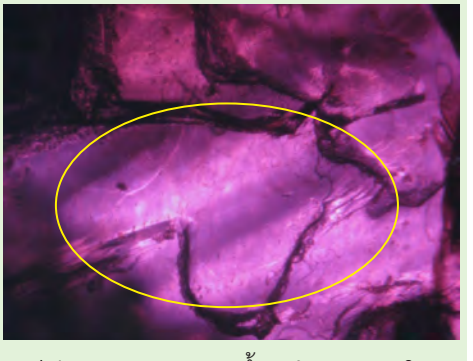
รูปที่ 3.8 *เปรียบเทียบสเปกตรัม UV-Vis ก่อนและหลังการยิงไอออน จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของยอด Cr^{3+} และ ยอด Fe^{2+}/Ti^{4+} ที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสีพลอย*

ตารางที่ 3.3 *ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของพลอยทับทิมสดหลังถูกยิงด้วยลำไอออนไนโตรเจน (ภาพถ่ายโดยอัมพร จันทร์คำมา)*

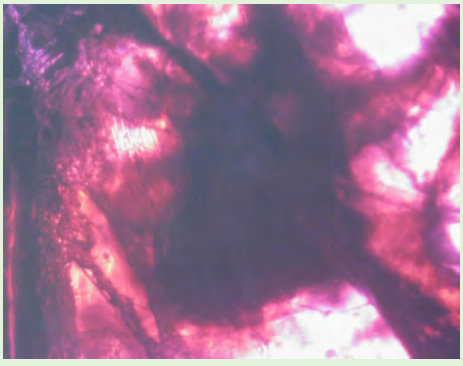
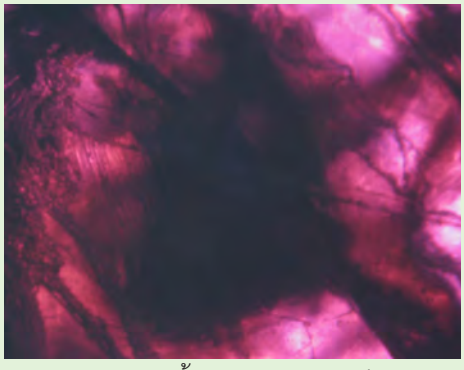
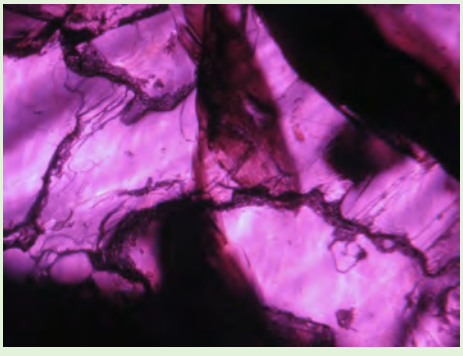
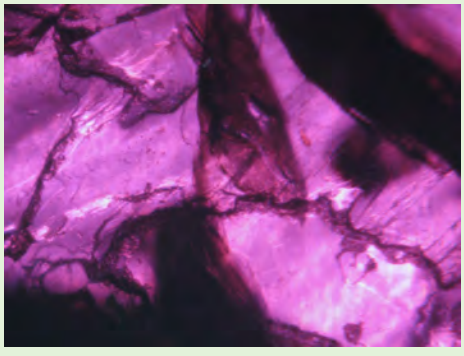
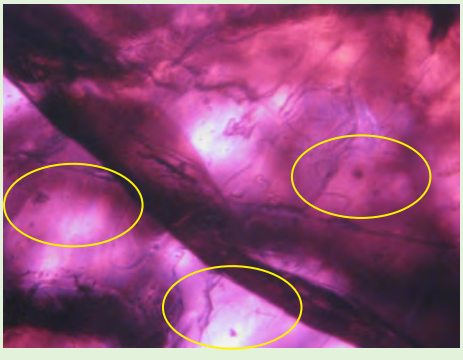
ตัวอย่างพลอยหมายเลข 8 : *ขนาดประมาณ 2.5 x 6.6 x 11.1 มิลลิเมตร*

ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน
	

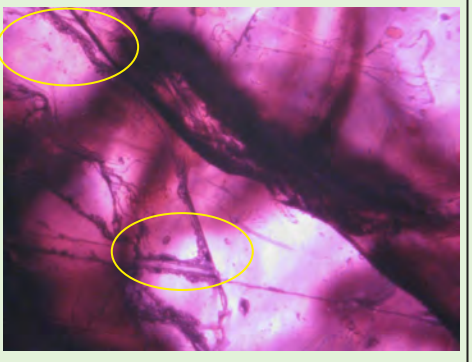
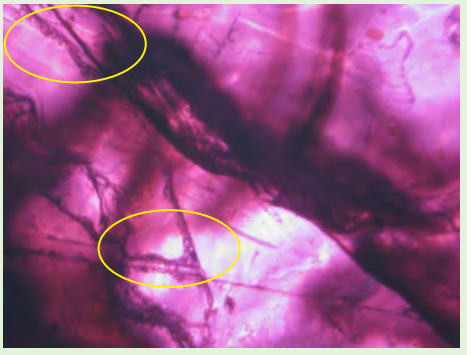
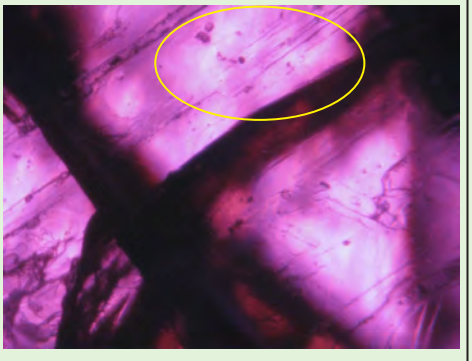
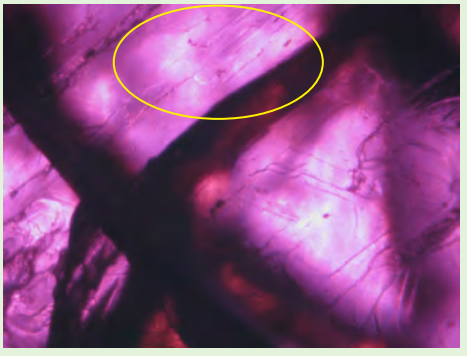
ตัวอย่างพลอยหมายเลข 8 : *ขนาดประมาณ 2.5 x 6.6 x 11.1 มิลลิเมตร* (ต่อ)

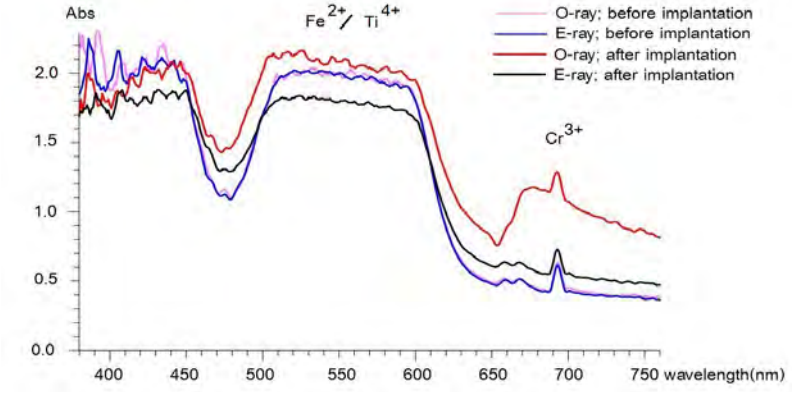
ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน
	
	มีสีม่วงเข้มขึ้น
	
	ตำหนิภายในหายไป
	
	สีม่วงกระจายมากขึ้น ตำหนิภายในหายไป

ตัวอย่างพลอยหมายเลข 8 : *ขนาดประมาณ 2.5 x 6.6 x 11.1 มิลลิเมตร* (ต่อ)

ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน
	
	สีแดงเข้มขึ้น กระจายออกไป
	
	มีสีม่วงเข้มขึ้น
	
	ตำหนิภายในหายไป สีม่วงแดงกระจายมากขึ้น

ตัวอย่างพลอยหมายเลข 8 : *ขนาดประมาณ 2.5 x 6.6 x 11.1 มิลลิเมตร* (ต่อ)

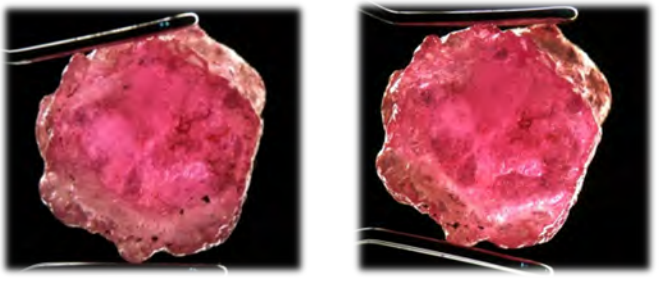
ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน
	
	ตำหนิภายในหายไป
	
	ตำหนิภายในหายไป



รูปที่ 3.9 *เปรียบเทียบสเปกตรัม UV-Vis ก่อนและหลังการยิงไอออน จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของยอด Cr^{3+} และ ยอด Fe^{2+}/Ti^{4+} สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสีพลอย*

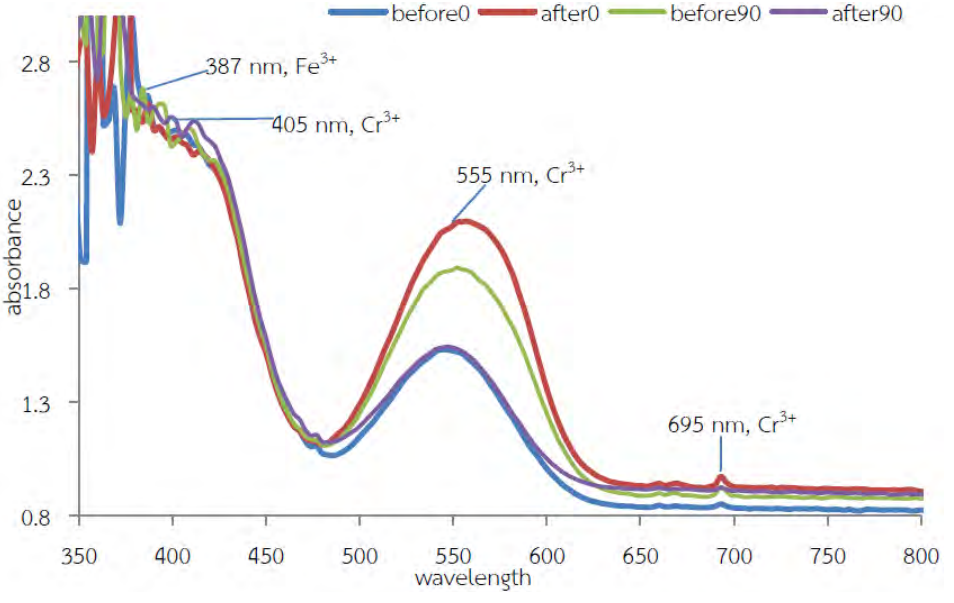
3.4.2 การปรับปรุงคุณภาพพลอยเพาใหม่ด้วยลำไอออน

จากรูปที่ 3.10 พบว่าสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลง โดยการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 405, 555, 695 nm ซึ่งเป็นตำแหน่งการดูดกลืนแสงของ Cr^{3+} ให้สีแดงในคอรันดัม และที่ 387 nm ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงของ Fe^{3+} ให้สีเหลืองในคอรันดัม เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการที่ยอดการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 555 nm เพิ่มขึ้น หลังจากการปรับปรุงคุณภาพ แสดงว่าปริมาณสัมพัทธ์ของ Cr^{3+} เพิ่มมากขึ้น ทำให้พลอยมีสีแดงเข้มขึ้น



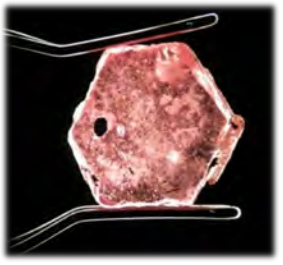
ก่อนยิงไอออน *หลังยิงไอออน*

พลอยตัวอย่างหมายเลข BR10 ประกอบรูปที่ 3.10

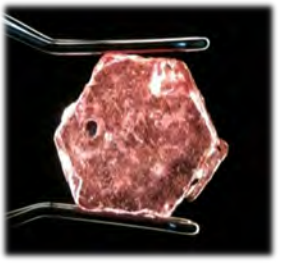


รูปที่ 3.10 *สเปกตรัมแสดงการดูดกลืนแสงของพลอยตัวอย่างหมายเลข BR10*

จากรูปที่ 3.11 พบว่าสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งก่อนการปรับปรุงคุณภาพ ยอดการดูดกลืนแสงที่ 405, 555, 695 nm ซึ่งเป็นตำแหน่งการดูดกลืนแสงของ Cr^{3+} ให้สีแดงในคอรันดัม และที่ 387 nm ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงของ Fe^{3+} ให้สีเหลืองในคอรันดัม มียอดที่ไม่สูงมาก ส่งผลให้ตัวอย่างพลอยทับทิมเม็ดนี้มีสีชมพู หลังการปรับปรุงคุณภาพ พบว่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 555 nm มียอดการดูดกลืนสูงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้สีของพลอยเข้มขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่สามารถเห็นได้ชัดเจน

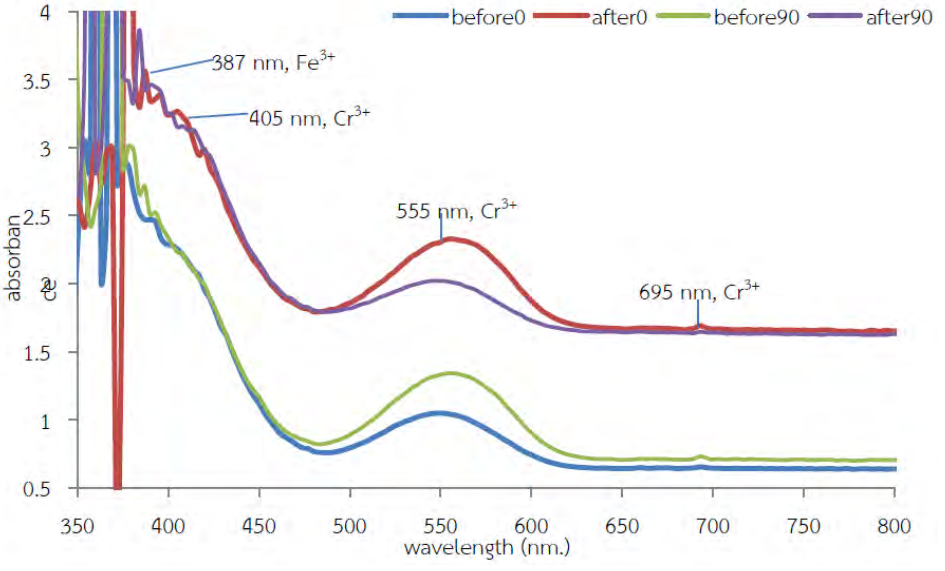


ก่อนยิงไอออน



หลังยิงไอออน

พลอยตัวอย่างหมายเลข CR4 ประกอบรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 *กราฟแสดงการดูดกลืนแสงของพลอยตัวอย่างหมายเลข CR4*

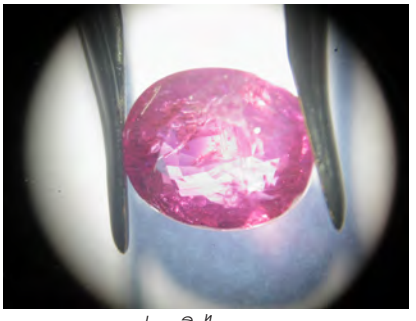
เนื่องจากพลอยตัวอย่างมีคุณภาพต่ำ ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสีไม่ชัดเจนนัก อย่างไรก็ตาม ข้อดีของเทคนิคนี้ในกรณีของพลอยเผาใหม่ คือ มีการลดลงของปริมาณตะกั่วหลังการยิงไอออน โดยที่ก่อนการทดลอง เมื่อวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของทับทิมเผาใหม่ พบว่ามีปริมาณตะกั่ว (PbO_2) ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง คืออยู่ในระดับร้อยละ 6.4 - 81.2 หลังการทดลองปรับปรุงคุณภาพ โดยใช้ไอออนอาร์กอน (Ar^+) ที่พลังงาน 70 keV เป็นเวลา 90 นาที พบว่า ปริมาณของธาตุที่ทำการวิเคราะห์มีการเปลี่ยนแปลง โดยปริมาณธาตุให้สี ได้แก่ Cr_2O_3, Fe_2O_3 และ TiO_2 ลดลง ส่งผลให้ทับทิมมีสีที่อ่อนลงเล็กน้อย แต่อาจจะไม่สามารถมองเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน แต่มีปริมาณตะกั่วลดลงจากเดิมอย่างมาก ส่งผลให้สัดส่วนของธาตุหลัก ได้แก่ Al_2O_3 เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 *ผลการวัดธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค PIXE ในพลอยทับทิมเผาใหม่เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออนอาร์กอนที่มีพลังงาน 70 keV เป็นเวลา 90 นาที*

ตัวอย่าง		Oxide (wt%)						
		Al_2O_3	TiO_2	V_2O_5	Cr_2O_3	Fe_2O_3	Ga_2O_3	PbO_2
AR5	ก่อน	86.7468	0.3630	0.2899	0.4113	1.0949	0.1334	10.9608
	หลัง	98.9899	0.0145	0.0063	0.1304	0.2260	0	0.6329
BR3	ก่อน	80.5441	0.1194	0.0564	0.3164	0.5084	0	18.4553
	หลัง	97.3975	0.0102	0	0.0591	0.1443	0.0096	2.3793
BR10	ก่อน	20.3081	0.1530	0.0759	0.2171	0.4885	0.2058	78.5517
	หลัง	97.0618	0.0092	0	0.1267	0.1507	0.0080	2.6436
CR2	ก่อน	18.1544	0.0710	0	0.1623	0.3713	0.772	81.1629
	หลัง	90.8987	0	0	0.0980	0.5249	0.0412	8.4371
CR4	ก่อน	23.6935	0.0874	0	0.1404	0.4247	0.0861	75.568
	หลัง	99.3650	0.0081	0.0062	0.0563	0.1619	0.0008	0.4016
CR6	ก่อน	24.0872	0.0814	0	0.1405	0.5264	0.0643	75.1002
	หลัง	98.5364	0.0094	0.0020	0.0430	0.1458	0.0127	1.2508
CR8	ก่อน	92.7434	0.0858	0.0154	0.1858	0.5856	0.0046	6.3793
	หลัง	95.8618	0.0186	0.0047	0.0735	0.2171	0.0025	3.8218

3.5 งานวิจัยนำร่องเชิงพาณิชย์

จากผลการทดลองที่กล่าวมาแล้ว พบว่า มีกรณีที่น่าสนใจและสามารถประยุกต์ในเชิงพาณิชย์ได้ทันที เช่น ในกรณีพลอยสดคุณภาพสูงที่เจียระไนแล้ว พบว่าไอออนไนโตรเจน จะทำให้พลอยทับทิมใสขึ้น ลดจำนวนตำหนิภายใน และได้พลอยทับทิมที่มีสีออกม่วงสวยงาม ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งเกิดจากไอออนไนโตรเจนที่เติมเข้าไปเหนี่ยวนำให้เกิด nitrogen fixation เป็นการ reduction ของธาตุโลหะทรานซิชันในพลอย ส่วนไอออนออกซิเจนจะทำให้พลอยทับทิมใสขึ้น ลดจำนวนตำหนิภายใน และทำให้พลอยทับทิมมีสีแดงเข้มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งเกิดจากกระบวนการ oxidation จากไอออนออกซิเจนที่เติมเข้าไป

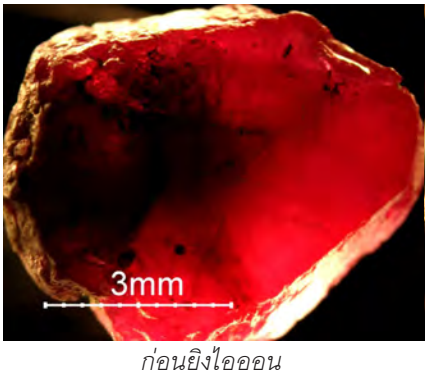


ก่อนยิงไอออน



หลังยิงไอออน

รูปที่ 3.12 *พลอยทับทิมสีชมพูที่มีมูลค่าการตลาดต่ำ สามารถเปลี่ยนเป็นพลอยสีม่วงที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น หลังผ่านกระบวนการยิงฝังด้วยลำไอออนไนโตรเจน*



ก่อนยิงไอออน



หลังยิงไอออน

รูปที่ 3.13 *การเปลี่ยนแปลงของพลอยทับทิมเมื่อถูกยิงด้วยไอออนออกซิเจน จะเห็นการเพิ่มขึ้นของความสดใส และการเพิ่มขึ้นของสีแดง ที่สำคัญ ตำหนิภายในถูกสลายให้ลดลงได้*

นอกจากนั้น การทดลองกับพลอยทับทิมเผาใหม่ ซึ่งมีการเจือปนของตะกั่วในปริมาณที่สูง หลังยิงด้วยลำไอออน พบว่า พลอยมีสีแดงมากขึ้น มีความสดใสแวววาวมากขึ้น ที่สำคัญทำให้ปริมาณของตะกั่วลดลงอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.14



ก่อนยิงไอออน *หลังยิงไอออน*

ก่อนยิงไอออน *หลังยิงไอออน*

รูปที่ 3.14 *พลอยทับทิมเผาใหม่หมายเลข LG1 และ LG5 หลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน มีสีแดงและความสดใสแวววาวเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้น ปริมาณตะกั่วเจือปนยังลดลงด้วยจากมากกว่า 5 wt% เหลือไม่ถึง 1 wt%*

รูปที่ 3.15 ได้แสดงแนวคิดหนึ่งในการใช้เทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นผลิตสินค้าสำหรับนิชมาร์เก็ต (niche market) เพื่อใช้เป็นของขวัญหรือของรางวัลที่มีความงดงามเชิงศิลป์พร้อมกับดูมีราคาเพราะประดับด้วยพลอยธรรมชาติจำนวนมาก แต่มูลค่าแท้จริงไม่สูงอย่างที่เห็น เพราะได้ใช้พลอยธรรมชาติคุณภาพต่ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออนไปประดับบนชิ้นงานประติมากรรม เช่นในกรณีนี้เป็นรูปพญาหงส์สา ลักษณะรำแพนหาง ที่ประดับด้วยพลอยคอรันดัม 9 สี จาก 5 แหล่งของประเทศไทย มีทั้งทับทิม แซฟไฟร์สีต่าง ๆ และแซฟไฟร์สีขาว จำนวนรวม



รูปที่ 3.15 *ภาพถ่ายด้านหน้า ของประติมากรรมชื่อ พญาหงส์สา มีความสูงจากพื้นถึงปลายหาง 50 ซม. ระยะรำแพน 55 ซม. ประดับด้วยพลอยคอรันดัมจากแหล่งประเทศไทยจำนวน 572 เม็ด น้ำหนักพลอยรวม 1,300 กะรัต ซึ่งทุกเม็ดผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออน องค์ประกอบประดับพลอย คือ ปีกล่างทั้งสองข้างประดับด้วยพลอยแซฟไฟร์สีขาวคล้ายเพชร 9 ชั้น ส่วนแพนหางที่มี 9 ชั้นประดับด้วยพลอย 9 สีที่มีแหล่งกำเนิดจากจังหวัดต่าง ๆเช่น พลอยสีเขียวอ่อนและเขียวเข้มจากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี พลอยสีฟ้าจากแหล่งตกพรม จังหวัดจันทบุรี พลอยทับทิมสยาม พลอยสีชมพู พลอยสีม่วง จากแหล่งบ่อไร่ จังหวัดตราด พลอยบุษราคัมจากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี พลอยสีน้ำเงินอ่อนจากแหล่งบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี และพลอยสีน้ำเงินเข้มสดจากแหล่งเด่นชัย จังหวัดแพร่*
(ภาพถ่ายโดย ชัยพิพัฒน์ แพ่งเกษร)

ทั้งสิ้น 572 เม็ด แต่ด้วยเหตุที่ว่าพลอยสดตระกูลคอรันดัมที่มีแหล่งกำเนิดอยู่ในประเทศไทยที่มีขนาดใหญ่และคุณภาพดีหายากมากและมีราคาสูง ดังนั้นเพื่อให้ชิ้นงานมีราคาที่ไม่สูงจนเกินไป พลอยธรรมชาติจำนวนมากที่ใช้ประดับบนชิ้นงานจึง

เลือกใช้พลอยคุณภาพต่ำที่หาไม่ยากและมีราคาไม่แพง แล้วใช้เทคนิคการยิงฝังด้วยลำไอออนที่พัฒนาขึ้นปรับปรุงคุณภาพให้พลอยสวยขึ้นทั้งในด้านสีและความใส อย่างเช่นพลอยแซฟไฟร์สีขาว ใช้เทคนิคการยิงฝังด้วยลำไอออนที่พัฒนาขึ้นปรับปรุงคุณภาพให้พลอยสวยขึ้นทั้งในด้านสีและความใส ซึ่งพลอยแซฟไฟร์สีขาวเมื่อถูกยิงฝังด้วยลำไอออนจะใสและสะอาดขึ้นจนดูเหมือนเพชรมาก ปฏิมากรรมชิ้นนี้เป็นผลงานที่ออกแบบ และขึ้นรูปโดย นางสาวสิริภัทร วิริยชัยฤกษ์ นางสาวนุสรา เนื่องแก้ว และนางสาวพัณณ์ชิตา พีรพิศาลพล นิสิตระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาอัญมณีและเครื่องประดับ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เริ่มจากการออกแบบ แกะแวกซ์ หล่อด้วยโลหะเงิน ฝังพลอยแบบหนามเตยและชุบทองคำ 24 K ทั้งนี้รวมถึงกระบวนการยิงฝังพลอยทุกเม็ดที่ใช้ประดับด้วยลำไอออน โดยใช้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

3.6 แผนการในอนาคต

เนื่องจากงานวิจัยในการใช้ลำไอออนเพื่อปรับปรุงคุณภาพพลอยธรรมชาติยังไม่มีผู้ใดดำเนินการมาก่อน นอกจากนั้น เครื่องมือหลักคือเครื่องเร่งอนุภาคก็มีอยู่แต่ที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เท่านั้น แต่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเทคนิคนี้เพิ่มมูลค่าให้พลอยทับทิมได้อย่างน่าสนใจ กล่าวคือคณะทำงานได้ขอให้ผู้ร่วมงานจากภาคเอกชน นำพลอยทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออนแล้วนั้น ไปทำการทดลองตลาด เพื่อดูความเป็นไปได้ในเชิงธุรกิจ ซึ่งพบว่าพลอยทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออน มีราคาเพิ่มขึ้นประมาณ 2-10 เท่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพตั้งต้นของพลอยที่นำมาทดลองด้วย ดังนั้นเพื่อให้โครงการเกิดประโยชน์ต่อผู้ประกอบการไทยกว้างขวางมากยิ่งขึ้น คณะผู้วิจัยจะได้จัดให้มีการฝึกอบรมถ่ายทอดเทคโนโลยีขึ้น และเปิดโอกาสให้ภาคเอกชนได้เข้ามาทดลองใช้เครื่องเร่งอนุภาคอีกด้วย

ในด้านวิชาการ คณะทำงานจะได้พัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคยิงไอออนต้นแบบที่สร้างขึ้นให้สามารถยิงไอออนได้มากชนิดขึ้น เช่นลำไอออนออกซิเจน เป็นต้น ทำการศึกษาทดลองกับพลอยสีอื่น ๆด้วย เช่นสีน้ำเงิน เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ร่วมมือกับห้องปฏิบัติการวิจัยนาโนสเปกโทรสโกปี สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ดูบทที่ 6) และศูนย์วิจัย Ångström

Laboratory ของ Uppsala University ประเทศสวีเดน ทำการค้นคว้าหาคำตอบว่าไอออนที่มีพลังงานจลน์เข้าไปทำอะไรกับพลอยจึงสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังที่เล่ามาได้ ปัจจุบันยังคงเป็นความลับดำมืดที่รอคอยการเปิดเผย

กิตติกรรมประกาศ

คณะทำงานขอขอบคุณนายช่างเทคนิคและวิศวกรวิจัยของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประกอบด้วย นายระเบียบ สุวรรณโกสุม นายสุวิชา รัตนรินทร์ และ นายวิษณุ บุญสุข สำหรับการดูแลรักษาและปรับปรุงเครื่องยิงลำไอออน นายโฉม ทองเหลื่อม สำหรับการดูแลรักษาและปรับปรุงเครื่องเร่งอนุภาคแทนเดอตรอน นายชาญชัย อุโมงโน สำหรับการดูแลรักษาและปรับปรุงเครื่องกำเนิดพลาสมา ซึ่งทั้งหมดนี้ทำให้คณะทำงานได้ค้นพบแนวทางใหม่ ๆ ในการประยุกต์ลำไอออนและพลาสมากับพลอยคอรันดัม ขอขอบคุณ นักศึกษาชั้นปีที่ 4 จากภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และจากภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป สาขาอัญมณีและเครื่องประดับ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เข้าร่วมในการทำวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) และศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์

บรรณานุกรม

[1] วิชิต เจริญสิงขร, *"ครูฟิสิกส์กับการพัฒนาภูมิปัญญาท้องถิ่น"*, วารสารฟิสิกส์ไทย ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 กันยายน – พฤศจิกายน 2547, หน้า 7-9.

[2] Kurt Nassau, *"Gemstone Enhancement"*, 1st Edition, Butterworths, London, 1984.

[3] Ted Themelis, *"The Heat Treatment of Ruby & Sapphire"*, 1st Edition, Gemlab, 1992.

[4] จากเว็บไซต์ http://travel.sanook.com/926986/. (คุณโซติกา วีรณะ สำนักข่าวไอ.เอ็น.เอ็น.)

[5] จากเว็บไซต์ http://www.manager.co.th/Travel/ViewNews.aspx?NewsID=9530000178745. (สื่อ ASTV ผู้จัดดารออนไลน์)

[6] จากเว็บไซต์ https://www.youtube.com/watch?v=y5M9UGdBZRo.

[7] จากเว็บไซต์ http://www.tint.or.th/index.php/th/2013-07-30-15-08-10/2013-07-30-16-21-2.

[8] S. Intarasiri, D. Bootkul, L.D. Yu, T. Kamwanna, S. Singkarat, T. Vilaithong, *"Gemological modification of local natural gemstones by ion beams"*, Surface and Coatings Technology 203 (2009) 2788-2792.

[9] C. M. Breeding, A. H. Shen, S. Eaton-Magaña, G. R. Rossman, J. E. Shigley, A. Gilbertson, *"Developments in Gemstone Analysis Techniques and Instrumentation During the 2000S"*, Gems & Gemology, Fall, 2010, pp. 241-257.

[10] สุรเชษฐ์ แสนซุ้ง, *"การศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิด Hot Cathode Arc Discharge แบบก๊าซของเครื่องแวเรียนไอออนอิมพลานเตอร์"*, การศึกษาค้นคว้าอิสระระดับปริญญาตรี, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พ.ศ. 2544.

[11] ธนาวุฒิ ลับภู, *"ลักษณะเฉพาะในการทำงานของแหล่งกำเนิดไอออนแบบไอระเหยของเครื่องแวเรียนอิมพลานเตอร์ 200 ดีเอฟ-5"*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การสอนฟิสิกส์) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พ.ศ. 2545.

[12] S. Intarasiri, C. Thongleum, R. Suwanakosum, S. Maleepat and S. Singkarat, "*Final Report on Overall Completion of the 2nd-year project: Ion Implantation System for Research and Training in Wafer Fabrication Industry*", submitted to the National Electronics and Computer Technology Center, Thailand, 2005.

[13] L.D. Yu, T. Vilaithong, B. Yotsombat, S. Thongtem, J. G. Han and J. S. Lee, *"Surface Modification of Tool Steels by Combined Cr- and N-ion Implantation"*, Surface Coatings Technology 103-104 (1998) 328-333.

[14] อภิวัฒน์ วิใจคำ, *"การพัฒนาเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัดขนาด*

*100 กิโลโวลต์",*วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พ.ศ. 2555.

[15] S. Singkarat, A. Wijaikhum, D. Suwannakachorn, M.W. Rhodes, R. Suwankosum, S. Rattanarin, S. Intarasiri, D. Bootkul, and L.D. Yu, *"A Vertical Compact Ion Implanter for Novel Applications in Biotechnology and Gemology",* Proceedings of the Eleventh International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerators, Bruges, Belgium, August 5-8, 2013. http://accapp13.org/sites/default/files/WEPMA02.pdf.

[16] U. Juncomma, S. Intarasiri, D. Bootkul and U. Tippawan, *"Ion Beam Analysis of Rubies and Their Simulants"*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 331(2014)102-107.

[17] T. Chulapakorn, S. Intarasiri, D. Bootkul and S. Singkarat, *"Identification of Deposit Types of Natural Corundum by PIXE"*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 331(2014)108-112.



การประชุมสัมมนาด้าน "Symposium on Ion Beam Biotechnology and Application" ระหว่างศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ กับ สถาบัน Institute of Technical Biology and Agricultural Engineering ภายใต้ Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Science ณ จังหวัดเหอเฝอย เมืองหลวงของมณฑลอันฮุย สาธารณรัฐประชาชนจีน เมื่อเดือนกันยายน พ.ศ. 2557 แถวด้านซ้ายของภาพคือคณะนักวิทยาศาสตร์เจ้าภาพ นำโดย Prof. Yu Zengliang (ใส่เสื้อสีเข้มคนที่สองจากซ้าย) และผู้บริหารของสถาบันฯ ซึ่งประกอบด้วย ผู้อำนวยการสถาบันฯ Prof. Dr. Wu Lijun (คนที่สามจากซ้าย) และ รองผู้อำนวยการของสถาบันฯ Prof. Dr. Wu Lifang (คนแรกด้านซ้าย) Prof. Yu Zengliang เป็นผู้ต้นคิดและบุกเบิกการใช้ลำไอออนจากเครื่องเร่งอนุภาคชักนำให้เกิดการกลายพันธุ์ในพืช แถวด้านขวาของภาพคือบางส่วนของคณะนักวิทยาศาสตร์ไทย นำโดยศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง (คนที่สี่จากขวา) พร้อมด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ อนันตลาโภชัย (คนที่ห้าจากขวา) รองศาสตราจารย์ ดร. เหลียงเติ้ง ยู (คนที่สามจากขวา) ดร. บุญรักษ์ พันธ์ไชยศรี (คนที่สองจากขวา) และ ดร. จิรณัทฐ์ เตชะรัง การประชุมนี้เป็นผลพวงของความร่วมมือแบบทวิภาคี ไทย-จีน ที่ได้รับการสนับสนุนจากกระทรวงการต่างประเทศของไทย และกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของสาธารณรัฐประชาชนจีน

เทคโนโลยีลำไอออนเพื่องานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ

เหลียงเติ้ง ยู[๑] และ สมบูรณ์ อนันตลาโภชัย[๒]

[๑] *ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ*

[๒] *หน่วยวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพ สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา*

4.1 อารัมภบท

การพัฒนาและการประยุกต์เครื่องเร่งอนุภาคเป็นหัวเรื่องหนึ่งที่มีความสำคัญของฟิสิกส์สมัยใหม่ เครื่องเร่งอนุภาคนั้นทำหน้าที่เพิ่มพลังงานจลน์ให้กับอนุภาค ซึ่งในที่นี้หมายถึงไอออน เมื่อไอออนที่มีความเร็วชนเข้ากับวัตถุ สามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในวัตถุนั้นได้หลายอย่างที่มีประโยชน์ บางการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอยู่แล้วในธรรมชาติ แต่มีโอกาสเกิดต่ำมาก จึงไม่เป็นที่สนใจและ/หรือเข้าใจอย่างถ่องแท้ มนุษย์จึงยังไม่ได้นำมาประยุกต์ แต่บางการเปลี่ยนแปลงได้ถูกชักนำให้เกิดขึ้นโดยฝีมือมนุษย์ เพราะมนุษย์สนใจและอยากใช้ประโยชน์

แนวทางการประยุกต์เครื่องเร่งอนุภาคนั้นมีกว้างขวางมาก สำหรับเครื่องเร่งอนุภาคที่ถูกสร้างให้มีพลังมหาศาล ได้ถูกนำไปใช้ชักนำให้เกิดการชนกันของอนุภาคสองตัวเช่นอนุภาคโปรตอนกับอนุภาคแอนตี้โปรตอน (anti-proton) ซึ่งจะแตกออกเป็นอนุภาคเล็กอนุภาคน้อย ทั้งนี้เพื่อการศึกษาค้นคว้าด้านฟิสิกส์ของอนุภาคมูลฐานที่จะสามารถตอบคำถามถึงจุดกำเนิดของสสารต่าง ๆได้ เมื่อเครื่องเร่งอนุภาคมีพลังลดลงมาในระดับปานกลาง อนุภาคที่ผลิตขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการศึกษาค้นคว้าทางด้านวิชาฟิสิกส์ของอะตอมและนิวเคลียส เมื่อเครื่องเร่งอนุภาคมี

พลังระดับต่ำ อนุภาคที่ผลิตได้มีศักยภาพที่จะสะบั้นพันธะระหว่างอะตอม หรือพันธะระหว่างโมเลกุล หรืออาจเข้าไปชนกับอิเล็กตรอนหรือนิวเคลียสในวัตถุเป้าได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ธาตุและในการดัดแปลง (modification) วัสดุได้ การประยุกต์ประเภทหลังนี้ครอบคลุมวัสดุทุกชนิด รวมถึงวัสดุชีวภาพที่มีชีวิตด้วย ถ้าวัสดุชีวภาพนั้นมาจากมนุษย์ ก็จะเป็นการประยุกต์เครื่องเร่งอนุภาคทางด้านการแพทย์ แต่ถ้าวัสดุชีวภาพมาจากพืช ก็จะเป็นการประยุกต์ด้านเกษตรกรรม ถ้าวัสดุชีวภาพเป็นของจุลชีพ (microbes) การประยุกต์จะเกี่ยวข้องกับทั้งสองสาขาที่กล่าวมาและรวมถึงด้านสิ่งแวดล้อมด้วย การประยุกต์เครื่องเร่งอนุภาคด้านชีววิทยาจึงมีความเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับความเป็นอยู่ของมนุษย์ ดังนั้นจึงจำเป็นที่เราจะต้องมีความคุ้นเคยกับข้อมูลในด้านนี้บ้าง โดยเฉพาะเมื่อมีองค์ความรู้ใหม่เกิดขึ้น เช่นเรื่องหนึ่งที่เพิ่งได้รับการสถาปนาขึ้นในระดับนานาชาติเมื่อไม่นานมานี้ เกิดจากการผสมผสานองค์ความรู้และเครื่องไม้เครื่องมือของหลายศาสตร์เข้าด้วยกัน เรียกว่า *“Ion Beam Biotechnology” [1]* หรืออาจแปลเป็นไทยได้ว่า *“เทคโนโลยีชีวภาพลำไอออน”* ซึ่งแสดงศักยภาพเชิงประยุกต์ที่น่าสนใจของเครื่องเร่งอนุภาคไอออนพลังงานต่ำ (low-energy ion accelerator) ทางด้านชีววิทยา โดยเฉพาะที่เกี่ยวกับสาขาเกษตรกรรม

ในส่วนของประเทศไทยนั้น โครงการค้นคว้าวิจัยในวิทยาการสายนี้ได้เริ่มต้นขึ้นตั้งแต่เมื่อตอนช่วงปลายของทศวรรษระหว่างปีพ.ศ. 2533-2543 ที่ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีวัตถุประสงค์หลักที่จะประยุกต์เครื่องเร่งอนุภาคไอออนพลังงานต่ำเพื่อการปรับปรุงคุณภาพพืชและการดัดแปลงจุลชีพที่ไม่ต้องข้องเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสีแต่อย่างใด จากความพยายามอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาเกือบสองทศวรรษ โครงการนี้ก็บังเกิดผลสัมฤทธิ์เป็นที่น่าพอใจ ทั้งในแง่ของการประยุกต์ที่นำไปใช้ได้จริงและในแง่ของจำนวนผลงานทางวิชาการ ซึ่งครอบคลุมแทบทุกเรื่องที่เกี่ยวข้องอันได้แก่ การพัฒนาอุปกรณ์ต่าง ๆของเครื่องเร่งอนุภาค การพัฒนาเทคนิคการดัดแปลงด้วยลำไอออน การชักนำการกลายพันธุ์ของพืชด้วยลำไอออน การชักนำการส่งถ่ายยีนด้วยลำไอออน และการศึกษากลไกที่เกี่ยวข้อง กิจกรรมทั้งปวงนี้แสดงให้เห็นถึงความคิดริเริ่มและความมุ่งมั่นของนักวิทยาศาสตร์ไทยกลุ่มหนึ่งที่ประกอบด้วยนัก

ฟิสิกส์ นักชีววิทยา และ นักวิชาการเกษตร ในการประยุกต์เครื่องเร่งอนุภาคแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นกันเองในประเทศไทยจนประสบความสำเร็จที่จับต้องได้ อย่างไรก็ตามโครงการนี้จะไม่สามารถประสบความสำเร็จได้ ถ้าไม่ได้รับการสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ในปัจจุบันนี้โครงการวิจัยนี้ยังได้มีความร่วมมือกับสถาบันวิจัยในต่างประเทศอีกสองแห่งคือ Chinese Academy of Sciences ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน และ University of Surrey ประเทศสหราชอาณาจักร

4.2 เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์เพื่องานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ

การค้นคว้าวิจัยเพื่อประยุกต์ไอออนพลังงานต่ำกับวัสดุชีวภาพที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ใช้เครื่องมือหลักหลากหลายชนิดดังต่อไปนี้

ก) เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ (Ion Implanter) แบบเครื่องเร่งอนุภาคขนาด 150 kV สำหรับไอออนมวลหนัก มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.1 เครื่องเร่งอนุภาคนี้เป็นไอออนอิมพลานเตอร์เครื่องแรกของศูนย์วิจัยที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพ สร้างเสร็จเมื่อปีพ.ศ. 2538 แหล่งกำเนิดไอออนเป็นชนิด RF (radio frequency) ท่อเร่งอนุภาคสามารถเพิ่มพลังงานให้ไอออนด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 150 kV กระแสลำไอออนมีค่าในเรือน 10 ไมโครแอมแปร์ เป็นลำไอออนที่มีคุณภาพสูงเพราะมีแม่เหล็กคัดกรอง (analysing magnet) ที่เลือกให้ผ่านไปได้แต่ไอออนที่เป็นชนิดและมีพลังงานที่ต้องการเท่านั้น อีกทั้งยังมีระบบโฟกัสลำไอออนด้วยสนามแม่เหล็กด้วย เครื่องเร่งอนุภาคนี้ถูกใช้ในการชักนำให้เกิดการส่งถ่ายยีนเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียเป็นครั้งแรกในช่วงปีพ.ศ. 2541-2542

ข) เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบเครื่องเร่งอนุภาคขนาด150 kV ที่มีกระแสไอออนสูง มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งเคยเป็นกำลังหลักในการค้นคว้าวิจัยด้านการชักนำการกลายพันธุ์ของข้าวด้วยลำไอออน เครื่องเร่งอนุภาคนี้สร้างเสร็จเมื่อปีพ.ศ. 2540 ถึงแม้สามารถสร้างศักย์ไฟฟ้าเร่งไอออนได้สูงสุดเท่ากับเครื่อง



รูปที่ 4.1 *ภาพถ่ายของเครื่องเร่งอนุภาคไอออนพลังงานต่ำเครื่องแรกที่สร้างเอง [2] ลำไอออนถูกผลิตจากแหล่งกำเนิดไอออนชนิดคลื่นวิทยุ (RF ion source) ที่อยู่ทางด้านขวามือของภาพ (ไม่เห็นในภาพ) แล้วถูกลำเลียงในท่อสุญญากาศไปยังห้องเป้าด้านซ้ายมือของภาพ วัตถุที่มีกรอบสีดำรูป 8 เหลี่ยม คือแม่เหล็กสำหรับโฟกัสลำไอออนซึ่งมีเรียงต่อกัน 3 ตัว (triplet magnetic lens) ส่วนวัตถุสีแดงคือแม่เหล็กคัดกรองลำอนุภาค อุปกรณ์ทั้งสองนี้สร้างกันเองโดยบุคลากรของศูนย์วิจัยฯ ที่นำทีมโดย ดร. ดุษฎี สุวรรณขจร ปัจจุบันเครื่องเร่งอนุภาคนี้ถูกปลดระวางแล้วเนื่องด้วยข้อจำกัดของพื้นที่*

เร่งอนุภาคในรูปที่ 4.1 คือ 150 kV แต่มีลักษณะเด่นพิเศษที่แหล่งกำเนิดไอออนเป็นแบบ duoplasmatron ที่สามารถผลิตกระแสไอออนได้สูงในเรือนมิลลิแอมแปร์ คือสูงกว่าเครื่องแรกเป็นพันเท่า ด้วยเหตุที่มุ่งเน้นไปที่ลำไอออนที่มีความเข้มสูงและครอบคลุมพื้นที่กว้างที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 ซม. ณ ตำแหน่งเป้าที่ปลายท่อนำลำอนุภาค (beamline) จึงไม่ได้ใช้แม่เหล็กคัดกรองลำอนุภาคในเครื่องนี้ อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กึ่งกลางห้องเป้า (target chamber) ก็คือฐานรองเป้า (sample holder) ที่สามารถหมุนได้โดยรอบ จึงยิงเป้าได้ 4 ชิ้นต่อการบรรจุเป้าตัวอย่างหนึ่งครั้ง ทั้งยังมีระบบน้ำหล่อเย็นให้แก่ฐานรองเป้าด้วย เครื่องเร่งอนุภาคนี้ถูกใช้ในภารกิจชักนำการกลายพันธ์ด้วยลำไอออนในพืชหลายชนิดจนถึงประมาณปีพ.ศ. 2553

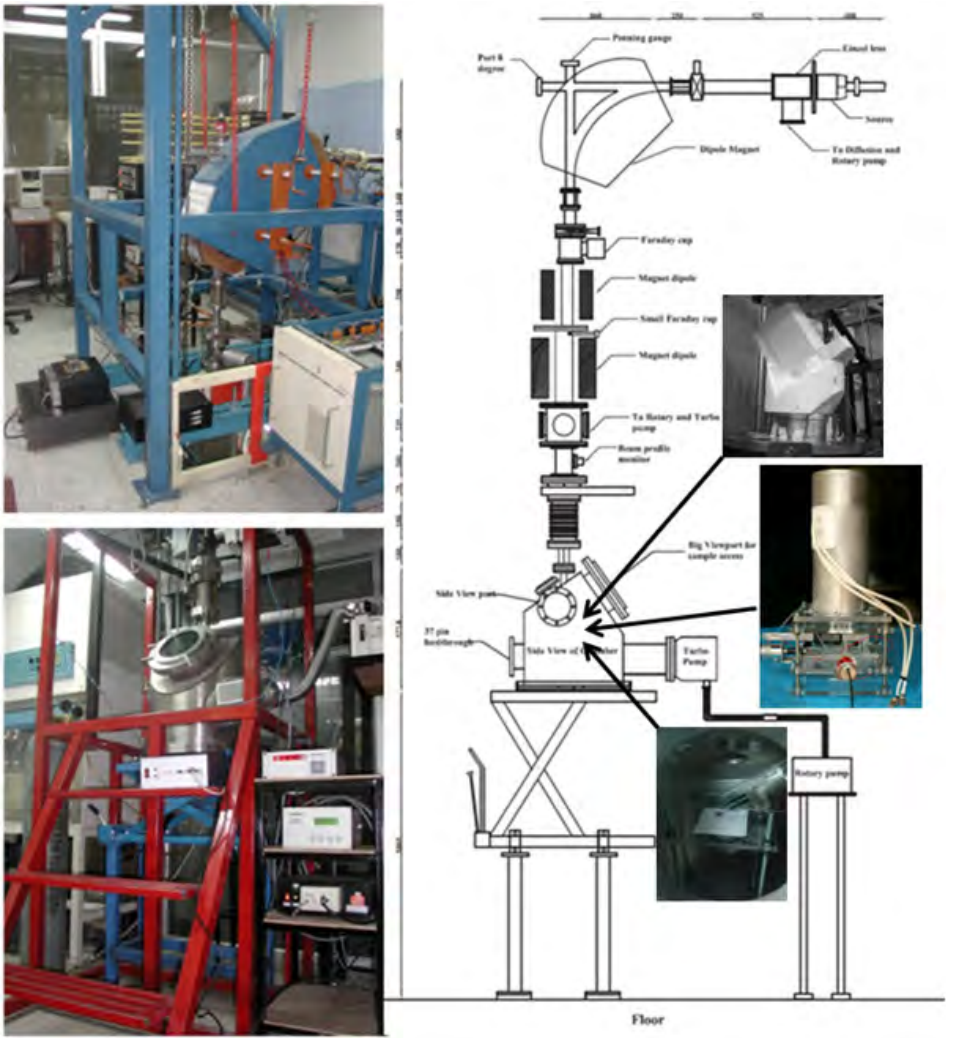


(ก) *(ข)*

รูปที่ 4.2 *(ก) ภาพถ่ายเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบเครื่องเร่งอนุภาคขนาด150 kV ที่มีกระแสไอออนสูงที่สร้างขึ้นเอง ซึ่งนำทีมโดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรจบ ยศสมบัติ และ Dr. S. Davydov [3] ถังโลหะสเตนเลสทางซ้ายมือของภาพคือห้องเป้า แหล่งกำเนิดไอออนและแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูงอยู่ในห้องปรับอากาศสีเขียว เครื่องเร่งอนุภาคนี้ถูกปลดระวางแล้วเช่นเดียวกัน (ข) ภาพเมล็ดพืชขณะติดอยู่บนฐานรองเป้าก่อนนำไปใส่ในห้องเป้า*

ค) เครื่องเร่งอนุภาคแนวดิ่งขนาด 30 kV สำหรับเทคโนโลยีชีวภาพลำไอออนโดยเฉพาะ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.3 ใช้แหล่งกำเนิดไอออนแบบไส้ลวดอุณหภูมิสูง *[4]* สร้างไอออนได้หลายชนิดที่สามารถใช้สารตั้งต้นทั้งที่เป็นก๊าซและของแข็ง เครื่องเร่งอนุภาคนี้ไม่ได้ใช้ท่อเร่ง แต่เพิ่มพลังงานจลน์ให้แก่ไอออนด้วยการปรับเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าของขั้วดึง (extraction electrode) ซึ่งทำค่าสูงสุดได้ 30 kV ลำไอออนจะถูกดึงและเร่งออกมาในแนวนอน แล้ววิ่งผ่านแม่เหล็กคัดกรองสนามแม่เหล็กจะบังคับให้ไอออนที่มีชนิดและพลังงานที่ต้องการวิ่งเป็นแนวโค้ง 90 องศา เมื่อหลุดออกจากสนามแม่เหล็กจึงวิ่งต่อไปในสุญญากาศในแนวดิ่ง จากบนลงล่าง ทำให้สามารถวางสารตัวอย่างในแนวราบได้ สะดวกสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นวัสดุทางชีวภาพที่มีลักษณะรูปร่างและขนาดหลากหลาย ด้วยเหตุนี้ เครื่องเร่งอนุภาคนี้จึงครอบคลุมเนื้อที่ 2 ชั้น โดยส่วนของแหล่งกำเนิดไอออนถึงแม่เหล็กคัดกรองไอออนจะอยู่ที่ชั้นบน ส่วนที่ต่อจากขาออกของแม่เหล็กคัดกรองลงมาจนถึงห้องเป้าจะอยู่ที่ชั้นล่าง กระแสลำไอออนที่เป้าจะอยู่ในเรือนหลายสิบไมโครแอมแปร์ ในห้องเป้ามีการติดตั้งกล้องจุลทรรศน์ AFM (atomic force microscope) และหัววัดรังสีเอกซ์ความไวสูงไว้ด้วย เพื่อสังเกตลักษณะพื้นผิวและรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นกับสารตัวอย่างที่เป็นวัสดุชีวภาพในขณะที่กำลังถูกยิงด้วยลำไอออน ในปีพ.ศ. 2555 ได้มีการติดตั้งเพิ่มอุปกรณ์ใหม่อีกหนึ่งอย่างภายในห้องเป้า คือเลนส์หน่วงลำไอออน (ion beam deceleration lens) เพื่อการทดลองยิงวัสดุชีวภาพด้วยลำไอออนที่มีพลังงานต่ำมาก (ultra-low-energy) คือต่ำกว่า 1 keV ระบบเครื่องเร่งอนุภาคนี้ทำงานได้เป็นอย่างดีมากในการทดลองด้านเทคโนโลยีชีวภาพลำไอออนหลายเรื่อง

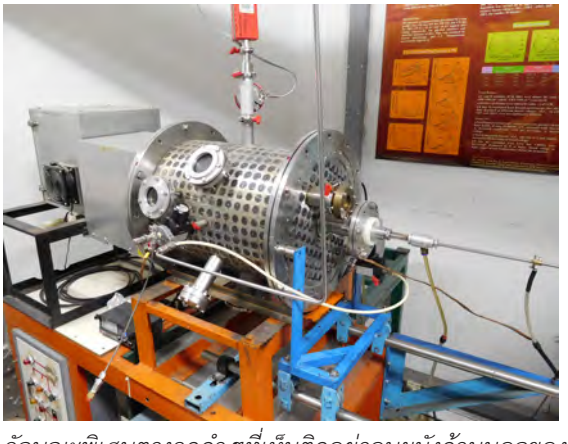
นอกจากนี้ยังได้มีการใช้เครื่องเร่งอนุภาคเสริมอีก 2 เครื่อง คือเครื่องแวเรียนไอออนอิมพลานเตอร์ขนาด 200 kV (รูปที่ 3.1) และเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ขนาดกะทัดรัดแบบเครื่องเร่งอนุภาคแนวดิ่งขนาด 90 kV (รูปที่ 3.2) ซึ่งปัจจุบันเครื่องหลังถูกใช้มากทั้งในการปรับปรุงคุณภาพพลอย (ดูบทที่ 3) และในการชักนำให้เกิดการกลายพันธุ์ในข้าวเพื่อการพัฒนาสายพันธุ์ใหม่ ๆ ที่มีคุณลักษณะดีกว่าพันธุ์ดั้งเดิม



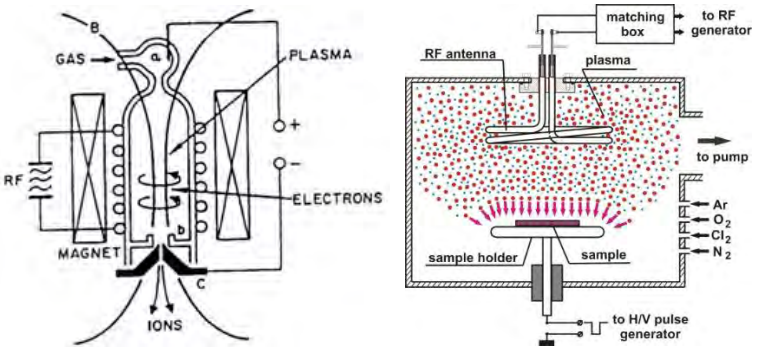
รูปที่ 4.3 *ภาพถ่าย (ซ้าย) และแผนภาพ (ขวา) ของระบบเครื่องเร่งอนุภาคแนวดิ่งขนาด 30 kV สำหรับเทคโนโลยีชีวภาพลำไอออน [5] ติดตั้งอยู่ที่อาคารเทคโนโลยีไอออนบีม-1 ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เครื่องเร่งอนุภาคนี้สร้างเสร็จเมื่อปีพ.ศ. 2543 ในแผนภาพได้แสดงให้เห็นว่าภายในห้องเป้ามีการติดตั้ง (จากบนลงล่าง) กล้องจุลทรรศน์ AFM เลนส์หน่วงลำไอออน และ หัววัดรังสีเอกซ์*

ง) เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ขนาด 30 kV แบบแช่ในพลาสมา (30-kV Plasma Immersion Ion Implanter หรือ PIII) มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งโดยหลักการแล้วก็คล้ายกับแหล่งกำเนิดไอออนชนิด RF ของเครื่องเร่งอนุภาคนั่นเอง แต่ขยายเฉพาะส่วนนี้ให้มีปริมาตรใหญ่ขึ้นมาก (รูปที่ 4.5) พลาสมา (plasma ใน

ที่นี้หมายถึงสถานะที่สี่ของสสารที่อิเล็กตรอนกับไอออนบวกสามารถอยู่แยกกันได้ อย่างเป็นอิสระ คนละความหมายกับพลาสมาของเลือด ซึ่งเขียนเหมือนกันทั้งภาษาไทยและอังกฤษ) ถูกสร้างขึ้นมาจากก๊าซที่เลือกแล้ว โดยการกระตุ้นด้วยคลื่นวิทยุความเข้มสูง ด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสม อะตอมของก๊าซจะแตกสลาย แยกออกเป็นอนุภาคอิเล็กตรอนและไอออนที่ต่างคนต่างอยู่ กระจายอยู่เต็มห้องพลาสมา (plasma chamber) และห้อมล้อมฐานรองเป้า (sample holder) ที่ติดตั้งอยู่ประมาณตรงกึ่งกลาง กระบวนการยิงฝังด้วยไอออน (ion implantation) เกิดขึ้นกับสารตัวอย่างได้ด้วยการที่ไอออนบวกในพลาสมา ที่กำลังวิ่งกันอยู่อย่างสะเปะสะปะ ถูกระดมให้วิ่งเข้ามาชนสารตัวอย่างที่วางอยู่บนฐานรองโลหะโดยการล่อด้วยศักย์ไฟฟ้าลบแบบห้วงที่ต่ออยู่กับฐานรองจากภายนอก ข้อดีของการยิงฝังสารตัวอย่างหรือชิ้นงานแบบนี้ก็คือไอออนสามารถวิ่งเข้าชนสารตัวอย่าง / ชิ้นงานได้เกือบทุกทิศทาง ทั้งผิวด้านนอกและด้านใน ไม่ว่าวัตถุตัวอย่างจะมีรูปทรงพิสดารอย่างใดก็ตาม ข้อดีอีกประการหนึ่งก็คือระบบแบบนี้มีขนาดเล็กและมีความซับซ้อนน้อยกว่าเครื่องเร่งอนุภาค ดังนั้นจึงใช้งานง่ายกว่าและมีราคาไม่สูงมากนัก เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์นี้มีบทบาทอย่างสำคัญในการค้นคว้าวิจัยด้านของผลที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุชีวภาพถูกชนด้วยไอออนพลังงานต่ำและการชักนำให้เกิดการส่งถ่ายดีเอ็นเอ (DNA) ด้วยไอออนพลังงานต่ำ



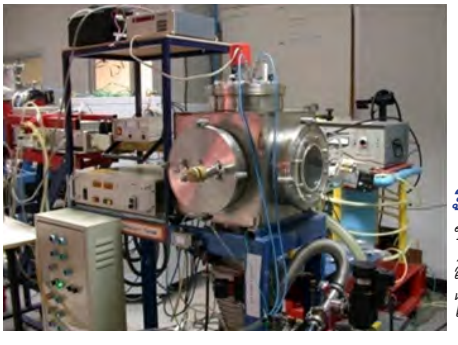
รูปที่ 4.4 *ภาพถ่ายของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ขนาด 30 kV แบบแช่ในพลาสมา [6, 7] สร้างขึ้นเมื่อประมาณปีพ.ศ. 2540 ติดตั้งอยู่ที่อาคารเทคโนโลยีไอออนบีม-1 ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ถังรูปทรงกระบอกที่ทำด้วยโลหะสเตนเลสคือห้องพลาสมาที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 31.2 ซม. และยาว 42.5 ซม. เครื่อง PIII นี้มีลักษณะพิเศษตรงจุดดำ ๆที่เห็นติดอยู่รอบผนังด้านนอกของห้องพลาสมา ซึ่งก็คือแม่เหล็กถาวรแบบเม็ดกระดุมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18.5 มม. และหนา 5.2 มม. มีจำนวนทั้งสิ้น 632 เม็ด สนามแม่เหล็กของพวกมันร่วมกันทำหน้าที่จำกัด (confine) ให้พลาสมารวมตัวกันอยู่เฉพาะบริเวณตรงกลางของห้องพลาสมา โดยไม่ไปสัมผัสกับผนังด้านในของห้องพลาสมา ทำให้พลาสมามีเสถียรภาพดีขึ้น*



(ก) (ข)

รูปที่ 4.5 *(ก) แผนภาพของแหล่งกำเนิดไอออนชนิด RF ซึ่งห้องที่เกิดพลาสมามีลักษณะเป็นหลอดแก้วควอตซ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3.5 ซม. ยาวประมาณ 12 ซม. ภายในบรรจุด้วยก๊าซที่ต้องการ ภายนอกพันโดยรอบด้วยโลหะตัวนำทำหน้าที่เป็น RF antenna ส่งคลื่นวิทยุเข้าไปกระตุ้นให้ก๊าซแตกตัว [8] แหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้ คือที่ถูกนำไปใช้ในเครื่องเร่งอนุภาคในรูปที่ 1.5 (ข) รูปที่ 1.7 และรูปที่ 4.1 และ (ข) แผนภาพแสดงลักษณะทั่วไปของเครื่อง PIII ซึ่งห้องพลาสมามีขนาดใหญ่ขึ้นมาก RF antenna จึงถูกใส่ไว้ข้างใน [9]*

จ) เครื่องกำเนิดลำไอออนที่เป็นกลางขนาด 10 kV (10-kV Ion Beam Neutralizer) มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.6 มีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน โดยส่วนแรกคือแหล่งกำเนิดไอออนชนิดคลื่นวิทยุ สามารถดึงไอออนออกมาได้ด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 10 kV และมีค่ากระแสไอออนในเรือน 10 ไมโครแอมแปร์ ส่วนที่สองมีหน้าที่ทำให้ไอออนเป็นกลางทางไฟฟ้า (neutralization) ซึ่งใช้วิธีกระตุ้นลำไอออนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และส่วนที่สามคือห้องยิงฝัง (implantation chamber) เครื่องนี้สร้างขึ้นมาเมื่อปีพ.ศ. 2548 *[10]* เพื่อใช้ศึกษาผลของประจุไฟฟ้าของไอออนที่มีต่อสารตัวอย่างที่เป็นวัสดุชีวภาพ เปรียบเทียบกันระหว่างการถูกยิงด้วยไอออนที่มีประจุไฟฟ้ากับการถูกยิงด้วยไอออนที่ถูกปลดประจุไฟฟ้าออกแล้ว สารตัวอย่างที่เคยนำมาใช้ในการศึกษาได้แก่ ดีเอ็นเอ เยื่อหุ้มเซลล์ และ เซลล์แบคทีเรีย *[11,12]*



รูปที่ 4.6 *ภาพถ่ายเครื่องกำเนิดลำไอออนที่เป็นกลางขนาด 10 kV ภายในกล่องโลหะสเตนเลสรูปทรงสี่เหลี่ยมคือบริเวณที่ไอออนถูกทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้าและเป็นตำแหน่งที่เกิดการยิงฝังวัตถุตัวอย่าง*

4.3 การชักนำการกลายพันธุ์ด้วยลำไอออนเพื่อการปรับปรุงพืช

การปรับปรุงพันธุ์พืชโดยการชักนำให้เกิดการกลายพันธุ์ด้วยรังสีที่แผ่ออกมาจากสารกัมมันตรังสีนั้นมีมานานแล้วพอสมควรในประเทศไทย นั่นคืออาจนับได้ตั้งแต่เมื่อปีพ.ศ. 2508 ที่ ดร. กาญจนา กล้าแข็ง นักวิชาการเกษตรชำนาญการพิเศษของกรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้เริ่มใช้รังสีแกมมาพลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV ที่แผ่ออกมาจากสารไอโซโทปกัมมันตรังสีโคบอลต์-60 (Co-60) ทำการปรับปรุงพันธุ์ข้าว โดยการนำพันธุ์ข้าวเจ้าพื้นเมืองขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีลักษณะดีคือนุ่มและมีกลิ่นหอม มาอาบรังสีแกมมาด้วยความเข้มนับสิบกิโลแรด (krad) ในที่สุดได้ข้าวพันธุ์กลายหลายสายพันธุ์ที่มีคุณลักษณะน่าสนใจหนึ่งในนั้นก็ได้แก่ข้าวเหนียว กข 6 ที่มีลักษณะและคุณภาพดีคือเหนียวนุ่มและมีกลิ่นหอม เป็นที่ยอมรับของเกษตรกรและผู้บริโภคทั้งในประเทศไทย ลาวและเวียดนาม ความสำเร็จของการประยุกต์ใช้ปรมาณูในทางสร้างสรรค์นี้ของกรมการข้าวได้เป็นที่ประจักษ์อย่างโดดเด่นต่อชาวโลกไปเมื่อไม่นานมานี้ จากการที่ประเทศไทยเป็น 1 ใน 12 ประเทศที่ได้รับรางวัล Achievement Awards in Plant Breeding จากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) ที่กรุงเวียนนา สาธารณรัฐออสเตรีย เมื่อเดือนกันยายน พ.ศ. 2557 นอกจากนั้นในเดือนเมษายนที่ผ่านมาก็มีข่าวการประสบความสำเร็จที่น่าสนใจมากของกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ในการปรับปรุงพันธุ์ส้มโชกุนไร้เมล็ด โดยเริ่มขึ้นตั้งแต่เมื่อปี พ.ศ. 2543 ด้วยการนำกิ่งพันธุ์ส้มโชกุนจากศูนย์วิจัยและพัฒนาเกษตรแพร่มาฉายรังสีแกมมาแบบเฉียบพลันด้วยปริมาณรังสี 4 กิโลแรด หรือประมาณ 40 เกรย์ (Gy) จากนั้นนำไปติดตากับต้นตอส้ม แล้วติดตามตัดกิ่งตาอีกหลายรุ่น จนในที่สุดได้ต้นที่ไม่มีเมล็ดหรือมีเมล็ดน้อย ซึ่งต้องใช้เวลานับทศวรรษ *[13]* ปัจจุบันกรมการข้าวกำลังเริ่มทดสอบการใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนแทนที่การใช้รังสีแกมมา *[14]*

รังสีแกมมานั้นต่างกับอนุภาคอิเล็กตรอนไม่น้อยเลย โดยตัวตนจริง ๆของรังสีแกมมาก็คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง แต่ก็มีความเป็นอนุภาคด้วย ตามทฤษฎีทวิภาคของคลื่น – อนุภาค (wave-particle duality theory) เรียกว่าอนุภาคโฟตอน (photon) ซึ่งเป็นอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าและไม่มีมวล ส่วนอนุภาคอิเล็กตรอนนั้นถึงแม้ว่าจะมีมวลน้อย แต่ก็ต้องถือว่ามีมวลและมีค่าประจุไฟฟ้าด้วย

คือ -1.602 x 10^{-19} คูลอมบ์ หรือเรียกสั้น ๆว่า -1e แต่ถ้านำไปเทียบกับไอออน จะเห็นความแตกต่างที่มากยิ่งขึ้นเพราะไอออนมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอนตั้งแต่ 1,836 เท่าหรือมากกว่านั้น (ขึ้นอยู่กับชนิดของไอออน) และมีค่าประจุไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า +1e (ขึ้นอยู่กับชนิดของไอออน) ตามหลักการทางฟิสิกส์แล้ว อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโฟตอน อิเล็กตรอน และไอออนกับวัตถุจึงแตกต่างกันมาก และโดยเฉพาะกับวัตถุที่เป็นวัสดุชีวภาพด้วยแล้ว ไอออนจะมีประสิทธิภาพในการก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้สูงกว่ารังสีแกมมามาก เพราะไอออนต่าง ๆ มีค่า LET สูงกว่าของรังสีแกมมาจากไอโซโทปกัมมันตรังสี Co-60 ระหว่าง 300 ถึง 6,000 เท่า ดังจะเห็นได้จากบทที่ 2 อนุภาคที่มีค่า LET สูงกว่าจะมีอำนาจการเปลี่ยนแปลงวัสดุชีวภาพสูงกว่า

คณะนักวิจัยที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จึงได้เลือกที่จะทดลองปรับปรุงพันธุ์พืชหลายชนิด เช่นข้าว ข้าวโพด พืชผัก และ ไม้ดอก โดยการชักนำการกลายพันธุ์ด้วยไอออนที่ผลิตจากเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ชนิดต่าง ๆตามที่กล่าวมา ซึ่งล้วนเป็นเครื่องมือที่ก็คล้ายกับอุปกรณ์ทางไฟฟ้าทั่วไป ที่เมื่อเปิดสวิทช์ ไอออนก็พุ่งออกมา ครั้นเมื่อปิดสวิทช์ ไอออนก็ดับลงทันที ไม่มีรังสีที่มีอันตรายใด ๆทั้งตอนเปิดและหลังปิด ดังนั้นจึงสามารถติดตั้งในอาคารธรรมดาทั่วไปได้ ซึ่งต่างจากกรณีของต้นกำเนิดรังสีแกมมาอย่าง Co-60 มาก

ในทางฟิสิกส์นั้น ไอออนที่มีพลังงานจลน์จะสามารถวิ่งทะลุผ่านผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปภายในเซลล์ จนถึงนิวเคลียส และชนเข้ากับดีเอ็นเอ สามารถทำให้โครงสร้างของดีเอ็นเอเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้ ในทางชีววิทยานั้นเมื่อดีเอ็นเอถูกทำให้มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดมีการซ่อมแซมตัวเองโดยที่เซลล์บางเซลล์อาจจะมีลำดับเบสบนดีเอ็นเอเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม การเปลี่ยนแปลงข้อมูลทางพันธุกรรมนี้หากอยู่ในยีน (gene) และเมื่อเกิดการถ่ายทอด จะปรากฏให้เห็นในรุ่นลูกต่อมา เรียกว่าเกิดการกลายพันธุ์ (mutation) ซึ่งการกลายพันธุ์จะเกิดแบบสุ่ม (random) ไม่สามารถกำหนดเอาไว้ก่อนได้ แต่สามารถที่จะคัดเลือกลักษณะพันธุ์กลายที่ต้องการหรือที่มีคุณลักษณะเฉพาะดีกว่าเดิมได้

กระบวนการชักนำให้เกิดการกลายพันธุ์เริ่มด้วยการเตรียมวัสดุตัวอย่างทางชีวภาพ เช่นเมล็ดหรือเนื้อเยื่อ กำหนดเงื่อนไขของลำไอออนเช่น ชนิดไอออน ค่า

พลังงานและความเข้ม ทำการยิงฝังด้วยลำไอออน ทำการเพาะเลี้ยงวัสดุตัวอย่างที่ถูกยิงแล้ว ดูแลรักษาสายพันธุ์กลาย คัดเลือกพันธุ์กลายที่มีคุณลักษณะเฉพาะที่จะเป็นประโยชน์ ทำการขยายพันธุ์และติดตามตรวจสอบความเสถียร (stability) ของการกลายพันธุ์ในรุ่นที่ 2-5 นอกจากนั้นยังมีการวิเคราะห์ทั้งในเชิงกายภาพและชีวภาพของพืชกลายพันธุ์ และศึกษากลไกที่เกี่ยวข้องด้วย จะเห็นได้ว่างานวิจัยเรื่องนี้มีความเป็นสหวิทยาการ (interdisciplinary) สูง ต้องอาศัยองค์ความรู้และความเชี่ยวชาญทั้งทางด้านวิชาฟิสิกส์ ชีววิทยา และวิชาการเกษตรร่วมกัน

4.3.1 ข้าว

เนื่องจากข้าวมีความสำคัญกับสังคมไทยมาก เป็นวิถีชีวิตของคนไทย นอกจากจะเป็นอาหารหลักที่บริโภคสืบเนื่องกันมาตั้งแต่ครั้งโบราณกาล ยังเป็นจุดศูนย์กลางที่ก่อให้เกิดความสามัคคี การร่วมแรงร่วมใจ และการเอื้อเฟื้อเผื่อแผ่ต่อกันผ่านทางรูปแบบของวัฒนธรรมและประเพณีต่าง ๆ ปัจจุบันยังเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศด้วย คณะนักวิจัยของโครงการจึงได้เลือกข้าวเป็นพืชชนิดแรกสุดที่จะทำการทดลองชักนำการกลายพันธุ์ด้วยลำไอออน โดยให้ความสนใจกับข้าวท้องถิ่น (Oryza sativa indica) ได้แก่ข้าวก่ำดอยสะเก็ด (เป็นข้าวเหนียวดำ) และ ข้าวขาวหอมมะลิ105 *[15, 16]* การดำเนินการมีขั้นตอนหลักดังนี้ เปลือกหุ้มเมล็ดข้าวด้านปลายที่มีตัวอ่อนข้าว (คัพภะ) จะถูกแกะออก (รูปที่ 4.7 (ก)) นำไปเรียงไว้ในเบ้าที่ทำขึ้นมาเป็นพิเศษ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) และ (ค) เพื่อบังคับให้



(ก) *(ข)* *(ค)*

รูปที่ 4.7 *(ก) และ (ข) นักศึกษากำลังแกะเปลือกและหยอดเมล็ดข้าวเหล่านั้นลงในรูบนเบ้า โดยหันปลายเมล็ดด้านตัวอ่อนข้าวชี้ออกด้านนอก (ค) เบ้ามีลักษณะเป็นแผ่นกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม.และหนา 1 ซม. ทำจากแผ่นทองแดง เพื่อช่วยในการกระจายและระบายความร้อนที่เกิดขึ้นขณะที่ทำการยิงฝังไอออน จะเห็นได้ว่าในการทดลองครั้งหนึ่ง ๆสามารถยิงข้าวได้นับเป็นร้อยเมล็ดพร้อม ๆกัน*

ข้าวทุกเมล็ดหันด้านคัพภะที่ไร้เปลือกป้องกันเข้าหาลำไอออน ซึ่งจะมีโอกาสสูงที่จะถูกไอออนพุ่งชนโดยตรง

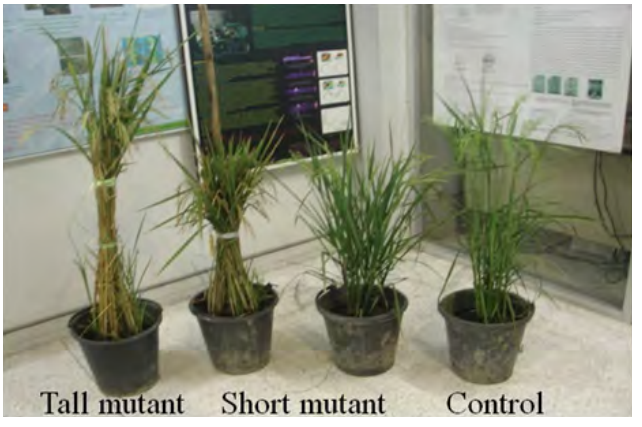
ปรกติแล้วเมล็ดข้าวจะถูกยิงด้วยลำไอออนไนโตรเจนที่มีพลังงานหลายสิบกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV)และมีความเข้มของลำไอออนในเรือน 10^{16} ถึง 10^{17} ไอออน / ตร. ซม. หลังจากนั้นเมล็ดข้าวจะถูกนำออกมาจากห้องเป้าของเครื่องเร่งอนุภาค แล้วนำไปเพาะในแปลง (รูปที่ 4.8) ในทุกระยะของการเติบโต ต้นข้าวจะถูกเฝ้าสังเกตอย่างใกล้ชิด เฉพาะต้นที่เปลี่ยนแปลงไปในทางที่จะเป็นประโยชน์มากขึ้นกว่าสายพันธุ์ดั้งเดิมจะถูกคัดเก็บไว้ ต้นพันธุ์กลายเหล่านี้จะถูกนำเมล็ดไปปลูกต่ออีกหลายรุ่นจนแน่ใจว่าลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นเสถียรแล้ว (รูปที่ 4.9) จากการวิจัยนี้ได้มีข้าวพันธุ์กลายเกิดขึ้นหลายสิบสายพันธุ์ ได้มีการนำแป้งของข้าวพันธุ์กลายไปทดสอบกับสารละลายไอโอดีนพบว่าย้อมติดสีน้ำเงินเข้ม แต่ย้อมไม่ติดในกรณีของข้าวพันธุ์ดั้งเดิม สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าลำไอออนพลังงานต่ำสามารถชักนำให้เกิดการกลายพันธุ์ในข้าวเหนียวได้และเมื่อดูจากลายพิมพ์ดีเอ็นเอก็ได้เปิดเผยให้เห็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางพันธุกรรมต่าง ๆกันในเมล็ดข้าวที่เกิดจากข้าวที่ถูกยิงด้วยไอออนในรุ่นที่ 2 ซึ่งเป็นการยืนยันว่าได้เกิดมีการดัดแปลงพันธุกรรมขึ้นจริง สำหรับข้าวขาวหอมมะลินั้น ได้พบข้าวพันธุ์กลายอีกหลายสายพันธุ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา (phenotypic difference) เช่นในด้านความสูงของลำต้น (รูปที่ 4.10) หรือการที่ไม่ไวแสงและออกรวงเร็ว หรือในลักษณะสีของลำต้นและเมล็ดข้าว (รูปที่ 4.11)



รูปที่ 4.8 *การเพาะปลูกเมล็ดข้าวที่ถูกยิงด้วยลำไอออนแล้ว (ภาพได้รับความเอื้อเฟื้อจาก ดร. บุญรักษ์ พันธ์ไชยศรี)*



รูปที่ 4.9 *แปลงทดลองข้าวในรุ่นที่ 2 ที่เพาะปลูกจากข้าวที่ได้จากรุ่นที่ 1 (ภาพได้รับความเอื้อเฟื้อจาก ดร. บุญรักษ์ พันธ์ไชยศรี)*



รูปที่ 4.10 *เปรียบเทียบความสูงของลำต้นของข้าวพันธุ์กลาย 3 สายพันธุ์ที่มีทั้งสูงกว่าและเตี้ยกว่าพันธุ์ดั้งเดิม (ด้านขวามือสุด หรือ control) ที่เป็นข้าวขาวหอมมะลิ 105*



รูปที่ 4.11 *แสดงการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของข้าวพันธ์กลายสายพันธุ์ BKOS6 เมื่อเทียบกับข้าวพันธุ์ดั้งเดิมที่ไม่ได้เกิดจากการถูกยิงด้วยลำไอออน คือข้าวขาวหอมมะลิ 105 (KDML 105) และข้าวก่ำดอยสะเก็ด (purple rice) เช่นลำต้นของข้าวขาวหอมมะลิจะมีสีเขียว แต่ข้าวพันธุ์กลาย BKOS6 จะมีสีม่วงแซม รูปร่างและสี ทั้งภายนอกและภายในของเมล็ดข้าวกล้องก็จะต่างกันด้วย*

ปัจจุบันองค์ความรู้และประสบการณ์ดังกล่าวนี้ได้รับการต่อยอดเป็นโครงการคัดเลือกและทดสอบข้าวพันธุ์กลายจากผลของลำไอออนโดยเฉพาะ อันมี ดร. บุญรักษ์ พันธ์ไชยศรี นักวิจัยของสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อดีตนักศึกษาปริญญาเอกที่ทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้เป็นผู้รับผิดชอบโครงการ โดยได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยอย่างสำคัญระหว่างปีพ.ศ. 2555 – 2557 และ 2557-2560 จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) หรือ สวก. ขณะนี้ข้าวพันธุ์กลายที่ผ่านการคัดเลือกจำนวน 5 สายพันธุ์กำลังถูกทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆตามมาตรฐานของกรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ภายใต้โครงการวิจัยร่วมระหว่างมหาวิทยาลัยเชียงใหม่กับกรมการข้าว เพื่อเก็บข้อมูลประกอบในการเสนอพันธุ์ข้าวเพื่อขอการรับรองพันธุ์

4.3.2 ไม้ดอกและพืชผัก

เมล็ดพันธุ์และตา (รูปที่ 4.12) ของไม้ดอกหลายสายพันธุ์ เช่น พิทูเนีย กุหลาบ เยอบีร่า และ เบญจมาศ ถูกนำมาใช้ในการทดลอง *[17]* หลังจากถูกยิงด้วยลำไอออน เมล็ดหรือตาจะถูกนำไปเพาะ ซึ่งได้พบการเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกในหลายรูปแบบ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.13 – 4.16 เมื่อตรวจสอบลักษณะลายพิมพ์ดีเอ็นเอก็ได้พบว่ามีความแตกต่างอย่างชัดเจนของแถบลายพิมพ์ดีเอ็นเอในต้นที่ผ่านการยิงด้วยไอออน เมื่อเทียบกับต้นควบคุมที่เป็นสายพันธุ์ดั้งเดิม

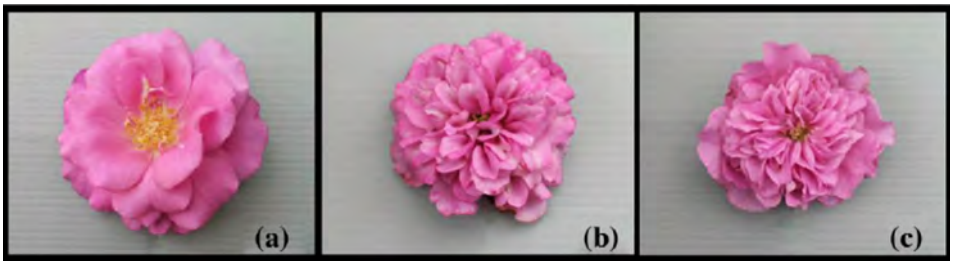


รูปที่ 4.12 *ตาของไม้ดอกกำลังถูกจัดเตรียมเพื่อการชักนำการกลายพันธุ์ด้วยลำไอออน*

ได้ทดลองยิงไอออนใส่เมล็ดของแตงกวา *(Curcumis sativus)* ด้วย ซึ่งได้สังเกตเห็นว่าดอกของต้นที่ผ่านการยิงด้วยไอออนมีขนาดรังไข่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับต้นควบคุม และในบางต้นเกสรตัวเมียก็ได้เปลี่ยนไปเป็นเกสรตัวผู้ และเมื่อถ่ายละอองเรณูข้ามดอก (cross-pollination) ระหว่างดอกตัวเมียที่มีรังไข่ขนาดใหญ่กับดอกตัวผู้ของพันธุ์ปรกติ ทำให้เกิดผลที่มีลักษณะป้อมสั้น (รูปที่ 4.17)



รูปที่ 4.13 *เปรียบเทียบต้นดอกเบญจมาศที่ผ่านการยิงด้วยลำไอออน (ขวา) กับต้นควบคุมที่เพาะจากเมล็ดที่ไม่ได้ถูกยิงด้วยลำไอออน (ซ้าย)*



รูปที่ 4.14 *ลักษณะของดอกกุหลาบที่เกิดจากตาที่ถูกยิงด้วยลำไอออนไนโตรเจนความเข้ม 1x10^{16} ไอออน / ตร.ซม. ที่มีพลังงาน 80 keV (รูปกลาง) และ 100 keV (รูปขวา) เปรียบเทียบกับต้นควบคุม (รูปซ้ายสุด)*



รูปที่ 4.15 *เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของดอกและใบของพิทูเนีย ที่เกิดจากเมล็ดที่ถูกยิงด้วยลำไอออนไนโตรเจน พลังงาน 60 keV แต่มีความเข้มลำไอออนแตกต่างกัน (a) ลักษณะดอกของต้นควบคุม (b และ c) ได้รับ 1x10^{16} ไอออน / ตร.ซม. (d) ได้รับ 8x10^{16} ไอออน / ตร.ซม. (e) ได้รับ1x10^{17} ไอออน / ตร.ซม. (f) ได้รับ 6x10^{16} ไอออน / ตร.ซม. (g) ลักษณะใบของต้นควบคุม (h) ได้รับ 6x10^{16} ไอออน / ตร.ซม. (i) ได้รับ 1x10^{17} ไอออน / ตร.ซม.*



รูปที่ 4.16 *ดอกเยอบีร่าเกิดมีสองสีเมื่อเจริญจากเมล็ดที่ถูกยิงด้วยลำไอออนไนโตรเจน เมล็ดที่ไม่ได้ถูกยิงด้วยลำไอออนจะให้ดอกสีแดงเพียงสีเดียว*



(ก) (ข)

รูปที่ 4.17 *เปรียบเทียบ (ก) ลักษณะดอกของแตงกวาที่เกิดจากเมล็ดที่ไม่ได้ถูกยิงด้วยไอออน (ซ้าย) กับที่เกิดจากเมล็ดที่ถูกไอออนยิง (ขวา) (ข) ลักษณะภายนอก และภายในของผลแตงกวาระหว่างผลปรกติ (ด้านซ้าย) กับผลที่เกิดจากต้นเพศเมียที่มีรังไข่ขนาดใหญ่กับต้นเพศผู้ที่เป็นต้นควบคุม (ด้านขวา)*

4.3.3 อื่นๆ

Bacillus licheniformis (B. licheniformis) เป็นแบคทีเรียในดินที่เป็นปฏิปักษ์กับเชื้อราก่อโรคในดอกปทุมมา *(Curcuma alismatiforia gagnep.)* ในความพยายามที่จะควบคุมโรคแอนแทรคโนส (anthracnose) ที่เกิดจากเชื้อราในปทุมมาโดย *B. licheniformis* นี้ คณะนักวิจัยของโครงการได้ศึกษาหายีนในแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับกลไกการเป็นปฏิปักษ์ต่อเชื้อรา โดยการนำแบคทีเรียที่มีความสามารถในการเป็นปฏิปักษ์มาระดมยิงด้วยไอออน ให้เกิดการกลายพันธุ์สูญเสียความสามารถในการเป็นปฏิปักษ์ จากการเปรียบเทียบลายพิมพ์ดีเอ็นเอระหว่างแบคทีเรียปรกติกับแบคทีเรียพันธุ์กลายนี้ ได้พบแถบดีเอ็นเอที่ปรากฏในแบคทีเรียปรกติ แต่ไม่พบในแบคทีเรียพันธุ์กลาย เมื่อนำชิ้นส่วนดีเอ็นเอดังกล่าวมาวิเคราะห์โดยการหาลำดับเบส พบว่าคือยีนไลเปส (lipase) ทำให้อธิบายถึงกลไกการยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ *[18]*

4.4 การชักนำการส่งถ่ายยีนด้วยลำไอออนพลังงานต่ำ

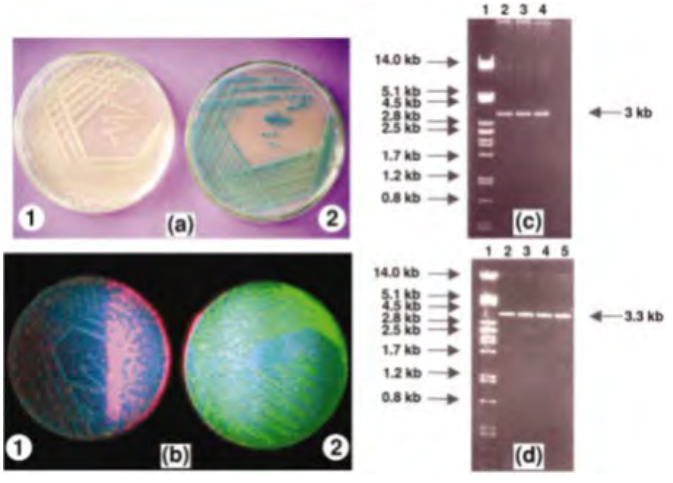
การระดมยิงด้วยลำไอออนที่ถูกควบคุมอย่างดีสามารถดัดแปลงส่วนที่ห่อหุ้มเซลล์ได้ โดยส่งผลให้ส่วนนี้บางลง เกิดมีช่องทางเข้า สมบัติทางไฟฟ้าของผนังเซลล์เปลี่ยนไป ในที่สุดค่าสภาพการยอมให้ซึมผ่าน (permeability) ของเซลล์เพิ่มขึ้น จนดีเอ็นเอจากภายนอกสามารถลอดผ่านเข้าไปข้างในเซลล์ได้ การทดลองมี 3 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ การระดมยิงไอออนใส่เซลล์ จากนั้นนำเซลล์ที่ถูกยิงแล้วมาแช่

ในสารละลายดีเอ็นเอ และติดตามการแสดงออกของยีน ซึ่งถ้าเห็นว่าเกิดขึ้นจริง ก็ถือได้ว่าการส่งถ่ายดีเอ็นเอประสบความสำเร็จ เนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์นั้นบางมากที่หนาสุดอยู่ในเรือนร้อยไมโครเมตร ที่บางสุดจะหนาประมาณ 100 นาโนเมตรหรือน้อยกว่า ดังนั้นพลังงานและความเข้มของลำไอออนที่ใช้จะต้องเลือกสรรอย่างพอเหมาะเพื่อที่ระยะทางที่ไอออนทะลวงเข้าไปได้จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับความหนาของส่วนที่ปกป้องเซลล์

ถึงแม้เงื่อนไขของการยิงฝังไอออนจะค่อนข้างเจาะจงอย่างมาก แต่ก็ยังไม่เหลือบ่ากว่าแรงที่จะชักนำให้เกิดการส่งถ่ายดีเอ็นเอเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรีย *Escherchia coli (E. coli)* ได้ ทั้งนี้แบคทีเรีย *E. coli* จะถูกระดมยิงด้วยลำไอออนไนโตรเจนและลำไอออนอาร์กอนที่มีพลังงาน 26 keV และความเข้มลำไอออนในช่วง $0.5x10^{15}$ – $4x10^{15}$ ไอออน / ตร.ซม. หลังจากนั้นจะมีการนำเซลล์ของแบคทีเรียที่ถูกยิงแล้วไปแยกผสมกับพลาสมิด (plasmid) 3 ชนิด คือ pGEM2, pGEM-T easy และ pGFP เพื่อให้เกิดมีการส่งถ่ายดีเอ็นเอเข้าไปในเซลล์แบคทีเรีย โดยดีเอ็นเอในพลาสมิดแต่ละชนิดบรรจุยีนเครื่องหมาย (marker gene) ที่แตกต่างกัน รูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงผลของการผสมกันระหว่างเซลล์แบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ DH5α ที่ถูกยิงด้วยไอออนอาร์กอนกับพลาสมิด pGEM-T easy (บรรจุยีนเครื่องหมาย *lacZ*) และพลาสมิด pGFP (บรรจุยีนเครื่องหมาย *GFP*) เมื่อสังเกตุผ่านกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนต์จะเห็นโคโลนีสีน้ำเงิน (การเรืองแสงของยีนเครื่องหมาย *lacZ*) และโคโลนีสีเขียว (การเรืองแสงของยีนเครื่องหมาย *GFP*) จากแบคทีเรียกลุ่มถูกยิงที่กำลังเจริญอยู่บนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ แต่จะไม่เห็นการเรืองแสงใด ๆจากกลุ่มแบคทีเรีย *E. coli* ที่ยังไม่ได้ถูกยิง ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่าดีเอ็นเอจะถูกส่งถ่ายเข้าไปในเซลล์แบคทีเรียที่ถูกยิงมาแล้วเท่านั้น แต่จะไม่เข้าไปในเซลล์แบคทีเรียควบคุมที่ยังไม่ถูกยิง

นอกจากแบคทีเรียแล้วยังได้ทำการทดลองกับยีส (yeast) ด้วย โดยยีนเครื่องหมายสองชนิดคือ *GFP* และ *lipoic acid synthetase* ได้ถูกส่งถ่ายเข้าไปในยีส ชื่อ *Saccharomyces cerevisiae* สายพันธุ์ *W303C*, *MATA*a *ura3-52 his3- 200 lys2-801* โดยการยิงเซลล์ของยีสด้วยไอออนไนโตรเจน *[21]* หลังจากนั้นนำไปผสมกับพลาสมิด 2 ชนิดคือ pYGFP (บรรจุยีนเครื่องหมาย *GFP*) และ pYlip (บรรจุยีน

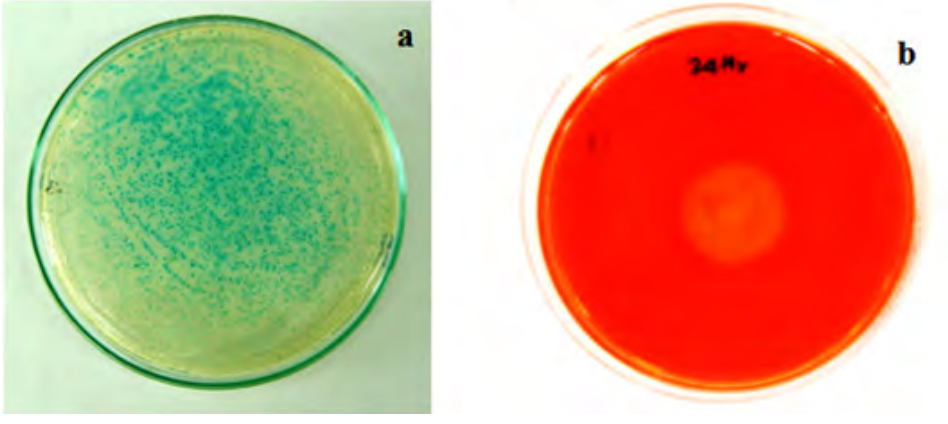
เครื่องหมาย *lipoic acid synthetase*) การแสดงออกของยีนเครื่องหมาย *GFP* ในยีสก็เหมือนกับในกรณีของแบคทีเรียเช่นกัน คือเห็นได้จากโคโลนีของยีสที่เรืองแสงสีเขียวภายใต้แสง UV ส่วนการแสดงออกของยีนติดตาม *lipoic acid synthetase* ตรวจสอบด้วยวิธี SDS-PAGE สามารถตรวจพบผลผลิตของยีน *lipoic acid synthetase* ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 34 กิโลดาลตัน (kDa) เฉพาะในยีสที่ถูกยิงและผสมกับพลาสมิด pYlip ซึ่งมียีนติดตาม *lipoic acid synthetase* จากหลักฐานนี้ (การตรวจพบยีนเครื่องหมาย *GFP* และยีนติดตาม *lipoic acid synthetase*) แสดงว่าไอออนไนโตรเจนใช้ในการส่งถ่ายยีนเข้าเซลล์ยีสได้



รูปที่ 4.18 *การพิสูจน์การส่งถ่ายยีน 2 ชนิดเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรีย E. coli โดยการชักนำด้วยลำไอออน (a) คือรูปถ่ายภายใต้แสง UV ของจานเพาะแบคทีเรีย 2 จาน โดยจานหมายเลข 1 คือกลุ่มแบคทีเรียที่ไม่ได้ถูกยิง หมายเลข 2 คือกลุ่มแบคทีเรียที่ถูกยิงมาแล้ว โดยแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มได้ถูกนำไปผสมกับพลาสมิด pGEM-T easy จะเห็นได้ว่าจานขวาเท่านั้นที่เรืองแสงสีน้ำเงิน (b) คือรูปถ่ายภายใต้แสง UV ของจานเพาะแบคทีเรีย 2 จาน โดยจานหมายเลข 1 คือกลุ่มแบคทีเรียที่ไม่ได้ถูกยิง จานหมายเลข 2 คือกลุ่มแบคทีเรียที่ถูกยิงมาแล้ว โดยแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มได้ถูกนำไปผสมกับพลาสมิด pGFP จะเห็นได้ว่าจานขวาเท่านั้นที่เรืองแสงสีเขียว ส่วนรูป (c) และ (d) คือผลการวัดน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งคัดแยกด้วยเทคนิค Gel Electrophoresis ของทั้งสองกรณี โดยแถวที่ 1 แสดงน้ำหนักโมเลกุลของยีนเครื่องหมาย ส่วนแถวอื่น ๆแสดงน้ำหนักโมเลกุลของดีเอ็นเอที่ถูกตัดด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะต่างชนิด [19, 20]*

นอกจากนั้นคณะนักวิจัยของโครงการยังได้ทดลองใช้ไอออนที่อยู่ในพลาสมาที่ผลิตโดยเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ PIII (รูปที่ 4.4) ด้วยในการชักนำให้เกิดการส่งถ่ายดีเอ็นเอ *[22]* โดยทดลองใช้ทั้งพลาสมาของอาร์กอนและไนโตรเจน ตัวอย่างวัตถุชีวภาพที่ใช้คือแบคทีเรีย *E. coli* ได้ทดลองล่อให้ไอออนวิ่งเข้าชนแบคทีเรียด้วยศักย์ไฟฟ้า 3 ค่าคือ 2.5, 5 และ 10 kV โดยต่อไฟเข้ากับฐานวางถาดหลุมใส่แบคทีเรีย เซลล์ของแบคทีเรียที่อยู่ในหลุมจึงถูกระดมยิงด้วยไอออนพลังงาน

ต่ำที่มีความเข้มอยู่ในช่วง $1x10^{12}$ – $1x10^{17}$ ไอออน / ตร.ซม. หลังจากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการส่งถ่ายดีเอ็นเอ ความสำเร็จของการส่งถ่ายดูได้จากการแสดงออกของยีนเครื่องหมาย (รูปที่ 4.19) ได้พบว่าความสำเร็จของการส่งถ่ายดีเอ็นเอจะขึ้นอยู่กับความเข้มของไอออน พลังงานจลน์ของไอออน และขนาดของดีเอ็นเอ (ตารางที่ 4.1) ความสำเร็จของการส่งถ่ายด้วยเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบ PIII ตรวจได้จากการพบยีนติดตามและหน้าที่ของยีนนั้นในเซลล์แบคทีเรีย กลไกการส่งถ่ายอาจเข้าใจได้ดีขึ้นโดยการสังเกตลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ จะเห็นได้จากรูปที่ 4.20 ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มของไอออนมากขึ้น เซลล์แบคทีเรียจะเกิดการเสียหายมากขึ้นตามไปด้วย จึงเป็นเฉพาะของกรณีที่เซลล์แบคทีเรียเกิดการเสียหายไม่มาก ส่วนที่ห่อหุ้มเซลล์เกิดเป็นช่องที่พอเหมาะ การส่งถ่ายดีเอ็นเอก็จะประสบความสำเร็จในกรณีนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการส่งถ่ายดีเอ็นเอแบบที่ใช้ลำไอออนจากเครื่องเร่งอนุภาค วิธีที่ใช้ไอออนจากพลาสมาจะใช้งบประมาณน้อยกว่า แต่มีประสิทธิภาพมากกว่า



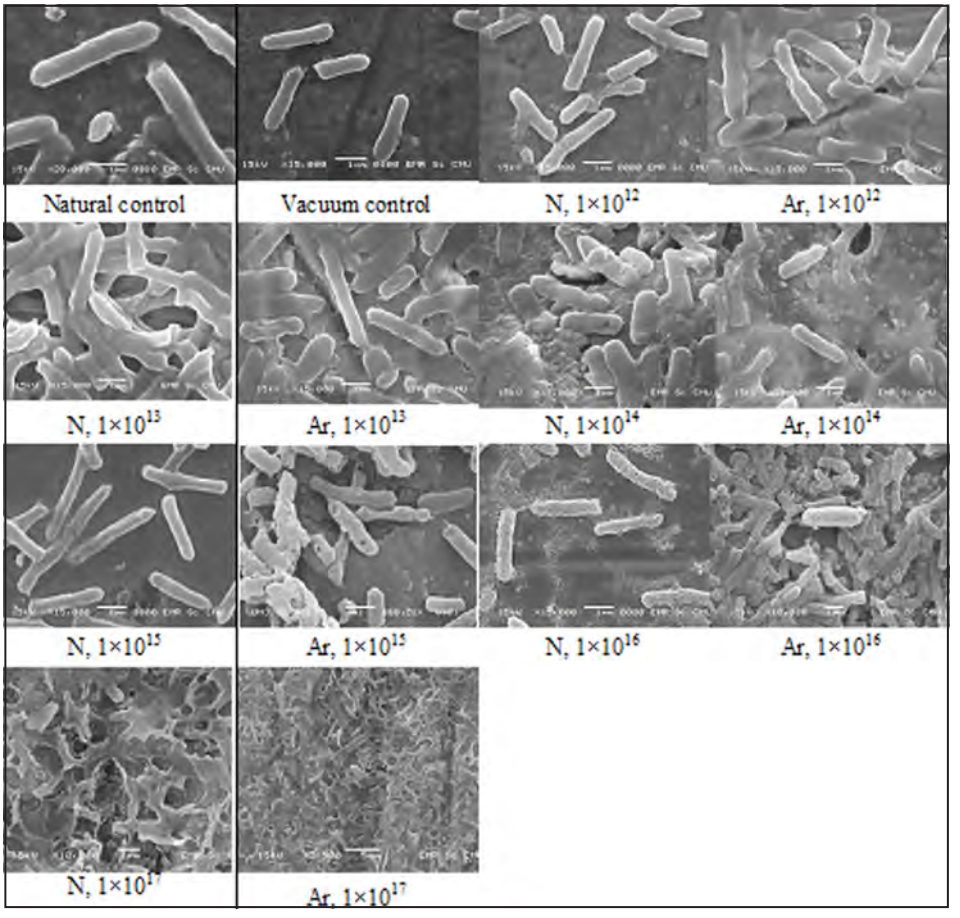
รูปที่ 4.19 *ภาพถ่ายจานเพาะเชื้อ (เส้นผ่าศูนย์กลาง 9 ซม.) ที่ใช้ยีนเครื่องหมาย 2 ชนิด (ซ้าย) โคโลนีของ E. coli ที่เลี้ยงบนอาหารคัดเลือกเกิดการเรืองแสงสีน้ำเงิน แสดงว่าพลาสมิด pTZ57R ที่มียีนเครื่องหมายถูกส่งถ่ายเข้าไปในเซลล์ E. coli ที่ถูกยิงด้วยไอออนจากพลาสมาไนโตรเจนได้ (ขวา) การแสดงออกของยีนเครื่องหมาย bglC โดยการใช้สีย้อม Congo red ซึ่งดูได้จากบริเวณใสเป็นวงตรงกลางจานที่เป็นโคโลนีของแบคทีเรียที่ถูกส่งถ่าย ในทั้งสองกรณีใช้ศักย์ไฟฟ้าล่อ -2.5 kV และมีความเข้มไอออน $1x10^{15}$ ไอออน/ตร.ซม.*

ตารางที่ 4.1 *สรุปผลของความเข้มของไอออนที่มีต่อการส่งถ่ายดีเอ็นเอเข้าสู่เซลล์ E. coli ที่ (A) ผสมกับพลาสมิด pTZ57R (ขนาดโมเลกุล = 2.8 kbp) และ (B) ผสมกับพลาสมิด pBI121 (ขนาดโมเลกุล = 14.7 kbp) หลังถูกระดมยิงด้วยไอออนจากอาร์กอนพลาสมา หรือ ไนโตรเจนพลาสมา ที่ถูกล่อด้วยศักย์ไฟฟ้า -2.5 kV สัญลักษณ์บวก (+) หมายถึง ดีเอ็นเอถูกส่งถ่ายเข้าสู่เซลล์ได้สำเร็จ ส่วนสัญลักษณ์ลบ (–) หมายถึงตรวจไม่พบ*

เงื่อนไขของการยิงไอออน	เซลล์ *E. coli* ที่ยังไม่ถูกยิง		ถูกยิงแล้วด้วยไอออนอาร์กอน		ถูกยิงแล้วด้วยไอออนไนโตรเจน	
ความเข้ม (ไอออน/ตร.ซม.)	A	B	A	B	A	B
1×10^{12}	-	-	+	-	+	+
5×10^{12}	-	-	+	+	+	+
1×10^{13}	-	-	+	+	+	+
5×10^{13}	-	-	+	+	+	+
1×10^{14}	-	-	+	-	+	+
1×10^{15}	-	-	-	-	+	+
1×10^{16}	-	-	-	-	+	-
1×10^{17}	-	-	-	-	-	-

คณะนักวิจัยของโครงการยังได้ทำการทดลองกับเซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมด้วย รวมถึงเซลล์ของมนุษย์ เทคนิคการใช้ลำไอออนพลังงานต่ำชักนำให้เกิดการส่งถ่ายยีนเข้าสู่เซลล์มะเร็งของมนุษย์ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการส่งถ่ายดีเอ็นเอที่ไม่ต้องอาศัยไวรัส (non-viral DNA transfection) *[23]* ในเรื่องนี้ต้องใช้วิธีการเตรียมเซลล์ตัวอย่างที่แตกต่างจากเรื่องที่ผ่านมา กล่าวคือต้องมีการแช่แข็งเซลล์ด้วยไนโตรเจนเหลวและปิดทับด้านบนด้วยแผ่นอาหารแช่แข็งบาง ๆเพื่อช่วยรักษาให้เซลล์อยู่รอดในสภาพสุญญากาศในขณะที่ทำการยิงเซลล์ด้วยลำไอออน (รูปที่ 4.21) เซลล์มะเร็งเยื่อบุกล่องเสียงที่นำมาทดลองเป็นชนิด HEp-2 ไอออนที่ใช้ยิงเป็นไอออนไนโตรเจน พลังงานอยู่ในช่วง 14 – 28 keV และความเข้มอยู่ในช่วง 10^{15} – 10^{16} ไอออน / ตร.ซม. สำหรับเซลล์ที่รอดชีวิต ได้ถูกนำไปเข้าสู่ขั้นตอนของการส่งถ่าย

ดีเอ็นเอโดยการแซ่ในพลาสมิด pEGFPN2 จากการทดลองได้ชี้ให้เห็นว่า ด้วยการควบคุมอย่างดีทุกขั้นตอน เซลล์มนุษย์อยู่รอดได้ด้วยกระบวนการที่กล่าวมา และสามารถส่งถ่ายดีเอ็นเอเข้าไปได้ด้วย



รูปที่ 4.20 *ภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซลล์ E. coli หลังถูกยิงด้วยไอออนไนโตรเจน (N) และ ไอออนอาร์กอน (Ar) ที่ความเข้มไอออนขนาดต่าง ๆกัน แต่ใช้ศักย์ไฟฟ้าล่อเท่ากันคือ -2.5 kV เปรียบเทียบกับ เซลล์ที่ยังไม่ถูกยิงและอยู่ในบรรยากาศปรกติ (natural control) กับเซลล์ที่ยังไม่ถูกยิง แต่เคยอยู่ในสภาพสุญญากาศมาแล้ว (vacuum control) จะเห็นได้ว่าความเข้มของลำไอออนระดับ 10^{17} ไอออน / ตร.ซม. นั้นแรงเกินไปจนเซลล์ถูกทำลายหมดสิ้น สัญลักษณ์ scale bar ในแต่ละรูปแทนความยาว 1 ไมโครเมตร ยกเว้นของรูปสุดท้ายที่มีค่า 5 ไมโครเมตร*



รูปที่ 4.21 *(a) ภาพถ่ายของกระบอกใส่สารตัวอย่างที่เป็นเซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (b) ถอดแยกให้เห็นลักษณะชิ้นส่วนประกอบทั้ง 3 ชิ้นของกระบอก (c) กระบอกใส่สารตัวอย่างกับตะขอเกี่ยว (ซ้าย) ขณะพร้อมที่จะถูกหย่อนลงไปในภาชนะบรรจุไนโตรเจนเหลว (ที่อุณหภูมิ –195.79 องศาเซลเซียส) เพื่อการแช่แข็งเป็นเวลาสั้น ๆ (ขวา) (d) ภาพถ่ายของห้องเป้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 ซม. และสูง 25 ซม.ของเครื่องเร่งอนุภาคตามรูปที่ 4.3 กระบอกสารตัวอย่างที่ถูกนำออกมาจากภาชนะบรรจุไนโตรเจนเหลวจะถูกใส่เข้าไปข้างในผ่านทางช่องประตูกลมที่กำลังเปิดอยู่นั้น ส่วนที่ติดอยู่ทางด้านขวาของห้องเป้าคือปั๊มสุญญากาศชนิด Turbomolecular pump ลำไอออนจะวิ่งลงมาในแนวดิ่งจากทางด้านบน*

4.5 สรุป

ในบทนี้ผู้เขียนได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่น่าสนใจในอีกแง่มุมหนึ่งของเครื่องเร่งอนุภาค / เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ คือการนำไปใช้เพื่อชักนำให้เกิดการกลายพันธุ์ในพืชและการส่งถ่ายยีนเข้าสู่เซลล์ชีวภาพ ที่ถือได้ว่าเป็นแขนงใหม่ของเทคโนโลยีชีวภาพ ปัจจุบันรู้จักกันในชื่อ *“เทคโนโลยีชีวภาพลำไอออน (Ion Beam Biotechnology)”* การที่ได้ค้นพบจากการวิจัยอย่างต่อเนื่องนับสิบปีว่า ไอออนพลังงานต่ำเพียงในเรือน 10 keV ก็สามารถชักนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมในเซลล์ชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลดีต่อการวิจัยค้นคว้าทางด้าน

นี้เป็นอย่างมาก เพราะหมายถึงว่าสามารถใช้เครื่องมือหลักเป็นเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานต่ำได้ ซึ่งมีทั้งความสะดวกในการใช้งาน ราคาที่ย่อมเยา ขนาดที่กะทัดรัดเหนือกว่าเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูงในเรือน MeV มาก

ยิ่งกว่านั้นก็คือทำให้คิดต่อไปได้อีกว่าสามารถใช้เครื่องผลิตและเร่งไอออนในลักษณะอื่นที่มีราคาต่ำและใช้งานง่ายกว่ายิ่งขึ้นไปอีกได้ เช่นเครื่อง Plasma Immersion Ion Implanter (PIII) ที่สามารถสร้างได้เองโดยไม่ยาก ทำให้เหมาะอย่างยิ่งกับการพยายามพัฒนาสังคมและเศรษฐกิจฐานความรู้แบบพึ่งพาตนเอง

อย่างไรก็ตามเครื่องมือหลักทั้งสองดังที่กล่าวมาก็มีจุดอ่อนอยู่ประการหนึ่ง นั่นก็คือเรื่องที่วัตถุตัวอย่างต้องถูกนำไปอยู่ในสภาพสุญญากาศ ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อวัตถุตัวอย่างที่เป็นเซลล์ชีวภาพ การใช้ลำไอออนจากเครื่องเร่งอนุภาคยิงทะลุแผ่นฟอยล์ (foil) บางชนิดที่เหนียวเป็นพิเศษ จากบริเวณสุญญากาศออกมายังวัตถุตัวอย่างในสภาพบรรยากาศปรกติ เป็นเรื่องที่ทำได้ แต่ต้องใช้เครื่องเร่งอนุภาคที่ผลิตลำไอออนที่มีพลังงานในเรือน MeV ซึ่งมีราคาแพง ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีผลิตลำไอออนในบรรยากาศควบคู่กับการวิจัยและพัฒนาด้านเทคโนโลยีชีวภาพลำไอออน ที่คำนึงถึงความประหยัดและการพึ่งพาตนเองด้วย จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจและท้าทาย ในขณะนี้คณะนักวิจัยของมหาวิทยาลัยพะเยาได้ทดลองใช้พลาสมาในบรรยากาศ (atmospheric plasma) ชักนำให้แบคทีเรียกลายพันธุ์ ซึ่งการทดลองขั้นต้นมีผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ คณะนักวิจัยกำลังพัฒนาและปรับปรุงเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

บรรณานุกรม

[1] Yu Zengliang (Chinese original), Yu Liangdeng, Thiraphat Vilaithong, Ian Brown (English translators), *"Introduction to Ion Beam Biotechnology*, Springer", New York, 2006.

[2] D. Suwannakachorn, D. Boonyawan, J.P. Green, S. Aumkaew, C. Thongleurm, P. Vichaisirimongkol and T. Vilaithong, *"A Heavy Ion Implanting Facility at the Chiang Mai University"*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 89 (1994) 354-356.

[3] S. Davydov, L.D. Yu, B. Yotsombat, S. Intarasiri, C. Thongleurm, V. A-no, T. Vilaithong, M.W. Rhodes, *"Applied High-Current N-Ion-Beam Surface Engineering of Metals and Industrial Tools at Chiang Mai University"*, Surface and Coatings Technology 131 (2000) 558-562.

[4] นิติศักดิ์ ปาสาจะ, *"การศึกษาคุณลักษณะในการทำงานของหัวจ่ายไอออนแบบนีลเซน ฮอด แคโทด"*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พ.ศ. 2542.

[5] L.D. Yu, S. Sangyuenyongpipat, C. Seprom, C. Thongleurm, R. Suwankosum, N. Tondee, K. Prakrajang, T. Vilaithong, I.G. Brown, H. Wiedemann, *"A Specialized Bioengineering Ion Beam Line"*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 257 (2007) 790-795.

[6] ประดุง สวนพุฒ, *"แหล่งกำเนิดไอออนแบบดีซีมัลติคัสพ์พลาสมา"*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พ.ศ. 2540.

[7] P. Chaivan, N. Pasaja, D. Boonyawan, P. Suanpoot, T. Vilaithong, *"Low-temperature Plasma Treatment for Hydrophobicity Improvement of Silk"*, Surface and Coatings Technology 193 (2005) 356–360.

[8] K. N. Leung, *"Characterization of Ion Sources"*, in Handbook of Ion Sources, Editor : B. Wolf, CRC Press, 1995, p. 102.

[9] จากเว็บไซต์ https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=32257&pNid=3537.

[10] Min Medhisuwakul, *"Vacuum Operated 2.45 GHz Microwave Plasma Source for Low-Energy Ion Beam Neutralizatio"*, Ph. D. Thesis, Chiang Mai University, March 2006.

[11] S. Sarapirom, P. Thongkumkoon, K. Prakrajang, S. Annutalabhochai and L.D. Yu, *"A Comparative Study on Low-energy Ion Beam and Neutralized Beam Modifications of Naked DNA and Biological Effect on Mutation"*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 272 (2012) 377-381.

[12] K. Prakrajang,K. Sangwijit, S. Anuntalabhochai, P. Wanichapichat, L.D. Yu, *"Neutralized Ion Beam Modification of Cellulose Membranes for Study of Ion Charge Effect on Ion-beam-induced DNA Transfer"*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 272 (2012) 382-385.

[13] *"เกษตรฯปรับปรุงส้มไร้เมล็ดพันธุ์ใหม่สำเร็จ",* หนังสือพิมพ์ไทยโพสต์ ฉบับวันที่ 28-29 เมษายน พ.ศ. 2558.

[14] ASTV ผู้จัดการออนไลน์, *"ก. วิทย์ยินดีกรมการข้าวรับรางวัลปรมาณูจากผลงานการปรับปรุงข้าวด้วยรังสี",* 19 พฤศจิกายน 2557, จากเว็บไซต์ http://www.manager.co.th/Science/ViewNews.aspx?NewsID=9570000133599.

[15] S. Anuntalabhochai, R. Chandej, B. Phanchaisri, L.D. Yu, S. Promthep, S. Jamjod, and T. Vilaithong, *"Mutation Induction in Thai Purple Rice by Low Energy Ion Beam",*Proceedings of the 9th Asia Pacific Physics Conference, Hanoi, Vietnam, October 25-31, 2004, Session 10: Applied Physics, 10-24C.

[16] B. Phanchaisri, R. Chandet, L.D. Yu, T. Vilaithong, S. Jamjod, S. Anuntalabhochai, *"Low-energy Ion-beam-induced Mutation in Thai Jasmine Rice (Oryza sativa indica, KDML 105)"*, Surface and Coatings Technology, 201(2007) 8024-8028.

[17] A. Krasaechai, L.D. Yu, T. Sirisawad, T. Phornsawatchai, W. Bundithya, U. Taya, S. Anuntalabhochai, T. Vilaithong, *"Low-energy Ion Beam Modification of Horticultural Plants for Induction of Mutation",* Surface and Coatings Technology 203 (2009) 2525-2530.

[18] S. Mahadtanapuk, M. Sanguansermsri, L.D. Yu, T. Vilaithong and S. Anuntalabhochai, *"Cloning of Antifungal Gene from Bacillus Licheniformis Induced by Low-energy Ion Beam Bombardment",* Surface and Coatings Technology 203 (2009) 2546-2549.

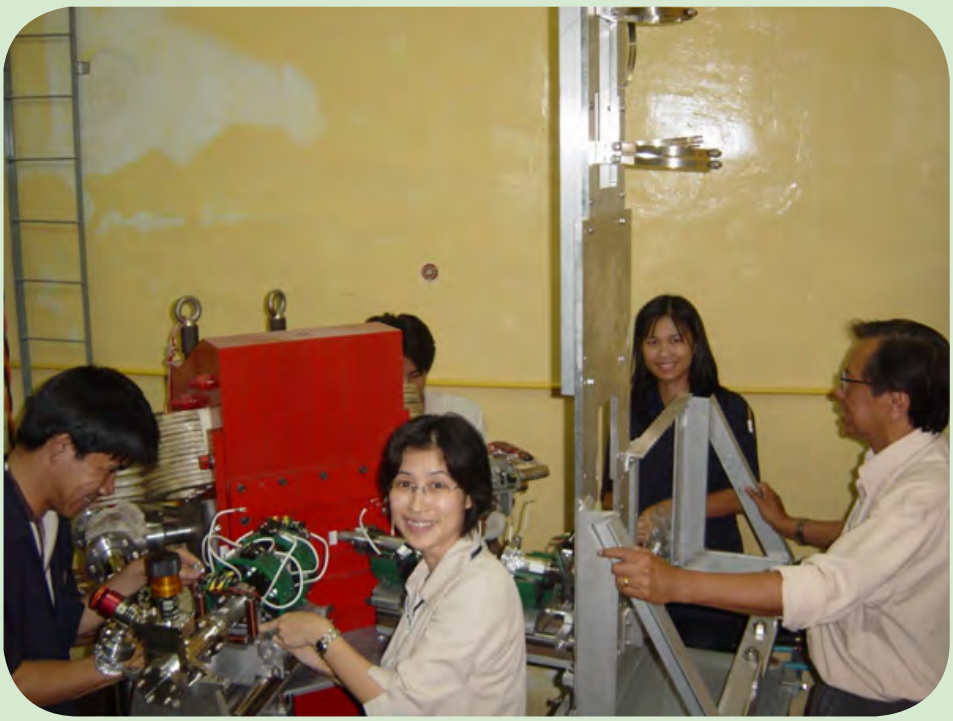
[19] S. Anuntalabhochai, R. Chandej, B. Phanchaisri, L.D. Yu, T. Vilaithong, I.G. Brown, *"Ion-Beam-Induced Deoxyribose Nucleic Acid Transfer",* Applied Physics Letters, Vol.78, No.16 (April 16, 2001) 2393-2395.

[20] B. Phanchaisri, L.D. Yu, S. Anuntalabhochai, R. Chandej, P. Apavatjrut, T. Vilaithong, I.G. Brown, *"Characteristics of Heavy Ion Beam Bombarded Bacteria E. Coli and Induced Direct DNA Transfer",* Surface and Coatings Technology 158-159 (2002) 624-629.

[21] S. Anuntalabhochai, R. Chandet, M. Sanguansermsri, S. Ladpala, R.W. Cutler and T. Vilaithong, *"Ion-beam-induced Gene Transfer in Saccharomyces cerevisiae",* Surface and Coatings Technology 203 (2009) 2521-2524.

[22] K. Sangwijit, L.D. Yu, S. Sarapirom, S. Pitakrattananukool, S. Anuntalabhochai, *"Low-energy Plasma Immersion Ion Implantation to Induce DNA Transfer into Bacterial E. coli",* Presented to The 19th International Conference on Ion Beam Modification of Materials (IBMM 2014), Leuven, Belgium, September 14-19, 2014. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B (2015), in press.

[23] W. Wongkham, R. Sririwichitthai, K. Inthanon, T. Puangwanna, M. Nambuddee, P. Thongkumkoon, K. Prakrajang and L.D. Yu, *"Low-energy Ion Beam Bombardment of Human Cells in Vacuum to Induce Gene Transfection",* Vacuum 90C (2013) 89-96.



คณะทำงานที่ประกอบด้วย (จากซ้ายไปขวา) ดร. จตุพร สายสุด ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตรลดา ทองใบ ดร. สาคร ริมแจ่ม ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง และ ดร. สมวัน ชุ่มพงษ์พันธ์ (ที่อยู่ด้านหลังของแม่เหล็กแบบอัลฟา ปัจจุบันเป็นอาจารย์อยู่ที่สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง จ. เชียงราย) กำลังร่วมกันติดตั้งช่วงต้นของ beamline เข้ากับแม่เหล็กแบบอัลฟา ที่ห้องใต้ดินของอาคารวิจัยนิวตรอน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อประมาณปี พ.ศ. 2546

เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นแบบอาร์เอฟ และการประยุกต์

จิตรลดา ทองใบ และ สาคร ริมแจ่ม

ห้องปฏิบัติการวิจัยลำอิเล็กตรอนและโฟตอนห้วงเฟมโตวินาที ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ในเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นนั้น อนุภาคมีประจุจะเคลื่อนที่เกือบเป็นแนวตรงไปตามความยาวของเครื่องเร่ง โดยอนุภาคจะเคลื่อนที่ผ่านส่วนของสนามเร่งของสถานีเร่งหนึ่ง ๆ เพียงครั้งเดียว และเส้นทางที่อนุภาคเคลื่อนที่จะมีความยาวใกล้เคียงกับความยาวของเครื่องเร่ง เครื่องเร่งอนุภาคแบบเชิงเส้นนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ เครื่องเร่งเชิงเส้นแบบสนามไฟฟ้าสถิต (electrostatic linear accelerator) และเครื่องเร่งเชิงเส้นแบบใช้สนามของคลื่นความถี่วิทยุ (radio frequency wave) หรือคลื่นอาร์เอฟ (RF linear accelerator)

5.1 ประเภทและความเป็นมาของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น

เครื่องเร่งเชิงเส้นแบบสนามไฟฟ้าสถิตใช้หลักการเร่งอนุภาคมีประจุไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงขึ้น โดยการให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านบริเวณความต่างศักย์ที่มีสนามไฟฟ้าคงที่ พลังงานของอนุภาคที่เร่งได้โดยใช้เครื่องเร่งชนิดนี้จะแปรผันตรงกับค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า เครื่องเร่งชนิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือเครื่องเร่งความต่างศักย์กระแสตรงอย่างง่าย และเครื่องเร่งอนุภาคศักย์สูง หลักการทำงานของเครื่องเร่งความต่างศักย์กระแสตรงอย่างง่ายจะมีความซับซ้อนน้อยที่สุด โดย

ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือขั้วแคโทด (cathode) และขั้วแอโนด (anode) ที่มีความต่างศักย์คร่อมอยู่ และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าคงที่ระหว่างขั้วทั้งสองโดยที่ขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งมีแหล่งกำเนิดประจุ ในกรณีของลำอนุภาคอิเล็กตรอน โดยส่วนมากจะใช้การผลิตอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดแบบเทอร์มิออนิก (thermionic cathode) ซึ่งอิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อให้ความร้อนแก่แคโทด จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด ส่วนในกรณีของอนุภาคประจุบวกจะใช้การดึงไอออนจากพลาสมาซึ่งเกิดจากกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) จากนั้นอนุภาคจะถูกเร่งในสนามไฟฟ้าคงที่ให้มีพลังงานสูงขึ้นภายในท่อเร่ง (accelerating tube) ที่ภายในเป็นสุญญากาศเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคไปชนกับโมเลกุลของก๊าซแล้วสูญเสียพลังงานไปในการชน เมื่อลำอนุภาคเคลื่อนที่ออกจากส่วนเร่งจะถูกนำไปชนเป้าหรือวัตถุตัวอย่างเพื่อผลิตรังสี หรือเพื่อนำลำอนุภาคไปใช้งานโดยตรง ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของเครื่องเร่งประเภทนี้ส่วนมากจะอยู่ในระดับกิโลโวลต์ (kV) ตัวอย่างที่น่าสนใจของเครื่องเร่งความต่างศักย์กระแสตรงในช่วงแรกของการพัฒนาเทคโนโลยีของเครื่องเร่งอนุภาคคือหลอดรังสีแคโทด (cathode ray tube) และในยุคปัจจุบันคือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope)

สำหรับเครื่องเร่งเชิงเส้นแบบใช้ความต่างศักย์สูง จะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดความต่างศักย์สูงและส่วนของท่อเร่งที่มีแหล่งกำเนิดอนุภาคมีประจุติดตั้งอยู่บริเวณต้นทางของท่อเร่งซึ่งเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดความต่างศักย์ ศักย์สูงสุดของเครื่องเร่งชนิดนี้มีค่าประมาณ 10 เมกะโวลต์ (MV) เนื่องจากถูกจำกัดด้วยปรากฏการณ์การแตกตัวทางไฟฟ้า (electric sparking) ตัวอย่างของเครื่องเร่งอนุภาคศักย์สูงที่น่าสนใจและพัฒนาขึ้นมาใช้งานกันมากในปัจจุบัน คือเครื่องเร่งคอคครอฟท์-วอลตัน (Cockcroft-Walton accelerator) เครื่องเร่งแวนเดอกราฟฟ์ (Van de Graaff accelerator) และเครื่องเร่งแทนเด็ม (tandem accelerator)

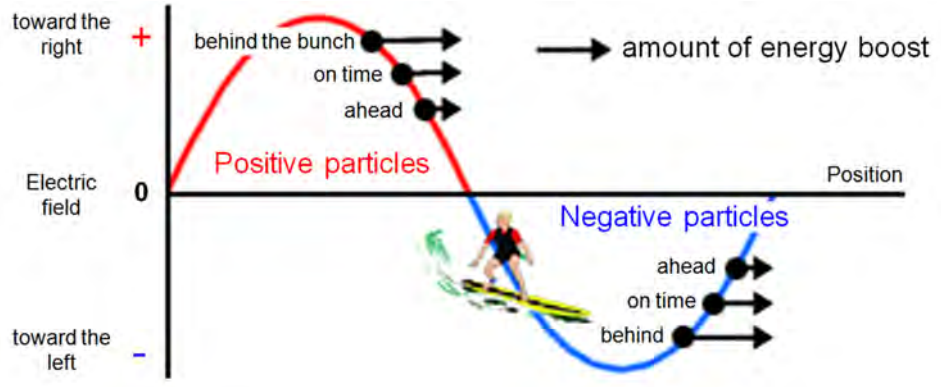
เครื่องเร่งเชิงเส้นแบบใช้สนามของคลื่นอาร์เอฟ (RF linear accelerator หรือ RF linac) ใช้องค์ประกอบสนามไฟฟ้าของคลื่นย่านความถี่วิทยุหรือคลื่นอาร์เอฟ (radio-frequency wave หรือ RF wave) ที่มีขนาดแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลา เครื่องเร่งชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษาวิจัยทางด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาคมูลฐาน (Elementary Particle Physics) ตลอดจน

การนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการแพทย์และอุตสาหกรรม การพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคชนิดนี้ได้เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2467 โดย G. Ising นักฟิสิกส์ชาวสวีเดน โดยเขาได้ใช้หลักการเร่งอนุภาคมีประจุด้วยการใส่ศักย์ไฟฟ้าคร่อมช่องว่างระหว่างท่อปลอดสนามในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่มาถึงช่องว่างระหว่างท่อ แล้วดึงศักย์ไฟฟ้าออกเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปในท่อปลอดสนาม ซึ่งวิธีการนี้มีความยุ่งยากมาก ต่อมาในปี พ.ศ. 2471 R. Wideröe นักฟิสิกส์ชาวนอร์เวย์ ได้เสนอให้ใช้ศักย์ไฟฟ้าจากคลื่นอาร์เอฟแทน ซึ่งหลักการที่เสนอโดย Wideröe นี้ ทำให้สามารถสร้างเครื่องเร่งเชิงเส้นแบบอาร์เอฟที่ใช้ศักย์อาร์เอฟ 25 kV ในการเร่งไอออนโซเดียมและไอออนโพแทสเซียมให้มีพลังงาน 50 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) ได้ ต่อมาในปี พ.ศ. 2474 เครื่องเร่งชนิดนี้ได้รับการพัฒนาต่อโดยนักฟิสิกส์ชาวอเมริกันสองคน คือ D. H. Sloan และ E. O. Lawrence ในการเร่งไอออนปรอท ให้มีพลังงานสูงถึง 1.25 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) หลังจากนั้นการพัฒนาเครื่องเร่งเชิงเส้นแบบอาร์เอฟได้เริ่มขึ้นอย่างจริงจังในช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่สอง โดยอาศัยเทคโนโลยีการพัฒนาคลื่นความถี่ย่านวิทยุสำหรับใช้งานในด้านเรดาห์ ซึ่งมีความถี่หลายร้อยเมกะเฮิรตซ์ (MHz) และมีกำลังในเรือนเมกะวัตต์ (MW) ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาและสร้างเครื่องเร่งเชิงเส้นแบบอาร์เอฟสำหรับอนุภาคมีประจุ ทั้งอิเล็กตรอน โปรตอน และไอออนขึ้นเพื่อนำไปใช้งานเชิงประยุกต์อย่างหลากหลาย

5.2 หลักการของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นแบบอาร์เอฟ

ในการเร่งอนุภาคมีประจุโดยใช้สนามไฟฟ้าแบบอาร์เอฟที่มีขนาดแอมพลิจูดของสนามที่แปรเปลี่ยนตามเวลานั้น มีลักษณะคล้ายกับการเล่นกระดานโต้คลื่น นั่นคืออนุภาคจะถูกผลักให้เคลื่อนที่ด้วยแรงไฟฟ้าเช่นเดียวกับการที่กระดานโต้คลื่นถูกผลักให้เคลื่อนที่โดยคลื่นน้ำ (ดังแสดงในรูปที่ 5.1) ซึ่งทั้งสองกรณีมีความคล้ายคลึงกัน คือจะมีบางบริเวณที่มีความเสถียรที่อนุภาคหรือกระดานโต้คลื่นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ได้ และมีบางบริเวณที่ไม่มีความเสถียร โดยหลักการสำคัญในการเร่งอนุภาคมีประจุนั้น ทิศของสนามไฟฟ้าต้องขนานกับแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งพลังงานที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคจะแปรตามเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณสนามเร่ง ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นเครื่องเร่งสำหรับ

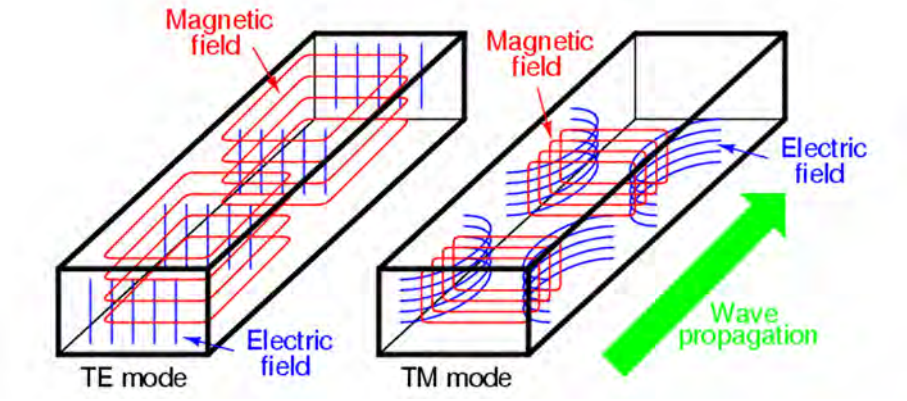
อนุภาคมีประจุชนิดใด จำเป็นต้องพิจารณาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเร่ง ซึ่งเรียกว่าเงื่อนไขการสอดประสาน (synchronism condition) และเนื่องจากคลื่นอาร์เอฟมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมา (oscillate) ตลอดเวลา ดังนั้นจะมีเฟสของสนามไฟฟ้าที่สอดคล้องกับการเร่งอนุภาคมีประจุไปตามทิศการเคลื่อนที่ครึ่งคาบ และมีเฟสสวนกับทิศการเคลื่อนที่ของอนุภาคอีกครึ่งคาบ ซึ่งทำให้ลำอนุภาคที่เร่งออกมาจากเครื่องเร่งอาร์เอฟมีลักษณะไม่ต่อเนื่องหรือเป็นห้วง (pulse) นั่นเอง



รูปที่5.1 *แสดงลักษณะการเร่งอนุภาคมีประจุบวก (positive particles) และอนุภาคมีประจุลบ (negative particles) โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา [1]*

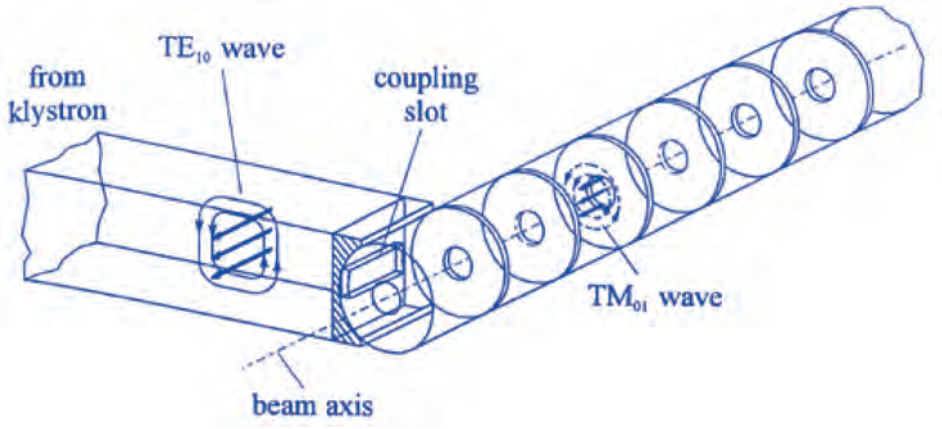
การอธิบายหลักการทำงานของเครื่องเร่งชนิดนี้ สามารถเริ่มจากการพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณสุญญากาศ ซึ่งจะประพฤติตัวเป็นคลื่นระนาบตามขวางที่มีองค์ประกอบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีทิศตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น เราเรียกคลื่นชนิดนี้ว่า “คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง *(transverse electromagnetic wave หรือ TEM wave)*” แต่เมื่อคลื่นดังกล่าวเคลื่อนที่ในบริเวณที่มีขอบเขตจำกัด เช่น ในท่อนำคลื่น (waveguide) หรือในโพรงเร่ง (accelerating cavity) ที่มีผนังทำมาจากวัสดุตัวนำไฟฟ้า มันจะไม่ประพฤติตัวเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางอีกต่อไป เนื่องจากองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่บริเวณขอบหรือผนังของท่อนำคลื่นหรือโพรงเร่ง โดยคลื่นที่สามารถเคลื่อนที่ภายในท่อนำคลื่นตัวนำแบบผนังชั้นเดียวได้นั้น ต้องเป็นคลื่นที่มีเฉพาะองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามขวาง

หรือเป็นคลื่นที่มีเฉพาะองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตามขวางเท่านั้น ซึ่งได้แสดงลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นแบบท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าในโหมด *"สนามไฟฟ้าตามขวาง (transverse electric wave หรือ TE mode)"* และโหมด *"สนามแม่เหล็กตามขวาง (transverse magnetic wave หรือ TM mode)"* ในรูปที่ 5.2

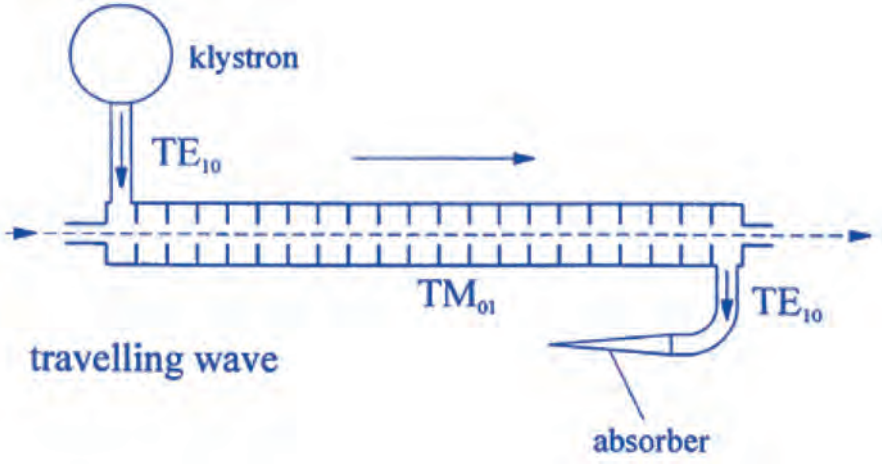


รูปที่ 5.2 *แสดงลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นแบบท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับโหมดสนามไฟฟ้าตามขวาง (TE mode) และสนามแม่เหล็กตามขวาง (TM mode) [2]*

การเร่งอนุภาคจะใช้สนามโหมด TM ในโพรงเร่ง เนื่องจากต้องมีสนามไฟฟ้าตามแนวเดียวกับแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาค ส่วนการส่งผ่านคลื่นอาร์เอฟจากแหล่งกำเนิดคลื่นเข้าไปในโพรงเร่งนั้น สามารถทำได้โดยการส่งผ่านคลื่นในท่อนำคลื่นด้วยโหมดที่ต่างกับโหมดในท่อเร่ง นั่นคือถ้าคลื่นในโพรงเร่งเป็นโหมด TM_{mn} ใช้การส่งคลื่นในท่อนำคลื่นด้วยโหมด TE_{mn} ตัวอย่างในรูปที่ 5.3 แสดงแผนภาพการใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าในโหมด TE_{10} สำหรับส่งผ่านคลื่นอาร์เอฟจากแหล่งกำเนิดคลื่น เช่น ไคลสตรอน (klystron) เข้าไปในโพรงเร่งที่เป็นโหมด TM_{01} ซึ่งเป็นโหมดที่มีความถี่ต่ำที่สุดของเครื่องเร่งชนิดนี้ ส่วนรูปที่ 5.4 แสดงแผนภาพของเครื่องเร่งชนิด "โครงสร้างอาร์เอฟแบบคลื่นเดินหน้า (RF travelling wave structure accelerator)" ซึ่งเครื่องเร่งชนิดนี้จำเป็นต้องมีตัวดูดกลืนคลื่นอาร์เอฟ (absorber) ที่ส่วนปลายของส่วนเร่ง โดยโครงสร้างของเครื่องเร่งอนุภาคนี้ มีลักษณะเป็นท่อนำคลื่นที่มีแผ่นดิสก์ตัวนำวางคั่นอยู่ภายใน เรียกว่า "disk loaded waveguide" เพื่อหน่วงความเร็วของคลื่นในท่อด้วยแผ่นดิสก์ตัวนำ ทำให้คลื่นมีความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วของอนุภาค และส่งผลให้เกิดการเร่งพลังงานของอนุภาคมีประจุได้

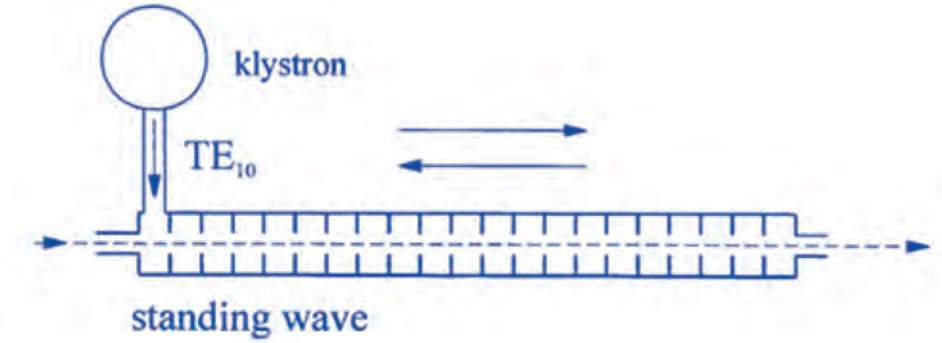


รูปที่ 5.3 *แผนภาพแสดงทิศของคลื่นอาร์เอฟที่ส่งจากไคลสตรอนผ่านท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าในโหมด TE_{10} เข้าไปยังเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นที่มีโพรงเร่งในโหมด TM_{01} [3]*



รูปที่ 5.4 *แผนภาพแสดงการส่งผ่านคลื่นจากไคลสตรอน (klystron) ผ่านท่อนำคลื่นโหมด TE_{10} เข้าไปยังเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นแบบคลื่นเดินหน้าที่มีโพรงเร่งในโหมด TM_{01} [3]*

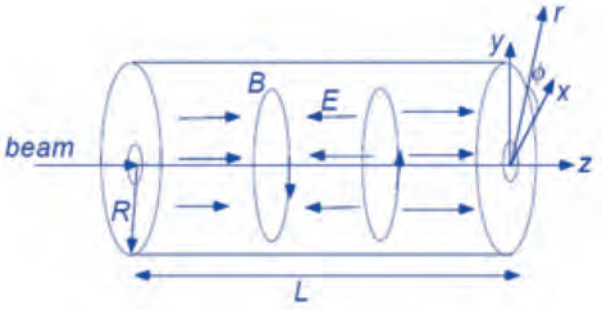
เครื่องเร่งแบบอาร์เอฟที่นิยมใช้งานอีกแบบหนึ่งคือเครื่องเร่งชนิด “โพรงอาร์เอฟสั่นพ้องแบบคลื่นนิ่ง (RF standing wave resonant cavity accelerator)” ซึ่งใช้หลักการการรวมกันของคลื่นเดินหน้าและคลื่นถอยหลัง ทำให้ได้โครงสร้างของสนามไฟฟ้าในโพรงเร่งชนิดนี้มีลักษณะเป็นคลื่นนิ่ง (standing wave) ที่มีแอมพลิจูดสูงสุดคงที่ ตัวอย่างแผนภาพของเครื่องเร่งชนิดนี้แสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 *แผนภาพแสดงการส่งผ่านคลื่นจากไคลสตรอนผ่านท่อนำคลื่นโหมด TE_{10} เข้าไปยังเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นแบบโพรงสั่นพ้องแบบคลื่นนิ่ง [3]*

การสร้างโพรงเร่งแบบคลื่นนิ่ง สามารถทำได้ด้วยการใช้ท่อนำคลื่นที่เป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้า เช่น ทองแดง ที่ปิดหัว-ท้ายของท่อด้วยวัสดุชนิดเดียวกันและมีรูเปิดอยู่ตรงกลางสำหรับให้อนุภาคมีประจุที่ต้องการทำการเร่งเคลื่อนที่เข้าและออกจากโพรงเร่งได้ โดยตำแหน่งที่ใช้แผ่นตัวนำปิดหัว-ท้ายท่อนำคลื่นต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขการเกิดคลื่นนิ่ง ซึ่งจะได้ความยาวของท่อนำคลื่นที่ปิดหัว-ท้ายเป็นระยะเท่ากับจำนวนเท่าของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นอาร์เอฟ ดังนั้นโหมดของโพรงสั่นพ้องจะมีดัชนี (index) เพิ่มขึ้นมาอีกหนึ่งตัว เพื่อใช้ระบุความยาวของโพรงสั่นพ้องในแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาค (แกน z) ซึ่งทำให้สามารถเขียนโหมดของโพรงสั่นพ้องแบบคลื่นนิ่งได้เป็น TE_{mnp} หรือ TM_{mnp} และเรียกโหมดซึ่งบรรยายลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรงสั่นพ้องว่า “โหมดโพรง (cavity mode)”

ภายในโพรงสั่นพ้องนั้น อนุภาคมีประจุจะเคลื่อนที่ไปตามแนวการเคลื่อนที่และได้รับพลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งเข้าไปกระตุ้นให้โพรงเร่งสั่นพ้องด้วยความถี่ที่ต่างกันออกไปตามขนาด รูปร่างและลักษณะของโพรงเร่ง ส่งผลให้มีโหมดของลักษณะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรงเร่งที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งโหมดของโพรงสั่นพ้องแบบคลื่นนิ่งที่มีความถี่ต่ำที่สุดและเป็นโครงสร้างที่นิยมใช้ในการเร่งอนุภาคมากที่สุดในปัจจุบัน คือโหมด TM_{010} ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีองค์ประกอบสนามไฟฟ้าขนานไปกับแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาค รูปที่ 5.6 แสดงตัวอย่างของโพรงสั่นพ้องทรงกระบอกแบบคลื่นนิ่งในโหมด TM_{010}



รูปที่ 5.6 *แสดงลักษณะของสนามไฟฟ้าตามยาวและสนามแม่เหล็กตามขวางภายในโพรงสั่นพ้องแบบคลื่นนิ่งโหมด* TM_{010}

มีการแบ่งเครื่องเร่งเชิงเส้นแบบอาร์เอฟออกเป็นเครื่องเร่งสำหรับอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีมวลนิ่ง (rest mass) น้อยมาก ซึ่งสามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีความเร็วเข้าใกล้ความเร็วแสงได้ในเวลาอันสั้น และเครื่องเร่งสำหรับอนุภาคโปรตอนหรือไอออนที่มีมวลนิ่งสูง ซึ่งไม่สามารถเร่งให้ความเร็วเปลี่ยนไปได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอน ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะรายละเอียดของส่วนประกอบของเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นแบบอาร์เอฟ (RF electron linac) ซึ่งเป็นเครื่องเร่งเชิงเส้นแบบอาร์เอฟที่นิยมนำไปใช้งานทั้งด้านการวิจัยพื้นฐาน และการประยุกต์ทางการแพทย์ อุตสาหกรรม และด้านการรักษาความปลอดภัย

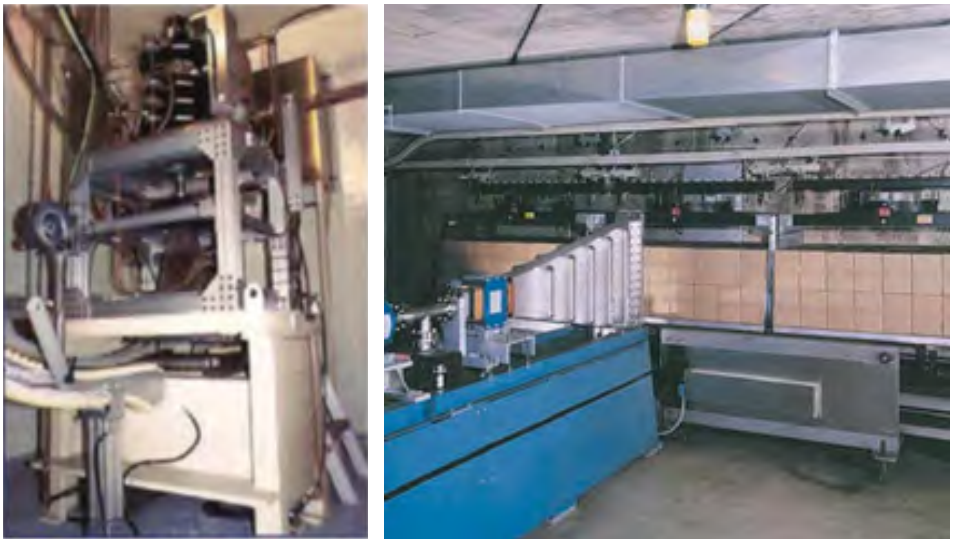
5.3 การประยุกต์เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นแบบอาร์เอฟ

5.3.1 การประยุกต์เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในภาคอุตสาหกรรม

การประยุกต์เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุ จุดเด่นของการใช้เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นคือให้พลังงานหรือโดส (dose) ที่สูง และลำอิเล็กตรอนออกมาจากระบบเครื่องเร่งมีทิศทางที่แน่นอน จึงเคลื่อนที่เข้าไปในผลิตภัณฑ์อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งผลิตภัณฑ์ไม่มีความเสี่ยงจากการปนเปื้อนของรังสีเหมือนกับการใช้แหล่งกำเนิดรังสีประเภทสารกัมมันตรังสี เช่น โคบอลต์-60 โดยการใช้งานมีทั้งการอาบด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam irradiation) หรือการอาบด้วยรังสีเอกซ์ที่ผลิตจากลำอิเล็กตรอน ทั้งนี้ระบบจะต้องมีกระแสอิเล็กตรอนที่สูงเพื่อที่จะใช้เวลาในการอาบ

ที่สั้น ทำให้มีอัตราการผลิตสูง สำหรับพลังงานของอิเล็กตรอนนั้น ต้องเหมาะกับผลิตภัณฑ์และจุดประสงค์ของการประยุกต์ โดยเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นที่ใช้สำหรับด้านอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีพลังงาน 1-10 MeV ตัวอย่างการประยุกต์เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในภาคอุตสาหกรรมได้แก่

ก) การฆ่าเชื้อ (sterilization) ในผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เช่น เข็มฉีดยา ถุงมือและผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์อื่น ๆ ซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีที่เป็นมลพิษ โดยใช้ระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นที่มีพลังงานประมาณ 8-10 MeV โดยสามารถใช้ได้ทั้งลำอิเล็กตรอนโดยตรงหรือรังสีเอกซ์ที่ผลิตจากเป้าโลหะหนักที่ถูกชนโดยลำอิเล็กตรอน และสามารถฆ่าเชื้ออุปกรณ์ที่อยู่ในหีบห่อได้ ทั้งนี้การฆ่าเชื้อด้วยลำอิเล็กตรอนจะเป็นที่นิยมมากกว่า ตัวอย่างของเครื่องฉายลำอิเล็กตรอนเพื่อการฆ่าเชื้อแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 *เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นพลังงาน 2 MeV (ซ้าย) และ พลังงาน 10 MeV (ขวา) พร้อมสายพานลำเลียง สำหรับใช้ในการฆ่าเชื้อโรค [4, 5]*

ข) การอาบลำอิเล็กตรอนบนอาหาร ผักและผลไม้เพื่อถนอมอายุและรักษาความสด เพื่อที่จะสามารถเก็บไว้ในอุณหภูมิห้องได้เป็นระยะเวลานานกว่าปกติ รวมทั้งการฆ่าเชื้อโรคหรือแมลงโดยไม่มีสารพิษตกค้าง ใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นพลังงาน 8 -10 MeV

ค) การประยุกต์ลำอิเล็กตรอนหรือรังสีเอกซ์จากลำอิเล็กตรอนในการปรับปรุงคุณภาพของอัญมณี เช่น ให้มีสีสวยงามขึ้นเป็นที่ต้องการของตลาด อันเป็นการเพิ่มมูลค่าของอัญมณี ซึ่งกระบวนการที่ใช้กันแพร่หลายกระบวนการหนึ่งคือ การใช้ลำอิเล็กตรอนในการเปลี่ยนสีของโทแพซ (topaz) ซึ่งเป็นพลอยเนื้ออ่อน ตัวอย่างการใช้งานในด้านนี้ในประเทศไทยคือ เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น ณ ศูนย์ฉายรังสีอัญมณีของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) หรือ สทน. ที่ให้บริการใช้ลำอิเล็กตรอนจากเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น 10-20 MeV ในการเปลี่ยนโทแพซธรรมชาติที่ไม่มีสี ให้เป็นสีน้ำเงินท้องฟ้า (sky blue) และ สีน้ำเงินสวิส (swiss blue) *[6]*

ง) การประยุกต์ลำอิเล็กตรอนในกระบวนการเชื่อมปฏิพันธ์ (cross-linking) ในพอลิเมอร์ อันจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น การใช้ลำอิเล็กตรอนในการทำให้ฉนวนไฟฟ้าของสายไฟหรือสายเคเบิลทนต่อความร้อนได้สูงขึ้นและมีความหน่วงไฟ (flame retardation) การใช้ลำอิเล็กตรอนในอุตสาหกรรมยางรถยนต์เพื่อปรับปรุงความยืดหยุ่น และ ความเหนียวของยาง หรือการใช้ลำอิเล็กตรอนอาบน้ำยางพาราดิบในกระบวนการวัลคาไนซ์ (vulcanization) โดยไม่ต้องใส่กำมะถัน

5.3.2 การประยุกต์เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อม และการรักษาความปลอดภัย

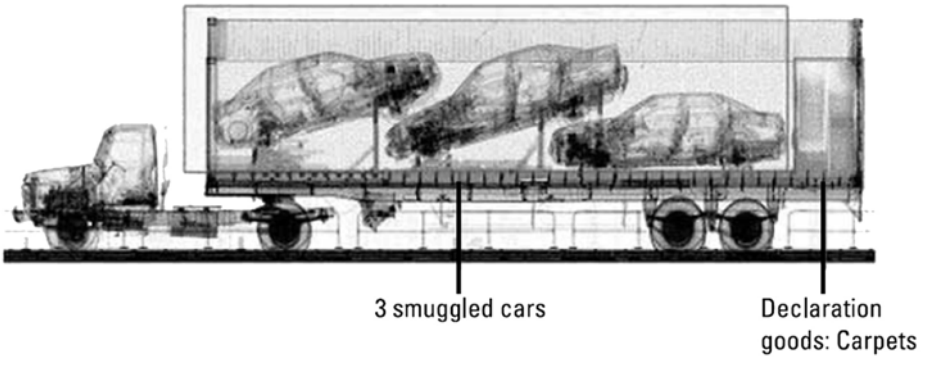
ก) การใช้ลำอิเล็กตรอนสำหรับบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดที่ใช้เวลาสั้น มีตัวอย่างการใช้งานเครื่องเร่งอนุภาคสำหรับบำบัดน้ำเสียในประเทศรัสเซีย เกาหลีใต้ อเมริกา และบราซิล เป็นต้น รูปที่ 5.8 แสดงระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในประเทศเกาหลีใต้ นอกจากนี้ยังมีการใช้ลำอิเล็กตรอนช่วยกำจัดมลพิษในอากาศ เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากโรงงานไฟฟ้าถ่านหินที่ทำให้เกิดฝนกรด ดังเช่นระบบเครื่องเร่งกำจัดมลพิษในอากาศที่ประเทศโปแลนด์ เป็นต้น

ข) การประยุกต์เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น สำหรับการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ เช่น รอยรั่วจากการเชื่อม และการประยุกต์ใช้สำหรับการรักษาความปลอดภัย เช่น การใช้รังสีเอกซ์หรือรังสีอินฟราเรดที่ผลิตจากลำอิเล็กตรอนในการ

ตรวจจับอาวุธ วัตถุระเบิด ยาเสพติด หรือวัตถุต้องห้ามอื่นๆ ภายในวัสดุห่อหุ้ม รูปที่ 5.9 แสดงการใช้งานรังสีเอกซ์ที่ผลิตจากระบบเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น พลังงาน 3-9 MeV สำหรับการตรวจสอบสินค้า ซึ่งมีทั้งระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่ แล้วให้รถบรรทุกสินค้าแล่นผ่านหรือระบบเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถเคลื่อนไปตรวจสอบตู้คอนเทนเนอร์บนเรือสินค้าที่จอดเทียบท่าได้



รูปที่ 5.8 *ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น ในประเทศเกาหลีใต้ [7]*



รูปที่ 5.9 *ภาพแสดงการใช้รังสีเอกซ์ที่ผลิตจากระบบเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น สำหรับตรวจสอบสินค้าภายในตู้คอนเทนเนอร์ของรถบรรทุกสินค้า [8]*

5.3.3 การประยุกต์เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในด้านรังสีรักษา

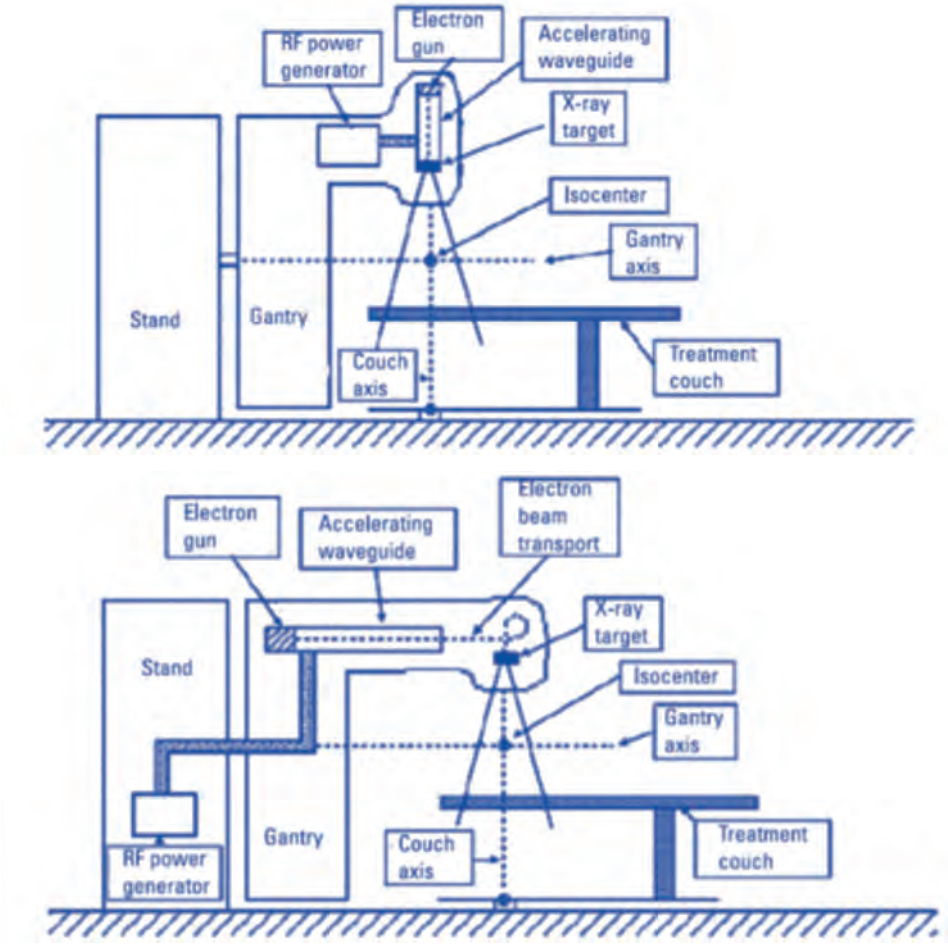
การประยุกต์เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในการบำบัดรักษา เช่น การใช้ลำอิเล็กตรอนโดยตรงหรือรังสีเอกซ์ที่ผลิตจากลำอิเล็กตรอนในการทำลายเซลล์มะเร็ง ซึ่งเป็นการประยุกต์ที่แพร่หลายมากในปัจจุบัน ในประเทศไทยมีเครื่องเร่งสำหรับการบำบัดดังกล่าวอยู่ตามโรงพยาบาลขนาดใหญ่หลายแห่ง (ดูบทที่ 1) ตัวอย่างของเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นด้านรังสีรักษาแสดงในรูปที่ 5.10 การใช้ลำอิเล็กตรอนหรือรังสีเอกซ์ที่ผลิตได้จากเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในการรักษามะเร็ง ถือเป็นหนึ่งในกระบวนการรังสีรักษา (radiotherapy) ที่ใช้แหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอกร่างกาย ซึ่งการฉายรังสีเอกซ์หรือลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงไปยังตำแหน่งของก้อนเนื้อร้ายที่มีเซลล์มะเร็งอยู่มากมาย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นภายในเซลล์หรือเซลล์ถูกทำลาย หรือหยุดการแบ่งตัว อันมีผลที่จะทำให้เซลล์ตายในที่สุด โดยเซลล์ปกติที่ไม่ใช่เซลล์มะเร็งจะได้รับอันตรายน้อยกว่า จึงสามารถฟื้นคืนสภาพได้ดีกว่าเมื่อได้รับความเสียหาย แต่เซลล์มะเร็งไม่สามารถกลับฟื้นคืนสภาพได้ใหม่ จัดเป็นการรักษามะเร็งที่ได้ผลดี ในการรักษามีทั้งการใช้รังสีรักษาอย่างเดียว หรือใช้ร่วมกับการรักษาแบบอื่น เช่น การผ่าตัด เป็นต้น เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในการบำบัดรักษามะเร็งได้รับการพัฒนาอย่างมาก ทำให้อุตสาหกรรมการพัฒนาและสร้างเครื่องเร่งอิเล็กตรอนชนิดนี้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วตามไปด้วย



รูปที่ 5.10 *ภาพถ่ายแสดงลักษณะภายนอกของเครื่องเร่งอนุภาคฉายรังสี โดยสิ่งที่มองเห็นได้ชัดที่สุดก็คือส่วนของแกนทรี [9, 10]*

จุดเด่นของการใช้เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นสำหรับรักษามะเร็ง คือ สามารถควบคุมการให้รังสีในปริมาณที่ถูกต้องและตรงจุดเป้าหมายในขณะที่เนื้อเยื่อปกติบริเวณรอบ ๆ จะได้รับความเสียหายน้อยที่สุด โดยระบบส่วนใหญ่จะใช้รังสีเอกซ์ในการรักษา แต่มีบางระบบใช้ลำอิเล็กตรอนในการรักษา หรือใช้ทั้งสองชนิดร่วมกัน ระบบเครื่องเร่งอิเล็กตรอนสำหรับรังสีรักษานิยมใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นพลังงาน 4 ถึง 25 MeV ความยาวของเครื่องเร่งจะขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอน ซึ่งจะมีความยาวตั้งแต่ประมาณ 30 เซนติเมตร สำหรับเร่งอิเล็กตรอนพลังงาน 4 ถึง 6 MeV ถึงความยาวประมาณ 150 เซนติเมตร สำหรับเร่งอิเล็กตรอนพลังงาน 20 MeV โดยเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นจะติดตั้งบนแกนทรี (gantry) ที่สามารถหมุนได้เกือบรอบตัวคนไข้ ดังนั้นจึงสามารถฉายรังสีเข้าสู่ร่างกายของผู้ป่วยในทิศทางต่าง ๆ ได้ (ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และ 5.11)

แผนภาพส่วนประกอบของเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นสำหรับรังสีรักษาในรูปที่ 5.11 แสดงส่วนประกอบหลัก คือ ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น (ในรูประบุด้วย accelerating waveguide) ซึ่งเป็นได้ทั้งแบบคลื่นเดินหน้า (travelling wave linac) หรือแบบโพรงแบบคลื่นนิ่ง (standing wave linac) โดยใช้แหล่งกำเนิดอาร์เอฟ (RF power generator) เป็นแมกนีตรอน (magnetron) สำหรับระบบพลังงาน ในช่วง 4 ถึง 10 MeV หรือ เป็นไคลสตรอนสำหรับระบบพลังงานช่วง 10 ถึง 25 MeV และมีเป้าผลิตรังสีเอกซ์ (X-ray target) ซึ่งเป็นเป้าโลหะหนัก รวมทั้งเตียงผู้ป่วย (treatment couch) ในรูปที่ 5.11 (บน) แสดงเครื่องรังสีรักษาที่ติดตั้งเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นตามแนวตั้ง ซึ่งเป็นการจัดเรียงที่ทำให้การลำเลียงลำอิเล็กตรอนทำได้ง่าย มักใช้สำหรับระบบพลังงาน 4 ถึง 6 MeV ส่วนระบบที่ใช้พลังงานสูงขึ้นจะมีเครื่องเร่งอนุภาคที่ยาวและต้องวางตามแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 5.11 (ล่าง) นั่นคือจะต้องมีแม่เหล็กสำหรับใช้สนามแม่เหล็กเบนลำอิเล็กตรอนในระบบลำเลียงด้วย คุณลักษณะสำคัญของเครื่องเร่งอิเล็กตรอนสำหรับรังสีรักษาก็คือ ให้เอาท์พุท (output) ในรูปของลำอิเล็กตรอนหรือรังสีเอกซ์ที่มีโดสสูงเพื่อให้การรักษาใช้เวลาสั้น ระบบมีความเสถียรและทำซ้ำใหม่ได้อย่างแม่นยำ เพื่อให้การรักษาเป็นไปอย่างถูกต้องตามที่วางแผนไว้ ตำแหน่งของเอาท์พุท (ทั้งรังสีเอกซ์ และลำอิเล็กตรอน) มีความแม่นยำ โดยลำอิเล็กตรอนที่ผลิตได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 1-2 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.11 *แผนภาพภายในของเครื่องเร่งอนุภาคฉายรังสีที่มีการติดตั้งเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นในสองลักษณะที่แตกต่างกัน [8]*

5.4 เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นแบบอาร์เอฟ ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

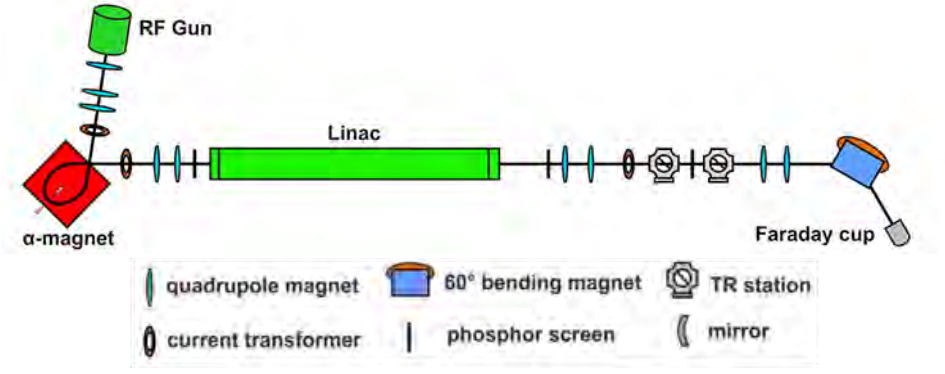
เครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค (Plasma and Beam Physics Research Facility หรือ PBP) ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ หรือเรียกสั้นว่า PBP-CMU Linac ซึ่งเริ่มสร้างขึ้นประมาณในปี พ.ศ. 2543 ตั้งแต่สมัยที่ศูนย์วิจัยยังใช้ชื่อเดิมว่า “ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง” โดยอยู่ภายใต้โครงการวิจัยชื่อ “สุริยา” ที่ได้รับงบ

ประมาณสนับสนุนหลักจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เครื่องเร่งอนุภาคนี้สร้างเสร็จและเริ่มใช้งานในการผลิตลำอิเล็กตรอนได้ในปลายปี พ.ศ. 2548 และผลิตรังสีอินฟราเรดย่านไกล (far infrared radiation) หรือเรียกอีกชื่อว่ารังสีเทราเฮิรตซ์ (terahertz หรือ THz หรือ 10^{12} Hz) ได้ในปี พ.ศ. 2549 ซึ่งนับเป็นเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นแบบอาร์เอฟที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเองโดยนักวิจัยและบุคลากรของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภายใต้การริเริ่มของศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง โดยได้รับการช่วยเหลือและการให้คำแนะนำอย่างมากจาก ศาสตราจารย์ ดร. Helmut Wiedemann (รูปที่ 5.12) แห่ง Department of Applied Physics มหาวิทยาลัย Stanford และสถาบันวิจัย Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือทั้งคำแนะนำด้านทฤษฎีและร่วมลงมือปฏิบัติจริงแทบทุกขั้นตอน นับตั้งแต่การร่วมเป็นที่ปรึกษานักศึกษาปริญญาเอก ในการคำนวณออกแบบ การจัดหาอุปกรณ์ การติดตั้ง การทดสอบ จนทำให้เครื่องเร่ง PBP-CMU Linac นี้ใช้งานได้ในที่สุด ซึ่งท่านยังคงให้ความสนใจและให้คำแนะนำตราบจนปัจจุบัน



รูปที่ 5.12 *ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง และ ศาสตราจารย์ ดร. Helmut Wiedemann ขณะร่วมกันติดตั้งอุปกรณ์ในระบบเครื่องเร่ง PBP-CMU LInac*

ส่วนประกอบหลักของเครื่องเร่ง PBP-CMU Linac ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ (RF electron gun) ที่มีโพรงเร่งอาร์เอฟแบบคลื่นนิ่ง ชุดแม่เหล็กอัลฟา (alpha magnet) ที่มีช่องเปิดสำหรับเลือกพลังงานและใช้บีบความยาวห้วงของพัลส์อิเล็กตรอน ท่อเร่งอาร์เอฟแบบคลื่นเดินหน้า (travelling wave linac) ระบบแม่เหล็กเลี้ยวเบนแบบสองขั้ว (bending magnet) และแม่เหล็กสี่ขั้ว (quadrupole magnet) เพื่อควบคุมขนาดตามขวางและทิศทางของลำอิเล็กตรอน นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้สำหรับทดลองวัดและวิเคราะห์สมบัติของลำอิเล็กตรอนและรังสีที่ผลิตได้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบเครื่องเร่งดังแสดงในรูปที่ 5.13 และ 5.14

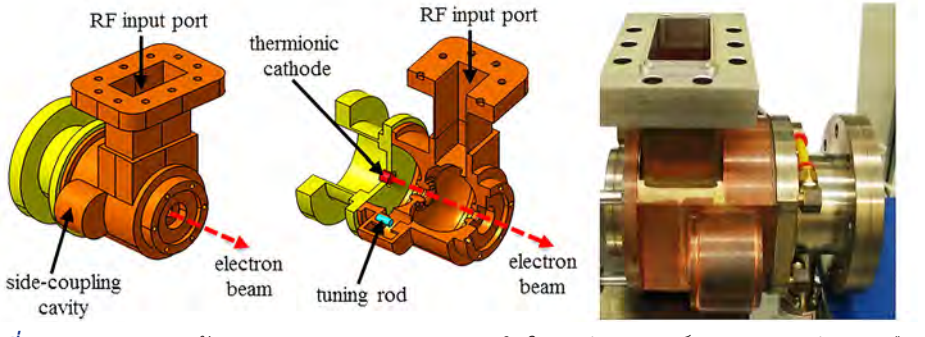


รูปที่ 5.13 *แผนผังอย่างง่ายแสดงส่วนประกอบหลักของระบบเครื่องเร่ง PBP-CMU Linac*



รูปที่ 5.14 *ภาพถ่ายระบบเครื่องเร่ง PBP-CMU Linac ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ห้องใต้ดินของอาคารวิจัยนิวตรอน ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยชุดแม่เหล็กอัลฟา (สีแดง) จะอยู่ที่ปลายด้านไกลของภาพ ส่วนที่เห็นเป็นสีฟ้าด้านหน้าของภาพคือระบบแม่เหล็กเลี้ยวเบน 60 องศาแบบสองขั้ว*

ปืนอิเล็กตรอนของเครื่องเร่ง PBP-CMU Linac เป็นปืนอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิกอาร์เอฟ (thermionic RF electron gun) ที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุกำลังสูง (ประมาณ 3-4 MW) ในการเร่งให้อิเล็กตรอนเคลื่อนออกจากปืนอาร์เอฟด้วยพลังงานจลน์ประมาณ 2-2.5 MeV ซึ่งได้รับการออกแบบให้เกิดการสั่นพ้องของคลื่นอาร์เอฟที่ความถี่ 2,856 MHz โดยปืนอิเล็กตรอน (ดังแสดงในรูปที่ 5.15) มีส่วนประกอบหลักคือแคโทดและโพรงสั่นพ้องอาร์เอฟแบบครึ่งเซลล์ (half-cell) และเต็มเซลล์ (full-cell) ที่สร้างมาจากทองแดงออกซิเจนต่ำเพื่อให้มีการปลดปล่อยก๊าซออกจากผนังของโพรงอาร์เอฟน้อย คลื่นอาร์เอฟเคลื่อนจากโพรงสั่นพ้องแบบเต็มเซลล์ไปยังโพรงสั่นพ้องครึ่งเซลล์ผ่านรูเชื่อมระหว่างโพรงสั่นพ้องทั้งสองที่เรียกว่า side coupling cavity โดยมีแคโทดติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางของผนังโพรงสั่นพ้องครึ่งเซลล์แรก ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยกระบวนการให้ความร้อน และมีท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมต่อจากระบบผลิตคลื่นอาร์เอฟมาเชื่อมต่อที่ส่วนบนของโพรงสั่นพ้องเต็มเซลล์ สำหรับส่งผ่านคลื่นอาร์เอฟกำลังสูงจากแหล่งกำเนิดคลื่นอาร์เอฟเข้าไปในโพรงสั่นพ้อง เพื่อใช้ในการเร่งให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์สูงขึ้นและเคลื่อนออกจากปืนอาร์เอฟไปยังอุปกรณ์อื่นในระบบเครื่องเร่งต่อไป



รูปที่ 5.15 *แผนภาพหน้าตัดสามมิติ แสดงลักษณะภายในโพรงเร่งแบบอาร์เอฟ และรูปถ่ายของปืนอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิกอาร์เอฟของระบบเครื่องเร่ง PBP-CMU Linac [11]*

ปืนอิเล็กตรอนของเครื่อง PBP-CMU Linac นี้ได้รับการออกแบบและพัฒนาขึ้น ณ ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนคุณภาพสูง ที่มีลักษณะการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนในลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสม สำหรับนำไปบีบอัดให้มีความยาวห้วงสั้นโดยใช้แม่เหล็กแบบอัลฟา (ดังแสดงในรูปที่ 5.16) ซึ่งได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นมาเอง ณ ศูนย์วิจัย

ฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาคเช่นเดียวกัน ซึ่งนับว่าเป็นการพัฒนาและสร้างปีนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟและแม่เหล็กแบบอัลฟาขึ้นเป็นครั้งแรกในประเทศไทยและในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้



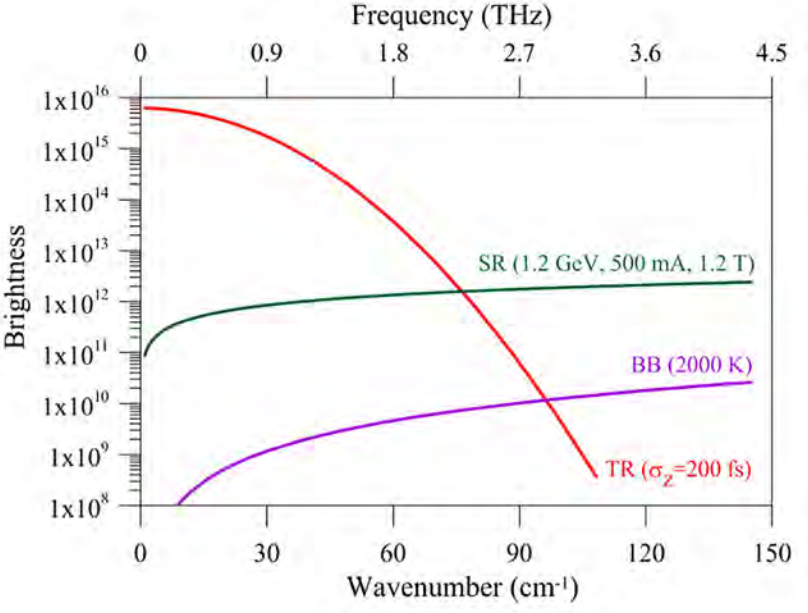
(ก) (ข)

รูปที่ 5.16 *(ก) ดร. จตุพร สายสุด ขณะกำลังตรวจสอบ 1 ใน 9 ของครึ่งหนึ่งของแผ่นเหล็กหนา 4.5 เซนติเมตร ที่จะประกอบกันเป็นทั้งแกนโย้ก (yoke) และขั้ว (pole) ของแม่เหล็กแบบอัลฟา ซึ่งที่เรียกชื่อเช่นนี้เพราะเส้นทางวิ่งของอนุภาคอิเล็กตรอนภายในบริเวณสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กนี้ที่ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษ จะมีลักษณะคล้ายตัวอักษรอัลฟา (α) ในภาษากรีก (ข) แม่เหล็กแบบอัลฟาของเครื่องเร่ง PBP-CMU Linac ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว [12, 13]*

อุปกรณ์บางส่วนในระบบเครื่องเร่ง PBP-CMU Linac ได้รับบริจาคมาจากชิ้นส่วนเดิมของระบบเครื่องเร่ง SUNSHINE (Stanford University Short Intense Electron source) ของมหาวิทยาลัย Stanford ได้แก่ ท่อเร่งอาร์เอฟเชิงเส้นความยาว 3 เมตร ซึ่งเป็นท่อเร่งที่มีลักษณะเดียวกับท่อเร่งที่ใช้ในเครื่องเร่งที่มีความยาว 3 ไมล์ (4.83 กิโลเมตร) ของสถาบันวิจัย Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) รวมทั้งอุปกรณ์การวัดสมบัติของลำอิเล็กตรอนหลายชิ้น นอกจากนั้นยังได้รับบริจาคระบบเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นสำหรับรังสีรักษาที่ปลดระวางแล้วจากโรงพยาบาลมหาราชนครเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ และโรงพยาบาลศิริราช กรุงเทพมหานคร ซึ่งได้นำอุปกรณ์มาประกอบเป็นระบบผลิตคลื่นอาร์เอฟสำหรับปีนอิเล็กตรอนและสำหรับท่อเร่งอาร์เอฟเชิงเส้น

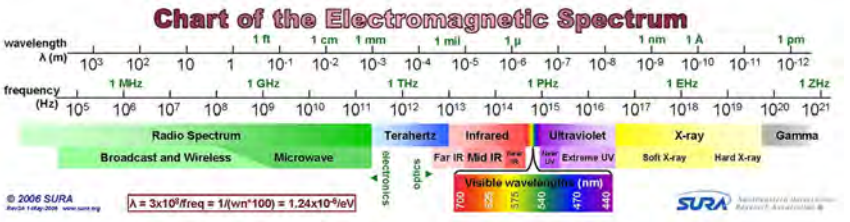
ระบบเครื่องเร่ง PBP-CMU Linac ในปัจจุบันสามารถใช้ผลิตลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงสุดประมาณ 10-15 MeV โดยมีความยาวห้วงประมาณ 200 เฟมโตวินาที (หรือ 2×10^{-13} วินาที) หรือเทียบเท่ากับความยาวห้วงของลำอิเล็กตรอน

ประมาณ 60 ไมโครเมตรนั่นเอง และเมื่อนำไปผลิตรังสี ในรูปของรังสีทรานสิชั่น (transition radiation) จะได้รังสีอินฟราเรดย่านไกลหรือรังสีเทราเฮิรตซ์แบบอาพันธ์ที่มีความเข้มมากและมีความถี่อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 3 THz โดยจะเห็นได้จากผลการคำนวณในกราฟของรูปที่ 5.17 ที่บ่งชี้ว่ารังสีที่ผลิตได้ในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 2 THz จะมีความสว่างสูงกว่ารังสีซินโครตรอนที่ผลิตจากลำอิเล็กตรอนพลังงาน 1.2 กิกะอิเล็กตรอนโวลต์ (GeV) ประมาณ 10 ถึง 10,000 เท่า



รูปที่ 5.17 *กราฟแสดงผลการคำนวณความสว่างของรังสี 3 ชนิด คือรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำอุณหภูมิ 2,000 เคลวิน (blackbody radiation: BB) รังสีซินโครตรอนที่ผลิตได้จากลำอิเล็กตรอนพลังงาน 1.2 GeV (synchrotron radiation: SR) และรังสีทรานสิชั่นที่ผลิตได้จากลำอิเล็กตรอนพลังงาน 10 MeV (transition radiation: TR) ในที่นี้ wavenumber = 1 / ความยาวคลื่น และหน่วยของความสว่าง (brightness) คือ ph/s/mm^2/100%BW*

หลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกือบทุกย่านความถี่ไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย รังสีย่านอินฟราเรดที่ครอบคลุมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความยาวคลื่นประมาณ 1 ไมโครเมตร ถึง 3 มิลลิเมตร แบ่งออกได้คร่าว ๆ เป็นรังสีย่านอินฟราเรดช่วงใกล้ (near infrared หรือ NIR) ย่านอินฟราเรดช่วงกลาง (mid infrared หรือ MIR) และย่านอินฟราเรดช่วงไกล (far infrared หรือ FIR) ดังแสดงในแผนภาพสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (รูปที่ 5.18)



รูปที่ 5.18 *แผนภาพสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [14]*

รังสีอินฟราเรดตั้งแต่ย่าน MIR ไปถึงย่าน FIR เป็นช่วงความถี่ที่มีความสำคัญต่อการศึกษาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เคมีเนื่องจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสสารแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ ดังนั้นโมเลกุลของสสารจึงดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ที่ความถี่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักของอะตอมในโมเลกุลนั้น ย่านความถี่ดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานที่ครอบคลุมในหลายสาขา โดยรังสี MIR ที่มีความยาวคลื่น 2–30 ไมโครเมตร และมีช่วงความถี่ที่ตรงกับความถี่การสั่น (vibration) ของพันธะโควาเลนซ์ในโมเลกุลของสสาร จึงถูกนำไปใช้ในการศึกษาสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจวิเคราะห์และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ของสารชีวโมเลกุล สเปกตรัมการดูดกลืนของแสงอินฟราเรดช่วงกลางมีประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์และวิทยาศาสตร์ชีวภาพ โดยสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนไขมันหรือกรดนิวคลีอิกที่เป็นส่วนประกอบหลักของ DNA และ RNA ซึ่งจะมีสเปกตรัมการดูดกลืนอยู่ในช่วงที่แตกต่างกัน โดยใช้เทคนิคการจำแนกเชิงสเปกโทรสโกปี นอกจากนี้ยังสามารถนำไปศึกษาการสั่นหรือการหมุนของชีวโมเลกุลที่ความถี่ต่ำย่าน FIR ที่สามารถบ่งบอกถึงโครงสร้างของโมเลกุลและการเคลื่อนที่เชิงสัมพัทธ์ของกลุ่มอะตอมที่โยงใยกับการทำหน้าที่ในส่วนต่าง ๆ ของโมเลกุลและยังสามารถใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของเนื้อเยื่อเพื่อใช้เป็นเครื่องมือทางการแพทย์ในการตรวจวินิจฉัยโรค ตัวอย่าง เช่น การวินิจฉัยสภาวะพังผืดภายในตับ (liver fibrosis) และสภาวะไขมันสะสมในตับ (liver steatosis) การตรวจสอบความผิดปกติของเซลล์สมองที่เป็นสาเหตุของโรคอัลไซเมอร์ รวมไปถึงงานวิจัยทางด้านเซลล์ต้นกำเนิด (stem cell)

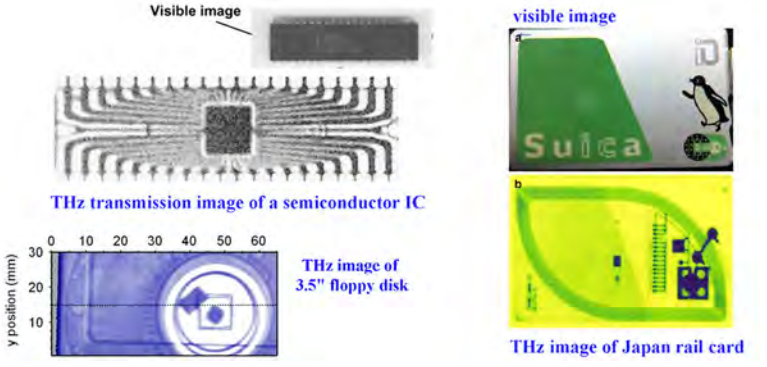
รังสี FIR หรือที่นิยมเรียกว่าย่านเทราเฮิรตซ์ (terahertz : THz) มีความถี่อยู่ในย่าน 100 GHz จนถึง 10 THz หรือมีความยาวคลื่นในช่วง 0.03-3 มิลลิเมตร

ที่ถูกเรียกว่าเป็นช่องว่างในสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ THz-gap เนื่องจากย่านความถี่นี้เป็นย่านความถี่ที่สูงเกินไปสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่สำหรับอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์แล้วถือเป็นย่านความถี่ที่ต่ำมาก ซึ่งการผลิตและประยุกต์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่เทราเฮิรตซ์นี้ เพิ่งมีการตื่นตัวอย่างสูงในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ทั้งในการพัฒนาแหล่งกำเนิดรังสีในช่วงความยาวคลื่นนี้ ตลอดจนการพัฒนาระบบหัววัด และเทคนิคการทดลองต่าง ๆ รังสีในย่านความถี่นี้จึงสามารถนำไปใช้ในงานวิจัยพื้นฐานและประยุกต์หลายด้าน ทั้งทางด้านชีววิทยา เคมี การแพทย์ วัสดุศาสตร์ ฟิสิกส์ อุตสาหกรรมอาหาร non-linear optics เซมิคอนดักเตอร์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสอดคล้องกับ IR spectroscopy และ Imaging technique

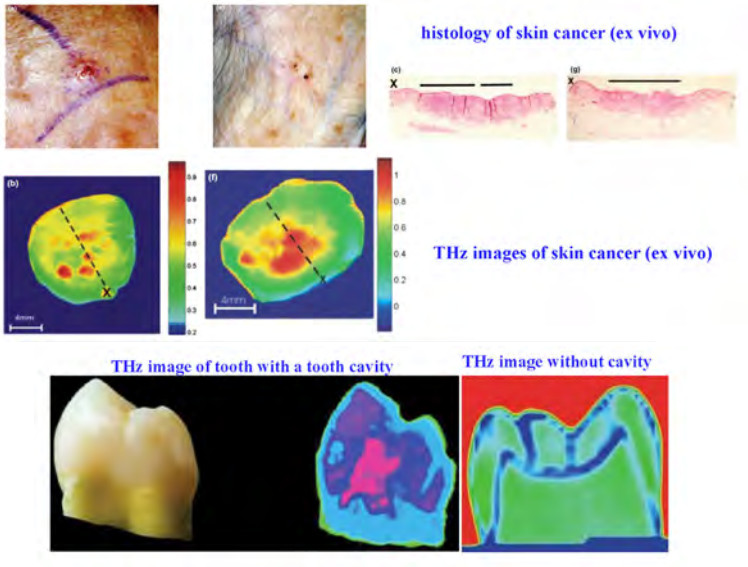
รังสีเทราเฮิรตซ์มีสมบัติเด่นคือ สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านอโลหะ เช่น พลาสติก ผ้า เซรามิค หรือกระดาษได้ แต่ไม่สามารถทะลุผ่านโลหะและน้ำ โดยจะมีการเคลื่อนที่สะท้อนกลับเมื่อตกกระทบโลหะและจะถูกดูดกลืนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านน้ำและของเหลว ด้วยสมบัติเฉพาะนี้จึงสามารถนำรังสีเทราเฮิรตซ์ไปวิเคราะห์แยกแยะวัตถุที่มีความหนาแน่นต่างกันโดยไม่มีการทำลายสารตัวอย่าง เช่น การวิเคราะห์ความสดของผักผลไม้ภายใต้หีบห่อหรือนำไปใช้ในด้านการรักษาความปลอดภัยเพื่อตรวจหาอาวุธที่ถูกซุกซ่อนหรือวัตถุระเบิดได้ รวมทั้งการตรวจสอบความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้วัสดุห่อหุ้ม โดยใช้เทคนิคทาง THz imaging เช่น อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ แผ่นซีดี แผ่นดิสเก็ต หรือบัตรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์วินิจฉัยอาการของโรคทางการแพทย์หรือทันตกรรม เช่น การวิเคราะห์เนื้อเยื่อมะเร็งผิวหนังหรือมะเร็งเต้านม การตรวจสอบความหนาหรือโพรงของฟัน รวมทั้งสามารถนำไปตรวจสอบยารักษาโรค หรือผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์และเภสัชศาสตร์ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ศึกษากระบวนการกระตุ้นโดยโฟนอน (phonon) ในวัตถุของแข็งและเซมิคอนดักเตอร์ได้อีกด้วย ตัวอย่างการใช้งานรังสีเทราเฮิรตซ์แสดงในรูปที่ 5.19 และ 5.20

จากสมบัติเฉพาะของรังสีอินฟราเรดและรังสีเทราเฮิรตซ์ดังที่กล่าวมานี้ จึงเป็นแรงจูงใจในการนำลำอิเล็กตรอนในห้วงเฟมโตวินาทีที่ผลิตได้จากระบบเครื่อง PBP-CMU Linac ไปผลิตรังสีอินฟราเรดย่านไกลและรังสีเทราเฮิรตซ์ความเข้มสูงเพื่อนำไปใช้ในงานวิจัยพื้นฐานและประยุกต์ ทั้งทางด้านชีววิทยา เคมี การแพทย์

วัสดุศาสตร์ อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอาหาร และงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องหรือสอดคล้องกับ THz spectroscopy และ THz imaging technique ตัวอย่างงานวิจัยเพื่อศึกษาพลศาสตร์ของโมเลกุลน้ำด้วยรังสีเทราเฮิรตซ์ที่ผลิตได้จากเครื่องเร่ง SUNSHINE ของมหาวิทยาลัย Stanford แสดงในเอกสารอ้างอิง *[17]* และ รูปที่ 5.21 แสดงสเปกตรัมของรังสีเทราเฮิรตซ์จากลำอิเล็กตรอนห้วงสั้นที่ถูกดูดกลืนไปบาง

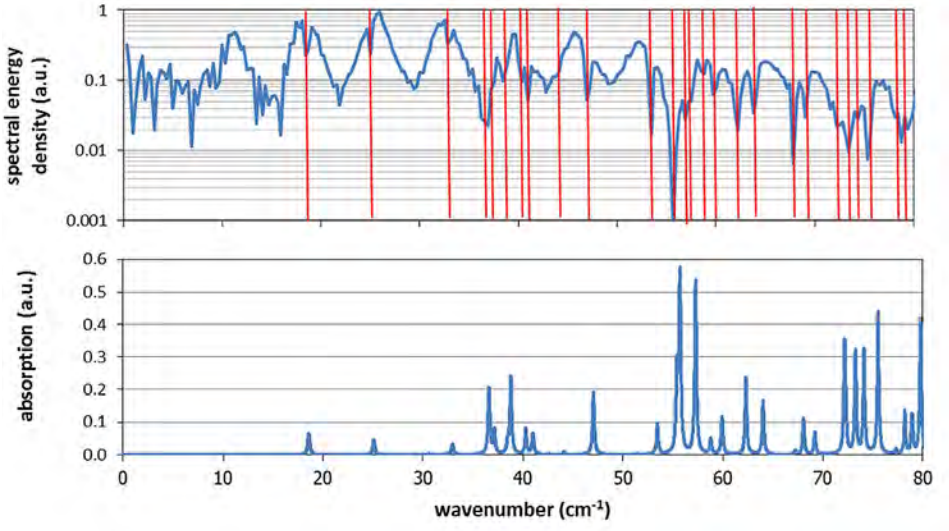


รูปที่ 5.19 *การประยุกต์ใช้รังสีเทราเฮิรตซ์ในการตรวจสอบความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้วัสดุห่อหุ้ม [15, 16]*

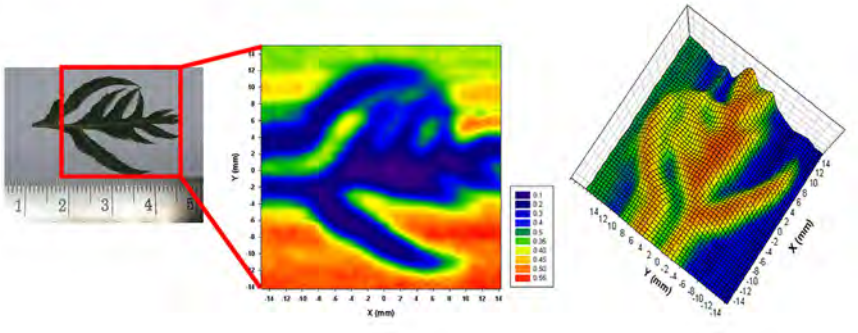


รูปที่ 5.20 *การประยุกต์รังสีเทราเฮิรตซ์ในการวิเคราะห์เพื่อวินิจฉัยอาการของโรคทางการแพทย์หรือทางทันตกรรม เช่น การวิเคราะห์เนื้อเยื่อมะเร็งผิวหนัง และการตรวจสอบความหนาหรือโพรงของฟัน [16]*

ช่วงความถี่ เนื่องจากความชื้นในอากาศซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมการดูดกลืนของไอน้ำจากโปรแกรม HITRAN *[18]* ตัวอย่างของภาพที่ได้จากการทดลองการสร้างภาพโดยใช้เทคนิคทาง THz imaging โดยใช้รังสีเทราเฮิรตซ์ที่ผลิตได้จากเครื่อง PBP-CMU Linac แสดงในรูปที่ 5.22 ทั้งนี้การดำเนินงานที่ผ่านมาได้รับการสนับสนุนงบประมาณในรูปทุนวิจัยอย่างต่อเนื่อง จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)



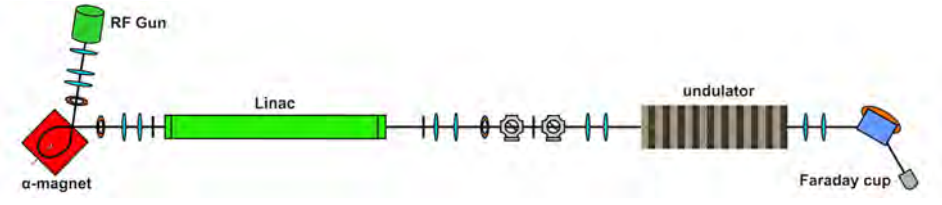
รูปที่ 5.21 *สเปกตรัมของรังสีเทราเฮิรตซ์จากลำอิเล็กตรอนห้วงสั้นที่ถูกดูดกลืนไปบางช่วงความถี่เนื่องจากความชื้นในอากาศ โดยเส้นสีแดงแสดงตำแหน่งความถี่ดูดกลืนของไอน้ำ (บน) และสเปกตรัมการดูดกลืนของไอน้ำจากโปรแกรม HITRAN (ล่าง)*



รูปที่ 5.22 *ตัวอย่างของภาพใบไม้สดที่ได้จากการทดลองการสร้างภาพโดยใช้เทคนิคทาง THz imaging ณ ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*

5.5 แผนการในอนาคต

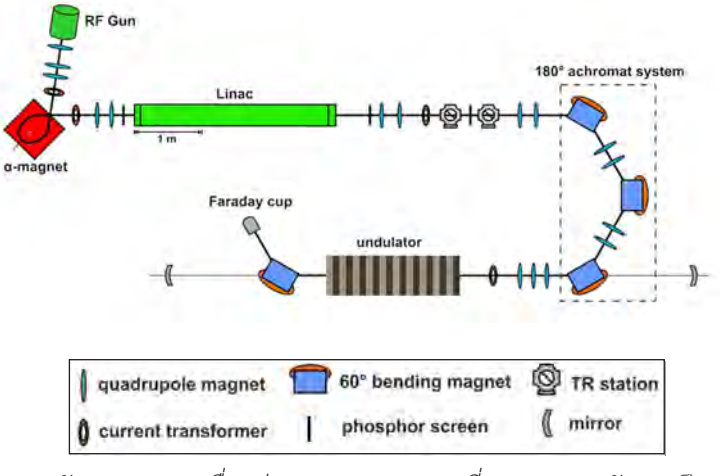
ในปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตรังสีอินฟราเรดความเข้มสูง เพื่อใช้ในการวิจัยทางด้าน Infrared Spectroscopy ได้แล้ว โดยใช้รังสีจากเครื่องซินโครตรอน แต่ยังไม่ได้ครอบคลุมถึงรังสีความถี่ต่ำในย่าน FIR หรือ THz คณะทำงานด้านเครื่องเร่งอิเล็กตรอนของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค จึงได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดที่สามารถครอบคลุมไปถึงย่าน MIR และ FIR/THz โดยใช้แม่เหล็กอันดูเลเตอร์ (undulator magnet) ซึ่งประกอบด้วยชุดแม่เหล็ก 2 ขั้ว หลายชุดที่มีขั้วสลับกันและมีทิศของสนามแม่เหล็กที่สลับกันไป - มา เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในสนามของแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ แรงจากสนามแม่เหล็กที่มากระทำต่ออิเล็กตรอนจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ส่ายแบบเป็นคาบที่แน่นอน (periodic oscillation) และปลดปล่อยรังสีซินโครตรอนออกมาทุกครั้งที่มีการเบี่ยงเบนซึ่งเรียกว่ารังสีอันดูเลเตอร์ (undulator radition) รังสีที่อิเล็กตรอนปลดปล่อยออกมาจะมีการแทรกสอดแบบเสริมกันที่ความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับความยาวคาบของแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ ทำให้ความเข้มของแสงที่ความยาวคลื่นนั้นมีค่าสูงมาก ซึ่งการผลิตรังสีโดยกระบวนการนี้จะได้รังสีเทราเฮิรตซ์แบบอาพันธ์ที่มีความเข้มสูงกว่าการผลิตรังสีโดยวิธีการทรานสิชั่น (transition radiation) หลายเท่า โดยมีแผนการที่จะติดตั้งแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ที่ปลายทางออกของท่อเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 *แผนผังแสดงระบบเครื่องเร่ง PBP-CMU Linac และตำแหน่งของแม่เหล็กอันดูเลเตอร์ที่วางแผนจะติดตั้งเพิ่มเติม*

นอกจากนี้คณะทำงานยังได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนา “เครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านอินฟราเรด (IR free-electron lasers : IR-FEL)” โดยมุ่งเน้นการปรับปรุงจากอุปกรณ์ของเครื่องเร่งอิเล็กตรอนที่มีอยู่เดิม รวมทั้งสร้างหรือพัฒนาอุปกรณ์บางส่วนที่จำเป็นขึ้นมาใหม่ แผนผังของเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่าน

อินฟราเรดที่จะพัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 5.24 โดยรังสีที่ผลิตจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระถือเป็นแหล่งกำเนิดแสงรุ่นที่สี่ (4th generation light sources) ที่มีความเข้มและความสว่างสูงมากกว่าเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิดอื่น ๆ รวมทั้งเป็นรังสีที่มีความเป็นอาพันธ์และให้แสงที่มีสีหรือความยาวคลื่นที่แน่นอนและช่วงความถี่ที่กว้าง ซึ่งสามารถควบคุมและปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นของแสงได้ตามต้องการ โดยจะแตกต่างจากเลเซอร์ปกติทั่วไปที่ผลิตจากอิเล็กตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวอยู่ในอะตอมและโมเลกุลที่มีความยาวคลื่นเพียงบางค่าและไม่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวอยู่ในอะตอมและโมเลกุลนี้จะสั่นและสามารถดูดกลืนและปลดปล่อยพลังงานได้บางความถี่เท่านั้น แต่เลเซอร์ที่ผลิตจากอิเล็กตรอนอิสระไม่มีข้อจำกัดด้านพลังงานยึดเหนี่ยวอะตอม จึงสามารถดูดกลืนและปลดปล่อยพลังงานได้ในทุก ๆ ความยาวคลื่นตามความต้องการ โดยที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่หรือความยาวคลื่นของเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระได้โดยการควบคุมความถี่ของการสั่นของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก ด้วยการปรับโครงสร้างของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กอันดูเลเตอร์หรือการปรับพลังงานของอิเล็กตรอนขณะเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กซึ่งคาดว่ารังสี MIR และ FIR/THz ที่ผลิตได้จากเครื่อง IR-FEL นี้ จะมีสมบัติเฉพาะที่มีศักยภาพสำหรับนำไปประยุกต์ด้าน THz spectroscopy และ THz imaging technique และงานวิจัยพื้นฐานและประยุกต์ที่เกี่ยวข้องได้หลากหลายสาขาและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 5.24 *แผนผังแสดงระบบเครื่องเร่งPBP-CMU Linac ที่จะขยายและพัฒนาเป็นเครื่องเลเซอร์อิเล็กตรอนอิสระย่านอินฟราเรด*

บรรณานุกรม

[1] G. Hoffstaetter, *"Accelerator Physics – USPAS P570".* U.S. Particle Accelerator School, June 2010, จากเว็บไซต์ http://www.lepp.cornell.edu/~hoff/LECTURES/10USPAS2010.

[2] จากเว็บไซต์ http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_14/8.html. สืบค้นวันที่ 20 กรกฎาคม 2558.

[3] K. Wille, *"The Physics of Particle Accelerators: An Introduction",* Oxford: Oxford University Press, 2000.

[4] *Outsourcing Outlook on Packaging and Sterilization,* จากเว็บไซต์ http://www.qmed.com/mpmn/article/outsourcing–outlook–packaging–and–sterilization. สืบค้นวันที่ 20 กรกฎาคม 2558.

[5] The International Atomic Energy Agency (IAEA), Industrial Radiation Processing with Electron Beam and X–rays, 2011.

[6] กาญจนา บุญชำ, นูฮายาตี สะแลแม, อภิเชษฐ์ มณีวงษ์ และ อารีรัตน์ คอนดวงแก้ว(แปลและเรียบเรียง), *"การเพิ่มคุณค่าโทแพซใสไม่มีสีโดยอิเล็กตรอน",* โครงการวิจัยฟิสิกส์และวิทยาการก้าวหน้า สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ,จากเว็บไซต์ http://www.nst.or.th/article/article493/article493016.html สืบค้นวันที่ 20 กรกฎาคม 2558.

[7] S. Machi, *"Trends for Electron Beam Accelerator Application Industry",* Review of Accelerator Science and Technology, Vol. 4 (2011) 1–10, World Scientific Publishing Company.

[8] Samy Hanna, *"RF Linear Accelerator for Medical and Industrial Applications",* Artech House, London, 2012.

[9] *"The right dose. The right place.The right time",* จากเว็บไซต์ http://www.varian.com/ us/oncology/ radiation_oncology/clinac/. สืบค้นวันที่ 20 กรกฎาคม 2558.

[10] *"External Beam Radiation Therapy",* จากเว็บไซต์ http://www.tcropa.com/services. สืบค้นวันที่ 20 กรกฎาคม 2558.

[11] S. Rimjaem, K. Kusoljariyakul, and C. Thongbai, *"RF Study and 3-D Simulations of a Side-coupling Thermionic RF-gun"*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 736 (2014) 10.

[12] จตุพร สายสุด, *"การออกแบบและสร้างแม่เหล็กแบบอัลฟา"*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พ.ศ. 2545.

[13] J. Saisut, K. Kusoljariyakul, S. Rimjaem, N. Kangrang, P. Wichaisirimongkol, P. Thamboon, M. W. Rhodes, and C. Thongbai, *"Construction and Performance of the Magnetic Bunch Compressor for the THz Facility at Chiang Mai University"*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 637 (2011)S99.

[14] จากเว็บไซต์ http://www.sura.org. สืบค้นวันที่ 20 กรกฎาคม 2558.

[15] G. P. Gallerano et al., *"Phase-sensitive Reflective Imaging Device in the mm-wave and Terahertz Regions"*, J. Infrared. Milli. Terhz Waves 30 (2009) 1351.

[16] W. L. Chan et al., *"Imaging with Terahertz Radiation"*, Rep. Prog. Phys. 70 (2007) 1325.

[17] K. N. Woods, and H. Wiedemann, *"The Relationship Between Dynamics and Structure in the Far Infrared Absorption Spectrum of Liquid Water"*, Chemical Physics Letters 393 (2004) 159–165.

[18] HITRAN, จากเว็บไซต์ https://www.cfa.harvard.edu/hitran/. สืบค้นวันที่ 20 กรกฎาคม 2558.



ภาพมุมกว้างของโถงทดลองระดับพื้นดิน ภายในอาคารห้องปฏิบัติการแสงสยาม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) โดยที่เห็นอยู่ด้านหน้าของรูปคือระบบลำเลียงแสงพร้อมสถานีทดลองต่าง ๆ และบริเวณเตรียมการทดลองของนักวิจัยและ/หรือเจ้าหน้าที่ ส่วนวงกักเก็บอิเล็กตรอนจะอยู่หลังกำแพงป้องกันรังสีสีน้ำเงิน-ขาว หอกลมตรงกลางเป็นบริเวณที่ติดตั้งระบบสนับสนุนต่าง ๆ เช่น แหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆของวงแหวนกักเก็บ เครื่องสำรองระบบไฟ UPS และบอลลูนเพื่อกักเก็บก๊าซฮีเลียมในกรณีที่มีการระเหยฮีเลียมเหลวในแม่เหล็กวิกเกลอร์อย่างฉับพลัน

๖

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

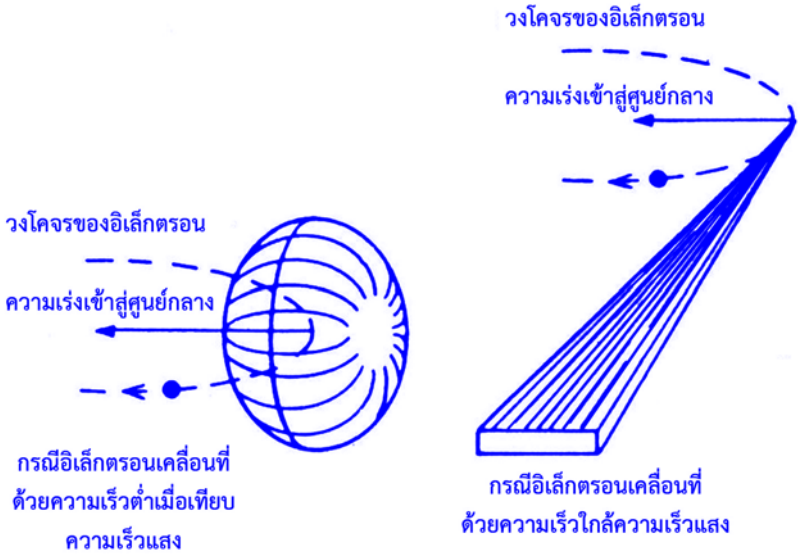
ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล

สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ. นครราชสีมา

6.1 อารัมภบท

คำถามที่มักจะพบเจออยู่เสมอคือ “แสงซินโครตรอนคืออะไร... ใช้ประโยชน์อะไร” ก่อนอื่นเราไปดูความหมายคำว่า แสง หรือ light ที่มีความหมายมากกว่าแสงที่ตามนุษย์มองเห็น (visible light) และมีความหมายที่กว้างกว่าที่เข้าใจโดยทั่วไป ในชีวิตประจำวันบ่อยครั้งและมากขึ้นเรื่อย ๆ เราได้ยินคำว่า แสงยูวีหรือรังสียูวี (ultraviolet) แสงอินฟราเรดหรือรังสีอินฟราเรด (infrared) หรือประโยคที่ว่าการฉายแสงรักษามะเร็ง... แสงคืออะไร? แสงคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยแสงมีชื่อเรียกที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับว่าแสงนั้นอยู่ในช่วงความยาวคลื่นหรือช่วงความถี่ใด แสงในชีวิตประจำวัน ได้แก่ คลื่นวิทยุ (radio waves) คลื่นไมโครเวฟ (microwaves) อินฟราเรดหรือแสงใต้แดง (infrared) แสงที่ตามนุษย์มองเห็น แสงยูวี/อัลตราไวโอเล็ต หรือแสงเหนือม่วง (ultraviolet) รังสีเอกซ์ (X-rays) และรังสีแกมมา (gamma rays)

นับว่าเป็นความมหัศจรรย์ที่แสงดำรงอยู่ในธรรมชาติ และมนุษย์ได้เรียนรู้ที่จะใช้ประโยชน์แสงอย่างหลากหลาย และเรามิอาจจะปฏิเสธได้ว่าส่วนหนึ่งของวิถีชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบันถูกกำหนดโดยการประยุกต์ใช้แสง โดยเฉพาะแสงในย่านคลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร และในครัวเรือน ในวงการวิทยาศาสตร์เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าแสงมีประโยชน์อย่างยิ่ง ทั้งนี้เนื่องจากแสงเป็นกุญแจสำคัญที่ทำให้เราเห็นภาพต่าง ๆ ในเอกภพตั้งแต่สิ่งที่มีขนาดเล็ก เช่น อะตอม โมเลกุล ไปจนถึงสิ่งที่มีขนาดใหญ่อย่างเช่นจักรวาล



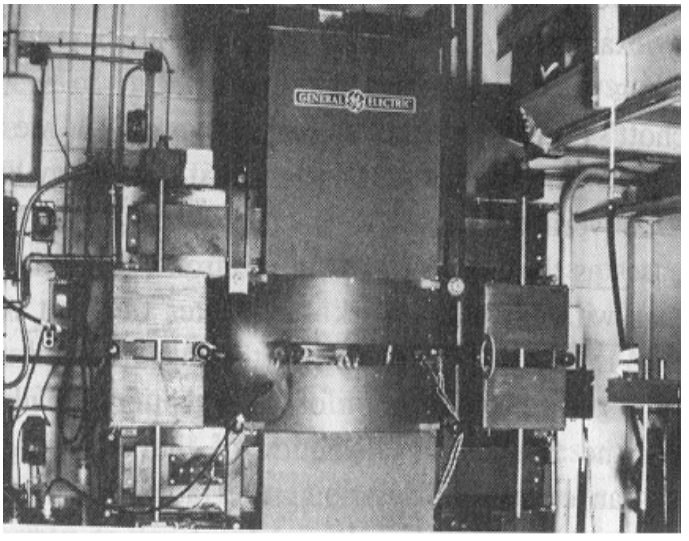
รูปที่ 6.1 *คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคที่มีประจุที่เคลื่อนที่ขณะเลี้ยวโค้งหรือมีความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (ซ้าย) กรณีความเร็วของอนุภาคมีค่าต่ำเทียบกับความเร็วแสง เช่นกรณีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่กลับไป-มาในเสาอากาศส่งสัญญาณวิทยุ ทำให้เกิดคลื่นวิทยุปลดปล่อยออกมาทุกทิศทาง (ขวา) กรณีความเร็วของอนุภาคมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วแสง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาเรียกว่าแสงซินโครตรอน โดยมีทิศขนานกับทิศการเคลื่อนที่ของอนุภาคในขณะที่ปลดปล่อยแสง*

แสงอาจจะถูกเรียกตามชื่อของแหล่งกำเนิด เช่น แสงเทียนคือแสงสว่างที่ได้จากการจุดเทียนไข ดังนั้นแสงซินโครตรอนก็คือแสงที่ถูกตั้งชื่อตามชื่อของเครื่องเร่งอนุภาคที่มนุษย์ได้สังเกตเห็นแสงปลดปล่อยออกมาครั้งแรก เครื่องเร่งอนุภาคนั้นคือเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน (synchrotron) การผลิตแสงซินโครตรอนอาศัยหลักการบังคับให้อนุภาคมีประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วของแสง ($3x10^8$ เมตร / วินาที) ให้มีการเปลี่ยนทิศทาง การเปลี่ยนทิศทางดังกล่าวทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ซึ่งทำให้เกิดการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามเส้นสัมผัสแนวทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค คำอธิบายนี้พัฒนาขึ้นจากทฤษฎีของการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่ออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก ซึ่งนำเสนอโดยนักฟิสิกส์ทฤษฎีชาวอังกฤษชื่อ James Maxwell ในปี พ.ศ. 2416 ซึ่งต่อมานักฟิสิกส์ทฤษฎีชาวอเมริกันชื่อ Julian Schwinger ได้ใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพของ Albert Einstein ไปพัฒนาทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอยู่ดั้งเดิม

เพื่ออธิบายการปลดปล่อยแสงซินโครตรอน ตลอดจนอธิบายลักษณะเฉพาะของแสงซินโครตรอนได้อย่างสมบูรณ์ กล่าวคือแสงซินโครตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจะมีลักษณะเป็นกรวยที่แคบมาก ๆ โดยมีทิศทางขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค *[1]* แสงซินโครตรอนสามารถเกิดขึ้นได้ในธรรมชาติ เช่น แสงซินโครตรอนที่เกิดขึ้นในวัตถุทางดาราศาสตร์ ที่รู้จักกันดีก็คือ เนบิวลาปู ซึ่งเป็นซากซูเปอร์โนวาที่หลงเหลือในกลุ่มดาวราศีพฤษภ (กลุ่มดาววัว)

6.2 ประวัติเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

รายงานการสังเกตเห็นแสงซินโครตรอนที่ผลิตโดยมนุษย์ครั้งแรกปรากฏขึ้นในปี พ.ศ. 2480 ซึ่งเป็นการสังเกตการปลดปล่อยแสงซินโครตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอนของบริษัท General Electric ประเทศสหรัฐอเมริกา ในช่วงนั้นเป็นยุคการพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคสำหรับงานวิจัยด้านอนุภาคมูลฐาน (Elementary Particles) วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยคือการค้นหาและศึกษาสมบัติของอนุภาคมูลฐาน การพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคและเครื่องมือวัดเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญซึ่งนำไปสู่ความสำเร็จในการค้นพบอนุภาคมูลฐาน การเร่งให้อนุภาคมีพลังงานสูงยิ่ง ๆ ขึ้นเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการค้นหาอนุภาคมูลฐาน เครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน จึงถูกพัฒนาขึ้นต่อจากเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอน (cyclotron) ซึ่งใช้สนามแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ เครื่องไซโคลตรอนจึงมีข้อจำกัดในการเร่งอนุภาคให้มีพลังงานสูงสุดได้เพียงในเรือนของหลักร้อยล้านอิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจากขนาดของเครื่องไซโคลตรอนต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นตามค่าพลังงานของอนุภาคตามหลักฟิสิกส์ที่กำหนดไว้ว่ารัศมีวงโคจรของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นตามพลังงาน ซึ่งทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างค่อนข้างสูง เครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอนจึงถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการปรับค่าสนามแม่เหล็กให้เพิ่มขึ้นตามค่าพลังงานของอนุภาคที่ถูกเร่งให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นทุก ๆรอบเพื่อรักษาให้รัศมีวงโคจรให้คงเดิม ด้วยหลักการดังกล่าวทำให้เครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอนสามารถเร่งอนุภาคให้มีพลังงานสูงขึ้นได้มากกว่าพันล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (gigaelectronvolt หรือ GeV)



รูปที่ 6.2 *ภาพถ่ายแสงซินโครตรอนแรกที่ห้องปฏิบัติการเครื่องเร่งซินโครตรอนขนาด 70 MeV ของบริษัท General Electric ในปี พ.ศ. 2490 [2]*

ในปี พ.ศ. 2499 นักฟิสิกส์ชาวอเมริกันสองคนคือ Diran Tomboulian และ Paul Hartman ได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของแสงซินโครตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจากเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน ณ มหาวิทยาลัยคอร์เนล (Cornell University) ประเทศสหรัฐอเมริกา และได้ผลการทดลองที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับคำทำนายโดยทฤษฎีของ Schwinger *[3]* นอกจากนี้พวกเขายังได้ทำการทดลองเทคนิคการวัดด้านสเปกโทรสโกปีรังสีเอกซ์โดยใช้แสงซินโครตรอนเป็นครั้งแรก หลังจากนั้น สำนักมาตรวิทยา (ชื่อในขณะนั้นคือ National Bureau of Standard) ของสหรัฐอเมริกาได้ทำการปรับเปลี่ยนเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอนพลังงาน 180 MeV ที่แต่เดิมใช้ในงานทดลองด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์ ให้เป็นเครื่องผลิตแสงซินโครตรอนสำหรับการทดลองที่ใช้แสงซินโครตรอน เครื่องเร่งอนุภาคดังกล่าวและเครื่องเร่งอนุภาคอีกหลายเครื่องที่แต่เดิมได้ออกแบบมาใช้งานด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์ ถูกจัดเป็นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นแรกสำหรับวงการวิจัยด้านแสงซินโครตรอน

การใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนได้เริ่มจากกลุ่มเล็ก ๆ ของนักฟิสิกส์ทางด้านฟิสิกส์ของของแข็ง (Solid State Physics) และมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะเดียวกันได้มีพัฒนาการและสิ่งใหม่ ๆที่เกิดขึ้นในวงการฟิสิกส์เครื่องเร่งอนุภาคหลายอย่างด้วยกัน เช่น การใช้วงกักเก็บ (storage ring) เพื่อกักเก็บอนุภาคที่ถูกเร่งโดยเครื่องเร่งอนุภาคที่ติดตั้งอยู่ก่อนหน้าที่จะถึงวงกักเก็บ การจัดวางระบบเครื่องเร่งอนุภาคในลักษณะดังกล่าวทำให้ได้ลำของอนุภาคที่กักเก็บสำหรับการใช้

งานมีคุณภาพสูงขึ้น นั่นคืออนุภาคสามารถโคจรอยู่ในวงกักเก็บได้นานขึ้น และวงโคจรมีความเสถียรในตำแหน่งมากยิ่งขึ้น และที่สำคัญพลังงานของอนุภาคในวงกักเก็บมีค่าคงที่ ส่งผลให้แสงซินโครตรอนที่ผลิตจากวงกักเก็บมีคุณภาพที่ดีตามไปด้วยกันกับคุณภาพของลำอนุภาค

พัฒนาการที่ถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อวงการวิจัยแสงซินโครตรอนเริ่มตอนประมาณปี พ.ศ. 2520 เมื่อประเทศสหราชอาณาจักรได้อนุมัติให้มีการสร้างเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่สามารถผลิตรังสีเอกซ์ โดยให้มีการออกแบบเครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้สำหรับการผลิตแสงซินโครตรอนเพื่องานวิจัยด้านแสงซินโครตรอนโดยเฉพาะ การก่อสร้างเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนมีขึ้นที่เมืองดาเรสบูรี (Daresbury) และเริ่มมีการใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 ซึ่งเป็นการเปิดศักราชของยุคเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 2 และตามมาด้วยการสร้างเครื่องรุ่นที่ 2 นี้ขึ้นอีกหลายแห่งในประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศญี่ปุ่น และในกลุ่มประเทศยุโรป จากจำนวนของผู้ใช้ที่เพิ่มขึ้น และความต้องการแสงซินโครตรอนที่มีคุณภาพดีมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้เกิดแรงผลักดันให้มีการปรับแต่งประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 2 ไปถึงขีดสุดในการผลิตแสงซินโครตรอนที่สามารถผลิตได้โดยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 2

การเปลี่ยนแปลงเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนจากรุ่นที่ 2 เป็นรุ่นที่ 3 คือวิธีการผลิตแสงซินโครตรอน โดยมีการใช้อุปกรณ์ชนิดใหม่ที่ติดตั้งแทรกเข้าไปในวงกักเก็บ ซึ่งเป็นที่มาของชื่อของอุปกรณ์ดังกล่าวว่า อุปกรณ์แทรก (insertion device) อุปกรณ์แทรกดังกล่าวเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กหรือแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกออกแบบให้มีสนามแม่เหล็กในลักษณะที่บังคับให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่ส่ายไปมา การติดตั้งอุปกรณ์แทรกในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 2 ทำให้ได้แสงซินโครตรอนที่สว่างจ้ามากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทดลอง ทำให้ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลที่สั้นลง และมีความคมชัดของข้อมูลทั้งในมิติของตำแหน่งและพลังงาน การเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนในหลากหลายสาขา ทำให้เกิดโครงการสร้างเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 3 เครื่องแรกโดยการร่วมทุนของกลุ่มประเทศยุโรป และเป็นที่รู้จักกันต่อมาในนามห้องปฏิบัติการแสงซินโครตรอนของยุโรป (European Synchrotron Radiation Facility หรือ ESRF) เครื่องกำเนิดแสง

ซินโครตรอนรุ่นที่ 3 จัดเป็นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่ให้บริการหลักทั้งในปัจจุบันและในอนาคต

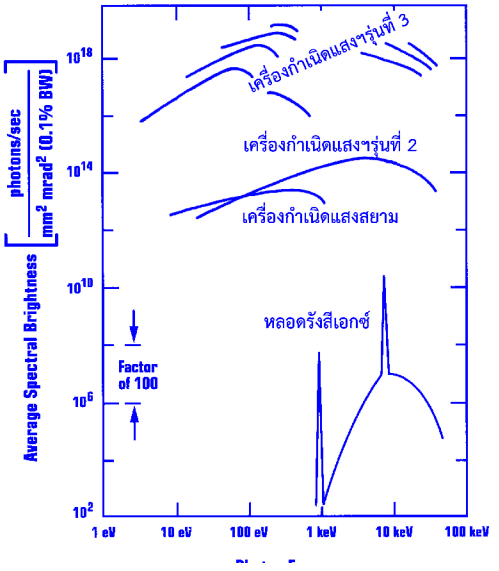
ความก้าวหน้าในการออกแบบและงานวิศวกรรม ส่งผลให้ระบบย่อยต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องเร่งอนุภาคถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็นอย่างมากในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา สิ่งใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจกันมากในวงการเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนก็คือเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนแนวตรง หรือ Linac (linear accelerator) ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยสามารถผลิตลำอิเล็กตรอนที่มีคุณสมบัติดีเพียงพอที่จะนำไปผลิตแสงซินโครตรอนที่มีคุณสมบัติเป็นเลเซอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเลเซอร์รังสีเอกซ์ เครื่องกำเนิดแสงดังกล่าวเป็นที่รู้จักในชื่อของ เครื่องกำเนิดเลเซอร์จากอิเล็กตรอนอิสระ (free electron laser) หรือเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 4 คุณลักษณะเด่นของแสงรุ่นที่ 4 นอกจากคุณสมบัติเป็นเลเซอร์แล้ว ยังมีลักษณะเป็นห้วงที่สั้นมาก ๆในเรือนของ 10^{-15} วินาที (หนึ่งในพันล้านล้านวินาที หรือ เฟมโตวินาที) แต่มีความสว่างจ้ามากกว่าแสงที่ผลิตได้จากเครื่องรุ่นที่ 3 หลายล้านเท่า เครื่องกำเนิดเลเซอร์จากอิเล็กตรอนอิสระจะเติมเต็มความต้องการของผู้ใช้ในสองย่านความยาวคลื่น คือเลเซอร์ในย่านเทราเฮิรตซ์ (terahertz หรือย่อว่า THz) และเลเซอร์ในย่านรังสีเอกซ์ นับว่าเป็นความโชคดีของประเทศไทยที่ ณ ปัจจุบันได้มีแผนการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแสงรุ่นที่ 4 เพื่อผลิตเลเซอร์ในย่านเทราเฮิรตซ์แล้ว (ตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.5) โครงการดังกล่าวจะเป็นบันไดสำคัญที่จะเตรียมความพร้อมด้านบุคลากรและเทคโนโลยีรองรับการสร้างเครื่องกำเนิดเลเซอร์จากอิเล็กตรอนอิสระย่านรังสีเอกซ์ของประเทศไทยในอนาคต ประโยชน์ของเลเซอร์ในย่านเทราเฮิรตซ์ได้มีการกล่าวถึงในบทที่ 5 ส่วนเลเซอร์ในย่านรังสีเอกซ์สามารถนำไปใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระบบที่เกิดขึ้นที่ไวมาก ๆ เช่น การติดตามปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี การเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะพื้นและสถานะที่ถูกกระตุ้น และ การศึกษาโครงสร้างสามมิติของโปรตีน เอนไซม์และไวรัส อย่างไรก็ตามเครื่องกำเนิดแสงรุ่นที่ 4 นี้จะไม่สามารถเข้ามาทดแทนเครื่องกำเนิดแสงรุ่นที่ 3 ได้ทั้งหมด การใช้ประโยชน์เลเซอร์จากอิเล็กตรอนอิสระจะจำกัดอยู่ที่บางโครงการที่ต้องการลักษณะพิเศษของเลเซอร์ดังกล่าวเท่านั้น กลุ่มผู้ใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนส่วนใหญ่ยังคงเป็นกลุ่มผู้ใช้ของเครื่องกำเนิดแสงรุ่นที่ 3

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่มีใช้งานอยู่ทั่วโลกในปัจจุบันมีมากกว่า 50 เครื่อง เครื่องรุ่นที่ 3 เป็นรุ่นที่มีจำนวนผู้ใช้สูงสุด ส่วนเครื่องรุ่นที่ 2 ได้มีการปรับแต่งเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมีการติดตั้งอันดูเลเตอร์เพื่อผลิตแสงให้มีความสว่างจ้าสูงขึ้น และในขณะเดียวกันยังมีเครื่องส่วนหนึ่งซึ่งเป็นส่วนน้อยที่เป็นการใช้เครื่องร่วมกับงานทางด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์ ส่วนเครื่องที่ใช้ผลิตเลเซอร์จากอิเล็กตรอนอิสระ (เครื่องรุ่นที่ 4) มีอยู่ประมาณ 10 เครื่อง โดยแรกเริ่มเป็นเครื่องขนาดเล็กผลิตเลเซอร์ย่านแสงใต้แดง ต่อมาได้เพิ่มขนาดขึ้นเพื่อผลิตเลเซอร์อัลตราไวโอเลตสุญญากาศ และไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการผลิตเลเซอร์รังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นย่านสเปกตรัมที่มีความต้องการใช้งานอย่างยิ่ง เนื่องจากจำนวนเครื่องและโครงการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความต้องการของผู้ใช้ และที่สำคัญคือตามสภาวะเศรษฐกิจหรืองบประมาณที่ได้รับการจัดสรร รายละเอียดของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนทั่วโลกมีการปรับเปลี่ยนใหม่เป็นระยะ ๆ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ที่เว็บไซต์ www.lightsources.org

6.3 คุณสมบัติเฉพาะของแสงซินโครตรอน

แสงซินโครตรอนมีคุณสมบัติที่เด่น และมีคุณสมบัติบางอย่างที่ไม่สามารถผลิตได้จากแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่น แสงซินโครตรอนจึงเป็นแสงที่เหมาะสมเป็นอย่างยิ่งในงานวิจัยพัฒนาทั้งด้านวิทยาศาสตร์และด้านวิศวกรรมหลากหลายสาขา คุณสมบัติเด่นของแสงซินโครตรอนได้แก่

ก) แสงซินโครตรอนมีสเปกตรัมที่ต่อเนื่อง ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ตั้งแต่ย่านแสงใต้แดงไปจนถึงย่านรังสีเอกซ์ ซึ่งทำให้เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงชนิดเดียวที่สามารถผลิตแสงที่ครอบคลุมตั้งแต่แสงเหนือม่วงจนถึงรังสีเอกซ์ นั่นคือระหว่างย่านอัลตราไวโอเลตสุญญากาศ (vacuum ultraviolet) จนถึง รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (soft X-rays) ซึ่งเป็นช่วงพลังงานของโฟตอน (photon) ประมาณจาก 100 ถึง 1,000 อิเล็กตรอนโวลต์ (ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1 ถึง 10 นาโนเมตร) การที่แสงซินโครตรอนมีสเปกตรัมที่ต่อเนื่องในช่วงที่กว้างดังกล่าว ทำให้มีความคล่องตัวสูงที่จะเลือกแสงที่มีค่าความยาวคลื่นใด ๆ มาใช้ประโยชน์



รูปที่ 6.3 *ความสว่างจ้า (brightness) โดยประมาณของแสงซินโครตรอนจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 2 และ 3 และจากหลอดรังสีเอกซ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไป สเปกตรัมของแสงซินโครตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยามเป็นค่าประมาณการจากแสงที่ออกจากแม่เหล็กสองขั้ว [ดัดแปลงจากรูปในเว็บไซต์ของ Advanced Light Source, USA]*

ข) ขนาดของแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนมีขนาดเล็กมาก ๆ ขนาดของลำแสงกำหนดโดยขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางของลำอนุภาคที่มีประจุ สำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนของประเทศไทยที่ติดตั้งอยู่ที่จังหวัดนครราชสีมา ขนาดของลำอนุภาคดังกล่าวมีค่าประมาณ 200 x 100 ตารางไมโครเมตร แต่สำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่ทันสมัย ขนาดลำอนุภาคจะมีขนาดเล็กลงไปอีกประมาณ 1,000 เท่า คุณสมบัติเด่นในข้อนี้เหมาะอย่างยิ่งที่จะนำแสงซินโครตรอนไปใช้ในการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของวัตถุหรือบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ที่มีขนาดเล็ก หรือเป็นแสงในกล้องจุลทรรศน์ เช่นกรณีกล้องจุลทรรศน์แสงใต้แดง และกล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์

ค) ลำแสงซินโครตรอนมีความลู่คม นั่นคือแสงมีการบานออกจากลำแสงน้อยมาก ทำให้ขนาดของลำแสงที่ตำแหน่งต่าง ๆห่างจากจุดที่ปลดปล่อยแสงมีขนาดใหญ่ไม่ต่างจากขนาดของลำอิเล็กตรอนมากนัก ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีที่ทำให้สามารถจัดวางอุปกรณ์การทดลองให้ห่างออกมาจากตัวเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนโดยไม่เกิดความสูญเสียปริมาณความเข้มแสงต่อพื้นที่

ง) แสงซินโครตรอนเป็นแสงที่มีความสว่างจ้าสูงมาก ความสว่างจ้า หรือ brightness คือความเข้มแสงต่อพื้นที่แหล่งกำเนิดที่แสงปลดปล่อยออกมา เนื่องด้วยแสงซินโครตรอนเป็นแสงที่มีความเข้มสูงอยู่แล้ว การที่แหล่งกำเนิดแสงมีขนาดเล็ก ทำให้ความสว่างจ้าของแสงซินโครตรอนมีค่าสูงมาก ๆ ยกตัวอย่าง เช่น แสงซินโครตรอนจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 2 ในย่านที่ตามนุษย์มองเห็น มีความสว่างจ้ากว่าแสงจากดวงอาทิตย์ประมาณล้านเท่า ความสว่างจ้าและความสู่คมของลำแสงซินโครตรอน ทำให้สามารถเลือกใช้แสงค่าความยาวคลื่นที่มีแถบความกว้างของความยาวคลื่นที่แคบมาก ๆ ทำให้การทดลองมีความสามารถในการแยกแยะความยาวคลื่นที่สูง และที่สำคัญทำให้การเก็บข้อมูลหรือการทดลองสามารถทำได้ในเวลาอันสั้น เช่นการเก็บข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกโปรตีน โดยเครื่องมือในห้องปฏิบัติการทั่วไปที่ต้องใช้เวลา 1-2 วัน แต่เมื่อใช้แสงซินโครตรอน การเก็บข้อมูลทั้งหมดที่มีความละเอียดสูงกว่าสามารถทำได้ภายในเวลา 1-2 นาที

จ) แสงซินโครตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนนั้นมีลักษณะเป็นห้วงเวลา หรือ พัลส์ (pulse) สั้น ๆ ในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 2 และ 3 ช่วงเวลาระหว่างพัลส์ของแสงมีค่าประมาณ 1-100 $\times$ 10^{-9} วินาที (หนึ่งในพันล้านวินาที) ในเครื่องรุ่นที่ 4 นั้นช่วงเวลาดังกล่าวอยู่ในเรือน ของ 10^{-15} วินาที (หนึ่งในพันล้านล้านวินาที) คุณสมบัติดังกล่าวเปิดโอกาสให้มนุษย์สามารถติดตามหรือสังเกตเหตุการณ์ในธรรมชาติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ เช่น การเปลี่ยนสถานะของอะตอม หรือการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมหรือโมเลกุล ซึ่งจะนำไปสู่องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับสิ่งที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ

ฉ) แสงซินโครตรอนมีคุณลักษณะทางโพลาไรเซชัน (polarization) ที่สามารถเลือกได้ เช่น โพลาไรเซชันเชิงเส้น (linear polarization) หรือ โพลาไรเซชันเชิงวงกลม (circular polarization) ซึ่งเป็นข้อเด่นในการตรวจวัดและ/หรือวิเคราะห์วัตถุที่มีการตอบสนองต่อลักษณะโพลาไรเซชันที่แตกต่างกัน เช่น โมเลกุลสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นเกลียว หรือโดเมนของสารแม่เหล็ก

ช) ความเข้มและความสว่างจ้าของแสงซินโครตรอนสามารถทำนายได้อย่างแม่นยำโดยทฤษฎีทางฟิสิกส์ จึงสามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดมาตรฐานในการปรับเทียบแหล่งกำเนิดแสงอื่น ๆ

ซ) คุณสมบัติที่ดีอีกประการเกี่ยวกับแสงซินโครตรอนก็คือ การที่ไม่มีสิ่งเจือปนเช่น ก๊าซต่าง ๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลดปล่อยแสงซินโครตรอน ดังนั้นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนจึงจัดได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่สะอาด

6.4 อนุภาคที่มีประจุสำหรับการผลิตแสงซินโครตรอน

เงื่อนไขหนึ่งที่สำคัญในการผลิตแสงซินโครตรอนให้มีความสู่คมและมีพลังงานโฟตอนสูง (แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์) คือความเร็วของอนุภาคที่มีประจุนั้นต้องเข้าใกล้ความเร็วแสง การที่จะเร่งอนุภาคดังกล่าวให้มีความเร็วสูง และใช้พลังงาน (แรง) ในการเร่งให้น้อยที่สุดนั้น อนุภาคที่ถูกเร่งต้องมีมวลน้อย อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าและมีมวลน้อยที่ใช้ในการผลิตแสงซินโครตรอนในปัจจุบัน ได้แก่ อิเล็กตรอน (electron) และโพสิตรอน (positron) อนุภาคทั้งสองมีมวลเท่ากันคือ $9.10938291 \times 10^{-31}$ กิโลกรัม และมีค่าของขนาดประจุไฟฟ้าเท่ากันคือ $1.60217657 \times 10^{-19}$ คูลอมบ์ (Coulomb) แต่อิเล็กตรอนเป็นประจุไฟฟ้าลบ ส่วนโพสิตรอนเป็นประจุไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้อีกอย่างว่าอนุภาคโพสิตรอน (ซึ่งมีสัญลักษณ์ว่า e^+) เป็นปฏิอนุภาค (antiparticle) ของอนุภาคอิเล็กตรอน (ซึ่งมีสัญลักษณ์ว่า e^-)

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเกือบทั้งหมดใช้อนุภาคอิเล็กตรอนในการผลิตแสงซินโครตรอน เนื่องจากการผลิตอิเล็กตรอนทำได้ง่ายกว่าการผลิตโพสิตรอน ในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 2 และที่ 3 การผลิตอิเล็กตรอนอาศัยการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนปลดปล่อยออกมาจากโลหะโดยอาศัยความร้อน (thermionic emission) ส่วนในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 4 นั้นอาศัยหลักการกระตุ้นให้มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากวัตถุโดยอาศัยแสงเลเซอร์ ข้อดีของวิธีการหลังนี้ทำให้ได้อิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์ที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สำคัญที่จะนำอิเล็กตรอนดังกล่าวไปใช้ในการผลิตแสงซินโครตรอนที่เรียกว่าเลเซอร์จากอิเล็กตรอนอิสระ

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนบางเครื่องใช้โพสิตรอนในการผลิตแสง เนื่องจากโพสิตรอนเป็นประจุบวก จึงมีโอกาสน้อยกว่าที่จะถูกดัก (trapped) โดย

ไอออนของโมเลกุลของก๊าซตกค้างในวงกักเก็บ ไอออนดังกล่าวนี้เป็นพวกประจุไฟฟ้าบวกเสียส่วนใหญ่ กรณีที่ประจุบวกเข้าใกล้ประจุบวกจะมีแรงผลักออกจากกัน ซึ่งต่างจากอิเล็กตรอนที่มีประจุลบ เมื่อเข้าใกล้ไอออนดังกล่าวก็จะถูกแรงทางไฟฟ้า (แรงคูลอมบ์) ดูดเข้าไปรวมกับไอออน จากเหตุผลดังกล่าวทำให้โพสิตรอนสามารถโคจรอยู่ในวงกักเก็บได้นานกว่าอิเล็กตรอน ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการอธิบาย อนุภาคที่มีประจุที่จะกล่าวถึงต่อจากนี้ไปจะหมายถึงแต่อนุภาคอิเล็กตรอนเท่านั้น

6.5 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 2 และ 3

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่มีการใช้งาน ณ ปัจจุบันเป็นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 2 ที่มีการปรับแต่งเพิ่มประสิทธิภาพ ส่วนประกอบหลักของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นดังกล่าวประกอบด้วย

ก) ระบบฉีดอนุภาคเข้าวงกักเก็บ (injection system) มีส่วนประกอบย่อยหลักคือ ปืนอิเล็กตรอน เครื่องเร่งอนุภาค และระบบลำเลียงอนุภาค

ข) วงกักเก็บ (storage ring)

ปืนอิเล็กตรอนเป็นจุดเริ่มต้น อิเล็กตรอนจะถูกผลิตออกจากเป้าโลหะที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อน และถูกแรงทางไฟฟ้าทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้น โดยส่วนใหญ่ลำอิเล็กตรอนที่ได้จากปืนอิเล็กตรอนมีพลังงานในเรือน 100 keV หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนอาจจะถูกปรับแต่งก่อนจะถูกนำไปเร่งต่อในเครื่องเร่งอนุภาค ซึ่งอาจจะเป็นเครื่องเร่งแนวตรงที่เรียกว่า Linac และ/หรือเครื่องเร่งซินโครตรอน เมื่อได้พลังงานของอิเล็กตรอนตามที่ต้องการที่จะกักเก็บในวงกักเก็บ อิเล็กตรอนจะถูกลำเลียงไปเลี้ยงอยู่ในวงกักเก็บ หลักการทำงานต่าง ๆของเครื่องเร่งอนุภาคชนิดต่าง ๆ ได้มีการอธิบายไว้แล้วในบทที่ 5 ในที่นี้จึงจะเน้นแต่เฉพาะเรื่องของวงกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งถือว่าเป็นหัวใจหลักของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 2 และ 3

คุณลักษณะของแสงซินโครตรอนถูกกำหนดโดยลักษณะของลำอิเล็กตรอนในวงกักเก็บ และกำหนดโดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนมีการเลี้ยวโค้งเพื่อ

ปลดปล่อยแสงซินโครตรอน การกักเก็บอิเล็กตรอนในวงกักเก็บทำได้โดยการใช้สนามแม่เหล็กบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน หรือการกำหนดวงโคจรนั่นเอง และในขณะเดียวกันก็ทำการบังคับขนาดของลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดและความลู่คมตามที่ต้องการ การพิจารณาประสิทธิภาพของวงกักเก็บสามารถดูได้จากค่าคงที่ค่าหนึ่งของวงกักเก็บ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการออกแบบระบบแม่เหล็กของวงกักเก็บ ค่าคงที่นี้เรียกว่าค่าอิมิตแตนซ์ (emittance) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของวงกักเก็บแต่ละวง และเป็นค่าที่ใช้วัดหรือบ่งบอกขนาดและความลู่คมของลำอิเล็กตรอนที่เลี้ยงอยู่ในวงกักเก็บ อาจจะกล่าวได้ว่าค่าผลคูณของขนาดและความลู่คมของลำอิเล็กตรอนมีค่าคงที่ ณ ทุก ๆตำแหน่งของวงแหวนกักเก็บ ตำแหน่งใดมีขนาดลำอิเล็กตรอนเล็ก ณ ตำแหน่งนั้นมีการเปลี่ยนแปลงขนาดมาก นั่นคือลำอิเล็กตรอนก็จะบาน/ลู่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่มีขนาดลำอิเล็กตรอนที่ใหญ่กว่า การออกแบบเชิงทัศนศาสตร์ของลำอิเล็กตรอนเป็นงานที่ละเอียดอ่อน เช่นเดียวกันกับการออกแบบระบบเลนส์ของกล้องถ่ายรูปที่ต้องการให้ภาพของวัตถุตกบนฟิล์มหรือเซนเซอร์โดยให้ได้ภาพที่ชัดที่สุดหรือไม่ให้เกิดความคลาดเชิงแสง (optical aberrations) นั่นเอง สิ่งที่ต้องการในวงกักเก็บอิเล็กตรอนคือการทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในวงโคจรอุดมคติ (ideal orbit) ให้มากที่สุด วงโคจรอุดมคติคือวงโคจรของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กในวงกักเก็บที่ได้จากการคำนวณ วงกักเก็บประกอบด้วยระบบหลักดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.4 *แสดงส่วนหนึ่งของแม่เหล็กสองขั้ว (สีน้ำเงิน) และแม่เหล็กสี่ขั้ว (สีส้ม)*

ระบบแม่เหล็ก (Magnet system) ซึ่งประกอบไปด้วยชุดแม่เหล็กและเครื่องป้อนกำลัง ชุดแม่เหล็กพื้นฐานที่ออกแบบใช้ในวงกักเก็บทั่วไปประกอบด้วย แม่เหล็กสองขั้ว (dipole หรือ bending magnet) และแม่เหล็กสี่ขั้ว (quadrupole magnet) โดยแม่เหล็กสองขั้วทั้งหลายทำหน้าที่บังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ได้ครบวงหรือมีการเลี้ยวโค้งครบ 360 องศานั่นเอง ส่วนแม่เหล็กสี่ขั้วทำ

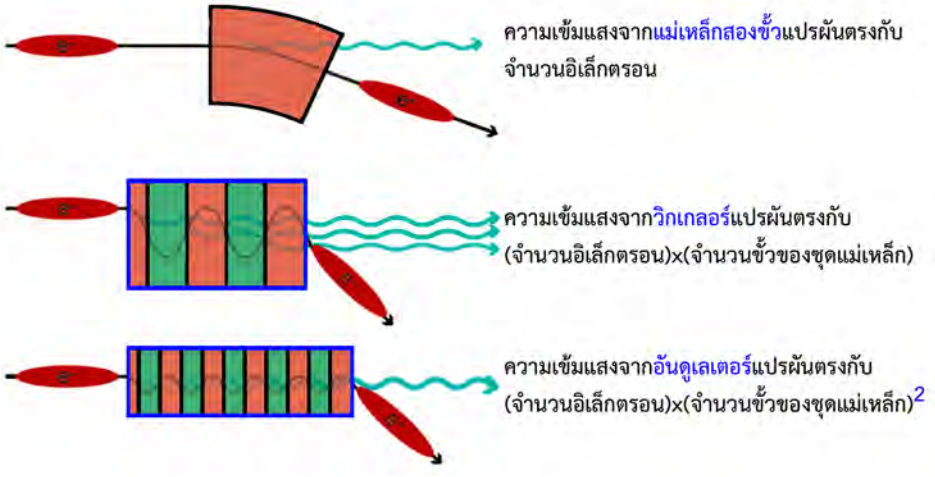
หน้าที่ควบคุมขนาดของลำอิเล็กตรอนไม่ให้มีการบานออกเนื่องจากแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนกันเอง นอกเหนือจากนั้นอาจจะมีแม่เหล็กหกขั้ว (sextupole magnet) และแม่เหล็กแปดขั้ว (octupole magnet) เพื่อชดเชยวงโคจรของอิเล็กตรอนที่มีค่าพลังงานแตกต่างกัน และ/หรือแก้ไขวงโคจรอันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์แบบของสนามแม่เหล็กที่ได้จากแม่เหล็กสี่ขั้วที่ใช้อยู่ แม่เหล็กอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนทิศทางของลำอิเล็กตรอนเป็นแม่เหล็กสองขั้วขนาดเล็ก (steering magnet) แม่เหล็กที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า นั่นคือสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด ขนาดสนามแม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนตามค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ สัดส่วนของการกระเพื่อมต่อค่ากระแสสำหรับแม่เหล็กในวงกักเก็บที่ทันสมัยจะต้องอยู่ในระดับ 10^{-4} หรือดีกว่า เพื่อที่จะทำให้ความเสถียรของวงโคจรอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่รับได้สำหรับการใช้งานแสงซินโครตรอน การให้ได้มาของระบบแม่เหล็กที่ทำงานได้ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้เป็นความท้าทายสำหรับวงการเครื่องเร่งอนุภาค อุปสรรคที่ต้องเผชิญนั้นเริ่มตั้งแต่การออกแบบแม่เหล็กและการผลิต หลังจากนั้นเป็นเรื่องการติดตั้งที่ต้องวางตำแหน่งและทิศทางของแม่เหล็กแต่ละตัวให้มีความผิดพลาดในระดับของขนาดลำอิเล็กตรอน (ในเรือนไม่กี่ไมโครเมตร) ซึ่งเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยากเนื่องจากขนาดและน้ำหนักของแม่เหล็กแต่ละตัว (แม่เหล็กสองขั้วที่ใช้ส่วนใหญ่มีน้ำหนักมากกว่าสองตัน) งานดังกล่าวต้องมีการเตรียมการตั้งแต่การออกแบบและสร้างอาคารติดตั้งเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ฐานพื้นและโครงสร้างรองรับแม่เหล็กต้องมีความมั่นคงไม่อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายนอก และตั้งอยู่บนพื้นที่มีความเสถียรสูงมาก และขณะใช้งานแม่เหล็ก สิ่งที่ต้องตระหนักได้แก่ระบบหล่อเย็นที่ต้องเอาความร้อนออกจากแม่เหล็ก ซึ่งต้องรักษาอุณหภูมิของแม่เหล็กให้คงที่ อีกส่วนหนึ่งคือเครื่องป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับแม่เหล็กที่ต้องมีเสถียรภาพสูงไม่อ่อนไหวต่ออุณหภูมิรอบข้างเช่นกัน

ระบบสุญญากาศ (Vacuum system) เป็นระบบที่จำเป็นสำหรับเครื่องเร่งอนุภาคทุกชนิด เนื่องจากว่าอิเล็กตรอนจำเป็นที่จะต้องเคลื่อนที่ในสุญญากาศเพื่อเลี่ยงการชนกับโมเลกุลของอากาศ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำให้ก๊าซในท่อสุญญากาศของวงกักเก็บหลงเหลืออยู่น้อยที่สุด เพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอน

สามารถโคจรอยู่ได้มากกว่า 10 ชั่วโมง (ระยะทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ประมาณ $10 \times 60 \times 60 \times 3 \times 10^5$ = หนึ่งหมื่นล้านกิโลเมตร) เนื่องด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีสุญญากาศ ค่าสภาพสุญญากาศในวงกักเก็บส่วนใหญ่จะอยู่ในระดับ 10^{-11} - 10^{-10} ทอร์ (ความดันบรรยากาศปรกติคือ 760 ทอร์) ท่อสุญญากาศของวงกักเก็บได้ถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กลง ทำให้ปริมาณก๊าซที่ออกมาจากวัสดุของท่อลดลง และยังมีข้อได้เปรียบที่สามารถติดตั้งขั้วแม่เหล็กเข้าใกล้วงโคจรของอิเล็กตรอนได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นได้ จึงเป็นการลดค่าใช้จ่ายเพราะใช้แม่เหล็กที่มีขนาดเล็กลง ในอดีตเป็นที่ทราบกันว่าท่อขนาดเล็กจะเป็นอุปสรรคในการสร้างสภาพสุญญากาศ ทีมงานด้านเครื่องเร่งอนุภาคของห้องปฏิบัติการ MaxLab ที่เมือง Lund ประเทศสวีเดน ได้ใช้ท่อสุญญากาศเป็นปั๊มไปในตัว โดยการเคลือบผิวภายในของท่อสุญญากาศด้วยวัสดุที่คอยดักเก็บโมเลกุลก๊าซต่าง ๆ การใช้ท่อเป็นปั๊มไปในตัวนั้นมีข้อดีอีกอย่างหนึ่งต่อความเสถียรของอิเล็กตรอน เนื่องจากการที่ไม่จำเป็นต้องมีช่องเปิดต่อกับปั๊มสุญญากาศภายนอกทำให้มีความต่อเนื่องของผิวท่อสุญญากาศ จึงลดปัญหาการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าโดยอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ด้านหน้า ที่ส่งผลต่อความเสถียรของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ตามมา ระบบสุญญากาศประกอบด้วยอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น ท่อสุญญากาศ ปั๊มสุญญากาศ และอุปกรณ์วัดระดับความดันของสุญญากาศ (vacuum gauge) เป็นต้น

ระบบคลื่นความถี่วิทยุ (RF system) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ทดแทนพลังงานของอิเล็กตรอนที่สูญเสียไปเนื่องจากการปลดปล่อยแสงซินโครตรอนขณะเลี้ยวโค้งในสนามแม่เหล็กสองขั้ว หรือขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในอุปกรณ์แทรกที่ใช้ผลิตแสงซินโครตรอน ดังนั้นทุกรอบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวงกักเก็บพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะลดลง จึงต้องมีการเติมพลังงานให้อิเล็กตรอนกลับคืนมาที่ค่าเดิม อุปกรณ์ของระบบคลื่นวิทยุที่ติดตั้งต่อเชื่อมกับท่อสุญญากาศของวงกักเก็บคือ โพรงเร่งอนุภาคด้วยคลื่นวิทยุ (RF acceleration cavity) ส่วนประกอบหลักอื่นของระบบคลื่นวิทยุได้แก่ เครื่องป้อนกำลังคลื่นความถี่วิทยุ และ ท่อนำคลื่น ความถี่ของคลื่นวิทยุที่นิยมใช้กันในวงกักเก็บคือ 500 MHz มีส่วนน้อยที่ใช้ความถี่อื่น เช่นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน MAX IV (เครื่องรุ่นที่ 3 ของประเทศสวีเดน) ใช้ความถี่ 105 MHz ส่วนเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนของไทยใช้ความถี่ 100 MHz

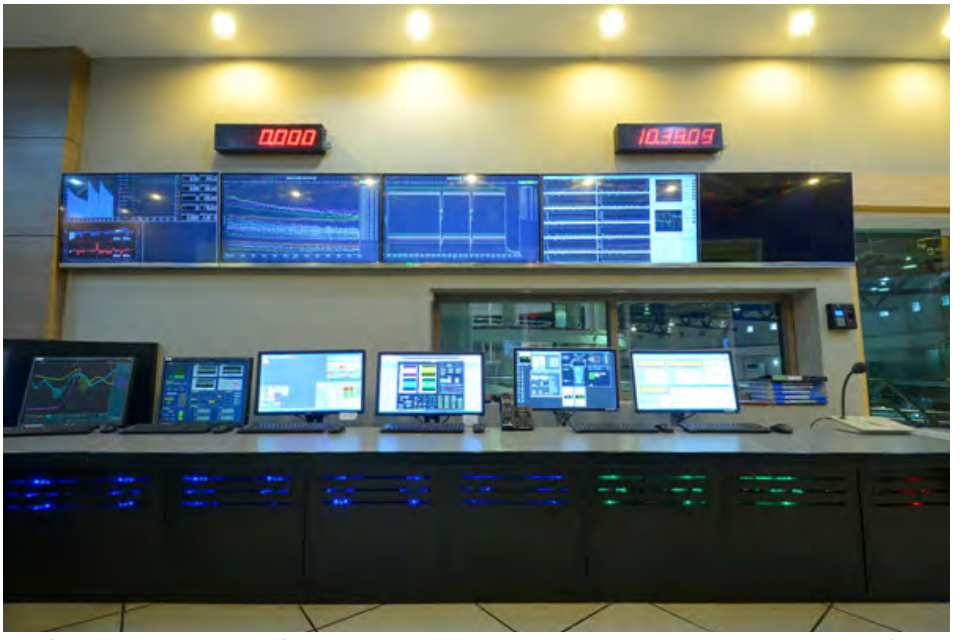
อุปกรณ์แทรก (Insertion devices) เป็นอุปกรณ์แม่เหล็กที่นำมาติดตั้งแทรกในส่วนที่เป็นช่วงตรงของวงกักเก็บอิเล็กตรอนเพื่อการผลิตแสงซินโครตรอนที่มีคุณสมบัติบางอย่างแตกต่างไปจากแสงซินโครตรอนที่ได้จากแม่เหล็กสองขั้ว อุปกรณ์แทรกแรกที่มีการใช้ในเครื่องเร่งอนุภาคสำหรับการทดลองด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์ก็คือ “วิกเกลอร์ (wiggler)” ซึ่งเป็นชุดของคู่แม่เหล็กที่มีการจัดวางให้อิเล็กตรอนมีการส่ายไปมาบนระนาบของวงกักเก็บ ทำให้ค่า emittance ของวงกักเก็บลดลง สำหรับการใช้วิกเกลอร์ในวงกักเก็บมีวัตถุประสงค์ต่างออกไป วิกเกลอร์ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนจะถูกออกแบบทำให้อิเล็กตรอนมีการเลี้ยวโค้งด้วยรัศมีที่เล็กกว่าการเลี้ยวโค้งในแม่เหล็กสองขั้ว การที่จะทำให้อิเล็กตรอนมีการเลี้ยวโค้งด้วยค่ารัศมีที่มีค่าน้อย ๆนั้นอาจจะมีการใช้แม่เหล็กไฟฟ้าที่ที่มีขดลวดทำจากสารตัวนำยิ่งยวด เพื่อที่จะสามารถสร้างค่าสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูง ๆ การเลี้ยวโค้งด้วยรัศมีที่มีค่าน้อยนี้ทำให้แสงที่ได้จากวิกเกลอร์เป็นแสงที่มีพลังงานโฟตอนที่สูงกว่า (หรือความยาวคลื่นที่สั้นกว่า) คือในย่านของรังสีเอกซ์พลังงานสูงนั่นเอง วิกเกลอร์จึงเป็นที่นิยมใช้กันในวงกักเก็บพลังงานต่ำที่ต้องการผลิตรังสีเอกซ์พลังงานสูง



รูปที่ 6.5 *แสดงการปลดปล่อยแสงซินโครตรอนที่ผลิตจากแม่เหล็กสองขั้ว วิกเกลอร์ และอัลดูเลเตอร์ (ดัดแปลงจากรูปดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ของ Helmholtz Zentrum Berlin, Germany)*

อุปกรณ์แทรกชนิดที่สองคือ “อัลดูเลเตอร์ (undulator)” มีหลักการกำเนิดแสงที่คล้ายกับวิกเกลอร์ แต่แสงซินโครตรอนที่ได้มีความแตกต่างอย่างชัดเจน แม่เหล็กที่ใช้ในอัลดูเลเตอร์มีค่าสนามที่ไม่สูงและมีการจัดวางให้คาบของการส่ายไปมาของอิเล็กตรอนค่อนข้างสั้น (ประมาณ 10 เซนติเมตรหรือน้อยกว่า ส่วนกรณีวิกเกลอร์คาบการส่ายไปมามีค่าประมาณยี่สิบกว่าเซนติเมตรหรือมากกว่านั้น) จากเงื่อนไขดังกล่าวและความจริงที่ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ใกล้เคียงความเร็วแสง ทำให้แสงซินโครตรอนที่ปลดปล่อยออกมาในแต่ละครั้งของการเลี้ยวโค้งเกิดการแทรกสอดกัน การแทรกสอดดังกล่าวทำให้แสงซินโครตรอนมีความสว่างจ้ามากกว่าแสงที่ปลดปล่อยจากแม่เหล็กสองขั้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กและมีความคมมาก แสงที่ได้ยิ่งจะมีความสว่างจ้าสูงตามค่ากำลังสองของจำนวนคาบของการส่ายไปมาของอิเล็กตรอนในอัลดูเลเตอร์ แม่เหล็กที่ใช้สร้างอัลดูเลเตอร์สำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเป็นแม่เหล็กถาวรที่สร้างจากโลหะผสมกลุ่ม Nd-Fe-B เนื่องจากขนาดที่เล็กของแม่เหล็กถาวร ทำให้การออกแบบจัดวางแม่เหล็กทำได้ง่ายกว่าแม่เหล็กไฟฟ้า ปัจจุบันอัลดูเลเตอร์ที่มีการใช้งานอยู่จะมีความแตกต่างในรูปแบบ ทั้งนี้เพื่อกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอันดูเลเตอร์เพื่อผลิตแสงที่มีโพราไรเซชันที่แตกต่างกัน

ระบบควบคุม (control system) เป็นระบบสุดท้ายที่จะกล่าวถึง และเป็นระบบที่มีความสำคัญไม่ได้ยิ่งหย่อนไปกว่าระบบอื่นที่ได้กล่าวมาแล้ว ระบบควบคุมทำหน้าที่ทั้งตรวจตรา (monitoring) และบังคับควบคุมการทำงานของทุกระบบย่อยของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน เริ่มตั้งแต่การผลิตอิเล็กตรอนในปืนอิเล็กตรอน จนกระทั่งการเลี้ยงอิเล็กตรอนอยู่ในวงกักเก็บ ในวงกักเก็บอิเล็กตรอน สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จากอุปกรณ์วัดตำแหน่งของลำอิเล็กตรอนที่อยู่ในส่วนต่าง ๆของวงกักเก็บจะถูกป้อนให้กับระบบควบคุม เพื่อการวิเคราะห์ที่จะนำไปสู่การตัดสินใจที่จะปรับแต่งสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์ในวงกักเก็บอิเล็กตรอน การทำงานของระบบควบคุมเกือบทั้งหมดในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 3 อาศัยระบบอัตโนมัติ โดยมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ช่วยในการทำงาน



รูปที่ 6.6 *ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนในห้องควบคุม (control room) ที่อาศัยคอมพิวเตอร์ PC (personal computer)*

6.6 ระบบลำเลียง (Beamline)

ระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน หรือเรียกสั้นๆว่าระบบลำเลียงแสง เป็นระบบที่ลำเลียงแสงซินโครตรอนออกจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนมายังสถานีทดลอง (experimental station บางครั้งอาจจะเรียกว่า end station กรณีสถานีทดลองอยู่ส่วนปลายของระบบลำเลียงแสง หรืออาจจะเรียกว่า side station กรณีสถานีทดลองขนาบติดด้านข้างของระบบลำเลียงแสง) ระบบลำเลียงแสงแต่ละระบบจะถูกออกแบบและสร้างขึ้นเฉพาะสำหรับแหล่งกำเนิดแสง ขึ้นอยู่กับลักษณะลำอิเล็กตรอน และชนิดของอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดแสงได้แก่ แม่เหล็กสองขั้ว อันดูเลเตอร์ หรือวิกเกลอร์ และเฉพาะสำหรับแต่ละเทคนิคการทดลองหรือเทคนิคการวัด ดังนั้นคุณลักษณะเฉพาะดังกล่าวถูกกำหนดจากความต้องการของการใช้งานในสถานีทดลอง เงื่อนไขทางเทคนิคของแสงที่ตกกระทบลงบนสารตัวอย่างโดยทั่วไปที่เป็นตัวกำหนดรูปแบบและอุปกรณ์ย่อยของระบบลำเลียงแสง ได้แก่ ช่วงพลังงานของโฟตอนหรือช่วงความยาวคลื่น ที่สามารถเลือกใช้งานได้โดยโมโนโครเมเตอร์

แถบความกว้างของพลังงานของโฟตอนที่ผ่านการคัดเลือกโดยโมโนโครเมเตอร์ (หรือความสามารถในการแยกแยะพลังงานโฟตอน) ขนาดของลำแสง ความคมหรือความลู่ของลำแสง และลักษณะโพลาไรเซชันของแสง

ในทางทัศนศาสตร์ ระบบลำเลียงแสงเป็นอุปกรณ์ที่จะสร้างภาพ (image) ของแหล่งกำเนิดแสงซึ่งเปรียบเสมือนวัตถุ (object) ลงบนระนาบของการเกิดภาพ (imaging plane) ซึ่งเป็นระนาบที่อยู่ ณ ตำแหน่งของสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษาหรือตรวจวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน แสงที่ตกกระทบสารตัวอย่างนั้นมีคุณสมบัติเฉพาะที่ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบลำเลียงแสง การจำแนกระบบลำเลียงแสงอาจจะทำได้โดยการจำแนกตามช่วงพลังงานของโฟตอนที่ลำเลียงได้ (เช่นระบบลำเลียงแสงอินฟราเรด ระบบลำเลียงแสงอัลตราไวโอเลต/อัลตราไวโอเลตสุญญากาศ หรือระบบลำเลียงแสงรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ/พลังงานสูง) หรืออาจจะแยกตามเทคนิคการตรวจวิเคราะห์ของสถานีทดลอง (เช่นระบบลำเลียงแสงด้านโฟโตอิมิชชัน ระบบลำเลียงแสงด้านสเปกโทรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอกซ์ ระบบลำเลียงแสงด้านการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นต้น)

การจำแนกระบบลำเลียงแสงตามช่วงพลังงานมีความสะดวก ระบบลำเลียงแสงย่านอินฟราเรดไม่จำเป็นที่จะต้องใช้โมโนโครเมเตอร์ในการคัดเลือกพลังงาน เนื่องจากระบบตรวจวัดวิเคราะห์ของแสงในย่านนี้อาศัยอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer) ระบบลำเลียงแสงในย่านอัลตราไวโอเลตใช้เกรตติงแบบสะท้อนเป็นชิ้นส่วนเชิงแสงหลักในการคัดเลือกพลังงาน โมโนโครเมเตอร์ชนิดเกรตติง (grating monochromator) สามารถใช้กับแสงในย่านอัลตราไวโอเลตสุญญากาศ สำหรับระบบลำเลียงแสงในย่านของรังสีเอกซ์ ผลึก (crystal) จะถูกใช้เป็นชิ้นส่วนเชิงแสงในโมโนโครเมเตอร์สำหรับการคัดเลือกความยาวคลื่นของแสง โมโนโครเมเตอร์ชนิดนี้เรียกว่าโมโนโครเมเตอร์ชนิดผลึก (crystal monochromator) ณ ปัจจุบันไม่มีการสร้างระบบลำเลียงแสงเฉพาะย่านที่ตามนุษย์มองเห็นได้ เนื่องจากว่าในย่านนี้มีแหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงที่มีคุณสมบัติที่ต้องการดีกว่าแสงซินโครตรอนอยู่แล้ว นั่นก็คือเลเซอร์

นอกเหนือจากระบบของชิ้นส่วนเชิงแสง ที่ใช้ในการลำเลียงและคัดเลือกแสงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน ระบบลำเลียงแสงยังประกอบไปด้วยระบบ

ย่อยอื่น ๆ เช่น ระบบสุญญากาศ ระบบการป้องกันอันตรายเนื่องจากรังสี ระบบป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดแสงเนื่องจากเหตุการณ์ที่ไม่คาดฝันที่อาจจะเกิดขึ้นในสถานีทดลอง

6.7 เครื่องกำเนิดแสงสยาม

ก่อนเริ่มยุครุ่งเรืองของเศรษฐกิจไทยเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2530 ประเทศไทยมีห้องปฏิบัติการวิจัยทางฟิสิกส์อยู่ไม่กี่แห่ง ห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์ที่ได้รับการสนับสนุนที่ดีที่พอจะทำอะไรได้ในช่วงนั้นก็คือห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์ของของแข็ง (นำทีมโดยศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ สายคณิต ตั้งอยู่ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) และศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง (นำทีมโดยรองศาสตราจารย์ ดร.ถิรพัฒน์ วิลัยทอง ตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่) เมื่อประเทศได้เข้าสู่ยุคของการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ โดยมีอัตราการเจริญเติบโตของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ทำให้นักฟิสิกส์ระดับแนวหน้าของประเทศในตอนนั้นมีแนวคิดที่จะสร้างห้องปฏิบัติการกลางระดับชาติ ที่สามารถรองรับและสนับสนุนงานวิจัยและพัฒนาได้หลากหลายสาขา และได้มีแนวความคิดว่าห้องปฏิบัติวิจัยแสงซินโครตรอนน่าจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและยกระดับการวิจัยด้านวิทยาศาสตร์พื้นฐานแขนงต่าง ๆ

ในปี พ.ศ. 2536 สภาวิจัยแห่งชาติจึงได้แต่งตั้งคณะทำงานเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการมีเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนในประเทศไทย *[4]* ข้อมูลจากการศึกษาได้ข้อสรุปว่า ประเทศไทยในขณะนั้นมีศักยภาพเพียงพอที่จะดำเนินการสร้างเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนขึ้นเอง *[5]* จึงได้มีการจัดทำข้อเสนอโครงการเพื่อยื่นขอการสนับสนุนจากรัฐบาล และในช่วงเดียวกันนั้น สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติได้รับแจ้งจากนักวิชาการชาวญี่ปุ่น (ศาสตราจารย์ ดร.Takehiko Ishii จากมหาวิทยาลัยโตเกียว) ถึงความเป็นไปได้ที่กลุ่มบริษัทในชื่อซอร์เทค (SORTEC CORPORATION) จะบริจาคเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนให้กับประเทศไทย คณะกรรมการบริหารสภาวิจัยแห่งชาติจึงได้แต่งตั้งคณะประสานงานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนขึ้น ประกอบด้วยนักวิชาการไทยจำนวน 6 คน *[6]* เดินทางไปประเทศญี่ปุ่น ในช่วงวันที่ 28-30 มกราคม พ.ศ. 2539 เพื่อประเมินสภาพของ

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนของกลุ่มบริษัทซอร์เทค จากการตรวจสภาพและดูการปฏิบัติงานของเครื่องโดยละเอียดรอบคอบ ได้มีความเห็นว่าเครื่องดังกล่าวทั้งระบบยังอยู่ในสภาพการทำงานที่ดีเยี่ยมและจะมีอายุการใช้งานอีกอย่างน้อย 20 ปี คณะผู้ประสานงานฯ จึงได้ร่างและนำเสนอ *"โครงการแสงสยาม"* ต่อคณะรัฐมนตรีในขณะนั้น และเมื่อวันที่ 5 มีนาคม พ.ศ. 2539 คณะรัฐมนตรีจึงมีมติอนุมัติจัดตั้ง *"ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ"* (ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็นสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)) ให้ดำเนินงานโครงการแสงสยาม โดยให้เป็นหน่วยงานในกำกับของกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (ในขณะนั้น) โดยมีระบบการบริหารงานเป็นอิสระจากระบบราชการ และดำเนินงานตามภารกิจภายใต้การกำหนดนโยบายของคณะกรรมการบริหารศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ



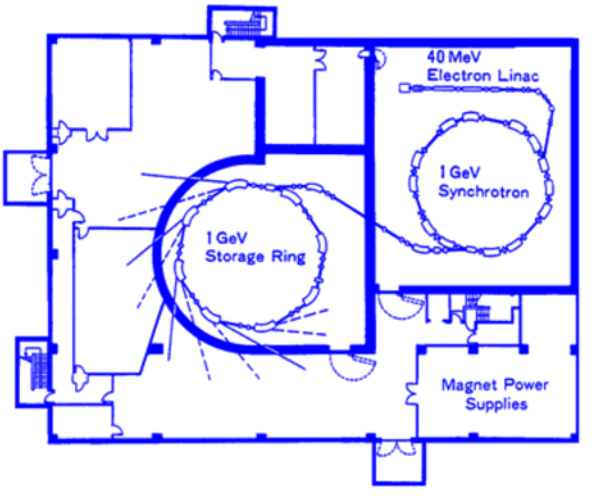
(ก)



(ข)

รูปที่ 6.7 *(ก) ภาพถ่ายคณะนักฟิสิกส์ไทย ขณะเดินทางดูงานเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอนในประเทศจีน ญี่ปุ่น เกาหลีใต้และ ไต้หวัน ระหว่างวันที่ 29 สิงหาคม - 14 กันยายน พ.ศ. 2536 บุคคลในภาพคือ (แถวหน้า จากซ้ายไปขวา) ศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณิต (หัวหน้าคณะ) รองศาสตราจารย์จงอร พีรานนท์ (แถวกลาง จากซ้ายไปขวา) ศาสตราจารย์ ดร. วิชิต ศรีตระกูล ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง (แถวหลัง) คุณขจรศักดิ์ จัยวัฒน์ (ข) ภาพหน้าปกของหนังสือชื่อ "เปิดยุคใหม่ไทยซินโครตรอน" ที่ศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณิตและคณะจัดทำขึ้น เล่าถึงที่มาของโครงการ "การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่อง Synchrotron Light Source ในประเทศไทย" ที่ได้รับการสนับสนุนเป็นอย่างดียิ่งจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ โดยมีศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณิต เป็นหัวหน้าโครงการ และรายละเอียดของการเดินทางเพื่อไปประชุมและดูงานใน 4 ประเทศดังกล่าวข้างต้น ซึ่งเป็นปฐมบทของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ในปัจจุบัน [5]*

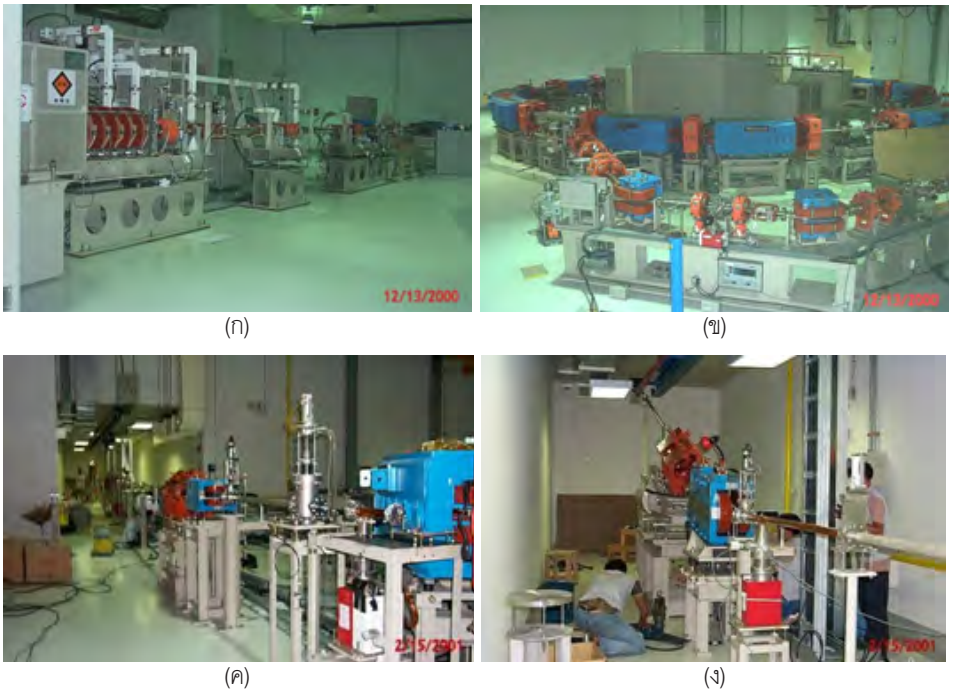
พื้นที่ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้ถูกเลือกให้เป็นที่ตั้งของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ด้วยเหตุผลหลักสองอย่างคือ บริเวณดังกล่าวไม่มีรอยเลื่อนของเปลือกโลก ทำให้โอกาสเกิดแผ่นดินไหวมีน้อยมาก และประเด็นที่สองคือว่ามหาวิทยาลัยมีอาคารที่รองรับการจัดเก็บชิ้นส่วนจำนวนมากที่จะเคลื่อนย้ายมาจากประเทศญี่ปุ่น หลังจากลงนามระหว่างฝ่ายไทยและกลุ่มบริษัทซอร์เทคผ่านกระทรวงการค้าและอุตสาหกรรม (Ministry of Trade and Industry, MITI) ของประเทศญี่ปุ่น ได้มีการรื้อเครื่องกำเนิดแสงที่ได้รับมอบจากกลุ่มบริษัทซอร์เทค และได้เคลื่อนย้ายชิ้นส่วนของเครื่องมาเก็บในอาคารสุรพัฒน์ 3 บริเวณเทคโนธานี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในช่วงวันที่ 9-10 มกราคม พ.ศ. 2540



รูปที่ 6.8 *แผนภาพแสดงเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนของกลุ่มบริษัทซอร์เทคก่อนที่จะมีการรื้อถอนและขนย้ายชิ้นส่วนส่งมายังประเทศไทย*

เนื่องจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่ได้รับบริจาคมานั้นถูกออกแบบมาเป็นการเฉพาะสำหรับการใช้งานวิจัยด้านลิโธกราฟี (Lithography) ซึ่งรองรับการพัฒนาวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดเล็กลง เครื่องดังกล่าวผลิตแสงซินโครตรอนที่มีความสว่างจ้าที่ต่ำและมีช่วงพลังงานแสงจำกัด จึงได้มีการออกแบบดัดแปลงวงกักเก็บของเครื่องกำเนิดแสง เพื่อที่จะสามารถผลิตแสงสำหรับงานวิจัยวิทยาศาสตร์พื้นฐานให้ครอบคลุมหลากหลายสาขา การออกแบบดัดแปลงวงกักเก็บแล้วเสร็จพร้อม ๆกันกับการเข้าสู่วิกฤติเศรษฐกิจต้มยำกุ้งในปี พ.ศ 2540 ขนาดของเครื่องกำเนิดแสงที่ดัดแปลงใหม่นี้มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะติดตั้งในอาคาร

สุรพัฒน์ 3 จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบและสร้างอาคารสำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดแสงสยาม การดำเนินการติดตั้งเครื่องกำเนิดแสงสยามเริ่มทันทีหลังการก่อสร้างอาคารแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2541



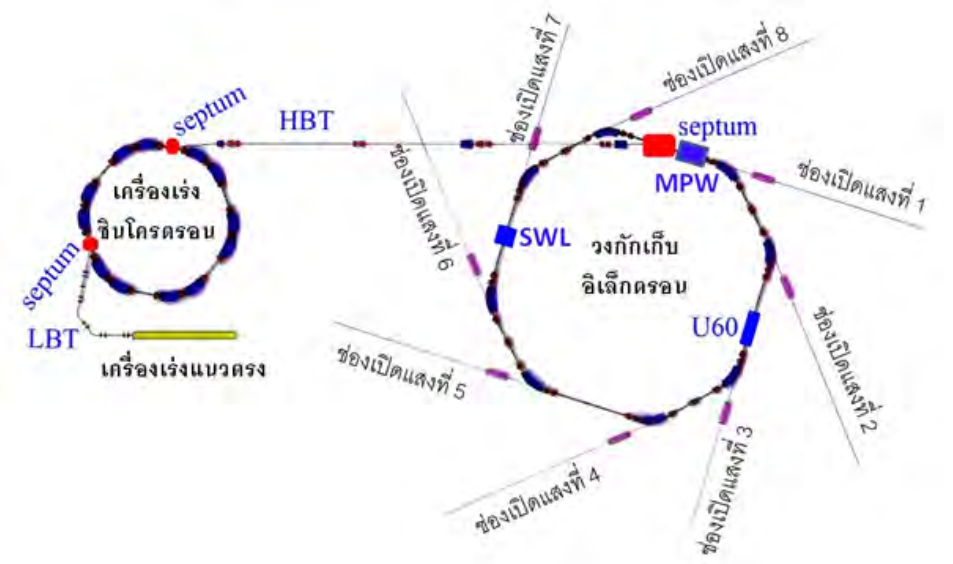
รูปที่ 6.9 *ภาพแสดงส่วนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ที่ติดตั้งในห้องใต้ดินของห้องปฏิบัติการแสงสยาม (ก) เครื่องเร่งอนุภาคในแนวตรงระดับพลังงาน 40 MeV (ข) ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำ เครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน ระดับพลังงาน 1.0 GeV (ค) ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูงออกจากเครื่องเร่งซินโครตรอน และ (ง) ส่วนบังคับอิเล็กตรอนขึ้นสู่ชั้นที่มีการติดตั้งวงแหวนกักเก็บ*

เครื่องกำเนิดแสงสยาม หรือเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเครื่องแรกของประเทศไทยได้ถูกปรับแต่งจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่ได้รับบริจาคจากประเทศญี่ปุ่น อาจจะเรียกเครื่องกำเนิดแสงสยามว่าเป็นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเครื่องใหม่ เนื่องจากประสิทธิภาพที่สูงกว่าเครื่องเดิม และสามารถผลิตแสงที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างและดีกว่าเดิม *[7, 8]* โดยการปรับแต่งในครั้งนั้น วงกักเก็บอิเล็กตรอนได้ถูกออกแบบใหม่เพื่อที่จะกักเก็บกระแสอิเล็กตรอนที่สูงกว่าเดิม ลำอิเล็กตรอนมีขนาดที่เล็กลง และมีการขยายวงกักเก็บอิเล็กตรอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์แทรกสองชนิดได้แก่ อันดูเลเตอร์สำหรับการผลิตแสงซิน

โครตรอนที่มีความเข้มสูงกว่าเครื่องเดิมถึง 1,000-10,000 เท่า และวิกเกลอร์สำหรับการผลิตแสงซินโครตรอนที่มีช่วงพลังงานที่กว้างกว่าเดิม ที่ครอบคลุมแถบของรังสีเอกซ์พลังงานสูง ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่ไม่สามารถผลิตได้จากเครื่องเดิม

เครื่องกำเนิดแสงสยามประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ (1) ระบบฉีดอิเล็กตรอนเข้าวงกักเก็บ และ (2) วงกักเก็บอิเล็กตรอน ระบบฉีดอิเล็กตรอนเข้าวงกักเก็บมีส่วนประกอบย่อยคือ ปืนอิเล็กตรอน เครื่องเร่งอิเล็กตรอนในแนวตรงขนาด 40 MeV ระบบลำเลียงอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ (low-energy beam transport line หรือ LBT) เครื่องเร่งซินโครตรอนขนาด 1 GeV ระบบลำเลียงอิเล็กตรอนพลังงานสูง (high-energy beam transport line หรือ HBT) แม่เหล็กเซ็บตัม (septum magnet) และแม่เหล็กคิกเกอร์ (kicker magnet) การติดตั้งระบบฉีดอิเล็กตรอนเข้าวงกักเก็บอิเล็กตรอนแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ยกเว้นส่วนระบบลำเลียงอิเล็กตรอนพลังงานสูง เนื่องจากเครื่องเร่งอนุภาคอยู่ชั้นใต้ดิน ส่วนวงกักเก็บอยู่บนระดับพื้นดิน ซึ่งต่างจากเครื่องเดิมที่มีการจัดวางทุกระบบในชั้นเดียวกัน

วงกักเก็บอิเล็กตรอนใหม่นี้มีลักษณะสมมาตรสี่ส่วน ซึ่งประกอบด้วยชุดแม่เหล็กที่เรียงกันแบบ DBA (double bend achromat) ที่เหมือนกันอยู่ 4 ชุด และระหว่างชุดแม่เหล็กทั้งสี่ชุดนั้นมีส่วนตรงที่มีความยาว 7 เมตร อีก 4 ส่วน ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้สำหรับรองรับการติดตั้งอุปกรณ์แทรกได้แก่ อันดูเลเตอร์ และวิกเกลอร์ และยังเป็นบริเวณที่ติดตั้งโพรงเร่งอนุภาคโดยอาศัยคลื่นวิทยุ ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับการชดเชยพลังงานของอิเล็กตรอนที่สูญเสียในรูปของแสงซินโครตรอน และแม่เหล็กเซ็บตัมสำหรับการฉีดอิเล็กตรอนเข้าวงกักเก็บ ชุดแม่เหล็กแบบ DBA ดังกล่าวทำหน้าที่บังคับทิศทางการเคลื่อนที่และควบคุมขนาดของลำอิเล็กตรอน สาเหตุในการเลือกชุดแม่เหล็กแบบ DBA คือความต้องการที่จะควบคุมจำนวนของแม่เหล็กที่จะสร้างเพิ่มเติมให้น้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าจำนวนแม่เหล็กสองขั้วของวงกักเก็บใหม่มีจำนวน 8 อันซึ่งเท่ากับจำนวนของแม่เหล็กสองขั้วของวงกักเก็บเดิม แต่อย่างไรก็ตาม การดัดแปลงวงกักเก็บในครั้งนี้จำเป็นต้องใช้แม่เหล็กสี่ขั้วเพิ่มอีก 12 อัน แม่เหล็กหกขั้วเพิ่มอีก 8 อัน และแม่เหล็กปรับแต่งทิศทางเพิ่มอีก 20 อัน ความยาวของเส้นรอบวงของวงกักเก็บมีค่าเท่ากับ 81.3 เมตร (ความยาวเส้นรอบวงของเครื่องเดิมเท่ากับ 45.7 เมตร)

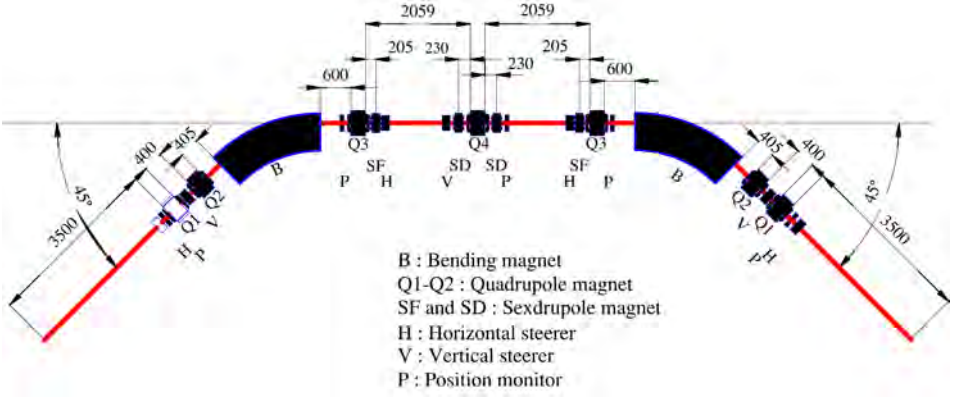


รูปที่ 6.10 *แผนภาพแสดงเครื่องกำเนิดแสงสยาม เริ่มจากอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยเครื่องเร่งแนวตรงให้มีพลังงาน 40 MeV และถูกส่งเร่งต่อในเครื่องเร่งซินโครตรอนให้มีพลังงาน 1.0 GeV ก่อนที่ถูกลำเลียงไปยังวงกักเก็บอิเล็กตรอน เพื่อเร่งต่อในวงกักเก็บให้มีพลังงาน 1.2 GeV และกักเก็บในวงเพื่อใช้ผลิตแสงซินโครตรอน (ปัจจุบันกำลังมีการปรับแต่งให้เครื่องเร่งซินโครตรอนสามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงาน 1.2 GeV)*

ในทางเทคนิค วงกักเก็บมีค่าคงที่ค่าหนึ่งเรียกว่าค่าอิมิตแตนซ์ดังกล่าวแล้วตอนต้น ค่าอิมิตแตนซ์ของวงกักเก็บของเครื่องกำเนิดแสงสยามมีค่าลดลงประมาณ 7 เท่าจากเครื่องเดิมที่มีค่า 500 nm·rad เป็น 74 nm·rad* ค่าที่ลดลงนี้บ่งบอกว่าลำอิเล็กตรอนในวงกักเก็บโดยเฉลี่ยมีขนาดเล็กลงจากเดิม ซึ่งส่งผลให้ขนาดของลำแสงซินโครตรอนที่ปลดปล่อยออกมามีขนาดเล็กลง การปรับปรุงชุดแม่เหล็กนั้นทำให้กระแสของอิเล็กตรอนกักเก็บในวงกักเก็บเพิ่มขึ้น เพื่อที่จะทำให้แสงซินโครตรอนที่ผลิตได้มีความเข้มสูงมากยิ่งขึ้น ทั้งสองปัจจัยข้างต้นจะทำให้ความสว่างจ้าเพิ่มขึ้นอีกเป็นอย่างมาก การปรับแต่งวงกักเก็บใหม่นี้ ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องสร้างท่อสุญญากาศในส่วนของวงกักเก็บขึ้นมาใหม่ โดยใช้อลูมิเนียมผสมเป็นวัสดุที่ใช้ในการทำท่อสุญญากาศ ความดันอากาศในวงกักเก็บจะอยู่ในช่วงปลายของระดับ 10^{-11} ทอร์

** rad ในที่นี้หมายถึง radian คือ หน่วยของมุม โดย 1 rad = 57.3 องศา (โดยประมาณ)*

ส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ซึ่งไม่ได้รับบริจาคมาพร้อมกับตัวเครื่องกำเนิดแสง เนื่องจากระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้กับระบบควบคุมเดิมเป็นเทคโนโลยีที่ล้าสมัย จึงมีความจำเป็นที่ต้องออกแบบและสร้างระบบควบคุมขึ้นมาใหม่ โดยระบบควบคุมแสงสยามเป็นระบบควบคุมเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ที่ใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (personal computer) ในการควบคุมเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากว่าประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นอย่างมาก



รูปที่ 6.11 *แผนภาพแสดงหนึ่งในชุดแม่เหล็กของวงกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม โดยตลอดทั้งวงกักเก็บจะประกอบด้วยชุดแม่เหล็กแบบนี้จำนวน 4 ชุด*

การออกแบบดัดแปลงวงกักเก็บแล้วเสร็จพร้อม ๆ กับการที่ประเทศไทยก้าวเข้าสู่วิกฤติเศรษฐกิจต้มยำกุ้งในปี พ.ศ 2540 ขนาดของเครื่องกำเนิดแสงที่ดัดแปลงใหม่นี้มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะติดตั้งในอาคารสุรพัฒน์ 3 จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบและสร้างอาคารสำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดแสงสยาม การดำเนินการติดตั้งเครื่องกำเนิดแสงสยามเริ่มทันทีหลังการก่อสร้างอาคารแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2541 หลังจากนั้นได้เริ่มทดสอบเดินเครื่อง โดยสามารถฉีดอิเล็กตรอนจากเครื่องเร่งแนวตรงเข้าในเครื่องเร่งซินโครตรอนเพื่อทำการเร่งให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นได้ในวันที่ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2544 ซึ่งทำให้สามารถสังเกตเห็นแสงซินโครตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน ต่อมาในวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2544 จึงประสบความสำเร็จในการลำเลียงอิเล็กตรอนจากเครื่องเร่งซินโครตรอนและฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปกักเก็บในวงกักเก็บอิเล็กตรอน ปัญหาหลักของการเดินเครื่องในช่วงแรกคือ

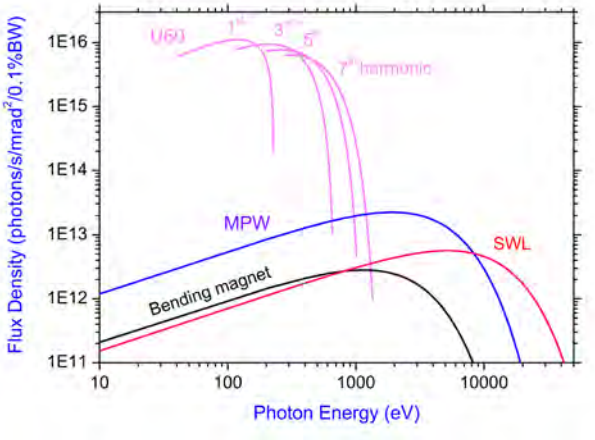
ความไม่เสถียรในตำแหน่งของลำอิเล็กตรอน ทำให้ได้แสงซินโครตรอนที่มีการกระเพื่อมตลอดเวลา ที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (ขนาดการกระเพื่อมของลำแสงมากถึง 2-3 มิลลิเมตร) ศาสตราจารย์ Helmut Wiedemann จาก Stanford University ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้นำทีมศึกษากลศาสตร์ของลำอิเล็กตรอนในวงกักเก็บเพื่อวิเคราะห์หาต้นตอของปัญหา จึงพบว่ามีการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรในขดลวดของแม่เหล็กสี่ขั้วที่ได้รับบริจาคมา เนื่องจากการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าที่ชุบเคลือบลวดไว้ จึงได้มีการดำเนินการเปลี่ยนขดลวดของแม่เหล็กสี่ขั้วที่ได้รับบริจาคทั้งหมด และเริ่มเดินเครื่องผลิตแสงซินโครตรอนเพื่อให้บริการตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2548 เป็นต้นมา

วงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนได้ถูกออกแบบใหม่และถูกปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง แต่เดิมพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่า 1.0 GeV ปัจจุบันได้มีการใช้โพรงเร่งอนุภาคด้วยคลื่นวิทยุของวงแหวนกักเก็บ ในการเร่งอิเล็กตรอน ที่มีพลังงาน 1.0 GeV ที่ลำเลียงมาจากเครื่องเร่งซินโครตรอน ให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 1.2 GeV ทำให้สามารถผลิตแสงที่ค่าพลังงานโฟตอนสูงขึ้นให้มีความเข้มเพิ่มขึ้น และที่สำคัญคือการที่ช่วงชีวิต (life time) ของลำอิเล็กตรอนในวงแหวนกักเก็บได้ถูกทำให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าที่ออกแบบไว้ 6 ชั่วโมงเป็นมากกว่า 20 ชั่วโมงที่ค่ากระแส 100 มิลลิแอมแปร์ การที่ค่าช่วงชีวิตของลำอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้นนี้ แสดงถึงการที่อิเล็กตรอนได้ถูกบังคับให้โคจรอยู่ใกล้กับวงโคจรในอุดมคติมากที่สุด ทำให้มีการสูญเสียปริมาณอิเล็กตรอนในอัตราที่ช้า นั่นแสดงถึงประสิทธิภาพการควบคุมของเครื่องกำเนิดแสงสยามได้มีการพัฒนาให้ดีขึ้น



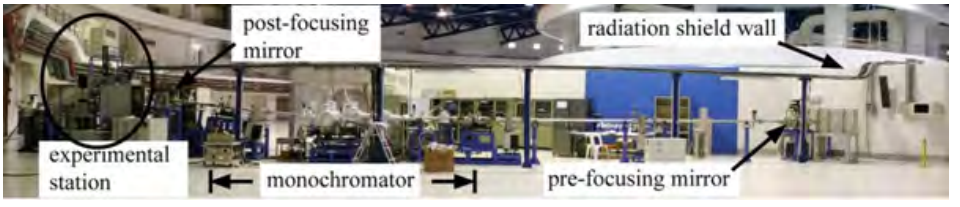
รูปที่ 6.12 *ศาสตราจารย์ James Clarke สังกัด ASTeC (คนกลาง) ได้พาผู้เขียนไปตรวจดูสภาพ MPW ในโกดังเก็บชิ้นส่วนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนของศูนย์วิจัยดาเรสบูรี ศาสตราจารย์ Clarke ได้ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการเพื่อขอยืม MPW มาใช้กับเครื่องกำเนิดแสงสยาม ปัจจุบัน MPW ดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ที่สามารถผลิตรังสีเอกซ์พลังงานสูงที่มีความสว่างจ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดแสงสยาม*

ในขณะเดียวกัน การพัฒนาเครื่องกำเนิดแสงสยามจำเป็นที่ต้องเดินไปในแนวทางที่ต้องผลิตรังสีเอกซ์พลังงานสูง ในย่านพลังงานโฟตอนมากกว่า 10 keV หรือย่านความยาวคลื่นที่สั้นกว่า 0.1 นาโนเมตร เพื่อสนองความต้องการในเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้รังสีเอกซ์พลังงานสูงเช่น เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เทคนิคการกระเจิงของรังสีเอกซ์ ตลอดจนเทคนิคสเปกโทรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอกซ์สำหรับธาตุหนัก ผู้เขียนได้รับความช่วยเหลือจากคณะอนุกรรมการที่ปรึกษานานาชาติของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศาสตราจารย์ Josef Hormes (ผู้อำนวยการของ Canadian Light Source ประเทศแคนาดา) และศาสตราจารย์ Keng Liang (ผู้อำนวยการของ National Synchrotron Radiation Research Center หรือ NSRRC ที่ไต้หวัน) ในการช่วยประสานงานการขอยืม/บริจาควิกเกลอร์จากห้องปฏิบัติการแสงซินโครตรอนอื่น ในที่สุดประเทศไทยก็โชคดีที่ได้รับบริจาค superconducting wavelength shifter (SWL) ขนาด 6.5 เทสลา จาก NSRRC และทาง ASTeC (Accelerator Science and Technology Center ประเทศสหราชอาณาจักร) ได้ให้ยืม multipole wiggler (MPW) ขนาด 2.4 เทสลา ซึ่งแต่เดิมถูกใช้ในวงกักเก็บของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนของศูนย์วิจัยดาเรสบูรี และต่อมาทางสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนได้ขอซื้อ MPW จาก ASTeC



รูปที่ 6.13 *กราฟแสดงสเปกตรัมของความหนาแน่นฟลั๊ก (flux density) ของโฟตอนที่ผลิตจากแม่เหล็กสองขั้ว อันดูเลเตอร์ U60 และ 6.5-T SWL และ วิกเกลอร์ 9 ขั้ว ขนาด 2.4 เทสลาของเครื่องกำเนิดแสงสยาม (สเปกตรัมของอันดูเลเตอร์เป็นการแสดงค่าสูงสุดของแสงแต่ละฮาร์มอนิก เมื่อมีการปรับระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กบน-ล่าง)*

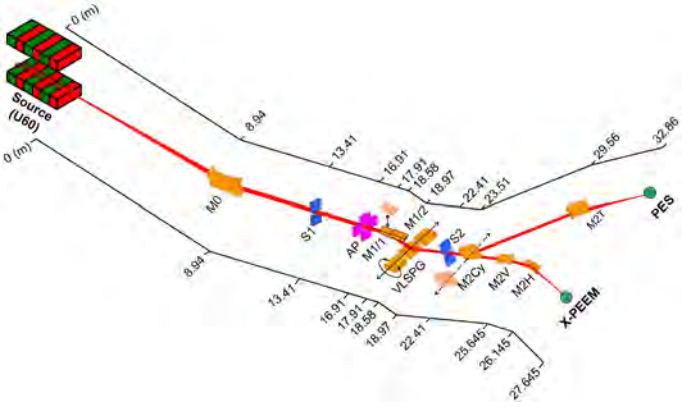
เครื่องกำเนิดแสงสยามผลิตแสงซินโครตรอนครอบคลุมตั้งแต่ย่านแสงใต้แดง จนถึงรังสีเอกซ์พลังงานสูง โดยแสงซินโครตรอนผลิตได้จากแม่เหล็กสองขั้ว (BM) อันดูเลเตอร์ (U60) วิกเกลอร์หลายขั้ว (MPW) และจาก SWL ณ ปัจจุบัน วงกักเก็บอิเล็กตรอนมีช่องเปิดนำแสงออกมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด 8 ช่อง ซึ่งสามารถรองรับระบบลำเลียงอย่างน้อย 16 ระบบลำเลียงแสง ระบบลำเลียงแสงแรก (ระบบลำเลียงแสง BL4) ที่สร้างขึ้น เป็นการนำแสงที่ผลิตจากแม่เหล็กสองขั้วจากช่องเปิดแสงที่ 4 ในช่วงพลังงาน 20-240 eV ไปใช้ประโยชน์ในเทคนิคการวัด PES (photoemission spectroscopy) สำหรับการศึกษาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุ *[9-11]* ระบบลำเลียงแสงดังกล่าวได้ถูกปรับแต่งและย้ายไปใช้แสงจากอันดูเลเตอร์ U60 จากช่องเปิดแสงที่ 3 โดยเปลี่ยนชื่อเป็นระบบลำเลียงแสง BL3.2 ในปี พ.ศ. 2552 *[12-14]*



รูปที่ 6.14 *ระบบลำเลียงแสง BL4 ของ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ลำเลียงแสงจากแหล่งกำเนิดซึ่งเป็นแม่เหล็กสองขั้ว (ที่ติดตั้งอยู่หลังกำแพงกั้นรังสี หรือ radiation shielding wall) โดยระบบกระจกก่อนและหลังโมโนโครเมเตอร์ (pre- และ post-focusing mirror systems) และโมโนโครเมเตอร์ชนิดเกรตติงที่สามารถคัดเลือกแสงที่มีพลังงานโฟตอนในช่วง 20 ถึง 240 eV*

ระบบลำเลียงแสงที่สองสร้างขึ้นโดยความบังเอิญ ในปี พ.ศ. 2546 ศาสตราจารย์ Josef Hormes (ขณะนั้นดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน CAMD, Louisiana, US) ได้มาเยี่ยมชมห้องปฏิบัติการแสงซินโครตรอนของไทย จึงได้เสนอให้สร้างระบบลำเลียงแสงสำหรับเทคนิคสเปกโทรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (X-ray absorption spectroscopy, XAS) โดยได้ขอซื้อโมโนโครเมเตอร์และระบบวัดที่ถูกพัฒนาพร้อมใช้โดยกลุ่มวิจัยของ ศาสตราจารย์ Hormes ที่ Bonn University ประเทศเยอรมนี (มหาวิทยาลัยต้นสังกัดของ ศาสตราจารย์ Hormes) การดำเนินการสร้างระบบลำเลียงแสง BL8 เป็นไปอย่างรวดเร็วโดยมีการใช้แสงจากแม่เหล็กสองขั้วจากช่องเปิดแสงที่ 8 และเริ่มเปิดให้บริการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 เป็นต้นมา *[15-16]* พร้อม ๆกันกับการสร้างระบบลำเลียงแสง BL8 ได้มีกลุ่ม

วิจัยสนใจในการพัฒนาเทคนิคการผลิตชิ้นส่วนจักรกลขนาดจิ๋วโดยใช้แสงซินโครตรอน จึงได้มีการปรับช่องเปิดแสงที่ 6 ซึ่งแต่เดิมใช้ในการตรวจตราและ/หรือวัดลักษณะของลำอิเล็กตรอน เป็นระบบลำเลียงแสง BL6 เพื่อใช้ในเทคนิค deep X-ray lithography *[17]*



รูปที่ 6.15 *แสดงแผนผังการจัดวางกระจก (M0, M1/1, M1/2, M2Cy, M2T, M2V และ M2H) เกรตติง VLSPG และช่องเปิดแสง (S1, AP และ S2) ชิ้นส่วนดังกล่าวลำเลียงแสงจากอันดูเลเตอร์และคัดเลือกค่าพลังงานแสงที่อยู่ช่วง 40-1,000 eV ไปใช้ในระบบวัด PES และ X-PEEM (X-ray photoemission electron microscopy) ขนาดของลำแสงที่ตกกระทบบนตัวอย่างมีขนาดประมาณ 10 x 100 ตารางไมโครเมตร (สเกลความยาวของระบบลำเลียงแสงในรูปมีหน่วยเป็นเมตร)*

หลังจากที่ ศาสตราจารย์ Hormes ได้ปิดห้องปฏิบัติการวิจัยแสงซินโครตรอนที่ใช้แสงจากเครื่องเร่งอนุภาค ELSA (ELectron Stretcher Accelerator) ของ Bonn University ศาสตราจารย์ Hormes ได้บริจาคระบบลำเลียงแสงเทคนิค Time-resolved XAS และ Normal incident monochromator ให้กับสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนในปี พ.ศ. 2552 ด้วยความร่วมมือระหว่าง Bonn University สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี การสร้างระบบลำเลียงแสงจากชิ้นส่วนที่ได้รับบริจาค โดยใช้ช่องเปิดแสงที่ 4 เป็นไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากยังคงมีส่วนหน้าของระบบลำเลียงแสง BL4 เดิมติดตั้งอยู่ จึงทำให้มีระบบลำเลียงแสงสำหรับงานด้าน Time-resolved XAS ที่ใช้ energy-dispersive monochromator เปิดให้บริการในปี พ.ศ. 2553 ระบบลำเลียงแสงดังกล่าวเป็นระบบลำเลียงแสงที่มีเอกลักษณ์และมีเพียง 3 ระบบในโลกนี้ ในเวลาต่อมา ได้มีการย้ายไปใช้ช่องเปิดแสงที่ 2 และเปลี่ยนชื่อเป็นระบบลำเลียงแสง BL2.2 *[18]*

ด้วยความก้าวหน้าของวิทยาการในการผลิต multi-layer mirror เปิดโอกาสให้มีการนำเอารังสีเอกซ์ผลิตจากแม่เหล็กสองขั้วของเครื่องกำเนิดแสงสยามมาใช้สำหรับเทคนิค Small-Angle/Wide-Angle X-ray Scattering (SAXS/WAXS) โดยมีการสร้างระบบลำเลียงแสงจากช่องเปิดแสงที่ 2 สำหรับการวัดเทคนิค SAXS *[19]* ต่อมาระบบลำเลียงแสงดังกล่าวได้มีการย้ายไปติดตั้ง ณ ช่องเปิดแสงที่ 1 เพื่อใช้รังสีเอกซ์ที่ความเข้มสูงกว่าที่ผลิตจากวิกเกลอร์ MPW และเปลี่ยนชื่อตามเป็นระบบลำเลียงแสง BL1.3

ความต้องการใช้ประโยชน์แสงเพิ่มขึ้นตามเวลา ทำให้มีสองหน่วยงานคือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติได้ทำข้อตกลงร่วมกับสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนเพื่อสร้างระบบลำเลียงแสง เพื่อที่จะเปิดโอกาสให้บุคลากรวิจัยของสองหน่วยงานดังกล่าวมีเวลาการใช้แสงมากขึ้น จึงได้มีการร่วมลงทุนสร้างระบบลำเลียงแสง BL5 สำหรับเทคนิค XAS โดยมีระบบลำเลียงแสง BL8 เป็นต้นแบบในการสร้าง ปัจจุบันมีการเปิดให้บริการแสงทั้งหมด 6 ระบบลำเลียงแสง และมีอีก 3 ระบบลำเลียงแสงที่อยู่ในช่วงการสร้างและ/หรือการปรับประสิทธิภาพการทำงานให้สอดคล้องกับการออกแบบ



รูปที่ 6.16 *ดร. คุณหญิงกัลยา โสภณพานิช เป็นสักขีพยานลงนามการบริจาคระบบลำเลียงแสงจาก Bonn University ให้แก่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน โดยมี ศาสตราจารย์ Josef Hormes (ขวา) และรองศาสตราจารย์ ดร.วีระพงษ์ แพสุวรรณ (ซ้าย) ผู้อำนวยสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนในขณะนั้น เป็นผู้ลงนาม ณ โรงแรมสยามซิตี้ (โรงแรมสุโกศลในปัจจุบัน) กรุงเทพมหานคร ในวันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2552*



รูปที่ 6.17 *สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนินทรงเปิดระบบลำเลียงแสง Bonn-SUT-SLRI ซึ่งเป็นระบบลำเลียงแสงที่สร้างขึ้นโดยชิ้นส่วนที่ได้รับบริจาคจากห้องปฏิบัติการวิจัยของ ศาสตราจารย์ Josef Hormes สังกัด Bonn University เมื่อวันที่ 25 ตุลาคม พ.ศ. 2553*

6.8 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอน

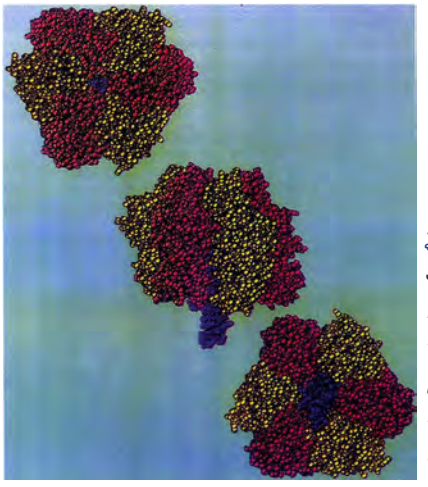
ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของแสงซินโครตรอนที่กล่าวมาข้างต้น แสงซินโครตรอนได้ถูกนำไปศึกษาและตรวจวิเคราะห์ชนิดของอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของสสาร และการจัดเรียงตัวของอะตอมในสสาร สสารนั้นอาจจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ อาจจะเป็นสิ่งมีชีวิตหรือสิ่งไม่มีชีวิต ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคที่ใช้แสงซินโครตรอนส่วนใหญ่เป็นข้อมูลที่ไม่สามารถได้มาจากเทคนิคการวัดในห้องปฏิบัติการทั่วไป เนื่องจากเทคนิคการวัดโดยใช้แสงซินโครตรอนได้ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยและพัฒนาหลากหลายสาขา สิ่งที่จะกล่าวถึงในลำดับต่อไปนี้เป็นเพียงตัวอย่างส่วนหนึ่งเท่านั้น โดยเน้นผลงานที่ไม่สามารถทำได้ด้วยเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการทั่วไป ซึ่งเกือบทั้งหมดเป็นงานที่ใช้แสงซินโครตรอนรุ่นที่ 3 และยกตัวอย่างการใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนผลิตจากเครื่องกำเนิดแสงสยาม โดยจะแสดงให้เห็นถึงพัฒนาการของกลุ่มผู้ใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดแสงสยาม

ตารางที่ 6.1 สรุปข้อมูลระบบลำเลียงแสงของเครื่องกำเนิดแสงสยาม

ชื่อระบบลำเลียงแสง	แหล่งกำเนิดแสง: ช่วงพลังงาน	เทคนิคการวัด
ระบบลำเลียงแสงที่เปิดให้บริการ		
BL1.3	MPW : 6-9 keV	SAXS (small angle X-ray scattering)
BL2.2	BM : 2.4-12 keV	Time-resolved XAS (X-ray absorption spectroscopy)
BL3.2	U60 : 40 -1,000 eV	PES (photoemission spectroscopy) และ PEEM (photoemission electron microscopy)
BL5	BM : 1.4 - 12 keV	XAS
BL6	BM : white light	DXL (deep X-ray lithography), micro-XRF (X-ray fluorescence)
BL8	BM : 1.4 - 12 keV	XAS
ระบบลำเลียงแสงที่อยู่ในช่วงการสร้างและ/หรือการปรับแต่งประสิทธิภาพ		
BL1.2	MPW : 6 - 15 keV	XRF, XRD (X-ray diffraction) และ XAS
BL4	BM : 0.01-0.5 eV (1-100 nm)	IR microscopy และ spectroscopy
BL7.2	SWL : 5 - 20 keV	Protein crystallography

6.8.1 ประโยชน์ด้านวิทยาศาสตร์สิ่งมีชีวิต

ในห้องปฏิบัติการแสงซินโครตรอนที่ทันสมัย กลุ่มผู้ใช้ที่มีจำนวนมากกลุ่มหนึ่งคือนักวิทยาศาสตร์จากมหาวิทยาลัย และจากบริษัทผลิตยา ผู้ใช้กลุ่มนี้ใช้แสงซินโครตรอนย่านรังสีเอกซ์ในการวิเคราะห์หาโครงสร้างสามมิติของโปรตีน เอนไซม์ หรือไวรัส โครงสร้างดังกล่าวเป็นตัวกำหนดหน้าที่หรือวิธีการทำงานของมัน ข้อมูลที่ได้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการพัฒนาสารเคมีที่จะใช้เป็นยารักษาโรค นักวิทยาศาสตร์ที่ใช้แสงซินโครตรอนที่ได้รับรางวัลโนเบลคนแรกคือ Sir John F. Walker เป็นรางวัลสาขาเคมีในปี พ.ศ. 2540 โดยงานวิจัยของท่านได้มีการใช้แสงซินโครตรอน



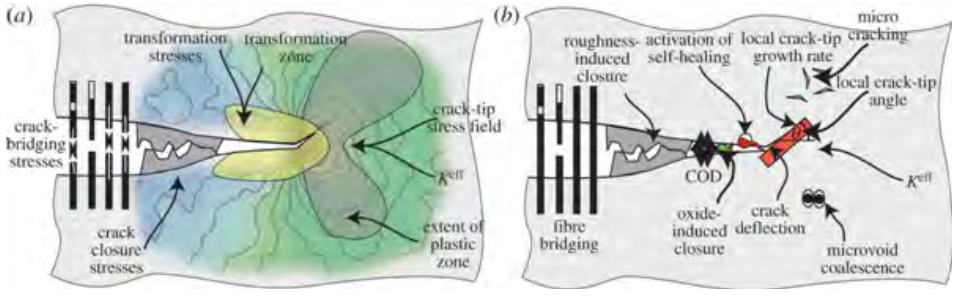
รูปที่ 6.18 *โครงสร้างสามมิติของ Bovine F1 ATP Synthase ส่วนที่เป็นสีแดง สีเหลืองและสีน้ำเงินคือหน่วยย่อย α, β, และ γ ตามลำดับ โดยภาพทั้งสามเป็นภาพที่มองจากทิศทางที่ต่างกันคือมองจากด้านบน ด้านข้าง และด้านล่าง ตามลำดับ การทราบถึงโครงสร้างสามมิติทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถทำความเข้าใจถึงการทำงานของเอนไซม์ดังกล่าว [20]*

ในการวิเคราะห์หาโครงสร้างสามมิติของ *Bovine F1 ATP Synthase* ซึ่งเป็นเอนไซม์สำคัญที่จะทำให้เกิดพลังงานสำหรับเซลล์สิ่งมีชีวิต เพื่อที่จะสังเคราะห์ ATP ซึ่ง ATP ก็จะถูกใช้ในการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างเซลล์ *[20]* ต่อมาในปี พ.ศ. 2549 ศาสตราจารย์ Roger Kornberg ได้รับรางวัลโนเบลในสาขาเดียวกันและใช้เทคนิคเดียวกันในงานวิจัยที่นำไปสู่ความเข้าใจในกระบวนการคัดลอกรหัสของยีนของมันเอง ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่มีความสำคัญและเกี่ยวข้องกับการเกิดโรคหลายชนิดในมนุษย์ตลอดจนความเป็นไปได้ในการรักษาโรคดังกล่าวโดยอาศัยเซลล์ต้นกำเนิด *[21]* ตัวอย่างยาที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ข้อมูลจากเทคนิคแสงซินโครตรอน ได้แก่ ยารักษาโรคหวัด Tamiful และยา Herceptin ที่ใช้ในการรักษามะเร็งเต้านม การเกิดโรคระบาดที่เป็นเชื้อไวรัสในช่วงที่ผ่านมา เช่น ไข้หวัดนก สิ่งแรกที่นักวิทยาศาสตร์จะต้องดำเนินการคือการวิเคราะห์หาโครงสร้างสามมิติของมัน นอกเหนือจากนั้นแสงซินโครตรอนในย่านของแสงใต้แดงกำลังถูกนำไปใช้สำหรับการพัฒนาเทคนิคการตรวจวินิจฉัยมะเร็งในร่างกายคน และการติดตามพัฒนาการของเซลล์ต้นกำเนิดที่มีความคาดหวังว่าจะได้นำไปใช้รักษาโรคที่มีการส่งผ่านทางพันธุกรรม

6.8.2 ประโยชน์ด้านวิศวกรรม

แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์พลังงานสูงมีอำนาจทะลุทะลวงค่อนข้างสูง ทำให้สามารถใช้ในการตรวจวิเคราะห์รายละเอียดความเครียด (strain) และรอยแตก

(crack) ในวัสดุหรือชิ้นงาน ที่มีขนาดเทียบเคียงกับชิ้นงานในสภาวะใช้งานจริง และด้วยความสว่างจ้าที่สูงมากของรังสีเอกซ์ การวัดจึงทำได้ในเวลาอันสั้นและสามารถที่จะติดตามการขยายตัวของรอยแตกหรือการเติบโตของความบกพร่องในโลหะ ซึ่งทำให้ได้ทราบกลไกการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว เพื่อนำไปปรับปรุงและแก้ไขกระบวนการผลิตเพื่อการพัฒนาวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูง *[22]* ยังมีปรากฏการณ์อื่นที่แสงซินโครตรอนได้ถูกนำไปใช้ศึกษา เช่นกระบวนการที่อยู่เบื้องหลังการกัดกร่อน (corrosion) ของโลหะป้องกันการกัดกร่อนที่ใช้ในภาชนะบรรจุกากนิวเคลียร์ ซึ่งนำไปสู่ความเข้าใจว่าความเครียดในวัสดุอาจทำให้รอยแตกเกิดการขยายตัวในวัสดุได้

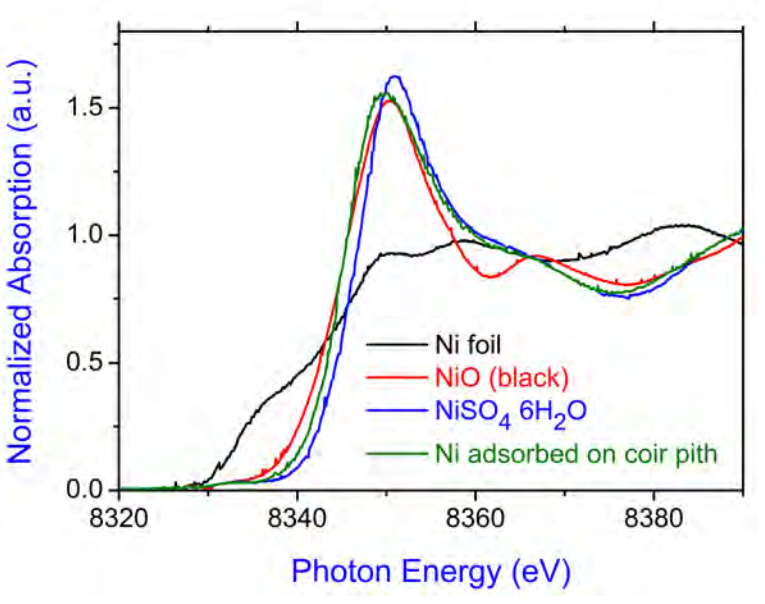


รูปที่ 6.19 *แผนภาพแสดงกลไกการขยายตัวของรอยแตกหรือการเติบโตของความบกพร่องในโลหะที่สามารถวิเคราะห์ได้จาก (a) เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และจาก (b) เทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานสูง [22]*

6.8.3 ประโยชน์ด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

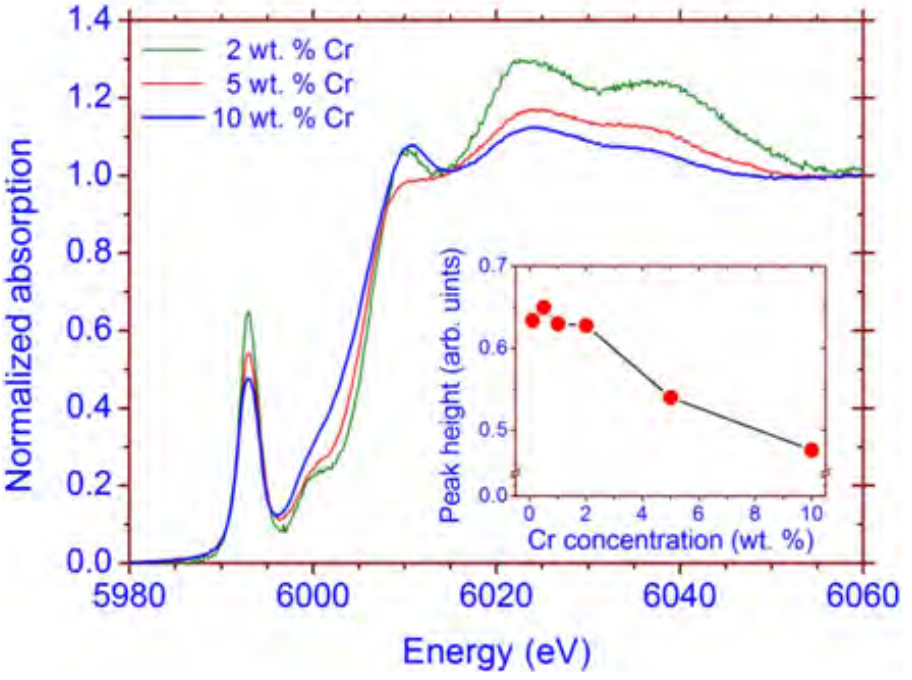
ในช่วงประมาณ 10 ปีที่ผ่านมา เทคนิคการวัดด้วยแสงซินโครตรอนเป็นที่ยอมรับในวงการวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เนื่องจากว่าความสว่างจ้าที่สูงมากของแสงซินโครตรอนช่วยให้การศึกษา/การวัดมีความละเอียดและความไวสูงในการตรวจวัดสารเจือหรือธาตุที่มีความเข้มข้นที่ต่ำมาก ๆที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และยังสามารถระบุถึงข้อมูลทางเคมีของธาตุได้อีกด้วย ข้อมูลทางเคมีดังกล่าวเป็นตัวบ่งบอกถึงความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลที่กระทบต่อสิ่งมีชีวิตในบริเวณดังกล่าว ได้มีการนำเอาเทคนิค XAS ศึกษากลไกการดูดซับโลหะนิกเกิลและโครเมียมของขุยมะพร้าว เพื่อมุ่งหวังที่จะลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม อาทิเช่น อุตสาหกรรมการชุบโลหะในขั้นตอนการชุบนิกเกิลหรือโครเมียม พบว่านิกเกิลที่ถูกดูดซับมีเลขออกซิเดชัน + 2 และมี

โครงสร้างพันธะแบบ octahedral นอกจากนี้ยังพบว่ากลไกการดูดซับนิกเกิลด้วยขุยมะพร้าวนั้นเกี่ยวข้องกับหมู่ไฮดรอกซิล คาร์บอกซิล และ เมทอกซี ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของขุยมะพร้าว *[23]*



รูปที่ 6.20 *สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์โดยนิกเกิลที่ถูกดูดซับโดยขุยมะพร้าวเทียบกับนิกเกิลในรูปแบบอื่น ๆ จากการเปรียบเทียบสเปกตรัมกับสารอ้างอิง (NiO และ $NiSO_4 \cdot 6H_2O$) นิกเกิลที่ถูกดูดซับมีเลขออกซิเดชัน + 2 และมีโครงสร้างพันธะแบบ octahedral*

เทคนิค XAS ยังนำไปศึกษาหาแนวทางการขจัดโลหะหนักโดยนำไปเจือในเม็ดปูนซีเมนต์ โดยมีการผสมธาตุโครเมียมในสัดส่วนต่าง ๆเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเม็ดปูน หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์หาข้อมูลทางเคมีหรือโครงสร้างทางเคมีของธาตุโครเมียมที่อยู่ในเม็ดปูน พบว่าสำหรับสัดส่วนของโครเมียมที่ 2 % โดยน้ำหนักหรือน้อยกว่า โครเมียมที่อยู่ในเม็ดปูนจะมีเลขออกซิเดชันเป็น + 6 แต่หากสัดส่วนของโครเมียมเพิ่มเป็น 5 หรือ 10 % โดยน้ำหนัก พบว่ามีโครเมียมที่มีออกซิเดชันอื่น ๆ ปนกันกับ + 6 *[24]* เป็นที่ทราบกันดีว่าโครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันเป็น + 6 เป็นพิษต่อมนุษย์ นอกจากนั้นแสงซินโครตรอนยังได้ถูกนำไปใช้ในการศึกษาเพื่อพัฒนาเทคนิคสำหรับการจัดเก็บไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) ที่คาดว่าจะเป็นแหล่งพลังงานสะอาดในอนาคต



รูปที่ 6.21 *สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของ Cr ในเม็ดปูนซีเมนต์ ในกรณีที่สัดส่วนของ Cr ต่ำกว่า 2 % wt. สเปกตรัมมีลักษณะเช่นเดียวกันกับเม็ดปูนที่เตรียมจาก Cr 2 % wt. สเปกตรัมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า Cr มีเลขออกซิเดชัน + 6 หากปริมาณของ Cr ที่ใช้เตรียมเป็น 5 หรือ 10 % wt. พบว่ามี Cr ที่มีเลขออกซิเดชันอื่นเพิ่มจาก + 6 การลดลงของปริมาณ Cr มีเลขออกซิเดชัน + 6 สามารถสังเกตได้จากการลดลงของความสูง (peak) ที่ค่าพลังงาน 5,993 eV [24]*

6.8.4 ประโยชน์ด้านฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์

แสงซินโครตรอนสามารถนำไปใช้ในการตรวจหาคุณสมบัติและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชั้นวัสดุและรอยต่อระหว่างวัสดุ เป็นหัวข้อสำคัญในงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมของวัสดุที่เป็นของแข็ง โครงสร้างของวัสดุที่เป็นชั้น ๆดังกล่าวเป็นโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ทันสมัยมากมาย ผลงานที่โดดเด่นอย่างหนึ่งของการใช้แสงซินโครตรอนคือการพัฒนาวัสดุที่มีคุณสมบัติการเปลี่ยนค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของชั้นวัสดุที่เหนี่ยวนำโดยสภาพการเป็นแม่เหล็กของชั้นฟิล์มสารแม่เหล็กที่อยู่ด้านข้าง หรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อย่อ GMR (Giant Magnetoresistance) โดยอาศัยอันตรกิริยาระหว่างโพลาไรเซชันของแสงซินโครตรอนกับสปินของอิเล็กตรอน ทำให้ทราบถึงโดเมนทางแม่เหล็กของฟิล์มสารแม่เหล็กที่ระดับความ

ลึกต่าง ๆ ความรู้เกี่ยวกับปรากฏการณ์ GMR ดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการพัฒนาหัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสค์ เซนเซอร์ทางชีวภาพ และในระบบจักรกลไฟฟ้าขนาดจิ๋ว ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน *[25]* แสงซินโครตรอนยังถูกนำไปศึกษาเกี่ยวกับความเป็นระเบียบของสปิน ประจุ และการกระจายของอิเล็กตรอนในสารชนิดต่าง ๆ เช่นสารแม่เหล็ก สารกึ่งตัวนำ และตัวนำยิ่งยวดที่ใช้งานในอุณหภูมิสูง ตลอดจนการศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำพอลิเมอร์ขณะที่กำลังขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง นับเป็นอีกหัวข้อหนึ่งที่สำคัญสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และแบตเตอรี่ในอนาคต

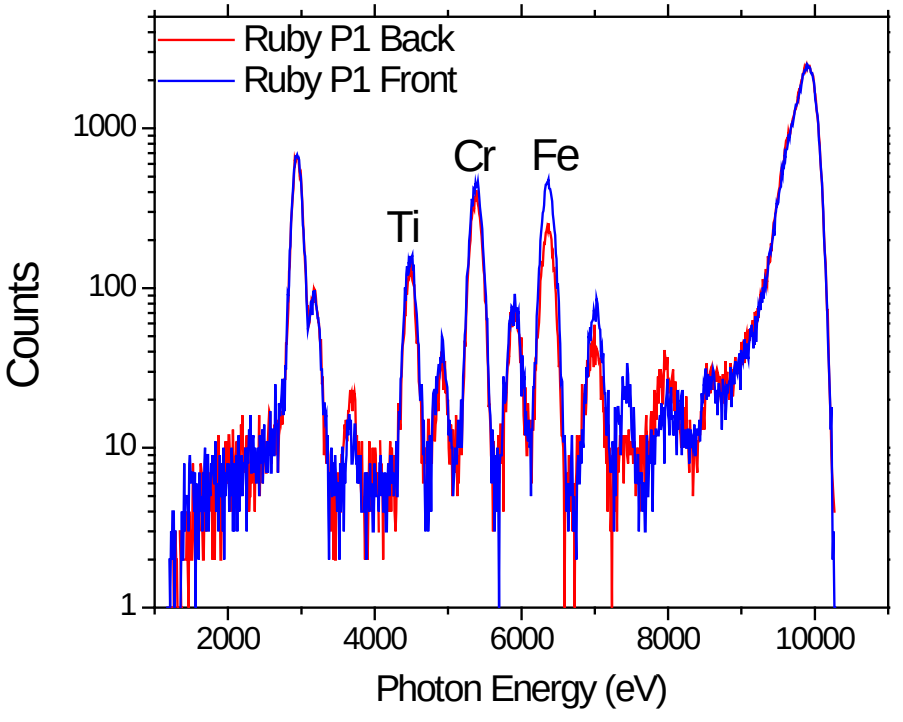


รูปที่ 6.22 *ภาพวาด Patch of Grass ที่ Van Gogh วาดทับภาพผู้หญิงที่ได้วาดไว้ก่อนหน้า [27]*

6.8.5 ประโยชน์ด้านมรดกทางวัฒนธรรม

การใช้แสงซินโครตรอนไปศึกษาโบราณวัตถุที่เป็นมรดกทางวัฒนธรรม เป็นหัวข้องานวิจัยที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา โดยอาศัยรังสีเอกซ์ที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงและอาศัยเทคนิคการวัดที่ไม่ทำความเสียหายให้แก่วัตถุโบราณที่นำมาวิเคราะห์ ตัวอย่างงานที่น่าสนใจ ได้แก่งานวิเคราะห์ภาพวาดของ Vincent Van Gogh โดยใช้แสงซินโครตรอนที่ศูนย์วิจัย DESY ของประเทศเยอรมนี ภาพวาดดังกล่าวคือ "Patch of Grass" ได้มีการค้นพบว่าภาพวาด "Patch of Grass" เป็นภาพที่วาดทับภาพวาดรูปคนที่วาดก่อนหน้าโดย Van Gogh เช่นกัน *[26-27]*

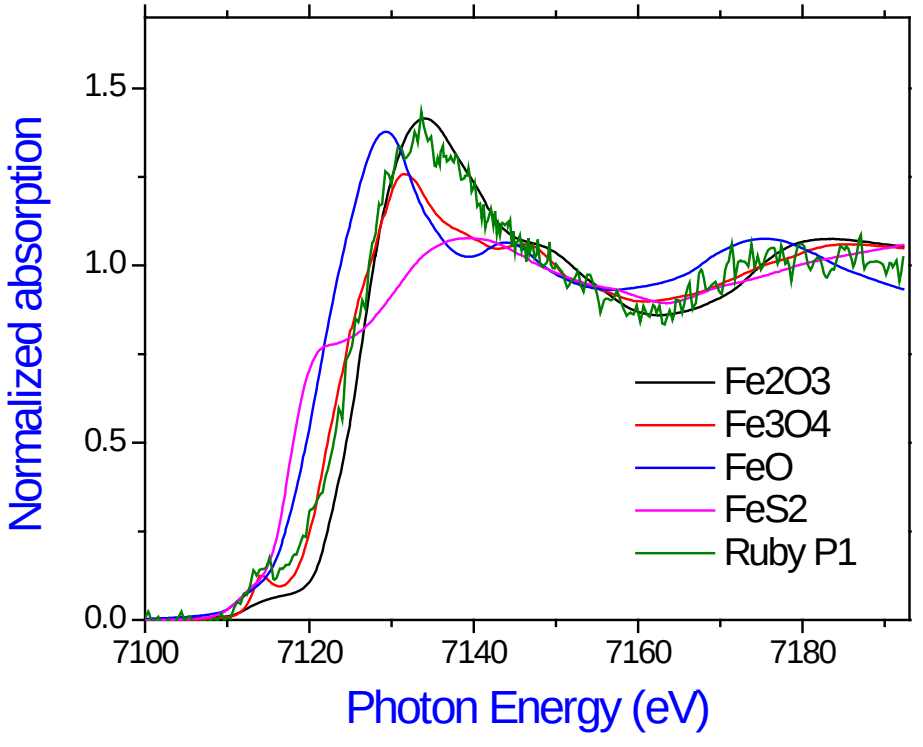
ได้มีการนำแสงซินโครตรอนไปศึกษาลักษณะรูปร่างของแมลงและอวัยวะของสัตว์โบราณที่เคยมีชีวิตร้อยล้านกว่าปีที่แล้ว *[28]* นอกจากนั้นได้มีการนำเอาแสงซินโครตรอนไปตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างที่นำมาจากเรือโบราณที่เคยจมอยู่ในท้องทะเล ได้ค้นพบว่าในขณะที่เรือจมอยู่ก้นทะเลนั้นได้มีการสะสมสารประกอบของกำมะถันซึ่งอาจจะสะสมอยู่บริเวณผิวหรือเข้าไปในเนื้อไม้ ในกรณีเรือวาซา (Vasa ship) ที่จมบริเวณท่าเรือของกรุงสตอกโฮล์ม ในปี พ.ศ. 2171 และถูกกู้ขึ้นมาบูรณะในปี พ.ศ. 2504 จากการวิเคราะห์ทางเคมีโดยใช้แสงซินโครตรอนพบการสะสมของสารประกอบของกำมะถันสะสมบริเวณผิวไม้ สารดังกล่าวบางส่วนได้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเนื่องจากความชื้นในอากาศทำให้เกิดกรดกำมะถัน (sulfuric acid) ส่งผลทำให้เกิดการเสื่อมสลายของเนื้อไม้ *[29]*



รูปที่ 6.23 *สเปกตรัม XRF ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของทับทิมสังเคราะห์ แสดงให้เห็นว่ามีธาตุ Ti, Cr และ Fe เจือปนอยู่ ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF นี้ รังสีเอกซ์พลังงานประมาณ 10 keV จากเครื่องกำเนิดแสงสยามถูกเลือกไปกระตุ้นให้เกิดการวาวแสง (fluorescence) ความไวในการวัดปริมาณธาตุสามารถเพิ่มได้โดยการใช้ white beam แทน monochromatized beam [30]*

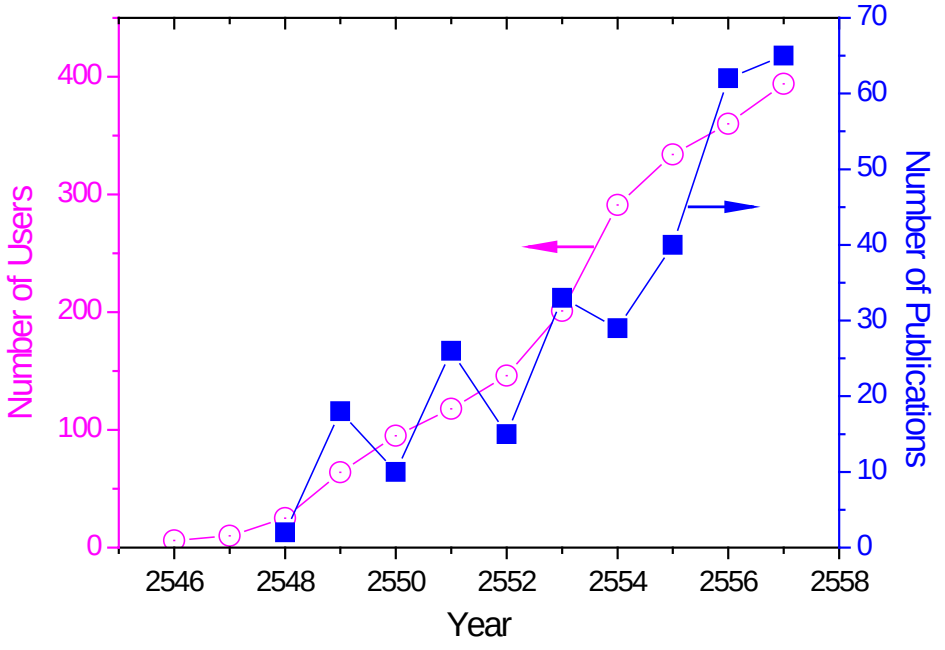
6.8.6 ประโยชน์ด้านอัญมณี

เทคนิคแสงซินโครตรอน เช่น เทคนิค XAS และ XRF มีศักยภาพค่อนข้างสูงในการศึกษาอัญมณี โดยมุ่งเน้นกลไกการเกิดสีในอัญมณี เทคนิค XRF ใช้ white beam (ไม่ผ่านโมโนโครเมเตอร์) สามารถตรวจวัดธาตุที่เจือปนในอัญมณีที่มีปริมาณต่ำมาก ๆในระดับที่เรียกว่า trace elements ส่วนเทคนิค XAS สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างรอบ ๆอะตอมที่คาดว่ามีผลต่อการเกิดสีของอัญมณี เป็นที่ทราบกันดีว่าหากมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอะตอมรอบธาตุที่ก่อให้เกิดสีอาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีอัญมณี เทคนิคทั้งสองที่กล่าวมาเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่จะช่วยเสริมแกร่งให้งานวิจัยและพัฒนาอัญมณีไทย



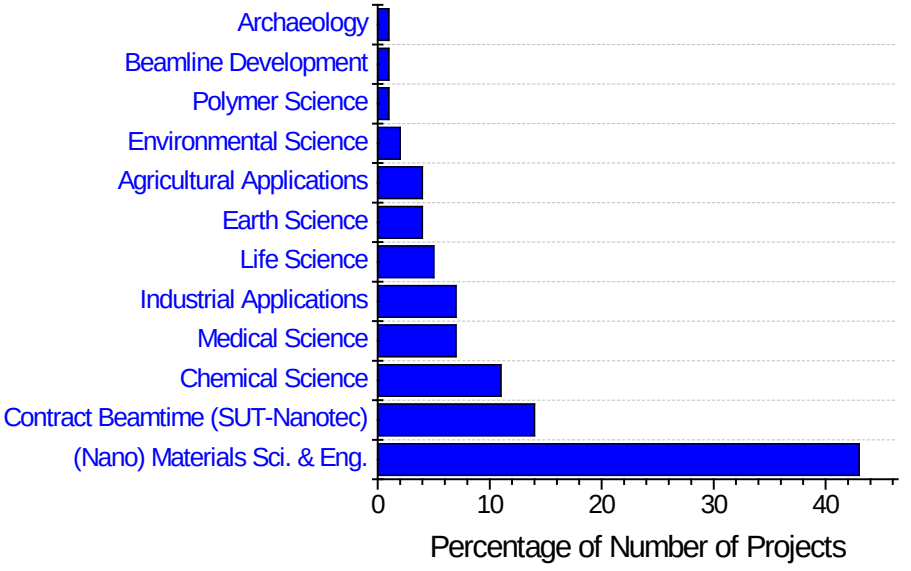
รูปที่ 6.24 *เปรียบเทียบสเปกตรัม XAS ของธาตุเหล็กในสารมาตรฐาน (Fe_2O_3, Fe_3O_4, FeO และ FeS_2) กับในทับทิมสังเคราะห์ (Ruby P1) แสดงการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่ค่าพลังงานบริเวณใกล้ K-edge พบว่าโครงสร้างอะตอมรอบ ๆอะตอมของ Fe ในทับทิมสังเคราะห์มีลักษณะคล้ายกันกับใน Fe_2O_3 [30]*

6.9 สถิติการใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม



รูปที่ 6.25 *กราฟแสดงจำนวนผู้ใช้แสงซินโครตรอนที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดแสงสยาม (สีม่วง) และจำนวนบทความทางวิชาการที่ตีพิมพ์ในวารสารวิจัย (สีน้ำเงิน) ตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2546 - 2557 [31]*

ผู้ใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดแสงสยาม มีจำนวนเพิ่มขึ้นตามระบบลำเลียงแสงที่ให้บริการ ในปีงบประมาณล่าสุด พ.ศ. 2557 จำนวนผู้ใช้ทั้งสิ้นคือ 394 คน และมีผลงานทางวิชาการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัยและพัฒนาเป็นจำนวน 65 บทความ โดยระบบลำเลียงแสงที่ให้บริการขณะนั้นมีเพียง 6 ระบบ ซึ่งเป็นการใช้ศักยภาพของเครื่องกำเนิดแสงสยามน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ (เครื่องกำเนิดแสงสยามสามารถรองรับได้อย่างน้อย 16 ระบบลำเลียงแสง) คาดว่าทั้งจำนวนผู้ใช้และผลงานจะเพิ่มขึ้นอีกหลังจากมีการเปิดให้บริการระบบลำเลียงแสงอีก 3 ระบบ ข้อมูลที่น่าสนใจยิ่งก็คือความหลากหลายของสายงาน/สาขาวิชาที่สามารถใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอน โครงการส่วนใหญ่ที่เข้ามาใช้งานจัดอยู่ในสาขาวัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุ (รวมวัสดุนาโน) โดยส่วนใหญ่เป็นงานตรวจวิเคราะห์โครงสร้าง ข้อมูลเชิงเคมีและองค์ประกอบด้วยเทคนิค XAS



รูปที่ 6.26 *กราฟแสดงร้อยละของโครงการที่ใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยามในงานวิจัยในแต่ละสายงาน/สาขาวิชา สำหรับปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 [31]*

6.10 สรุป

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าตลอดระยะเวลา 17 ปีที่ผ่านมา การอุบัติขึ้นของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเครื่องแรกของอาเซียนที่จังหวัดนครราชสีมาได้แสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่ามีส่วนช่วยยกระดับวงการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีของชาติขึ้นเป็นอย่างมาก ทั้งในแง่ของความเป็นนานาชาติในวงการวิทยาศาสตร์ ผลงานทางวิชาการระดับสูงจำนวนมาก การพัฒนานักวิทยาศาสตร์และวิศวกรรุ่นใหม่จำนวนมาก โอกาสที่จะพัฒนานวัตกรรมขั้นสูง เป็นตัวอย่างที่ดีของการทำงานวิจัยที่มีความเป็นสหวิชาการสูง ฯลฯ เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 3 จึงมีความจำเป็นสำหรับประเทศไทยหากประเทศยังคงมีความต้องการพัฒนาวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่อง โดยเฉาะอย่างยิ่งในสายงานที่มีความเชื่อมโยงหรือที่สามารถรองรับงานวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม แต่เครื่องกำเนิดแสงสยามที่ใช้งานในปัจจุบันถูกออกแบบและสร้างเน้นรองรับงานวิจัยพื้นฐานเพื่อการศึกษาเป็นสำคัญ จึงมีข้อจำกัดทั้งพลังงานโฟตอนของแสงที่มีพลังงานต่ำ (ความยาวคลื่นไม่สั้นพอ) ลำแสงมีขนาดใหญ่เกินไป และกระแสอิเล็กตรอนที่กักเก็บมีค่าค่อนข้างต่ำ ในขณะที่เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้รังสีเอกซ์

ในห้องปฏิบัติการทั่วไปได้รับการพัฒนาให้ก้าวหน้าขึ้นเป็นอย่างมาก และบางเครื่องมือวิเคราะห์ เช่น เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และ เครื่องถ่ายภาพ 3 มิติโดยรังสีเอกซ์ มีประสิทธิภาพการทำงานที่เทียบเท่าหรือดีกว่าที่ใช้แสงซินโครตรอนจากเครื่องกำเนิดแสงสยามในปัจจุบัน ดังนั้นการมีเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นที่ 3 จะเป็นการเปิดโอกาสให้นำแสงซินโครตรอนไปใช้กับโจทย์หรือปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิต และยังเปิดโอกาสเกิดงานวิจัยพื้นฐานในระดับแนวหน้าได้อีกหลากหลายสาขา

บรรณานุกรม

[1] J. Schwinger, "*On the Classical Radiation of Accelerated Electrons*", Phys. Rev. 75 (1949) 1912-1925.

[2] F.R. Elder, A.M. Gurewitsch, R.V. Langmuir, H.C. Pollock, "*Radiation from Electrons in a Synchrotron*", Phys. Rev., 71 (1947) 829-830.

[3] D.H. Tomboulian and P.L. Hartman, "*Spectral and Angular Distribution of Ultraviolet Radiation from the 300-MeV Cornell Synchrotron*", Phys. Rev., 102 (1956) 1423.

[4] คณะทำงานประกอบด้วยศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ สายคณิต (หัวหน้าโครงการ) รองศาสตราจารย์ ดร.ถิรพัฒน์ วิลัยทอง รองศาสตราจารย์ จงอร พีรานนท์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิชิต ศรีตระกูล และนายขจรศักดิ์ ชัยวัฒน์

[5] วิรุฬห์ สายคณิต, ถิรพัฒน์ วิลัยทอง, จงอร พีรานนท์, วิชิต ศรีตระกูล, ขจรศักดิ์ ชัยวัฒน์, *"เปิดยุคใหม่ไทยซินโครตรอน"*, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2539 (ISBN 974-634-674-1).

[6] คณะผู้ประสานงานประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. สิปปนนท์ เกตุทัต (ประธานกรรมการบริหารสภาวิจัยแห่งชาติ) ศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร ศรีสอ้าน (อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) ศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ สายคณิต (กรรมการบริหารสภาวิจัยแห่งชาติ) ดร. สุวิทย์ วิบูลย์เศรษฐ์ (เลขาธิการคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ) รองศาสตราจารย์ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง และรองศาสตราจารย์ วิรุฬห์ มังคละวิรัช

[7] P. Kengkan, W. Pairsuwan, G. Isoyama, T. Yamakawa and T. Ishii, "*Magnetic Lattice for Siam Photon Source*", J. Synchrotron Rad. 5 (1998) 348-350.

[8] ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล, วีระพงษ์ แพสุวรรณ, สมรเมธ เจียรนัยกุล และ ทาเก ฮิโก อิชิอิ, "*เครื่องกำเนิดแสงสยาม*", วารสารเทคโนโลยีสุรนารี ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 (2542) 22-31.

[9] P. Songsiriritthigul, W. Pairsuwan, T. Ishii and A. Kakizaki, *"Beamlines at Siam Photon Laboratory",* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 199 (2003) 565-568.

[10] P. Songsiriritthigul, W. Pairsuwan, T. Ishii and A. Kakizaki, *"Photoemission Beamline at the Siam Photon Laboratory",* Surf. Rev. Lett. 8 (2001) 497-500.

[11] P. Songsiriritthigul, P. Sombunchoo, B.N. Raja Sekhar, W. Pairsuwan, T. Ishii and A. Kakizaki, *"Comparison of Varied Line-Spacing Plane Grating and Varied Line-Spacing Spherical Grating Monochromators for the Siam Photon Source",* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A Vol. 467-8 (2001) 606-609.

[12] P. Songsiriritthigul, B. Kjornrattanawanich, A. Tong-on and H. Nakajima, *"Design of the First Undulator Beamline for the Siam Photon Laboratory",* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 82 (2007) 100-102.

[13] C Euaruksakul, N Jearanaikoon, W Bussayaporn, N Kamonsutthipaijit, P Photongkam, S Tunmee, P Songsiriritthigul, "*Photoemission Electron Microscopy Beamline at the Synchrotron Light Research Institute*", J. Phys.: Conf. Series 425 (2013) 182011.

[14] H Nakajima, A Tong-on, N Sumano, K Sittisard, S Rattanasuporn, C Euaruksakul, R Supruangnet, N Jearanaikoon, P. Photongkam, N Chanlek and P. Songsiriritthigul, "*Photoemission Spectroscopy and Photoemission Electron Microscopy Beamline at the Siam Photon Laboratory*", J. Phys.: Conf. Series 425 (2013) 132020.

[15] W. Klysubun, P. Tarawarakarn, P. Sombunchoo, S. Klinkhieo and P. Songsiriritthigul, *"X-ray Absorption Spectroscopy Beamline at the Siam Photon Laboratory",* Proc. 9th Intl Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation (Daeju, Korea, 2006). AIP CP # 879 (2007) 860-863.

[16] W. Klysubun, P.Sombunchoo, N. Wongprachanukul, P. Tarawarakarn, S. Klinkhieo, J. Chaiprapa and P. Songsiriritthigul, *"Commissioning and Performance of X-ray Absorption Beamline at the Siam Photon Laboratory*", Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 582 (2007) 87-89.

[17] P. Klysubun , N. Chomnawang and P. Songsiriritthigul, *"Soft X-ray Lithography Beamline at the Siam Photon Laboratory",* Proc. 9th Intl Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation (Daeju, Korea, 2006). AIP CP # 879 (2007) 1490-1492.

[18] Y. Poo-arporn, P. Chirawatkul, W. Saengsui, S. Chotiwan, S. Kityakarn, S. Klinkhieo, J. Hormes and P. Songsiriritthigul, *"Time-resolved XAS (Bonn-SUT-SLRI) Beamline at SLRI",* J. Synchrotron Rad. 19 (2012) 937–943.

[19] R. Phinjaroenphan, S. Soontaranon, P. Chirawatkul, J. Chaiprapa, W. Busayaporn, S. Pongampai, S. Lapboonreung and S. Rugmai, "*SAXS/ WAXS Capability and Absolute Intensity Measurement Study at the SAXS Beamline of the Siam Photon Laboratory*", J. Physics: Conf. Series 425 (2013) 132019.

[20] จากเว็บไซต์ http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1997/walker- lecture.html.

[21] จากเว็บไซต์ http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2006/kornberg-lecture.html.

[22] P. J. Withers, *"Fracture Mechanics by Three-dimensional Crack-tip Synchrotron X-ray Microscopy",* Phil. Trans. R. Soc. A 373 (2015) 20130157.

[23] รายงานประจำปี 2551 สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) : ผลงานวิจัยโดย ไพทิพย์ ธีรเวชญาณ, อรุณี อิ้วเจริญ, M. Bauer, E. Wendel และ H. Bertagnolli.

[24] S. Sinyoung, S. Asavapisit, P. Kajitvichyanukul and P. Songsiriritthigul, "Speciation of Cr in Cement Clinkers Obtained from Co-burning with Cr_2O_3" Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 649 (2011) 210-212.

[25] จากเว็บไซต์ http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/ (การค้นพบ GMR).

[26] J. Dik, K. Janssens, G. van der Snickt, L. van der Loeff, K. Rickers, M. Cotte, "*Visualization of a Lost Painting by Vincent van Gogh using Synchrotron Radiation Based X-ray Fluorescence Elemental Mapping*", Anal. Chem. 15:80 (2008) 6436-6442.

[27] จากเว็บไซต์ http://photon-science.desy.de/research/research_highlights/archive/visualizing_a_lost_painting_by_vincent_van_gogh/index_eng.html (DESY Research Highlights).

[28] S. Sanchez, P.E. Ahlberg, K.M. Trinajstic, A. Mirone, P. Tafforeau, "*Three-dimensional Synchrotron Virtual Paleohistology : A New Insight into the World of Fossil Bone Microstructures*", Microsc. Microanal. 18 (2012) 1095-1105.

[29] M. Sandström, F. Jalilehvand, I. Persson, U. Gelius, P. Frank and I. Hall-Roth, "*Deterioration of the Seventeenth-century Warship Vasa by Internal Formation of Sulphuric Acid*", *Nature* 415 (2012) 893-897.

[30] ตัวอย่างทับทิมจาก ดร. ดวงแข บุตรกูล และ ดร.เสวต อินทรศิริ ในโครงการที่เกี่ยวข้องกับบทที่ 3

[31] จากเว็บไซต์ http:/www.slri.or.th/.


X-RAY ON
TION
X-RAY ON



ภาคผนวก

ก. ข้อมูลคณะผู้เขียน

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตรลดา ทองใบ

ห้องปฏิบัติการวิจัยลำอิเล็กตรอนและโฟตอนห้วงเฟมโตวินาที ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ. เชียงใหม่ 50200

E-mail : *chlada@yahoo.com*

2. ดร. ดุษฎี สุวรรณขจร

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ตู้ ปณ.70 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ. เมือง จ. เชียงใหม่ 50202

E-mail : *dusadee.suwann@gmail.com*

3. ดร. ดวงแข บุตรกูล

สาขาอัญมณีและเครื่องประดับ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ 10110

E-mail : *mo.duangkhae@gmail.com*

4. ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ตู้ ปณ.70 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ. เมือง จ. เชียงใหม่ 50202

E-mail : *thiraphatvilai@gmail.com*

5. ดร. สาคร ริมแจ่ม

ห้องปฏิบัติการวิจัยลำอิเล็กตรอนและโฟตอนห้วงเฟมโตวินาที ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ. เชียงใหม่ 50200

E-mail : *r.sakhorn@googlemail.com*

6. ดร. เสวต อินทรศิริ
หน่วยวิจัยเทคโนโลยีลำอนุภาคและพลาสมา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ. เชียงใหม่ 50202
E-mail : *saweat@gmail.com*

7. รองศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ อนันตลาโภชัย
หน่วยวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพ สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา 19 หมู่ 2 ต. แม่กา อ. เมือง จ. พะเยา 56000
E-mail : *soanu-1@gmail.com*

8. รองศาสตราจารย์ ดร. สมศร สิงขรัตน์
ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ
ตู้ ปณ.70 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ. เมือง จ. เชียงใหม่ 50202
E-mail : *somsorn.s@gmail.com*

9. รองศาสตราจารย์ ดร. ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล
ห้องปฏิบัติการวิจัยนาโนสเปกโทรสโกปี สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ. นครราชสีมา 30000
E-mail : *prayoon.song@gmail.com*

10. รองศาสตราจารย์ ดร. ยู เหลียงเติ้ง
ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ
ตู้ ปณ.70 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ. เมือง จ. เชียงใหม่ 50202
E-mail : *yuld@thep-center.org*

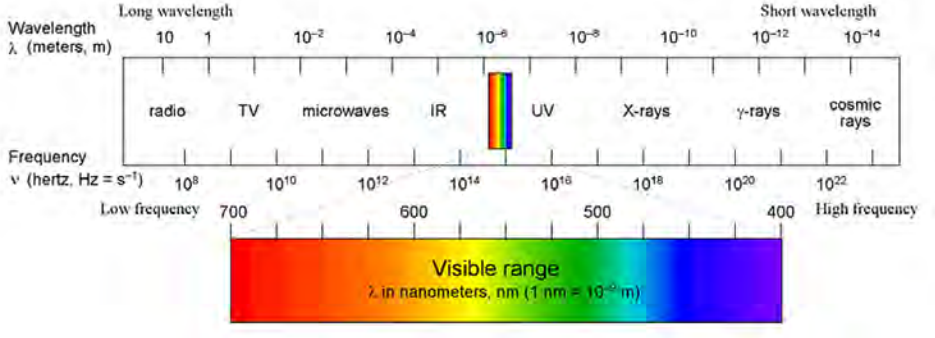
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุดมรัตน์ ทิพวรรณ
ห้องปฏิบัติการวิจัยด้านลำไอออนและการประยุกต์ ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ. เชียงใหม่ 50200
E-mail : *beary1001@gmail.com*

ข). ข้อมูลเพื่อการเปรียบเทียบ

1. ความหมายของคำนำหน้า (prefix) ที่ใช้หน้าหน่วยต่างๆ

คำนำหน้า	คูณด้วย	คำนำหน้า	คูณด้วย
deci (d)	10^{-1}	exa (E)	10^{18}
centi (c)	10^{-2}	peta (P)	10^{15}
milli (m)	10^{-3}	tera (T)	10^{12}
micro (μ)	10^{-6}	giga (G)	10^{9}
nano (n)	10^{-9}	mega (M)	10^{6}
pico (p)	10^{-12}	kilo (k)	10^{3}
femto (f)	10^{-15}	hector (h)	10^{2}
atto (a)	10^{-18}	deca (da)	10^{1}

2. สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



ที่มา : จากเว็บไซต์ http://mcdowellscienceexam.weebly.com/heat.html

3. การคิดค่าพลังงานของโฟตอน (photon) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$E = (0.4136 \times 10^{-20})\ V$

$E = 1.2399 \times 10^{-12} / \lambda$

เมื่อ **E** คือพลังงานของโฟตอนในหน่วย MeV

ν คือความถี่ (frequency) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหน่วยเฮิรตซ์ (Hz) หรือ รอบ / วินาที

λ คือความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (wavelength) ในหน่วยเมตร (m) เช่น โฟตอนของแสงสีแดง (λ = 650 nm = 650 x 10^{-9} m) มีพลังงาน = 1.91 eV โฟตอนของรังสีแกมมาจากสารไอโซโทปโคบอลต์รังสี Co-60 มีพลังงานเฉลี่ย = 1.25 MeV

4. มวล

1 กะรัต (carat) = 0.2 กรัม (g)

1 atomic mass unit (u) = 1.66054 x 10^{-27} kg

มวลของอนุภาคอัลฟา = 4.0015062 u

มวลของอนุภาคนิวตรอน = 1.0086649 u

มวลของอนุภาคโปรตอน = 1.0072765 u

มวลของอนุภาคอิเล็กตรอน = 0.0005486 u

5. พลังงาน และ ความเร็ว

1 electron volt (eV) = 1.6021773 x 10^{-19} Joule (J)

1 MeV = 10^{3} keV = 10^{6} eV

ความเร็วแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ = 2.996 x 10^{8} m/s

ความเร็วของอนุภาคโปรตอนพลังงาน 2 MeV = 1.96 x 10^{7} m/s

ความเร็วของไอออนอาร์กอนพลังงาน 70 keV = 5.82 x 10^{5} m/s

ความเร็วของเครื่องบิน Boeing 777 ที่บินระหว่างกรุงเทพฯ – เชียงใหม่ ขณะบินที่ความสูง 11,277 เมตร = 2.45 x 10^{2} m/s

ความเร็วสูงสุดของเสือ Cheetah = 2.6 x 10^{1} m/s

ความเร็วสูงสุดของนักวิ่งลมกรด Usain Bolt = 1.2 x 10^{1} m/s

6. ความดัน

1 torr = 1.33322 mbar

1 บรรยากาศ (atm) = 760 torr = 1,013.25 mbar = ความดันอากาศที่ระดับน้ำทะเล

ความดันอากาศที่ความสูง 10,000 เมตร เหนือระดับน้ำทะเล = 264.36 mbar

ความดันในล้อรถยนต์ส่วนบุคคล = 1,861.59 – 2,206.34 mbar

7. ความเข้มสนามแม่เหล็ก

1 gauss (G) = 10^{-4} tesla (T)

ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวโลก = 25 – 65 μT

ความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่อง MRI = 0.5 – 3.0 T

8. ความยาว

1 angström (Å) = 0.1 นาโนเมตร (nm) = 10^{-10} เมตร (m)

1 fermi (fm) = 10^{-15} m = 1 femtometer

ระยะทางระหว่างกรุงเทพ-เชียงใหม่	7.12×10^{5} m
ความยาวของคลื่นไมโครเวฟในเตาไมโครเวฟ	1.22×10^{-1} m
เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นผม	2.5×10^{-5} m
ขนาดของทรานซิสเตอร์เล็กที่สุดในไมโครโปรเซสเซอร์อินเทล 4004	2×10^{-5} m
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ในร่างกายมนุษย์	1×10^{-5} m
เส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์เม็ดเลือดแดง	8.4×10^{-6} m
ความหนาเซลล์เม็ดเลือดแดง	2.4×10^{-6} m
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของนิวเคลียสของเซลล์มนุษย์	1.7×10^{-6} m
เส้นผ่านศูนย์กลางแบคทีเรียที่เล็กที่สุด	2×10^{-7} m
ขนาดของไวรัส	7.5×10^{-8} m
เส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียวดีเอ็นเอ	2×10^{-9} m
เส้นผ่านศูนย์กลางอะตอมทอง	3.48×10^{-10} m

เส้นผ่านศูนย์กลางอะตอมอลูมิเนียม	2.36×10^{-10} m
ระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมกับออกซิเจนในผลึกคอรันดัม (Al_2O_3)	1.9×10^{-10} m
ระยะระหว่างนิวเคลียสของไฮโดรเจนทั้งสองในโมเลกุลน้ำ (H_2O)	1.52×10^{-10} m
เส้นผ่านศูนย์กลางอะตอมไนโตรเจน	1.12×10^{-10} m
เส้นผ่านศูนย์กลางอะตอมไฮโดรเจน	1.06×10^{-10} m
เส้นผ่านศูนย์กลางอะตอมออกซิเจน	0.96×10^{-10} m
เส้นผ่านศูนย์กลางอะตอมฮีเลียม	0.62×10^{-10} m
ระยะระหว่างนิวเคลียสของออกซิเจนกับของไฮโดรเจนในโมเลกุลน้ำ (H_2O)	0.958×10^{-10} m
เส้นผ่านศูนย์กลางนิวเคลียสทอง	13.96×10^{-15} m
เส้นผ่านศูนย์กลางนิวเคลียสอลูมิเนียม	7.8×10^{-15} m
เส้นผ่านศูนย์กลางนิวเคลียสออกซิเจน	6.05×10^{-15} m
เส้นผ่านศูนย์กลางนิวเคลียสไนโตรเจน	5.78×10^{-15} m
เส้นผ่านศูนย์กลางนิวเคลียสฮีเลียม (ประกอบด้วยอนุภาคโปรตอนและนิวตรอนอย่างละ 2 ตัว)	3.81×10^{-15} m