หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

วิธีทำและผลการทดลอง

4.1 การสร้างอุปกรณ์หยุดลำอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมา (Beam stop)

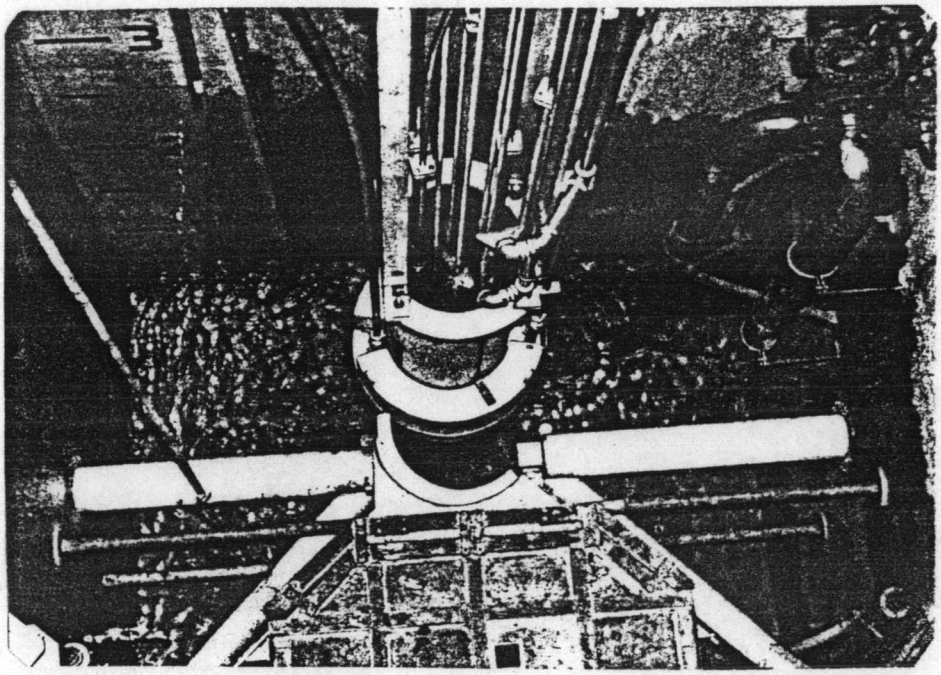
จากการศึกษาหาข้อมูลอย่างละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์อำนวยความสะดวกในการอาบรังสีของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเครื่องนี้ พบว่ามีตำแหน่งหลายตำแหน่งซึ่งสามารถนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ในงานถ่ายภาพด้วยนิวตรอน แต่ทั้งนี้ต้องได้รับการออกแบบที่ถูกต้อง เพื่อสะดวกในการปฏิบัติงาน และมีความปลอดภัยจากกัมมันตภาพ-รังสี ในการทดลองศึกษาครั้งนี้ได้เลือกท่ออาบรังสีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วอันล่าง (lower through tube 2 in.) ซึ่งเป็นท่อที่สัมผัสแกนเครื่องปฏิกรณ์ (tangent beam) โดยมีข้อดีดังนี้

4.1.1 จะเป็นการลดความแรงรังสีแกมมาที่ปล่อยออกมาจากแกนเครื่อง-ปฏิกรณ์ฯ

4.1.2 ท่ออาบรังสีท่อนี้อยู่สูงจากระดับพื้น 67 เซนติเมตร ซึ่งเหมาะแก่การปฏิบัติงานในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน และในการสร้างอุปกรณ์หยุดลำนิวตรอนและรังสีแกมมา

4.1.3 จากการคำนวณหาความเข้มของนิวตรอนที่จุดจะใช้งานในการถ่าย-ภาพพบว่ามีความเข้มนิวตรอน 2.52×10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์ทำงานอยู่ที่กำลัง 1000 กิโลวัตต์

จะเห็นว่าจากเหตุผลข้างบนนี้ท่ออาบรังสีท่อนี้น่าจะใช้เป็นท่อสำหรับการถ่าย-ภาพด้วยนิวตรอนได้ ดูรูป 4.1

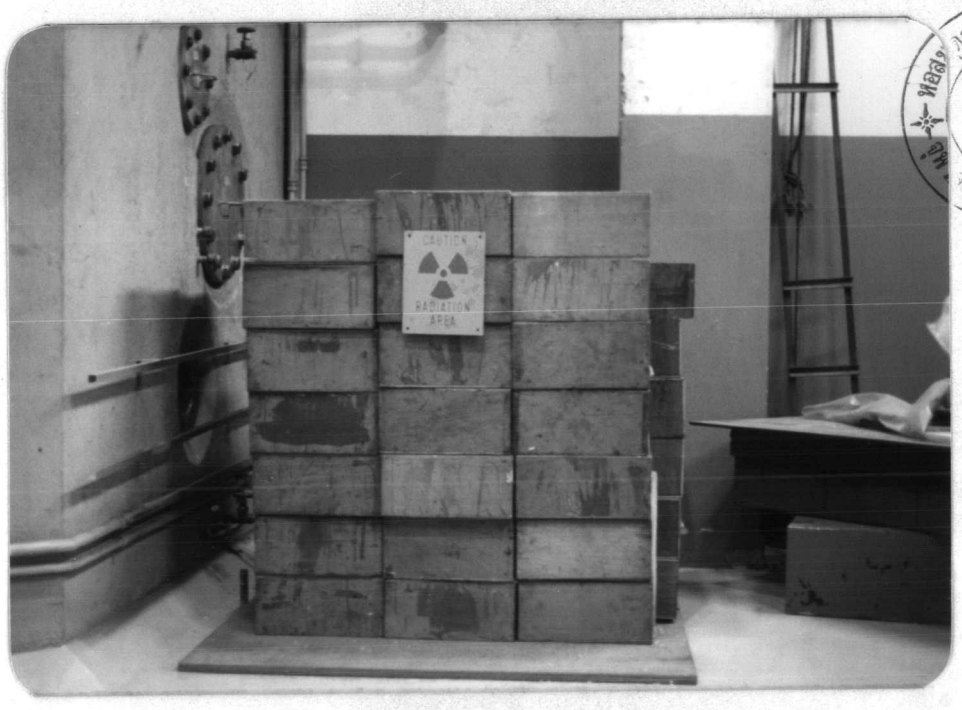


รูปที่ 4.1 แกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เครื่องอำนวยความสะดวกในการอาบรังสี และท่อที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

ปกติท่ออาบรังสีท่อนี้จะมีท่อตันซึ่งทำด้วยเหล็กหุ้มด้วยแคดเมียม ซึ่งเรียกว่า plug อุดไว้เพื่อไม่ให้นิวตรอนและรังสีแกมมาทะลุออกมาเกินปริมาณที่จะเป็นอันตรายได้ขณะที่เดินเครื่องปฏิกรณ์ฯ ฉะนั้นเมื่อจะดึง plug อันนี้ออกเพื่อให้นิวตรอนวิ่งออกมาตามท่อจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการที่จะสร้างอุปกรณ์หยุดลำนิวตรอนและรังสีแกมมา

จากการค้นคว้าจากเอกสารประกอบและคำนวณแบบคร่าว ๆ จึงได้ออกแบบสร้างอุปกรณ์หยุดลำนิวตรอนและรังสีแกมมาในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์ฯทำงานที่กำลัง 1000 กิโลวัตต์ ดูรูปที่ 4.2 โดยสร้างอุปกรณ์นี้ให้ห่างจากปากท่อ 30 เซนติเมตร นำตะกั่วแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 4 x 8 x 2 นิ้ว มาวางเรียงกันโดยให้มีความหนา 20 เซนติเมตร จากนั้นวางตะกั่วให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมข้างในกลวงมีขนาด 30 x 30 เซนติเมตร โดยให้ด้านอีก 4 ด้าน มีความหนา 10 เซนติเมตร ทั้งนี้ต้องจัดให้ลำของนิวตรอนและรังสีแกมมาวิ่งเข้าไปในช่องสี่เหลี่ยมกลวงนี้ให้ได้ ส่วนความหนา 10 เซนติเมตร นั้น ก็กันไม่ให้รังสีแกมมากระเจิง (scattered radiation) ทะลุออกมา ต่อไปนำพาราฟิน (paraffin)

ซึ่งผสมกับบอแรกซ์ทำเป็นก้อนสี่เหลี่ยมขนาด 15 x 30 x 15 เซนติเมตร มาวางล้อมรอบตะกั่วโดยให้มีความหนา 45 เซนติเมตร ซึ่งคาดว่าความหนาขนาดนี้ก็พอจะกั้นพวกนิวตรอนได้ การจัดรูปตะกั่วและพาราฟิน ในการประกอบอุปกรณ์นี้ต้องพยายามวางเรียงอย่าให้มีช่องของรอยต่อเป็นรอยเดียวกัน ควรวางสลับรอยต่อ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้นิวตรอนและรังสีแกมมาทะลุออกมาตามรอยต่อได้ เมื่อได้ออกแบบสร้างอุปกรณ์หยุดลำนิวตรอนได้แล้วขั้นต่อไปก็ถึง **plug** ออกจากท่ออาบรังสีนี้ แล้วก็ทำการสร้างประกอบอุปกรณ์หยุดลำนิวตรอนและรังสีแกมมา เมื่อสร้างเสร็จแล้วทำการเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯที่กำลัง 100; 200, 500 และ 1000 กิโลวัตต์ ทั้งนี้เพื่อวัดหาความแรงของรังสีแกมมาและนิวตรอนที่รอบ ๆ อุปกรณ์หยุดลำนิวตรอนและรังสีแกมมานี้พบว่าเมื่อเดินเครื่องปฏิกรณ์ฯที่กำลัง 1000 กิโลวัตต์ ที่บริเวณรอบ ๆ อุปกรณ์ฯนี้จะมีความแรงรังสีแกมมา 2.5 มิลลิเรินท์เก้นต่อชั่วโมง และนิวตรอน 1 มิลลิเรมต่อชั่วโมง ส่วนที่ปากท่อซึ่งเป็นจุดที่จะใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนนั้นอัตราความแรงรังสีแกมมา 20 เรินท์เก้นต่อชั่วโมง



หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

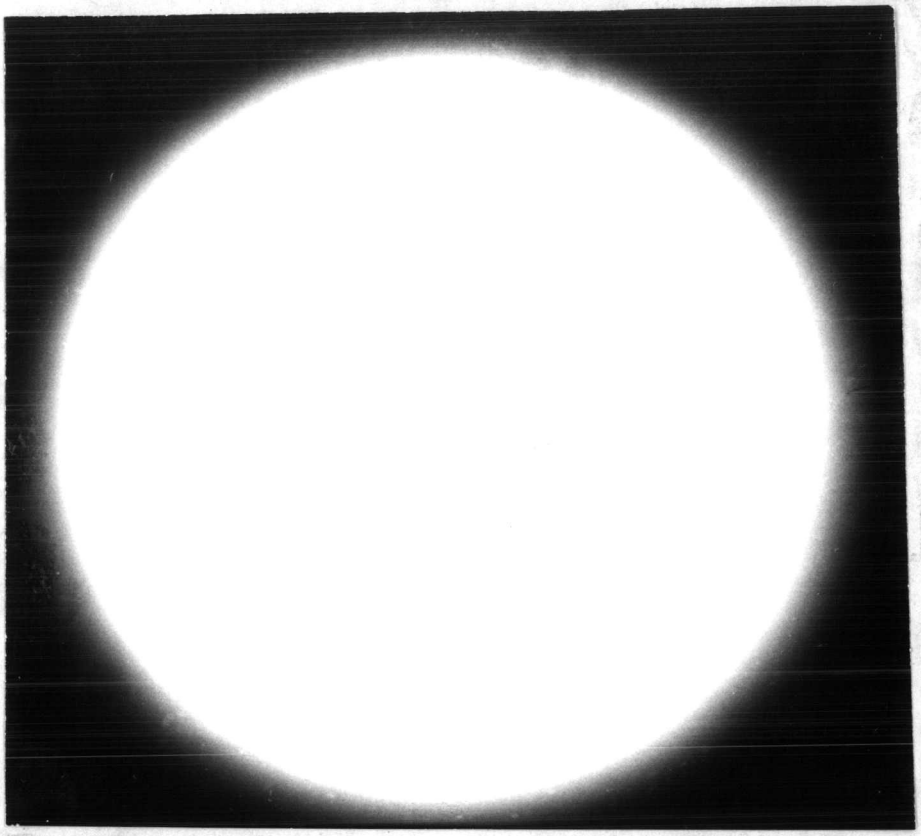
รูปที่ 4.2 อุปกรณ์หยุดลำนิวตรอนและรังสีแกมมา

4.2 ทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

ที่บริเวณปากท่ออาบรังสีซึ่งจะใช้ทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีเครื่องมือสำหรับทำให้สารตัวอย่างที่จะทำการตรวจสอบภายใน และตลับอลูมินัมที่แสงเข้าไม่ได้ (Light tight Aluminum Cassette) ซึ่งเป็นตัวบรรจุฟิล์มไปวางขวางลำของนิวตรอน ในการออกแบบสร้างอันนี้ใช้วิธีง่าย ๆ และสะดวกมาก เนื่องจากของอลูมิเนียมที่แสงผ่านไม่ได้นี้มีขนาด 8 x 10 นิ้ว และมีความหนา ½ นิ้ว ดังนั้นจึงใช้รางอลูมิเนียมรูปตัวยูที่มีความกว้างของรางมากกว่าความหนาของของอลูมิเนียมเล็กน้อยเพื่อให้มันเลื่อนไปมาในรางได้สะดวกนั่นคือขนาด $^{5}/_{8}$ นิ้ว ยาว 2.50 เมตร จำนวน 2 อัน นำมายึดติดกับผนังของบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯ โดยให้รางนี้ห่างจากผนังของบ่อ 6 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อให้มีเนื้อที่สำหรับวางสารตัวอย่างที่จะนำมาถ่ายตรวจสอบ ส่วนการนำสารตัวอย่างและตลับอลูมินัมให้ไปอยู่ในตำแหน่งที่มีลำของนิวตรอนพุ่งออกมาก็กระทำได้โดยใช้ไม้ยาว ๆ ทำเป็นตะขอซึ่งใช้ผลักและเกี่ยว ซึ่งจะเห็นว่าวิธีนี้สะดวกและมีความปลอดภัยจากการที่จะได้รับรังสี

4.3 ทำการทดสอบหาความโตและแนวของลำนิวตรอน

จุดประสงค์ทั้งนี้เพราะแผ่นเพิ่มความเข้มนิวตรอนที่จะนำมาใช้ในงานถ่ายภาพด้วยนิวตรอนมีหลายขนาด จึงจำเป็นอย่างยิ่งจะต้องหาความโตของลำนิวตรอนให้ได้ และถ้าพบแล้วจะได้ทำจุดหยุด คือ สามารถผลักตลับอลูมินัมที่แสงเข้าไม่ได้ไปอยู่ตรงจุดนั้น นอกจากนี้ความโตของลำนิวตรอนก็จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบทั้งนี้เพื่อจะได้นำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เพราะบางครั้งสารที่จะนำมาตรวจสอบด้วยวิธีนี้ถ้ามีขนาดใหญ่กว่าลำของนิวตรอนก็ต้องใช้ถ่ายเป็นส่วน ๆ แล้วถึงนำภาพมาติดต่อกัน การตรวจสอบลำของนิวตรอนนี้กระทำได้ดังนี้คือใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียม (Cadmium) ประกบเข้ากับแผ่นฟิล์ม Kodak Industrex AA แล้วนำไปบรรจุอยู่ในตลับอลูมินัมที่แสงเข้าไม่ได้ แล้วนำไปอาบลำนิวตรอนใช้เวลาประมาณ 3 นาที ซึ่งคาดว่าจะเห็นความโตของลำนิวตรอนได้ จากนั้นนำแผ่นฟิล์มไปล้างโดยขบวนการล้างฟิล์ม จะพบว่าลำของนิวตรอนตรงจุดที่ใช้ถ่ายภาพมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ซึ่งพอที่จะใช้ถ่ายตรวจสอบโครงสร้างภายในของสารตัวอย่างบางชนิดได้ ดูรูปที่ 4.3 การนำแผ่นฟิล์มบรรจุในตลับอลูมินัมที่แสงผ่านไม่ได้นี้ต้องกระทำในห้องมืด (Dark Room)



รูปที่ 4.3 แสดงถึงความกว้างของลำเทอร์มัลนิวตรอนที่ใช้ในงานถ่ายภาพ

4.4 ทำการวัดหาอัตราส่วนแคดเมียม (Cadmium ratio)

จุดประสงค์เพื่อต้องการทราบว่าที่ตำแหน่งที่จะใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนนี้มีความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) และนิวตรอนเร็ว (fast neutron) อยู่เท่าไร การทดลองกระทำดังนี้คือ

ใช้แผ่นทอง 2 แผ่น ซึ่งบางพอสมควรทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการกำบังตัวเอง (self shielding) แผ่นทองทั้งสองแผ่นนี้มีขนาด 1 ตารางเซนติเมตร นำไปชั่งด้วยเครื่องชั่งอย่างละเอียด และแต่ละแผ่นมีน้ำหนักดังนี้ 0.04188 กรัม และ 0.04231 กรัม ตามลำดับ แผ่นที่มีน้ำหนักมากกว่าหุ้มด้วยแผ่นแคดเมียม จากนั้นนำแผ่นทองทั้งสองนี้ไปอาบนิวตรอนตรงจุดที่จะใช้ถ่ายภาพ โดยให้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูทำงานอยู่ที่กำลัง 1000 กิโลวัตต์ เวลาในการอาบนิวตรอนประมาณ 5 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดรังสีด้วยเครื่องมัลติแชนแนล อะนาไลเซอร์ แบบ 5048 ช่อง พร้อมทั้งใช้ร่วมกับหัววัด NaI (Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 นิ้ว จากนั้น

ทำการคำนวณดังบทที่ 5 ซึ่งจะให้ความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอนมีค่าเท่ากับ 2.91×10^6 นิวตรอน ต่อตารางเซนติเมตร-วินาที และค่าอัตราส่วนแคดเมียมประมาณ 4.00

จะเห็นว่าค่าความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอนที่ได้จากการวัดโดยใช้ทองมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณโดยวิธีประมาณ

4.5 ทำการทดสอบหาอัตราส่วนของเทอร์มัลนิวตรอนต่อรังสีแกมมา

จุดประสงค์เพื่อต้องการทราบว่ามีอัตราส่วนเกินขีดกำหนดหรือไม่ ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน อัตราส่วนนี้ต้องไม่น้อยกว่า 10^5 นิวตรอน ต่อตารางเซนติเมตร-มิลลิเรินท์เก้น เพราะถ้าอัตราส่วนน้อยกว่านี้ แสดงว่ามีรังสีแกมมาปนมากับลำของนิวตรอนมาก ซึ่งจะมีผลไปทำให้ฟิล์มดำ ทำให้ภาพที่ถ่ายไม่ชัด และจะตรวจสอบข้อบกพร่องภายในสารตัวอย่างได้ไม่แน่นอน แต่ในกรณีนี้ผลการตรวจสอบมีค่า 5.24×10^5 นิวตรอน ต่อตารางเซนติเมตร-มิลลิเรินท์เก้น ซึ่งคาดว่าลำนิวตรอนนี้น่าจะใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนได้

4.6 ศึกษาและทำการทดลองถ่ายภาพด้วยเทอร์มัลนิวตรอนโดยวิธีทางตรง (direct technique)

จุดประสงค์เพื่อต้องการทราบว่าเมื่อใช้แผ่นเพิ่มความเข้มต่าง ๆ และนำไปอาบเทอร์มัลนิวตรอน โดยใช้เวลาในการอาบต่าง ๆ กัน จะทำให้ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม (film density) มีผลเป็นอย่างไร ทั้งนี้เพื่อจะได้เป็นข้อมูลในการทำเส้นเทียบปรับระหว่างเวลาในการอาบรังสีกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม หรือ เส้นเทียบปรับระหว่างจำนวนเทอร์มัลนิวตรอน ต่อตารางเซนติเมตร กับ ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

4.6.1 แผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียม

แผ่นเพิ่มความเข้มที่ใช้ในการทดลองนี้มีขนาด 2½ x 4 นิ้ว และมีความหนา 0.001 นิ้ว ส่วนฟิล์มที่ใช้คือ Kodak Industrex AA การทดลองทำดังนี้ใช้แผ่นฟิล์มประกบเข้าหน้าหลังกับแผ่นเพิ่มความเข้มและนำไปใส่ไว้ในตลับอลูมินัมที่แสงผ่านไม่ได้ เสร็จแล้วนำไปอาบรังสีเทอร์มัลนิวตรอนที่ตำแหน่งจะใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้เวลาในการอาบรังสี 100 วินาที จากนั้นใช้ไม้ตะขอดึงเอาตลับอลูมินัมนี้ออกจากตำแหน่งที่ใช้ถ่ายภาพ ทำการวัดอัตราความแรงของ

รังสีที่ตลับนี้ พบว่ามีค่า 5 มิลลิเรินท์เก้นต่อชั่วโมง โดยวัดที่ทำแหน่งติดกับตลับ จากนั้นนำตลับนี้ไปในห้องมืด ทำการถอดฟิล์มออกจากตลับนี้และทำเครื่องหมายไว้ที่แผ่นฟิล์มว่าแผ่นไหนวางอยู่หน้าแผ่นเพิ่มความเข้ม แผ่นไหนวางอยู่ข้างหลัง การทดลองต่อไปก็กระทำแบบเดียวกับวิธีแรกเพียงแต่ระยะเวลาในการอาบรังสีเปลี่ยนไปเป็น 150 วินาที และก็ทำการวัดอัตราของรังสีแกมมาได้ 8 มิลลิเรินท์เก้น ต่อชั่วโมง ต่อไปก็ทำแบบเดียวกันอีกแต่ใช้เวลาในการอาบรังสี 200 วินาที วัดรังสีแกมมาได้ 8.5 มิลลิเรินท์เก้นต่อชั่วโมง ต่อไปก็ทำแบบเดียวกันแต่เวลาเป็น 250 วินาที วัดรังสีแกมมาได้ 9.0 มิลลิเรินท์เก้นต่อชั่วโมง การทดลองทุกครั้งต้องตรวจสอบความแรงของรังสีแกมมา เพราะเกี่ยวกับความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน จากการทดลองทั้ง 4 ครั้งจะได้ฟิล์ม 8 ฟิล์ม ซึ่ง 4 ฟิล์มจะเป็นฟิล์มที่วางอยู่หน้าแผ่นเพิ่มความเข้ม ส่วนอีก 4 ฟิล์ม เป็นแผ่นฟิล์มที่วางอยู่หลังแผ่นเพิ่มความเข้ม ขั้นต่อไปนำแผ่นฟิล์มทั้ง 8 แผ่นนี้ไปล้างฟิล์มในขบวนการล้างฟิล์ม และต้องทำการล้างฟิล์มพร้อม ๆ กัน ทั้งนี้เพื่อจะได้ไม่มีข้อผิดพลาดในเรื่องเวลาและอุณหภูมิของขบวนการล้างฟิล์ม

เมื่อผ่านขบวนการล้างฟิล์มแล้ว แผ่นฟิล์มจะแห้งสนิท ดังนั้นนำแผ่นฟิล์มทั้งหมดนี้ไปวัดหาความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม โดยใช้เครื่องมือวัดซึ่งเรียกว่า Densitometer ในการวัดหาความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มต้องวัดหลาย ๆ จุดบนแผ่นฟิล์มทั้งนี้เพื่อจะได้ค่าเฉลี่ยที่ถูกต้องใกล้เคียงความจริงมากที่สุด ผลการทดลองได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม (film density)

เวลา (วินาที)	ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม	
	แผ่นฟิล์มที่อยู่หลังแผ่นเพิ่มความเข้ม	แผ่นฟิล์มที่อยู่หน้าแผ่นเพิ่มความเข้ม
100	1.20	1.45
150	1.64	1.94
200	2.02	2.46
250	2.45	2.94

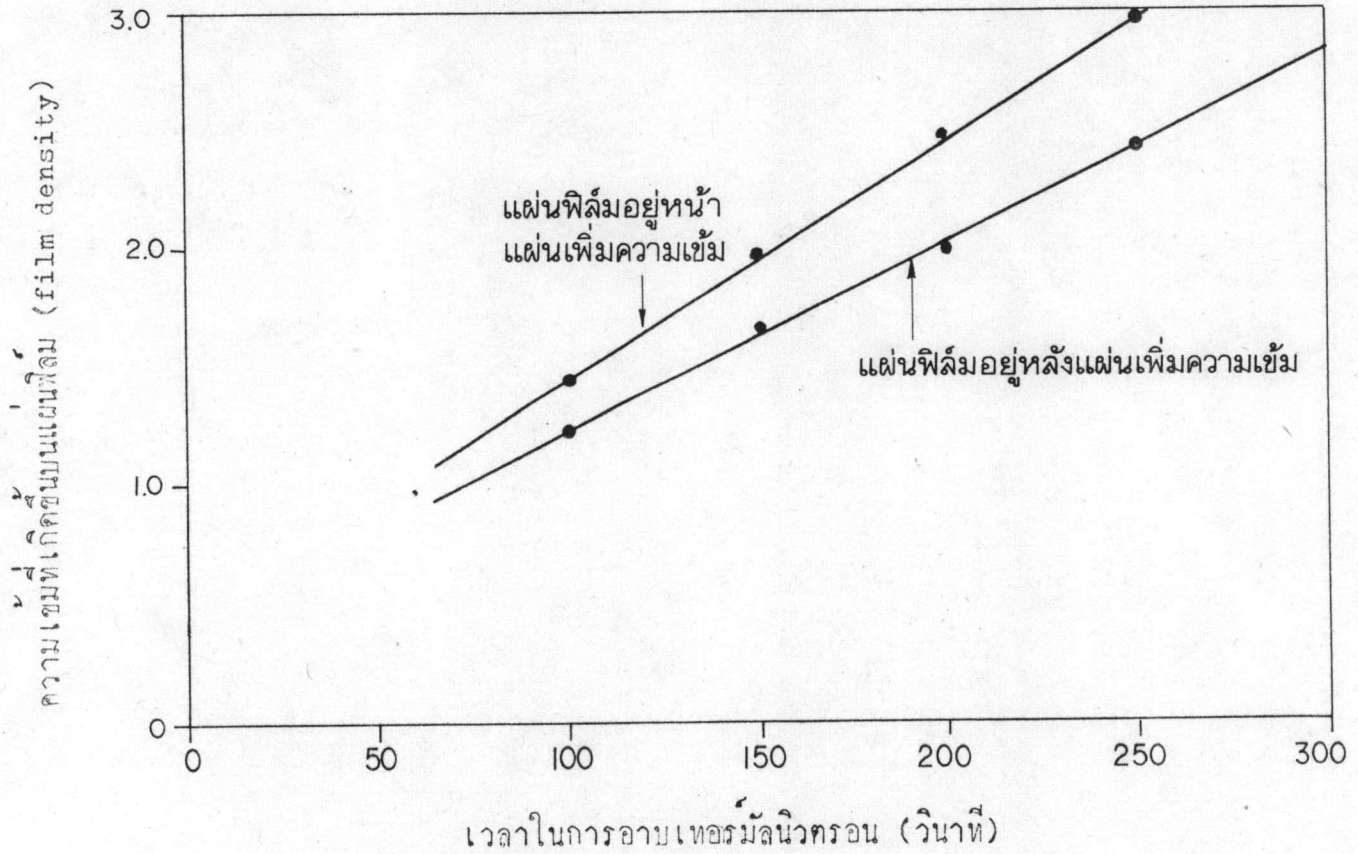
I16411841

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 ที่ได้จากการทดลองทำให้พอสรุปได้ว่า การวางแผ่นฟิล์มไว้ข้างหน้าแผ่นเพิ่มความเข้มจะเป็นผลทำให้ค่าความเข้มที่เกิดขึ้นบนฟิล์มมีค่ามากกว่าการวางแผ่นฟิล์มไว้ข้างหลังแผ่นเพิ่มความเข้ม ทั้งนี้เป็นเพราะด้านใดของแผ่นเพิ่มความเข้มหันเข้าหาลำของนิวตรอนด้านนั้นจะได้รับนิวตรอนมากกว่า ส่วนด้านหลังของแผ่นเพิ่มความเข้มจะมีผลกระทบกระเทือนจากการกำบังตัวเองจึงเป็นผลทำให้ด้านหลังของแผ่นเพิ่มความเข้มได้รับนิวตรอนน้อย เมื่อนำข้อมูลระหว่างความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มกับระยะเวลาในการอาบรังสีเทอร์มัลนิวตรอนมาเขียนกราฟจะได้ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟเป็นเส้นตรง ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.4

จากกราฟรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าเส้นเทียบปรับทั้งสอง คือเส้นหนึ่งวางแผ่นฟิล์มอยู่หน้าแผ่นเพิ่มความเข้ม และอีกเส้นหนึ่งวางแผ่นฟิล์มอยู่หลังแผ่นเพิ่มความเข้ม ซึ่งเส้นทั้งสองนี้เป็นเส้นตรง แต่อย่างไรก็ตามไม่ตัดที่จุดศูนย์ที่เป็นเช่นนี้เพราะลำของเทอร์มัลนิวตรอนที่ออกมาตรงจุดที่ใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนนั้นมีส่วนผสมของรังสีแกมมา ซึ่งเป็นผลทำให้ฟิล์มเพิ่มความเข้มขึ้น นอกจากนี้ก็ยังมีความเข้มที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวของมันเอง คือฟิล์มซึ่งไม่ได้รับรังสีหรือถูกแสง เมื่อนำไปล้างในขบวนการล้างฟิล์มแล้ว และนำมาตรวจหาค่าความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มโดยใช้เครื่องวัดความเข้ม จะพบว่าแผ่นฟิล์มมีค่าความเข้มอยู่ในช่วง 0.20 ถึง 0.22

การทดลองขั้นต่อไป คือการหาจำนวนความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มอันเนื่องมาจากรังสีแกมมาที่ปนมากับลำของเทอร์มัลนิวตรอนการทดลองกระทำดังนี้ ใช้ฟิล์ม **Kodak Industrex AA** ใส่เข้าไปในตลับอลูมินัมที่แสงเข้าไม่ได้ จากนั้นนำไปอาบรังสีนิวตรอนที่จุดที่ใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ฟิล์มแต่ละฟิล์มต้องอาบรังสีเป็นเวลา 100, 150, 200 และ 250 วินาที ตามลำดับ จะเห็นว่ามีฟิล์ม 4 ฟิล์ม ซึ่งอาบรังสีเป็นเวลาต่าง ๆ กัน เมื่อนำเอาฟิล์มเหล่านี้ไปล้างฟิล์มด้วยขบวนการล้างฟิล์มในเวลาพร้อม ๆ กัน แล้วนำไปวัดหาค่าความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องวัดจะได้ผลดังตารางที่ 4.2

กราฟรูปที่ 4.4 เส้นกราฟเทียบปรับระหว่างเวลาในการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มสำหรับแผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียมหนา 0.001 นิ้ว



ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอาบรังสีแกมมาที่ปนมากับลำของเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

เวลา (วินาที)	ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม (film density)
100	0.69
150	0.80
200	0.92
250	1.04

จากการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นว่าการวางแผ่นฟิล์มอยู่หน้าแผ่นเพิ่มความเข้มจะให้ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มมีค่ามากและในเรื่องการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา หรือนิวตรอนก็ตาม ความคมของภาพ (contrast) จะเห็นได้ดีเมื่อแผ่นฟิล์มมีความเข้มที่เกิดขึ้นบนฟิล์มมีค่าต่างกันมากกับ ความเข้มที่เกิดขึ้นบนฟิล์มอันเนื่องมาจากสารตัวอย่าง และในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนใช้แผ่นฟิล์มเพียงแผ่นเดียวก็พอซ้ำยังเป็นการประหยัดด้วย จากข้อมูล ตารางที่ 4.1 การวางแผ่นฟิล์มอยู่หน้าแผ่นเพิ่มความเข้มจึงเป็นวิธีดีที่สุด และนิยมใช้กันในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน และเนื่องจากความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอนมีค่า 2.91×10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เพราะฉะนั้นจึงหาความสัมพันธ์ระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร กับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มอันเนื่องจากเทอร์มัลนิวตรอนอย่างเดียว และจากความเข้มที่เกิดขึ้นบนฟิล์มเนื่องจากเทอร์มัลนิวตรอนและรังสีแกมมา แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร กับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

เทอร์มัลนิวตรอน (เทอร์มัลนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร)	ค่าความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม	
	เทอร์มัลนิวตรอนและรังสีแกมมา	เทอร์มัลนิวตรอน
2.91×10^8	1.45	0.76
4.37×10^8	1.94	1.14
5.82×10^8	2.46	1.54
7.28×10^8	2.94	1.90

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 นำไปเขียนเป็นเส้นเทียบปรับได้ดังรูปที่ 4.5

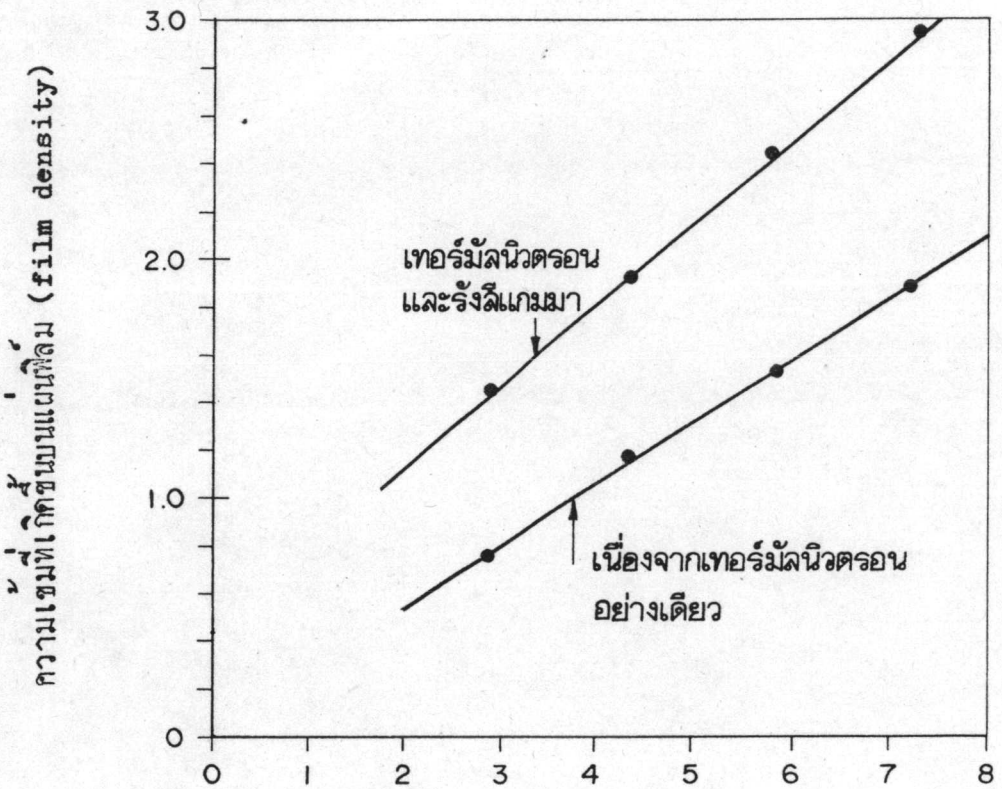
จากข้อมูลในกราฟรูปที่ 4.5 จะเป็นข้อมูลสำคัญเป็นอย่างยิ่งในวิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีทางตรง และใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียมหนา 0.001 นิ้ว ซึ่งจากค่าเส้นเทียบปรับนี้จะทำให้สามารถคำนวณหาเวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนได้จากลำของนิวตรอนนี้ เมื่อทราบว่าสารตัวอย่างเป็นอะไร มีค่า macroscopic cross section เท่าไร และความหนาของสารตัวอย่าง ดูวิธีคำนวณในบทที่ 5 หัวข้อ 5.3

4.6.2 แผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียม

เนื่องจากแผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียมที่ใช้ในการทดลองนี้มีอยู่ 2 แผ่น ซึ่งมีขนาดและความหนาไม่เท่ากัน คือแผ่นแรกมีขนาด 5 x 5 นิ้ว ความหนา 0.025 นิ้ว ส่วนแผ่นที่สองมีขนาด 2 x 2 นิ้ว หนา 0.050 นิ้ว ฉะนั้นจึงเป็นการดีที่จะได้ศึกษาเปรียบเทียบว่าถ้าความหนาต่างกัน แต่ใช้เวลาในการอาบเทอร์มัลนิวตรอนที่เวลาเท่ากันจะเป็นผลทำให้ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มมีค่าแตกต่างกันอย่างไร

วิธีดำเนินการทดลองในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน การล้างฟิล์ม และการวัดหาความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม กระทำเช่นเดียวกับแผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียม ผลของ

รูปที่ 4.5 แสดงเส้นกราฟเทียบปรับระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนต่อความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม (สำหรับแผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียม (0.001 นิ้ว)



การทดลองแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม (สำหรับแผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียมหนา 0.025 นิ้ว)

เวลา (วินาที)	ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม	
	แผ่นฟิล์มที่อยู่หลังแผ่นเพิ่มความเข้ม	แผ่นฟิล์มที่อยู่หน้าแผ่นเพิ่มความเข้ม
100	1.14	1.51
150	1.52	2.03
200	1.91	2.51
250	2.26	2.99

ตารางที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม (สำหรับแผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียมหนา 0.050 นิ้ว)

เวลา (วินาที)	ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม	
	แผ่นฟิล์มที่อยู่หลังแผ่นเพิ่มความเข้ม	แผ่นฟิล์มที่อยู่หน้าแผ่นเพิ่มความเข้ม
100	1.11	1.53
150	1.43	2.06
200	1.82	2.60
250	2.19	3.09

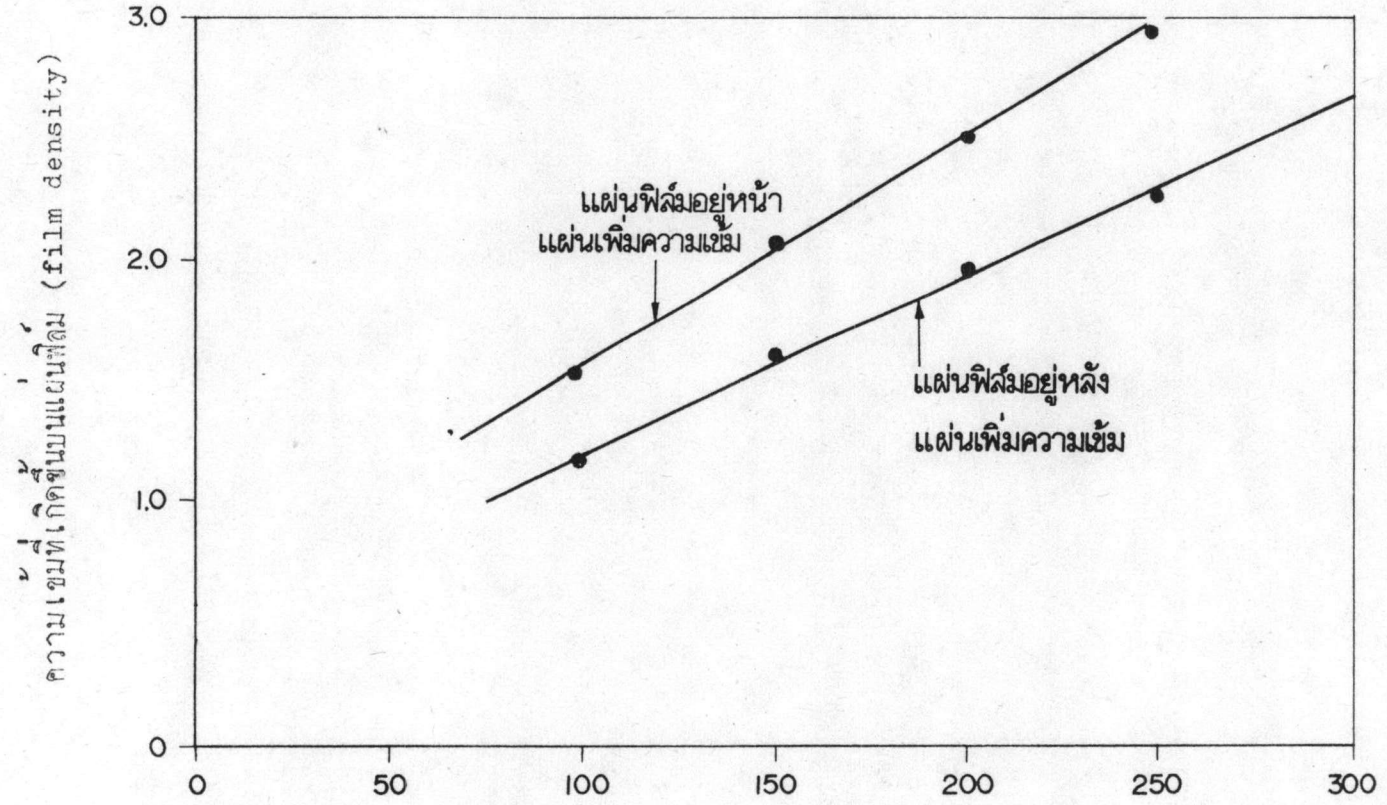
จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 และ 4.5 จะพบว่าแม้จะเพิ่มความหนาของแผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียมขึ้นไปอีกเท่าตัวคือ 0.025 นิ้ว ก็เพียงแต่ให้ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มมีค่าเพิ่มอีกนิดหน่อยในกรณีที่ใช้แผ่นฟิล์มอยู่หน้าแผ่นเพิ่มความเข้ม แต่ถ้าพิจารณาในกรณีวางแผ่นฟิล์มอยู่หลังแผ่นเพิ่มความเข้ม จะเห็นว่าความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มโดยใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียมหนา 0.050 นิ้ว กลับมีค่าน้อยกว่าใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียมหนา 0.025 นิ้ว ที่เป็นดังนี้เพราะเกิดการกำบังตัวเองอย่างมากในแผ่นเพิ่มความเข้มที่หนา นอกจากนี้แผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียมชนิดหนา 0.050 นิ้ว จะมีความแข็งตัวซึ่งเป็นการยากที่จะทำให้แนบสนิทกับแผ่นฟิล์มดังนั้นภาพที่ถ่ายออกมาอาจจะดูไม่ชัดในเรื่องรายละเอียด จากตารางที่ 4.4 และ 4.5 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอาบเทอร์มัลนิวตรอน กับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7

สรุปผลการทดลองในเรื่องความหนาของแผ่นแคดเมียมพบว่าความหนา 0.025 นิ้ว น่าจะเป็นความหนาที่นำมาใช้เป็นแผ่นเพิ่มความเข้มในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีทางตรง และเนื่องจากการวางแผ่นฟิล์มอยู่หน้าแผ่นเพิ่มความเข้ม มีผลทำให้ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มมีค่ามาก จึงได้นำวิธีการถ่ายภาพแบบนี้มาใช้งานต่อไป และจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 และข้อมูลในตารางที่ 4.2 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์และเปรียบเทียบให้เห็นว่าถ้าไม่มีรังสีแกมมาปนมากับลำของเทอร์มัลนิวตรอน กับมีรังสีแกมมาปนมากับลำของเทอร์มัลนิวตรอน ดังตารางที่ 4.6 และกราฟรูปที่ 4.8

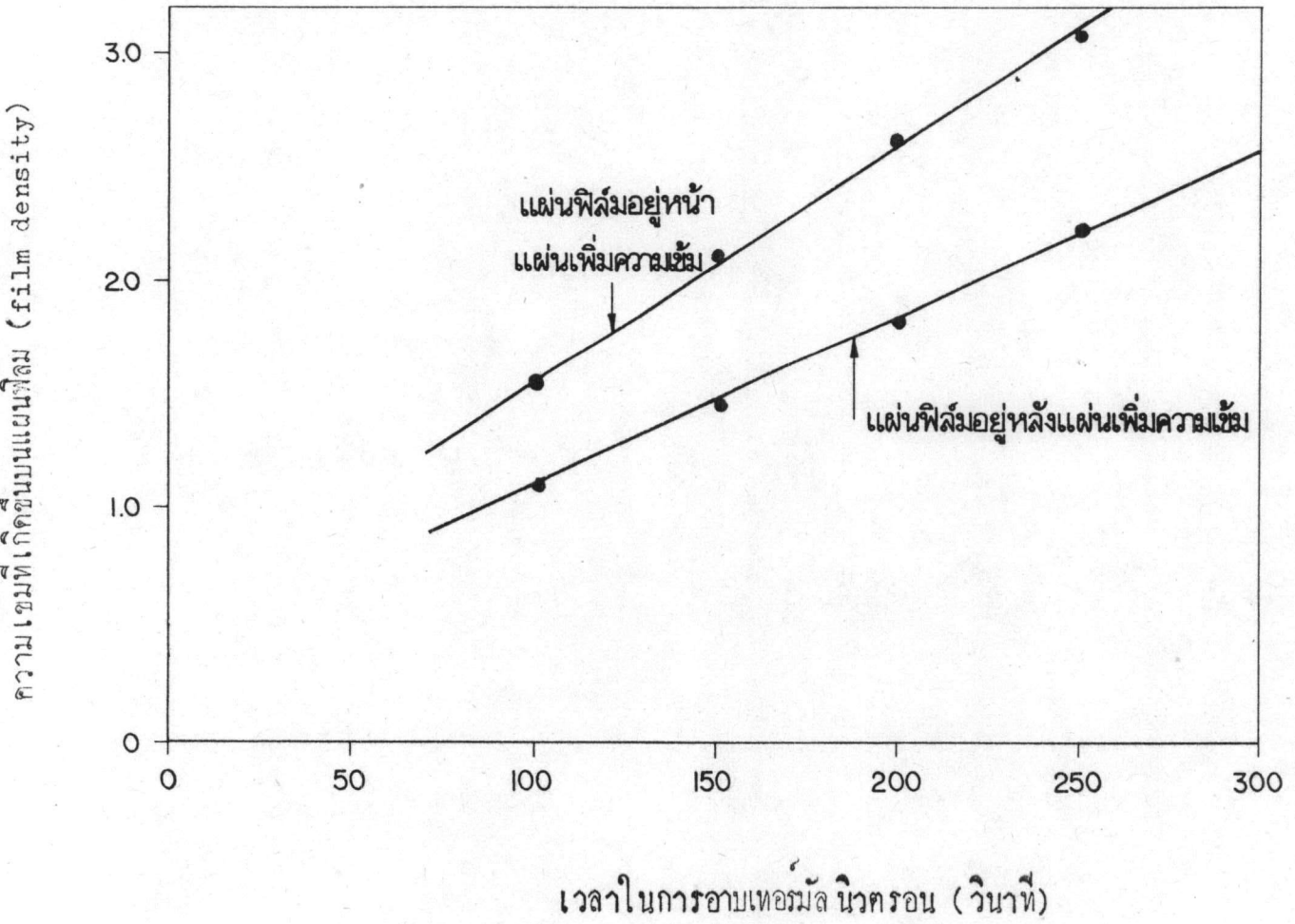
ตารางที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร กับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

เทอร์มัลนิวตรอน (นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร)	ค่าความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม	
	เทอร์มัลนิวตรอนและรังสีแกมมา	เทอร์มัลนิวตรอน
2.91×10^8	1.51	0.82
4.37×10^8	2.03	1.23
5.82×10^8	2.51	1.59
7.28×10^8	2.99	1.95

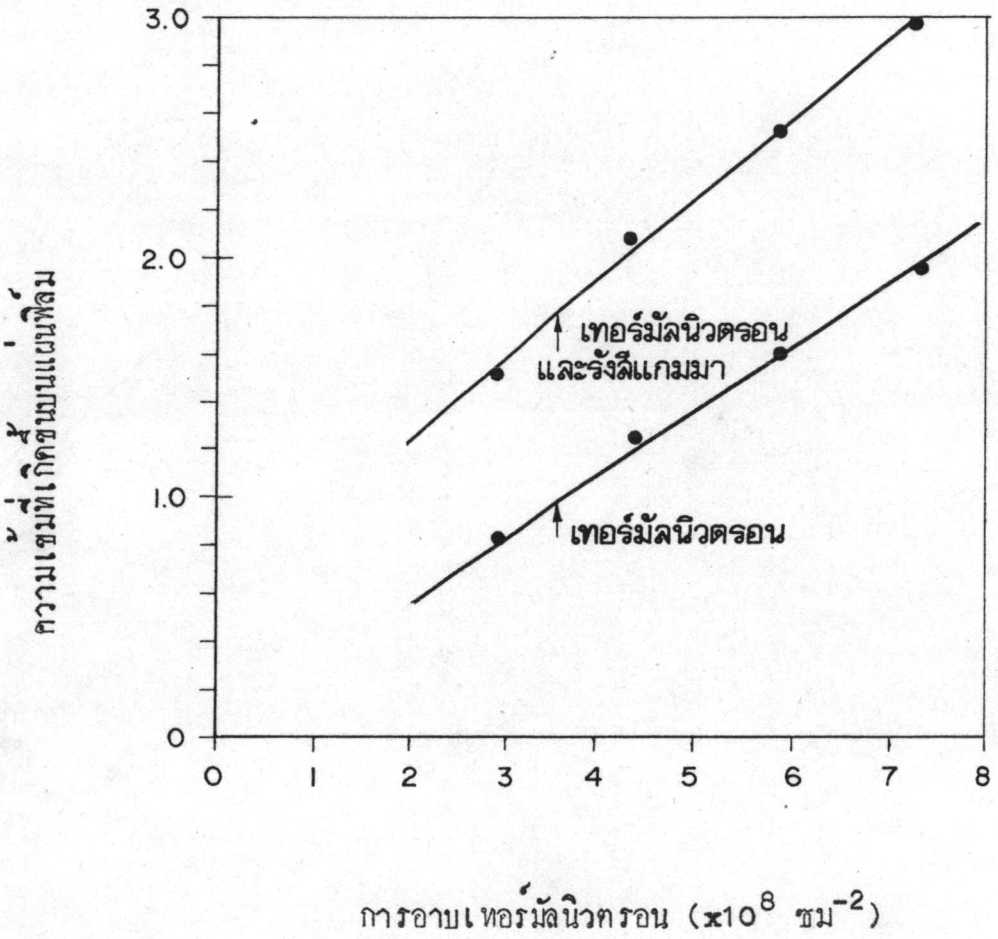
กราฟรูปที่ 4.6 เส้นกราฟเทียบปรับระหว่างเวลาในการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้ม
ที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม สำหรับแผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียมหนา 0.025 นิ้ว



กราฟรูปที่ 4.7 เส้นกราฟเทียบปรับระหว่างเวลาในการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้ม
ที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม สำหรับแผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียมหนา 0.05 นิ้ว



กราฟรูปที่ 4.8 แสดงเส้นเทียบปรับระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนต่อความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม สำหรับแผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียมหนา 0.025 นิ้ว

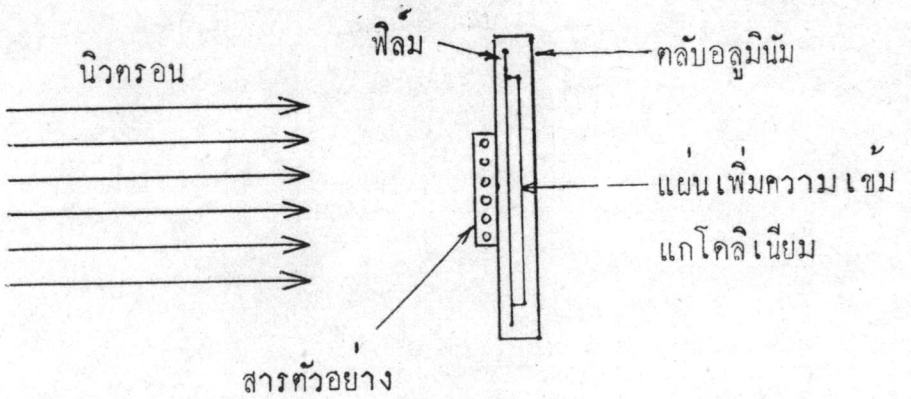


4.7 ศึกษาและทดลองในเรื่องการแยกจุดที่ใกล้ชิดกัน (resolution) ของแผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียมและแคดเมียม

จากผลการทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีทางตรงเป็นที่คาดว่าทั้งแผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียมและแผ่นแคดเมียมสามารถนำไปใช้งานได้ ขั้นตอนต่อไปก็คือการตรวจสอบว่าแผ่นเพิ่มความเข้มชนิดใดที่จะให้ resolution ได้ดีกว่ากัน ขั้นตอนดำเนินงานทำดังนี้ คือสร้างแผ่นตรวจสอบโดยตัดแผ่นแคดเมียมให้มีขนาด ยาว 2 นิ้ว กว้าง ½ นิ้ว และหนา 0.05 นิ้ว เจาะรูหลายรู ๆ บนแผ่นแคดเมียมนี้โดยให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับความหนาของแผ่นแคดเมียมและความห่างจากขอบรูถึงขอบรูแต่ละรูมีดังนี้ 0.008, 0.016, 0.040, 0.079, 0.143, 0.191 และ 0.310 นิ้ว ตามลำดับซึ่งจะเห็นว่าแผ่นแคดเมียมนี้จะเป็นสารตัวอย่างทดสอบในเรื่อง resolution ของแผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียม (0.025 นิ้ว) และแผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียม (0.001 นิ้ว)

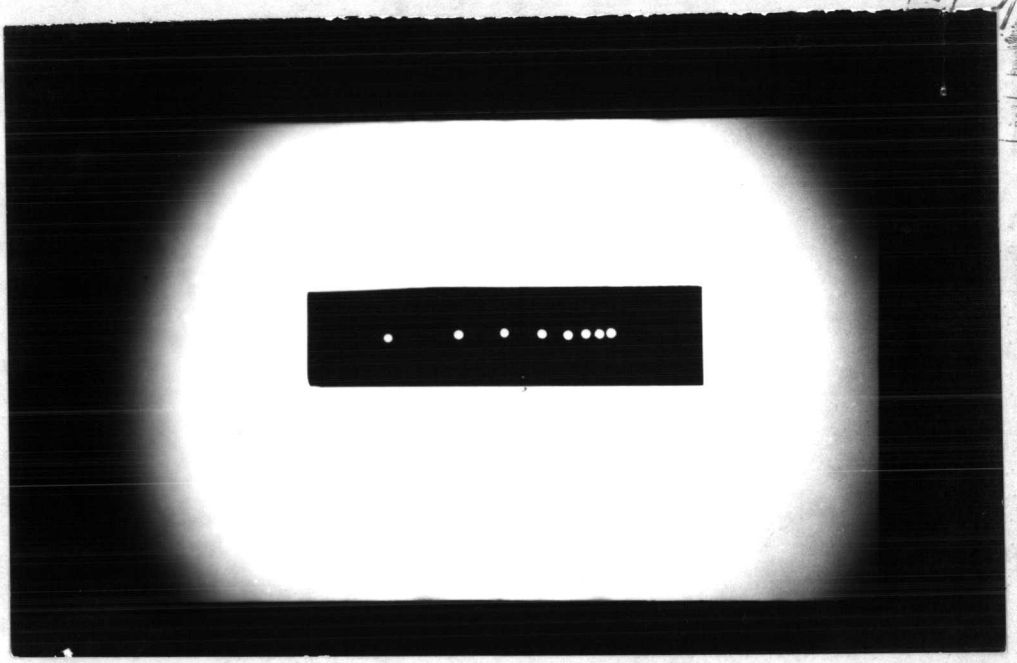
4.7.1 ทดสอบหา resolution ของแผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียม (0.001 นิ้ว)

การทดลองกระทำดังนี้ ใช้แผ่นฟิล์ม Kodak Industrex AA วางให้แนบสนิทกับแผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียม และบรรจุในตลับอลูมินัมที่แสงผ่านไม่ได้ จากนั้นนำไปอาบรังสีเทอร์มัลนิวตรอน ดูรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงวิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อทดสอบหา resolution ของแผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียม

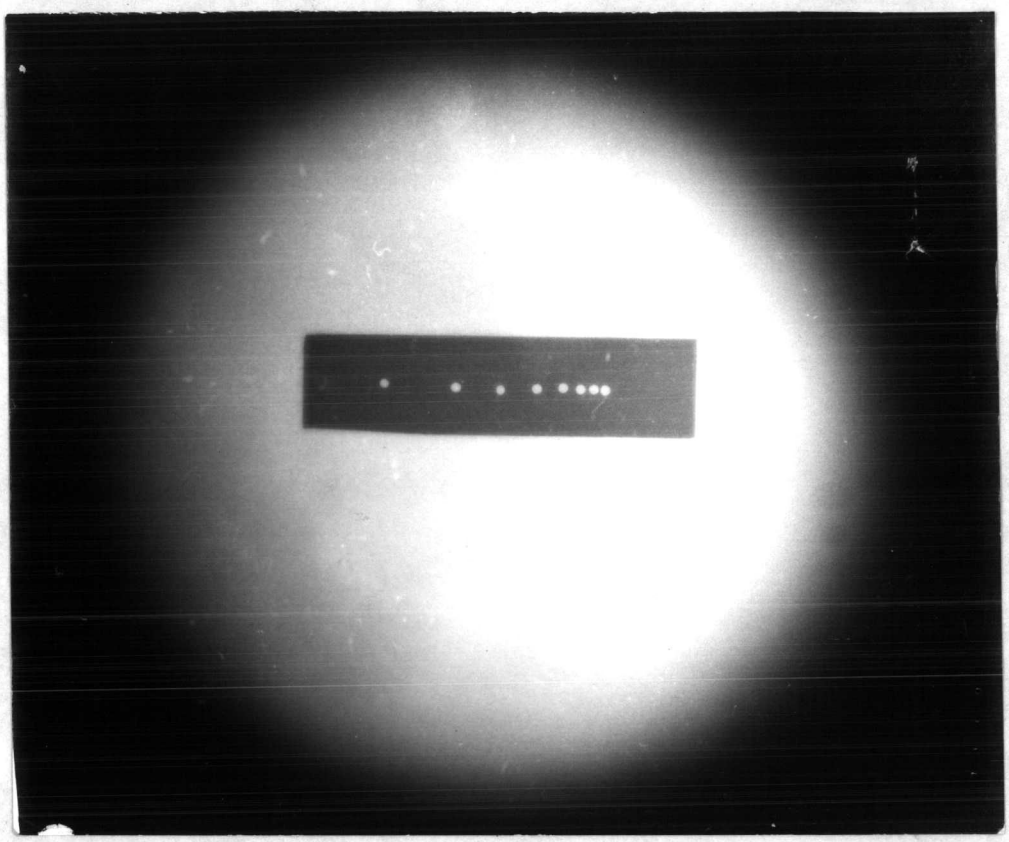
จากเส้นเทียบปรับของกราฟรูปที่ 4.5 และรู้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นของแคดเมียม ฉะนั้นจึงคำนวณหาเวลาในการถ่ายได้ เวลาในการถ่าย 150 วินาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงการถ่ายสารตัวอย่างทดสอบ **resolution** ที่ทำด้วยแคดเมียม โดยวิธีถ่ายภาพด้วยนิวตรอนและใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียม

4.7.2 ทดสอบหา **resolution** ของแผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียม (0.025 นิ้ว)

การทดลองกระทำเช่นเดียวกับข้อ 4.7.1 แต่ใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียมและเวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนก็ดูจากเส้นเทียบปรับในกราฟรูปที่ 4.8 เวลาในการถ่าย 150 วินาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงการถ่ายสารตัวอย่างทดสอบ **resolution** ที่ทำด้วยแคดเมียม โดยวิธีถ่ายภาพด้วยนิวตรอน และใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียม

สรุปจากผลการทดลองเปรียบเทียบของแผ่นเพิ่มความเข้มทั้งสองพบว่าสามารถหา resolution ได้ถึง 0.008 นิ้ว ซึ่งนับว่าอยู่ในเกณฑ์ดี อย่างไรก็ตามแผ่นทดสอบแคดเมียมนี้น่าจะเจาะรูให้มีระยะห่างจากขอบรูถึงขอบรูถัดไปมีระยะ 0.001 นิ้ว แต่การเจาะรูให้มีความห่างขนาดนี้ไม่สามารถกระทำได้ในขณะนี้ นอกจากสั่งสารตัวอย่างทดสอบ **resolution** มาจากต่างประเทศ

4.8 ทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีทางตรงเพื่อตรวจสอบโครงสร้างภายในของสารตัวอย่าง

ดังที่กล่าวมาแล้ววัตถุบางชนิดไม่สามารถทำการตรวจสอบด้วยวิธีถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา เช่น ดินสงกระสุน เป็นต้น

ดินส่งกระสุนที่ใช้กันในปัจจุบันนี้เป็นดินควันน้อย (smokeless powder) และแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ ดินส่งกระสุนแบบฐานเดี่ยว (single base) และดินส่งกระสุนแบบฐานคู่ (double base) นอกจากนี้ยังแบ่งตามประเภทการเผาไหม้ของดินส่งกระสุนนั้น ๆ เช่น ประเภทการเผาไหม้คงที่ (stable) การเผาไหม้แบบก้าวหน้า (progressive) และการเผาไหม้อย่างลดลง (regressive) ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่าง ลักษณะการออกแบบและความหนาแน่นของดินส่งกระสุนนั้น ๆ

ดินส่งกระสุนที่มีอัตราการเผาไหม้สูงจะมีลักษณะเป็นผงละเอียดหรือเป็นแผ่น (Flake) บาง ๆ เล็ก ๆ ส่วนดินส่งกระสุนที่มีอัตราการเผาไหม้ช้าจะมีลักษณะเป็นแผ่นหนา ๆ หรือเป็นเม็ดเล็ก ๆ หรือเป็นแท่งเล็ก ๆ คล้ายเส้นผมและมีขนาดต่าง ๆ กัน ดินส่งกระสุนปืนสั้นที่นิยมใช้กันก็มีแบบ ball eye ทำเป็นผงละเอียดหรือเป็นแผ่นบาง ๆ เล็ก ๆ ซึ่งจะทำให้มีการเผาไหม้สูง นอกจากนี้ก็มีดินส่งกระสุนแบบ unique ซึ่งมีอัตราการเผาไหม้ช้ากว่าแบบแรก และยังมีแบบที่ไหม้ช้ากว่า 2 แบบแรก ซึ่งเหมาะในการบรรจุเป็นดินส่งกระสุนประเภท Magnum ดินส่งกระสุนจะไหม้หมดในลำกล้องปืนที่มีความยาว 6 นิ้วขึ้นไป เช่นดินส่งกระสุน 2400 Hercules

4.8.1 ทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีทางตรง และใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียม

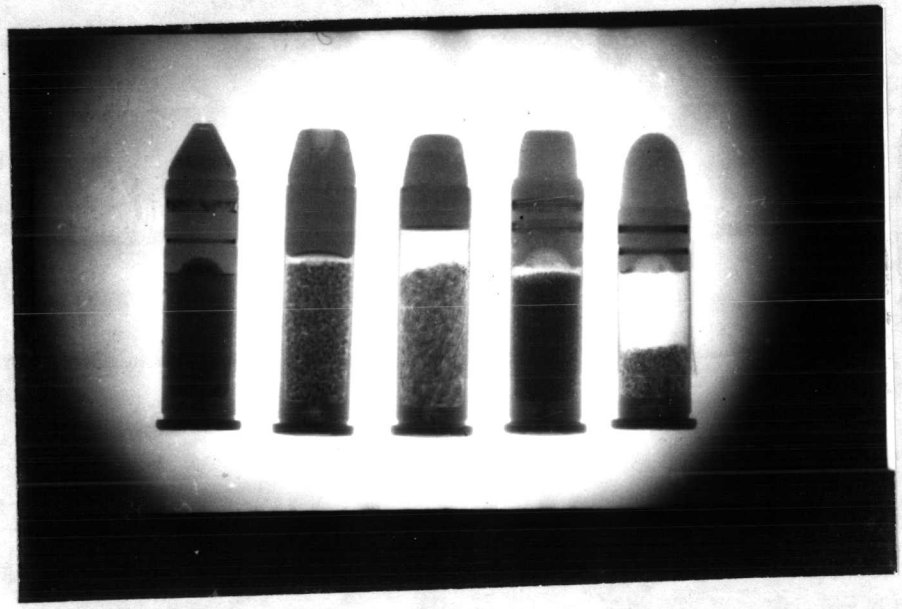
วัตถุที่นำมาเพื่อจะตรวจสอบโครงสร้างภายในคือ ลูกปืนสั้นชนิดต่าง ๆ คือ WW 38 special, WW Super 357 MAGNUM, SUPER VEL 357 MAG, NORMA 357 MAGNUM และ WW SUPER 357 MAGNUM รวมทั้งหมด 5 ลูก

วิธีการทดลองกระทำดังนี้ บรรจุแผ่นฟิล์ม Kodak Industrex AA โดยวางให้แนบสนิทกับแผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียมลงในตลับอลูมิเนียมที่แสงผ่านไม่ได้ จากนั้นนำเอาลูกปืนทั้ง 5 ลูก ที่จะทำการตรวจสอบภายในมาแปะติดเข้ากับกล่องอลูมินัมนี้และต้องจัดให้ลำของเทอร์มัลนิวตรอนมากระทบลงบนลูกปืนและไปตกกระทบแผ่นฟิล์มพร้อมทั้งแผ่นเพิ่มความเข้มนิวตรอนด้วย จากเส้นเทียบปรับของกราฟรูปที่ 4.5 และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นของดินส่งกระสุนมีค่าเท่ากับ 2.15 ซม.$^{-1}$ ฉะนั้นเวลาในการถ่ายจึงใช้ 100 วินาที และ 150 วินาที ทั้งนี้ที่ใช้เวลาต่างกันเพื่อจะได้ดูว่าสองภาพนี้ภาพไหนจะให้ความชัดเจนดีกว่า ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12

และ 4.13

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.12 เวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 100 วินาที

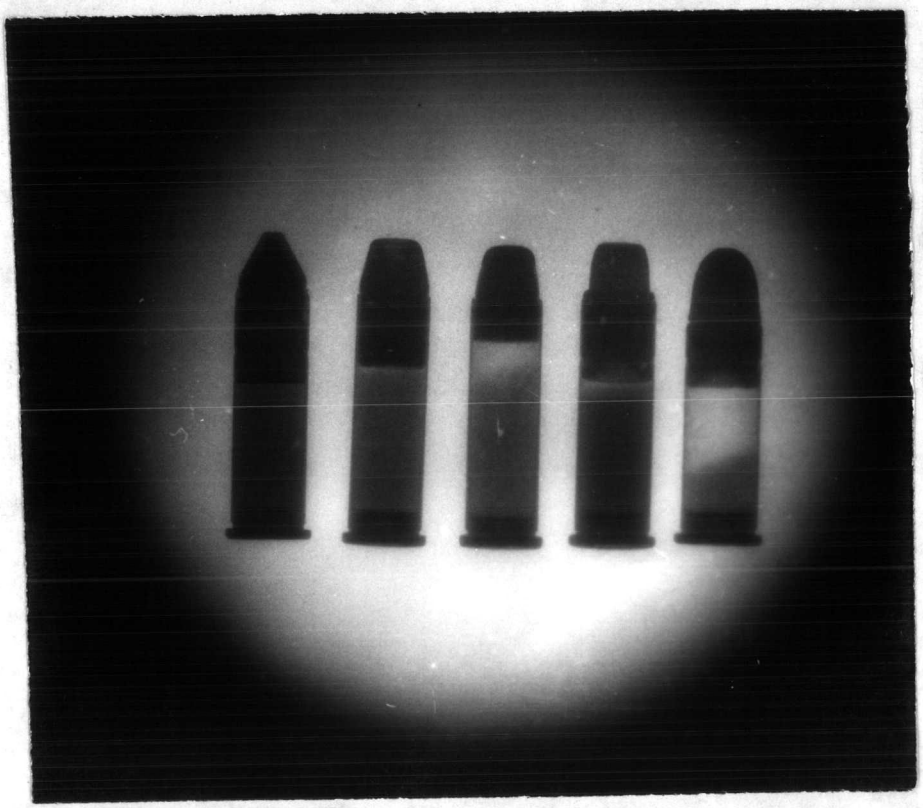


รูปที่ 4.13 เวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 150 วินาที

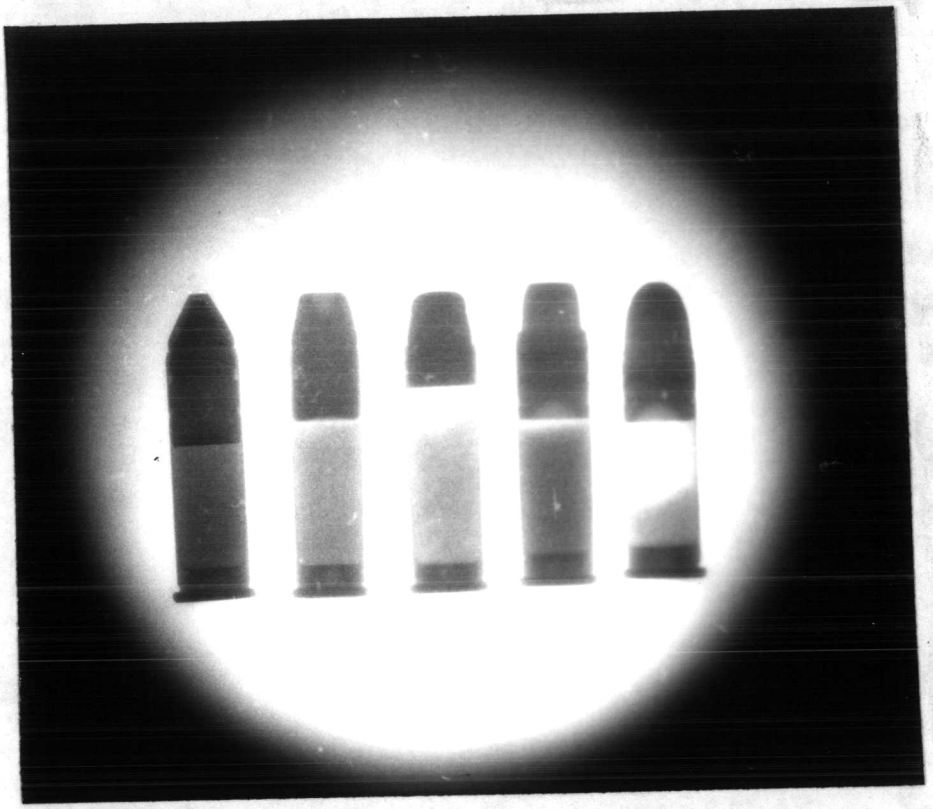
สรุปผลการทดลองในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีตรง และใช้แผ่นเพิ่มความเข้ม แกโดลิเนียม จะให้ภาพที่มีความคม (contrast) มาก และ resolution ดีมาก สามารถ ตรวจสอบหาความแน่น และส่วนที่ไม่มีดินส่งกระสุน ตลอดจนความแตกต่างของดินส่งกระสุนที่ บรรจุอยู่ในลูกปืน ซึ่งจะเป็นประโยชน์มากในการที่จะใช้เป็นเครื่องมือตรวจสอบการประกัน คุณภาพโดยวิธีไม่ทำลายวัตถุ

4.8.2 ทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีทางตรง และใช้แผ่นเพิ่มความเข้ม แคดเมียม

วัตถุที่จะตรวจสอบก็เป็นลูกปืนทั้ง 5 ลูก ที่เคยตรวจสอบมาแล้ว วิธีการถ่ายภาพ ก็ทำเหมือนกับข้อ 4.8.1 ต่างกันเพียงแต่ใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียม ส่วนเวลาในการ ถ่ายภาพคำนวณจากเส้นเทียบปรับของกราฟรูปที่ 4.8 ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.14 เวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 150 วินาที



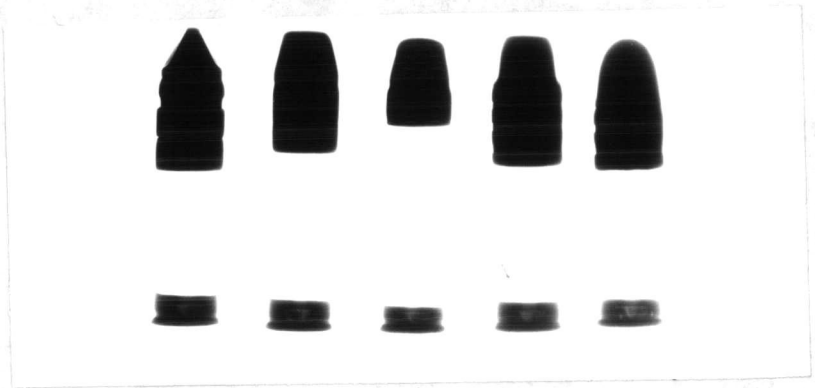
รูปที่ 4.15 เวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 200 วินาที

ผลการทดลองเมื่อใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแคดเมียมหนา 0.025 นิ้ว นั้น สามารถหารายละเอียดและข้อบกพร่องภายในได้ดีพอสมควร แต่ความคมชองภาพและ **Resolution** ยังไม่ดีพอถ้านำไปเปรียบเทียบกับการใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียมหนา 0.001 นิ้ว

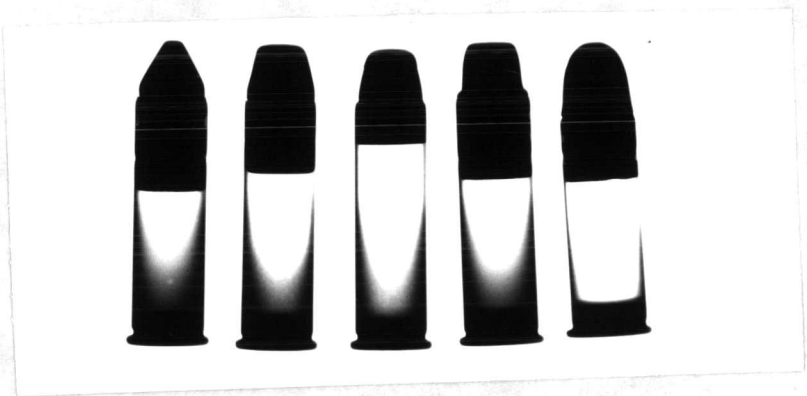
4.9 ทำการถ่ายภาพลูกปืนทั้ง 5 ลูก โดยวิธีถ่ายด้วยรังสีเอกซ์

จุดประสงค์ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบโครงสร้างภายในของลูกปืน และนำผลไปเปรียบเทียบกับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จากการศึกษาวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดรังสี-เอกซ์ ที่มีอยู่ในสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ การทดลองได้กระทำดังนี้ ใช้พลังงานของคลื่นรังสีเอกซ์ที่ขนาดต่าง ๆ กัน คือ 150 **kVp** 3 **mAm**, 90 **kVp** 8 **mAm** และ 70 **kVp** 4 **mAm** ทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบเปรียบเทียบเพื่อให้เกิดความแน่นอนว่าพลังงานรังสีเอกซ์ขนาดเท่าไรจึงจะสามารถตรวจสอบหารายละเอียดของดินส่งกระสุนที่บรรจุอยู่ภายในลูกปืนได้ผลดีที่สุด ผลของการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16

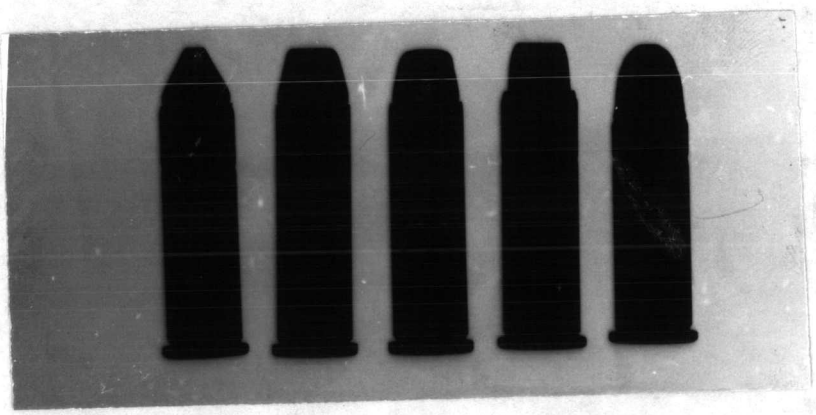
150 kVp 3 mAm



90 kVp 8 mAm



70 kVp 4 mAm



รูปที่ 4.16 แสดงการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ โดยใช้พลังงานของคลื่นต่าง ๆ กัน

ผลการทดลองการใช้พลังงานคลื่นรังสีเอกซ์ ขนาด 150 kVp 3 mAm พบว่าไม่สามารถเห็นรายละเอียดดินส่งกระสุนที่บรรจุอยู่ภายในลูกปืน ทั้งนี้เพราะรังสีเอกซ์มีพลังงานสูงเกินไปจึงผ่านดินส่งกระสุนไปได้จำนวนมาก นอกจากนี้ดินส่งกระสุนมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นต่ำต่อคลื่นรังสีเอกซ์ เพราะฉะนั้นภาพที่ได้จึงหารายละเอียดของดินส่งกระสุนไม่ได้ ส่วนการใช้พลังงานขนาด 90 kVp 8 mAm และ 70 kVp 4 mAm นั้นก็ไม่สามารถบอกรายละเอียดของดินส่งกระสุนเช่นกัน เพราะพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ใช้ต่ำเกินไปจึงไม่สามารถทะลุผ่านเปลือกนอกของลูกปืนได้ สรุปในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบดินส่งกระสุนที่บรรจุในลูกปืนนั้นไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดได้

4.10 ศึกษาและทำการทดลองถ่ายภาพด้วยเทอร์มัลนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอด (transfer technique)

วิธีนี้เป็นวิธีที่น่าสนใจมากเพราะสามารถนำไปใช้ถ่ายภาพพวกวัสดุที่มีรังสีในตัวเอง เช่นสารรังสี แท่งเชื้อเพลิงปรมาณู เป็นต้น มีแผ่นเพิ่มความเข้มหลายชนิดที่สามารถใช้ในวิธีการนี้ได้แต่ในการทดลองครั้งนี้ได้เลือกเอา แผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียม (Indium) และแผ่นเพิ่มความเข้มดิสโปรเซียม (dysprosium) จุดประสงค์ของการทดลองเพื่อต้องการหาข้อมูลต่าง ๆ ในด้านเทคนิคเพื่อใช้กับอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเช่น เวลาในการนำสารตัวอย่างไปอาบเทอร์มัลนิวตรอน และเวลาที่นำแผ่นฟิล์มไปอาบรังสีจากแผ่นเพิ่มความเข้มนิวตรอนหลังจากอาบเทอร์มัลนิวตรอนแล้ว

4.10.1 แผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียม (indium)

แผ่นเพิ่มความเข้มที่ใช้มีขนาด 2½ x 3¼ นิ้ว และหนา 0.010 นิ้ว และมีคุณสมบัติของตัวมันเอง กล่าวคือถ้าแผ่นเพิ่มความเข้มนี้ได้รับเทอร์มัลนิวตรอนจะเป็นผลทำให้ตัวมันเองมีรังสีและมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 54 นาที เพราะฉะนั้นเมื่อนำเอาแผ่นฟิล์มที่มีความไวต่อแสงเช่น ฟิล์มรังสีเอกซ์ไปแปะติดเข้ากับแผ่นเพิ่มความเข้มนี้ ก็จะมีผลทำให้เกิดความเข้มบนแผ่นฟิล์ม (film density)

การทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพทำดังนี้คือ นำเอาแผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียมบรรจุลงในคลับอลูมินัมที่แสงเข้าไม่ได้ นำไปอาบรังสีเทอร์มัลนิวตรอนตรงตำ-

แหน่งที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นดึงเอาตลับอลูมินัมออกจากลำของเทอร์มัลนิวตรอนทำการวัดหาอัตราความแรงของรังสีแกมมาอันเนื่องจากแผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียมและจากตลับอลูมินัม โดยวัดที่ตำแหน่งติดกับตลับผลการวัดได้ความแรง 35 มิลลิ-เรินท์เก้นต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นรังสีที่แรงพอสมควรกับผู้ปฏิบัติงาน เพราะฉะนั้นจึงปล่อยให้สลายตัวลดลงไปบ้างประมาณ 5 นาที ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า **handling time** จากนั้นก็นำเอาแผ่นฟิล์ม **Kodak Industrex AA** บรรจุลงไปในตลับอลูมินัมเพื่อให้แผ่นฟิล์มและแผ่นเพิ่มความเข้มประกบกัน ทั้งนี้แผ่นฟิล์มจะได้รับรังสีที่แผ่ออกมาจากแผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียม ใช้เวลาอาบรังสีช่วงนี้เป็น 3 เท่าของค่าครึ่งชีวิตของแผ่นเพิ่มความเข้ม จากนั้นนำเอาแผ่นฟิล์มออกมาเก็บไว้อย่าให้ถูกแสง เพื่อจะรอไว้ล้างฟิล์มพร้อมกับการทดลองครั้งต่อไป ในการทำเส้นเทียบปรับต้องทำการล้างฟิล์มพร้อม ๆ กัน

การทดลองครั้งที่สองกระทำแบบเดียวกันเพียงแต่เวลาในการเอาแผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียมไปอาบเทอร์มัลนิวตรอนเป็นเวลา 20 นาที ส่วนช่วง **handling time** และช่วงเวลาเอาแผ่นฟิล์มไปแปะติดกับแผ่นเพิ่มความเข้ม เหมือนการทดลองครั้งแรก การอาบรังสีเทอร์มัล-นิวตรอน 20 นาที นั้น ทำให้ความแรงของรังสีแกมมาวัดได้ 40 มิลลิเรินท์เก้นต่อชั่วโมง การทดลองครั้งที่สามใช้เวลาในการอาบเทอร์มัลนิวตรอนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเมื่อใช้เครื่อง-มือวัดรังสีแกมมาวัดได้ 42 มิลลิเรินท์เก้นต่อชั่วโมง ส่วนขั้นตอนอื่น ๆ เหมือนการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จากนั้นนำเอาฟิล์มทั้งสามนี้ไปล้างตามขบวนการล้างฟิล์ม แล้วนำไปวัดหาความเข้มที่เกิดขึ้นด้วยขบวนการวัดฟิล์ม ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

เวลา (นาที)	ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม
10	1.26
20	1.48
30	1.72

จากตารางที่ 4.7 สามารถทำเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มดังตารางที่ 4.8 เพราะความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอนมีค่าเท่ากับ 2.91×10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร ต่อวินาที

ตารางที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

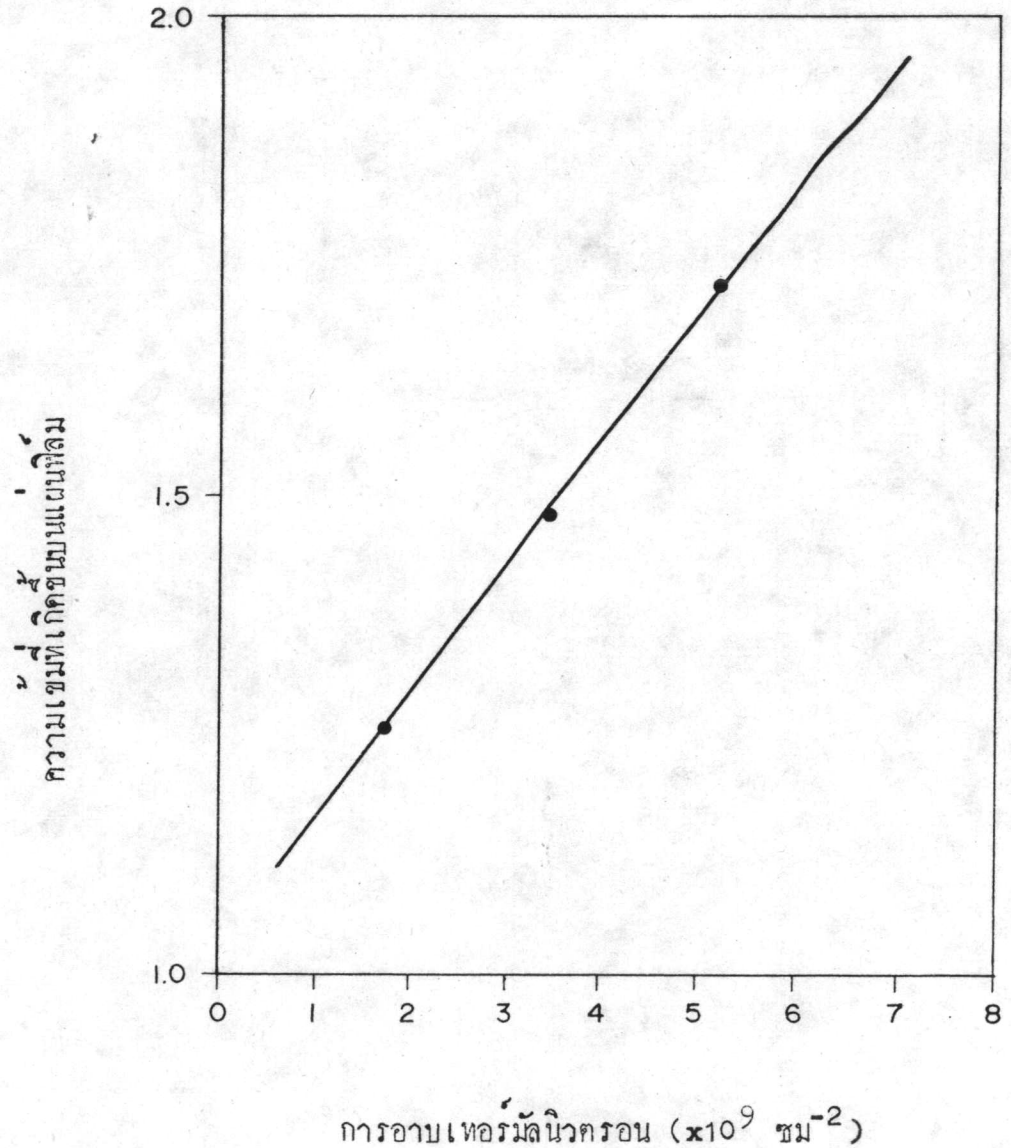
เทอร์มัลนิวตรอน (นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร)	ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม
1.75×10^9	1.26
3.49×10^9	1.48
5.24×10^9	1.72

จากตารางที่ 4.8 นำไปเขียนเป็นกราฟเส้นเทียบปรับดังรูปที่ 4.17

4.10.2 แผ่นเพิ่มความเข้มดิสโปรเซียม (dysprosium)

แผ่นเพิ่มความเข้มดิสโปรเซียมที่ใช้มีขนาด 2 x 2 นิ้ว หนา 0.001 นิ้ว และมีค่าการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนค่อนข้างสูง แต่มีค่าครึ่งชีวิตค่อนข้างยาวคือ 140 นาที อย่างไรก็ตามเป็นแผ่นเพิ่มความเข้มที่น่าสนใจในวิธีถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอด การทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพกระทำดังนี้คือ นำเอาแผ่นเพิ่มความเข้มนี้บรรจุลงในตลับอลูมินัมที่แสงเข้าไม่ได้ นำไปอาบรังสีเทอร์มัลนิวตรอนตรงตำแหน่งที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่เวลาต่าง ๆ กัน ทั้งนี้เพื่อจะให้แผ่นดิสโปรเซียมนี้ได้รับเทอร์มัลนิวตรอนมีความแรงรังสีต่าง ๆ กัน หลังจากนั้นก็นำแผ่นฟิล์ม **Kodak Industrex AA** ไปวางให้แนบสนิทในตลับอลูมินัม โดยใช้เวลาอาบรังสีช่วงนี้เป็นเวลา 3 เท่าของค่าครึ่งชีวิต เสร็จแล้วนำแผ่นฟิล์มทั้งหมดไปล้างตามขบวนการล้างฟิล์ม จากนั้นนำแผ่นฟิล์มไปวัดหาค่าความเข้มที่เกิดบนแผ่นฟิล์ม

กราฟรูปที่ 4.17 แสดงเส้นเทียบปรับระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม (สำหรับแผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียม หนา 0.010 นิ้ว) โดยวิธีถ่ายทอด



แบบเดียวกับที่เคยทำมาแล้ว การทดลองนี้ใช้เวลาในการเอาแผ่นเพิ่มความเข้มดิสโปรเซียม ไปอาบเทอร์มัลนิวตรอน 6, 9 และ 12 นาที ตามลำดับ และช่วงเวลา **handling time** ก็ใช้ 5 นาที ทุกครั้งหลังจากอาบเทอร์มัลนิวตรอนได้ใช้เครื่องมือวัดรังสีวัดหาอัตราความแรงของรังสีทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน ผลการวัดอัตราความแรงของรังสีมีค่าไม่เกิน 5 มิลลิเรินท์เก้นต่อชั่วโมง ที่ตำแหน่งติดกับศลับอลูมินัมของการทดลองทุก ๆ ครั้ง ซึ่งนับว่าปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอาบเทอร์มัลนิวตรอน กับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

เวลา (นาที)	ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม
6	1.14
9	1.47
12	1.87

จากตารางที่ 4.9 สามารถทำเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

เทอร์มัลนิวตรอน (นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร)	ความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม
1.05×10^9	1.14
1.57×10^9	1.47
2.10×10^9	1.87

จากตารางที่ 4.10 นำไปเขียนกราฟเส้นเทียบปรับดังรูปที่ 4.18

4.11 ทำการถ่ายภาพสารรังสีอิริเดียม-192 (**Iridium-192**) ด้วยนิวตรอนโดยใช้วิธีถ่ายทอด

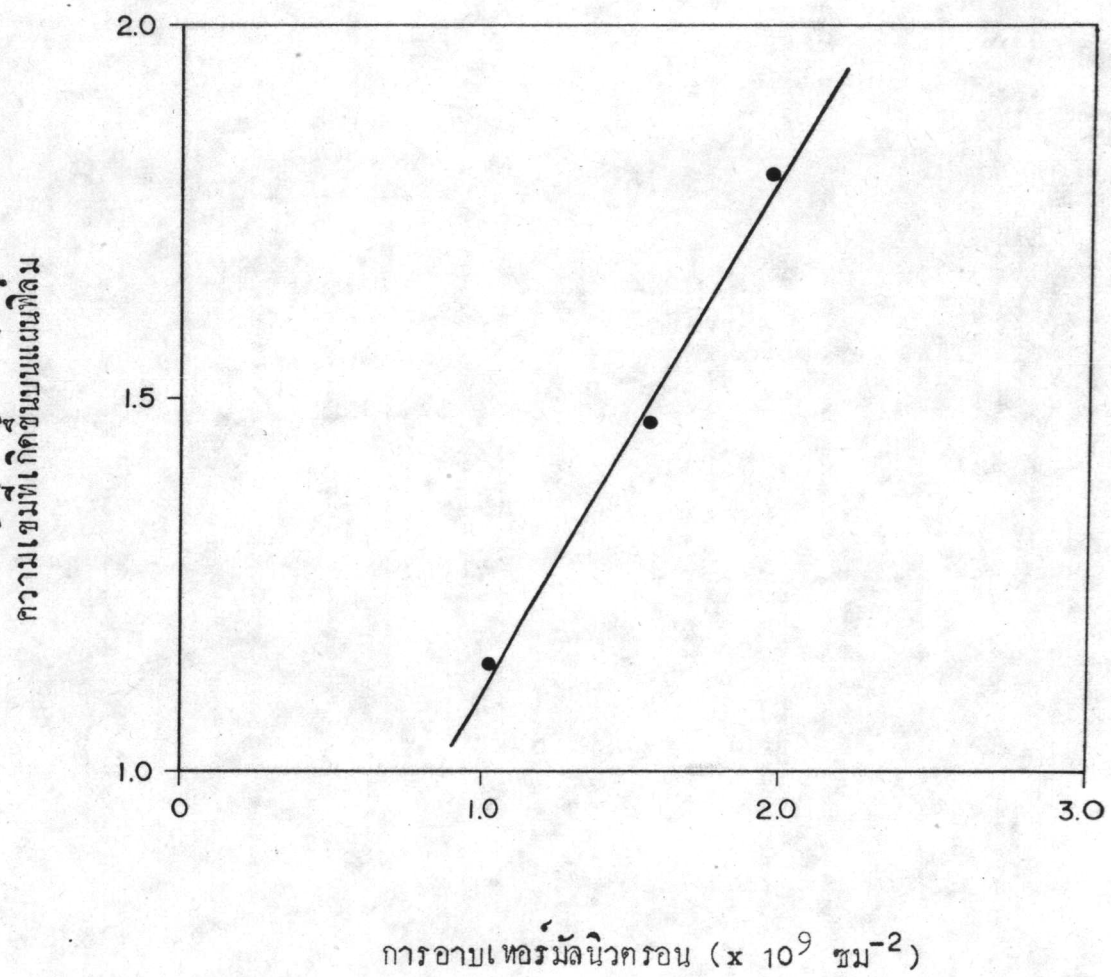
จุดประสงค์เพื่อต้องการตรวจสอบโครงสร้างภายในของสารรังสี และต้องการชี้ให้เห็นว่าสารรังสีที่มีรังสีในตัวเองนั้นสามารถตรวจสอบด้วยวิธีถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้วิธีถ่ายทอดได้ สารรังสีอิริเดียม-192 ที่ใช้เป็นสารตัวอย่างในการทดลองครั้งนี้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ในงานถ่ายภาพทางอุตสาหกรรม แต่ความแรงของรังสีได้ลดน้อยลงแล้ว และไม่ได้นำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดแล้ว อย่างไรก็ตามสารรังสีนี้ก็ยังปล่อยรังสีแกมมาออกมาตลอดเวลา เมื่อใช้เครื่องมือวัดรังสีแบบ GM ไปวัดจะได้อัตราความแรง 320 มิลลิ-เรินท์เก้นต่อชั่วโมง ที่ระยะติดกับสารรังสี

4.11.1 ทำการถ่ายภาพสารรังสีอิริเดียม-192 ด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียม

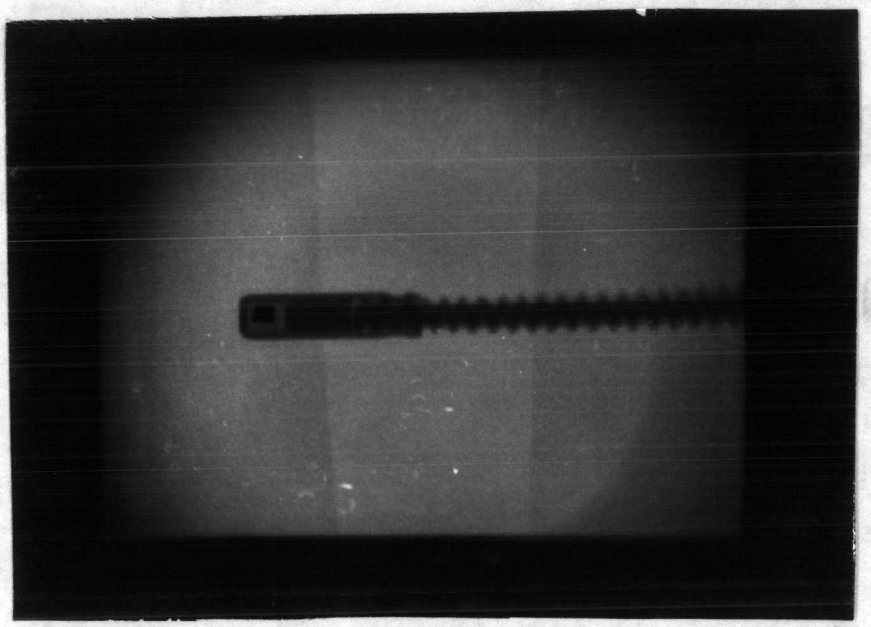
นำแผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียมบรรจุลงในตลับอลูมินัมที่แสงผ่านไม่ได้ การคำนวณหาเวลาในการถ่ายสารอิริเดียมนี้ดูจากกราฟรูปที่ 4.17 นำสารรังสีอิริเดียม-192 วางติดกับตลับอลูมินัม แล้วนำไปอาบเทอร์มัลนิวตรอนเป็นเวลา 14 นาที จากนั้นดึงเอาสารรังสี

กราฟรูปที่ 4.18

แสดงเส้นเทียบปรับระหว่างการอาบเทอร์มัลนิวตรอนกับความเข้มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม (สำหรับแผ่นเพิ่มความเข้มดิสโปรเซียม หนา 0.001 นิ้ว) โดยวิธีถ่ายทอด



นี้เก็บให้เรียบร้อยในกระปุกตะกั่ว ขั้นต่อไปนำแผ่นฟิล์ม **Kodak Industrex AA** บรรจุลงในตลับอลูมินัมโดยวางให้ทิดกับแผ่นเพิ่มความเข้ม โดยให้แผ่นเพิ่มความเข้มอยู่หลังฟิล์ม ปล่อยให้ฟิล์มนี้ได้รับรังสีจากแผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียมเป็นระยะเวลา 3 เท่าของค่าครึ่งชีวิต (162 นาที) จากนั้นก็นำแผ่นฟิล์มนี้ไปล้างในขบวนการล้างฟิล์ม ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.19

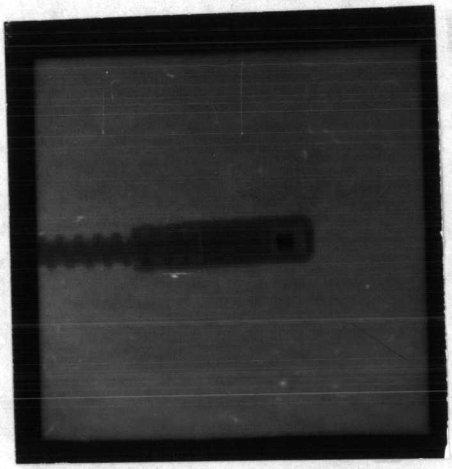


รูปที่ 4.19 แสดงการถ่ายภาพสารรังสีอิริเดียม-192 ด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอดและใช้แผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียม

4.11.2 ทำการถ่ายภาพสารรังสีอิริเดียม-192 ด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นเพิ่มความเข้มดิสโปรเซียม

การทดลองทำดังนี้ นำสารรังสีอิริเดียมอีกตัวหนึ่ง ซึ่งยังมีความแรงรังสีอยู่ซึ่งเมื่อใช้เครื่องวัดแบบ **GM** วัดจะได้อัตราความแรงมีค่า 290 มิลลิเรินท์เก่นต่อชั่วโมง และสารรังสีอิริเดียม-192 ตัวนี้เป็นคนละตัวกับตัวก่อน ขั้นตอนและวิธีการถ่ายกระทำเหมือนกับถ่ายภาพโดย

ใช้แผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียม ระยะเวลาในการอาบเทอร์มัลนิวตรอนคำนวณจากกราฟรูปที่ 4.18 ระยะเวลาในการถ่าย 9 นาที เวลาในการให้แผ่นฟิล์มรับรังสีจากแผ่นเพิ่มความเข้มดิสโปรเซียมเท่ากับ 3 เท่าของค่าครึ่งชีวิตของดิสโปรเซียม (7 ชั่วโมง) ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.20

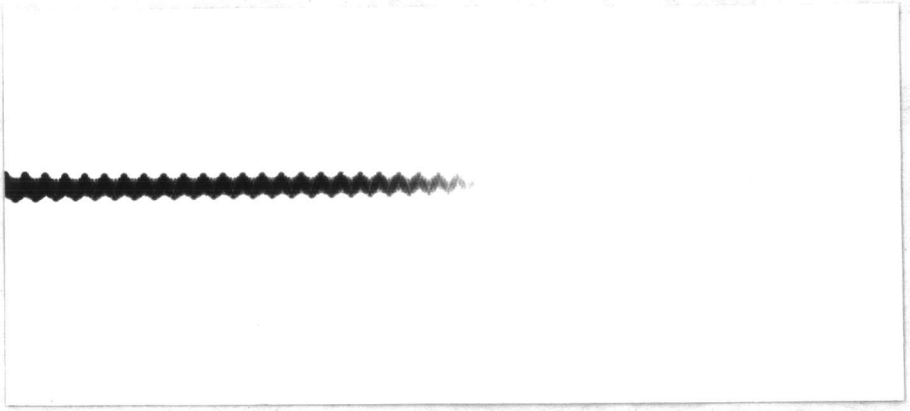


หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.20 แสดงการถ่ายภาพสารรังสีอิริเดียม-192 ด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอดและใช้แผ่นเพิ่มความเข้มดิสโปรเซียม

4.12 ทำการถ่ายภาพสารรังสีอิริเดียม-192 โดยใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

จุดประสงค์เพื่อเป็นการเปรียบเทียบว่าสารรังสีนี้สามารถถ่ายด้วยเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์หรือไม่ ในการถ่ายได้เลือกพลังงานของคลื่นรังสีเอกซ์ที่ขนาด 100 kVp 4 mAm และสารรังสีตัวที่นำมาเป็นสารตัวอย่างในการถ่ายภาพตรวจสอบภายในก็เป็นตัวที่เคยถ่ายด้วยวิธีนิวตรอนมาแล้ว ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงการถ่ายภาพสารรังสีอิริเดียม-192 ด้วยรังสีเอกซ์

ผลการทดลองไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดภายในของสารรังสีอิริเดียม-192 ได้เลย ทั้งนี้เพราะตัวของมันเองได้ปล่อยรังสีออกมาด้วยซึ่งเป็นผลทำให้แผ่นฟิล์มได้รับรังสีจากสารรังสีนี้ ซึ่งจะเห็นว่าฟิล์มจะเกิดความเข้มมากเกินไป คือแผ่นฟิล์มดำมืดหมดเลย