



ผลของสภาวะของพลาสมาวัฏภาคของเหลวที่มีต่อ  
อัตราการย่อยสลายของไคโตซาน  
EFFECT OF SOLUTION PLASMA CONDITIONS  
ON DEGRADATION RATE OF CHITOSAN



นางสาวทิฆัมพร ตันติพลาผล รหัส 54360407  
นางสาวนิตารัตน์ ณรงค์ศิลป์ รหัส 54360421  
นายยุทธนา สิงห์สวัสดิ์ รหัส 54360483

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2557



## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ ผลของสภาวะของพลาสมาวิภาคของเหลวที่มีต่อ  
อัตราการย่อยสลายของไคโตซาน

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวทิฆัมพร ตันติพลาผล รหัส 54360407  
นางสาวนิตารัตน์ ณรงค์ศิลป์ รหัส 54360421  
นายยุทธนา สิงห์สวัสดิ์ รหัส 54360483

ที่ปรึกษาโครงการ ดร.อิสราวุธ ประเสริฐสังข์  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบรจรัม อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

  
.....ที่ปรึกษาโครงการ

(ดร.อิสราวุธ ประเสริฐสังข์)

  
.....กรรมการ

(รศ.ดร.สมร หิรัญประดิษฐกุล)

  
.....กรรมการ

(ดร.นพวรรณ ไม้ทอง)

  
.....กรรมการ

(ดร.ภมรรัตน์ จันทร์ธรรม)

ชื่อหัวข้อโครงการ ผลของสภาวะของพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่มีต่ออัตราการย่อยสลาย  
ของไคโตซาน

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวทิษัมพร ตันติพลาผล รหัส 54360407

นางสาวนิดารัตน์ ณรงค์ศิลป์ รหัส 54360421

นายยุทธนา สิงห์สวัสดิ์ รหัส 54360483

ที่ปรึกษาโครงการ ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2557

#### บทคัดย่อ

ในโครงการนี้ ได้ทำการศึกษาผลของสภาวะของพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่มีต่ออัตราการย่อยสลายและคุณสมบัติของไคโตซาน โดยผลของสภาวะของพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด ได้แก่ ทั้งสแตน ทองแดง และเหล็ก ที่เวลาในการย่อยสลาย 0-210 นาที ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 15-30 กิโลเฮิร์ตซ์ ทั้งนี้ ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ของไคโตซาน โดยตรวจวัดความหนืดด้วยเครื่อง Viscometer ตรวจวัดน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC) ตรวจสอบโครงสร้างความเป็นผลึกและคุณสมบัติทางเคมีของไคโตซานด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD) และ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ตามลำดับ ซึ่งผลของการศึกษาดังกล่าวพบว่า หลังจากการทรีทสารละลายไคโตซานด้วยพลาสมาเป็นเวลา 210 นาที ความหนืดของไคโตซานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายก่อนทรีทด้วยพลาสมาชี้ให้เห็นว่า ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดและความถี่ของพลาสมาส่งผลต่อการย่อยสลายของไคโตซานโดยขั้วอิเล็กโทรดเหล็กที่ความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ให้ผลของอัตราการย่อยสลายของไคโตซานสูงสุด และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างความเป็นผลึกของไคโตซานพบว่า โครงสร้างความเป็นผลึกของไคโตซานถูกทำลายหลังจากการทรีทด้วยพลาสมา แต่คุณสมบัติทางเคมีของไคโตซานไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ การทรีทสารละลายไคโตซานด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเหล็กให้ผลของร้อยละผลผลิตของความสามารถในการละลายน้ำของไคโตซานสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนและทองแดง

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่สามารถจะนำมากล่าวได้ทั้งหมด โดยผู้มีพระคุณท่านแรกและผู้ศึกษาใคร่ขอกราบพระคุณคือ ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์ ครูผู้สอนที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน เพื่อให้การเขียนรายงานปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุดและขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้



คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นางสาวทิพย์พร ตันติพลาผล

นางสาวนิดารัตน์ ณรงค์ศิลป์

นายยุทธนา สิงห์สวัสดิ์

พฤษภาคม 2558

## สารบัญ

| เรื่อง  | หน้า |
|---|------|
| ใบรับรองปริญญาโท.....   | ก    |
| บทคัดย่อ.....   | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ค    |
| สารบัญ.....   | ง    |
| <b>บทที่ 1 บทนำ</b>   |      |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ.....  | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์.....   | 2    |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....   | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....  | 3    |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎี</b>  |      |
| 2.1 ไคตินและไคโตซาน.....  | 4    |
| 2.2 การย่อยสลายไคโตซาน.....   | 10   |
| 2.3 กระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว.....  | 11   |
| 2.4 เทคนิค Optical Emission Spectroscopy (OES) .....  | 15   |
| 2.5 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์.....   | 16   |
| 2.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายของไคซาน.....                                       | 27   |
| 2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD.....                                      | 27   |
| 2.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR.....   | 29   |
| 2.9 แนวคิดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....   | 32   |
| <b>บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย</b>   |      |
| 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....  | 37   |
| 3.2 วิธีการทดลอง.....   | 38   |
| 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....   | 39   |
| <b>บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>  |      |
| 4.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของพลาสมาวิภาคของเหลวด้วยเทคนิค OES.....                               | 42   |
| 4.2 ผลของพลาสมาวิภาคของเหลวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของ<br>ไคโตซาน.....                  | 43   |
| 4.3 ผลของชนิดขั้วอิเล็กโทรด และความถี่ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุล<br>ของไคโตซาน..... | 45   |

## สารบัญ (ต่อ)

| เรื่อง   | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง  |      |
| 4.4 ผลของจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายไคโตซาน.....  | 48   |
| 4.5 ผลของพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง<br>ความเป็นผลึกของไคโตซาน..... | 51   |
| 4.6 ผลของพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ<br>ทางเคมีของไคโตซาน.....      | 52   |
| 4.7 ผลการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ไคโตซานที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ.....                               | 53   |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ  |      |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....  | 55   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....  | 55   |
| เอกสารอ้างอิง.....   | 56   |
| ภาคผนวก.....   | 59   |
| ประวัติผู้จัดทำโครงการ.....  | 62   |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 4.1  |      |
| น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ( $M_w$ ) และค่าการกระจายตัว (PDI) ของ<br>น้ำหนักโมเลกุลของโคโตซานตัวอย่างภายหลังการย่อยสลาย<br>ด้วยเทคนิคพลาสมาวิทยุภาคของเหลวในสารละลายกรดอะซิติก<br>ความเข้มข้น 0.5% โดยน้ำหนัก โดยใช้ข้ออิเล็กโทรดชนิดต่างๆ<br>และความถี่ของพลาสมา 15-30 กิโลเฮิร์ตซ์..... | 45   |
| ตาราง 4.2   |      |
| ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายโคโตซานและค่า $R^2$ .....   | 50   |
| ตาราง 4.3   |      |
| ผลของค่าคงที่อัตราการย่อยสลายของโคโตซานเปรียบเทียบกับ<br>งานวิจัยที่ผ่านมา.....   | 50   |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 4.4 อัตราการย่อยสลายไคโตซาน จากการทรีตด้วยเครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลวโดยใช้ข้อั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตน ทองแดง และเหล็ก ที่ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และข้อั้วอิเล็กโทรดเหล็กที่ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์..... | 49   |
| รูปที่ 4.5 แสดงผลของโครงสร้างความเป็นผลึกของไคโตซานที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD.....  | 51   |
| รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของไคโตซานก่อนและหลังการทรีตด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR.....   | 52   |
| รูปที่ 4.7 ร้อยละผลผลิตของไคโตซานที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำและผลรวมของร้อยละผลผลิตของไคโตซาน.....  | 53   |





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

โคโตซานเป็นชีววัสดุชนิดพอลิแซคคาไรด์ที่สามารถเตรียมได้จากโคตินด้วยกระบวนการกำจัดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) โดยมีโครงสร้างที่เชื่อมต่อระหว่าง  $\beta$ -1,4 2-amino-2-deoxy-D-glucopyranose (GlcN) และ 2-acet-amido-2-deoxy-D-glucopyranose (GlcNAc) เป็นองค์ประกอบหลัก โคโตซานเป็นชีววัสดุที่มีคุณสมบัติหลากหลาย อาทิ ความเข้ากันได้ ทางชีวภาพ (Biocompatibility) และย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) ดังนั้น จึงได้รับความนิยมนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงการค้า เช่น อาหาร เกษษกรรม เครื่องสำอาง และทางการแพทย์ [1-4]. โดยทั่วไปแล้วโคโตซานมีน้ำหนักโมเลกุลได้หลายค่าขึ้นอยู่กับกระบวนการเตรียมโคโตซานและน้ำหนักโมเลกุลดังกล่าวจะส่งผลต่อสมบัติทางด้านชีวภาพของโคโตซาน จากรายงานวิจัยของ Tangsadthakun C. และคณะพบว่า โคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (น้ำหนักโมเลกุล ( $M_w$ ) ประมาณ 74000 ดาลตัน) จะช่วยส่งเสริมการเพิ่มจำนวนเซลล์จากผิวหนังของหนูได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลสูง (น้ำหนักโมเลกุล ( $M_w$ ) ประมาณ 880000 ดาลตัน) [5] Richardson SCW. และคณะ ได้รายงานว่ โคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 15-20 กิโลดาลตัน มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุนำส่งดีเอ็นเอได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6] นอกจากนี้แล้ว Kondo Y. และคณะ ยังพบว่า โคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุล 20 กิโลดาลตัน จะแสดงความเข้ากันได้กับไลโปพอลิแซคคาไรด์ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุล 140 กิโลดาลตัน [7] ซึ่งจากรายงานการวิจัยดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า การย่อยสลายโคโตซานเพื่อเตรียมโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีความสำคัญและได้รับความสนใจอย่างยิ่งจากนักวิจัย

ในการเตรียมโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถทำได้หลายวิธี อาทิ การใช้สารเคมี การใช้เอนไซม์ และการใช้หมู่ว่องไว [8-12] การเตรียมโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำโดยการใช้สารเคมีสามารถทำได้ง่ายและใช้ต้นทุนต่ำ แต่ข้อด้อยของกระบวนการนี้คือจะก่อให้เกิดของเสียอันตรายและการปนเปื้อนของสารเคมี กระบวนการใช้เอนไซม์ถือเป็นกระบวนการเตรียมโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากเอนไซม์มีความจำเพาะในการตัดสายโซ่ของโคโตซานเพื่อให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลง แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ มีความซับซ้อนในการเตรียมเอนไซม์และการทำบริสุทธิ์ผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม สำหรับกระบวนการเตรียมโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำโดยการใช้หมู่ว่องไว โคโตซานจะถูกย่อยสลายด้วยหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลซึ่งถูกผลิตขึ้นจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [12] อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้มีความยุ่งยากในการกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ออกจากผลิตภัณฑ์

กระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวเป็นกระบวนการใหม่ที่ถูกค้นพบโดย Takai O. [13] และนิยมนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆ อาทิ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ การบำบัดน้ำเสีย การฆ่าเชื้อ และการย่อยสลายสารอแกนิค กระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวเป็นกระบวนการที่สามารถผลิตหมู่ไอออนที่มีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี อาทิ หมู่ไฮดรอกซิล (OH) หมู่ไฮโดรเปอร์ออกซิล ( $\text{HO}_2$ ) อิเล็กตรอนอิสระ ( $e^-$ ) และออกซิเจนแอนไอออน ( $\text{O}^-$ ) ซึ่งหมู่ไอออนดังกล่าวสามารถชักนำให้เกิดการย่อยสลายสารอแกนิค [14] นอกจากนั้นแล้ว กระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการดำเนินการ ดังนั้น จึงไม่มีการปนเปื้อนของสารเคมีในระบบ จากการศึกษาที่ผ่านมาของผู้วิจัยซึ่งได้ประยุกต์ใช้กระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวในการทรีตสารละลายโคโคซาน พบว่า กระบวนการพลาสมาส่งผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของโคโคซานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [15-16] แต่อย่างไรก็ตาม ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายโคโคซาน อาทิ ชนิดของอิเล็กโทรด พลังงานพลาสมา ยังไม่ได้รับการศึกษา ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาถึงสภาวะของพลาสมาที่ส่งผลต่อการย่อยสลายโคโคซาน โดยตัวแปรที่สนใจประกอบไปด้วยเวลาที่ใช้ในการทรีตพลาสมา ความถี่ของพลาสมา และชนิดของอิเล็กโทรด โคโคซานที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาจะถูกนำไปตรวจสอบคุณลักษณะ อาทิ ความหนืด น้ำหนักโมเลกุล ความสามารถในการละลาย โครงสร้างความเป็นผลึก และองค์ประกอบทางด้านเคมี ผลที่ได้จากการศึกษานี้ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้เตรียมโคโคซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำอย่างมีประสิทธิภาพ ผลิตภัณฑ์โคโคซานที่เตรียมได้จากกระบวนการพลาสมาสามารถนำไปใช้งานทางด้านทางการแพทย์ อาทิ ผิวหนังทดแทน และกระดูกทดแทน กระบวนการเตรียมโคโคซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำแบบใหม่ที่พัฒนาได้ สามารถนำไปทดแทนกระบวนการดั้งเดิมคือ การใช้สารเคมีและการใช้เอนไซม์ที่มีต้นทุนสูงและมีความซับซ้อนของกระบวนการได้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของสภาวะของพลาสมาวิภาคของเหลวที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสารละลายโคโคซาน

1.2.2 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายของโคโคซาน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ติดตั้งเครื่องกำเนิดพลาสมาวิภาคของเหลวและตรวจวัดคุณลักษณะของพลาสมาที่สภาวะต่างๆ ด้วยเทคนิค Optical Emission Microscopy (OES)

1.3.2 เตรียมสารละลายโคโคซานน้ำหนัก 5 กรัม ในสารละลายกรดอะซิติก 1,000 มิลลิลิตร และนำไปทรีตด้วยพลาสมา โดยมีตัวแปรที่ศึกษาดังนี้

1.3.2.1 ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด คือ ทังสเตน ทองแดง และเหล็ก

1.3.2.2 พลังงานของพลาสมาโดยปรับความถี่ คือ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิรตซ์

1.3.2.3 เวลาที่ใช้ในการทรีทพลาสมา 0 – 210 นาที

1.3.3 วิเคราะห์คุณลักษณะของโคโตซานที่ได้หลังจากการย่อยสลายโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

1.3.3.1 ตรวจวัดความหนืดด้วยเครื่อง Viscometer

1.3.3.2 ตรวจวัดน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC)

1.3.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometry (XRD)

1.3.3.4 ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

1.3.3.5 ตรวจวัดปริมาณผลิตภัณฑ์โคโตซานที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ

1.3.4 ศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายของโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 กระบวนการเตรียมโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำแบบใหม่ที่สามารถนำไปทดแทนกระบวนการดั้งเดิม คือ การใช้สารเคมีและการใช้เอนไซม์ที่มีต้นทุนสูง

1.4.2 ผลิตภัณฑ์โคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่เตรียมได้จากกระบวนการพลาสมาสามารถนำไปใช้งานทางการแพทย์ อาทิ ผิวหนังทดแทน และกระดูกทดแทน

## บทที่ 2

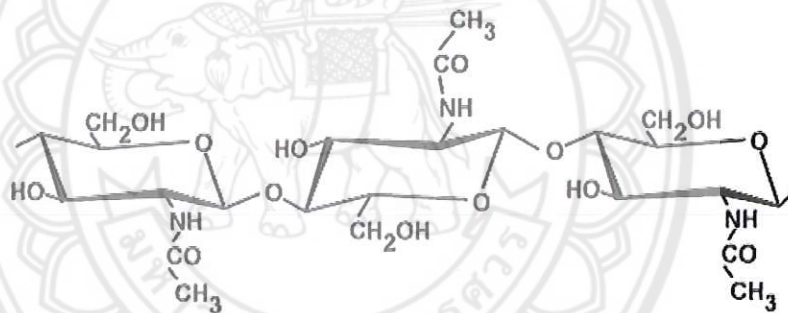
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ไคตินและไคโตซาน

##### 2.1.1 โครงสร้างของไคตินและไคโตซาน

ไคตินเป็นโพลิเมอร์ธรรมชาติโดยพบเป็นองค์ประกอบของเปลือกแข็งที่หุ้มเซลล์ของรา ยีสต์ และจุลินทรีย์หลายชนิด หรือพบเป็นโครงสร้างแข็งของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง จำพวกแมลง กุ้ง ปู ปลาหมึก เป็นต้น [2] ไคตินมีปริมาณมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลสที่เป็นส่วนประกอบของเนื้อไม้

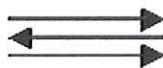
ไคตินเป็นโพลิเมอร์สายยาวที่ประกอบขึ้นจากน้ำตาลหน่วยย่อย คือ N-acetyl-D-glucosamine มาเรียงต่อกันเป็นสายลักษณะเป็นของแข็งดังแสดงในรูปที่ 2.1 ละลายได้ในกรดอินทรีย์ เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน กรดฟอสฟอริก และกรดฟอร์มิกที่ปราศจากน้ำ แต่ไม่ละลายในต่างเจือจาง แอลกอฮอล์และตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของไคติน [1]

ไคตินที่ได้จากแต่ละแหล่งมีโครงสร้างและสมบัติแตกต่างกันโดยแบ่งตามลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยได้ 3 กลุ่ม คือ

โครงสร้างแบบอัลฟา



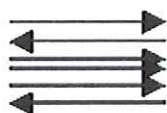
มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะสวนทางกัน มีความแข็งแรงสูง ได้แก่ ไคตินจากเปลือกกุ้งและกระดองปู

### โครงสร้างแบบเบตา



มีการเรียงตัวของสายโซ่มอเลกุลในทิศทางเดียวกัน จึงจับกันได้ไม่ค่อยแข็งแรง มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีมากกว่าแบบอัลฟา ได้แก่ ไคตินจากแกนปลาหมึก

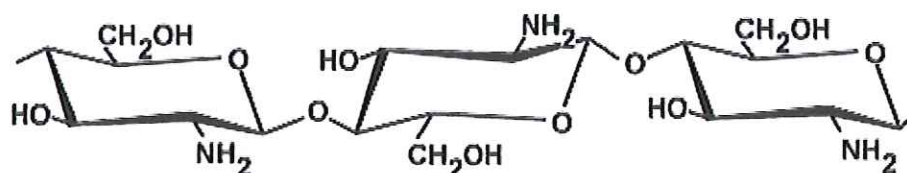
### โครงสร้างแบบแกมมา



มีการเรียงตัวของสายโซ่มอเลกุลในลักษณะที่ไม่แน่นอน (สวนทางกันสลับทิศทางเดียวกัน) มีความแข็งแรงรองจากแบบอัลฟา ได้แก่ ไคตินจากเห็ด รา และพืชชั้นต่ำ

โครงสร้างทางเคมีของสารไคตินคล้ายคลึงกับเซลลูโลสคือเป็นเส้นใยที่ยาว ไคตินที่เกิดในธรรมชาติมีโครงสร้างของผลึกที่แข็งแรงมีการจัดตัวของรูปแบบของผลึกเป็น 3 ลักษณะดังกล่าวพบว่า อัลฟาไคตินมีคุณลักษณะของเสถียรภาพทางเคมีสูงกว่าเบตาไคติน ดังนั้น จึงมีโอกาสที่เบตาไคตินสามารถจะเปลี่ยนแปลงรูปแบบไปเป็นอัลฟาไคตินได้ในสารละลายของกรดแก่ เช่น กรดเกลือ เป็นต้น ส่วนแกมมาไคตินเป็นโครงสร้างผสมระหว่างอัลฟาและเบตาไคติน

ไคโตซานเป็นโพลิเมอร์ของหน่วยย่อยที่ชื่อว่า glucosamine มากกว่าร้อยละ 60 ขึ้นไป ในธรรมชาติย้อมมีไคตินและไคโตซานเป็นองค์ประกอบอยู่ในโพลิเมอร์ ในสัดส่วนต่างๆ กัน ถ้ามีปริมาณของ glucosamine น้อยกว่าร้อยละ 40 โพลิเมอร์นั้นจะละลายได้ในกรดอินทรีย์ต่างๆ ฉะนั้น การเปลี่ยนแปลงทางเคมีทำให้ไคตินเปลี่ยนไปเป็นไคโตซาน คือการลดลงของหมู่อะซิติลหรือ เรียกว่า deacetylation [1] ขณะที่มีการลดลงของหน่วยย่อย N-acetyl glucosamine ย่อมเป็นการเพิ่มขึ้นของ glucosamine ในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนไคตินให้เป็นไคโตซานนั่นเอง การจัดระดับของการ deacetylation มีค่าร้อยละหรือเรียกว่า Percent Deacetylation (%DD) กล่าวคือ เมื่อในโพลิเมอร์มีค่าร้อยละการเกิด deacetylation เกินกว่าร้อยละ 60 ขึ้นไป ของการกระจายไคโตซานในกรดอินทรีย์มากจะเพิ่มขึ้นของหมู่เอมิโนของ glucosamine ทำให้มีความสามารถในการรับโปรตอนจากสารละลายได้เพิ่มขึ้นซึ่งช่วยในการละลายดีขึ้น เพราะมีสมบัติของประจุบวกเพิ่มขึ้น ดังนั้น ไคโตซานจึงสามารถละลายได้ดีขึ้นในกรดต่างๆ เช่น กรดน้ำส้ม กรดแลคติก และกรดอินทรีย์อื่นๆ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน [1]

ปกติแล้วไคโตซานที่ได้จะมีส่วนผสมของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine และ glucosamine อยู่ในสายโพลิเมอร์เดียวกัน ซึ่งระดับการกำจัดหมู่ acetyl (หรือร้อยละการเกิด deacetylation) นี้มีผลต่อสมบัติและการทำงานของไคโตซาน นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานสามารถบอกถึงความยาวของสายไคโตซานซึ่งมีผลต่อความหนืด เช่น ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีสายยาวและสารละลายมีความหนืดมากกว่าไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เป็นต้น การนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์จะต้องพิจารณาทั้งร้อยละการเกิด deacetylation และน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งโดยธรรมชาติแล้ว ไคโตซานจะไม่ละลายน้ำเช่นเดียวกับเปลือกกุ้ง กระดองปูหรือเปลือกไม้ทั่วไป แต่ไคโตซานจะละลายได้ดีเมื่อใช้กรดอินทรีย์เป็นตัวทำละลายสารละลายของไคโตซานจะมีความข้น เหนียวแต่ใส่คล้ายวุ้นหรือพลาสติกใส ยืดหยุ่นได้เล็กน้อย จึงมีคุณสมบัติที่พร้อมจะทำให้เป็นรูปแบบต่างๆ ได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าต้องการทำเป็นแผ่นหรือเยื่อต่างๆ เป็นเจล หรือรูปร่างเป็นเม็ดเกล็ด เส้นใย สารเคลือบและคอลลอยด์ เป็นต้น นอกจากนี้ ไคโตซานยังย่อยสลายตามธรรมชาติจึงไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต เมื่อกินเข้าไปและไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเติมลงไปในน้ำหรือในดินเพื่อการเกษตร

ไคโตซานที่ผลิตขึ้นมาใช้ในปัจจุบันนี้มีหลายรูปแบบและส่วนใหญ่จะผลิตมาจากบริษัทต่างประเทศจึงมีราคาค่อนข้างสูง

### 2.1.2 คุณสมบัติของไคตินและไคโตซาน [15, 17]

ไคตินและไคโตซานเป็นวัสดุชีวภาพเกิดในธรรมชาติ จัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตผสมที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีธาตุไนโตรเจนติดอยู่ด้วยทำให้มีคุณสมบัติที่โดดเด่นและหลากหลายมีประสิทธิภาพสูงในกิจกรรมชีวภาพ และยังสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ดังนั้น จึงเป็นสารที่มีความปลอดภัยในการใช้กับมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม โดยสารไคตินและไคโตซานมีลักษณะพิเศษในการนำมาใช้ดูดซับและจับตะกอนต่างๆ ในสารละลายแล้วนำสารกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งเป็นการหมุนเวียนตามระบบธรรมชาติ

### 2.1.3 การผลิตสารไคตินและไคโตซาน

ปัจจุบันการผลิตสารไคตินและไคโตซานโดยใช้สารเคมี ได้แก่ ต่างและกรดโดยมีหลักการที่สำคัญคือ

2.1.3.1 กระบวนการกำจัดโปรตีน (Deproteination) [2] โดยการทำปฏิกิริยากับต่าง ซึ่งส่วนใหญ่ใช้โซดาไฟ (NaOH) ในกระบวนการนี้ โปรตีนส่วนใหญ่จะถูกขจัดออกไปจากวัตถุดิบพร้อมกับบางส่วนไขมันและรงควัตถุบางชนิด การพิจารณาใช้กระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบที่จะนำมาใช้

2.1.3.2 กระบวนการกำจัดเกลือแร่ (Demineralization) [2] โดยการนำวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการกำจัดโปรตีนแล้วมาทำปฏิกิริยากับกรดซึ่งส่วนมากใช้กรดเกลือ (HCl) ทำให้เกลือแร่ส่วนใหญ่ ได้แก่ หินปูน (Calcium Carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งถูกกำจัดออกไปโดยเปลี่ยนไปเป็นแก๊ส

2.1.3.3 กระบวนการกำจัดหรือลดหมู่อะซีติล (Deacetylation) [18] เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ใช้ในการกำจัดหรือลดหมู่อะซีติล ( $\text{CH}_3\text{CO}$ ) ที่มีอยู่บนโมเลกุลของไคติน เพื่อให้เกิดเป็นไคโตซาน (Chitosan) ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นของหมู่อะมิโน ( $-\text{NH}_2$ ) บนโมเลกุลของไคตินและหมู่อะมิโนนี้มีความสามารถในการรับโปรตอนจากสารละลายซึ่งช่วยให้การละลายดีขึ้น เพราะมีสมบัติเป็นประจุบวก (Cation) ส่วนใหญ่เมื่อปริมาณของหมู่อะซีติล ถูกกำจัดไปมากกว่าร้อยละ 60 ขึ้นไป สารไคโตซานที่ได้สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์หลายชนิด การลดหมู่อะซีติลกระทำโดยใช้ต่างที่เข้มข้นสูงตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไป ดังนั้น พารามิเตอร์ที่สำคัญในการพิจารณาสารไคโตซาน คือ ค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีติล (Degree of Deacetylation, %DD)

ไคโตซานได้จากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีติล (Deacetylation) ของไคตินซึ่งก็คือ พอลิเมอร์ของ (1-4)-2-amino-2-deoxy-b-D-glucan หรือเรียกง่าย ๆ ว่า พอลิเมอร์ของ (Glucosamine) การเกิดไคโตซานนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีติล (Deacetylation) ซึ่งวัดจากค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีติล (Degree of Deacetylation) [18] การทำปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีติล คิดเป็นหน่วยร้อยละ (Percentage of Degree of Deacetylation, %DD) กล่าวคือ ถ้าร้อยละการเกิด deacetylation เกินกว่าร้อยละ 50 ขึ้นไปแล้วสามารถใช้พอลิเมอร์นั้นทำให้เกิดอนุพันธ์ที่ละลายในกรดอินทรีย์ได้ หรืออาจกล่าวได้ว่า การลดลงของหมู่อะซีติลในไคติน (Chitin Regenerated) ผลที่ได้คือการเพิ่มหมู่อะมิโนซึ่งเป็นการเพิ่มสมบัติการเป็นสารที่มีประจุเป็นบวก (Polycationic Activity) บนพอลิเมอร์ทำให้เกิดสภาพของการเป็นไคโตซานเพิ่มขึ้น (Chitosan Generation) เพราะฉะนั้น โครงสร้างของไคโตซานต่างจากไคตินตรงหน่วยที่เป็น glucosamine ในสายพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นกว่าร้อยละ 50 ขึ้นไป ซึ่งในอุตสาหกรรมปัจจุบันการผลิตสารไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งโดยใช้เคมีสาร ได้แก่ ต่างและกรด

#### 2.1.4 รูปแบบของไคโตซาน

รูปแบบของไคโตซานที่ผลิตขึ้นมาจำหน่ายในขณะนี้ มี 4 รูปแบบ ได้แก่

2.1.4.1 ไคโตซานที่เป็นเกล็ดหรือแผ่นบางเล็กๆ (Flake)

2.1.4.2 ไคโตซานที่เป็นผงละเอียดคล้ายแป้ง (Micromilled Powder)

2.1.4.3 ไคโตซานในรูปแบบสารละลายเป็นของเหลวหนืด (Solutions) ซึ่งความเข้มข้นอาจจะแตกต่างกันไปตามความต้องการของผู้สั่งซื้อ

2.1.4.4 ไคโตซานที่อยู่ในรูปเม็ดจิ๋วขนาดประมาณ 300-500 ไมโครเมตร (Bead)

ผลิตภัณฑ์ไคโตซานที่อยู่ในรูป Flake, Powder, Bead หากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงจะต้องมีความชื้นต่ำมากคือไม่เกินร้อยละ 5-10 หากความชื้นสูงกว่านี้ก็จะทำให้เกิดเชื้อราหรือมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ เข้าไปปะปนอยู่ทำให้คุณภาพด้อยลงหรืออาจจะเกิดความเป็นพิษเนื่องจากเชื้อราเชื้อแบคทีเรียหรือสิ่งปนเปื้อนนั้นๆ ผลิตภัณฑ์พิษออกมา ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการปนเปื้อนของสิ่งไม่พึงประสงค์ในไคโตซานนั้นเนื่องจากวัตถุดิบที่นำมาสกัดนั่นเอง

### 2.1.5 สาเหตุการปนเปื้อน

เนื่องจากไคโตซานผลิตมาจากไคตินซึ่งมีต้นกำเนิดมาจากเปลือกกุ้ง กระจดงปู กระจดงปลาหมึก และจากสัตว์น้ำอื่นๆ ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว ดังนั้น จึงเป็นไปได้ว่า ผลิตภัณฑ์ไคโตซานที่สกัดออกมาได้ อาจจะมีการปนเปื้อนของสิ่งไม่พึงประสงค์ที่มาจากสิ่งแวดล้อม หากกุ้ง ปู หรือปลาหมึก เปลือกที่ถูกแกะกระจดงแล้วนำมาสกัดนั้นถูกจับมาจากแหล่งน้ำที่ไม่สะอาดนัก เช่น ในแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก สารเคมี หรือยาปฏิชีวนะ ตลอดจนจุลชีพ ก่อให้เกิดโรคที่สำคัญ ได้แก่ *E.coli*, *Salmonella* และ *Vibrio spp.* ซึ่งสิ่งเหล่านี้ปะปนอยู่ในน้ำทะเลบางแห่ง ที่ขาดการตรวจสอบและเฝ้าระวังทางด้านสุขอนามัยและมลภาวะ การที่จะคัดเลือกไคโตซานที่มีคุณภาพดีทั้งทางด้านขบวนการผลิตและทางด้านสุขอนามัยนั้นจำเป็นต้องสืบหาข้อมูลและประวัติอันดีงามของบริษัทเสียก่อน

### 2.1.6 การใช้ประโยชน์จากไคโตซาน [1-3]

ปัจจุบันไคโตซานถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในด้านวงการเกษตร อาหารเสริม สุขภาพและอีกหลายวงการ เช่น

#### 2.1.6.1 การใช้กับพืชผักผลไม้

ในด้านการเกษตรกรรมนั้นมีการนำไคโตซานมาใช้เป็นอาหารเสริมให้แก่พืช เพื่อช่วยควบคุมการทำงานของพืช ผลไม้ และต้นไม้ให้ทำงานได้ดีขึ้นคล้ายๆ กับการเพิ่มปุ๋ยพิเศษให้แก่พืชผักผลไม้ นอกจากนี้ ยังนำไปใช้ในการป้องกันโรคที่เกิดจากจุลินทรีย์และเชื้อราบางชนิดอีกด้วย

ทุกวันนี้เกษตรกรได้นำเอาผลิตภัณฑ์ไคโตซานไปใช้ประโยชน์กับพืชผักผลไม้หลายชนิดแล้ว เช่น หน่อไม้ฝรั่ง ต้นหอม คะน้า แตงโม ข้าว ถั่ว และข้าวโพด ตลอดจนไม้ดอกไม้ประดับที่มีราคาสูงหลายชนิด เช่น ดอกคาร์เนชั่น ดอกเยอบีร่าพันธุ์นอก ดอกแคดิโอลัส และดอกบานชื่นฝรั่ง เป็นต้น



### 2.1.6.2 การใช้โคโตซานในวงการประมง

ในวงการประมงนั้น ขณะนี้ได้มีการนำโคโตซานมาใช้ประโยชน์ในด้านการยืดอายุ การรักษาและเก็บถนอมอาหารที่เป็นผลิตภัณฑ์จากสัตว์น้ำ และในขั้นต้นนี้ได้สกัดโปรตีนจากหัวกุ้งด้วยกระบวนการย่อยด้วยแบคทีเรียกรดแลคติก (Lactic Acid Bacteria) เพื่อนำโปรตีนนั้นมาใช้ในแง่เป็นสารเสริมคุณค่าอาหารและของว่างที่ทำจากสัตว์น้ำ การปรุงแต่งรส และกลิ่นในอาหารขบเคี้ยวที่เป็นผลิตภัณฑ์จากสัตว์น้ำ เป็นต้น

นอกจากนี้ ฝ่ายเอกชนหลายแห่งได้นำโคโตซานมาใช้ประโยชน์ในด้านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำ วิธีการนั้นมีหลายรูปแบบ ได้แก่ การคลุกกับอาหารเม็ดในอัตราส่วนต่างๆ กันเพื่อให้กุ้งกิน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการไปกระตุ้นภูมิคุ้มกันต้านโรคในตัวกุ้ง และเพื่อเป็นส่วนไปกระตุ้นการย่อยอาหารและการเจริญเติบโต ประโยชน์อีกด้านหนึ่งที่ผู้ขายโฆษณาไว้คือ การช่วยให้เม็ดอาหารคงรูปอยู่ในน้ำได้นานกว่า โดยการเคลือบสารโคโตซานบนอาหารที่จะหว่านให้กุ้งกินบางรายก็แนะนำให้เติมลงไปลงในน้ำเพื่อช่วยปรับสภาพแวดล้อมให้ดีขึ้น

### 2.1.6.3 การใช้โคโตซานในวงการแพทย์

โคโตซานที่ใช้ในการแพทย์และมีผลที่เชื่อถือได้ ซึ่งได้ดำเนินการมาหลายปีแล้ว เช่น การใช้ประโยชน์โดยนำมาประกอบเป็นอาหารเพื่อลดน้ำหนัก ทำผลิตภัณฑ์เสริมความงาม เช่น ครีมทาผิว แผ่นโคโตซานเพื่อปิดปากแผลที่เกิดจากการผ่าตัดเฉพาะที่ ซึ่งพบว่า แผ่นโคโตซานจะช่วยให้คนป่วยเกิดการเจ็บปวดผลน้อยกว่าการใช้ผ้าก๊อชชุบน้ำมันวาสลินมาปิดแผลเหมือนที่เคยปฏิบัติมาในสมัยก่อน นอกจากนี้ เวลาที่แผลปิดดีแล้วและมีการลอกแผ่นโคโตซานออก ยังสะดวกและง่ายกว่าการลอกแถบผ้าก๊อชเพราะจะไม่มีอาการสูญเสียเลือดที่เกิดจากการลอกแผ่นปิดแผลออกทำให้ผู้ป่วยไม่เจ็บปวดเท่ากับการใช้แถบผ้าก๊อชปิดแผล นอกจากนี้ ยังใช้โคโตซานไปเป็นส่วนผสมของยาหลายประเภท เช่น ยาที่ใช้พ่นทางจมูกเพื่อบรรเทาอาการโรคทางเดินหายใจ

### 2.1.6.4 ด้านอาหารเสริม

โคโตซานช่วยลดคอเลสเตอรอลและไขมันในเส้นเลือด โดยโคโตซานไปจับกับคอเลสเตอรอลทำให้ร่างกายไม่สามารถดูดซึมไปใช้หรือดูดซึมได้น้อยลง จึงมีการโฆษณาเป็นผลิตภัณฑ์ลดน้ำหนัก ทั้งนี้ ต้องใช้ด้วยความระมัดระวังเนื่องจากโคโตซานสามารถจับวิตามินที่ละลายได้ดีในไขมัน (วิตามินเอ ดี อี เค) อาจทำให้ขาดวิตามินเหล่านี้ได้ นอกจากนี้ ทางวงการแพทย์ มีรายงานการนำ N-acetyl-D-glucosamine ไปใช้รักษาไขข้อเสื่อม โดยอธิบายว่า ข้อเสื่อมเกิดเนื่องจากการสึกกร่อนของเนื้อเยื่ออ่อนที่เคลือบอยู่ระหว่างข้อกระดูก ซึ่ง glucosamine เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ proteoglycan และ matrix ของกระดูกอ่อน จึงช่วยทำให้เยื่อหุ้มกระดูกอ่อนหนาขึ้น

### 2.1.6.5 ด้านการเกษตร

เนื่องจากไคตินและโคโตซานมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ไนโตรเจนจะถูกปลดปล่อยออกจากโมเลกุลอย่างช้าๆ รวมทั้งช่วยตรึงไนโตรเจนจากอากาศและดิน จึงใช้เป็นปุ๋ย

ชีวภาพ นอกจากนี้ ยังช่วยกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของพืชและกระตุ้นการนำแร่ธาตุไปใช้ ผลคือสามารถเพิ่มผลผลิตและคุณภาพการผลิตได้ ทำให้เกษตรกรมีต้นทุนต่ำลงเนื่องจากลดการใช้ปุ๋ยและยาฆ่าแมลง

#### 2.1.6.7 ด้านการบำบัดน้ำเสีย

โดยทั่วไปน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารมีสารแขวนลอยสูงไคโตซานมีประจุบวก สามารถจับกับโปรตีนและไขมันได้ดี ซึ่งโปรตีนที่ได้สามารถแยกนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ต่อไป นอกจากนี้ ไคโตซานยังสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักและจับสี (Dye) ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย

#### 2.1.6.8 ด้านสิ่งทอ

นำมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยและใช้ในการทอร่วมหรือเคลือบกับเส้นใยอื่นๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติการต้านจุลชีพ ลดการเกิดกลิ่นอับชื้น

### 2.2 การย่อยสลายไคโตซาน [19]

ไคโตซานเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีหมู่อะมิโน ( $-NH_2$ ) มาประกอบกันเรียกว่า polyamino glucose มีสูตรโมเลกุล  $(C_6H_{12}O_4N)_n$  ไคโตซานมีชื่อทางเคมีว่า poly- $\beta$ -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose เป็นอนุพันธ์ของไคติน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซิติล (Deacetylation) ออกจากไคตินในสารละลายต่างเข้มข้น จึงทำให้โครงสร้างของไคตินบางส่วนเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะหมู่ฟังก์ชันที่มีธาตุไนโตรเจนในรูปของหมู่อะเซตามิโด ( $NH-CO-CH_3$ ) เปลี่ยนไปเป็นหมู่อะมิโน ( $NH_2$ ) [16]

ไคโตซานสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและไม่มีความเป็นพิษ ไคโตซานไม่ละลายในน้ำแต่ละลายได้ในสารละลายที่มีความเป็นกรดเบสต่ำกว่า 6.5 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์มีหมู่อะมิโน ( $NH^+2$ ) และหมู่ไฮดรอกซิล ( $OH^-$ ) ที่ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างภายในสายโซ่ที่เรียกว่า Intramolecular Hydrogen Bonding และระหว่างสายโซ่ ที่เรียกว่า Intermolecular Hydrogen Bonding

พันธะไฮโดรเจนยังทำให้การเรียงตัวของสายโซ่แต่ละสายเป็นไปอย่างจำกัดโดยปฏิกิริยาทิศทางของสายโซ่ที่เรียงตัวกันนี้จำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ การเรียงตัวของสายโซ่เป็นการเรียงแบบทิศทางเดียวกัน เบตา-ไคติน ( $\beta$ -Chitin) แบบทิศทางเดียวกันและสวนทิศทางสลับกันไป อัลฟา-ไคติน ( $\alpha$ -Chitin) และแบบสวนทิศทางตลอดสายโซ่ หรือ แกมมา-ไคติน ( $\gamma$ -Chitin) โครงสร้างอัลฟาเป็นโครงสร้างที่มีความสมบูรณ์ในด้านพันธะไฮโดรเจน คือ มีทั้งแบบภายในและระหว่างสายโซ่อย่างเป็นระเบียบ ไคตินและไคโตซานที่มีโครงสร้างประเภทนี้จะมีความเสถียรสูง ได้แก่ เปลือกกุ้ง ปู และเชื้อราบางชนิด สำหรับเบตาและแกมมาจะพบในแกนปลาหมึก

ในการเตรียมไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถทำได้หลายวิธี อาทิ การใช้สารเคมี การใช้เอนไซม์ [11] และการใช้หมู่อองไว [8-12] การเตรียมไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำโดยการใช้สารเคมี

สามารถทำได้ง่ายและใช้ต้นทุนต่ำ แต่ข้อด้อยของกระบวนการนี้คือ ก่อให้เกิดของเสียอันตรายและการปนเปื้อนของสารเคมี กระบวนการใช้เอนไซม์ถือเป็นกระบวนการเตรียมโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากเอนไซม์มีความจำเพาะในการตัดสายโซ่ของโคโตซานเพื่อให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลง แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ มีความซับซ้อนในการเตรียมเอนไซม์และการทำบริสุทธิ์ผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม สำหรับกระบวนการเตรียมโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำโดยการใช้หมู่ว่องไว โคโตซานจะถูกย่อยสลายด้วยหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลซึ่งถูกผลิตขึ้นจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [12] อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้มีความยุ่งยากในการกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ออกจากผลิตภัณฑ์

## 2.3 กระบวนการพลาสมาวิญญากาศของเหลว (Solution Plasma Process)

### 2.3.1 พลาสมา

พลาสมา (Plasma) [13] ถูกจัดเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีสมบัติบางประการที่แตกต่างจากของแข็ง ของเหลวและแก๊ส พลาสมาเกิดจากการแตกตัวของแก๊สที่เป็นกลางกลายเป็นอนุภาคที่มีประจุหรือไอออน กระบวนการนี้เรียกว่า “กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization)” โดยการแตกตัวจะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สถูกกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน คลื่นไมโครเวฟ และรังสียูวี เป็นต้น การกระตุ้นส่งผลให้อะตอมสูญเสียสภาพความเป็นกลางและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ปริมาณที่ใกล้เคียงกับประจุบวกส่งผลให้ประจุไฟฟ้าสุทธิของพลาสมาเป็นศูนย์ พลาสมาแสดงพฤติกรรมเหมือนอนุภาคเป็นกลาง (Quasi-Neutral) และมีการอยู่รวมกันแบบเป็นกลุ่ม (Collective Behavior)

พลาสมาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ พลาสมาอุณหภูมิสูงและพลาสมาอุณหภูมิต่ำ พลาสมาอุณหภูมิสูง คือ พลาสมาที่เกิดจากการให้พลังงานสูงแก่แก๊สเพื่อให้แก๊สเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งแก๊สในระบบของพลาสมาประเภทนี้จะเกิดการแตกตัวเกือบสมบูรณ์และระบบประจุสุทธิอยู่ในสภาวะสมดุล เช่น ปฏิกิริยานิวเคลียร์ ไอพ่นเครื่องยนต์ เป็นต้น ส่วนพลาสมาอุณหภูมิต่ำ คือ พลาสมาที่เกิดจากการให้พลังงานต่ำแก่แก๊สส่งผลให้เกิดการแตกตัวไม่สมบูรณ์ของไอออนในระบบอุณหภูมิต่ำ เช่น ระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่ความดันต่ำ การปล่อยประจุด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เป็นต้น

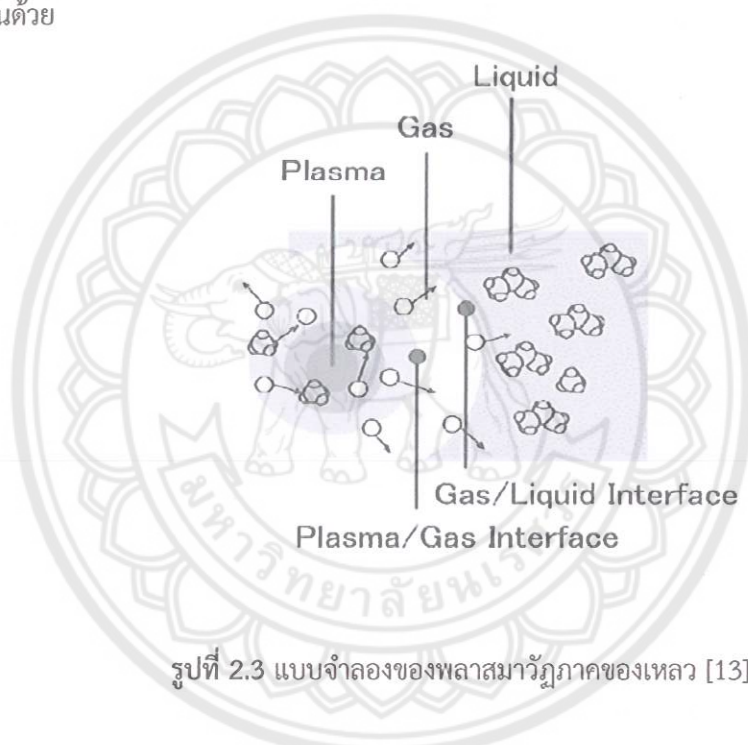
### 2.3.2 พลาสมาวิญญากาศของเหลว (Liquid Phase Plasma)

#### 2.3.2.1 หลักการของพลาสมาวิญญากาศของเหลว

พลาสมาวิญญากาศของเหลว [13] คือกระบวนการผลิตพลาสมาที่ล้อมรอบด้วยวิญญากาศของเหลวโดยใช้ความต่างศักย์ของไฟฟ้ากระตุ้นให้เกิดหมู่ว่องไว (Free radical) ซึ่งหมู่ว่องไวที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยาได้เร็ว ข้อดีของพลาสมาวิญญากาศของเหลว คือ สามารถใช้งานได้อย่างหลากหลายเนื่องจากสามารถเลือกชนิดของตัวทำละลายและสารละลายที่ใช้ในการผลิตพลาสมาได้

ในปัจจุบันกระบวนการพลาสมาที่ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ อาทิ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การดัดแปลงพื้นผิวของโลหะและการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

รูปแบบการเกิดพลาสมาวัฏภาคของเหลวแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 โดยพลาสมาเกิดขึ้นที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างอิเล็กโทรดซึ่งถูกล้อมรอบด้วยแก๊สและของเหลวส่งผลให้เกิดผิวสัมผัสระหว่างสถานะ 2 บริเวณกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อถึงจุดที่สารเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคหรือสถานะพลาสมาที่สามารถนำไฟฟ้าได้จะทำให้เกิดพองแก๊สขึ้นบริเวณรอบๆ พลาสมา ในขณะที่พลาสมาถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องจะทำให้หมู่ว่องไวระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้น เกิดการเคลื่อนตัวไปอยู่บริเวณของเหลวที่มีหมู่ว่องไวน้อยกว่า โดยอาศัยหลักการถ่ายโอนมวล ดังนั้น สารที่อยู่ในวัฏภาคของเหลวจะแพร่เข้ามาแทนที่และถูกกระตุ้นให้แตกตัวกลายเป็นหมู่ว่องไวต่อไป จากหลักการดังกล่าวส่งผลให้หมู่ว่องไวภายในสารละลายเพิ่มขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นด้วย



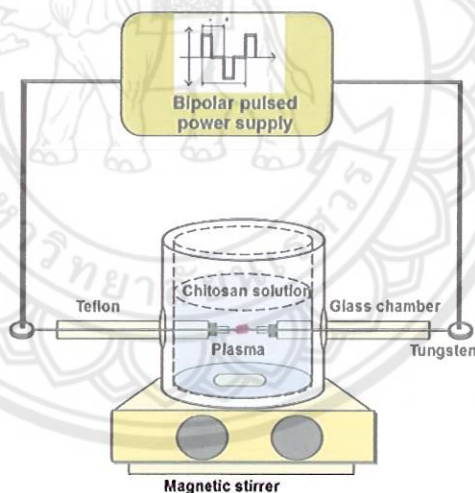
รูปที่ 2.3 แบบจำลองของพลาสมาวัฏภาคของเหลว [13]

### 2.3.2.2 เครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว [16]

พลาสมาวัฏภาคของเหลวสามารถผลิตได้จากเครื่องกำเนิดพลาสมา [16] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยเครื่องกำเนิดพลาสมาจะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันและความถี่สูงระบบกระแสตรง ซึ่งเพาเวอร์ซัพพลายจะทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ให้กับระบบ โดยมีทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้าแบบสลับขั้วบวกและลบ (Bipolar pulsed) เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปเป็นกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ ดังนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ในเพาเวอร์ซัพพลายที่มีหน้าที่ในการแปลงระบบไฟฟ้าจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงก่อนที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังถึงปฏิกรณ์พลาสมาเพื่อผลิตพลาสมาต่อไป สำหรับองค์ประกอบส่วนที่ 2 คือ ถึงปฏิกรณ์พลาสมา โดยทั่วไปแล้วนิยมทำจากแก้ว

รูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-10 เซนติเมตร ซึ่งตำแหน่งด้านข้างทั้งสองด้านของถังปฏิกรณ์จะติดตั้งอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุทั้งสแตน ทองแดง และเหล็ก เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 0.2 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกหุ้มด้วยเซรามิกเพื่อป้องกันความร้อนและการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตพลาสมา ในการผลิตพลาสมาวัฏภาคของเหลวจะเชื่อมต่อเพาเวอร์ซัพพลายเข้ากับอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน โดยใช้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่สูง โดยค่าแรงดันและความถี่ที่ใช้ในการผลิตพลาสมาขึ้นอยู่กับ การนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารละลายภายในเครื่องกำเนิดพลาสมา

พลาสมาสามารถสร้างหมว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยหมว่องไวที่เกิดขึ้นเป็นสารตัวนำไฟฟ้าเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากกระแสไฟฟ้าจะแตกตัวเป็นไอออนที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ไอออนต่างๆ เหล่านี้เรียกว่า หมว่องไว [8-12] โดยหมว่องไวที่มักเกิดขึ้นระหว่างการทรานส์เฟอร์ด้วยพลาสมา เช่น Hydroxyl radical ( $\text{OH}\cdot$ ), Hydroperoxyl radical ( $\text{H}_2\text{O}_2\cdot$ ), Free electron ( $e^-$ ), Superoxide anion ( $\text{O}^-$ ) เป็นต้น นอกจากนี้ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดยังมีผลต่อความสามารถในการสร้างหมว่องไว สีของแสงพลาสมาที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดซึ่งอยู่ภายในสารละลายแสดงถึงชนิดของหมว่องไวซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค Optical Emission Spectrometer (OES) [20]



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมของการผลิตพลาสมาวัฏภาคของเหลว [16]

### 2.3.2.3 การประยุกต์ใช้พลาสมาวัฏภาคของเหลว

ในปัจจุบันพลาสมาวัฏภาคของเหลวได้รับความนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน [21] การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุและการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็น

การบวนการที่สามารถดำเนินการได้ในสภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้องซึ่งทำให้ต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสมาวิภาคของแก๊ส

*การสังเคราะห์อนุภาคทองขนาดนาโนด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว*

[1-2]

ในการสังเคราะห์อนุภาคทองขนาดนาโนด้วยพลาสมาจะสังเคราะห์ภายใต้สารละลาย  $\text{HAuCl}_4$  ซึ่งเป็นสารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำ (Aqueous Solution) และไม่ใช่ในน้ำ (Nonaqueous Solution) ในระบบเปิด ในกระบวนการสังเคราะห์จะติดตั้งระบบพลาสมาแรงดัน 2.5 กิโลโวลต์ ความถี่ 60 กิโลเฮิร์ตซ์ และความกว้างพัลส์ (Pulse Width)  $2 \times 10^{-6}$  วินาที ( $\mu\text{s}$ ) จากการศึกษาพบว่า อนุภาคนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยพลาสมาวิภาคของเหลวโดยใช้สารละลาย  $\text{HAuCl}_4$  ความเข้มข้น 0.60 มิลลิโมลาร์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยสูงสุด  $10.5 \pm 3.6$  นาโนเมตร จากการศึกษาด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray analyzer (EDX) และ Infrared Spectroscopy (IR) พบว่า อนุภาคนาโนมีองค์ประกอบของทองและมีค่าการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยความเข้มของพีคจะสูงขึ้นตามระยะเวลาในการดีสชาร์จ (Discharge Time) นอกจากนั้น พลาสมาวิภาคของเหลวยังสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่เป็นทองให้มีรูปร่างแบบเรขาคณิตที่แตกต่างกันได้ อาทิ สามเหลี่ยม ห้าเหลี่ยม และหกเหลี่ยม โดยใช้สารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำ ดังนั้น การสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยวิธีพลาสมาวิภาคของเหลวจึงง่ายต่อการควบคุมรูปร่างของอนุภาคนาโนในรูปแบบต่างๆ ได้

*การปรับปรุงพื้นผิวของโลหะด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว [1-2]*

ในการปรับปรุงพื้นผิวของโลหะด้วยพลาสมาจะใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนด และขั้วแคโทดเป็นสแตนเลสสตีล สารละลายที่ใช้มีค่าความเป็นด่างอยู่ระหว่าง 8 และ 12 จากการศึกษาผลของค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่มีต่อการปรับปรุงพื้นผิวโลหะพบว่า ช่วงที่ให้ค่าความต่างศักย์ต่ำ 0 ถึง 150 โวลต์ ไม่พบการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของขั้วแอโนดและแคโทด จากการเพิ่มค่าความต่างศักย์มากขึ้น จะสังเกตเห็นฟองอากาศเกิดขึ้นบนพื้นผิว เมื่อให้ค่าความต่างศักย์มากกว่า 175 โวลต์ พบว่า พื้นผิวของขั้วแอโนดเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนั้น ยังพบว่า ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการพลาสมาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากผลการศึกษาสัณฐานพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM ของพื้นผิวโลหะพบว่า พื้นผิวชั้นนอกของอะลูมิเนียมมีรูพรุนสูงซึ่งส่งผลให้มีความแข็งแรงต่ำ ในขณะที่พื้นผิวชั้นในของอะลูมิเนียมจะมีความหนาแน่นของเนื้อโลหะสูงกว่าชั้นนอกและมีความแข็งแรงมากกว่า ทั้งนี้ เนื่องจากพื้นผิวชั้นนอกของอะลูมิเนียมสัมผัสกับพลาสมาได้มากกว่าพื้นผิวชั้นในทำให้พื้นผิว มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว [1-2]

การบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมาจะใช้ค่าความต่างศักย์ 800 โวลต์ เวลาที่ใช้ในการเปิด-ปิดพัลส์ 40 วินาที และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมา คือ สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ  $\text{CH}_3\text{COONa}$  จากการทดลองกับน้ำที่มีเชื้อแบคทีเรีย *E.Coil uc 4100* (แบคทีเรียแกรมลบ) และ *Staphylococcus aureus* (แบคทีเรียแกรมบวก) พบว่า การบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมาที่เวลาสูงสุด 30 วินาที แบคทีเรียที่อยู่ในสารละลายตายทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า พลาสมาสามารถทำลายแบคทีเรียได้

## 2.4 เทคนิค Optical Emission Spectroscopy (OES)

เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ ทดสอบ เชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพของธาตุต่างๆ ในสิ่งที่สนใจ ซึ่งใช้งานได้หลากหลายและสามารถวิเคราะห์ได้หลายธาตุในเวลาเดียวกัน

หลักการของเทคนิค OES

ระบบของ OES ประกอบด้วย 4 ส่วน หลัก คือ

2.4.1 ขาดังสารตัวอย่าง

2.4.2 แหล่งกำเนิด

2.4.3 สเปกโตรมิเตอร์

2.4.4 ชุดประกอบอิเล็กทรอนิกส์

ในระบบต่างๆ ที่สนใจ เช่น ระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลว เมื่อระบบดำเนินไประบบจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปแสง (Light Emission) หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัว จากสมการ

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

และ 
$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.2)$$

จะได้ 
$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

โดย

E คือ พลังงานที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ระดับพลังงาน

h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (J·s)

V คือ ความถี่ของรังสี (Hz)

C คือ ความเร็วแสง (m/s)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น (m)

ดังนั้น ค่าพลังงานจะแปรผกผันกับค่าความยาวคลื่น แต่ธาตุจะมีชุดความยาวคลื่นที่เกิดจากการเปล่งพลังงาน (Emission) เฉพาะตัว แสงที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวมโดยสเปกโตรมิเตอร์ และถูกส่งผ่านไปยังเกรตติงเลี้ยวเบนเพื่อแยกช่วงความยาวคลื่นให้เกิดการหักเหแสงกลายเป็นสเปกตรัม จากนั้นแสงที่ถูกแยกช่วงความยาวคลื่นแล้วจะถูกส่งไปยังตัวรับสัญญาณ (Detector) เพื่อเปลี่ยนความเข้มแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าให้เป็นความเข้มข้นของธาตุโดยเปรียบเทียบกับสัญญาณของมาตรฐานที่เราทราบความเข้มข้นที่ได้ทำการวิเคราะห์ และบันทึกไว้ก่อนหน้า

ความยาวคลื่นที่ใช้สำหรับ OES อยู่ในช่วงระหว่าง 150-800 นาโนเมตร เครื่องมือนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุที่ได้ทำการทดสอบเทียบไว้แล้วเท่านั้น

เครื่องมือ OES ใช้วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุโดยการวิเคราะห์พลังงานที่ได้จากระบบที่เราสนใจเมื่อระบบปล่อยแสงออกมา

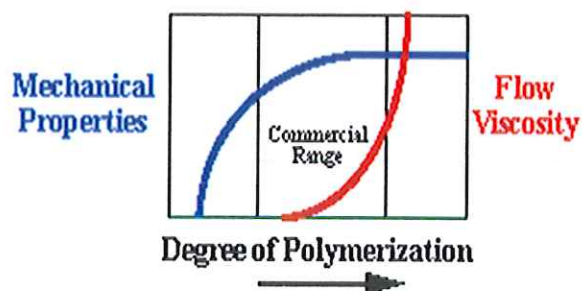
จากการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิค OES ที่ผ่านมามีพบว่า พีคที่แสดงการปล่อยแสงของอะตอมของธาตุที่พบทั่วไปจากการดิซซาร์จของพลาสมาในภูมิภาคของเหลวคือ  $H\alpha$  ที่มีค่าการปล่อยแสงที่ 656.3 นาโนเมตร และ  $O$  ที่มีค่าการปล่อยแสงที่ 777 และ 844 นาโนเมตร และการปล่อยแสงของไอออนสำหรับธาตุอื่นๆ เช่น  $Fe^{II}$  มีค่าการปล่อยแสงที่ 259.941 และ 425.079 นาโนเมตร  $H\gamma$  434 นาโนเมตร  $H\beta$  486.1 นาโนเมตร  $Ca$  393.366 นาโนเมตร  $Br^{II}$  523.823 นาโนเมตร และ Yttrium 371.025 นาโนเมตร เป็นต้น [20, 22-24]

## 2.5 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

### 2.5.1 ความสำคัญของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ [25]

น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุดังกล่าว ทั้งในด้านของความหนืดและสมบัติด้านการไหล (ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูป) และสมบัติเชิงกล (เช่น ค่าการทนแรงดึง การยืดตัว) ดังแนวโน้มทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนั้น การทราบค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จึงเป็นสิ่งสำคัญและเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อประโยชน์ในการเลือกนำพอลิเมอร์ไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม





รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน กับสมบัติเชิงกลและความหนืดของพอลิเมอร์ [25]

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากในความเป็นจริงแล้ว พอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีน้ำหนักโมเลกุลที่ไม่เท่ากันทุกๆ โมเลกุล เนื่องจากมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์หรือแม้แต่พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ (เช่น ยางพารา) ก็จะมีน้ำหนักโมเลกุลที่หลากหลาย ดังนั้น การรายงานค่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จึงต้องระบุเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีการระบุได้เป็น 3 แบบลักษณะ คือ

ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลโดยจำนวน ( $M_n$ )

$$M_n = \frac{\sum(N_i M_i)}{\sum(N_i)} \quad (2.4)$$

ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลโดยน้ำหนัก ( $M_w$ )

$$M_w = \frac{\sum(N_i M_i^2)}{\sum(N_i M_i)} \quad (2.5)$$

ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลโดยความหนืด ( $M_v$ )

$$M_v = \left[ \frac{\sum N_i M_i^{1+a}}{\sum N_i M_i} \right]^{1/a} \quad (2.6)$$

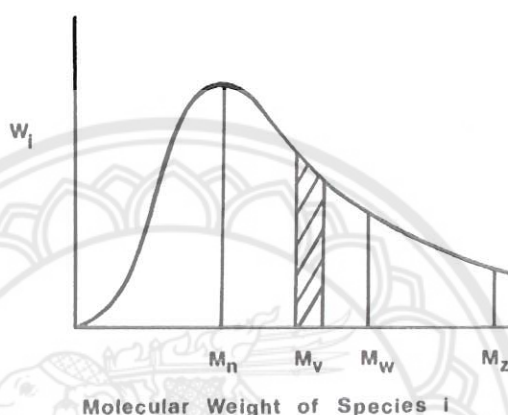
เมื่อ

a = ค่าคงที่ Mark-Houwink ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 – 0.8

N = จำนวนโมเลกุลในสารตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ทำการวิเคราะห์

M = น้ำหนักโมเลกุลของแต่ละสายโซ่

ซึ่งการเฉลี่ยในแต่ละแบบจะให้ค่าตัวเลขที่แตกต่างกัน โดยที่การเฉลี่ยแบบจำนวน ( $M_n$ ) จะให้ค่าน้อยที่สุด ในขณะที่การเฉลี่ยแบบน้ำหนัก ( $M_w$ ) จะให้ค่ามากที่สุด สำหรับการเฉลี่ยแบบความหนืด ( $M_v$ ) จะให้ค่าอยู่ระหว่าง  $M_n$  กับ  $M_w$  และโดยทั่วไปแล้วค่า  $M_v$  จะเข้าใกล้  $M_w$  มากกว่า  $M_n$  (รูปที่ 2.6) ในการรายงานค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์นั้นสามารถใช้ได้ทั้ง 3 แบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเทคนิควิเคราะห์ที่ใช้ว่าจะให้ค่าเฉลี่ยแบบใด สิ่งสำคัญ คือ ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ควรจะใช้ค่าเฉลี่ยประเภทเดียวกันมาพิจารณา



รูปที่ 2.6 กราฟการกระจายตัวน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight Distribution Curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลกับสัดส่วนน้ำหนัก [25]

นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างค่า  $M_w$  กับ  $M_n$  จะได้ค่า Polydispersity Index (PDI) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความกว้างของกราฟในรูปที่ 2.6 กล่าวคือถ้า  $M_w$  มีค่าห่างจาก  $M_n$  มาก PDI จะมีค่าสูงและกราฟที่ได้จะมีความกว้างมาก ในทางตรงกันข้ามถ้า  $M_w$  มีค่าใกล้เคียง  $M_n$  มากค่า PDI จะเข้าใกล้ 1 และกราฟที่ได้จะมีลักษณะแคบมากๆ สำหรับในกรณีที่ค่า PDI เท่ากับ 1 นั้นจะหมายความว่า สารตัวอย่างพอลิเมอร์ดังกล่าวมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากันทุกโมเลกุล (เรียกว่า Monodisperse Polymer) ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย ยกเว้น พอลิเมอร์ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยกระบวนการแบบ Living Polymerization ความสำคัญของค่า PDI อยู่ที่การนำไปใช้งาน เช่น ในงานด้านการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC) [16] จำเป็นที่จะต้องใช้สารมาตรฐาน (Standard) มาประกอบการวิเคราะห์ ซึ่งในการนี้จะต้องใช้สารมาตรฐานพอลิเมอร์ที่มีค่า PDI เท่ากับ 1 เท่านั้น ส่วนในงานอื่นๆ ทั่วไปสามารถใช้พอลิเมอร์ที่มีค่า PDI มากกว่า 1 ได้ เนื่องจากสังเคราะห์ได้ง่ายกว่าและมีราคาถูกกว่า

## 2.5.2 เทคนิคสำหรับหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ [25]

ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลแต่ละแบบจะได้มาจากการทดลองร่วมกับการทำการคำนวณด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

2.5.2.1 End group analysis (absolute method)

2.5.2.2 Osmometry (absolute method)

2.5.2.3 Viscometry

2.5.2.4 Gel permeation Chromatography

2.5.2.5 Light scattering (absolute method)

โดยเทคนิคที่เราใช้วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลคือ Viscometry และ Gel Permeation Chromatography

### Viscometry [27]

ในขณะที่เทคนิค Colligative (เช่น End Group Analysis และ Osmometry) และเทคนิค Light Scattering (LS) ให้ผลการวัดน้ำหนักโมเลกุลเป็นค่าสัมบูรณ์ (Absolute) (หมายความว่าน้ำหนักโมเลกุลสามารถคำนวณได้โดยตรงโดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลด้านโครงสร้างเคมีพอลิเมอร์) แต่การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเหล่านี้จะใช้เวลาค่อนข้างมากและบางครั้งจะต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง ดังนั้น การใช้เทคนิคอย่างง่าย เช่น การวัดความหนืด (Viscometry) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โดยหลักการของ Viscometry จะเป็นการวัดความหนืดแบบ Intrinsic Viscosity ของสารละลายพอลิเมอร์เจือจาง เพื่อใช้หาค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลแบบความหนืด ( $M_v$ ) โดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จะสัมพันธ์กับความหนืด กล่าวคือ ยิ่งพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงก็จะยิ่งทำให้ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์หรือความหนืดของพอลิเมอร์ในขณะไหลมีค่าสูงขึ้น สำหรับในกรณีของสารละลายพอลิเมอร์ค่าความหนืดกับน้ำหนักโมเลกุลจะสัมพันธ์กันตามสมการของ Mark-Houwink [26] ดังนี้

$$[\eta] = kM_v^a \quad (2.7)$$

เมื่อ

$[\eta]$  = intrinsic viscosity

$k, a$  = ค่าคงที่ Mark-Houwink

ซึ่ง  $k$  และ  $a$  จะเป็นค่าคงที่เฉพาะของแต่ละคู่ของพอลิเมอร์และตัวทำละลายที่อุณหภูมิหนึ่งๆ กล่าวคือถ้าเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายหรือใช้อุณหภูมิในการวัดความหนืดเปลี่ยนไปจะใช้ค่า  $k$  และ  $a$  เดิมในการคำนวณไม่ได้ โดยทั่วไปแล้ว  $a$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5–1 โดยในกรณีที่โมเลกุลพอลิเมอร์

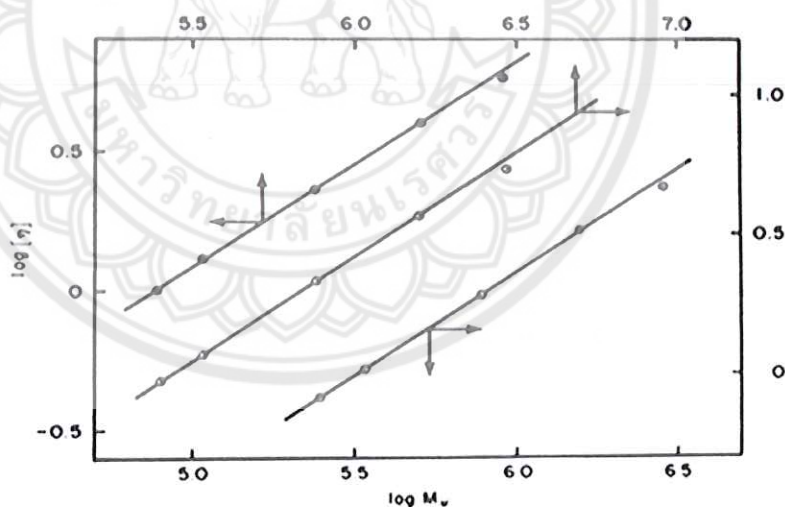
มีความอ่อนตัว (Flexible) ค่า  $a$  จะอยู่ที่ประมาณ 0.5–0.9 ในขณะที่โมเลกุลที่เริ่มมี Flexibility ลดลง เช่น โมเลกุลที่มี Conformation แบบ Linear Chain หรือ Worm Like (เช่น ในกรณี Cellulose หรือ Polyelectrolyte) ค่า  $a$  จะเข้าใกล้ 1 มากๆ ยิ่งไปกว่านั้น ค่า  $a$  ในบางกรณีอาจมากกว่า 1 ก็ได้ เช่น Conformation แบบ Rod จะมีค่า  $a$  อยู่ระหว่าง 1.7–2.0 [27]

#### การหาค่าคงที่ $k$ และ $a$

หลักการในการหาค่าคงที่  $k$  และ  $a$  จะอาศัยสมการที่ได้จากการใส่ค่า Natural Log (ln) ของสมการ Mark-Houwink

$$\ln[\eta] = \ln(k) + a \ln[M_v] \quad (2.8)$$

จากนั้นจะทำการวัดค่า Intrinsic Viscosity  $[\eta]$  ของสารตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ทราบค่า  $M_v$  มาแล้วจากเทคนิคอื่นๆ เช่น ในกรณีของ Monodisperse Polymer อาจจะทราบ  $M_n$  หรือ  $M_w$  จากเทคนิคอื่น (เช่น Osmometry, LS) และถ้าถือว่า  $M_v = M_n = M_w$  (เนื่องจากเป็น Monodisperse) ดังนั้น เมื่อทำการวัดค่า Intrinsic Viscosity  $[\eta]$  แล้วทำการ Plot กราฟระหว่าง  $\ln[\eta]$  กับ  $\ln[M_v]$  ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.7 จะได้ค่าความชันเท่ากับ  $a$  และ จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\ln(k)$



รูปที่ 2.7 กราฟ logarithm ระหว่าง  $[\eta]$  กับ  $M_w$  ของพอลิไสตรีนที่สังเคราะห์โดยกระบวนการ Anionic polymerization โดยมีค่า Polydispersity Index เท่ากับ 1.06 ที่ได้จากการวัดความหนืดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสโดยใช้ตัวทาละลายชนิดต่างๆ ดังนี้ เบนซีน (จุดทึบ) โทลูอีน (จุดกึ่งทึบ) และไดคลอโรเอธิลีน (จุดโปร่ง) [25]

สังเกตว่าในกรณีของสารตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีค่า PDI มากกว่า 1 (Polydisperse Polymer) หรือมีค่า  $M_v \neq M_n \neq M_w$  จะอนุโลมให้นำค่า  $M_w$  ที่วัดจากเทคนิคอื่นมาใช้ในการคำนวณค่า  $k$  และ  $a$  เนื่องจากถือว่ามีค่า  $M_v$  เข้าใกล้  $M_w$  มากกว่า  $M_n$  (โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้า Polydispersity  $< 3$  ค่า  $M_w$  กับค่า  $M_v$  จะต่างกันไม่กี่เปอร์เซ็นต์) ในปัจจุบันค่า  $k$  และ  $a$  ในระบบต่างๆ ได้มีผู้ทำการศึกษาทดลองคำนวณค่าและสรุปไว้ในเอกสารอ้างอิง เช่น Polymer Handbook ไว้แล้ว ดังนั้น ผู้ใช้สามารถเลือกตัวทำละลายอุณหภูมิทดสอบและชนิดพอลิเมอร์ได้ตรงกับเงื่อนไขสถานะในตารางค่าคงที่  $k$  และ  $a$  ใน Handbook เพื่อนำไปคำนวณค่า  $M_v$  ของสารตัวอย่างพอลิเมอร์โดยการวัดความหนืด

การหาค่า intrinsic viscosity  $[\eta]$  เพื่อใช้ในการคำนวณหา  $M_v$

ค่า  $[\eta]$  จะได้มาจากสมการที่สำคัญ 2 สมการคือ

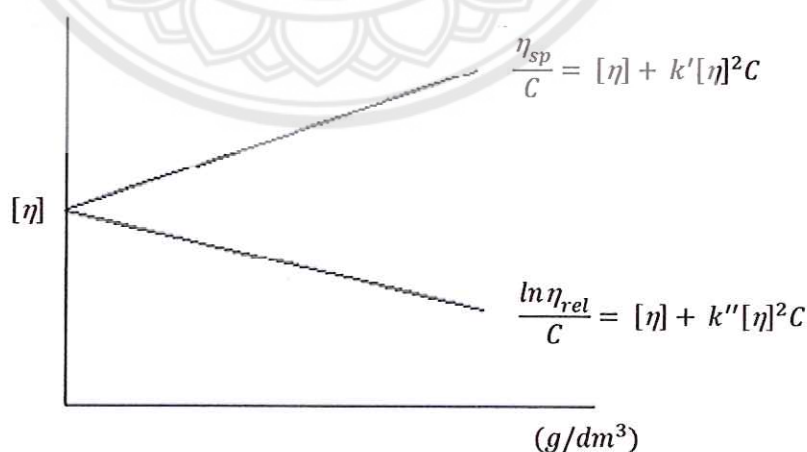
1. Huggins equation

$$\frac{\eta_{sp}}{C} = [\eta] + k'[\eta]^2 C \quad (2.9)$$

2. Kramer equation

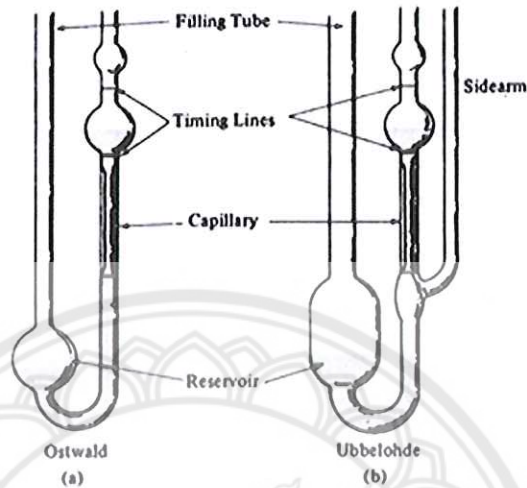
$$\frac{\ln \eta_{rel}}{C} = [\eta] + k''[\eta]^2 C \quad (2.10)$$

ซึ่งจากสมการทั้ง 2 จะเห็นได้ว่า



รูป 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ [27]

จากรูป 2.8 จะสังเกตเห็นกราฟ 2 เส้นที่ควรจะมีจุดตัดแกน Y เดียวกัน (ซึ่งมีค่าเท่ากับ Intrinsic Viscosity) ส่วน  $k'$  และ  $k''$  สามารถคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟที่มาจากแต่ละสมการในทางปฏิบัติ ค่า  $\eta_{sp}$  และ  $\eta_{rel}$  จะได้มาจากการวัดความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้เครื่อง Viscometer ในแบบต่างๆ (รูปที่ 2.9)



รูปที่ 2.9 Viscometer แบบ Ostwald และแบบ Ubbelohde [25]

โดยที่ค่าความหนืดที่วัดได้จากการไหลของสารผ่าน Capillary ในเครื่อง Viscometer นั้นจะมีค่าเท่ากับ

$$\eta = Atp \quad (2.11)$$

ดังนั้น อัตราส่วนระหว่างค่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ ( $\eta$ ) กับค่าความหนืดของตัวทำละลายบริสุทธิ์ ( $\eta_0$ ) จะมีค่าเท่ากับค่า Relative Viscosity ( $\eta_{rel}$ )

$$\eta = \frac{\eta}{\eta_0} \quad (2.12)$$

เมื่อแทนค่าจะได้ว่า

$$\eta_{rel} = \frac{Atp}{t_0\rho_0} \quad (2.13)$$

$$\eta_{rel} = \frac{tp}{t_0\rho_0} \quad (2.14)$$

ในกรณีที่สารละลายพอลิเมอร์ที่วัดเจือจางมากๆ จะถือว่าความหนาแน่นของสารละลายพอลิเมอร์เท่ากับความหนาแน่นของตัวทำละลายบริสุทธิ์

$$\eta_{rel} = \frac{t}{t_0} \quad (2.15)$$

ดังนั้น ในการทดลองถ้าสามารถวัดเวลาที่ของไหลเดินทางไหลผ่าน Capillary ในช่วงปริมาตรคงที่ได้ก็จะสามารถหาค่า  $\eta_{rel}$  ได้และสามารถหาค่า Specific Viscosity ( $\eta_{sp}$ ) ได้จากสมการ

$$\eta_{sp} = \eta_r - 1 = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} \quad (2.16)$$

ในทางปฏิบัติจะหาค่า  $\eta_{rel}$ ,  $\eta_{sp}$  โดยการเตรียมสารละลายตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ อย่างน้อย 4 ค่า (เพื่อนำไป Plot กราฟต่อไป) โดยความเข้มข้นที่ใช้ควรจะไม่สูงมากนัก โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 1-20 กรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่สารตัวอย่างมี  $M_w$  ต่ำมาก อาจจะต้องใช้ความเข้มข้นสูงขึ้น 10-40 กรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร หรือในทางตรงกันข้ามถ้าสารตัวอย่างมี  $M_w$  สูงมากๆ อาจจะต้องใช้ความเข้มข้นเจือจางในช่วง 1-5 กรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

ที่มาของสมการเริ่มจาก Poiseville's equation

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi Pr^4}{8\eta lc} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\text{volume of liquid flowing through the capillary}}{\text{time (sec/cc)}} \quad (2.18)$$

- P = hydrostatic pressure
- $\eta$  = viscosity ของสาร หรือของไหล
- r = radius ของ capillary
- lc = length ของ capillary

ในกรณีที่วัดการไหลของสารที่ปริมาณคงที่

$$\frac{V}{t} = \frac{\pi Pr^4}{8\eta lc} \quad (2.19)$$

เนื่องจาก  $P = \rho gh$   
ดังนั้น

$$t = \frac{8\eta lcV}{\rho ghr^4\pi} \quad (2.20)$$

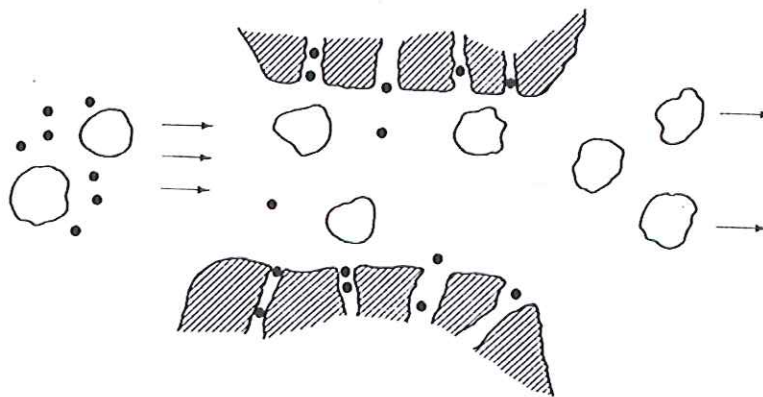
ซึ่งสามารถรวมค่าคงที่ทั้งหมดให้อยู่ในเทอม A

ดังนั้น จากสมการ (2.11) ซึ่งให้เห็นว่า Kinetic energy มีผลเล็กน้อยมากต่อ pressure โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ใช้ capillary ที่ยาวและรัศมีเล็ก

#### *Gel Permeation Chromatography [25]*

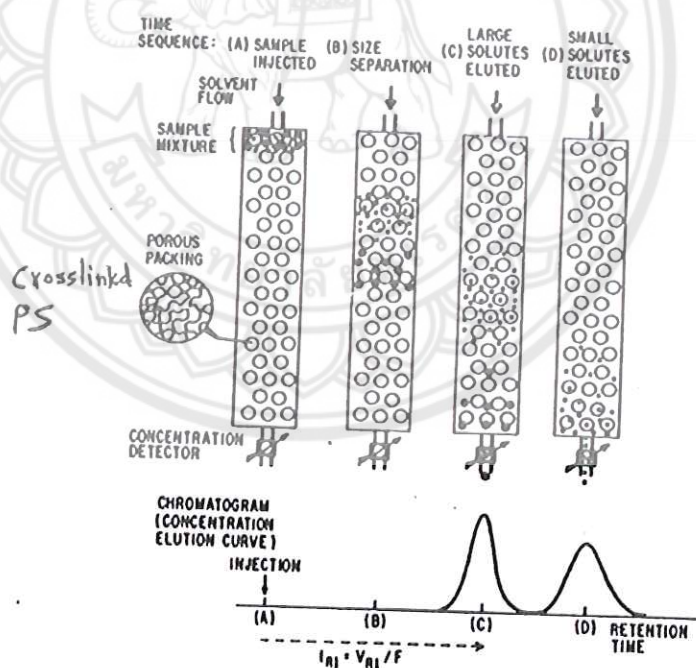
Gel permeation Chromatography (GPC) หรือ Size Exclusion Chromatography (SEC) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่อาศัยหลักการพื้นฐานที่ว่า พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันเมื่ออยู่ในสารละลายจะเกิดการพองตัวของ Random Coil ที่ให้ขนาดต่างกัน โดยมีสมมุติฐานว่า Hydrodynamic Volume ที่เกิดจากการพองตัวของพอลิเมอร์จะแปรผันตามน้ำหนักโมเลกุล (Assumption ตรงนี้สำคัญมากๆ เพราะจะมีผลเวลาเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน) และเมื่อทำการฉีดสารละลายพอลิเมอร์ผ่านคอลัมน์ที่อยู่ในบรรจุสารที่มีลักษณะเป็นรูพรุน เช่น เม็ดอนุภาคโครอสติงค์พอลิสไตรีนที่มีรูพรุน จะพบว่า พอลิเมอร์ที่มีขนาดของ Random Coil หรือ Hydrodynamic Volume ต่างกันก็จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์และไหลออกจากคอลัมน์ในเวลาที่ไม่เท่ากัน โดยพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ (หมายถึง Hydrodynamic Volume หรือ Random Coil) จะออกมาได้เร็วกว่า เนื่องจากไม่สามารถแทรกเข้าไปตามรูพรุนของสารที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ได้ดังแสดงในรูป 2.10 ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กกว่าจะไหลผ่านออกจากคอลัมน์ได้ช้ากว่าเนื่องจากโมเลกุลมีขนาดเล็กพอที่จะแทรกเข้าไปในรูพรุนสารที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ได้จึงเสียเวลาในการเดินทางนานขึ้น ดังนั้น จะเห็นได้ว่า GPC เป็นเทคนิคที่แยกพอลิเมอร์ตามขนาด ดังนั้น บางครั้งจึงอาจจะเรียกชื่อเทคนิคนี้ว่า "Size Exclusion Chromatography (SEC)"





รูปที่ 2.10 แสดงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์โดยเทคนิค GPC

สารละลายพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากคอลัมน์ในช่วงเวลาต่างๆ กัน จึงมีน้ำหนักโมเลกุลไม่เท่ากัน ซึ่งเมื่อทำการวัดปริมาณของสารละลายพอลิเมอร์ที่ไหลออกในช่วงเวลาต่างๆ กันโดยใช้ Detector ชนิดต่างๆ เช่น UV Detector หรือ Reflective Index Detector (RI) ก็จะสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารกับเวลาที่ไหลออกจากคอลัมน์ (หรือเรียกว่า "Retention Time") ซึ่งกราฟดังกล่าวจะเรียกว่า GPC Chromatogram และมีลักษณะดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงหลักการทำงานของเทคนิค GPC

นอกจากนั้นในบางครั้ง ค่า Retention Time ใน GPC Chromatogram อาจถูกนำเสนอแทนที่ด้วย ค่า Retention Volume ได้ ซึ่งค่าทั้งสองสามารถเทียบกลับไปมาได้โดยอาศัยสมการ

$$T_{Rt} = \frac{V_{Rt}}{F} \quad (2.21)$$

เมื่อ

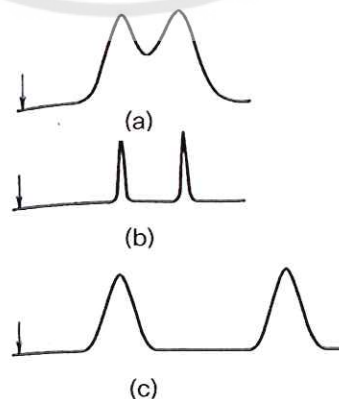
$T_{Rt}$  = Retention Time

$V_{Rt}$  = Retention Volume

$F$  = Flow rate ของสารละลายที่ไหลผ่าน column (ml/min)

โดยทั่วไปแล้วอัตราการไหลที่ใช้จะอยู่ที่ประมาณ 1 ml/min นอกจากนั้น จะสังเกตเห็นได้ว่า GPC Chromatogram ที่ได้ อาจจะไม่ได้มีลักษณะเป็นพีคเดี่ยวๆ ก็ได้ ขึ้นอยู่กับว่าสารตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ทำการวิเคราะห์นั้นมีความกว้างของการกระจายตัวน้ำหนักโมเลกุลหรือมีค่า Polydispersity Index มากแค่ไหน

นอกจากนั้น ลักษณะของโครมาโตแกรมที่ได้ยังจะขึ้นอยู่กับสมบัติของคอลัมน์ด้วยว่ามีความสามารถในการแยกแยะ (Resolution) สารละลายพอลิเมอร์ดีแค่ไหน โดยถ้าคอลัมน์มีระยะทางยาวมากขึ้นและรูพรุนในคอลัมน์มีขนาดที่หลากหลายแตกต่างกันมากขึ้น Resolution ก็จะได้ดีขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าคอลัมน์มี Resolution ไม่ดีอาจเห็นพีค 2 พีคผสมเข้าหากันกลายเป็นพีคกว้าง 1 พีคได้ (รูปที่ 2.12) นอกจากนั้น วัสดุที่บรรจุในคอลัมน์เองก็จะมีขนาดหลากหลาย ซึ่งถ้าหากใช้ Porous Bead ขนาดที่มีเล็กก็จะบรรจุอนุภาคสารดังกล่าวได้เยอะ (High Packing Density) และทำให้ Separation Efficiency สูง แต่ในขณะเดียวกันถ้าใช้ Bead ที่มีขนาดอนุภาคเล็กก็จะทำให้เกิด Back Pressure ในคอลัมน์สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะพีคของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์

## 2.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายของไคโตซาน

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายไคโตซานเป็นผลต่อเนื่องจากการศึกษา น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานที่ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นในการทรีทด้วยพลาสมา โดยการนำผลของ คำน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของไคโตซาน ( $M_t$ ) หรือ จำนวนเฉลี่ยของน้ำหนักโมเลกุล ( $M_n$ ) ที่ได้จากการ ตรวจสอบด้วยเครื่อง GPC มาคำนวณ สามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.22) ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการ ศึกษาจลนพลศาสตร์ของ Chang K.L.B. และคณะ โดยได้อธิบายว่า สมการดังกล่าวสามารถสร้าง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยากับส่วนกลับของค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย โดย เส้นกราฟที่เกิดขึ้นแสดงเป็นเส้นตรงและมีความชัน ซึ่งความเป็นเส้นตรงของกราฟนั้นแสดงถึงอันดับ การเกิดปฏิกิริยาของการย่อยสลายไคโตซานที่เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order) และความชันของ กราฟที่ได้จะบอกถึงค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซาน ( $k$ ) [12]

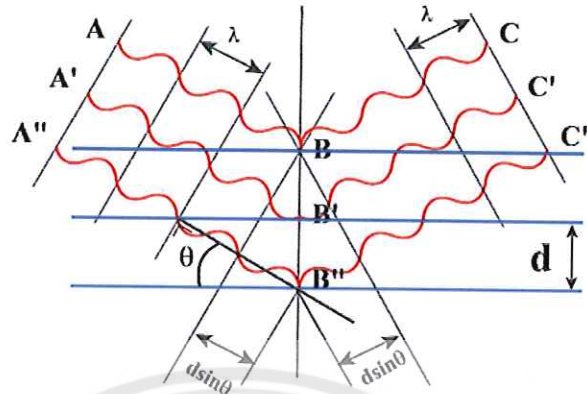
$$\frac{1}{M_t} = \frac{1}{M_0} + \frac{kt}{M} = \frac{1}{M_0} + k't \quad (2.22)$$

|       |       |     |   |
|-------|-------|-----|---|
| เมื่อ | $M_t$ | คือ | ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่เวลาใดๆ                                       |
|       | $M_0$ | คือ | ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของไคโตซานตัวอย่าง                               |
|       | $M$   | คือ | ค่าน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานมอนอเมอร์                                    |
|       | $k$   | คือ | ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซาน ( $\text{min}^{-1}$ )                   |
|       | $k'$  | คือ | ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซาน ( $\text{mol g}^{-1} \text{min}^{-1}$ ) |
|       | $t$   | คือ | เวลาในการเกิดปฏิกิริยา  |

## 2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD [28]

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์คุณสมบัติ ของวัสดุต่างๆ โดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิด ประเภทของสารประกอบแบบผลึกต่างๆ ในชิ้นงาน โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ใน สารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้ โดยในผลึกของ ตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของหน่วยเซลล์ที่ไม่เท่ากันทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะช่วยให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง เมื่อลำรังสี ตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาค เท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบดังรูป 2.13 โดยอาศัย Bragg's law ซึ่งแสดงเป็นสมการ  $2d\sin\theta = n\lambda$  ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยังผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้เครื่องตรวจจับ

รับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบซึ่งสามารถทำการทดสอบตัวอย่างได้รวดเร็วและให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่สูง



รูปที่ 2.13 รูปแสดงลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก

#### 2.7.1 ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือองค์ประกอบตัวอย่างที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้เครื่อง XRD คำนวณหาปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่างว่ามีสัดส่วนกี่เปอร์เซ็นต์ได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

#### 2.7.2 ลักษณะตัวอย่างที่เหมาะสมในการส่งเพื่อทดสอบ

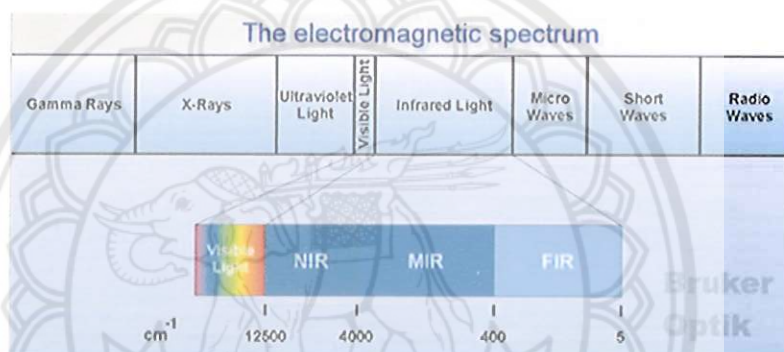
เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็งหรือตัวอย่างที่เป็นผง (Powder) ได้ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 เมช (Mesh) หรือ ประมาณ 40 ไมครอน (Micron) (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดีโดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้งประมาณ 1-2 กรัม ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อนต้องมีขนาดกว้างยาวไม่เกิน 10 เซนติเมตร ทั้งนี้พื้นที่ที่จะทำการทดสอบจะเป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ประมาณ 10 มิลลิเมตร เท่านั้น กรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณน้อยมากๆ ก็อาจทำการทดสอบได้โดยใช้แผ่น Zero Background ในการวางตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ

ในกรณีที่ต้องการทดสอบชั้นฟิล์มบางเพื่อหาความหนาความหนาของฟิล์มที่เตรียมต้องอยู่ระหว่าง 10-100 นาโนเมตร ถ้าต่ำกว่า 10 นาโนเมตร ผลการทดสอบจะความคลาดเคลื่อนมาก และหากหนาเกิน 100 นาโนเมตร จะไม่สามารถคำนวณความหนาได้

## 2.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR [28-29]

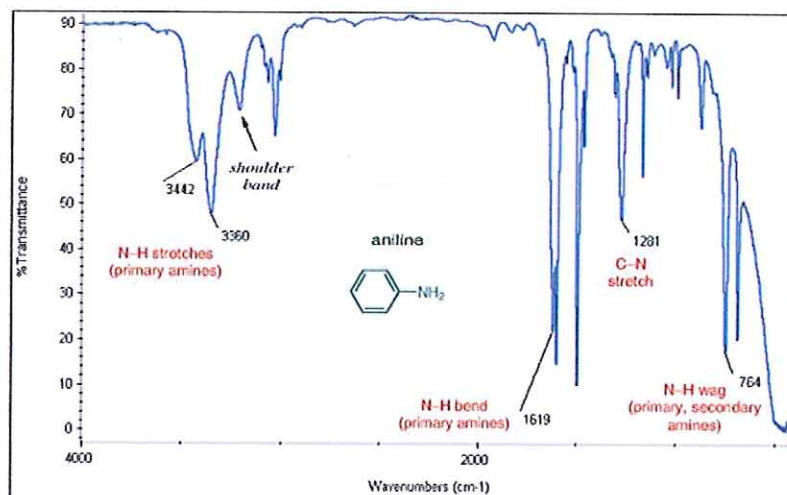
FT-IR spectrometer (Fourier Transform Infrared Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ 12800 - 10 ต่อเซนติเมตร ( $\text{cm}^{-1}$ ) ดังรูป 2.14 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

- ก. Near Infrared (12800-4000 ต่อเซนติเมตร)
- ข. Middle Infrared (4000-200 ต่อเซนติเมตร)
- ค. Far Infrared (200-10 ต่อเซนติเมตร)



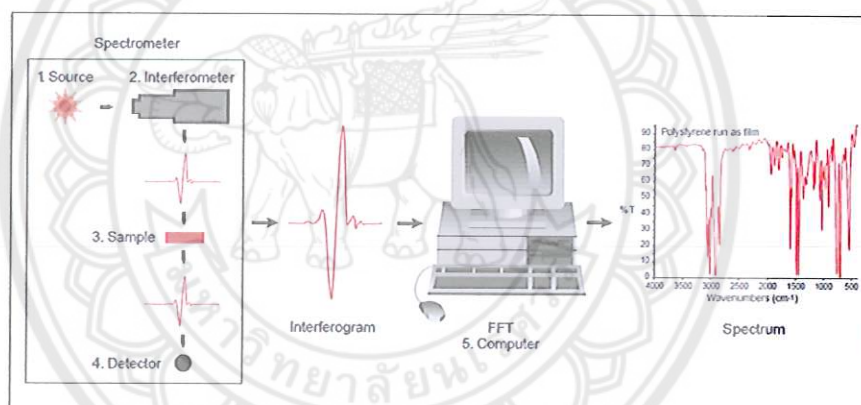
รูปที่ 2.14 แสดงช่วงของรังสีอินฟราเรด

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave Number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared Spectrum ดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wave Number กับ Transmittance

### 2.8.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FTIR spectrometer



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FTIR Spectrometer

2.8.1.1 Light source คือ แหล่งกำเนิดรังสี เป็นสารเฉื่อยที่ถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิระหว่าง 1,000 – 1,800 องศาเซลเซียส

2.8.1.2 Interferometer คือ ตัวแยกรังสี มีหน้าที่แยกรังสี ทำให้รังสีเกิดการกระจายตัว แล้วทำการรวมสัญญาณแทรกสอดซึ่งเป็นฟังก์ชันกับการกระจายตัวของรังสีโดยเครื่องตรวจวัดซึ่งประกอบด้วย Mobile Mirror, Fixed Mirror และ Beam Splitter

ก. Sample คือ สารตัวอย่างที่เราต้องการวิเคราะห์

ข. Detector คือ ตัววัดสัญญาณความเข้มแสงที่เหลือจากการดูดกลืนของสาร

ตัวอย่าง

ค. Computer คือ ส่วนที่มีหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับจากตัวตรวจวัดเพื่อประมาณผลและแสดงออกมาเป็นกราฟ

## 2.8.2 การทำงานของเครื่อง FT-IR

2.8.2.1 แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดจะทำการผลิตรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นหรือเลขคลื่นที่จะใช้ในการวิเคราะห์

2.8.2.2 Beam Splitter ซึ่ง Beam Splitter จะปล่อยให้ทะลุผ่านไป Fixed Mirror ร้อยละ 50 และสะท้อนกลับมาที่ Mobile Mirror ร้อยละ 50

2.8.2.3 Fixed Mirror จะสะท้อนกลับมาที่ Beam Splitter

2.8.2.4 Mobile Mirror จะสะท้อนกลับมาที่ Beam Splitter

2.8.2.5 อินฟราเรดที่สะท้อนมาจาก Mobile Mirror และ Fixed Mirror จะมารวมกันและเกิดการแทรกสอดกันขึ้น แต่จากการที่ Mobile Mirror สามารถเคลื่อนที่ได้โดยการควบคุมระยะการเคลื่อนที่โดย Laser เมื่อ Mobile Mirror เคลื่อนที่ก็จะทำให้ระยะทางการสะท้อนกลับของรังสีอินฟราเรดของ Mobile Mirror และ Fixed Mirror ไม่เท่ากันซึ่งส่งผลให้รังสีอินฟราเรดที่ได้มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปอันเกิดจากการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือหักล้างกันเรียกว่า Interferogram

## 2.8.3 ข้อดีของ FT-IR

2.8.3.1 ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วและมีความไวสูง

2.8.3.2 มีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio:  $s/n$ ) ต่ำ อัตรา  $s/n$  จะแปรผันกับรากที่สองของปริมาณสัญญาณที่ตรวจวัดได้ทั้งหมด

2.8.3.3 ความไวของเครื่องตรวจวัดสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเพิ่ม  $s/n$  ร่วมกับการเพิ่มจำนวนรอบของสแกน มีการใช้ Circular Optical Aperture แทนที่ Entrance Slit ทำให้ลำรังสีมีขนาดมากกว่าแบบ Dispersive ถึง 75-100 เท่า

2.8.3.4 มีกำลังแสงสูงเหมาะสำหรับตัวอย่างหรือเทคนิคบางเทคนิคที่มีข้อจำกัดของกำลังแสง

2.8.3.5 นอกจากนี้ FTIR ยังให้ประสิทธิภาพในการแยกสเปกตรัมที่มีความถูกต้องไม่ต่ำกว่า 0.01 ต่อเซนติเมตร มีกลไกทำงานที่ง่าย

## 2.9 แนวคิดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2006 Huang Q.Z. และคณะ [30] ได้ศึกษาผลการย่อยสลายไคโตซานด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งมีกรด 3 ชนิด ได้แก่ Tungstosilicic Acid, Phosphotungstic Acid และ Phosphomolybdic Acid เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยนำไคโตซานน้ำหนัก 1.5 กรัม ละลายในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และเติมกรดที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 0.02 กรัม จากนั้นนำไปปั่นกวนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-120 นาที โดยวัดน้ำหนักโมกุลทุก 30 นาที และเปรียบเทียบการย่อยสลายไคโตซานด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดกับการย่อยสลายไคโตซานด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่า การย่อยสลายไคโตซานด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ส่งผลให้การย่อยสลายดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการย่อยสลายไคโตซานด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลให้การย่อยสลายไคโตซานด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ Phosphotungstic Acid

ปี ค.ศ. 2007 Jayakumar R. และคณะ [31] ได้ศึกษาการปรับแต่งไคตินและไคโตซาน ให้เป็นวัสดุชีวภาพใหม่ คือ Sulfate Chitin และ Chitosan โดยใช้กรดซัลฟิวริกเตตระไฮโดรฟูราน และ ฟอสฟอรัส ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่า Sulfate Chitin และ Chitosan ที่ได้จากกรดซัลฟิวริกมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายของพอลิแซ็กคาไรด์ และส่งผลทำให้ไคโตซานมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง หลังจากนั้นได้มีการนำ Sulfate Chitin และ Chitosan ไปใช้งานด้านต่างๆ เช่น การดูดซับโลหะไอออน ชีวภาพการแพทย์ ยาปฏิชีวนะ การปลูกถ่ายเซลล์เพื่อสร้างเนื้อเยื่อ จากการศึกษาที่สรุปได้ว่า ไคโตซานที่ปรับแต่งโดยใช้กรดซัลฟิวริกจะทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง โดยคงคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพและทางเคมีชีวภาพไว้ได้

ในปี ค.ศ. 2008 Takai O. [13] ได้ศึกษาคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้กระบวนการพลาสมา ภูมิภาคของเหลวทางด้านต่างๆ พบว่า กระบวนการพลาสมาพลาสมาภูมิภาคของเหลวปล่อยพลังงานพลาสมาในสารละลายที่มีตัวถูกละลายและตัวทำละลาย โดยพลาสมาที่เกิดขึ้นมีผิวสัมผัสเกิดขึ้นสองส่วนคือ พลาสมาที่กับแก๊ส และ แก๊สกับของเหลว พลาสมาที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน การปรับปรุงพื้นผิว และการบำบัดน้ำ ซึ่งในการสังเคราะห์วัสดุนาโน ใช้คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของพลาสมาในการสังเคราะห์อนุภาคทองคอลลอย โดยการศึกษผลของความเข้มข้นของสารละลาย การเติมสารเติมแต่ง และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่ออนุภาคนาโนที่เกิดขึ้น พบว่า เกิดอนุภาคทองขนาดนาโนรูปร่างแตกต่างกันผลที่ได้นี้สามารถนำไปสังเคราะห์เป็นอนุภาคนาโนขนาดใหม่ได้ สำหรับการประยุกต์ใช้กระบวนการพลาสมาในการปรับปรุงพื้นผิว ได้ใช้



คุณสมบัติทางไฟฟ้าของระบบพลาสมาในการศึกษาคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้นที่มีไทเทเนียมและอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ หลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยพลาสมา พบว่า ลักษณะภายนอกของสารตั้งต้นมีค่าความแข็งต่ำและมีความเป็นรูพรุนสูง ส่วนลักษณะภายในมีความแข็งแรงสูงและยึดเกาะได้ดี การประยุกต์ใช้พลาสมาในการบำบัดน้ำพบว่า กระบวนการพลาสมาสามารถกำจัดแบคทีเรียในน้ำได้ ทำให้จำนวนแบคทีเรียในน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรมรวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมได้

ในปี ค.ศ. 2009 Potocký S. และคณะ [20] ได้ศึกษาระบบการเกิดพลาสมาในสารละลายที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ความต่างศักย์ 4 กิโลโวลต์ พลังงานพัลส์ 10 มิลลิจูลต่อพัลส์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ทั้งนี้ได้เปรียบเทียบลักษณะของพลาสมา 2 แบบคือ แบบเชื่อมต่อ (Bridge) และแบบไม่เชื่อมต่อ (Unbridge) ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด จากการประยุกต์ใช้อิเล็กโทรด 2 ชนิดคือ ทังสเตนและสแตนเลสสตีลเกรด 304 พบว่า ที่สภาวะการเกิดพลาสมาแบบไม่เชื่อมต่อของขั้วอิเล็กโทรดจะชักนำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลลจำนวนมาก นอกจากนี้ ที่ขั้วอิเล็กโทรดทังสเตนมีค่าอัตราการกัดกร่อนต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลสสตีล การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นขณะที่เกิดพลาสมามีผลทำให้พื้นผิวหน้าตัดของอิเล็กโทรดสแตนเลสสตีลมีลักษณะคล้ายปล่องภูเขาไฟขนาดใหญ่ ส่วนพื้นผิวหน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรดทังสเตนมีลักษณะคล้ายปล่องภูเขาไฟขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวหน้าตัด ดังนั้น สรุปได้ว่า ลักษณะของพลาสมาและชนิดของขั้วอิเล็กโทรดมีผลต่อปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคอลล อัตราการกัดกร่อนของขั้วอิเล็กโทรด และลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรด

ในปี ค.ศ. 2009 Morris . G.A. และคณะ [32] ได้ทำการศึกษการย่อยสลายของโคโคซานที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยใช้โคโคซาน 100 มิลลิกรัม ละลายในกรดอะซิติกความเข้มข้น 2 โมลาร์ 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 4 25 และ 40 องศาเซลเซียส จากนั้น ทำการวัดน้ำหนักโมเลกุลโดยใช้เครื่อง SEC-MALLS และวัดความหนืดโดยใช้เครื่อง Viscometer จากผลการศึกษาพบว่า น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการย่อยสลายโคโคซานโดยการละลายที่อุณหภูมิสูง 40 องศาเซลเซียส จะให้อัตราการย่อยสลายสูงสุด จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของโคโคซาน

ในปี ค.ศ. 2010 Jayakumar R. และคณะ [33] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ไคตินและโคโคซานในการเตรียมวัสดุนาโน จากรายงานดังกล่าวพบว่า ไคตินและโคโคซานเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในทางชีวการแพทย์ โดยในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยถึงความแตกต่างทางลักษณะของไคตินและโคโคซานบนพื้นฐานของวัสดุนาโน รวมทั้งการเตรียมและการประยุกต์ใช้ไคตินและโคโคซานในการทำเส้นใยนาโน อนุภาคนาโน และสารประกอบนาโน เพื่อนำไป

ใช้ทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ การทำผ้าปิดแผล การถ่านไอออนยา และการวินิจฉัยมะเร็ง ทั้งนี้ เนื่องจากไคตินและไคโตซานมีคุณสมบัติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และไม่มีความเป็นพิษ สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และมีคุณสมบัติในการกระตุ้นการสร้างแอนติบอดีต่ำ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ไคตินและไคโตซานเป็นสารชีวพอลิเมอร์ทางธรรมชาติที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านชีวการแพทย์ในรูปแบบของวัสดุนาโน

ในปี ค.ศ. 2011 Wu S. [34] ได้ศึกษาการเตรียมสารไคโตซานที่สามารถละลายน้ำได้โดยกระบวนการย่อยสลายไคโตซานด้วยสารอัลฟา-อไมเลส โดยการละลายไคโตซานในกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ได้สารละลายไคโตซานความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก ปรับค่า pH โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ให้มีค่า 5.0 และเติมสารอัลฟา-อไมเลสปริมาณ 20 มิลลิกรัมลงในสารละลายไคโตซานที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ขนาด 500 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า ร้อยละผลได้ของไคโตซานที่สามารถละลายน้ำ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 0-3 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงเวลา 3-4 ชั่วโมง และจะคงที่หลังจากเวลา 4 ชั่วโมง นอกจากนี้ ยังพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียมไคโตซานที่ละลายน้ำได้คือ ค่า pH เท่ากับ 5.0 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณอัลฟา-อไมเลสที่ใช้ 20 มิลลิกรัมต่อ 500 มิลลิลิตรสารผสม และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง โดยน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานที่เตรียมได้ในสภาวะดังกล่าวจะมีค่า 730 ดาลตัน เมื่อนำสารละลายไคโตซานไปกรองแล้วทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของไคโตโอลิโกแซ็กคาไรด์ และผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจะอยู่ในรูปผงคล้ายแป้งสีขาวซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดี

ในปี ค.ศ. 2012 Prasertsung I. และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาการเตรียมไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว ไคโตซานจากแกนปลาหมึกถูกนำมาละลายในกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ได้สารละลายไคโตซานร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารละลายไคโตซานที่เตรียมได้จะถูกนำไปทรีตด้วยพลาสมา ที่แรงดันไฟฟ้า 1.6 กิโลโวลต์ ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และความกว้างของพัลส์  $2 \times 10^{-6}$  วินาที ที่อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทรีตด้วยพลาสมาในช่วง 0-300 นาที พบว่า น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของไคโตซานที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการทรีตด้วยพลาสมามีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลแต่ไม่มีผลต่อโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการเตรียมไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

ในปี ค.ศ. 2013 Prasertsung I. และคณะ [16] ได้ศึกษาการย่อยสลายเบตาไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว สารละลายเบตาไคโตซานถูกเตรียมที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 โมลาร์ และทรีตด้วยพลาสมาที่

ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ความต่างศักย์ 1.6 กิโลโวลต์ ความกว้างพัลส์  $2 \times 10^6$  วินาที มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 0.2 มิลลิเมตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 25-30 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทรีทเป็นเวลา 0-300 นาที จากการวัดน้ำหนักโมเลกุลด้วยเครื่อง GPC พบว่า ค่าน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานลดลงจาก  $5.5 \times 10^5$  ดาลตัน เป็น  $1.9 \times 10^4$  ดาลตัน หลังจากผ่านการทรีทด้วยพลาสมา 300 นาที ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับความหนืดที่วัดด้วยเครื่อง Viscometer คือ ความหนืดไคโตซานลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อผ่านการทรีทด้วยพลาสมาในช่วง 0-120 นาที และความหนืดจะลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่ง 300 นาที จากการใช้เครื่อง XRD ตรวจสอบโครงสร้างความเป็นผลึกของไคโตซาน แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างความเป็นผลึกของไคโตซานที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาถูกทำลาย อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของไคโตซานด้วยเทคนิค FTIR พบว่า การทรีทด้วยพลาสมาไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของไคโตซาน ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่เตรียมได้สามารถละลายได้ในสถานะที่เป็นกลางมากขึ้น จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า กระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเตรียมไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำอย่างมีประสิทธิภาพ

ในปี ค.ศ. 2013 Xia Z. และคณะ [35] ได้ศึกษาการเตรียมสารไคโตซานละลายน้ำได้โดยการย่อยสลายไคโตซานด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งมี Phosphotungstic Acid เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไคโตซานจะถูกละลายในกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ได้สารละลายไคโตซานความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นนำสารละลายไคโตซานที่เตรียมได้ใส่ในถังปฏิกรณ์ขนาด 1000 มิลลิลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และ Phosphotungstic Acid 1 กรัม จากนั้นอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะถูกควบคุมที่ 65 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 40 นาที จากการศึกษาพบว่า สามารถเตรียมไคโตซานละลายน้ำได้โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตรต่อปริมาตร Phosphotungstic Acid ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิที่ 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 40 นาที ซึ่งให้ค่าสมมูลการย่อยสลายมีค่าสูงสุดได้ และผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจะเป็นผงคล้ายแป้งและสามารถละลายน้ำได้ดี

ในปี ค.ศ. 2014 Pornsunthorntawe O. และคณะ [36] ได้ศึกษาการย่อยสลายของไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว ที่มีการเติมโลหะไอออน 4 ชนิด ได้แก่ ซิลเวอร์ไอออน ซิงค์ไอออน คอปเปอร์(II)ไอออน และ เฟอร์ริกไอออน ลงไปในสารละลายไคโตซานในอัตราส่วนของไคโตซานต่อโลหะไอออน เท่ากับ 1 ส่วน ต่อ 8 ส่วน ทำการย่อยสลายไคโตซานด้วยกระบวนการดังกล่าวเป็นเวลา 0-180 นาที และเปรียบเทียบกับ การย่อยสลายไคโตซานด้วยกรด และการย่อยสลายไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวที่ปราศจากโลหะไอออน จากการศึกษาพบว่า การย่อยสลายไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวที่มีโลหะไอออน มีอัตราการ

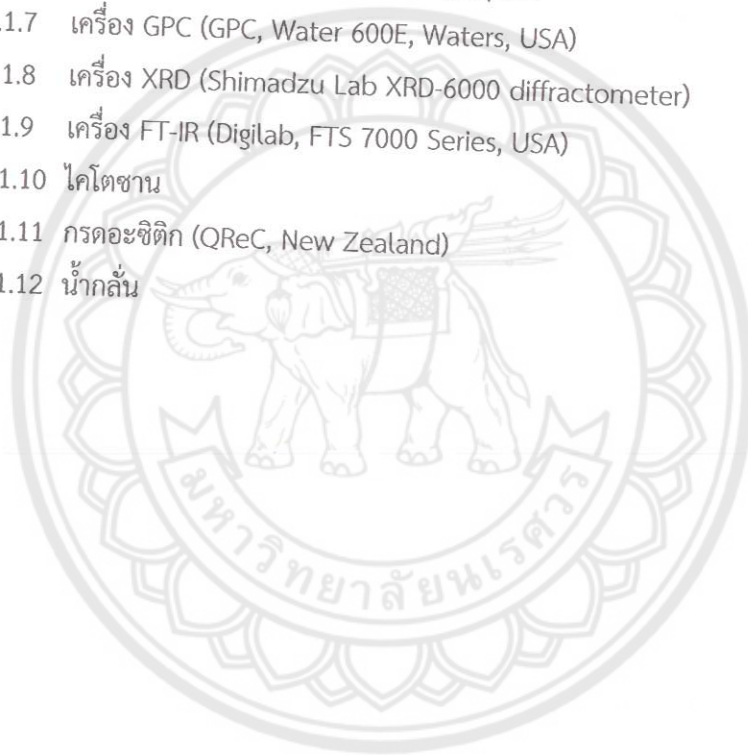
ย่อยสลายสูงกว่าอัตราการย่อยสลายโคโคซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่ปราศจากโลหะไอออน และกระบวนการย่อยสลายด้วยกรด และยังพบว่า การย่อยสลายด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่มีการเติมโลหะไอออนชนิดคอปเปอร์(II)ไอออน และเฟอริกไอออน จะให้อัตราการย่อยสลายที่สูงกว่าการย่อยสลายโคโคซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่มีโลหะไอออนชนิดซิลเวอร์ไอออนและซิงค์ไอออน



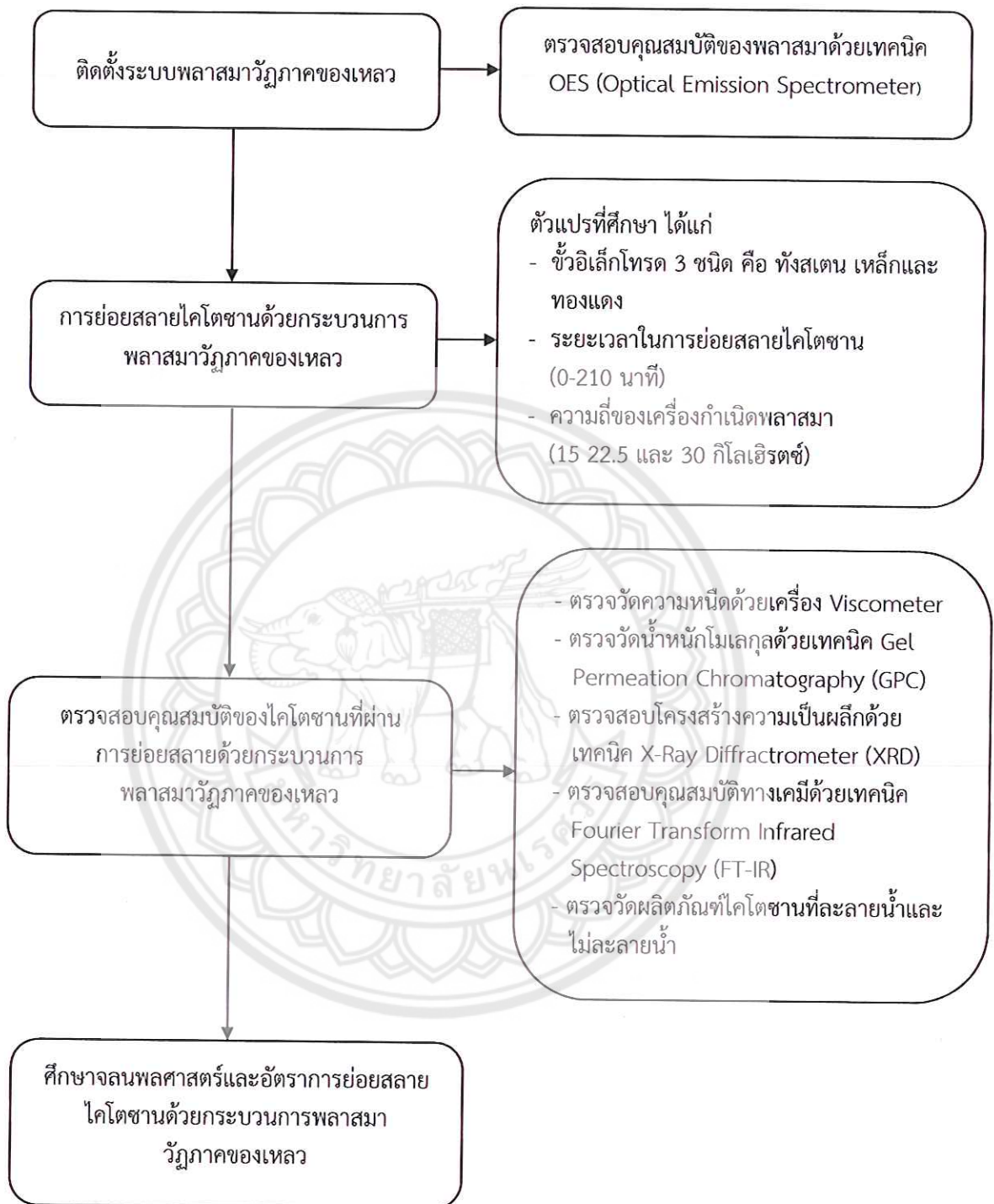
บทที่ 3  
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- 3.1.1 เครื่องปั่นกวน (Magnetic stirrer)
- 3.1.2 เครื่องกำเนิดพลาสมาภูมิภาคของเหลว (PEKURIS, Japan)
- 3.1.3 Reactor 100 มิลลิลิตร
- 3.1.4 ซีวอิเล็กโทรด (ทั้งสแตน เหล็ก และทองแดง)
- 3.1.5 เครื่องชั่งสาร
- 3.1.6 เครื่อง Viscometer (Vibro SV-100, Japan)
- 3.1.7 เครื่อง GPC (GPC, Water 600E, Waters, USA)
- 3.1.8 เครื่อง XRD (Shimadzu Lab XRD-6000 diffractometer)
- 3.1.9 เครื่อง FT-IR (Digilab, FTS 7000 Series, USA)
- 3.1.10 โคโคซาน
- 3.1.11 กรดอะซิติก (QReC, New Zealand)
- 3.1.12 น้ำกลั่น



## 3.2 วิธีการทดลอง



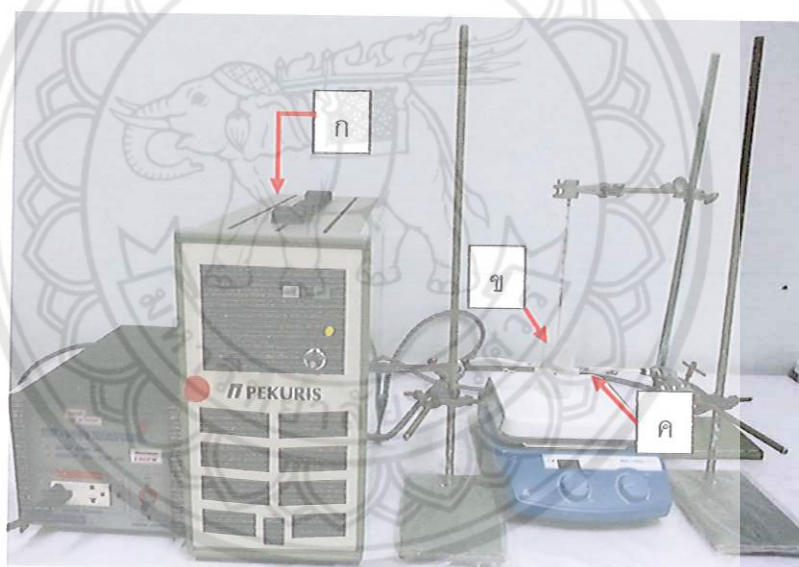
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย [15]

ในการศึกษาการย่อยสลายโมเลกุลของโคโคซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ดังรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 การติดตั้งระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเกิดขึ้นในระบบเปิดภายในเครื่องปฏิกรณ์แก้วที่มีขั้วอิเล็กโทรดติดตั้งอยู่ทั้งสองข้างของเครื่องปฏิกรณ์ [13] มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว 0.2 มิลลิเมตร เชื่อมต่อขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองเข้ากับเครื่องพาวเวอร์ซัพพลายระบบไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ โดยที่เครื่องปฏิกรณ์แก้วตั้งอยู่บนเครื่องปั่นกวาดรูปที่ 3.2 ทั้งนี้ ในการตรวจสอบคุณสมบัติพลาสมาที่เกิดขึ้นอาศัยเทคนิค OES [14] โดยนำหัววัดจุ่มลงในสารละลายโคโคซานขณะทำการทรีทด้วยระบบพลาสมาเพื่อวัดระดับการเปล่งแสง ผลที่ได้จากการวัดแสดงในรูปของกราฟที่แสดงความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง เพื่อระบุชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์กำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

- ก. เพาเวอร์ซัพพลาย
- ข. ถังปฏิกรณ์พลาสมา
- ค. ขั้วอิเล็กโทรด

### 3.3.2 การย่อยสลายไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

เตรียมสารละลายไคโตซาน ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก โดยนำไคโตซานน้ำหนัก 5 กรัม ละลายในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 โมลาร์ 1 ลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการย่อยสลายสารละลายไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว ที่มีความต่างศักย์ 1.6 กิโลโวลต์ (Voltage) ความกว้างของพัลส์ (Pulse Width)  $2 \times 10^{-6}$  -  $3 \times 10^{-6}$  วินาที ( $\mu$ s) โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 15-30 กิโลเฮิร์ตซ์ เวลาที่ใช้ในการทรีท 0-210 นาที และชนิดของขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทั้งสแตน เหล็ก และทองแดง

### 3.3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของไคโตซานที่ได้หลังจากการย่อยสลายไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

#### การวัดความหนืด

การวัดความหนืดของไคโตซานก่อนและหลังการย่อยสลายไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวสามารถตรวจสอบโดยใช้เครื่อง viscometer ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [15]

#### การวัดน้ำหนักโมเลกุล

น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานก่อนและหลังการย่อยสลายไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวสามารถตรวจสอบด้วยเทคนิค GPC (Gel Permeation Chromatography) โดยการใช้สารตัวอย่างมาตรฐานที่มีน้ำหนักโมเลกุลช่วง 5900-708000 ดาลตัน สร้างเป็นกราฟมาตรฐาน นำสารละลายไคโตซานมาตรวจวัดโดยใช้คอลัมน์ชนิด Ultra hydrogel linear 1 ความเข้มข้นของสารละลายไคโตซาน 0.4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ถูกกรองผ่านเมมเบรนขนาด 0.45 ไมโครเมตร อัตราการไหล 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน [15] และศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายไคโตซานโดยใช้สมการ (2.22) จากนั้น ทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยากับส่วนกลับของค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย เพื่อหาค่าอันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายไคโตซาน [12]

#### การตรวจสอบโครงสร้างความเป็นผลึก

การตรวจสอบโครงสร้างความเป็นผลึกของไคโตซานด้วยเทคนิค XRD ทำได้โดยนำสารละลายไคโตซานมาขึ้นรูปในแม่พิมพ์ แล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ให้ความหนาของชั้นฟิล์มบาง  $110 \pm 20$  ไมโครเมตร ในการตรวจสอบใช้ความเข้มการแผ่รังสีของ  $\text{CuK}\alpha$  ที่แรงดัน 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 50 มิลลิแอมแปร์ และมุมที่ใช้  $2\theta$  ระหว่าง 10 องศา ถึง 40 องศา [15]



### การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของโคโตซานก่อนและหลังการย่อยสลายโคซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวสามารถตรวจสอบโดยนำสารละลายโคโตซานขึ้นรูปในแม่พิมพ์ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ให้ได้ชั้นฟิล์มบางที่มีความหนา  $110 \pm 20$  ไมโครเมตร แล้วนำไปตรวจสอบด้วยเครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) โดยใช้ Transmittance Mode สแกนในช่วง  $4000-400$  ต่อเซนติเมตร ( $\text{cm}^{-1}$ ) [15]

### การตรวจวัดผลิตภัณฑ์โคโตซานที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ

การตรวจวัดผลิตภัณฑ์โคโตซานที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำก่อนและหลังการย่อยสลายด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวสามารถตรวจสอบโดยนำสารละลายตัวอย่างปรับค่า pH ให้มีค่าประมาณ 7 และนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที นาน 5 นาที จากนั้น นำตะกอนไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักตะกอนครั้งที่หนึ่ง นำสารละลายส่วนใสผสมกับอะซิโตนในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 และนำไปปั่นเหวี่ยงอีกครั้ง แล้วนำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักตะกอนครั้งที่สอง แล้วนำค่าน้ำหนักตะกอนที่ได้ไปคิดหาสัดส่วนที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ คำนวณโดยใช้น้ำหนักตะกอนหลังการทรีทต่อด้วยน้ำหนักตะกอนก่อนการทรีท

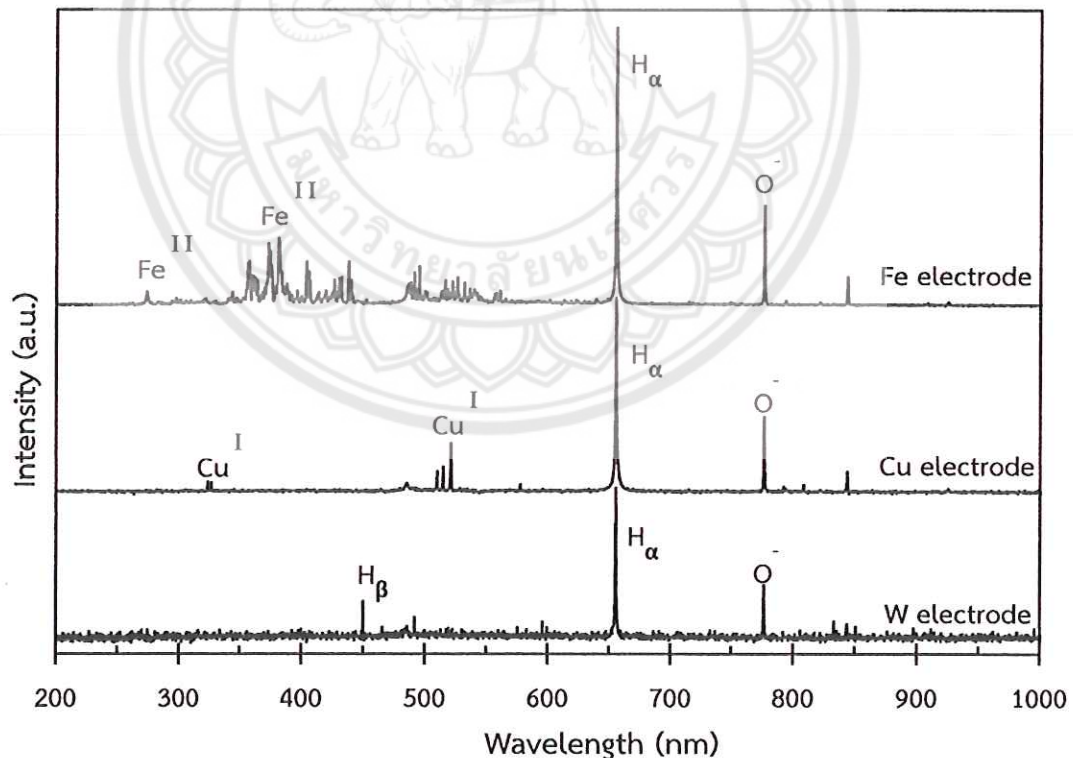


## บทที่ 4

### ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของพลาสมาวิภาคของเหลวด้วยเทคนิค OES

เนื่องจากหลักการของพลาสมาเกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องพาวเวอร์ซัพพลายที่เชื่อมต่ออยู่กับขั้วอิเล็กโทรดของเครื่องปฏิกรณ์แก้วที่มีสารละลาย โดยกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก่อให้เกิดการปล่อยประจุของขั้วอิเล็กโทรดทำให้อะตอมของธาตุหลุดออกจากขั้วอิเล็กโทรด เช่น การใช้ขั้วอิเล็กโทรดเหล็กเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าจากเครื่องพาวเวอร์ซัพพลายอะตอมของธาตุที่หลุดออกมาจากขั้วอิเล็กโทรดเหล็กคืออะตอมของเหล็ก ในทางกลับกันถ้าขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นทองแดงอะตอมที่หลุดออกมาจากขั้วอิเล็กโทรดจะเป็นอะตอมของทองแดง ทั้งนี้ อาจตรวจพบอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่เป็นสิ่งเจือปนในสารละลาย รวมทั้งธาตุที่เกิดจากการปล่อยประจุเนื่องจากพลังงานของพลาสมาในสารละลาย โดยธาตุที่ตรวจพบทั่วไป เช่น อะตอมของไฮโดรเจน และอะตอมของออกซิเจน ซึ่งสามารถตรวจสอบอะตอมของธาตุต่างๆ ที่หลุดออกมาหลังจากการเกิดพลาสมาได้ด้วยเทคนิค OES โดยจะแสดงค่าในรูปแบบพีคของธาตุต่างๆ ที่สามารถตรวจวัดได้ดังรูป 4.1



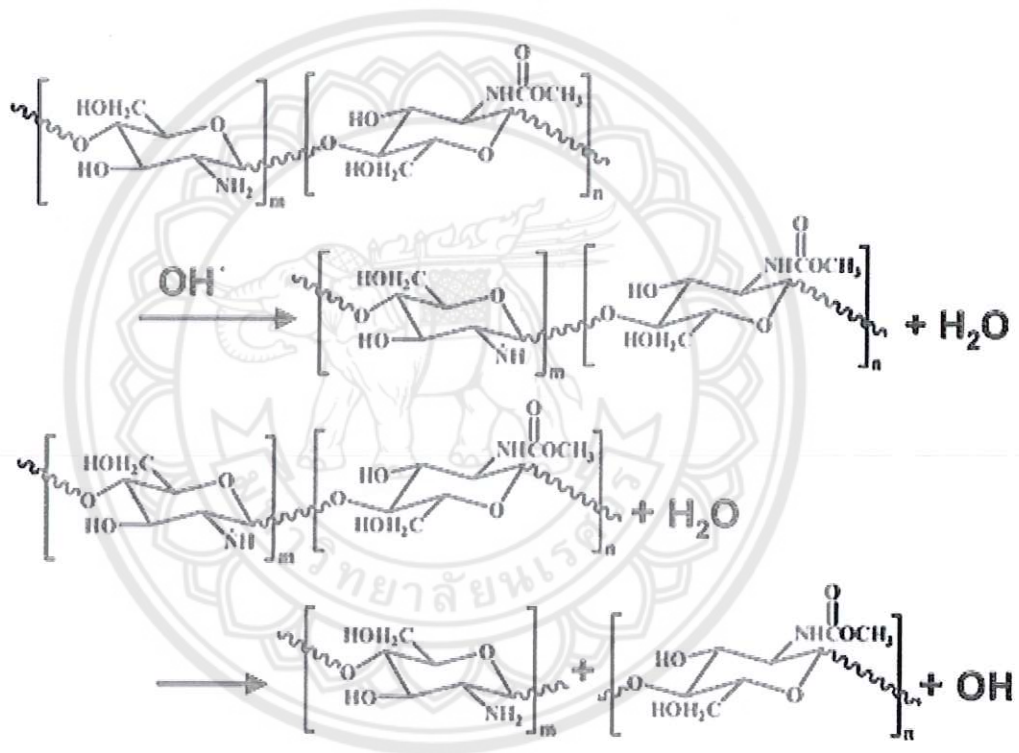
รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโคโดซาน

จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงสเปกตรัมฟิสิกส์ที่ได้จากการวัดชนิดของอิเล็กโทรด พบว่า โคลิตซานที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนเป็นเวลา 30 นาที แสดงสเปกตรัมฟิสิกส์ที่ตำแหน่ง  $H\alpha$  ที่มีค่าการปล่อยแสงที่ 656.3 นาโนเมตร [34] และ  $O^-$  ที่มีค่าการปล่อยแสงที่ 777 และ 844 นาโนเมตร  $H\beta$  ที่มีค่าการปล่อยแสง 486.1 นาโนเมตร [15] ทั้งนี้ เนื่องจากในสารละลายโคลิตซานมีน้ำเป็นส่วนประกอบเมื่อเกิดการดิซชาร์จของพลาสมาทำให้อะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจนหลุดออกจากกัน เกิดเป็นไอออนของธาตุที่สามารถตรวจวัดค่าการปล่อยแสงได้ด้วยเทคนิค OES การทรีตด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดทองแดง หลังจากการทรีตพบว่า มีไอออนของทองแดงอยู่โดยมีค่าการปล่อยแสงอยู่ที่ 324.5 และ 521.8 นาโนเมตร [33] และพบไอออนของธาตุที่เจือปนมาคือ  $Br^{II}$  และการทรีตสารละลายโคลิตซานด้วยขั้วอิเล็กโทรดเหล็ก พบว่า ในสารละลายมีไอออนของ  $Fe^{II}$  อยู่ โดยมีค่าการปล่อยแสงที่ 259.941 และ 425.079 นาโนเมตร [32] ทั้งนี้ ยังพบไอออนของธาตุอื่นๆ ที่เป็นสิ่งเจือปนมาในสารละลายนี้คือ H 434 นาโนเมตร  $H\beta$  486.1 นาโนเมตร [15] Ca 393.366 นาโนเมตร [33]  $Br^{II}$  523.823 นาโนเมตร [32] และ Yttrium 371.025 นาโนเมตร [33] ดังนั้น จากผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค OES สามารถสรุปได้ว่า พลาสมามีคุณสมบัติในการทำให้อะตอมของธาตุหลุดออกจากขั้วอิเล็กโทรด และอะตอมของธาตุโลหะเหล่านี้ถูกเปลี่ยนเป็นไอออนที่มีความสามารถในการตัดสายโซ่ของโคลิตซานเพื่อให้ได้โคลิตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลอื่นๆ ที่ได้จากการตรวจสอบคุณสมบัติของโคลิตซาน และจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพด้วยสายตาพบว่า โคลิตซานหลังผ่านการทรีตด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างชนิด จะให้สีแตกต่างกัน โดยการทรีตด้วยขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนให้สีเหลือง การทรีตด้วยขั้วอิเล็กโทรดทองแดงให้สีเขียว และการทรีตด้วยขั้วอิเล็กโทรดเหล็กให้สีน้ำตาล และเมื่อทรีตด้วยขั้วอิเล็กโทรดเหล็กที่ความถี่สูงขึ้นพบว่า สารละลายโคลิตซานมีสีเข้มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของไฮดรอกซิลเรดิคัล และไอออนของเหล็ก อย่างไรก็ตาม การตรวจวัดปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลและไอออนที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องนำเทคนิคอื่นมาตรวจวัดเพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้น

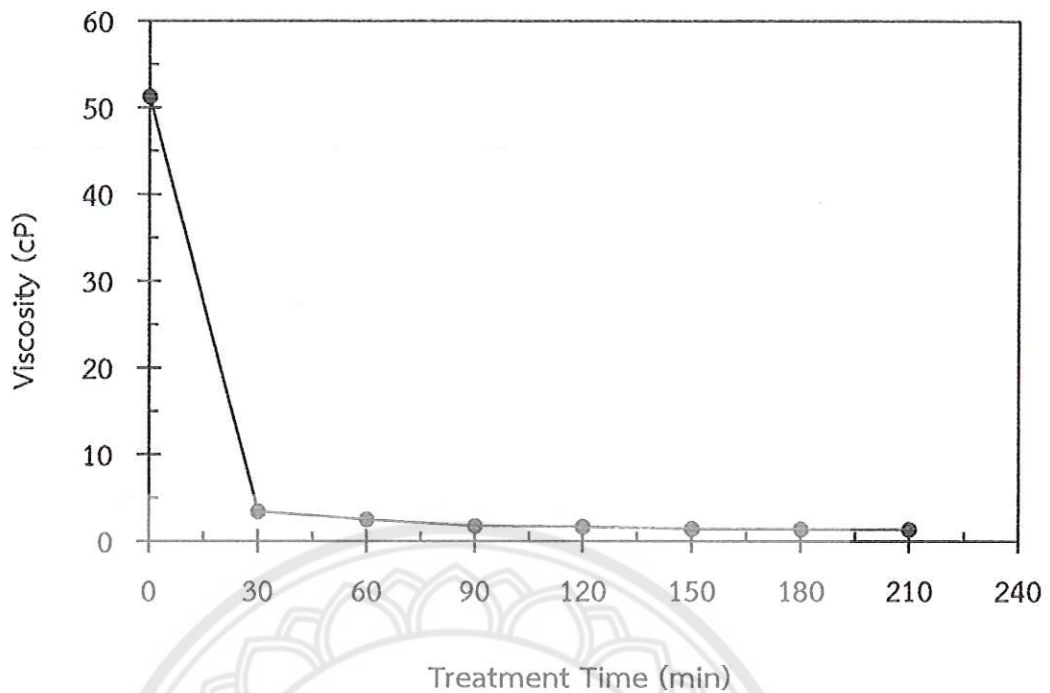
#### 4.2 ผลของพลาสมาวิฤภาคของเหลวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของโคลิตซาน

จากรูปที่ 4.3 แสดงถึงความหนืดของสารละลายโคลิตซานที่ผ่านการทรีตด้วยกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลว พบว่า ความหนืดของสารละลายโคลิตซานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความหนืดของโคลิตซานที่ผ่านการทรีตด้วยขั้วอิเล็กโทรดเหล็ก หลังจากการทรีตด้วยพลาสมาเป็นเวลา 30 นาที ความหนืดของโคลิตซานลดลงอย่างรวดเร็ว โดยค่าความหนืดลดลงจาก 51.30 เซนติพอยท์ (cP) เป็น 3.44 เซนติพอยท์ (cP) และที่เวลาหลังจาก 30 นาที ถึง 210 นาที พบว่า ความหนืดของโคลิตซานมีแนวโน้มลดลงและเริ่มคงที่ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ความหนืดของโคลิตซานลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามเวลาในการทรีตที่เพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า พลาสมาวิฤภาคของเหลวส่งผลให้เกิดการย่อยสลายของ

ไคโตซาน นั้นคือ ไคโตซานถูกย่อยสลายจากการทรีทด้วยพลาสมาซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเกิดขึ้นภายในระบบ โดยผลที่ได้รับสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ Prasertsung I. และคณะ ดังแสดงในสมการ (4.1) และรูป 4.2 ซึ่งแสดงกลไกการย่อยสลายไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว โดยพลาสมาทำให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งเป็นปัจจัยในการลดน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานหลังผ่านการทรีทแล้ว โดยไคโตซานถูกย่อยสลายด้วยไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นเรดิคัลอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทรีทด้วยพลาสมา และทำลายพันธะไกลโคซิดิกของไคโตซาน ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาดทำให้ไคโตซานมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง [15, 16]



รูปที่ 4.2 แสดงกลไกการย่อยสลายไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว [15]

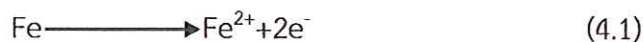


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของไคโตซานกับเวลาที่ใช้ในการทรีทสารละลายไคโตซานจากการทรีทด้วยเครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลวโดยใช้ข้อั้วอิเล็กโทรดเหล็ก

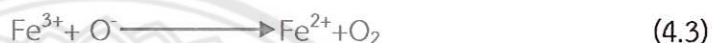
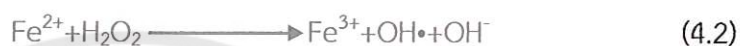
#### 4.3 ผลของชนิดข้อั้วอิเล็กโทรด และความถี่ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน

จากตาราง 4.1 แสดงถึงน้ำหนักโมเลกุล และค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลไคโตซานหลังผ่านกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว จากผลการทดลองพบว่า น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานก่อนการทรีทมีค่า  $1.3 \times 10^5$  ดาลตัน ซึ่งหลังจากผ่านการทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้ข้อั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนเป็นเวล 210 นาที พบว่า น้ำหนักโมเลกุลลดลงเหลือ  $3.1 \times 10^4$  ดาลตัน ซึ่งจากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไคโตซานถูกย่อยสลายโดยไฮดรอกซิลซึ่งเป็นเรดิคอลลิสระที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทรีทด้วยพลาสมา [15-16] เมื่อใช้ข้อั้วอิเล็กโทรดทองแดงและเหล็กพบว่า ข้อั้วอิเล็กโทรดทั้งสองส่งเสริมการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลไคโตซานอย่างมาก ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลไคโตซานที่ทรีทด้วยข้อั้วอิเล็กโทรดทองแดงมีค่า  $2.4 \times 10^4$  ดาลตัน และน้ำหนักโมเลกุลไคโตซานที่ทรีทด้วยข้อั้วอิเล็กโทรดเหล็กมีค่า  $1.3 \times 10^4$  ดาลตัน จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า การทรีทสารละลายไคโตซานโดยใช้ข้อั้วอิเล็กโทรดเหล็กสามารถลดน้ำหนักโมเลกุลไคโตซานได้ดีกว่าการทรีทโดยใช้ข้อั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนและทองแดง และถือได้ว่าเป็นไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำ [38] ทั้งนี้ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานมาจากอนุภาคหรือไอออนของเหล็กที่เกิดขึ้นจากการทำลายข้อั้วอิเล็กโทรดเหล็กด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสระหว่างการทรีทด้วยพลาสมา

ซึ่งอนุภาคหรือไอออนเหล่านี้สามารถเกิดเป็นเฟอร์รัสไอออนได้จากกระบวนการออกซิเดชันที่ขั้วอิเล็กโทรดระหว่างกระบวนการทรีตด้วยพลาสมา ดังแสดงในสมการ (4.1) [39]



จากรายงานการศึกษาของ Chang, K.L.B. และคณะชี้ให้เห็นว่า เฟอร์รัสไอออนมีส่วนช่วยเสริมในปฏิกิริยาเฟนตอนซึ่งเป็นปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลในปริมาณที่สูงดังแสดงในสมการ (4.2) และ สมการ (4.3) [12]



ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยปฏิกิริยาเฟนตอนเป็นปัจจัยในการลดน้ำหนักโมเลกุลของโคโตซานหลังผ่านการทรีตแล้ว นอกจากนี้ อนุภาคเหล็กที่เกิดขึ้นจะเกิดการรวมตัวกับโคโตซานอยู่ในรูปโคโตซานโลหะเชิงซ้อนจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ OH และ NH<sub>2</sub> ในโครงสร้างโคโตซานนำไปสู่การย่อยสลายโคโตซาน เพราะสามารถทำลายโคโตซานโลหะเชิงซ้อนได้ง่ายกว่าตัวโคโตซานเอง [36]

จากตาราง 4.1 เมื่อพิจารณาผลของความถี่พลาสมาที่ส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลโคโตซาน พบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ของพลาสมาที่ใช้ในการทรีตจะส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของโคโตซานลดลง ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลของโคโตซานที่ความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่า  $1.3 \times 10^4$  ดาลตัน  $9.2 \times 10^3$  ดาลตัน และ  $6.8 \times 10^3$  ดาลตัน ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่า การเพิ่มความถี่พลาสมาจะเป็นการเพิ่มเรดิคอลลอิสระ และทำให้น้ำหนักโมเลกุลของโคโตซานลดลง ซึ่งมีรายงานในการศึกษาของ Kung J. และคณะ [21] โดยมีผลทำให้อัตราการย่อยสลายโคโตซานสูงตามไปด้วย

ตาราง 4.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ( $M_w$ ) และค่าการกระจายตัว (PDI) ของน้ำหนักโมเลกุลของโคโตซานตัวอย่างภายใต้สภาวะการย่อยสลายด้วยเทคนิค พลาสมาวิทยุภาคของเหลวในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.5% โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวอิเล็กโทรดชนิดต่างๆ และความถี่ของ พลาสมา 15-30 กิโลเฮิร์ตซ์

| เวลาในการ<br>เกิดปฏิกิริยา<br>(นาที) | น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (ค่าเริ่มต้น) / ค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล | น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (ค่าเริ่มต้น) / ค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล | น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (ค่าเริ่มต้น) / ค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล | น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (ค่าเริ่มต้น) / ค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล |
|--------------------------------------|---|---|---|---|
|                                      | ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด (ความถี่ของพลาสมา)                              | ทองแดง (15 กิโลเฮิร์ตซ์)  | เหล็ก (15 กิโลเฮิร์ตซ์)   | เหล็ก (22.5 กิโลเฮิร์ตซ์)   |
|                                      | ทั้งหมด (15 กิโลเฮิร์ตซ์)   | ทั้งหมด (15 กิโลเฮิร์ตซ์)   | ทั้งหมด (15 กิโลเฮิร์ตซ์)   | ทั้งหมด (30 กิโลเฮิร์ตซ์)   |
| 0                                    | $1.3 \times 10^5$ <sup>a</sup> (3.5) <sup>b</sup>                     | $1.3 \times 10^5$ (3.5)   | $1.3 \times 10^5$ (3.5)   | $1.3 \times 10^5$ (3.5)   |
| 60                                   | $8.7 \times 10^4$ (2.9)   | $6.2 \times 10^4$ (3.0)   | $4.1 \times 10^4$ (2.8)   | $3.0 \times 10^4$ (3.5)   |
| 120                                  | $6.4 \times 10^4$ (2.9)   | $4.3 \times 10^4$ (2.8)   | $2.0 \times 10^4$ (2.5)   | $1.5 \times 10^4$ (3.2)   |
| 210                                  | $3.1 \times 10^4$ (2.7)   | $2.4 \times 10^4$ (2.5)   | $1.3 \times 10^4$ (2.3)   | $9.2 \times 10^3$ (2.8)   |

<sup>a</sup> รายงานค่าเป็นน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของโคโตซานตัวอย่าง

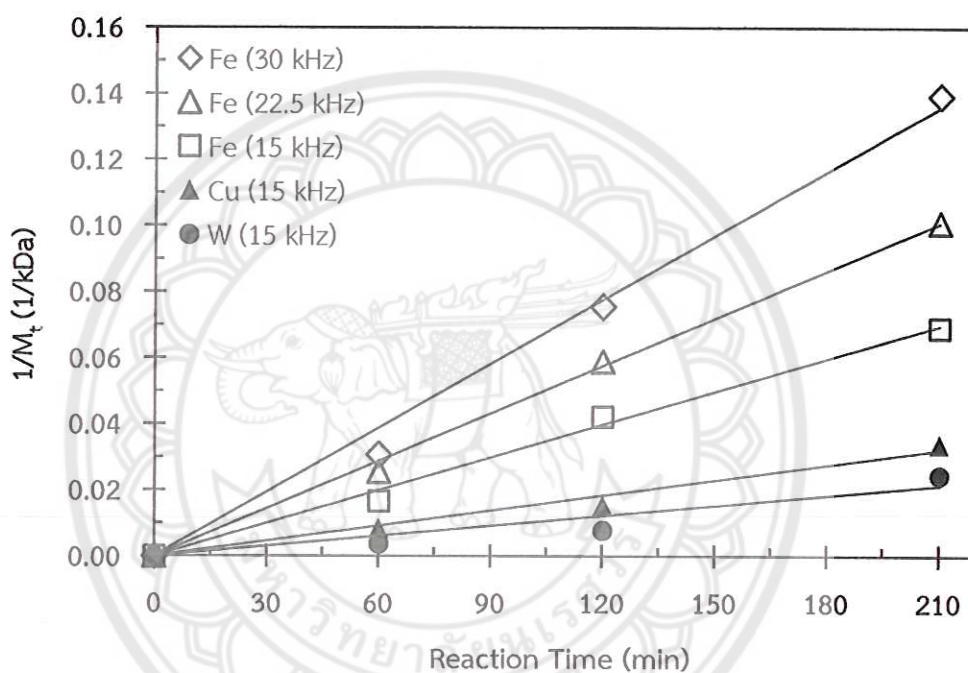
<sup>b</sup> รายงานค่าเป็นค่าการกระจายตัวของโคโตซานตัวอย่าง

#### 4.4 ผลของจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายไคโตซาน

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของ Chang K.L.B. และคณะ ได้อธิบายสมการเกี่ยวกับการหาอันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซาน โดยจากสมการ (2.22) สามารถนำผลของน้ำหนักโมเลกุลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยากับส่วนกลับของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย โดยเส้นกราฟที่เกิดขึ้นแสดงเป็นเส้นตรงและมีความชัน ซึ่งความเป็นเส้นตรงของกราฟนั้นแสดงถึงอันดับการเกิดปฏิกิริยาของการย่อยสลายไคโตซานที่เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order) และความชันของกราฟที่ได้จะบอกถึงค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซาน ( $k$ ) ซึ่งในการศึกษาปัจจุบันนี้ ได้แสดงผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายไคโตซานดังรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงอันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานหลังผ่านการทรีตด้วยพลาสมาเป็นเวลา 0-210 นาที พบว่า ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานเมื่อใช้ซัลโฟลิกโทรดทั้งสแตนมีค่า  $3.77 \times 10^{-2}$  ต่อนาที และเมื่อใช้ซัลโฟลิกโทรดทองแดงและเหล็กมีค่า  $5.66 \times 10^{-2}$  ต่อนาที และ  $1.22 \times 10^{-1}$  ต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าไคโตซานที่ผ่านการทรีตโดยใช้ซัลโฟลิกโทรดทองแดงและเหล็กมีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายมากกว่าการใช้ซัลโฟลิกโทรดทั้งสแตน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ Pornsunthorntawe O. และคณะได้แสดงให้เห็นว่า การใช้โลหะไอออน  $\text{Cu}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{2+}$  เติมในสารละลายไคโตซานส่งผลต่อค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานอย่างมาก [36] เมื่อพิจารณาผลความถี่พลาสมาที่ส่งผลต่อค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซาน พบว่า เมื่อเพิ่มความถี่พลาสมาส่งผลค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานเป็น  $1.77 \times 10^{-1}$  ต่อนาที และ  $2.39 \times 10^{-1}$  ต่อนาที ตามลำดับ โดยผลของค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานแสดงในตาราง 4.2 กับค่า  $R^2$  ที่แสดงความเป็นเส้นตรงของกราฟ ซึ่งถ้าค่า  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 1 มาก แสดงว่า กราฟมีความเป็นเส้นตรงสูงและชี้ให้เห็นว่า อันดับการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการที่เลือกใช้คือ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เมื่อพิจารณาจากลำดับการย่อยสลายพบว่า ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานโดยใช้ซัลโฟลิกโทรดเหล็กที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่การย่อยสลายไคโตซานโดยใช้ซัลโฟลิกโทรดเหล็กที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีค่ามากกว่าการใช้ซัลโฟลิกโทรดเหล็กที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่ามากกว่าการใช้ซัลโฟลิกโทรดทองแดงที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีค่ามากกว่าการใช้ซัลโฟลิกโทรดทั้งสแตนที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์มาก ทั้งนี้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของไคโตซานจะเห็นได้ว่า เส้นกราฟที่แสดงในรูป 4.4 เป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีความสอดคล้องกับสมการ (2.22) ที่เป็นสมการในการพิจารณาอันดับการเกิดปฏิกิริยาที่หนึ่ง ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า การศึกษาจลนพลศาสตร์และค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซาน มีอันดับการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และการใช้ซัลโฟลิกโทรดเหล็กในการทรีตด้วยพลาสมาที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ให้ผลของค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานสูงที่สุด ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การทรีตด้วยพลาสมาโดยใช้ซัลโฟลิกโทรดเหล็กที่ความถี่พลาสมาสูงจะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายไคโตซานดีที่สุด และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานกับงานวิจัยที่



ผ่านมาโดยการใช้เทคนิคอื่นๆ พบว่า เทคนิคการใช้เอนไซม์และการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานเท่ากับ  $10^{-5} - 10^{-4}$  ต่อนาที [12, 37] ส่วนการใช้กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวโดยการเติมไอออนของเหล็กลงไปในสารละลายไคโตซานแล้วทำการทรีทด้วยพลาสมาที่มีความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานเท่ากับ  $8.83 \times 10^{-2}$  ต่อนาที [36] และในการศึกษาปัจจุบัน ได้ทำการย่อยสลายสารละลายไคโตซานโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเหล็กที่มีความถี่พลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานเท่ากับ  $2.39 \times 10^{-1}$  ต่อนาที ซึ่งให้ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายไคโตซานสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ดังตาราง 4.3



รูปที่ 4.4 อัตราการย่อยสลายไคโตซาน จากการทรีทด้วยเครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตน ทองแดง และเหล็ก ที่ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และขั้วอิเล็กโทรดเหล็กที่มีความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์

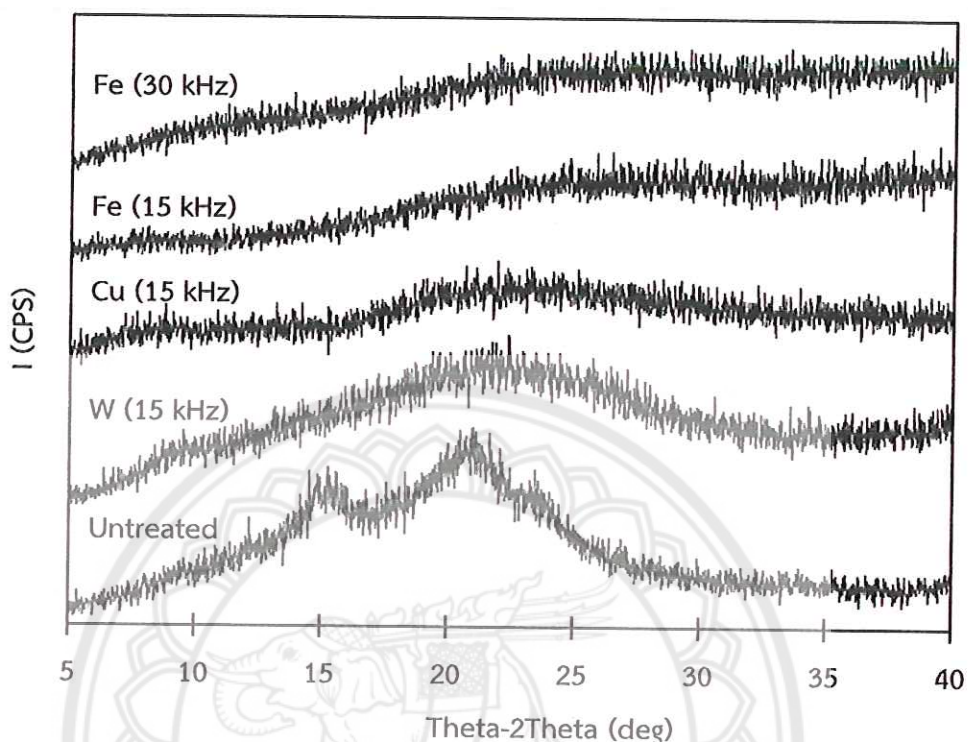
ตาราง 4.2 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายโคโคซานและค่า R<sup>2</sup>

| ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด/<br>ความถี่พลาสมา (กิโลเฮิร์ตซ์) | ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายของ<br>โคโคซาน (min <sup>-1</sup> ) | ค่า R <sup>2</sup> จากกราฟ<br>(รูปที่ 4.4) |
|--|---|--|
| ทั้งสแตน / 15  | $3.77 \times 10^{-2}$                                       | 0.9038                                     |
| ทองแดง / 15  | $5.66 \times 10^{-2}$                                       | 0.9812                                     |
| เหล็ก / 15   | $1.22 \times 10^{-1}$                                       | 0.9939                                     |
| เหล็ก / 22.5   | $1.77 \times 10^{-1}$                                       | 0.9979                                     |
| เหล็ก / 30   | $2.39 \times 10^{-1}$                                       | 0.9926                                     |

ตาราง 4.3 ผลของค่าคงที่อัตราการย่อยสลายของโคโคซานเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                      | เทคนิคที่ใช้   | ค่าคงที่อัตราการย่อย<br>สลายของโคโคซาน<br>(min <sup>-1</sup> ) |
|--|--|--|
| A.V. Ilyina, et al.<br>(2000) [37]         | การใช้เอนไซม์  | $10^{-5} - 10^{-4}$  |
| K.L.B. Chang, et al.<br>(2001) [12]        | การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์   | $10^{-5} - 10^{-4}$  |
| O. Pornsunthorntawe, et al.<br>(2014) [39] | กระบวนการพลาสมา<br>วิทยาศาสตร์ของเหลว<br>(เติมไอออนของเหล็ก<br>ความถี่พลาสมา 15 kHz)   | $8.83 \times 10^{-2}$  |
| การศึกษาปัจจุบัน                           | กระบวนการพลาสมา<br>วิทยาศาสตร์ของเหลว<br>(ขั้วอิเล็กโทรดเหล็ก<br>ความถี่พลาสมา 30 kHz) | $2.39 \times 10^{-1}$  |

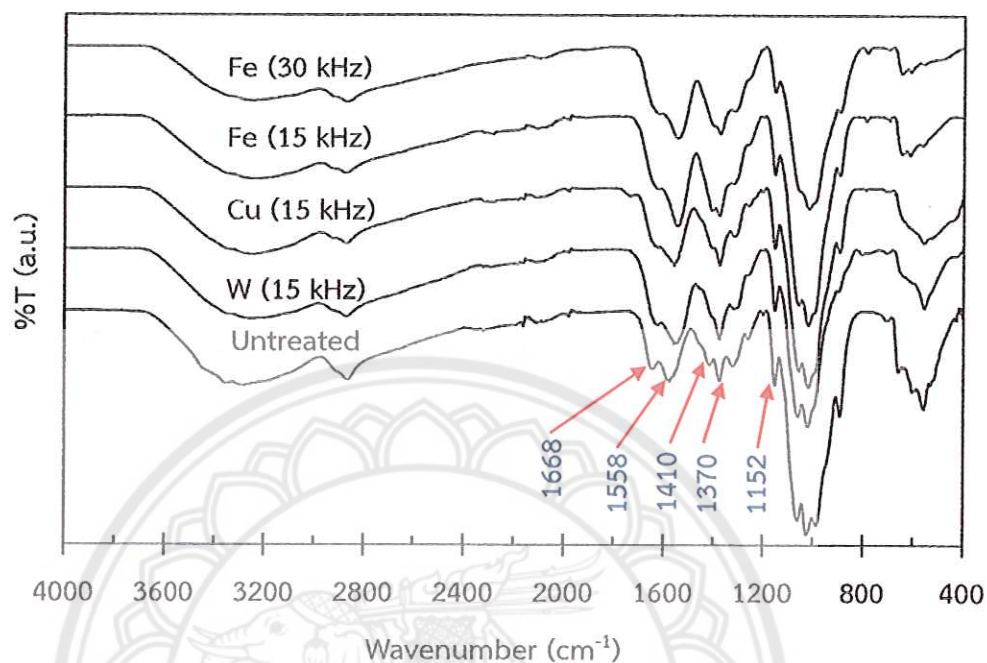
#### 4.5 ผลของพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างความเป็นผลึกของไคโตซาน



รูปที่ 4.5 แสดงผลของโครงสร้างความเป็นผลึกของไคโตซานที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ไคโตซานที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทรีตด้วยพลาสมาจะแสดงพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 15.1 และ 21.4 องศา ซึ่งพีคดังกล่าวแสดงความเป็นผลึกของไคโตซาน และหลังจากการทรีตด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนเป็นเวลายาว 210 นาที พบว่า พีคที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 15.1 และ 21.4 องศา มีลักษณะเรียบขึ้น ซึ่งให้เห็นว่า การทรีตด้วยพลาสมาสามารถทำลายโครงสร้างความเป็นผลึกของไคโตซานได้ เมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดทองแดง พบว่า พีคที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 15.1 และ 21.4 องศา โครงสร้างของไคโตซานยังคงถูกทำลายเช่นเดิม และเมื่อนำไคโตซานผ่านการทรีตด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเหล็ก ที่ความถี่พลาสมา 15 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่า พีคที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 15.1 และ 21.4 องศา พีคเรียบขึ้นและลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจากผลนี้สามารถบอกได้ว่า การทรีตด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเหล็กส่งผลกระทบต่อโครงสร้างความเป็นผลึกของไคโตซานมากกว่าขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนและทองแดง ซึ่งสอดคล้องกับผลของอัตราการย่อยสลายไคโตซาน (รูปที่ 4.4)

#### 4.6 ผลของพลาสมาวิฤภาคของเหลวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของไคโตซาน



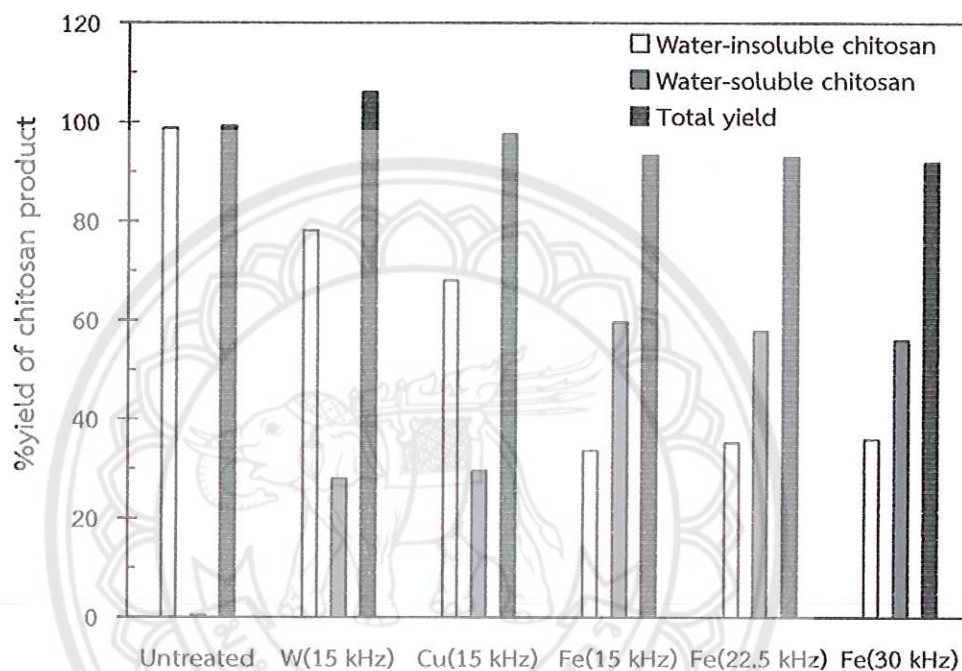
รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของไคโตซานก่อนและหลังการทรีตด้วยกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลวตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR

จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างทางเคมีของไคโตซานก่อนการทรีต และไคโตซานหลังการทรีตที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตน ทองแดง เหล็ก และไคโตซานหลังการทรีตด้วยขั้วอิเล็กโทรดเหล็ก ที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยใช้กระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลว ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่า แผ่นฟิล์มของไคโตซานก่อนการทรีตด้วยพลาสมาวิฤภาคของเหลวนั้นแสดงพีคที่ตำแหน่ง 1668 ต่อเซนติเมตร 1558 ต่อเซนติเมตร และ 1152 ต่อเซนติเมตร โดยเป็นพันธะแบบยีสต์ (C=O) พันธะแบบงอ (-NH<sub>2</sub>) และพันธะการเชื่อมโยงไกลโคซิดิก (-C-O-C-) ระหว่างมอนอเมอร์ของไคโตซาน ซึ่งบ่งบอกถึงองค์ประกอบโครงสร้างของไคโตซาน เมื่อผ่านการทรีตด้วยกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลวโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดต่างๆ พบว่า พีคที่ได้ส่วนใหญ่ นั้นมีลักษณะเหมือนกับพีคของไคโตซานก่อนการทรีตด้วยพลาสมา แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ของไคโตซานยังคงอยู่

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า การย่อยสลายไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลว โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ ส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานเพียงอย่างเดียว แต่ไม่ส่งผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของไคโตซานเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของไคโตซานก่อนการ

ทรีทและหลังการทรีทมีค่าแตกต่างกันในช่วงคลื่น 1600 ถึง 1300 ต่อเซนติเมตร คือ จุดยอดที่ช่วงคลื่น 1410 ต่อเซนติเมตร และที่ช่วงคลื่น 1370 ต่อเซนติเมตร ซึ่งให้เห็นว่า พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลและพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของไคโตซานหลังผ่านการทรีทด้วยกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเลเซอร์ทำให้ลดลง และมีความเป็นผลึกลดลงด้วย

#### 4.7 ผลการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ไคโตซานที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ



รูปที่ 4.7 ร้อยละผลผลิตของไคโตซานที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำและผลรวมของร้อยละผลผลิตของไคโตซาน

จากรูปที่ 4.7 พบว่า ร้อยละผลผลิตของไคโตซานที่ละลายน้ำ ซึ่งผ่านการทรีทโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสและทองแดง มีค่าร้อยละ 26 และ 30 ตามลำดับ และพบว่า การทรีทโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเหล็กให้ร้อยละผลผลิตของไคโตซานที่ละลายน้ำสูงสุด คือ ร้อยละ 60 ซึ่งผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า กระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเลเซอร์สามารถเพิ่มร้อยละผลผลิตของไคโตซานที่ละลายน้ำได้ แต่อย่างไรก็ตาม สารละลายไคโตซานหลังผ่านการทรีทแล้วยังมีส่วนที่ไม่ละลายน้ำอยู่ ทั้งนี้ เพราะการตัดสายโซ่โมเลกุลไคโตซานที่ไม่สม่ำเสมอและไม่เฉพาะเจาะจง โดยพิจารณาจากค่าการกระจายตัวของไคโตซาน (ตารางที่ 4.1) พบว่า การทรีทโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลส ทองแดง และเหล็ก มีค่าการกระจายตัวของไคโตซานเป็น 2.7 2.5 และ 2.3 ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ไคโตซาน

น้ำหนักโมเลกุลต่ำมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากค่าการกระจายตัวที่ดีต้องมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มความถี่พลาสมาในการทรีท พบว่า การเพิ่มความถี่พลาสมานั้นไม่ส่งผลต่อร้อยละผลผลิตของไคโตซานที่ละลายน้ำ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มความถี่พลาสมาส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายของไคโตซานแต่ไม่ส่งผลต่อร้อยละผลผลิตของไคโตซาน



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษานี้ เป็นการนำสารละลายเบตาโคโตซานมาทรีทด้วยระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลว พบว่า น้ำหนักโมเลกุลของโคโตซานลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการทรีท เมื่อเปรียบเทียบกับโคโตซานที่ไม่ผ่านการทรีท และพบว่า ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดและความถี่พลาสมาส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายโคโตซานเป็นอย่างมาก โดยขั้วอิเล็กโทรดเหล็กกับความถี่พลาสมาสูงช่วยส่งเสริมอัตราการย่อยสลายของโคโตซาน โดยกระบวนการย่อยสลายของโคโตซานด้วยระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลวนี้มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างความเป็นผลึก แต่ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมีของโคโตซาน นอกจากนี้ ยังพบว่า การย่อยสลายโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเหล็กให้ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์โคโตซานที่ละลายน้ำได้สูงที่สุด เมื่อเทียบกับการทรีทด้วยขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสและทองแดง สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์มีอันดับการเกิดปฏิกิริยาเป็นอันดับที่หนึ่ง และการทรีทโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเหล็กที่ความถี่พลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ส่งผลให้มีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายโคโตซานสูงที่สุดคือ  $2.39 \times 10^{-1}$  ต่อนาที ดังนั้น ผลที่ได้นี้ชี้ให้เห็นว่า การใช้ขั้วอิเล็กโทรดเหล็กที่ความถี่พลาสมาสูง เหมาะสำหรับการย่อยสลายของโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาการย่อยสลายโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว ถึงแม้ว่าโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่เตรียมได้มีความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 50 โดยใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายสั้น แต่อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งต่อไปควรเพิ่มเติมการวิเคราะห์ต้นทุนที่ใช้ในการเตรียมโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีความสามารถในการละลายน้ำสูง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Shahidi F., Arachchi J.K.V., Jeon Y.J., Food applications of chitin and chitosans. *Trends. Food. Sci. Technol.* 1990; 10(2):37-51.
- [2] Kumar M.N.V.R., A review of chitin and chitosan applications. *React. Funct. Polym.* 2000; 46(1):1-27.
- [3] Dodane V., Vilivalam V.D., Pharmaceutical applications of chitosan. *Pharm. Sci. Technol. Today* 1998; 1(6):246-253.
- [4] Li J., Du Y., Yang J., Feng T., Li A., Chen P., Preparation and characterization of low molecular weight chitosan and chito-oligomers by a commercial enzyme. *Polym. Degrad. Stabil.* 2005; 87:441-448.
- [5] Tangsadthakun C., Kanokpanont S., Sanchavanakit N., Pichyangkura R., Banaprasert T., Tabata Y., Damrongsakkul S., The influence of molecular weight of chitosan on the physical and biological properties of collagen/chitosan scaffolds. *J. Biomat. Sci-Polym E.* 2008; 15:147-163.
- [6] Richardson S.C.W., Kolbe H.V.J., Duncan R., Potentials of low molecular mass chitosan as a DNA delivery system. biocompatibility, body distribution and ability to complex and protect DNA. *Int. J. Pharm.* 1999; 178:231-243.
- [7] Kondo Y., Nakatani A., Hayashi K., Ito M., Low molecular weight chitosan prevents the progression of low dose streptozotocin induced slowly progressive diabetes mellitus in mice. *Biol. Pharm. Bull.* 2000; 23(12):1458-1464.
- [8] Wenshui X., Ping L., Jiali Z., Jie C., Biological activities of chitosan and chitooligosaccharides. *Food Hydrocolloids.* 2011; in press.
- [9] Ratanavaraporn J., Kanokpanont S., Tabata Y., Damrongsakkul S., Growth and osteogenic differentiation of adipose-derived and bone marrow-derived stem cells on chitosan and chitooligosaccharide films. *Carbohydr. Polym.* 2009; 78:873-878.
- [10] Kittur F.S., Vishu Kumar A.B., Tharanathan R.N., Low molecular weight chitosans-preparation by depolymerization with *Aspergillus niger* pectinase, and characterization. *Carbo. Hydr. Res.* 2003; 338(12):1283-90.
- [11] Xie Y., Hu J., Wei Y., Hong X., Preparation of chitooligosaccharides by the enzymatic hydrolysis of chitosan. *Polym. Degrad. Stabil.* 2009; 94:1895-1899.



- [12] Chang K.L.B., Tai M.C., Cheng F.H., Kinetics and products of the degradation of chitosan by hydrogen peroxide. *J.Agric.Food Chem.* 2001; 49:4845–4851.
- [13] Takai O., Solution plasma processing (SPP). *Pure Appl. Chem.* 2008; 80:2003-2011.
- [14] Baroch P., Anita V., Saito N., Takai O., Bipolar pulsed electrical discharge for decomposition of organic compounds in water. *J. Electrostat.* 2008; 66:294-299.
- [15] Prasertsung I., Damrongsakkul S., Terashima C., Saito N., Takai O., Preparation of low molecular weight chitosan using solution plasma system. *Carbohydrate Polymers.* 2012; 87:2745-2749.
- [16] Prasertsung I., Damrongsakkul S., Saito N., Degradation of  $\beta$ -chitosan by solution plasma process. *Polymer Degradation and Stability* 2013; 98:2089-2093.
- [17] Riaudo M., Chitin and chitosan: Properties and applications. *Prog. Polym. Sci.* 2006; 31:603-632.
- [18] Czechowska-Biskup R., Arosinska D., Rokita B., Ulanski P., Rosiak J.M., Determination of degree of deacetylation of chitosan comparison of methods. *Progress on chemistry and application of chitin and its derivatives* 2012; 72: 5-20.
- [19] Suphavananusorn P., Chitosan coating effects on postharvest quality of tangerine fruit cv. Sai Nam Pung 2005; ISBN 974-9885-77-5.
- [20] Potocký Š., Saito N., Takai O., Needle electrode erosion in water plasma discharge. *Thin Solid Films.* 2009; 518:918–923.
- [21] Kung J., Li O.L., Saito N., Synthesis of structure-controlled carbon nano spheres by solution plasma process. *Carbon* 2013; 60:292-298.
- [22] Reha K.T., Tracey J., Romon M.B., Atomic emission of anhydrous hydrogen bromide: spectra from 200 to 900 nm by sealed inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B* 1997; 52:2103-2113.
- [23] Eduardo S.C., Margaretha T.C. de Loos-Vollebregt, Adilson J.C., Frank V., Determination of trace elements in biodiesel and vegetable oil by inductively coupled plasma optical emission spectrometry following alcohol dilution. *Spectrochimica Acta Part B* 2011; 66: 733-739.
- [24] Bing S., Masayuki S., Sid J.C., Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water. *Journal of Electrostatics* 1997; 39: 189-202.
- [25] รศ.ดร.จตุพร วุฒิภักกกาญจน์ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. เอกสารประกอบการสอนวิชา MTT656 Polymer Characterization and Analysis.

- [26] Morris G.A., Castile J., Smith A., Adams G.G., Harding S.E., Macromolecular conformation of chitosan in dilute solution: a new global hydrodynamic approach. *Carbohydrate Polymers* 2009; 76:616–21.
- [27] Pasch H., Trathnigg B., *HPLC of Polymers*. Springer 1999: p 15.
- [28] [www.mfu.ac.th](http://www.mfu.ac.th), 2015
- [29] [www.sec.psu.ac.th](http://www.sec.psu.ac.th), 2015
- [30] Huang Q.Z., Wang S.M., Huang J.F., Zhuo L.H., Guo Y.C., Study on the heterogeneous degradation of chitosan with hydrogen peroxide under the catalysis of phosphotungstic acid. *Carbohydrate Polymer* 2007; 68:761-765.
- [31] Jayakumar R., New N., Tokura S., Tamura H., Sulfated chitin and chitosan as novel biomaterials 2007; 40:175-181.
- [32] Morris G.A., Castile J., Smith A., Adams G.G., Harding S.E., The kinetics of chitosan depolymerisation at different temperatures. *Polymer Degradation and Stability* 2009; 98:1344-1348.
- [33] Jayakumar R., Menon D., manzoor K., Nair S.V., Tamura H., Biochemical applications of chitin and chitosan based nanomaterials-A short review. *Carbohydrate Polymers* 2010; 82:227-232.
- [34] Wu S., Preparation of water soluble chitosan by hydrolysis with commercial  $\alpha$ -amylase containing chitosanase activity. *Food Chemistry* 2011; 128:769-772.
- [35] Xai Z., Wu S., Chen J., Preparation of water soluble chitosan hydrolysis using hydrogen peroxide. *International of Biological Macromolecules* 2013; 59:242-245.
- [36] Pomsunthorntawee O., Katepetch C., Vanichvattanadecha C., Saito N., Rujiravanit R., Depolymerization of chitosan-metal complexes via solution plasma technique. *Carbohydrate polymers* 2014; 102:504-512.
- [37] Ilyina A.V., Tikhonov V.E., Albulov A.I., and Varlamov V.P., Enzymic preparation of acid-free-water-soluble chitosan. *Process Biochem.* 2000; 35: 563-568
- [38] Harish Prashanth K.V., and Tharanathan R.N., Chitin/Chitosan: Modifications and their unlimited application potential-An overview. *Trens. Food Sci. Tech.* 2007; 18: 117-131
- [39] Sarahney H., Mao X., and Alshwabkeha A.N., Role of iron anode oxidation on transformation of chromium by Electrolysis. *Electrochim Acta.* 2012; 86: 96-101

# ภาคผนวก



### ตัวอย่างการคำนวณ

อัตราการย่อยสลายโคโคซานเมื่อพรีทด้วยซั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตน ความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่เวลา 210 นาที

จากสมการ 
$$\frac{1}{M_t} = \frac{1}{M_0} + \frac{kt}{M} = \frac{1}{M_0} + k't$$

เมื่อ ค่า  $M_0 = 1.3 \times 10^5$  ดาลตัน

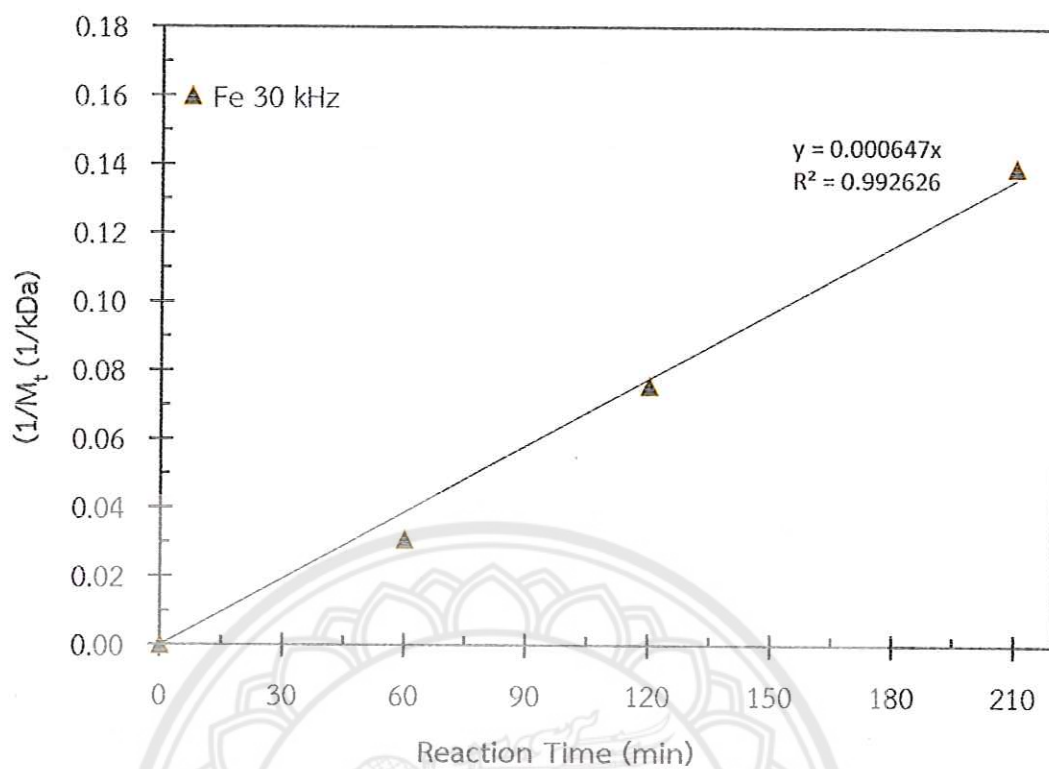
ค่า  $M = 370$  ดาลตัน

ค่า  $M_t = 6.8 \times 10^3$  ดาลตัน (จากตาราง 4.1)

หาค่า  $k'$  โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{M_t}$  กับ  $\frac{1}{M_0} + k't$

ดังแสดงต่อไปนี้

| t   | $M_0$  | $1/M_0$     | Fe 30 kHz |             |
|-----|--------|-------------|-----------|-------------|
|     |        |             | $M_t$     | $1/M_t$     |
| 0   | 130000 | 0.007692308 | 130000    | 0.000000000 |
| 60  | 130000 | 0.007692308 | 26000     | 0.030769231 |
| 120 | 130000 | 0.007692308 | 12000     | 0.075641026 |
| 210 | 130000 | 0.007692308 | 6800      | 0.139366516 |



รูป ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{M_t}$  กับ  $\frac{1}{M_0} + k't$

จากกราฟเราจะได้ค่าความชัน เท่ากับ 0.000647 ซึ่งคือค่า  $k'$

ดังนั้นค่า  $k' = 0.000647 \text{ mol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$

จากนั้นนำค่า  $k'$  ไปคำนวณค่า  $k$

จากสมการ

$$\frac{1}{M_0} + \frac{kt}{M} = \frac{1}{M_0} + k't$$

ดังนั้น

$$\frac{1}{1.3 \times 10^5} + \frac{k(210)}{370} = \frac{1}{1.3 \times 10^5} + (0.000647)(210)$$

$$k = 0.23939 \text{ min}^{-1}$$

## ประวัติผู้จัดทำโครงการ



ชื่อ : นางสาวทิมมพร ตันติพลาผล  
 ภูมิลำเนา : 297/30 ซ. 3 ถ. มิตรภาพ ต. ในเมือง  
 อ. เมือง จ. พิชณุโลก

ประวัติการศึกษา :

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน เฉลิมขวัญสตรี จ. พิชณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : phan\_slot9821@hotmail.com



ชื่อ : นางสาวนิตารัตน์ ณรงค์ศิลป์  
 ภูมิลำเนา : 22 หมู่ 9 ต. ทนองหลวง อ. ลานกระบือ  
 จ. กำแพงเพชร

ประวัติการศึกษา :

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสากเหล็กวิทยา จ. พิจิตร
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : tor\_ha0.0@hotmail.com



ชื่อ : นายยุทธนา สิงห์สวัสดิ์  
 ภูมิลำเนา : 107 หมู่ 6 ต. ท้อแท้ อ. วัดโบสถ์  
 จ. พิชณุโลก

ประวัติการศึกษา :

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัดโบสถ์ศึกษา จ. พิชณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : nidrogenz@gmail.com