

การศึกษาสมบัติการส่งผ่านและการกระเจิงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแผ่นแก้วที่เกิดรอยพิชชั้นแฟร็ก
เมนต์

นายมารุตพงศ์ แสงเจริญถาวร



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INVESTIGATION ON PROPERTIES OF FISSION FRAGMENT TRACK-
ETCHED GLASS IN TRANSMISSION AND SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVE

Mr. Marutpong Saengcharoenthaworn



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาสมบัติการส่งผ่านและการกระเจิงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแผ่นแก้วที่เกิดรอยพิชชั้นแฟรกเมนต์

โดย

นายมารุตพงศ์ แสงเจริญถาวร

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.พรรณี แสงแก้ว)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสมันต์)

มารุตพงศ์ แสงเจริญถาวร : การศึกษาสมบัติการส่งผ่านและการกระเจิงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแผ่นแก้วที่เกิดรอยฟิชชันแฟรกเมนต์ (INVESTIGATION ON PROPERTIES OF FISSION FRAGMENT TRACK-ETCHED GLASS IN TRANSMISSION AND SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว, 67 หน้า.

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการก่อตัวของแผ่นแก้วกระจกสไลด์ที่เกิดรอยฟิชชันแฟรกเมนต์ รวมถึงการทดสอบสมบัติในการส่งผ่านและการกระเจิงของแสงช่วงที่ตามองเห็น รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีอินฟราเรด และรังสีเอ็กซ์

ผลที่ได้ชี้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายใช้ที่กัดล้าง เวลาล้างกรดรอย และอุณหภูมิขณะล้างกรดรอย ในขณะที่ความหนาแน่นของรอยกัดเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับเวลาอาบนิวตรอน ความหนาแน่นของรอยกัดยังเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกแต่ไม่สัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้น

จากการทดลองยังพบว่าความเข้มในการส่งผ่านแสง รังสีอัลตราไวโอเล็ต และรังสีอินฟราเรด ลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อความหนาแน่นของรอยกัดเพิ่มขึ้น แต่ไม่สัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของแทรก อย่างไรก็ตาม ปัจจัยเหล่านั้นไม่แสดงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับการส่งผ่านและกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ในช่วงพลังงานที่ทำการทดลอง (ประมาณ 10-60keV)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5470334921 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: NUCLEAR TRACK / FISSION TRACK / TRACK ETCHED

MARUTPONG SAENGCHAROENTHAWORN: INVESTIGATION ON PROPERTIES OF FISSION FRAGMENT TRACK-ETCHED GLASS IN TRANSMISSION AND SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVE. ADVISOR: ASSOC. PROF.NARES CHANKOW, 67 pp.

The objectives of this research were to investigate factors that affect formation of fission fragment tracks on optical microscope slide glass as well as to test their properties in transmission and scattering of visible light, ultraviolet(UV), infrared(IR) and X-ray. The results indicated that the track diameter increased linearly with increase of concentration of the hydrofluoric acid (HF) etching solution, etching time and etching temperature while the track density increased linearly with the neutron irradiation time. The track density also increased with HF concentration but not in linear relationship.

It was found that the transmitted intensity of light, UV and IR decreased linearly with increase of track density but not with track diameter. However, these factors have no clear effect on transmission and scattering of x-rays in the range of this experiments (~ 10-60 keV).

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Nuclear Engineering

Student's Signature

Field of Study: Nuclear Technology

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือของ ผศ. นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งได้ตรวจทาน แก้ไขต้นฉบับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้ายนี้คงจะขาดเสียไม่ได้ ขอกราบขอบพระคุณมารดา และบิดาของข้าพเจ้า รวมถึงเพื่อน ๆ จากหลายสาขาวิชา ที่ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1: บทนำ	10
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	10
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	11
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	11
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	12
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	12
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 2: ทฤษฎี.....	16
2.1 แทรค-เอตช์ (track-etch).....	16
2.2 ปฏิกริยาฟิชชัน.....	19
2.3 แสงสว่าง อัลตราไวโอเลต อินฟราเรดและรังสีเอ็กซ์	22
2.3.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	22
2.3.2 อันตรกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อสสาร	23
2.3.3 การกระเจิงของรังสีเอ็กซ์และปรากฏการณ์คอมป์ตัน.....	24
บทที่ 3: วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และการดำเนินการวิจัย	25
3.1 วัสดุ อุปกรณ์.....	25
3.2 สารเคมีและสารที่ใช้.....	25
3.3 เครื่องมือ.....	25

3.4 การดำเนินการวิจัย.....	26
3.4.1 การนำแผ่นแก้วประกบแผ่นยูเรเนียมไปอบรังสี.....	26
3.4.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อขนาดและความหนาแน่นของรอยกัด	26
3.4.3 การศึกษาสมบัติการกระเจิงและการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อแผ่นแก้วที่มี รอยรอยกัด.....	28
บทที่ 4: ผลการวิจัย.....	30
4.1 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆที่อาจมีผลต่อขนาดของรอยกัด.....	30
4.1.1 ความสัมพันธ์ของเวลาล้างกัดรอยกับขนาดของรอยกัด	31
4.1.2 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดกับขนาดของรอยกัด	34
4.1.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิขณะล้างกัดรอยกับขนาดของรอยกัด.....	37
4.2 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆที่อาจมีผลต่อความหนาแน่นของรอยกัด.....	40
4.2.1 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาอบรังสีกับความหนาแน่นของรอยกัด	40
4.2.2 ความสัมพันธ์ของเวลาล้างกัดรอยกับความหนาแน่นของรอยกัด	42
4.2.3 ความสัมพันธ์ของเวลาล้างกัดรอยกับความหนาแน่นของรอยกัด	43
4.2.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิขณะล้างกัดรอยกับขนาดของรอยกัด.....	44
4.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านและการกระเจิงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนแผ่นแก้วที่มีรอยกัด.....	45
4.3.1 ความสัมพันธ์ของการส่งผ่านแสงช่วงที่ตามองเห็นบนแผ่นแก้วที่มีรอยกัด	45
4.3.2 ความสัมพันธ์ของการส่งผ่านรังสีอินฟราเรดบนแผ่นแก้วที่มีรอยกัด	47
4.3.3 ความสัมพันธ์ของการส่งผ่านรังสีอัลตราไวโอเล็ตบนแผ่นแก้วที่มีรอยกัด	49
4.3.4 ความสัมพันธ์ของการส่งผ่านรังสีเอ็กซ์บนแผ่นแก้วที่มีรอยกัด	51
4.3.5 ความสัมพันธ์ของการส่งผ่านรังสีเอ็กซ์บนแผ่นแก้วที่มีรอยกัด	53
บทที่ 5: สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56

5.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและความหนาแน่นของแทรก	56
5.1.2 การส่งผ่านและการกระเจิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
รายการอ้างอิง	61
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	67



บทที่ 1: บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

D. A. Young ได้ค้นพบการเกิดรอยของฟิชชันแฟรกเมนต์(fission fragment track) บนลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) ภายหลังจากการล้างกัดรอย(etching) เมื่อปี ค.ศ. 1958 ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการใช้ประโยชน์วิธีนี้ในการวัดรังสีประเภทอนุภาคโดยมีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน อาทิ แทรค-เอตซ์ดีเทคเตอร์(track-etch detector) โซลิดสเตทแทรคดีเทคเตอร์(solid state track detector, SSTD) โซลิดสเตทนิวเคลียร์แทรคดีเทคเตอร์(solid state nuclear track detector, SSNTD) เป็นต้น ต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้วิธีนี้ในงานด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น การวัดรังสีชนิด ทั้งอนุภาคโปรตอน แอลฟา และนิวตรอน [1-3] การหาอายุด้วยวิธีตรวจดูรอยฟิชชันแฟรกเมนต์ในวัสดุธรรมชาติ (fission track dating)[1, 4-5] การหาปริมาณยูเรเนียมในวัสดุ [6] การหาความเข้มข้นของยูเรเนียม-235 ในสารประกอบยูเรเนียม[7] การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน[8, 9] และล่าสุดคือใช้ในการผลิตแผ่นกรองที่มีรูขนาดเท่ากันและเล็กมากซึ่งเรียกว่าแทรค-เอตซ์เมมเบรนฟิลเตอร์(track-etch membrane filter) [10] เป็นต้น

รอยของอนุภาคมีประจุบนวัสดุเกิดได้จากการที่อนุภาควิ่งผ่านเนื้อวัสดุแล้วทำให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างของวัสดุตามแนวที่อนุภาควิ่งผ่าน จึงสามารถเห็นเป็นรอยขนาดเล็กมาก ซึ่งเรียกว่า “แทรค(track)” ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แต่เมื่อนำวัสดุดังกล่าวไปแช่ในสารละลายที่มีคุณสมบัติในการละลายวัสดุชนิดนั้นๆ บริเวณเส้นทางที่อนุภาควิ่งผ่านจะมีอัตราการละลายเร็วกว่าบริเวณอื่น ทำให้รอยถูกกัดขยายจนสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา โดยใช้กำลังขยายต่ำเพียงในช่วง $\times 100$ ถึง $\times 1000$ เท่า วิธีการขยายรอยด้วยสารละลายเคมีนี้เรียกว่า “การล้างกัดขยายรอย (etching)” สำหรับแผ่นบันทึกรอยประเภทพลาสติกมักใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(sodium hydroxide, NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(potassium hydroxide, KOH) ส่วนวัสดุประเภทแก้วและไมก้า(mica) มักใช้กรดกัดแก้ว โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

การวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของแผ่นแก้วที่มีรอยของฟิชชันแฟรกเมนต์ ในการส่องผ่านและการกระเจิงของแสง รังสีอุลตราไวโอเล็ต(ultraviolet, UV) และแสงอินฟราเรด(infrared, IR) ที่เงื่อนไขความหนาแน่นรอยและขนาดของรอยต่าง ๆ กัน โดยใช้

วิธีการสร้างรอยของฟิชชันแฟรกเมนต์จากการนำแผ่นโลหะยูเรเนียมธรรมชาติ(natural uranium) ปรกกับแผ่นแก้วแล้วนำไปอาบนิวตรอนที่เวลาต่าง ๆ กันเพื่อให้มีความหนาแน่นของรอยมาก หรือน้อยตามความเหมาะสม แล้วนำไปล้างกัดขยายรอยด้วยกรดกัดแก้ว(hydrofluoric acid, HF) ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กัน ได้แก่ ระยะเวลา ความเข้มข้น และอุณหภูมิ ซึ่งจะทำให้รอยของฟิชชันแฟรกเมนต์มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน จากสมมุติฐานเบื้องต้นและจากงานวิจัยของเสาวนีย์ อัครว ชาติบุญ[2] คาดว่าความหนาแน่น และขนาดของรอยเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการส่งผ่านและการ กระเจิงของแสงสว่าง อุตราไวโอเล็ต และแสงอินฟราเรด ซึ่งหากสามารถใช้แผ่นวัสดุใส เช่น แก้ว พลาสติก ที่มีรอยของอนุภาคอยู่ในการกรองแสงสว่างและ/หรือคลื่นความร้อนได้ ก็จะมี ความแตกต่างกับการใช้กระจกฝ้าตรงที่วัสดุใสที่มีรอยอนุภาคนั้นเราสามารถมองเห็นทะลุผ่านได้ ส่วน การกระเจิงน่าจะทำให้แสงและคลื่นความร้อนที่ผ่านไปได้มีการฟุ้งกระจายสูง ไม่สามารถเคลื่อนที่ ไปได้ไกลจากแผ่นวัสดุนัก ซึ่งอาจทำให้ช่วยลดความร้อนในตัวยานพาหนะและในห้องใต้หากใช้ วัสดุใสที่มีรอยอนุภาคแทนฟิล์มกรองแสงหรือกระจกฝ้า ซึ่งหากผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึง แนวโน้มที่เป็นไปได้ ยังคงต้องมีการวิจัยต่อไปที่จะทดสอบในแง่ของการลดลงของอุณหภูมิภายใน ห้องและอาคารให้ชัดเจน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อขนาดและความหนาแน่นของรอยกัดในแผ่นแก้วที่เกิดรอย ฟิชชันแฟรกเมนต์
2. เพื่อศึกษาสมบัติการส่งผ่านและการกระเจิงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแผ่นแก้วที่เกิดรอย ฟิชชันแฟรกเมนต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. หาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทำให้เกิดรอยของฟิชชันแฟรกเมนต์บนแผ่นแก้ว ด้วยวิธีอาบ นิวตรอนแผ่นแก้วที่ประกบกับแผ่นโลหะยูเรเนียมธรรมชาติ (natural uranium metal)

2. หาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยพิชชั้นแฟรกเมนต์กับเงื่อนไขในการล้างแผ่นแก้ว ได้แก่ ระยะเวลา ความเข้มข้นของกรดกัดแก้ว และอุณหภูมิ

3. ทดสอบสมบัติของแผ่นแก้วที่มีรอยพิชชั้นแฟรกเมนต์เงื่อนไขต่าง ๆ กัน ในการส่งผ่านและการกระเจิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่มีผู้ทดลองก่อนหน้า เพื่อจำกัดและเลือกตัวแปรสำหรับการทดลอง
2. เริ่มการทดลองอาบนิวตรอนให้กับแผ่นแก้วประเภทโลหะยูเรเนียมธรรมชาติ เพื่อนำข้อมูลมากำหนดช่วงเวลาและช่วงกว้างของตัวแปรที่จะทดลองต่อไป
3. ทดลองกับแผ่นแก้วจำนวนมากโดยการปรับเงื่อนไขของตัวแปรที่ใช้
4. สรุปความสัมพันธ์ว่าตัวแปรเหล่านั้นเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นรอยกัดและขนาดรอยกัดอย่างไร
5. ทดสอบการส่งผ่านและการกระเจิงของแผ่นแก้วที่มีรอยกัดอยู่แล้วโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางช่วงคลื่น
6. สรุปความสัมพันธ์ว่าแผ่นแก้วที่มีความหนาแน่นรอยกัดและขนาดของรอยกัดหนึ่งๆ เกี่ยวข้องกับสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าข้างต้นอย่างไร
7. สรุปผลการทดลอง ความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์จริง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นแก้วซึ่งมีรอยของพิชชั้นแฟรกเมนต์ที่ขนาดและความหนาแน่นต่างๆตามต้องการ
2. ทราบถึงความสัมพันธ์ของขนาดรอยพิชชั้นแฟรกเมนต์เฉลี่ยและความหนาแน่น สำหรับการส่งผ่านและการกระเจิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. J.C. Hadler, I. Alencar, P.J. Iunes, S. Guedes (2009) ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบแบบจำลองของ Somogyi and Szalay ซึ่งตั้งสมมุติฐานว่าฟิซชันรอยกั้ดที่เกิดขึ้นจากฟิซชันแฟรกเมนต์นั้นเป็นทรงกระบอก และพบว่าแบบจำลองใช้งานได้ดี งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษา ลึกลงไปถึงอัตราการกัดกร่อน (etching rate) ของสารละลายกรดกัดแก้วที่มีต่อผิวแก้ว และฟิซชันรอยกั้ด รวมถึงการพัฒนาของรอยกั้ดขนาดเล็กมาสู่อรอยกั้ดขนาดใหญ่ที่มองเห็นได้ด้วยกล้องโทรทรรศน์ชนิดแสงว่าเป็นเชิงเส้นหรือไม่ จากการทดลองพบว่าอัตราการกัดกร่อนของผิวส่วนที่เป็นแก้วปกติซึ่งไม่โดนฟิซชันแฟรกเมนต์ทำลายโครงสร้าง และอัตราการกัดกร่อนของฟิซชันรอยกั้ดมีความคงที่มาก รวมถึงการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกของฟิซชันรอยกั้ดก็มีค่าคงที่เช่นกัน ผลจากการวิจัยนี้ทำให้การขยายโครงสร้างฟิซชันรอยกั้ดสามารถทำได้โดยไม่มีปัจจัยเวลาและความเข้มข้นของกรดกัดแก้วมาเกี่ยวข้อง เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดแบบเชิงเส้น เช่นการใช้กรดกัดแก้วเข้มข้น 5% นาน 1 นาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกั้ดเป็นสองเท่าของการใช้กรดกัดแก้วเข้มข้น 5% นาน 30 วินาที จึงง่ายต่อการควบคุมผล
2. K. James and S.A. Durrani (1987) ได้ศึกษาปัจจัยที่อาจทำให้การตรวจสอบฟิซชันรอยกั้ดซึ่งปะปนอยู่ในแร่ธรรมชาติผิดพลาดไป การวิจัยนี้เน้นการศึกษาการฟิซชันตามธรรมชาติ อันเกิดจากรังสีคอสมิก (Cosmic ray) รังสีพลังงานสูงที่มีแหล่งกำเนิดจากนอกโลก เช่นดวงอาทิตย์หรืออวกาศห้วงลึก รังสีนี้ทำอันตรกิริยากับไอโซโทปธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ ทั้งบนโลก บนอวกาศบาตร และบนหินจากดวงจันทร์ ซึ่งจากการวัดค่าก่อนหน้านั้นพบว่าปริมาณรังสีคอสมิกจากแหล่งใกล้ ๆ กันในช่วงเวลาเดียวกันกลับแตกต่างกัน ตัวแปรสำคัญที่งานวิจัยนี้พิจารณาคืออุณหภูมิในช่วงการเกิดฟิซชันรอยกั้ด และการเปลี่ยนอุณหภูมิตั้งแต่ใกล้ 0 เคลวินไปจนถึงราว 600 เคลวินหลังจากฟิซชันรอยกั้ดก่อตัวเรียบร้อยแล้ว ผลการทดลองในแร่ชนิดต่างๆพบว่าอุณหภูมิมีผลแค่เล็กน้อยกับความลึกของรอยกั้ด เมื่อวัสดุถูกฟิซชันแฟรกเมนต์พุ่งใส่ที่อุณหภูมิต่างๆกัน รวมถึงเกือบไม่มีผลต่อช่วงเวลาที่ใช้ในการขยายขนาดรอยกั้ดทางเคมีจนได้ความลึกสูงสุด แต่อุณหภูมิกลับส่งผลที่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของรอยกั้ดหลังการสร้างรอยกั้ดแล้ว โดยรอยกั้ดที่ก่อตัวบริเวณอุณหภูมิต่ำๆ จะต่อต้านการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรอยกั้ดได้ดีกว่ารอยกั้ดที่ก่อตัว ณ อุณหภูมิสูงๆ แต่เมื่อมองโดยรวม ต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกันหลายร้อยเคลวิน เพื่อให้โครงสร้างรอยกั้ดแตกต่างกันจนมีนัยสำคัญ ดังนั้นสำหรับการทดลองที่ใช้อุณหภูมิประจำวันซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก

จึงสามารถบอกได้ว่าพิษชั้นรอยกัดที่เกิดขึ้นมีความเหมือนกันโดยไม่มีปัจจัยของอุณหภูมิมาเกี่ยวข้อง

3. นเรศร์ จันทน์ขาว (2522) ได้ศึกษาการใช้แผ่นเซลลูโลสไนเตรท (cellulose nitrate) ในการบันทึกรอยอนุภาคแอลฟา เพื่อใช้ประโยชน์ในการสำรวจแร่ยูเรเนียม โดยได้หาเงื่อนไขในการล้างกัดขยายรอยที่เหมาะสมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ ซึ่งพบว่าได้ความหนาแน่นรอยสูงสุดที่ระยะเวลาล้างกัดขยายรอย 40 นาที จากนั้นได้ใช้วิธีติดแผ่นเซลลูโลสไนเตรทขนาดประมาณ 2 ซม. X 3 ซม. ติดที่ก้นถ้วยพลาสติกด้านในแล้วนำไปตรวจวัดอนุภาคแอลฟาที่สลายตัวจากก๊าซเรดอนในดิน โดยชุดหลุมลึกประมาณ 50 - 70 ซม. แล้ววางถ้วยในลักษณะคว่ำลงที่ก้นหลุมทิ้งไว้ประมาณ 1 เดือน พบว่าภายหลังการล้างกัดขยายรอยด้วยเงื่อนไขดังกล่าว สามารถเห็นรอยอนุภาคแอลฟาได้ชัดเจน นอกจากนี้ได้ทดสอบโดยการฝังก้อนแร่ยูเรเนียมที่อยู่ในหินทรายจากอำเภอภูเวียงจังหวัดขอนแก่น ไว้ในกระบะดิน เมื่อทำการวัดก๊าซเรดอนที่บริเวณด้านบนของผิวดินด้วยถ้วยพลาสติกที่ติดแผ่นเซลลูโลสไนเตรทพบว่า ที่บริเวณตรงกับตำแหน่งของก้อนแร่มีนับจำนวนรอยอนุภาคแอลฟาได้สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดก๊าซเรดอนด้วยเรดอนมิเตอร์ (radon meter)
4. วิเชียร รตนธงชัย (2536) ได้ทำการวิจัยเรื่องการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากรูปเปลี่ยนนิวตรอนชนิดบีอี-10 ซึ่งเป็นฉากรูปที่เคลือบสารประกอบโบรอนคาร์ไบด์ (boron carbide, B_4C) ที่เสริมสมรรถนะโบรอน-10 สูงถึงร้อยละ 95 เมื่อโบรอน-10 จับนิวตรอน จะปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา จึงต้องใช้แผ่นเซลลูโลสไนเตรทประกบเพื่อบันทึกรอยของอนุภาคแอลฟา บริเวณใดที่นิวตรอนทะลุผ่านขึ้นงานได้น้อย บนแผ่นบันทึกรอยจะมีความหนาแน่นรอยต่ำทำให้แผ่นบันทึกรอยดูใส ในทางกลับกันกับบริเวณใดนิวตรอนทะลุผ่านได้มาก ความหนาแน่นรอยก็จะมาก แผ่นบันทึกรอยจะดูฝ้า ๆ จึงเกิดเป็นภาพถ่ายด้วยนิวตรอน ซึ่งเหมาะสมในการตรวจวัสดุที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุเบา เช่น พลาสติก ดิน ดินปืน ฯลฯ โดยได้ทดลองถ่ายภาพชิ้นงานบางชนิดโดยใช้ลำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย เช่น ฮาร์ดดิสก์ ฟลอปปีดิสก์ เปรียบเทียบกับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนวิธีอื่น
5. นิวัฒน์ ตะโพนทอง (2535) ทำวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนด้วยเทคนิคแทรกเอตซ์ โดยใช้ลำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย แผ่นบันทึกรอยที่ใช้คือ CN85 Type B ซึ่งเป็นแผ่นเซลลูโลสไนเตรทที่เคลือบสารประกอบลิเทียมเมตาบอเรต (lithium metaborate, $Li_2B_4O_7$) ทั้งลิเทียมและโบรอนมีความเข้มข้นของไอโซโทปลิเทียม-6 และ

โบรอน-10 ตามธรรมชาติ (ไม่มีการเสริมสมรรถนะไอโซโทป) ทำให้ต้องใช้เวลาในการถ่ายภาพนานประมาณ 60 ถึง 150 นาที แต่ก็ให้คุณภาพของภาพดีเมื่อเทียบกับเทคนิคปกติ แต่มีความแปรปรวนของภาพต่ำ จึงได้ทดลองอัดภาพที่ได้ลงกระดาษอัดรูปขาวดำเพื่อทำให้ความแปรปรวนของภาพดีขึ้นและมีความสะดวกในการดูภาพ งานวิจัยนี้ยังได้ทดลองถ่ายภาพต้นกำเนิดรังสีแกมมาอิริเดียม-192 ที่ใช้ในงานถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาทางอุตสาหกรรม ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจมาก เนื่องจากไม่สามารถทำได้ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนวิธีเดิมและเทคนิคถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา เพราะทั้งสองเทคนิคต้องใช้ฟิล์มที่มีความไวต่อรังสีแกมมาจึงใช้กับชิ้นงานที่เป็นวัสดุกัมมันตรังสีไม่ได้ แต่การใช้แผ่นบันทึกรอยแตรคเอดซ์ชนิดเซลลูโลสไนเตรทนั้นไม่มีความไวต่อรังสีแกมมา

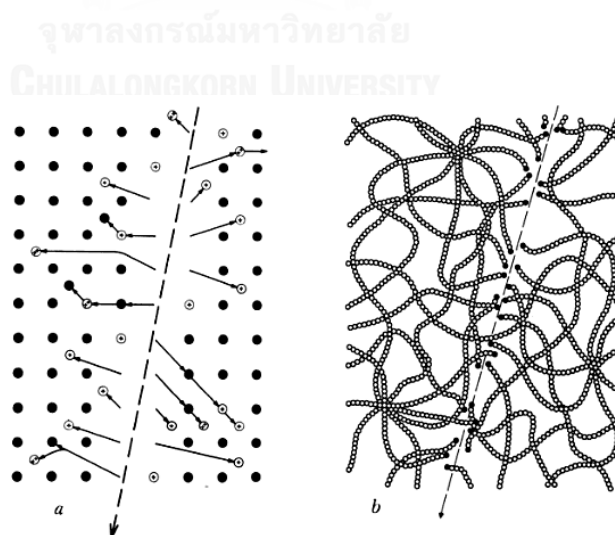
6. เสาวนีย์ อัครชาติบุญ (2556) ทำวิจัยเกี่ยวกับการผลิตแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่มีรอยของอนุภาคโปรตอน โดยนำแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปอบรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดชนิดแคลิฟอร์เนียม-252 (californium-252, ^{252}Cf) ที่อยู่ในน้ำ ซึ่งทำให้เกิดโปรตอนจากปฏิกิริยา (n, p) จากการชนของอนุภาคนิวตรอนกับธาตุไฮโดรเจนในโพลีคาร์บอเนต จากนั้นได้ใช้สารละลาย PEW ที่มีส่วนผสมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) เอทานอล (Ethanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) และน้ำ (Water) ในการล้างกัดขยายรอย เมื่อนำแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่มีรอยอนุภาคโปรตอนไปทดสอบการส่องผ่านและการกระเจิงของแสงสว่าง อุลตราไวโอเล็ต และแสงอินฟราเรด พบว่า อุลตราไวโอเล็ตไม่สามารถทะลุผ่านได้ ส่วนแสงสว่างและแสงอินฟราเรดมีความเข้มลดลงเล็กน้อยและลดลงมากขึ้นเมื่อความหนาแน่นรอยเพิ่มขึ้น แต่การทดสอบการกระจายของลำแสงเลเซอร์สีแดงจากเลเซอร์พอยเตอร์ (laser pointer) แสดงให้เห็นว่าแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่มีรอยอนุภาคโปรตอนทำให้อำนาจแสงสีแดงกระจายตัวได้ดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่ไม่มีรอยอนุภาคโปรตอน ผลการวิจัยสรุปได้ว่าน่าจะใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตที่มีรอยอนุภาคโปรตอนในการทำให้อำนาจแสงกระจายตัวและเพื่อลดความร้อนภายในห้องหรือยานพาหนะได้ถ้าผลิตรออกมาในลักษณะเป็นฟิล์มกรองแสง

บทที่ 2: ทฤษฎี

2.1 แทรค-เอตช์ (track-etch)

[1, 11]

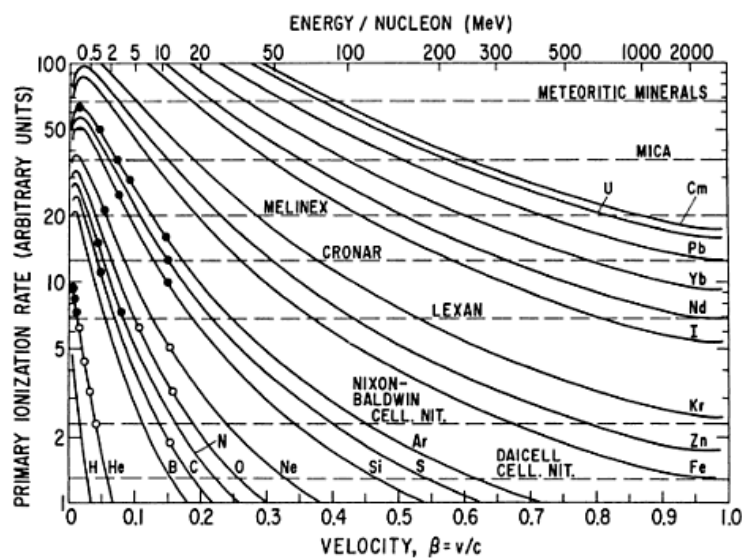
2.1.1 การเกิดรอย (track formation) กลไกที่อธิบายการเกิดรอยของอนุภาคมีประจุในวัสดุตัวกลาง คือ “Ion explosion spike” ซึ่งกล่าวไว้ว่า เมื่ออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุตัวกลางที่เป็นฉนวน เช่น แก้ว ไมกา และพลาสติก ประจุไฟฟ้าในอนุภาคนั้นจะเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนและถ่ายโอนพลังงานให้ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร (ionization) เกิดประจุบวกขึ้นรอบๆ แนวทางที่อนุภาคนั้นเคลื่อนที่ผ่าน เมื่อประจุบวกเหล่านี้อยู่ใกล้กัน จะเกิดแรงผลักกันขึ้น ทำให้เคลื่อนที่ไปเบียดอะตอมถัดไป เกิดความเครียดขึ้น ความเครียดนี้จะแผ่กระจายไปยังอะตอมถัดไปทุกทิศทาง ทำให้โมเลกุลเรียงตัวกันใหม่ เพื่อให้เกิดความสมดุล จึงทำให้เกิดรอย(track) ขึ้นในตัวกลางอยู่อย่างถาวรจึงสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ในตัวกลางที่เป็นฉนวนเนื่องจากไม่สามารถจับอิเล็กตรอนเข้าไปทำให้เป็นกลางได้ทันที ดังแผนภาพในรูปที่ 2.1 ถ้าหากเป็นวัสดุประเภทกึ่งตัวนำ (semiconductor) และตัวกลางกึ่งตัวนำจะไม่เกิดช่องว่างขึ้นเนื่องจากประจุบวกที่เกิดขึ้นสามารถจับอิเล็กตรอนอิสระแล้วกลายเป็นกลาง



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการเกิดรอยของอนุภาคมีประจุในผลึก(ซ้าย) และในพอลิเมอร์(ขวา)

[11]

การที่จะเกิดรอยของอนุภาคได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ ประการแรกอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทาง (linear energy transfer, LET) ของอนุภาค ซึ่งขึ้นอยู่กับประจุและมวลของอนุภาค ประการที่สองคือ ความแข็งแรงของโครงสร้างของวัสดุ โดยพลังงานที่อนุภาคถ่ายเทให้วัสดุตัวกลางจะต้องมีค่าสูงกว่าค่าพลังงานวิกฤติ (critical energy) หรือพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ของวัสดุนั้นจึงจะเกิดรอยได้ รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นอัตราการสูญเสียพลังงานของอนุภาคหลายชนิดที่มีพลังงานจลน์ต่าง ๆ กัน เปรียบเทียบกับพลังงานวิกฤติของวัสดุบางชนิด (เส้นประในแนวนอน) ดังตัวอย่างเช่น Diacell ซึ่งเป็นเซลลูโลสไนเตรท (cellulose nitrate) สามารถบันทึกรอยกับอนุภาคทุกชนิด ในรูปที่ 2.2 คือตั้งแต่โปรตอน (ที่เขียนกำกับเป็น H ในรูป) ขึ้นไป ส่วนไมก้า (mica) มีค่าพลังงานวิกฤติสูงมาก อัตราการสูญเสียพลังงานของโปรตอนและแอลฟา (ที่เขียนกำกับเป็น He ในรูป) มีค่าน้อยเกินไป อนุภาคขนาดเล็กที่สุดที่สามารถเกิดรอยได้ในไมก้าคือนิวเคลียสของนีออน (ที่เขียนกำกับเป็น Ne ในรูป) ขึ้นไป



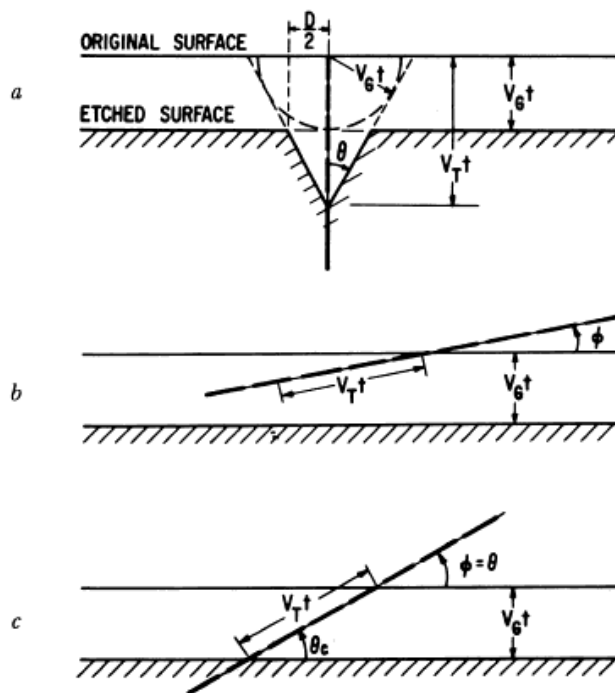
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงอัตราการสูญเสียพลังงานของอนุภาคมีประจุที่พลังงานจลน์ต่าง ๆ

กับค่าพลังงานวิกฤติในการเกิดรอยของวัสดุบางชนิด [11]

2.1.2 แผ่นวัสดุบันทึกรอยและการล้างกัดขยายรอย ดังได้กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับ

ความสามารถในการทำให้เกิดรอยขึ้นในวัสดุ แต่ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงจะสามารถมองเห็นได้ หากนำวัสดุที่เกิดรอยขึ้นไปแช่ในสารทำลายที่เหมาะสม รอยเหล่านั้นก็จะถูกกัด

ขยายขึ้น ทำให้สามารถเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา กระบวนการนี้เรียกว่า “การกัดขยายรอย (track etching)” การที่จะเห็นรอยที่เกิดขึ้นหรือไม่จึงมีปัจจัยอื่นอีก ได้แก่ ชนิด อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลาย และระยะเวลาที่ใช้ รวมทั้งพลังงานของอนุภาคที่ไปถึงผิวหน้าแผ่นบันทึกรอยและมุมตกกระทบของอนุภาคด้วย ดังนั้นเงื่อนไขในการกัดขยายรอยจึงเป็นเรื่องสำคัญสำหรับการทำให้ปรากฏรอยของอนุภาคบนแผ่นวัสดุที่ใช้บันทึกรอย ในรูปที่ 2.3 b. อนุภาคทำมุมเอียงกับผิวหน้าของวัสดุมาก ประกอบกับใช้เวลาการกัดขยายรอยนานเกินไป จึงทำให้ไม่ปรากฏรอยให้เห็น



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการกัดรอยของอนุภาคเมื่อมีมุมตกกระทบต่างกัน [11]

(t คือระยะเวลา, V_G คืออัตราการละลายของวัสดุตรงบริเวณที่ไม่มีอนุภาคตกกระทบ,

V_T คือ อัตราการละลายของวัสดุตามแนวที่อนุภาควิ่งผ่าน และ ϕ คือมุมตกกระทบของอนุภาค)

ตารางที่ 2.2

แผ่นบันทึกรอยบางชนิดและเงื่อนไขในการล้างกัดขยายรอย [1, 3-6]

ชนิดของแผ่นวัสดุบันทึกรอย	อนุภาค	ชนิดของสารทำละลายและเงื่อนไขในการล้างกัดขยายรอย
เซลลูโลสไนเตรท เซลลูโลสอะซิเตท	โปรตอน, แอลฟา	2.5 N NaOH, 6.25 N NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 20-40 นาที
CR39 (polyallyl diglycol carbonate)	โปรตอน, แอลฟา	6 N NaOH อุณหภูมิ 90 องศา เซลเซียส 90 นาที
พอลิคาร์บอเนต	โปรตอน, แอลฟา	สารละลาย PEW อุณหภูมิ 60 องศา เซลเซียส 60-90 นาที
แก้ว ไมก้า ไมลาร์	ฟิชชันแฟรก เมนต์	กรดกัดแก้ว (HF) อุณหภูมิห้อง 2-3 วินาที

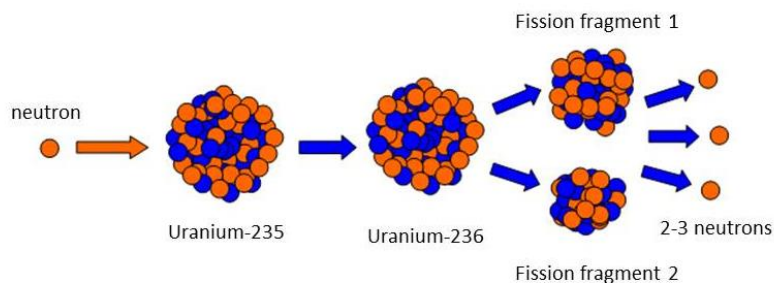
หมายเหตุ 1. เงื่อนไขในการกัดรอยเป็นเพียงตัวอย่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาค และขยายของรอยที่ต้องการ

2. PEW คือสารละลายที่มีส่วนผสมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เอทานอล และน้ำ ในอัตราส่วน

15:45:40

2.2 ปฏิกิริยาฟิชชัน

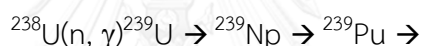
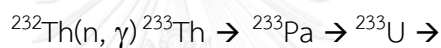
[13]



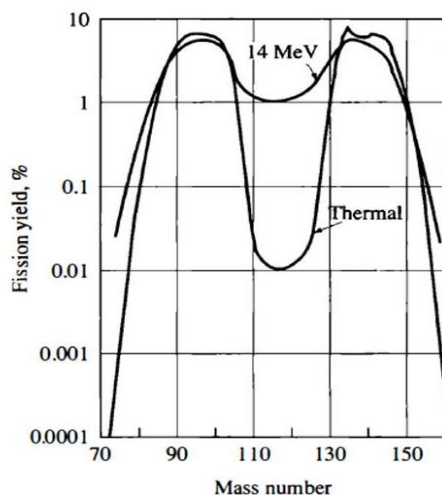
รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาแตกตัวของยูเรเนียม-235

(จาก <http://www.schoolphysics.co.uk>)

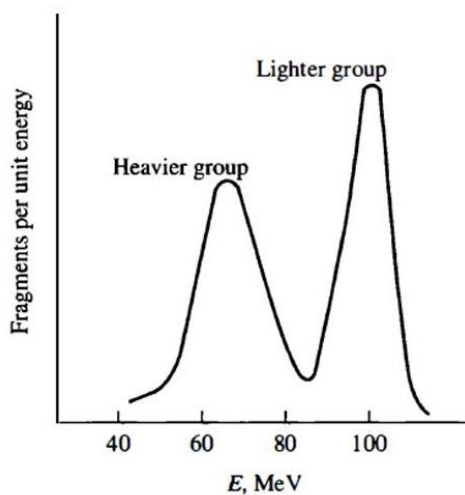
ปฏิกิริยาแตกตัวหรือฟิชชัน(fission) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดกับนิวเคลียสขนาดใหญ่ เช่น ยูเรเนียม-233 ยูเรเนียม-235 และพลูโทเนียม-239 ซึ่งเมื่อมีอนุภาคนิวตรอนเข้าไปรวมในนิวเคลียส จะทำให้นิวเคลียสแตกตัวออกมาเป็นสองส่วนเรียกว่า “ผลผลิตจากปฏิกิริยาแตกตัว(fission product or fission fragment)” พร้อมกับมีอนุภาคนิวตรอนออกมา 2 หรือ 3 ตัวด้วย ปฏิกิริยานี้เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาหลักในการผลิตพลังงานของระเบิดนิวเคลียร์ และผลิตเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้ผลิตพลังงาน (power nuclear reactor) รวมทั้งในการผลิตนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (nuclear research reactor) ยูเรเนียม-235 ถือว่าเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่สำคัญและถูกใช้ประโยชน์มากที่สุดเนื่องจากเป็นไอโซโทปเดียวที่มีอยู่ในยูเรเนียมธรรมชาติ (natural uranium) ที่เกิดปฏิกิริยาแตกตัวได้กับนิวตรอนพลังงานต่ำ ส่วนยูเรเนียม-233 กับพลูโทเนียม-239 เกิดจากปฏิกิริยาจับนิวตรอน (neutron capture) ของทอเรียม-232 กับยูเรเนียม-238 ตามลำดับ ดังสมการต่อไปนี้



^{233}Th มีครึ่งชีวิต 22.3 นาที จะสลายตัวให้รังสีบีตากลายเป็น ^{233}Pa ซึ่งมีครึ่งชีวิต 27 วัน โดย ^{233}Pa สลายตัวให้รังสีบีตาอีก จึงได้ ^{233}U ที่มีครึ่งชีวิต 1.6×10^5 ปี ทำนองเดียวกัน ^{239}U ซึ่งมีครึ่งชีวิต 23.5 นาที สลายตัวให้รังสีบีตากลายเป็น ^{239}Np ซึ่งมีครึ่งชีวิต 2.35 วัน สลายตัวให้รังสีบีตาอีก จึงได้ ^{239}Pu ที่มีครึ่งชีวิต 2.44×10^4 ปี ทั้ง ^{233}U และ ^{239}Pu เกิดปฏิกิริยาแตกตัวได้กับนิวตรอนพลังงานต่ำเช่นเดียวกับ ^{235}U



รูปที่ 2.4 ฟิชชันยี่ลด์ของฟิชชันแฟรกเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาแตกตัวของยูเรเนียม-235 [13]



รูปที่ 2.5 พลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์กลุ่มมวลเบาและกลุ่มมวลหนัก [13]

ตารางที่ 2.1

พิสัยของฟิชชันแฟรกเมนต์ในวัสดุบางชนิด [13]

วัสดุ	พิสัย (มิลลิเมตร)
อะลูมิเนียม	0.014
ทองแดง	0.0059
เงิน	0.0053
ยูเรเนียม	0.0066
ยูเรเนียมออกไซด์ (U_3O_8)	0.014

ฟิชชันแฟรกเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาแตกตัวของยูเรเนียม-235 มีเลขมวลอยู่ระหว่าง 70 ถึง 160 และมีประจุแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเบา มีเลขมวลประมาณ 90 มีประจุ +20 มีพลังงานจลน์ประมาณ 100 MeV ส่วนกลุ่มหนัก มีเลขมวลประมาณ 140 มีประจุ +22 มีพลังงานจลน์ประมาณ 68 MeV จึงจัดว่าเป็นอนุภาคที่มีอำนาจในการทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออนสูงมากเมื่อเทียบกับอนุภาคโปรตอน และแอลฟาที่มีมวลเพียง 1 และ 2 หน่วย และมีประจุ +1 และ +2 ตามลำดับ เมื่อฟิชชันแฟรกเมนต์วิ่งผ่านตัวกลาง จะเกิดการสูญเสียอย่างรวดเร็ว จึงมีพิสัย (range) สั้นมากดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1

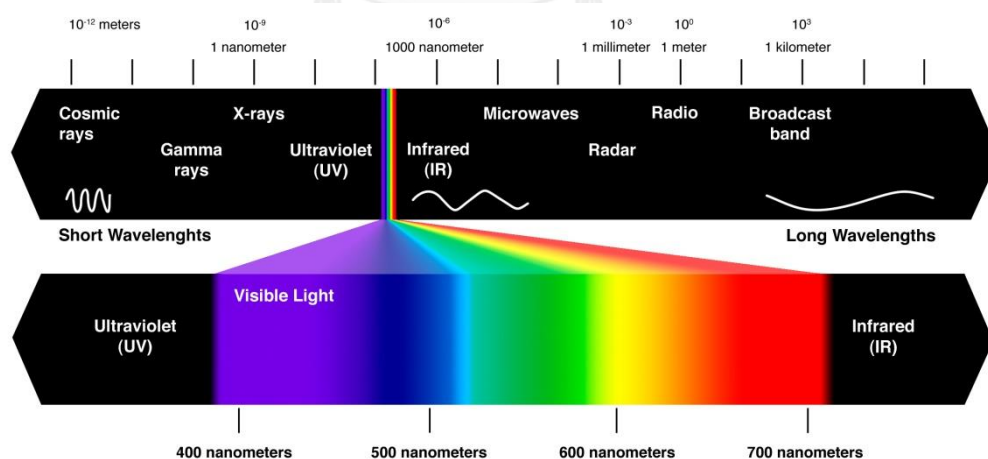
อัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางของฟิซชันแฟรกเมนต์สูงมาก จึงทำให้เกิดรอยขึ้นได้ในวัสดุหลายชนิด เช่น เซลลูโลสในเดรท เซลลูโลสอะซิเตท โพลีคาร์บอนเนต แก้ว ไมลาร์ และไมก้า เป็นต้น แต่แผ่นบันทึกรอยสามชนิดหลัง คือ แก้ว ไมลาร์ และไมก้า มีพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) หรือพลังงานวิกฤติ (critical energy) สูง ไม่สามารถเกิดรอยกับอนุภาคโปรตอนและอนุภาคแอลฟา จึงมักถูกใช้ในการบันทึกรอยฟิซชันแฟรกเมนต์ เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากรอยอนุภาคอื่น ๆ

2.3 แสงสว่าง อัลตราไวโอเล็ต อินฟราเรดและรังสีเอ็กซ์

2.3.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากสมการแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกเสนอโดยแมกซ์เวลล์ (James Maxwell) ในปี 1861 ทำให้เราทราบว่าเมื่อสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และเมื่อสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงก็จะเกิดสนามไฟฟ้าเช่นกัน หากสนามใดสนามหนึ่งมีการสั่นอย่างต่อเนื่อง ก็จะเกิดอีกสนามหนึ่งขึ้นอย่างต่อเนื่อง การสั่นนี้ส่งทั้งสนามและพลังงานออกไปได้ในอวกาศ (space) เกิดเป็นคลื่นตามขวางซึ่งเรียกกันว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave)

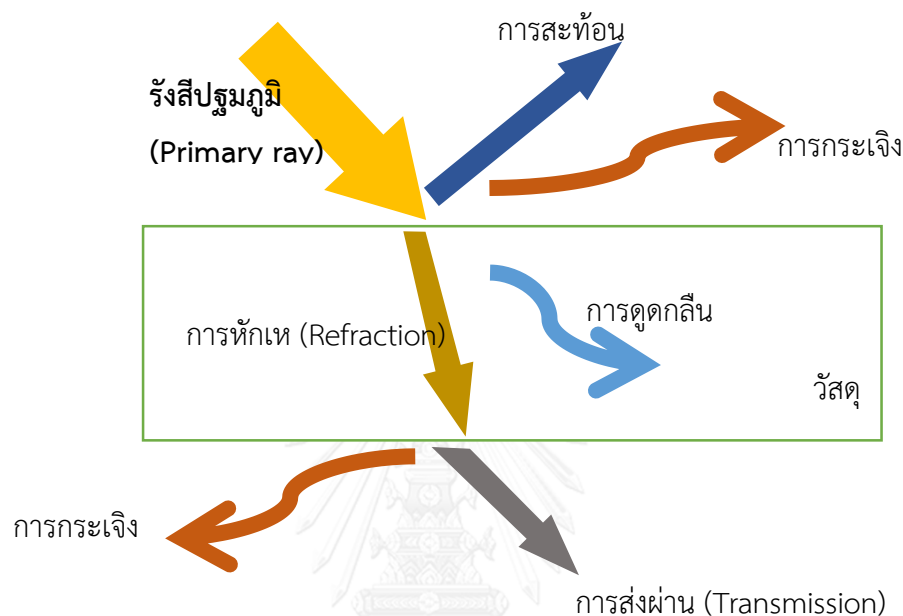
เราแบ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็นหลายช่วงคลื่น เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา ซึ่งแบ่งออกจากความถี่ต่ำไปหาความถี่สูงได้ 7 ช่วง คือ คลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด แสงช่วงที่ตามองเห็นได้ รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
(จาก <http://deserthighlandspr.com>)

2.3.2 อันตรกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อสสาร

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางที่โปร่งแสงหรือโปร่งใส คลื่นนั้นจะเกิดอันตรกิริยาขึ้นพร้อมกันหลายอย่าง ได้แก่การสะท้อน(Reflection), การหักเห (Refraction), การกระเจิง (Scattering), การส่งผ่าน (Absorption) และการส่งผ่าน (Transmission)



ภาพที่ 2.7 อันตรกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับวัสดุโปร่งใสหรือโปร่งแสง

ซึ่งหากเราสนใจเฉพาะอันตรกิริยาที่ส่งผลต่อการส่งผ่านพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมันเคลื่อนผ่านตัวกลาง เราก็สามารถพิจารณาแค่เพียงการดูดกลืน (Absorption) และการส่งผ่าน (Transmission) ได้ ซึ่งสองอันตรกิริยานี้ก็มีความเกี่ยวพันกันโดยตรง ทำให้สามารถเลือกพิจารณาเพียงอย่างเดียวก็ได้

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนเป็นอนุภาคพาหะแรง (Force carried particle) ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า และอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคมูลฐาน (Fundamental particle) หนึ่งของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอิเล็กตรอนมีปฏิสัมพันธ์กันเสมอ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนผ่านอะตอม กลุ่มหมอกของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสอะตอมจะมีโอกาสส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นไว้ หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอาจเคลื่อนที่ผ่านไปในช่วงระหว่างอะตอมโดยไม่ทำอันตรกิริยาใดๆเลยก็ได้ เนื่องจากอะตอมนั้นประกอบด้วยที่ว่างเป็นส่วนใหญ่

การเรียงตัวของอะตอมที่เป็นระเบียบ หรือเป็นโครงผลึกที่ดีมักทำอันตรกิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านออกมาได้ง่าย หรือถูกส่งผ่านไปได้น้อยนั่นเอง แต่หากโครงสร้างของวัสดุเริ่มเสียระเบียบ ซึ่งในที่นี้มาจากนิวเคลียร์แทรกที่เกิดขึ้น สามารถส่งผลต่อสัดส่วนการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับตัวกลางเดิมได้ การจะทราบความสัมพันธ์ที่แน่ชัดจำเป็นต้องใช้กลศาสตร์ควอนตัมและการคำนวณที่สลับซับซ้อนด้วยคอมพิวเตอร์ จึงทำให้ยากเกินไปที่จะศึกษาอย่างเจาะจงในระดับจุลภาค

เพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนของการคำนวณ เรามักนิยมใช้วิธีการเชิงสถิติเข้ามาช่วย นั่นคือการยิงโฟตอนจำนวนมาก เพื่อวัดผลที่เกิดขึ้นกับลำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนพื้นผิวขนาดใหญ่ มิใช่โฟตอนเดี่ยวต่อโครงสร้างอะตอมระดับจุลภาค นอกจากนั้นยังต้องมีการวัดปริมาณบางอย่างเพื่อให้สามารถระบุถึงสัดส่วนการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน

2.3.3 การกระเจิงของรังสีเอ็กซ์และปรากฏการณ์คอมป์ตัน

ในปี 1923 คอมป์ตัน (Arthur Holly Compton) ทดลองฉายรังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวเข้าไปใส่แท่งกราไฟต์พบว่ารังสีเอ็กซ์บางส่วนมีการกระเจิงออกจากแนวยิงและมีความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นอย่างสอดคล้องกัน รวมถึงการเปลี่ยนความยาวคลื่นนี้ไม่ขึ้นกับความเข้มของรังสีเอ็กซ์แต่อย่างใด โดยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

โดยสามารถจัดรูปสมการข้างต้นให้อยู่ในรูปของพลังงานได้เป็น

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{E_e} (1 - \cos \theta)}$$

โดย E คือพลังงานรังสีเอ็กซ์ก่อนกระเจิง

E_e คือพลังงานของอนุภาคที่ถูกโฟตอนรังสีเอ็กซ์ชน (โดยทั่วไปมักเป็นอิเล็กตรอน ที่พลังงาน 0.511 MeV)

θ คือมุมกระเจิง วัดจากแนวกึ่งกลาง

ในสสารการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์จะเกิดกับอิเล็กตรอน ดังนั้นพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงตามมุมต่างๆจะสอดคล้องกับสมการข้างต้น โดยลดลงเมื่อมุมกระเจิงมากขึ้น

บทที่ 3: วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์

- 3.1.1. แผ่นกระจกสไลด์มาตรฐานสำหรับกล้องจุลทรรศน์
- 3.1.2. แผ่นพลาสติกใส
- 3.1.3. บีกเกอร์พลาสติกปริมาตร 100 และ 250 มล.
- 3.1.4. กระจกตวงพลาสติกปริมาตร 15 มล.
- 3.1.5. ขวดพลาสติกสำหรับใส่กรดกัดแก้ว
- 3.1.6. ถุงมือยาง
- 3.1.7. ผ้าปิดปาก
- 3.1.8. ปากคีบพลาสติก
- 3.1.9. ขาดั่งหลอดทดลองพร้อมไม้หนีบ
- 3.1.10. แผ่นพลาสติกสำหรับวัดมุม
- 3.1.11. เวอร์เนียคาลิเปอร์

3.2 สารเคมีและสารที่ใช้

- 3.2.1. แผ่นโลหะยูเรเนียมธรรมชาติ
- 3.2.2. สารให้รังสี Fe-55
- 3.2.3. สารให้รังสี Cd-109
- 3.2.4. สารให้รังสี Pu-238
- 3.2.5. สารให้รังสี Am-241
- 3.2.6. กรดกัดแก้วเข้มข้น 50% (conc HF)

3.3 เครื่องมือ

- 3.3.1. เครื่องรีดปิดปากถุงพลาสติกด้วยความร้อน
- 3.3.2. เทอร์โมมิเตอร์ชนิดคู่ควบโลหะ
- 3.3.3. กล้องจุลทรรศน์พร้อม digital eyepiece
- 3.3.4. หัววัดรังสี CdTe

3.3.5. เครื่องวัดการส่งผ่านสเปกตรัม Model# SD2400

3.4 การดำเนินการวิจัย

3.4.1 การนำแผ่นแก้วประกบแผ่นยูเรเนียมไปอบรังสี

- เลือกแผ่นกระจกสไลด์กล้องจุลทรรศน์ที่ใส ไม่มีรอยขีดข่วนมาทำความสะอาด เพื่อป้องกันปัจจัยอื่นๆที่อาจกระทบต่อการทดลอง
- นำแผ่นกระจกไปประกบกับแผ่นยูเรเนียมธรรมชาติ ขนาด 5x5 เซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจก 4 แผ่นประกบทั้งด้านหน้าและหลังของแผ่นยูเรเนียมธรรมชาติ
- ตัดแผ่นพลาสติกใส กะขนาดให้เหมาะสมสำหรับการผนึกแผ่นกระจกและแผ่นยูเรเนียมธรรมชาติ
- ใช้เครื่องรีดปิดปากถุงพลาสติกด้วยความร้อนผนึกพลาสติกให้สนิท และแนบพอลิเมอร์แผ่นกระจกและแผ่นยูเรเนียมธรรมชาติไม่สามารถขยับได้
- นำท่อพลาสติกที่ผนึกแล้วไปติดเข้ากับปลายท่อโลหะยาวด้วยเทปใสให้แน่นหนา
- นำแท่งโลหะที่ติดพลาสติกผนึกเรียบร้อยแล้วไปอบรังสีนิวตรอน โดยแช่ลงในอ่างน้ำซึ่งมีสารรังสี Cf-252
- จับเวลาที่ใช้ในการอบรังสี และทำซ้ำเพื่อให้ได้แผ่นแก้วที่มีรอยฟิชชันแฟรกเมนต์ตามเงื่อนไขเวลาต่างๆ
- ทำความสะอาดแผ่นแก้วหลังนำขึ้นจากน้ำ และเก็บไว้ห่างจากแผ่นยูเรเนียมธรรมชาติ หรือแหล่งรังสีมีประจุพลังงานสูงอื่นๆ

3.4.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อขนาดและความหนาแน่นของรอยกัด

การเตรียมกรดกัดแก้ว

- เตรียมกรดกัดแก้ว (HF) จากกรดกัดแก้วเข้มข้น 50% w/w โดยตวงกรดเข้มข้นด้วยกระบอกตวงพลาสติกให้ได้ปริมาตรตามต้องการ
- เทกรดในกระบอกตวงพลาสติกลงในบีกเกอร์พลาสติกซึ่งใส่น้ำกลั่น ผสมให้เข้ากัน
- เทกรดกัดแก้วที่เจือจางแล้วลงในขวดพลาสติก เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป
- ต้องสวมถุงมือยางและผ้าปิดปากเสมอเมื่อต้องใช้กรดกัดแก้ว เนื่องจากเป็นอันตรายทั้งตัวกรดและไอระเหย

การขยายรอยกัดด้วยกระบวนการทางเคมี

- เตรียมภาชนะบรรจุน้ำสำหรับล้างแผ่นแก้วที่มีปริมาตรอย่างน้อย 500 มล.
- ใช้แผ่นแก้วที่อาบนิวตรอนแล้วครึ่งละสองแผ่น วางลงในบีกเกอร์พลาสติกโดยไม่ให้แผ่นแก้วประกบติดกัน
- เติมกรดกัดแก้วที่เจือจางไว้แล้วลงในบีกเกอร์ข้างต้น จนท่วมแผ่นแก้วประมาณ $\frac{3}{4}$ และเริ่มจับเวลา
- หลังจากครบเวลาตามที่ต้องการ ใช้ปากคีบพลาสติกคีบแผ่นแก้วและแช่ลงในน้ำสะอาดทันที
- นำแผ่นแก้วที่ผ่านการล้างกรดรอยกัดแก้วแล้วมาล้างน้ำสะอาดอีกครั้ง เช็ดให้แห้ง

การศึกษาปัจจัยต่างๆที่อาจมีผลต่อขนาดและความหนาแน่นของรอยกัด
ปัจจัยที่เลือกศึกษาได้แก่

1. เวลาในการอาบนิวตรอนก่อนการล้างกรดรอยกัดแก้ว

วิธีการ: ควบคุมเวลาในการอาบรังสีตามหัวข้อ 3.4.1

ตัวแปรควบคุม: เวลาในการล้างกรดรอย 4 นาที, กรดกัดแก้วความเข้มข้น 5% และอุณหภูมิ 27.5 องศาเซลเซียส

2. ระยะเวลาในการล้างกรดรอยกัดแก้ว

วิธีการ: ใช้การตั้งเวลานับถอยหลังเพื่อควบคุมเวลาล้างกรดรอยให้แม่นยำ โดยใส่แผ่นแก้วลงในบีกเกอร์พลาสติกก่อน เมื่อนาฬิกาจับเวลาเริ่มจับเวลาก็เทกรดกัดแก้วที่เตรียมไว้ในขวดพลาสติกลงไป

ตัวแปรควบคุม: ใช้แผ่นแก้วที่อาบนิวตรอน 23 ชั่วโมง, กรดกัดแก้วความเข้มข้น 5% และอุณหภูมิ 27.5 องศาเซลเซียส

3. ความเข้มข้นของกรดกัดแก้ว

วิธีการ: เตรียมกรดตาม 3.4.2

ตัวแปรควบคุม: ใช้แผ่นแก้วที่อาบนิวตรอน 23 ชั่วโมง, เวลาในการล้างกรดรอย 4 นาที, และอุณหภูมิ 27.5 องศาเซลเซียส

4. อุณหภูมิขณะล้างกรดรอยกัดแก้ว

วิธีการ: ต้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่หรือเกือบคงที่ตลอดเวลาว่างกัตรอยกัดแก้ว โดยแช่ขวดพลาสติกที่ใส่กรดกัดแก้ว รวมถึงอุปกรณ์ทดลองอื่นๆเอาไว้ในตู้เย็นนาน 1 วัน จากนั้นทำการทดลองในตู้เย็นโดยใส่เทอร์โมมิเตอร์คู่ควบโลหะเพื่อดูอุณหภูมิระหว่างการล้างกัตรอย

ตัวแปรควบคุม: ใช้แผ่นแก้วที่อาบนิวตรอน 23 ชั่วโมง, กรดกัดแก้วความเข้มข้น 5% และ เวลาในการล้างกัตรอย 4 นาที

- เมื่อได้แผ่นแก้วที่ผ่านกระบวนการขยายรอยกัดด้วยเคมีแล้ว นำแผ่นแก้วนั้นไปส่องด้วย กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 400 เท่า
- บันทึกภาพด้วยโปรแกรม Motic Image Plus 2.0 (วิธีการใช้งานอยู่ในภาคผนวก)
- ใช้โปรแกรม Motic Image Plus 2.0 นับจำนวนของรอยกัดในพื้นที่ภาพ สุ่มนับ 5 จุดต่อแผ่นแก้วหนึ่งแผ่น
- ใช้โปรแกรม Motic Image Plus 2.0 วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด สุ่มวัด 9 รอย กัดต่อแผ่นแก้วหนึ่งแผ่น
- การสุ่มวัดรอยกัด ให้ใช้รอยกัดที่เป็นวงกลม มีสีเข้ม เพื่อให้ได้รอยกัดที่ตั้งฉากกับผิวแก้วพอดี

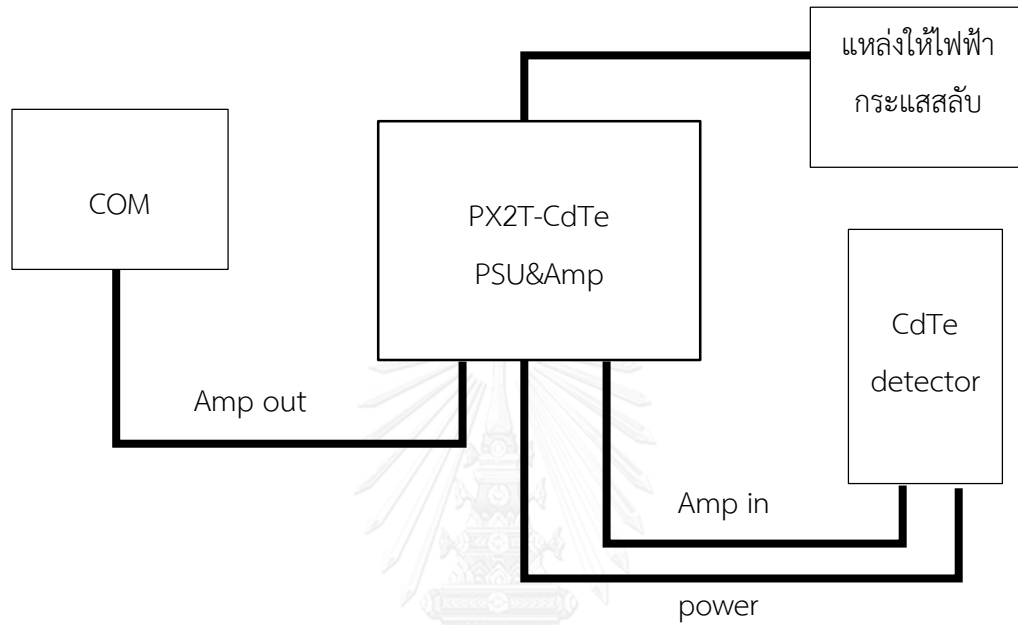
3.4.3 การศึกษาสมบัติการกระเจิงและการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อแผ่นแก้วที่มี รอยรอยกัด

การวัดการส่งผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีอินฟราเรด และแสงช่วงที่ตามองเห็น

- ตั้งเครื่องวัดการส่งผ่านสเปกตรัม Model# SD2400 ไว้บนพื้นระนาบ ให้ สภาพแวดล้อมมืดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อป้องกันการถูกแหล่งกำเนิดแสงอื่นๆรบกวน
- เปิดเครื่องส่งผ่านสเปกตรัม Model# SD2400 ทิ้งไว้ 2-3 วินาทีเพื่อให้เครื่องมือทำการ Calibrate ตัวเอง
- ใช้ขาตั้งและไม้หนีบเพื่อจัดตำแหน่งของแผ่นแก้วให้วางอย่างตั้งฉากกับส่วนตรวจวัดการส่งผ่านแสงของเครื่องมือ
- รอให้ตัวเลขบนเครื่องมือนิ่ง แล้วจึงบันทึกผล
- ทำซ้ำ 5 จุดอย่างสุ่มบนแผ่นแก้ว จากนั้นเปลี่ยนแผ่นแก้วใหม่แล้วทำซ้ำ

การวัดการส่งผ่านและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากการส่งผ่านของรังสีเอ็กซ์ในวัสดุมีกระบวนการวัดที่แตกต่างจากช่วงคลื่นที่กล่าวไป
ก่อนหน้า ซึ่งเครื่องวัดการส่งผ่านสเปกตรัม Model# SD2400 ไม่สามารถอ่านค่าได้ จึง
จำเป็นต้องใช้หัววัดรังสี CdTe แทน



ภาพที่ 3.1 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดการส่งผ่านและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์

บทที่ 4: ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆที่อาจมีผลต่อขนาดของรอยกัด

จากการทดลองเพื่อหาช่วงที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยต่างๆ ได้ช่วงที่เหมาะสมเป็นดังนี้

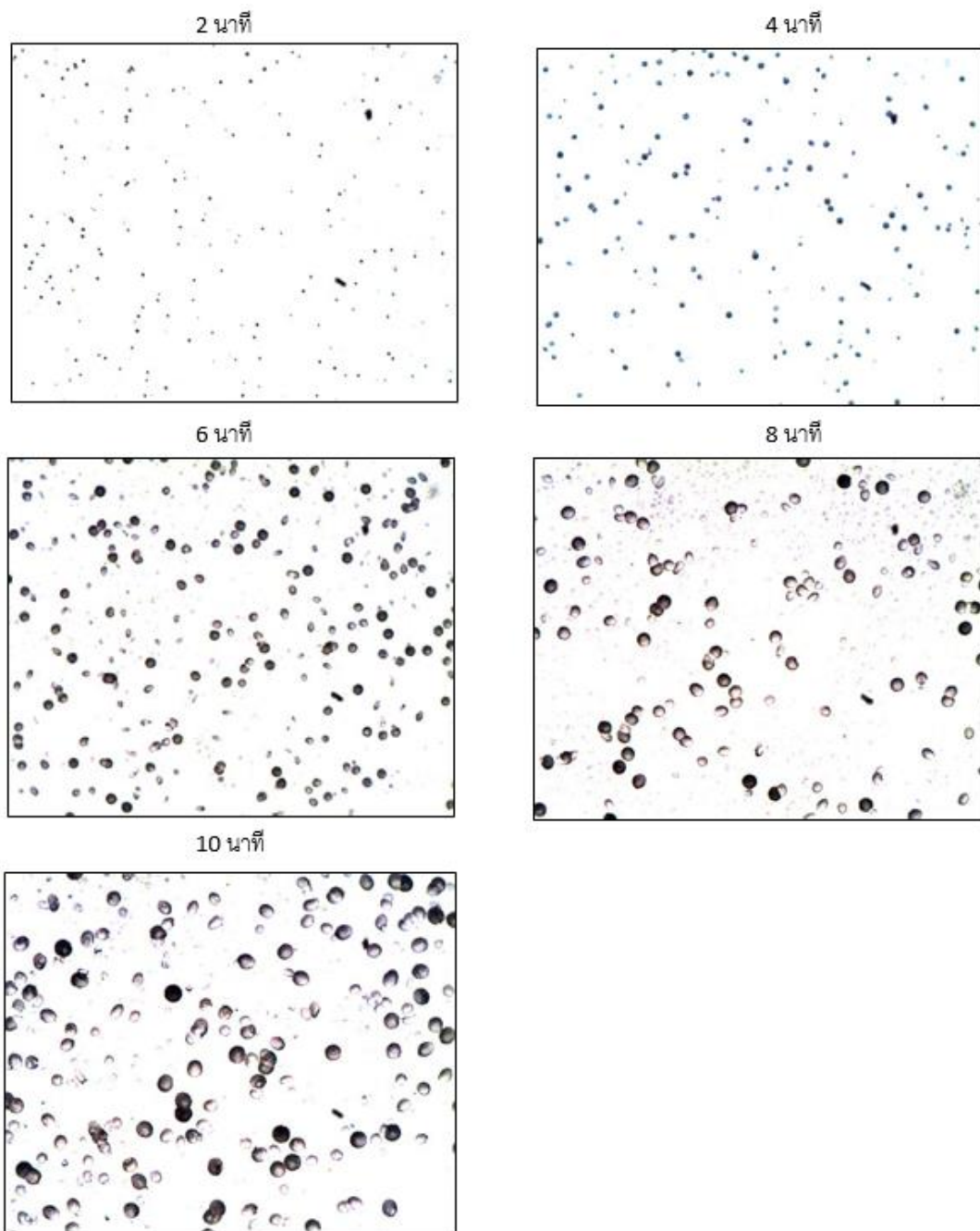
- ระยะเวลาในการอาบนิวตรอนจาก Cf-252 ใช้ช่วงเวลาที่ 23 ชั่วโมง, 52 ชั่วโมง, 92 ชั่วโมง, 142 ชั่วโมง และ 210 ชั่วโมง
- ระยะเวลาในการล้างกัดรอย HF ใช้ค่าที่ 2 นาที, 4 นาที, 6 นาที, 8 นาที และ 10 นาที
- ความเข้มข้นของกรด HF ใช้ค่าที่ 2.5%, 5% และ 10%
- อุณหภูมิขณะล้างกัดรอย HF ใช้ค่าที่ 0.0, 5.5, 11.3 และ 27.5 องศาเซลเซียส

โดยการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของรอยกัดจะใช้ ระยะเวลาในการล้างกัดรอย, ความเข้มข้นของกรด และ อุณหภูมิขณะล้างกัดรอย

ส่วนปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของรอยกัดจะใช้ ระยะเวลาในการอาบนิวตรอน, ระยะเวลาในการล้างกัดรอย, ความเข้มข้นของกรด และ อุณหภูมิขณะล้างกัดรอย

จากการทดลองพบว่าแผ่นแก้วที่อาบนิวตรอนเป็นเวลา 142 ชั่วโมงไม่ปรากฏรอยกัดหลังแช่ในกรด ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดในบางขั้นตอน จึงต้องตัดแผ่นแก้วกลุ่มนี้ออกจากการศึกษาปัจจัยไป

4.1.1 ความสัมพันธ์ของเวลาดำงักตรอยกับขนาดของรอยกัด

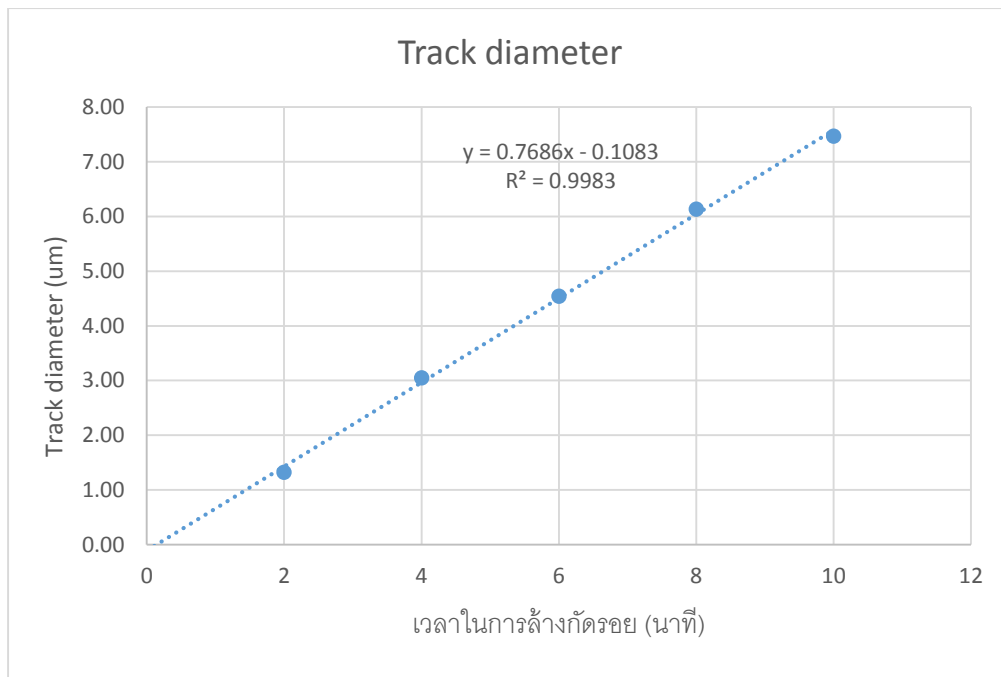


ภาพที่ 4.1 ภาพแสดงรอยกัดผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า ที่เวลาดำงักตรอยต่างๆ

ตาราง 4.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของเวลาล้างกัตรอยกับขนาดของรอยกัตหลังการล้างกัตรอย
 ตัวแปรควบคุม: แผ่นแก้วอบนิวตรอน 23 ชั่วโมง, ความเข้มข้นของกรด 5%w/w, อุณหภูมิขณะล้าง
 กัตรอย 27.5 องศาเซลเซียส

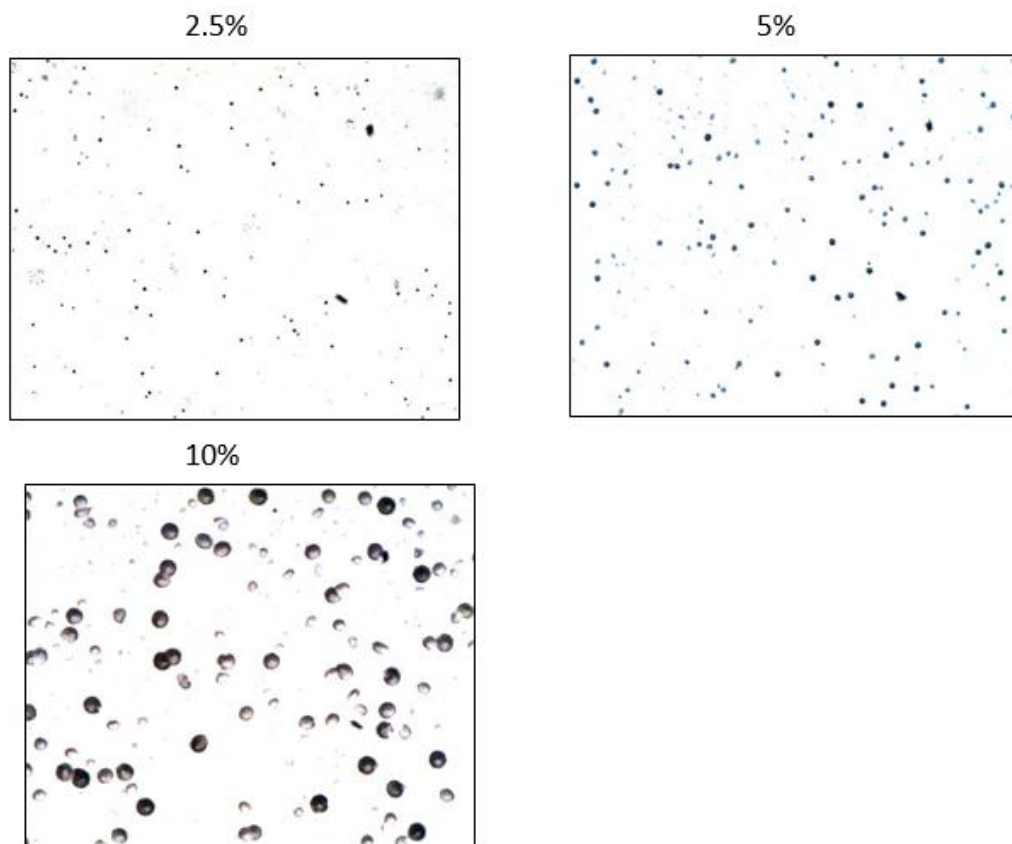
แ ฝ น ที่	เวลา ล้าง กั ตร อย (นาที่)	เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัต (ไมโครเมตร)									ค่าเฉลี่ย ยเส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (ไมโคร เมตร)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (% ของ ค่าที่ วัด)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	2	1.2	1.4	1.4	1.9	1	1	1.3	0.9	1.6	1.30	0.32	24.63
2	2	1.6	1.7	1	1.3	1.3	1.3	0.9	1.7	1.3	1.34	0.28	21.07
3	4	2.8	3.2	3	2.9	2.5	3.1	3.8	3.3	2.9	3.06	0.36	11.93
4	4	3	2.9	3.2	2.9	3.2	3	2.9	3.3	3	3.04	0.15	4.96
5	6	5.2	4.8	4.6	4.5	4.5	5.2	4.2	3.9	4.8	4.63	0.43	9.22
6	6	5.2	4.5	4.6	4.8	4.2	3.6	3.9	4.5	4.8	4.46	0.49	11.00
7	8	5.9	5.5	5.5	5.8	6.2	6.1	6.3	6.8	5.2	5.92	0.49	8.26
8	8	5.8	6.5	5.9	6.8	6.1	6.5	6.3	6.7	6.5	6.34	0.35	5.47
9	10	8.2	5.6	7.2	6.5	8.4	8.7	6.8	7.8	7.1	7.37	1.00	13.59
10	10	7.1	6.8	7.1	7.7	7.8	7.8	7.4	8.7	7.7	7.57	0.56	7.36

* เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัตถูกวัดด้วยโปรแกรม Motic Image Plus 2.0 (รายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก) ซึ่งสำหรับเวลาล้างกัตรอย 2 นาที พบว่าขนาดของรอยกัตเล็กมากจนโปรแกรมไม่สามารถวัดเส้นผ่านศูนย์กลางได้



กราฟที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด (เฉลี่ยทั้งหมด) กับเวลาที่ใช้ในการล้างกัตรอย

4.1.2 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดกับขนาดของรอยกัด



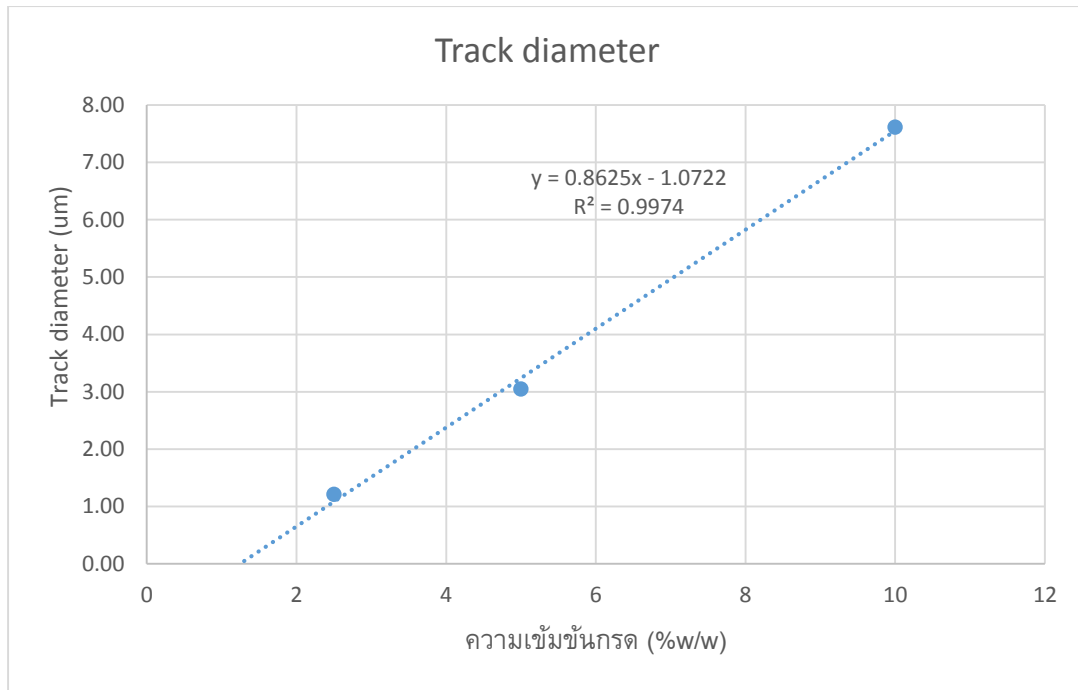
ภาพที่ 4.2 ภาพแสดงรอยกัดผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า ที่ความเข้มข้นของกรดต่างๆ

ตาราง 4.2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดกับขนาดของรอยกัดหลังการล้างกัด
รอย

ตัวแปรควบคุม: แผ่นแก้วอาบนิวตรอน 23 ชั่วโมง, เวลาล้างกัดรอย 4 นาที, อุณหภูมิขณะล้างกัดรอย

27.5 องศาเซลเซียส

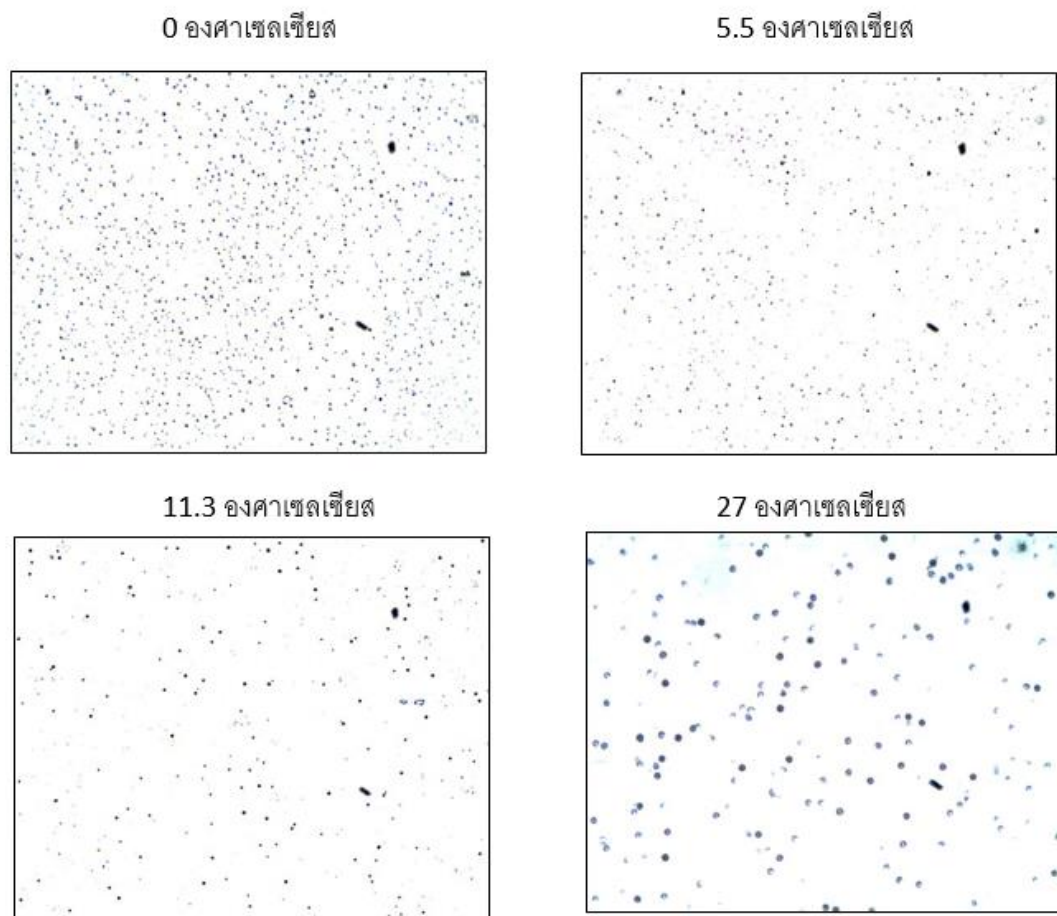
แ ผ น ที่	ความ เข้มข้นของ กรด (%)	เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด (ไมโครเมตร)									ค่าเฉลี่ย ยเส้น ผ่าน ศูนย์กลาง วาง (ไมโคร เมตร)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน น	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน น (%) ของ ค่าที่ วัด)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	2.5	1.2	1.2	1	1.4	1.3	1.3	1	0.7	1.3	1.16	0.22	18.92
2	2.5	1.3	0.9	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.27	0.14	11.16
3	5	2.8	3.2	3	2.9	2.5	3.1	3.8	3.3	2.9	3.06	0.36	11.93
4	5	3	2.9	3.2	2.9	3.2	3	2.9	3.3	3	3.04	0.15	4.96
5	10	7.7	9.7	8.1	8.1	7.8	7.8	7.4	7.4	6.5	7.83	0.85	10.87
6	10	8.1	6.2	6.8	7.1	7.4	7.7	8.1	8.1	7.1	7.40	0.67	8.99



กราฟที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด (เฉลี่ยทั้งหมด) กับเวลาที่ใช้ในการล้างกรดรอย



4.1.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิขณะล้างกับขนาดของรอยกัด



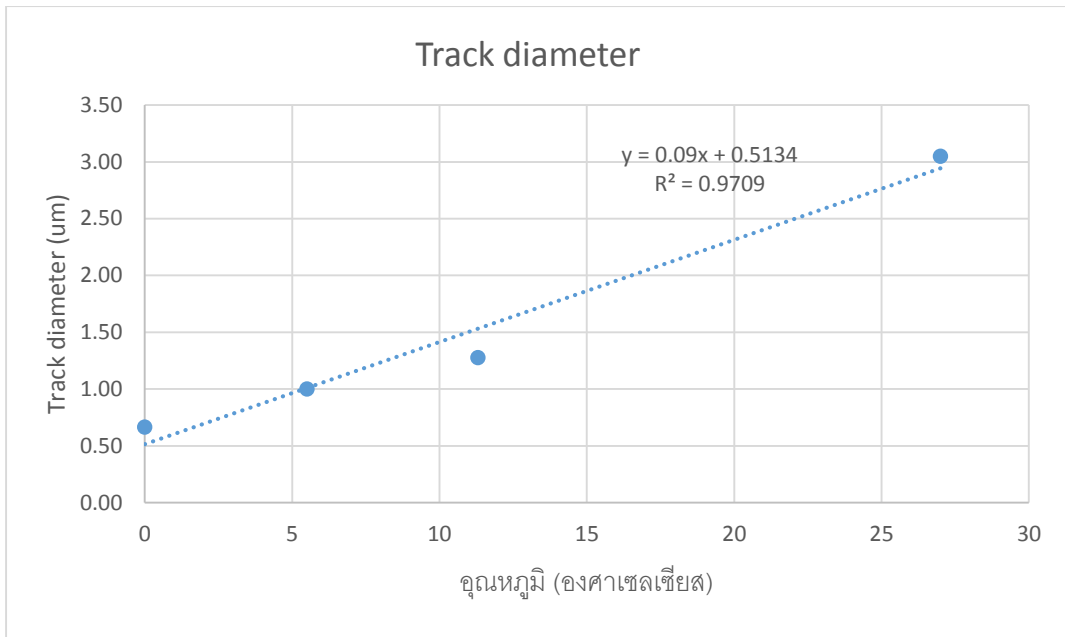
ภาพที่ 4.3 ภาพแสดงรอยกัดผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า ที่อุณหภูมิขณะล้างที่รอยกัดต่างๆ

ตาราง 4.3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิแผ่นแก้วขณะล้างกัทรอยกับขนาดของรอยกัทรอยหลังการล้างกัทรอย

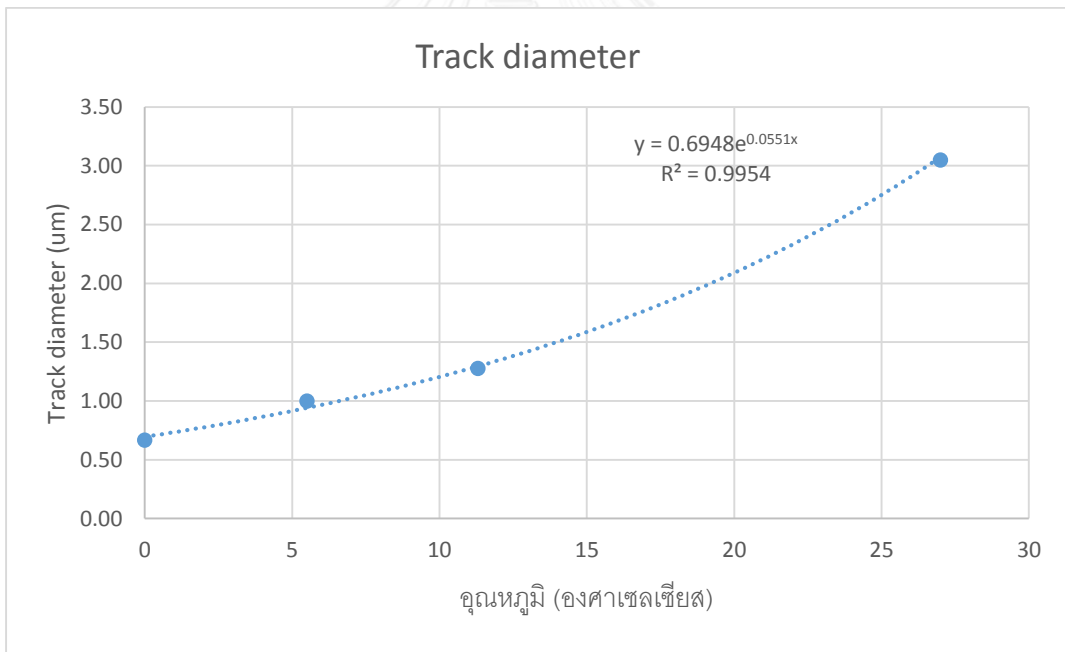
ตัวแปรควบคุม: แผ่นแก้วอบนิวตรอน 23 ชั่วโมง, ความเข้มข้นของกรด 5%w/w, เวลาล้างกัทรอย 4 นาที

แ ผ น ที่	อุณห ภูมิ (องศา เซล เซียส)	เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัทรอย (ไมโครเมตร)									ค่าเฉลี่ย ยเส้น ผ่าน ศูนย์กลาง กัทรอย (ไมโคร เมตร)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (% ของ ค่าที่ วัด)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.0	0.6	0.6	0.6	0.3	0.7	1	0.6	1.3	0.3	0.67	0.32	47.43
3	5.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	5.5	1.3	1.2	0.6	1.2	0.5	1.3	0.9	1	1	1.00	0.29	29.15
5	11.3	0.7	0.7	1	1	1.3	1.6	1.2	1.3	1.2	1.11	0.29	26.41
6	11.3	1.3	1.6	1	1.3	1.3	1.6	1.3	2	1.6	1.44	0.29	19.92
7	27.5	2.8	3.2	3	2.9	2.5	3.1	3.8	3.3	2.9	3.06	0.36	11.93
8	27.5	3	2.9	3.2	2.9	3.2	3	2.9	3.3	3	3.04	0.15	4.96

* ข้อมูลที่ปรากฏเป็น ซีด (-) ในตารางหมายถึงเป็นข้อมูลที่ไม่สามารถวัดด้วยโปรแกรม Motic Image Plus 2.0 ได้ หรืออาจพอมวัดได้แต่ข้อมูลที่ได้ไม่ดีเพียงพอ



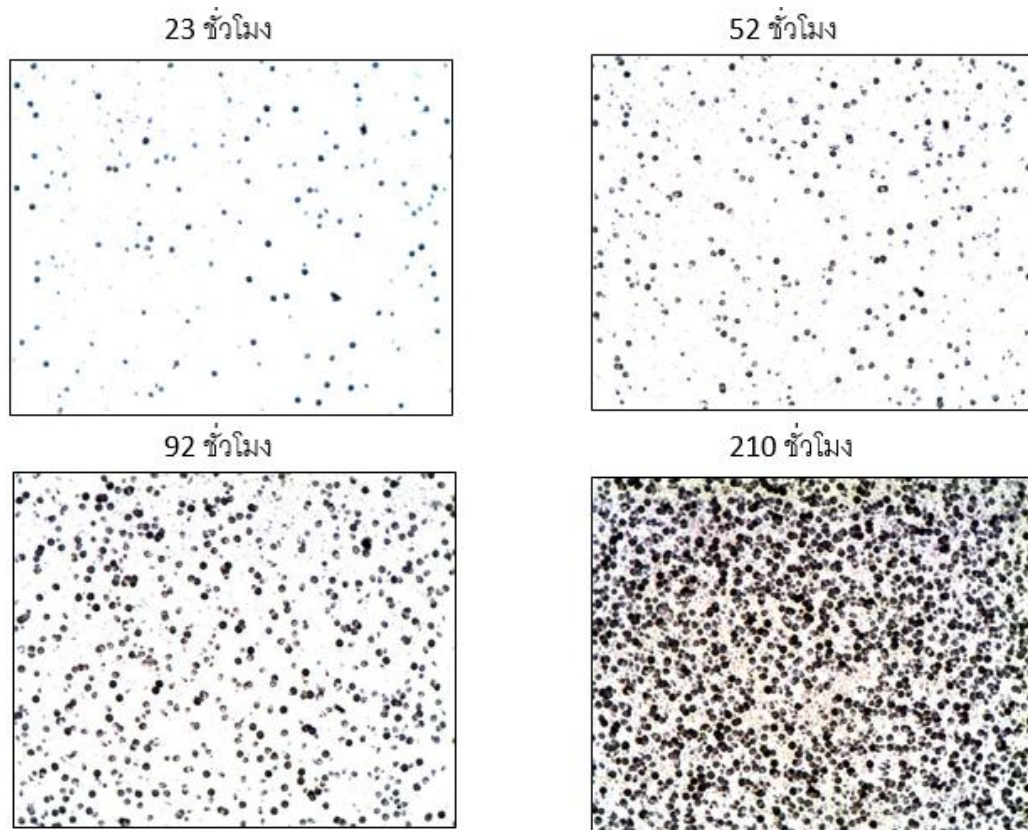
กราฟที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด (เฉลี่ยทั้งหมด) กับ อุณหภูมิแผ่นแก้วขณะล้างกัทรอยโดยใช้เส้นประมาณ (Trend line) เป็นสมการเชิงเส้น



กราฟที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด (เฉลี่ยทั้งหมด) กับ อุณหภูมิแผ่นแก้วขณะล้างกัทรอยโดยใช้เส้นประมาณ (Trend line) เป็นสมการเอ็กซ์โปเนนเชียล

4.2 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆที่อาจมีผลต่อความหนาแน่นของรอยกัด

4.2.1 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาอบรังสีกับความหนาแน่นของรอยกัด



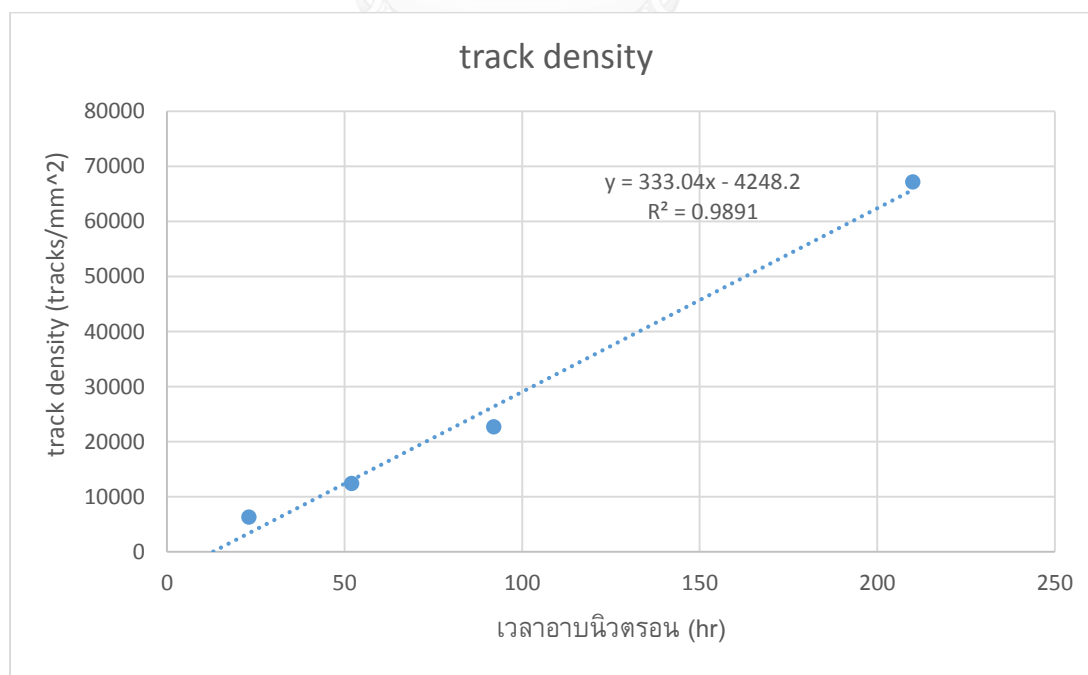
ภาพที่ 4.4 ภาพแสดงรอยกัดผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า ที่ระยะเวลาอบนิวตรอนต่างๆ

ตาราง 4.4 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาอบรังสีก่อนล้างกัตรอยกับความหนาแน่นของรอยกัตรหลังการล้างกัตรอย

ตัวแปรควบคุม: ความเข้มข้นของกรด 5%w/w, เวลาล้างกัตรอย 4 นาที, อุณหภูมิขณะล้างกัตรอย

27.5 องศาเซลเซียส

แผ่นที่	เวลาอบรังสี (ชั่วโมง)	จำนวนของรอยกัตรในพื้นที่						ความหนาแน่นรอยกัตร (รอยกัตรต่อตารางมิลลิเมตร)
		1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
1	23	207	179	216	246	226	214.8	6270
2	23	218	179	222	240	226	217.0	6335
3	52	486	414	423	324	382	405.8	486
4	52	593	442	439	410	341	445.0	593
5	92	733	720	896	795	712	771.2	733
6	92	827	709	787	795	796	782.8	827
7	210	2026	2348	2124	2270	2218	2197.2	2026
8	210	2312	2152	2498	2524	2534	2404.0	2312



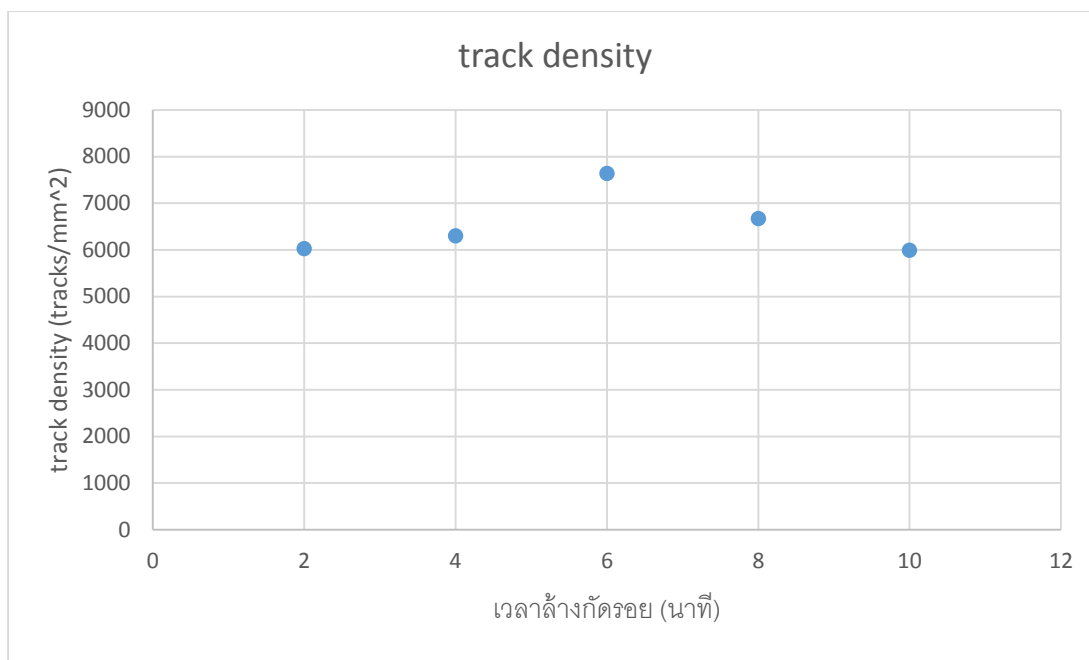
กราฟที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของรอยกัตร (เฉลี่ยทั้งหมด) กับระยะเวลาอบรังสีก่อนล้างกัตรอย

4.2.2 ความสัมพันธ์ของเวลาล้างกัตรอยกับความหนาแน่นของรอยกัด

ตาราง 4.5 ความสัมพันธ์ของเวลาล้างกัตรอยกับความหนาแน่นของรอยกัดหลังการล้างกัตรอย

ตัวแปรควบคุม: แผ่นแก้วอาบนิวตรอน 23 ชั่วโมง, ความเข้มข้นของกรด 5%w/w, อุณหภูมิขณะล้างกัตรอย 27.5 องศาเซลเซียส

แผ่น ที่	เวลาล้าง กัตรอย (นาที)	จำนวนของรอยกัดในพื้นที่						ความหนาแน่น รอยกัด (รอยกัด ต่อตาราง มิลลิเมตร)
		1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
1	2	224	265	190	121	154	190.8	5570
2	2	177	215	276	251	191	222.0	6481
3	4	207	179	216	246	226	214.8	6270
4	4	218	179	222	240	226	217.0	6335
5	6	258	274	297	213	270	262.4	7660
6	6	260	295	263	271	217	261.2	7625
7	8	260	261	172	176	184	210.6	6148
8	8	290	316	212	198	216	246.4	7193
9	10	123	196	228	167	155	173.8	5074
10	10	220	334	224	215	190	236.6	6907



กราฟที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของรอยกัด (เฉลี่ยทั้งหมด) กับระยะเวลาอบรังสีก่อนล้างกัทรอย

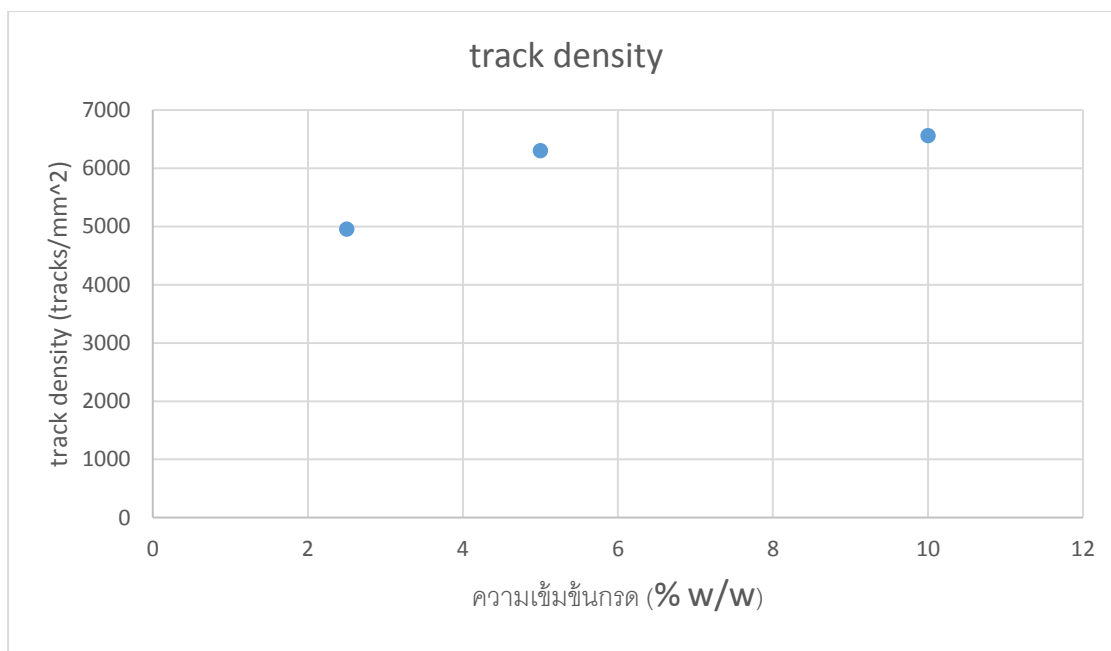
4.2.3 ความสัมพันธ์ของเวลาล้างกัทรอยกับความหนาแน่นของรอยกัด

ตาราง 4.6 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นกรดกับความหนาแน่นของรอยกัดหลังการล้างกัทรอย

ตัวแปรควบคุม: แผ่นแก้วอบนิวตรอน 23 ชั่วโมง, เวลาล้างกัทรอย 4 นาที, อุณหภูมิขณะล้างกัทรอย

27.5 องศาเซลเซียส

แผ่นที่	ความเข้มข้นของกรด (%)	จำนวนของรอยกัดในพื้นที่						ความหนาแน่นของรอยกัด (รอยกัดต่อตารางมิลลิเมตร)
		1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
1	2.5	221	94	250	160	163	177.6	5185
2	2.5	166	167	113	279	84	161.8	4723
3	5	207	179	216	246	226	214.8	6270
4	5	218	179	222	240	226	217.0	6335
5	10	296	220	164	212	197	217.8	6358
6	10	269	213	237	194	245	231.6	6761



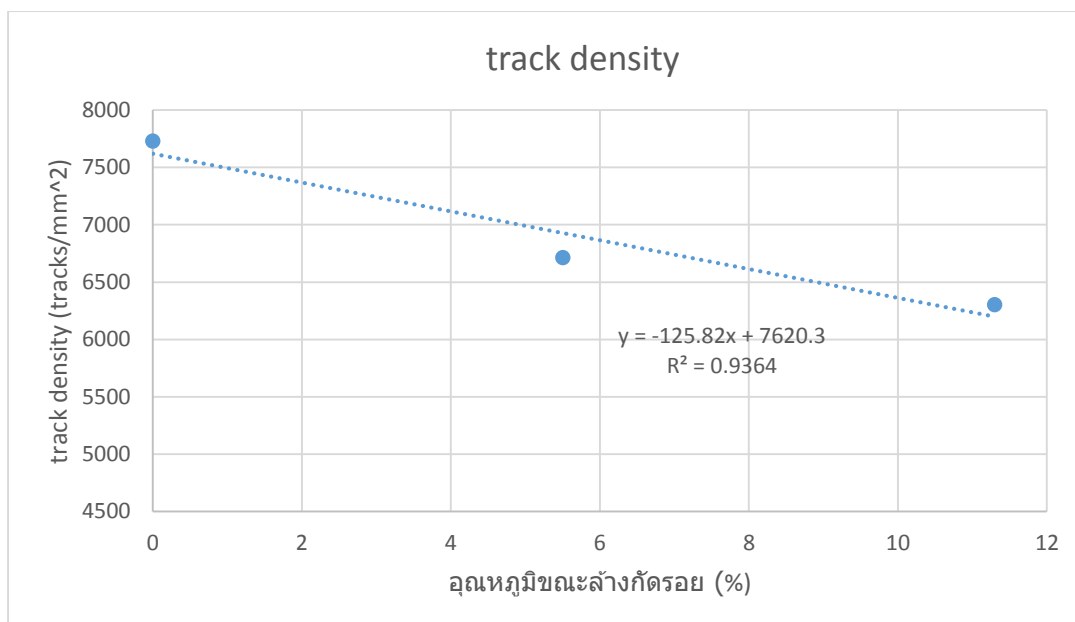
กราฟที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของรอยกัด (เฉลี่ยทั้งหมด) กับความเข้มข้นกรด

4.2.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิขณะล้างกัดรอยกับขนาดของรอยกัด

ตาราง 4.7 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิระหว่างล้างกัดรอยกับความหนาแน่นของรอยกัดหลังการล้างกัดรอย

ตัวแปรควบคุม: แผ่นแก้วอาบนิวตรอน 23 ชั่วโมง, ความเข้มข้นของกรด 5%w/w, เวลาล้างกัดรอย 4 นาที

แผ่นที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	จำนวนของรอยกัดในพื้นที่						ความหนาแน่นรอยกัด (รอยกัดต่อตารางมิลลิเมตร)
		1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
1	0.0	1123	718	1115	1507	1071	1106.8	32310
2	0.0	-	-	-	-	-	-	-
3	5.5	473	80	86	685		264.8	7730
4	5.5	-	-	-	-	-	-	-
5	11.3	258	254	210	249	250	244.2	7129
6	11.3	238	258	203	186	194	215.8	6300
7	27.5	207	179	216	246	226	214.8	6270
8	27.5	218	179	222	240	226	217.0	6335



กราฟที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของรอยกัด (เฉลี่ยทั้งหมด) กับอุณหภูมิละออง

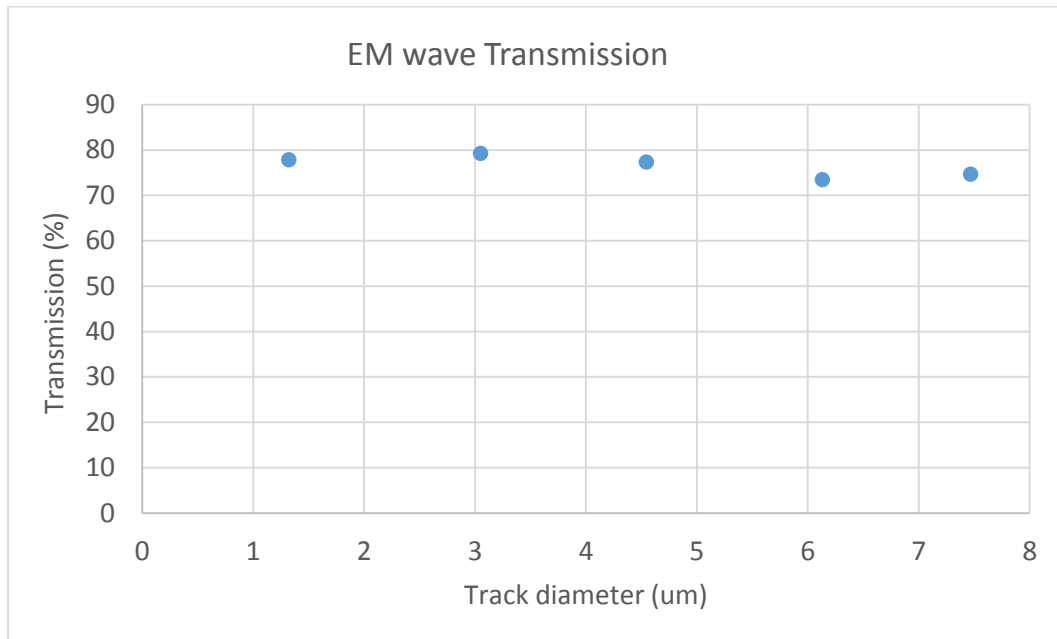
4.3 ผลการศึกษาการส่องผ่านและการกระเจิงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนแผ่นแก้วที่มีรอยกัด

4.3.1 ความสัมพันธ์ของการส่องผ่านแสงช่วงที่ตามองเห็นบนแผ่นแก้วที่มีรอยกัด

ตาราง 4.8 ความสัมพันธ์เส้นผ่านศูนย์กลางรอยกัดกับการส่องผ่านแสงที่ตามองเห็น

เส้นผ่านศูนย์กลางรอยกัด (ไมโครเมตร)	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน
1.32	77.9
3.05	79.3
4.54	77.4
6.13	73.5
7.47	74.7

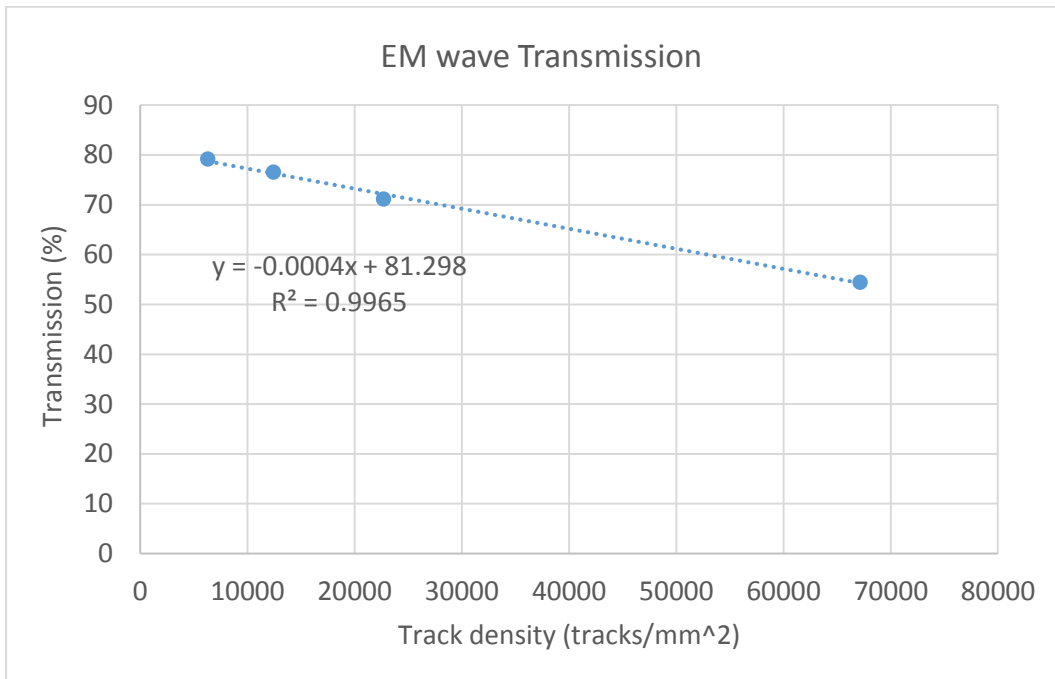
กราฟ 4.14 กราฟแสดงการส่งผ่านแสงช่วงที่ตามองเห็นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด



ตาราง 4.9 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นรอยกัดกับการส่งผ่านแสงที่ตามองเห็น

ความหนาแน่นของรอยกัด (รอย/ตาราง มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์การส่งผ่าน
6303	79.2
12418	76.6
22682	71.2
67160	54.5

กราฟที่ 4.15 กราฟแสดงการส่งผ่านแสงช่วงที่ตามองเห็นกับความหนาแน่นของรอยกัด

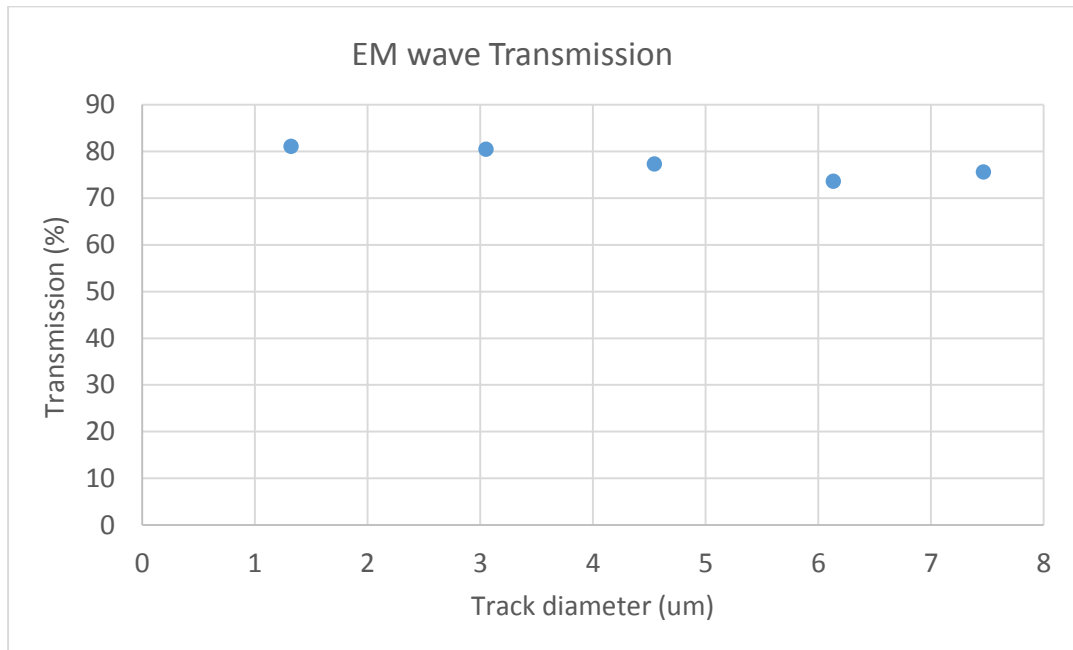


4.3.2 ความสัมพันธ์ของการส่งผ่านรังสีอินฟราเรดบนแผ่นแก้วที่มีรอยกัด

ตาราง 4.10 ความสัมพันธ์เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัดกับการส่งผ่านรังสีอินฟราเรด

เส้นผ่านศูนย์กลางรอยกัด (ไมโครเมตร)	เปอร์เซ็นต์การส่งผ่าน
1.32	81.1
3.05	80.5
4.54	77.3
6.13	73.6
7.47	75.6

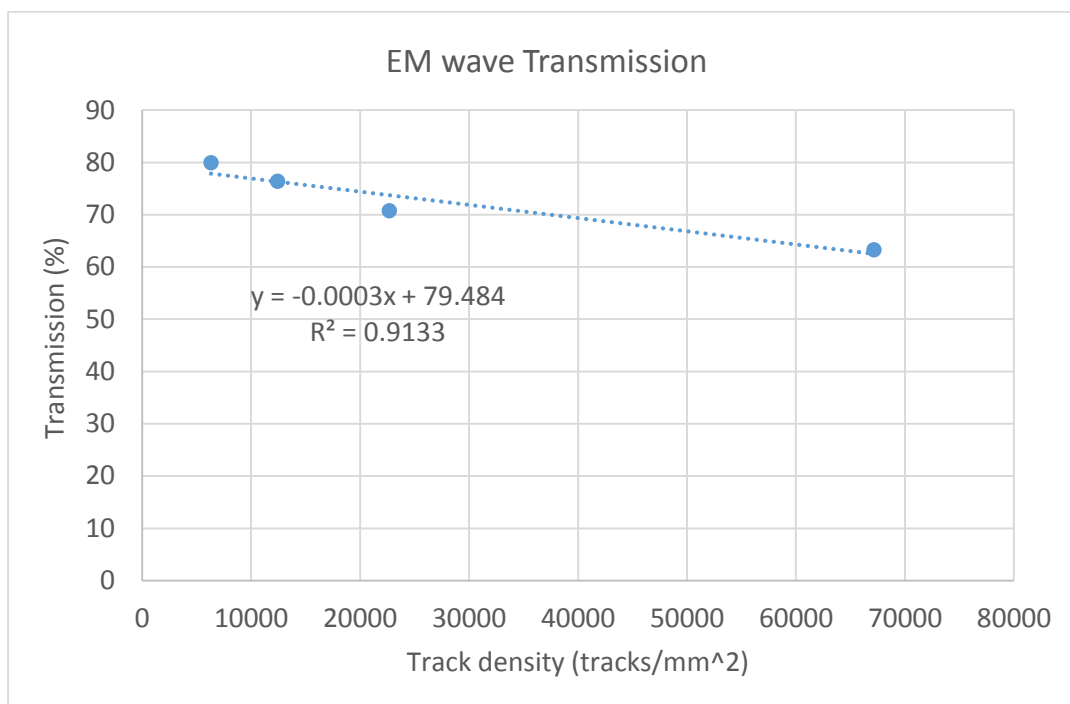
กราฟที่ 4.16 กราฟแสดงการส่งผ่านรังสีอินฟราเรดกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด



ตาราง 4.11 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นรอยกัดกับการส่งผ่านรังสีอินฟราเรด

ความหนาแน่นของรอยกัด (รอย/ตาราง มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์การส่งผ่าน
6303	80
12418	76.4
22682	70.8
67160	63.3

กราฟที่ 4.17 กราฟแสดงการส่งผ่านรังสีอินฟราเรดกับความหนาแน่นของรอยกัด

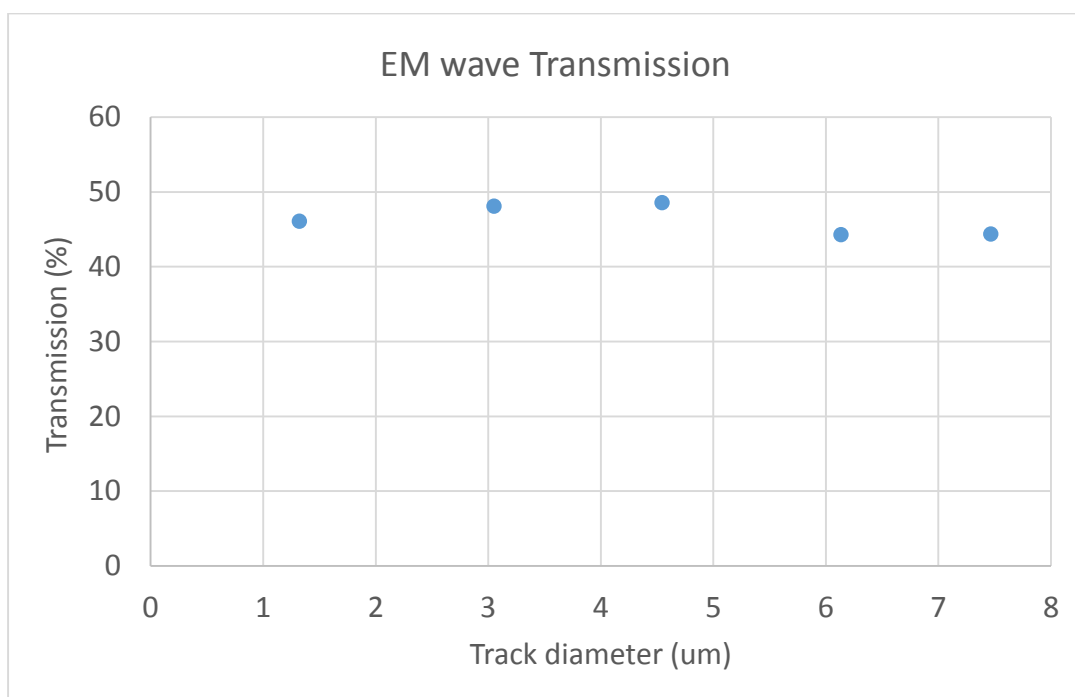


4.3.3 ความสัมพันธ์ของการส่งผ่านรังสีอัลตราไวโอเล็ตบนแผ่นแก้วที่มีรอยกัด

ตาราง 4.12 ความสัมพันธ์เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัดกับการอัลตราไวโอเล็ต

เส้นผ่านศูนย์กลางรอยกัด (ไมโครเมตร)	เปอร์เซ็นต์การส่งผ่าน
1.32	46.1
3.05	48.1
4.54	48.6
6.13	44.3
7.47	44.4

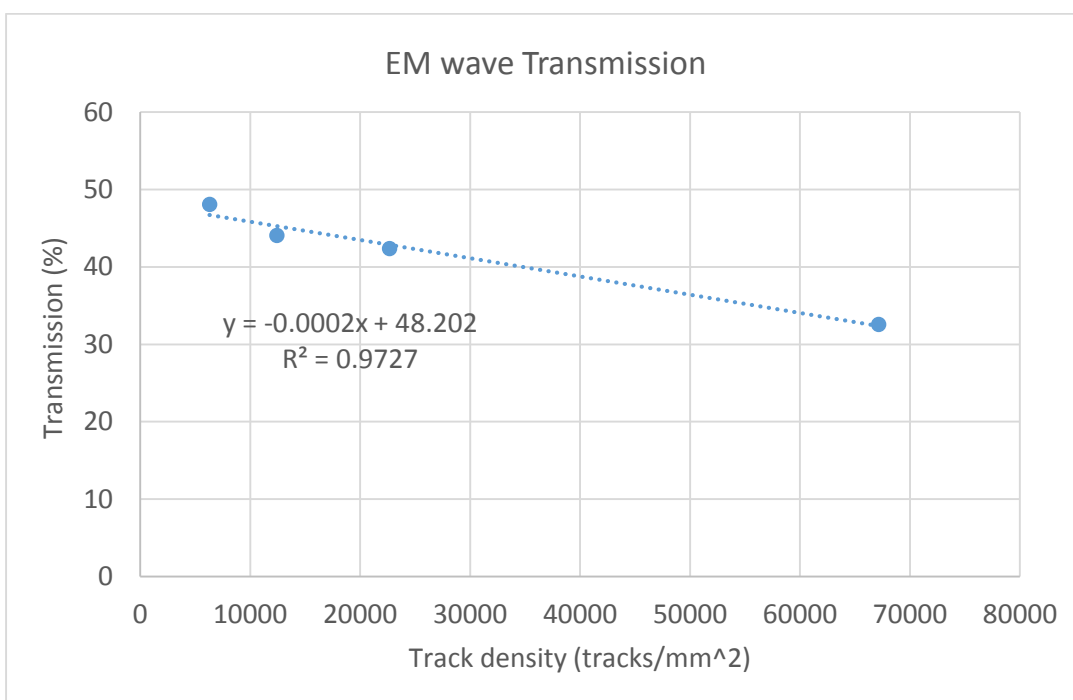
กราฟที่ 4.18 กราฟแสดงการส่งผ่านรังสีอัลตราไวโอเล็ตกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด



ตาราง 4.13 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นรอยกัดกับการส่งผ่านรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ความหนาแน่นของรอยกัด (รอย/ตาราง มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์การส่งผ่าน
6303	48.1
12418	44.1
22682	42.4
67160	32.6

กราฟที่ 4.19 กราฟแสดงการส่งผ่านรังสีอัลตราไวโอเล็ตกับความหนาแน่นของรอยกัด

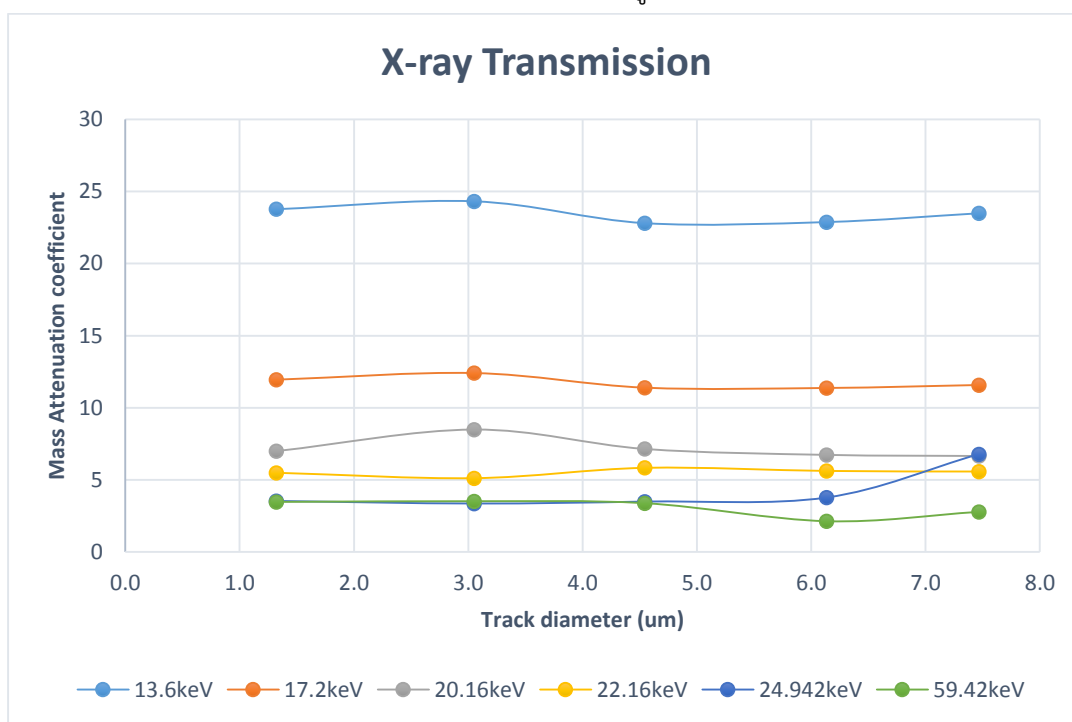


4.3.4 ความสัมพันธ์ของการส่งผ่านรังสีเอ็กซ์บนแผ่นแก้วที่มีรอยกัด

ตาราง 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mass attenuation coefficient กับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด

เส้นผ่านศูนย์กลางรอยกัด (ไมโครเมตร)	Mass attenuation coefficient ที่พลังงานต่างๆ				
	13.6keV	17.2keV	20.16keV	22.16keV	24.942keV
1.32	23.77	11.95	7.00	5.49	3.54
3.05	24.32	12.41	8.49	5.12	3.36
4.54	22.80	11.39	7.14	5.83	3.50
6.13	22.88	11.37	6.73	5.62	3.78
7.47	23.49	11.58	6.66	5.58	6.79

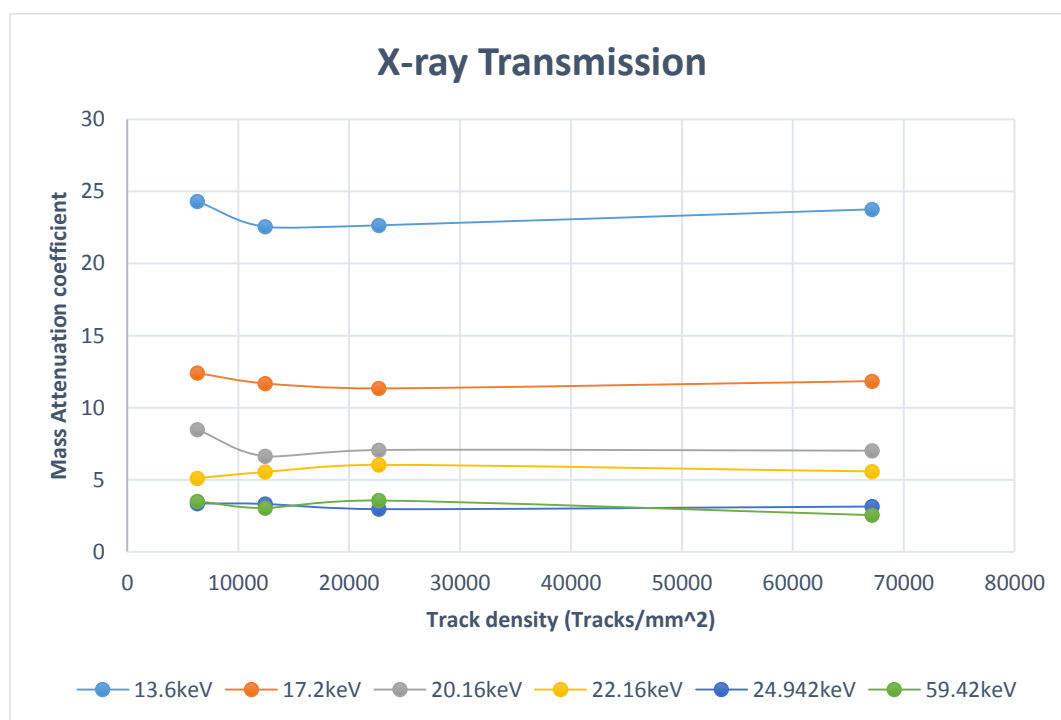
กราฟที่ 4.20 กราฟแสดงการส่งผ่านรังสีเอ็กซ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด



ตาราง 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mass attenuation coefficient กับความหนาแน่นของรอยกัด

ความหนาแน่น ของรอยกัด (รอย/ตาราง มิลลิเมตร)	พลังงานของรังสีเอ็กซ์				
	13.6keV	17.2keV	20.16keV	22.16keV	24.942keV
6303	24.32	12.41	8.49	5.12	3.36
12418	22.56	11.69	6.64	5.54	3.33
22682	22.65	11.34	7.07	6.04	2.97
67160	23.76	11.85	7.03	5.58	3.15

กราฟที่ 4.21 กราฟแสดงการส่งผ่านรังสีเอ็กซ์กับความหนาแน่นของรอยกัด

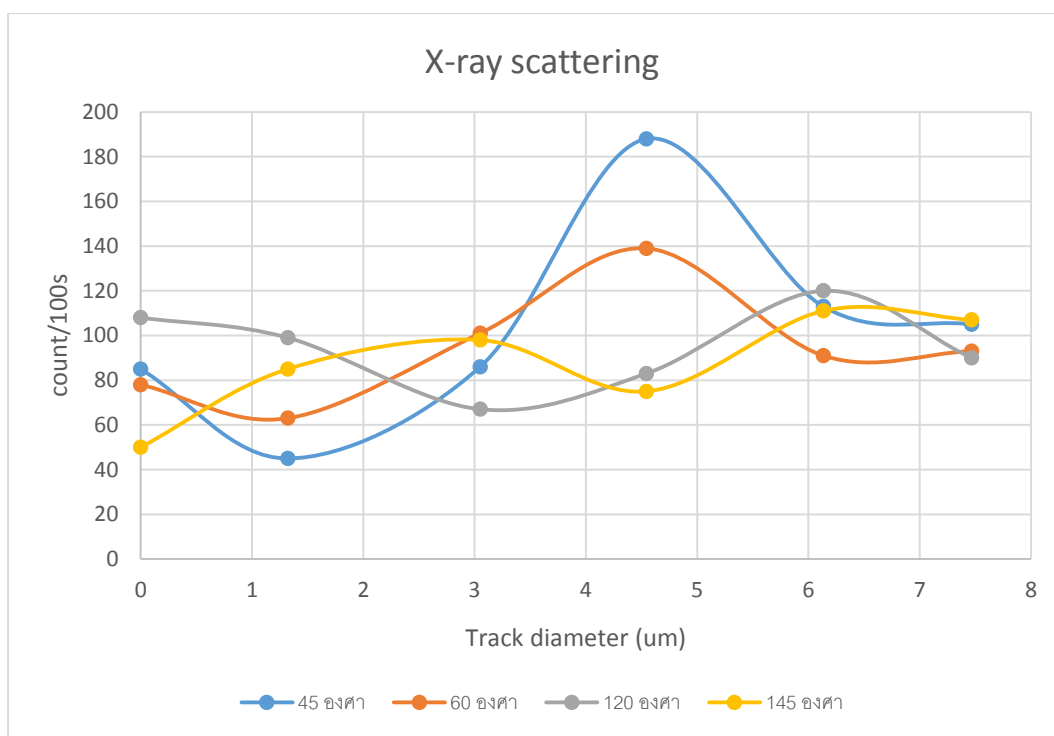


4.3.5 ความสัมพันธ์ของการส่งผ่านรังสีเอ็กซ์บนแผ่นแก้วที่มีรอยกัด

ตาราง 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดของรังสีเอ็กซ์ในมุมกระเจิงต่างๆต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด

เส้นผ่านศูนย์กลาง รอยกัด (ไมโครเมตร)	ค่าที่วัดได้ตามมุมกระเจิง (ต่อ 100 วินาที)			
	45	60	120	145
0	85	78	108	50
1.32	45	63	99	85
3.05	86	101	67	98
4.54	188	139	83	75
6.13	113	91	120	111
7.47	105	93	90	107

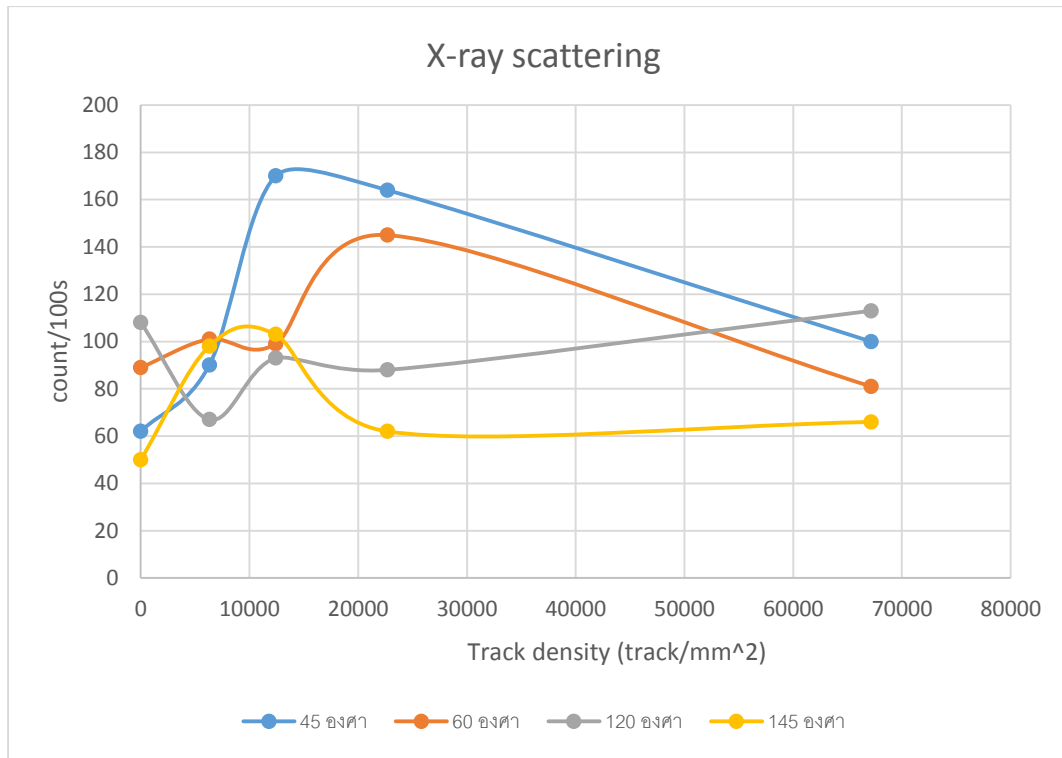
กราฟที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดของรังสีเอ็กซ์ในมุมกระเจิงต่างๆต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกัด



ตาราง 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดของรังสีเอ็กซ์ในมุมกระเจิงต่างๆต่อความหนาแน่นของรอยกัด

ความหนาแน่นของรอยกัด (รอย/ตารางมิลลิเมตร)	ค่าที่วัดได้ตามมุมกระเจิง (ต่อ 100 วินาที)			
	45	60	120	145
0	62	89	108	50
6303	90	101	67	98
12418	170	99	93	103
22682	164	145	88	62
67160	100	81	113	66

กราฟที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดของรังสีเอ็กซ์ในมุมกระเจิงต่างๆต่อความหนาแน่นของรอยกัด



บทที่ 5: สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการศึกษานิวเคลียร์แทรกในแผ่นแก้วออกเป็นสองส่วนได้แก่ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและความหนาแน่นของแทรก และผลของการส่งผ่าน-กระเจิงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางชนิดกับแผ่นแก้วที่มีนิวเคลียร์แทรก

5.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและความหนาแน่นของแทรก

- เส้นผ่านศูนย์กลางของแทรก

ทั้งสามปัจจัยที่ทำการทดลอง ได้แก่เวลาที่ใช้ในการล้างกัทรอย ความเข้มข้นของกรด และอุณหภูมิขณะล้างกัทรอยนั้นส่งผลต่อขนาดของแทรกอย่างชัดเจน โดยที่เวลาที่ใช้ในการล้างกัทรอยและความเข้มข้นของกรดแปรผันตรงเชิงเส้นกับขนาดของแทรก ส่วนอุณหภูมิ นั้นยังระบุได้ไม่แน่นอนว่าแปรผันตรงเป็นเชิงเส้น หรือเป็นสมการเอ็กซ์โปเนนเชียลเนื่องจาก จุดข้อมูลมีจำนวนน้อย จึงเห็นแนวโน้มของกราฟไม่ชัดเจนนัก

- ความหนาแน่นของแทรก

เมื่อเวลาที่ใช้ในการอบนิวตรอนเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของแทรกก็เพิ่มขึ้นใกล้เคียงเชิงเส้นมาก ตรงข้ามกับอุณหภูมิต่ำระหว่างล้างกัทรอยซึ่งมีแนวโน้มลดลงเป็นเชิงเส้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น การลดลงนี้อาจเกิดเพราะอัตราการทำปฏิกิริยาระหว่างกัทรอยกับแก้วและผิวแก้วจะรวดเร็วขึ้น ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แทรกบางส่วนที่ตื่นอาจลื่นไปกับผิวแก้วที่ถูกกัดไปด้วย

สำหรับเวลาในการล้างกัทรอยผลได้ที่ไม่สม่ำเสมอ โดยตลอดช่วงเวลาดังตั้ง 2-10 นาที ไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจน แต่แผ่นแก้วทั้งสองแผ่นที่วัดรวมถึงค่าเฉลี่ยได้ความหนาแน่นสูงสุดที่เวลา 6 นาทีเหมือนกัน จึงอาจพอสรุปได้ว่าที่เวลา 6 นาทีเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการขยายแทรกด้วยกระบวนการทางเคมีที่สุด หากใช้เวลาน้อยเกินไปแทรกบางส่วนอาจยังไม่ถูกกัดจนใหญ่พอจะเห็นได้ แต่หากใช้เวลามากเกินไป แทรกที่ตื่นอาจถูกกัดจนลื่นไปกับผิวแก้ว

ด้านความเข้มข้นของกรดกัทรอยนั้น เมื่อใช้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของแทรกก็เพิ่มขึ้นแต่ไม่ได้เพิ่มแบบเชิงเส้น ในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 2.5% ถึง 5% นั้น ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ในช่วงความเข้มข้นกรด 5% ถึง 10% ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย หากความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอีก ความหนาแน่นของแทรกอาจเข้าสู่จุด

อิมิตัว ค่าที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับสมการในรูปแบบ $y = 1 - a^{-x}$ โดย x คือตัวแปรตัว และ y คือตัวแปรตาม แต่เนื่องจากข้อมูลจุดมีจำนวนน้อย ทำให้หารูปแบบสมการที่ชัดเจนไม่ได้

5.1.2 การส่งผ่านและการกระเจิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นได้แก่ รังสีอินฟราเรด แสงช่วงที่ตามองเห็น รังสีอัลตราไวโอเล็ต และรังสีเอ็กซ์ โดยรังสีอินฟราเรด แสงช่วงที่ตามองเห็น และรังสีอัลตราไวโอเล็ตใช้อุปกรณ์เดียวกันในการทดลอง วัดเฉพาะการส่งผ่านเท่านั้น แสงทั้งสามช่วงไม่ได้ใช้สเปกตรัมที่เจาะจงค่า ส่วนรังสีเอ็กซ์เป็นสเปกตรัมเฉพาะค่าซึ่งมาจากการแผ่รังสีของอะตอม ทำการศึกษาทั้งการกระเจิงและการส่งผ่าน

- การส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นอินฟราเรด แสงช่วงที่ตามองเห็น และอัลตราไวโอเล็ต

จากการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของรอยกั๊ดมีผลต่อการส่งผ่านรังสีอินฟราเรด แสงช่วงที่ตามองเห็น และรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยเมื่อความหนาแน่นของรอยกั๊ดมากขึ้น การส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสามช่วงลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น

เมื่อใช้ความหนาแน่นของรอยกั๊ดเท่ากัน แต่เปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกั๊ดไป พบว่าการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสามช่วงไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกั๊ด

- การส่งผ่านและกระเจิงรังสีเอ็กซ์

จากการทดลองวัดการส่งผ่านของรังสีเอ็กซ์ในแผ่นแก้วที่มีรอยกั๊ด โดยใช้ค่า mass attenuation coefficient พบว่าค่าที่ได้ไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนต่อทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดของรอยกั๊ด ความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจนนี้อาจมีสาเหตุมาจากเวลาที่ใช้นับวัดรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงสั้นน้อยเกินไป ข้อมูลที่ได้จึงยังไม่ลู่เข้าค่าที่เหมาะสมในเชิงสถิติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของรอยกั๊ดบางส่วน ยังมีจำนวนข้อมูลน้อย ทำให้หาความสัมพันธ์ได้ยังไม่ชัดเจน เช่นความเข้มข้นของกรดกั๊ดแก้ว ซึ่งมีเพียงสามชุดข้อมูล
- สำหรับการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในส่วนของแสงช่วงที่ตามองเห็น รังสีอินฟราเรด และรังสีอัลตราไวโอเล็ต สามารถขยายการทดลองโดยใช้ความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเฉพาะค่า

- สามารถเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นแก้วและตัวตรวจวัดรังสี เพื่อดูการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะต่างๆได้

- สำหรับการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ สามารถเพิ่มการทดลองโดยปรับความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ให้หลากหลายได้ รวมไปถึงเพิ่มเวลาในการนับวัดจาก 100 วินาทีให้นานขึ้นอย่างน้อยคือ 5 นาทีขึ้นไป เพื่อให้ค่าที่ได้เหมาะสมในเชิงสถิติมากขึ้น



รายการอ้างอิง

1. P. B. Price. “Science and Technology with Nuclear Tracks in Solids”, Radiation Measurements, Vol. 40 (2005): pp. 146-159.
2. เสาวนีย์ อัครผาติบุญ. การพัฒนาฟิล์มกรองแสงจากพอลิเมอร์ที่เกิดรอยจากการเหนี่ยวนำด้วยนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุชฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
3. นเรศร์ จันทน์ขาว. การสำรวจจूरเนียมด้วยเทคนิคแทรคเอทซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2522.
4. Robert H.Brill, et al. “The Fission-Track Dating of Man-Made Glasses: Preliminary Results”, The Journal of Glass Studies, Vol. 6 (1964): pp. 151-155.
5. K. James and S.A. Durrani. “The Temperature Dependence of Heavy-Ion Track Registration in Crystals”, Nuclear Tracks and Radiation Measurements. **13**(1987): pp. 143-145.
6. S. Kansal, R. Mehra and N. P. Singh. Uranium Concentration in Ground Water Samples Belonging in Some Areas of Western Haryana, India Using Fission Track Registration Technique. Journal of Public Health and Epidemiology. Vol. 3(8), 2011: pp. 352-357.
7. ดีเซลล์ สนวนบุรี. การวิเคราะห์ไอโซโทปยูเรเนียม-235 จากรอยฟิสชันแฟรกเมนต์บนแผ่นไมลาร์เมื่ออาร์รังสีเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
8. นิวัฒน์ ตะโพนทอง. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทร็ก-เอตซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
9. วิเชียร รตนธงชัย. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากรเปลี่ยนนิวตรอนบีอี-10. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

10. P. Wanichapichart, T. Chittrakarn, W. Sujaritturakarn and Hans GL Coster.
Production of Track-Etched Membranes. Science Asia. Vol. 26 (2000): pp.175-179.
11. R. L. Fleischer, P. B. Price and R. M. Walker. Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications. University of California Press, California, 1975.
12. G. F. Knoll. Radiation Detecion and Measurement. 4th ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2010.
13. J. R. Lamarsh and A. J. Baratta. Introduction to Nuclear Engineering. 3rd ed., Prentice Hall, New Jersey, 2001.



รายการอ้างอิง





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การใช้งานโปรแกรม motic image plus2.0 เพื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของรอยกัด
โปรแกรม motic image plus 2.0 เป็นโปรแกรมสำหรับกล้องจุลทรรศน์ที่ถูกออกแบบมาเฉพาะสำหรับ
ภาพที่ส่องเห็นจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โปรแกรมสามารถรับข้อมูลจากทั้งเลนส์ใกล้ตาดิจิทัล
(digital eyepiece) และภาพนิ่ง

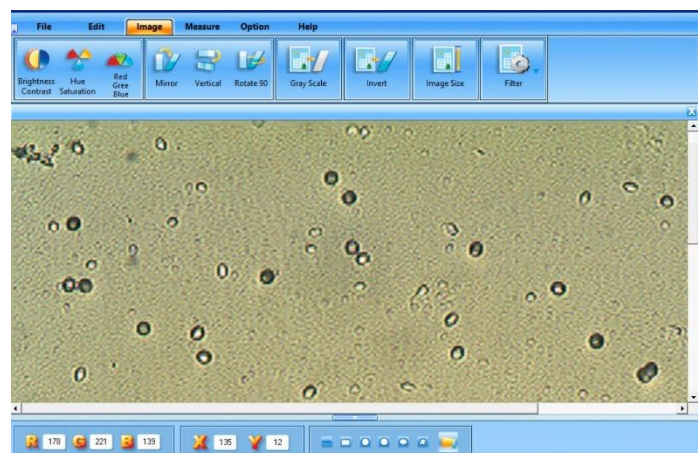


ภาพที่ 1 หน้าต่างโปรแกรม motic image plus 2.0

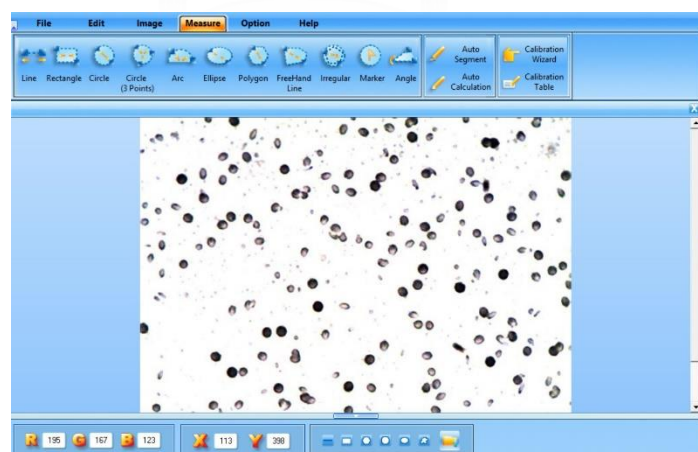
สำหรับการวัดข้อมูลเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นรอยกัดจากพีชชันแฟรกเมนต์ผ่านกล้อง
จุลทรรศน์มีขั้นตอนดังนี้

- นำกระจกสไลด์ที่ผ่านการล้างกักรอยแล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ ใช้กำลังขยาย 400 เท่า โดยต่อเลนส์ใกล้ตาดิจิทัลเข้ากับคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม motic image plus 2.0 ปรับโฟกัสและความเข้มแสงจากกล้องจุลทรรศน์ให้ภาพชัดเจน
- ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์หลังจากปรับโฟกัสและความเข้มแสงจะเป็นสีเหลืองตามสีของไฟที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์ สำหรับการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของรอยกัดแล้วถือว่ายังไม่เหมาะสม เพราะเมื่อใช้โปรแกรมนี้บอาจเกิดความผิดพลาดจากสีพื้นหลังและรอยกัดที่ใกล้เคียงกันได้ ก่อนการบันทึกภาพจึงต้องปรับภาพให้เห็นรอยกัดชัดเจนซึ่งอยู่ในหัวข้อ Image (ภาพที่ 2)
- เมื่อปรับภาพจนชัดเจนแล้วคลิกไปที่หัวข้อ Measure และคลิกในไอคอนย่อย Auto segment เพื่อให้โปรแกรมนับจำนวนรอยกัด โดยรอยกัดที่นับจะระบายเป็นสีเขียว (ภาพที่ 3-4) หากประเมินแล้วเห็นว่ารอยที่ระบายไม่ตรงกับรอยกัดที่เห็นด้วยตา ต้องกลับไปปรับภาพตามข้อ 2. ใหม่เพื่อให้โปรแกรมนับวัดจุดได้ดีขึ้น
- คลิกไปที่ Auto calculation โปรแกรมจะเรียกหน้าต่างข้อมูลขึ้นมา บันทึกความหนาแน่นรอยกัดจากหัวข้อ the number of Objects (ภาพที่ 5)

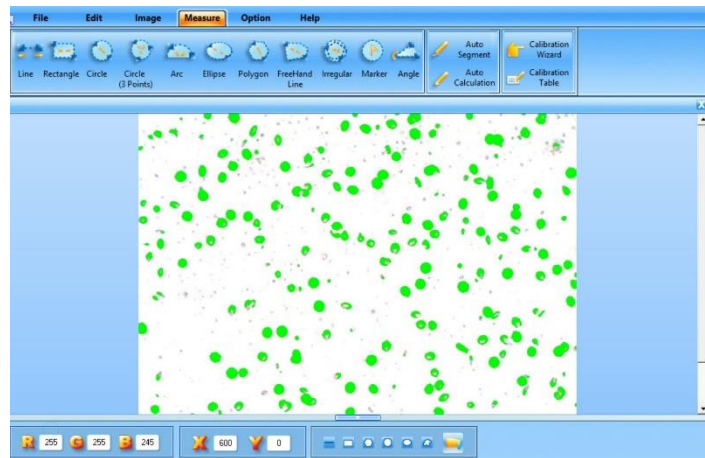
5. คลิกไปที่หัวข้อ Measure และคลิกในไอคอนย่อย Calibration table เพื่อดึงข้อมูลมาตราส่วนมาใช้ในการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ภาพที่ 3 และ 6) โดยมาตราส่วนนี้สามารถตั้งค่าและวัดได้โดยใช้สไลด์ Calibration ที่ให้มาพร้อมเลนส์ใกล้ตาดิจิทัล
6. ก่อนทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง คลิกไปที่ไอคอน Magnifier ด้านล่างของหน้าต่างโปรแกรม เพื่อเปิดหน้าต่างย่อยขยายภาพ (ภาพที่ 7)
7. คลิกที่ไอคอน Line จากนั้นลากเส้นผ่านรอยกั๊ดที่สนใจ โปรแกรมจะแสดงความยาวของเส้น (ภาพที่ 8) บันทึกผล



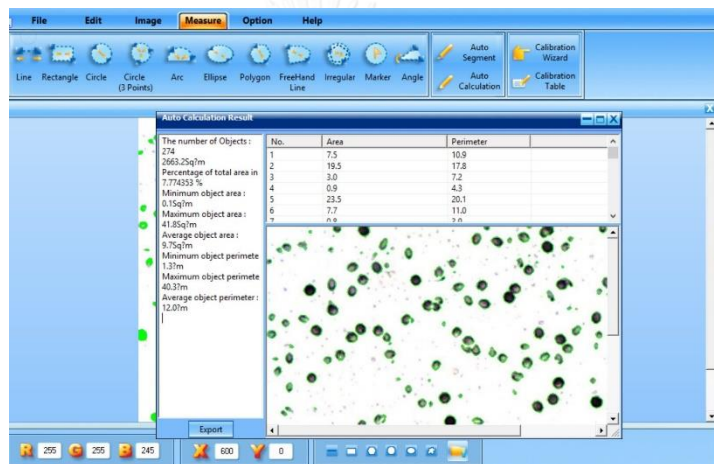
ภาพที่ 2



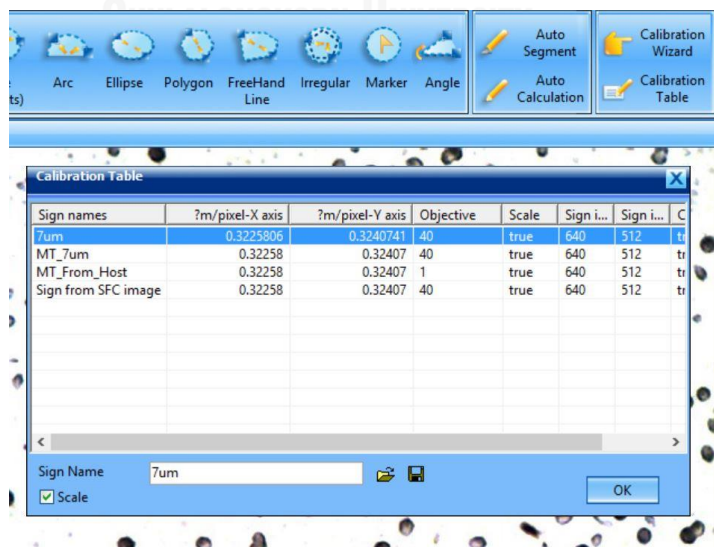
ภาพที่ 3



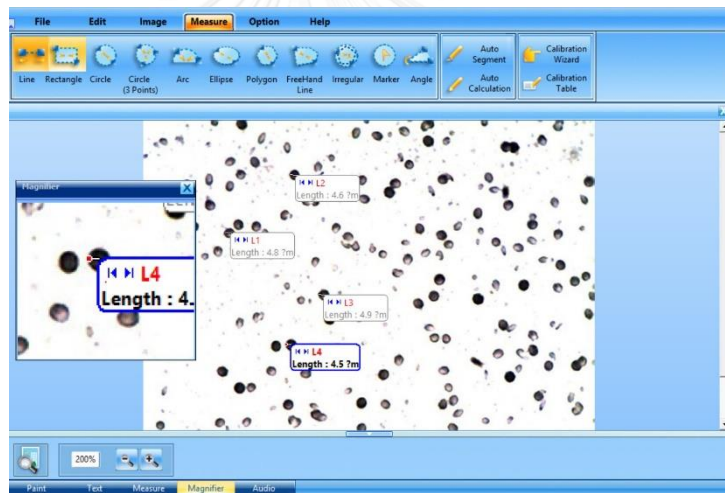
ภาพที่ 4



ภาพที่ 5



ภาพที่ 6



ภาพที่ 8

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายมารุตพงศ์ แสงเจริญถาวร เกิดเมื่อวันที่ 13 มกราคม พ.ศ. 2531 จังหวัดสมุทรสงคราม

สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต จาก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554



