

## ส่วนที่ 2

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำหัววัด Gas Electron Multiplier (GEM) ประยุกต์ใช้ในการวัดอนุภาคนิวตรอนโดยใช้ตัวเปลี่ยนนิวตรอนทั้งชนิดของแข็ง (Solid neutron converters) และก๊าซ (Gaseous neutron converters) โดยได้มีการพิจารณาศึกษาตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็งจำนวน 2 ชนิดคือโบรอน-10 (ความหนา 1 ไมโครเมตร) และโบรอนธรรมชาติ (ความหนา 2.5 และ 3.5 ไมโครเมตร) และตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดก๊าซ 2 ชนิดคือ ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20 และก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30 โดยศึกษาเปรียบเทียบถึงความสามารถในการนับวัดและขนาดของสัญญาณของการใช้ตัวเปลี่ยนนิวตรอนร่วมกันในการตรวจวัดนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutrons) และนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) ซึ่งผลการวิจัยเบื้องต้นพบว่า หัววัด GEM ที่มีการใช้ตัวเปลี่ยนนิวตรอนทั้งชนิดของแข็งและก๊าซสามารถตรวจวัดนิวตรอนพลังงานต่ำได้ทุกชนิด ในขณะที่สามารถตรวจวัดนิวตรอนพลังงานสูงได้เพียงแค่หัววัด GEM ที่มีการใช้ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ร่วมกับตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็งทุกชนิด ทั้งนี้พบว่าหัววัด GEM ที่มีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1 ไมโครเมตร มีความสามารถในการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำได้ดีกว่าโบรอนธรรมชาติที่ความหนา 2.5 ไมโครเมตร เมื่อใช้ร่วมกับตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดก๊าซทุกชนิด ในขณะที่หัววัด GEM ที่มีการใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็งทุกชนิด สามารถตรวจวัดนิวตรอนพลังงานต่ำได้ดีกว่าหัววัด GEM ที่มีการใช้ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็งทุกชนิด แต่หัววัด GEM ที่มีการใช้ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็งทุกชนิด มีขนาดสัญญาณที่มากกว่าหัววัด GEM ที่มีการใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็งทุกชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าหัววัด GEM ที่มีการใช้ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็งทุกชนิด มีขนาดของสัญญาณ Background ที่สูงกว่าหัววัด GEM ที่มีการใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็งทุกชนิด

คำสำคัญ: หัววัด GEM, นิวตรอน, ตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็ง, ตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดก๊าซ

## Abstract

This research aims to study the possibility of utilizing the Gas Electron Multiplier (GEM) detector for neutron detection by using both solid and gaseous neutron converters. In this research, 2 types of solid neutron converters are used: Boron-10 (thickness 1  $\mu\text{m}$ ) and natural Boron (thickness 2.5 and  $\mu\text{m}$ ) and 2 types of gaseous neutron converters are used: gas mixtures of Ar/CO<sub>2</sub> (70:30) and He/CO<sub>2</sub> (80:20). Properties that are investigated are the ability to detect both fast neutrons and thermal neutrons by investigating on count rates and signal amplitudes. Results have shown that all combinations of solid neutron converters and gaseous neutron converters are able to detect thermal neutrons, while only combination of He/CO<sub>2</sub> with solid neutron converters are able to detect fast neutrons. Furthermore, results have shown that GEM detectors with 1- $\mu\text{m}$  Boron-10 and all gaseous neutron converters have better thermal neutron detection ability than 2.5- $\mu\text{m}$  natural Boron, while GEM detectors with Ar/CO<sub>2</sub> have better thermal neutron detection ability than He/CO<sub>2</sub> for all solid neutron converters. Results have also shown that backgrounds from GEM detectors with He/CO<sub>2</sub> are higher than while GEM detectors with Ar/CO<sub>2</sub>.

Key words: GEM detector, neutrons, gaseous neutron converters, solid neutron converters

## รายการรูปประกอบ

ภาพที่	คำบรรยาย	หน้า
1	ภาพขยายของแผ่น GEM ที่ประกอบไปด้วยรูขนาดเล็กๆจำนวนมาก	12
2	ภาพแสดงภาพตัดขวางและภาพด้านบนของรูบนแผ่น GEM	12
3	ภาพด้านซ้ายแสดงถึงสนามไฟฟ้าภายในรูบนแผ่น GEM ที่เกิดจากความต่างศักย์ประมาณ 300-400 โวลต์ ระหว่างแผ่นทองแดงด้านบนและด้านล่าง ภาพทางด้านขวาแสดงการเพิ่มจำนวนของกลุ่มอิเล็กตรอนที่ผ่านรูบนแผ่น GEM ที่มีค่าสนามไฟฟ้าที่สูงมาก	14
4	ภาพแสดงการขยายจำนวนของกลุ่มอิเล็กตรอนในแต่ละแผ่น GEM โดยที่ในขั้นตอนสุดท้าย กลุ่มอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ด้านล่างสุดของเครื่อง	14
5	ภาพแสดงค่าความสามารถในการขยายสัญญาณของหัววัด GEM ชนิดต่างๆ โดยการเปลี่ยนความต่างศักย์ระหว่างแผ่นทองแดงด้านบนและด้านล่างของแผ่น GEM	15
6	ภาพแสดงความละเอียดของการวัดพลังงานของหัววัด GEM โดยใช้โฟตอนพลังงาน 5.9 keV จาก Fe-55	16
7	ภาพแสดงค่าประสิทธิภาพในการตรวจวัดของหัววัด GEM โดยการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์โดยรวมของหัววัด GEM	16
8	ภาพแสดงค่าภาคตัดขวางนิวตรอน (Neutron Cross Section) ของธาตุชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาทำเป็นตัวเปลี่ยนนิวตรอนได้	18
9	ภาพแสดงแผ่น GEM พร้อมกรอบที่สามารถสั่งซื้อมาจาก CERN	20
10	ภาพตัดขวางของหัววัดนิวตรอน GEM	21
11	ภาพแสดงสัญญาณจากหัววัดนิวตรอน GEM โดยใช้ $^{55}\text{Fe}$ เป็นแหล่งปล่อยโฟตอน	22

12	ภาพแสดงการทดลองหัววัดนิวตรอน GEM	23
13	Micro flow box ภายใน Clean room ที่ใช้ในการประกอบหัววัด GEM	24
14	การประกอบหัววัด GEM	24
15	หัววัด GEM ที่มีการปิดฝาครอบ	24
16	การทดสอบการต่อวงจรไฟฟ้าของหัววัด GEM	24
17	ภาพแสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการแบ่งความต่างศักย์ไปยังส่วนต่างๆของหัววัด GEM	25
18	ภาพแสดงลักษณะสัญญาณบน Oscilloscope	26
19	ภาพแสดงค่านับวัดที่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่เริ่มเปิดและปิดก๊าซ	26
20	ภาพแสดงค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity) ของหัววัด GEM เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเป็น (a) 3 ลิตร/ชั่วโมง (b) 4.5 ลิตร/ชั่วโมง (c) 7.5 ลิตร/ชั่วโมง (d) 10.5 ลิตร/ชั่วโมง	27
21	ภาพแสดงค่านับวัดของหัววัด GEM ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3, 4.5, 7.5 และ 10.5 ลิตร/ชั่วโมง	28
22	ภาพแสดงขนาดสัญญาณอัตราการไหลของก๊าซ 3, 4.5, 7.5 และ 10.5 ลิตร/ชั่วโมง	28
23	ภาพแสดงภาพจำลองการไหลของก๊าซผ่านบริเวณต่างๆของหัววัด GEM เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเป็น (a) 3 ลิตร/ชั่วโมง (b) 4.5 ลิตร/ชั่วโมง (c) 7.5 ลิตร/ชั่วโมง (d) 10.5 ลิตร/ชั่วโมง	29
24	ภาพแสดงการตั้งอุปกรณ์การทดสอบการวัดนิวตรอน	30
25	ภาพแสดงค่านับวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1 $\mu\text{m}$ หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5 $\mu\text{m}$ กับก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ (Ar/CO <sub>2</sub> ) ในอัตราส่วน 70:30	31

26	<p>ภาพแสดงขนาดสัญญาณการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1 <math>\mu\text{m}</math> หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5 <math>\mu\text{m}</math> กับก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ (<math>\text{Ar}/\text{CO}_2</math>) ในอัตราส่วน 70:30</p>	31
27	<p>ภาพแสดงค่านับวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1 <math>\mu\text{m}</math> หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5 <math>\mu\text{m}</math> กับก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ (<math>\text{He}/\text{CO}_2</math>) ในอัตราส่วน 80:20</p>	32
28	<p>ภาพแสดงขนาดสัญญาณการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1 <math>\mu\text{m}</math> หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5 <math>\mu\text{m}</math> กับก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ (<math>\text{He}/\text{CO}_2</math>) ในอัตราส่วน 80:20</p>	32
29	<p>ภาพแสดงค่านับวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1 <math>\mu\text{m}</math> กับก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ (<math>\text{Ar}/\text{CO}_2</math>) ในอัตราส่วน 70:30 หรือ ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ (<math>\text{He}/\text{CO}_2</math>) ในอัตราส่วน 80:20</p>	33
30	<p>ภาพแสดงขนาดสัญญาณการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1 <math>\mu\text{m}</math> กับก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ (<math>\text{Ar}/\text{CO}_2</math>) ในอัตราส่วน 70:30 หรือ ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ (<math>\text{He}/\text{CO}_2</math>) ในอัตราส่วน 80:20</p>	33
31	<p>ภาพแสดงค่านับวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5 <math>\mu\text{m}</math> กับก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ (<math>\text{Ar}/\text{CO}_2</math>) ในอัตราส่วน 70:30 หรือ ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ (<math>\text{He}/\text{CO}_2</math>) ในอัตราส่วน 80:20</p>	34
32	<p>ภาพแสดงขนาดสัญญาณการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5 <math>\mu\text{m}</math> กับก๊าซผสมระหว่าง</p>	34

อาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ (Ar/CO<sub>2</sub>) ในอัตราส่วน 70:30 หรือ ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ (He/CO<sub>2</sub>) ในอัตราส่วน 80:20

- |    |  |    |
|----|--|----|
| 33 | ภาพแสดงค่านับวัดนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1 $\mu\text{m}$ หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5 $\mu\text{m}$ กับก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ (He/CO <sub>2</sub> ) ในอัตราส่วน 80:20        | 36 |
| 34 | ภาพแสดงขนาดสัญญาณการวัดนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1 $\mu\text{m}$ หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5 $\mu\text{m}$ กับก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ (He/CO <sub>2</sub> ) ในอัตราส่วน 80:20 | 37 |

## 1. บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากธาตุพลูโตเนียม (Plutonium หรือ Pu) และธาตุยูเรเนียม (Uranium หรือ U) เป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับการผลิตอาวุธนิวเคลียร์ (Nuclear Weapons) ที่มีพลังงานและความสามารถในการทำลายล้างสูง การควบคุมและการป้องกันการลักลอบขนย้ายหรือมีไว้ในครอบครองของธาตุทั้งสองอย่างผิดกฎหมายจึงเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งในการรักษาความมั่นคงและความปลอดภัยของประเทศ

โดยปกติ ธาตุทั้งสองชนิดรวมถึงธาตุหนักชนิดอื่นๆ จะทำปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน (Nuclear Fission) และปลดปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมาเป็นจำนวนมาก แต่เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ การตรวจวัดนิวตรอนเพื่อหาธาตุทั้งสองจึงทำได้ยาก วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการตรวจหาธาตุทั้งสองคือการใช้หัววัดที่สามารถตรวจวัดนิวตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในอดีต หัววัดนิวตรอนทั่วไปจะใช้ก๊าซ ฮีเลียม-3 (Helium-3 หรือ  $^3\text{He}$ ) เป็นส่วนประกอบหลักของหัววัดนิวตรอน ซึ่งหัววัดนิวตรอนที่ใช้ ฮีเลียม-3 นี้ มีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูงและผลการวัดที่ได้มีความน่าเชื่อถือ ทั้งนี้เนื่องจาก ฮีเลียม-3 มีค่าความเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับนิวตรอนหรือมีภาคตัดขวางกับนิวตรอน (Neutron cross section) ที่ค่อนข้างสูง โดยปกติ ฮีเลียม-3 จะถูกสกัดมาจากทริเทียม-3 (Tritium-3 หรือ  $^3\text{H}$ ) ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการรักษาความสมดุลของวัตถุนิวเคลียร์ต่างๆที่ใช้ในการผลิตหรือเก็บรักษาอาวุธนิวเคลียร์ แต่เนื่องจากในขณะนี้ มีความพยายามจากประเทศต่างๆทั่วโลกที่ต้องการจำกัดและลดจำนวนอาวุธนิวเคลียร์ ส่งผลให้ความต้องการทริเทียม-3 ในการรักษาความสมดุลของวัตถุนิวเคลียร์ต่างๆ ลดลงเป็นอย่างมาก การลดลงของความต้องการทริเทียม-3 ส่งผลกระทบให้การผลิตฮีเลียม-3 ลดลงเป็นอย่างมากเช่นกัน จนเกิดสภาวะการณ์ขาดแคลนและราคาที่สูงขึ้นของฮีเลียม-3 ขึ้นทั่วโลก นอกจากนี้ หลังจากเหตุการณ์ความไม่สงบจากผู้ก่อการร้ายที่ประเทศสหรัฐอเมริกาในวันที่ 9 กันยายน ปี พ.ศ. 2544 ความต้องการใช้หัววัดนิวตรอนซึ่งใช้ ฮีเลียม-3 เป็นส่วนประกอบหลัก เพื่อใช้ในการตรวจสอบหาและป้องกันการลักลอบขนย้ายวัตถุที่สามารถนำไปทำอาวุธนิวเคลียร์ของผู้ก่อการร้าย ได้เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก [1] ทั้งนี้ การลดจำนวนการผลิตและความต้องการที่เพิ่มขึ้นหลายเท่าตัวของฮีเลียม-3 ในการเพิ่มขีดความสามารถในการรักษาความมั่นคงของชาติในช่วงหลัง ส่งผลให้เกิดความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการผลิตคัดค้นหัววัดนิวตรอนชนิดอื่นที่ปราศจากฮีเลียม-3 หรือไม่ใช้ ฮีเลียม-3 เป็นส่วนประกอบหลักในการตรวจวัด

นอกจากความสำคัญของหัววัดนิวตรอนในการรักษาความมั่นคงของประเทศแล้ว การทำวิจัยไม่ว่าจะเป็นในด้านวิทยาศาสตร์หรืออุตสาหกรรม ก็มีการอาศัยหัววัดนิวตรอนเป็นอุปกรณ์หลักในการทำวิจัยเช่นกัน ตัวอย่างการวิจัยที่ต้องอาศัยหัววัดนิวตรอน เช่น

1. วัสดุศาสตร์: หัววัดนิวตรอนสามารถนำมาใช้ในการศึกษาและตรวจวัดโครงสร้างของวัสดุในระดับอังสตรอม (Angstrom) โดยอาศัยการวัดการกระเจิงของนิวตรอนกับวัสดุที่ต้องการศึกษา
2. เครื่องมือที่ใช้กับเครื่องเร่งอนุภาคหรือเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์: หัววัดนิวตรอนสามารถนำมาใช้ในการวัดและวิเคราะห์กำลังของเครื่องเร่งอนุภาคหรือเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้ เนื่องจากกำลังของเครื่องเร่งอนุภาคหรือเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์แปรผันโดยตรงกับความหนาแน่นและจำนวนของนิวตรอนที่ปล่อยออกมา
3. ดาราศาสตร์: หัววัดนิวตรอนสามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดนิวตรอนประเภททุติยภูมิ (Secondary Neutrons) ซึ่งเป็นอนุภาคหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นมาในชั้นบรรยากาศโลกจากรังสีคอสมิก (Cosmic ray)
4. การฉายรังสีทางการแพทย์: หัววัดนิวตรอนสามารถนำมาใช้ในการสร้างภาพ (Medical Imaging) จากการฉายนิวตรอนไปยังผู้ป่วย

จะเห็นได้ว่าจากความสำคัญของหัววัดนิวตรอนและสภาวะการณ์ขาดแคลนอย่างหนักของ ฮีเลียม-3 ซึ่งใช้เป็นองค์ประกอบหลักของหัววัดนิวตรอนชนิดเดิม ส่งผลให้ความจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาค้นคว้าหาหัววัดนิวตรอนชนิดอื่นที่ไม่มีการใช้ ฮีเลียม-3 เป็นองค์ประกอบหลัก มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อการคงอยู่ของการรักษาความมั่นคงของประเทศและการวิจัยต่างๆ ให้เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หัววัดอนุภาคทางรังสี Gas Electron Multiplier (GEM) [2] สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นหัววัดนิวตรอนแทนที่หัววัดชนิดเดิมที่ใช้ ฮีเลียม-3 เป็นองค์ประกอบหลักได้ เนื่องจาก หัววัดอนุภาคทางรังสี GEM มีความละเอียดในการวัดตำแหน่งในระดับที่สูง (ประมาณ 50 ไมครอน) นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการวัดที่รวดเร็ว มีความทนทานต่อรังสีที่ดี และมีความเป็นไปได้ในการผลิตหัววัดที่มีพื้นที่ตรวจวัดที่ใหญ่กว่าหัววัดชนิดอื่นๆ [3] ถึงแม้ว่าในอดีต หัววัดอนุภาคทางรังสี GEM จะถูกใช้ในการตรวจวัดอนุภาคทางรังสีที่มีประจุเป็นหลัก แต่ทั้งนี้ หัววัดอนุภาคทางรังสี GEM สามารถถูกดัดแปลงให้สามารถตรวจวัดนิวตรอนซึ่งเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุได้เช่นกัน โดยการเพิ่มตัวเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron Converters) เข้าไปในหัววัดอนุภาคทางรังสี GEM ซึ่งวิธีการเพิ่มตัวเปลี่ยนนิวตรอนสามารถทำได้หลายวิธีแต่วิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมคือการใช้ก๊าซหรือแผ่นฟิล์มที่มีส่วนประกอบของ โบรอน-10 (Boron-10 หรือ  $^{10}\text{B}$ ), ลิเทียม-6 (Lithium-6 หรือ  $^6\text{Li}$ ), ไฮโดรเจน (Hydrogen-1 หรือ  $^1\text{H}$ ) หรือ ฮีเลียม-4 (Helium-4 หรือ  $^4\text{He}$ ) เพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนให้เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า โดยที่

เมื่อนิวตรอนผ่านเข้ามาภายในหัววัดอนุภาคทางรังสี GEM จะเข้าทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับตัวเปลี่ยนนิวตรอนเหล่านี้ และก่อให้เกิดอนุภาคแอลฟา ( $\alpha$ ) ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุที่สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของก๊าซภายในหัววัด ก่อให้เกิดการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกมาจากโมเลกุลของก๊าซ (Ionization) ซึ่งต่อมา อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเพิ่มจำนวนมากขึ้นหลายเท่าตัวเมื่อผ่านเข้าสู่กระบวนการขยายสัญญาณภายในหัววัดอนุภาคทางรังสี GEM

ถึงแม้ว่า จากการศึกษาและการวิจัยเบื้องต้นจะแสดงให้เห็นว่าหัววัดอนุภาคทางรังสี GEM สามารถนำไปใช้ตรวจวัดนิวตรอนได้จริง แต่ในความเป็นจริง ความรู้และความเข้าใจถึงประสิทธิภาพของตัวเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้ในหัววัดอนุภาคทางรังสี GEM ยังต้องการการศึกษาและการพัฒนาเป็นอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากค่าประสิทธิภาพในการตรวจวัดนิวตรอน (Neutron Detection Efficiency) ของก๊าซชนิดอื่นนอกจาก ฮีเลียม-3 ยังอยู่ในระดับที่ต่ำ (ประมาณ 1-2%) [4] เหตุผลหนึ่งซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการตรวจวัดนิวตรอนมีระดับต่ำคือค่าความเป็นไปได้ที่อนุภาคนิวตรอนจะทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับอนุภาคของก๊าซชนิดอื่นเมื่อเปรียบเทียบกับฮีเลียม-3 อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า ดังนั้นวิธีการหนึ่งที่จะเพิ่มค่าความเป็นไปได้ในการที่อนุภาคนิวตรอนจะทำปฏิกิริยากับอนุภาคของก๊าซคือการเพิ่มระยะทางที่นิวตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ได้ภายในหัววัดอนุภาคทางรังสี GEM ซึ่งการเพิ่มระยะทางนี้จะทำให้ออกาสที่นิวตรอนเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคของก๊าซเพิ่มมากขึ้น แต่ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงลักษณะของหัววัดอนุภาคทางรังสี GEM จะทำให้คุณสมบัติการทำงานของเครื่องมือบางส่วนเปลี่ยนไป ดังนั้นการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหัววัดจึงเป็นสิ่งจำเป็น นอกจากนี้ การศึกษาถึงประสิทธิภาพของตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดต่างๆ ยังสามารถทำให้เกิดการเปรียบเทียบและสามารถเลือกชนิดของวัสดุที่เพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดนิวตรอน

การทำวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพของหัววัดนิวตรอน GEM จากการใช้ตัวเปลี่ยนอนุภาคนิวตรอนชนิดต่างๆ จะส่งผลประโยชน์ต่อการวิจัยที่ต้องอาศัยการตรวจวัดนิวตรอนเป็นอย่างมาก ซึ่งงานวิจัยอื่นๆ สามารถนำเอาผลการวิจัยนี้ไปใช้ในการตัดสินใจเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆ ได้อย่างแพร่หลาย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของหัววัดนิวตรอนจาก GEM จากการใช้ตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็ง (แผ่นฟิล์มโบรอน) และชนิดก๊าซ (He/CO<sub>2</sub>) ร่วมกัน
2. เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของหัววัดนิวตรอนจาก GEM จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาของตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็ง (แผ่นฟิล์มโบรอน)

3. เพื่อศึกษาและคัดเลือกลักษณะของตัวเปลี่ยนนิวตรอน ที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพในการตรวจวัดนิวตรอนมีค่าสูงสุด
4. เพื่อนำเสนอผลการวิจัยในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ผู้ทำการวิจัยทำการประกอบหัววัดนิวตรอนจาก หัววัด GEM โดยการใช้ตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็ง (แผ่นฟิล์มโบรอน) และชนิดก๊าซ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ร่วมกัน
2. ผู้ทำการวิจัยทำการเก็บข้อมูลการตรวจวัดนิวตรอนโดยใช้  $\text{Am}/\text{Be}$  เป็นแหล่งปล่อยนิวตรอน ทั้งนี้ ผู้ทำการวิจัยจะทำการศึกษาและเปรียบเทียบถึงคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปของหัววัดนิวตรอน GEM เมื่อมีการเปลี่ยนความหนาของแผ่นฟิล์มโบรอน
3. ข้อมูลที่ได้ทั้งหมด ผู้ทำการวิจัยจะนำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพและลักษณะทางกายภาพของสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม Matlab และ Signal Express
4. ผลการวิจัยที่ได้จะถูกนำไปเผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ และนำไปใช้ในการวิจัยเพื่อสร้างเครื่องตรวจหาวัตถุอันตรายที่สามารถนำไปสร้างอาวุธนิวเคลียร์ หรือนำไปใช้ในการวิจัยเชิงการแพทย์เพื่อสร้างเครื่องสร้างภาพจากนิวตรอน (Neutron Medical Imaging) ที่มีประสิทธิภาพที่สูง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ด้านวิชาการ
  - ข้อมูลและความรู้เกี่ยวกับการงานวิจัย สามารถนำไปใช้ในการวิจัยในอนาคต ไม่ว่าจะเป็นงานวิจัยในด้านความมั่นคงของประเทศ ด้านการแพทย์หรือด้านวิทยาศาสตร์
  - ผลการวิจัยสามารถนำไปเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ เช่น วารสาร Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometer, Detectors and Associated Equipment ในหัวข้อ The Use of Boron Film and  $\text{He}/\text{CO}_2$  in GEM-Based Neutron Detector
  - เป็นการก่อตั้งงานวิจัยเกี่ยวกับหัววัด GEM ขึ้นเป็นแห่งแรกในประเทศไทย
  - มีการร่วมมือในด้านการวิจัยกับสถาบันการวิจัยและมหาวิทยาลัยชั้นนำในต่างประเทศ
2. ด้านนโยบาย

- ส่งเสริมความร่วมมือทางด้านเทคโนโลยีกับหน่วยงานต่างประเทศ

### 3. ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์

- หากงานวิจัยสามารถหาวัสดุที่มีราคาถูกกว่าฮีเลียม-3 ในการนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจหาวัตถุอันตรายที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตอาวุธนิวเคลียร์ได้ จะเป็นการลดต้นทุนในเชิงเศรษฐกิจได้เป็นอย่างมาก
- การส่งเสริมงานวิจัยในด้านการตรวจหาวัตถุอันตรายในการขนส่ง (Cargo shipping) จะช่วยส่งเสริมให้เกิดความเชื่อมั่นในการขนส่งระหว่างประเทศ และเป็นการเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับนักลงทุน

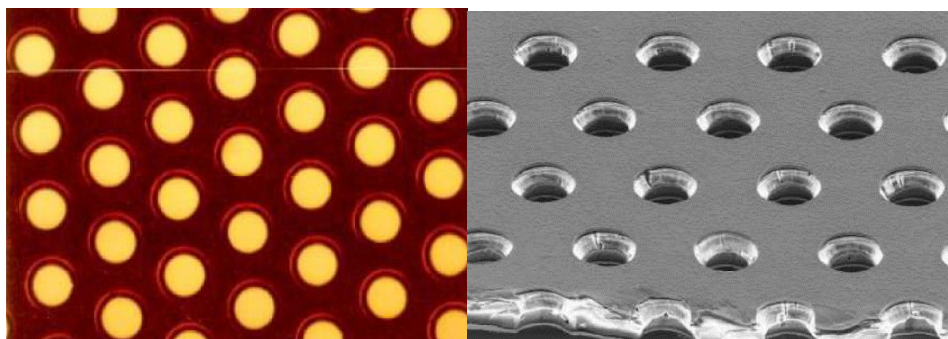
### 4. ด้านสังคมและชุมชน

- การทำวิจัยเกี่ยวกับหัววัดนิวตรอนซึ่งสามารถนำมาใช้ในการตรวจหาวัตถุอันตราย เป็นการช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน

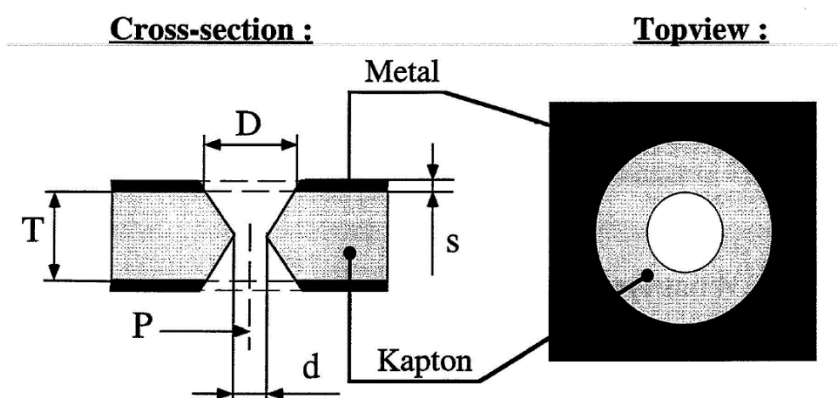
## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

หัววัด Gas Electron Multiplier (GEM) เป็นหัววัดที่ใช้ก๊าซในการขยายสัญญาณจากการตรวจวัดอนุภาคทางรังสี หัววัด GEM ถูกคิดค้นโดย F. Sauli และกลุ่มนักวิจัยที่ CERN ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ในปี ค.ศ. 1997 [5] ส่วนประกอบหลักของหัววัด GEM ประกอบไปด้วย แผ่น GEM ซึ่งเป็นแผ่นที่ประกอบไปด้วย แผ่นฉนวนไฟฟ้าที่ทำจากแคปตอน (Kapton หรือ Polyimide) เป็นแกนกลางของแผ่น มีความหนาประมาณ 50 ไมครอน ด้านบนและด้านล่างของแผ่นแคปตอน มีแผ่นโลหะที่ทำจากทองแดง ความหนาประมาณ 5 ไมครอน นอกจากนี้ ทิวทั้งแผ่นของแผ่น GEM จะมีรูขนาดเล็กเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 70 ไมครอน และแต่ละรูจะอยู่ห่างกันประมาณ 140 ไมครอน [6]



ภาพที่ 1: ภาพขยายของแผ่น GEM ที่ประกอบไปด้วยรูขนาดเล็กจำนวนมาก



ภาพที่ 2: ภาพแสดงภาพตัดขวางและภาพด้านบนของรูบนแผ่น GEM

ตัวแปรที่แสดงบนภาพที่ 2 มีความหมายดังนี้คือ

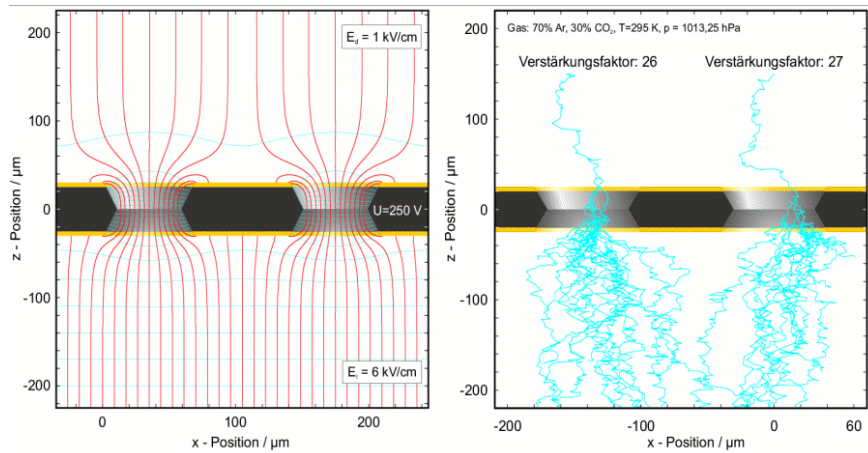
- D: เส้นผ่านศูนย์กลางของรูบนแผ่นทองแดง
- d: เส้นผ่านศูนย์กลางของรูบนแผ่นแคปตอน
- P: ระยะห่างระหว่างรูที่อยู่ใกล้กันที่สุด
- T: ความหนาของแผ่นแคปตอน
- s: ความหนาของแผ่นทองแดง

ลักษณะของรูบนแผ่น GEM มีสองแบบคือ แบบรูปทรงกรวยสองด้าน ดังที่แสดงในภาพที่ 2 และแบบรูปทรงกรวยด้านเดียว ทั้งนี้ลักษณะของรูบนแผ่น GEM ขึ้นอยู่กับวิธีการเจาะรูบนแผ่น GEM ในอดีต ลักษณะของรูจะเป็นแบบรูปทรงกรวยสองด้านซึ่งเกิดจากการเจาะรูโดยใช้วิธี Double Masking แต่ในปัจจุบัน เพื่อเป็นการเพิ่มความสามารภในการผลิตแผ่น GEM ให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและเพื่อหลีกเลี่ยงการเจาะรูที่ไม่ตรงกันจากด้านบนและด้านล่างของแผ่น GEM การเจาะรูโดยการใช่วิธี Single Masking จึงเป็นที่นิยมมากขึ้น โดยที่การเจาะรูวิธีนี้ ทำให้รูบนแผ่น GEM มีลักษณะเป็นแบบรูปทรงกรวยด้านเดียว

ส่วนประกอบอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญของหัววัด GEM คือก๊าซที่ใช้ในการขยายสัญญาณภายในหัววัด GEM ในทางทฤษฎี หัววัด GEM สามารถทำงานได้โดยใช้เพียงก๊าซเฉื่อยบริสุทธิ์ เช่น อาร์กอน (Ar) แต่ในทางปฏิบัติแล้ว เพื่อเป็นการเพิ่มความมีเสถียรภาพในการทำงานของตัวเครื่อง จึงมีการใช้ก๊าซผสมระหว่างก๊าซเฉื่อยและก๊าซอื่นๆ ที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของหัววัด GEM เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซผสมมาตรฐานที่ใช้เป็นส่วนมากในเกือบทุกงานวิจัยคือก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนและคาร์บอนไดออกไซด์ ในอัตราส่วน 70:30

หลักการการทำงานที่สำคัญของหัววัด GEM มีดังต่อไปนี้

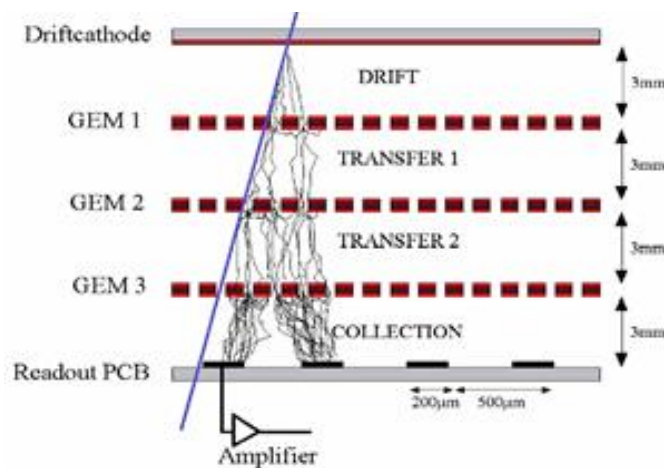
1. ความต่างศักย์ประมาณ 300-400 โวลต์ ระหว่างแผ่นทองแดงด้านบนและด้านล่างของแผ่น GEM ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีความแรงสูงมากภายในรูบนแผ่น GEM
2. เมื่อมีอนุภาคทางรังสีผ่านหัววัดเข้ามาในช่วงดริฟท์ (Drift Region) ซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นแคโทด กับแผ่นอิเล็กโทดหรือแผ่น GEM แผ่นแรก อนุภาคเหล่านี้จะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการแตกตัว (Ionization) ออกมาจากโมเลกุลของก๊าซ (Primary Electrons) ซึ่งเมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนเหล่านี้ผ่านเข้าไปภายในสนามไฟฟ้าของรูบนแผ่น GEM จะมีการเพิ่มพลังงานของกลุ่มอิเล็กตรอนเป็นอย่างมากและกลุ่มอิเล็กตรอนเหล่านี้จะสามารถไปทำให้อิเล็กตรอนตัวอื่นๆ เกิดการแตกตัวออกมาจากโมเลกุลของก๊าซเพิ่มมากขึ้น เกิดเป็นกลุ่มของอิเล็กตรอนที่ใหญ่ขึ้น (Electron Avalanche) กระบวนการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนนี้สามารถแสดงได้ตามภาพด้านล่าง



ภาพที่ 3: ภาพด้านซ้ายแสดงถึงสนามไฟฟ้าภายในรูบนแผ่น GEM ที่เกิดจากความต่างศักย์ประมาณ 300-400 โวลต์ ระหว่างแผ่นทองแดงด้านบนและด้านล่าง ภาพทางด้านขวาแสดงการเพิ่มจำนวนของกลุ่มอิเล็กตรอนที่ผ่านรูบนแผ่น GEM ที่มีค่าสนามไฟฟ้าที่สูงมาก

3. หัววัด GEM สามารถทำงานได้ โดยใช้แผ่น GEM เพียงหนึ่งแผ่นหรือที่เรียกว่า Single GEM detector (SGEM) หรืออาจใช้แผ่น GEM สองแผ่นหรือที่เรียกว่า Double GEM detector (DGEM) หรืออาจใช้แผ่น GEM สามแผ่นหรือที่เรียกว่า Triple GEM detector (TGEM) ทั้งนี้การเลือกชนิดของหัววัด GEM ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และค่าของการขยายสัญญาณ (Gain) ที่ต้องการ

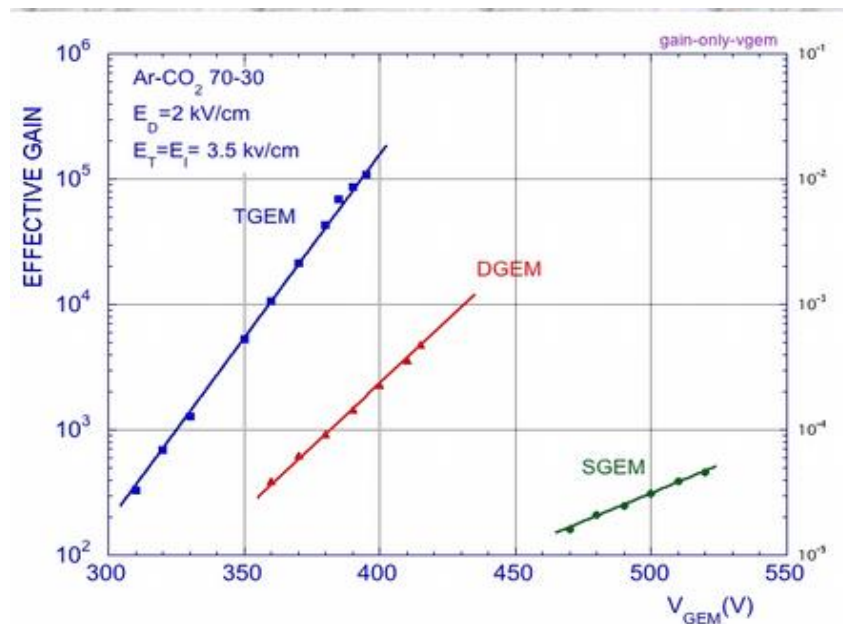
4. หลังจากกลุ่มอิเล็กตรอนผ่านการขยายสัญญาณในระยะสุดท้าย กลุ่มของอิเล็กตรอนจะถูกจับโดยตัวอ่านสัญญาณที่อยู่ด้านล่างสุดของหัววัด GEM กลุ่มอิเล็กตรอนเหล่านี้จะสร้างสัญญาณที่มีขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณต่อไป



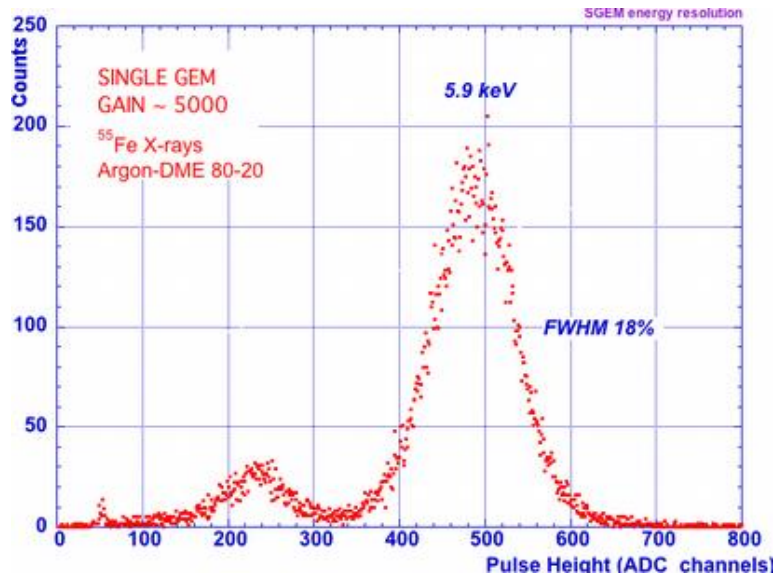
ภาพที่ 4: ภาพแสดงการขยายจำนวนของกลุ่มอิเล็กตรอนในแต่ละแผ่น GEM โดยที่ในขั้นตอนสุดท้าย กลุ่มอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ด้านล่างสุดของเครื่อง

หัววัด GEM ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากนักวิจัยหลายแขนงและได้มีการทำวิจัยเพื่อทำการศึกษาและพัฒนาหัววัด GEM ผลการวิจัยในเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า หัววัด GEM มีข้อดีที่จะสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเหนือกว่าหัววัดชนิดเดิม ดังต่อไปนี้ [7][8]

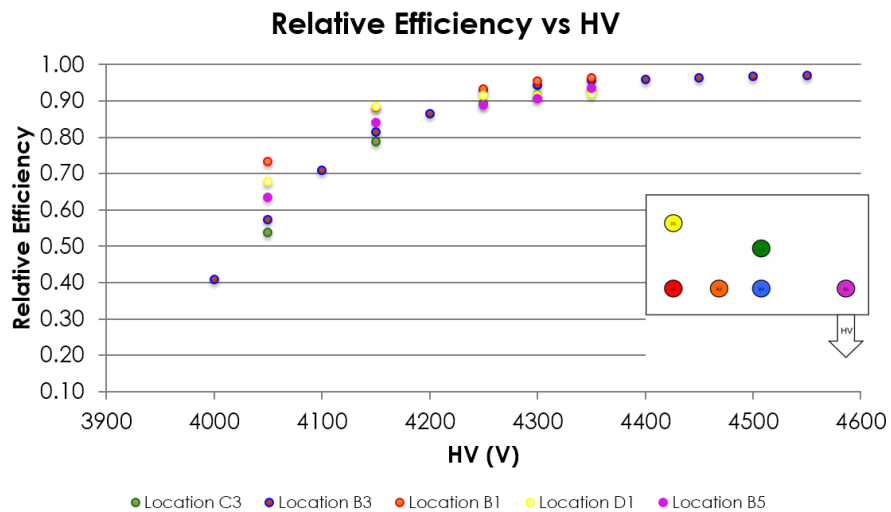
- หัววัด GEM สามารถทำงานได้ในก๊าซเกือบทุกชนิด รวมถึงก๊าซเฉื่อยบริสุทธิ์ เช่น อาร์กอน
- หัววัด GEM สามารถขยายจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในตอนแรกได้มากถึงหนึ่งแสนเท่า
- หัววัด GEM มีความละเอียดในด้านการวัดตำแหน่งถึง 50 ไมครอน
- หัววัด GEM มีความละเอียดในด้านการวัดพลังงานที่ 18% FWHM สำหรับโฟตอนพลังงาน 5.9 keV
- หัววัด GEM สามารถวัดอนุภาคทางรังสีได้ในอัตราที่สูงถึง 1 MHz/mm<sup>2</sup>
- สามารถสร้างหัววัด GEM ให้มีพื้นที่ที่สามารถวัดได้ถึง 2500 cm<sup>2</sup> และมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถผลิตหัววัด GEM ให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นได้ในอนาคต
- ลักษณะและการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับตรวจจับสัญญาณมีความยืดหยุ่นสูง และสามารถออกแบบให้มีรูปแบบตามที่ต้องการได้
- หัววัด GEM มีความแข็งแรงและมีขนาดเล็ก อีกทั้งยังมีราคาที่ย่อมเยาเมื่อเทียบกับหัววัดชนิดอื่น ๆ ที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 5: ภาพแสดงค่าความสามารถในการขยายสัญญาณของหัววัด GEM ชนิดต่างๆ โดยการเปลี่ยนความต่างศักย์ระหว่างแผ่นทองแดงด้านบนและด้านล่างของแผ่น GEM



ภาพที่ 6: ภาพแสดงความละเอียดของการวัดพลังงานของหัววัด GEM โดยใช้โฟตอนพลังงาน 5.9 keV จาก Fe-55



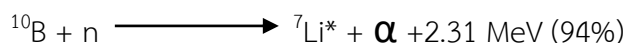
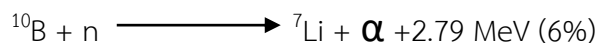
ภาพที่ 7: ภาพแสดงค่าประสิทธิภาพในการตรวจวัดของหัววัด GEM โดยการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์โดยรวมของหัววัด GEM

หัววัด GEM สามารถนำมาประยุกต์ในงานวิจัยได้หลายชนิด เช่น

- การวิเคราะห์พลาสมาจากรังสีเอ็กซ์ (Ultrafast soft X-ray Plasma Diagnostics)
- เครื่องซินติเลเตอร์จากหัววัด GEM (Scintillating GEMs)
- หัววัดนิวตรอน (Neutron Detection)
- เครื่องสร้างภาพความเร็วสูงจากหัววัด GEM (High Rate GEM Detectors for Portal Imaging)
- หัววัดโฟโตอิเล็กตรอน (GEM Gas Photomultiplier)

- หัววัดรังสีเอ็กซ์ในงานด้านดาราศาสตร์ (X-ray Polarimeter Astrophysics)

ถึงแม้ว่าหัววัด GEM จะถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดอนุภาคที่มีประจุและโฟตอนพลังงานต่ำเป็นหลัก แต่หัววัด GEM สามารถถูกดัดแปลงให้สามารถตรวจวัดนิวตรอนซึ่งเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุได้โดยการเพิ่มตัวเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron Converters) เข้าไปในหัววัด GEM ทั้งนี้ความสามารถในการเปลี่ยนนิวตรอนให้เป็นอนุภาคที่มีประจุนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนนิวตรอนที่เกิดขึ้นในช่วงดริฟท์ (Drift Region) จากปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ ระหว่างนิวตรอนและไอโซโทปที่เหมาะสมของตัวเปลี่ยนนิวตรอน วิธีการหนึ่งในการที่จะเพิ่มตัวเปลี่ยนนิวตรอนเข้าไปในหัววัด GEM คือการใช้ก๊าซหรือแผ่นฟิล์มที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์กับนิวตรอน เพิ่มเข้าไปในหัววัด GEM ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนนิวตรอนให้เป็นอนุภาคที่มีประจุ เช่นอนุภาคแอลฟา ( $\alpha$ ) ได้ โดยก๊าซหรือแผ่นฟิล์มที่สามารถนำมาทำเป็นตัวเปลี่ยนนิวตรอนได้แก่ ก๊าซหรือแผ่นฟิล์มที่มี ไฮโดรเจน-1 หรือ ฮีเลียม-3 หรือ ลิเทียม-6 หรือ โบรอน-10 เป็นส่วนประกอบหลัก เมื่อนิวตรอนทำปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์กับตัวเปลี่ยนนิวตรอนเหล่านี้ อนุภาคที่ได้คือ อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานประมาณ 2 MeV ตัวอย่างของปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ ระหว่างนิวตรอนกับโบรอน-10 สามารถแสดงได้ดังนี้

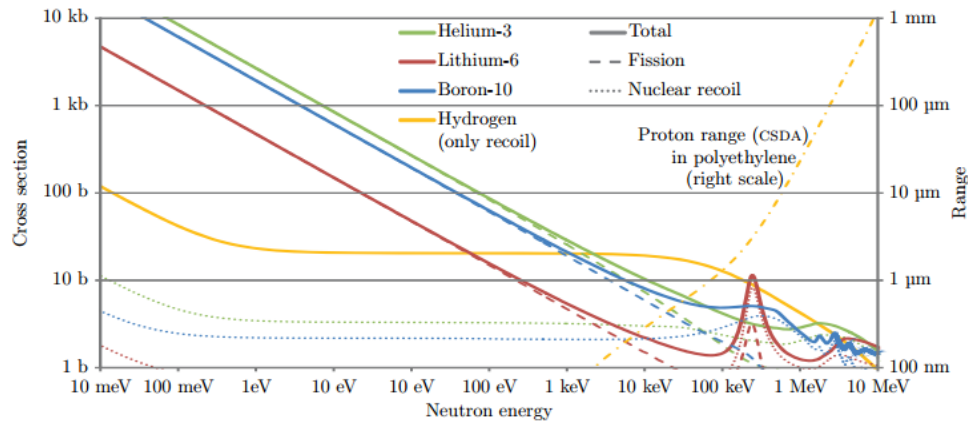


โดยที่  $^7\text{Li}^*$  คือลิเทียมที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าพลังงานต่ำสุด ทั้งนี้  $^7\text{Li}^*$  จะทำการปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 0.48 MeV ออกมา แล้วกลับสู่ระดับพลังงานต่ำสุดต่อไป อนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของก๊าซภายในหัววัดและทำให้อิเล็กตรอนเกิดการแตกตัว (Ionization) ออกมาจากโมเลกุลของก๊าซ กลุ่มของอิเล็กตรอนเหล่านี้จะผ่านเข้าสู่กระบวนการขยายสัญญาณต่อไป ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ทางผู้ทำการวิจัยเชื่อว่าการทำวิจัยเกี่ยวกับการใช้หัววัด GEM มาใช้ในการตรวจวัดนิวตรอนโดยใช้ตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็งและชนิดก๊าซร่วมกัน จะทำให้เกิดความรู้และผลประโยชน์เป็นอย่างมากต่องานวิจัยที่ต้องใช้หัววัดนิวตรอนไม่ว่าจะเป็นในด้านความมั่นคงของประเทศ ด้านการแพทย์ และด้านการทำวิจัยทางวิทยาศาสตร์

## 2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

ความสามารถในการตรวจวัดนิวตรอนของหัววัดนิวตรอนโดยทั่วไป ขึ้นอยู่กับค่าภาคตัดขวางนิวตรอน (Neutron Cross Section) ของวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron Converter) เป็นสำคัญ โดยค่าภาคตัดขวางนิวตรอนในวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวเปลี่ยนนิวตรอนในแต่ละชนิด เป็นไปตามภาพที่ 8



ภาพที่ 8: ภาพแสดงค่าภาคตัดขวางนิวตรอน (Neutron Cross Section) ของธาตุชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาทำเป็นตัวเปลี่ยนนิวตรอนได้ [4]

จากภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่า ธาตุฮีเลียม-3 มีความเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับนิวตรอนหรือมีค่าภาคตัดขวางนิวตรอน (Neutron Cross Section) มากที่สุด แต่เนื่องจากปัญหาการขาดแคลน และราคาที่สูงขึ้นของฮีเลียม-3 ทำให้เกิดความจำเป็นที่จะต้องหาวัสดุชนิดอื่นมาทดแทนการใช้ฮีเลียม-3

การวิจัยโดยใช้หัววัด GEM มาใช้ในการตรวจวัดนิวตรอน โดยปกติจะใช้แผ่นฟิล์มหรือก๊าซที่มีส่วนประกอบของโบรอน-10 ทั้งนี้เนื่องจากโบรอน-10 หากไม่รวมถึงฮีเลียม-3 มีความเป็นไปได้ในการทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับนิวตรอนหรือค่าภาคตัดขวางนิวตรอน (Neutron Cross Section) ที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุชนิดอื่นๆ นักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติการทำงานของแผ่นฟิล์มโบรอน-10 และผลการวิจัยที่ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะใช้โบรอน-10 เป็นตัวเปลี่ยนนิวตรอนเพื่อทดแทนฮีเลียม-3 [3][10][11] แต่ทั้งนี้ผลการวิจัยต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพในการตรวจวัดนิวตรอนเมื่อใช้แผ่นฟิล์มที่ทำขึ้นจากโบรอน-10 ยังอยู่ในระดับต่ำ (ประมาณ 1-2%) ทั้งนี้เนื่องจากการที่อนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ จะสามารถผ่านแผ่นฟิล์มโบรอน-10 ออกมาได้ นั่น ความหนาของแผ่นฟิล์มจะต้องอยู่ในระดับเพียง 2-5 ไมครอน ซึ่งเป็นการลดโอกาสในการเปลี่ยนนิวตรอนเป็นอนุภาคแอลฟาให้น้อยลง ทั้งนี้หากพิจารณาถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ของตัวเปลี่ยนนิวตรอนกับนิวตรอน ( $R$ )

$$R = \int \phi(E)N\sigma(E)dE$$

โดยที่  $\phi = \int \phi(E)dE$  คือฟลักซ์ของนิวตรอน (Neutron Flux)

$N$  คือจำนวนอะตอมของตัวเปลี่ยนนิวตรอน

$\sigma(E)$  คือค่าภาคตัดขวางนิวตรอน (Neutron Cross Section)

จะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอน ( $R$ ) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า  $\sigma(E)$  เพียงเท่านั้นแต่ยังขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของตัวเปลี่ยนนิวตรอนด้วยเช่นกัน โดยที่จำนวนอะตอมของตัวเปลี่ยนนิวตรอนนี้แปรผันโดยตรงกับปริมาตรหรือระยะทางที่นิวตรอนสามารถทำปฏิกิริยากับนิวตรอนได้ ผู้ทำการวิจัยเห็นว่าหากมีการเพิ่มเติมตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดก๊าซ (Gaseous Neutron Converters) เช่นก๊าซ He/CO<sub>2</sub> จะช่วยเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเปลี่ยนนิวตรอนกับนิวตรอนได้ การใช้ก๊าซที่มีส่วนประกอบของฮีเลียม ช่วยลดข้อจำกัดที่การเกิดปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ต้องเกิดขึ้นในระยะทางเพียง 2-5 ไมครอนอย่างเช่นในกรณีการใช้แผ่นฟิล์มเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ การใช้ตัวเปลี่ยนนิวตรอนในสถานะก๊าซยังทำให้สามารถเกิดการเปลี่ยนนิวตรอนได้ในขั้นตอนของการขยายสัญญาณ (Amplification Stage) ซึ่งโดยปกติ การใช้ตัวเปลี่ยนนิวตรอนในสถานะของแข็งเพียงอย่างเดียว การเปลี่ยนนิวตรอนจะถูกจำกัดให้อยู่เพียงแคในช่วงดริฟท์ (Drift Region)

นอกจากนี้เนื่องจาก ผู้ทำวิจัย ได้รับทุนวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ ในหัวข้อเรื่อง Performances of the Gas Electron Multiplier (GEM) Detector as a Neutron Detector using Solid Neutron Converters โดยเป็นการศึกษาและพัฒนาหัววัดนิวตรอนจาก GEM โดยใช้ตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็งเพียงอย่างเดียว ผู้ทำวิจัยเห็นว่าหากมีการทำวิจัยเพิ่มเติมโดยมีการใช้ตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดก๊าซ (He/CO<sub>2</sub>) ร่วมกับตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็ง (แผ่นฟิล์มโบรอน) จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของหัววัดนิวตรอนให้ดียิ่งขึ้น ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้น

### 3. วิธีการทำวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

#### 3.1 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์

- สั่งซื้อชิ้นส่วนของหัววัด GEM ขนาดมาตรฐาน 10x10 ตารางเซนติเมตร ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่น GEM และอุปกรณ์อื่นๆ จากกลุ่มนักวิจัยที่ CERN ลักษณะของแผ่น GEM มีลักษณะดังภาพที่ 9



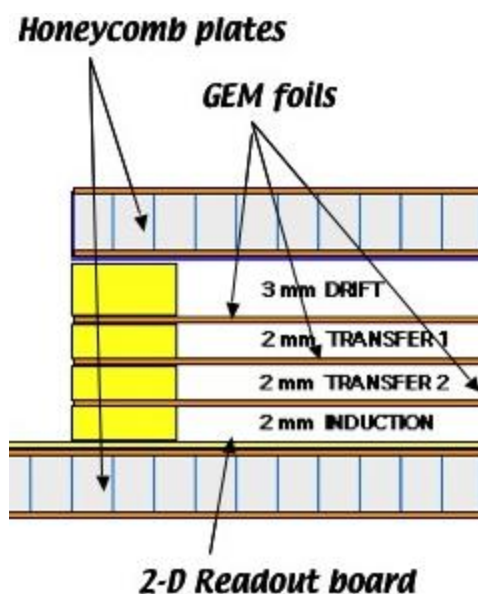
ภาพที่ 9: ภาพแสดงแผ่น GEM พร้อมกรอบที่สามารถสั่งซื้อมาจาก CERN

- สั่งซื้อก๊าซชนิดต่างๆ ที่จะนำมาเป็นตัวเปลี่ยนนิวตรอน ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20 ให้มีจำนวนที่พอเพียงสำหรับการวิจัย นอกจากนี้ ยังต้องมีการสั่งซื้อก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนและคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30 และก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ( $\text{N}_2$ ) เพื่อใช้ในการทำความสะอาดหัววัดและทดสอบการทำงานของหัววัด
- เตรียมแผ่นฟิล์มที่มีการเคลือบด้วยโบรอน-10 และโบรอนธรรมชาติ เพื่อนำมาใช้เป็นตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็ง
- เตรียมจัดหาแหล่งปล่อยนิวตรอน โดยใช้ Am/Be ซึ่งสามารถขอใช้จากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติเพื่อใช้ในการวิจัย

### 3.2 การทดลอง

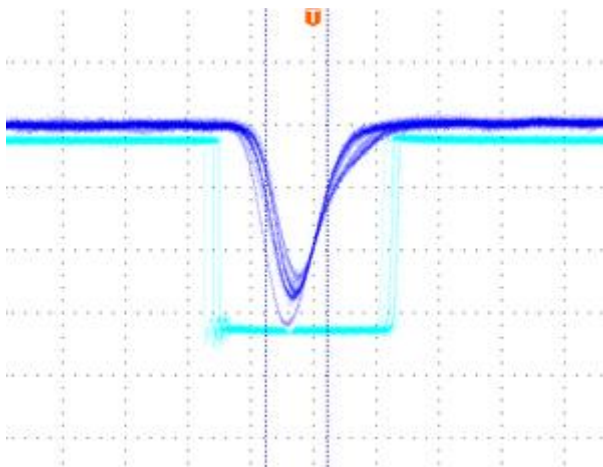
• ในขั้นตอนการประกอบหัววัดนิวตรอน GEM จำเป็นที่จะต้องใช้อำนาจปฏิบัติการที่มีความสะอาดในระดับสูง (Cleanroom) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเครื่องมือระหว่างขั้นตอนการก่อสร้าง ผู้วิจัยสามารถขอใช้อำนาจปฏิบัติการได้จากห้องวิจัยภายในสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) หรือสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) ส่วนประกอบหลักของหัววัดนิวตรอน GEM ประกอบไปด้วย

1. แผ่นด้านหน้าสำหรับให้อนุภาคผ่าน (Gas Window)
2. แผ่นแคโทด (Drift Cathode) ซึ่งเป็นแผ่นที่ประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านหนึ่งและเป็นแผ่นฉนวนไฟฟ้าอีกด้านหนึ่ง โดยด้านที่เป็นแผ่นนำไฟฟ้า มีการเคลือบด้วยโบรอน-10 ด้วยความหนาต่างๆ เช่น 2 มม. 4 มม. 6 มม. เป็นต้น
3. แผ่น GEM สามแผ่น
4. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับอ่านค่าสัญญาณ
5. กล่องที่ครอบแผ่นแคโทดและแผ่น GEM พร้อมทั้งช่องสำหรับให้ก๊าซเข้าและออก
6. ก๊าซที่ใช้ในการเปลี่ยนนิวตรอน ( $\text{He}/\text{CO}_2$ )



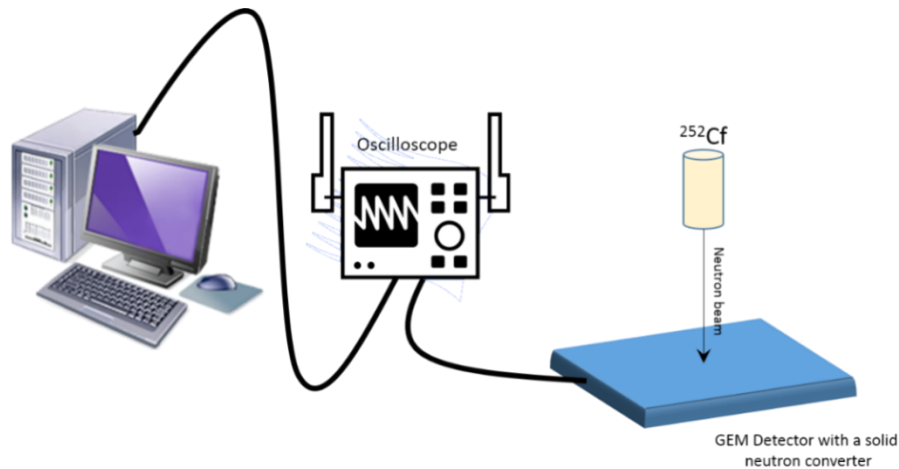
ภาพที่ 10: ภาพตัดขวางของหัววัดนิวตรอน GEM

- เมื่อการประกอบหัววัดนิวตรอน GEM เสรีจสมบูรณ์ สามารถนำหัววัดนิวตรอน GEM ออกจากห้องปฏิบัติการและย้ายมาทำการวิจัยที่ห้องปฏิบัติการที่ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทปได้
- เมื่อการเคลื่อนย้ายเสร็จสิ้น จะต้องมีกรไหลเวียนของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ผ่านเข้าออกภายในตัวเครื่องเป็นเวลาสองถึงสามวันเพื่อเป็นการทำความสะอาดเศษผงฝุ่นที่อาจหลงเหลืออยู่ในหัววัดนิวตรอน GEM
- หลังจากนั้นจะต้องมีการทดสอบความสามารถในการปฏิบัติงานของหัววัดเมื่อมีการผ่านพลังงานไฟฟ้าความต่างศักย์สูงไปยังหัววัดนิวตรอน GEM โดยปกติ หัววัดนิวตรอน GEM ที่ดีควรสามารถทนต่อความต่างศักย์ที่ 4400 โวลต์ ได้โดยที่ไม่มีการลัดวงจรระหว่างแผ่น GEM
- เมื่อหัววัดนิวตรอน GEM ผ่านการทดสอบความต่างศักย์สูง จะต้องมีกรทดสอบการปฏิบัติงานจริง โดยทดสอบความสามารถในการขยายสัญญาณจากโฟตอน พลังงาน 5.9 keV โดยใช้ เหล็ก-55 ( $^{55}\text{Fe}$ ) เป็นแหล่งปล่อยโฟตอน



ภาพที่ 11: ภาพแสดงสัญญาณจากหัววัดนิวตรอน GEM โดยใช้  $^{55}\text{Fe}$  เป็นแหล่งปล่อยโฟตอน

- เมื่อหัววัดนิวตรอน GEM ผ่านการทดสอบโดยใช้  $^{55}\text{Fe}$  จึงมีการทดสอบการตรวจวัดนิวตรอนโดยใช้ Am/Be หรือเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เป็นแหล่งปล่อยนิวตรอน การเก็บข้อมูลจะเก็บเพื่อมาศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดนิวตรอนและความสามารถในการขยายสัญญาณของหัววัดนิวตรอน



ภาพที่ 12: ภาพแสดงการทดลองห้วงวัดนิวตรอน GEM

### 3.3 การเก็บข้อมูล

ในการอ่านสัญญาณจากห้วงวัดนิวตรอน GEM วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถขยายสัญญาณ (Charge Sensitive Preamplifier) ได้ดีเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก เนื่องจากสัญญาณจากห้วงวัดนิวตรอน GEM โดยปกติมักจะมีขนาดเล็กเกินกว่าที่เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปจะสามารถอ่านได้ วงจรอิเล็กทรอนิกส์นี้สามารถสั่งซื้อได้จากบริษัท Cremat หรือสามารถประดิษฐ์ได้เอง หลังจากสัญญาณถูกขยายจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณจะถูกส่งเข้าสู่ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม Signal Express และ Matlab เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้โปรแกรม Signal Express และ Matlab ในการหาจำนวนครั้งห้วงวัดนิวตรอนสามารถถูกตรวจจับได้ เพื่อใช้ในการหาประสิทธิภาพในการตรวจวัดนิวตรอน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของสัญญาณเพื่อใช้ในการหาค่าการขยายสัญญาณ (Gain)

### 3.5 การสรุปผลและการเผยแพร่ผลการวิจัย

ผู้ทำการวิจัยจะนำข้อมูลและผลการวิเคราะห์ไปพูดคุยแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้เชี่ยวชาญในสาขาและหากมีช่องทางหรือวิธีการที่จะพัฒนางานวิจัยเพื่อให้ได้ผลการวิจัยที่มีคุณภาพที่ดีกว่า ผู้ทำการวิจัยจะทำการเก็บข้อมูลเพิ่มเติม โดยผลการวิจัยที่ได้ จะมีการเผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติและงานสัมมนาทางวิชาการและเทคโนโลยีต่อไป

## 4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### 4.1 การประกอบหัววัด GEM

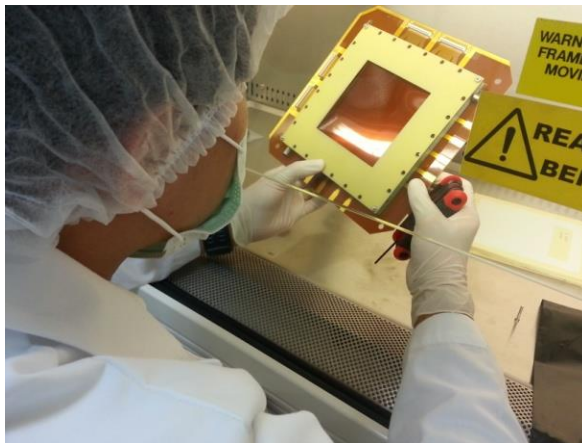
ได้มีการประกอบหัววัด GEM โดยได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) ให้เข้าใช้ Clean room ในการประกอบหัววัด GEM กระบวนการประกอบดังแสดงในภาพที่ 13-16



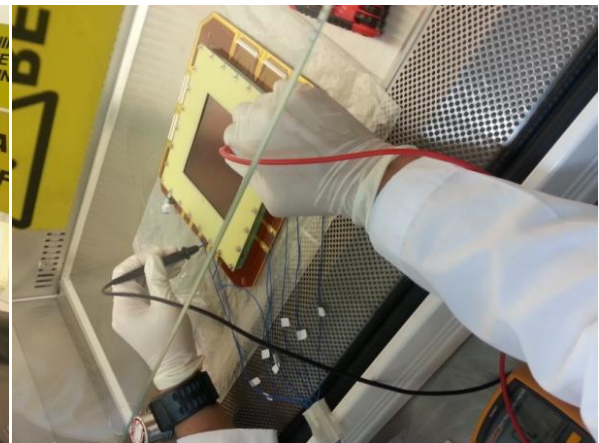
ภาพที่ 13: Micro flow box ภายใน Clean room ที่ใช้ในการประกอบหัววัด GEM



ภาพที่ 14: การประกอบหัววัด GEM



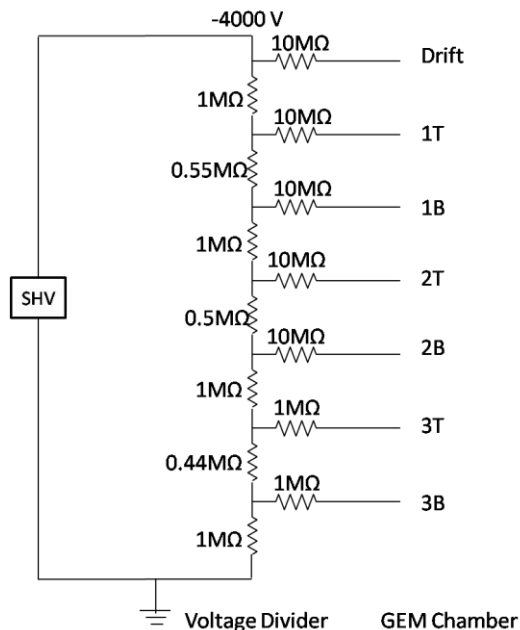
ภาพที่ 15: หัววัด GEM ที่มีการปิดฝาครอบ



ภาพที่ 16: การทดสอบการต่อวงจรไฟฟ้าของหัววัด GEM

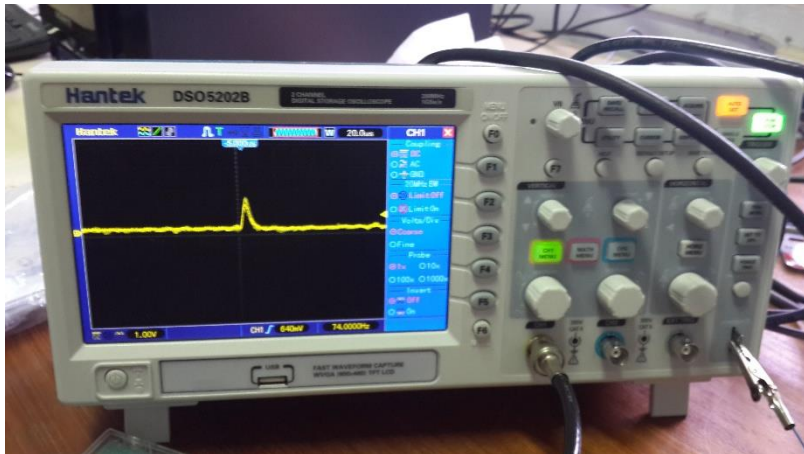
## 4.2 การทดสอบการทำงานของหัววัด GEM ด้วย Sr-90 และ Am-241

เมื่อหัววัด GEM ถูกประกอบเสร็จสิ้นและได้มีการทดสอบการต่อวงจรไฟฟ้า ได้มีการนำหัววัด GEM กลับมายังห้องทดลองทางรังสีที่ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และมีการผ่านก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ไปยังหัววัด GEM เป็นเวลาอย่างน้อย 1 วันเพื่อให้ผงฝุ่นที่อาจหลงเหลือภายในหัววัดระหว่างการประกอบถูกก๊าซไนโตรเจนนำพาออกไป จากนั้นจึงเปลี่ยนก๊าซที่ไหลผ่านเป็นก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนและคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราส่วน 70:30 เพื่อทำการทดสอบการทำงานของหัววัด GEM โดยมีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ -3900 V ถึง -4400 V ไปยังหัววัด GEM โดยใช้วงจรไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 17 ในการแบ่งความต่างศักย์ไปยังส่วนต่างๆ ของหัววัด GEM



ภาพที่ 17: ภาพแสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการแบ่งความต่างศักย์ไปยังส่วนต่างๆของหัววัด GEM

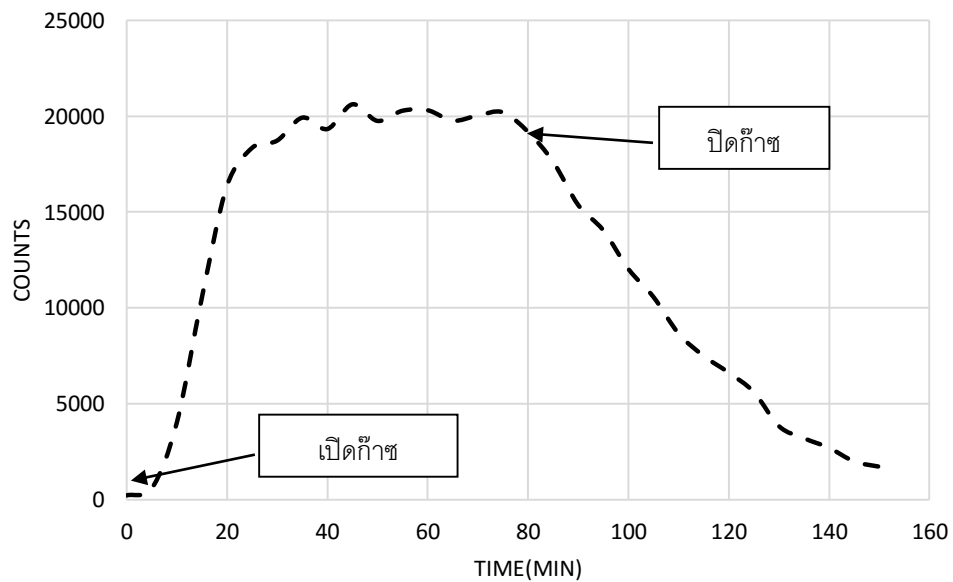
จากนั้นจึงได้มีการนำแหล่งกำเนิดรังสี Sr-90 (อิลีCtrอน) และ Am-241 (รังสีแกมมา) วางบริเวณด้านหน้าของหัววัด GEM และทำการต่อ Preamplifier, Amplifier และ Counter ต่อเข้ากับหัววัด GEM เพื่อประมวลผลของสัญญาณ นอกจากนี้ได้มีการส่งสัญญาณไปยัง Oscilloscope เพื่อศึกษาลักษณะของสัญญาณ ดังแสดงในภาพที่



ภาพที่ 18: ภาพแสดงลักษณะสัญญาณบน Oscilloscope

#### 4.2.1 การทดสอบความเร็วในการทำงานของหัววัด GEM เมื่อเริ่มเปิดและปิดก๊าซที่ไหลผ่าน

เพื่อศึกษาระยะเวลาที่หัววัด Gem ใช้การทำงานหลังจากเริ่มเปิดและปิดก๊าซที่ไหลผ่านโดยทำการวัดค่านับวัดที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่มีการเปิดและปิดก๊าซ ผลการนับวัดดังแสดงในภาพที่ 19

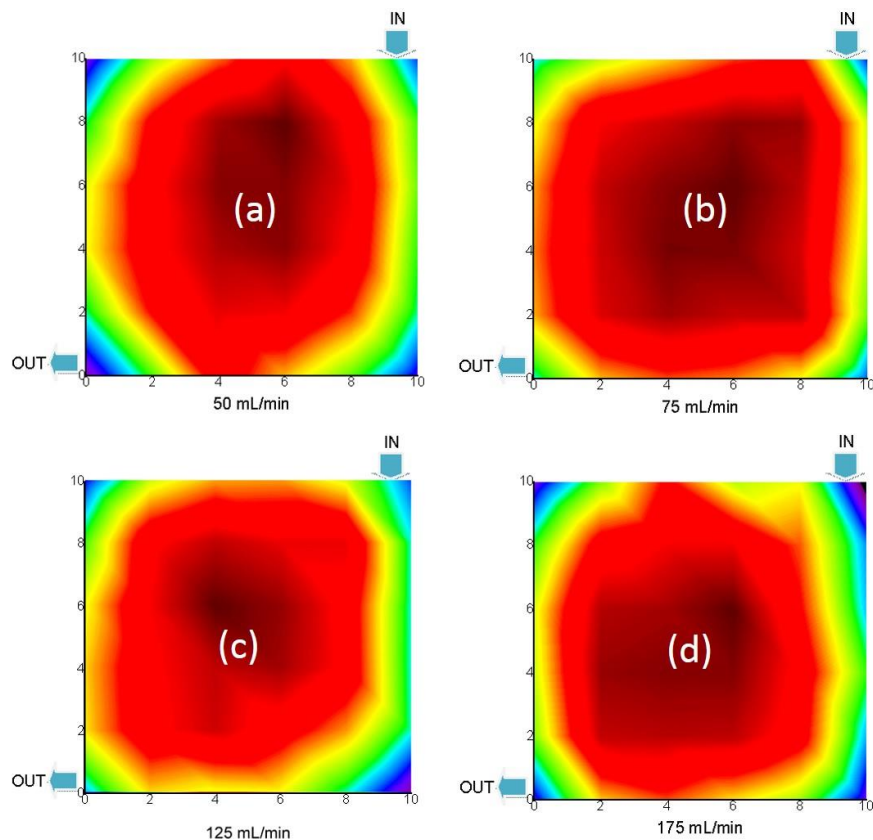


ภาพที่ 19: ภาพแสดงค่านับวัดที่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่เริ่มเปิดและปิดก๊าซ

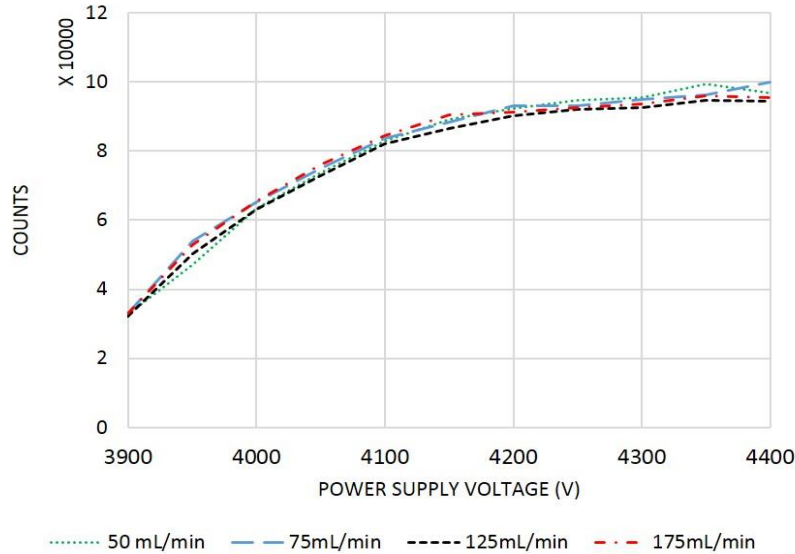
ผลการศึกษาพบว่าหัววัดใช้เวลาประมาณ 30 นาทีนับจากเริ่มมีการปล่อยก๊าซเข้าไปยังหัววัด GEM จึงจะสามารถทำการตรวจวัดรังสีได้สูงสุด และใช้เวลาประมาณ 30-40 นาทีนับจากเริ่มปิดก๊าซ ค่านับวัดลดลงครึ่งหนึ่ง และใช้เวลาประมาณ 70 นาทีในการหยุดการทำงานของหัววัด GEM

#### 4.2.2 การทดสอบผลของการเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซต่อหัววัด GEM

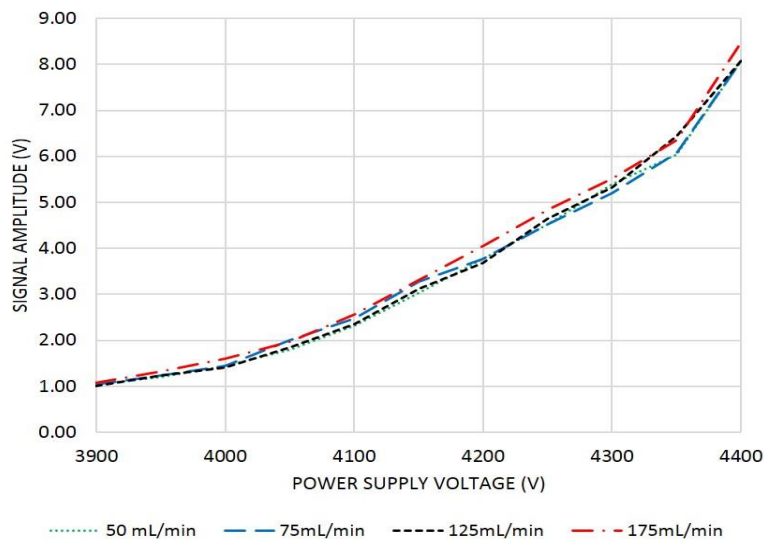
เนื่องจากหัววัด GEM มีการใช้ก๊าซในการตรวจวัดรังสี อัตราการไหลของก๊าซที่ผ่านหัววัด GEM อาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของหัววัด GEM เพื่อศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนและคาร์บอนไดออกไซด์ ในอัตราส่วน 70:30 ที่ไหลผ่านหัววัด GEM ด้วยอัตราการไหล 3, 4.5, 7.5 และ 10.5 ลิตร/ชั่วโมง แล้วทำการศึกษาความสม่ำเสมอ (Uniformity) ค่านับวัดและขนาดของสัญญาณที่อัตราการไหลต่างๆ ผลการศึกษาดังแสดงในภาพ 20-22



ภาพที่ 20: ภาพแสดงค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity) ของหัววัด GEM เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเป็น (a) 3 ลิตร/ชั่วโมง (b) 4.5 ลิตร/ชั่วโมง (c) 7.5 ลิตร/ชั่วโมง (d) 10.5 ลิตร/ชั่วโมง



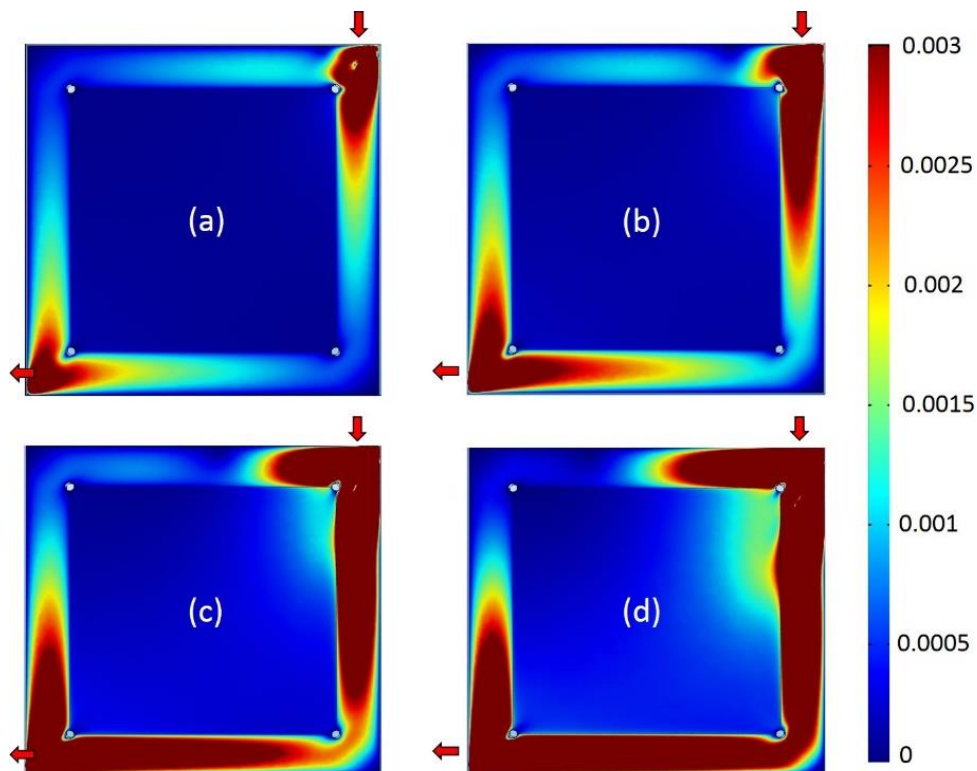
ภาพที่ 21: ภาพแสดงค่านับวัดของหัววัด GEM ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3, 4.5, 7.5 และ 10.5 ลิตร/ชั่วโมง



ภาพที่ 22: ภาพแสดงขนาดสัญญาณอัตราการไหลของก๊าซ 3, 4.5, 7.5 และ 10.5 ลิตร/ชั่วโมง

ดังแสดงในภาพที่ 20 ค่าความสม่ำเสมอของหัววัด GEM ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ กันพบว่ามีความไม่ต่างกันมากนัก โดยที่บริเวณส่วนกลางของหัววัดมีค่านับวัดสูงกว่าบริเวณด้านข้าง และดังแสดงในภาพที่ 21 และ 22 ค่านับวัดและขนาดสัญญาณที่วัดด้วยหัววัด GEM ไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนสำหรับการไหลที่อัตราการไหลต่างกัน โดยที่ค่านับวัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความต่างศักย์ที่ให้กับหัววัด GEM มีค่าเพิ่มขึ้นและคงที่ (Plateau) เมื่อค่าความต่างศักย์มีค่ามากกว่า -4100 V ในขณะที่ขนาดสัญญาณเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความต่างศักย์ที่ให้กับหัววัด GEM มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เหตุผลที่ส่งให้หัววัด GEM มีคุณสมบัติที่ไม่ต่างกันมากเนื่องจากก๊าซที่ไหลผ่านหัววัด GEM

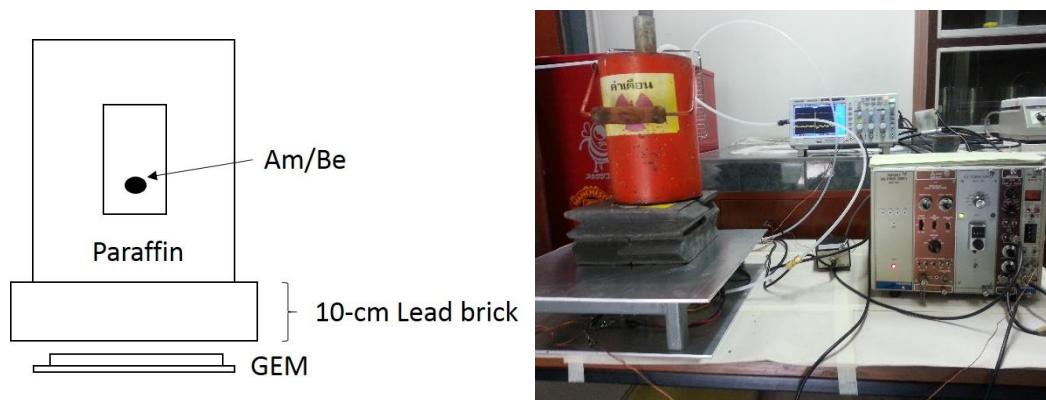
บริเวณ Active area มีค่าคงที่ โดยไม่ขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ ซึ่งจะเห็นได้จากการจำลองการไหลของก๊าซ ด้วยโปรแกรม COMSOL ดังแสดงในภาพที่ 23 พบว่าก๊าซที่มีอัตราการไหลสูงจะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณด้านข้างของ หัววัด GEM ซึ่งส่งผลให้ปริมาณและอัตราการไหลของก๊าซบริเวณส่วนกลางของหัววัด GEM มีค่าคงที่



ภาพที่ 23: ภาพแสดงภาพจำลองการไหลของก๊าซผ่านบริเวณต่างๆของหัววัด GEM เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเป็น (a) 3 ลิตร/ ชั่วโมง (b) 4.5 ลิตร/ชั่วโมง (c) 7.5 ลิตร/ชั่วโมง (d) 10.5 ลิตร/ชั่วโมง

### 4.3 การทดสอบการวัดนิวตรอนด้วยแหล่งปล่อยนิวตรอน Am/Be

ในการทดสอบการวัดนิวตรอนได้มีการนำแหล่งกำเนิดนิวตรอน Am/Be ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) เป็นตัวปล่อยนิวตรอน ภาพแสดงการจัดอุปกรณ์การวัดดังแสดงใน ภาพที่ 24 ซึ่งในกรณีของการวัดนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutrons) จะไม่มีการวางแผ่นพาราฟินระหว่าง Am/Be และแผ่นตะกั่วซึ่งใช้ในการกำบังรังสีแกมมา



ภาพที่ 24: ภาพแสดงการตั้งอุปกรณ์การทดสอบการวัดนิวตรอน

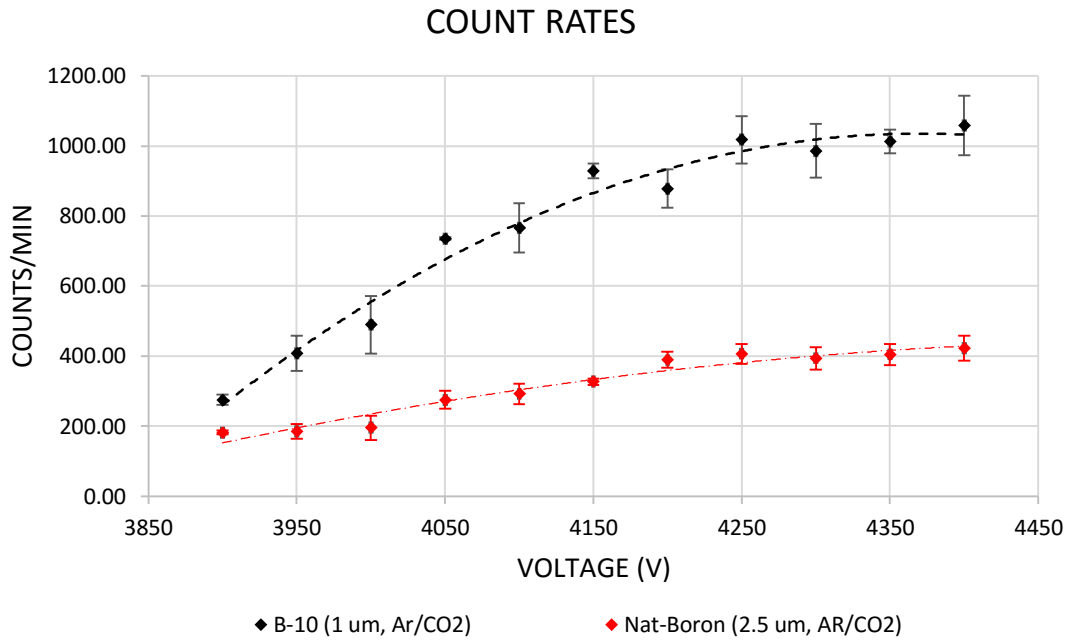
โดยในการวิจัยในปีที่ 1 ได้มีการใช้ตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดของแข็งจำนวน 2 ชนิดคือโบรอน-10 (ความหนา 1 ไมโครเมตร) และโบรอนธรรมชาติ (ความหนา 2.5 ไมโครเมตร) และตัวเปลี่ยนนิวตรอนชนิดก๊าซ 2 ชนิดคือ ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20 และก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30 ในการตรวจวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) และนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutrons)

#### 4.3.1 การทดสอบการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons)

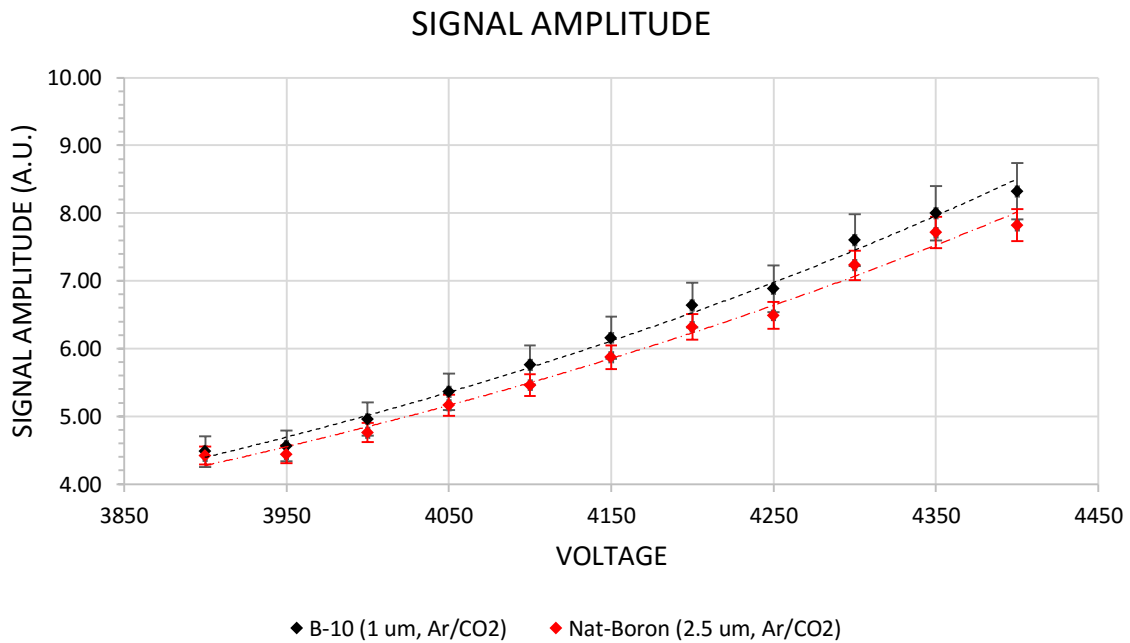
ในการทดสอบการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ ได้มีการทดสอบหัววัด GEM ที่มีตัวเปลี่ยนนิวตรอนร่วมกัน 4 รูปแบบ คือ

1. โบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  ร่วมกับก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20
2. โบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  ร่วมกับก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20
3. โบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  ร่วมกับก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30
4. โบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  ร่วมกับก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30

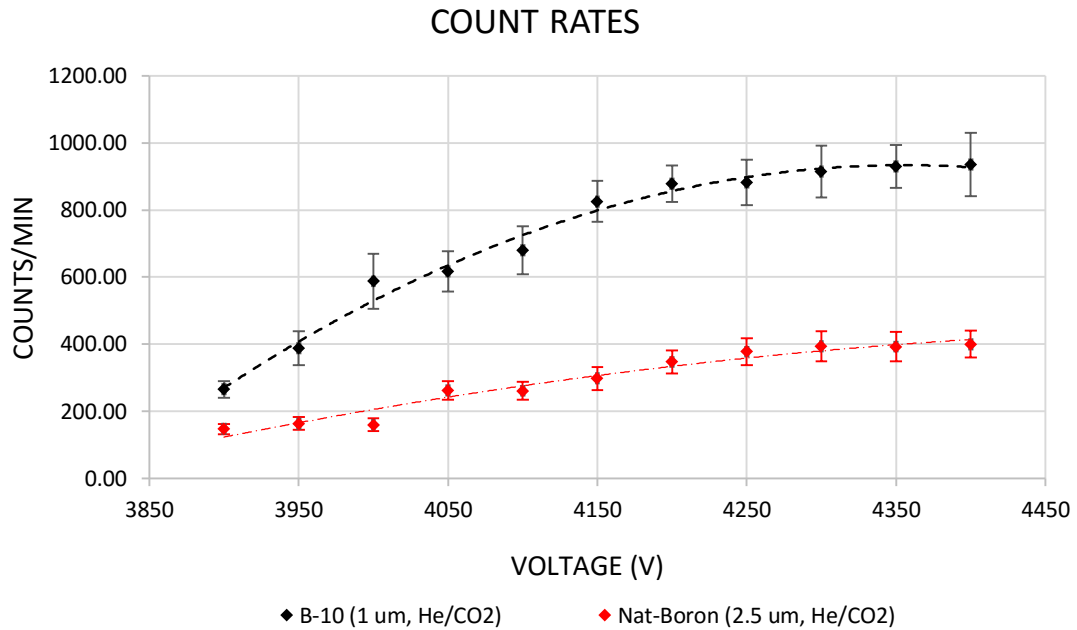
ผลการทดสอบค่านับวัดนิวตรอนพลังงานต่ำทั้ง 4 รูปแบบ แสดงดังรูปภาพที่ 25-32



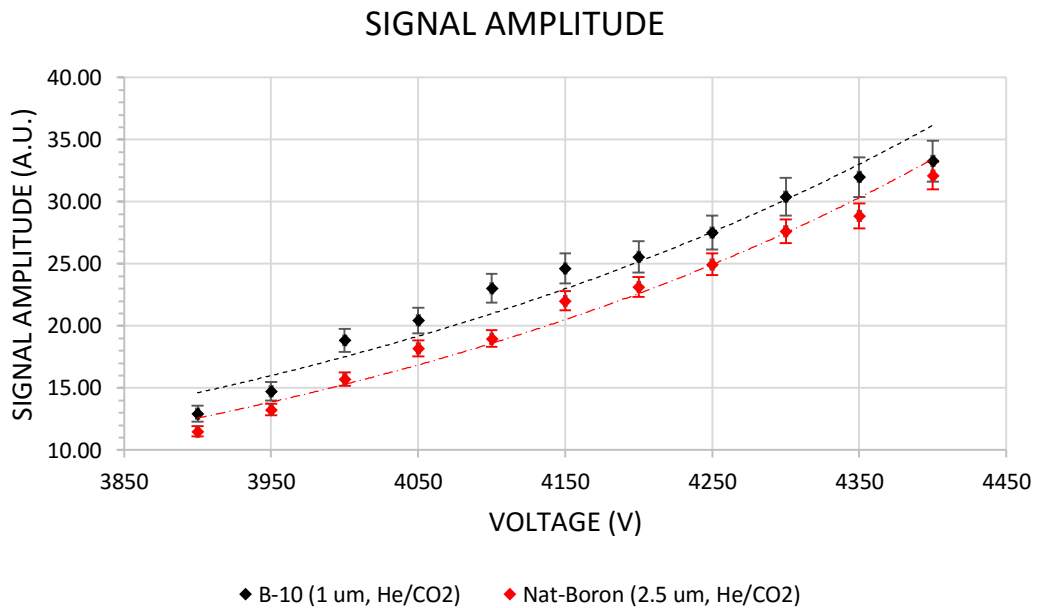
ภาพที่ 25: ภาพแสดงค่านับวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  กับก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ (Ar/CO<sub>2</sub>) ในอัตราส่วน 70:30



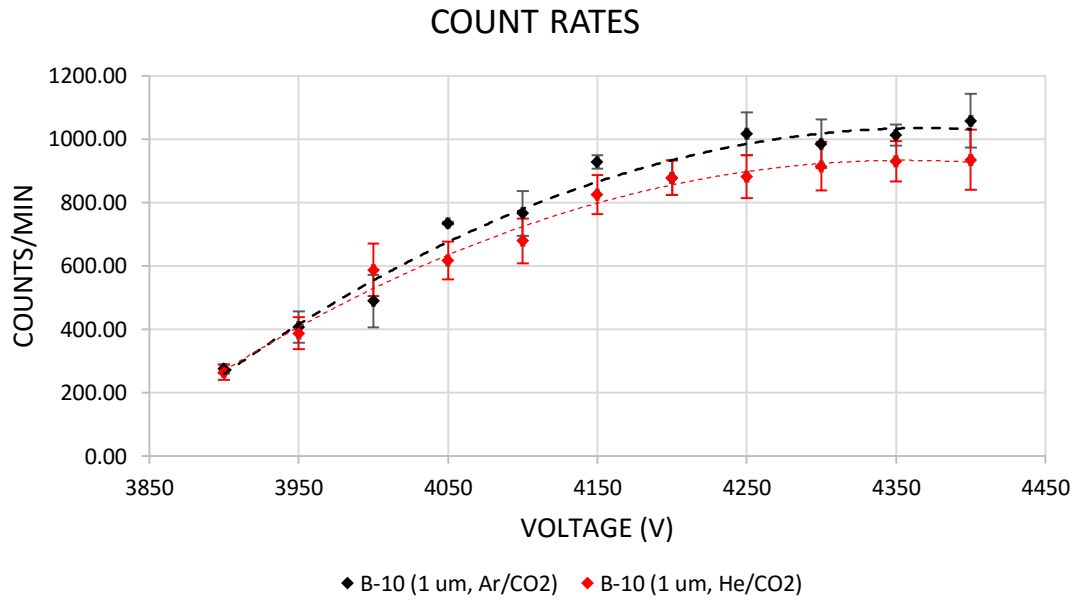
ภาพที่ 26: ภาพแสดงขนาดสัญญาณการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  กับก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ (Ar/CO<sub>2</sub>) ในอัตราส่วน 70:30



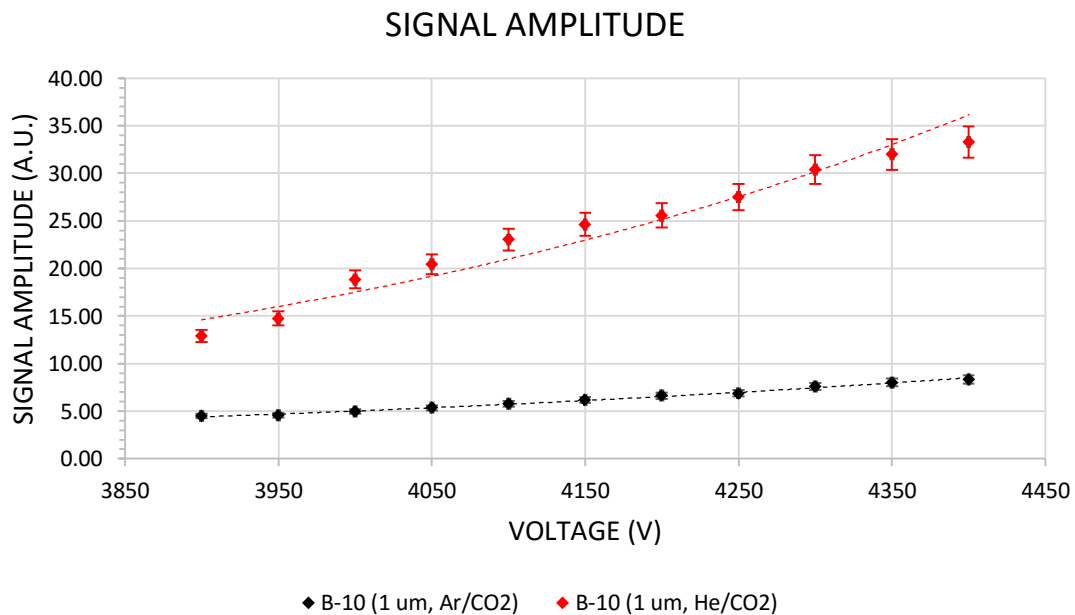
ภาพที่ 27: ภาพแสดงค่านับวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  กับก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ (He/CO<sub>2</sub>) ในอัตราส่วน 80:20



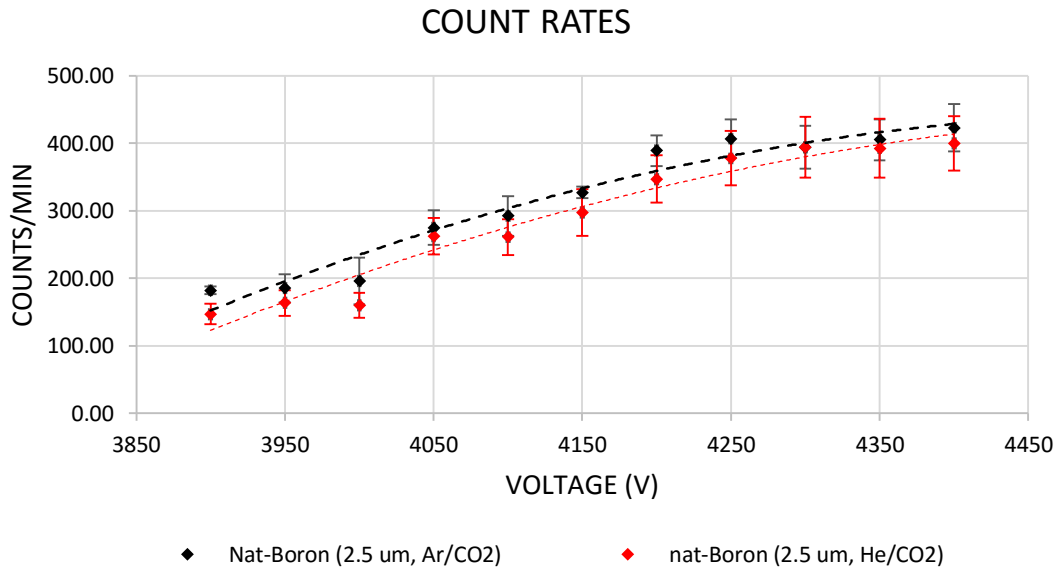
ภาพที่ 28: ภาพแสดงขนาดสัญญาณการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  กับก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ (He/CO<sub>2</sub>) ในอัตราส่วน 80:20



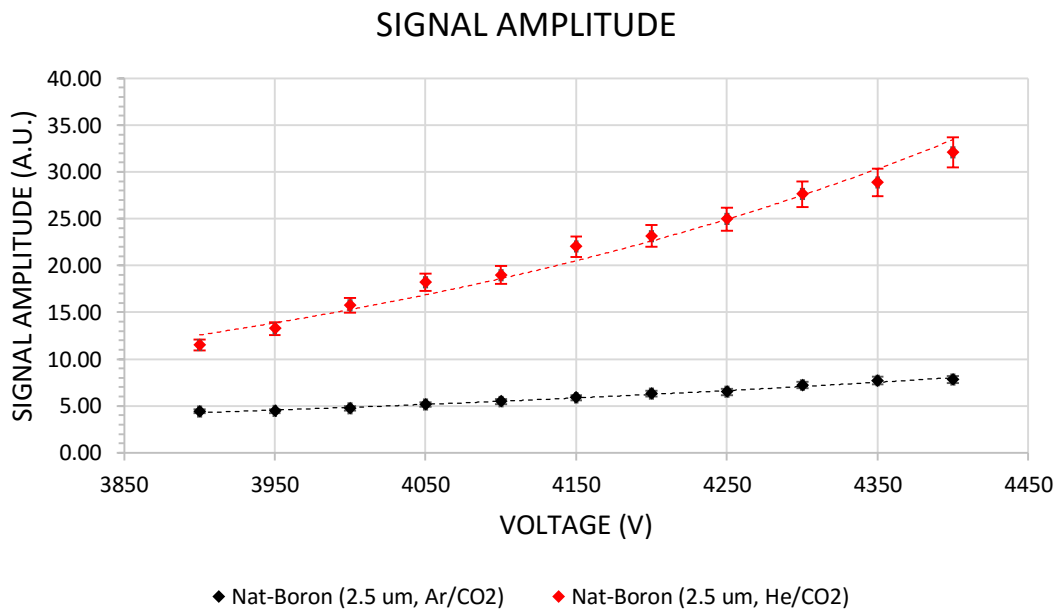
ภาพที่ 29: ภาพแสดงค่านับวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  กับก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30 หรือ ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20



ภาพที่ 30: ภาพแสดงขนาดสัญญาณการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  กับก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30 หรือ ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20



ภาพที่ 31: ภาพแสดงค่านับวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  กับ ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30 หรือ ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20



ภาพที่ 32: ภาพแสดงขนาดสัญญาณการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  กับก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30 หรือ ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20

ซึ่งจากผลการวิจัย สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

1. จากภาพที่ 25 และภาพที่ 27 พบว่าเมื่อก๊าซที่ไหลผ่านหัววัด GEM ชนิดเดียวกัน หัววัด GEM ที่มีการเคลือบด้วยโบรอน-10 ความหนา  $1 \mu\text{m}$  มีความสามารถในการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำได้ดีกว่าโบรอนธรรมชาติ (โบรอน-10 20% และโบรอน-11 80%) ความหนา  $2.5 \mu\text{m}$  ทั้งนี้เนื่องจากโบรอน-10 มีค่า neutron cross section ที่สูงกว่าโบรอนธรรมชาติถึง 5 เท่า ซึ่งถึงแม้ว่าโบรอนธรรมชาติที่ใช้ จะมีความหนาที่มากกว่า แต่ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้การเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับนิวตรอนมีค่าใกล้เคียงกับโบรอน-10 และพบว่าหัววัด GEM มีประสิทธิภาพในการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำเพิ่มขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นและเริ่มมีค่าคงที่ (Plateau region) เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าประมาณ  $-4150 \text{ V}$  กับหัววัด GEM

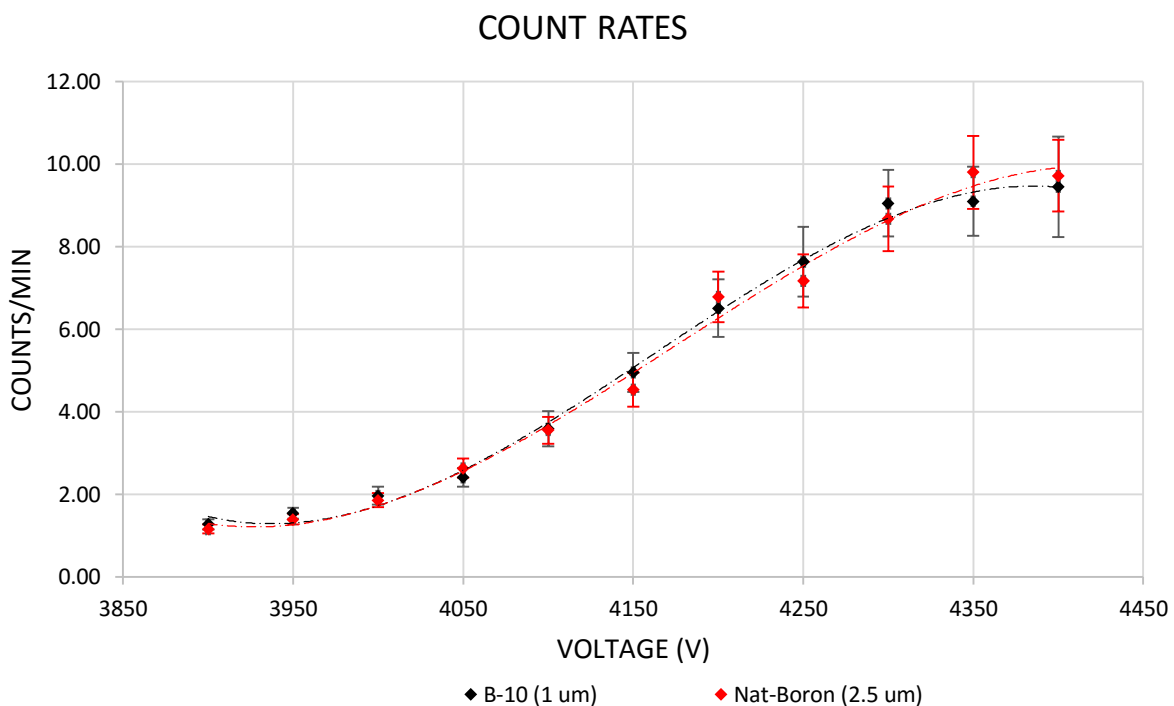
2. จากภาพที่ 26 และภาพที่ 28 พบว่าเมื่อก๊าซที่ไหลผ่านหัววัด GEM ชนิดเดียวกัน หัววัด GEM ที่มีการเคลือบด้วยโบรอน-10 ความหนา  $1 \mu\text{m}$  มีขนาดสัญญาณที่มากกว่าโบรอนธรรมชาติ (โบรอน-10 20% และโบรอน-11 80%) ความหนา  $2.5 \mu\text{m}$  ทั้งนี้เนื่องจากความหนาที่มากขึ้นของโบรอนธรรมชาติ ทำให้ความเป็นไปได้ที่อนุภาคแอลฟาจะผ่านแผ่นเคลือบออกมายังก๊าซเพื่อก่อให้เกิดไอออนมีค่าลดลงและพลังงานของอนุภาคแอลฟาที่อาจมีค่าลดลง จึงทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากการก่อไอออนมีค่าลดลง ทั้งนี้ขนาดของสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น

3. จากภาพที่ 29 และภาพที่ 31 พบว่าเมื่อหัววัด GEM มีการเคลือบด้วยสารเปลี่ยนนิวตรอนชนิดเดียวกันแต่มีก๊าซที่ไหลผ่านต่างชนิดกัน ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30 มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดนิวตรอนพลังงานต่ำที่สูงกว่าก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20 เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก  $\text{He}/\text{CO}_2$  มีค่า Background ที่สูงกว่า  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  และสัญญาณที่เกิดขึ้นจาก  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  มีความเสถียรที่สูงกว่าทำให้ค่านับวัดที่ได้จาก  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  มีค่าสูงกว่า  $\text{He}/\text{CO}_2$

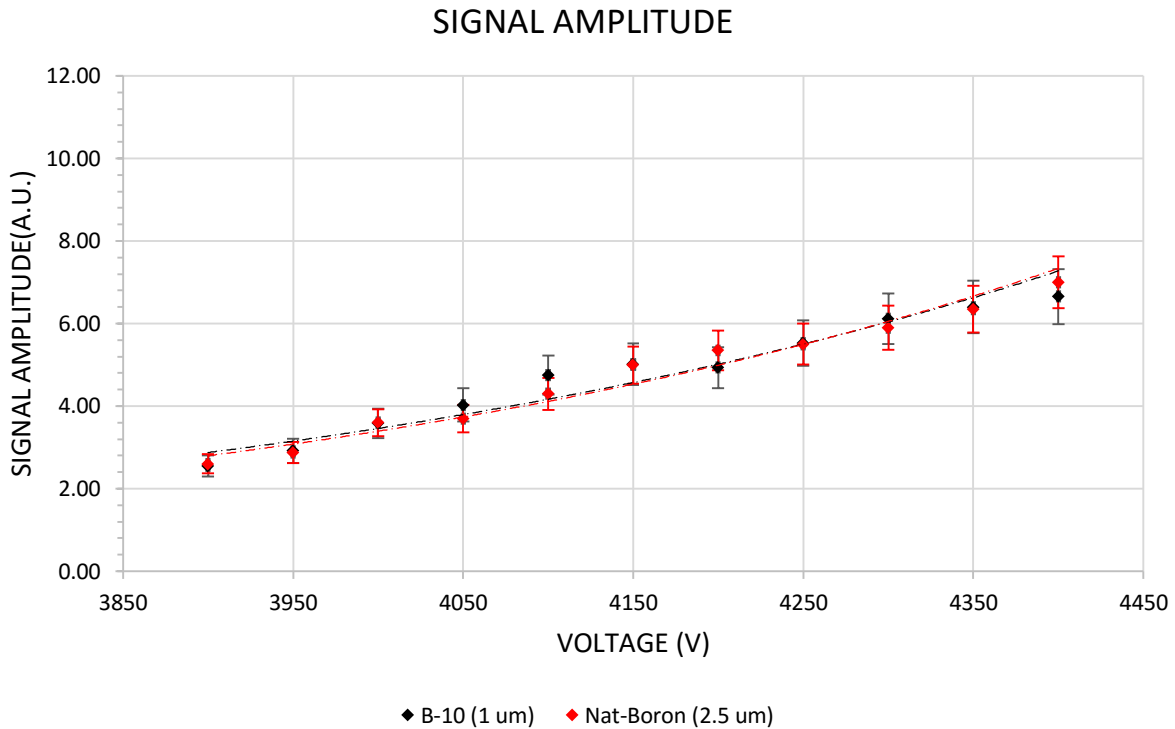
4. จากภาพที่ 30 และภาพที่ 32 พบว่าเมื่อหัววัด GEM มีการเคลือบด้วยสารเปลี่ยนนิวตรอนชนิดเดียวกันแต่มีก๊าซที่ไหลผ่านต่างชนิดกัน ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20 มีขนาดของสัญญาณที่สูงกว่าก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30 ทั้งนี้เนื่องจากฮีเลียมมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอิเล็กตรอนกับนิวตรอนที่น้อยกว่าอาร์กอน จึงทำให้มีจำนวนเล็กที่เกิดจากการก่อไอออนมีค่าสูงกว่าและเมื่อผ่านการขยายสัญญาณจากหัววัด GEM จึงทำให้ขนาดสัญญาณจากก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงกว่าก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์

#### 4.3.2 การทดสอบการวัดนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutrons)

ในการทดสอบการวัดนิวตรอนพลังงานสูง (fast neutrons) พบว่าหัววัด GEM ที่มีการใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ (Ar/CO<sub>2</sub>) ในอัตราส่วน 70:30 ไม่สามารถใช้ในการวัดนิวตรอนพลังงานสูงได้ แต่หัววัด GEM ที่มีการใช้ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ (He/CO<sub>2</sub>) ในอัตราส่วน 80:20 สามารถตรวจวัดนิวตรอนพลังงานสูงได้ ทั้งนี้เนื่องจากอาร์กอนมีเลขมวลที่สูงกว่าฮีเลียม ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานเนื่องจากการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างนิวตรอนพลังงานสูงกับอาร์กอนเกิดขึ้นน้อยกว่า จึงทำให้อาร์กอนไม่สามารถทำให้เกิดการก่อไอออนขึ้นได้ ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 33-34



ภาพที่ 33: ภาพแสดงค่านับวัดนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  กับก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ (He/CO<sub>2</sub>) ในอัตราส่วน 80:20



ภาพที่ 34: ภาพแสดงขนาดสัญญาณการวัดนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutrons) เมื่อมีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  กับก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20

จากภาพที่ 33 และภาพที่ 34 พบว่าประสิทธิภาพและขนาดสัญญาณจากการวัดนิวตรอนพลังงานสูงสำหรับหัววัดที่มีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  กับก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20 ไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของโบรอนที่เคลือบในระดับไมโครเมตร ไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของนิวตรอนที่ผ่านได้อย่างมีนัยสำคัญ

## 5. สรุปผลการวิจัย

1. หัววัด GEM ใช้เวลาประมาณ 30 นาทีตั้งแต่เริ่มมีการเปิดก๊าซจึงจะสามารถทำการตรวจวัดรังสีได้สูงสุด
2. อัตราการไหลของก๊าซไม่มีผลกระทบต่อความสม่ำเสมอในการวัด (Uniformity) ค่านับวัดและขนาดสัญญาณ
3. เมื่อก๊าซที่ไหลผ่านหัววัด GEM ชนิดเดียวกัน หัววัด GEM ที่มีการเคลือบด้วยโบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  มีความสามารถในการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำได้ดีกว่าโบรอนธรรมชาติ (โบรอน-10 20% และโบรอน-11 80%) ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  และพบว่าหัววัด GEM มีประสิทธิภาพในการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำเพิ่มขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นและเริ่มมีค่าคงที่ (Plateau region) เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าประมาณ -4150 V กับหัววัด GEM
4. เมื่อก๊าซที่ไหลผ่านหัววัด GEM ชนิดเดียวกัน หัววัด GEM ที่มีการเคลือบด้วยโบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  มีขนาดสัญญาณในการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำที่มากกว่าโบรอนธรรมชาติ (โบรอน-10 20% และโบรอน-11 80%) ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  ทั้งนี้ขนาดของสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น
5. เมื่อหัววัด GEM มีการเคลือบด้วยสารเปลี่ยนนิวตรอนชนิดเดียวกันแต่มีก๊าซที่ไหลผ่านต่างชนิดกัน ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30 มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดนิวตรอนพลังงานต่ำที่สูงกว่าก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20 เล็กน้อย
6. เมื่อหัววัด GEM มีการเคลือบด้วยสารเปลี่ยนนิวตรอนชนิดเดียวกันแต่มีก๊าซที่ไหลผ่านต่างชนิดกัน ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20 มีขนาดของสัญญาณในการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำที่สูงกว่าก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30
7. หัววัด GEM ที่มีการใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 70:30 ไม่สามารถใช้ในการวัดนิวตรอนพลังงานสูงได้ แต่หัววัด GEM ที่มีการใช้ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20 สามารถตรวจวัดนิวตรอนพลังงานสูงได้
8. ประสิทธิภาพและขนาดสัญญาณจากการวัดนิวตรอนพลังงานสูงสำหรับหัววัดที่มีการใช้โบรอน-10 ความหนา 1  $\mu\text{m}$  หรือโบรอนธรรมชาติ ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  กับก๊าซผสมระหว่างฮีเลียม/คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{He}/\text{CO}_2$ ) ในอัตราส่วน 80:20 ไม่มีความแตกต่างกัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Richard T. Kouzes, James H. Ely, Luke E. Eriksen, et al., “Neutron detection alternatives to  $^3\text{He}$  for national security applications”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 623, 1035-1045 (2010)
- [2] Fabio Sauli, “Development and applications of gas electron multiplier detectors”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 505, 195-198 (2003)
- [3] G. Croci, G. Claps, R. Caniello, et al., “GEM-based thermal neutron beam monitors for spallation sources”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, (Article in press)
- [4] Serge Duarte Pinto, “GEM applications outside high energy physics”, arXiv:1302.1713v1 (2013)
- [5] F. Sauli, “GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 386, 531-534 (1996)
- [6] Abhishek Chowdhury and Mehedi Masud, “GEM: A comparison of Single & Double mask GEMs”, Report, (2011)
- [7] S. Bachmann, A. Bressan, L. Ropelewski, F. Sauli, A. Sharma, D. Mormann, “Charge amplification and transfer processes in the gas electron multiplier”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 438, 376-408 (1999)
- [8] Fabio Sauli, “Progress with the gas electron multiplier”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 522, 93-98, (2004)
- [9] Se-Hwan Park, Han-Soo Kim, Jang-Ho Ha, Yong-Kyun Kim, and Jong Kyung Kim, “Fabrication of a GEM-Based Gas Detector for Thermal Neutron Measurement”, Journal of the Korean Physical Society, 49 (5), 1939-1943 (2006)

- [10] H. Ohshita, S. Uno, T. Otomo, T. Koike, T. Murakami, S. Satoh, M. Sekimoto, T. Uchida, “Development of a neutron detector with a GEM”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 623, 126-128 (2010)
- [11] A. Pietropaolo, F. Murtas, G. Claps, L. Quintieri, D. Raspino, G. Celentano, A. Vannozzi, O. Frasciello, “A new  $^3\text{He}$ -free thermal neutrons detector concept based on the GEM technology”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 729, 117-126, (2013)
- [12] RT Kouzes, JH Ely, AT Linterur, ER Siciliano, ML Woodring, “BF<sub>3</sub> Neutron Detection Tests”, Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830, (2009)