

การพัฒนาชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์
DEVELOPMENT OF MEASUREMENT SYSTEM
FOR STUDYING FARADAY ROTATION

ภัทรชนก ศรีชัย
รินฤดี ต่อชีวัน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

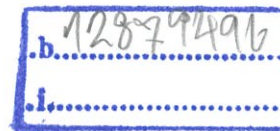
การพัฒนาชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์
DEVELOPMENT OF MEASUREMENT SYSTEM
FOR STUDYING FARADAY ROTATION



T149021

ภัทรชนก ศรีชัย
รินฤดี ต่อชีวัน

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....149021
วัน,เดือน,ปี.....27 S.ค. 2560



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

DEVELOPMENT OF MEASUREMENT SYSTEM
FOR STUDYING FARADAY ROTATION

PATCHANOK SRICHAJ
RUENRUDEE TORCHEEWAN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์
 Development of Measurement System for Studying
 Faraday Rotation

ชื่อนักศึกษา นางสาวภัทรชนก ศรีชัย รหัสนักศึกษา 55051576
 นางสาวรินฤดี ต่อชีวัน รหัสนักศึกษา 55051596



ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.กฤษกร โล้เจริญรัตน์ กรรมการ	
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ	พิศาล สุขวิสูตร
ผศ.ดร.ภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	ภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวภัทรชนก ศรีชัย	รหัสนักศึกษา 55051576
	นางสาวรีนฤดี ต่อชีวัน	รหัสนักศึกษา 55051596
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์ประสงค์ในการพัฒนาระบบวัดค่าคงที่ verdet และเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าจากทฤษฎี ค่าคงที่ verdet คือ ค่าคงที่ทางแสงที่อธิบายถึงความเข้มเฉพาะของปรากฏการณ์ฟาราเดย์ของวัสดุ โดยในระบบที่ได้พัฒนาขึ้นจะใช้โพโตไดโอดในการตรวจวัดแสงแทนการใช้ฉากรับภาพสีขาว ซึ่งจะพบว่า ค่าคงที่ verdet ที่ได้จากระบบวัดที่พัฒนาขึ้น มีค่าสูงกว่าค่าจากทฤษฎีถึง 2 เท่า ดังนั้นระบบวัดที่พัฒนาขึ้นจึงไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการเรียนการสอนได้

คำสำคัญ : ค่าคงที่ verdet, ปรากฏการณ์ฟาราเดย์, โพโตไดโอด

Title	Development of Measurement System for Studying Faraday Rotation	
Students	Miss Patchanok Srichai	Student ID 55051576
	Miss Ruenrudee Torcheewan	Student ID 55051596
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2015	
Advisor	Asst.Prof.Dr.Pattareeya Kittidachachan	

Abstract

This project aims to develop a measurement system for measuring a Verdet constant and compare the measured values with an theoretical value through Faraday effect. The Verdet constant is an optical constant that describes the strength of the Faraday effect for a particular material. In the developed system, the photodiode was used as a detector instead of the white screen. It was found that the Verdet constant obtained from the developed system was higher than the theoretical value of about 2 folds. Therefore, the developed system is not suitable for current laboratory.

Keywords: Faraday effect, Photodiode, Verdet constant

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษ เรื่อง การพัฒนาชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์พาราเดย์ สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ โดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก ผศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ดี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ และคณะอาจารย์สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำโครงการพิเศษนี้ ตลอดจนช่วยในการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้โครงการพิเศษเล่มนี้ถูกต้องและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และทุนสนับสนุนในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณผู้เขียนบทความทุกท่านสำหรับบทความที่ได้นำมาเป็นแหล่งอ้างอิง

ขอขอบคุณ คุณเอกชัย รัมมะรัตน์ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆทุกคนที่ให้กำลังใจ และให้การช่วยเหลือให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาต่างๆ มาโดยตลอด จนโครงการพิเศษเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

และท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งทุกคนในครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมา จนโครงการพิเศษเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ภัทรชนก ศรีชัย

รุ่นฤติ ต่อชีวัน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ปรากฏการณ์ฟาราเดย์ (Faraday Effect)	5
2.2 การโพลาไรซ์ของแสง (Polarized light)	6
2.2.1 โพลาไรซ์เชิงเส้นหรือโพลาไรซ์เชิงระนาบ	6
2.2.2 โพลาไรซ์เชิงวงกลม	10
2.2.3 โพลาไรซ์เชิงวงรี	11
2.3 สภาวะแม่เหล็กและวัสดุแม่เหล็ก (Magnetism and Magnetic Materials)	11
2.3.1 สภาวะแม่เหล็กไดอา(Diamagnetism)	11
2.3.2 สภาวะแม่เหล็กพารา (Paramagnetism)	12
2.3.3 สภาวะแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetism)	12
2.3.4 สภาวะแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (Anti-ferromagnetism)	13
2.3.5 สภาวะแม่เหล็กเฟอร์รี่ (Ferrimagnetism)	13
2.4 ประเภทของแก้ว	14
2.4.1 แก้วซิลิกาหลอมเหลว (silica glass) หรือแก้วควอตซ์ (quartz)	14
2.4.2 แก้วซิลิกาหลอมเหลวร้อยละ 96 (96% silica glass)	14
2.4.3 แก้วโซดาไลม์ (soda lime glass)	14
2.4.4 แก้วเลดซิลิเกต (leadalkali silicate glass)	15
2.4.5 แก้วโบโรซิลิเกต (borosilicate glass)	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.6 แก้วอะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminosilicate glass)	15
2.5 เลเซอร์ (Laser)	16
2.5.1 ชนิดของเลเซอร์	16
2.5.2 เลเซอร์ที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม	17
2.6 วงจรขยายสัญญาณ	20
2.7 ตัวตรวจวัดแสง	20
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
2.8.1 ปรากฏการณ์ฟาราเดย์ของน้ำ และแก้วฟลินต์ (Faradey Effect Rotation for Water and Flint Glass)	21
2.8.2 ปรากฏการณ์ฟาราเดย์ (Faradey Effect)	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	23
3.1 การทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์	23
3.1.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติ	23
3.1.2 การพัฒนาชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์	29
3.2 การนำชุดทดลองที่ผ่านการปรับปรุงมาทดลองใช้ในการเรียนการสอน	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	33
4.1 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ โดยกลุ่มผู้ทดลอง	33
4.1.1 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็ก	33
4.1.2 ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของแก้ว	34
4.1.3 ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ	39
4.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ โดยกลุ่มนักศึกษาตัวอย่าง	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผลการวิจัย	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก	55
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ โดยกลุ่มนักศึกษาตัวอย่าง	56
ภาคผนวก ข วิธีใช้โปรแกรม Keysight BenchVue	96

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	ระยะเวลาของขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ	4
2.1	ค่าคงที่ verdet ของน้ำและแก้วฟลินต์	21
4.1	ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ	33
4.2	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)	35
4.3	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)	35
4.4	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)	37
4.5	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)	37
4.6	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)	38
4.7	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)	40
4.8	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)	40
4.9	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)	41
4.10	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)	42
4.11	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)	43
4.12	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)	43
4.13	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียว เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)	45
4.14	ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียว เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)	46

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียว เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)	46
4.16 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียว เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)	48
4.17 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียว เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)	48
4.18 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียว เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)	49
4.19 ค่าคงที่ verdet ของน้ำที่ศึกษา โดยกลุ่มนักศึกษาตัวอย่าง	51
5.1 ค่าคงที่ verdet ของน้ำจากการศึกษา โดยกลุ่มผู้ทดลอง	52

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ชุดการทดลองที่ผู้ทดลองต้องใช้สายตาในการพิจารณาความเข้ม (ก) ไดอะแกรม (ข) อุปกรณ์จริง	2
1.2 ชุดการทดลองที่ผู้ทดลองต้องใช้อุปกรณ์ทางแสงมาช่วยในการพิจารณาความเข้ม (ก) ไดอะแกรม (ข) อุปกรณ์จริง	2
2.1 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ฟาราเดย์	5
2.2 ทิศทางการแกว่งของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	6
2.3 ลักษณะของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นและแสงไม่โพลาไรซ์หรือแสงโพลาไรซ์แบบสุ่ม	7
2.4 สัญลักษณ์ของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นและแสงไม่โพลาไรซ์	7
2.5 ระนาบตกกระทบ (plane of incidence)	7
2.6 ลักษณะการสะท้อนของแสงโพลาไรซ์	8
2.7 โครงสร้างผลึกที่ไม่สมมาตร ทำให้ผลึกมีดัชนีหักเหสองค่า	9
2.8 แสงโพลาไรส์จากการกระเจิงของแสง	9
2.9 แสงโพลาไรส์จากการดูดกลืนแสง	10
2.10 แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม	10
2.11 แสงโพลาไรซ์แบบวงรี	11
2.12 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กพารา (ก) ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก (ข) ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก	12
2.13 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กเฟอร์โร	13
2.14 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กแอนติเฟอร์โร	13
2.15 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กเฟอร์รี	14
2.16 ระบบ He-Ne Laser (กล่องสี่ขา) ที่ใช้ในการสร้างภาพโฮโลแกรม	17
2.17 He-Ne Laser ก๊าซบรรจุอยู่ในหลอดแก้ว จะเห็นกระจกที่ปลายทั้งสองข้าง	17
2.18 ลำแสงสีเขียวของอาร์กอน-อิตอน เลเซอร์	18
2.19 แสงสีเขียวของ นีโอดีเมียมแย็ก เลเซอร์	19
2.20 วงจรขยายสัญญาณ	20
2.21 ลักษณะของโฟโตไดโอดและสัญลักษณ์ที่ใช้ในวงจร	21
3.1 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ (ก) ไดอะแกรม (ข) อุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการ	23
3.2 เลเซอร์ HeNe	24
3.3 เลเซอร์ไดโอดสีเขียว	24

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.4 แผ่นโพลาไรซ์ (Polarizing filter)	24
3.5 ขดลวด (Coil,600 turns)	25
3.6 แหล่งจ่ายไฟ (Power supply)	25
3.7 Hall probe	25
3.8 เทสลามีเตอร์ (Tesla Meter)	26
3.9 ฉากรับแสง (Screen)	26
3.10 วัสดุที่ต้องการทดสอบ (ก) แท่งแก้ว (ข) น้ำที่บรรจุในหลอด	26
3.11 การจัดวางอุปกรณ์การทดลองในการวัดค่าสนามแม่เหล็ก (ก) ไดอะแกรม (ข) อุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการ	27
3.12 การจัดวางวัสดุตัวอย่าง (ก) ไดอะแกรม (ข) อุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการ	28
3.13 ชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ที่พัฒนาขึ้น (ก) ไดอะแกรม (ข) อุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการ	29
3.14 โฟโตไดโอดและกราฟการตอบสนองต่อแสงกับความยาวคลื่น (ก) โฟโตไดโอดของRoithner Laser รุ่น SPD900-9P (ข) กราฟการตอบสนองของโฟโตไดโอดของ Roithner Laserรุ่น SPD900-9P	30
3.15 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ของ Agilent รุ่น 34411A 6½ Digit Multimeter	30
3.16 วงจรขยายออพแอมป์ LM 741	31
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดกับสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A	35
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)	37
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)	37
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)	39
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)	39
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)	40

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การจัดการเรียนการสอนที่เน้นในภาคปฏิบัตินั้นมีจุดประสงค์ที่สำคัญ คือ ให้ผู้เรียนฝึกและทำความเข้าใจในกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ที่มีความจำเป็นต่อการศึกษา ค้นคว้า และแก้ปัญหาในเชิงปฏิบัติ การฝึกฝนทั้งด้านความคิดและด้านลงมือปฏิบัติจริง โดยเชื่อมโยงความรู้ในภาคทฤษฎีให้เข้ากับสถานการณ์จริง โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการเรียนการสอนในภาคปฏิบัติ คือ การใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการทดลอง ซึ่งจะทำให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้และเชื่อมโยงกับภาคทฤษฎีได้อย่างชัดเจน ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่เหมาะสมจะเป็นตัวชี้ถึงประสิทธิภาพของการเรียนการสอนนั้น ๆ

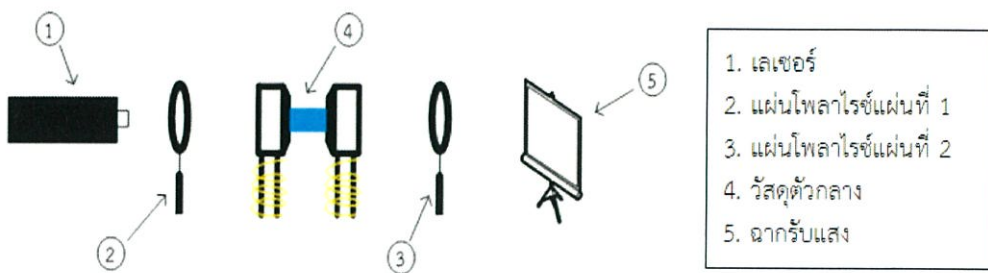
ในรายวิชาปฏิบัติการสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Devices Laboratory) การทดลองเรื่อง การศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ (Faraday Effect) จึงเป็นหนึ่งในทดลองที่มีความน่าสนใจ โดยปรากฏการณ์ฟาราเดย์ (Faraday Effect)^[1] ค้นพบในปีค.ศ. 1845 โดยไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ซึ่งเป็นการค้นพบปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กและแสงครั้งแรกที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์การหมุนควงแบบฟาราเดย์” ซึ่งมีหลักฐานที่เป็นรูปธรรมครั้งแรก สำหรับอธิบายการเชื่อมโยงกันระหว่างสนามแม่เหล็กและแสง นับว่าเป็นอีกหนึ่งในการค้นพบที่สำคัญทางประวัติศาสตร์ โดยเป็นการสังเกตว่าระนาบของการโพลาไรซ์ของแสงที่หมุนนั้น เป็นผลมาจากแสงเดินทางผ่านวัสดุในทิศทางขนานกับสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดมุมในการหมุนที่เรียกว่า “มุมในการหมุนควงแบบฟาราเดย์ (Faraday Rotation Angle)” ซึ่งที่มุมๆหนึ่งจะเป็นจุดที่แสงมีความสว่างมากที่สุด

ต่อมาในปี ค.ศ. 1854, Verdet พบว่ามุมของการหมุน (θ) จะขึ้นกับความยาว (L) ของวัสดุตัวกลางและความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B) และค่าคงที่ (V) ดังสมการ

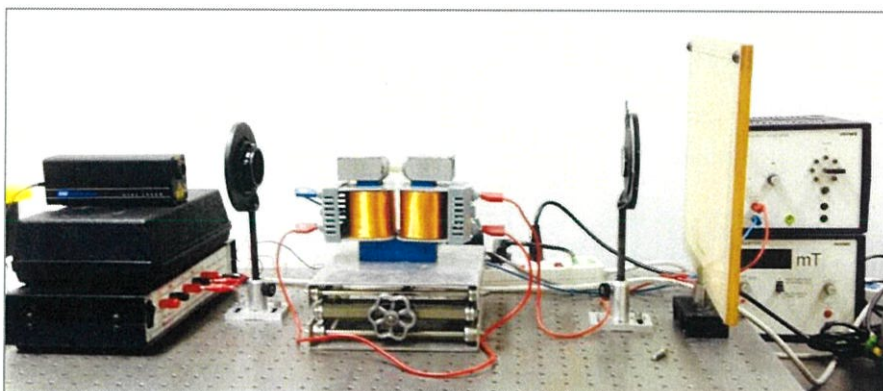
$$\theta = VBL \quad (1.1)$$

เมื่อ V คือ ค่าคงที่ verdet ของวัสดุตัวกลาง ค่าคงที่ verdet นั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุตัวกลางและความถี่ของแสง^[2]

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ในการวัดความเข้มของแสงโพลาไรซ์ที่ผ่านวัสดุ ผู้ทดลองต้องใช้สายตาในการพิจารณาความเข้มมากที่สุดและน้อยที่สุด เพื่อให้ได้ค่ามุมในการบิดตัวแบบฟาราเดย์ (Faraday Rotation Angle) ซึ่งการใช้สายตาวัด ทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อปรับปรุงชุดทดลองดังกล่าว โดยจะพิจารณาในส่วนของการวัดผลโดยใช้อุปกรณ์ทางแสงมาแทนการใช้สายตา



(ก)

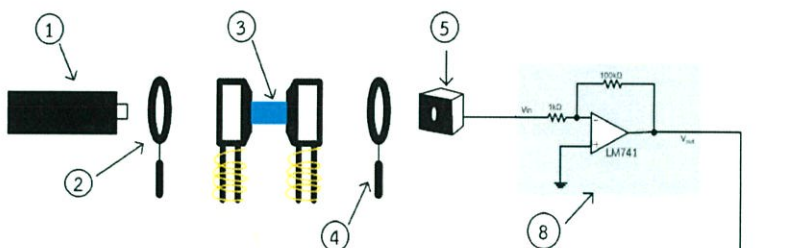


(ข)

รูปที่ 1.1 ชุดการทดลองที่ผู้ทดลองต้องใช้สายตาในการพิจารณาความเข้ม

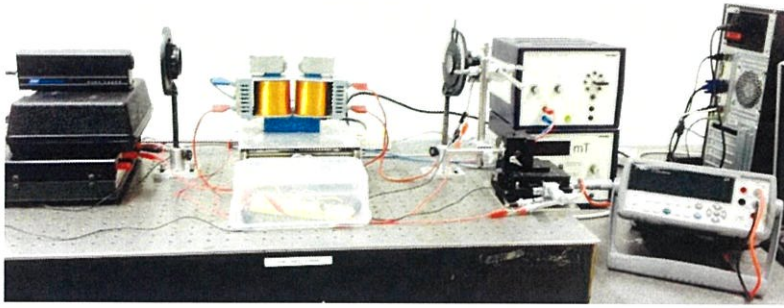
(ก) ไดอะแกรม

(ข) อุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการ



- | | |
|--------------------------|--------------------|
| 1. เลเซอร์(HeNe) | 5. โฟโตไดโอด |
| 2. แผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่ 1 | 6. ดิจิตอลมิลิเมตร |
| 3. ตัวกลาง | 7. คอมพิวเตอร์ |
| 4. แผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่ 2 | 8. วงจรขยาย |

(ก)



(ข)

รูปที่ 1.2 ชุดการทดลองที่ผู้ทดลองต้องใช้อุปกรณ์ทางแสงมาช่วยในการพิจารณาความเข้ม

(ก) ไดอะแกรม

(ข) อุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟาราเดย์และการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ฟาราเดย์
2. เพื่อพัฒนาชุดทดลองเรื่อง การศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์
3. เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์และหาค่าคงที่ verdet จากการใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา และจากชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับค่าจากทฤษฎี
4. เพื่อนำชุดทดลองทั้งก่อนและหลังการพัฒนามาใช้ในการเรียนการสอน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟาราเดย์
2. พัฒนาชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดแสง
3. ศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ของวัสดุ 2 ประเภท คือ แก้ว และน้ำ และคำนวณหาค่าคงที่ verdet เปรียบเทียบผลกับทฤษฎี

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ

- | | |
|--------------|---|
| ขั้นตอนที่ 1 | ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมเอกสารข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟาราเดย์ |
| ขั้นตอนที่ 2 | กำหนดขอบเขต และรูปแบบของชุดทดลองเรื่อง การศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ พร้อมทั้งออกแบบชุดทดลอง |
| ขั้นตอนที่ 3 | จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทดลอง |
| ขั้นตอนที่ 4 | ทดสอบใช้ชุดทดลองเรื่อง การศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ |
| ขั้นตอนที่ 5 | วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้ |
| ขั้นตอนที่ 6 | จัดเตรียมรูปเล่มและการนำเสนอให้เสร็จสมบูรณ์ |

ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาของขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ

ปีการศึกษา 2558										
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ขั้นตอนที่ 1										
ขั้นตอนที่ 2										
ขั้นตอนที่ 3										
ขั้นตอนที่ 4										
ขั้นตอนที่ 5										
ขั้นตอนที่ 6										

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟาราเดย์และการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ฟาราเดย์
2. ได้ชุดทดลองเรื่อง การศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ สำหรับใช้ในรายวิชาปฏิบัติการสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Devices Laboratory) ที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น

บทที่ 2

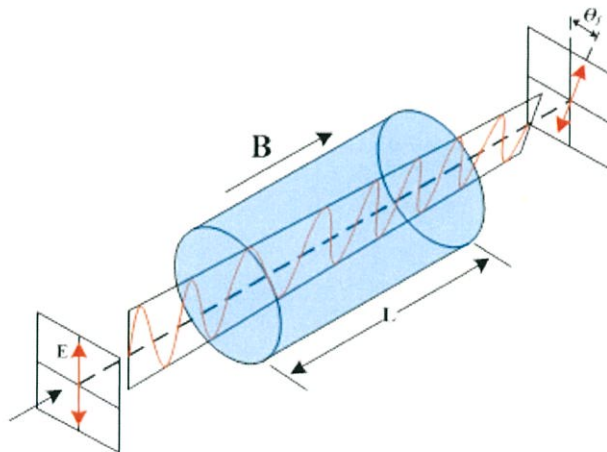
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานวิจัยเรื่อง การพัฒนาชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ ต้องอาศัย ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นข้อมูลประกอบการดำเนินงาน โดยอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.1 ปรากฏการณ์ฟาราเดย์ (Faraday Effect)^[4]

ปรากฏการณ์ฟาราเดย์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปรากฏการณ์ Magneto - optical เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุมีการแสดงสมบัติทางแสงบางประการภายใต้สนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ magneto - optical เกิดได้ทั้งกับวัสดุที่มีสถานะเป็นก๊าซ ของแข็ง และของเหลว โดยทั่วไปแล้ว ปรากฏการณ์ magneto - optical ที่เกิดขึ้นในวัสดุที่เป็นของแข็งจะมีความชัดเจนมากกว่าวัสดุที่เป็นของเหลว และก๊าซจะมีการแสดงสมบัติของปรากฏการณ์ magneto - optical ได้น้อยที่สุด

ปรากฏการณ์ magneto - optical ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1845 โดยไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) และเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า “ปรากฏการณ์ฟาราเดย์ (Faraday Effect)” ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้น เมื่อมีแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก แนวการโพลาไรซ์ของแสงจะบิดไปเป็นสัดส่วนโดยตรงกับองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศทางการเคลื่อนที่ของแสง โดยการบิดไปของแนวการโพลาไรซ์นั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนที่ของแสง และเมื่อแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นเดินทางผ่านตัวกลาง แนวการโพลาไรซ์ของแสงจะบิดไปเป็นมุมๆหนึ่ง



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ฟาราเดย์

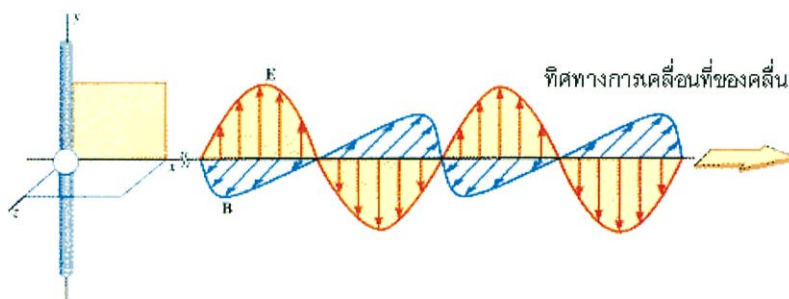
ต่อมาในปี ค.ศ. 1854, Verdet พบว่ามุมของการโพลาไรซ์ที่บิดไป (θ) จะขึ้นกับความยาวของวัสดุ (L) และความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B) และค่าคงที่ (V) ดังสมการ

$$\theta = VBL \quad (2.1)$$

เมื่อ V คือ ค่าคงที่ verdet ของวัสดุ ค่าคงที่ verdet นั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ^[2] และความถี่ของแสง ซึ่งค่าคงที่ verdet นั้นเป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพของวัสดุในการสะท้อนแสง โดยคุณสมบัติของวัสดุ magneto - optic สามารถแบ่งสถานะแม่เหล็กได้เป็น paramagnetic, ferromagnetic, antiferromagnetic และ ferromagnetic

2.2 การโพลาไรซ์ของแสง (Polarized light)^[5]

การโพลาไรซ์เป็นสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น แสง ที่อธิบายทิศทางการแกว่ง ของสนามไฟฟ้าตามขวางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (คลื่นตามยาว เช่น คลื่นเสียง ไม่มีสมบัติการโพลาไรซ์ เนื่องจากการแกว่งมีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่น)

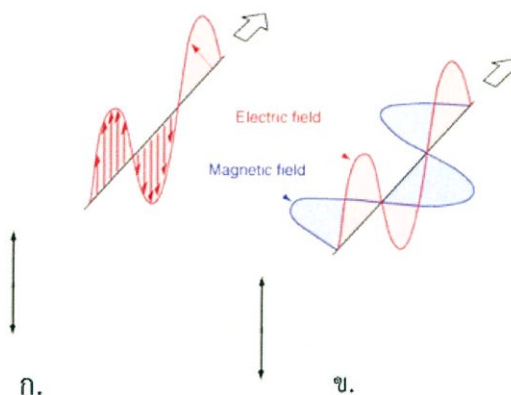


รูปที่ 2.2 ทิศทางการแกว่งของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โพลาไรซ์ของแสง (Polarized light) นั้นมีหลายชนิด ได้แก่ โพลาไรซ์เชิงเส้นหรือโพลาไรซ์เชิงระนาบ (Linear or Plane polarization) โพลาไรซ์แบบวงกลม (circularly-polarized light) และ แสงโพลาไรซ์แบบวงรี (elliptically-polarized light)

2.2.1 โพลาไรซ์เชิงเส้นหรือโพลาไรซ์เชิงระนาบ (Linear or Plane polarization)

ถ้าสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงมีการแกว่งในระนาบใดระนาบหนึ่ง จะเรียกคลื่นแสงนี้ว่าแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นหรือโพลาไรซ์เชิงระนาบ (Linear or Plane polarized light) ถ้าสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงมีการแกว่งในทิศทางต่างๆกันและมีเฟสต่างกันอย่างสุ่ม (Randomly in time) ซึ่งจะเรียกคลื่นแสงนี้ว่า เป็นแสงไม่โพลาไรซ์หรือแสงโพลาไรซ์แบบสุ่ม (Unpolarized light or Random polarized light)



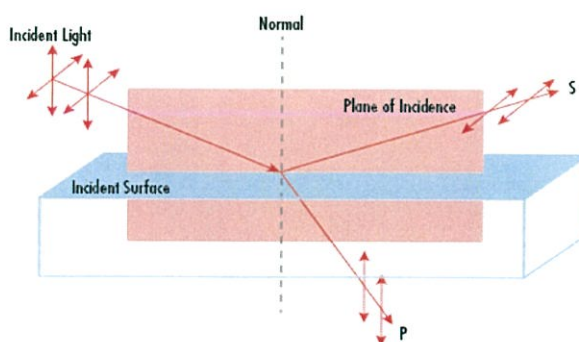
รูปที่ 2.3 (ก) ลักษณะของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น
(ข) ลักษณะของแสงที่ไม่โพลาไรซ์



รูปที่ 2.4 (ก) สัญลักษณ์ของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น
(ข) สัญลักษณ์ของแสงไม่โพลาไรซ์

1. ชนิดของโพลาไรซ์เชิงเส้นหรือโพลาไรซ์เชิงระนาบ

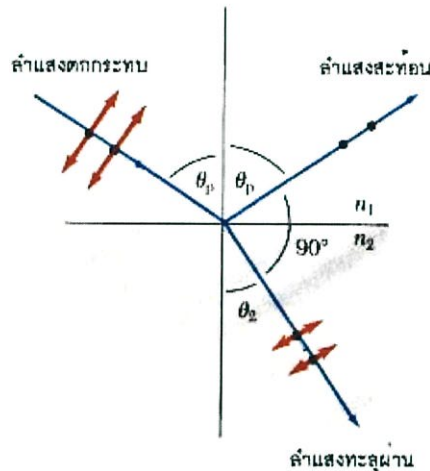
เมื่อแสงเคลื่อนที่ตกกระทบบนพื้นผิวใดๆ จะสามารถสร้างระนาบที่เกิดจากแสงตกกระทบบกับเส้นที่ตั้งฉากกับพื้นผิวตรงจุดที่แสงตกกระทบบและเรียกระนาบนี้ว่า ระนาบแสงตกกระทบบ (Plane of incidence) แสดงดังรูปที่ 2.5 ถ้าสนามไฟฟ้าของแสงที่ตกกระทบบนั้นมีการแกว่งในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบของแสงตกกระทบบ จะเรียกแสงที่มีการแกว่งของสนามไฟฟ้าแบบนี้ว่า แสงโพลาไรซ์ชนิด S (S-polarized light) และในกรณีที่สนามไฟฟ้าของแสงที่ตกกระทบบมีการแกว่งในทิศขนานกับระนาบของแสงที่ตกกระทบบ จะเรียกแสงที่มีการแกว่งของสนามไฟฟ้าแบบนี้ว่า แสงโพลาไรซ์ชนิด P (P-polarized light)



รูปที่ 2.5 ระนาบตกกระทบบ (plane of incidence)

2. การทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงโพลาไรซ์^[6]

1) การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการสะท้อน แสงที่สามารถที่จะโพลาไรซ์ได้โดยการนำให้แสงที่ไม่โพลาไรซ์ไปตกกระทบกับตัวกลางที่สามารถทำให้เกิดการสะท้อนส่วนหนึ่ง แสงที่สะท้อนขึ้นไปในตัวกลางแรกโพลาไรซ์ได้ ถ้ามุมตกกระทบนั้นเป็นมุมที่มีค่าพอเหมาะค่าหนึ่ง มุมที่พอเหมาะนั้นเราเรียกว่า มุมโพลาไรซ์ (θ_p) หรือมุม บรูสเตอร์ ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ รังสีสะท้อนและรังสีหักเหจะทำมุม 90° กันพอดี



รูปที่ 2.6 ลักษณะการสะท้อนของแสงโพลาไรซ์

2) การทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์โดยวัสดุที่มีสมบัติ Double refraction

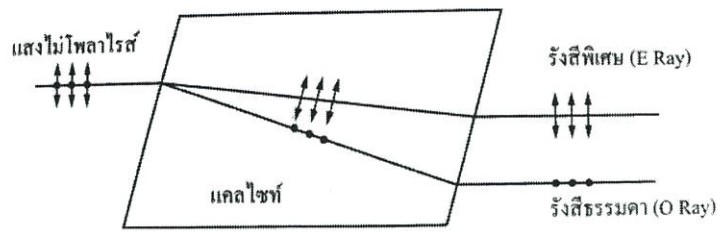
หรือ Birefringence วัสดุส่วนใหญ่ที่ยอมให้แสงผ่านได้นั้นจะต้องมีค่า

ดรรชนีหักเหคงที่ไม่ว่าจะเป็นเนื้อเดียวกันตลอด แต่มีวัสดุบางอย่างจะมี ดรรชนีหักเหที่ไม่คงที่คือแม้จะเป็นเนื้อเดียวกันตลอด แต่ดรรชนีหักเหขึ้นกับทิศทางที่แสงผ่านเมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ เคลื่อนที่ผ่านแคลไซต์จะเกิดการหักเหแล้วแยกรังสีออกเป็น 2 แนวที่มีสมบัติดังนี้

1. รังสีทั้งสองเป็นแสงโพลาไรซ์ ที่มีระนาบโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน
2. รังสีเส้นหนึ่งมีความเร็วคงที่ในทุกๆ ทิศทางจึงมีดรรชนีหักเหคงที่ รังสี

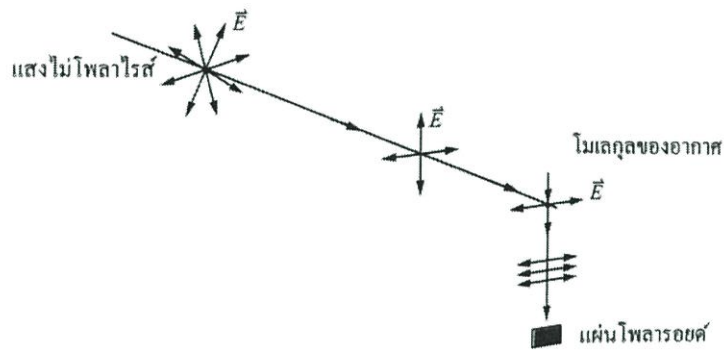
อีกเส้นมีความเร็วไม่คงที่ขึ้นกับทิศทางของมุมตกกระทบ จึงมีดรรชนีหักเหในตัวกลางนั้นไม่คงที่ ทำให้รังสีทั้งสองเส้นมีเฟสที่แตกต่างกันดังนั้นเมื่อนำวัตถุวางใต้ผลึกแคลไซต์จะเกิดภาพซ้อนเป็น 2 ภาพ

วัสดุอื่นๆ ที่มี n คงที่ ยกตัวอย่างเช่น แก้ว, พลาสติกถ้าถูกแรงกระทำก็สามารถเกิดการหักเห 2 แนวได้เช่นกัน (โดย n เพิ่มขึ้นตาม F) จึงนำมาใช้ประโยชน์ด้านการออกแบบโครงสร้างจำลอง เมื่อมองผ่านแผ่นโพลาไรซ์จะเห็นลายมีดสว่างทำให้ทราบว่าเป็นบริเวณใดถูกแรงกระทำมาก หรือเสี่ยงต่อการแตกหักเพื่อจะได้แก้ไขก่อนการผลิตจริง



รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกที่ไม่สมมาตร ทำให้ผลึกมีดัชนีหักเหสองค่า

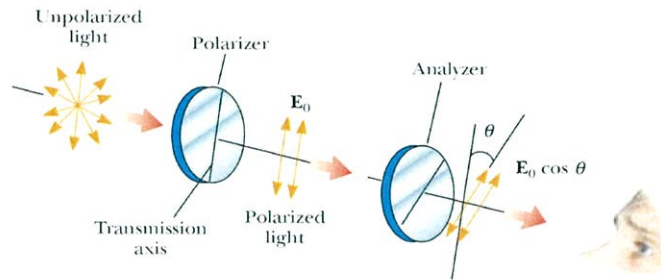
3) การทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์โดยการกระเจิงของแสง เมื่อแสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาในบรรยากาศของโลก แสงจะกระทบโมเลกุลของอากาศหรืออนุภาคในบรรยากาศ อิเล็กตรอนในโมเลกุลจะดูดกลืนแสงที่ตกกระทบนั้น และจะปลดปล่อยแสงนั้นออกมาอีกครั้งหนึ่งในทุกทิศทาง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การกระเจิงของแสง



รูปที่ 2.8 แสงโพลาไรซ์จากการกระเจิงของแสง

จากรูปที่ 2.8 แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแสงไม่โพลาไรซ์กระทบโมเลกุลของอากาศ สนามไฟฟ้าของแสงจะทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่ คล้ายกับการเคลื่อนที่กลับป้อนมาของประจุไฟฟ้าในสายอากาศ แต่มีรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ซับซ้อนกว่า อาจถือได้ว่าแสงอาทิตย์มีแนวของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งและแนวระดับดังรูป เมื่อแสงที่มีสนามไฟฟ้าในแนวระดับกระทบโมเลกุลของอากาศ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปมาในแนวระดับ และในขณะเดียวกันสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง ก็จะทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลของอากาศเคลื่อนที่ไปมาในแนวตั้ง อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในแนวระดับจะให้แสงโพลาไรซ์ในแนวระดับ แสดงดังรูปที่ 2.8 ส่วนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในแนวตั้งจะให้แสงโพลาไรซ์ในแนวตั้ง (ไม่ได้แสดงในรูป) เราสามารถตรวจสอบแสงโพลาไรซ์นี้ได้โดยให้ผู้สังเกตมองท้องฟ้าผ่านแผ่นโพลาไรซ์ แล้วหมุนแผ่นโพลาไรซ์ไปรอบๆ จะพบว่าความสว่างของแสงเปลี่ยนไป แสดงว่าแสงจากท้องฟ้าส่วนหนึ่งมีแสงโพลาไรซ์ปนอยู่ด้วยความรู้เรื่องโพลาไรเซชันของแสงได้นำไปใช้ในการผลิตแว่นตาโพลาไรซ์ และเพื่อช่วยลดปริมาณแสงสะท้อนจากวัตถุมาเข้าตา รวมทั้งมีการนำแผ่นโพลาไรซ์ไปใช้กับกล้องถ่ายรูป

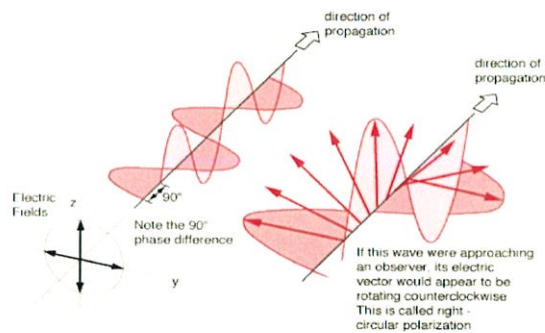
4) การทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์โดยการดุดกลืน ผลึกไดโครอิก (dichroic) คือผลึกที่มีสมบัติในการดุดกลืนแสงที่มีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าในทิศทางหนึ่งมากกว่าอีกทิศทางหนึ่ง ได้แก่ ทัวร์มาลีน (tourmaline) เมื่อให้แสงไม่โพลาไรซ์เคลื่อนที่ผ่านผลึกทัวร์มาลีน แสงที่มีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าในทิศทางหนึ่งจะถูกดุดกลืนมากกว่าแสงที่มีส่วนประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าอยู่ในทิศทางที่ตั้งฉากกัน ดังนั้น ถ้าผลึกมีความหนาพอแสงที่ผ่านออกไปจะมีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าอยู่ในทิศเดียว คือ เป็นแสงโพลาไรซ์ ถ้าวางผลึกทัวร์มาลีนอีกอันหนึ่งให้ขนานกับอันแรกแสงจะผ่านไปได้ แต่ถ้าวางผลึกทัวร์มาลีนอีกอันหนึ่งให้แกนตั้งฉากกับอันแรก แสงจะไม่ผ่าน



รูปที่ 2.9 แสงโพลาไรซ์จากการดุดกลืนแสง

2.2.2 โพลาไรซ์เชิงวงกลม (Circularly polarized) [7]

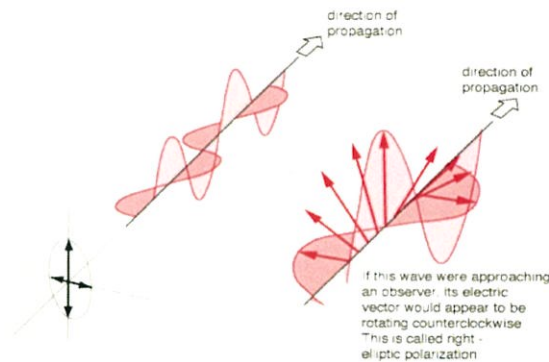
แสงโพลาไรซ์แบบวงกลม เป็นการโพลาไรซ์ที่แสงที่มีองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกันทั้งสององค์ประกอบมีแอมพลิจูดเท่ากันและมีเฟสต่างกัน 90° ถ้าพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิที่ตำแหน่งหนึ่งๆ ทิศของสนามไฟฟ้าหรือทิศของโพลาไรเซชันของแสงที่ผ่านตำแหน่งนั้นจะหมุน เปลี่ยนไปทวนหรือตามเข็มนาฬิกาแบบใดแบบหนึ่งตามเวลา โดยที่มีขนาดคงที่และมีคาบของการหมุนเท่ากับคาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือถ้าหากพิจารณาแสง ณ เวลาหนึ่งๆ ทิศของสนามไฟฟ้าสุทธิหรือทิศของโพลาไรเซชันของแสงที่ผ่านตำแหน่งต่างๆ ในเวลานั้นจะคงทวนหรือตามเข็มนาฬิกาแบบใดแบบหนึ่งไปตามตำแหน่งโดยมีขนาดคงที่และมีคาบของการคงกลับมาซ้ำทิศทางเดิมเท่ากับความยาวคลื่นของแสง



รูปที่ 2.10 แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม (circularly-polarized light)

2.2.3 โพลาริซ์เชิงวงรี (Elliptically polarized) ^[7]

แสงโพลาริซ์เชิงวงรี เป็นแสงที่มีองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกัน ทั้งสององค์ประกอบมีแอมพลิจูดเท่ากันและมีเฟสต่างกัน ไม่เท่ากับ 0° หรือ 90° หรือองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกันทั้งสององค์ประกอบมีเฟสเท่ากับ 90° แต่มีแอมพลิจูดต่างกัน ถ้าพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิที่ตำแหน่งหนึ่งๆ ทิศของสนามไฟฟ้าหรือทิศของโพลาไรเซชันของแสงที่ผ่านตำแหน่งนั้นจะหมุนเปลี่ยนไปทวนหรือตามเข็มนาฬิกาแบบใดแบบหนึ่งตามเวลา โดยที่มีขนาดไม่คงที่เสมือนกับว่าสนามไฟฟ้าหมุนรอบตำแหน่งนั้นเป็นวงรีโดยที่มีคาบของการหมุนเท่ากับคาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือถ้าพิจารณาแสง ณ เวลาหนึ่งๆ ทิศของสนามไฟฟ้าสุทธิหรือทิศของโพลาไรเซชันของแสงที่ผ่านตำแหน่งต่างๆ ในเวลานั้นจะควงทวนหรือตามเข็มนาฬิกาแบบใดแบบหนึ่งไปตามตำแหน่งโดยมีขนาดไม่คงที่แต่มีโปรเจกชันไปตามทิศการเคลื่อนที่เป็นวงรี และมีคาบของการควงกลับมาซ้ำทิศทางเดิมเท่ากับความยาวคลื่นของแสง



รูปที่ 2.11 แสงโพลาริซ์แบบวงรี (elliptically-polarized light)

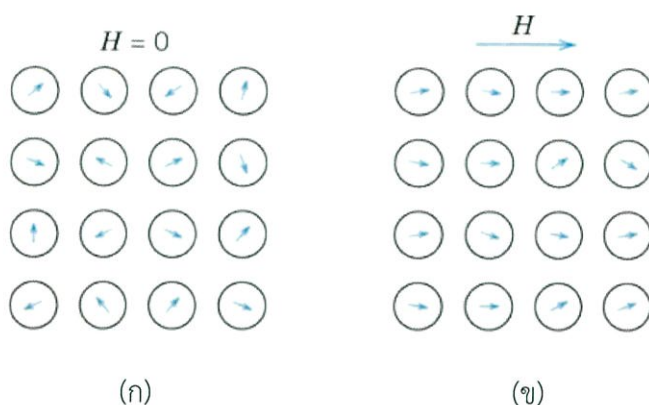
2.3 สภาวะแม่เหล็กและวัสดุแม่เหล็ก (Magnetism and Magnetic Materials)

2.3.1 สภาวะแม่เหล็กไดอา (Diamagnetism) ^[8]

วัสดุแม่เหล็กไดอา (Diamagnetism) เป็นคุณสมบัติของแม่เหล็กที่อ่อนแอที่สุด ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบที่ไม่ถาวร (nonpermanent) หรือถาวร (permanent) ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำต่ออะตอมของวัสดุ จะทำให้อิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียสของอะตอมเกิดการเสียดุลเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเล็กๆ ขึ้นในอะตอม ซึ่งค่าของ magnetic moment มีค่าน้อยมากและอยู่ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก จึงมีผลทำให้เกิดผลของแม่เหล็กในทางลบซึ่งเรียกว่า diamagnetism โดยค่าของ volume susceptibility, χ_m มีค่าน้อยมากประมาณ -10^{-5}

2.3.2 สภาวะแม่เหล็กพารา (Paramagnetism)

วัสดุแม่เหล็กพารา (Paramagnetism) เป็นวัสดุที่สามารถแสดง magnetic susceptibility ในเชิงบวกเล็กน้อยเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กจะเรียกว่า paramagnetism และสภาวะแม่เหล็กนี้จะหายไปเมื่อวัสดุนั้นถูกนำออกจากสนามแม่เหล็กวัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กแบบ paramagnetism นี้ มักมีค่าความไวต่อสนามแม่เหล็กอยู่ในช่วง 10^{-6} – 10^{-2} ซึ่งสภาวะแม่เหล็กแบบนี้จะเกิดได้เนื่องจาก การเรียงตัวของ magnetic dipole moment ของอะตอมเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ทิศทางการเรียงตัวจะเกิดความไม่เป็นระเบียบมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็นผลทำให้สภาวะแม่เหล็กแบบ paramagnetism



รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กพารา

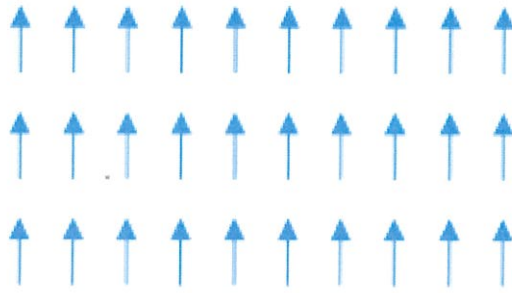
(ก) ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก

(ข) มีสนามแม่เหล็กภายนอก

2.3.3 สภาวะแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetism)^[9]

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetism) เป็นสภาวะแม่เหล็กที่สามารถคงสภาพอำนาจแม่เหล็กอยู่ได้ โดยไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก และทิศทางโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมไปทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 แตกต่างจากสารแม่เหล็กไดอะ ซึ่งโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นได้

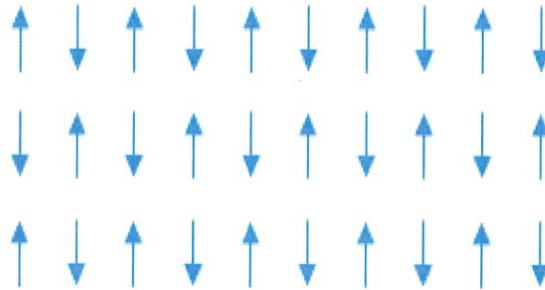
เมื่อใส่สนามภายนอกเข้าไปเท่านั้น หรือสารแม่เหล็กพาราที่แสดงอำนาจแม่เหล็กเมื่อมีสนามภายนอก และไม่มีอำนาจแม่เหล็ก เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก สารแม่เหล็กเฟอร์โรมีความสำคัญมากต่องานทางด้านวิศวกรรมวัสดุ และอุตสาหกรรม ได้แก่ เหล็ก (Fe), โคบอลต์ (Co) และนิกเกิล (Ni) สมบัติสารแม่เหล็กเฟอร์โรของธาตุแทรนซิชันเหล่านี้เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ที่อยู่ระดับพลังงานย่อยชั้น 3d จำนวน 4, 3 และ 2 ตามลำดับ จึงทำให้เหล็ก, โคบอลต์ และนิกเกิลแสดงสมบัติสภาพแม่เหล็กเฟอร์โรได้



รูปที่ 2.13 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กเฟอร์โร

2.3.4 สภาวะแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (Anti-ferromagnetism)

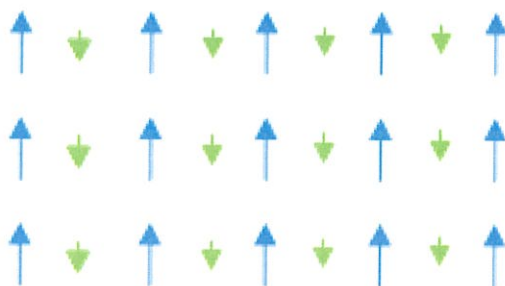
วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (Anti-ferromagnetism) เป็นวัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กที่เกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมในวัสดุมีทิศทางตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ทำให้เกิดการหักล้างกัน เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมที่มีทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ส่วนโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมที่มีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง ทำให้ผลรวมแม่เหล็กสุทธิไม่เป็นศูนย์ วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร เช่น แมงกานีส (Mn) และ โครเมียม (Cr)



รูปที่ 2.14 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กแอนติเฟอร์โร

2.3.5 สภาวะแม่เหล็กเฟอร์รี (Ferrimagnetism)

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์รี (Ferrimagnetism) เป็นวัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กที่เกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงข้ามกัน ดังรูปที่ 2.15 โมเมนต์แม่เหล็กจะไม่หักล้างกันหมด จะยังคงมีค่าโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิในทิศทางหนึ่ง โมเมนต์แม่เหล็กเหล่านี้ทำให้วัสดุเหล่านี้สามารถแสดงสมบัติสภาวะแม่เหล็กได้โดยส่วนใหญ่จะพบในวัสดุเซรามิกที่ประกอบด้วยไอออนต่างชนิดกัน ซึ่งมีโมเมนต์แม่เหล็กมากน้อยแตกต่างกัน เช่น แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) วัสดุแม่เหล็กเฟอร์รีจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ จึงมักถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.15 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กเฟอร์รี

2.4 ประเภทของแก้ว^[10]

ประเภทของแก้วที่แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี ได้เป็น 6 ชนิด ดังต่อไปนี้

2.4.1 แก้วซิลิกาหลอมเหลว (silica glass) หรือแก้วควอตซ์ (quartz)

แก้วซิลิกาหลอมเหลว (silica glass) หรือแก้วควอตซ์ (quartz) ได้จากการหลอมเศษแก้ว ททรายแก้วหรือพวกหินควอตซ์โดยไม่เติมสารประกอบอื่น ซึ่งจึงจะต้องทำการหลอมที่อุณหภูมิสูงถึง 1,710 องศาเซลเซียส ขณะหลอมจะได้น้ำแก้วที่มีความหนืดสูงจึงเกิดฟองอากาศมากแข็งตัวเร็ว ทำให้ขึ้นรูปยาก จึงนิยมหลอมในสุญญากาศ สมบัติของซิลิกาหลอม คือ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำทนต่อสารเคมีและทนความร้อนได้ดี ยอมให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตส่งผ่านได้ดี (โปร่งใส) จึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้ในห้องปฏิบัติการ (laboratory) ใช้งานทางด้านไฟฟ้าและใช้งานเกี่ยวกับด้านแสง แต่แก้วชนิดนี้จะมีราคาแพง

2.4.2 แก้วซิลิกาหลอมเหลวร้อยละ 96 (96% silica glass)

แก้วซิลิกาหลอมเหลวร้อยละ 96 (96% silica glass) มีสมบัติเกือบจะเหมือนแก้วประเภท ซิลิกาหลอม แต่มีจุดหลอมต่ำกว่า มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า เพราะมีสารช่วยหลอมละลาย (fluxing oxide) และสารอื่นอีกประมาณร้อยละ 4 เพื่อลดจุดหลอมละลายให้ต่ำลงและสะดวกในการขึ้นรูป แก้วชนิดนี้อาจเรียกว่า ไวคอร์ (vycor) นิยมใช้ทำเครื่องใช้ในห้องทดลองพวกหลอดแก้ว (tubes) หรือถ้วแก้ว (rod)

2.4.3 แก้วโซดาไลม์ (soda lime glass)

แก้วโซดาไลม์ (soda lime glass) เป็นแก้วชนิดที่ใช้มากที่สุด แก้วชนิดนี้ถูกให้ความหมายไว้ว่าเป็นแก้วที่ทำมาจากไลม์ (lime) โซดา (soda) และทรายเป็นส่วนผสมหลักโดยใช้โซดาหรือโพแทส (potash) ผสมเป็นสารช่วยหลอมละลายเพื่อลดจุดหลอมให้ต่ำลง ลดความหนืดให้สะดวกในการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังมีไลม์ (calcium oxide, CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide, MgO) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide, Al₂O₃) ปนอยู่เล็กน้อย เพื่อให้แก้วมีความคงทนต่อสารเคมี แก้วชนิดโซดาไลม์นี้ ถ้าขึ้นรูปให้บางจะไม่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิโดยกะทันหันได้ (thermal shock) แก้วชนิดนี้นิยมใช้กันมากทั้งที่เป็น แผ่น (Sheet glass), แท่งแก้วทรงหรือหลอดแก้ว (Glass tubing) และแท่งแก้วตัน (Glass rod) นิยมใช้ทำขวด กระจกหน้าต่าง กระจกแผ่น ถ้วยแก้ว แก้วกันกระสุน (bullet proof glass) แก้วกระจกรถยนต์ แท่งคนสาร หลอดทดลอง เป็นต้น

2.4.4 แก้วเลดซิลิเกต (leadalkali silicate glass)

แก้วชนิดนี้ได้จากการแทนแคลเซียมออกไซด์ด้วยตะกั่ว (lead oxide, PbO) ตามปกติแคลเซียมออกไซด์จะใช้ได้ไม่เกินร้อยละ 15 แต่ถ้าใช้ตะกั่วแทน สามารถใช้ได้ถึงร้อยละ 80 บางครั้งใส่ตะกั่วถึงร้อยละ 92 แก้วจึงมีน้ำหนักมาก โดยตะกั่วทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมละลายทำให้มีจุดหลอมต่ำกว่าแก้วโซดาไลม์ และตะกั่วช่วยให้แก้วมีความแวววาวสุกใสสวยงาม แต่ความหนาแน่น การหักเหของแสงความมันเงาและราคาสูงกว่า จึงนิยมใช้ทำหลอดแก้วเพื่อการให้แสงสว่าง และยังนิยมนำไปทำผลิตภัณฑ์ประเภทงานศิลปะ (art ware) และแก้วเจียรไน รวมทั้งนิยมนำไปใช้ผลิตอุปกรณ์วิทยุ เรดาร์ (radar) และเครื่องหลอดโทรทัศน์ หลอดวิทยุต่าง ๆ เป็นต้น เนื่องจากมีความต้านทานทางไฟฟ้าดี

2.4.5 แก้วโบโรซิลิเกต (borosilicate glass)

แก้วชนิดนี้มีความหมายที่กล่าวไว้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมว่า แก้วโบโรซิลิเกตเป็นแก้วที่มีโบรอนไตรออกไซด์ (borontrioxide, B₂O₃) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือนิยมเรียกว่าแก้วไพเรก (pyrex) ได้แก่ แก้วทนไฟ แก้วชนิดนี้ใช้โบรอนออกไซด์เป็นตัวช่วยหลอมละลาย โดยโบรอนจะลดความหนืดของแก้วลงแต่ทำได้น้อยกว่าโซดา การขึ้นรูปค่อนข้างลำบากแต่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหันได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีและมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ นิยมใช้ทำภาชนะหุงต้ม (cooking ware) ชนิดที่สัมผัสความร้อนโดยตรง ใช้ทำภาชนะ ที่ใช้ในห้องทดลอง และทำเลนส์ของกล้องดูดาว

2.4.6 แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate glass)

แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate glass) ได้แก่ แก้วที่มีอะลูมิเนียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 20 มีแคลเซียมและแมกนีเซียมปริมาณน้อย ทำให้การหลอมยากและการขยายตัวต่ำ เมื่อได้รับความร้อนจึงเหมาะที่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์ประเภทที่ต้องสัมผัสกับอุณหภูมิสูง (high temperature ware) เช่น ภาชนะหุงต้ม

2.5 เลเซอร์ (Laser) ^[5]

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงประเภทโคฮีเรนต์ ซึ่งกำเนิดแสงโดยกระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (stimulated emission) ซึ่งต่างจากแหล่งกำเนิดแสงประเภทอินโคฮีเรนต์ซึ่งกำเนิดแสงโดยกระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous emission) เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มนุษย์สร้างขึ้น แสงที่มีสมบัติเช่นเดียวกับแสงเลเซอร์ไม่มีในธรรมชาติ

คำว่า laser เป็นคำย่อของคำว่า Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation เป็นการกำเนิดแสงโดยใช้กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นซึ่งเสนอโดยไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1917 แต่ไม่สามารถทำให้เกิดขึ้นได้จนกระทั่งถึงปี ค.ศ. 1957 ได้มีการประดิษฐ์อุปกรณ์กำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านไมโครเวฟที่มีสมบัติโคฮีเรนต์ โดยกระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นของไอน์สไตน์ อุปกรณ์นี้มีชื่อว่า Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ 2 กลุ่มในเวลาเดียวกัน คือ กลุ่มของ Charles H. Townes, J. P. Gordon และ H. J. Zeiger แห่งมหาวิทยาลัยโคลัมเบียในนิวยอร์ก และกลุ่มของ Nikolay Basov and Alexander Prokhorov แห่งสถาบันเลเบเดฟ (Labeled Institute) ในกรุงมอสโก โดยการกระตุ้นให้โมเลกุลของแอมโมเนียปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 24 GHz

ต่อมา Townes ซึ่งทำงานร่วมกับ Arthur L. Schawlow ได้อธิบายหลักการของ maser ที่สามารถปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสง (optical maser หรือ laser) ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ. 1960 Theodore H. Maiman แห่งห้องปฏิบัติการ Hughes ในแคลิฟอร์เนีย ได้สร้างเลเซอร์สำเร็จเป็นคนแรกซึ่งเป็นเลเซอร์ทับทิม (ruby laser) ซึ่งให้แสงสีแดง (Townes, Basov และ Prokhorov ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1964) หลักการพื้นฐานและโครงสร้างของเลเซอร์เป็นสิ่งที่เข้าใจง่าย แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อวิเคราะห์ถึงหลักการทางฟิสิกส์ของเลเซอร์อย่างลึกซึ้งแล้วพบว่า ซับซ้อนมาก

2.5.1 ชนิดของเลเซอร์ ^[11]

เราสามารถแบ่งชนิดของเลเซอร์ตามลักษณะของตัวกลางเลเซอร์ได้ดังนี้

- Gas Laser: สารตัวกลางเลเซอร์มีลักษณะเป็นก๊าซ เช่น CO₂ Laser, Argon Laser, Xenon Laser, He-Ne Laser
- Solid State Laser: ใช้สารตัวกลางเลเซอร์ที่เป็นแท่งผลึกแข็ง เช่น Nd:YAG Laser
- Dye Laser: สารตัวกลางมีลักษณะเป็นของเหลว เช่น Rhodamin 6G Laser
- Semiconductor Laser: เป็นเลเซอร์ที่ใช้สารตัวกลางเลเซอร์เป็นสารกึ่งตัวนำ เช่น Diode Laser ชนิดต่าง ๆ

2.5.2 เลเซอร์ที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม

เลเซอร์ที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ได้แก่ He-Ne Laser, Argon-Ion Laser, Carbon dioxide Laser และ Nd:YAG Laser เลเซอร์แต่ละชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

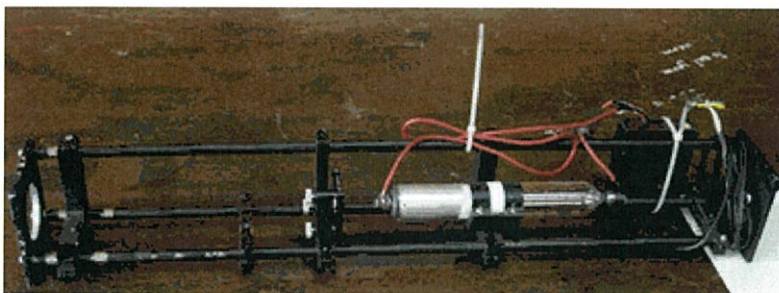
1) ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ (He-Ne Laser)

ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์เป็นเลเซอร์ก๊าซชนิดแรก ประกอบด้วยก๊าซฮีเลียม (He) และนีออน (Ne) ในอัตราส่วนประมาณ 10:1 แหล่งกำเนิดพลังงานที่กระตุ้นให้เกิดประชากรผกผัน (มักเรียกอีกชื่อว่า pumping source) ที่ใช้จะเป็น electrical discharge คือทำให้มีอิเล็กตรอนวิ่งผ่านและชนกับก๊าซที่บรรจุอยู่ในหลอดเลเซอร์

แสงเลเซอร์ที่ได้จะเป็นสีแดงมีความยาวคลื่น 632.8 nm (หรือ $632.8 \times 10^{-9} \text{m}$) และมีกำลังประมาณ 0.5–50 mW ผู้สร้างสามารถเลือกการเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมให้เกิดเป็นเลเซอร์สีเขียว และอินฟราเรด ได้ แต่ไม่นิยม เพราะแสงดังกล่าวเกิดยากกว่าและต้องใช้ต้นทุนสูง มีการใช้งานฮีเลียม-นีออนเลเซอร์มากในงานศึกษาวิจัย โดยมากใช้ในการสอบเทียบการวัดการสร้างภาพโฮโลแกรมในงานอุตสาหกรรมใช้เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบการวัดเชิงมิติ



รูปที่ 2.16 ระบบ He-Ne Laser (กล่องสีขาว) ที่ใช้ในการสร้างภาพโฮโลแกรม



รูปที่ 2.17 He-Ne Laser ก๊าซบรรจุอยู่ในหลอดแก้ว จะเห็นกระจกที่ปลายทั้งสองข้าง

2) อาร์กอน-อไอออน เลเซอร์ (Argon-ion Laser)

ตัวกลางที่เป็นต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์ชนิดนี้ คือ อไอออนของอาร์กอน ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นอะตอมของอาร์กอน จนอิเล็กตรอนบางอนุภาคหลุดออกไป Pumping source ที่ใช้เป็นแบบ electrical discharge ทำให้ไอออนของอาร์กอนถูกกระตุ้นไปอยู่ที่ชั้นพลังงานที่สูงกว่าที่เรียกว่า metastable state โดยที่บริเวณที่เป็น metastable states จะมีหลายชั้นย่อย ทำให้สามารถเกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานได้หลายแบบ แต่ที่เด่นชัดคือ แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 514 nm (สีเขียว) และ 488 nm (สีน้ำเงิน) กำลังของแสงเลเซอร์ที่ได้จะอยู่ในช่วง 1–20 W

ข้อเสียของเลเซอร์ชนิดนี้ คือ ต้องใช้กระแสไฟฟ้าในการ Pump สูงมาก เพราะต้องทำหน้าที่ทั้งทำให้อะตอมเป็นไอออน และกระตุ้นไอออนให้เกิดประชากรผกผัน ทำให้เกิดความร้อนสูงจึงต้องมีระบบหล่อเย็น

อาร์กอน-อไอออนเลเซอร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์(ผ่าตัด), สร้างภาพโฮโลแกรม (holography) และงานด้าน spectro photometry



รูปที่ 2.18 ลำแสงสีเขียวของอาร์กอน-อไอออน เลเซอร์

3) คาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์ (Carbon dioxide Laser)

คาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์เป็นเลเซอร์ชนิดก๊าซ ประกอบด้วยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซฮีเลียม ในอัตราส่วนประมาณ 1:1:10 เพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์ที่แตกต่างเลเซอร์ก๊าซประเภทอื่นมาก เพราะแสงเลเซอร์ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอม แต่เกิดจากการหมุนและการสั่นของโมเลกุลของก๊าซ โดยปกติโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยมีออกซิเจนอยู่สองข้างและคาร์บอนอยู่ตรงกลาง การสั่นของโมเลกุลเป็นการสั่นขึ้นลงหรือเข้าออกของออกซิเจน เมื่อเทียบกับคาร์บอนพลังงานจากการเปลี่ยนระดับพลังงานในการสั่นของโมเลกุลจะมีค่าประมาณ 0.1 eV ได้ความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ประมาณ 10.6 μm (10.6×10^{-6} m) ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านอินฟราเรด

การที่พลังงานจากการเปลี่ยนระดับพลังงานมีค่าต่ำ ทำให้ Pump โดยใช้ Electrical discharge ได้ง่าย และมีประสิทธิภาพสูงถึง 20% ซึ่งถือว่ามากเมื่อเทียบกับเลเซอร์ โดยทั่วไปที่มีประสิทธิภาพประมาณ 1%

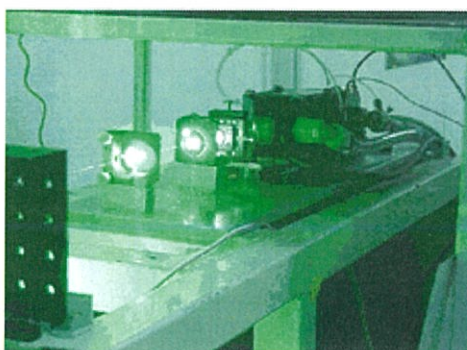
คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ โดยทั่วไปจะมีกำลังเฉลี่ยประมาณ 10–2,000 W นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการตัดกระดาษหรือผ้า หรือในงานแกะสลักพลาสติกและไม้ จะใช้กำลังอยู่ที่ประมาณ 10–5 W แต่ถ้าใช้ในการตัดหรือเจาะโลหะหรือวัสดุที่มีความแข็งสูงมาก ต้องใช้กำลังอยู่ที่ประมาณ 100 W ขึ้นไป ทำให้เลเซอร์ชนิดนี้ไม่เหมาะในการนำมาประยุกต์ใช้ในการแกะสลัก หรือเจาะวัสดุที่มีความแข็งสูง โดยส่วนใหญ่แล้วมักใช้กับวัสดุจำพวกอลูมิเนียม เนื่องจากระบบคาร์บอนไดออกไซด์แบบชนิดที่มีกำลังสูงจะมีขนาดใหญ่ และมีอุปกรณ์เสริมต่อพ่วง เช่น ถังก๊าซ ป้อนสุญญากาศ และอุปกรณ์ควบคุมความดัน รวมถึงแหล่งจ่ายกำลังแรงดันสูงประมาณ 10–25 kV

4) นีโอติเมียมแย็กเลเซอร์ (Nd:YAG Laser)

นีโอติเมียมแย็กเลเซอร์ เป็นเลเซอร์ชนิดของแข็ง โดยมี host เป็น ผลึกของ Yttrium-aluminium garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) หรือเรียกย่อๆว่า “YAG” ส่วน impurity คือ Nd^{3+} ซึ่งจะถูก dope เข้าไปประมาณ 1% โดยน้ำหนัก

โดยทั่วไปนีโอติเมียมแย็กเลเซอร์ มีกำลังเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3–1,000 W สามารถให้แสงได้ทั้งแบบพัลส์ (pulse) และแบบต่อเนื่อง (continuous) ขึ้นอยู่กับว่า pumping source ที่ใช้เป็นแบบหลอดไฟแฟลช หรือหลอดไฟอาร์ค

เลเซอร์ชนิดนี้มีความยาวคลื่น 1064 nm อยู่ในย่านอินฟราเรด แต่นิยมใช้ควบคู่กับ second harmonic crystal เช่น KTP ทำให้ได้ความยาวคลื่น 532 nm เป็นแสงสีเขียวออกมาได้ เนื่องจากเลเซอร์ชนิดนี้สามารถทำให้เกิดค่ากำลังสูงสุดถึง 2,000 W ได้ในระบบเลเซอร์ที่มีค่ากำลังเฉลี่ย 3 W เท่านั้น จึงทำให้ระบบเลเซอร์นี้มีขนาดเล็ก สามารถนำไปทำการเจาะ ตัด หรือแกะสลักวัสดุที่มีความแข็งสูง วัสดุจำพวกโลหะ หรือวัสดุเช่นแก้ว เซรามิก หรืออัญมณี เป็นอย่างดี

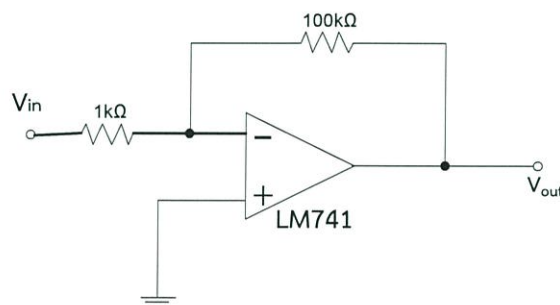


รูปที่ 2.19 แสงสีเขียวของ นีโอติเมียมแย็กเลเซอร์

ปัจจุบันระบบนิโอดีเมียมแฉีกเลเซอร์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็นแบบใช้หลอดไฟแฟลช หรือหลอดไฟอาร์ค เป็น pumping source ซึ่งระบบนี้มีการสิ้นเปลืองพลังงานมาก เนื่องจากพลังงานทั้งหมดที่ใส่ให้แก่หลอดอาร์คจะมีเพียง 4–7% เท่านั้นที่ถูกนำไปใช้ในการกระตุ้น ส่วนที่เหลือคือความร้อนซึ่งจะต้องถูกระบายทิ้งออกไป ในปัจจุบันมีการพัฒนาเลเซอร์ไดโอดให้มีประสิทธิภาพสูงและมีราคาที่ถูกลงมาก จึงได้นำเอาเลเซอร์ไดโอดมาใช้เป็นแหล่งกระตุ้นแทนที่หลอดไฟอาร์คชนิดเดิม ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นถึง 50–70% ของประสิทธิภาพรวม โดยที่ระบบเดิมมีค่าเพียง 2–3% เท่านั้น ระบบจึงมีขนาดเล็กลงมาก และมีอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีขนาดเล็กด้วย ทำให้ค่าใช้จ่ายในการทำงานลดลงมาก

2.6 วงจรขยายสัญญาณ

สัญญาณไฟฟ้าต่าง ๆ นั้น มักจะมีกำลังต่ำ ไม่เพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้งานตามที่เราต้องการได้ เพื่อให้สัญญาณไฟฟ้ามียกกำลังสูงขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณไฟฟ้าให้มีขนาดโตขึ้นพอที่จะนำไปจัดการหรือวิเคราะห์ต่อไปได้ โดยใช้วงจรขยายซึ่งวงจรขยายสัญญาณจะทำหน้าที่แปลงกระแสที่เป็นแรงดันและขยายสัญญาณให้ค่าสูงขึ้น อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณคือออปแอมป์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ออปแอมป์เบอร์ LM 741 นั้นมาใช้งาน โดยมีวงจรขยายแสดงดังรูปที่ 2.20



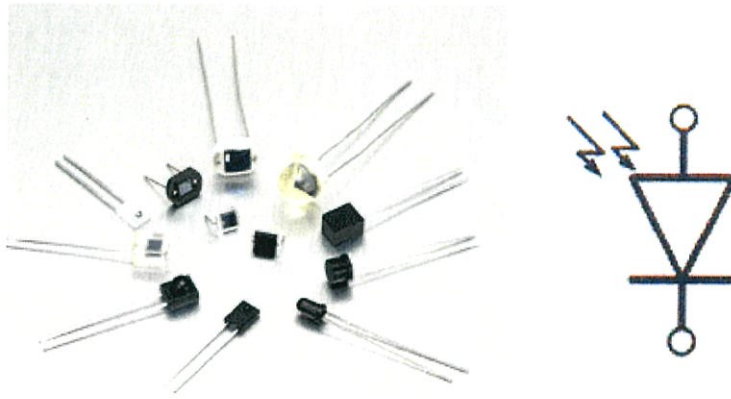
รูปที่ 2.20 วงจรขยายสัญญาณ

2.7 ตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสง คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดแสงมีหลายชนิด เช่น LDR, Photo Transistors, IR Sensor และ Photo Diode แล้วแต่ในการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับการใช้งาน และโฟโตไดโอดก็เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดแสงเช่นกัน

โฟโตไดโอด (Photo diode) เป็นไดโอดที่จะทำงานเมื่อมีแสงมาตกกระทบ^[12] เมื่อแสงตกกระทบบิเล็กตรอนที่ ยึดติดอยู่กับอะตอมในขั้วผลึกจะแตกหลุด เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ และโฮลอิสระขึ้น อิเล็กตรอน และโฮลเหล่านี้จะเคลื่อนที่เข้าไปในเขตปลอดพาหะ เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าย้อนด้วยปริมาณที่แปรเปลี่ยนตามความเข้มแสง เรียกว่า กระแสโฟโต

ในการนำโฟโตไดโอดไปใช้งานต้องต่อในลักษณะไบแอสกลับ คือ ต่อแอโนดเข้ากับขั้วไฟลบ, แคโทดเข้ากับขั้วไฟบวก จนเมื่อมีแสงมาตกกระทบจึงจะสามารถนำกระแสได้ แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่ไม่มีแสงมาตกกระทบก็จะมีกระแสรั่วไหลอยู่ค่าหนึ่งประมาณ $10 \mu\text{A}$ เมื่อมีแสงมาตกกระทบ กระแสจะไหลเพิ่มเป็นประมาณ $1,000 \mu\text{A}$



รูปที่ 2.21 ลักษณะของโฟโตไดโอดและสัญลักษณ์ที่ใช้ในวงจร

โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำ อิมพีแดนซ์สูง และเมื่อนำมาใช้จำเป็นต้องมีการออกแบบวงจรที่ซับซ้อนกว่าแอลดีอาร์ แต่ว่าการตอบสนองในการทำงานของโฟโตไดโอดเป็นเชิงเส้นและมีความไวในการทำงานสูงกว่า แอลดีอาร์มาก เพราะใช้เวลาในการตอบสนองการทำงานเพียง 200ns เท่านั้น โฟโตไดโอดมักถูกนำไปใช้ในตัวอ่านเทปความเร็วสูง และในออปโตไอโซเลเตอร์

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 ปรากฏการณ์ฟาราเดย์ของน้ำ และแก้วฟลินต์ (Faradey Effect Rotation for Water and Flint Glass)^[3]

ในปี 2540 Kāshif Rasool Sayan ได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ของน้ำ และแก้วฟลินต์ โดยได้ออกแบบเครื่องมือสำหรับวัดค่าคงที่ verdet ซึ่งมีแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 632.8 nm และเลือกใช้วัสดุตัวกลางที่แตกต่างกัน คือ น้ำ และแก้วฟลินต์ โดยค่าคงที่ verdet วัสดุตัวกลางที่เป็น น้ำ และแก้วฟลินต์ที่ได้จากทฤษฎีและจากงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ verdet ของน้ำและแก้วฟลินต์

ชนิดของวัสดุตัวกลาง	ค่าคงที่ verdet จากทฤษฎี		ค่าคงที่ verdet จากงานวิจัย	
	rad/G-cm	°/G-cm	rad/G-cm	°/G-cm
น้ำ	3.80×10^{-6}	2.18×10^{-4}	1.30×10^{-5}	7.45×10^{-4}
แก้วฟลินต์	1.77×10^{-5}	1.01×10^{-3}	1.79×10^{-5}	1.03×10^{-3}

2.8.2 ปฏิกิริยาฟาราเดย์(Faradey Effect)^[2]

ในงานวิจัย เรื่อง Polarimetry and Schlieren diagnostics of underwater exploding wires ซึ่งจัดทำโดย A. V. Fedotov-Gefen และ Ya. E. Krasik โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟาราเดย์ซึ่งปรากฏการณ์ฟาราเดย์เป็นหมุนควงของระนาบการโพลาไรเซชันเชิงเส้นของแสงภายใต้ทิศทางของสนามแม่เหล็ก โดยสามารถคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (α) ได้จาก $\alpha = V \int B_{\parallel} dl$ เมื่อ V ($^{\circ}/G\cdot cm$) คือ ค่าคงที่ verdet ของวัสดุตัวกลาง, B (G) คือ สนามแม่เหล็กในทิศขนานกับลำแสงเลเซอร์ และ l (cm) คือ ความยาวของวัสดุตัวกลางจะได้ว่าค่าคงที่ verdet สำหรับน้ำ ที่ความยาวคลื่น 532 nm เท่ากับ $2.8 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}/G\cdot cm$

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยเรื่อง การพัฒนาชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ สำหรับใช้ในรายวิชาปฏิบัติการสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Devices Laboratory) ผู้วิจัยได้ดำเนินการเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ และขั้นตอนที่ 2 การนำชุดทดลองที่ผ่านการปรับปรุงมาทดลองใช้ในการเรียนการสอน โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

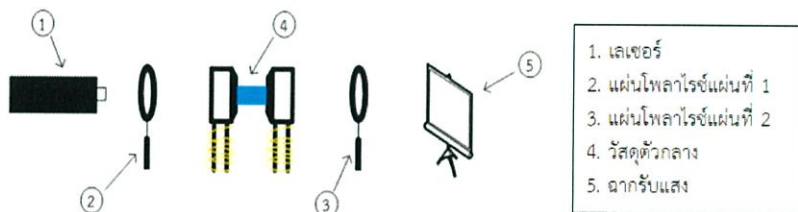
3.1 การทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์

3.1.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์จากชุดทดลองที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการ

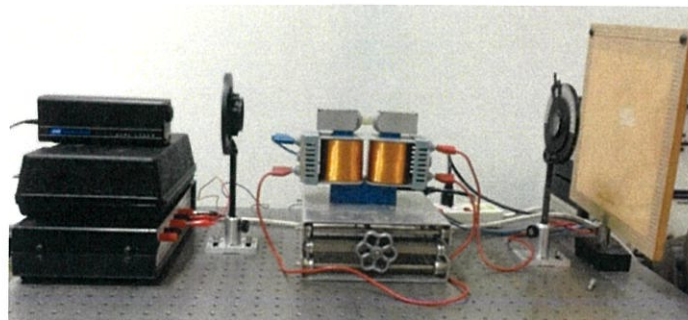
วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการ
- วิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเทียบกับงานวิจัยที่สืบค้นได้

การจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์

(ก) ไดอะแกรม

(ข) อุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง จะประกอบด้วย

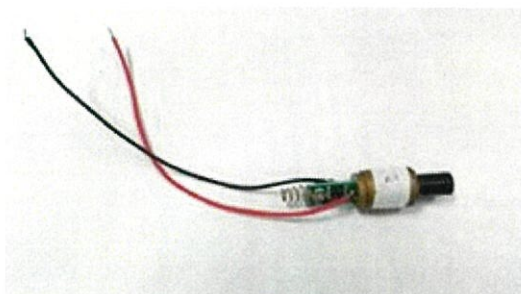
1. เลเซอร์ (Laser)

- เลเซอร์ HeNe ที่ให้ความยาวคลื่น 632.8 nm



รูปที่ 3.2 เลเซอร์ HeNe

- เลเซอร์ไดโอดสีเขียว ที่ให้ความยาวคลื่น 532 nm



รูปที่ 3.3 เลเซอร์ไดโอดสีเขียว

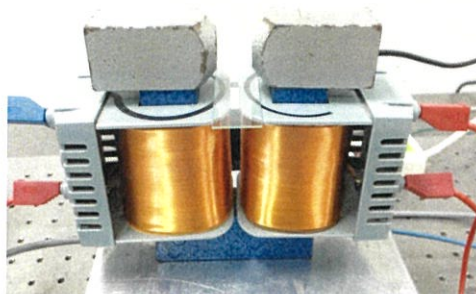
2. แผ่นโพลาไรซ์ (Polarizing filter) 2 แผ่น

- แผ่นที่ 1 ทำหน้าที่กรองแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้เป็นแสงโพลาไรซ์
- แผ่นที่ 2 ทำหน้าที่กรองแสงโพลาไรซ์ที่บิดไป เมื่อผ่านมาจากวัสดุตัวอย่าง และมีสเกลวัดมุมที่แสงบิดไป



รูปที่ 3.4 แผ่นโพลาไรซ์ (Polarizing filter)

3. ขดลวด (Coil,600 turns) ทำหน้าที่กำเนิดสนามแม่เหล็ก



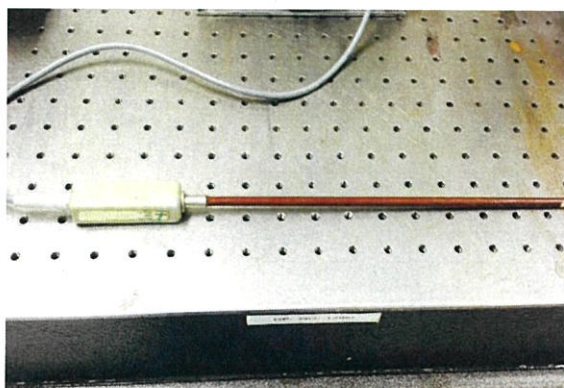
รูปที่ 3.5 ขดลวด (Coil,600 turns)

4. แหล่งจ่ายไฟ (Power supply) ทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับขดลวด



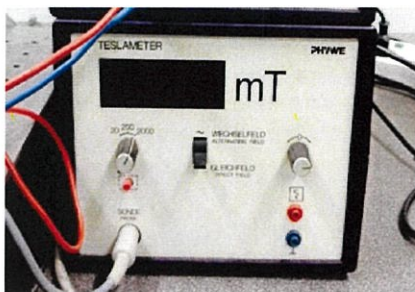
รูปที่ 3.6 แหล่งจ่ายไฟ (Power supply)

5. Hall probe ทำหน้าที่วัดสนามแม่เหล็ก



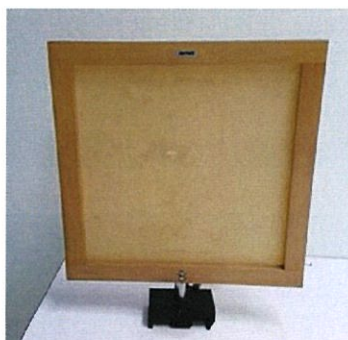
รูปที่ 3.7 Hall probe

6. เทสลามิเตอร์ (Tesla Meter) ทำหน้าที่รับสัญญาณจาก Hall probe มาแสดงผลเป็นค่าสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.8 เทสลามิเตอร์ (Tesla Meter)

7. ฉากรับแสง (Screen) ทำหน้าที่รับแสง

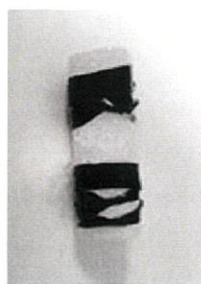


รูปที่ 3.9 ฉากรับแสง (Screen)

8. วัสดุที่ต้องการทดสอบ ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาวัสดุ 2 ชนิด คือ แท่งแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm ยาว 3 cm และน้ำที่บรรจุในหลอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm ยาว 3 cm



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.10 วัสดุที่ต้องการทดสอบ

(ก) แท่งแก้ว

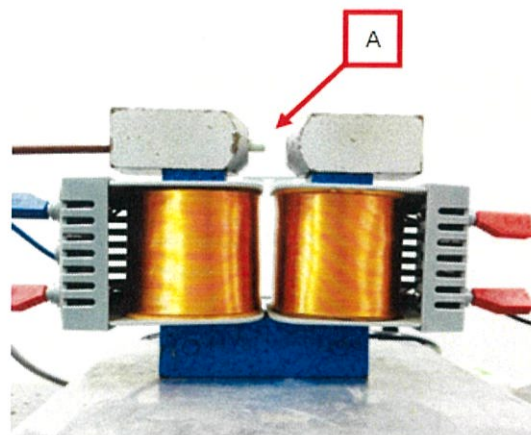
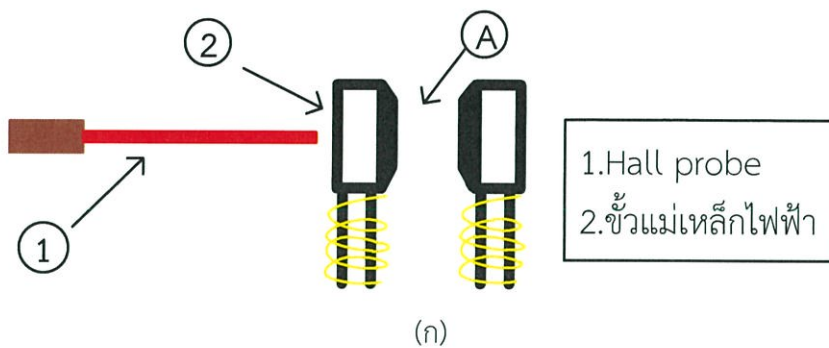
(ข) น้ำที่บรรจุในหลอด

ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 การวัดค่าสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากการทดลองนี้จะต้องนำเอาวัสดุตัวอย่างมาวางในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก (ตำแหน่ง A) ดังรูปที่ 3.2 จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาสนามแม่เหล็กในบริเวณนี้ว่ามีลักษณะอย่างไร ในการทดลองนั้นจะแบ่งเป็นตอนต่างๆ ดังนี้

1. ทำการวัดสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall probe บริเวณตำแหน่ง A จำนวน 20 จุด แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การจัดวางอุปกรณ์การทดลองในการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

(ก) ไดอะแกรม

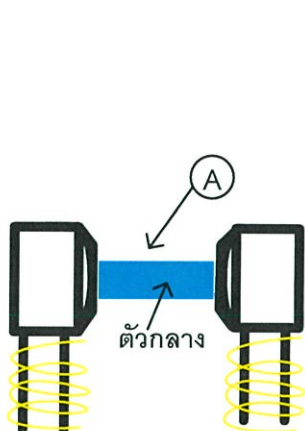
(ข) อุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการ

2. จ่ายกระแสให้กับขดลวดในช่วง 0.5 A แล้วทำการวัดค่าสนามแม่เหล็กบริเวณตำแหน่ง A ดังรูปที่ 3.11 โดยจะทำการวัดทั้งหมด 20 จุด
3. ปรับค่ากระแสเพิ่มทีละ 0.5 A และทำการทดลองข้อ 2 ซ้ำ จนกระทั่งถึงค่ากระแส 3.5 A

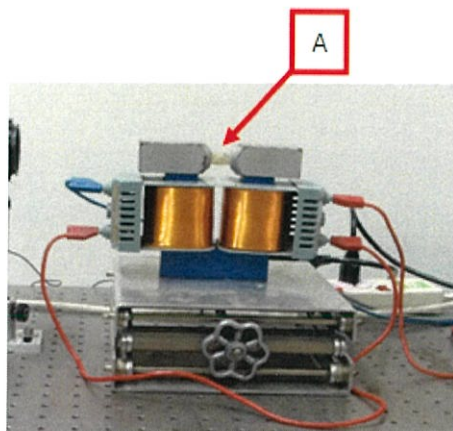
4. นำข้อมูลมาพล็อตกราฟ เพื่อพิจารณาความเข้มของสนามแม่เหล็กในแต่ละตำแหน่ง และทำการหาค่าสนามแม่เหล็กที่ค่ากระแส 0.5-3.5 A เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าคงที่ verdet ของวัสดุ

ขั้นตอนที่ 2 การหาค่าคงที่ verdet ของวัสดุ

1. นำวัสดุที่ต้องการทดสอบมาติดตั้งบริเวณตำแหน่ง A ดังรูปที่ 3.12



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.12 การจัดวางวัสดุตัวอย่าง

(ก) ไดอะแกรม

(ข) อุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการ

- ฉายแสงเลเซอร์ HeNe ผ่านบริเวณใจกลางของแท่งแก้ว และให้แสงตกกระทบบลงบนฉากรับภาพ
- ปรับกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟให้มีค่าเป็น 0.5 A
- ติดตั้งแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่ 1 บนแท่นจับยึด และทำการหมุนแผ่นโพลาไรซ์ให้แสงปรากฏบนฉากรับมีความสว่างมากที่สุด
- ติดตั้งแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่ 2 บนแท่นจับยึด แล้วทำการหมุนแผ่นโพลาไรซ์จนแสงปรากฏบนฉากรับมีความเข้มน้อยที่สุด (จุดมืด) และบันทึกค่ามุม θ_1
- สลับขั้วกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับขดลวด เพื่อกำเนิดสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้าม และทำการทดลองข้อ 5 ข้าง และบันทึกค่ามุม θ_2
- ทำการทดลองข้อ 5 ข้าง โดยจ่ายกระแสค่าอื่นๆ เพิ่มทีละ 0.5 A จนถึง 3.5 A
- คำนวณหาผลต่างมุม $|\theta_2 - \theta_1|$ ในแต่ละค่ากระแส และคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$
- เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ย (\bar{B}) และค่ามุมแสงที่บิดไป (θ)

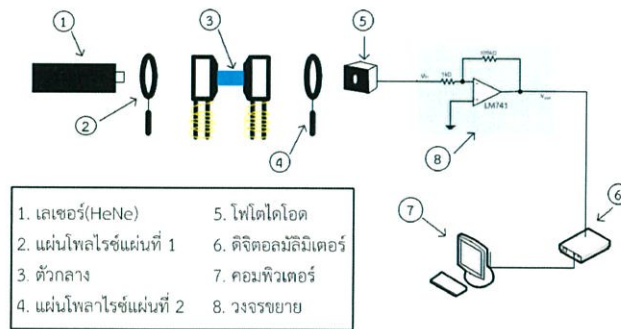
10. คำนวณหาค่าคงที่ verdet จากความชันกราฟ
11. เปลี่ยนวัสดุจากแท่งแก้วเป็นน้ำ และทำการทดลองข้อ 1-10 ซ้ำอีกครั้ง
12. เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ HeNe เป็นเลเซอร์ไดโอดสีเขียว จากนั้นทำการทดลองข้อ 1-11 ซ้ำ

3.1.2 การพัฒนาชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์

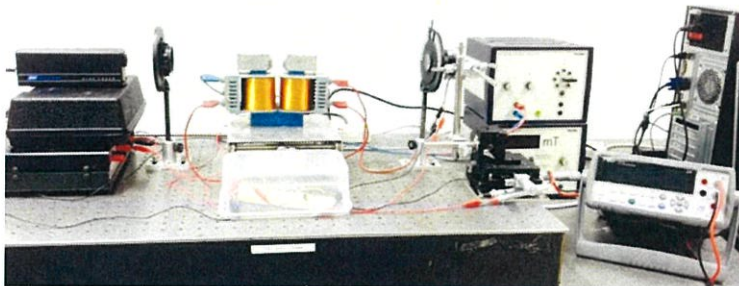
วัตถุประสงค์

- เพื่อปรับปรุงชุดทดลองที่มีอยู่ให้สามารถวัดความเข้มแสงโดยผ่านโพโตไดโอด
- เพื่อนำชุดทดลองที่พัฒนาแล้วมาศึกษาวัดค่าคงที่ verdet ของวัสดุ และเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับชุดทดลองเดิม

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ในการวัดความเข้มของแสงโพลาไรซ์ที่ผ่านวัสดุ ผู้ทดลองต้องใช้สายตาในการพิจารณาความเข้มของแสงที่ปรากฏบนฉาก เพื่อหาค่ามุมในการบิดตัวแบบฟาราเดย์ (Faraday Rotation Angle) ซึ่งการใช้สายตาวัด อาจส่งผลให้มุมที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการปรับปรุงชุดทดลองดังกล่าว ซึ่งจะเน้นในส่วนของการวัดความเข้มแสง โดยใช้อุปกรณ์ทางแสงที่เรียกว่า โพโตไดโอด (Photo diode) มาแทนการใช้สายตา ระบบวัดที่ถูกปรับปรุงแสดงดังรูปที่ 3.13



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.13 ชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ที่พัฒนาขึ้น

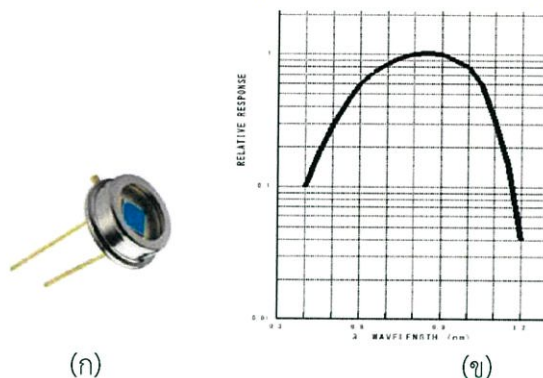
(ก) ไดอะแกรม

(ข) อุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์ที่เพิ่มเข้ามาในระบบ แสดงดังนี้

1. โฟโตไดโอด (Photo diode)^[14]

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้โฟโตไดโอดที่ทำจากวัสดุซิลิกอนของบริษัท Roithner Laser รุ่น SPD900-9P มีย่านการตอบสนองอยู่ในช่วง 400-1100 nm ที่การตอบสนองสูงสุด 900 nm และต่อเข้ากับดิจิตอลมัลติมิเตอร์



รูปที่ 3.14 โฟโตไดโอดและกราฟการตอบสนองต่อแสงกับความยาวคลื่น

(ก) โฟโตไดโอดของRoithner Laser รุ่น SPD900-9P

(ข) กราฟการตอบสนองของโฟโตไดโอดของบริษัท Roithner Laser รุ่น SPD900-9P

2. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter)

ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณไฟฟ้าได้หลายชนิดถูกสร้างขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวกต่อผู้ใช้ปริมาณไฟฟ้าที่วัดได้ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า และวัดปริมาณไฟฟ้าอื่นๆ ได้อีกซึ่งแล้วแต่รุ่นของมัลติมิเตอร์นั้น

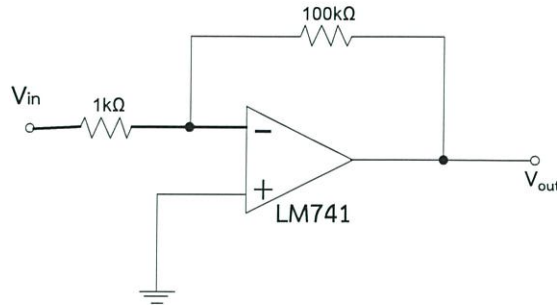
ในงานวิจัยนี้จะใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ของบริษัท Agilent รุ่น 34411A 6½ Digit Multimeter โดยสามารถวัดค่าได้ละเอียดถึง 6 ตำแหน่งซึ่งจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับโปรแกรมเพื่อทำหน้าที่ในการบันทึกปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.15 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ของ Agilent รุ่น 34411A 6½ Digit Multimeter^[13]

3. วงจรขยายสัญญาณ

เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าที่โฟโตไดโอดผลิตได้มีค่าต่ำ และอาจส่งผลให้ค่าที่วัดได้จากดีจิตอลมัลติมิเตอร์เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทดลองนำวงจรขยายสัญญาณมาใช้ โดยวงจรขยายสัญญาณจะทำหน้าที่แปลงกระแสที่เป็นแรงดันและขยายสัญญาณให้มีค่าสูงขึ้น วงจรขยายสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ออปแอมป์ LM 741 แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรขยายออปแอมป์ LM 741

การทดลอง

ในการทดลองเพื่อหาค่าคงที่ verdet โดยใช้โฟโตไดโอดกับวงจรขยายในการตรวจวัดแสง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. นำวัสดุที่ต้องการทดสอบมาติดตั้งบริเวณตำแหน่ง A ดังรูปที่ 3.12
2. ฉายแสงเลเซอร์ผ่านบริเวณใจกลางของแท่งแก้ว และให้แสงตกกระทบบน โฟโตไดโอด
3. ปรับกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟให้มีค่าเป็น 0.5 A
4. ติดตั้งแผ่นโพลารอยซ์แผ่นที่ 1 บนแท่นจับยึด และทำการหมุนแผ่นโพลารอยซ์ให้แสงปรากฏบนโฟโตไดโอดมีความสว่างมากที่สุด โดยสังเกตค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุดซึ่งได้จากโฟโตไดโอด
5. ติดตั้งแผ่นโพลารอยซ์แผ่นที่ 2 บนแท่นจับยึด แล้วทำการหมุนแผ่นโพลารอยซ์จนแสงปรากฏบนโฟโตไดโอดมีความเข้มสว่างมากที่สุด โดยสังเกตค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุดซึ่งได้จากโฟโตไดโอดและบันทึกค่ามุม θ_1
6. สลับขั้วกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับขดลวด เพื่อกำเนิดสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้าม และทำการทดลองข้อ 5 ซ้ำ และบันทึกค่ามุม θ_2
7. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 1-6 โดยจ่ายกระแสค่าอื่นๆ เพิ่มที่ละ 0.5 A จนถึง 3.5 A
8. คำนวณหาผลต่างมุม $|\theta_2 - \theta_1|$ ในแต่ละค่ากระแส และคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป

$$\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$$

9. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ย (\bar{B}) และค่ามุมของแสงที่บิดไป (θ)
10. คำนวณหาค่าคงที่ verdet จากความชันกราฟ
11. เปลี่ยนวัสดุจากแท่งแก้วเป็นน้ำ และทำการทดลองข้อ 1-10 ซ้ำอีกครั้ง
12. เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ HeNe เป็นเลเซอร์ไดโอดสีเขียว จากนั้นทำการทดลองข้อ 1-11 ซ้ำ

3.2 การนำชุดทดลองที่ผ่านการปรับปรุงมาทดลองใช้ในการเรียนการสอน

การนำชุดทดลองที่ผ่านการปรับปรุงมาทดลองใช้ในการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Devices Laboratory) ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2558

วัตถุประสงค์

- เพื่อนำการนำชุดทดลองทั้งก่อนและหลังการพัฒนาใช้ในการเรียนการสอน
- เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองที่เก็บบันทึกโดยนักศึกษากลุ่มตัวอย่าง

การทดลอง

1. ผู้วิจัยจะทำการรวบรวมผลจากนักศึกษากลุ่มตัวอย่าง จำนวน 10 กลุ่มไปวิเคราะห์
2. นำผลการวัดมาวิเคราะห์หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation : S.D) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$S. D. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

โดย \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต, n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด และ x_i คือ ข้อมูลแต่ละตัว

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้แบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ โดยกลุ่มผู้ทดลอง และผลการศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ โดยกลุ่มนักศึกษาตัวอย่าง แสดงรายละเอียดของผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

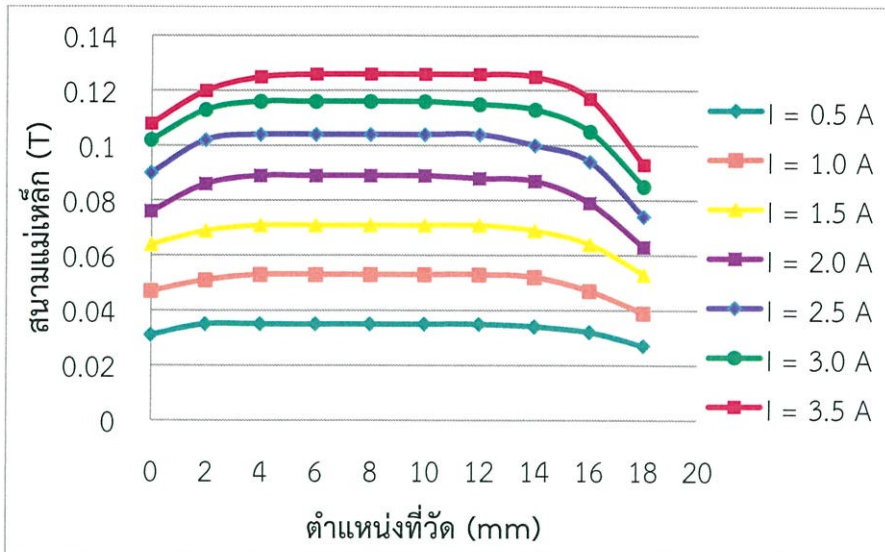
4.1 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ โดยกลุ่มผู้ทดลอง

4.1.1 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่จะนำวัสดุไปวาง โดยอาศัยวิธีการทดลองที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.1 ในขั้นตอนที่ 1 ได้ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ

I (A)	B (T)										\bar{B} (T)
	ตำแหน่งที่วัด (mm)										
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	
0.5	0.031	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.034	0.032	0.027	0.033
1.0	0.047	0.051	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.052	0.047	0.039	0.050
1.5	0.064	0.069	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.069	0.064	0.053	0.067
2.0	0.076	0.086	0.089	0.089	0.089	0.089	0.088	0.087	0.079	0.063	0.083
2.5	0.090	0.102	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.100	0.094	0.074	0.098
3.0	0.102	0.113	0.116	0.116	0.116	0.116	0.115	0.113	0.105	0.085	0.110
3.5	0.108	0.120	0.125	0.126	0.126	0.126	0.126	0.125	0.117	0.093	0.120



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดกับสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A

จากกราฟแสดงผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จะนำวัสดุตัวอย่างไปวาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุดในช่วงตำแหน่งระหว่าง 4-12 mm

4.1.2 ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของแก้ว

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อที่ 3.1.1 ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจะทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของแก้ว โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนาและชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน 2 ประเภทคือ เลเซอร์ HeNe ($\lambda=632.8$ nm) และ เลเซอร์ไดโอดสีเขียว ($\lambda=532$ nm) และปรับแผ่นโพลาไรซ์ เพื่อให้แสงมีความเข้มน้อยที่สุด เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้ง 2 ทิศทาง (θ_1 และ θ_2) จากนั้นนำค่า θ_1 และ θ_2 มาคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (θ) ดังสมการ $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

- ค่าคงที่ verdet ของแก้ว โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา และใช้เลเซอร์ HeNe ($\lambda=632.8$ nm) เป็นแหล่งกำเนิดแสง

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของแก้วซ้ำ 2 ครั้ง โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 4.2 และ 4.3

ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นแก้วโดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	15.5	5.5	5.00
1.0	17.0	6.0	5.00
1.5	17.0	9.0	4.00
2.0	17.5	7.0	5.25
2.5	17.5	8.0	4.75
3.0	20.0	9.0	5.50
3.5	23.5	5.0	9.25

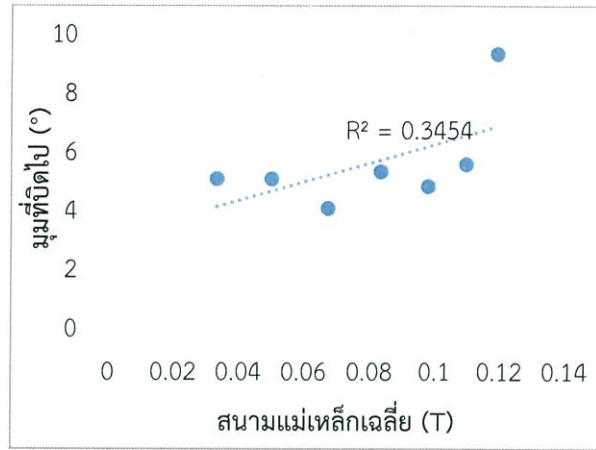
ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นแก้วโดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)

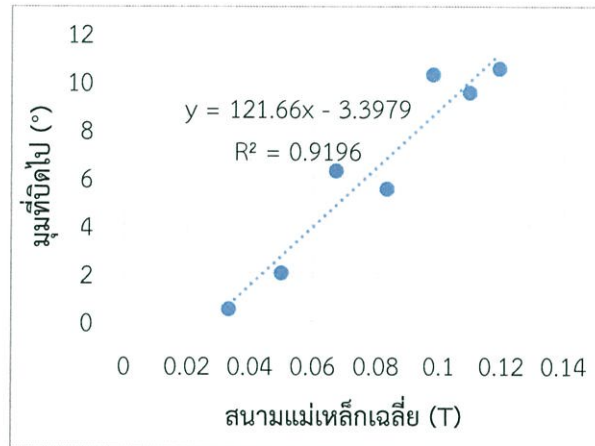
I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	7.0	8.0	0.50
1.0	9.5	13.5	2.00
1.5	7.0	19.5	6.25
2.0	9.0	20.0	5.50
2.5	4.5	25.0	10.25
3.0	6.0	25.0	9.50
3.5	4.0	25.0	10.50

* ในการทดลองนี้ ไม่สามารถทำซ้ำได้ครบทั้ง 3 ครั้ง เนื่องจากเกิดปัญหาในระหว่างที่ทำการทดลอง คือ แก้วที่ใช้เป็นวัสดุตัวกลางนั้นแตก ทำให้ผู้ทดลองสามารถทำการทดลองได้เพียง 2 ครั้ง

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 4.1 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 4.2 และ 4.3 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของแก้วที่ได้จากการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จะเห็นว่า การทดลองครั้งที่ 2 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเป็นเชิงเส้นมากกว่าการทดลองครั้งที่ 1 ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟของการทดลองทั้ง 2 ครั้ง มีค่าเท่ากับ 0.3454 (ครั้งที่ 1) และ 0.9196 (ครั้งที่ 2) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงไม่นำผลการทดลองครั้งที่ 1 มาวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของแก้ว และจากการวิเคราะห์ค่าคงที่ verdet จากผลการทดลองในครั้งที่ 2 จะพบว่ามีค่าคงที่ verdet ของแก้ว เท่ากับ $4.05 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 1.01 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 632.8 \text{ nm}$) สูงถึง 3 เท่า

- ค่าคงที่ verdet ของแก้ว โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ HeNe ($\lambda=632.8$ nm) เป็นแหล่งกำเนิดแสง

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของแก้ว ซ้ำ 3 ครั้ง โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 4.4-4.6

ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.4 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	35.0	35.0	0.00
1.0	36.0	37.0	0.50
1.5	36.0	35.0	0.50
2.0	35.0	36.0	0.50
2.5	35.0	34.0	0.50
3.0	36.0	35.0	0.50
3.5	36.0	34.0	1.00

ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.5 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)

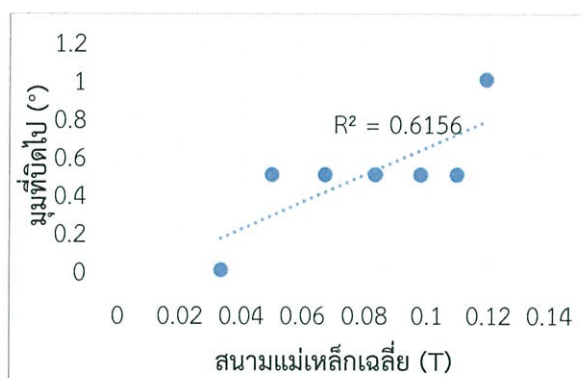
I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	9.0	7.0	1.00
1.0	12.0	9.0	1.50
1.5	11.0	15.0	2.00
2.0	16.0	10.0	3.00
2.5	13.0	17.0	2.00
3.0	19.0	14.0	2.50
3.5	22.0	26.0	2.00

ครั้งที่ 3

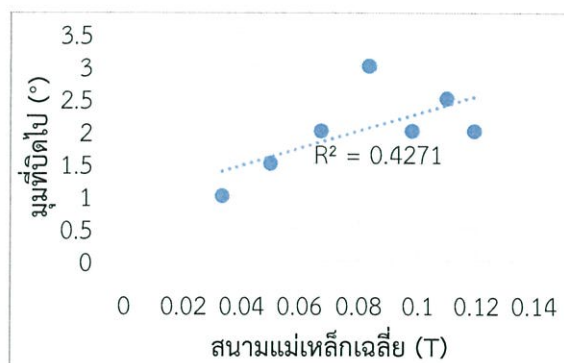
ตารางที่ 4.6 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารไรซ์ของวัสดุที่เป็นแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	29.0	28.0	0.50
1.0	31.0	28.0	1.50
1.5	31.0	27.0	2.00
2.0	31.0	27.0	2.00
2.5	34.0	28.0	3.00
3.0	32.0	26.0	3.00
3.5	30.0	25.0	2.50

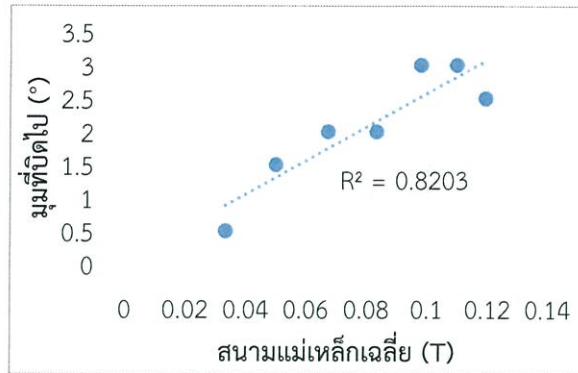
เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 4.1 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 4.10-4.12 มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 4.10-4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของแก้ว โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของแก้วที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จะเห็นว่า การทดลองครั้งที่ 3 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเป็นเชิงเส้นมากกว่าการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟของการทดลองทั้ง 3 ครั้ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.6156 (ครั้งที่ 1), 0.4271 (ครั้งที่ 2) และ 0.8263 (ครั้งที่ 3) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงไม่นำผลการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 มาวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของแก้ว เนื่องจากมีค่า R^2 ต่ำมาก และจากการวิเคราะห์ผลการทดลองในครั้งที่ 3 จะพบว่ามีค่าคงที่ verdet ของแก้ว เท่ากับ $2.73 \times 10^{-3} / \text{G} \cdot \text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 1.01 \times 10^{-3} / \text{G} \cdot \text{cm}$ ที่ $\lambda = 632.8 \text{ nm}$) สูงถึง 2 เท่า

จากการทดลองโดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา และชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎีสูงถึง 3 เท่า และ 2 เท่า ตามลำดับ ผู้วิจัยคิดว่ามีสาเหตุจากค่ามุมที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน ทั้งนี้เนื่องมาจากแก้วที่ใช้เป็นวัสดุตัวกลางในการทดลองนั้นมีรอยร้าวเมื่อแสงที่เคลื่อนที่ภายในแก้วอาจจะเกิดการกระเจิงที่รอยต่อของแก้ว ทำให้การพิจารณาค่าแห่งที่ความเข้มของแสงที่มีที่สุดผิดพลาดไป

4.1.3 ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อที่ 3.1.1 ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจะทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของแก้ว โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนาและชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน 2 ประเภทคือ เลเซอร์ HeNe ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) และเลเซอร์ไดโอดสีเขียว ($\lambda = 532 \text{ nm}$) และปรับแผ่นโพลาไรซ์ เพื่อให้แสงมีความเข้มน้อยที่สุด เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้ง 2 ทิศทาง (θ_1 และ θ_2) จากนั้นนำค่า θ_1 และ θ_2 มาคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (θ) ดังสมการ $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

- ค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา และใช้เลเซอร์ HeNe ($\lambda=632.8$ nm) เป็นแหล่งกำเนิดแสง

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำซ้ำ 3 ครั้ง โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 4.7-4.9

ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำโดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	26.0	25.5	0.25
1.0	25.0	25.5	0.25
1.5	26.0	25.0	0.50
2.0	26.0	27.0	0.50
2.5	24.0	26.0	1.00
3.0	24.0	26.0	1.00
3.5	24.0	28.0	2.00

ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.8 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำโดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)

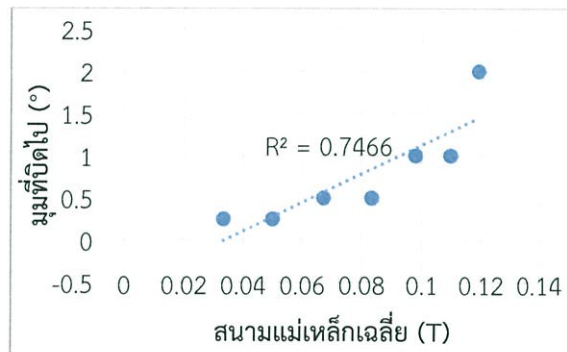
I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	33.0	33.0	0.00
1.0	33.0	34.0	0.50
1.5	33.0	34.0	0.50
2.0	35.0	33.0	1.00
2.5	33.0	32.0	0.50
3.0	32.0	30.0	1.00
3.5	34.0	32.0	1.00

ครั้งที่ 3

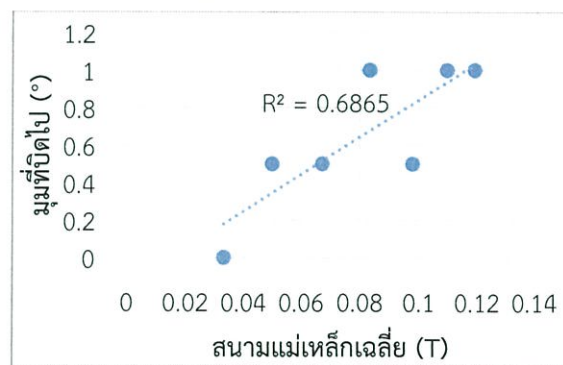
ตารางที่ 4.9 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำโดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	73.0	74.0	0.50
1.0	74.0	75.0	0.50
1.5	74.0	75.0	0.50
2.0	75.0	74.0	0.50
2.5	73.0	76.0	1.50
3.0	73.0	77.0	2.00
3.5	73.0	76.0	1.50

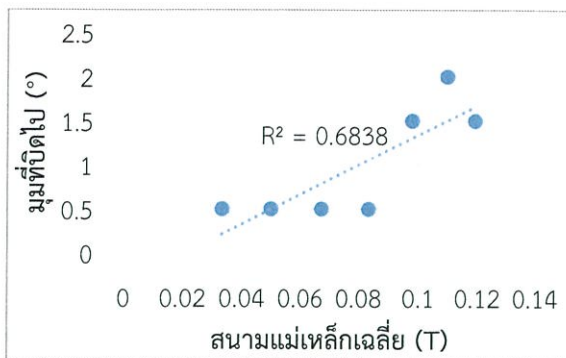
เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 4.1 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 4.7-4.9 มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 4.7-4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำโดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำโดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จะเห็นว่า การทดลองทั้ง 3 ครั้งนั้นให้ชุดข้อมูลที่ไม่น่าเป็นเชิงเส้น ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 ที่ได้จากการสมการเส้นตรงของกราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลการทดลองครั้งที่ 1-3 มีค่าเท่ากับ 0.7466, 0.6865 และ 0.6838 ตามลำดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงไม่สามารถนำข้อมูลชุดนี้มาวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้

- ค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ HeNe ($\lambda=632.8$ nm) เป็นแหล่งกำเนิดแสง

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำซ้ำ 3 ครั้ง โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 4.10-4.12

ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.10 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยด์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	31.0	33.0	1.00
1.0	32.0	32.0	0.00
1.5	34.0	35.0	0.50
2.0	35.0	32.0	1.50
2.5	35.0	32.0	1.50
3.0	30.0	35.0	2.50
3.5	37.0	32.0	2.50

ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.11 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)

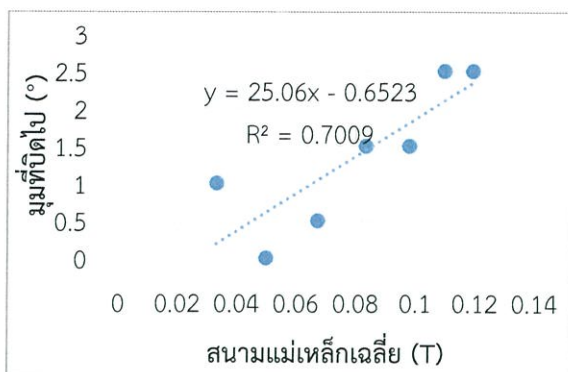
I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	21.0	19.0	1.00
1.0	21.0	23.0	1.00
1.5	21.0	24.0	1.50
2.0	21.0	18.0	1.50
2.5	20.0	23.0	1.50
3.0	23.0	20.0	1.50
3.5	22.0	20.0	1.00

ครั้งที่ 3

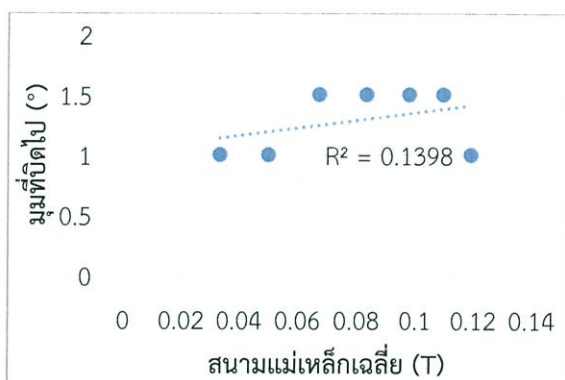
ตารางที่ 4.12 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	18.0	20.0	1.00
1.0	20.0	21.0	0.50
1.5	23.0	25.0	1.00
2.0	22.0	20.0	1.00
2.5	20.0	22.0	1.00
3.0	22.0	20.0	1.00
3.5	22.0	25.0	1.50

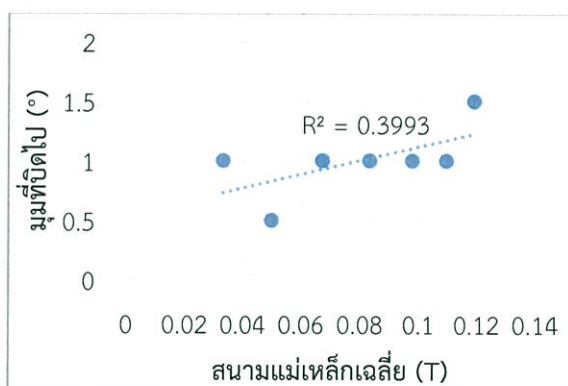
เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 4.1 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 4.10-4.12 มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 4.10-4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้เลเซอร์ HeNe เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จะเห็นว่า การทดลองครั้งที่ 1 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเป็นเชิงเส้นมากกว่าการทดลองครั้งที่ 2 และ 3 ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟของการทดลองทั้ง 3 ครั้ง มีค่าเท่ากับ 0.7005 (ครั้งที่ 1), 0.1398 (ครั้งที่ 2) และ 0.3993 (ครั้งที่ 3) ดังนั้น ผู้วิจัย

จึงไม่สามารถนำผลการทดลองครั้งที่ 2 และ 3 มาวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำเนื่องจากมีค่า R^2 ต่ำมาก และจากการวิเคราะห์ค่าคงที่ verdet จากผลการทดลองในครั้งที่ 1 จะพบว่าค่าคงที่ verdet ของน้ำเท่ากับ $2.33 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V=2.18 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda=632.8 \text{ nm}$) ถึง 1 เท่า

จากการทดลองโดยใช้เลเซอร์ HeNe ($\lambda=632.8 \text{ nm}$) เป็นแหล่งกำเนิดแสง จะเห็นว่าการใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนานั้น ผู้วิจัยไม่สามารถนำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ และจากการใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎีสูงถึง 1 เท่า ทั้งนี้ผู้วิจัยคิดว่ามีสาเหตุมาจากมุมที่บิดไปของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านน้ำนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งเครื่องมือที่ใช้วัดมุมนั้นอาจจะมีความละเอียดไม่มากพอ เมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์จะได้ค่าคงที่ verdet ที่ผิดเพี้ยนไป

- ค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียว ($\lambda=532 \text{ nm}$) เป็นแหล่งกำเนิดแสง

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำซ้ำ 3 ครั้ง โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 4.13-4.15

ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.13 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาริซของวัสดุที่เป็นน้ำโดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)

I (A)	θ_1 ($^\circ$)	θ_2 ($^\circ$)	θ ($^\circ$)
0.5	60.0	61.0	0.50
1.0	61.0	60.0	0.50
1.5	62.0	60.0	1.00
2.0	63.0	59.0	2.00
2.5	62.0	59.0	1.50
3.0	62.0	63.0	0.50
3.5	60.0	64.0	2.00

ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.14 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำโดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)

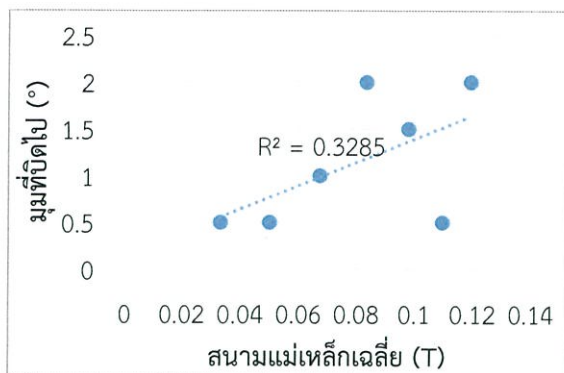
I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	62.0	60.0	1.00
1.0	61.0	59.0	1.00
1.5	61.0	60.0	0.50
2.0	61.0	58.0	1.50
2.5	60.0	57.0	1.50
3.0	61.0	57.0	2.00
3.5	60.0	58.0	1.00

ครั้งที่ 3

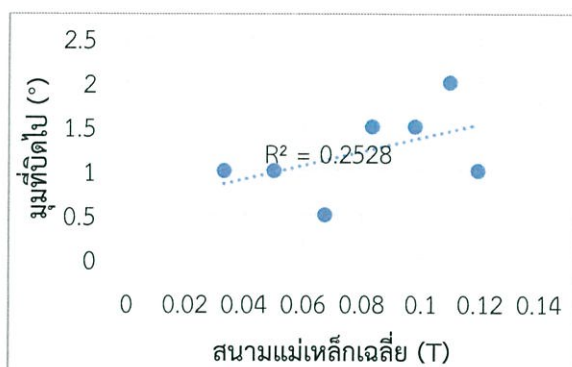
ตารางที่ 4.15 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำโดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	66.0	67.0	0.50
1.0	67.0	69.0	1.00
1.5	71.0	67.0	2.00
2.0	66.0	62.0	2.00
2.5	68.0	65.0	1.50
3.0	65.0	63.0	1.00
3.5	70.0	68.0	1.00

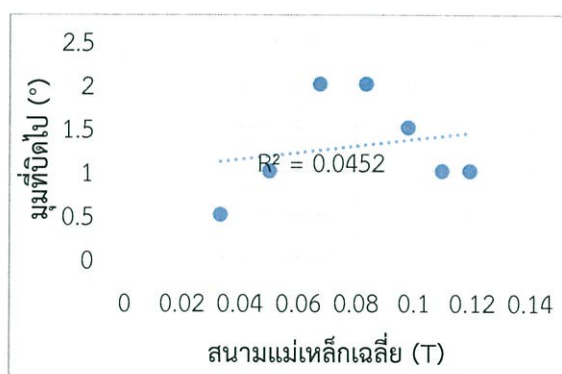
เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 4.1 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 4.13-4.15 มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 4.13-4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จะเห็นว่า ในการใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสงนั้น จะให้ชุดข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 ที่ได้จากการเส้นตรงของกราฟแสดงความสัมพันธ์

ของผลการทดลองครั้งที่ 1-3 มีค่าเท่ากับ 0.3285, 0.2528 และ 0.0452 ตามลำดับ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงไม่สามารถนำข้อมูลชุดนี้มาวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้

- ค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียว ($\lambda=532$ nm) เป็นแหล่งกำเนิดแสง

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำซ้ำ 3 ครั้ง โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 4.16-4.18

ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.16 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาริซของวัสดุที่เป็นน้ำโดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	34.0	33.0	0.50
1.0	37.0	35.0	1.00
1.5	37.0	35.0	1.00
2.0	38.0	40.0	1.00
2.5	38.0	39.0	0.50
3.0	38.0	40.0	1.00
3.5	37.0	40.0	1.50

ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.17 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาริซของวัสดุที่เป็นน้ำโดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)

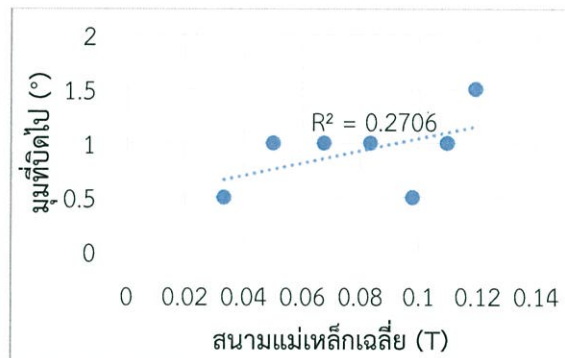
I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	44.0	44.0	0.00
1.0	42.0	41.0	0.50
1.5	46.0	45.0	0.50
2.0	44.0	45.0	0.50
2.5	42.0	44.0	1.00
3.0	43.0	45.0	1.00
3.5	43.0	46.0	1.50

ครั้งที่ 3

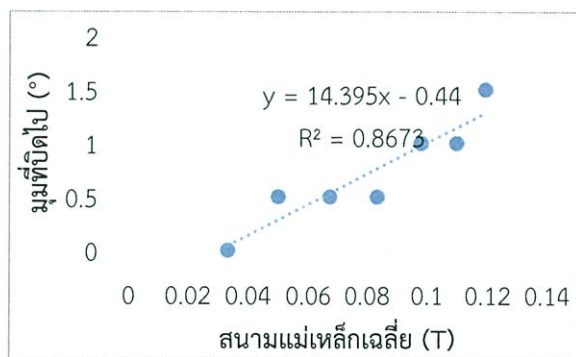
ตารางที่ 4.18 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำโดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	50.0	47.0	1.50
1.0	48.0	43.0	2.50
1.5	41.0	45.	2.00
2.0	40.0	45.0	2.50
2.5	42.0	47.0	2.50
3.0	39.0	45.0	3.00
3.5	44.0	48.0	2.00

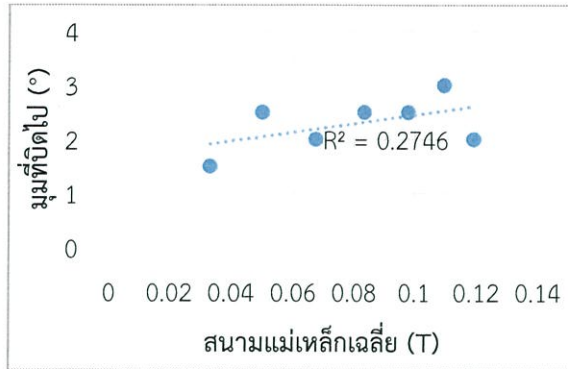
เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 4.1 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 4.16-4.18 มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 4.16-4.18 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำโดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 1)



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำโดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 2)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ครั้งที่ 3)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จะเห็นว่า การทดลองครั้งที่ 2 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเป็นเชิงเส้นมากกว่าการทดลองครั้งที่ 1 และ 3 ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟของการทดลองทั้ง 3 ครั้ง มีค่าเท่ากับ 0.2706 (ครั้งที่ 1), 0.8675 (ครั้งที่ 2) และ 0.2746 (ครั้งที่ 3) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงไม่นำผลการทดลองครั้งที่ 1 และ 3 มาวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำ เนื่องจากมีค่า R^2 ต่ำมาก และจากการวิเคราะห์ค่าคงที่ verdet จากผลการทดลองในครั้งที่ 2 จะพบว่า มีค่าคงที่ verdet ของน้ำเท่ากับ $4.80 \times 10^{-4} / \text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} / \text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 1 เท่า

จากการทดลองโดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียว ($\lambda = 532 \text{ nm}$) เป็นแหล่งกำเนิดแสง จะเห็นว่าการใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนานั้น ผู้วิจัยไม่สามารถนำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ และจากการใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎีสูงถึง 1 เท่า ทั้งนี้ผู้วิจัยคิดว่ามีสาเหตุมาจากเมื่อใช้งานเลเซอร์ไดโอดไปเป็นเวลานานจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น เนื่องจากเลเซอร์ไดโอดไม่มีระบบระบายอากาศ ทำให้ความเข้มของแสงเปลี่ยน และเนื่องจากมุมที่บิดไปของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านน้ำนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งเครื่องมือที่ใช้วัดมุมนั้นอาจมีความละเอียดไม่มากพอ เมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์จะได้ค่าคงที่ verdet ที่ผิดเพี้ยนไป

4.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ โดยกลุ่มนักศึกษาตัวอย่าง

จากการนำชุดอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการ และชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในการเรียนการสอนในรายวิชาปฏิบัติการสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Devices Laboratory) ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2558 ซึ่งเก็บผลการทดลองโดยกลุ่มนักศึกษาตัวอย่างทั้งหมด 10 กลุ่ม และใช้วัสดุตัวกลาง คือ น้ำที่บรรจุในหลอดยาว 3 cm พบว่าได้ผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ค่าคงที่ verdet ของน้ำที่ศึกษา โดยกลุ่มนักศึกษาตัวอย่าง

กลุ่ม	น้ำ (ชุดทดลองที่มีอยู่แล้ว)		น้ำ (ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น)	
	V (°/G-cm)	ความคลาดเคลื่อน (%)	V (°/G-cm)	ความคลาดเคลื่อน(%)
1	3.66×10^{-4}	30.7	1.91×10^{-3}	582.1
2	-7.83×10^{-5}	72.0	1.59×10^{-3}	467.8
3	-1.88×10^{-4}	167.1	1.53×10^{-3}	446.4
4	2.76×10^{-4}	1.4	1.46×10^{-5}	94.8
5	1.95×10^{-5}	93.0	3.50×10^{-5}	87.6
6	5.04×10^{-5}	82.0	-8.52×10^{-5}	130.4
7	7.57×10^{-5}	73.0	-1.65×10^{-4}	158.9
8	1.05×10^{-3}	275.0	1.51×10^{-3}	439.3
9	-2.64×10^{-5}	90.6	-1.99×10^{-5}	107.1
10	6.56×10^{-4}	92.8	1.33×10^{-3}	375.0
	ความคลาด เคลื่อนเฉลี่ย	97.8	ความคลาด เคลื่อนเฉลี่ย	288.9
	S.D.	75.7	S.D.	190.3

จากการสืบค้นข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา จะพบว่าค่าคงที่ verdet ของน้ำ มีค่าเท่ากับ 2.80×10^{-4} °/G-cm (ที่ $\lambda=532$ nm) และผู้วิจัยได้ทำการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าที่สืบค้นได้ ซึ่งจากตารางที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการเก็บผลการทดลอง โดยนักศึกษากลุ่มตัวอย่างทั้ง 10 กลุ่ม โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วมีค่าอยู่ระหว่าง 1.4-275.0 % และจากการใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 87.6-582.1 % เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย จะเห็นได้ว่า จากการใช้ชุดทดลองเดิมให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าการใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น แสดงว่าชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นยังไม่สามารถนำมาใช้ในการวัดค่าคงที่ verdet อย่างแม่นยำได้ และจากผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ ของกลุ่มนักศึกษาตัวอย่างในบางกลุ่มนั้น มีค่าคงที่ verdet ติดลบ ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วค่าคงที่ verdet ของวัสดุจะไม่สามารถติดลบได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผู้ทดลองอาจมีการศึกษาวิธีการทดลองมาไม่ละเอียด ทำให้ผลการทดลองที่ได้เกิดความผิดพลาดขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่จะต้องปรับปรุงในอนาคตตามข้อเสนอแนะในบทที่ 5

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ โดยกลุ่มผู้ทดลอง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าคงที่ verdet ของวัสดุที่ได้จากการศึกษา โดยกลุ่มผู้ทดลอง

แหล่งกำเนิดแสง : วัสดุ	ชุดทดลองที่มีอยู่แล้ว ก่อนการพัฒนา		ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น	
	ค่าคงที่ verdet (°/G·cm)	ความคลาด เคลื่อน (เท่า)	ค่าคงที่ verdet (°/G·cm)	ความคลาด เคลื่อน (เท่า)
เลเซอร์ HeNe : แก้ว	4.05×10^{-3}	3	2.73×10^{-3}	2
เลเซอร์ HeNe : น้ำ	-	-	2.33×10^{-3}	1
เลเซอร์ไดโอดสีเขียว : น้ำ	-	-	4.80×10^{-4}	1

ค่าคงที่ verdet จากทฤษฎี เลเซอร์ HeNe ($\lambda=632.8$ nm) : แก้ว เท่ากับ 1.01×10^{-3} °/G·cm

เลเซอร์ HeNe ($\lambda=632.8$ nm) : น้ำ เท่ากับ 2.18×10^{-4} °/G·cm

เลเซอร์ไดโอดสีเขียว ($\lambda=532$ nm) : น้ำ เท่ากับ 2.80×10^{-4} °/G·cm

จากการพัฒนาชุดทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ ผู้วิจัยพบว่าการใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นโดยใช้แก้วเป็นวัสดุตัวกลางมีค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีต่ำกว่าชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา 1 เท่า ทั้งนี้เนื่องมาจากแก้วที่ใช้เป็นวัสดุตัวกลางในการทดลองนั้นมียอรั่ว เมื่อแสงที่เคลื่อนที่ภายในแก้วอาจจะเกิดการกระเจิงที่รอยต่อของแก้ว ทำให้การพิจารณาตำแหน่งที่ความเข้มของแสงที่มีดที่สุดผิดพลาดไป และจากการใช้น้ำเป็นวัสดุตัวกลาง โดยใช้เลเซอร์ HeNe และเลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิด สามารถวัดค่าคงที่ verdet ได้เพียงชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นเท่านั้น โดยมีค่าคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี สูงถึง 1 เท่า ซึ่งเมื่อนำมาใช้ในนักศึกษาตัวอย่าง โดยเลือกใช้วัสดุตัวกลาง คือ น้ำ และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง จะเห็นได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการเก็บผลการทดลอง โดยนักศึกษากลุ่มตัวอย่างทั้ง 10 กลุ่มนั้น เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยจะพบว่าชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ต่ำกว่าชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา สามารถสรุปได้ว่าชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นนั้นยังไม่สามารถนำมาใช้ในการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำที่ถูกต้องและแม่นยำได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมุมที่บิดไปของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านน้ำนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งเครื่องมือที่ใช้วัดมุมนั้นอาจจะมีคลาดเคลื่อนไม่มากพอ เมื่อนำผลที่

ได้มาวิเคราะห์จะได้ค่าคงที่ verdet ที่ผิดเพี้ยนไป และเมื่อใช้งานเลเซอร์ไดโอดไปเป็นเวลานานจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น เนื่องจากเลเซอร์ไดโอดไม่มีระบบระบายอากาศ ทำให้ความเข้มของแสงเปลี่ยน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ต้องจัดหาแก้วที่เป็นวัสดุตัวกลางใหม่ มาทดแทนแก้วที่เกิดรอยร้าว เพื่อให้การพิจารณาดำเนินการที่ความเข้มของแสงที่มืดที่สุดมีความถูกต้องและแม่นยำขึ้น
2. ควรมีการปรับปรุงอุปกรณ์ตรวจวัดมุม ให้มีความละเอียดเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สามารถวัดมุมที่แสงบิดไปได้ละเอียดมากขึ้น
3. ควรมีการออกแบบระบบระบายความร้อนให้กับเลเซอร์ไดโอด หรือหาแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นที่มีเสถียรภาพมากขึ้น เช่น เลเซอร์ HeNe ที่ชำรุดไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jaydeep Belapure. 2007. **Faraday Rotation Effect**. [Online]. Available : http://iucaa-rpl.weebly.com/uploads/1/7/1/7/17179300/report_fre.pdf
- [2] A. V. Fedotov-Gefen. 2009. **Polarimetry and Schlieren diagnostics of underwater exploding wires**. [Online]. Available : http://physics.technion.ac.il/~plasma/publications/J_Appl_Phys_106_093303.pdf
- [3] Kāshif Rasool Sayan. 1997. **Faraday Effect Rotation for Water and Flint Glass**. [Online]. Available : <http://physics.wooster.edu/JrIS/Files/Kash-webarticle.pdf>
- [4] Awesomeonesome. 2015. **The Faraday Effect**. [Online]. Available : <http://imgur.com/gallery/Oc3Ed>
- [5] วราวุฒิ เถลัดดา. มปป. **ออปโตอิเล็กทรอนิกส์**. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] Edward. 2005. **การทำให้แสงไมโพลาไรซ์เป็นแสงโพลาไรซ์**. [Online]. Available : http://www.cpn1.go.th/media/thonburi/lesson/17_Electromagnetic_Wave/content4.html
- [7] n.p. n.d. **การโพลาไรซ์**. [Online]. Available : http://www.sc.mahidol.ac.th/scpy/courses/scpy350_11/LabY350-2011-Lab6-Quaterwave%20plates.pdf Collett,
- [8] n.p. n.d. **วัสดุแม่เหล็ก**. [Online]. Available : http://ie.eng.cmu.ac.th/IE2014/elearnings/2014_08/14
- [9] n.p. n.d. **สภาวะและวัสดุแม่เหล็ก**. [Online]. Available : https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc_upload/20120308121450.pdf
- [10] n.p. n.d. **ประเภทของแก้ว**. [Online]. Available : http://www.teacher.ssru.ac.th/reudee_ni/file.php/1/CeramicTechnology/c1-glass.pdf
- [11] กลุ่มวิจัยทัศนศาสตร์. n.d. **ชนิดของเลเซอร์**. [Online]. Available : http://www.sc.mahidol.ac.th/scpy/Optics/basic_laser3.htm
- [12] n.p. n.d. **โฟโตไดโอด**. [Online]. Available : http://ipstbox.programming.in.th/microbox/1_2_3_5.html
- [13] Agilent. n.d. **Digital Multimeter**. [Online]. Available : http://www.sophphx.caltech.edu/Lab_Equipment/34410%20User%20Guide.pdf
- [14] สุภารัตน์ รุจิหาญ. 2556. “การพัฒนากระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกแซนแนลต้นทุนต่ำสำหรับการตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฟาราเดย์ โดยกลุ่มผู้ทดลอง

จากการนำชุดอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการ และชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในการเรียนการสอนในรายวิชาปฏิบัติการสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Devices Laboratory) ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2558 ซึ่งเก็บผลการทดลองโดยกลุ่มนักศึกษาตัวอย่างทั้งหมด 10 กลุ่ม และใช้วัสดุตัวกลาง คือ น้ำที่บรรจุในหลอดยาว 3 cm โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

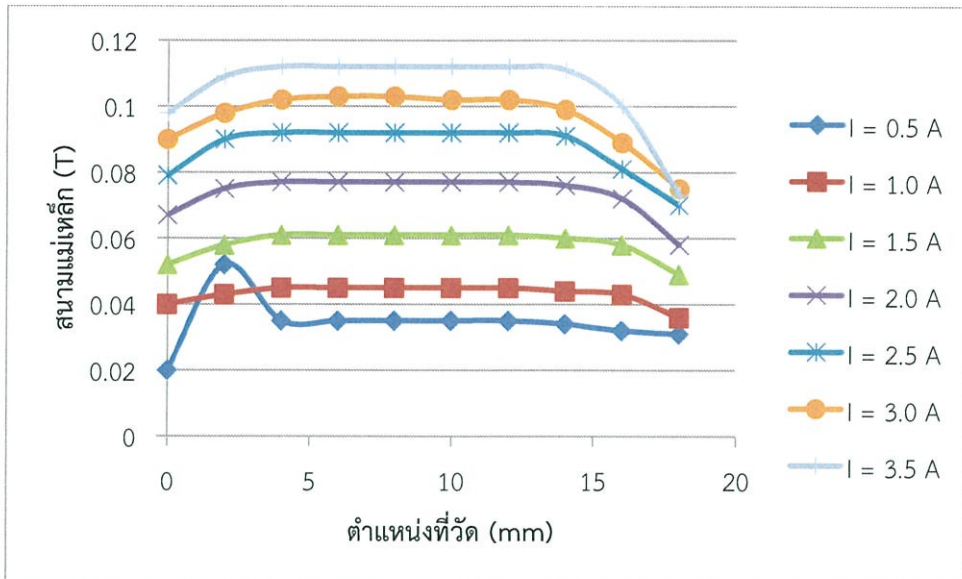
กลุ่มที่ 1

- ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่จะนำวัสดุไปวาง โดยอาศัยวิธีการทดลองที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.1 ในขั้นตอนที่ 1 ได้ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (กลุ่มที่ 1)

I (A)	B (T)										\bar{B} (T)
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	
0.5	0.020	0.052	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.034	0.032	0.031	0.034
1.0	0.040	0.043	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.044	0.043	0.036	0.043
1.5	0.052	0.058	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.060	0.058	0.049	0.058
2.0	0.067	0.075	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.076	0.072	0.058	0.073
2.5	0.079	0.090	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092	0.091	0.081	0.070	0.087
3.0	0.090	0.098	0.102	0.103	0.103	0.102	0.102	0.099	0.089	0.075	0.096
3.5	0.098	0.109	0.112	0.112	0.112	0.112	0.112	0.111	0.100	0.073	0.105



รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดกับสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A (กลุ่มที่ 1)

จากกราฟแสดงผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จะนำวัสดุตัวอย่างไปวาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุดในช่วงตำแหน่งระหว่าง 4-10 mm

- ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อที่ 3.1.1 ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจะทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนาและชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง ($\lambda=532$ nm) และปรับแผ่นโพลาไรซ์ เพื่อให้แสงมีความเข้มน้อยที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา) และให้แสงมีความเข้มมากที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น) เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้ง 2 ทิศทาง (θ_1 และ θ_2) จากนั้นนำค่า θ_1 และ θ_2 มาคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (θ) ดังสมการ $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

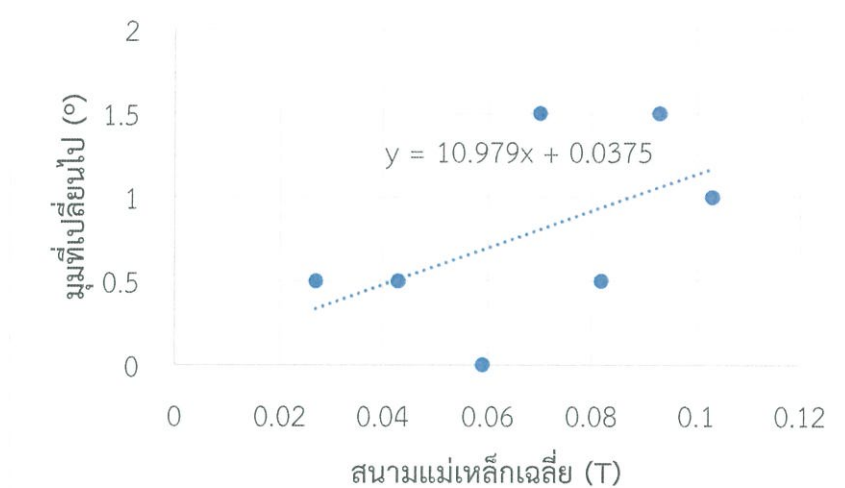
- ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 1)

I (A)	θ_1 ($^\circ$)	θ_2 ($^\circ$)	θ ($^\circ$)
0.5	43.0	44.0	0.50
1.0	44.0	43.0	0.50
1.5	44.0	44.0	0.00
2.0	43.0	46.0	1.50
2.5	43.0	44.0	0.50
3.0	41.0	44.0	1.50
3.5	43.0	45.0	1.00

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 1 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 2 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 1)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $3.66 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 30.7 %

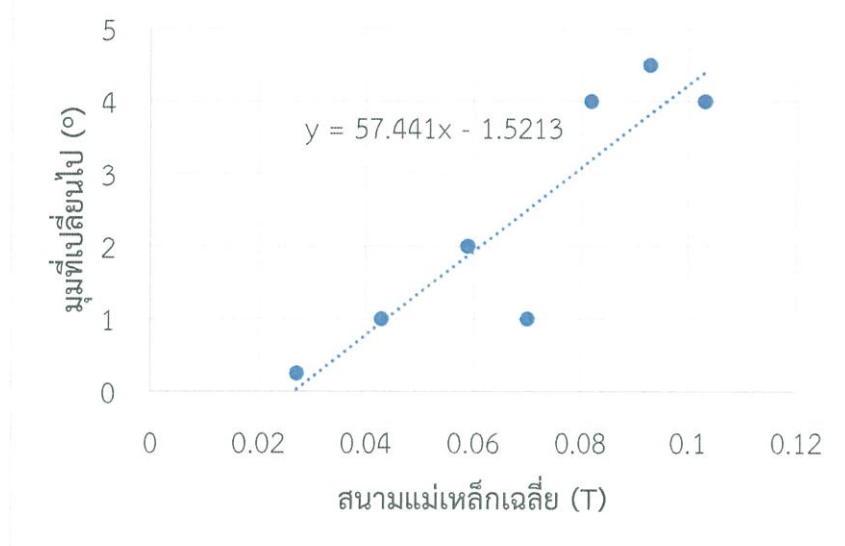
▪ ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น (กลุ่มที่ 1)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	44.0	43.5	0.25
1.0	45.0	43.0	1.00
1.5	43.0	47.0	2.00
2.0	45.0	48.0	1.00
2.5	46.0	54.0	4.00
3.0	43.0	52.0	4.50
3.5	45.0	53.0	4.00

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 1 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 3 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 1)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $1.91 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 582.1 %

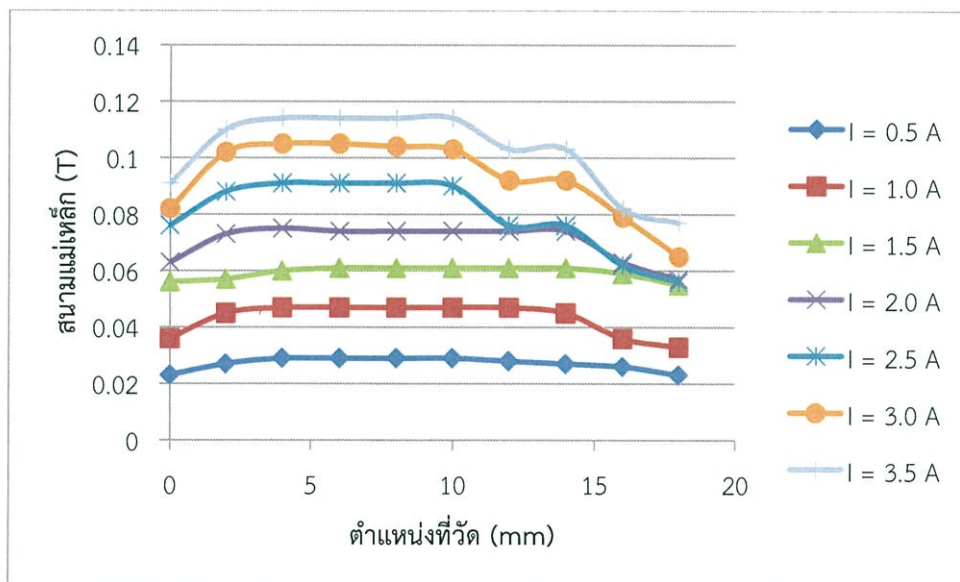
กลุ่มที่ 2

• ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่จะนำวัสดุไปวาง โดยอาศัยวิธีการทดลองที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.1 ในขั้นตอนที่ 1 ได้ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (กลุ่มที่ 2)

I (A)	B (T)										\bar{B} (T)
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	
0.5	0.023	0.027	0.029	0.029	0.029	0.029	0.028	0.027	0.026	0.023	0.027
1.0	0.036	0.045	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.045	0.036	0.033	0.043
1.5	0.056	0.057	0.060	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.059	0.055	0.059
2.0	0.063	0.073	0.075	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.063	0.057	0.070
2.5	0.076	0.088	0.091	0.091	0.091	0.090	0.076	0.076	0.062	0.056	0.082
3.0	0.082	0.102	0.105	0.105	0.104	0.103	0.092	0.092	0.079	0.065	0.093
3.5	0.091	0.110	0.114	0.114	0.114	0.114	0.103	0.103	0.082	0.077	0.103



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดกับสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A (กลุ่มที่ 2)

จากกราฟแสดงผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จะนำวัสดุตัวอย่างไปวาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุดในช่วงตำแหน่งระหว่าง 4-10 mm

- ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อที่ 3.1.1 ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจะทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนาและชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง ($\lambda=532$ nm) และปรับแผ่นโพลาไรซ์ เพื่อให้แสงมีความเข้มน้อยที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา) และให้แสงมีความเข้มมากที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น) เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้ง 2 ทิศทาง (θ_1 และ θ_2) จากนั้นนำค่า θ_1 และ θ_2 มาคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (θ) ดังสมการ $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

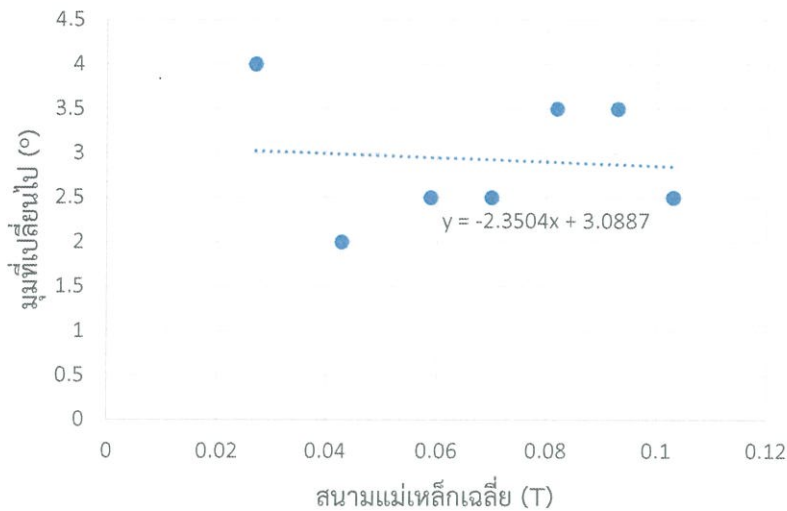
- ▶ ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 2)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	73.0	65.0	4.00
1.0	68.0	64.0	2.00
1.5	69.0	64.0	2.50
2.0	66.0	61.0	2.50
2.5	60.0	67.0	3.50
3.0	70.0	63.0	3.50
3.5	66.0	71.0	2.50

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 4 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 5 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 2)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $-7.83 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 72.0 %

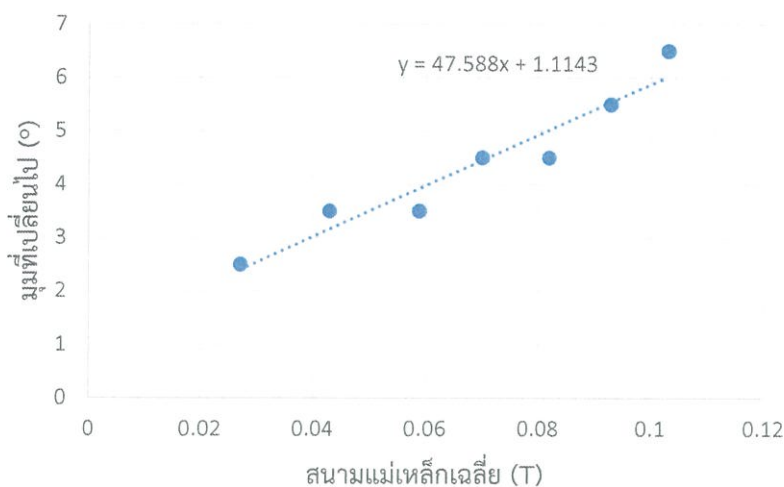
▶ ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น (กลุ่มที่ 2)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	71.0	76.0	2.50
1.0	67.0	74.0	3.50
1.5	60.0	67.0	3.50
2.0	57.0	66.0	4.50
2.5	51.0	60.0	4.50
3.0	68.0	57.0	5.50
3.5	41.0	54.0	6.50

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 4 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 6 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 2)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $1.59 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 467.8 %

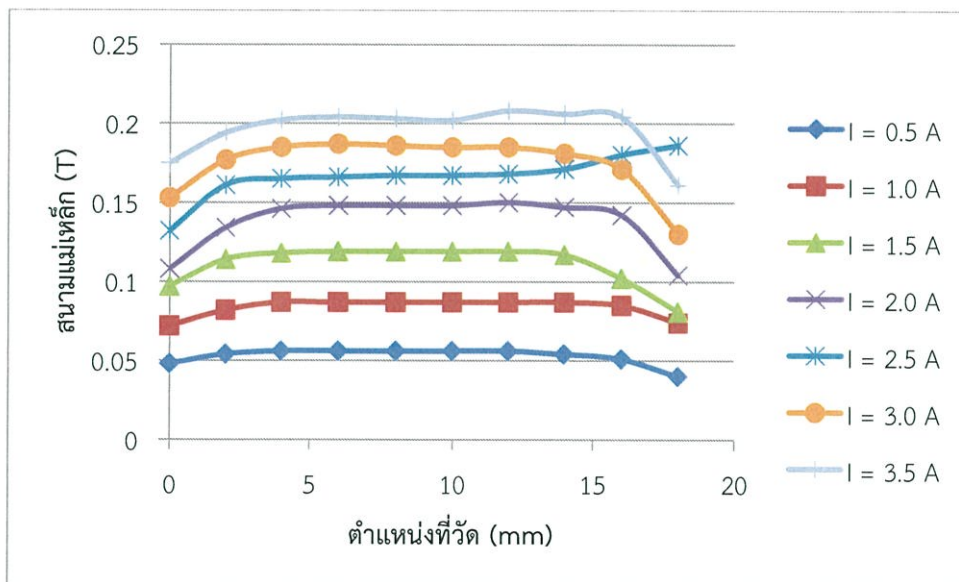
กลุ่มที่ 3

- ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่จะนำวัสดุไปวาง โดยอาศัยวิธีการทดลองที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.1 ในขั้นตอนที่ 1 ได้ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (กลุ่มที่ 3)

I (A)	B (T)										\bar{B} (T)
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	
0.5	0.048	0.054	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.054	0.051	0.040	0.053
1.0	0.072	0.082	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.085	0.074	0.082
1.5	0.097	0.114	0.118	0.119	0.119	0.119	0.119	0.117	0.102	0.081	0.111
2.0	0.108	0.134	0.146	0.148	0.148	0.148	0.150	0.147	0.142	0.104	0.134
2.5	0.132	0.161	0.165	0.166	0.167	0.167	0.168	0.171	0.180	0.186	0.154
3.0	0.153	0.177	0.185	0.187	0.186	0.185	0.185	0.181	0.171	0.130	0.175
3.5	0.175	0.194	0.202	0.204	0.203	0.202	0.208	0.206	0.204	0.161	0.192



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดกับสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A (กลุ่มที่ 3)

จากกราฟแสดงผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จะนำวัสดุตัวอย่างไปวาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุดในช่วงตำแหน่งระหว่าง 4-10 mm

- ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อที่ 3.1.1 ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจะทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนาและชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง ($\lambda=532$ nm) และปรับแผ่นโพลาไรซ์ เพื่อให้แสงมีความเข้มน้อยที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา) และห้แสงมีความเข้มมากที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น) เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้ง 2 ทิศทาง (θ_1 และ θ_2) จากนั้นนำค่า θ_1 และ θ_2 มาคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (θ) ดังสมการ $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

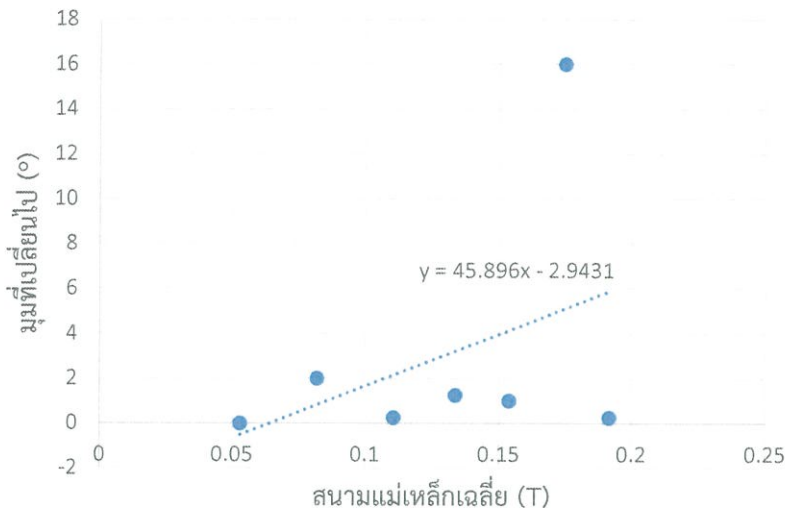
- ▶ ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 3)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	16.5	16.5	0.00
1.0	42.5	46.5	2.00
1.5	74.0	74.5	0.25
2.0	65.0	62.5	1.25
2.5	32.5	34.5	1.00
3.0	42.0	10.0	16.00
3.5	41.0	40.5	0.25

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 7 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 8 มาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 3)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $-1.88 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 167.1 %

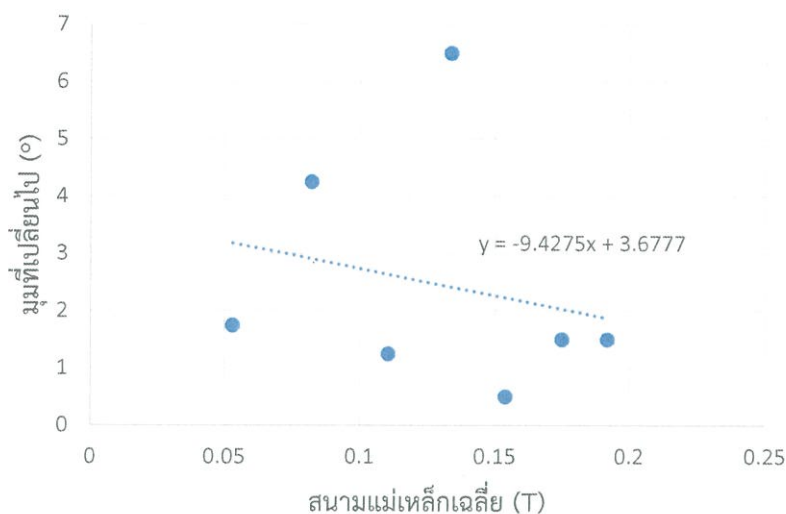
▶ ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น (กลุ่มที่ 3)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	36.5	40.0	1.75
1.0	50.0	58.5	4.25
1.5	34.5	32.0	1.25
2.0	23.0	10.0	6.50
2.5	8.0	7.0	0.50
3.0	24.0	21.0	1.50
3.5	23.0	26.0	1.50

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 7 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 9 มาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 3)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $1.53 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 446.4 %

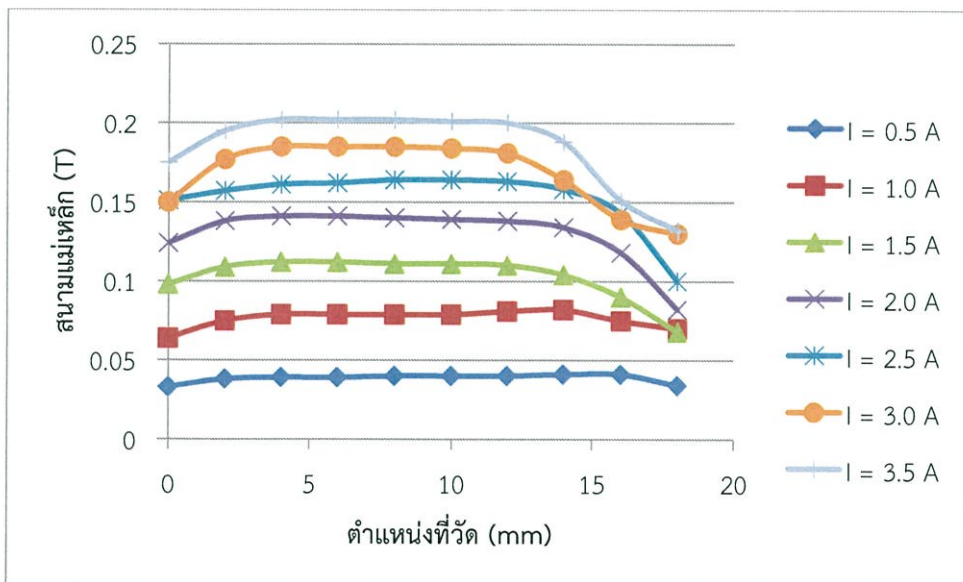
กลุ่มที่ 4

- ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่จะนำวัสดุไปวาง โดยอาศัยวิธีการทดลองที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.1 ในขั้นตอนที่ 1 ได้ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (กลุ่มที่ 4)

I (A)	B (T)										\bar{B} (T)
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	
0.5	0.033	0.038	0.039	0.039	0.040	0.040	0.040	0.041	0.041	0.034	0.038
1.0	0.064	0.075	0.079	0.079	0.079	0.079	0.081	0.082	0.075	0.070	0.076
1.5	0.098	0.109	0.112	0.112	0.111	0.111	0.110	0.104	0.090	0.068	0.102
2.0	0.124	0.138	0.141	0.141	0.140	0.139	0.138	0.134	0.118	0.082	0.129
2.5	0.151	0.157	0.161	0.162	0.164	0.164	0.163	0.158	0.143	0.100	0.152
3.0	0.150	0.177	0.185	0.185	0.185	0.184	0.181	0.164	0.139	0.130	0.168
3.5	0.175	0.195	0.202	0.202	0.202	0.201	0.200	0.188	0.151	0.132	0.185



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดกับสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A (กลุ่มที่ 4)

จากกราฟแสดงผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จะนำวัสดุตัวอย่างไปวาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุดในช่วงตำแหน่งระหว่าง 4-12 mm

- ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อที่ 3.1.1 ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจะทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนาและชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง ($\lambda=532$ nm) และปรับแผ่นโพลาไรซ์ เพื่อให้แสงมีความเข้มน้อยที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา) และห้แสงมีความเข้มมากที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น) เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้ง 2 ทิศทาง (θ_1 และ θ_2) จากนั้นนำค่า θ_1 และ θ_2 มาคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (θ) ดังสมการ $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

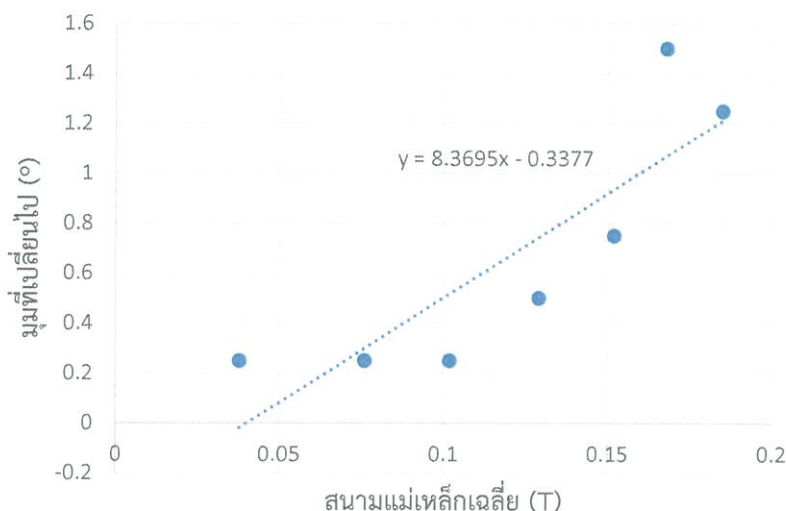
- ▶ ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 4)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	55.0	55.5	0.25
1.0	55.0	54.5	0.25
1.5	54.5	54.0	0.25
2.0	55.5	54.5	0.50
2.5	55.0	53.5	0.75
3.0	56.0	53.0	1.50
3.5	55.5	53.0	1.25

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 10 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 11 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 4)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $2.76 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 1.4 %

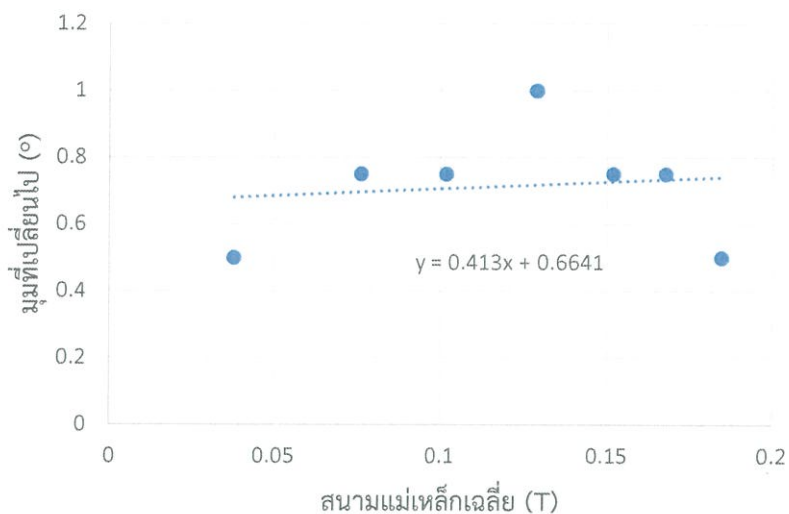
► ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาริซของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น (กลุ่มที่ 4)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	54.0	55.0	0.50
1.0	53.5	55.0	0.75
1.5	53.5	55.0	0.75
2.0	53.0	55.0	1.00
2.5	53.5	55.0	0.75
3.0	54.0	55.5	0.75
3.5	54.0	55.0	0.50

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 10 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 12 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 4)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $1.46 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 94.8 %

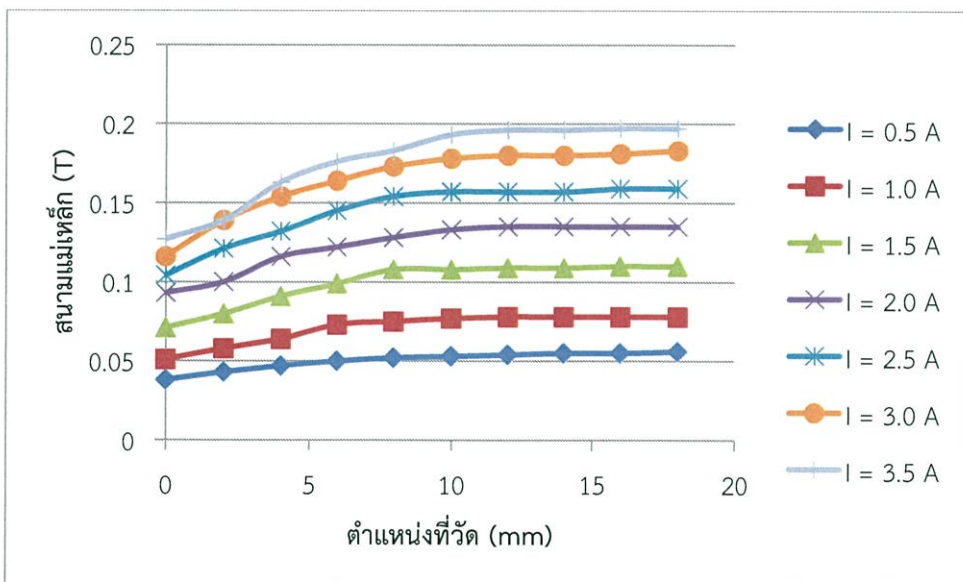
กลุ่มที่ 5

- ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่จะนำวัสดุไปวาง โดยอาศัยวิธีการทดลองที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.1 ในขั้นตอนที่ 1 ได้ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (กลุ่มที่ 5)

I (A)	B (T)										\bar{B} (T)
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	
0.5	0.038	0.043	0.047	0.050	0.052	0.053	0.054	0.055	0.055	0.056	0.050
1.0	0.051	0.058	0.064	0.073	0.075	0.077	0.078	0.078	0.078	0.078	0.071
1.5	0.071	0.080	0.091	0.099	0.108	0.108	0.109	0.109	0.110	0.110	0.100
2.0	0.093	0.100	0.116	0.122	0.128	0.133	0.135	0.135	0.135	0.135	0.123
2.5	0.104	0.121	0.132	0.145	0.154	0.157	0.157	0.157	0.159	0.159	0.145
3.0	0.116	0.139	0.154	0.164	0.173	0.178	0.180	0.180	0.181	0.183	0.165
3.5	0.127	0.139	0.163	0.176	0.183	0.193	0.196	0.196	0.197	0.197	0.177



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดกับสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A (กลุ่มที่ 5)

จากกราฟแสดงผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จะนำวัสดุตัวอย่างไปวาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุดในช่วงตำแหน่งระหว่าง 12-18 mm

- ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อที่ 3.1.1 ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจะทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนาและชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง ($\lambda=532$ nm) และปรับแผ่นโพลาไรซ์ เพื่อให้แสงมีความเข้มน้อยที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา) และห้แสงมีความเข้มมากที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น) เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้ง 2 ทิศทาง (θ_1 และ θ_2) จากนั้นนำค่า θ_1 และ θ_2 มาคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (θ) ดังสมการ $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

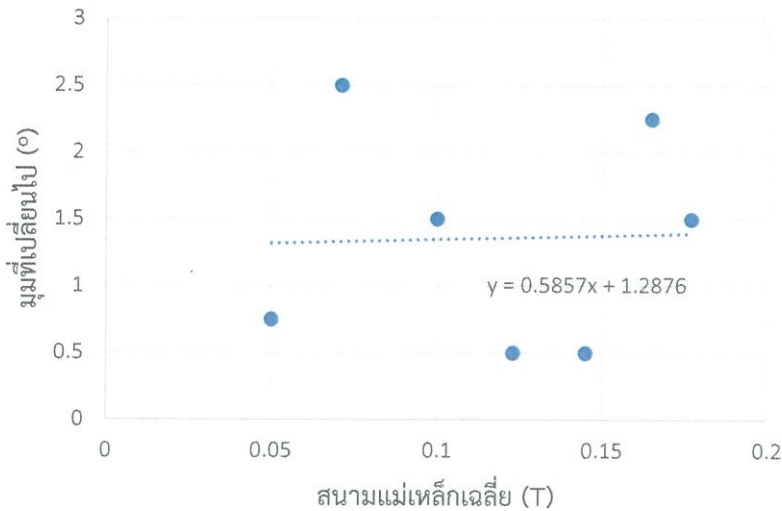
- ▶ ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 5)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	36.5	35.0	0.75
1.0	40.0	35.0	2.50
1.5	39.0	36.0	1.50
2.0	36.0	35.0	0.50
2.5	35.0	36.0	0.50
3.0	31.5	36.0	2.25
3.5	33.0	36.0	1.50

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 13 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 14 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 5)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $1.95 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 93.0%

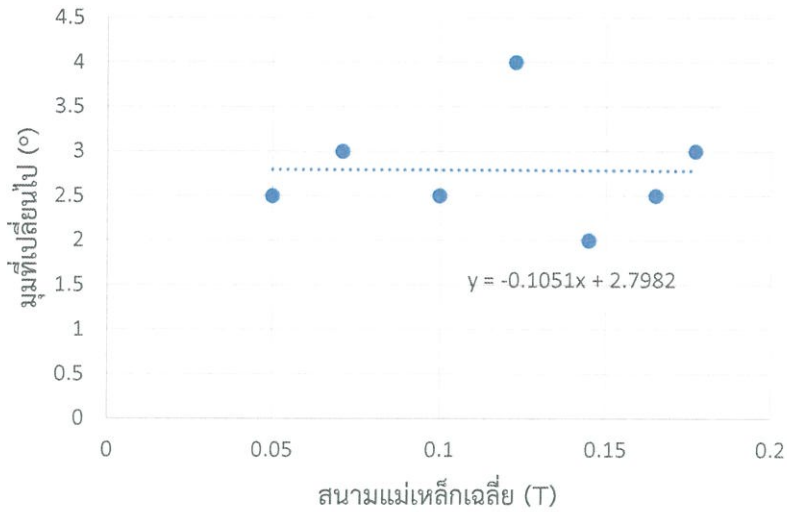
► ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น (กลุ่มที่ 5)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	68.0	73.0	2.50
1.0	5.0	59.0	3.00
1.5	66.0	61.0	2.50
2.0	56.0	64.0	4.00
2.5	58.0	62.0	2.00
3.0	51.0	56.0	2.50
3.5	46.0	52.0	3.00

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 13 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 15 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 5)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $3.50 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 87.6 %

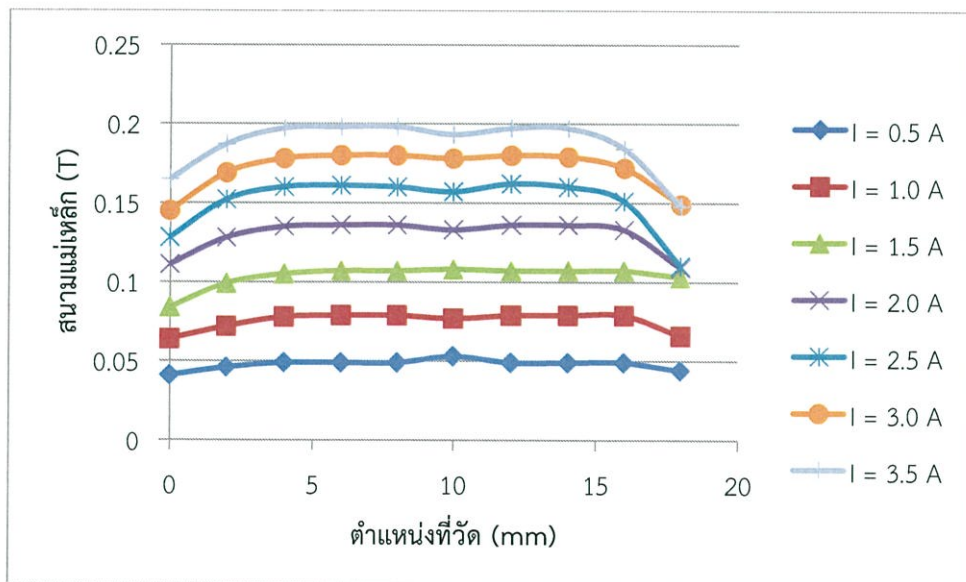
กลุ่มที่ 6

• ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่จะนำวัสดุไปวาง โดยอาศัยวิธีการทดลองที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.1 ในขั้นตอนที่ 1 ได้ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (กลุ่มที่ 6)

I (A)	B (T)										\bar{B} (T)
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	
0.5	0.041	0.046	0.049	0.049	0.049	0.053	0.049	0.049	0.049	0.044	0.047
1.0	0.064	0.072	0.078	0.079	0.079	0.077	0.079	0.079	0.079	0.066	0.075
1.5	0.084	0.099	0.105	0.107	0.107	0.108	0.107	0.107	0.107	0.103	0.103
2.0	0.111	0.128	0.135	0.136	0.136	0.133	0.136	0.136	0.133	0.109	0.129
2.5	0.128	0.152	0.160	0.161	0.160	0.157	0.162	0.160	0.151	0.110	0.150
3.0	0.145	0.169	0.178	0.180	0.180	0.178	0.180	0.179	0.172	0.149	0.171
3.5	0.165	0.187	0.197	0.198	0.198	0.193	0.197	0.197	0.184	0.148	0.186



รูปที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดกับสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A (กลุ่มที่ 6)

จากกราฟแสดงผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จะนำวัสดุตัวอย่างไปวาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 16 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุดในช่วงตำแหน่งระหว่าง 4-8 mm

- ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อที่ 3.1.1 ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจะทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนาและชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง ($\lambda=532$ nm) และปรับแผ่นโพลาริซ เพื่อให้แสงมีความเข้มน้อยที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา) และห้แสงมีความเข้มมากที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น) เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้ง 2 ทิศทาง (θ_1 และ θ_2) จากนั้นนำค่า θ_1 และ θ_2 มาคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (θ) ดังสมการ $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

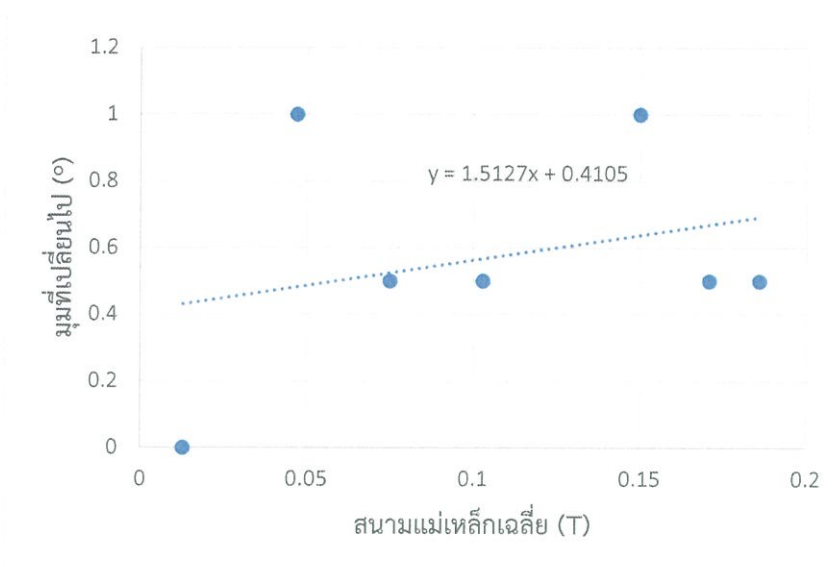
- ▶ ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาริซของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 6)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	82.0	80.0	1.00
1.0	86.0	85.0	0.50
1.5	84.0	84.0	0.50
2.0	83.0	84.0	0.00
2.5	84.0	85.0	1.00
3.0	82.0	85.0	0.50
3.5	43.0	83.0	0.50

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 16 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 17 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 6)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ 5.04×10^{-5} $^{\circ}/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4}$ $^{\circ}/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532$ nm) สูงถึง 82.0 %

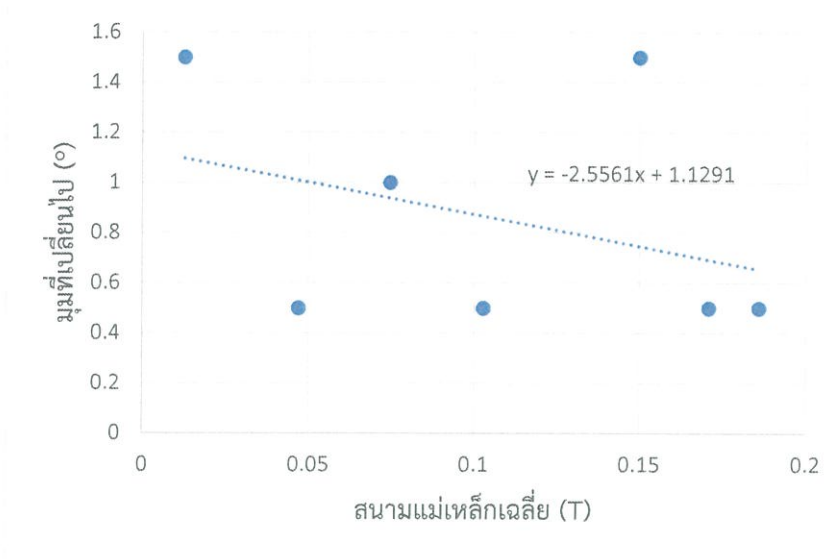
► ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น (กลุ่มที่ 6)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	42.0	43.0	0.50
1.0	50.0	48.0	1.00
1.5	51.0	52.0	0.50
2.0	56.0	53.0	1.50
2.5	52.0	55.0	1.50
3.0	53.0	54.0	0.50
3.5	55.0	56.0	0.50

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 16 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 18 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 6)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $-8.52 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 130.4 %

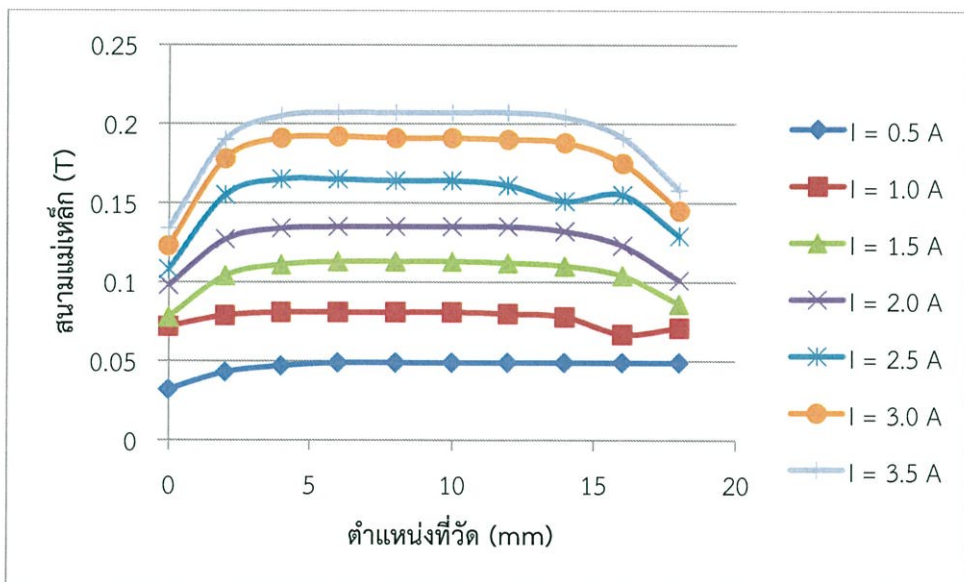
กลุ่มที่ 7

• ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่จะนำวัสดุไปวาง โดยอาศัยวิธีการทดลองที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.1 ในขั้นตอนที่ 1 ได้ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (กลุ่มที่ 7)

I (A)	B (T)										\bar{B} (T)	
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18		
0.5	0.032	0.043	0.047	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.047
1.0	0.072	0.079	0.081	0.081	0.081	0.081	0.080	0.078	0.067	0.071	0.071	0.077
1.5	0.078	0.104	0.111	0.113	0.113	0.113	0.112	0.110	0.104	0.086	0.086	0.104
2.0	0.098	0.127	0.134	0.135	0.135	0.135	0.135	0.132	0.123	0.101	0.101	0.126
2.5	0.108	0.155	0.165	0.165	0.164	0.164	0.161	0.151	0.155	0.129	0.129	0.152
3.0	0.123	0.178	0.191	0.192	0.191	0.191	0.190	0.188	0.175	0.145	0.145	0.176
3.5	0.134	0.190	0.205	0.207	0.207	0.207	0.207	0.204	0.191	0.158	0.158	0.191



รูปที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดกับสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A (กลุ่มที่ 7)

จากกราฟแสดงผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จะนำวัสดุตัวอย่างไปวาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 19 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุดในช่วงตำแหน่งระหว่าง 4-12 mm

- ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อที่ 3.1.1 ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจะทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนาและชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง ($\lambda=532$ nm) และปรับแผ่นโพลาไรซ์ เพื่อให้แสงมีความเข้มน้อยที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา) และให้แสงมีความเข้มมากที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น) เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้ง 2 ทิศทาง (θ_1 และ θ_2) จากนั้นนำค่า θ_1 และ θ_2 มาคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (θ) ดังสมการ $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

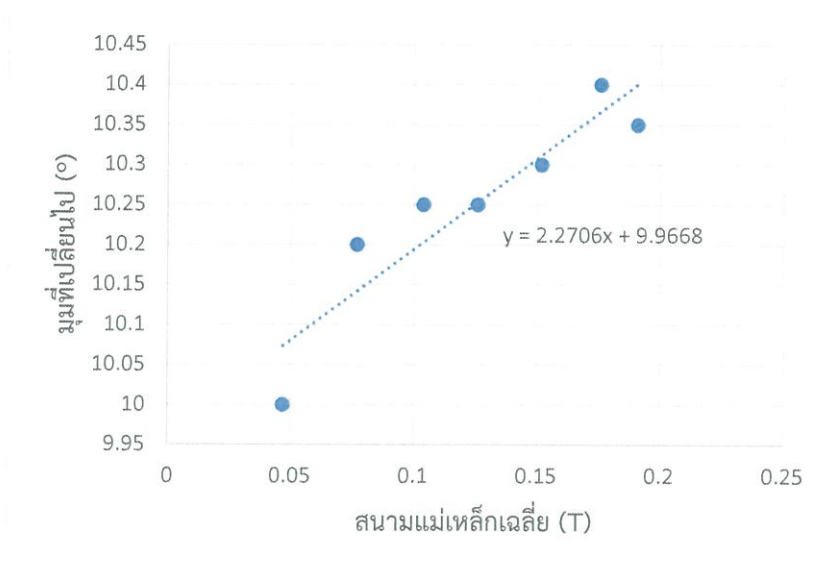
- ▶ ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 7)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	0.6	20.6	10.00
1.0	0.2	20.6	10.20
1.5	0.1	20.6	10.25
2.0	0.2	20.7	10.25
2.5	0.1	20.7	10.30
3.0	0.0	20.8	10.40
3.5	0.0	20.7	10.35

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 19 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 20 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 7)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $7.57 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 73.0 %

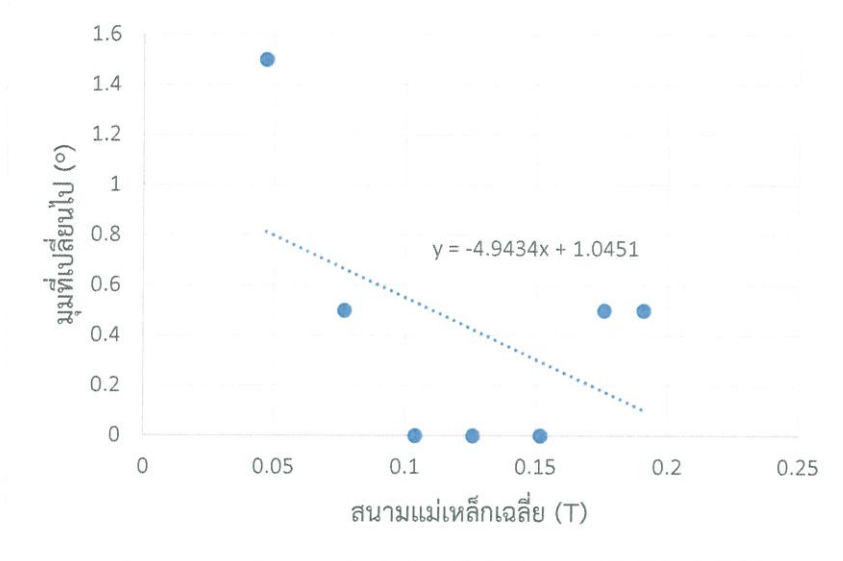
► ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น (กลุ่มที่ 7)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	85.0	88.0	1.50
1.0	86.0	87.0	0.50
1.5	87.0	87.0	0.00
2.0	87.0	87.0	0.00
2.5	87.0	87.0	0.00
3.0	87.0	88.0	0.50
3.5	87.0	88.0	0.50

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 19 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 21 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 7)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $-1.65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 158.9 %

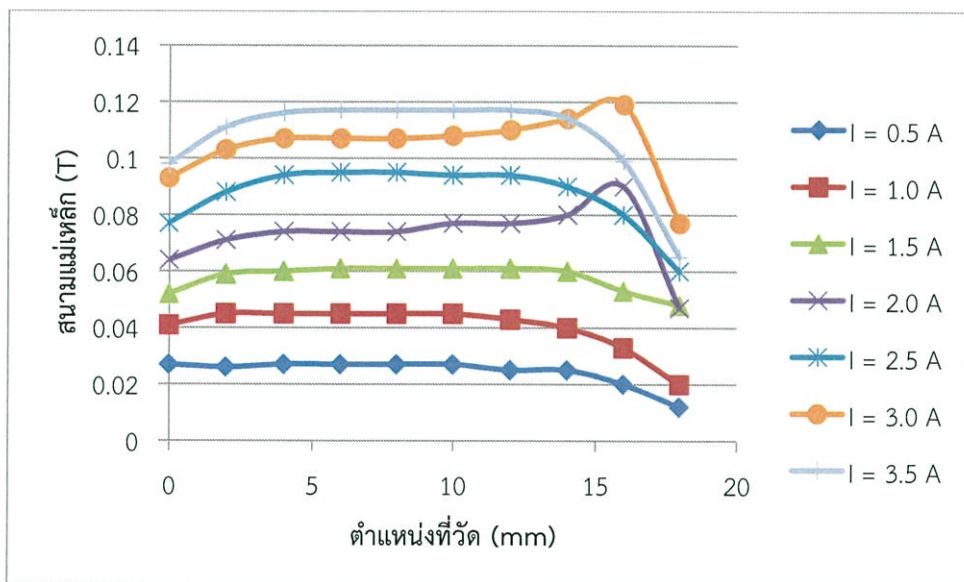
กลุ่มที่ 8

- ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่จะนำวัสดุไปวาง โดยอาศัยวิธีการทดลองที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.1 ในขั้นตอนที่ 1 ได้ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (กลุ่มที่ 8)

I (A)	B (T)										\bar{B} (T)
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	
0.5	0.027	0.026	0.027	0.027	0.027	0.027	0.025	0.025	0.020	0.012	0.024
1.0	0.041	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.043	0.040	0.033	0.020	0.040
1.5	0.052	0.059	0.060	0.061	0.061	0.061	0.061	0.060	0.053	0.048	0.058
2.0	0.064	0.071	0.074	0.074	0.074	0.077	0.077	0.080	0.090	0.047	0.073
2.5	0.077	0.088	0.094	0.095	0.095	0.094	0.094	0.090	0.080	0.060	0.087
3.0	0.093	0.103	0.107	0.107	0.107	0.108	0.110	0.114	0.119	0.077	0.095
3.5	0.098	0.111	0.116	0.117	0.117	0.117	0.117	0.114	0.099	0.065	0.107



รูปที่ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดกับสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A (กลุ่มที่ 8)

จากกราฟแสดงผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จะนำวัสดุตัวอย่างไปวาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุดในช่วงตำแหน่งระหว่าง 6-10 mm

- ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อที่ 3.1.1 ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจะทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนาและชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง ($\lambda=532$ nm) และปรับแผ่นโพลาไรซ์เพื่อให้แสงมีความเข้มน้อยที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา) และห้แสงมีความเข้มมากที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น) เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้ง 2 ทิศทาง (θ_1 และ θ_2) จากนั้นนำค่า θ_1 และ θ_2 มาคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (θ) ดังสมการ $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

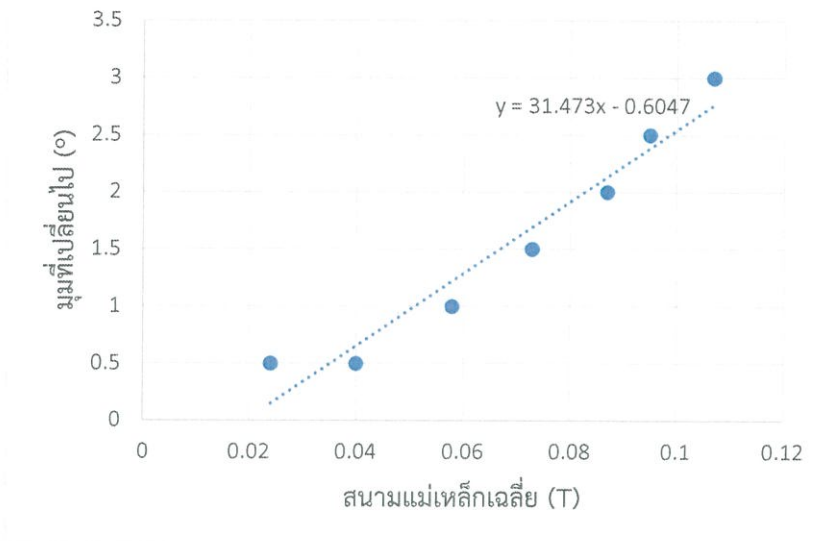
- ▶ ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 8)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	41.0	40.0	0.50
1.0	44.0	45.0	0.50
1.5	41.0	43.0	1.00
2.0	42.0	45.0	1.50
2.5	41.0	45.0	2.00
3.0	41.0	46.0	2.50
3.5	40.0	46.0	3.00

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 22 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 23 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 8)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ 1.05×10^{-3} °/G·cm ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4}$ °/G·cm ที่ $\lambda = 532$ nm) สูงถึง 275.0 %

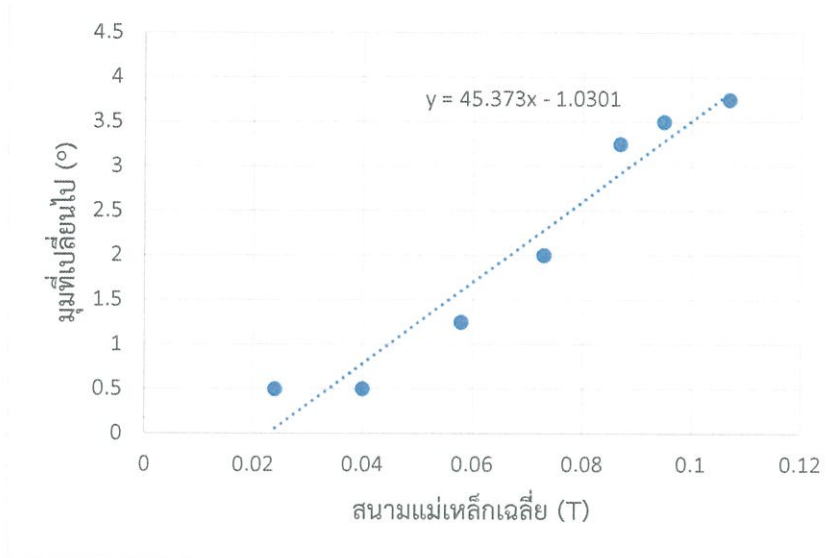
▶ ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น (กลุ่มที่ 8)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	44.0	43.0	0.50
1.0	45.0	44.0	0.50
1.5	45.5	43.0	1.25
2.0	46.0	42.0	2.00
2.5	46.5	40.0	3.25
3.0	46.0	39.0	3.50
3.5	47.5	40.0	3.75

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 22 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 24 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 8)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $1.51 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 439.3 %

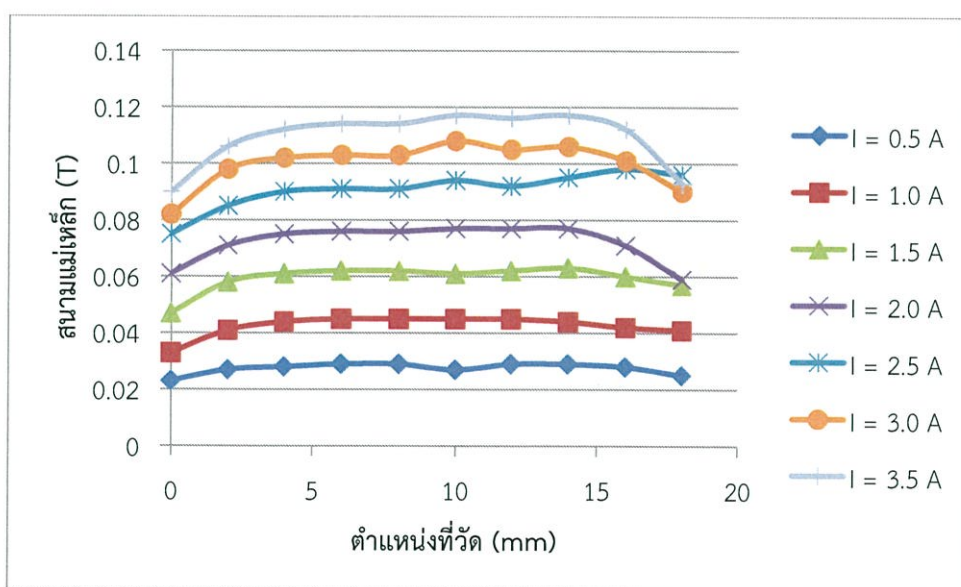
กลุ่มที่ 9

• ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่จะนำวัสดุไปวาง โดยอาศัยวิธีการทดลองที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.1 ในขั้นตอนที่ 1 ได้ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (กลุ่มที่ 9)

I (A)	B (T)										\bar{B} (T)
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	
0.5	0.023	0.027	0.028	0.029	0.029	0.027	0.029	0.029	0.028	0.025	0.028
1.0	0.033	0.041	0.044	0.045	0.045	0.045	0.045	0.044	0.042	0.041	0.043
1.5	0.047	0.058	0.061	0.062	0.062	0.061	0.062	0.063	0.060	0.057	0.059
2.0	0.061	0.071	0.075	0.076	0.076	0.077	0.077	0.077	0.071	0.059	0.072
2.5	0.075	0.085	0.090	0.091	0.091	0.094	0.092	0.095	0.098	0.096	0.090
3.0	0.082	0.098	0.102	0.103	0.103	0.108	0.105	0.106	0.101	0.090	0.099
3.5	0.090	0.106	0.112	0.114	0.114	0.117	0.116	0.117	0.112	0.093	0.109



รูปที่ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดกับสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A (กลุ่มที่ 9)

จากกราฟแสดงผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จะนำวัสดุตัวอย่างไปวาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 25 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุดในช่วงตำแหน่งระหว่าง 4-8 mm

- ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อที่ 3.1.1 ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจะทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนาและชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง ($\lambda=532$ nm) และปรับแผ่นโพลาไรซ์ เพื่อให้แสงมีความเข้มน้อยที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา) และให้แสงมีความเข้มมากที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น) เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้ง 2 ทิศทาง (θ_1 และ θ_2) จากนั้นนำค่า θ_1 และ θ_2 มาคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (θ) ดังสมการ $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

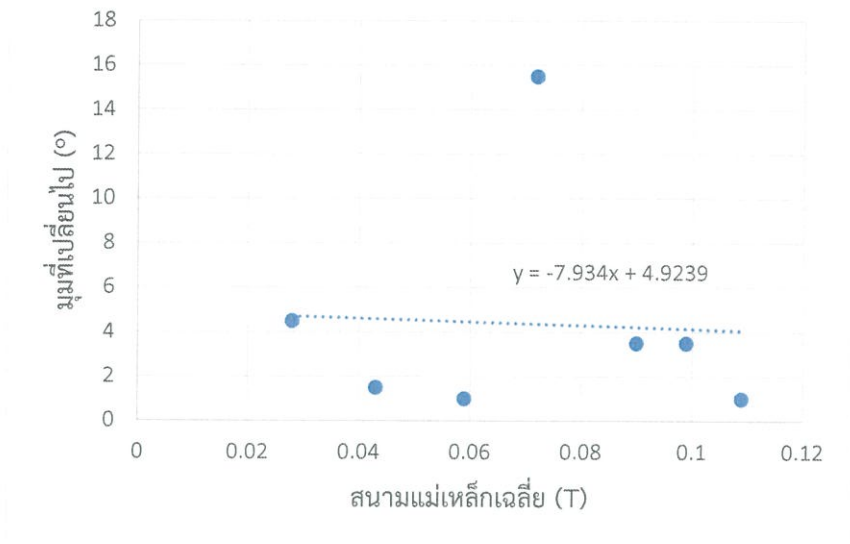
- ▶ ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 26

ตารางที่ 26 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 9)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	90.0	81.0	4.50
1.0	54.0	51.0	1.50
1.5	86.0	84.0	1.00
2.0	42.0	11.0	15.50
2.5	90.0	83.0	3.50
3.0	84.0	77.0	3.20
3.5	90.0	88.0	1.00

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 25 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 26 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 26



รูปที่ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 9)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $-2.64 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 90.6 %

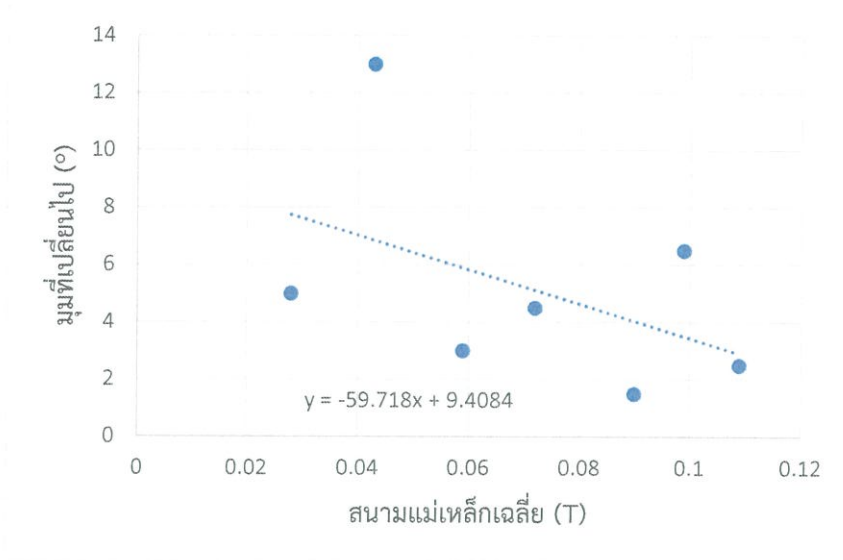
▶ ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 27

ตารางที่ 27 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น (กลุ่มที่ 9)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	50.0	60.0	5.00
1.0	44.0	70.0	13.00
1.5	56.0	62.0	13.00
2.0	55.0	64.0	4.50
2.5	75.0	66.0	4.50
3.0	77.0	64.0	6.50
3.5	74.0	79.0	2.50

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 25 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 27 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 27



รูปที่ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 9)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ -1.99×10^{-5} $^{\circ}/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4}$ $^{\circ}/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532$ nm) สูงถึง 107.1 %

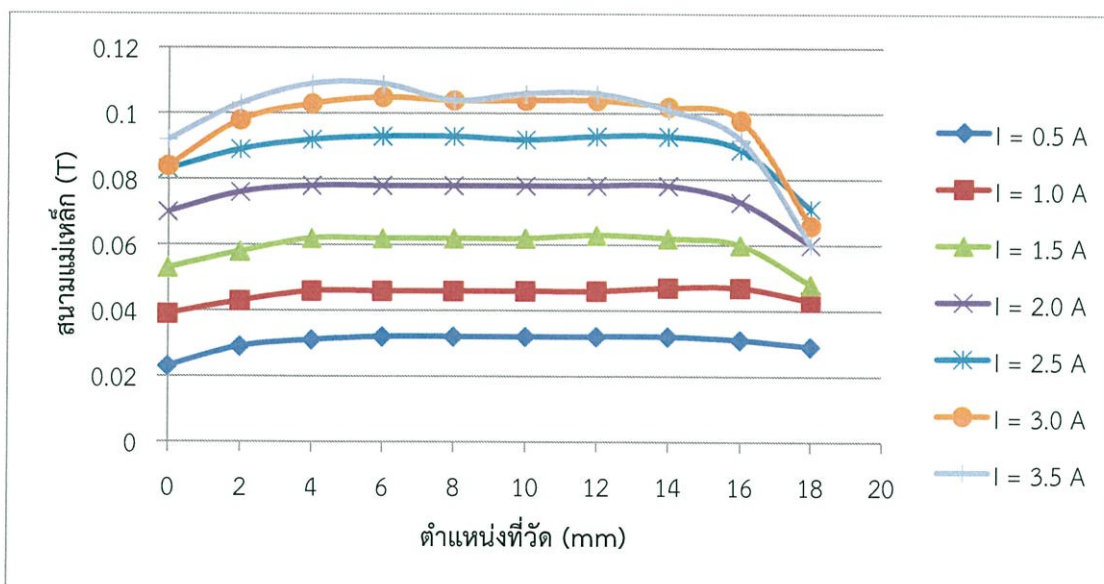
กลุ่มที่ 10

ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่จะนำวัสดุไปวาง โดยอาศัยวิธีการทดลองที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.1 ในขั้นตอนที่ 1 ได้ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 28

ตารางที่ 28 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (กลุ่มที่ 10)

I (A)	B (T)										\bar{B} (T)
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	
0.5	0.023	0.029	0.031	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.031	0.029	0.030
1.0	0.039	0.043	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.047	0.047	0.043	0.045
1.5	0.053	0.058	0.062	0.062	0.062	0.062	0.063	0.062	0.060	0.048	0.059
2.0	0.070	0.076	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.073	0.060	0.075
2.5	0.083	0.089	0.092	0.093	0.093	0.092	0.093	0.093	0.089	0.071	0.089
3.0	0.084	0.098	0.103	0.105	0.104	0.104	0.104	0.102	0.098	0.066	0.097
3.5	0.092	0.103	0.109	0.109	0.104	0.106	0.106	0.101	0.092	0.060	0.099



รูปที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดกับสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A (กลุ่มที่ 10)

จากกราฟแสดงผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จะนำวัสดุตัวอย่างไปวาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 28 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุดในช่วงตำแหน่งระหว่าง 6-12 mm

- ผลการวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการในหัวข้อที่ 3.1.1 ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจะทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนาและชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น และใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง ($\lambda=532$ nm) และปรับแผ่นโพลารอยซ์ เพื่อให้แสงมีความเข้มน้อยที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา) และให้แสงมีความเข้มมากที่สุด (สำหรับชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น) เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้ง 2 ทิศทาง (θ_1 และ θ_2) จากนั้นนำค่า θ_1 และ θ_2 มาคำนวณหาค่ามุมที่บิดไป (θ) ดังสมการ $\theta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{2}$ ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

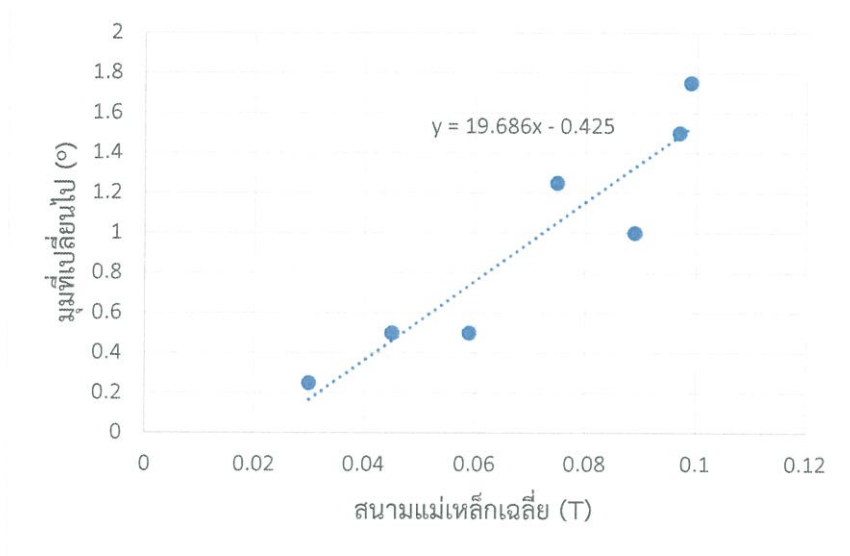
- ▶ ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 29

ตารางที่ 29 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลารอยซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่มีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 10)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	57.0	57.5	0.25
1.0	71.0	72.0	0.50
1.5	58.0	57.0	0.50
2.0	57.0	54.5	1.25
2.5	58.0	60.0	1.00
3.0	55.0	52.0	1.50
3.5	54.0	50.5	1.75

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 28 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 29 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 10)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $6.56 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 92.8 %

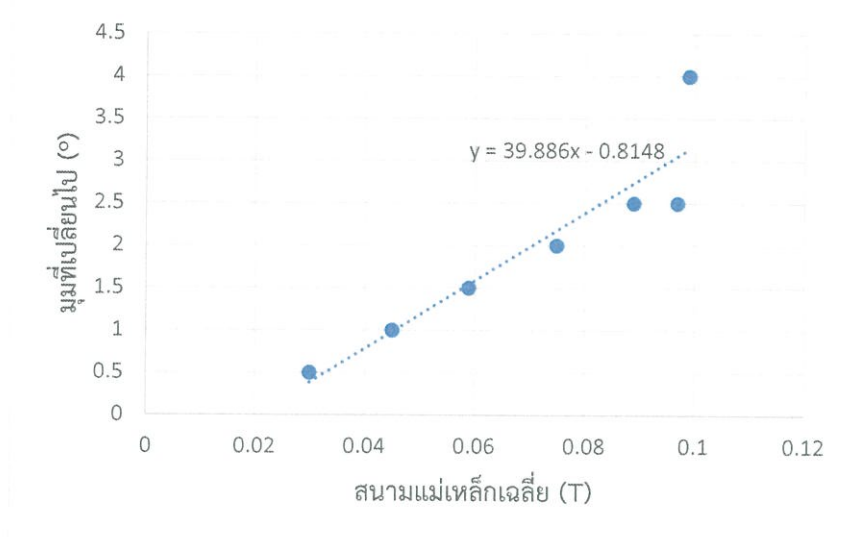
▶ ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น

จากการทดลองวัดค่าคงที่ verdet ของน้ำ โดยทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดระหว่าง 0.5-3.5 A และทำการวัดค่ามุมที่บิดไปได้ผลดังตารางที่ 30

ตารางที่ 30 ค่ากระแสไฟฟ้าและมุมที่วัดได้จากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ของวัสดุที่เป็นน้ำ โดยใช้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น (กลุ่มที่ 10)

I (A)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ (°)
0.5	48.0	47.0	0.50
1.0	59.0	61.0	1.00
1.5	69.0	66.0	1.50
2.0	61.0	65.0	2.00
2.5	60.0	65.0	2.50
3.0	68.0	73.0	2.50
3.5	71.0	79.0	4.00

เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยจากตารางที่ 28 และค่ามุมที่บิดไปจากตารางที่ 30 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะแสดงดังรูปที่ 30



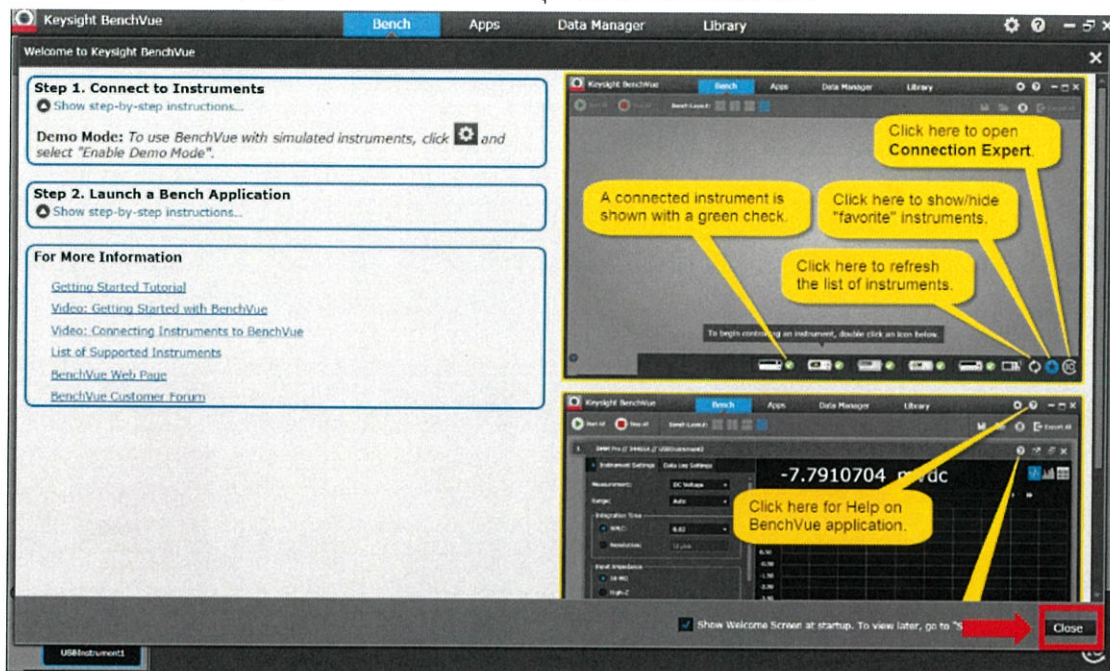
รูปที่ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำ โดยใช้ชุดทดลองมีอยู่แล้วก่อนการพัฒนา (กลุ่มที่ 10)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเฉลี่ยกับค่ามุมที่บิดไปของน้ำจะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ verdet ของน้ำได้ เท่ากับ $1.33 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี ($V = 2.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{G}\cdot\text{cm}$ ที่ $\lambda = 532 \text{ nm}$) สูงถึง 375.0 %

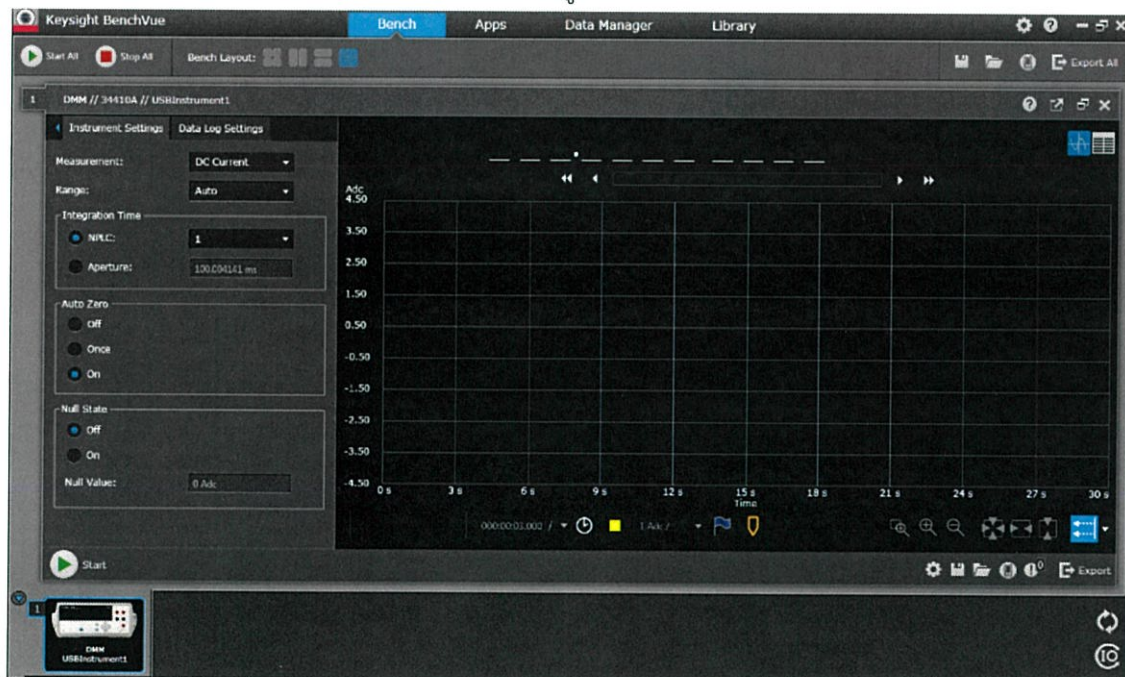
ภาคผนวก ข

วิธีใช้โปรแกรม Keysight BenchVue

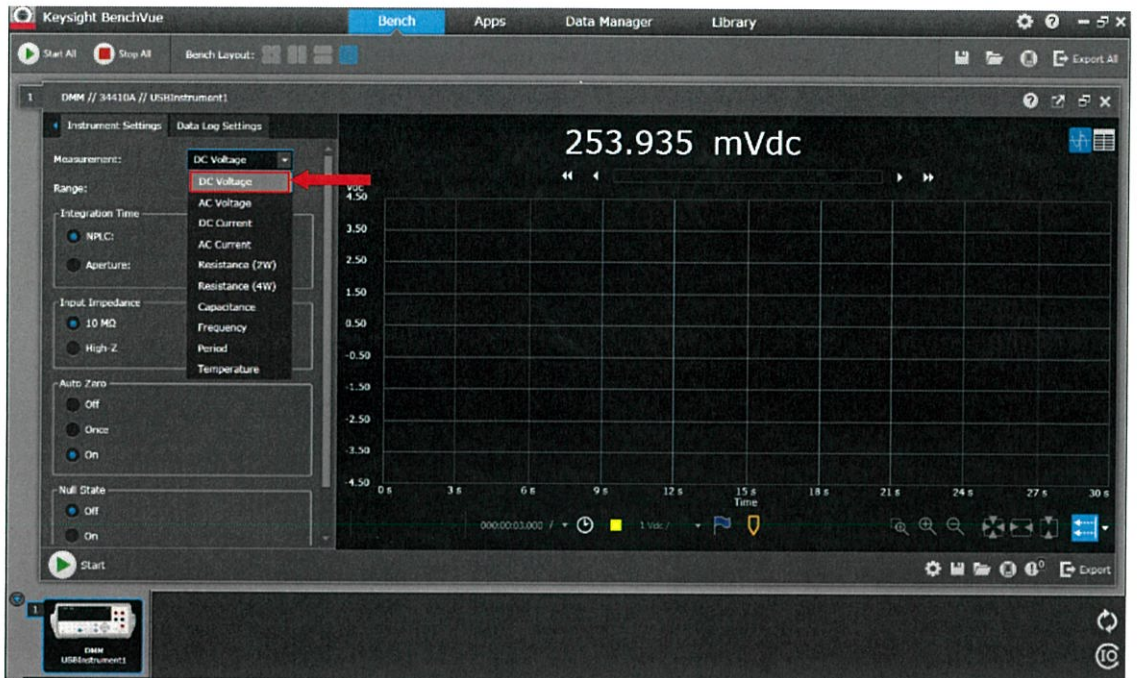
1. เปิดโปรแกรม Keysight BenchVue และกดปุ่ม close เพื่อปิดหน้าต่าง



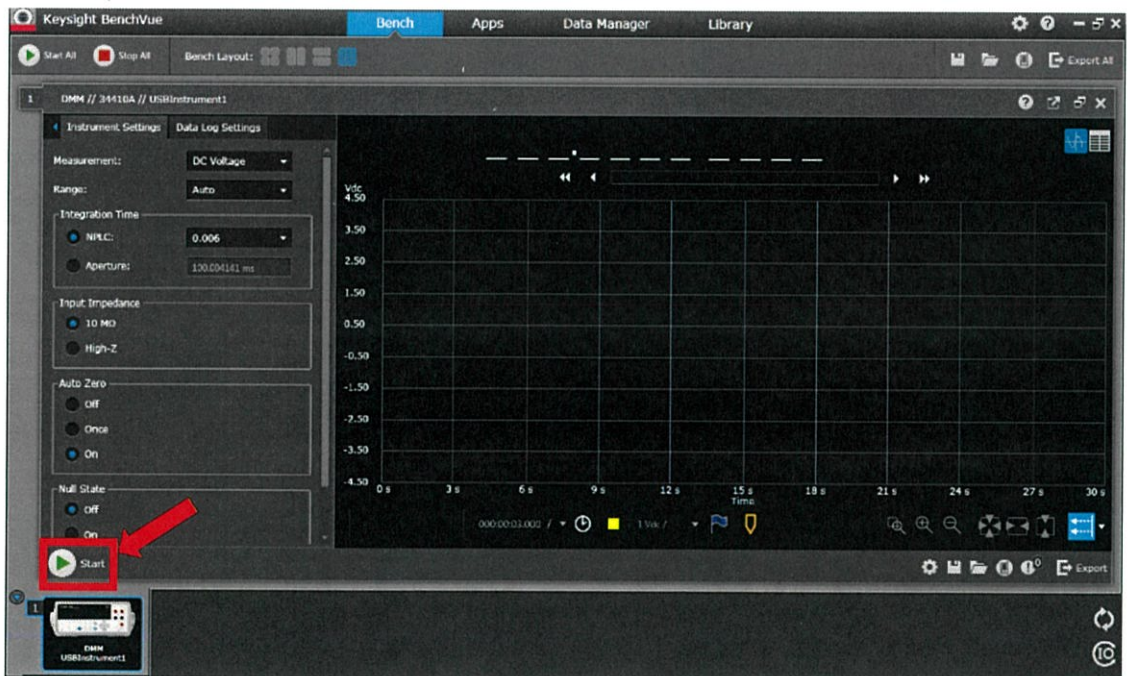
2. โปรแกรม Keysight BenchVue จะมีหน้าต่างดังรูป



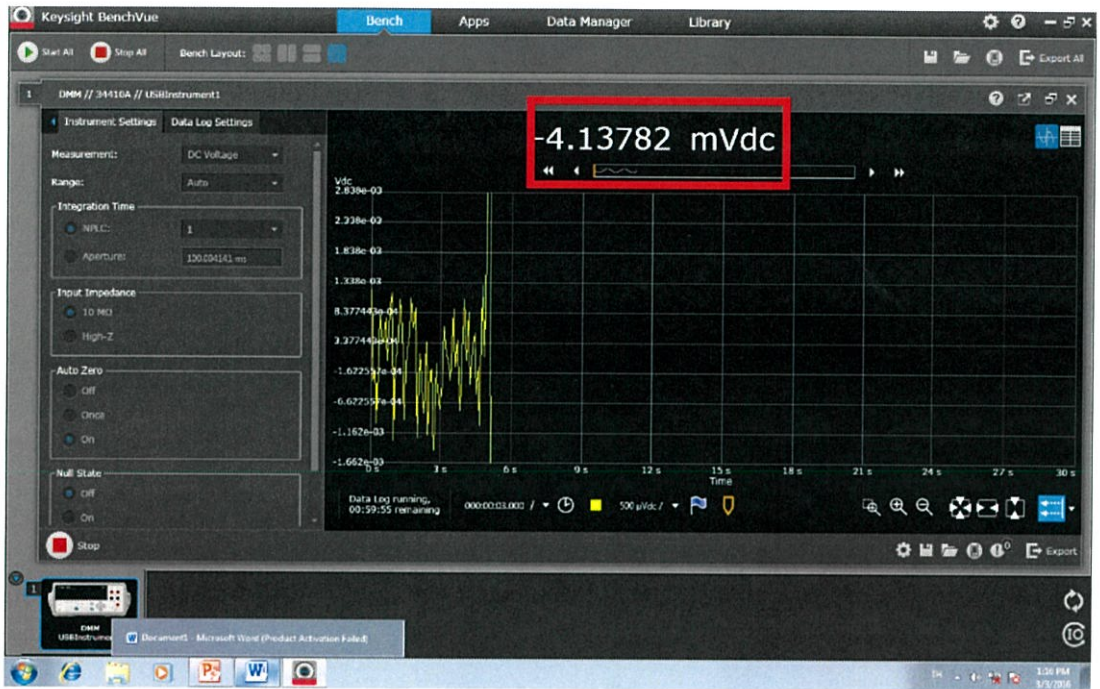
3. ที่ Measurement ให้เลือกเป็นDC Voltage



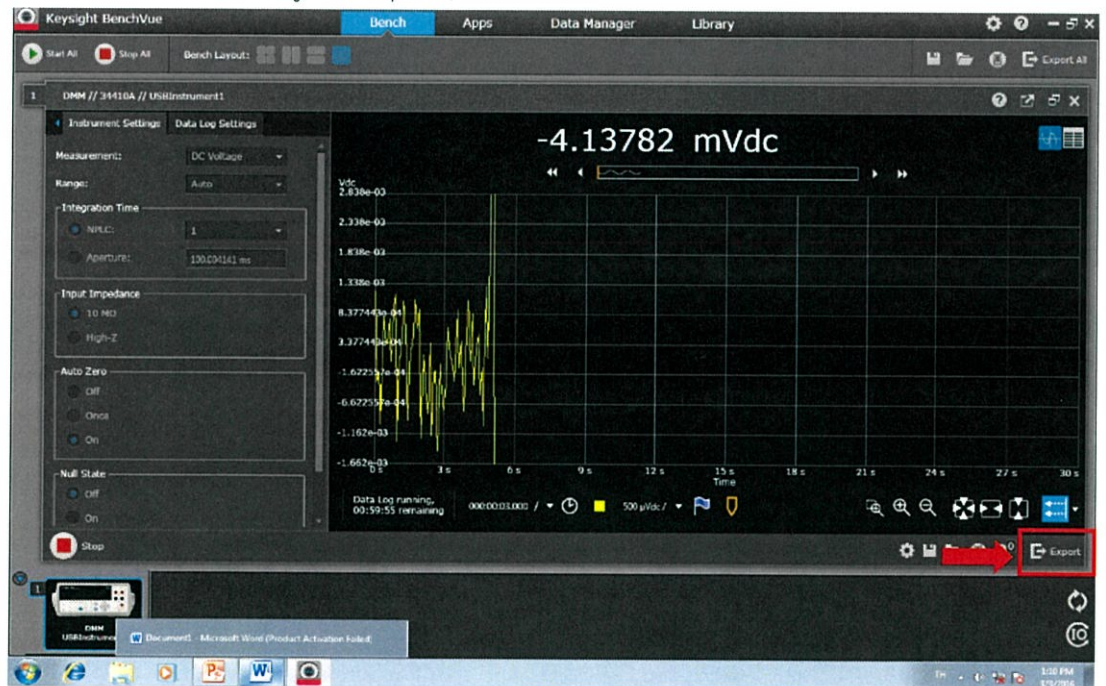
4. กดปุ่ม Startเพื่อเริ่มการทำงานของโปรแกรม Keysight BenchVue



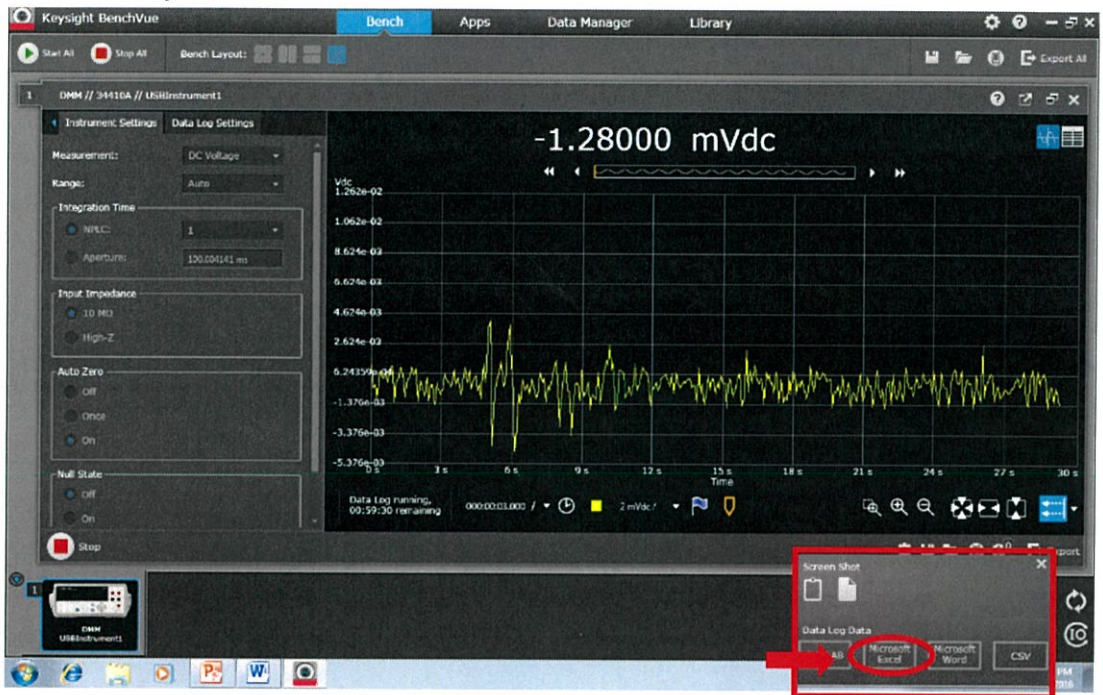
5. เมื่อโปรแกรม Keysight BenchVue เริ่มการทำงานแล้ว ให้ดูค่า voltage ทางด้านบนของโปรแกรม



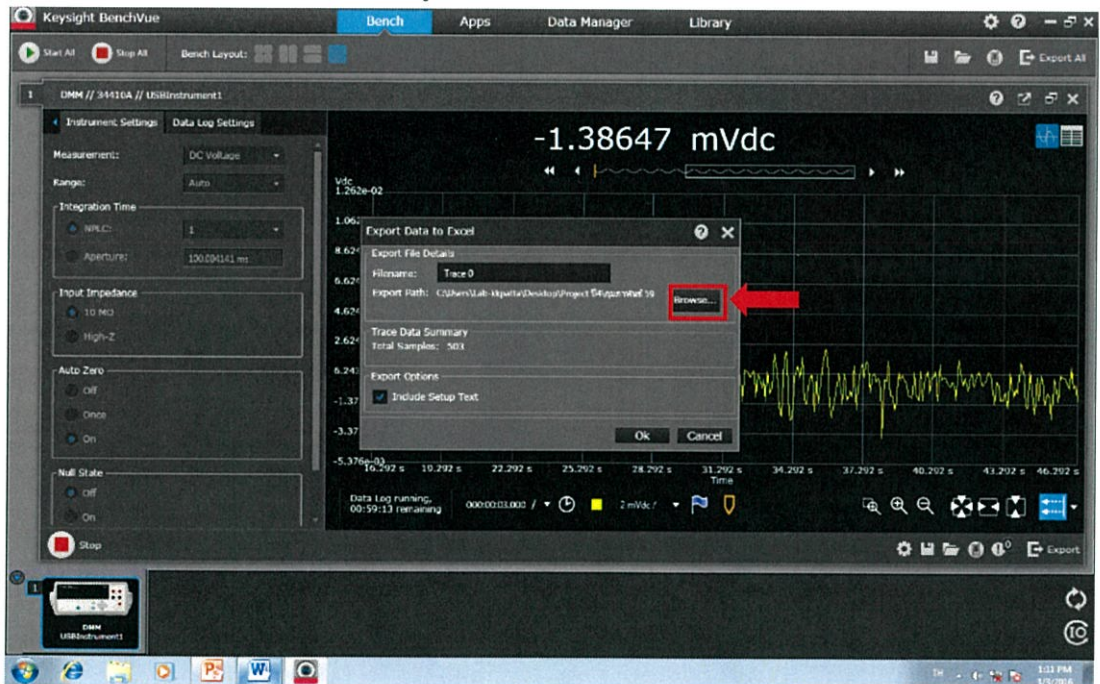
6. เมื่อต้องการบันทึกข้อมูลให้กดปุ่ม Export



7. จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างต่าง สำหรับเลือกรูปแบบที่ต้องการบันทึกข้อมูลขึ้นมา เช่นเมื่อต้องการบันทึกในรูปแบบของ Microsoft Excel ให้เลือกที่ Microsoft Excel



8. เลือก Folder ที่ต้องการบันทึกข้อมูลและพิมพ์ชื่อไฟล์ที่ต้องการบันทึก



9. เมื่อทำการบันทึกข้อมูลเรียบร้อยแล้วให้กดปุ่ม stop ที่โปรแกรม Keysight BenchVue เพื่อหยุดการทำงานของโปรแกรม

