

การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบกะสำหรับการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิลคูมาริน  
เชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทริก



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2559  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Scale-up of batch reactor for synthesis of 7-hydroxy-4-chloromethyl  
coumarin grafted with indole-3-butyric acid

Miss Chutikan Sae-tae



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบกะสำหรับการ  
สังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิลคูมารินเชื่อมต่อกับ  
กรดอินโดล-3-ปิวิทริก

โดย

นางสาวชุตติกาญจน์ แซ่แต่

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ สุทธิธารวัช

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.คมสันต์ สุทธิสินทอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วัชชัย ชรินพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ สุทธิธารวัช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.คมสันต์ สุทธิสินทอง)

..... กรรมการ

(ดร.ชลิตา คล้ายโสม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.อุรษา รักษัตานนท์ชัย)

ชุดิกาญจน์ แซ่แต้ : การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบกะสำหรับการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิลคูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก (Scale-up of batch reactor for synthesis of 7-hydroxy-4-chloromethyl coumarin grafted with indole-3-butyric acid) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารวัช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.คมสันต์ สุทธิสินทอง, 135 หน้า.

กรดอินโดล-3- บิวทีริกเป็นฮอร์โมนพืชใช้เพื่อเร่งการสร้างราก ในกรณีที่กรดอินโดล -3-บิวทีริกมีความเข้มข้นสูงจะส่งผลในการยับยั้งการเติบโตในส่วนอื่น ๆ ของพืชดังนั้นปริมาณของกรดอินโดล-3- บิวทีริกจำเป็นต้องถูกควบคุมไม่ให้มีปริมาณสูงเกินไป 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก สามารถนำมาใช้ในการเกษตรเพื่อเป็นฮอร์โมนพืชสำหรับช่วยในการเจริญเติบโตของพืช 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริกสามารถควบคุมการปลดปล่อยของกรดอินโดล-3- บิวทีริกได้ในห้องปฏิบัติการ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ถูกแยกด้วยวิธีโครมาโตกราฟี งานวิจัยนี้ทำการขนาดการผลิตจากขวดกลมที่มีปริมาตร 250 มล.ไปสู่เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนขนาด 2 ลิตรและ 10 ลิตรตามลำดับ ในขนาด 250 มล.ได้ทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อปฏิกิริยาซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (50 - 60 องศาเซลเซียส) เวลาในการทำปฏิกิริยา (15 นาที - 5 ชั่วโมง) และเวลาในการตกผลึก (1 - 4 วัน) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลผลิตของผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส สภาวะที่เหมาะสมคือ 55 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงให้ผลผลิตที่ 74% และทำการแยกสารโดยวิธีตกผลึกที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 วัน ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรความเร็วของใบพัดที่เหมาะสมที่สุดคือ 700 รอบต่อนาทีและเมื่อขยายขนาดไปยังเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรพบว่าพบว่เมื่อกำหนดให้การกระจายตัวของของแข็งคงที่ส่งผลให้ผลผลิตที่ 74% ใกล้เคียงกับในระดับห้องปฏิบัติการ

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5870137021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: COUMARIN / INDOLE-3-BUTYRIC ACID / SCALE-UP / PHOTORESPONSIVE

CHUTIKAN SAE-TAE: Scale-up of batch reactor for synthesis of 7-hydroxy-4-chloromethyl coumarin grafted with indole-3-butyric acid. ADVISOR: ASST. PROF. APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng., CO-ADVISOR: KHOMSON SUTTISINTONG, Ph.D., 135 pp.

Indole-3-butyric acid (IBA) is a plant hormone, used to initiate root formation. However, in case of high concentration of IBA, it affected other parts of the plant resulting no effects to the root. The amount of IBA have to be control led to not exceed the higher limit as well as controlled release. 7-hydroxy-4-chloromethyl Coumarin grafted with IBA is used for agriculture as a regulator for plant growth regulator, it can control release of IBA. In laboratory scale 7-hydroxy-4-chloromethyl Coumarin grafted with IBA was separated by chromatography. The reaction process needs to be scaled-up from 250 mL round bottom flask to 2 L and 10 L stirred-tank reactor. In 250 mL scale, the effects of reaction parameters on the grafting yield was investigated. these parameters included temperature of reaction (50 - 60 °C), time of reaction (15 min - 5 hrs.) and crystallization time (1 - 4 days). The results showed that the product yield decreased when the temperature exceeds 60 °C. The optimum condition to give the highest yield at 74 % was 55 °C for 1hr. and separated by crystallization at 23 °C for 4 days. The optimum impeller speed in 2 L reactor was 700 rpm. The constant suspension of solid was successfully used as scale up factor in 10 L reactor.

Department: Chemical Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Chemical Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะไม่สำเร็จไปได้ด้วยดี หากขาดการแนะนำและช่วยเหลือ พร้อมทั้งแนวทางในการแก้ปัญหาจากบุคคลหลายท่าน

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. อภินันท์ สุทธิธรรวัช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ดร. คมสันต์ สุทธิสินทอง ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ในด้านใหม่ๆ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์

ขอขอบคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อ.ดร.ชลิดา คล้ายโสม และ ดร.อุรษา รักษัตานนท์ชัย ที่สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์

ขอขอบคุณ นายณรงค์พล แก้วจังหวัด สมาชิกห้องปฏิบัติการวัสดุงานเฉพาะทางและโครงสร้างพื้นผิวและสมาชิกห้องปฏิบัติการระบบนำส่งอนุภาคนาโน สำหรับคำปรึกษาที่ดีในทุกๆ เรื่องตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวัสดุงานเฉพาะทางและโครงสร้างพื้นผิวและห้องปฏิบัติการระบบนำส่งอนุภาคนาโน อาคารนวัตกรรม 2 ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่อนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ นายธนวิทย์ โปธิศรี ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับการช่วยเหลือและความรู้ด้านการวิเคราะห์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ นางศรินทร์ธร หนูม่วง มารดาผู้สนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆ ด้าน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช .....	5
2.1.1 ออกซิน (auxin).....	5
2.1.2 ผลของ IBA ต่อการขยายพันธุ์ไม้เลื้อยด้วยวิธีการตอน .....	7
2.1.3 ผลของ NAA IBA และส่วนของกิ่งต่อการออกรากกิ่งปักชำสบู่ดำ.....	8
2.1.4 ความเสถียรของ IAA และ IBA ในธาตุอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ .....	8
2.2 คุมาริน.....	10
2.2.1 ผลของคุมารินต่อการเจริญเติบโตของราก .....	11
2.2.2 การแตกพันธะด้วยแสงของคุมาริน .....	13
2.3 การสังเคราะห์อนุพันธ์คุมารินเชื่อมต่อกับสารอื่น ๆ.....	15
2.3.1 การสังเคราะห์อนุพันธ์คุมารินเชื่อมต่อกับ NAA และ 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid.....	15

2.3.2 การสังเคราะห์ coumarin–chlorambucil conjugate.....	16
2.3.3 การสังเคราะห์ Coumarin–Chlorambucil Conjugate.....	16
2.3.4 การสังเคราะห์ butyric acid - coumarin fused oxazole heterocycles conjugate.....	17
2.3.5 การสังเคราะห์ Coumarin–benzothiazole–chlorambucil conjugate .....	18
อนุพันธ์คูมาริน.....	19
2.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.....	20
2.5 การเลือกชนิดใบกวน.....	22
2.6 การขยายขนาดการผลิต.....	22
2.7 การขยายขนาดถังกวน.....	36
2.7.1 การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ถังกวน สำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิล ไซโคลเด็กซ์ทริน .....	36
2.7.2 การขยายขนาดการสังเคราะห์ไซโคลเด็กซ์ทรินเชื่อมกับโคโตซาน .....	36
2.7.3 การขยายขนาดการสังเคราะห์ควอเทอร์ไนซ์ไซโคลเด็กซ์ทรินเชื่อมโคโตซาน .....	37
2.7.4 การขยายขนาดของถังกวนโดยดูการกระจายตัวของของแข็ง .....	37
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	38
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	38
3.3 ขั้นตอนการทดลอง .....	42
3.4 การวิเคราะห์สมบัติของสาร .....	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	49
4.1 การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก ขนาด 250 มิลลิลิตร.....	49
4.1.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการตกตะกอนต่อการแยกสาร.....	49



4.1.2 ผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา.....	54
4.1.3 ผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยา .....	58
4.1.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-3- บิวทีริก.....	62
4.1.5 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียม คาร์บอเนต.....	67
4.2 การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ขนาด 2 ลิตร .....	73
4.3 การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ขนาด 10 ลิตร.....	78
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	84
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	86
รายการอ้างอิง .....	87
ภาคผนวก ก. การคำนวณอัตราส่วนของสาร .....	91
ภาคผนวก ข. ขนาดและสัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ .....	93
ภาคผนวก ค. การคำนวณความเร็วรอบในการปั่นกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร.....	95
ภาคผนวก ง. สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอิน โดล-3-บิวทีริกที่ได้จากการทดลอง.....	105
ภาคผนวก จ. ตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless number).....	132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	135

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 การเกิดคูมารินในพืช .....	1
รูปที่ 2 การแตกพันธะด้วยแสงของสารประกอบโดยมีคูมารินเป็นหมู่ปกป้อง.....	2
รูปที่ 3 ผลของ IBA ต่อการออกรากของไม้เลื้อยในการตอน .....	7
รูปที่ 4 การทดลองผลของ IBA ต่อการขยายพันธุ์ไม้เลื้อยด้วยวิธีการตอน .....	7
รูปที่ 5 ผลของ IBA ต่อจำนวนรากของกิ่งปักชำสบู่ดำ .....	8
รูปที่ 6 ผลของ IBA ต่อความยาวของรากของกิ่งปักชำสบู่ดำ .....	8
รูปที่ 7 (A) % ของ IAA และ IBA ที่เหลือในธาตุอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ(ของเหลว)เทียบกับเวลา, (B) % ของ IAA และ IBA ที่เหลือในธาตุอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ(วุ้น)เทียบกับเวลา.....	9
รูปที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของคูมาริน .....	10
รูปที่ 9 ผลของคูมารินและอนุพันธ์คูมารินต่อการงอกของราก Avena.....	12
รูปที่ 10 การเชื่อมต่อและการแตกพันธะด้วยแสงของคูมาริน .....	13
รูปที่ 11 Photochemical reaction of coumarin compounds.....	13
รูปที่ 12 ตัวอย่างการเกิด photoresponsive ของคูมาริน.....	14
รูปที่ 13 การสังเคราะห์อนุพันธ์คูมารินเชื่อมต่อกับสารออกฤทธิ์ .....	15
รูปที่ 14 การสังเคราะห์ coumarin–chlorambucil conjugate .....	16
รูปที่ 15 การสังเคราะห์ butyric acid cages based on 6-oxo-6H-benzopyrano [6,7-d]oxazol-8-yl)methyl groups.....	17
รูปที่ 16 การสังเคราะห์ Coumarin–benzothiazole–chlorambucil conjugate.....	18
รูปที่ 17 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ .....	20
รูปที่ 18 เครื่องปฏิกรณ์มาตรฐาน.....	21
รูปที่ 19 ใบกวนชนิด พิชเบลต .....	22

รูปที่ 20 การเกิดคูมารินในพืช.....	27
รูปที่ 21 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร.....	39
รูปที่ 22 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร.....	40
รูปที่ 23 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร.....	41
รูปที่ 24 แผนภาพการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล -3-บิวทีริก.....	44
รูปที่ 25 เทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปี.....	45
รูปที่ 26 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก.....	46
รูปที่ 27 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล -3-บิวทีริก.....	47
รูปที่ 28 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก หลังการ ตกตะกอนเป็นเวลา 4 วัน.....	50
รูปที่ 29 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริกที่ได้จากการกรอง... 50	
รูปที่ 30 ผลของอุณหภูมิ (5 °C, 23 °C)และเวลาในการตกตะกอน (1, 2, 3, 4 และ 10 วัน) ต่อการแยกสาร.....	51
รูปที่ 31 ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอน.....	53
รูปที่ 32 ผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา (50-60 °C) ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	54
รูปที่ 33 ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา.....	57
รูปที่ 34 ผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยา (15 นาที-5 ชั่วโมง)ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	58
รูปที่ 35 ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยา.....	61

รูปที่ 36 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : กรดอินโดล -3-บิวทีริก (1 : 1-3) ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ .....	63
รูปที่ 37 ประสิทธิภาพในการเข้าทำปฏิกิริยาของกรดอินโดล-3-บิวทีริก และร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : กรดอินโดล -3-บิวทีริกแตกต่างกัน.....	64
รูปที่ 38 ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี -4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-3-บิวทีริก.....	66
รูปที่ 39 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก .....	68
รูปที่ 40 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : โฟแทสเซียม คาร์บอเนตต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (*0.05 eq. mol เท่ากับความสามารถในการ ละลายของโพแทสเซียมคาร์บอเนตใน DMF 119 มล.ที่ 55 °C) .....	68
รูปที่ 41 ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่ 1 : 0.05.....	70
รูปที่ 42 ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี -4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนต (1:1-2).....	72
รูปที่ 43 ผลของความเร็วยรอบในการปั่นกวนของใบกวนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ใน เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร .....	74
รูปที่ 44 การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ความเร็วยรอบ 200 รอบต่อนาที (ซ้าย) และ 700 รอบต่อนาที (ขวา) .....	75
รูปที่ 45 ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วยรอบในการปั่นกวนของ ใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร.....	77

รูปที่ 46 ผลของความเร็วยรอบในการปั่นกวนของใบกวนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร.....	81
รูปที่ 47 ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วยรอบในการปั่นกวนของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร.....	83
รูปที่ 48 ภาพรวมของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก .....	85
รูปที่ ข.1 ขนาดและสัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร.....	93
รูปที่ ข.2 ขนาดและสัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร .....	94
รูปที่ ง.1 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 5 °C เป็นเวลา 1 วัน .....	105
รูปที่ ง.2 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 5 °C เป็นเวลา 2 วัน.....	106
รูปที่ ง.3 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 5 °C เป็นเวลา 3 วัน.....	106
รูปที่ ง.4 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 5 °C เป็นเวลา 4 วัน.....	107
รูปที่ ง.5 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 5 °C เป็นเวลา 10 วัน.....	107
รูปที่ ง.6 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 23 °C เป็นเวลา 1 วัน.....	108
รูปที่ ง.7 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 23 °C เป็นเวลา 2 วัน.....	108
รูปที่ ง.8 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 23 °C เป็นเวลา 3 วัน.....	109









- รูปที่ ง.40 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ  
กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของ  
ใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรที่ 357 รอบต่อนาที ..... 129
- รูปที่ ง.41 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ  
กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของ  
ใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรที่ 423 รอบต่อนาที ..... 130
- รูปที่ ง.42 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ  
กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของ  
ใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรที่ 447 รอบต่อนาที ..... 130
- รูปที่ ง.43 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ  
กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของ  
ใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรที่ 500 รอบต่อนาที ..... 131

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สรุปการสังเคราะห์ห่อนุพันธ์คูมารินเชื่อมต่อกับสารอื่นๆ .....	19
ตารางที่ 2 สัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะมาตรฐาน.....	21
ตารางที่ 3 ค่าเอ็มพีริคัลและค่าเชิงทฤษฎี (n) ระหว่างความสัมพันธ์ของความเร็วรอบในการปั่น กวนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนในกรณีต่าง ๆ.....	35
ตารางที่ 4 สภาวะการดำเนินงานที่ศึกษาในการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิลคูมาริน เชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร.....	42
ตารางที่ 5 ตำแหน่งและพื้นที่ได้กราฟได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปีของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อ กับกรดอินโดล-3-บิวทีริก.....	48
ตารางที่ 6 ตำแหน่งและพื้นที่ได้กราฟได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปีของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อ กับกรดอินโดล-3-บิวทีริกของข้อมูลอ้างอิงเทียบกับผลจากการทดลองผลของอุณหภูมิ และเวลาในการตกตะกอนต่อการแยกสาร.....	52
ตารางที่ 7 ตำแหน่งและพื้นที่ได้กราฟได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปีของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อ กับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ของข้อมูลอ้างอิงเทียบกับผลจากการทดลองผลของอุณหภูมิ การเกิดปฏิกิริยา.....	56
ตารางที่ 8 ตำแหน่งและพื้นที่ได้กราฟได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปีของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อ กับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ของข้อมูลอ้างอิงเทียบกับผลจากการทดลองผลของเวลา การเกิดปฏิกิริยา.....	60
ตารางที่ 9 ตำแหน่งและพื้นที่ได้กราฟได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปีของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อ กับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ของข้อมูลอ้างอิงเทียบกับผลจากการทดลองผลของ อัตราส่วน โมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-3-บิวทีริก ....	65

ตารางที่ 10 ตำแหน่งและพื้นที่ได้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์  
แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปีของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ของข้อมูลอ้างอิงเทียบกับผลจากการทดลองผลของอัตราส่วน โดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนต . 71

ตารางที่ 11 ตำแหน่งและพื้นที่ได้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์  
แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปีของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ของข้อมูลอ้างอิงเทียบกับผลของความเร็วรอบในการปั่นกวนของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ..... 76

ตารางที่ 12 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบในการปั่นกวนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวนขนาด 5 เซนติเมตร และ 10 ลิตร ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวนขนาด 10 เซนติเมตร เมื่อความเร็วรอบในการปั่นกวนของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร (N1) เท่ากับ 700 รอบต่อนาที..... 80

ตารางที่ 13 ตำแหน่งและพื้นที่ได้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์  
แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปีของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ของข้อมูลอ้างอิงเทียบกับผลของความเร็วรอบในการปั่นกวนของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร ..... 82

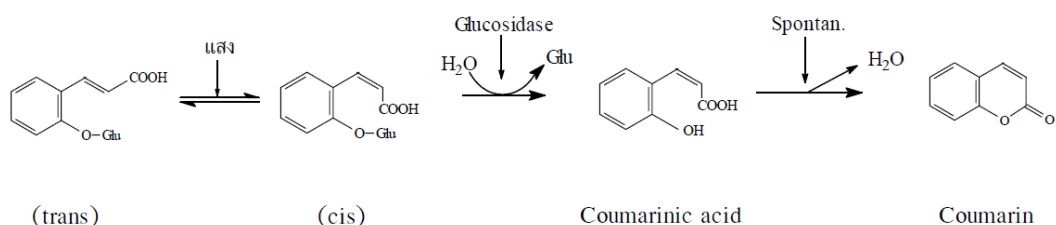
ตารางที่ ก.1 ปริมาณ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินและกรดอินโดล-3-ปิวิทีริกที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แต่ละขนาด..... 92

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

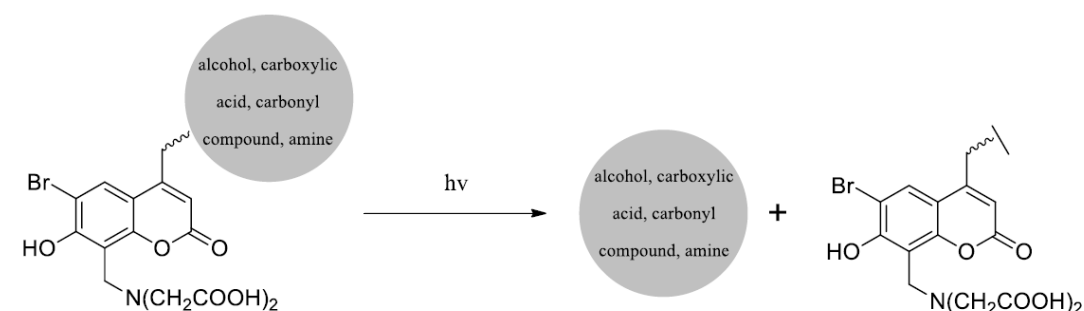
ในการเพาะพันธุ์พืชมักมีการใช้ฮอร์โมนพืชในการเร่งการเจริญเติบโตของพืชเพื่อเร่งผลผลิตหรือเพิ่มคุณลักษณะของพืชที่ต้องการเช่น เพิ่มดอก เร่งการเจริญเติบโตของราก เพิ่มขนาดของผล เป็นต้น ฮอร์โมนพืชมีหลายชนิดเช่น ออกซิน ไซโตไคนิน จิบเบอเรลลิน เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงฮอร์โมนพืชชนิดออกซิน (Auxins) ออกซินเป็นฮอร์โมนที่พบได้ทั่วไปในพืช พบได้ค่อนข้างมากในเนื้อเยื่อเจริญ บริเวณปลายยอดและปลายราก ใบอ่อน ช่อดอกที่กำลังเจริญ เมล็ดที่กำลังงอก เอ็มบริโอและผลที่กำลังเจริญ ฮอร์โมนพืชชนิดออกซินที่นิยมใช้ทั่วไปคือ กรดอินโดล-3-บิวทีริก (Indole-3-butyric acid, IBA) [1, 2] ออกซินมีผลในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของลำต้น ตา ใบ และราก โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกระตุ้นของแต่ละส่วนมีปริมาณที่แตกต่างกัน ความเข้มข้นที่เหมาะสมกับส่วนของพืชที่ต้องการปริมาณออกซินที่สูงกว่าจะส่งผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของส่วนอื่นๆ ของพืชที่ต้องการปริมาณออกซินที่ต่ำกว่า ดังนั้นปริมาณออกซินที่เหมาะสมกับส่วนหนึ่งของพืชอาจส่งผลเสียต่อส่วนอื่นได้ [3] จึงมีแนวคิดที่จะควบคุมปริมาณของออกซินให้อยู่ในระดับที่ต่ำ และเนื่องจากฮอร์โมนพืชชนิดนี้เป็นสารที่ไม่เสถียรสามารถเสื่อมสภาพได้แม้เก็บในที่มืด [4] จึงมีการนำฮอร์โมนพืชชนิดนี้มาเชื่อมต่อกับคูมารินเพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับสารและยังช่วยควบคุมการปลดปล่อยสารได้

คูมาริน (coumarin) ส่วนมากเกิดจากการแตกออก (cleavage) จากเมลิโลโทไซด์ (melilotoside) พบได้ในพืชทั่วไป เมื่อพืชตายจะมีเอนไซม์มาย่อยเมลิโลโทไซด์ (melilotoside) กลายเป็นคูมาริน [5]



รูปที่ 1 การเกิดคูมารินในพืช [6]

คูมารินมีคุณสมบัติเป็นสารนำส่งที่ดีโดยตัวคูมารินเองจะเชื่อมต่อกับสารที่ต้องการนำส่งด้วยพันธะเคมี คูมารินจะทำหน้าที่เป็นหมู่ป้องกัน (protecting group) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าเช่น แสง จะเกิดการสลายพันธะเคมีพร้อมทั้งปลดปล่อยสารที่ต้องการนำส่งด้วย [7] จากคุณสมบัติดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำคูมารินมาเชื่อมต่อกับ IBA ซึ่งเป็นฮอร์โมนพืชเพื่อช่วยในการควบคุมการปลดปล่อยของ กรดอินโดล-3-ปิวิทริก ไม่ให้ กรดอินโดล-3-ปิวิทริก มีปริมาณที่สูงมากเกินไป



รูปที่ 2 การแตกพันธะด้วยแสงของสารประกอบโดยมีคูมารินเป็นหมู่ปกป้อง [8]

ในงานวิจัยก่อนหน้า สุทธิสินทอง [7] ได้สังเคราะห์คูมารินเชื่อมต่อกับฮอร์โมนพืชในกลุ่มออกซินในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาการสังเคราะห์และกักเก็บอนุพันธ์ของคูมารินเชื่อมต่อกับฮอร์โมนพืช แต่ยังไม่มีการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ อันได้แก่ เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของสารตั้งต้น ความเร็วรอบของไบวอร์น ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยานี้เพื่อให้ได้สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด และทำการศึกษาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก ในกระบวนการสังเคราะห์ที่มีขนาดใหญ่เพื่อเพิ่มกำลังการผลิต 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก โดยยังคงรักษาประสิทธิภาพในการผลิต 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก ให้เหมือนในระดับห้องปฏิบัติการ

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการขยายขนาดกระบวนการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก เพื่อขยายกำลังการผลิตจากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับนำร่อง เพื่อเป็นการพัฒนาการผลิตผลิตภัณฑ์ด้านการเกษตรที่สามารถชะลอการปลดปล่อยสารสำคัญสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-พิวทีริก ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสม
- 1.2.2 ศึกษาการขยายการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-พิวทีริก จากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับนาร่องเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมในการขยายขนาด

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-พิวทีริก ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร
  - 1.3.1.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนของจำนวนโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิลคูมาริน ต่อ กรดอินโดล-3-พิวทีริก
  - 1.3.1.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนของจำนวนโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิลคูมาริน ต่อ โปแทสเซียมคาร์บอเนต
  - 1.3.1.3 ศึกษาผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง
  - 1.3.1.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ที่ 50, 53, 55, 58 และ 60 องศาเซลเซียส
  - 1.3.1.5 ศึกษาและพัฒนาการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากสารละลายโดยวิธีการตกตะกอน
- 1.3.2 การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-พิวทีริก ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร
 

ศึกษาผลของความเร็วรอบของการปั่นกวนที่มีผลต่อการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-พิวทีริก ที่ความเร็วรอบ 200-800 รอบต่อนาที โดยอ้างอิงสภาวะการดำเนินงานที่ดีที่สุด เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร

1.3.3 การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

ศึกษาผลของความเร็วรอบของการปั่นกวนที่มีผลต่อการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก โดยอ้างอิง สภาวะการดำเนินงานที่ดีที่สุดในการเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร เพื่อหา ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาต่อตัวแปรในการขยายขนาด

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก
- 1.4.2 สามารถเพิ่มกำลังการผลิต 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก
- 1.4.3 เป็นแนวทางในการขยายขนาดการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน เชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตให้สามารถใช้งานได้ในระดับ อุตสาหกรรม

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช

สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (plant growth regulator) เป็นสารเคมีที่สามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพืชทั้งในด้านส่งเสริมและยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช แต่ไม่ใช่สารอาหาร มีทั้งที่พืชผลิตเองและพืชไม่ได้ผลิตเอง [9]

ฮอร์โมนพืช (Plant hormone) หมายถึง สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชเฉพาะที่พืชผลิตขึ้นเองเท่านั้น

ฮอร์โมนพืชแบ่งตามลักษณะการทำงานได้ดังนี้ [9]

1. ออกซิน (auxin) มีหน้าที่ในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของลำต้น ตา ใบ และรากในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน
2. ไซโตไคนิน (cytokinins) มีหน้าที่ในการควบคุม การแบ่งเซลล์ การขยายตัวและการเปลี่ยนแปลงของเซลล์พืช มีผลต่อการชะงักของตายอดและการเจริญของตาข้าง
3. จิบเบอเรลลิน (gibberellins) มีหน้าที่ในการช่วยเพิ่มความสูงของพืชที่เกิดจากการยืดตัวของข้อ
4. เอทิลีน (ethylene) เป็นฮอร์โมนพืชชนิดเดียวที่อยู่ในรูปก๊าซ มีหน้าที่ควบคุมการแก่ของพืช ดังนั้นช่วงใดก็ตามถ้ามีเอทิลีนมากก็จะเป็นการเร่งให้พืชแก่ได้เร็วขึ้น จึงช่วยในการเร่งการสุกของผลไม้ได้
5. สารยับยั้งการเจริญเติบโต (inhibitors)

##### 2.1.1 ออกซิน (auxin)

สารควบคุมการเจริญเติบโตกลุ่มออกซินที่รู้จักเป็นชนิดแรกคือ indol-3-acetic acid (IAA) เป็นสารที่พืชสร้างเอง สารสังเคราะห์กลุ่มออกซินที่นิยมใช้คือ 1-naphthylactic acid (NAA), indole-3-butylic acid (IBA) [1, 2]

สารกลุ่มออกซินที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช [9]

1. ช่วยกระตุ้นการแบ่งเซลล์ของเยื่อไม้ ทำให้พืชเกิดการเจริญเติบโตด้านข้างมากขึ้น มีเนื้อไม้มากขึ้น
2. ช่วยให้เซลล์ในส่วนต่าง ๆ ยืดยาวขึ้นโดยกระตุ้นให้เซลล์สร้างผนังเซลล์มากขึ้น



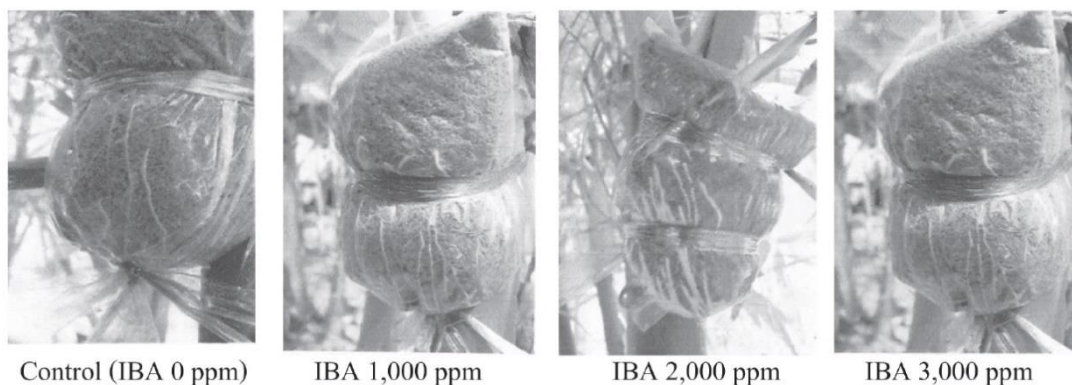
3. ควบคุมการเจริญของตาข้างโดยตายอด เมื่อตายอดสร้างออกซินในปริมาณสูงจะถูกทำลายลงด้านล่างและออกซินปริมาณนี้จะยับยั้งการเจริญเติบโตของตาและใบด้านข้าง พืชจะสูงแต่ไม่เป็นพุ่ม
4. กระตุ้นการเกิดรากของการตอนและการปักชำ
5. ควบคุมการตอบสนองของพืชโดยมีแสง และแรงโน้มถ่วงของโลกเป็นสิ่งเร้า
6. ควบคุมการออกดอกของพืช โดยถ้าพ่นออกซินให้พืชที่กำลังจะออกดอกจะทำให้พืชออกดอกช้า ยกเว้น สับปะรด มะม่วง และลิ้นจี่ ซึ่งจะทำการออกดอกไวขึ้นโดยเป็นผลทางอ้อมที่สารออกซินไปกระตุ้นให้พืชสร้างเอทิลีนขึ้นมา
7. เปลี่ยนเพศของดอก
8. เพิ่มขนาดของผล ผลไม้บางชนิดสามารถใช้ออกซินเพื่อป้องกันผลร่วงก่อนการเก็บเกี่ยวได้ เช่น มะม่วง ส้ม องุ่น และลำไย
9. ควบคุมการเจริญเติบโตของผล เช่น แตงโม องุ่น มะเขือเทศ บวบ มะเดื่อ สตรอเบอร์รี่ เมื่อพ่นด้วยในปริมาณที่พอเหมาะก็จะทำให้รังไข่เจริญไปเป็นผลได้โดยไม่มีเมล็ด ซึ่งเรียกผลไม้ประเภทนี้ว่า ผลไม่มีเมล็ด
10. ควบคุมการหลุดร่วงของใบ ดอกและผล
11. มีคุณสมบัติเป็นสารกำจัดวัชพืช หากใช้ในความเข้มข้นสูงจะสามารถฆ่าพืชได้ ดังนั้นจึงมีการนำสารออกซินมาใช้เป็นยากำจัดวัชพืชอย่างกว้างขวาง ออกซินที่ใช้สารกำจัดวัชพืชอย่างกว้างขวางได้แก่ 2,4-D, 2,4,5-T, MCPA สารที่นิยมใช้คือ 2,4-D รองลงมาคือ 4-CPA

### 2.1.2 ผลของ IBA ต่อการขยายพันธุ์ไม้เลื้อยด้วยวิธีการตอน

พวกจิก และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาผลของ IBA ต่อการขยายพันธุ์ไม้เลื้อยด้วยวิธีการตอน ที่อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี ระหว่างเดือนสิงหาคม 2551 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2552 ทดลองโดยใช้ IBA ความเข้มข้น 1,000 ppm, 2,000 ppm, 3,000 ppm, 4,000 ppm และ 5,000 ppm สารละลายกะปิ และไม่ใช่สาร IBA พบว่าที่ IBA ความเข้มข้น 2,000 ppm ให้จำนวนรากเฉลี่ยต่อกิ่งมากที่สุด 2.25 รากและยังเพิ่มความเข้มข้นของ IBA มากขึ้นจะพบว่ารากที่ได้มีปริมาณลดลงแสดงให้เห็นว่าการใช้ IBA ปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลต่อการเจริญของพืช

IBA concentration (ppm)	% rooting	number of roots	% survival
0	25.00	1.63	100
1,000	22.50	1.75	100
2,000	22.50	2.25	100
3,000	22.50	2.00	100
4,000	20.00	1.54	100
5,000	20.00	1.38	100

รูปที่ 3 ผลของ IBA ต่อการออกรากของไม้เลื้อยในการตอน [10]



Control (IBA 0 ppm)

IBA 1,000 ppm

IBA 2,000 ppm

IBA 3,000 ppm

รูปที่ 4 การทดลองผลของ IBA ต่อการขยายพันธุ์ไม้เลื้อยด้วยวิธีการตอน [10]

### 2.1.3 ผลของ NAA IBA และส่วนของกิ่งต่อการออกรากกิ่งปักชำสับุดำ

ผกามาศ และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาผลของ NAA, IBA และส่วนของกิ่งต่อการออกรากกิ่งปักชำสับุดำ พบว่า IBA ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรให้ปริมาณรากและความยาวของรากมากที่สุดและการให้ IBA มากขึ้นจะให้ผลในทางตรงข้ามคือจำนวนรากและความยาวรากลดลง

Concentrations (mg/liter)	Root number		
	Top part	Middle part	Bottom part
0	13.57	8.42	18.57
IBA 1,000	8.42	11.00	20.57
IBA 2,000	11.28	15.28	26.00
IBA 3,000	9.57	14.71	16.57

รูปที่ 5 ผลของ IBA ต่อจำนวนรากของกิ่งปักชำสับุดำ [11]

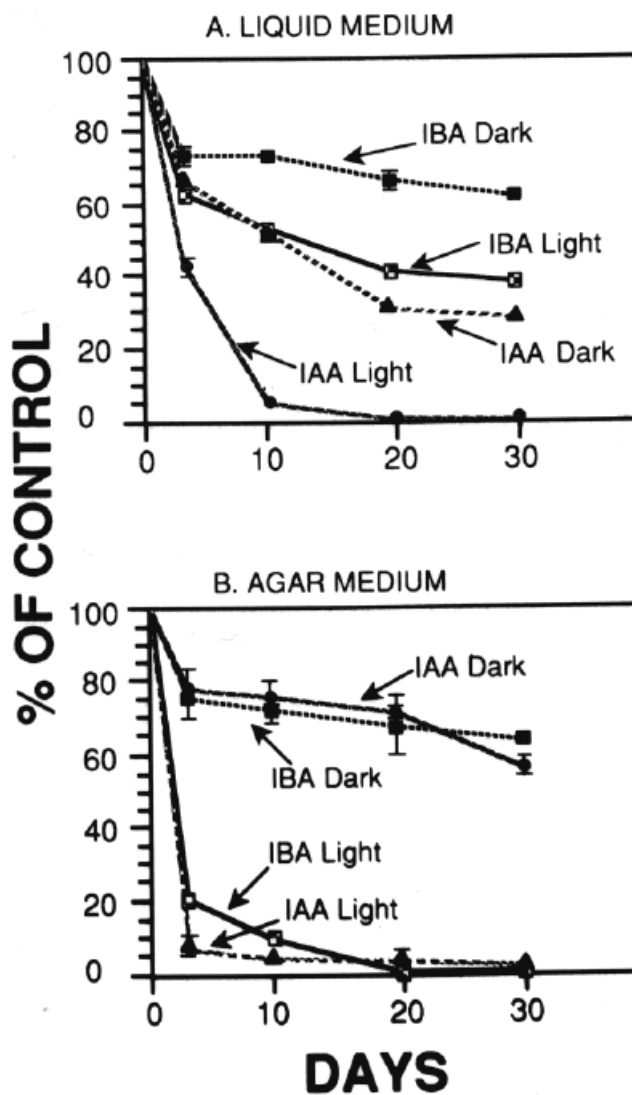
Concentrations (mg/liter)	Root length (cm)		
	Top part	Middle part	Bottom part
0	5.72	4.65	11.42
IBA 1,000	4.54	5.45	8.21
IBA 2,000	5.10	4.68	8.54
IBA 3,000	3.17	4.62	4.85

รูปที่ 6 ผลของ IBA ต่อความยาวของรากของกิ่งปักชำสับุดำ [11]

### 2.1.4 ความเสถียรของ IAA และ IBA ในธาตุอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ

Nissen และคณะ [4] ได้ศึกษาความเสถียรของ IAA และ IBA ในธาตุอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ โดยเตรียมธาตุอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อที่มี IAA และ IBA ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 1  $\mu\text{M}$  เก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $24 \pm 2^\circ\text{C}$  พร้อมกับเขย่าตลอดเวลาในการทดลอง โดยสารกลุ่มหนึ่ง

จะถูกเก็บในที่มืดตลอดเวลา และอีกกลุ่มจะถูกเก็บในที่ที่มีแสงสว่าง โดยวัดความเข้มข้นของ IAA และ IBA โดยใช้ HPLC และทำการเก็บตัวอย่างสารในวันที่ 2, 10, 20 และ 30 วัน ผลการทดลองพบว่าทั้ง IAA และ IBA มีปริมาณลดลงจากตอนแรก โดยทั้งที่เก็บในที่สว่างและที่มืด โดยความเข้มข้นของ IAA และ IBA ลดลงมากถึง 97% และ 60% ตามลำดับ



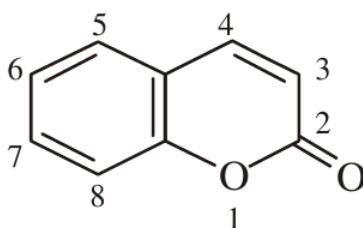
รูปที่ 7 (A) % ของ IAA และ IBA ที่เหลือในธาตุอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (ของเหลว) เทียบกับเวลา, (B) % ของ IAA และ IBA ที่เหลือในธาตุอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (วุ้น) เทียบกับเวลา [4]

## 2.2 คูมาริน

คูมารินและอนุพันธ์คูมารินเป็นพฤษเคมี (phytochemical) มีกลิ่นคล้ายวนิลลา สามารถเกิดได้เองหรือเกิดร่วมกับน้ำตาลกลูโคส (coumarin glycoside) พบได้ทั่วไปในพืช เช่น tonka beans ลาเวนเดอร์ ชะเอม สตรอเบอร์รี่ แอปริคอต เซอร์รี่ อบเชย และถั่วหวาน [12] คูมารินมีการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมายเช่น ด้านการเกษตร การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เวชสำอาง สารกำจัดศัตรูพืช น้ำหอมและอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากคูมารินมีคุณสมบัติที่ดีในการนำส่งสารกระตุ้นหรือสารสำคัญต่าง ๆ โดยคูมารินจะทำหน้าที่เป็นหมู่ป้องกัน (protecting group) ที่เชื่อมต่อกับสารกระตุ้นหรือสารสำคัญด้วยพันธะเคมีที่จำเพาะและสามารถสลายพันธะเพื่อปลดปล่อยสารสำคัญไปสู่เป้าหมายเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าต่าง ๆ โดยเฉพาะแสง

จากคุณสมบัติที่สามารถสลายพันธะได้ด้วยแสงของคูมาริน ได้มีการนำคูมารินมาใช้ในด้านเกษตรกรรม โดยการนำมาใช้ในการนำส่งสารสำคัญสำหรับพืช ได้แก่ ฮอริโมนพืช ยากำจัดวัชพืชและยาปราบศัตรูพืช เนื่องจากสารเหล่านี้มีอายุการใช้งานสั้นเนื่องจาก เป็นสารระเหยง่ายและสลายตัวได้ ทำให้ต้องมีการให้สารเคมีเหล่านี้ซ้ำ จึงทำให้เกิดการสะสมของสารเคมีที่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิต และก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศต่าง ๆ

การประยุกต์ใช้คูมารินในทางการเกษตรจึงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการ ออกฤทธิ์ของสารสำคัญโดยสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน ด้วยการสลายพันธะจากพลังงานแสงอาทิตย์ จึงเป็นการปลดปล่อยสารทีละน้อย และยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายรวมถึงปริมาณการใช้สารเคมีที่มากเกินไปจนจำเป็น จึงเป็นการช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสิ่งมีชีวิตอีกด้วย [7]



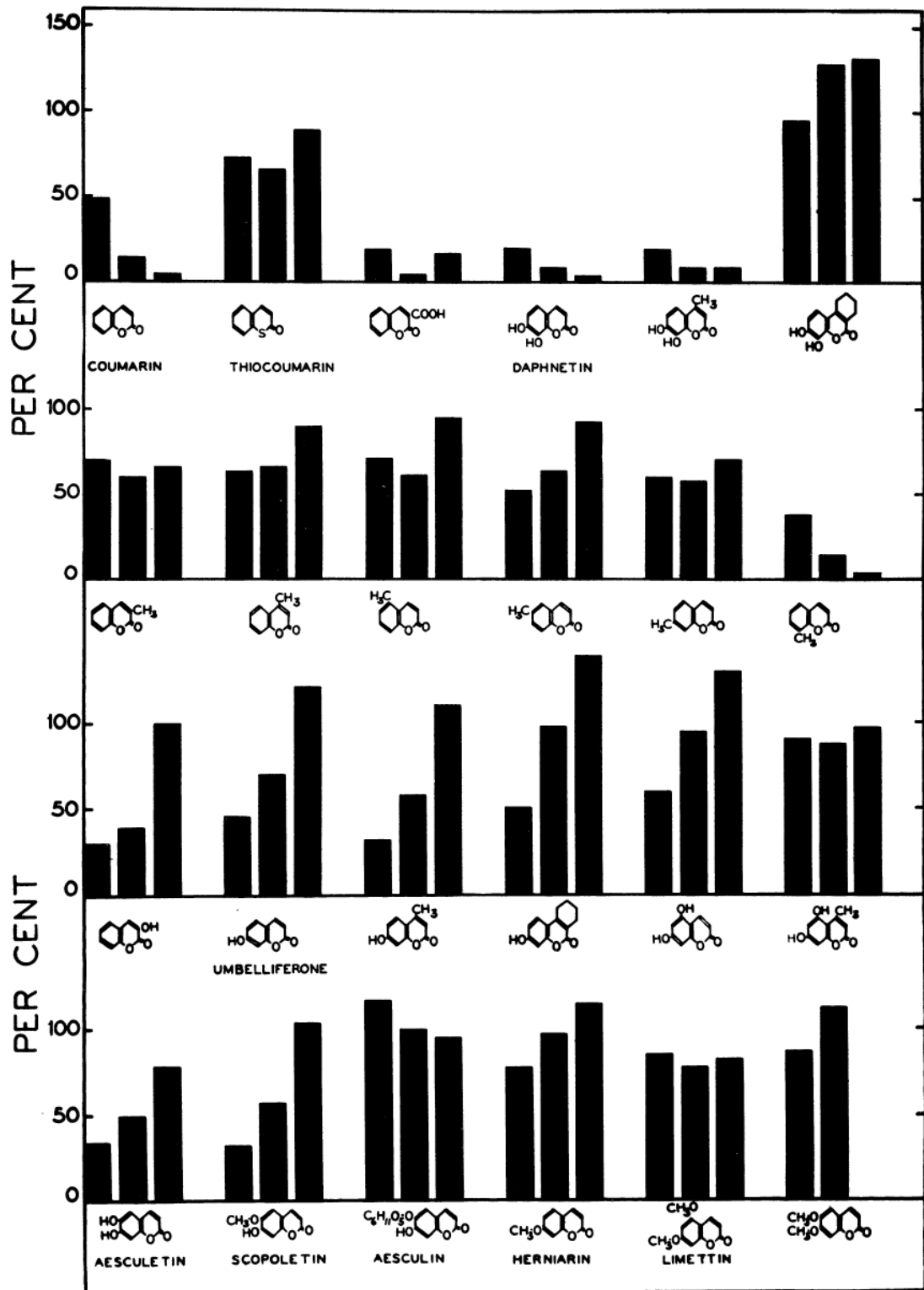
รูปที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของคูมาริน [13]

### 2.2.1 ผลของคูมารินต่อการเจริญเติบโตของราก

Goodwin และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาผลของคูมารินและอนุพันธ์คูมารินต่อการงอกของรากของ Avena โดยทำการศึกษาคูมารินและอนุพันธ์คูมาริน 23 ชนิด โดยกราฟแท่งแรกแสดงอัตราการงอกของราก 3 ชั่วโมงแรก กราฟแท่งที่สองแสดงอัตราการงอกของราก 3 ชั่วโมงถัดมา และกราฟแท่งที่สามแสดงอัตราการงอกของราก 12 ชั่วโมงถัดมา

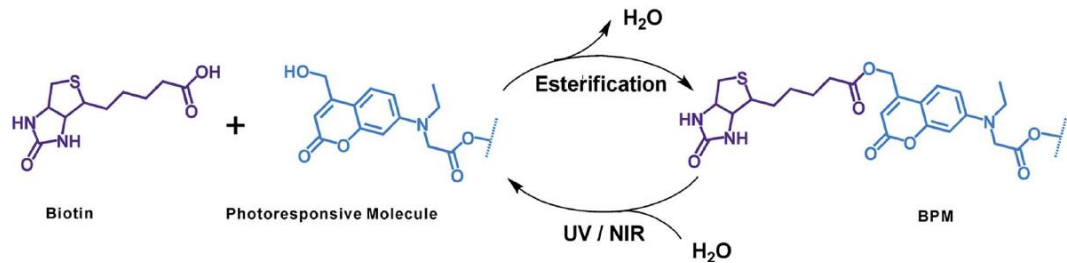
พบว่าสามารถแบ่งคูมารินและอนุพันธ์ของคูมารินได้เป็น 4 กลุ่ม

1. คูมารินกลุ่มที่ 1 ที่ความเข้มข้น  $10^{-3}$  M มีผลมากในการยับยั้งการงอกของราก คูมารินในกลุ่มนี้ได้แก่ coumarin, 8-methyl coumarin, daphnetin, 4-methyl daphnetin, coumarin-3-carboxylic acid
2. คูมารินกลุ่มที่ 2 มีผลในการยับยั้งการงอกของรากเล็กน้อย คูมารินในกลุ่มนี้ได้แก่ 3-methyl, 4-methyl, 5-methyl, 6-methyl, and 7-methyl coumarins and thiocoumarin
3. คูมารินกลุ่มที่ 3 ที่ความเข้มข้น  $10^{-3}$  M มีผลยับยั้งการงอกของรากเล็กน้อยในช่วงต้น คูมารินในกลุ่มนี้ได้แก่
4. 3-hydroxy coumarin, umbelliferone, 4-methyl umbelliferone, 5,7-dihydroxy coumarin, aesculetin, scopoletin, 3-hydroxy- 7, 8, 9, 10-tetrahydrodibenzo-[b,d]-pyron
5. คูมารินกลุ่มที่ 4 นี้เกือบจะไม่มีผลต่อการงอกของราก คูมารินในกลุ่มนี้ได้แก่ herniarin, limettin, 6,7 - dimethoxy coumarin, aesculin, 5,7 - dihydroxy-4 - methyl coumarin, 3,4-dihydroxy-7, 8, 9, 10 o-tetrahydrodibenzo-[b,d]-pyrone



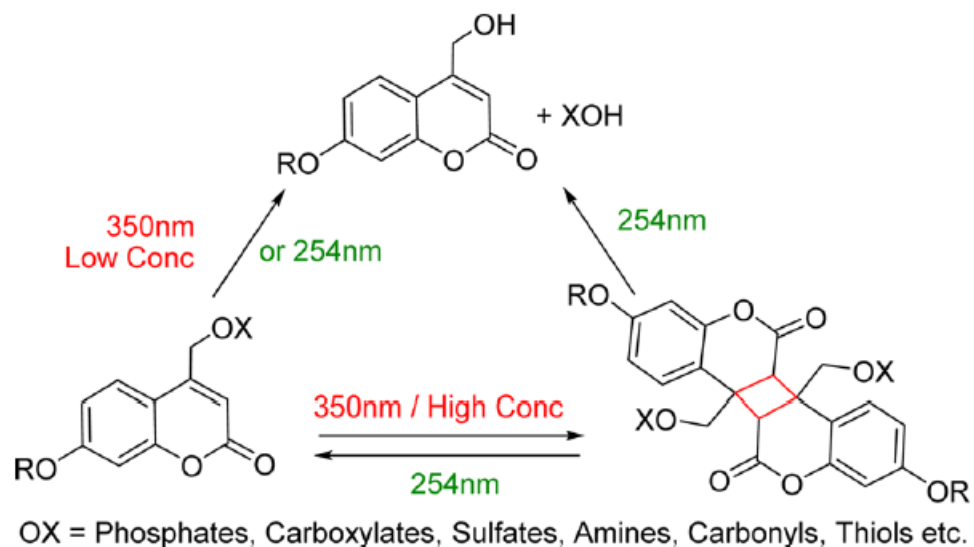
รูปที่ 9 ผลของคูมารินและอนุพันธ์คูมารินต่อการงอกของราก Avena [14]

## 2.2.2 การแตกพันธะด้วยแสงของคูมาริน



รูปที่ 10 การเชื่อมต่อและการแตกพันธะด้วยแสงของคูมาริน [15]

Song และคณะ [15] ได้อธิบายไว้ดังรูปที่ 10 Biotin และ Photoresponsive Molecule เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้หมู่เอสเทอร์คือ biotin-photoresponsive molecule (BPM) และน้ำ เมื่อ BPM ได้รับความชื้นและพลังงานจากแสง UV จะเกิดการแตกพันธะตรงหมู่ ester ของ BPM ที่



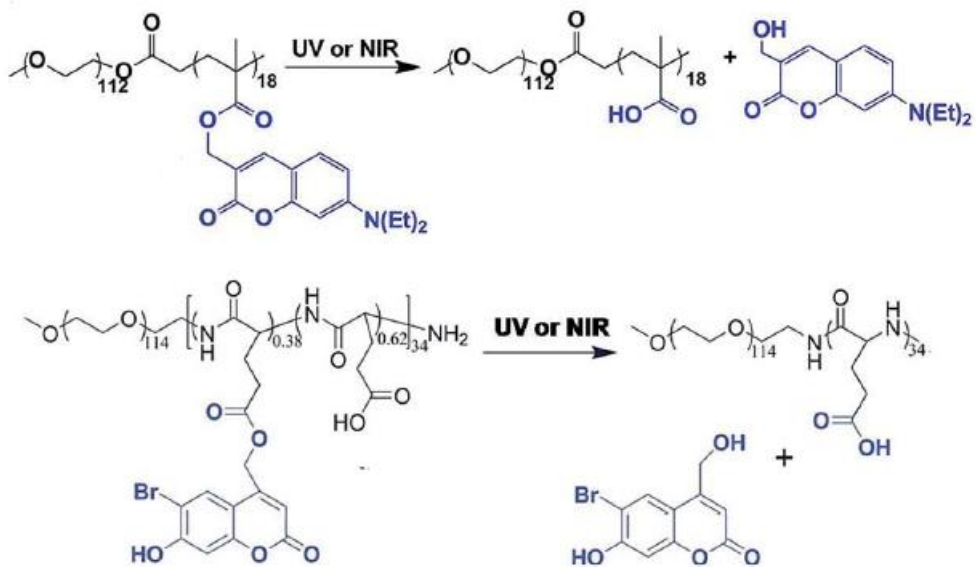
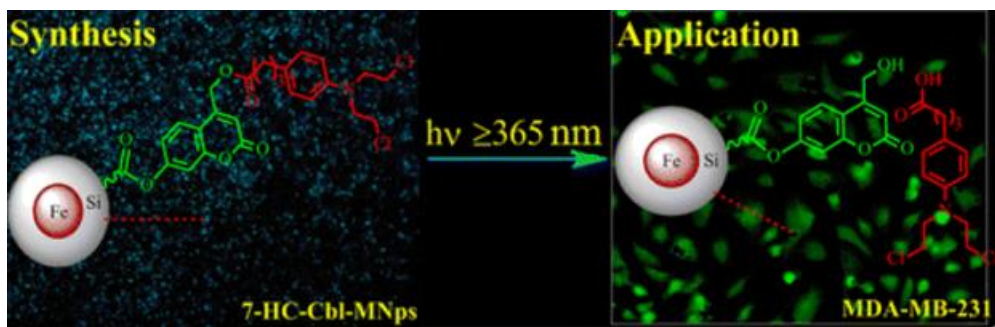
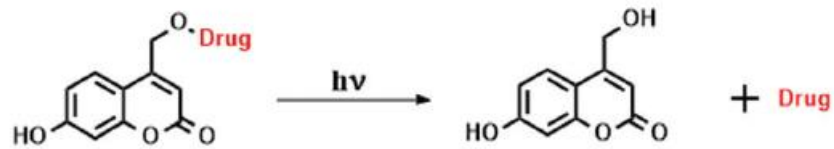
ตำแหน่งพันธะระหว่าง C-O ได้กลับมาเป็น Biotin และ Photoresponsive Molecule

รูปที่ 11 Photochemical reaction of coumarin compounds [16]

Murthy และคณะ [16] ได้อธิบายการแตกพันธะด้วยแสงดังแสดงในรูปที่ 11 เมื่อคูมาริน ได้รับความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรหรือ 350 นาโนเมตรในปริมาณความเข้มข้นต่ำ คูมารินจะแตกพันธะแล้วปลดปล่อยสารเป้าหมายออกมา และเมื่อคูมารินได้รับความยาวคลื่น 350 นาโน



เมตรในปริมาณความเข้มข้นสูง คูมารินจะสร้างพันธะระหว่างคูมารินด้วยกันแต่สามารถผันกลับได้หรือปลดปล่อยสารเป้าหมาย เมื่อได้รับแสงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

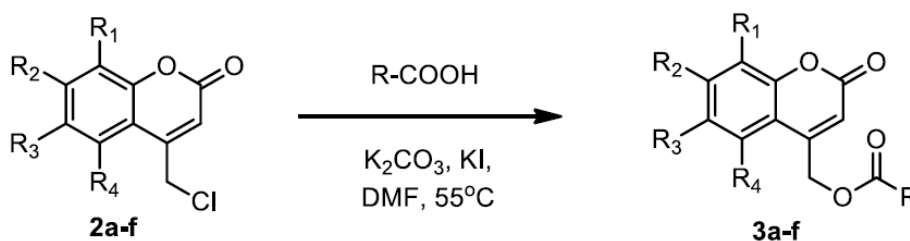


รูปที่ 12 ตัวอย่างการเกิด photoresponsive ของคูมาริน [17-19]

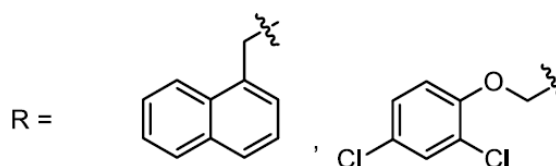
## 2.3 การสังเคราะห์อนุพันธ์คูมารินเชื่อมต่อกับสารอื่น ๆ

### 2.3.1 การสังเคราะห์อนุพันธ์คูมารินเชื่อมต่อกับ NAA และ 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid

สุทธิสินทอง [7] ได้ทำการสังเคราะห์อนุพันธ์คูมารินเชื่อมต่อกับฮอร์โมนพืชกลุ่มออกซิน 2 ชนิดคือ NAA และ 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid โดยมีหมู่แทนที่บนคูมารินที่แตกต่างกัน ในการเชื่อมต่อกับอนุพันธ์คูมารินและฮอร์โมนพืชจะทำปฏิกิริยาที่ 55 °C โดยมี โพแทสเซียมไฮโอไดด์, โพแทสเซียมคาร์บอเนต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว จึงทำการแยกสารให้บริสุทธิ์โดยวิธีโครมาโทกราฟี และในการศึกษาการแตกพันธะด้วยแสง พบว่ามีการแตกพันธะเอสเทอร์ให้อนุพันธ์ของคูมารินและสารออกฤทธิ์



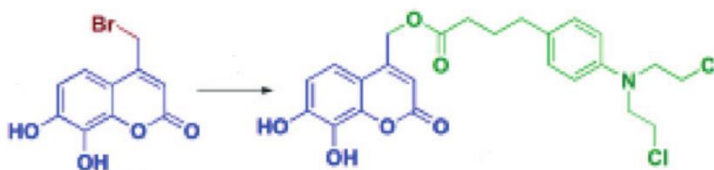
- a; R<sub>1</sub>=H, R<sub>2</sub>=OH, R<sub>3</sub>=H, R<sub>4</sub>=H  
 b; R<sub>1</sub>=H, R<sub>2</sub>=H, R<sub>3</sub>=OH, R<sub>4</sub>=H  
 c; R<sub>1</sub>=H, R<sub>2</sub>=OH, R<sub>3</sub>=H, R<sub>4</sub>=OH  
 d; R<sub>1</sub>=OH, R<sub>2</sub>=OH, R<sub>3</sub>=H, R<sub>4</sub>=H  
 e; R<sub>1</sub>=H, R<sub>2</sub>=OH, R<sub>3</sub>=OH, R<sub>4</sub>=H  
 f; R<sub>1</sub>=H, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>=OCH<sub>2</sub>O, R<sub>4</sub>=H



รูปที่ 13 การสังเคราะห์อนุพันธ์คูมารินเชื่อมต่อกับสารออกฤทธิ์ [7]

### 2.3.2 การสังเคราะห์ coumarin–chlorambucil conjugate

Moumita และคณะ [20] ได้ทำการสังเคราะห์ coumarin–chlorambucil conjugate เป็นการสังเคราะห์ 7,8-dihydroxy-4-bromomethyl coumarin เชื่อมต่อกับ chlorambucil โดยละลาย 7,8-dihydroxy-4-bromomethyl coumarin และ chlorambucil ใน dimethylformamide แล้วจึงใส่  $K_2CO_3$  ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง



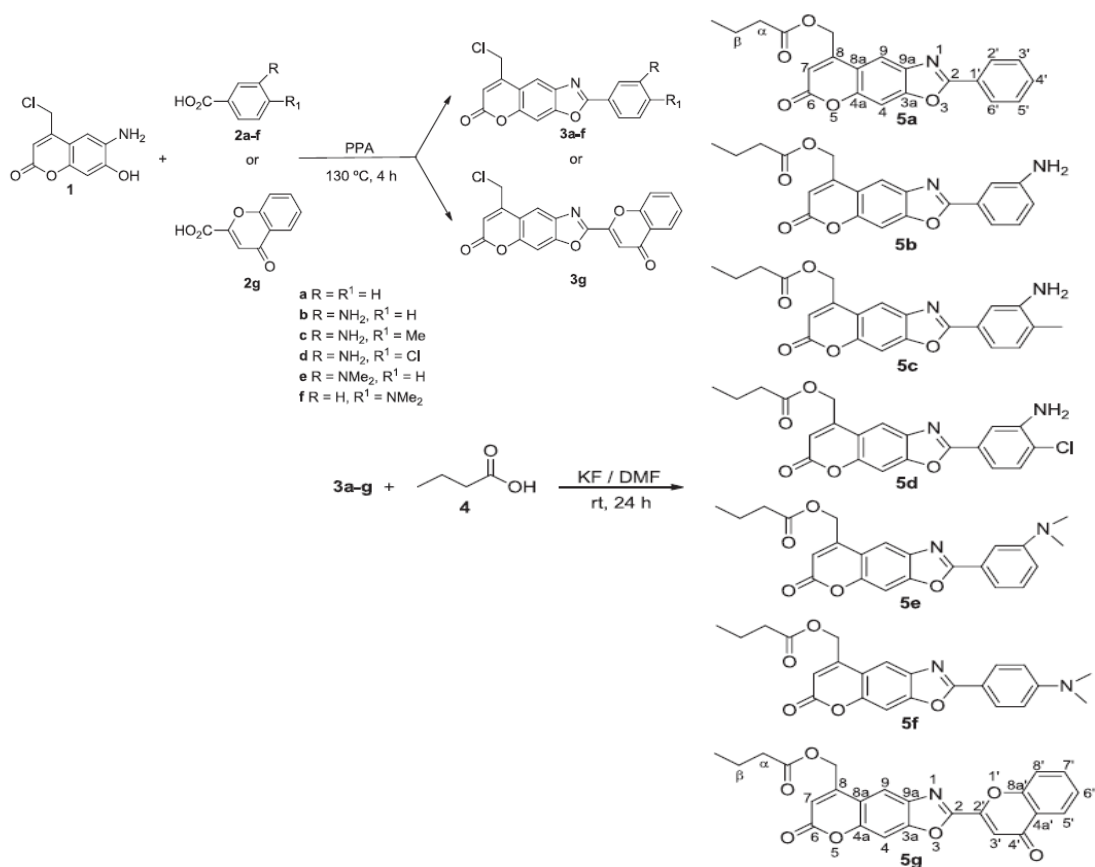
รูปที่ 14 การสังเคราะห์ coumarin–chlorambucil conjugate [20]

### 2.3.3 การสังเคราะห์ Coumarin–Chlorambucil Conjugate

Karthik และคณะ [18] ได้ทำการสังเคราะห์อนุพันธ์คูมารินเชื่อมต่อกับ Chlorambucil โดยละลาย 7-hydroxy-4-bromomethyl coumarin (0.100 g, 0.29 mmol) และ chlorambucil (0.088 g, 0.29 mmol) ใน dimethylformamide แล้วจึงใส่  $K_2CO_3$  (0.048 g, 0.34 mmol) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วทำให้สารบริสุทธิ์โดยการลงคอลัมน์โครมาโทกราฟี

### 2.3.4 การสังเคราะห์ butyric acid - coumarin fused oxazole heterocycles conjugate

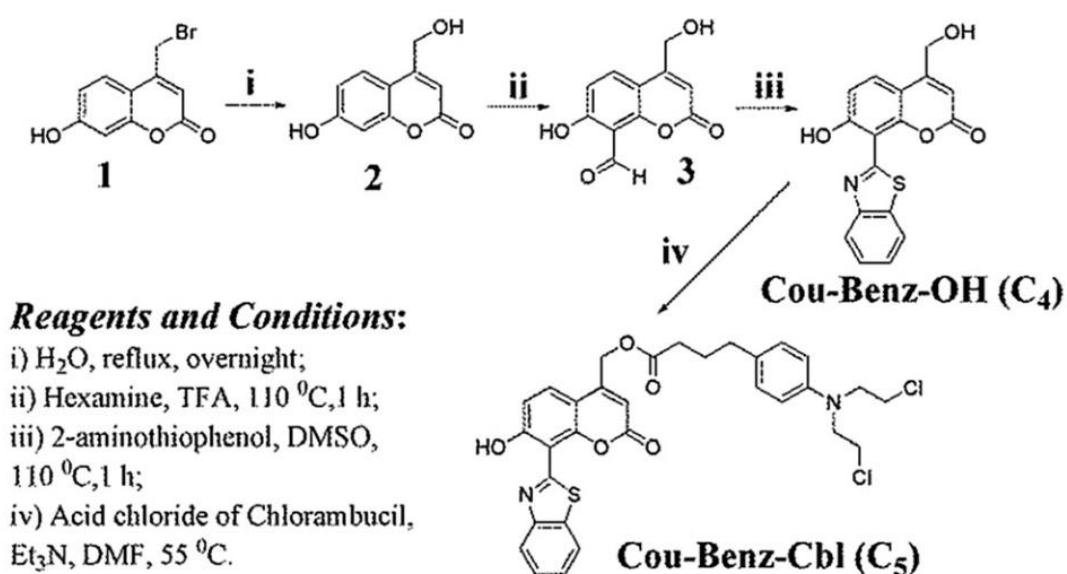
Ana และคณะ [21] ได้ทำการสังเคราะห์ butyric acid - coumarin fused oxazole heterocycles conjugate โดยใช้ coumarin fused oxazole heterocycles และ butyric acid เป็นสารตั้งต้นและใช้ potassium fluoride เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ละลายใน DMF ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการแยกสารให้บริสุทธิ์โดยวิธีโครมาโทกราฟี



รูปที่ 15 การสังเคราะห์ butyric acid cages based on 6-oxo-6H-benzopyrano[6,7-d]oxazol-8-yl)methyl groups [21]

### 2.3.5 การสังเคราะห์ Coumarin–benzothiazole–chlorambucil conjugate

Barman และคณะ [22] ได้ทำการสังเคราะห์ Coumarin–benzothiazole–chlorambucil conjugate โดยใช้ Chlorambucil ละลายใน oxalyl chloride และป่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง  $60^{\circ}\text{C}$  และทำให้แห้งในสุญญากาศ แล้วจึงนำไปละลายใน DMF เพื่อทำปฏิกิริยากับ 8-Benzothiazoyl-7-hydroxyl-4-(hydroxymethyl)-coumarin และเติม triethylamine ป่นกวนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง  $55^{\circ}\text{C}$  หลังจากสารละลายเย็นแล้วจึงนำไปสกัดด้วย ethyl acetate



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 16 การสังเคราะห์ Coumarin–benzothiazole–chlorambucil conjugate [22]

ตารางที่ 1 สรุปการสังเคราะห์อนุพันธ์คูมารินเชื่อมต่อกับสารอื่นๆ

อนุพันธ์คูมาริน	ตัวเชื่อม	สารละลาย	สถานะของปฏิกิริยา	การแยกผลิตภัณฑ์
อนุพันธ์คูมาริน	NAA, 2,4-D	DMF	55 °C, 2-3 ชั่วโมง	คอลัมน์โครมาโทกราฟี
7,8-dihydroxy-4-bromomethyl coumarin	chlorambucil	DMF	อุณหภูมิห้อง	N/A
7-hydroxy-4-bromomethyl coumarin	chlorambucil	DMF	อุณหภูมิห้อง 6 ชั่วโมง	N/A
coumarin fused oxazole heterocycles	butyric acid	DMF	อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง	คอลัมน์โครมาโทกราฟี
8-Benzothiazoyl-7-hydroxyl-4-(hydroxymethyl)-coumarin	Chlorambucil	DMF	55 °C, 8 ชั่วโมง	สกัดด้วย ethyl acetate

## 2.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้งานง่าย ดูแลรักษาง่าย ใช้พื้นที่ไม่มาก ติดตั้งง่าย ต้นทุนต่ำและสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายเนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนสภาวะการดำเนินงานได้หลากหลาย เครื่องปฏิกรณ์แบบกะจึงสามารถพบได้ในหลาย ๆ โรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมเคมี การบำบัดน้ำเสีย และอุตสาหกรรมยา เป็นต้น [23]

ในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ สารตั้งต้นทุกตัวจะถูกป้อนเข้าไปเครื่องปฏิกรณ์ในครั้งเดียวแล้วจึงเริ่มทำปฏิกิริยา ในระหว่างการทำปฏิกิริยาจะไม่มีสารใด ๆ ลงไปในเครื่องปฏิกรณ์ จนปฏิกิริยาแล้วเสร็จจึงนำสารออกมา ในการดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์มักมีการปั่นกวนและการให้ความร้อนหรือลดความร้อนแก่สารในเครื่องปฏิกรณ์



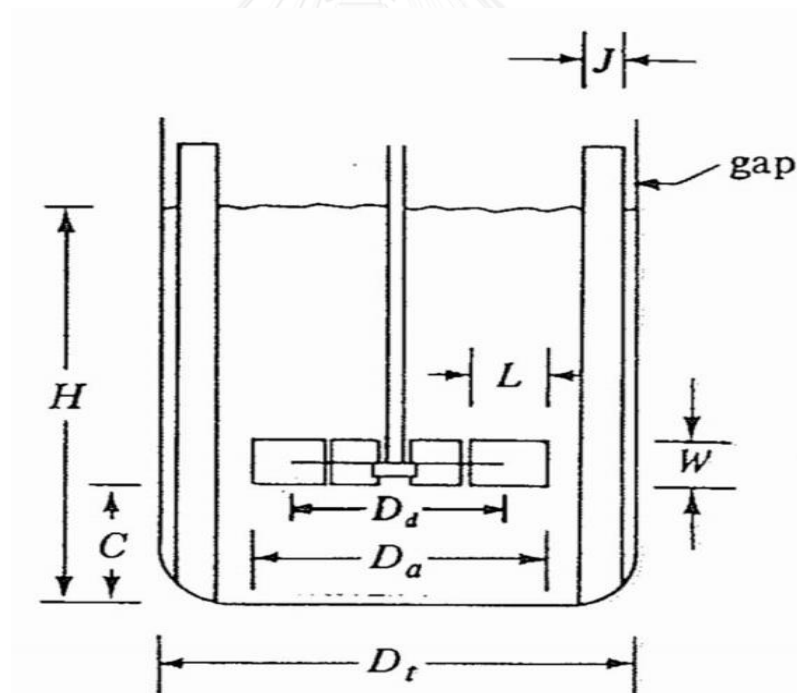
รูปที่ 17 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ [23]

เครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยทั่วไปจะเป็นแบบที่มีสัดส่วนมาตรฐาน (standard tank) ซึ่งสัดส่วนมาตรฐานนี้เป็นสัดส่วนมาตรฐานที่จะใช้ในการอ้างอิงในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการที่มีการปั่นกวนเนื่องจากเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมและให้การผสมที่ดีเพียงพอสำหรับ

กระบวนการส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ค่าสัดส่วนมาตรฐานนี้อาจไม่ใช่สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการบางกระบวนการ จึงอาจมีการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมกับแต่ละกระบวนการต่อไป ซึ่งสัดส่วนมาตรฐานได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะมาตรฐาน [24]

Impeller diameter/Tank diameter ( $D_a/D_t$ )	0.3-0.5
Impeller height from tank bottom/Tank diameter ( $C/D_t$ )	1/3
Impeller blade width/Impeller diameter ( $W/D_a$ )	1/5
Impeller blade length/Impeller diameter ( $L/D_a$ )	1/4
Liquid height/Tank diameter ( $H/D_t$ )	1
Baffle number	4
Baffle width/Tank diameter ( $J/D_t$ )	1/12



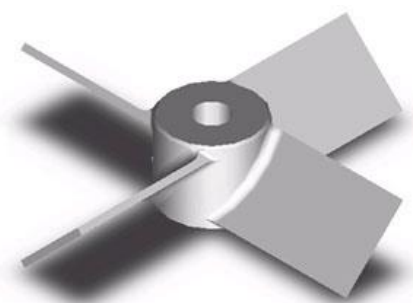
รูปที่ 18 เครื่องปฏิกรณ์มาตรฐาน [24]



## 2.5 การเลือกชนิดใบกวน

ชนิดของใบกวนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญในการกวนผสมสารเข้าด้วยกัน ใบกวนแต่ละชนิดทำให้เกิดทิศทางการไหลของสารที่แตกต่างกัน การเลือกใบกวนจึงควรเลือกให้ถูกต้องและเหมาะสมกับการใช้งาน ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกชนิดของใบกวน เช่น ทิศทางการไหลของสาร ความหนืดของสาร เป็นต้น

ใบกวนชนิด พิชเบลต (Pitched Blade Turbine) ตัวใบพัดส่วนใหญ่มักทำมุม  $45^{\circ}$  กับแกนของใบกวน มีจำนวนใบพัด 2, 4 ใบ เนื่องจากตัวใบพัดทำมุม  $45^{\circ}$  กับแกนของใบกวนจึงทำให้ทิศทางการไหลของสารเกิดขึ้นทั้งในแนวตั้ง (axial) และแนวรัศมี (radial) [13]



รูปที่ 19 ใบกวนชนิด พิชเบลต [13]

## 2.6 การขยายขนาดการผลิต

การขยายขนาดการผลิต (scale up) คือ การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์หรือกระบวนการการผลิตเพื่อเพิ่มกำลังในการผลิตให้มากขึ้น ซึ่งจะขยายขนาดจากระดับห้องปฏิบัติการ (lab scale) สู่กระบวนการผลิตในขนาดใหญ่ขึ้น คือ ระดับนำร่อง (pilot scale) และระดับอุตสาหกรรม (industrial scale)

ในการขยายขนาดของกระบวนการผลิตสารเคมีนั้นไม่สามารถขยายขนาดตามสัดส่วนทางเรขาคณิตได้โดยตรง จำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นภายหลังจากการขยายขนาด เนื่องจากกระบวนการผลิตที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมีความแตกต่างจากกระบวนการขนาดเล็ก ไม่ว่าจะเป็นในด้านของการถ่ายเทมวล การถ่ายเทความร้อน การควบคุมอุณหภูมิ ความดัน การผสม เวลาและการควบคุมกระบวนการ รวมไปถึงการจัดการความปลอดภัยในกระบวนการขนาดเล็กอาจทำได้ง่ายกว่าและใช้เวลาน้อยกว่ากระบวนการขนาดใหญ่ นอกจากนี้หากเกิดความผิดพลาดในกระบวนการขนาดใหญ่อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างมาก ผลกระทบบางอย่างอาจไม่พบในกระบวนการขนาดเล็ก

แต่ส่งผลในกระบวนการขนาดใหญ่ ดังนั้นการศึกษาการขยายขนาดจึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบกระบวนการผลิต

ในการทำการขยายขนาดกระบวนการนั้นจำเป็นต้องกำหนดวัตถุประสงค์ในการทำการขยายกระบวนการ วัตถุประสงค์ที่กำหนดนั้นคือสิ่งที่ต้องการให้เกิดขึ้นเหมือนกันในกระบวนการขนาดเล็กและขนาดใหญ่ วัตถุประสงค์ที่กำหนดจะเป็นตัวกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขยายขนาดกระบวนการนั้น ๆ ในทางทฤษฎีการขยายขนาดที่สมบูรณ์แบบระบบทั้งสองขนาดจะต้องมีความคล้ายคลึงกันอย่างสมบูรณ์ (Complete similarity) ซึ่ง Complete similarity นี้จะเกิดขึ้นได้ต้องผ่านเงื่อนไข 3 อย่าง คือต้องมีความคล้ายคลึงกันดังนี้ [25]

1. ความคล้ายคลึงกันทางเรขาคณิต (Geometric similarity) หมายถึง โมเดล (model) ที่ใช้ต้องมีรูปร่างเช่นเดียวกับต้นแบบ (prototype) และมีสัดส่วนที่เหมือนกัน
2. ความคล้ายคลึงกันทางจลนศาสตร์ (Kinematic similarity) หมายถึง ความเร็วที่ ณ จุดๆ ใดในการเคลื่อนที่ของโมเดลต้องเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็ว ณ จุดที่สอดคล้องกันในต้นแบบ
3. ความคล้ายคลึงกันทางพลศาสตร์ (Dynamics similarity) หมายถึง แรงที่กระทำให้เกิดการไหลในโมเดลต้องเป็นสัดส่วนที่คงที่ต่อแรงที่สอดคล้องกันที่ทำให้เกิดการไหลในต้นแบบ

ในการขยายขนาดโดยทั่วไปจะกำหนดให้ตัวแปรไร้หน่วยทุกตัวที่อยู่ในระบบมีค่าเท่ากัน โดยตัวแปรไร้หน่วยมีวิธหามาได้หลายวิธี เช่น การใช้วิธีการวิเคราะห์มิติ (Dimensional analysis) แต่ในความเป็นจริงแล้วการทำให้กระบวนการที่มีขนาดต่างกันมีความคล้ายคลึงกันอย่างสมบูรณ์นั้นแทบเป็นไปไม่ได้เลย ดังนั้นในการขยายขนาดจึงเริ่มต้นจากการทำให้กระบวนการมีความคล้ายคลึงกันทางเรขาคณิตก่อนซึ่งเป็นสิ่งที่ง่ายที่สุด ซึ่งในการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนจะใช้ถังกวนที่มีขนาดและสัดส่วนมาตรฐาน และขยายขนาดโดยกำหนดให้ปัจจัยการขยายขนาดบางตัวมีค่าคงที่ เช่น ความเร็วที่ปลายใบกวนคงที่ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) มีค่าคงที่ เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเดียวที่สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้ปัจจัยการขยายขนาดที่ต้องการศึกษามีค่าคงที่เพื่อหาความสัมพันธ์ในการขยายขนาดได้คือความเร็วรอบในการปั่นกวน [25]

### หลักการพื้นฐานในการขยายขนาดการผลิต (The General Scale-up Method) [25]

1. กำหนดวัตถุประสงค์ในการขยายขนาด (scale-up objectives)
2. ต้องเข้าใจกระบวนการ ต้องทราบว่าอะไรเป็นตัวควบคุมกลไกของกระบวนการ
3. ต้องทราบสภาวะทางกายภาพและเคมีของกระบวนการ และทราบรูปแบบการไหล (flow regimes)
4. เริ่มขยายขนาดโดยให้มี Geometric similarity
5. จากข้อมูลและความสัมพันธ์ต่าง ๆ จะได้วิธีการขยายขนาด โดยรูปทรงทางเรขาคณิตจะได้จาก Geometric similarity
6. วิเคราะห์และตัดสินใจว่าการขยายขนาดประสบความสำเร็จหรือไม่ สมเหตุสมผลหรือไม่
7. ถ้าการขยายขนาดประสบความสำเร็จก็จบ แต่ถ้าไม่สำเร็จต้องเลือกทางเลือกอื่นในการขยายขนาด

การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนจะขยายขนาดตามสัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ โดยยึดตามรูปทรงสมมาตรของถัง ในการคำนวณอัตราส่วนการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนจะอ้างอิงจากสัดส่วนมาตรฐานของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งความสูงของของเหลวมีค่าเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง ( $H=D_t$ )

จะได้ปริมาตรของถังกวนใบที่ 1 ดังนี้

$$V_1 = \left( \frac{\pi D_{t1}^2}{4} \right) H_1 = \left( \frac{\pi D_{t1}^3}{4} \right) \quad (1)$$

โดยที่  $V_1$  คือ ปริมาตรของถังกวนใบที่ 1

$D_1$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของถังกวนใบที่ 1

$H_1$  คือ ความสูงของถังกวนใบที่ 1

และได้ปริมาตรของถังกวนใบที่ 2 ดังนี้

$$V_2 = \left( \frac{\pi D_2^2}{4} \right) H_2 = \left( \frac{\pi D_2^3}{4} \right) \quad (2)$$

โดยที่  $V_2$  คือ ปริมาตรของถังกวนใบที่ 2

$D_2$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของถังกวนใบที่ 2

$H_2$  คือ ความสูงของถังกวนใบที่ 2

เมื่อนำสมการที่ (2) หาด้วยสมการที่ (1) จะได้

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\left( \frac{\pi D_2^3}{4} \right)}{\left( \frac{\pi D_1^3}{4} \right)} = \left( \frac{D_2^3}{D_1^3} \right) \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาจากความคล้ายคลึงกันทางเรขาคณิต อัตราส่วนการขยายขนาด ( $R$ ) จะแปรผันตามความเร็วรอบในการปั่นกวนและเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน

$$R \propto N^c D^d$$

โดยที่  $N$  คือ ความเร็วรอบในการปั่นกวน

$D$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน

อัตราส่วนการขยายขนาดนี้สามารถอธิบายได้จากกำลังต่อปริมาตร

$$\frac{P}{V} \propto N^a D^b$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

$$N \propto \left(\frac{P}{V}\right)^{\frac{1}{a}} / D^{\frac{b}{a}}$$

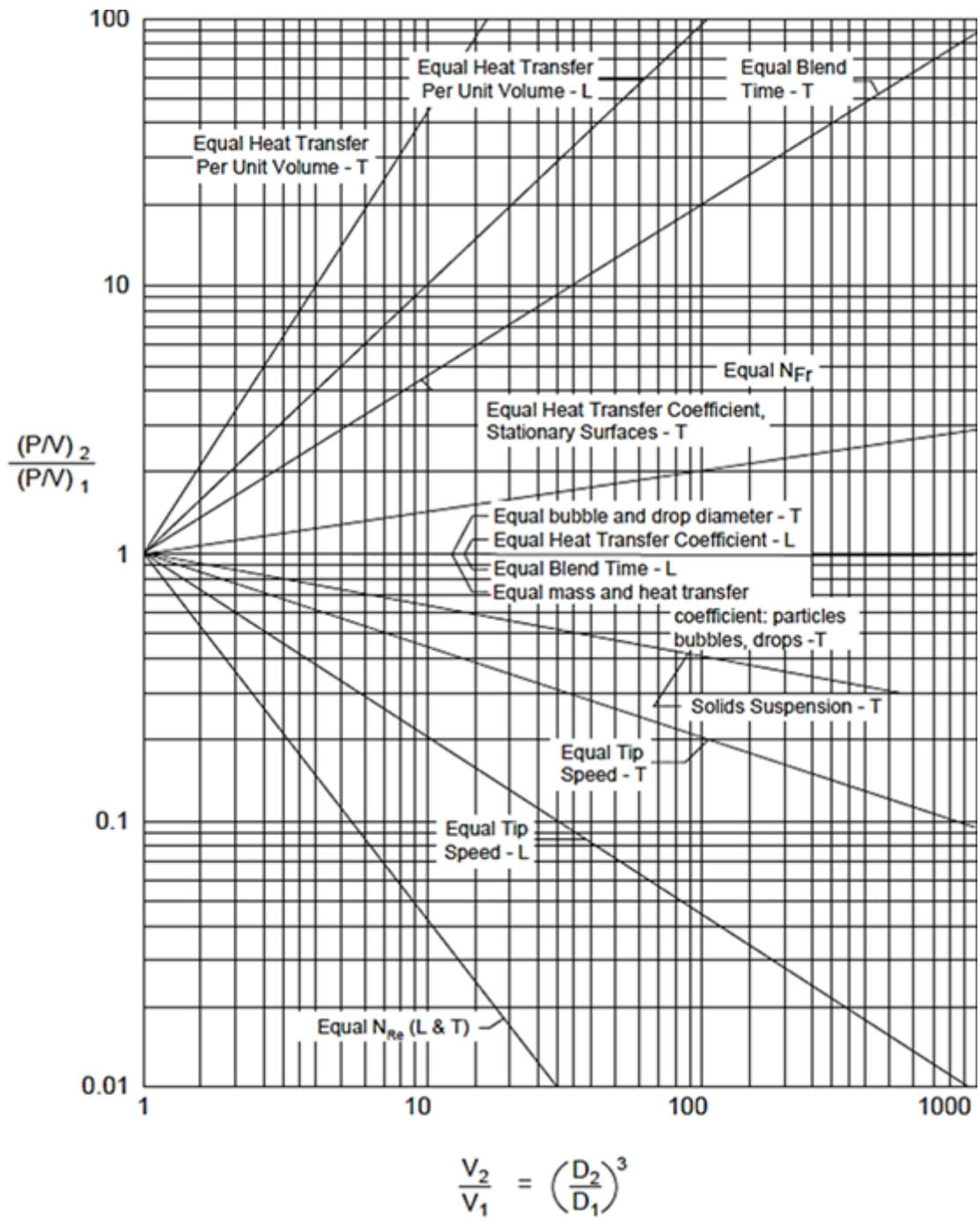
$$R \propto \left(\frac{P}{V}\right)^{\frac{c}{a}} / D^{\frac{b-ad}{c}}$$

$$R \propto \left(\frac{P}{V}\right)^{\frac{c}{a}} / V^{\frac{b-ad}{c}}$$

$$\frac{(P/V)_2}{(P/V)_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\frac{b-ad}{c}}$$

(4)

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{(P/V)_2}{(P/V)_1}$  และ  $\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$  แสดงไว้ในรูปที่ 20



รูปที่ 20 กราฟแสดงการหาอัตราส่วนการขยายขนาดกำลังต่อปริมาตร [26]

การคำนวณอัตราส่วนการขยายขนาดสามารถคำนวณได้จากกราฟการหาอัตราส่วนการขยายขนาดกำลังการปั่นกวต่อปริมาตรในรูปที่ 20 โดยกำหนดให้ค่าใดค่าหนึ่งดังต่อไปนี้ในการปั่นกวของถังกวนขนาดเล็กและถังกวนขนาดใหญ่มีค่าเท่ากัน

1. อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรของถังกวนมีค่าเท่ากัน ในสภาวะที่ของไหลมีการไหลแบบปั่นป่วน (Equal Heat Transfer per unit volume - Turbulent)
2. อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรของถังกวนมีค่าเท่ากัน ในสภาวะที่ของไหลมีการไหลแบบราบเรียบ (Equal Heat Transfer per unit volume - Laminar)
3. เวลาในการปั่นกวนมีค่าเท่ากัน ในสภาวะที่ของไหลมีการไหลแบบปั่นป่วน (Equal Blend Time - Turbulent)
4. ตัวเลขฟรูดของถังกวน (Froude number,  $Fr$ ) มีค่าเท่ากัน (Equal  $N_{Fr}$ )
5. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของถังกวนมีค่าเท่ากัน ในสภาวะที่ของไหลมีการไหลแบบปั่นป่วน (Equal Heat Transfer Coefficient - Turbulent )
6. เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองน้ำและหยดน้ำมีค่าเท่ากัน ในสภาวะที่ของไหลมีการไหลแบบปั่นป่วน (Equal bubble and drop diameter - Turbulent)
7. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของถังกวนมีค่าเท่ากัน ในสภาวะที่ของไหลมีการไหลแบบราบเรียบ (Equal Heat Transfer Coefficient - Laminar )
8. เวลาในการปั่นกวนมีค่าเท่ากัน ในสภาวะที่ของไหลมีการไหลแบบราบเรียบ (Equal Blend Time - Laminar)
9. สัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทมวลสารของถังกวนมีค่าเท่ากัน ในสภาวะที่ของไหลมีการไหลแบบปั่นป่วน (Equal mass and heat Transfer Coefficient - Turbulent)
10. การกระจายตัวอนุภาคของของแข็งในถังกวนมีค่าเท่ากัน ในสภาวะที่ของไหลมีการไหลแบบปั่นป่วน (Equal Solid Suspension - Turbulent)
11. ความเร็วที่ปลายใบกวนมีค่าเท่ากัน ในสภาวะที่ของไหลมีการไหลแบบปั่นป่วน (Equal Tip Speed - Turbulent)
12. ความเร็วที่ปลายใบกวนมีค่าเท่ากัน ในสภาวะที่ของไหลมีการไหลแบบราบเรียบ (Equal Tip Speed - Laminar )

13. ตัวเลขเรย์โนลของถังกวนมีค่าเท่ากัน ในสถานะที่ของไหลมีการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน (Equal  $N_{Re}$  - Laminar and Turbulent)

ตัวอย่างสมการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการขยายขนาดในกรณีต่างๆ

1. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากัน

$$h_1 = h_2$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะแปรผันตามความเร็วรอบในการปั่นกวนและ

เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน ( $h \propto N^x D^{x/2}$ ) จะได้ว่า

$$N_1^x D_1^{x/2} = N_2^x D_2^{x/2}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

โดยที่  $h_1, h_2$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับผนังของถังกวนใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (วัดต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส)

$N_1, N_2$  คือ ความเร็วรอบของใบกวนของถังใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (รอบต่อนาที)

$D_1, D_2$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวนของถังใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (เมตร)



จากความสัมพันธ์ของตัวแปรในการขยายขนาด สามารถเขียนสมการทั่วไปในการคำนวณ  
ความเร็วรอบในการปั่นกววนในเครื่องปฏิกรณ์ได้ดังนี้

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^n$$

โดยที่  $N_1, N_2$  คือ ความเร็วรอบของใบกวนของถังใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (รอบต่อนาที)  
 $D_1, D_2$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวนของถังใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (เมตร)  
 $n$  คือ ค่าเอมพิริคัลและค่าเชิงทฤษฎี

## 2. ความเร็วปลายใบกวนมีค่าเท่ากัน

$$v = \omega R = \omega \frac{D}{2}$$

โดยที่  $v$  คือ ความเร็วปลายใบกวน  
 $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมในการกวน  
 $R$  คือ รัศมีของใบกวน  
 $D$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน (เมตร)

เมื่อกำหนดให้ความเร็วปลายใบกวนมีค่าเท่ากัน จะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$v_1 = v_2$$

$$\omega_1 \frac{D_1}{2} = \omega_2 \frac{D_2}{2}$$

โดยที่  $\omega_1, \omega_2$  คือ ความเร็วเชิงมุมในการกวนของถังใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ  
 $D_1, D_2$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวนของถังใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (เมตร)

เมื่อ  $\omega = 2\pi N$  โดยที่  $N$  คือ ความเร็วรอบของใบกวน จะได้ว่า

$$2\pi N_1 \frac{D_1}{2} = 2\pi N_2 \frac{D_2}{2}$$

$$N_1 D_1 = N_2 D_2$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^1$$

### 3. กำลังต่อปริมาตรหรืออัตราการถ่ายเทมวลมีค่าเท่ากัน

ตัวเลขกำลัง (Power number) เป็นตัวเลขไร้มิติที่แสดงความสัมพันธ์ของแรงต้าน (resistance force) และแรงเฉื่อย (inertia force) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$N_P = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

โดยที่	$N_P$	คือ ตัวเลขกำลัง (power number)
	$P$	คือ กำลัง (วัตต์)
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	$D$	คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน (เมตร)
	$N$	คือ ความเร็วรอบของใบกวน (รอบต่อนาที)

เมื่อกำหนดให้ตัวเลขกำลังต่อปริมาตรมีค่าเท่ากัน จะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{N_{P1}}{V_1} = \frac{N_{P2}}{V_2}$$

$$\frac{P_1}{\rho V_1 N_1^3 D_1^5} = \frac{P_2}{\rho V_2 N_2^3 D_2^5}$$

กรณีที่สารในถังกวนใบที่ 1 และ 2 เป็นสารชนิดเดียวกัน ( $\rho_1 = \rho_2$ ) จะได้

$$\frac{P_2/V_2}{P_1/V_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5$$

เมื่อ  $V = \pi \frac{D_t^3}{4}$  และ  $D_t \propto D$  เนื่องจากเป็นถังกวนมาตรฐาน จะได้ว่า

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{\frac{2}{3}}$$

#### 4. ค่าตัวเลขเรย์โนลของถังกวนมีค่าเท่ากัน

ค่าตัวเลขเรย์โนลของถังกวนมีค่าเท่ากัน ตัวเลขเรย์โนล (Reynolds number) เป็นตัวเลขที่ใช้อธิบายลักษณะการไหลของของไหลที่แตกต่างกัน โดยอยู่ในรูปของอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงจากความหนืด ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$Re = \frac{\rho v D_p}{\mu} = \frac{\rho D^2 N}{\mu}$$

โดยที่ Re	คือ ตัวเลขเรย์โนล (Reynolds number)
$\rho$	คือ คือความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
V	คือ ความเร็วในการไหล (เมตรต่อวินาที)
$D_p$	คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ (เมตร)
D	คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน (เมตร)
N	คือ ความเร็วรอบของใบกวน (รอบต่อวินาที)
$\mu$	คือ ความหนืดของของไหล (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

เมื่อกำหนดให้ตัวเลขเรย์โนลของถังกวนมีค่าเท่ากันจะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Re_1 = Re_2$$

$$\frac{\rho_1 D_1^2 N_1}{\mu_1} = \frac{\rho_2 D_2^2 N_2}{\mu_2}$$

โดยที่  $Re_1, Re_2$  คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของถังกวนใบที่ 1 และ 2

$\rho_1, \rho_2$  คือ คือความหนาแน่นของของไหลในถังกวนใบที่ 1 และ 2 (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$D_1, D_2$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวนใบที่ 1 และ 2 (เมตร)

$N_1, N_2$  คือ ความเร็วรอบของใบกวนของถังกวนใบที่ 1 และ 2 (รอบต่อนาที)

$\mu_1, \mu_2$  คือ ความหนืดของของไหล (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

สำหรับสารภายในถังกวนใบที่ 1 และ 2 เป็นสารชนิดเดียวกัน

$$\rho_1 = \rho_2$$

$$\mu_1 = \mu_2$$

จะได้ว่า

$$D_1^2 N_1 = D_2^2 N_2$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$N_2 = N_1 \frac{D_1^2}{D_2^2} = N_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

## 5. ค่าตัวเลขฟรูดของถังกวนมีค่าเท่ากัน

ตัวเลขฟรูด คือ อัตราส่วนของแรงเนื่องจากความเฉื่อยกับแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$Fr = \frac{DN^2}{g}$$

โดยที่	Fr	คือ	ตัวเลขฟรูด (Froude number)
	D	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน (เมตร)
	N	คือ	ความเร็วรอบของใบกวน (รอบต่อนาที)
	g	คือ	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อตารางวินาที)

เมื่อกำหนดให้ตัวเลขฟรูดของถังกวนมีค่าเท่ากันจะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Fr_1 = Fr_2$$

$$\frac{D_1 N_1^2}{g} = \frac{D_2 N_2^2}{g}$$

โดยที่	$Fr_1, Fr_2$	คือ	ตัวเลขฟรูดของถังกวนใบที่ 1 และ 2
	$D_1, D_2$	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวนใบที่ 1 และ 2 (เมตร)
	$N_1, N_2$	คือ	ความเร็วรอบของใบกวนของถังกวนใบที่ 1 และ 2 (รอบต่อนาที)

เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากัน จะได้ว่า

$$D_1 N_1^2 = D_2 N_2^2$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$N_2 = N_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{1/2}$$

**ตารางที่ 3** ค่าเอ็มพีริคัลและค่าเชิงทฤษฎี (n) ระหว่างความสัมพันธ์ของความเร็วรอบในการปั่นกวน กับเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนในกรณีต่าง ๆ [24]

Objectives	n
Equal Re	2
Equal Fr	1/2
Equal tip speed	1
Equal power per unit volume, Equal rate of mass transfer	2/3
Equal heat transfer coefficient	1/2
Equal suspension of solid	3/4
Equal complete mixing time	0

## 2.7 การขยายขนาดถึงกวน

### 2.7.1 การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวน สำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทริน

เอี่ยมกุลวรพงษ์ [27] ได้ทำการศึกษาการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวน สำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทรินในเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนขนาด 0.5, 2, 15 ลิตรตามลำดับ โดยมีการหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมกับปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตรโดยศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราส่วนสารลักษณะการเติมสาร พบว่าตัวแปรที่สำคัญของระบบคืออัตราการละลายของพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรได้ศึกษาความเร็วรอบในการปั่นกวนและการเปลี่ยนตำแหน่งใบกวนพบว่าที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาทีขึ้นไปให้ร้อยละผลได้เหมือนกับห้องปฏิบัติการ การถ่ายเทมวลไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ สารเกิดการฟุ้งกระจายดีไม่น้อยกัน และในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตรที่ความเร็วการปั่นกวน 220 รอบต่อนาทีได้ผลเหมือนกับในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ซึ่งความเร็วรอบในการปั่นกวนเป็นไปตามความสัมพันธ์การฟุ้งกระจายของของแข็ง

### 2.7.2 การขยายขนาดการสังเคราะห์ไซโคลเด็กซ์ทรินเชื่อมกับไคโตซาน

ไพบูลย์ [28] ได้ทำการศึกษาการขยายขนาดการสังเคราะห์ไซโคลเด็กซ์ทรินเชื่อมกับไคโตซานในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร 2 ลิตร และ 10 ลิตรตามลำดับ โดยทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร พบว่ายิ่งเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ปฏิกิริยายิ่งเกิดดีขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 95 องศาเซลเซียสทำให้สารเกิดการเสื่อมสภาพ เวลาในการทำปฏิกิริยายังนานปฏิกิริยายิ่งเกิดได้ดี แต่เมื่อเวลามากกว่า 30 ชั่วโมง ร้อยละการแทนที่ของเบตาไซโคลเด็กซ์ทรินบนสายโซ่ไคโตซานมีค่าค่อนข้างคงที่ ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรพบว่าความเร็วรอบในการปั่นกวนที่เหมาะสมคือ 450 รอบต่อนาที การลดความเร็วรอบจะส่งผลกระทบต่ออัตราการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสและหากเพิ่มความเร็วจะทำให้เกิดฟองอากาศขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา จากการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนถือเป็นอัตราส่วนการขยายที่เหมาะสมที่สุด

### 2.7.3 การขยายขนาดการสังเคราะห์ควอเทอร์ไนซ์ไซโคลเดกซ์ทรินเชื่อมโคโตซาน

ใจสัจย์ [25] ได้ทำการศึกษาการขยายขนาดการสังเคราะห์ควอเทอร์ไนซ์ไซโคลเดกซ์ทรินเชื่อมโคโตซานในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร 2 ลิตร และ 10 ลิตร ตามลำดับ โดยทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ผลกระทบของอัตราส่วนของจำนวนโมลของไกลซิดิลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ต่อหมู่อะมิโน เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่อระดับของควอเทอร์ไนเซชัน พบว่าที่อัตราส่วนของจำนวนโมลของสารตั้งต้นเท่ากับ 7 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ 6 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมของปฏิกิริยานี้ และพบว่าไซโคลเดกซ์ทรินที่ถูกกราฟต์บนโคโตซานไม่มีผลต่อแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร พบว่าที่ความเร็วรอบของใบกวนเท่ากับ 500 รอบต่อนาที ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีระดับของควอเทอร์ไนเซชันเข้าสู่ร้อยละ 100 เช่นเดียวกับผลที่เกิดขึ้นในขนาด 250 มิลลิลิตร และในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรพบว่าสารที่ได้มีระดับของควอเทอร์ไนเซชันเข้าสู่ร้อยละ 100 เมื่อความเร็วรอบเท่ากับ 358 รอบต่อนาทีซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่

### 2.7.4 การขยายขนาดของถังกวนโดยดูการกระจายตัวของของแข็ง

Annett และคณะ [29] ได้ศึกษาการไหลของสารและการกระจายตัวของสารเมื่อได้รับผลจากการขยายขนาดโดยดูจากแรงดันไฟฟ้า ในการทดลองได้นำฟางข้าวสาลิมาใช้แทนสารที่เป็น ของแข็ง แล้วทำการปั่นกวนโดยทำการปรับเปลี่ยนขนาดและความเข้มข้นของประมาณฟางข้าวสาลิมาโดยในระดับห้องปฏิบัติการใช้ถังกวนผสมขนาด 0.1 m<sup>3</sup> และขยายขนาดไปเป็น 1 m<sup>3</sup> จากการศึกษาพบว่าขนาดของของแข็งและความเข้มข้นเป็นปัจจัยสำคัญในการกระจายตัวของของแข็งเมื่อต้องการขยายขนาดการผลิต



### บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (7-hydroxy-4 chloromethyl Coumarin)
- 3.1.2 กรดอินโดล-3- บิวทีริก (Indole-3- butyric acid) บริษัท Tokyo chemical industry ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.3 โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium Carbonate) บริษัท Carlo Erba group
- 3.1.4 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium Iodide) บริษัท Carlo Erba group
- 3.1.5 ไดเมทิลฟอรั่มารไมด์ (Dimethylformamide, DMF)
- 3.1.6 น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องปั่นกวนสาร Magnetic stirrer regulator hotplate รุ่น Heidolph MR 3001 บริษัท ITS (Thailand) Co., Ltd ประเทศไทย
- 3.2.2 เครื่องทำแห้งแบบสุญญากาศ (vacuum dryer)
- 3.2.3 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี (nuclear magnetic resonance, NMR) รุ่น ADVANCE AV 500 MHz บริษัท Bruker ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.2.4 ปัมสุญญากาศความดัน Vacuum-Pump system

### 3.2.5 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร



รูปที่ 21 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร ประกอบด้วย Round bottom flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิด้วย เครื่องปั่นกวนสาร Magnetic stirrer regulator hotplate โดยให้ความร้อนผ่านอ่างน้ำมัน (oil bath)

### 3.2.6 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร



รูปที่ 22 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร [13]

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ประกอบไปด้วย Jacketed Reactor ขนาด 2 ลิตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10.5 เซนติเมตร ใบกวนชนิดพิชเบลต (Pitched Blade Turbine) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ระบบสามารถควบคุมความเร็วรอบของการปั่นกวน สูงสุด 800 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิด้วย อ่างน้ำมันวน (Circulating bath)

### 3.2.7 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร



รูปที่ 23 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร [28]

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร ถังกวนทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) เกรด 316 เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร ใบกวนแบบพิชเบลต (pitch blade) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ระบบสามารถควบคุมความเร็วรอบของการปั่นกวน ในช่วง 100 – 500 รอบต่อนาที [28]

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.3.1 การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน เชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร

นำกรดอินโดล-3-ปิวิทริก 2.4125 กรัม โพแทสเซียมคาร์บอเนต 3.281 กรัม และ โพแทสเซียมไอโอไดด์ 1.97 กรัม ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปละลายใน ไดม์ทิลฟอร์มาร์-ไมด์ 79 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนแล้วจึงให้ความร้อนจนถึง  $55^{\circ}\text{C}$  ใส่ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน 2.5 กรัม ในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปละลายใน ไดม์ทิลฟอร์มาร์-ไมด์ 40 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนแล้วจึงให้ความร้อนจนถึง  $55^{\circ}\text{C}$  เมื่ออุณหภูมิถึง  $55^{\circ}\text{C}$  ผสมสารละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร และปั่นกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำสารออกมาใส่น้ำเย็น  $0^{\circ}\text{C}$  ปริมาตร 1 ลิตร รอให้สารตกตะกอนเป็นเวลา 96 ชั่วโมง จากนั้นนำสารไปกรองแยกของแข็งด้วยตัวกรองสุญญากาศ และล้างของแข็งด้วยน้ำแล้วจึงนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งสุญญากาศ

**ตารางที่ 4** สภาวะการดำเนินงานที่ศึกษาในการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิลคูมาริน เชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร

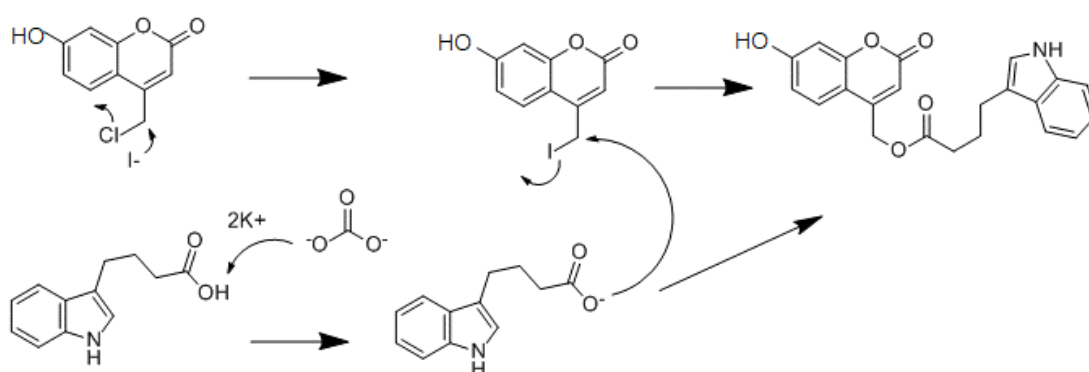
ตัวแปรที่ศึกษา	สภาวะ
อุณหภูมิในการตกตะกอน (องศาเซลเซียส)	5, 23
เวลาในการตกตะกอน (วัน)	1, 2, 3, 4, 10
อุณหภูมิของปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	50, 53, 55, 56, 57, 58, 60
เวลาในการทำปฏิกิริยา	15 นาที – 5 ชั่วโมง
อัตราส่วนโดยโมล (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : กรดอินโดล-3-ปิวิทริก)	1:1, 1:1.2, 1:1.5, 1:2, 1:3
อัตราส่วนโดยโมล (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : โพแทสเซียมคาร์บอเนต)	1:1, 1:1.5, 1:2

### 3.3.2 การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน เชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

นำกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก โพลแทสเซียมคาร์บอเนต และโพลแทสเซียมไอโอไดด์ ละลายใน ไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ปั่นกวนควบคุม อุณหภูมิที่ 55 °C ละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ในไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ ในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C เมื่ออุณหภูมิ ถึง 55 °C ผสมสารละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสารออกมาใส่น้ำเย็น 0°C รอให้สารตกตะกอน เป็นเวลา 4 วันที่อุณหภูมิ 23°C จากนั้นนำสารไปกรองเอาของแข็งด้วยตัวกรองสุญญากาศ และล้างของแข็งด้วยน้ำแล้วจึงนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งสุญญากาศ โดยอัตราส่วนของสารและสภาวะการดำเนินงานอ้างอิงจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 250 มิลลิลิตรและความเร็วของในกวนขณะปั่นกวนจะถูกกำหนดค่าที่ 200, 400, 600, 700 และ 800 รอบต่อนาที

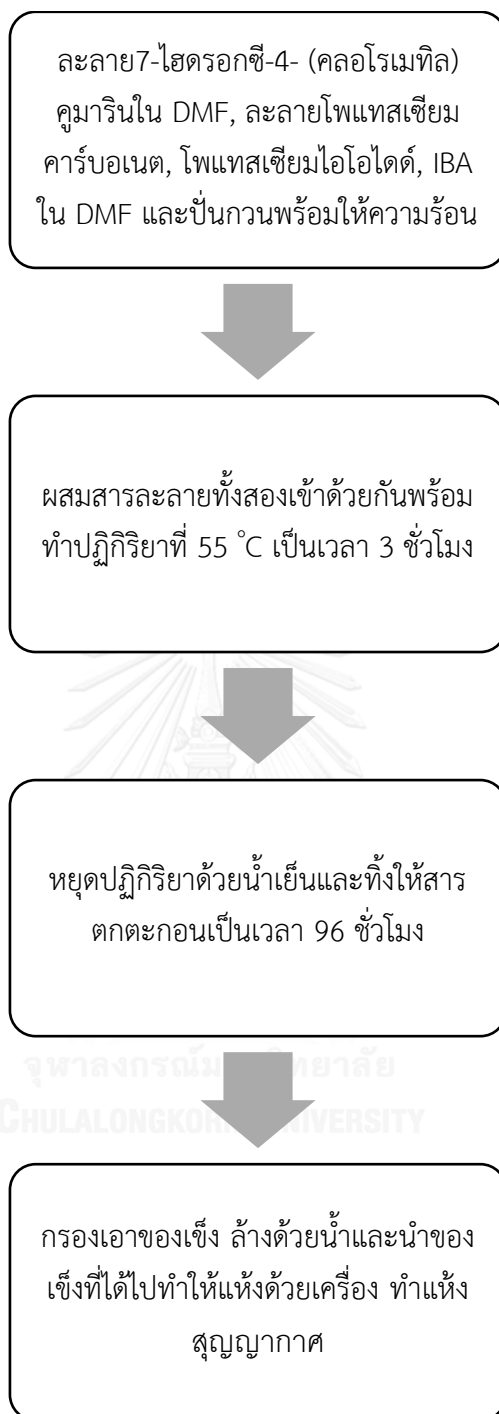
### 3.3.3 การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน เชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

นำกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก โพลแทสเซียมคาร์บอเนต และโพลแทสเซียมไอโอไดด์ ละลายใน ไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรพร้อมปั่นกวน ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C ละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ในไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ ในเครื่องปฏิกรณ์อีกเครื่องพร้อมปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C เมื่อ อุณหภูมิถึง 55 °C ถึงผสมสารละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ลงในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร และปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง(ทำการเปลี่ยนความเร็วรอบในการ กวนผสมสารในช่วง 200-600 รอบต่อนาที) นำสารออกมาใส่น้ำเย็น 0 °C รอให้สาร ตกตะกอนเป็นเวลา 4 วันที่อุณหภูมิ 23 °C จากนั้นนำสารไปกรองเอาของแข็งด้วยตัวกรอง สุญญากาศ และล้างของแข็งด้วยน้ำแล้วจึงนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งสุญญากาศ โดยอัตราส่วนของสารและสภาวะการดำเนินงานอ้างอิงจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดใน เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร



รูปที่ 24 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก





รูปที่ 25 แผนภาพการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน เชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก



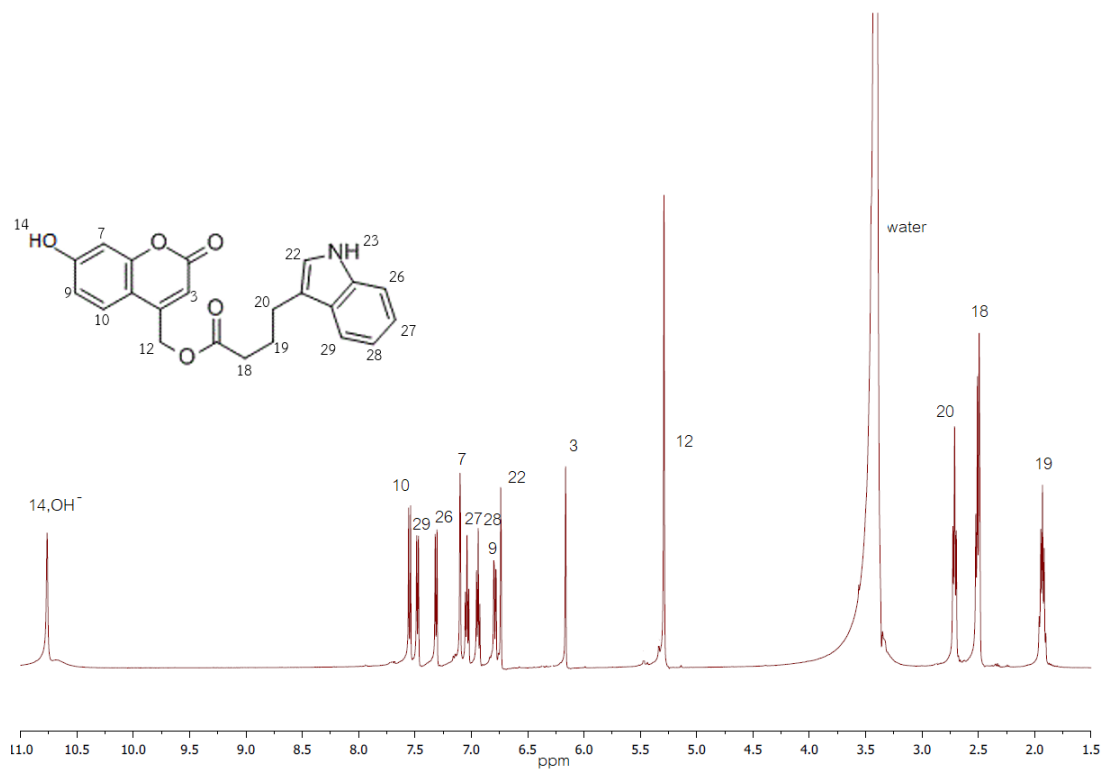
### 3.4 การวิเคราะห์สมบัติของสาร

#### 3.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของสาร

นำ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน เชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ละลายใน ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) และวิเคราะห์ทดสอบโครงสร้างของสารด้วยเทคนิค โพรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี ( $^1\text{H}$  NMR spectroscopy) โดยใช้เครื่อง NMR spectro meter Bruker Ascend™ 500 (ประเทศสวีตเซอร์แลนด์)



รูปที่ 26 เทคนิคโพรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี ( $^1\text{H}$  NMR spectroscopy)



รูปที่ 27 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน  
เชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก

ค่าสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน  
เชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก คือ  $^1\text{H NMR}$  (500 MHz, DMSO)  $\delta$  10.76 (s, -OH, 1H), 7.54 (d,  $J = 8.7$  Hz, 1H), 7.47 (d,  $J = 7.8$  Hz, 1H), 7.32 (d,  $J = 8.1$  Hz, 1H), 7.10 (s, 1H), 7.04 (t,  $J = 7.5$  Hz, 1H), 6.94 (t,  $J = 7.4$  Hz, 1H), 6.79 (d,  $J = 8.7$ , 2.0 Hz, 1H), 6.74 (d,  $J = 1.9$  Hz, 1H), 6.16 (s, 1H), 5.29 (s, 2H), 2.71 (t,  $J = 7.4$  Hz, 2H), 2.50 (t,  $J = 7.1$  Hz, 2H), 1.97 – 1.90 (m, 2H). โดยตำแหน่งที่ 3.33 ppm คือตำแหน่งของน้ำในตัวทำละลาย ไดเมทิลซัลฟอกไซด์

ตารางที่ 5 ตำแหน่งและอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-ปิวิตรีกที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (ใช้ตำแหน่งของโครงสร้างที่ 12 เป็นตำแหน่งอ้างอิง)

ตำแหน่งของโครงสร้าง	ตำแหน่งของกราฟ (ppm)	อัตราส่วนพื้นที่ ใต้กราฟ
3	6.16	1
7	7.10	1
9	6.79	1
10	7.54	1
12	5.29	2
14	10.76	1
18	2.50	2
19	1.97 – 1.90	2
20	2.71	2
22	6.74	1
26	7.32	1
27	7.04	1
28	6.94	1
29	7.47	1

CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.4.2 การคำนวณหาร้อยละผลได้ (%yield)

$$\% \text{ Yield} = \frac{\text{mol product}}{\text{mol of limiting reactant}} \times 100\%$$

- 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิลคูมารินที่เชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิตรีก น้ำหนักโมเลกุล 377.39 g/mol
- 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิลคูมาริน น้ำหนักโมเลกุล 210.614 g/mol

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

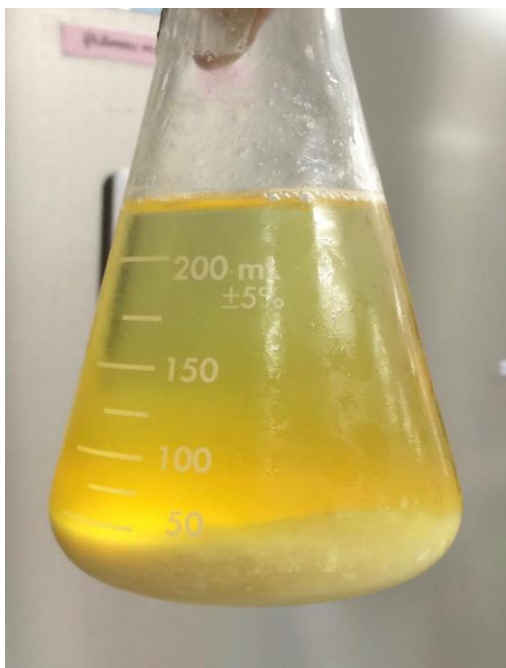
#### 4.1 การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริกขนาด 250 มิลลิลิตร

ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตรนี้ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์(kinematic) ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก เพื่อให้ได้สภาวะที่ได้ร้อยละผลได้สูงสุดและสารผลิตภัณฑ์ที่บริสุทธิ์ สามารถนำไปใช้ในการขยายขนาดไปสู่เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรและ 10 ลิตรต่อไป

##### 4.1.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการตกตะกอนต่อการแยกสาร

เนื่องจากการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ในระดับห้องปฏิบัติการโดยปกตินั้นจะแยกสารผลิตภัณฑ์โดยใช้วิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟี (Column Chromatography) แต่เนื่องจากในระดับอุตสาหกรรมนั้นไม่สามารถใช้วิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟีได้ เนื่องจากไม่มีหน่วยปฏิบัติการที่รองรับกับวิธีนี้ในงานวิจัยนี้จึงได้ปรับเปลี่ยนวิธีในการแยกสารโดยใช้วิธีการตกตะกอนแทนวิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟี โดยใช้น้ำในการตกตะกอนเนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ไม่ละลายน้ำ

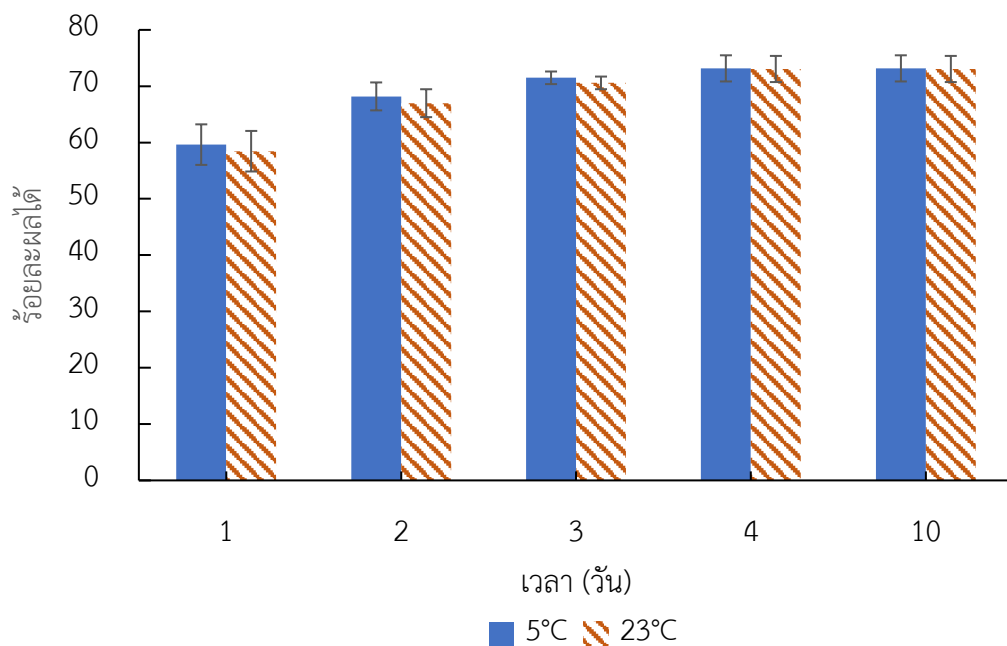
โดยนำกรดอินโดล-3-บิวทีริก 2.4125 กรัม โพแทสเซียมคาร์บอเนต 3.281 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 1.97 กรัมใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปละลายใน ไดเมทิลฟอร์มาร์-ไมด์ 79 มิลลิลิตรพร้อมปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C ใส่ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน 2.5 กรัมในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปละลายในไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ 40 มิลลิลิตรพร้อมปั่นกวนและควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C เมื่ออุณหภูมิถึง 55 °C ผสมสารละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร และปั่นกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วแยกสารที่ได้จากการทำปฏิกิริยาออกเป็น 10 ส่วนแล้วนำสารออกมาใส่น้ำเย็น 0 °C รอให้สารตกตะกอนเป็นเวลา 1-4 วันในอุณหภูมิ 5 °C และ 23 °C ดังแสดงใน รูปที่ 28 เปรียบเทียบกัน จากนั้นนำสารไปกรองเอาของแข็งด้วยตัวกรองสุญญากาศดังแสดงในรูปที่ 29 และล้างของแข็งด้วยน้ำแล้วจึงนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งสุญญากาศ



รูปที่ 28 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก  
หลังการตกตะกอนเป็นเวลา 4 วัน



รูปที่ 29 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก  
ที่ได้จากการกรอง

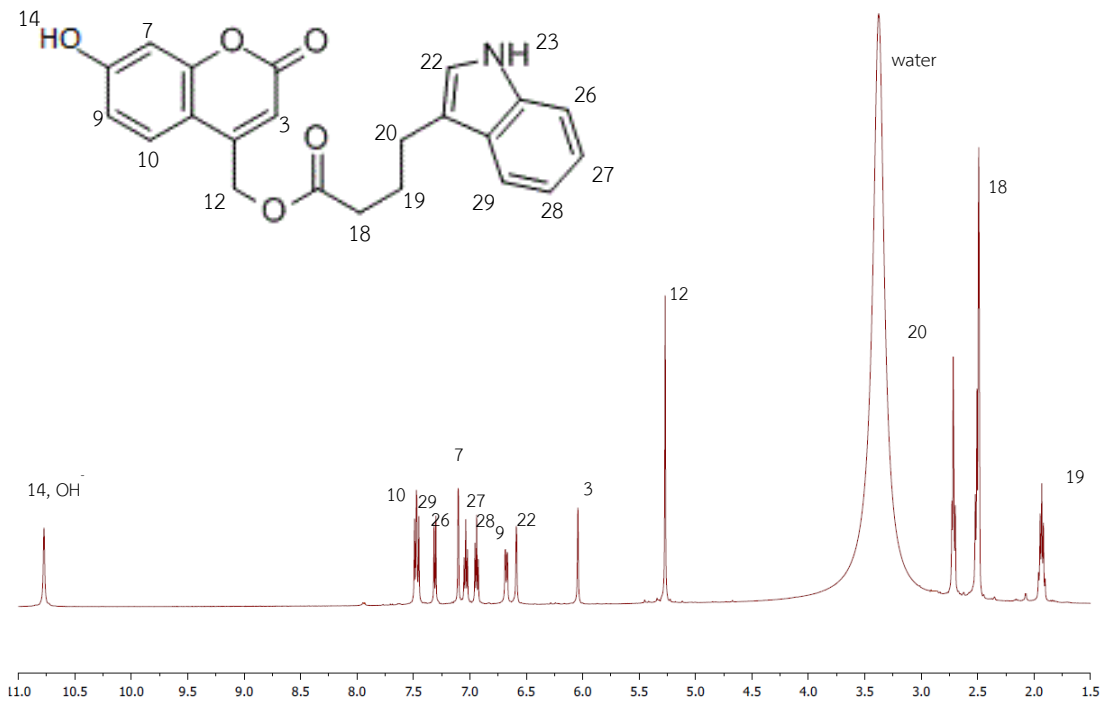


**รูปที่ 30** ผลของอุณหภูมิ (5 °C, 23 °C) และเวลาในการตกตะกอน (1, 2, 3, 4 และ 10 วัน) ต่อการแยกสาร (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก (1 eq.mol), โฟแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55°C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 30 พบว่าในวันที่ 1-3 ให้ผลิตภัณฑ์จำนวนน้อย เมื่อเทียบกับวันที่ 4 และ 10 เมื่อเวลาในการตกตะกอนเพิ่มขึ้นจำนวนของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นตามเวลาในการตกตะกอนที่มากขึ้นแต่หลักจากวันที่ 4 จำนวนผลิตภัณฑ์มีจำนวนใกล้เคียงกับวันที่ 10 และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตกตะกอนมีความบริสุทธิ์ใกล้เคียงกับการแยกสารด้วยวิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟีแสดงผลในตารางที่ 6 และในรูปที่ 31 เป็นตัวอย่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปีโดยผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง.

ดังนั้นจึงสามารถใช้วิธีการตกตะกอนแทนวิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟีได้ และสภาวะในการตกตะกอนที่เหมาะสมคือ ตกตะกอนที่อุณหภูมิ 23 °C เป็นเวลา 4 วัน



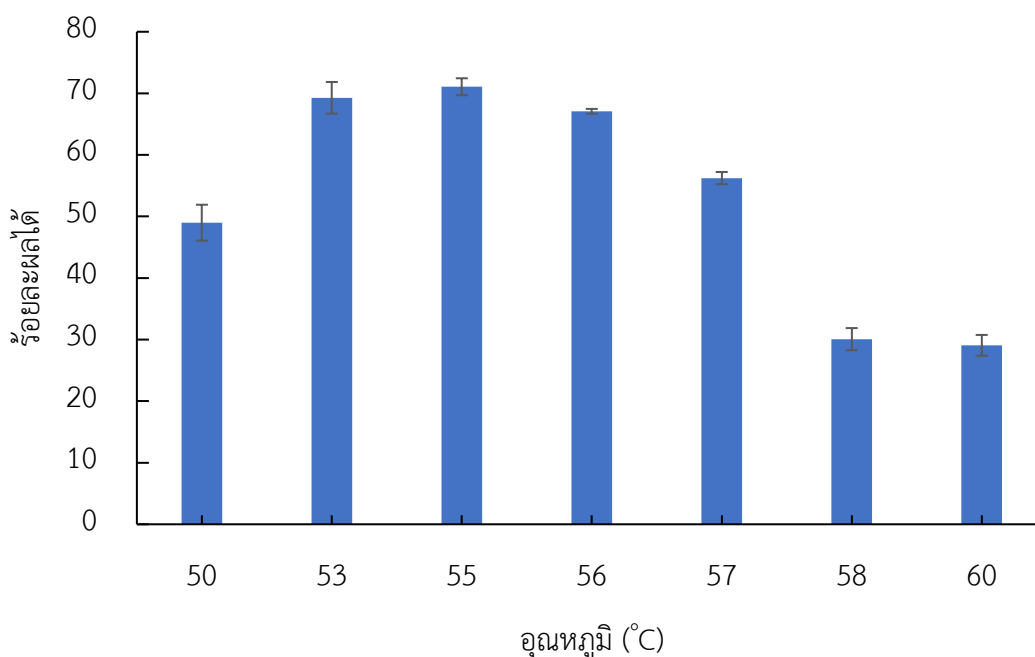


**รูปที่ 31** ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน เชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-ปิวิเทริก ที่ ได้จากการทดลองการตกตะกอน (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-ปิวิเทริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55°C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



#### 4.1.2 ผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา

นำกรดอินโดล-3-บิวทีริก 2.4125 กรัม โพแทสเซียมคาร์บอเนต 3.281 กรัม และ โพแทสเซียมไอโอไดด์ 1.97 กรัมใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปละลายใน ไดม์ทิลฟอร์มาร์ไมด์ 79 มิลลิลิตรพร้อมปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิตามที่กำหนด ใส่ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน 2.5 กรัมในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปละลายในไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ 40 มิลลิลิตรพร้อมควบคุมอุณหภูมิตามที่กำหนด ผสมสารละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร และปั่นกวนพร้อมควบคุมอุณหภูมิตามที่กำหนดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยในการทดลองนี้จะทดลองที่อุณหภูมิ 50, 53, 55, 56, 57, 58 และ 60 °C นำสารออกมาใส่น้ำเย็นที่ 0 °C รอให้สารตกตะกอนเป็นเวลา 4 วัน ที่อุณหภูมิ 23 °C จากนั้นนำสารไปกรองเอาของแข็งด้วยตัวกรองสุญญากาศ และล้างของแข็งด้วยน้ำแล้วจึงนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งสุญญากาศ

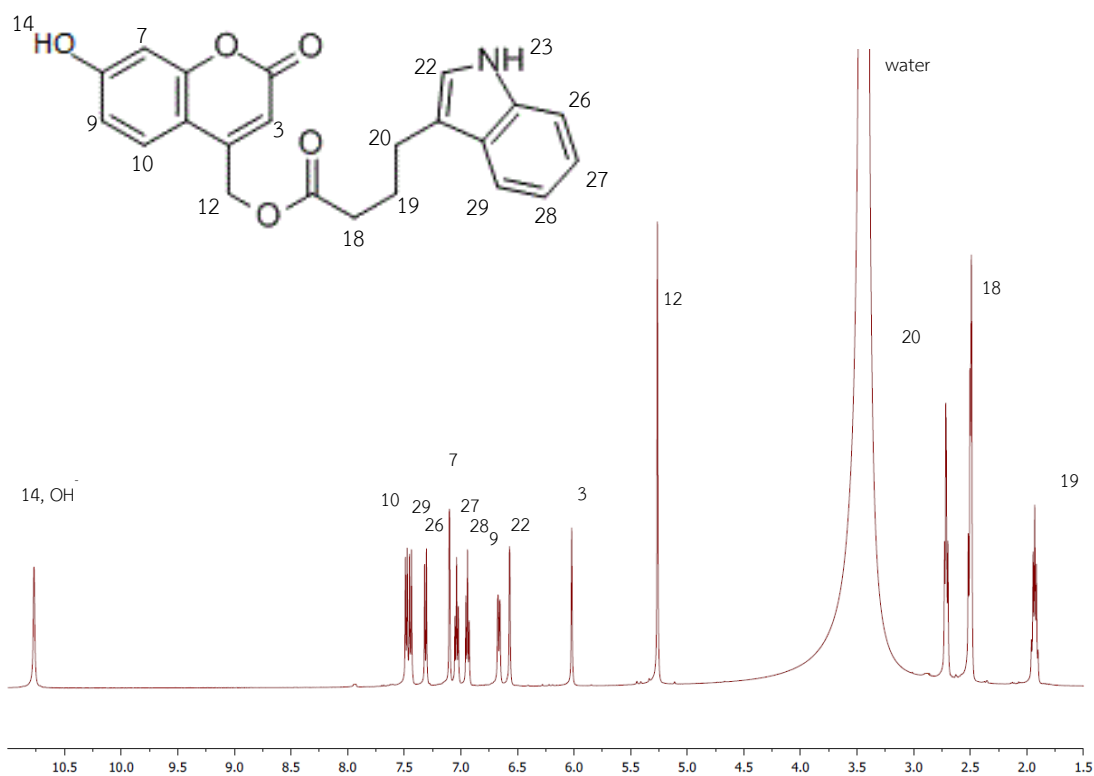


**รูปที่ 32** ผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา(50-60 °C) ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต(2 eq.mol), เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 32 พบว่าปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนดังจะเห็นได้จากผลการทดลองที่ยิ่งเพิ่มอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาจะยิ่งทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จนถึงอุณหภูมิที่ 55 °C จะให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสูงที่สุดที่ 71% และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นสูงกว่า 55 °C จะพบว่าร้อยละผลได้มีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจาก กรดอินโดล-3-บิวทีริก เกิดการเสื่อมสภาพเป็นไปตามงานวิจัยของ Nissen และคณะ [4] ที่พบว่ากรดอินโดล-3-บิวทีริกไม่เสถียรสามารถสลายตัวได้เอง แม้เก็บในที่มืด

ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก คืออุณหภูมิที่ 55 °C โดยความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์แสดงผลในตารางที่ 7 และในรูปที่ 33 เป็นตัวอย่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี โดยผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง.

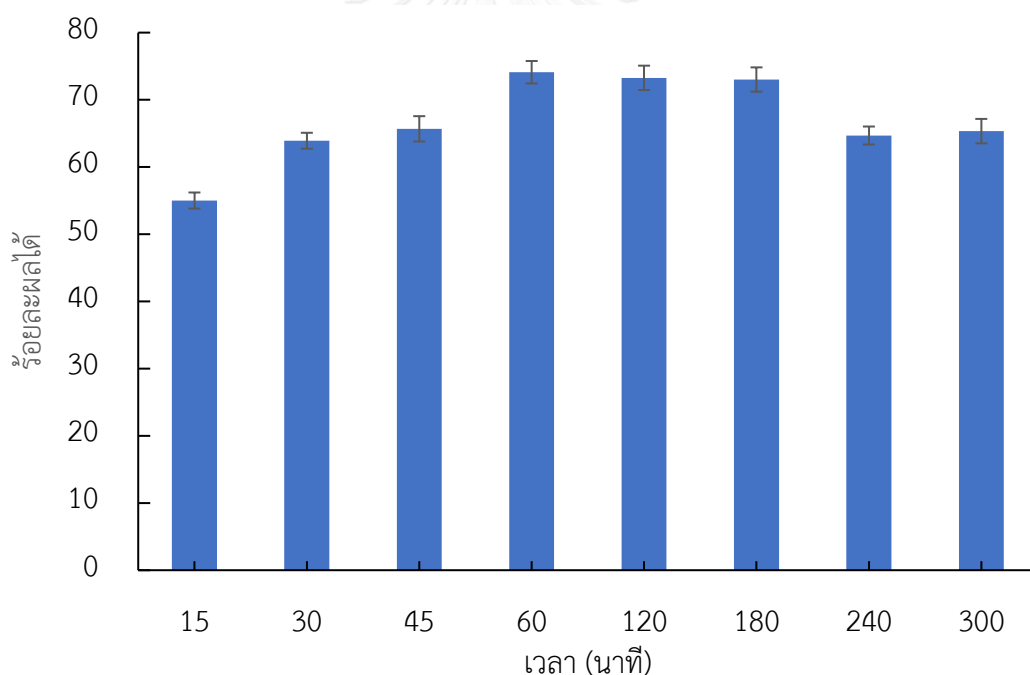




**รูปที่ 33** ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)

#### 4.1.3 ผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยา

นำกรดอินโดล-3-บิวทีริก 2.4125 กรัม โพแทสเซียมคาร์บอเนต 3.281 กรัม และ โพแทสเซียมไอโอไดด์ 1.97 กรัม ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปละลายใน ไดเมทิลฟอร์มาล-ไมด์ 79 มิลลิลิตรพร้อมปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C ใส่ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน 2.5 กรัมในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปละลายในไดเมทิลฟอร์มาล-ไมด์ 40 มิลลิลิตรพร้อมปั่นกวนแล้วควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C ผสมสารละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร และปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที - 5 ชั่วโมง แล้วนำสารออกมาใส่น้ำเย็น 0 °C รอให้สารตกตะกอนเป็นเวลา 4 วันในอุณหภูมิ 23 °C จากนั้นนำสารไปกรองเอาของแข็งด้วยตัวกรองสุญญากาศ และล้างของแข็งด้วยน้ำแล้วจึงนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งสุญญากาศ



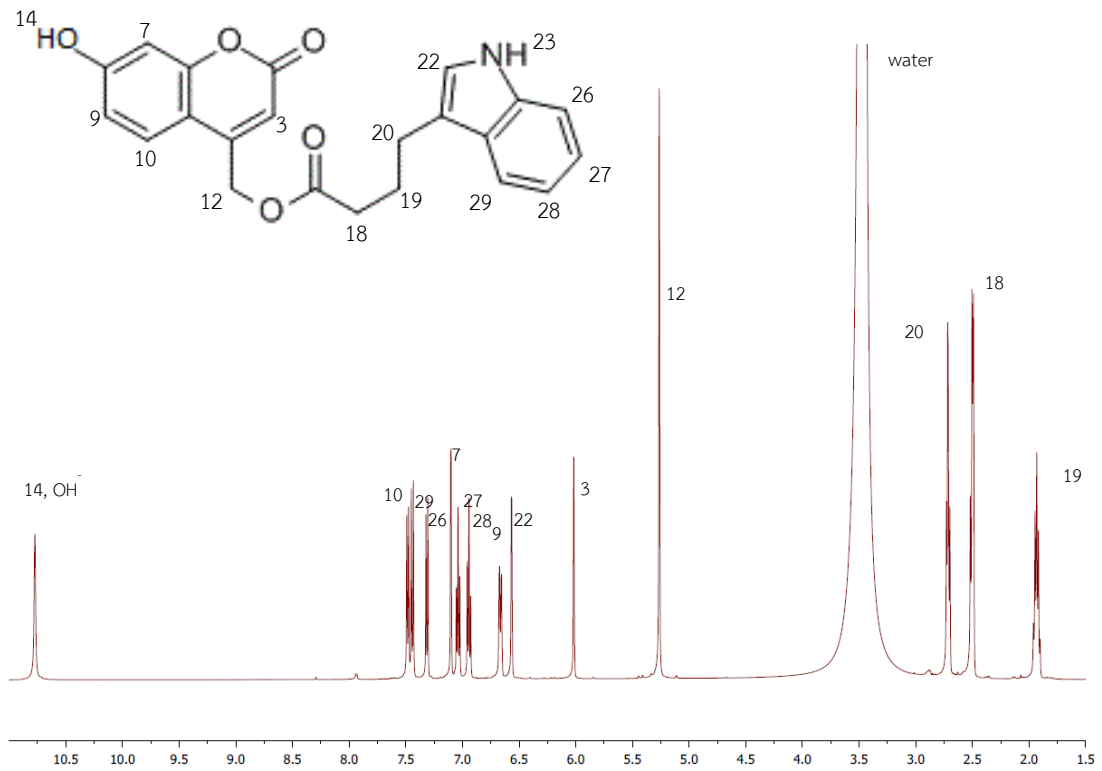
**รูปที่ 34** ผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยา (15 นาที-5 ชั่วโมง) ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55°C)

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 34 พบว่าปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก เกิดได้ค่อนข้างรวดเร็วจะเห็นได้ว่าที่ 15 นาทีแรกให้ร้อยละผลได้ที่ค่อนข้างสูงที่ 55.86% และเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจนให้ร้อยละผลได้ที่สูงที่สุดที่ 74% ที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ 1 ชั่วโมงแรกและหลังจาก 1 ชั่วโมงแรกจะพบว่าร้อยละผลได้มีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากกรดอินโดล-3-บิวทีริก เกิดการเสื่อมสภาพเป็นไปตามงานวิจัยของ Nissen และคณะ [4] ที่พบว่ากรดอินโดล-3-บิวทีริกไม่เสถียรสามารถสลายตัวได้เองแม้เก็บในที่มืด

ดังนั้นเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก คือ 1 ชั่วโมง โดยความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์แสดงผลในตารางที่ 8 และในรูปที่ 35 เป็นตัวอย่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี โดยผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง.







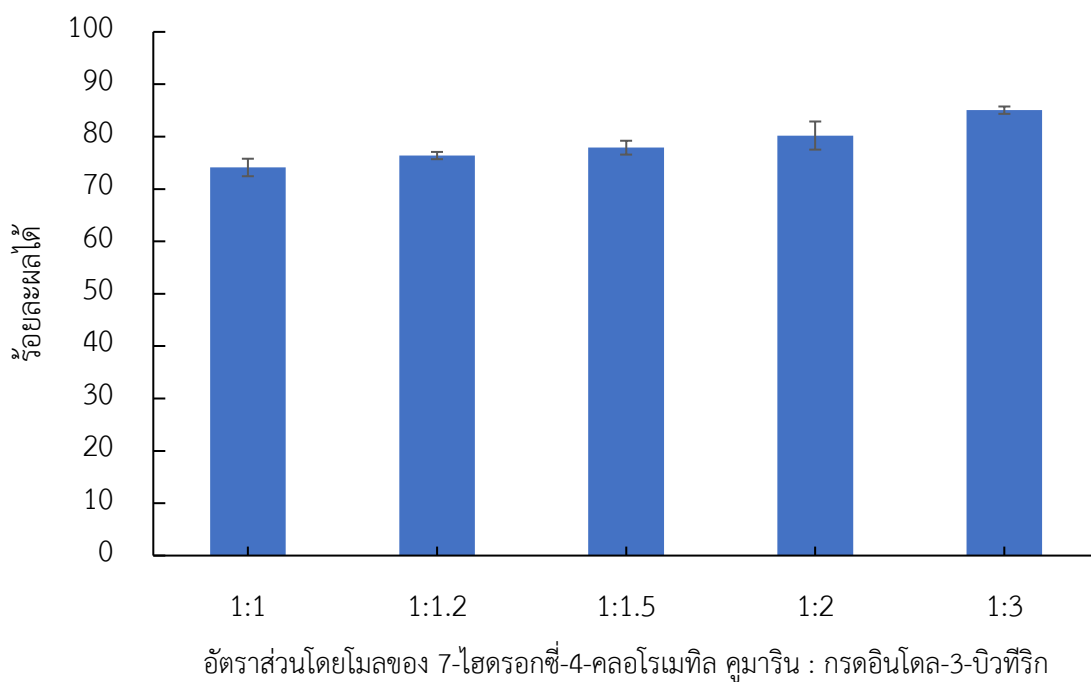
**รูปที่ 35** ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยา (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C)



#### 4.1.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-3-บิวทีริก

จากการทดลองของ Nissen และคณะ [4] พบว่ากรดอินโดล-3-บิวทีริก ไม่เสถียร สามารถเสื่อมสภาพเองได้แม้เก็บในที่มืดในการทดลองนี้จึงทำการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่สูงและคุ้มค่าที่สุดเนื่องจากสารตั้งต้นมีราคาที่สูง

นำกรดอินโดล-3-บิวทีริก 2.4125 กรัม (1eq. mol) โพแทสเซียมคาร์บอเนต 3.281 กรัม และโพแทสเซียมไฮโอไดด์ 1.97 กรัมใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปละลายใน ไดเมทิลฟอรั่มาร์-ไมด์ 79 มิลลิลิตรพร้อมปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C ใส่ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน 2.5 กรัม (1eq. mol) ในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปละลายในไดเมทิลฟอรั่มาร์ไมด์ 40 มิลลิลิตรพร้อมปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C เมื่ออุณหภูมิถึง 55 °C ถึงผสมสารละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร และปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำสารออกมาใส่น้ำเย็น 0 °C รอให้สารตกตะกอนเป็นเวลา 4 วันในอุณหภูมิ 23 °C จากนั้นนำสารไปกรองเอาของแข็งด้วยตัวกรองสุญญากาศ และล้างของแข็งด้วยน้ำ แล้วจึงนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งสุญญากาศ

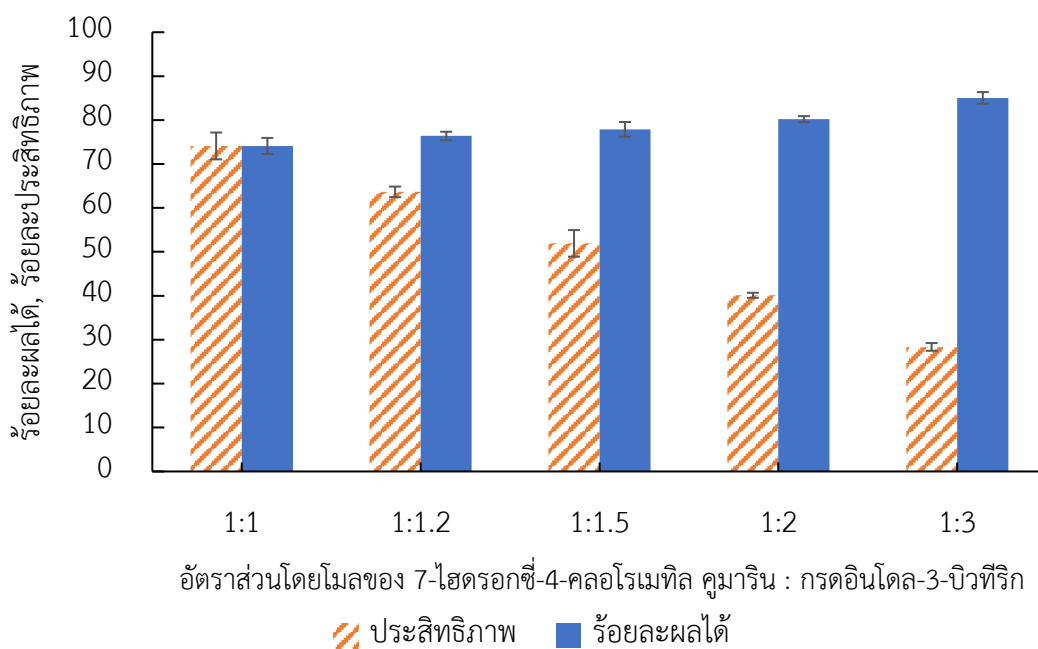


**รูปที่ 36** ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 : 1-3) ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

จากผลการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ต่อกรดอินโดล-3-บิวทีริกต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 36 พบว่า ยิ่งใส่กรดอินโดล-3-บิวทีริกในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์มีค่ามากขึ้นตามลำดับและให้ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงสุด 85% ที่อัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-3-บิวทีริกที่ 1 : 3

อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องหาอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมที่สุดทั้งทางด้านร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และทางด้านความคุ้มค่าในการผลิต ในการทดลองนี้จึงได้ทำการคำนวณประสิทธิภาพในการเข้าทำปฏิกิริยาของกรดอินโดล-3-บิวทีริก (conversion)

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{โมลของผลิตภัณฑ์}}{\text{โมลของกรดอินโดล-3-บิวทีริกตั้งต้น}} \times 100\%$$



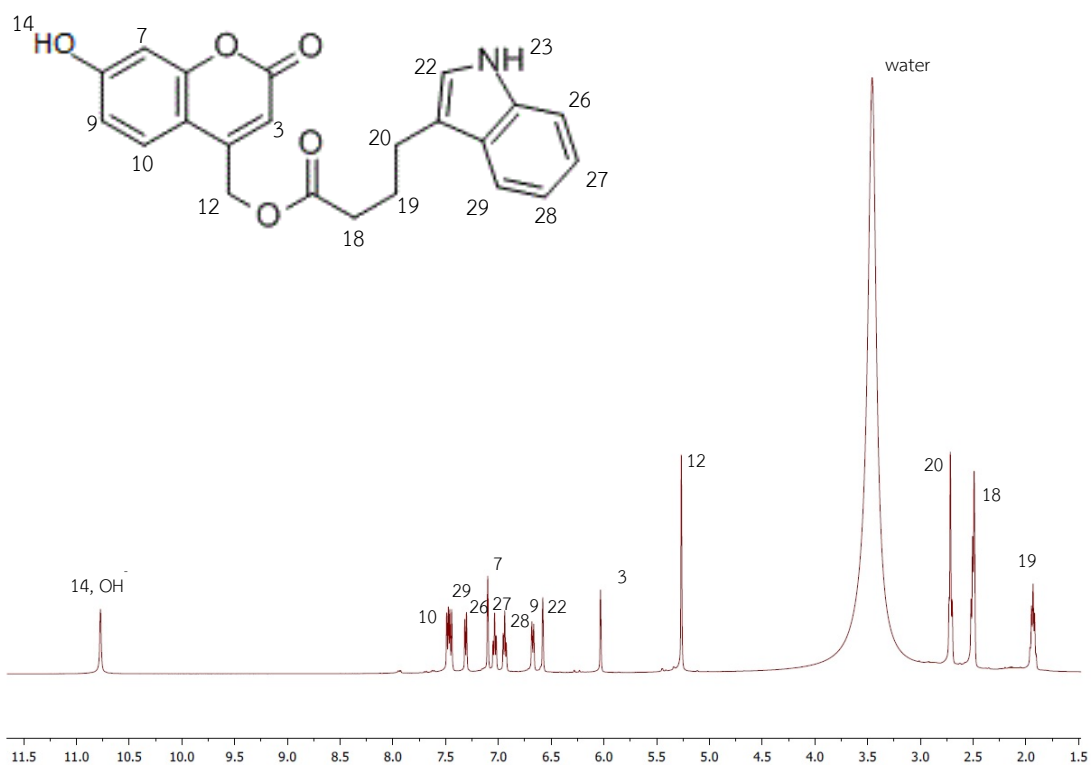
**รูปที่ 37** ประสิทธิภาพในการเข้าทำปฏิกิริยาของกรดอินโดล-3-บิวทีริก และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : กรดอินโดล-3-บิวทีริก แตกต่างกัน (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), โปแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

เมื่อทำการคำนวณประสิทธิภาพในการเข้าทำปฏิกิริยาของกรดอินโดล-3-บิวทีริก ดังแสดงในรูปที่ 37 มาเพื่อใช้ในการประกอบการพิจารณาพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ต่อกรดอินโดล-3-บิวทีริก เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการเข้าทำปฏิกิริยาของกรดอินโดล-3-บิวทีริกกลับมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด จึงไม่เหมาะสมทางด้านความคุ้มค่า

ดังนั้นอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ต่อกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่เหมาะสมที่สุดทั้งทางด้านร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และทางด้านความคุ้มค่าในการผลิต คือ 1:1 ที่ 74 %ของร้อยละผลได้ โดยความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์ แสดงผลในตารางที่ 9 และในรูปที่ 38 เป็นตัวอย่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค โพรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี โดยผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง.

**ตารางที่ 9** ตำแหน่งและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปีของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ของข้อมูลอ้างอิงเทียบกับผลจากการทดลองผลของอัตราส่วนโดย โมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-3-บิวทีริก

สารบริสุทธิ์ (อ้างอิง)		อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของสาร (จากการทดลอง)				
ตำแหน่งของ กราฟ (ppm)	อัตราส่วน พื้นที่ ได้กราฟ	1:1	1:1.2	1:1.5	1:2	1:3
6.16	1	1	1	1	1	1
7.10	1	1	1	1	1	1
6.79	1	1	1	1	1	1
7.54	1	1	1	1	1	1
5.29	2	2	2	2	2	2
10.76	1	1	1	1	1	1
2.50	2	2	2	2	2	2
1.97 – 1.90	2	2	2	2	2	2
2.71	2	2	2	2	2	2
6.74	1	1	1	1	1	1
7.32	1	1	1	1	1	1
7.04	1	1	1	1	1	1
6.94	1	1	1	1	1	1
7.47	1	1	1	1	1	1

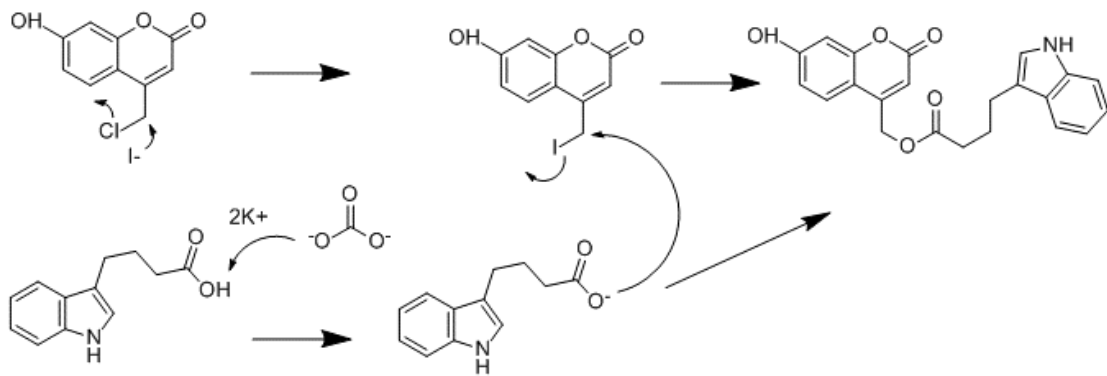


**รูปที่ 38** ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), โปแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

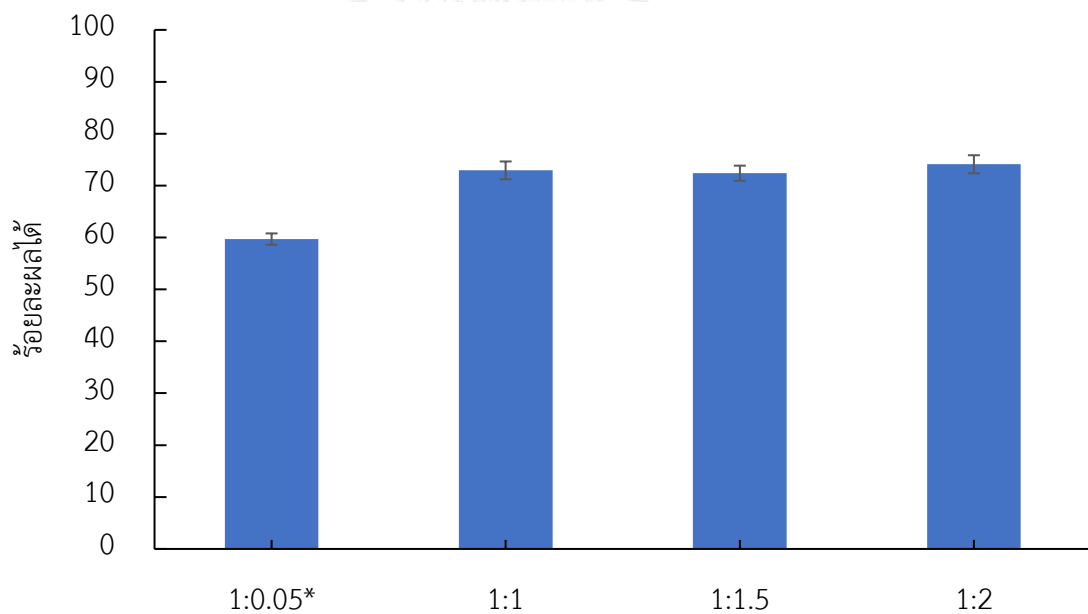
#### 4.1.5 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนต

เนื่องจากโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็น ตัวทำปฏิกิริยา (reagent) ที่สำคัญในปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ดังรูปที่ 39 และโพแทสเซียมคาร์บอเนตสามารถละลายใน ไดเมทิลฟอรั่มาร์ไมด์ได้น้อยมาก ดังนั้นในปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก จะมีโพแทสเซียมคาร์บอเนตละลายเข้าไปในสารละลายบางส่วนและบางส่วนจะยังคงเป็นของแข็งกระจายอยู่ในสารละลาย ในงานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตเพื่อทำให้การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก เป็นระบบที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous phase) เพื่อลดปัญหาด้านการถ่ายเทมวลระหว่างเม็ดโพแทสเซียมคาร์บอเนตไปยังสารละลาย และเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่สูง พร้อมกับความคุ้มค่าในการผลิต

นำกรดอินโดล-3-บิวทีริก 2.4125 กรัม (1eq. mol) โพแทสเซียมคาร์บอเนต 3.281 กรัม (2eq. mol) และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 1.97 กรัมใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปละลายใน ไดเมทิลฟอรั่มาร์ไมด์ 79 มิลลิลิตรพร้อมปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C ใส่ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน 2.5 กรัมในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปละลายในไดเมทิลฟอรั่มาร์ไมด์ 40 มิลลิลิตรพร้อมปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C เมื่ออุณหภูมิถึง 55 °C ถึงผสมสารละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร และปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำสารออกมาใส่น้ำเย็น 0 °C รอให้สารตกตะกอนเป็นเวลา 4 วันในอุณหภูมิ 23 °C จากนั้นนำสารไปกรองเอาของแข็งด้วยตัวกรองสุญญากาศ และล้างของแข็งด้วยน้ำ แล้วจึงนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งสุญญากาศ



**รูปที่ 39** กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-ปิวทีริก



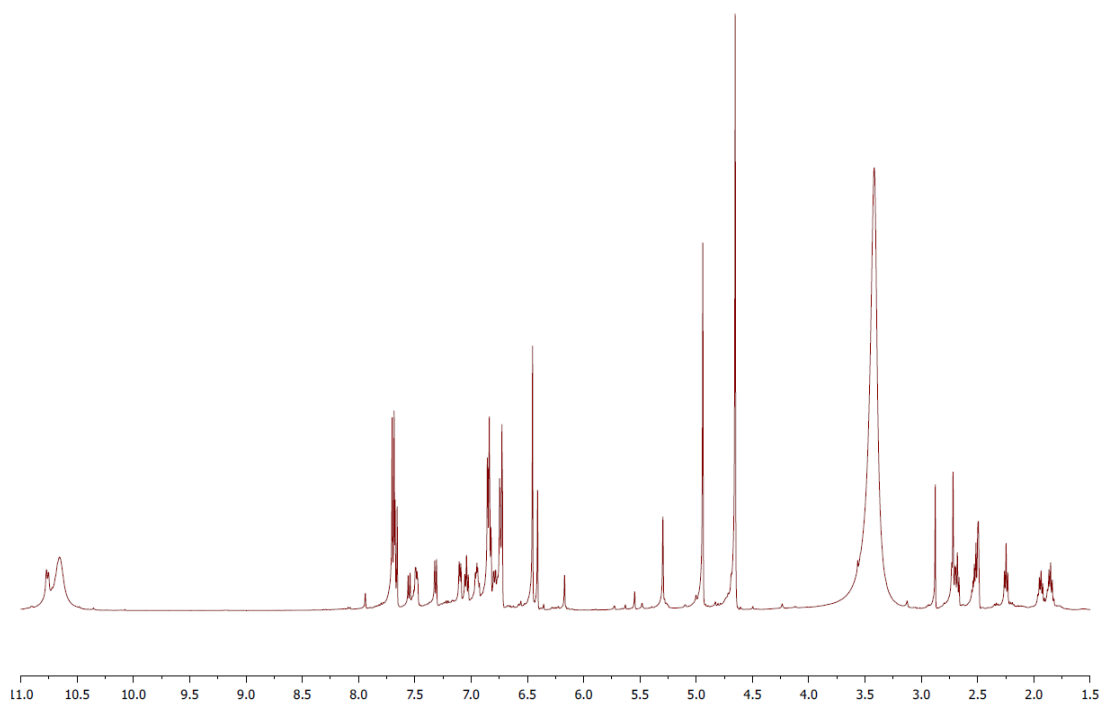
อัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : โพแทสเซียมคาร์บอเนต

**รูปที่ 40** ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : โพแทสเซียมคาร์บอเนตต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (\*0.05 eq. mol เท่ากับความสามารถในการละลายของ โพแทสเซียมคาร์บอเนตใน DMF 119 มล.ที่ 55 °C), (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-ปิวทีริก (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55°C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : โฟแทสเซียมคาร์บอเนตต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 40 พบว่าไม่สามารถทำให้เป็นระบบที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous phase) เนื่องจากเมื่อใส่โฟแทสเซียมคาร์บอเนตเข้าไปในปริมาณเทียบเท่ากับความสามารถในการละลายของโฟแทสเซียมคาร์บอเนตใน ไดเมทิลฟอรัมาอิมิด 119 มล.ที่ 55 °C พบว่าปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์ซึ่งจะเห็นได้จากสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ในรูปที่ 41 ปฏิกิริยาจะเกิดได้สมบูรณ์เมื่อใส่โฟแทสเซียมคาร์บอเนตเข้าไปในปริมาณเท่ากับ 1 eq. mol ขึ้นไปแต่เมื่อเปรียบเทียบกับที่ 1-2 eq. mol พบว่า ปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์เหมือนกันและให้ร้อยละผลได้ที่ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 73%

ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : โฟแทสเซียมคาร์บอเนต คือ 1:1 โดยความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์แสดงผลในตารางที่ 10 และในรูปที่ 42 เป็นตัวอย่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี โดยผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง.

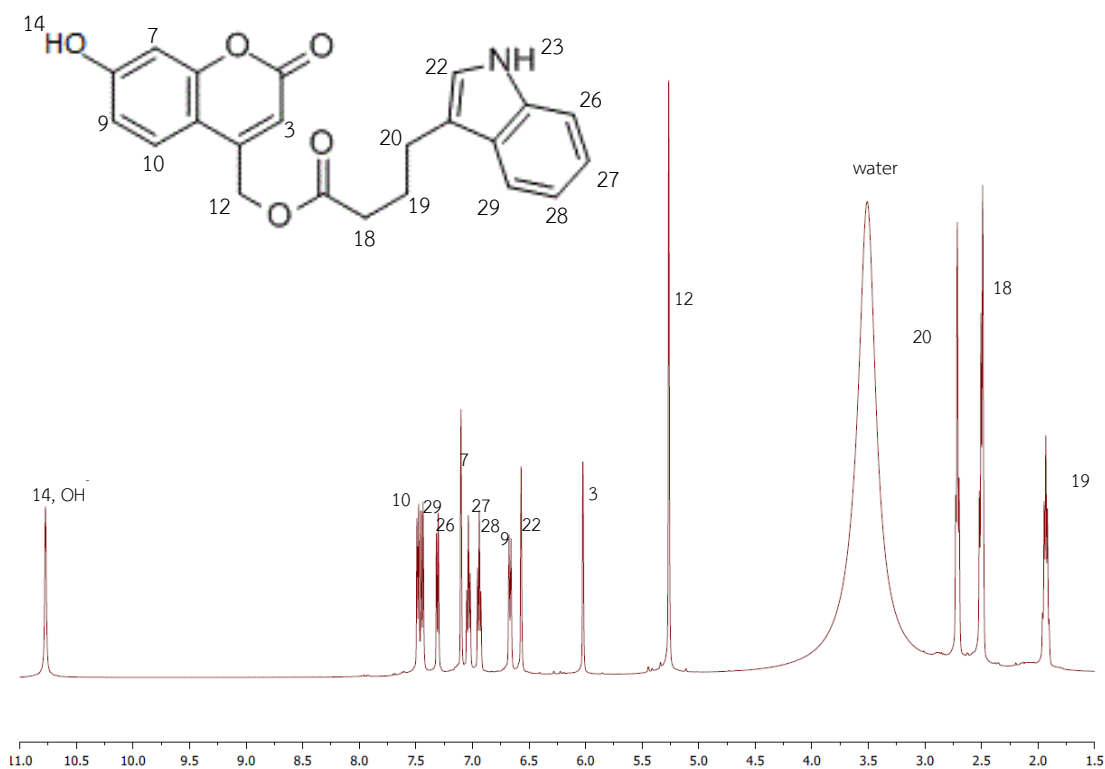




**รูปที่ 41** ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่ 1 : 0.05 (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

**ตารางที่ 10** ตำแหน่งและอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปีของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน เชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ของข้อมูลอ้างอิงเทียบกับผลจากการทดลองผลของ อัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนต

สารบริสุทธิ์ (อ้างอิง)		อัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของสาร (จากการทดลอง)			
ตำแหน่งของ กราฟ (ppm)	อัตราส่วน พื้นที่ใต้กราฟ	1:0.05	1:1	1:1.5	1:2
6.16	1	1	1	1	1
7.10	1	2	1	1	1
6.79	1	8	1	1	1
7.54	1	2	1	1	1
5.29	2	2	2	2	2
10.76	1	2	1	1	1
2.50	2	5	2	2	2
1.97 – 1.90	2	5	2	2	2
2.71	2	5	2	2	2
6.74	1	5	1	1	1
7.32	1	6	1	1	1
7.04	1	3	1	1	1
6.94	1	1	1	1	1
7.47	1	2	1	1	1

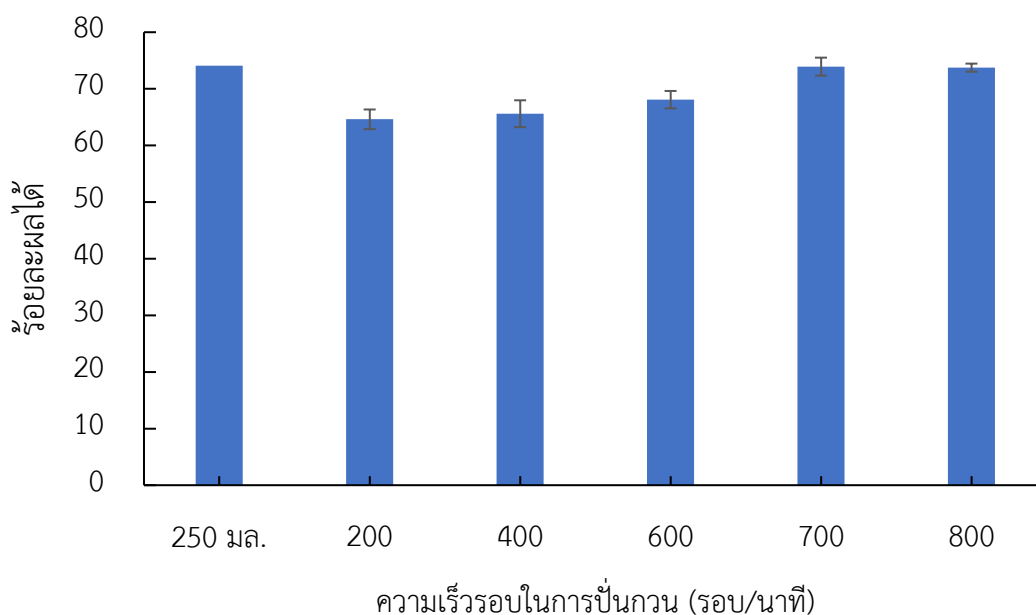


**รูปที่ 42** ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนต (1:1-2) (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

#### 4.2 การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก ขนาด 2 ลิตร

ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรนี้ได้ทำการศึกษาหาความเร็วรอบของใบกวนในการปั่นกวนที่เหมาะสมโดยได้ร้อยละผลได้และ ความบริสุทธิ์ของสารใกล้เคียงกับในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร

โดยนำกรดอินโดล-3-ปิวิทริก โปแทสเซียมคาร์บอเนต และโปแทสเซียมไอโอไดด์ ละลายใน ไดเมทิลฟอรั่มาร์-ไมด์ ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C ละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ในไดเมทิลฟอรั่มาร์ไมด์ ในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C เมื่ออุณหภูมิถึง 55 °C ผสมสารละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสารออกมาใส่น้ำเย็น 0 °C รอให้สารตกตะกอนเป็นเวลา 4 วันที่อุณหภูมิ 23 °C จากนั้นนำสารไปกรองเอาของแข็งด้วยตัวกรองสุญญากาศ และล้างของแข็งด้วยน้ำแล้วจึงนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งสุญญากาศ โดยอัตราส่วนของสารและสภาวะการดำเนินงานอ้างอิงจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตรและความเร็วของใบกวนขณะปั่นกวนจะถูกกำหนดค่าที่ 200, 400, 600, 700 และ 800 รอบต่อนาที



**รูปที่ 43** ผลของความเร็วรอบในการปั่นกวนของใบกวนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

จากการทดลองหาความเร็วรอบของใบกวนในการปั่นกวนที่เหมาะสมโดยได้ร้อยละผลได้และความบริสุทธิ์ของสารใกล้เคียงกับในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตรดังแสดงในรูปที่ 43 พบว่าในช่วงความเร็วรอบ 200-600 รอบต่อนาทีได้ร้อยละผลได้ที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากการกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตทำได้ไม่ดีดังแสดงในรูปที่ 44 ซึ่งโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวทำปฏิกิริยาที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยานี้ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 700 รอบต่อนาทีพบว่าร้อยละผลได้มีค่า 74% ใกล้เคียงกับที่ได้ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบขึ้นไปเป็น 800 รอบต่อนาทีร้อยละผลได้ที่ได้มีค่าคงที่

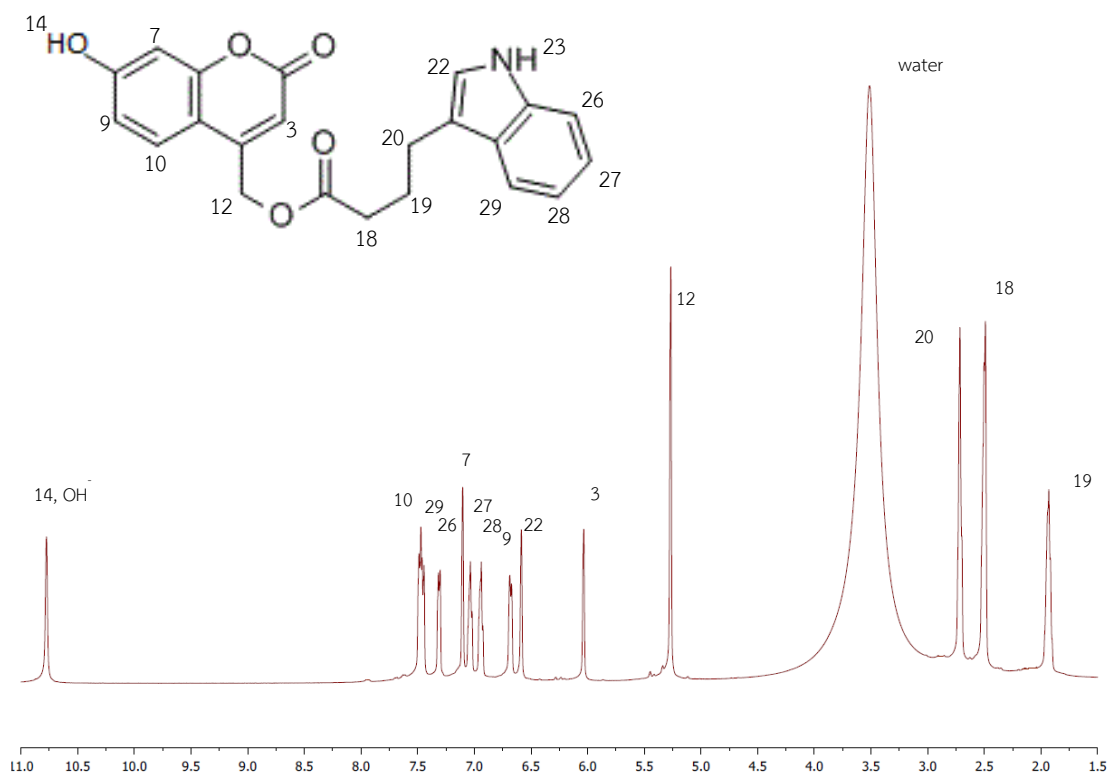
ดังนั้นความเร็วรอบที่ 700 รอบต่อนาทีจึงเป็นความเร็วรอบที่เหมาะสม โดยความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์แสดงผลในตารางที่ 11 และในรูปที่ 45 เป็นตัวอย่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี โดยผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง.



รูปที่ 44 การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ความเร็วรอบ  
200 รอบต่อนาที (ซ้าย)และ 700 รอบต่อนาที (ขวา)

**ตารางที่ 11** ตำแหน่งและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปีของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน เชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ของข้อมูลอ้างอิงเทียบกับผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

สารบริสุทธิ์ (อ้างอิง)		อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของสาร (จากการทดลอง)				
ตำแหน่งของ กราฟ (ppm)	อัตราส่วน พื้นที่ ได้กราฟ	200 rpm	400 rpm	600 rpm	700 rpm	800 rpm
6.16	1	1	1	1	1	1
7.10	1	1	1	1	1	1
6.79	1	1	1	1	1	1
7.54	1	1	1	1	1	1
5.29	2	2	2	2	2	2
10.76	1	1	1	1	1	1
2.50	2	2	2	2	2	2
1.97 – 1.90	2	2	2	2	2	2
2.71	2	2	2	2	2	2
6.74	1	1	1	1	1	1
7.32	1	1	1	1	1	1
7.04	1	1	1	1	1	1
6.94	1	1	1	1	1	1
7.47	1	1	1	1	1	1



**รูปที่ 45** ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน เชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วยวอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)



#### 4.3 การสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก ขนาด 10 ลิตร

จากการศึกษาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร และความเร็วรอบในการปั่นกวนในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนที่มีสัดส่วนมาตรฐานขนาด 2 ลิตร ที่มีใบกวนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร พบว่าสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมของปฏิกิริยานี้คือ การทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนของจำนวนโมลของคูมารินต่อกรดอินโดล-3-ปิวิทริกเท่ากับ 1:1 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่ 700 รอบต่อนาที

ในการศึกษาการขยายขนาดการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริกจึงได้ใช้สภาวะเหล่านี้ในการดำเนินการทดลอง โดยทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนที่มีสัดส่วนมาตรฐานขนาด 10 ลิตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร มีบัพเฟิลกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 22 เซนติเมตร จำนวน 4 ชั้น ใบกวนที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรโดยมีปริมาตรของสารในระบบที่ใช้งานจริงเท่ากับ 6 ลิตร เพื่อหาความสัมพันธ์ในการขยายขนาด โดยทำการศึกษาที่ความเร็วรอบในการปั่นกวนในช่วง 300-500 รอบต่อนาที

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 การขยายขนาดกระบวนการทางเคมีนั้นไม่สามารถขยายขนาดตามสัดส่วนทางเรขาคณิตได้โดยตรงเนื่องจากกระบวนการที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมีความแตกต่างจากกระบวนการขนาดเล็ก จึงต้องหาความสัมพันธ์ในการขยายขนาดโดยใช้อัตราส่วนในการขยายขนาดเป็นตัวกำหนดวัตถุประสงค์ในการขยายขนาด ซึ่งอัตราส่วนการขยายขนาด ( $R$ ) จะแปรผันตามความเร็วรอบในการปั่นกวนและเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน

$$R \propto N^c D^d$$

โดยที่  $N$  คือ ความเร็วรอบในการปั่นกวน

$D$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน

จากที่กล่าวไปข้างต้นในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรในการขยายขนาด สามารถเขียนสมการทั่วไปในการคำนวณความเร็วรอบในการปั่นกวนในเครื่องปฏิกรณ์ได้ตามสมการที่ 6 ดังนี้

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^n$$

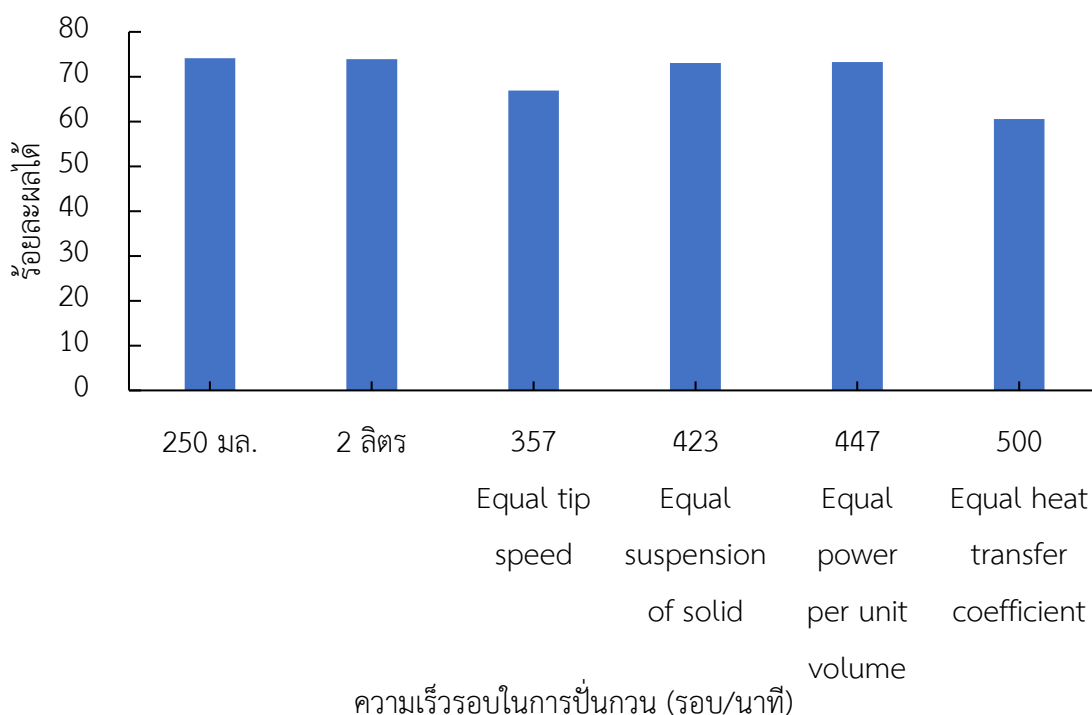
โดยที่  $N_1, N_2$  คือ ความเร็วรอบของใบกวนของถังใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (รอบต่อนาที)  
 $D_1, D_2$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวนของถังใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (เมตร)  
 $n$  คือ ค่าเอ็มพิริคัลและค่าเชิงทฤษฎี

จากสมการนี้สามารถคำนวณความเร็วรอบในการปั่นกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรที่ใช้ใบกวนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 10 เซนติเมตรได้ดังแสดงในตารางที่ 12 ซึ่งอ้างอิงจากเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ที่ใช้ใบกวนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5 เซนติเมตร และใช้ความเร็วรอบในการปั่นกวนเท่ากับ 700 รอบต่อนาที

**ตารางที่ 12** ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบในการปั่นกวนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวนขนาด 5 เซนติเมตร และ 10 ลิตร ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวนขนาด 10 เซนติเมตร เมื่อความเร็วรอบในการปั่นกวนของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ( $N_1$ ) เท่ากับ 700 รอบต่อนาที

อัตราส่วนการขยายขนาด	ค่าเอ็มพิริคอลและค่าเชิง ทฤษฎี (n)	ความเร็วรอบในการปั่นกวนของ เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร ( $N_2$ , รอบต่อนาที)
ความเร็วปลายใบกวนเท่ากัน	1	357
กำลังต่อปริมาตรของถังกวน เท่ากัน	2/3	447
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของถังกวนเท่ากัน	1/2	500
การกระจายตัวของของแข็ง เท่ากัน	3/4	423

นำกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก โฟแทสเซียมคาร์บอเนต และโฟแทสเซียมไอโอไดด์ ละลายในไตรเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรพร้อมปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C ละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ในไตรเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ ในเครื่องปฏิกรณ์อีกเครื่องพร้อมปั่นกวนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C เมื่ออุณหภูมิถึง 55 °C ถึงผสมสารละลาย 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร และปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสารออกมาใส่น้ำเย็น 0 °C รอให้สารตกตะกอนเป็นเวลา 4 วันที่อุณหภูมิ 23 °C จากนั้นนำสารไปกรองเอาของแข็งด้วยตัวกรองสุญญากาศ และล้างของแข็งด้วยน้ำแล้วจึงนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งสุญญากาศ โดยอัตราส่วนของสารและสภาวะการดำเนินงานอ้างอิงจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร



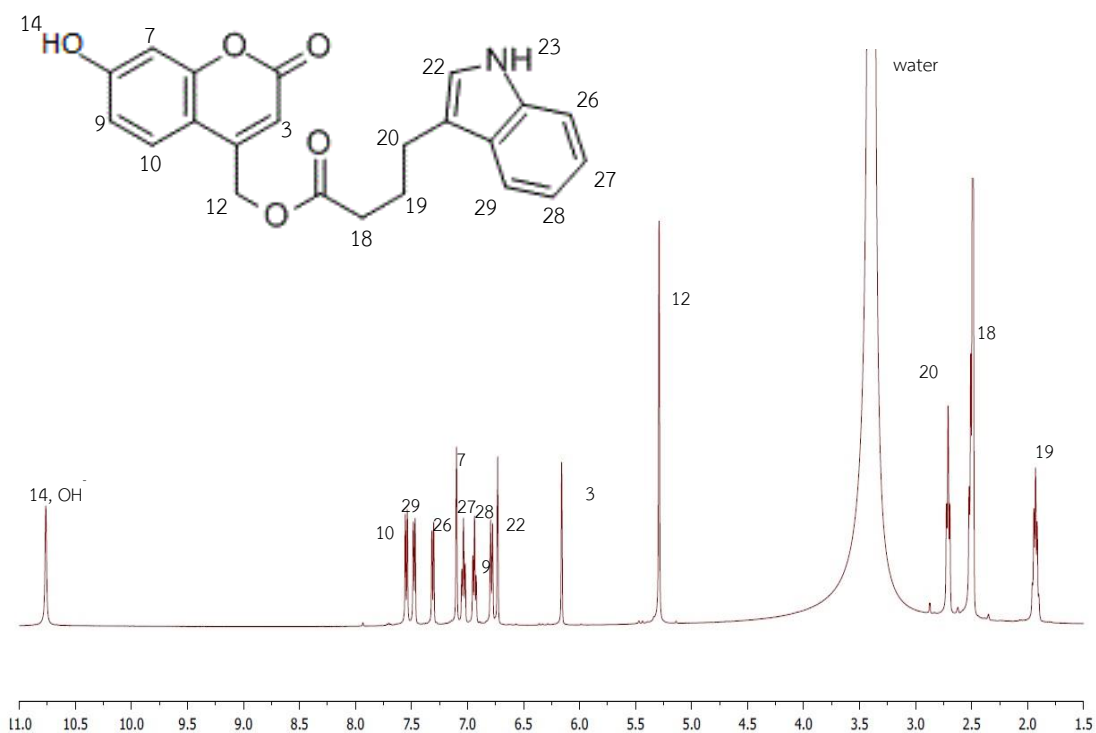
**รูปที่ 46** ผลของความเร็วยรอบในการปั่นกวนของใบกวนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โฟแทสเซียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55°C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 46 พบว่าความเร็วยรอบที่เหมาะสมในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรเท่ากับ 423 รอบต่อนาที เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ในตารางที่ 12 พบว่าเมื่อกำหนดให้ค่าการกระจายตัวของของแข็งของถังกวนทั้งสองขนาดมีค่าเท่ากันจะได้ความเร็วยรอบในการปั่นกวนที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองคือ 423 รอบต่อนาที แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดในการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในขนาด 250 มิลลิลิตรและขนาด 2 ลิตรที่พบว่า การกระจายตัวของของแข็งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยานี้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการขยายขนาดกระบวนการนี้สู่ระดับที่ใหญ่ขึ้นสามารถขยายขนาดได้โดยการกำหนดให้ค่าการกระจายตัวของของแข็งมีค่าเท่ากัน เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนให้สูงขึ้นพบว่าร้อยละผลได้มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากที่ความเร็วยรอบสูง ๆ พบว่ามี vortex เกิดขึ้นเนื่องจากเกิดความปั่นป่วนจากการปั่นกวนที่รุนแรงซึ่งทำให้การผสมของสารในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ส่งผลให้กระจายของของแข็งในระบบไม่สม่ำเสมอ โดยความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์แสดงผลในตารางที่ 13

และในรูปที่ 47 เป็นตัวอย่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี โดยผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง.

**ตารางที่ 13** ตำแหน่งและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปีของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน เชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-ปิวิทริก ของข้อมูลอ้างอิงเทียบกับผลของความเร็รรอบในการปั่นกววนของใบกววนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

สารบริสุทธิ์ (อ้างอิง)		อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของสาร (จากการทดลอง)			
ตำแหน่งของกราฟ (ppm)	อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ	357 rpm	423 rpm	447 rpm	500 rpm
6.16	1	1	1	1	1
7.10	1	1	1	1	1
6.79	1	1	1	1	1
7.54	1	1	1	1	1
5.29	2	2	2	2	2
10.76	1	1	1	1	1
2.50	2	2	2	2	2
1.97 – 1.90	2	2	2	2	2
2.71	2	2	2	2	2
6.74	1	1	1	1	1
7.32	1	1	1	1	1
7.04	1	1	1	1	1
6.94	1	1	1	1	1
7.47	1	1	1	1	1



**รูปที่ 47** ตัวอย่างสเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความถี่รอบในการปั่นกวานของไบกวานในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

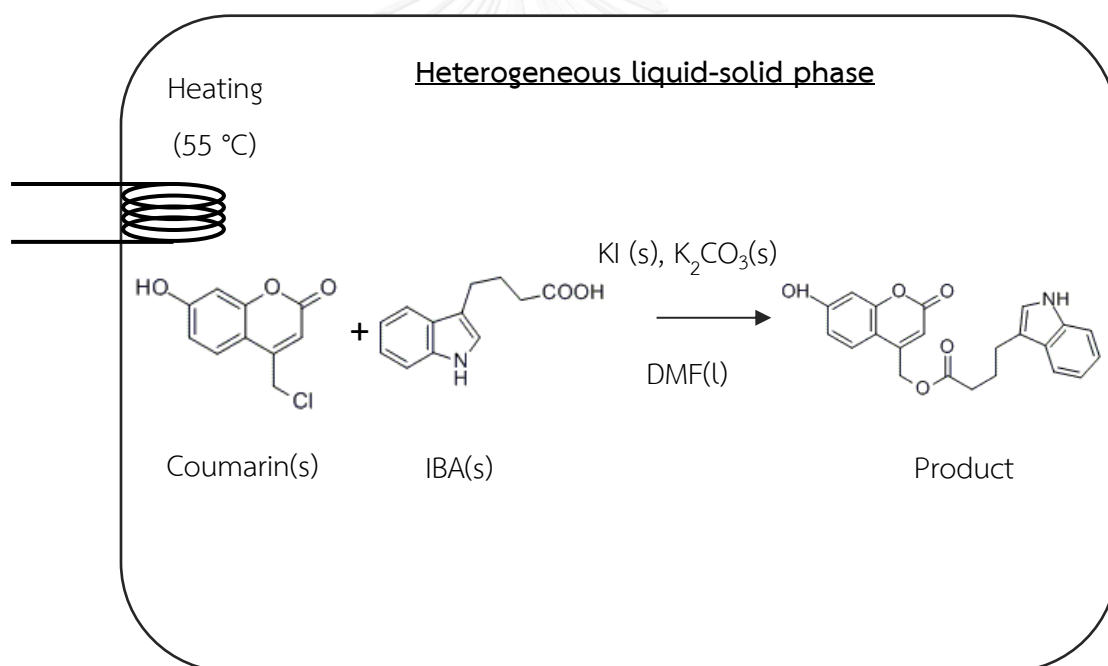
#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริกเป็นปฏิกิริยาเนื้อผสม การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นของแข็งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยานี้ จากการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนของจำนวน โมลของสารตั้งต้น อัตราส่วนของจำนวนโมลของโพแทสเซียมคาร์บอเนต เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริกในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร พบว่าการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนจำนวนโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-3-บิวทีริกเท่ากับ 1:1 อัตราส่วนโดย โมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนตเท่ากับ 1:1 โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียสโดยภาพรวมของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริกแสดงในรูปที่ 48 จากสภาวะดังกล่าวทำให้ได้ร้อยละผลได้ที่สูงที่สุดที่ประมาณ 74% โดยใช้การตกตะกอนเป็นวิธีในการแยกสารผลิตภัณฑ์โดยใช้เวลาในการตกตะกอนคือ 4 วันที่ 23 °C แล้วจึงนำไปกรองเอาของแข็งซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์

ในการศึกษาผลของความเร็วยรอบในการปั่นกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร โดยใช้สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในขนาด 250 มิลลิลิตร พบว่าความเร็วยรอบในการปั่นกวนส่งผลค่อนข้างมากต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อใช้ความเร็วยรอบในการปั่นกวนในช่วงต่ำทำให้ไม่เกิดการกระจายตัวของของแข็งหรือเกิดการกระจายตัวของของแข็งได้น้อย ส่งผลให้ปฏิกิริยาได้ไม่สมบูรณ์ เมื่อความเร็วยรอบในการปั่นกวนสูงขึ้นร้อยละผลได้เพิ่มขึ้นไปจนมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองในขนาด 250 มิลลิลิตร และเมื่อความเร็วยรอบในการปั่นกวนสูงขึ้นไปจะทำให้เกิด vortex ซึ่งส่งผลเสียต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยที่ความเร็วยรอบในการปั่นกวนที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ร้อยละผลได้ในเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนที่มีสัดส่วนมาตรฐานขนาด 2 ลิตร ใกล้เคียงกับในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร คือ 700 รอบต่อนาที

ในการศึกษาการขยายขนาดจากเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ไปเป็นเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร โดยอ้างอิงสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาการปฏิกิริยาในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าการการปั่นกวนที่ความเร็วรอบในการปั่นกวนเท่ากับ 423 รอบต่อนาที ทำให้ได้ร้อยละผลได้ใกล้เคียงกับกับในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งตรงกับความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณเมื่อกำหนดให้การกระจายตัวของของแข็งมีค่าเท่ากันระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และ 10 ลิตร ซึ่งตรงการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรที่พบว่าการกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก

ในการแยกสารผลิตภัณฑ์ได้ใช้วิธีการตกตะกอนด้วยน้ำแทนการใช้วิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟี โดยใช้การตกตะกอนด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 23 °C เป็นเวลา 4 วัน



รูปที่ 48 ภาพรวมของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน  
เชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก มีการกระจายตัวของโฟแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นปัจจัยที่สำคัญแต่อีกปัจจัยที่สำคัญคือ ความร้อน อุณหภูมิที่สูงจะทำให้เกิดการสลายตัวของกรดอินโดล-3-ปิวิทริกเป็นไปตามงานวิจัยของ Nissen และคณะ [4] ซึ่งเป็นอีกปัจจัยที่ทำให้ได้ร้อยละผลได้ไม่ถึง 100% ดังนั้นจึงควรระมัดระวังในเรื่องของการควบคุมอุณหภูมิควบคู่ไปกับการกระจายตัวของโฟแทสเซียมคาร์บอเนต

การแยกสารใช้วิธีการตกตะกอนด้วยน้ำสามารถแยกสารผลิตภัณฑ์ได้แต่ใช้เวลานานถึง 4 วันซึ่งเป็นเวลาที่นานจึงควรจะหาวิธีแยกสารวิธีอื่นเพิ่มเติมเพื่อลดเวลา



## รายการอ้างอิง

1. มาไฟโรจน์, พ., ฮอร์โมนและสารเร่งการเจริญเติบโตของพืช : บทแนะนำความรู้พื้นฐาน. 2532, เชียงใหม่: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 44.
2. ทองอำไพ, พ., ฮอร์โมนพืชและสารสังเคราะห์. 2529, กทม.: ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 196.
3. จรัสสัมฤทธิ์, น., ฮอร์โมนพืชและสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช. 2537, กทม.: โรงพิมพ์ สหมิตรออฟเซท. 124.
4. Sutter, S.J.N.a.E.G., *Stability of IAA and IBA in Nutrient Medium to Several Tissue Culture Procedures*. 1990.
5. ภก.วันชัย ศรีวิบูลย์, ภ.แ.ป., ญญ.อรอนงค์ ตันทวีวัฒน์, รศ.ดร.วีณา จิรัจฉริยากุล สมุนไพรธรรมชาติที่นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง *Phytocosmetic*. Vol. 1. 665.
6. ภก.วันชัย ศรีวิบูลย์, ญญ.อรอนงค์ ตันทวีวัฒน์, รศ.ดร.วีณา จิรัจฉริยากุล สมุนไพรธรรมชาติที่นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง *Phytocosmetic* กลุ่มควบคุมเครื่องสำอาง สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา
7. คมสันต์ สุทธิสินทอง, ม.อ., การสังเคราะห์และกักเก็บสารออกฤทธิ์ของอนุพันธ์คูมารินที่สามารถตอบสนองต่อแสงในรูปอนุภาคนาโนสำหรับประยุกต์ใช้ในทางการเกษตร. 2558, ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ.
8. Volker Hagen, F.K., Janina Schaal, Brigitte Dekowski, Reinhard Schmidt and Nico Kotzur, [8-[Bis(carboxymethyl)aminomethyl]-6-bromo-7-hydroxycoumarin-4-yl]methyl Moieties as Photoremovable Protecting Groups for Compounds with COOH, NH<sub>2</sub>, OH, and CdO Functions. *J. Org. Chem.*, 2010. 75.
9. พันธุ์เกษมสุข, ธ., บทที่ 5 สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช. เชียงใหม่: วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกษตรศาสตร์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
10. ัญญพิสิษฐ์ พวกจิก, ส.ธ., ผลของสาร IBA ต่อการขยายพันธุ์ไม้เลี้ยงด้วยวิธีการตอน. *Journal of forest management* 2552. 3(6): p. 8.
11. ปิยะณัฐ ฝกามาศ, อ.เ., มลปภา นาถึง, ผลของ NAA IBA และส่วนของกิ่งต่อการออกรากกิ่งปักชำสบู่ดำ.

12. 2016; Available from:  
<http://www.phytochemicals.info/phytochemicals/coumarin.php>.
13. ; Available from: <https://chemistry.stackexchange.com/questions/506/explain-the-nomenclature-of-7-amino-4-methylcoumarin>.
14. Taves, R.H.G.a.C., *The Effect of Coumarin Derivatives on the Growth of Avena Roots*. American Journal of Botany, 1950.
15. Song-Wei Lv, J.W., Min Xie, Ning-Ning Lu, Zhen Li, Xue-Wei Yan, Si-Liang Cai, Ping-An Zhang, Wei-Guo Dong and Wei-Hua Huang, *Photoresponsive immunomagnetic nanocarrier for capture and release of rare circulating tumor cells*. Chemical Science, 2015.
16. Murthy V. S. N. Maddipatla, D.W., Chuan Tang, Weizheng Fan, Moses O. Oyewumi, Toshikazu Miyoshi and Abraham Joy, *Photoresponsive Coumarin Polyesters That Exhibit Cross-Linking and Chain Scission Properties*. Macromolecules, 2013.
17. Shrabani Barman, J.D., Sandipan Biswas, T. K. Maitib, N. D. Pradeep Singh, *A spiropyran-coumarin platform: an environment sensitive photoresponsive drug delivery system for efficient cancer therapy*. Journal of Materials Chemistry B, 2017.
18. S. Karthik, N.P., B. N. Prashanth Kumar, Shashi Rajput, Amita Pathak, Mahitosh Mandal, and N. D. Pradeep Singh, *Photoresponsive Coumarin-Tethered Multifunctional Magnetic Nanoparticles for Release of Anticancer Drug*. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013.
19. Yu Huang, R.D., Xinyuan Zhu, Deyue Yan, *Photo-responsive polymeric micelles*. 2014.
20. Moumita Gangopadhyay, S.K.M., S. Karthik, Shrabani Barmana and N. D. Pradeep Singh, *Targeted photoresponsive TiO<sub>2</sub>-coumarin nanoconjugate for efficient combination therapy in MDA-MB-231 breast cancer cells: synergic effect of photodynamic therapy (PDT) and anticancer drug chlorambucil*. MedChemComm, 2015.

21. Ana M.S. Soares, G.H., Susana P.G. Costa, M. Sameiro T. Gonçalves, *Photoactivatable prodrugs of butyric acid based on new coumarin fused oxazole heterocycles*. Dyes and Pigments, 2017.
22. Shrabani Barman, S.K.M., Moumita Gangopadhyay, Sandipan Biswas, a Satyahari Dey, N. D. Pradeep Singh, *Coumarin–benzothiazole–chlorambucil*. 2015.
23. contributors., *W. Batch reactor*. 2016 12 october 2016; Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Batch\\_reactor](https://en.wikipedia.org/wiki/Batch_reactor).
24. Tatterson, G.B., *Geometric Similarity. Process Scaleup and Design*. 2002: North Carolina: North Carolina A&T State University.
25. ใจสัตย์, ล., การขยายขนาดการสังเคราะห์ควอเทอร์ไนซ์ไซโคลเดกซ์ทรินเชื่อมโคโตซาน 2559, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
26. Couper, J.R., et al., *Chemical Process Equipment Selection and Design*. . Third ed. 2012: Elsevier Inc.
27. เอี่ยมกุลวรพงษ์, ธ., การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนสำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเดกซ์ทริน. 2557, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. p. 107.
28. ไพบูลย์, น., การขยายขนาดการสังเคราะห์ไซโครเดกซ์ทรินเชื่อมกับโคโตซาน. 2558, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. p. 92.
29. Annett Lomtschera, K.J., Stefan Fogel, Kay Rostalski, Silke Stempin, Matthias Kraume, *Scale-up of mixing processes of highly concentrated suspensions using electrical resistance tomography*. Flow Measurement and Instrumentation, 2016.



## ภาคผนวก ก.

## การคำนวณอัตราส่วนของสาร

มวลโมเลกุลของสาร

7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน	= 210.614	กรัมต่อโมล
กรดอินโดล-3-บิวทีริก	= 203.24	กรัมต่อโมล
7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก	= 377.39	กรัมต่อโมล
โพแทสเซียมคาร์บอเนต	= 138.205	กรัมต่อโมล
โพแทสเซียมไอโอไดด์	= 166.003	กรัมต่อโมล

วิธีคำนวณ

น้ำหนักของ7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินที่ใช้	= 2.5	กรัม
มีจำนวนโมล	$= \frac{2.5 \text{ กรัม}}{210.614 \text{ กรัมต่อโมล}}$	= 0.01187 โมล
น้ำหนักของกรดอินโดล-3-บิวทีริกที่ใช้	= 2.4125	กรัม
มีจำนวนโมล	$= \frac{2.4125 \text{ กรัม}}{210.614 \text{ กรัมต่อโมล}}$	= 0.01187 โมล

คิดเป็นอัตราส่วน 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : กรดอินโดล-3-บิวทีริก เท่ากับ 1:1

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

น้ำหนักของ7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินที่ใช้	= 17.5	กรัม
มีจำนวนโมล	$= \frac{17.5 \text{ กรัม}}{210.614 \text{ กรัมต่อโมล}}$	= 0.083 โมล

จาก อัตราส่วนโดยโมลของ7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : กรดอินโดล-3-บิวทีริกเท่ากับ 1 : 1

คิดเป็นกรดอินโดล-3-บิวทีริก 0.08309 โมล  $\times$  203.24 กรัมต่อโมล = 16.8875 กรัม

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ที่ใช้} &= 122.5 \quad \text{กรัม} \\ \text{มีจำนวนโมล} &= \frac{122.5 \text{ กรัม}}{210.614 \text{ กรัมต่อโมล}} = 0.581 \quad \text{โมล} \end{aligned}$$

จาก อัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน : กรดอินโดล-3-บิวทีริก เท่ากับ 1 : 1  
คิดเป็นกรดอินโดล-3-บิวทีริก 0.58163 โมล  $\times$  203.24 กรัมต่อโมล = 118.2125 กรัม

**ตารางที่ ก.1** ปริมาณ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน และกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แต่ละขนาด

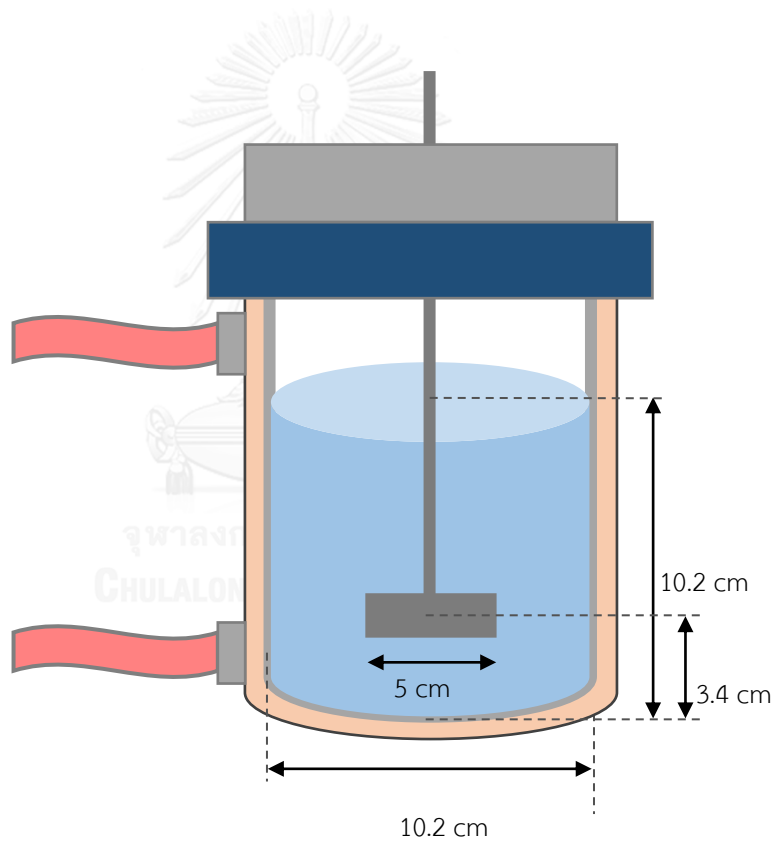
ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ (ลิตร)	7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (กรัม)	กรดอินโดล-3-บิวทีริก (กรัม)
0.25	2.5	2.4125
2	17.5	16.8875
10	122.5	118.2125

ภาคผนวก ข.

## ขนาดและสัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์

### เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบถังกวนประกอบด้วย jacket reactor ขนาด 2 ลิตร และอ่างน้ำมันร้อน (circulating bath) เป็นส่วนควบคุมอุณหภูมิ ถังกวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10.2 เซนติเมตร ใบกวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความเร็วรอบในการปั่นการสามารถที่ควบคุมได้อยู่ในช่วง 0-800 รอบต่อนาที

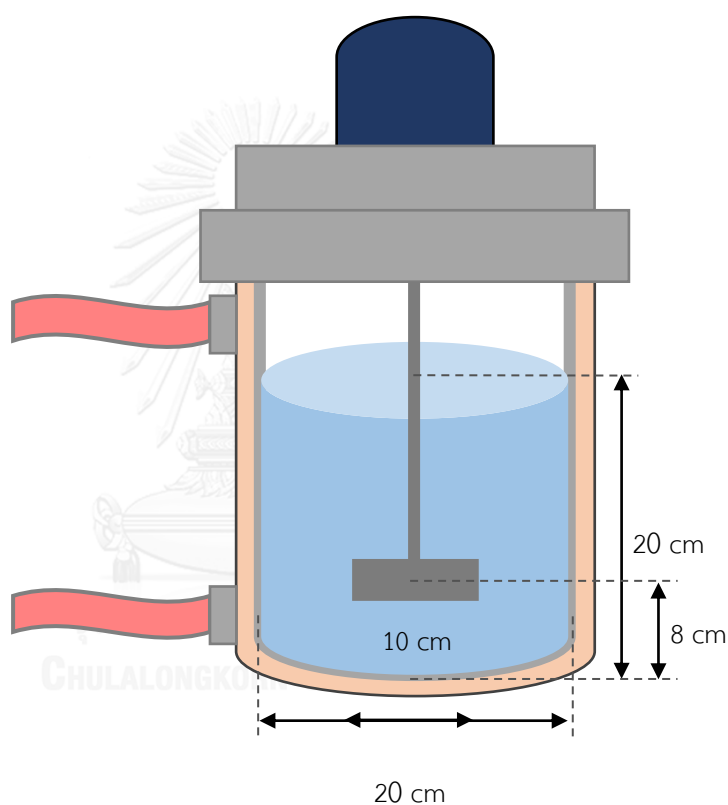


รูปที่ ข.1 ขนาดและสัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร



### เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบถังกวนขนาด 10 ลิตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) เกรด 316 ควบคุมอุณหภูมิน้ำมันร้อนแบบไหลเวียน ถังกวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร มีบัพเฟิลจำนวน 4 ชั้น กว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 22 เซนติเมตร ใบกวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความเร็วรอบในการปั่นการสามารถที่ควบคุมได้อยู่ในช่วง 0-500 รอบต่อนาที



รูปที่ ข.2 ขนาดและสัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

ภาคผนวก ค.

การคำนวณความเร็วรอบในการปั่นกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

การคำนวณความเร็วรอบในการปั่นกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร อ้างอิงจากความเร็วรอบที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร คือที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) ดังต่อไปนี้

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^n$$

โดยที่ $N_2$	คือ ความเร็วรอบของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 700 รอบต่อนาที
$N_1$	คือ ความเร็วรอบของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร (รอบต่อนาที)
$D_1$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร มีค่าเท่ากับ 10.2 เซนติเมตร
$D_2$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร มีค่าเท่ากับ 20 เซนติเมตร
$n$	คือ ค่าเอ็มพิริคัลและค่าเชิงทฤษฎี

ความเร็วปลายใบกวนมีค่าเท่ากัน (n=1)

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{10.2}{20}\right)^1$$

$$N_2 = 700 \times \left(\frac{10.2}{20}\right)^1$$

$$N_2 = 357$$

กำลังต่อปริมาตรหรืออัตราการถ่ายเทมวลมีค่าเท่ากัน (n=2/3)

$$\frac{N_2}{N_1} = \left( \frac{10.2}{20} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$N_2 = 700 \times \left( \frac{10.2}{20} \right)^{2/3}$$

$$N_2 = 447$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากัน (n=1/2)

$$\frac{N_2}{N_1} = \left( \frac{10.2}{20} \right)^{1/2}$$

$$N_2 = 700 \times \left( \frac{10.2}{20} \right)^{1/2}$$

$$N_2 = 500$$

การกระจายตัวของของแข็งเท่ากัน( $n=3/4$ )

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{10.2}{20}\right)^{3/4}$$

$$N_2 = 700 \times \left(\frac{10.2}{20}\right)^{3/4}$$

$$N_2 = 423$$



ตัวอย่างการหาความสัมพันธ์ของค่าเอ็มพิริคัลและค่าเชิงทฤษฎี ( $n$ ) ในการขยายขนาด

เมื่อกำหนดให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่

การถ่ายเทความร้อนภายในถึงกวนที่มีของไหลเคลื่อนที่จะมีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (convection) ซึ่งมีสมการดังนี้ [17]

$$Q = hA\Delta T$$

โดยที่  $Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$h$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$A$  คือ พื้นที่ผิวสัมผัส

$\Delta T$  คือ ความต่างของอุณหภูมิที่พื้นผิวให้ความร้อนและอุณหภูมิของสาร

กลุ่มตัวเลขไร้มิติของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน  $Nu$  จะเป็นฟังก์ชันของ  $Re$  และ  $Pr$  คือ

$$Nu = f(Re, Pr)$$

ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้ [17]

$$\frac{hl}{k} = f\left(\frac{\rho lv}{\mu}, \frac{C_p \mu}{k}\right)$$

โดยที่  $l$  คือ ความยาวเฉพาะ(characteristic length)

$k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล

$v$  คือ ความเร็วในการไหล

$\mu$  คือ ความหนืดของของไหล

$C_p$  คือ ความจุความร้อนของของไหล

สำหรับถึงกวนมาตรฐาน  $l = D$  ดังนั้น จะได้ว่า

$$\frac{hD}{k} = f \left( \frac{\rho D v}{\mu}, \frac{C_p \mu}{k} \right) \quad (11)$$

เมื่อ  $v = \omega r$  และ  $\omega$  คือความเร็วเชิงมุมซึ่งมีความสัมพันธ์กับ  $N$  ส่วน  $r$  คือรัศมีของใบกวนซึ่งสัมพันธ์กับเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน เมื่อเขียนสมการที่ (11) ในรูปใหม่จะได้ดังนี้

$$\frac{hD}{k} = f \left( \frac{\rho D^2 N}{\mu}, \frac{C_p \mu}{k} \right) \quad (12)$$

สำหรับการถ่ายเทความร้อนในถึงกวนที่มีการเคลื่อนที่ของของไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent heat transfer) มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขไร์หน่วยดังนี้ [17]

$$Nu = 0.332 Re^{0.66} Pr^{0.33} \quad (13)$$

และจากสมการที่ (12) และ (13) จะได้ว่า

$$\frac{hD}{k} = \left( \frac{\rho D^2 N}{\mu} \right)^{0.66} \left( \frac{C_p \mu}{k} \right)^{0.33} \quad (14)$$

เมื่อสารในถึงกวนทั้งสองคือสารเดียวกันสมบัติต่างๆของสารจะมีค่าเท่ากัน ดังนี้

$$k_1 = k_2, \mu_1 = \mu_2, \rho_1 = \rho_2, C_{p1} = C_{p2}$$

โดยที่  $k_1, k_2$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลในถึงกวนใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$\mu_1, \mu_2$  คือ ความหนืดของของไหลในถึงกวนใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$\rho_1, \rho_2$  คือ ความหนาแน่นของของไหลในถึงกวนใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$C_{p1}, C_{p2}$  คือ ความจุความร้อนของของไหลในถึงกวนใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

เมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างถังกวนใบที่ 1 และ 2 จะได้

$$\frac{h_1 D_1}{h_2 D_2} = \left( \frac{D_1^2 N_1}{D_2^2 N_2} \right)^{0.66}$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{D_1^{2 \cdot 0.66 - 1} N_1^{0.66}}{D_2^{2 \cdot 0.66 - 1} N_2^{0.66}}$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{D_1^{0.33} N_1^{0.66}}{D_2^{2 \cdot 0.33 - 1} N_2^{0.66}}$$

เมื่อ  $h_1, h_2$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในถังกวนใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

เมื่อกำหนดให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ ( $h_1 = h_2$ ) จะได้ว่า

$$\left( \frac{N_2}{N_1} \right) = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{0.33/0.66}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{1/2}$$

เมื่อกำหนดให้ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าคงที่

ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) เป็นตัวเลขที่ใช้อธิบายลักษณะการไหลของของไหล โดยอยู่ในรูปของอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงจากความหนืด ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้ [17]

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{\rho D^2 N}{\mu}$$

เมื่อกำหนดให้ตัวเลขเรย์โนลด์ของถังกวนมีค่าคงที่จะได้

$$Re_1 = Re_2$$

$$\frac{\rho_1 D_1^2 N_1}{\mu_1} = \frac{\rho_2 D_2^2 N_2}{\mu_2}$$

โดยที่  $Re_1, Re_2$  คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของถังกวนใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

เมื่อสารในถังกวนทั้งสองคือสารเดียวกัน  $\mu_1 = \mu_2$  และ  $\rho_1 = \rho_2$  จะได้ว่า

$$D_1^2 N_1 = D_2^2 N_2$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$$



เมื่อกำหนดให้ตัวเลขเฟรardtมีค่าคงที่

ตัวเลขเฟรardt (Froude number) คือ อัตราส่วนของแรงเนื่องจากความเฉื่อยกับแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้ [17]

$$Fr = \frac{DN^2}{g}$$

โดยที่  $Fr$  คือ ตัวเลขเฟรardt

$g$  คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก

เมื่อกำหนดให้ตัวเลขเฟรardtของถังกวนมีค่าคงที่จะได้

$$Fr_1 = Fr_2$$

$$\frac{D_1 N_1^2}{g} = \frac{D_2 N_2^2}{g}$$

โดยที่  $Fr_1, Fr_2$  คือ ตัวเลขฟรูดของถังกวนใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ  
เนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจะได้ว่า

$$D_1 N_1^2 = D_2 N_2^2$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{1/2}$$

เมื่อกำหนดให้ความเร็วที่ปลายใบกวนมีค่าคงที่

ความเร็วปลายใบกวนจากการกวนในแนวแกนซีต้า ( $\theta$ ) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้ [17]

$$v = \omega R = \omega \frac{D}{2}$$

เมื่อกำหนดให้ความเร็วปลายใบกวนมีค่าคงที่จะได้

$$v_1 = v_2$$

$$\omega_1 \frac{D_1}{2} = \omega_2 \frac{D_2}{2}$$

โดยที่  $v_1, v_2$  คือ ความเร็วปลายใบกวนของถังกวนใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$\omega_1, \omega_2$  คือ ความเร็วเชิงมุมในการกวนของถังกวนใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

เนื่องจาก  $\omega = 2\pi N$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{2\pi N_1 D_1}{2} = \frac{2\pi N_2 D_2}{2}$$

$$N_1 D_1 = N_2 D_2$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^1$$

เมื่อกำหนดให้เวลาในการปั่นกวนสมบูรณ์มีค่าคงที่

เวลาของการปั่นกวนมีความสัมพันธ์กับจำนวนรอบในการกวนที่ทำให้การปั่นกวนสมบูรณ์ (mixing time factor) ดังนี้ [17]

$$f_T = Nt_m$$

โดยที่  $f_T$  คือ mixing time factor

$t_m$  คือ เวลาที่ใช้ในการปั่นกวน

เมื่อกำหนดให้เวลาในการปั่นกวนสมบูรณ์มีค่าคงที่จะได้

$$f_{T1} = f_{T2}$$

$$N_1 t_{m1} = N_2 t_{m2}$$

โดยที่  $f_{T1}, f_{T2}$  คือ เวลาในการปั่นกวนสมบูรณ์ถึงกวนใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$t_{m1}, t_{m2}$  คือ เวลาที่ใช้ในการปั่นกวนของถังกวนใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

เมื่อใช้เวลาในการปั่นกวนเท่ากัน จะได้ว่า

$$N_1 = N_2$$

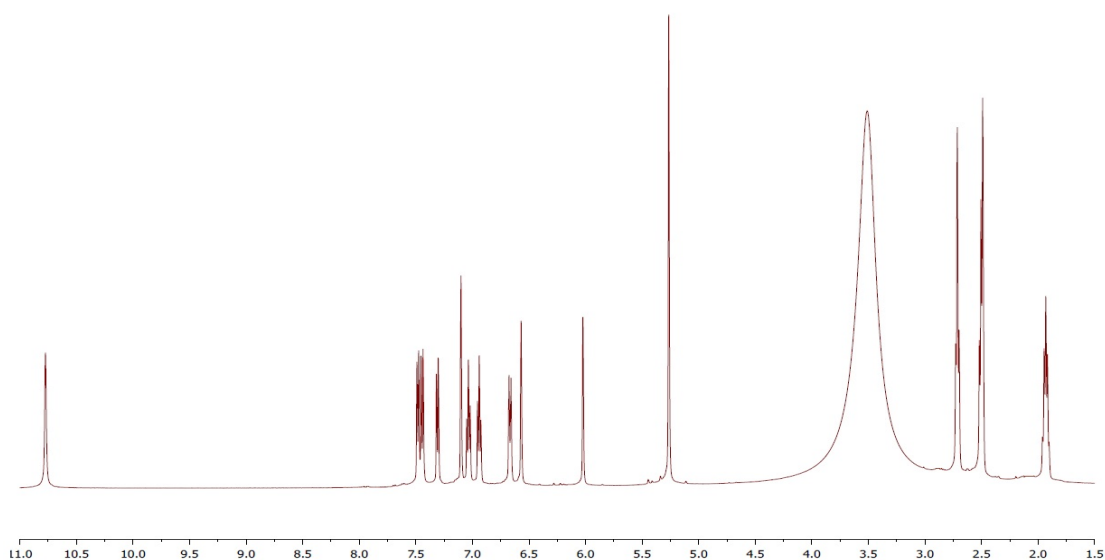
จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^0$$

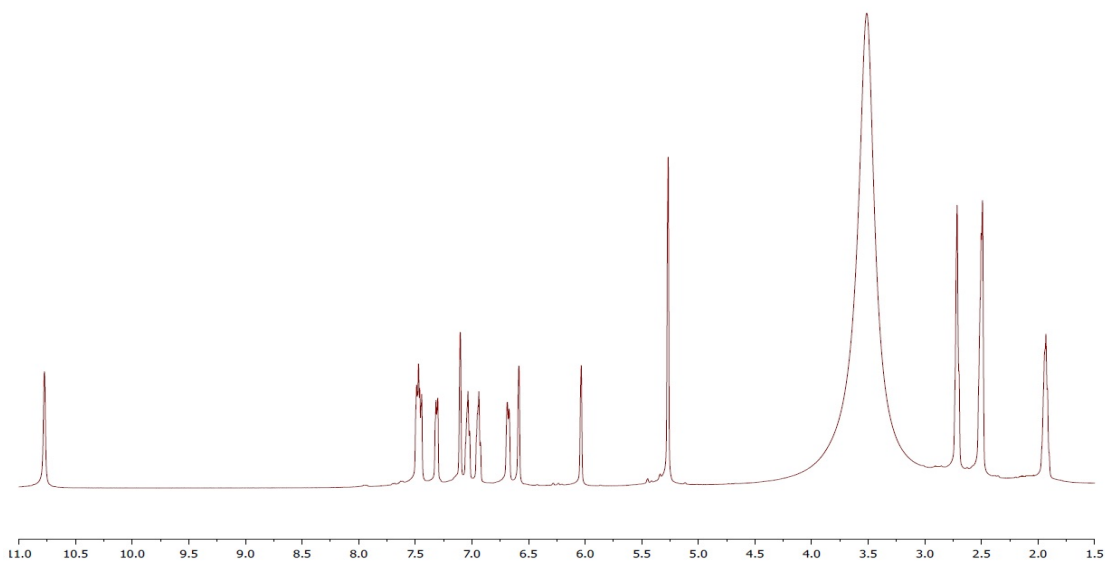
ภาคผนวก ง.

สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริกที่  
ได้จากการทดลอง

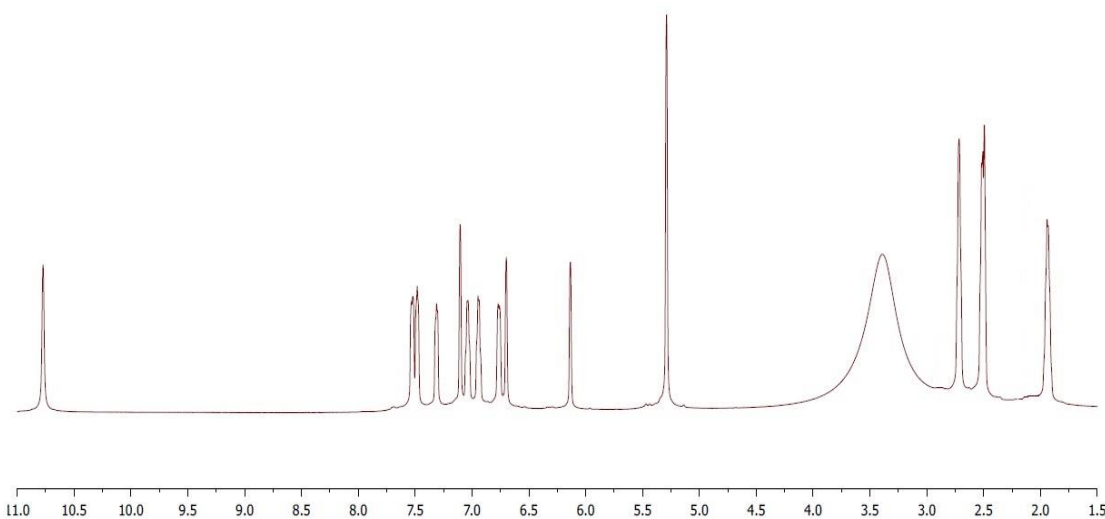
สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริกที่  
ได้จากการทดลองการตกตะกอน



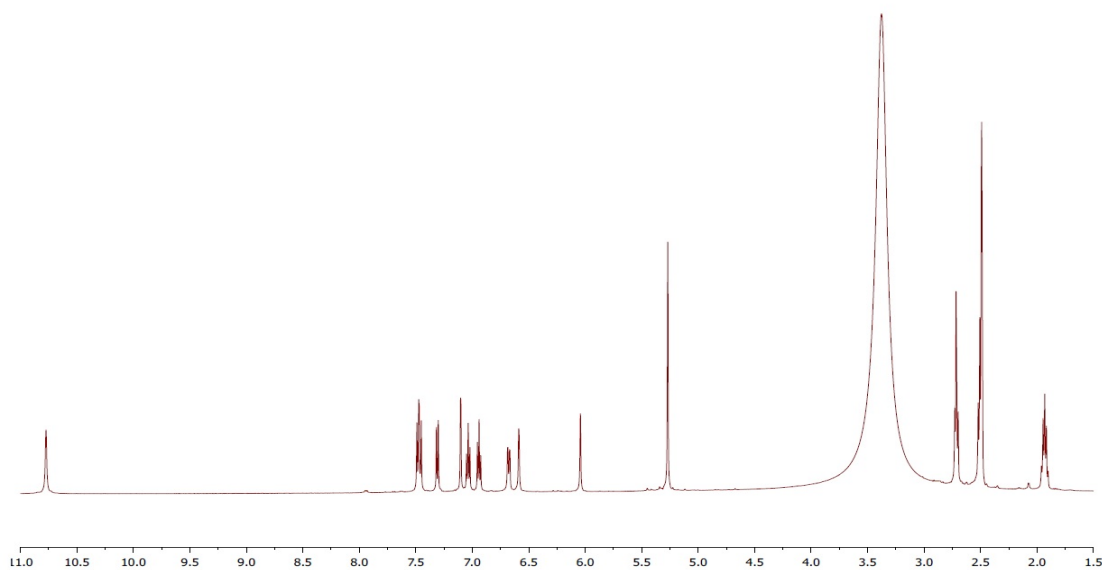
**รูปที่ ง.1** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 5 °C เป็นเวลา 1 วัน (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โฟแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



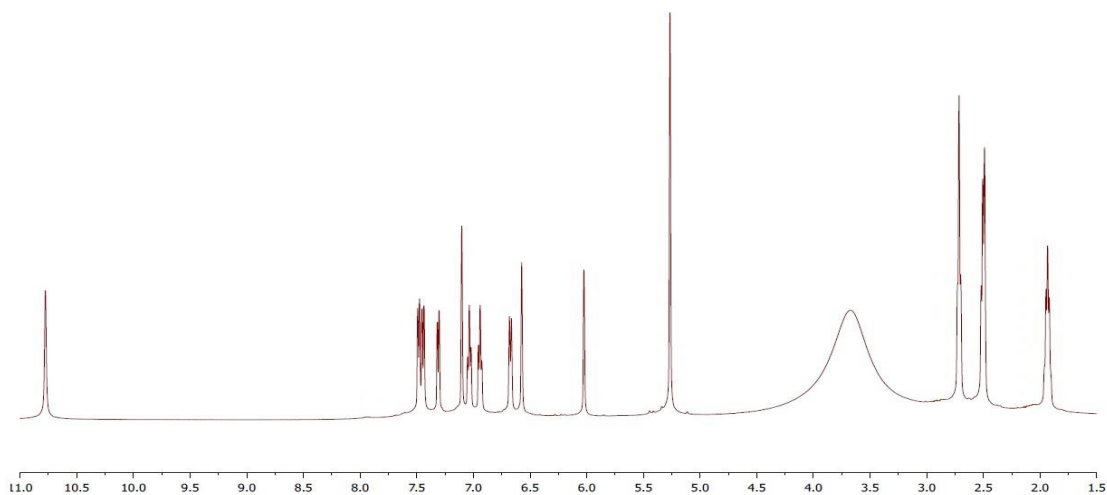
**รูปที่ ง.2** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 5 °C เป็นเวลา 2 วัน (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



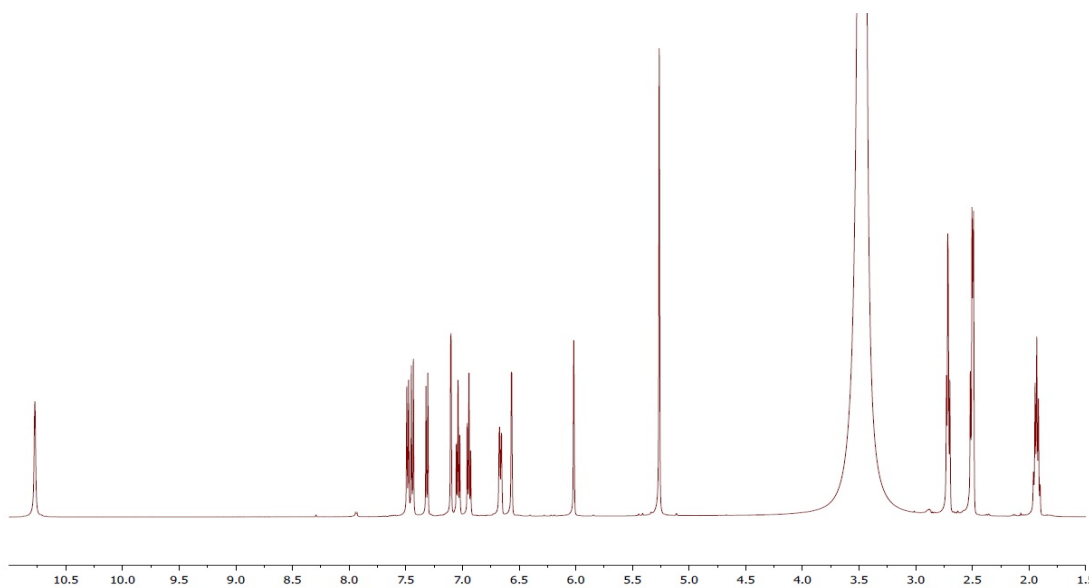
**รูปที่ ง.3** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 5 °C เป็นเวลา 3 วัน (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



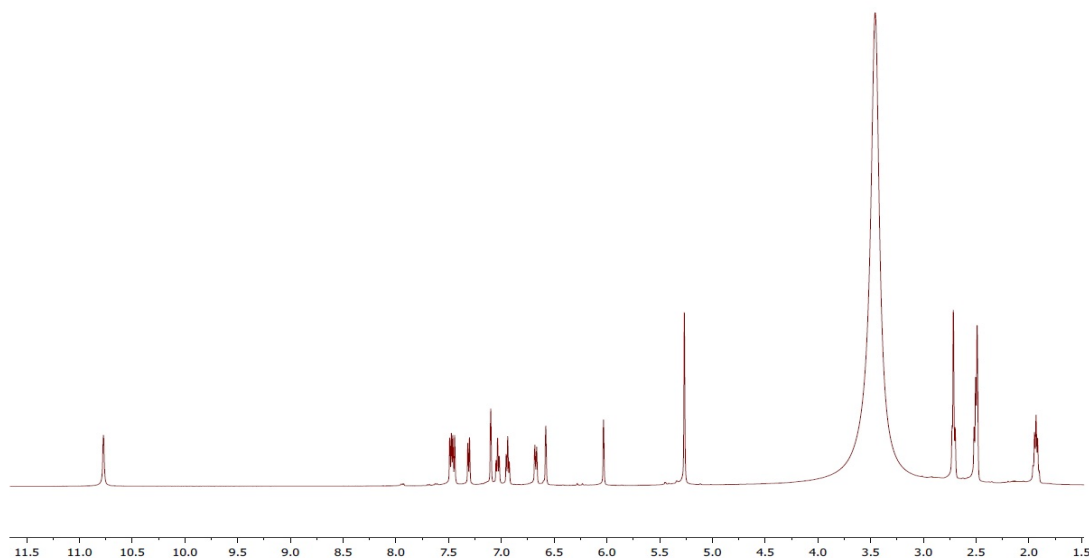
**รูปที่ ง.4** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 5 °C เป็นเวลา 4 วัน (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



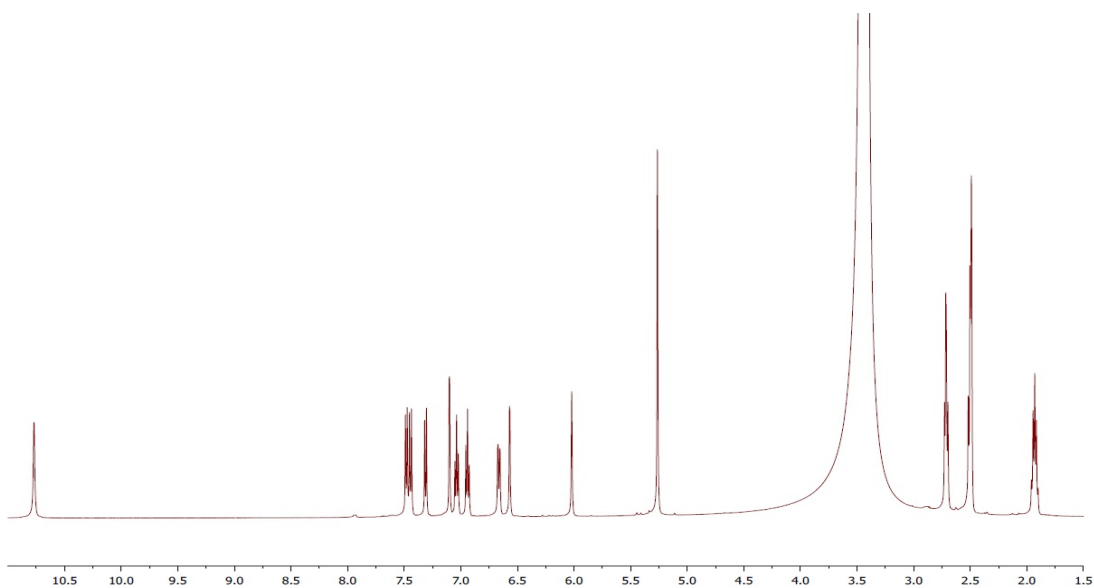
**รูปที่ ง.5** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 5 °C เป็นเวลา 10 วัน (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



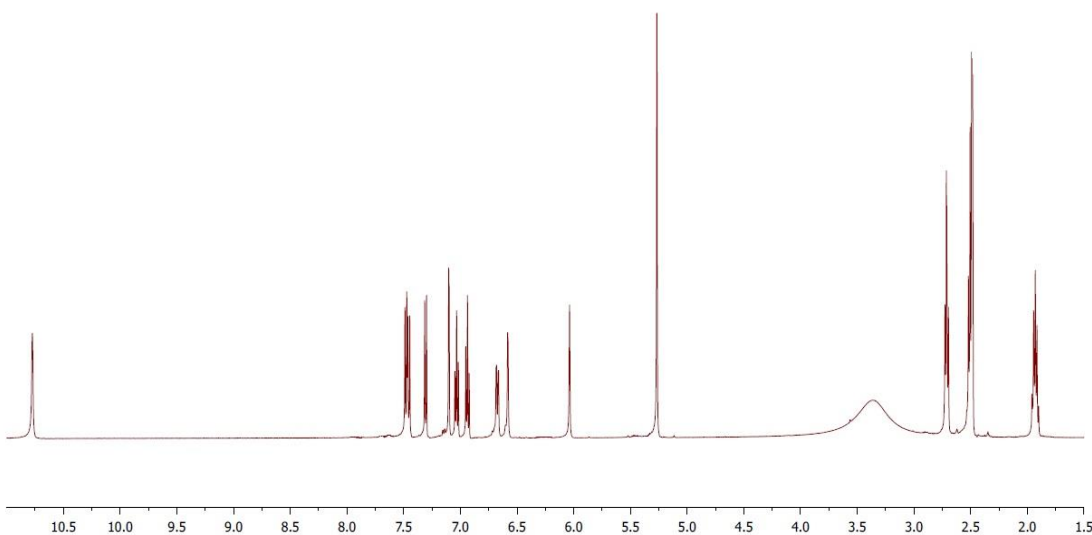
**รูปที่ ง.6** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 23 °C เป็นเวลา 1 วัน (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



**รูปที่ ง.7** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 23 °C เป็นเวลา 2 วัน (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)

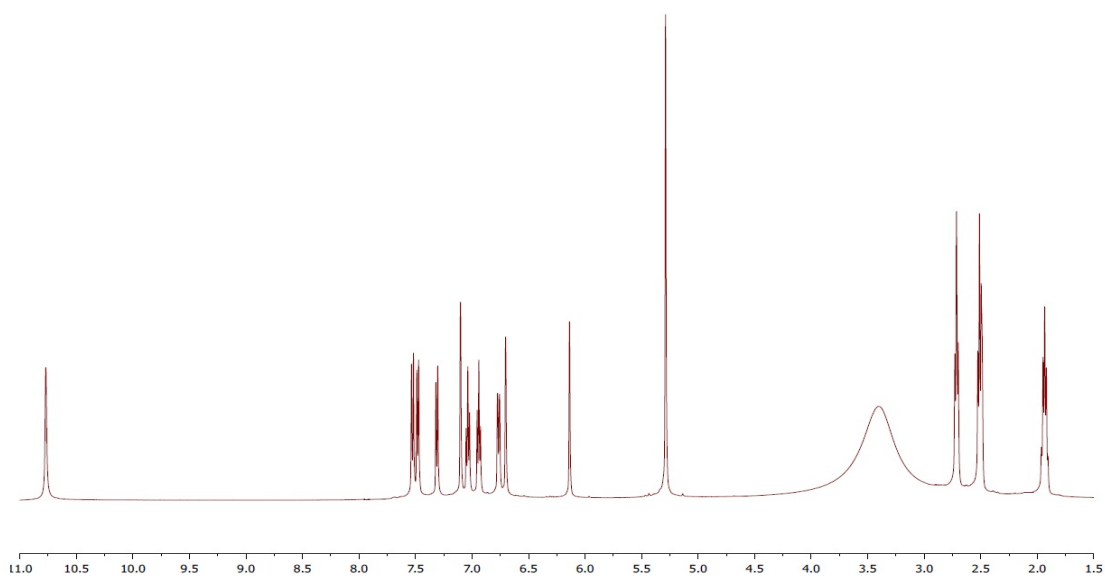


**รูปที่ ง.8** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 23 °C เป็นเวลา 3 วัน (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



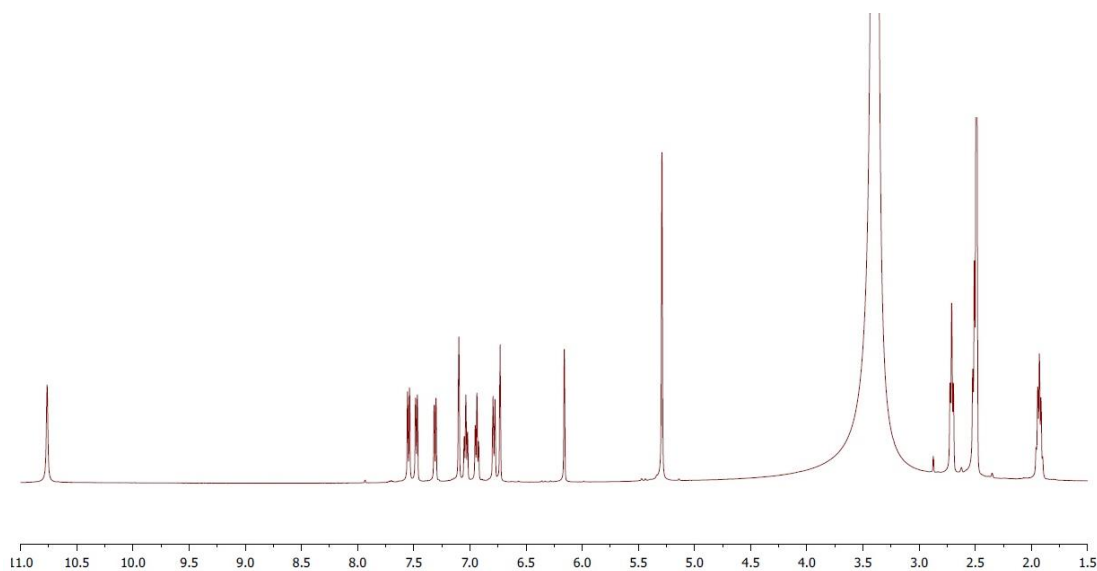
**รูปที่ ง.9** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 23 °C เป็นเวลา 4 วัน (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



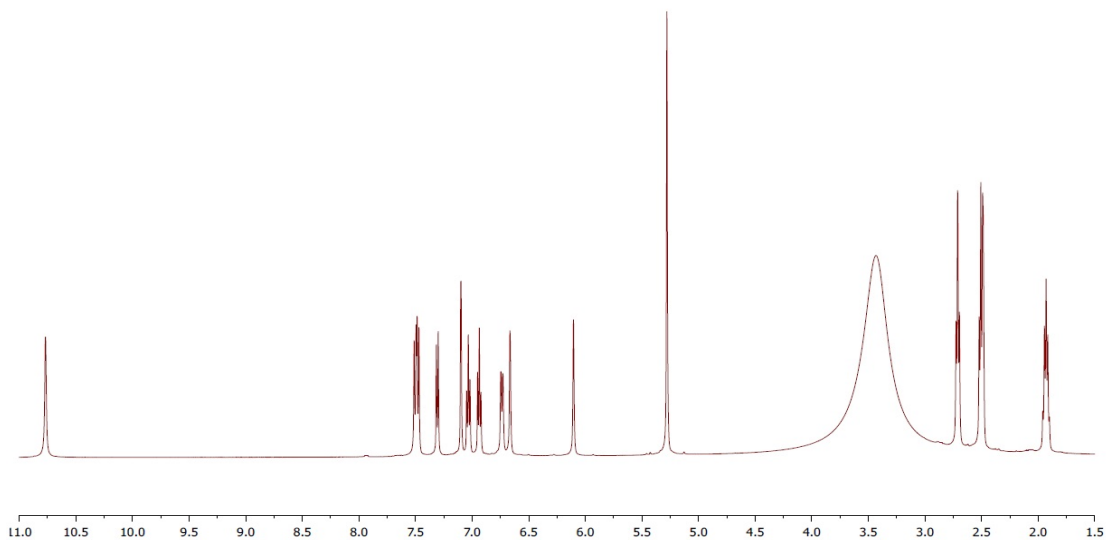


**รูปที่ ง.10** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองการตกตะกอนที่ 23 °C เป็นเวลา 10 วัน (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)

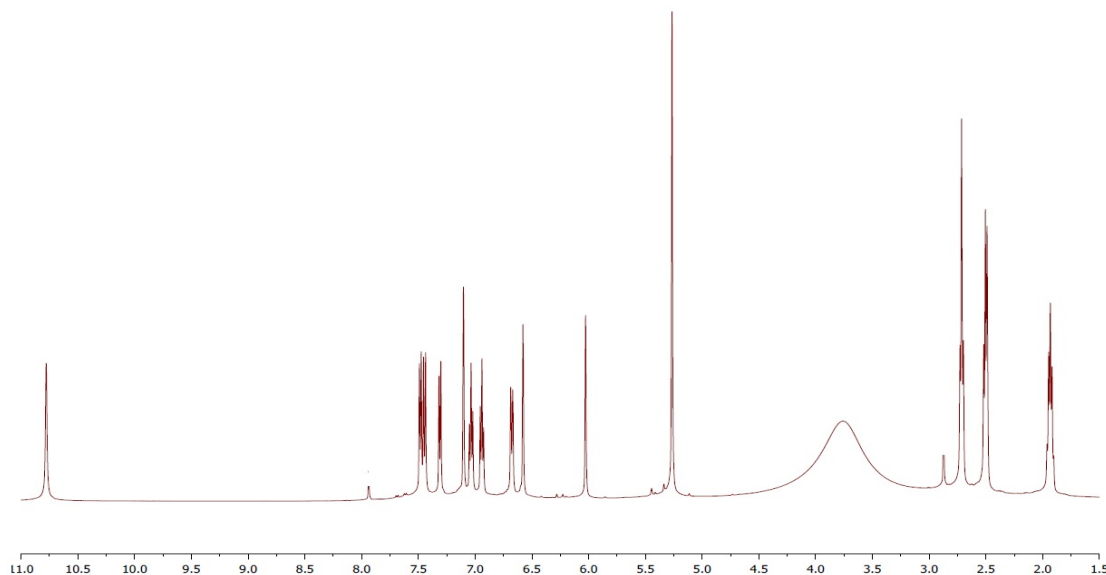
สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่  
ได้จากการทดลองผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา



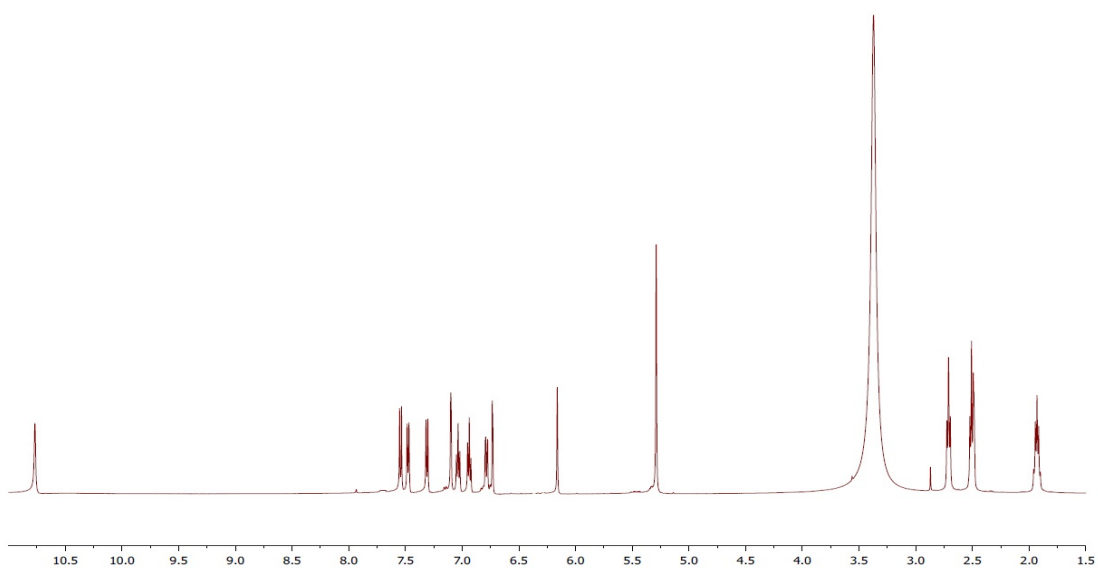
**รูปที่ ง.11** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่ 50 °C (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



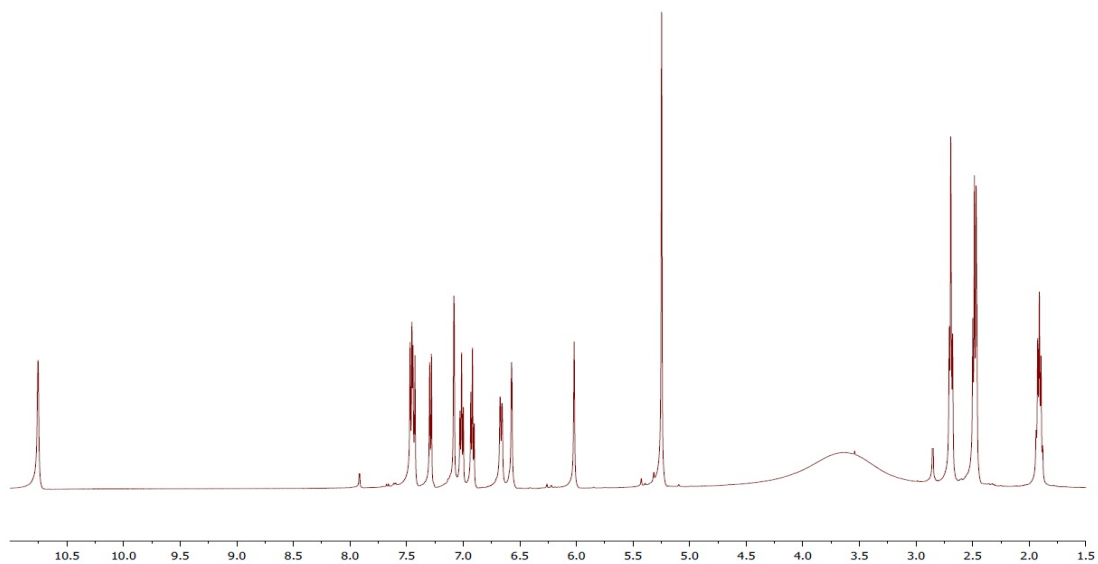
**รูปที่ ง.12** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่ 53 °C (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



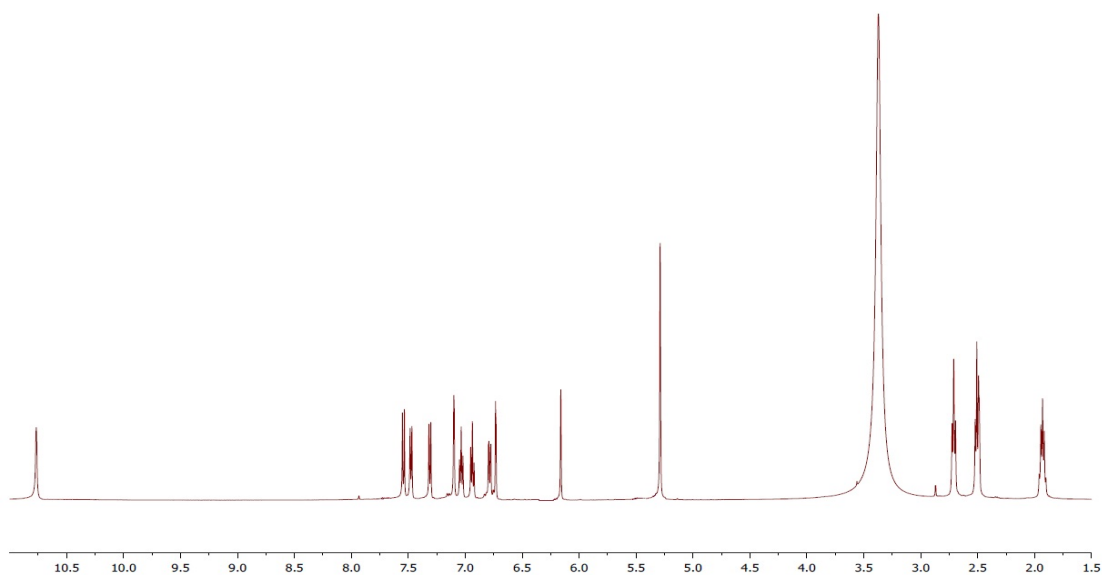
**รูปที่ ง.13** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่ 55 °C (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



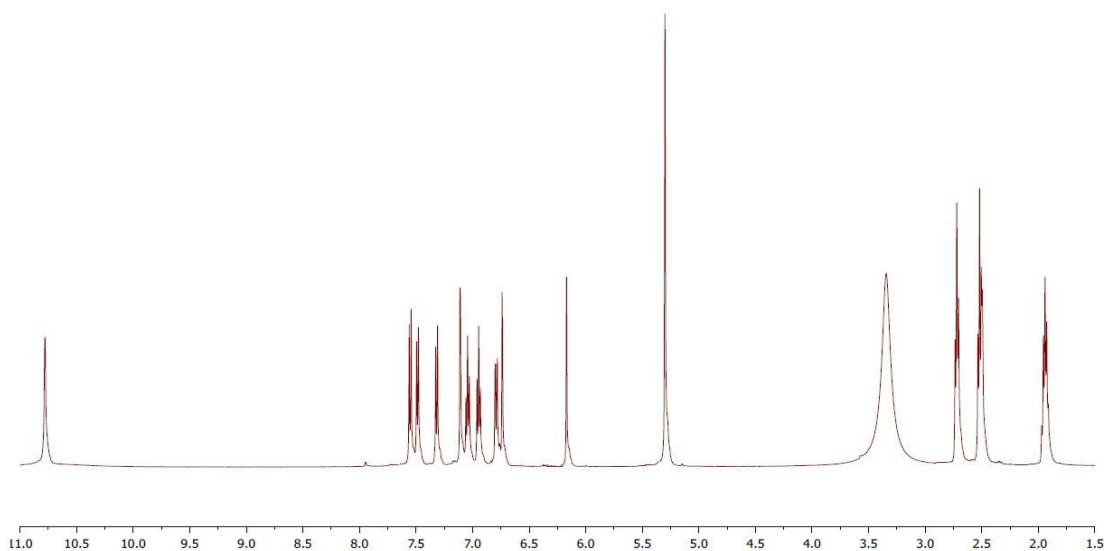
**รูปที่ ง.14** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่ 56 °C (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)



**รูปที่ ง.15** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่ 57 °C (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)

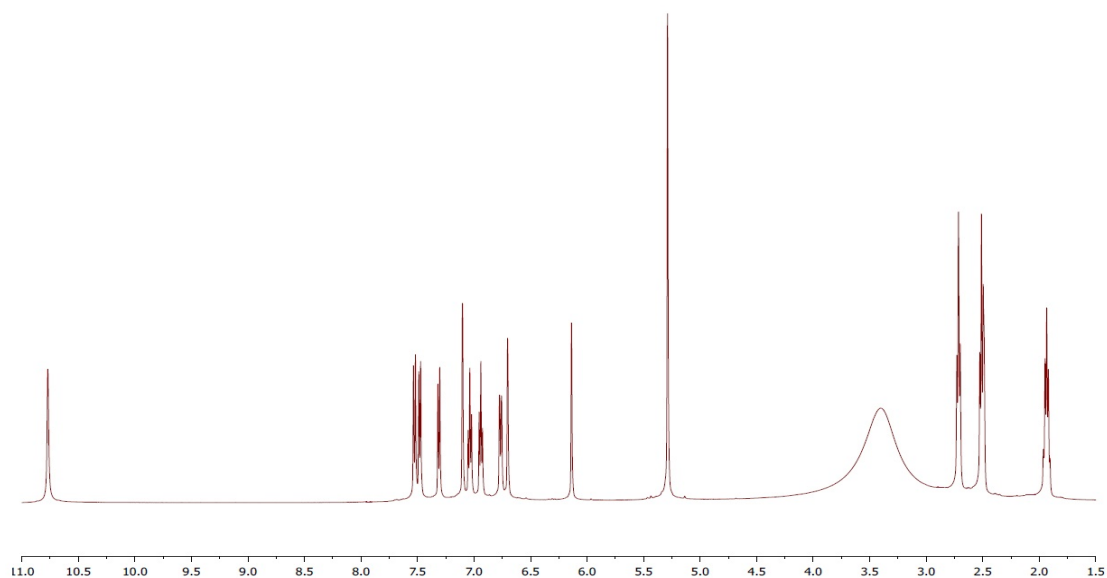


**รูปที่ ง.16** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่ 58 °C (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)

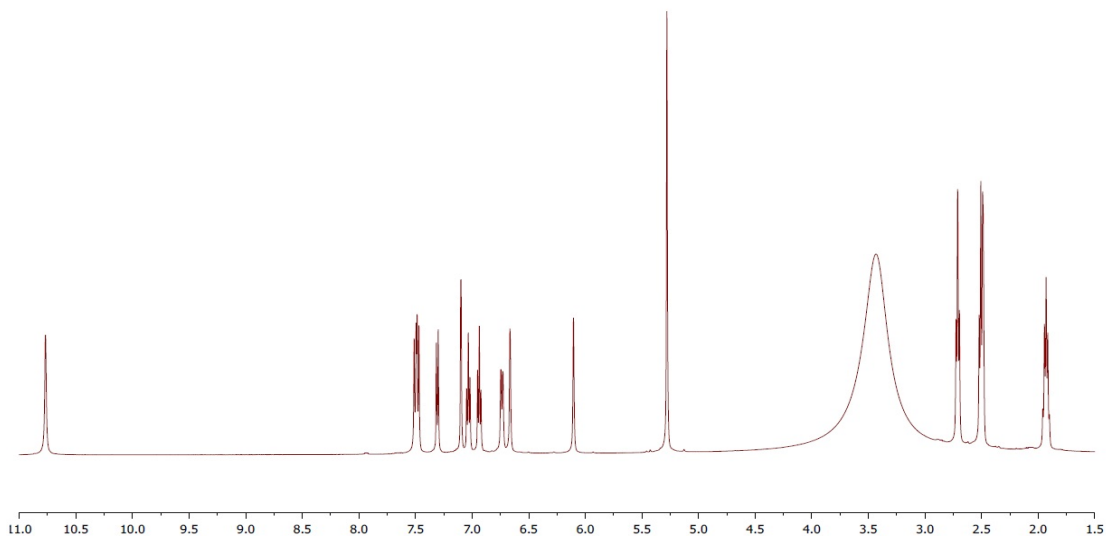


**รูปที่ ง.17** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่ 60 °C (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง)

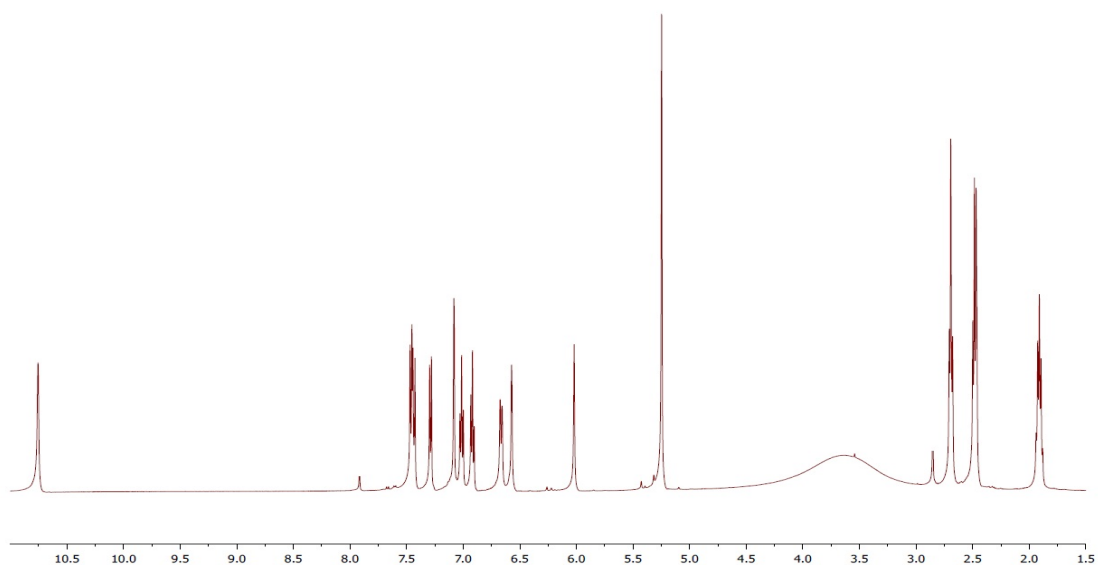
สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก  
ที่ได้จากการทดลองผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยา



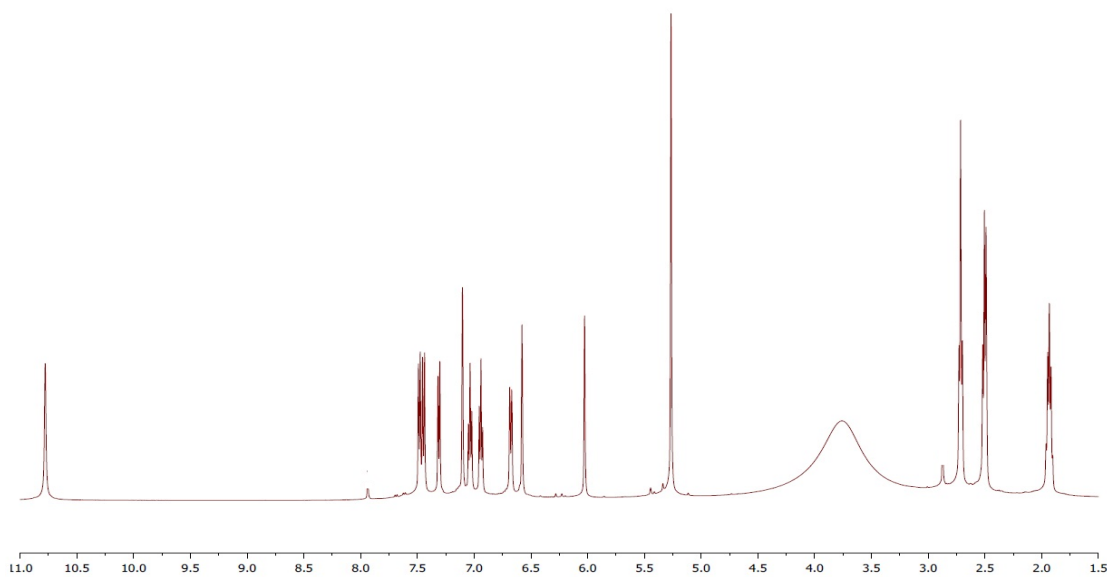
รูปที่ ง.18 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ  
กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 15 นาที (7-ไฮดรอกซี-4-  
คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต  
(2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C)



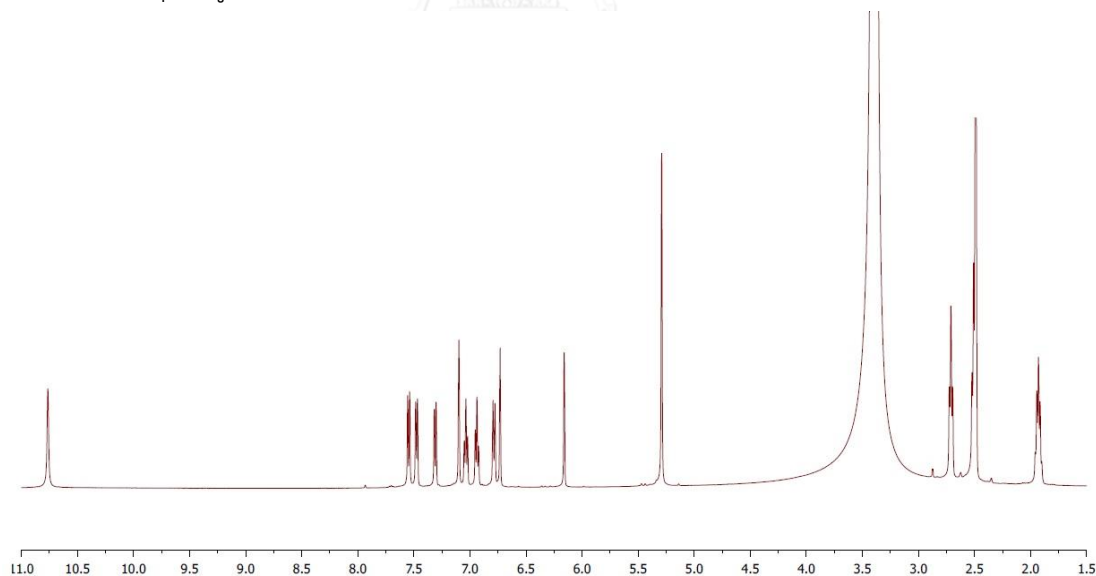
**รูปที่ ง.19** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 30 นาที (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C)



**รูปที่ ง.20** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 45 นาที (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C)

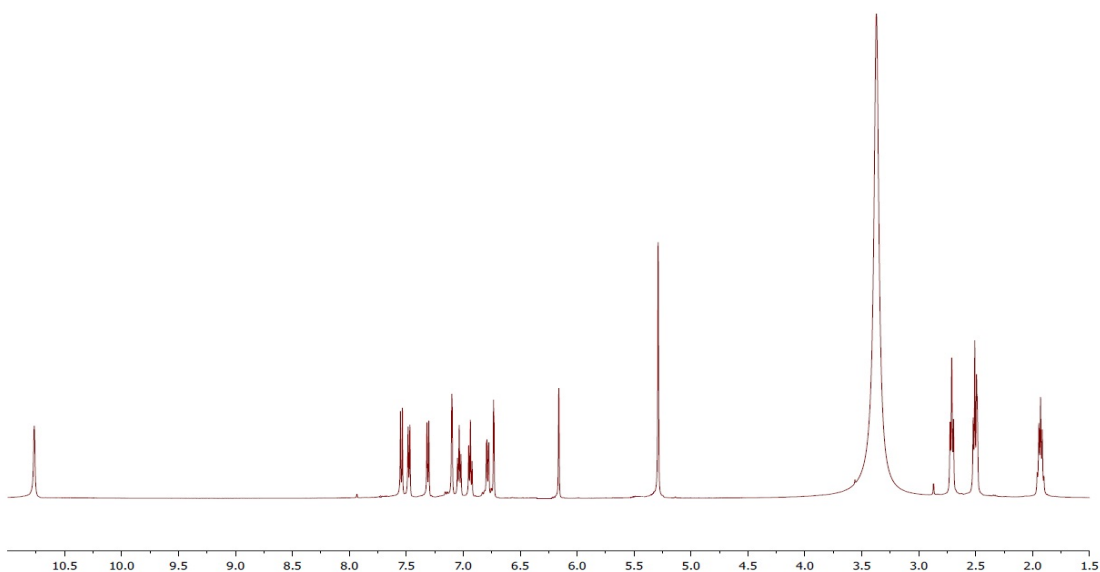


**รูปที่ ง.21** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 1 ชั่วโมง (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C)

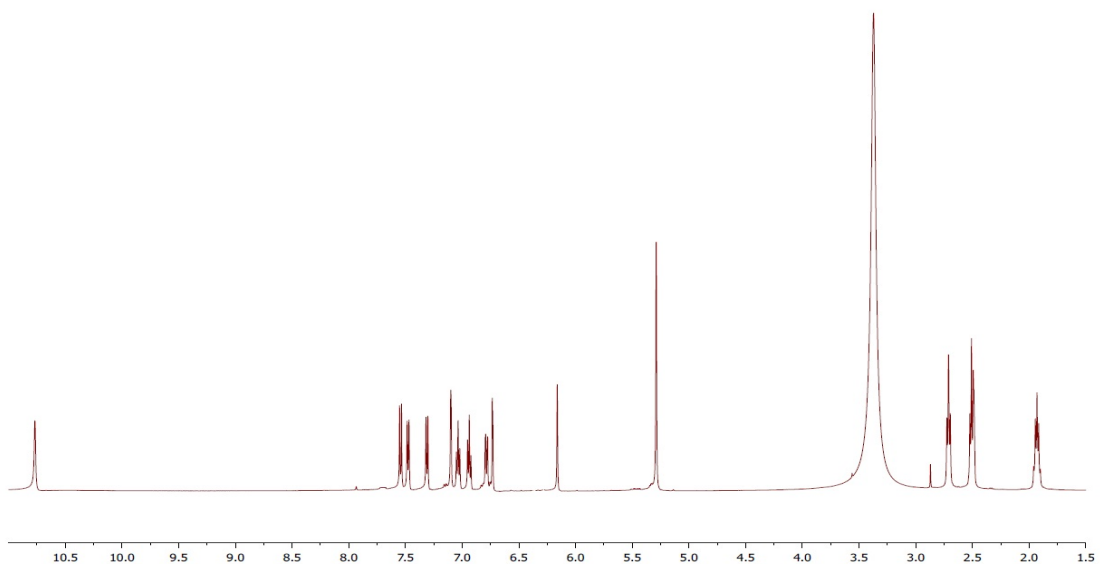


**รูปที่ ง.22** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 2 ชั่วโมง (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C)

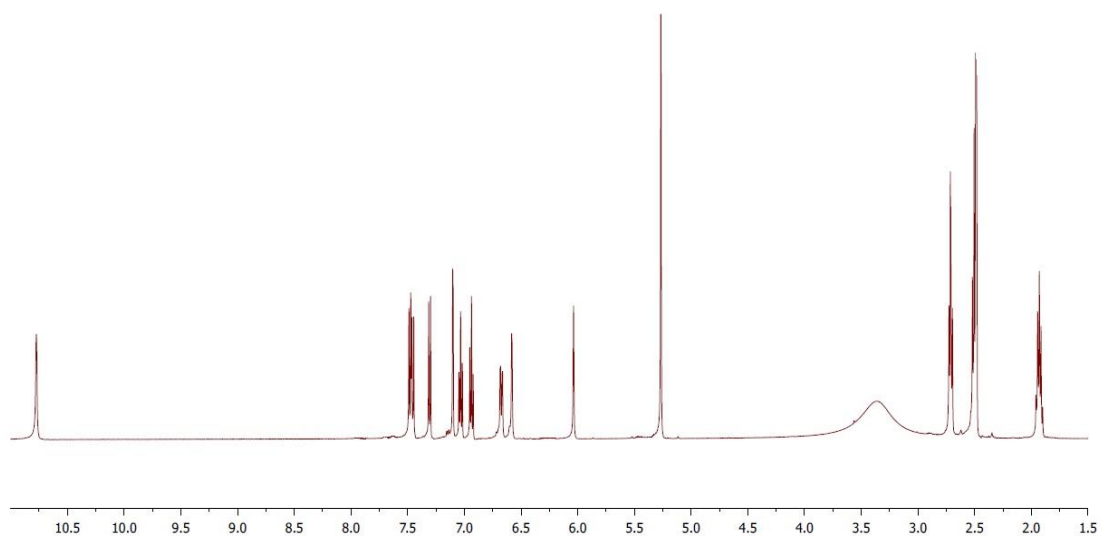




**รูปที่ ง.23** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 3 ชั่วโมง (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C)

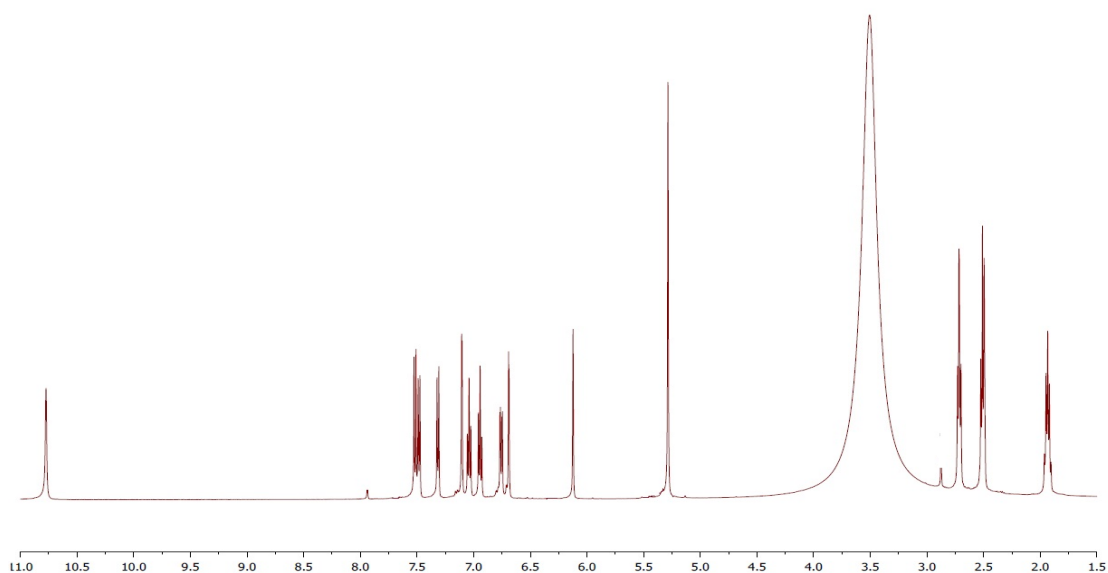


**รูปที่ ง.24** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 4 ชั่วโมง (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C)

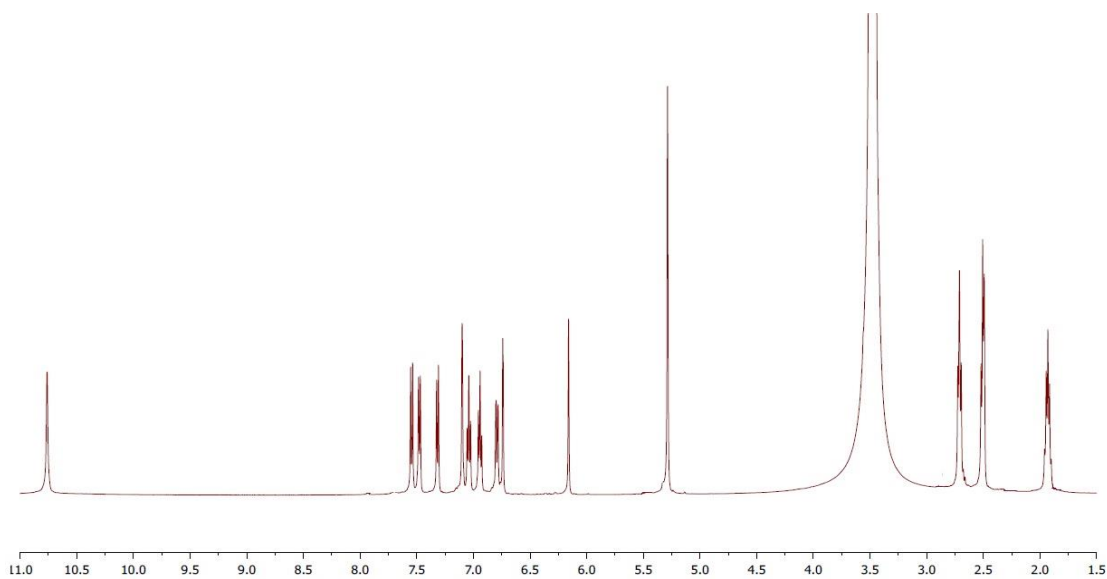


**รูปที่ ง.25** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 5 ชั่วโมง (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C)

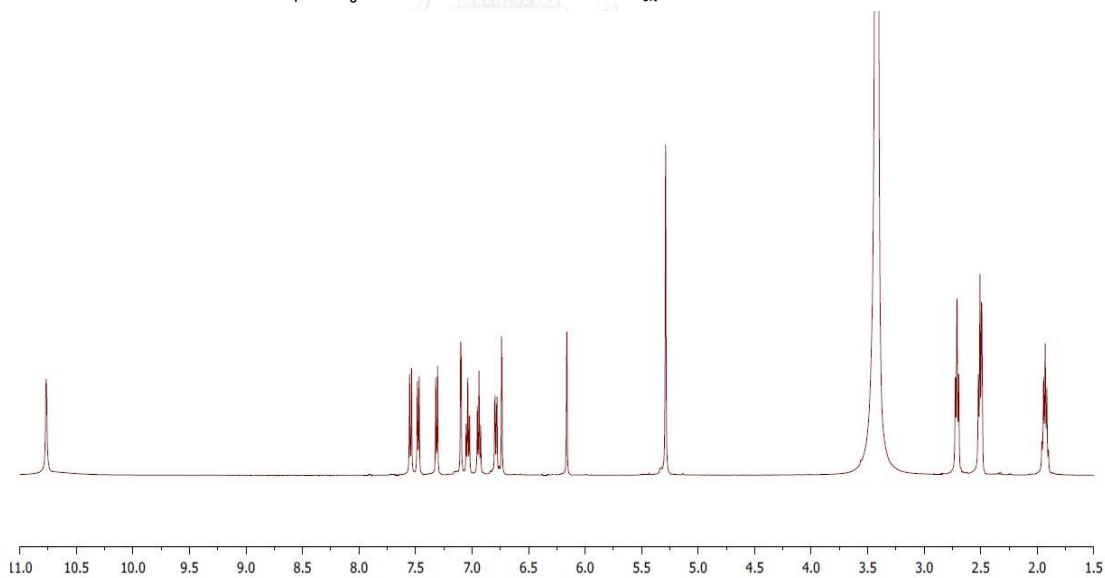
สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก  
 ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-  
 3-บิวทีริก



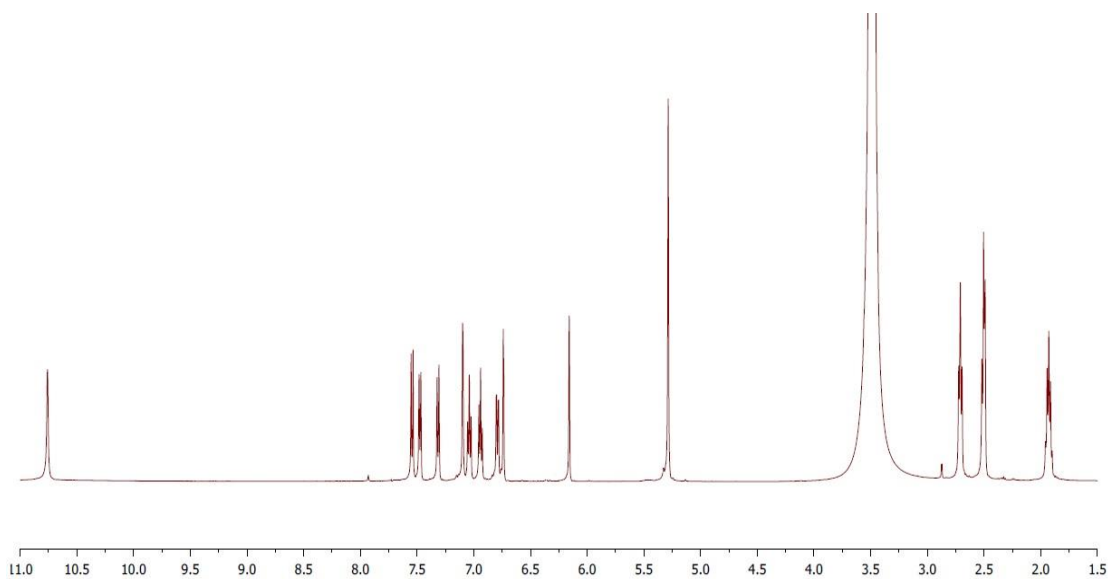
รูปที่ ง.26 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-3-บิวทีริกที่ 1:1 (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)



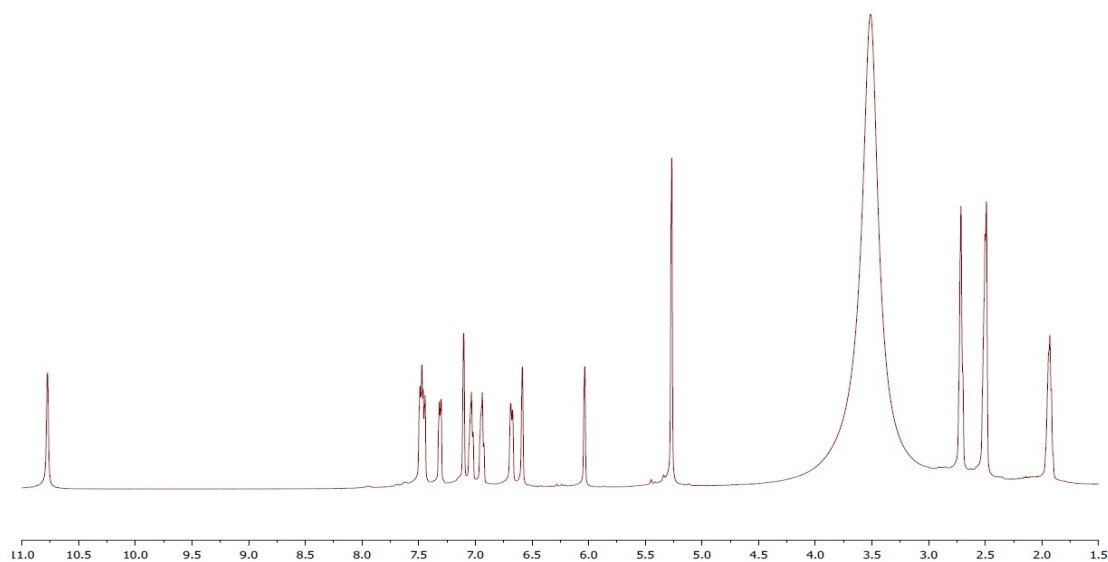
**รูปที่ ง.27** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ต่อกรดอินโดล-3-ปิวิทริกที่ 1:1.2 (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)



**รูปที่ ง.28** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน ต่อกรดอินโดล-3-ปิวิทริกที่ 1:1.5 (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

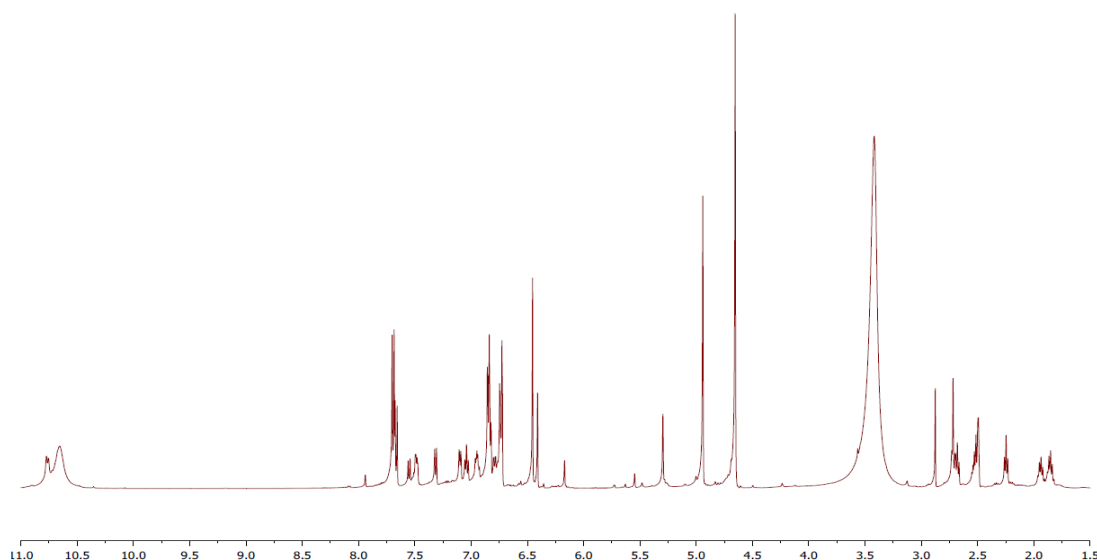


**รูปที่ ง.29** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-3-ปิวิทีริกที่ 1:2 (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

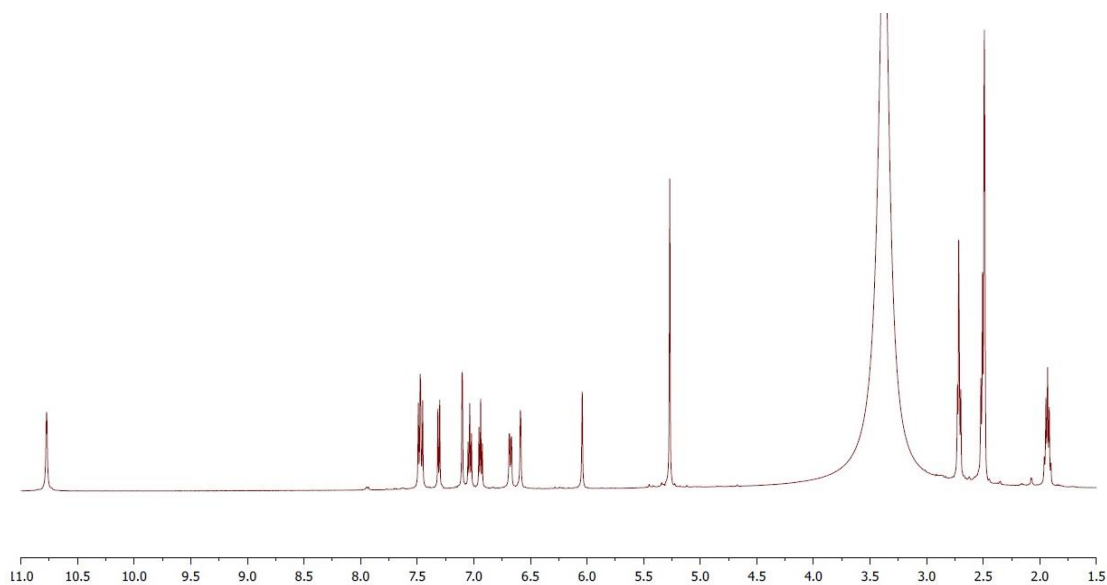


**รูปที่ ง.30** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อกรดอินโดล-3-ปิวิทีริกที่ 1:3 (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (2 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

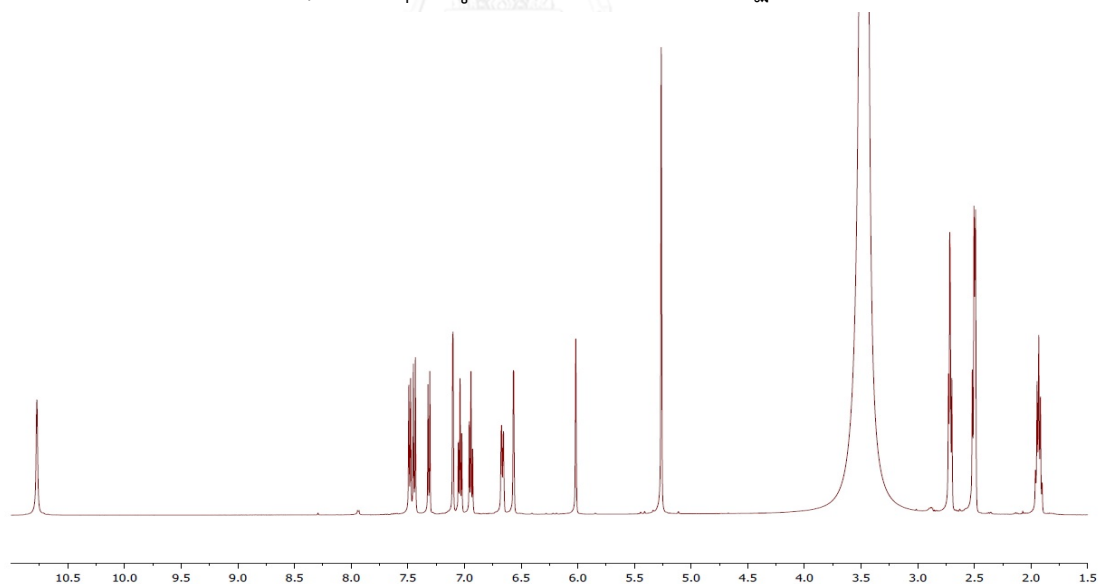
สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก  
ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียม  
คาร์บอเนต



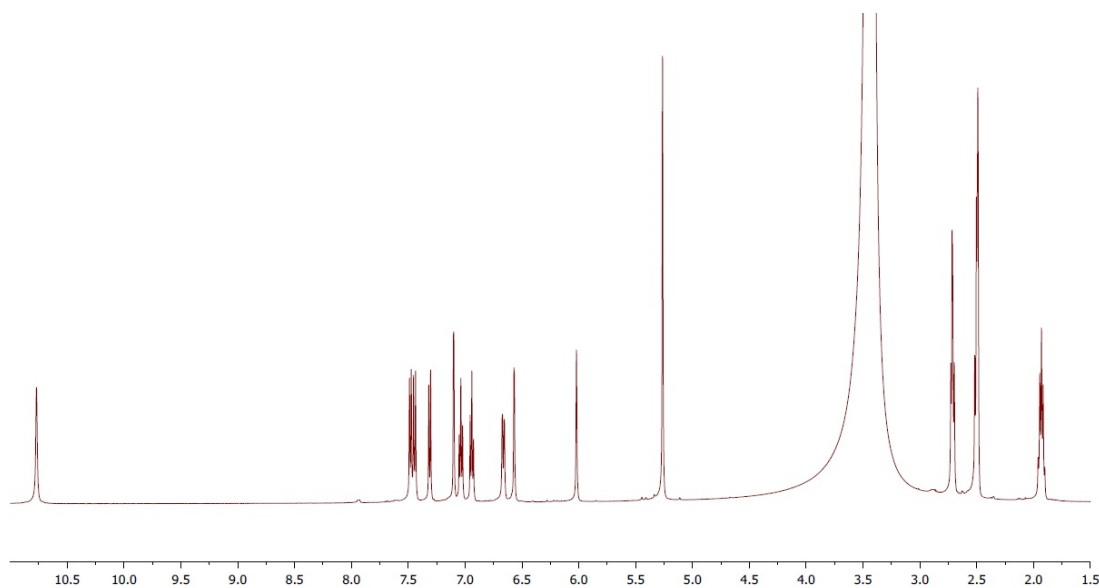
รูปที่ ง.31 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ  
กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล  
คูมารินต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ 1:0.05 (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol),  
กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)



**รูปที่ ง.32** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ 1:1 (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)



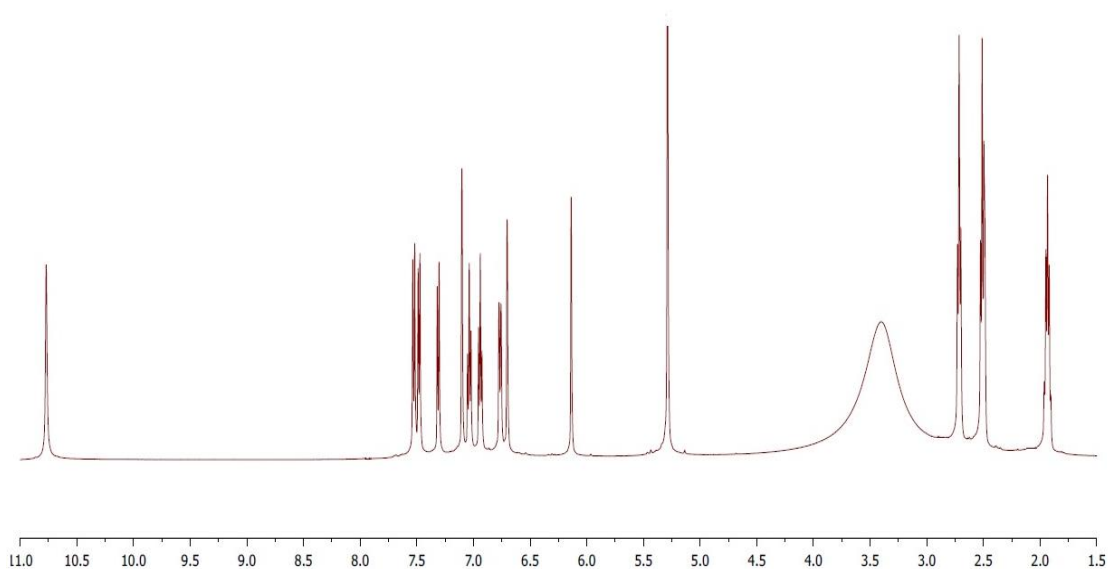
**รูปที่ ง.33** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ 1:1.5 (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)



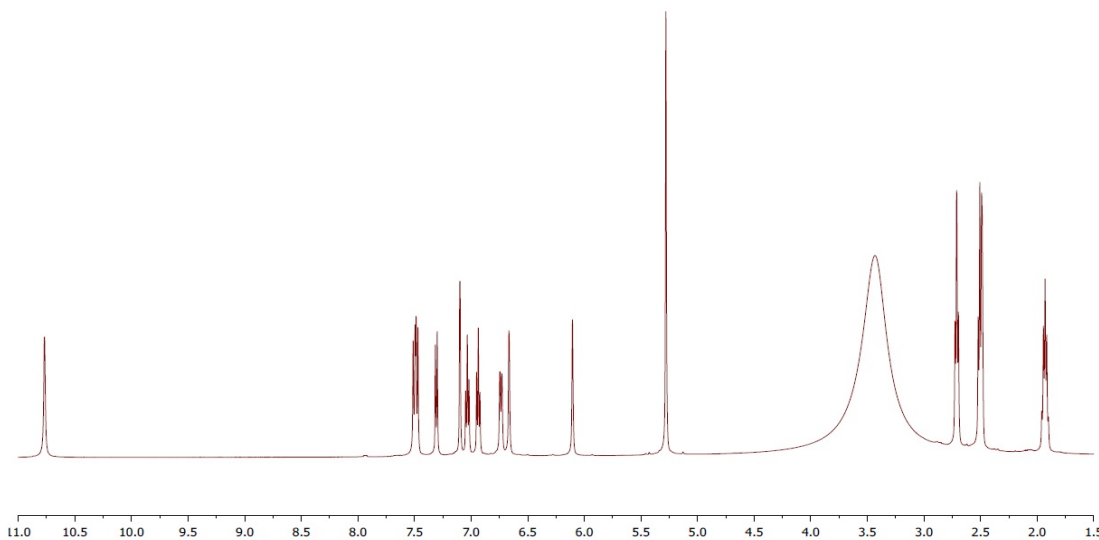
**รูปที่ ง.34** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ 1:2 (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)



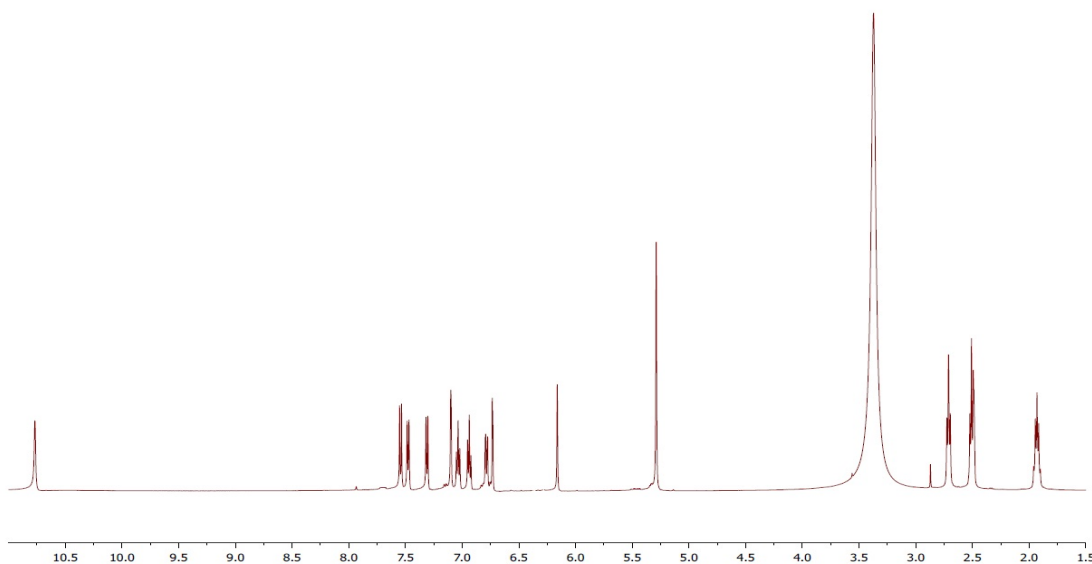
สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร



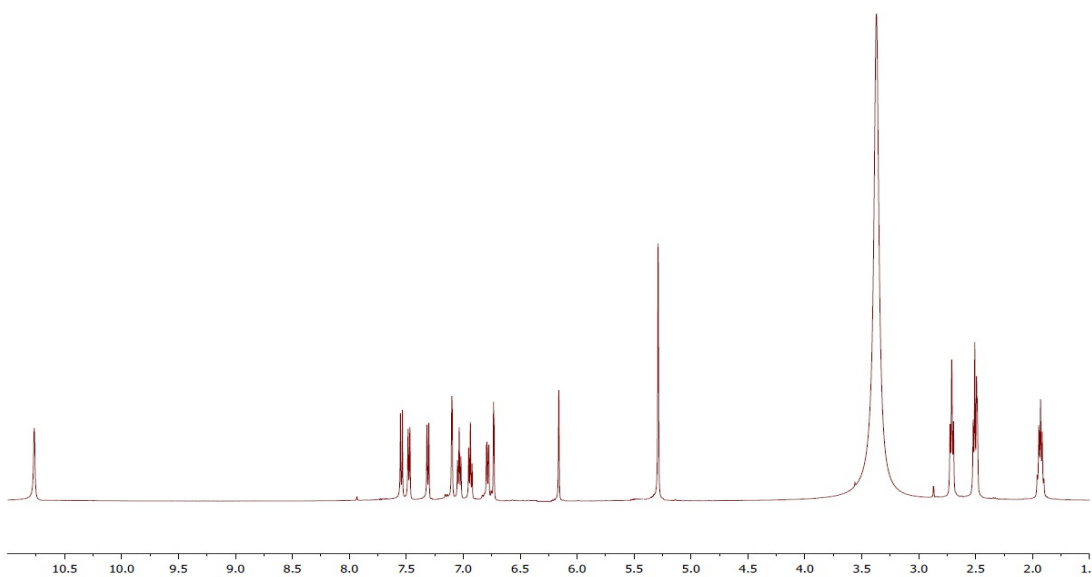
**รูปที่ ง.35** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรที่ 200 รอบต่อนาที (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โปแทสเซียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)



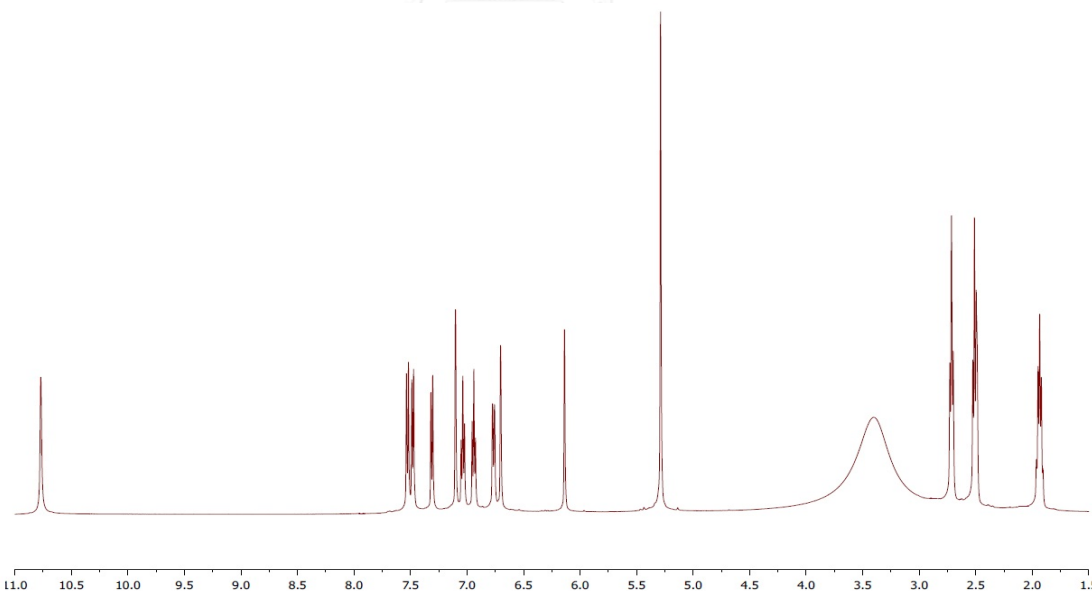
**รูปที่ ง.36** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรที่ 400 รอบต่อนาที (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โฟสเฟสซีียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)



**รูปที่ ง.37** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรที่ 600 รอบต่อนาที (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โฟสเฟสซีียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

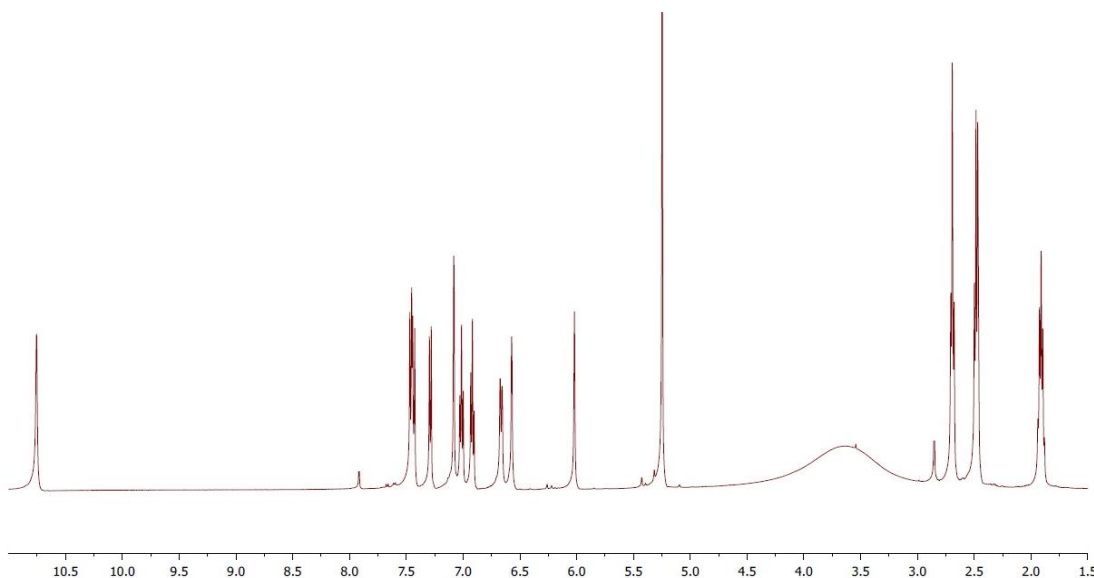


**รูปที่ ง.38** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรที่ 700 รอบต่อนาที (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

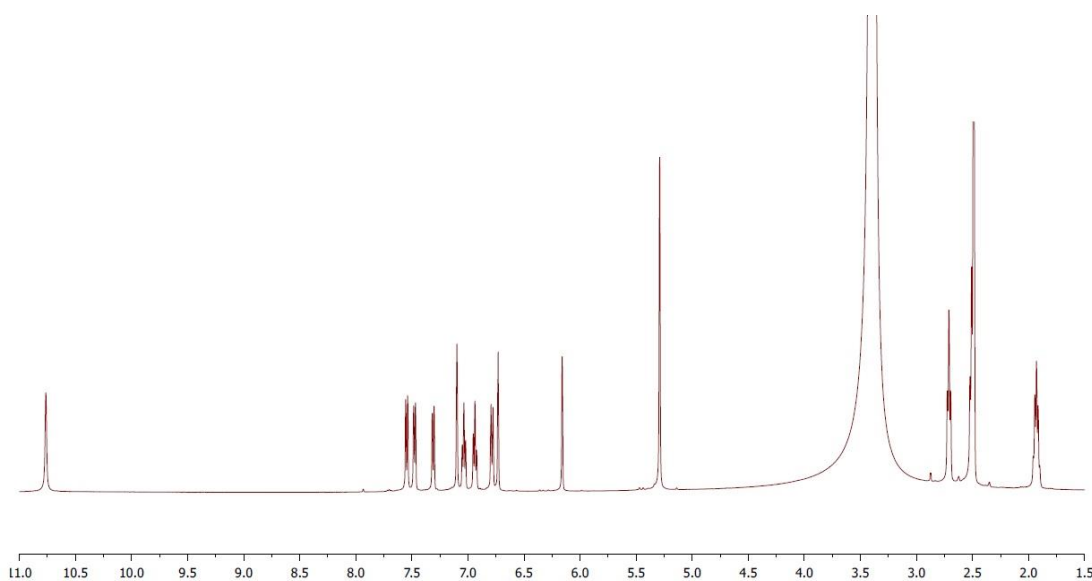


**รูปที่ ง.39** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรที่ 800 รอบต่อนาที (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

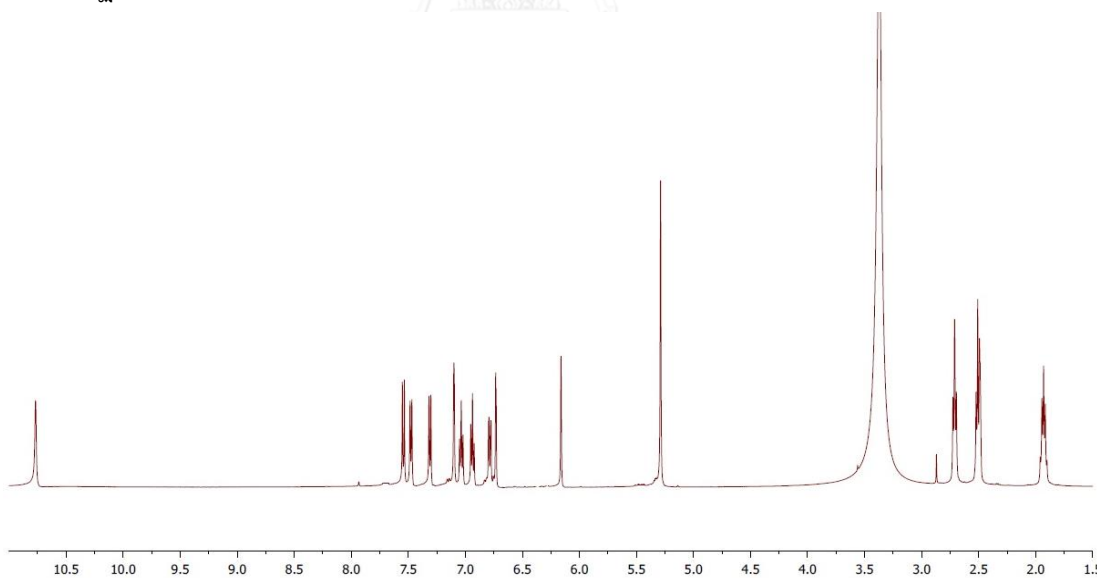
สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับกรดอินโดล-3-บิวทีริก  
ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร



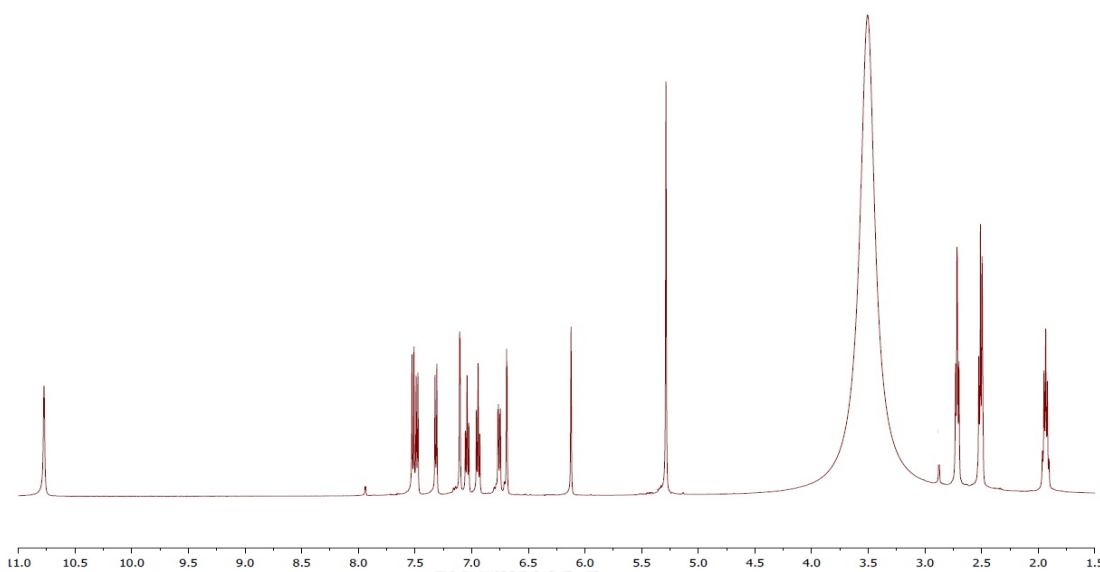
รูปที่ ง.40 สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ  
กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่อง  
ปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรที่ 357 รอบต่อนาที (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol),  
กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โฟสเฟตโซเดียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาใน  
การทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)



**รูปที่ ง.41** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรที่ 423 รอบต่อนาที (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)



**รูปที่ ง.42** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-บิวทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรที่ 447 รอบต่อนาที (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-บิวทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)



**รูปที่ ง.43** สเปกตรัมเอ็นเอ็มอาร์ของ 7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมารินเชื่อมต่อกับ กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก ที่ได้จากการทดลองผลของความเร็วรอบในการปั่นกววนของใบกวนในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรที่ 500 รอบต่อนาที (7-ไฮดรอกซี-4-คลอโรเมทิล คูมาริน (1 eq.mol), กรดอินโดล-3-ปิวิทีริก (1 eq.mol), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (1 eq.mol), อุณหภูมิ 55 °C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง)

ภาคผนวก จ.

ตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless number)

คุณสมบัติของสาร

ความหนืด	0.0092	กรัม/ซม./วินาที
ความหนาแน่น	0.948	กรัม/ซม. <sup>3</sup>
ความร้อนจำเพาะ	1.99	จูล/กรัม/เคลวิน
ค่าการนำความร้อน	0.0018	จูล/วินาที/ซม./เคลวิน

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{\rho D^2 N}{\mu}$$

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

$$Re = \frac{\rho D^2 N}{\mu}$$

$$Re = \frac{(0.948)(5)^2(700)}{(0.0092)}$$

$$Re = 1,803,260$$

เป็นการไหลแบบปั่นป่วน

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

$$Re = \frac{\rho D^2 N}{\mu}$$

$$Re = \frac{(0.948)(10)^2(423)}{(0.0092)}$$

$$Re = 4,358,739$$

เป็นการไหลแบบปั่นป่วน

ค่าตัวเลขเฟรด์

$$Fr = \frac{DN^2}{g}$$

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

$$Fr = \frac{DN^2}{g}$$

$$Fr = \frac{(5)(700)^2}{9.81}$$

$$Fr = 24,974$$

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

$$Fr = \frac{DN^2}{g}$$



$$Fr = \frac{(10)(423)^2}{9.81}$$

$$Fr = 182,394$$

ค่าตัวเลขพริ้นด์เทิล

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

$$Pr = \frac{(0.0092)(1.99)}{0.0018}$$

$$Pr = 10.17$$

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

$$Pr = \frac{(0.0092)(1.99)}{0.0018}$$

$$Pr = 10.17$$

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชุตติกาญจน์ แซ่แต้ เกิดเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษา  
ระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนศึกษานารี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์  
บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปี  
การศึกษา 2557 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2558





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY