

การตรวจวัดสนามแม่เหล็ก การดูดกลืนและการส่องผ่านแสง
ของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่ไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกเซนแนล

DETECTION OF MAGNETIC FIELD, ABSORBANCE AND
TRANSMITTANCE OF MAGNETITE (Fe_3O_4) FLOWED IN
MICROFLUIDIC CHANNEL

พิชญา ครุฑมงคล

อรดี คุ่มพ่วงดี

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

DETECTION OF MAGNETIC FIELD, ABSORBANCE AND
TRANSMITTANCE OF MAGNETITE (Fe_3O_4) FLOWED IN
MICROFLUIDIC CHANNEL

PICHAYA KROOTAMONGKOL
ORADEE KHUMPHUANGDEE


A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

หัวข้อโครงการพิเศษ การตรวจวัดสนามแม่เหล็ก การดูดกลืนและการส่องผ่านแสง
 ของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่ไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแซนแนล
 Detection of Magnetic Field, Absorbance and Transmittance
 of Magnetite (Fe_3O_4) Flowed in Microfluidic Channel

ชื่อนักศึกษา นางสาวพิชญา ธรรมมงคล รหัสนักศึกษา 58051105
 นางสาวอรดี คุ่มพวงดี รหัสนักศึกษา 58051172

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ภาควิชา ฟิสิกส์
 ปีการศึกษา 2561
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์
 ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.พิศาล สุขวิสูตร ประธานกรรมการ	พิศาล สุขวิสูตร
ดร.กมลปัญญา สุวรรณสุขโข กรรมการ	
รศ.ดร.ภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	ภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การตรวจวัดสนามแม่เหล็ก การดูดกลืนและการส่องผ่านแสงของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ที่ไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแขนแนล		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพิชญา คุรุมงคล	รหัสนักศึกษา	58051105
	นางสาวอรดี คุ้มพวงดี	รหัสนักศึกษา	58051172
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)		
ภาควิชา	ฟิสิกส์		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2561		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก โดยอาศัยกระบวนการไมโครแมชชีนนิ่ง ตัวต้นแบบที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กและสมบัติทางแสงของวัสดุของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กของ Fe_3O_4 ในน้ำปราศจากไอออนที่มีความเข้มข้น 300-500 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่าน้อยกว่า 300 มิลลิเกาส์ และไม่สามารถวัดได้จากตัวอย่างที่เตรียมขึ้น นอกจากนี้ยังมีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการส่องผ่านแสง เพื่อแสดงถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไมโครฟลูอิดิกสำหรับการตรวจวัดทางแสง

คำสำคัญ: ไมโครฟลูอิดิก อนุภาคนาโนแมกนีไทต์ Fe_3O_4

Title	Detection of Magnetic Field, Absorbance and Transmittance of Magnetite (Fe_3O_4) Flowed in Microfluidic Channel	
Students	Miss Pichaya Krootamongkol	Student ID 58051105
	Miss Oradee Khumphuangdee	Student ID 58051172
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL).	
Academic Year	2018	
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pattareeya Damrongsak	

Abstract

This special project aimed to fabricate a microfluidic devices based on micromachining process. The fabricated prototypes were used for detection of magnetic and optical properties of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles. The experimental results indicated that the magnetic field of Fe_3O_4 in water with concentration of 300-500 mg/L is less than 300 milligauss and can not be detected from the prepared samples. The absorbance and transmittance spectrum were also measured in order to demonstrate the feasibility of the microfluidic samples for optical detection.

Keywords: Microfluidic, Magnetite nanoparticles, Fe_3O_4

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลืออย่างสูงจาก รศ.ดร.ภทรียา ดำรงค์ศักดิ์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไข รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะมาปรับปรุงแก้ไขและเป็นที่ปรึกษาในทุกๆด้าน อีกทั้งยังปลุกฝังวิธีการทำงานที่ดีที่สุดที่จะช่วยให้สามารถนำไปพัฒนาต่อในการทำงานในอนาคตได้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตากรุณาของอาจารย์ท่านนี้เป็นอย่างยิ่งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษทั้งสองท่านได้แก่ ดร.กวางปัญญา สุวรรณสุขโข และดร.พิศาล สุขวิสูตร ที่สละเวลาอันมีค่าเข้ารับฟังการนำเสนองานวิจัย อีกทั้งยังให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษเล่มนี้

ขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นสถานที่ที่ให้ความรู้ ให้มิตรภาพระหว่างเพื่อน และทำให้รู้จัก พบเจอรุ่นพี่ที่มีความรู้ความสามารถโดยเฉพาะพี่เอกชัย รัมมะรัตน์ และพี่สุวิษญ์ เพิ่มพูนธัญญกิจ ผู้วิจัยขอขอบคุณรุ่นพี่ทั้งสองคนเป็นอย่างมากที่คอยให้ความช่วยเหลืออีกมากที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ หากมีโอกาสที่ผู้วิจัยจะสามารถตอบแทนบุญคุณและสร้างประโยชน์ให้กับสถาบันได้ ผู้วิจัยก็พร้อมและเต็มใจที่จะทำอย่างสุดความสามารถ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกๆ ท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้

ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้ทำวิจัย ที่ได้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน เป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ ของผู้ทำวิจัย และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

พิชญญา ครุฑมงคล

อรดี คุ่มพ่วงดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไมโครฟลูอิดิก (Microfluidic)	4
2.1.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.2 ทฤษฎีฟิสิกส์ของของไหล.....	5
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันในหลอดฉีดยา.....	6
2.2 คุณสมบัติของแสง.....	6
2.2.1 การเดินทางเป็นเส้นตรง (Rectilinear Propagation).....	6
2.2.2 การหักเห (Refraction)	6
2.2.3 การสะท้อน (Reflection)	8
2.2.4 การกระจาย	9
2.3 คุณสมบัติการดูดกลืนแสง.....	10
2.3.1 การดูดกลืนแสง (Absorption)	10
2.4 คุณสมบัติการทะลุผ่านของแสง.....	11
2.4.1 การส่องผ่านของแสง (Transmission)	11
2.5 กฎของแสง.....	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.1 ทฤษฎีกฎของแสง.....	11
2.5.2 กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law).....	11
2.5.3 กฎของเบียร์ (Beer's law)	12
2.6 สเปกโทรสโกปี(Spectroscopy).....	13
2.6.1 หลักการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี.....	13
2.7 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก.....	14
2.7.1 การออกแบบไมโครฟลูอิดิก.....	14
2.7.2 โปรแกรม Solidworks Simulation.....	14
2.7.3 การตัดด้วยแสงเลเซอร์ (Laser-cut)	15
2.7.4 น้ำยาประสานอะคริลิก (Acrylic Mate)	15
2.8 แม่เหล็กที่จะนำมาใช้ในการวิจัย.....	16
2.8.1 อนุภาคเหล็ก.....	16
2.8.2 สมบัติความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์.....	16
2.8.3 อนุภาคนาโนแมกนีไทต์ (Iron oxide : Fe ₃ O ₄).....	16
2.9 เครื่องวัดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Milli Gauss Meter).....	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	18
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	18
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	19
3.3 กระบวนการออกแบบและสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนล.....	20
3.3.1 กระบวนการออกแบบไมโครฟลูอิดิกแขนแนล.....	20
3.3.2 กระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนล.....	21
3.3.3 การประกบติด (Bonding).....	22
3.4 การทดสอบการรั่วไหลของไมโครฟลูอิดิกแขนแนล	
ด้วยน้ำปราศจากไอออนและอนุภาค Fe ₃ O ₄	22
3.4.1 การเตรียมสารอนุภาค Fe ₃ O ₄	22
3.4.2 วิธีการทดลอง.....	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การนำไมโครฟลูอิดิกไปประยุกต์วัดสนามแม่เหล็กของ อนุภาค Fe_3O_4	24
3.6 การนำไมโครฟลูอิดิกไปประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัดสมบัติ ทางแสงของอนุภาค Fe_3O_4	25
3.6.1 การหาค่าการดูดกลืนแสงและค่าการส่องผ่านคลื่นแสง ของสารละลายที่บรรจุในคิวเวทท์.....	26
3.6.2 การหาค่าการดูดกลืนแสงและค่าการส่องผ่านคลื่นแสง ของอนุภาค Fe_3O_4 ที่ไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแขนแนล.....	27
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	29
4.1 กระบวนการออกแบบและสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนล.....	29
4.2 การทดสอบการรั่วไหลของไมโครฟลูอิดิกแขนแนล ด้วยน้ำ DI และอนุภาค Fe_3O_4	31
4.3 การนำไมโครฟลูอิดิกไปประยุกต์วัดสนามแม่เหล็กของ อนุภาค Fe_3O_4	33
4.4 การนำไมโครฟลูอิดิกไปประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัด สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ (Fe_3O_4).....	35
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
เอกสารอ้างอิง.....	40
ภาคผนวก.....	41
ภาคผนวก ก.....	42
ภาคผนวก ข.....	44

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทะลุผ่านกับค่าการดูดกลืน.....	13
3.1 แสดงสมบัติพื้นฐานของอนุภาคนาโนแมกนีไทด์ (Fe ₃ O ₄).....	18
4.1 แสดงไมโครฟลูอิดิกเซนแนล.....	29
4.2 แสดงไมโครฟลูอิดิกเซนแนล.....	30
4.3 แสดงผลการทดสอบการรั่วไหลของไมโครฟลูอิดิกเซนแนลด้วยน้ำ DI.....	31
4.4 แสดงผลการทดสอบการรั่วไหลของไมโครฟลูอิดิกเซนแนล ด้วยสารละลายอนุภาค Fe ₃ O ₄	32
4.5 แสดงค่าสนามแม่เหล็กของสารละลายอนุภาค Fe ₃ O ₄ ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	33
4.6 แสดงค่าสนามแม่เหล็กของสารละลายอนุภาค Fe ₃ O ₄ ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	33
4.7 แสดงค่าสนามแม่เหล็กของสารละลายอนุภาค Fe ₃ O ₄ ที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	34

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 ไมโครฟลูอิดิกแซนแนล.....	4
2.2 แสดงลักษณะความดันของของไหล.....	5
2.3 แสดงการหักเหของแสงเมื่อมีตัวกลางบนน้ำ.....	7
2.4 แสดงการสะท้อนของแสง.....	8
2.5 การสะท้อนแบบปกติ.....	8
2.6 การสะท้อนแบบกระจาย.....	9
2.7 กฎการสะท้อนของแสง.....	9
2.8 แสดงการกระจายของแสงขาว.....	10
2.9 แสดงการดูดกลืนแสงและการส่องผ่านคลื่นผ่าน.....	11
2.10 เครื่อง uv-vis spectrophotometer.....	13
2.11 ชิ้นงานที่ออกแบบโดยโปรแกรม Solidworks Simulation.....	14
2.12 เครื่องเลเซอร์ (Laser-cut).....	15
2.13 น้ำยาอะคริลิก (Acrylic Mate).....	15
2.14 ลักษณะอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ (Fe_3O_4).....	16
2.15 เครื่องวัดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
3.1 อนุภาค Fe_3O_4	19
3.2 รูปแสดงการออกแบบไมโครฟลูอิดิกแซนแนล.....	21
3.3 การประกอบติด.....	22
3.4 ระบบการทดสอบการรั่วไหลของไมโครฟลูอิดิก (ก) ภาพจริง (ข) แผนภาพ.....	24
3.5 ระบบการวัดค่าสนามแม่เหล็กของสารอนุภาค Fe_3O_4 (ก) ภาพจริง (ข) แผนภาพ.....	25
3.6 ระบบวัดการดูดกลืนและการส่องผ่านคลื่นแสงของสารละลายที่บรรจุในควิเวทท์ (ก) ภาพจริง (ข) แผนภาพ.....	27
3.7 ระบบวัดการดูดกลืนและการส่องผ่านคลื่นแสงของสารละลายที่ไหล ผ่านไมโครฟลูอิดิก (ก) ภาพจริง (ข) แผนภาพ.....	28
4.1 ไมโครฟลูอิดิกแซนแนล.....	31
4.2 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าการส่องผ่านแสงของสารละลาย ที่บรรจุในควิเวทท์.....	35

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.3 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าการส่องผ่านแสงของสารละลายที่ไหลผ่าน ไมโครฟลูอิดิกแซนแนล.....	36

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีไมโครฟลูอิดิกมีการพัฒนาและจำนวนการใช้เทคโนโลยีได้แพร่ขยายไปอย่างรวดเร็ว ไมโครฟลูอิดิกถือว่าเป็นได้ทั้งวิทยาศาสตร์คือเป็นการศึกษาพฤติกรรมของของเหลวในแขนแนลที่มีขนาดเล็ก และเป็นเทคโนโลยีคือเป็นการผลิตอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆเช่น การใช้ร่วมกับห้องปฏิบัติการบนชิพ (lap on a chip) ไมโครฟลูอิดิกมีการใช้งานทั้งทางด้านเคมี ด้านชีววิทยาและความหลากหลายที่นำมาประยุกต์ใช้ที่มีศักยภาพในวงการแพทย์เช่น การทำพันธุกรรม การตรวจจับไวรัส การแยกแม่เหล็กของสารชีวโมเลกุลหรือการจัดส่งยา อีกทั้งไมโครฟลูอิดิกนั้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากการย่อกระบวนการต่างๆที่ต้องทำในห้องทดลองให้มีขนาดเล็กลง เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง ใช้สารตัวอย่างในปริมาณน้อย มีสภาพไวสูง มีค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดวิเคราะห์ค่อนข้างต่ำ มีขนาดเล็ก สะดวกต่อการพกพาหรือนำไปติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ

หนึ่งในโครงสร้างที่ถูกใช้งานมากที่สุดในเทคโนโลยีไมโครฟลูอิดิกนี้คือ ไมโครฟลูอิดิกแขนแนล ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการไหลของของเหลวหรือสารละลายประเภทต่างๆภายในช่องจะมีขนาดอยู่ในช่วงของไมโครหรือหากจะเปรียบเทียบขนาดก็จะมีขนาดประมาณเส้นผมของคนเราเท่านั้น ซึ่งการสร้างไมโครฟลูอิดิกนั้นสามารถสร้างได้หลายวิธีเช่น การเจาะร่องสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนลลงไปในแผ่นโพลีเมอร์ ซิลิกอน กระจก หรือแผ่นอะคริลิก การสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนลด้วยเทคนิคการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน (Injection Molding) ด้วยวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกเป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้มีต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูงอีกทั้งขั้นตอนในการผลิตยังยุ่งยาก จึงได้มีการพัฒนาการผลิตไมโครฟลูอิดิกแขนแนลที่มีต้นทุนต่ำและขั้นตอนในการผลิตที่ไม่ยุ่งยาก เช่น การสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนลบนกระจกสไลด์ด้วยเทคนิค Buffer Oxide Etching (BOE) การสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนลโดยการปั๊มขึ้นรูปบนวัสดุพอลิเมอร์ที่เรียกว่า Polydimethylsiloxane (PDMS) ซึ่งการสร้างแม่พิมพ์สำหรับขึ้นโครงสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนลแบบ PDMS นั้นนิยมทำ2วิธีได้แก่ การสร้างเป็นแม่พิมพ์ต้นแบบพอลิเมอร์สารไวแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV lithograpy) และการสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบพอลิเมอร์สารไวแสงด้วยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน การสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนลโดยการใช้แผ่นวงจร

อิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Board) การสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนลด้วยฟอยล์ทำโดยการใช้เลเซอร์ตัดเป็นลายแล้วปิดผนึกด้วยฟอยล์ การสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนลบนกระดาษด้วยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) เทคนิค Wax Printing เป็นต้น

และในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้กระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนลแบบต้นทุนต่ำสำหรับการตรวจวัดสมบัติทางแม่เหล็กโดยกระบวนการไมโครแมชชีนนิ่ง ผู้วิจัยเลือกใช้วัสดุอะคริลิกในการสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบเนื่องจากมีราคาถูก อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกที่จัดสร้างจะถูกนำไปทดสอบว่าสามารถตรวจวัด สมบัติความเป็นแม่เหล็กและสมบัติทางแสงของวัสดุ Fe_3O_4 ที่มีความเข้มข้นในช่วง 300-500 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบและสร้างระบบตรวจวัดอนุภาคอนุภาค Fe_3O_4 ที่ไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแขนแนล
- 2) เพื่อศึกษาการวัดค่าสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4
- 3) เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าการส่องผ่านคลื่นแสง (Transmittance) ของอนุภาค Fe_3O_4

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ออกแบบและสร้างระบบตรวจวัดอนุภาค Fe_3O_4 ที่ไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแขนแนล
- 2) ศึกษาการตรวจวัดค่าสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4
- 3) ศึกษาการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงและค่าการส่องผ่านคลื่นแสงของอนุภาค Fe_3O_4

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน

ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาความรู้พื้นฐานของไมโครฟลูอิดิกและระบบการตรวจวัดสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4 และศึกษาระบบการดูดกลืนแสงและการส่องผ่านคลื่นแสง

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบการรั่วไหลของไมโครฟลูอิดิกแขนแนล

ขั้นตอนที่ 3 นำไมโครฟลูอิดิกไปประยุกต์วัดสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4

ขั้นตอนที่ 4 นำไมโครฟลูอิดิกแขนแนลไปประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัดสมบัติทางแสงของอนุภาค Fe_3O_4

กิจกรรม	ระยะเวลา								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
ขั้นตอนที่ 1									
ขั้นตอนที่ 2									
ขั้นตอนที่ 3									
ขั้นตอนที่ 4									

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สร้างองค์ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับไมโครฟลูอิดิกแขนแนลและกระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนล
- 2) สร้างองค์ความรู้ถึงหลักการตรวจวัดสมบัติสนามแม่เหล็กและสมบัติทางแสงผ่านไมโครฟลูอิดิกแขนแนล
- 3) สามารถนำไมโครฟลูอิดิกแขนแนลไปใช้ในงานตรวจวัดการไหลของอนุภาค Fe_3O_4 เพื่อศึกษาสมบัติของสนามแม่เหล็กและพฤติกรรมทางแสง

บทที่ 2

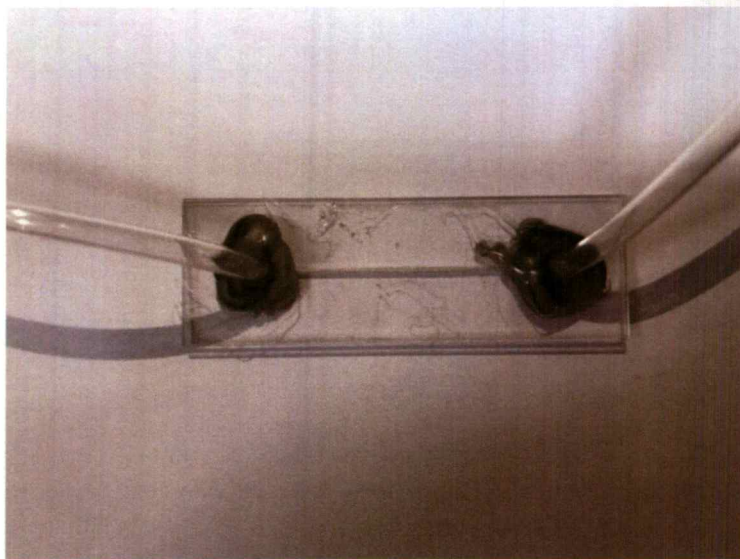
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและจัดสร้างระบบช่องทางไหลจุลภาคเพื่อประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆ และศึกษาการไหลของของเหลวในท่อขนาดเล็ก (Microfluidic)

2.1 ไมโครฟลูอิดิก (Microfluidic)

2.1.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ไมโครฟลูอิดิก นิยามคือ “การศึกษาการไหลของของเหลวหรือแก๊สในระบบจุลภาค” หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ การศึกษาระบบของของไหลในท่อขนาดเล็ก ในท่อที่มีขนาดกว้าง 0.3 มิลลิเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิคการตัดด้วยแสงเลเซอร์โดยสร้างมาจากโปรแกรม SolidWorks Simulation ออกแบบแผ่นอะคริลิก (Acrylic Sheet) เพื่อนำมาประกอบเป็นไมโครฟลูอิดิก ที่พัฒนาขึ้นมาเอง โดยของไหลจะถูกผลักดันให้ไหลไปตามท่อที่สร้างขึ้นนี้ด้วยระบบ Syringe pump ที่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้เอง ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบทางเคมีและชีวภาค เนื่องจากปริมาตรที่ใช้ในการตรวจสอบน้อย และเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง [2]



รูปที่ 2.1 ไมโครฟลูอิดิกแขนแนล

2.1.2 ทฤษฎีฟิสิกส์ของของไหล

1. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของสารเป็นสมบัติเฉพาะของสารแต่ชนิดและเป็นปริมาณที่บอกค่ามวลของสารในหนึ่งหน่วยปริมาตรถ้าให้ (m) เป็นมวลของสารที่มีปริมาตร (V) และ (ρ) เป็นความหนาแน่นของสาร สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า [3]

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

เมื่อ m คือ มวลของสาร หน่วยกิโลกรัม

V คือ ปริมาตร หน่วยลูกบาศก์เมตร

ρ คือ ความหนาแน่นของสาร หน่วยกิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

2. ความดันของของไหล

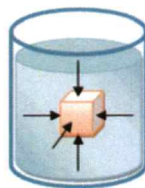
ความดันของของไหล หมายถึง อัตราส่วนของแรงที่กระทำต่อวัตถุต่อหน่วยพื้นที่ที่สัมผัสกับของไหลโดยมีทิศตั้งฉากกับผนังที่ของเหลวสัมผัสเสมอ โดยเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของของเหลว และความลึก [3]

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ของเหลวกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ A

P คือ ความดันที่เกิดจากของเหลวกระทำบนพื้นที่ A มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ ปาสคัล (Pascal : Pa)

A คือ พื้นที่ (ตารางเมตร) และเป็นพื้นที่ราบ (Flat area)



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะความดันของของไหล [3]

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันในหลอดฉีดยา

1. ความลึกของๆเหลว

ถ้าระดับความลึกต่างกัน ของเหลวที่อยู่ระดับลึกกว่า จะมีความดันมากกว่า

2. ความหนาแน่นของๆเหลว

ของเหลวต่างชนิดกันจะมีความดันต่างกัน โดยของเหลวที่มีความหนาแน่นมาก จะมีความดันสูงกว่าของเหลวที่มีความหนาแน่นน้อย

2.2 คุณสมบัติของแสง

แสงมีคุณสมบัติที่สำคัญ 4 อย่างได้แก่

1. แสงเดินทางเป็นเส้นตรง (Rectilinear Propagation)
2. แสงเกิดการหักเห (Refraction)
3. แสงเกิดการสะท้อน (Reflection)
4. แสงเกิดการกระจาย (Dispersion)

2.2.1 การเดินทางเป็นเส้นตรง (Rectilinear Propagation)

การเดินทางแสงเป็นเส้นตรง ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห (Refractive index ;n) ของแสงเท่านั้น แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงโดยค่า n สามารถหาได้จากสมการ

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

เมื่อ n คือ ดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางนั้นๆ

c คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ

v คือ ความเร็วของแสงในตัวกลางนั้นๆ

2.2.2 การหักเห (Refraction)

การหักเหของแสงจะเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหไม่เท่ากัน โดยลำแสงที่ตกกระทบบจะต้องไม่ทำมุมฉากกับรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสอง และมุมตกกระทบบ

ต้องมีค่าไม่เกินมุมวิกฤต (Critical angle) เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง แสงบางส่วนสะท้อนกลับไปในตัวกลางเดิม ส่วนแสงที่เหลือจะหักเหเข้าไปในตัวกลางใหม่



รูปที่ 2.3 แสดงการหักเหของแสง เมื่อมีตัวกลางเป็นน้ำ [3]

ในการหักเหความถี่ของแสงก่อนและหลังการหักเหเท่าเดิมเสมอ แต่แสงจะมีความเร็วลดลงเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลาง ดังนั้นเราจึงเราจึงทราบได้ว่า ความยาวคลื่นจะต้องเปลี่ยนไปเป็นสัดส่วนกับความเร็ว ส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงนั้นส่วนมากแล้วจะเปลี่ยนเมื่อเทียบกับทิศทางเดิม ยกเว้นกรณีเดียวคือ กรณีที่มุมตกกระทบเป็นศูนย์ (คือแสงส่องไปเลยตรงๆ) สมการที่ใช้ในการอธิบายเรื่องการหักเหของแสงคือกฎของสเนลล์ ดังนี้

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \quad (2.4)$$

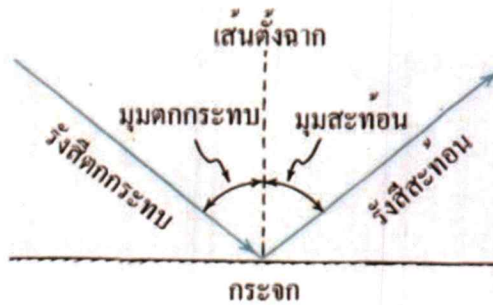
เมื่อ n_1 คือ ดัชนีหักเหของตัวกลาง 1

n_2 คือ ดัชนีหักเหของตัวกลาง 2

θ_1 คือ มุมตกกระทบ

θ_2 คือ มุมหักเห

2.2.2 การสะท้อน (Reflection)



รูปที่ 2.4 แสดงการสะท้อนของแสง [3]

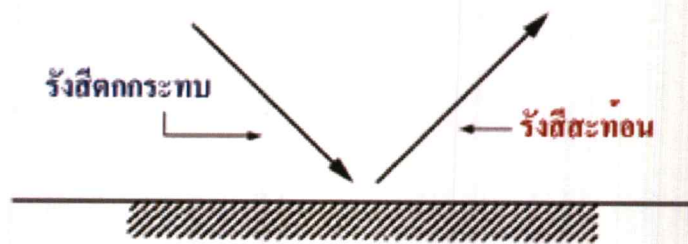
เมื่อแสงเดินทางไปเจอขอบเขตระหว่างตัวกลางสองตัวกลาง แสงบางส่วนสะท้อนกลับ และบางส่วนก็จะเคลื่อนที่ต่อไปบนตัวกลางถัดไป โดยกฎการสะท้อนของแสงดังนี้

1. เส้นปกติ รังสีตกกระทบ และรังสีสะท้อนอยู่ในระนาบเดียวกัน
2. มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน

เส้นปกติคือเส้นที่ลากขึ้นมาตั้งฉากกับผิวการสะท้อนนั่นเอง ส่วนมุมตกกระทบกับมุมสะท้อนนั้น เวลาวัดมุมให้วัดเทียบกับเส้นปกติเท่านั้น

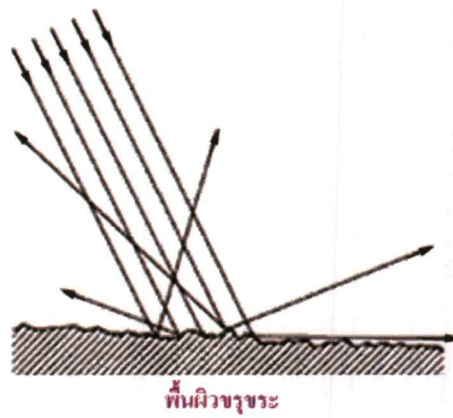
การสะท้อนของแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การสะท้อนแบบปกติ (Regular reflection) จะเกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบกับวัตถุที่มีผิวเรียบมันวาวดังรูปที่ 2.5



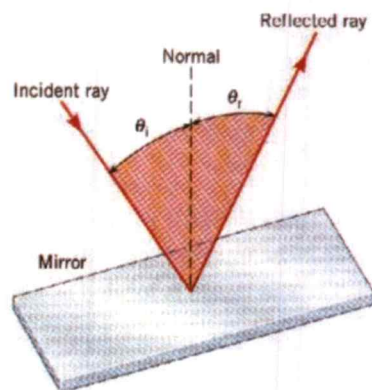
รูปที่ 2.5 การสะท้อนแบบปกติ [3]

2. การสะท้อนแบบกระจาย (Diffuse reflection) จะเกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบบัวตฤที่มีผิวขรุขระ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การสะท้อนแบบกระจาย [3]

โดยการสะท้อนของแสงไม่ว่าจะเป็นแบบใดก็ตามจะต้องเป็นไปตามกฎการสะท้อนของแสงที่ว่า “มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบบ” ซึ่งแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 2.7

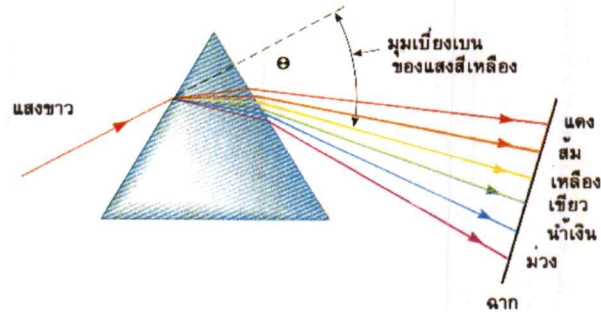


รูปที่ 2.7 กฎการสะท้อนของแสง [3]

2.2.4 การกระจาย

การกระจายแสง หมายถึง แสงขาวซึ่งประกอบด้วยแสงหลายความถี่ตกกระทบบริซิมแล้วทำให้เกิดการหักเหของแสง 2 ครั้ง (ที่ผิวรอยต่อของปริซึม ทั้งขาเข้า และขาออก) ทำให้แสงสีต่างๆ แยกออกจากกันอย่างเป็นระเบียบเรียงตามความยาวคลื่นและความถี่ ที่เราเรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum) รุ้งกินน้ำ เป็นการกระจายของแสง เกิดจากแสงขาวหักเหผ่านผิวของละอองน้ำ ทำให้

แสงสีต่างๆกระจายออกจากกันแล้วเกิดการสะท้อนกลับหมดที่ผิวด้านหลังของละอองน้ำแล้วหักเห ออกสู่อากาศ ทำให้แสงขาวกระจายออกเป็นแสงสีต่างๆกัน แสงจะกระจายตัวออกเมื่อกระทบถูกผิว ของตัวกลาง เราใช้ประโยชน์จากการกระจายตัวของลำแสงเมื่อกระทบตัวกลางนี้



รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายของแสงขาว [3]

จากรูปเมื่อฉากแสงขาวผ่านปริซึมและทำให้แสงขาวนั้นกระจายออกเป็นสีต่างมุมในรูปเรียกว่ามุม เบี่ยงเบนสังเกตได้ว่ามุมของแสงสีแดงจะมีค่าน้อยที่สุด และมุมเบี่ยงเบนของสีม่วงมีค่ามากที่สุด [5]

2.3 คุณสมบัติการดูดกลืนของแสง

2.3.1 การดูดกลืนแสง (Absorption)

ในกรณีที่แสงขาวตกกระทบวัตถุทึบแสง วัตถุนั้นจะดูดกลืนแสงแต่ละสีที่ประกอบเป็น แสงขาวนั้นไว้ในปริมาณต่าง ๆ กัน แสงส่วนที่เหลือจากการดูดกลืนจะสะท้อนกลับเข้าตา ทำให้เรา เห็นวัตถุเป็นสีเดียวกับแสงที่สะท้อนมาเข้าตามากที่สุด ตามปกติวัตถุมีสารที่เรียกว่า สารสีทำหน้าที่ ดูดกลืนแสง วัตถุที่มีสีต่างกันจะมีสารสีต่างกัน การเห็นใบไม้เป็นสีเขียว เป็นเพราะใบไม้มีคลอโรฟิล เป็นสารดูดกลืนแสงสีม่วงและสีแดง แล้วปล่อยแสงสีเขียวและสีใกล้เคียงให้สะท้อนกลับเข้าตามาก ที่สุด ส่วนดอกไม้ที่มีสีแดงเพราะดอกมีสารสีแดงซึ่งดูดกลืนแสงสีม่วง สีน้ำเงิน และสีเขียวส่วนใหญ่ไว้ แล้วปล่อยให้แสงสีแดงปนสีส้มและสีเหลืองให้สะท้อนกลับมาเข้าตามากที่สุด ส่วนสารที่มีสีดำนั้นจะ ดูดกลืนแสงทุกสีที่ตกกระทบทำให้ไม่มีแสงสีใดสะท้อนกลับเข้าสู่ตาเลย เราจึงเห็นวัตถุเป็นสีดำ แต่ สารสีขาวนั้นจะสะท้อนแสงทุกสีที่ตกกระทบ โดยสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.7)

2.4 คุณสมบัติการส่องผ่านของแสง

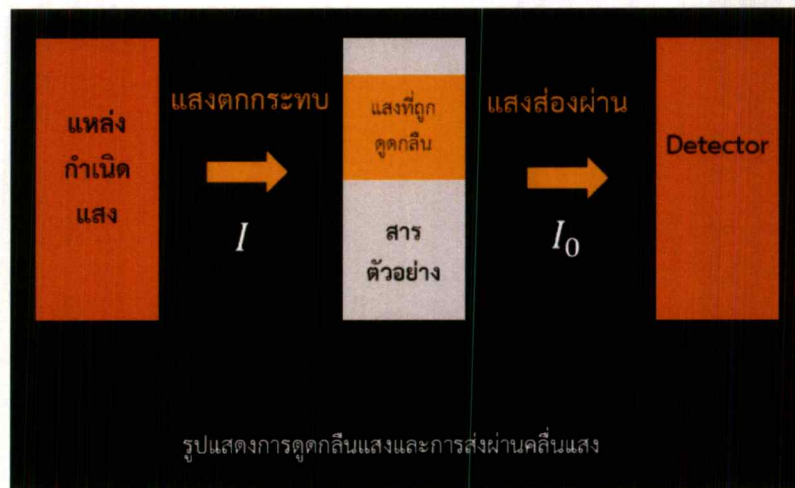
2.4.1 การส่องผ่านของแสง (Transmission)

การทะลุผ่าน หมายถึงการที่แสงพุ่งชนตัวกลางแล้วทะลุผ่านมันออกไปอีกด้านหนึ่ง โดยที่ความถี่ไม่เปลี่ยนแปลงวัตถุที่มีคุณสมบัติการทะลุผ่านได้ เช่น กระจก ผลึกคริสตัล พลาสติกใส น้ำและของเหลวต่าง ๆ โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2.9)

2.5 กฎของแสง

2.5.1 กฎของแสง

เมื่อแสงตกกระทบวัตถุอาจจะเกิดการดูดกลืนแสง การส่องผ่าน การกระจาย การสะท้อนกลับ หรือเกิดการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ แต่กฎของแสงที่นำมาใช้วัดค่าการดูดกลืนแสง ถือว่ามีเฉพาะแสงที่ตกกระทบ (Incident light) แสงที่ดูดกลืน (Absorbed light) และแสงที่ส่องผ่าน (Transmitted light) โดยไม่ได้คำนึงถึงผลของแสงรบกวน (Scattered light) ดังรูปที่ 2.8 [3]



รูปที่ 2.9 แสดงการดูดกลืนแสงและการส่องผ่านคลื่นผ่าน

2.5.2 กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law)

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) (ค.ศ. 1760) กำหนดว่าแสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของตัวกลางที่แสงผ่าน ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ โดยสมการดังนี้

$$I_t = I_0 \times 10^{-kt} \quad (2.5)$$

โดย k คือ เศษส่วนของความหนาในหน่วยเซนติเมตร ที่ทำให้ความเข้มของแสงลดลง จากความเข้มเดิม 10 เท่า ($I_0 = 10I_t$)

2.6.3 กฎของเบียร์ (Beer's law)

ในปี (ค.ศ. 1852) กำหนดว่าแสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของ สารในของเหลว เมื่อคำนวณเช่นเดียวกับกฎของแลมเบิร์ต จะได้สมการคือ

$$I_t = I_0 \times 10^{-ke} \quad (2.6)$$

เมื่อรวมสองกฎทั้งสองเข้าด้วยกัน (Beer-Lambert's law) โดยการบวกสมการที่ (1) และ สมการที่ (2) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$I_t = I_0 \times 10^{-\epsilon ct} \quad (2.7)$$

แต่แสงส่องผ่าน (Transmittance: T) มีค่าเท่ากับ I_t/I_0 และแสงที่ถูกดูดกลืน (Absorbance: A) มีค่าเท่ากับ $\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)$ ดังนั้น

$$A = \epsilon ct = -\log T = 2 - \log \%T \quad (2.8)$$

โดยที่ ϵ คือ Molar Extinction Coefficient ของสารแต่ละชนิด ซึ่งจะมีค่าคงที่ในแต่ละความ ยาวคลื่น

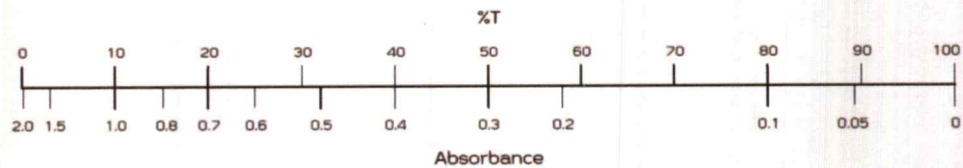
เมื่อ c = ความเข้มข้นในหน่วย โมล/ลิตร

t = ระยะทางที่แสงผ่านมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

$$\%T = I_t/I_0 \times 100 \quad (2.9)$$

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทะลุผ่านกับค่าการดูดกลืน

Transmittance (P/P_0)	%T ($\log P/P_0$)	$\log \%T$	Absorbance ($-\log T$)
1	100	2	0
0.1	10	1	1
0.01	1	0	2
0.001	0.1	-1	3



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืน (Absorbance) กับ ค่าการส่องผ่าน (Transmittance)

2.6 สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy)

2.6.1 หลักการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี

สเปกโตรมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ทัศนศาสตร์สำหรับการวัดคุณสมบัติของแสงในช่วงความยาวคลื่นเฉพาะค่าหนึ่งๆ ของ สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อธิบายอย่างง่าย คือ สเปกโตรมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่แยกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออก ตามความยาวคลื่นต่างๆ เพื่อช่วยให้การวิเคราะห์ศึกษาองค์ประกอบของสเปกตรัมหนึ่งๆ ตัวอย่างของสเปกโตรมิเตอร์อย่างง่าย ที่สุดชนิดหนึ่ง คือ ปริซึม (prism) ซึ่งเราทราบมาแล้วว่าแสงขาว (visible light) ประกอบไปด้วยแสงสีต่างๆ (อย่างน้อยต้อง ประกอบด้วยแสงปฐมภูมิ) ซึ่งในสภาวะปกติ เราไม่สามารถแยกแยะแสงสีทั้งหลายที่รวมกันเป็นสีขาวได้ แต่เมื่อแสงขาวเดินทางผ่านปริซึม แสงสีต่างๆ จะหักเหผ่านปริซึมด้วยมุมที่แตกต่างกัน เราจึงเห็นสีต่างๆ เป็นสีรุ้งนั่นเอง



รูป 2.11 เครื่อง uv-vis spectrophotometer

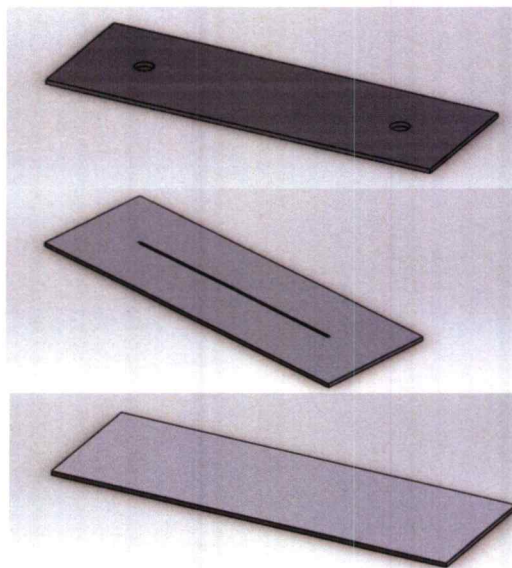
2.7 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก

2.7.1 การออกแบบไมโครฟลูอิดิก

จากการศึกษางานวิจัยอื่นๆ การออกแบบไมโครฟลูอิดิกแขนงนี้มีหลากหลายรูปแบบตามความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน และสามารถสร้างได้หลายวิธีเช่น การเซาะร่องสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนงลงไปในแผ่นโพลีเมอร์ ซิลิกอน กระฉก การสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนงด้วยเทคนิคการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน (Injection molding) ด้วยวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกเป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้ล้วนมีต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูงอีกทั้งขั้นตอนในการผลิตยังยุ่งยาก ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้กระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนงสำหรับการตรวจวัดสมบัติทางแม่เหล็ก แบบต้นทุนต่ำ โดยการทำด้วยเทคนิคการตัดด้วยแสงเลเซอร์ (Laser-cut)

2.7.2 โปรแกรม Solidworks Simulation

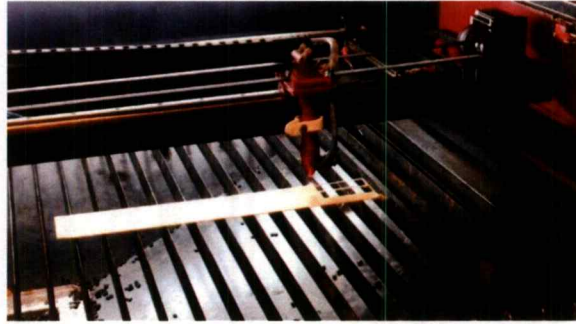
โปรแกรม SolidWorks เป็นโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ สามารถเพิ่มฟังก์ชัน Add-in เพื่อให้มีความสามารถอย่างอื่นนอกเหนือจากการวาดโมเดล 3 มิติ ฟังก์ชัน Simulation เองก็เป็นหนึ่งในฟังก์ชัน Add-in ที่มีอยู่มากมาย



รูปที่ 2.12 ชิ้นงานที่ออกแบบโดยโปรแกรม Solidworks Simulation

2.7.3 เทคนิคการตัดด้วยแสงเลเซอร์ (Laser-cut)

เทคนิคการตัดด้วยแสงเลเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดวัสดุที่มีคุณภาพสูงมากซึ่งมักจะมีความรวดเร็วในการตัด โดยระบบการตัดด้วยเลเซอร์นี้จะใช้ความร้อนผ่านไบบนวัตถุ ทำให้วัตถุบริเวณที่โดนความร้อนจากลำแสงละลายอย่างรวดเร็วและถูกตัดออกมาเป็นชิ้นอย่างละเอียดสวยงาม



รูปที่ 2.13 เครื่องตัดเลเซอร์ (Laser-cut)

2.7.4 น้ำยาประสานอะคริลิก (Acrylic Mate)

น้ำยาที่ได้จากการนำเอาสารเคมีมาผสมกัน จนเกิดเป็นสารที่มีองค์ประกอบใหม่ โดยสามารถนำไปใช้ในการประกอบชิ้นงานการแปรรูปจากแผ่นอะคริลิก ที่ต้องการความประณีตของชิ้นงานให้เกิดความสวยงามเป็นพิเศษ



รูปที่ 2.14 น้ำยาอะคริลิก (Acrylic Mate)

2.8 แม่เหล็กที่จะนำมาใช้ในการวิจัย

2.8.1 อนุภาคเหล็ก

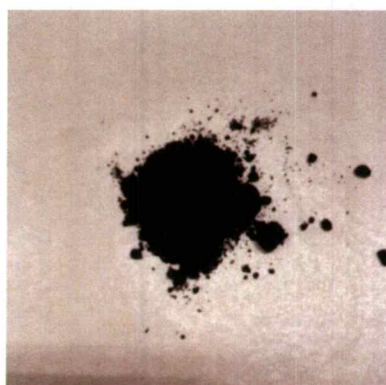
เหล็กพบมากในสินแร่ฮีมาไทต์ (Hematite ; Fe_2O_2) และแมกนีไทต์ (Magnetite ; Fe_3O_4) สามารถแยกออกมาได้โดยการถลุงกับถ่านโค้กจะได้เหล็กบริสุทธิ์ที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาและเป็นสนิมเร็วมาก จึงใช้ทำเป็นโลหะผสม โดยการผสมกับคาร์บอน

2.8.2 สมบัติความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์

สมบัติความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคนาโน (Magnetic Nanoparticles) สมบัติของแม่เหล็กของวัสดุขึ้นอยู่กับโครงสร้างอะตอม สารที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กนั้นเกิดจากการที่อะตอมมีจำนวนอิเล็กตรอนที่มีสปินขึ้น และลงไม่เท่ากันทำให้ค่าโมเมนต์เชิงมุมหรือโมเมนต์แม่เหล็กมีค่าไม่เท่ากับศูนย์

2.8.3 อนุภาคนาโนแมกนีไทต์ (Iron oxide: Fe_3O_4)

แมกนีไทต์จัดเป็นกลุ่มวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กในกลุ่มเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) คือมีทิศทางการสปินของอิเล็กตรอนในโครงสร้างอะตอมแบบตรงแปดหน้าและทรงสี่หน้าตรงข้ามกัน และอนุภาคเฟอร์โรแมกเนติกมีขนาดเล็กมากพอจะทำให้กำแพงโดเมนมีค่าพลังงานไม่มั่นคง ส่งผลให้ทั้งอนุภาคเสมือนเป็นโดเมนแม่เหล็กเดี่ยว



รูปที่ 2.15 ลักษณะอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ (Fe_3O_4)

2.9 เครื่องวัดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Milli Gauss Meter)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดระดับของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายอยู่ในบริเวณที่ทดสอบหรือแพร่กระจายอยู่ในบริเวณรอบๆของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยคลื่นสนามแม่เหล็กนั้นอาจเกิดขึ้นได้จากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าหรือการหมุนรอบตัวของอนุภาคต่างๆ ก็ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก จากนั้นเราสามารถใช้อัตรารับรู้ฮอลล์ (Linear Hall sensor) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ตัวรับรู้ฮอลล์เป็นวงจรรวมที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ซึ่งเป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านในแนวตั้ง เมื่อนำตัวรับรู้ฮอลล์ไปต่อกับโวลต์มิเตอร์ แล้วนำไปวางใกล้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กก็จะทำให้ทราบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ [6][7]



รูปที่ 2.16 เครื่องวัดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือและระบบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยรวมถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยมีเนื้อหาแบ่งออกเป็น 6 หัวข้อหลัก ดังนี้

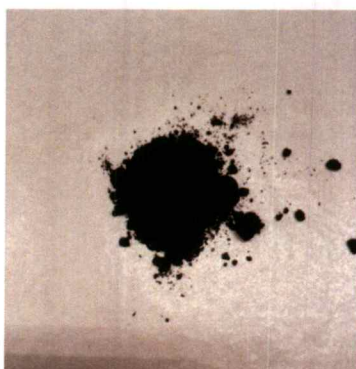
1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
3. กระบวนการออกแบบและสร้างไมโครฟลูอิดิกแซนแนล
4. การทดสอบการรั่วไหลของไมโครฟลูอิดิกแซนแนล ด้วยน้ำ DI และอนุภาค Fe_3O_4
5. การนำไมโครฟลูอิดิกไปประยุกต์วัดสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4
6. การนำไมโครฟลูอิดิกไปประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัดสมบัติทางแสงของอนุภาค Fe_3O_4

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. อนุภาค Fe_3O_4

ตาราง 3.1 แสดงสมบัติพื้นฐานของอนุภาคนาโนแม่เหล็ก

สมบัติ	อนุภาคนาโนแม่เหล็ก
ชื่อทางเคมี	iron(II) iron(III) oxide
สูตรเคมี	Fe_3O_4
มวลโมเลกุล	231.53
ขนาดของอนุภาค (นาโนเมตร)	50-100
ความหนาแน่น (g/mL)	4.8-5.1
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	1538



รูป 3.1 อนุภาค Fe_3O_4

- น้ำปราศจากไอออนหรือน้ำDI (Dionized water) ใช้สำหรับเป็นตัวทำละลายอนุภาค Fe_3O_4

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- ไมโครฟลูอิดิกแชนแนล (Microfluidic channel) ที่สร้างขึ้น
- เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก (Milli-gauss meter) ใช้สำหรับวัดค่าสนามแม่เหล็ก (รุ่น GU-3001 จากบริษัท Lutron) มีช่วงการวัด -3,000 ถึง 3,000 มิลลิเกาส์หรือช่วง - 300.0 ถึง 300.0 ไมโครเทสลา
- เครื่องฉีดยา (Syringe Pump) ใช้สำหรับฉีดยาละลายเข้าไปในไมโครฟลูอิดิกแชนแนล (รุ่น NE-300 จากบริษัท Just Infusion)
- เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (รุ่น AvaSpec-2048 จากบริษัท Avantes StarLine) ทำหน้าที่ในการวัดแสง สามารถวัดแสงได้ในย่านความยาวคลื่น 200-1100 นาโนเมตร
- สายใยแก้วนำแสง ทำหน้าที่นำแสงที่ผ่านสารตัวอย่างเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 200 ไมโครเมตร
- แหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน (Schott Megalight 100) ให้สเปกตรัมแสงในย่านความยาวคลื่น 400-900 นาโนเมตร ใช้แรงดัน 12 โวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 0.9 แอมแปร์
- สายใยแก้วนำแสง ทำหน้าที่นำส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังสารตัวอย่าง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร
- สาย USB สำหรับนำส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์
- เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับประมวลผล โดยติดตั้งโปรแกรม Avasoft 8.1
- เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer GENIE 2) ใช้สำหรับเขย่าสารละลายให้เข้ากัน (รุ่น G560E)

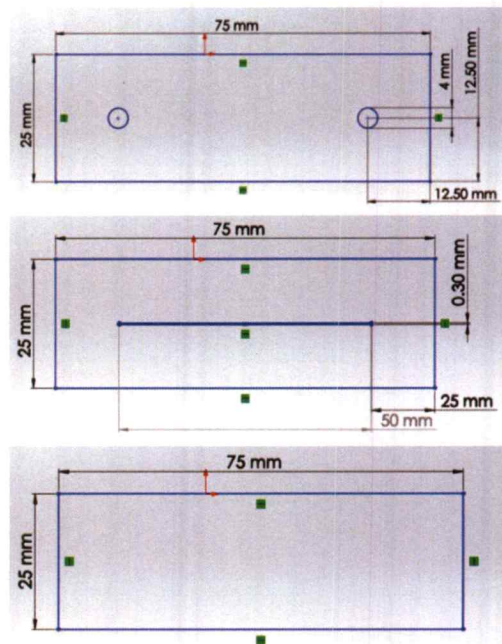
11. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner) ใช้สำหรับเขย่าสารให้โมเลกุลสารแตกตัวได้ดีขึ้น (รุ่น CMT-50 จากบริษัท K.A.)
12. ภาชนะพลาสติก (Plastic cuvette) ใช้สำหรับบรรจุสารละลายในการวัดสเปกตรัมแสง (จากบริษัท Brain)
13. แท่นจับยึดคิวเวตต์ ใช้สำหรับยึดจับคิวเวตต์และต่อกับสายใยแก้วนำแสง
14. แท่นจับยึดอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก ใช้สำหรับยึดจับไมโครฟลูอิดิกแขนแนลและต่อกับสายใยแก้วนำแสง
15. เครื่องชั่งดิจิตอล (รุ่น PA-214 จากบริษัท OHAUS) ใช้สำหรับชั่งสารละลาย
16. เครื่องดูดจ่ายสารละลายหรือไมโครปิเปต (Micro Pipette) ใช้สำหรับดูดสารละลาย (จากบริษัท Nichiryo)
17. ปิเปตทิป (Pipette Tips) ใช้งานร่วมกับไมโครปิเปต (TIP-1100-B จากบริษัท Axygen)
18. กระจกฉีดยา (จากบริษัท Nipro) มีขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร ใช้ร่วมกับเครื่องฉีดยา
19. เข็มฉีดยา (รุ่น 23Gx1" จากบริษัท Nipro) ขนาด 0.6x25 มิลลิเมตร
20. สายน้ำเกลือ (จากบริษัท Terumo) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ใช้ร่วมกับไมโครฟลูอิดิกแขนแนล
21. น้ำยาเชื่อมอะคริลิกไร้คราบ (Acrylic Mate) พู่กัน และปืนกาว สำหรับการประกบติด ซึ่งกล่าวในหัวข้อ 3.3.3
22. ปีกเกอร์ (Beaker) สำหรับบรรจุสารละลาย (จากบริษัท Pyrex)
23. ตัวยึดจับหัวโพรบวัดของเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก
24. ปืนกาว

3.3 กระบวนการออกแบบและสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนล

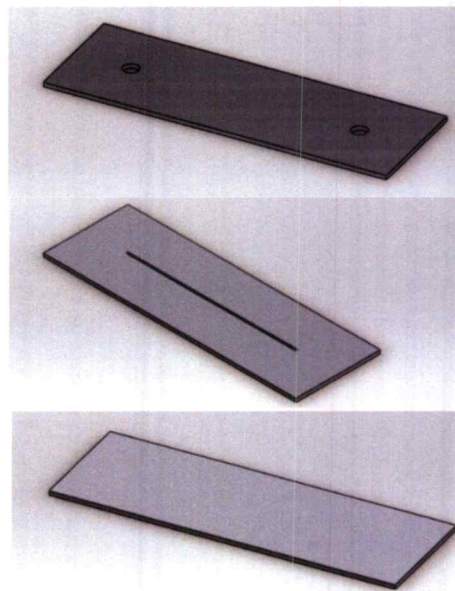
โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกแขนแนลด้วยเทคนิค การตัดด้วยแสงเลเซอร์

3.3.1 กระบวนการออกแบบไมโครฟลูอิดิกแขนแนล

ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบไมโครฟลูอิดิกแขนแนลด้วยโปรแกรม Solidwork Simulation โดยจะแบ่งโครงสร้างของไมโครฟลูอิดิกแขนแนลออกเป็นทั้งหมด 3 ส่วน ดังรูป 3.2



(ก) แสดงขนาดของส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่าง ตามลำดับ



(ข) แสดงส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างแบบ 3 มิติ ตามลำดับ

รูป 3.2 รูปแสดงการออกแบบไมโครฟลูอิดิกแซนแนล

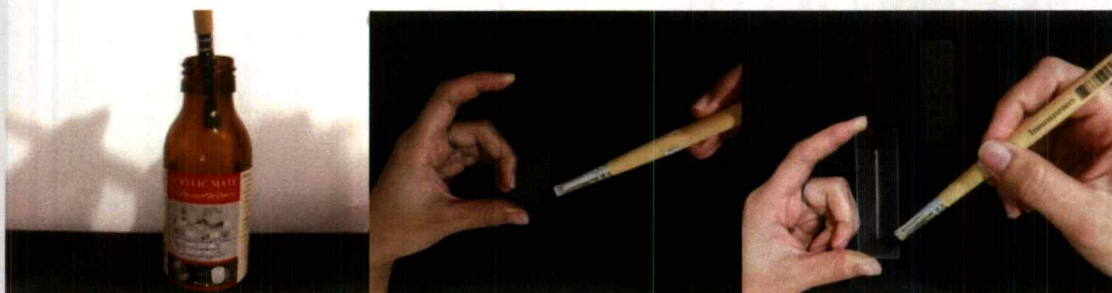
3.3.2 กระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกแซนแนล

กระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกแซนแนลนั้นจะใช้แผ่นอะคริลิก (จากบริษัท Panglas) หนาขนาด 1 มิลลิเมตรทำการตัดและเจาะร่องแผ่นอะคริลิกด้วยกระบวนการตัดด้วยแสงเลเซอร์ที่

ควบคุมการตัดด้วยคอมพิวเตอร์ โดยแสงเลเซอร์มีแหล่งกำเนิดมาจากกระบวนการที่ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซฮีเลียมและก๊าซไนโตรเจน ผ่านเข้าไปในแท่งทรงกระบอกกลวงพร้อมๆกัน ตามด้วยการกระตุ้นอะตอมของก๊าซด้วยพลังงานไฟฟ้า พลังงานจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของลำแสงเลเซอร์ ซึ่งจะมีพลังงานสูง มีช่องความถี่คลื่นแคบและมีความเข้ม แสงเลเซอร์นี้จะถูกส่งไปที่หัวตัด โดยหัวตัดเป็นเลนส์เพื่อบีบลำแสงเลเซอร์ให้เล็กลงให้สามารถฉายลงไปบนวัตถุ ทำให้วัตถุถูกตัดออกมาเป็นชิ้นงานตามที่ต้องการ

3.3.3 การประกบติด (Bonding)

การประกบติด เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกแซนแนล โดยใช้ น้ำยาเชื่อมอะคริลิกทาลงบนแผ่นอะคริลิกที่ได้จากขั้นตอน 3.3.2 ด้วยพู่กัน และวางทิ้งไว้ให้แห้งแล้วทำการต่อท่อ โดยท่อทำมาจากสายน้ำเกลือด้วยปืนกาว



รูป 3.3 การประกบติด

3.4 การทดสอบการรั่วไหลของไมโครฟลูอิดิกแซนแนล ด้วยน้ำ DI และอนุภาค Fe_3O_4

จากที่ได้ทำการออกแบบและสร้างไมโครฟลูอิดิกดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.3 แล้ว จำเป็นต้องมีการทดสอบไมโครฟลูอิดิกแซนแนลเพื่อที่จะได้นำไมโครฟลูอิดิกมาประยุกต์ใช้ทดลองในหัวข้อถัดไป มีวิธีการทดลองดังนี้

3.4.1 การเตรียมอนุภาค Fe_3O_4

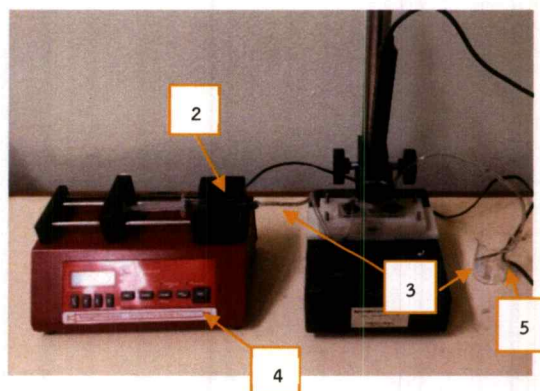
ขั้นตอนการเตรียม

1. นำปิเกตอร์ใส่ในเครื่องชั่งโดยจะมีตัวเลขน้ำหนักของปิเกตอร์ขึ้นมาที่หน้าปัด ให้ทำการกดปุ่ม set zero
2. เมื่อหน้าปัดเครื่องชั่งเป็น 0.0000 ให้ทำการตักสารอนุภาค Fe_3O_4 ใส่ในปิเกตอร์ ชั่งให้ได้ตามปริมาตรที่คำนวณไว้ (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก)

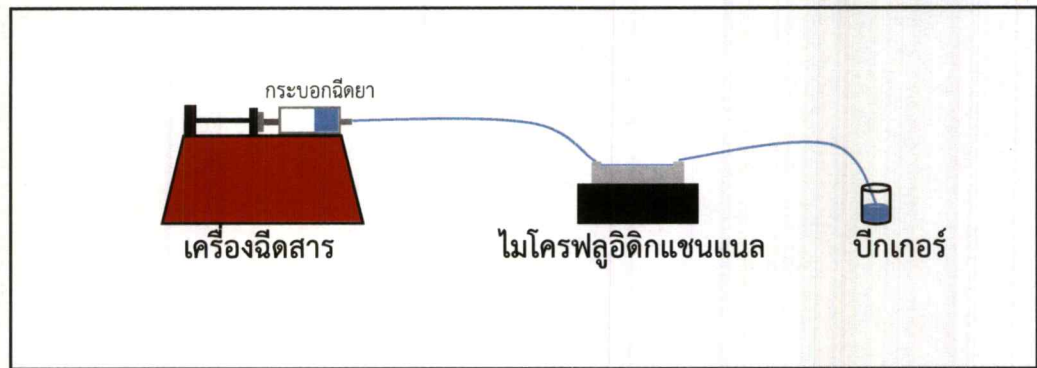
3. เมื่อได้ปริมาตรสารตามที่ต้องการแล้ว ให้นำไมโครปิเปตดูดน้ำ DI ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้
4. ทำการเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อให้สารละลายแตกตัวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
5. ก่อนนำมาทดลองให้นำมาเขย่าที่เครื่องเขย่าสารอีกครั้งจนสารอนุภาค Fe_3O_4 ที่เป็นผงละลายเข้ากับน้ำ DI

3.4.2 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูป 3.4
2. ใช้กระบอกฉีดยาสูดน้ำ DI ขึ้นมา ที่ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปติดตั้งกับเครื่องฉีดยา
3. ทำการต่อไมโครฟลูอิดิกแซนแนล โดยที่ด้านหนึ่งต่อเข้ากับกระบอกฉีดยาและอีกด้านหนึ่งให้นำบีกเกอร์มารอง จัดไมโครฟลูอิดิกแซนแนลให้อยู่ในตำแหน่งที่สมดุล
4. ทำการเปิดเครื่องฉีดยาเพื่อให้สารละลายไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแซนแนล โดยใช้อัตราการไหล 5 มิลลิลิตร/นาที่
5. เมื่อสารละลายไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแซนแนลมาอยู่ในบีกเกอร์แล้วให้ทำการวัดปริมาตร
6. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 2-5 แต่เปลี่ยนปริมาตรน้ำ DI เป็น 10 และ 15 มิลลิลิตรตามลำดับ
7. ให้ทำการเปลี่ยนจากน้ำ DI เป็นอนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 150 200 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ทำการทดลองซ้ำในข้อ 2-5



(ก)



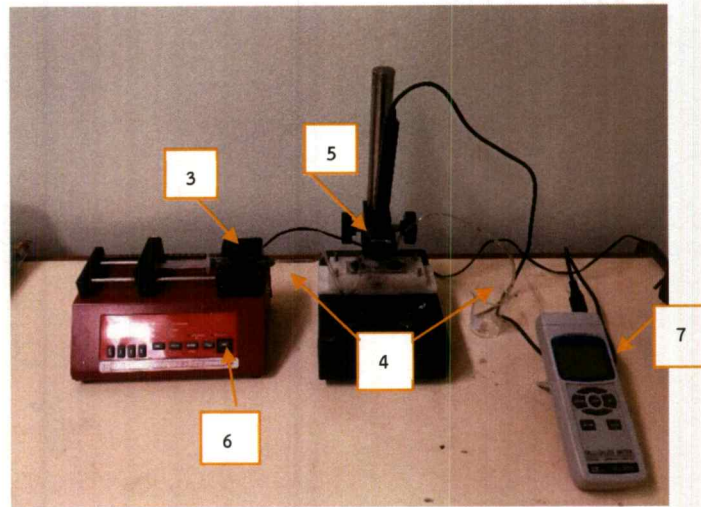
(ข)

รูป 3.4 ระบบการทดสอบการรั่วไหลของไมโครฟลูอิดิก (ก) ภาพจริง (ข) แผนภาพ

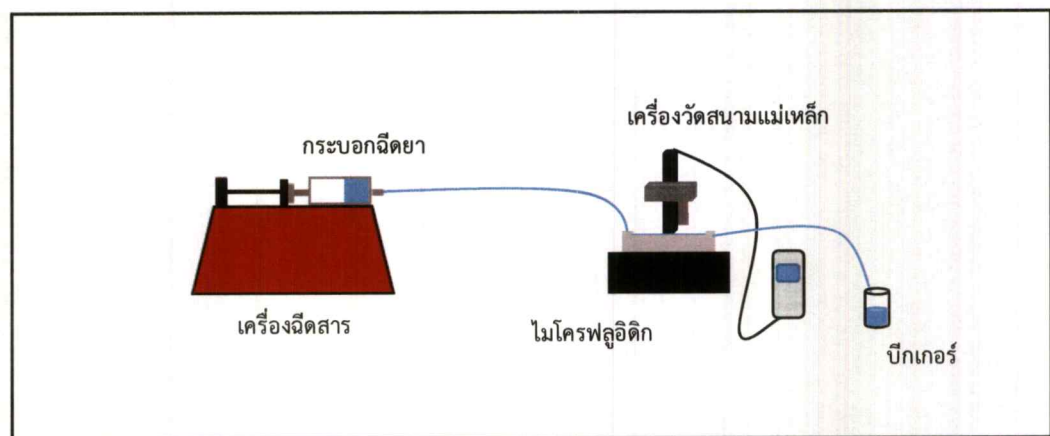
3.5 การนำไมโครฟลูอิดิกไปประยุกต์วัดสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4

จากการทดลองเพื่อศึกษาการวัดค่าสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4 มีวิธีการทดลองดังนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูป 3.5
2. เตรียมอนุภาค Fe_3O_4 ตามหัวข้อ 3.4.1 โดยใช้ปริมาตรสาร Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 150 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ใช้กระบอกฉีดยาสูบสารละลายที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตรจากบีกเกอร์ขึ้นมา จากนั้นนำไปติดตั้งที่เครื่องฉีดสาร
4. ทำการต่อไมโครฟลูอิดิกแซนแนล โดยที่ด้านหนึ่งต่อเข้ากับกระบอกฉีดยาและอีกด้านหนึ่งให้นำบีกเกอร์มารอง จัดไมโครฟลูอิดิกแซนแนลให้อยู่ในตำแหน่งที่สมดุล
5. ทำการจัดตำแหน่งเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก โดยให้หัววัดอยู่ตรงกับตำแหน่งไมโครฟลูอิดิกแซนแนล
6. ทำการเปิดเครื่องฉีดสารเพื่อให้สารละลายไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแซนแนล โดยใช้อัตราการไหล 5 มิลลิลิตร/นาที
7. สังเกตค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้จากเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก แล้วบันทึกผลการทดลอง
8. ทำซ้ำข้อ 2-6 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของอนุภาค Fe_3O_4 เป็น 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูป 3.5 ระบบการวัดค่าสนามแม่เหล็กของสารอนุภาค Fe_3O_4 (ก) ภาพจริง (ข) แผนภาพ

3.6 การนำไมโครพลูติคไปประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัดสมบัติทางแสงของอนุภาค Fe_3O_4

การทดลองนี้จะหาค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าการส่องผ่านคลื่นแสง (Transmittance) ของสารละลายที่บรรจุลงในควเวทท์และสารละลายที่ไหลผ่านไมโครพลูติค แชนแนล

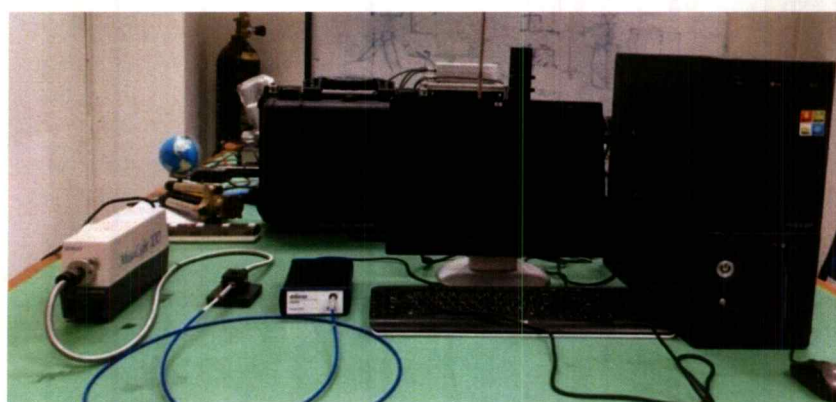
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของอนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยจะมีความเข้มข้นเท่ากับ 300 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. เพื่อศึกษาความสามารถในการส่องผ่านคลื่นแสง (Transmittance) ของอนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยจะมีความเข้มข้นเท่ากับ 300 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

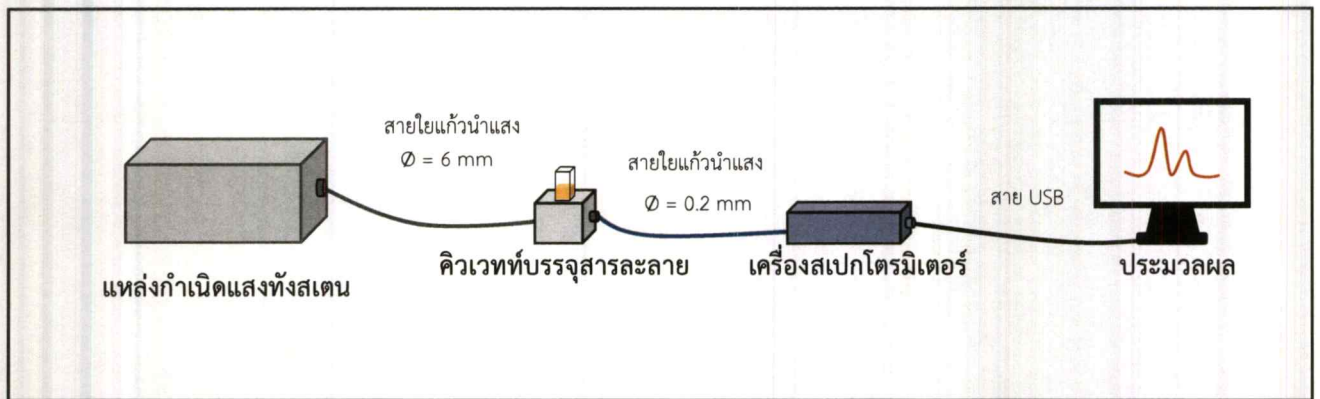
3.6.1 การหาค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าการส่องผ่านคลื่นแสง (Transmittance) ของสารละลายที่บรรจุในคิวเวทท์

วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูป 3.6
2. เตรียมอนุภาค Fe_3O_4 ตามหัวข้อ 3.4.1 โดยใช้ปริมาตรที่ความเข้มข้น 300 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. เปิดโปรแกรม Avasoft 8.1
4. ทำการวัด background ของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์
5. นำคิวเวทท์ที่บรรจุสารละลายวางลงในแท่นจับยึดคิวเวทท์
6. เปิดแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนด์และทำการวัดค่าการดูดกลืนของน้ำ DI เพื่อที่จะใช้เป็นค่าอ้างอิงในการวัดการดูดกลืนของสารละลายจะทำให้ได้ค่าเฉพาะค่าการดูดกลืนของสารละลายเพียงอย่างเดียว
7. ทำการวัดค่าการดูดกลืนของสารละลายและค่าการส่องผ่านคลื่นแสง โดยการวิเคราะห์ผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Avasoft 8.1



(ก)



(ข)

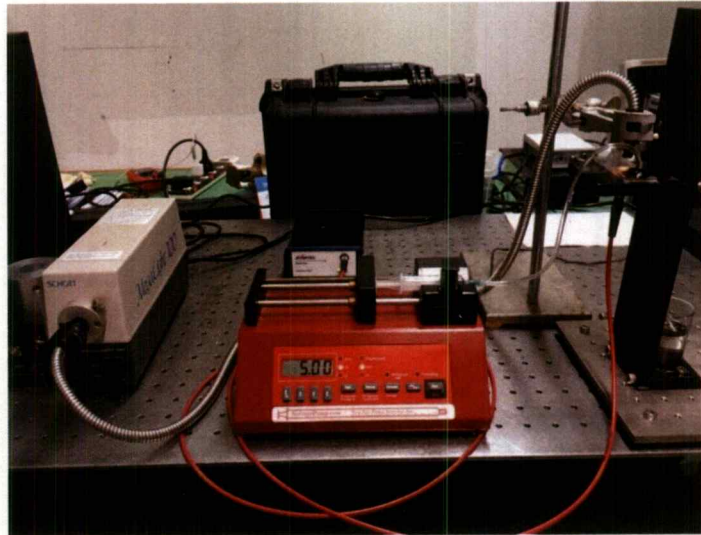
รูป 3.6 ระบบวัดการดูดกลืนและการส่องผ่านคลื่นแสงของสารละลายที่บรรจุในคิวเวทท์

(ก) ภาพจริง (ข) แผนภาพ

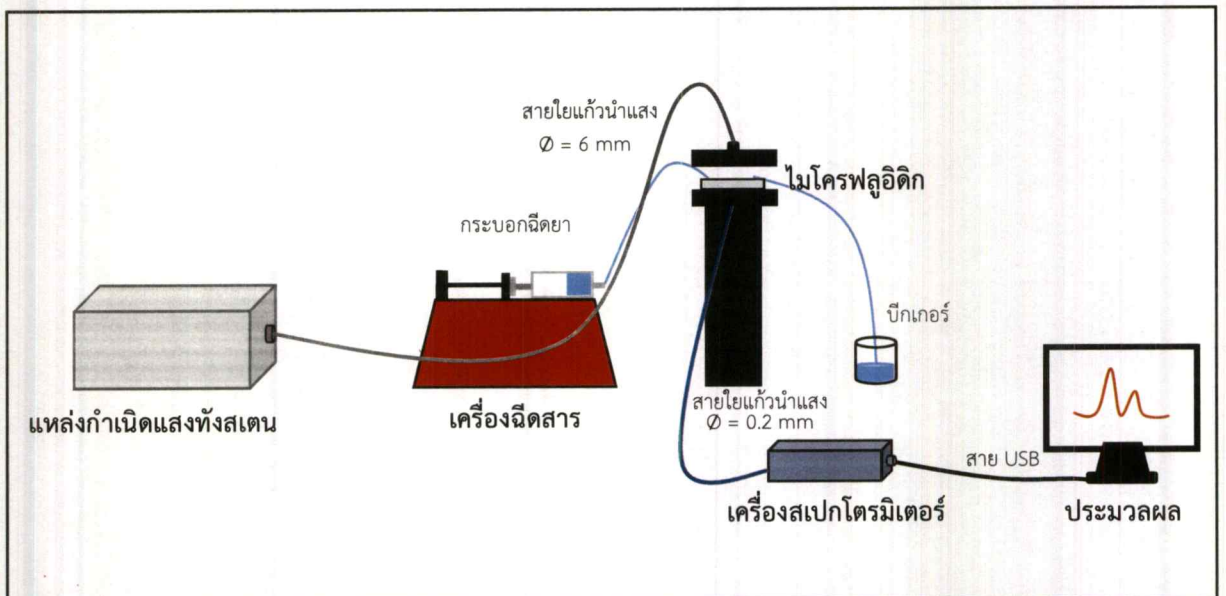
3.6.2 การหาค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าการส่องผ่านคลื่นแสง (Transmittance) ของสารละลายที่ไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแขนแนล

วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูป 3.7
2. เตรียมอนุภาค Fe_3O_4 ตามหัวข้อ 3.4.1 โดยใช้ปริมาตรที่ความเข้มข้น 300 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. เปิดโปรแกรม Avasoft 8.1
4. ทำการวัด background ของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์
5. นำไมโครฟลูอิดิกวางบนแท่นจับยึด จากนั้นเปิดเครื่องฉีดสารเพื่อให้สารละลายจากกระบอกฉีดยาไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกขณะที่ทำการวัดค่า
6. เปิดแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนและทำการวัดค่าการดูดกลืนของน้ำ DI เพื่อที่จะใช้เป็นค่าอ้างอิงในการวัดการดูดกลืนของสารละลายจะทำให้ได้ค่าเฉพาะค่าการดูดกลืนของสารละลายเพียงอย่างเดียว
7. ทำการวัดค่าการดูดกลืนของสารละลายและค่าการส่องผ่านคลื่นแสง โดยการวิเคราะห์ผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Avasoft 8.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 ระบบวัดการดูดกลืนและการส่งผ่านคลื่นแสงของสารละลายที่ไหลผ่านไมโครฟลูอิดิก

(ก) ภาพจริง (ข) แผนภาพ

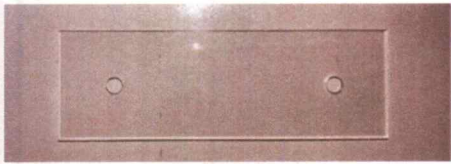
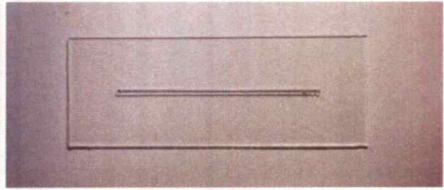
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 กระบวนการออกแบบและสร้างไมโครฟลูอิดิกเซนแนล

จากหัวข้อ 3.3 ที่ได้กล่าวไว้ ทำให้ได้ไมโครฟลูอิดิกเซนแนล ดังนี้

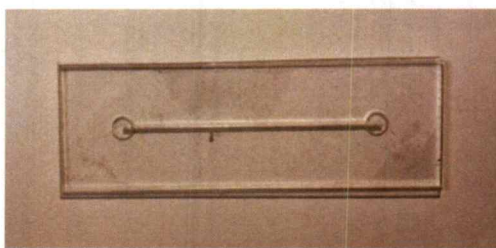
ตารางที่ 4.1 แสดงไมโครฟลูอิดิกเซนแนล

รูปไมโครฟลูอิดิกเซนแนล	ขนาด (มิลลิเมตร)	ผลที่ได้
	กว้าง : 25 ยาว : 75 หนา : 1 เส้นผ่านศูนย์กลาง: 3.5	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรูที่ต่อเข้ากับสายน้ำเกลือเล็กเกินไป
	กว้าง : 25 ยาว : 75 หนา : 1 เซาะร่อง : 0.60	ร่องที่ให้สารละลายไหลผ่านใหญ่เกินไปจากที่ออกแบบไว้

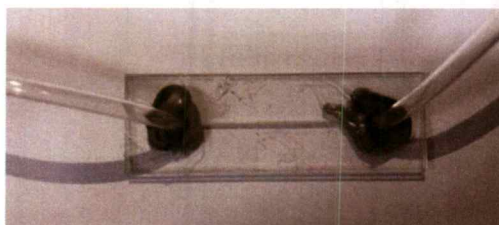
ตารางที่ 4.2 แสดงไมโครฟลูอิดิกแซนแนล

รูปไมโครฟลูอิดิกแซนแนล	ขนาด (มิลลิเมตร)	ผลที่ได้
	กว้าง : 25 ยาว : 75 หนา : 1 เส้นผ่านศูนย์กลาง : 4	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่ต่อเข้ากับสายน้ำเกลือพอดีกับสายน้ำเกลือ
	กว้าง : 25 ยาว : 75 หนา : 1 เซาะร่อง : 0.30	ร่องที่ให้สารละลายไหลผ่านพอดีกับที่ออกแบบไว้
	กว้าง : 25 ยาว : 75 หนา : 1	แผ่นประกบขนาดพอดีกับส่วนบนและส่วนกลาง

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเกิดปัญหาในการออกแบบและการสร้างไมโครฟลูอิดิกแซนแนล โดยข้อผิดพลาดที่พบเกิดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่ต่อเข้ากับสายน้ำเกลือเล็กเกินไปเนื่องจากสายน้ำเกลือที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มิลลิเมตร และเทคนิคการตัดด้วยเลเซอร์นี้ จะเป็นการกวาดหัวตัดเลเซอร์ไปและกลับ เพื่อตัดให้ร่องของแผ่นอะคริลิกทะลุ ซึ่งเลเซอร์ได้กวาดด้านข้างของร่องไปด้วย ทำให้ร่องมีขนาดใหญ่กว่าที่ออกแบบไว้ จากปัญหาข้างต้นทำให้ผู้วิจัยได้แก้ไขการออกแบบและการสร้างไมโครฟลูอิดิกแซนแนลชิ้นใหม่ ทำให้ได้ไมโครฟลูอิดิกแซนแนลตามตารางที่ 4.2 และนำไมโครฟลูอิดิกแซนแนลที่ได้มาทำการประกบติดด้วยวิธีที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.3 จะได้ดังรูป 4.1



(ก) ไมโครฟลูอิดิกเซนแนลที่ประกบติดแล้ว



(ข) ไมโครฟลูอิดิกที่ประกบติดแล้วพร้อมต่อสายน้ำเกลือ

รูปที่ 4.1 ไมโครฟลูอิดิก

4.2 การทดสอบการรั่วไหลของไมโครฟลูอิดิกเซนแนล ด้วยน้ำ DI และอนุภาค Fe_3O_4

จากการทดลองที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4 ได้ผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบการรั่วไหลของไมโครฟลูอิดิกเซนแนล ด้วยน้ำ DI

ปริมาตรของน้ำ DI ก่อน ไหลผ่านเซนแนล (มิลลิลิตร)	ปริมาตรของน้ำ DI หลังไหลผ่านเซนแนล (มิลลิลิตร)			ค่าเฉลี่ย ปริมาตรของน้ำ DI	ค่าเปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
5	5	5	5	5	0
10	10	9.90	10	9.97	0.3
15	14.80	15	15	14.93	0.47

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบการรั่วไหลของไมโครฟลูอิดิกแซนแนล ด้วยอนุภาค Fe_3O_4

ความเข้มข้นของ สารละลายที่ไหล ผ่านแซนแนล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณของ สารละลาย ก่อนไหลผ่าน แซนแนล (มิลลิลิตร)	ปริมาณของสารละลาย หลังไหลผ่านแซนแนล (มิลลิลิตร)			ค่าเฉลี่ย ปริมาณ ของ สารละลาย	ค่า เปอร์เซ็นต์ความ คลาดเคลื่อน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
150	10	10	10	10	10	0
200	10	10	10	9.9	9.97	0.3
250	10	10	9.8	10	9.93	0.7
300	10	10	10	10	10	0

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 การทดสอบปริมาณของน้ำ DI และสารละลายอนุภาค Fe_3O_4 ก่อนและหลังผ่านแซนแนล พบว่า ปริมาณที่ 5 10 และ 15 มิลลิลิตรของน้ำ DI เมื่อทำการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0 0.3 และ 0.47 ตามลำดับ และเมื่อเปลี่ยนจากน้ำ DI มาเป็นอนุภาค Fe_3O_4 ปริมาณ 10 มิลลิลิตรที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า ที่ความเข้มข้น 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อทำการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเท่ากับ 0 ที่ความเข้มข้น 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้นเมื่อทำการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.3 และ 0.7 ตามลำดับ โดยวิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแสดงในภาคผนวก

4.3 การนำไมโครฟลูอิดิกไปประยุกต์วัดสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4

จากการทดลองที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.5 ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง	ค่าสนามแม่เหล็กก่อนสารละลายไหลผ่านเซนแนล (มิลลิเกาส์)	ค่าสนามแม่เหล็กเมื่อสารละลายไหลผ่านเซนแนล (มิลลิเกาส์)
1	182.4	183.3
2	182.6	184.1
3	182.7	184.3
4	178.8	180.2
5	178.8	180.1
ค่าเฉลี่ย	181.06	182.4

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง	ค่าสนามแม่เหล็กก่อนสารละลายไหลผ่านเซนแนล (มิลลิเกาส์)	ค่าสนามแม่เหล็กเมื่อสารละลายไหลผ่านเซนแนล (มิลลิเกาส์)
1	193.30	195.10
2	194.40	196.10
3	194.80	196.80
4	195.20	197.80
5	196.40	198.70
ค่าเฉลี่ย	196.82	196.90

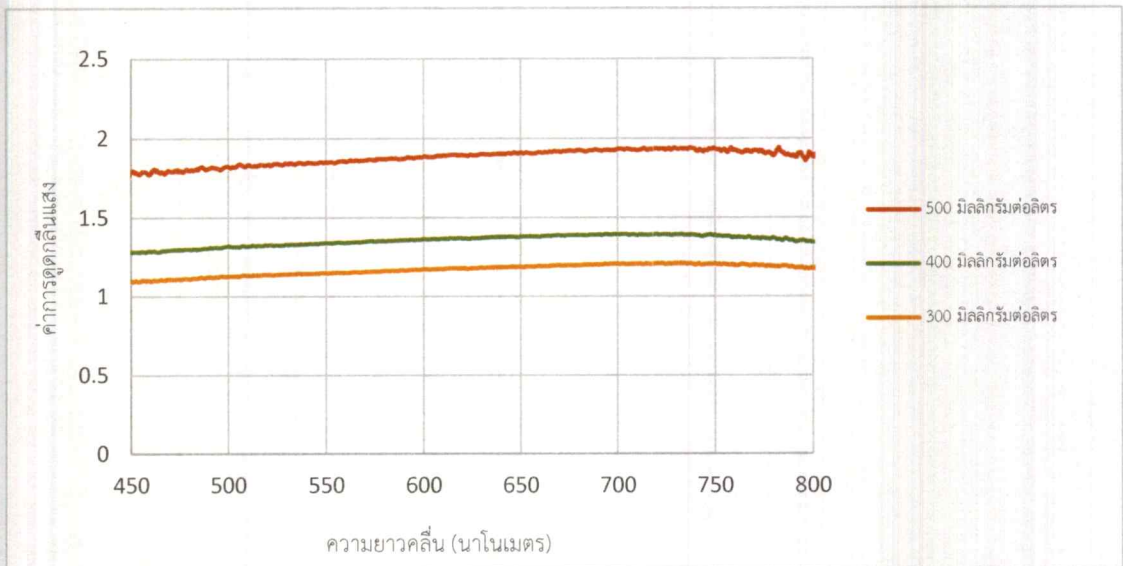
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง	ค่าสนามแม่เหล็กก่อนสารละลายไหลผ่านเซนแนล (มิลลิเกาส์)	ค่าสนามแม่เหล็กเมื่อสารละลายไหลผ่านเซนแนล (มิลลิเกาส์)
1	193.60	195.30
2	194.20	196.10
3	194.30	195.40
4	194.40	195.60
5	194.60	195.30
ค่าเฉลี่ย	194.22	195.54

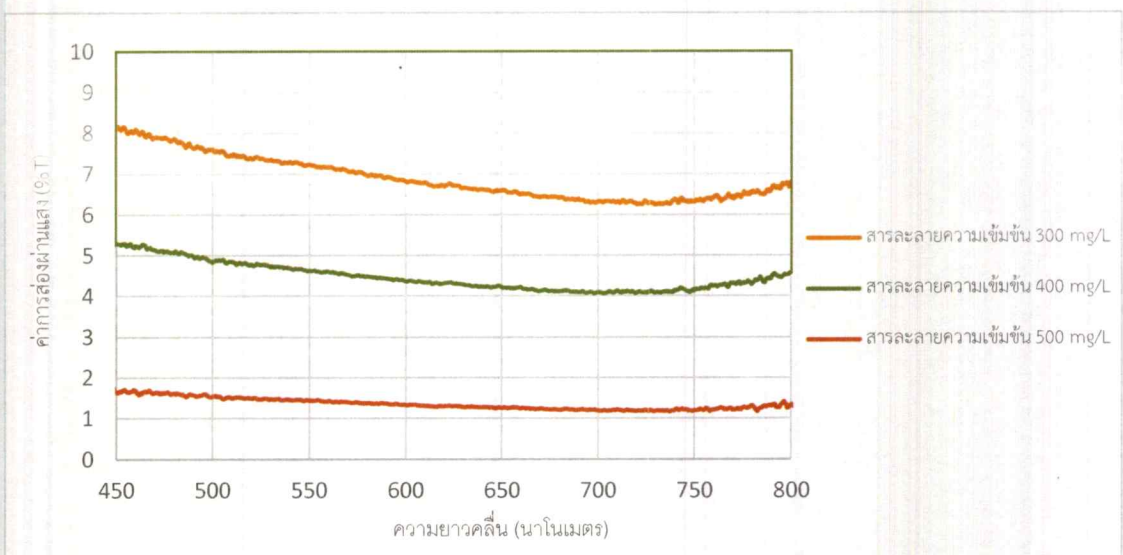
จากตาราง 4.5-4.7 พบว่าค่าสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 150 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 0.74 0.04 และ 0.68 ตามลำดับ โดยวิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างแสดงในภาคผนวก ทั้งนี้ค่าสนามแม่เหล็กไม่สามารถตรวจวัดได้ในความเข้มข้นดังกล่าวเนื่องจากมีข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด โดยเครื่องมือนี้จะสามารถตรวจวัดได้ในช่วงต่ำสุดคือ 0.1 มิลลิเกาส์

4.4 การนำไมโครฟลูอิดิกไปประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัดสมบัติทางแสงของอนุภาค Fe_3O_4

จากการทดลองที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.6 ได้ผลการทดลอง ดังนี้

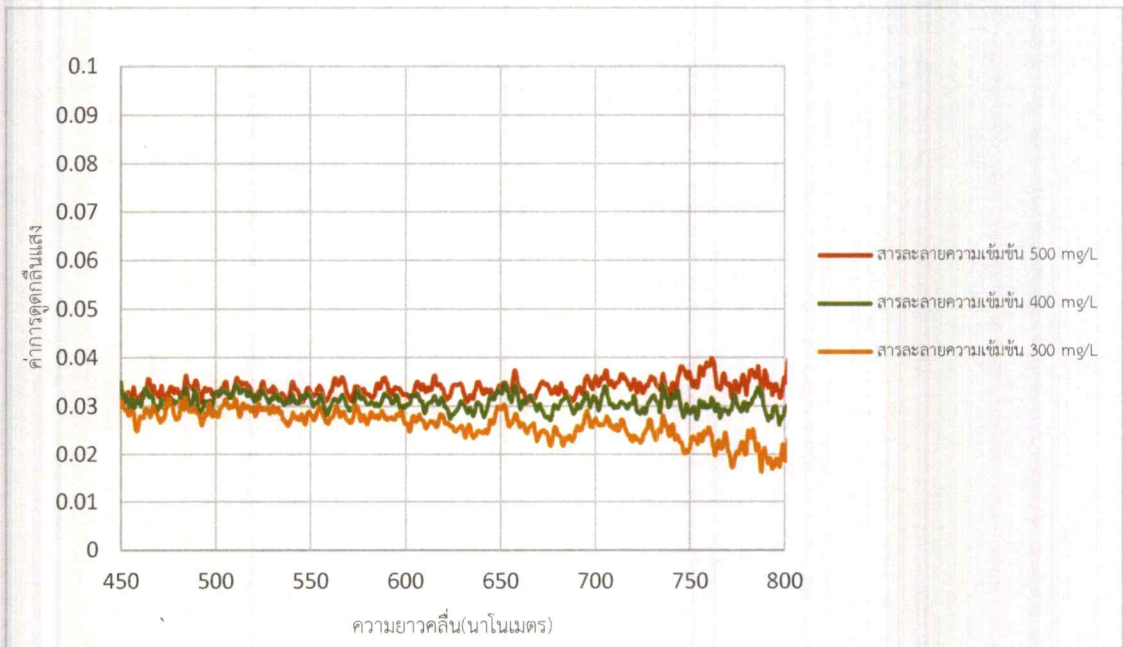


(ก) กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่บรรจุในควิเวทท์

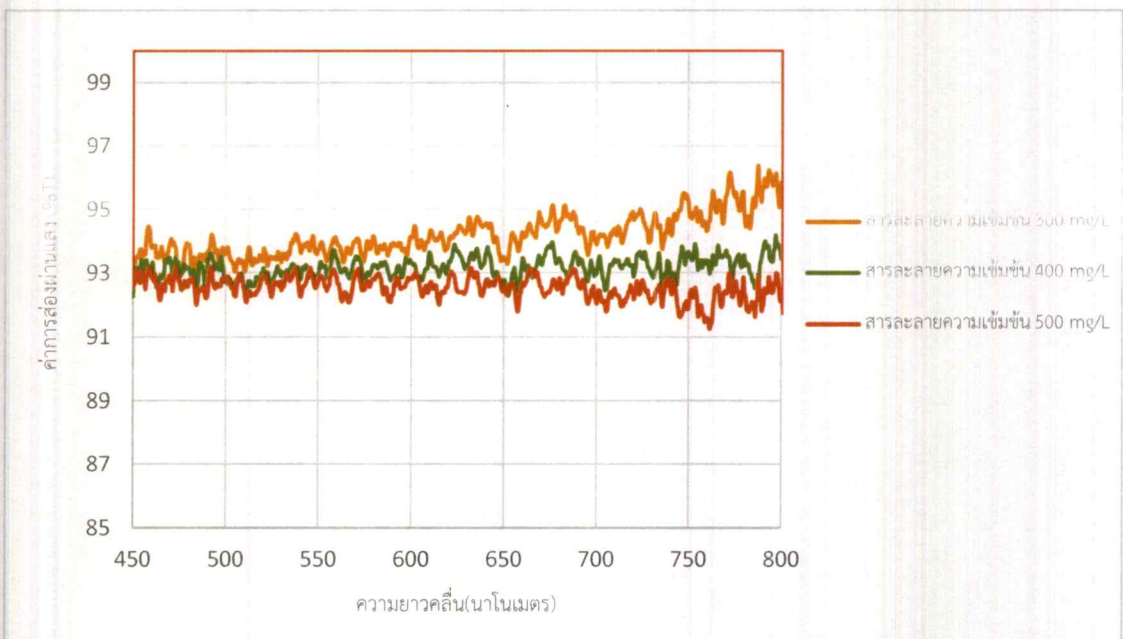


(ข) กราฟแสดงค่าการส่องผ่านแสงของสารละลายที่บรรจุในควิเวทท์

รูป 4.2 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าการส่องผ่านแสงของสารละลายที่บรรจุในควิเวทท์



(ก) กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแซนแนล



(ข) กราฟแสดงค่าการส่องผ่านแสงของสารละลายที่ไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแซนแนล

รูป 4.3 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าการส่องผ่านแสงของสารละลายที่ไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแซนแนล

จากรูปที่ 4.2 – 4.3 เป็นกราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงและค่าการส่องผ่านแสงของอนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 300 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับสารละลายที่บรรจุในควิเวทในช่วงความยาวคลื่น 450 – 800 นาโนเมตร พบว่าการตรวจวัดด้วยวิธีให้สารละลายไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกเซนแนลสามารถให้ผลของสเปกตรัมที่ถูกต้องกว่าการตรวจวัดแสงผ่านสารละลายที่บรรจุในควิเวท เนื่องจากจะไม่พบปัญหาของการทึบแสงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากซึ่งทำให้เกิดกลไกการดูดกลืนซ้ำของสารละลายตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากกระบวนการออกแบบและสร้างไมโครฟลูอิดิกแซนแนลด้วยแผ่นอะคริลิก โดยอาศัยเทคนิคการตัดด้วยแสงเลเซอร์ พบว่าเป็นกระบวนการสร้างที่รวดเร็วและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ ในที่นี้สร้างไมโครฟลูอิดิกแซนแนลที่มีขนาด 0.3 มิลลิเมตร เมื่อนำไมโครฟลูอิดิกแซนแนลมาทดสอบวัดสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 150 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าค่าสนามแม่เหล็กไม่สามารถตรวจวัดได้ในความเข้มข้นดังกล่าวเนื่องจากมีข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด โดยเครื่องมือนี้จะสามารถตรวจวัดได้ในช่วงต่ำสุดคือ 0.1 มิลลิเกาส์ อีกทั้งสมบัติความเป็นแม่เหล็กกลายเป็น superparamagnetic ทำให้อนุภาคแม่เหล็กเกิดโมเมนต์แม่เหล็กที่หักล้างกันทำให้ภาพรวมสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสารละลายในที่นี้มีค่าน้อยและไม่สามารถวัดค่าได้ ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้วัดอนุภาค Fe_3O_4

และสุดท้ายการนำไมโครฟลูอิดิกแซนแนลไปประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัดสมบัติทางแสงของอนุภาค Fe_3O_4 เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดกลืนแสงและการส่งผ่านแสงที่ความเข้มข้น 300 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับสารละลายที่บรรจุในควเวท ช่วงความยาวคลื่น 450 – 800 นาโนเมตร พบว่าการตรวจวัดด้วยวิธีให้สารละลายไหลผ่านไมโครฟลูอิดิกแซนแนลสามารถให้ผลของสเปกตรัมที่ถูกต้องกว่าการตรวจวัดแสงผ่านสารละลายที่บรรจุในควเวท เนื่องจากจะไม่พบปัญหาของการทึบแสงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากซึ่งทำให้เกิดกลไกการดูดกลืนซ้ำของสารละลาย ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พบข้อผิดพลาดในการทดลองหลายประการ เช่น อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกที่สร้างขึ้นนั้นไม่สามารถนำมาทดลองซ้ำได้เนื่องจากสารละลายค้างอยู่ภายในแขนแนล การวัดค่าสนามแม่เหล็กในการทดลองวัดสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4 แทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง การนำไมโครฟลูอิดิกไปประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัดสมบัติทางแสงของอนุภาค Fe_3O_4 เมื่อวัดค่าออกมาแล้วไม่สามารถเห็นพิกัดได้อย่างชัดเจน

สำหรับงานวิจัยที่จะดำเนินต่อไปในอนาคตคือ การออกแบบไมโครฟลูอิดิกแขนแนลอาจจำเป็นต้องเปลี่ยนวัสดุจากแผ่นอะคริลิกมาเป็นวัสดุพอลิไดเมทิลไซโลเซน (PDMS) เปลี่ยนจากสายน้ำเกลือเป็นสายซิลิโคนและการนำไมโครฟลูอิดิกมาประยุกต์วัดสนามแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4 นั้นควรจะใช้สนามแม่เหล็กแล้ววัดเป็นค่า magnetization ออกมา ส่วนตัวทำละลายจากการวิจัยนี้ใช้แค่ DI อาจจะต้องเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นอย่างอื่นเช่น เอทานอล เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์, 2555. เครื่องวัดการดูดกลืนของแสง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://home.kku.ac.th/chuare/12/spectrophotometer.pdf>. (วันที่ค้นข้อมูล : 21 กุมภาพันธ์ 2562).
- [2] ดร.นิธิพนธ์ พุทธรักษา, 2559. ไมโครฟลูอิดิกส์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://the-center.org/src2/views/industrial.php?article_id=15. (วันที่ค้นข้อมูล : 12 ธันวาคม 2561).
- [3] ผศ.ปรียา อนุพงษ์อ้อจาง, 2562. กฎการสะท้อนของแสง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_4.htm. (วันที่ค้นข้อมูล : 21 กุมภาพันธ์ 2562).
- [4] วีทิต วรรณเลิศลักษณ์, 2560. ความรู้เกี่ยวกับของไหล. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7268-fluid>. (วันที่ค้นข้อมูล : 12 ธันวาคม 2561).
- [5] Anuwat Janmano, 2560. คุณสมบัติของแสง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7312-2017-06-14-15-39-08>. (วันที่ค้นข้อมูล : 21 กุมภาพันธ์ 2562).
- [6] Fan Liu, Pawan KC, Ge Zhang and Jiang Zhe. "Microfluidic Magnetic Bead Assay for Cell Detection". *Department of Mechanical Engineering, University of Akron, Akron, Ohio 44325, United States*. (2015) : 711-717. (วันที่ค้นข้อมูล : 12 ธันวาคม 2561).
- [7] Piyawhatm02, 2014. เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://classesphysics.wordpress.com/2014/03/28/เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก/>. (วันที่ค้นข้อมูล : 21 กุมภาพันธ์ 2562).
- [8] Waan's, 2017. เครื่องวัดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://wannachat.name/article/gauss-tesla-meter/>. (วันที่ค้นข้อมูล : 21 กุมภาพันธ์ 2562).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ในหมวดของภาคผนวก ก จะกล่าวถึงรายละเอียดการคำนวณในงานวิจัย

รายละเอียดการคำนวณในงานวิจัย

ก.1 การเตรียมสารในงานวิจัย

เนื่องจากการทดลองใช้ออนุภาค Fe_3O_4 ผสมน้ำ DI ที่ความเข้มข้น 300 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยสามารถคำนวณได้ด้วยการเทียบบัญญัติไตรยางค์ ดังนี้

ก.1.1 วิธีคำนวณปริมาตรอนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

ดังนั้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร = 0.003 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร

เพราะฉะนั้นปริมาตรอนุภาค Fe_3O_4 ที่ต้องการซึ่งเท่ากับ 0.003 กรัม ผสมน้ำ DI 10 มิลลิลิตร จะได้อนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

ก.1.2 วิธีคำนวณปริมาตรอนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

ดังนั้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร = 0.004 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร

เพราะฉะนั้นปริมาตรอนุภาค Fe_3O_4 ที่ต้องการซึ่งเท่ากับ 0.004 กรัม ผสมน้ำ DI 10 มิลลิลิตร จะได้อนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ก.1.3 วิธีคำนวณปริมาตรอนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

ดังนั้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร = 0.005 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร

เพราะฉะนั้นปริมาตรอนุภาค Fe_3O_4 ที่ต้องการซึ่งเท่ากับ 0.005 กรัม ผสมน้ำ DI 10 มิลลิลิตร จะได้อนุภาค Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

ก.2 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน

ก.2.1 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Percentage error)

ความคลาดเคลื่อนของการทดลองอาจเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับกันหรือค่าที่แสดงไว้ในตารางโดยทั่วไป ซึ่งหาได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{(\text{ค่าที่ยอมรับ} - \text{ค่าที่ได้จากการทดลอง})}{\text{ค่าที่ยอมรับ}} \times 100\%$$

ก.2.2 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percentage Difference)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง} = \frac{2 |x_1 - x_2|}{x_1 + x_2} \times 100\%$$

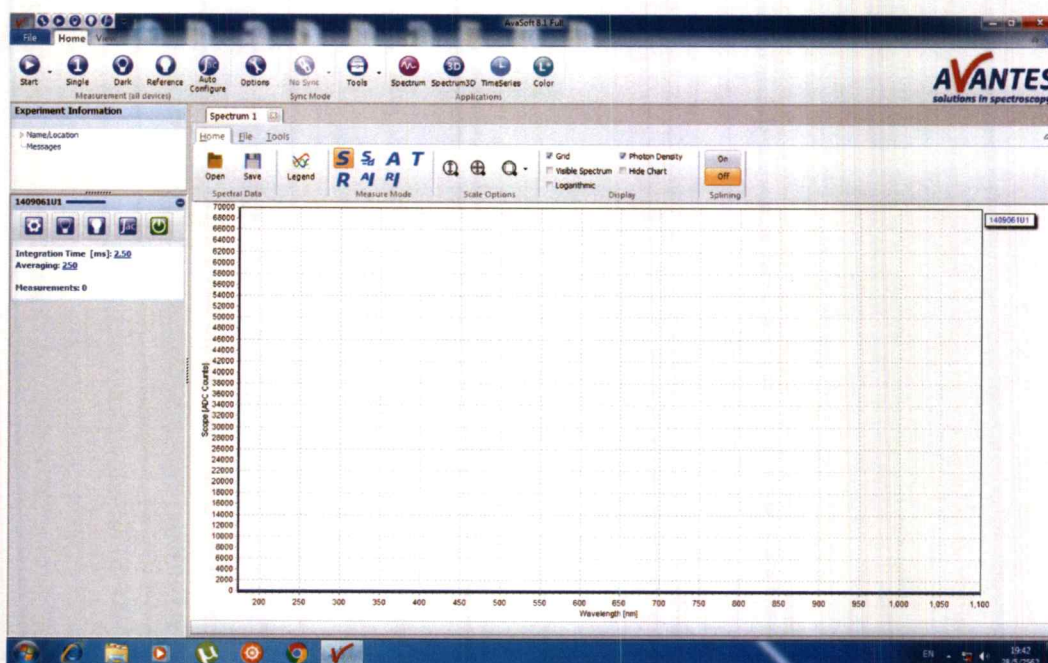
ภาคผนวก ข

ในหมวดของภาคผนวก ข จะกล่าวถึงการใช้โปรแกรม AvaSoft 8.2

การใช้โปรแกรม AvaSoft 8.2

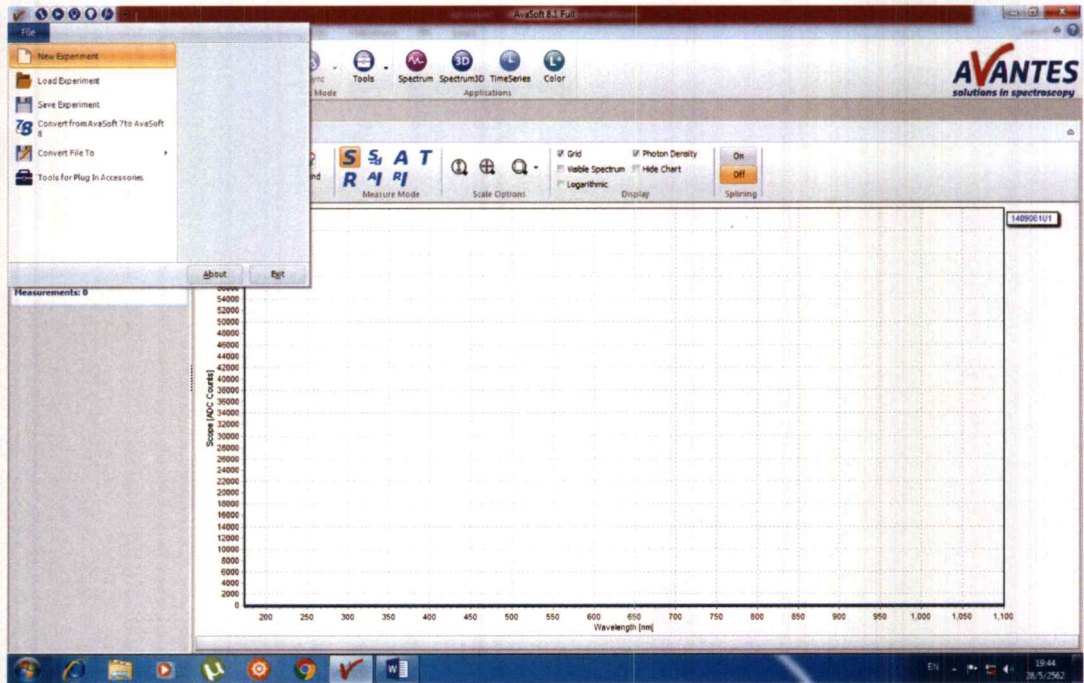
ข.1 วิธีการใช้โปรแกรม AvaSoft 8.2

ขั้นตอนที่ 1 เปิดโปรแกรม AvaSoft 8.2 ดังรูป ข.1



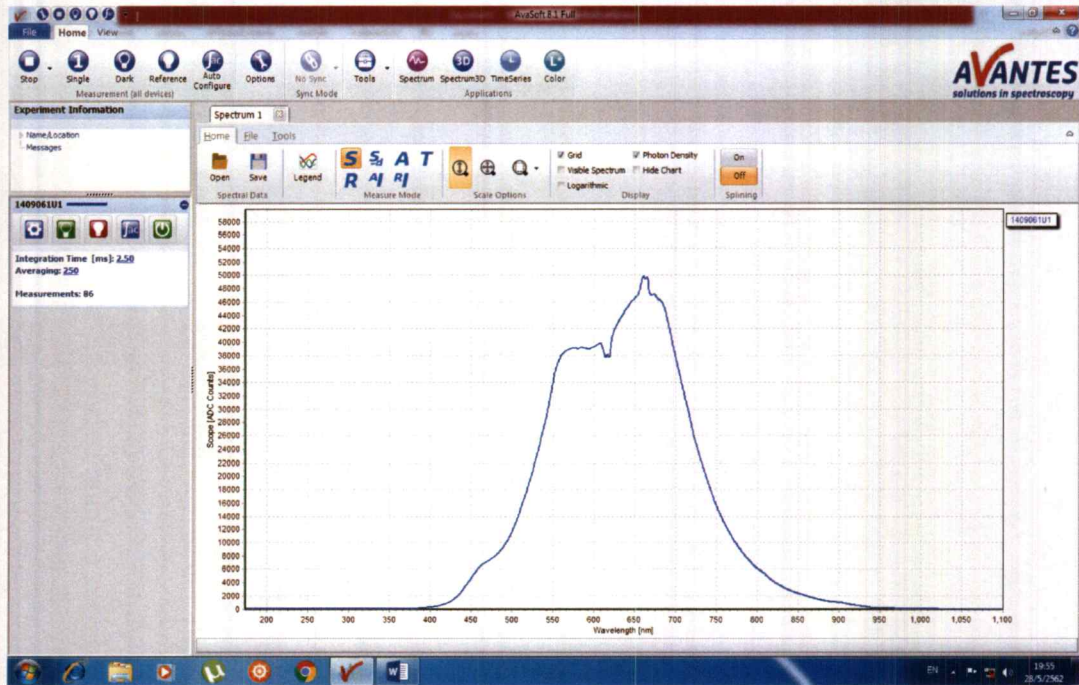
รูปที่ ข.1 แสดงหน้าโปรแกรม AvaSoft 8.2

ขั้นตอนที่ 2 ไปที่ File แล้วกด New Experiment แล้วเลือก Folder ที่ต้องการ
บันทึกงาน ตั้งชื่อ file แล้วกด save ดังรูป ข.2



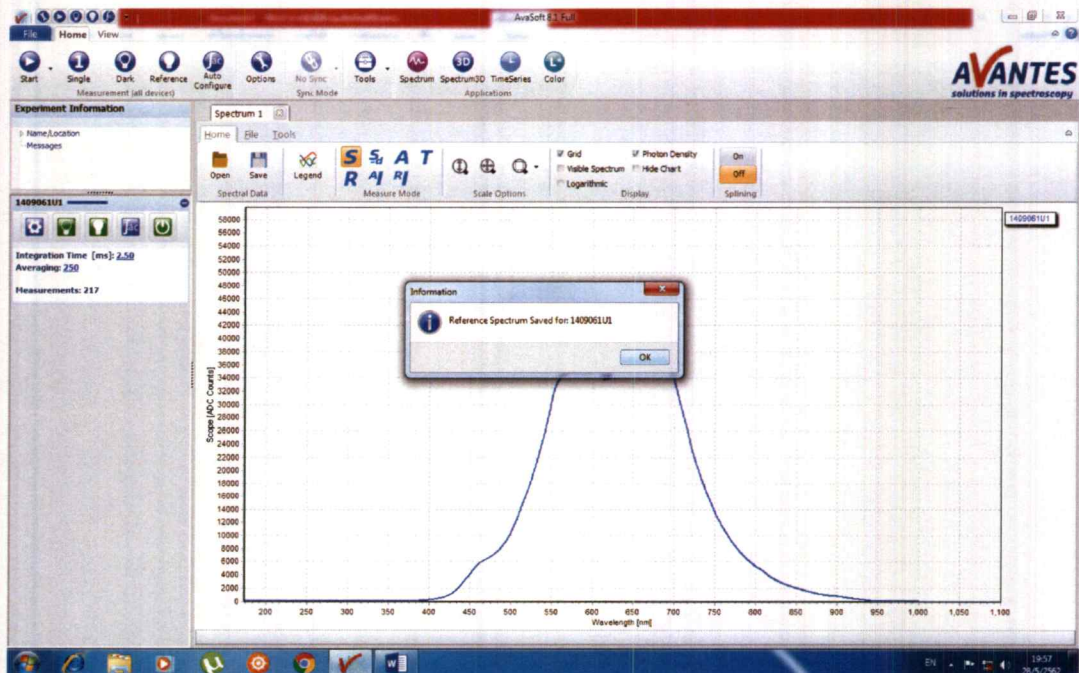
รูปที่ ข.2 แสดงการเริ่มใช้โปรแกรม AvaSoft 8.2

ขั้นตอนที่ 3 กดปุ่ม start แล้วกดปุ่ม S และ Auto Scale ปรับความเข้มแสง จากหลอดทั้งสแตน จนได้ความเข้มแสงเข้าประมาณ 50,000 counts ปิดทางเดินแสงเข้าที่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (ถอนสาย Optic Fiber ออกแล้วปิดจุกสีดำที่หมักกับเครื่อง) เช็คสัญญาณว่า ไม่มีแสงเข้า โดยกด Auto Scale จากนั้นกด Save Dark และ OK ดังรูปที่ ข.3



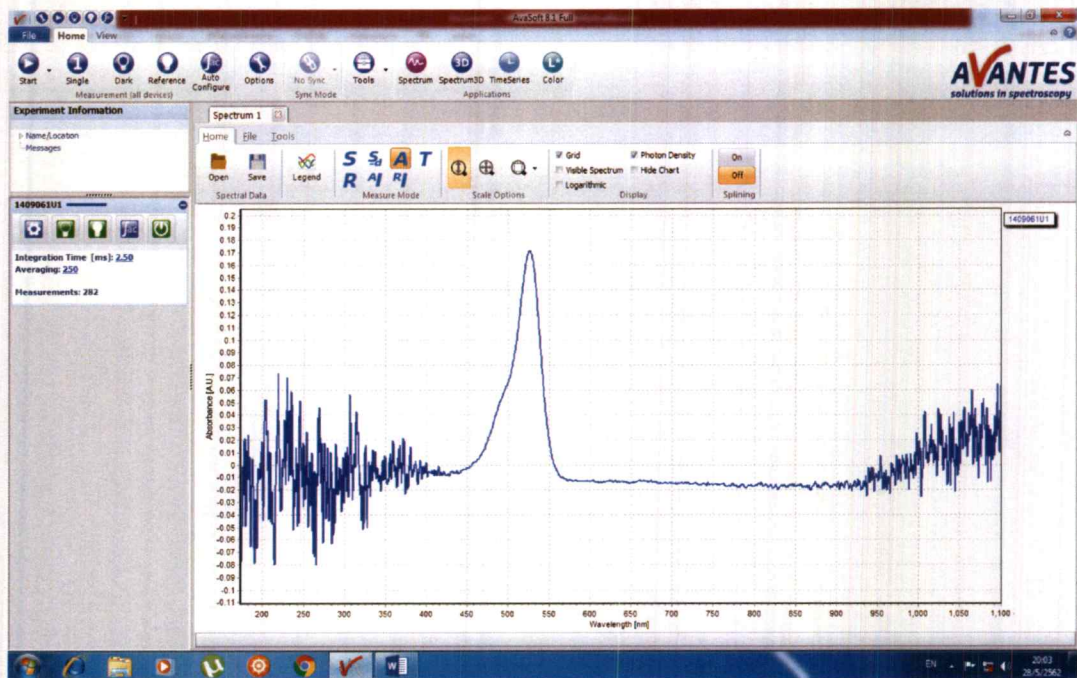
รูปที่ ข.3 แสดงการ Save Dark

ขั้นตอนที่ 4 ต่อสาย Optic Fiber เข้าที่เดิม นำน้ำ DI มาวางบนแท่น
วางเพื่อเป็นตัว Blank เพื่อวัด White mode กด S กด
Save Reference กด OK ดังรูป ข.4



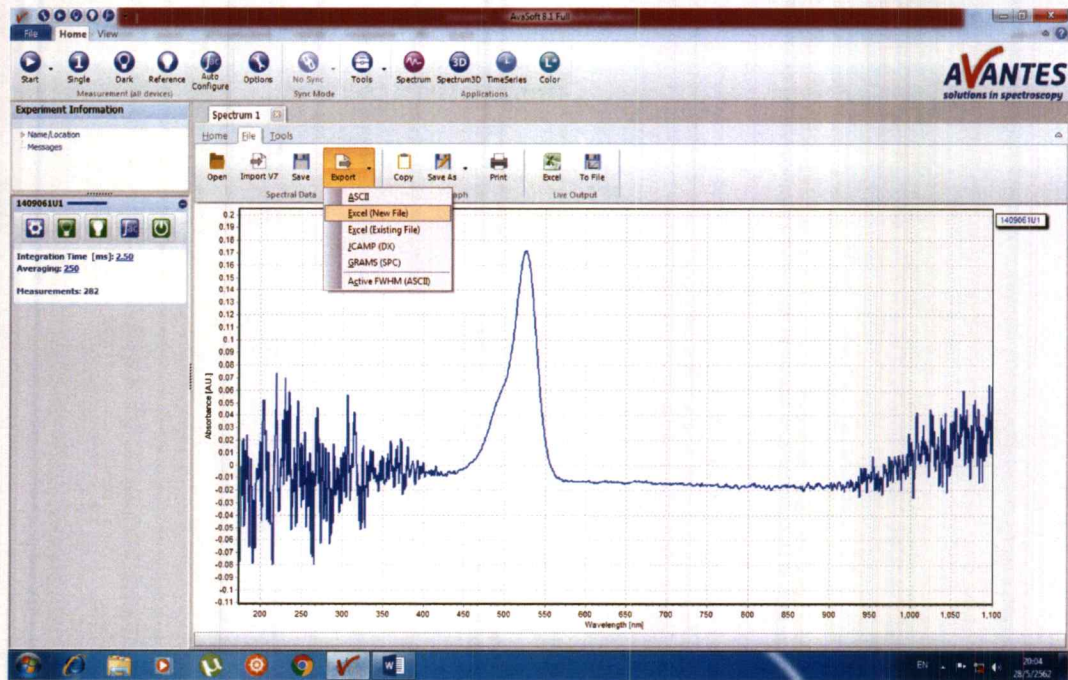
รูปที่ ข.4 แสดงการ Save Reference

ขั้นตอนที่ 5 นำตัวอย่างที่ต้องการวัด ใส่ใน Cuvette มาวางบนแท่นวางเพื่อวัดค่า Absorbance โดยกดปุ่ม A และ Auto Scale เมื่อได้กราฟที่ต้องให้กดปุ่ม Stop ดังรูป ข.5



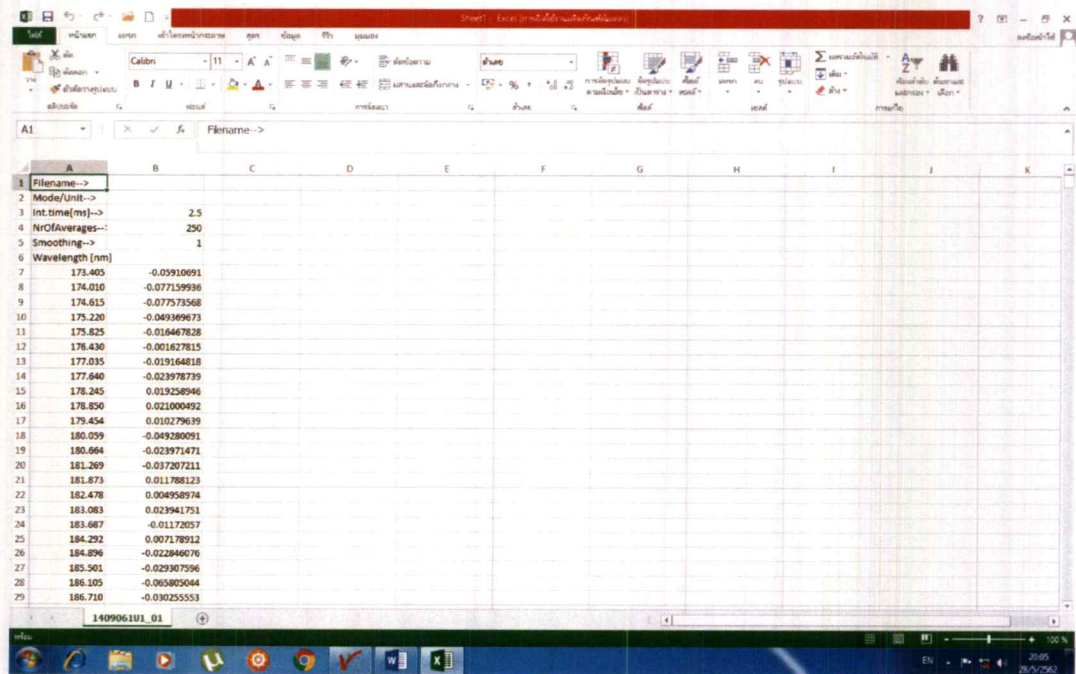
รูปที่ ข.5 แสดงการวัดค่า Absorbance

ขั้นตอนที่ 6 เปิดดูข้อมูลปัจจุบันที่บันทึกจากหน้าโปรแกรม โดยเลือกที่ File > Export > Excel (new file) > yes จะเปิดหน้าต่าง excel ที่มีข้อมูลปัจจุบันออกมา และสามารถ Save (.xls) ข้อมูลไปไว้ในไฟล์เดสก์ท็อปที่ต้องการ



รูปที่ ข.6 แสดงวิธีการ Save ข้อมูล

ขั้นตอนที่ 7 จากนั้นข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Absorbance กับ Wavelength โดยเลือกใช้กราฟแบบกระจาย



รูปที่ ข.7 แสดงข้อมูลที่ได้ใน Excel