

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมาก เป็น superabsorbent ที่ได้จากธรรมชาติหรือการสังเคราะห์ ไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้จากการเชื่อมโยงสายโซ่มอเลกุลขนาดใหญ่ที่สามารถบวมตัวในน้ำได้ดีหรือมอนอเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ ความสามารถในการดูดซับน้ำหรือบวมตัวของไฮโดรเจลเนื่องมาจากความยืดหยุ่น หมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เช่น $-OH$, $-COOH$, $-NH_2$ เป็นต้น รวมถึงปริมาตรอิสระของสายโซ่มอเลกุล ไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากการสังเคราะห์ พอลิเมอร์อาทิ พอลิเมทาคริเลต พอลิอะคริเลต พอลิอะคริลาไมด์ รวมถึงพอลิเมอร์ร่วมด้วย เช่น พอลิเมอร์ร่วมระหว่างอะคริลาไมด์กับกรดอะคริลิก [1] เป็นต้น ไฮโดรเจลสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ในทางการแพทย์ นำไปใช้ทำวัสดุปิดแผล ใช้ในการทำศัลยกรรม รวมทั้งใช้บรรจุยาให้มีการปลดปล่อยได้ตามที่ต้องการ หรือในการเกษตรที่ใช้โรยในดินเพื่อเพิ่มความชุ่มชื้น ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ในผ้าอ้อมเด็กแบบใช้แล้วทิ้ง คอนแทคเลนส์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้งานเฉพาะทางด้าน การต้านเชื้อแบคทีเรียได้ [2] เช่น การใช้เป็นเจลต้านเชื้อแบคทีเรียเพื่อป้องกันการเน่าเสียหรือรักษา สภาพของไฮโดรเจลไว้ ดังนั้นไฮโดรเจลที่ใช้จึงต้องมีการเติมสารที่ช่วยยับยั้งแบคทีเรีย เช่น ซิลเวอร์ลง ไปเพื่อเพิ่มสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรีย [3] ไฮโดรเจลที่ได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์นั้นมีสมบัติในการดูดซับน้ำที่ดีเยี่ยม แต่มอนอเมอร์ที่ตกค้างอยู่ในชิ้นงานนั้นเป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็ง การตกค้างของมอนอเมอร์จึงกลายเป็นปัญหาในการนำไปใช้งาน ทำให้การเลือกใช้สารตั้งต้นที่ได้จากธรรมชาติเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะลดปัญหาดังกล่าวได้ และเพื่อเป็นการลดการใช้มอนอเมอร์จึงมีงานวิจัยมากมายที่ใช้สารตั้งต้นที่ได้จากธรรมชาติร่วมกับมอนอเมอร์ที่ได้จากสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ร่วม เช่น พอลิอะคริลิกแอซิดกับกัวร์กัม [4] เป็นต้น ต่อมาจึงมีการศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่มาจากพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมด อาทิ การเตรียมไฮโดรเจลจากกัวร์กัมและโซเดียมอัลจิเนตโดยใช้กลูตา รอลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยง [5] เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการนำพอลิแซคคาไรด์ ได้แก่ โซเดียมอัลจิเนต และ กัวร์กัม มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมไฮโดรเจลเนื่องจาก ไม่เป็นพิษ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หาได้ง่าย ย่อยสลายได้ง่าย และสามารถบวมตัวในน้ำได้ดีเพราะในโครงสร้างมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ คือ $-OH$ ที่มีอยู่ในโครงสร้างของสารตั้งต้นทั้งสองชนิด และ $-COOH$ ที่มีอยู่ในโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนต ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับน้ำของกัวร์กัมไม่มีผลของประจุเข้ามาเกี่ยวข้องจึงช่วยให้การบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์คงรูปอยู่ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิแซคคาไรด์สองชนิดดังกล่าวและมีการเติมซิลเวอร์เข้าไปในโครงสร้าง เนื่องจากซิลเวอร์มีสมบัติในการต้านเชื้อที่ดีและไม่เป็นอันตรายหรือเป็นพิษ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนขององค์ประกอบระหว่างโซเดียมอัลจิเนตต่อกัวร์กัม ปริมาณซิลเวอร์ในโครงสร้างของไฮโดรเจล ความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียของซิลเวอร์ที่อยู่ในไฮโดรเจล เชื้อแบคทีเรียที่ทดสอบ คือ *Bacillus subtilis* และ *Escherichia coli* [3]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบหลักเป็นโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม
2. เพื่อศึกษาปริมาณของซิลเวอร์ที่มีผลต่อสมบัติการต้านเชื้อของไฮโดรเจล
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวเมื่อมีซิลเวอร์อยู่ในไฮโดรเจลโดยใช้ปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตกับกัวร์กัมแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบของโซเดียมอัลจิเนตกับกัวร์กัมแบบเชื่อมโยงขั้นตอนเดียวด้วยโซเดียมเททระบอเรต
2. ตรวจสอบคุณสมบัติของไฮโดรเจลที่เตรียมได้ด้วย TGA, XRD และ XRF
3. ทดสอบสมบัติการฆ่าเชื้อของแบคทีเรียคือ *Bacillus subtilis* และ *Escherichia coli*

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิแซคคาไรด์ได้
2. ได้ไฮโดรเจลที่สามารถควบคุมปริมาณของซิลเวอร์ที่มีผลต่อสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียคือ *Bacillus subtilis* และ *Escherichia coli*
3. ได้ไฮโดรเจลที่มีอายุเวลาดำรงการใช้งานนานขึ้น

บทที่ 2

หลักการ

2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogel)

ไฮโดรเจล (Hydrogel) หรือเรียกกันในชื่ออื่น เช่น Water gel, Water crystal, Gel crystal [6] ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถดูดซับน้ำไว้ภายในโครงสร้างได้จนถึงจุดสมดุลโดยไม่เกิดการละลาย สมบัติเฉพาะของไฮโดรเจล คือ การบวมตัวเมื่ออยู่ในน้ำและหดตัวได้เมื่อไม่มีน้ำซึ่งลักษณะของไฮโดรเจลก่อนการดูดซับน้ำอาจมีลักษณะคล้ายผลึกควอร์ซึ้นเล็กๆ แต่เมื่อดูดซับน้ำแล้วจะบวมตัวอ่อนนุ่มคล้ายเยลลี่ โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) เช่น $-OH$, $-COOH$, $-CONH_2$ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่น $-CH_2-$, $-CH_3$ ในโครงสร้างของไฮโดรเจลมีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะโควาเลนต์ พันธะไฮโดรเจน รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆในสายโซ่ทำให้ไฮโดรเจลสามารถคงรูปอยู่ในสภาพที่บวมตัวได้ ส่วนไฮโดรเจลในสภาพที่แห้งเรียกได้อีกชื่อว่า เซโรเจล (Xerogel) โดยความสามารถในการบวมตัวของ ไฮโดรเจลนั้นขึ้นอยู่กับความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ของสายโซ่พอลิเมอร์ในโครงสร้างรวมถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density) ด้วยไฮโดรเจลสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น

- ในทางการแพทย์
- ใช้เป็นวัสดุปิดแผล
- ศัลยกรรม
- บรรจุยาที่ต้องการให้ปลดปล่อยได้ตามความต้องการ
- ในการเกษตร
- ใช้ในการโรยดินเพื่อเพิ่มความชุ่มชื้น
- ในชีวิตประจำวัน

2.1.1 ประเภทของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด ขึ้นกับลักษณะการแบ่งประเภท

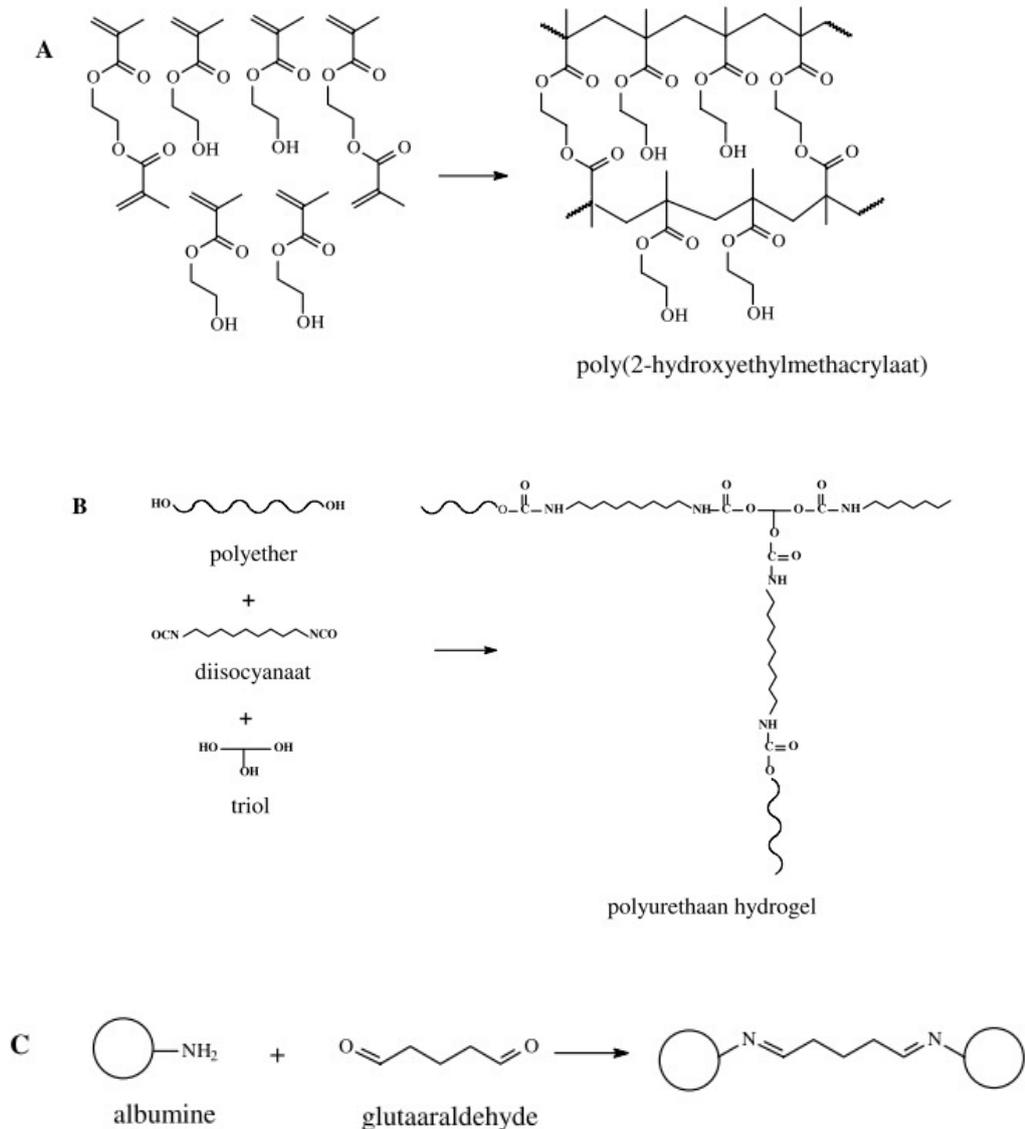
2.1.1.1 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้

1) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นมอนอเมอร์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic monomer) และมอนอเมอร์ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (Polyfunctional comonomer) โครงสร้างร่างแหของไฮโดรเจลเกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันของแต่ละมอนอเมอร์ ตัวอย่างของมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ เช่น เมทาคริเลต เมทาคริลลาไมด์ เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้ เช่น พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง 2-ไฮดรอกซีเอทิล เมทาคริเลต ((2-hydroxyethyl) methacrylate (HEMA)) กับเอทิลีนไกลคอล บิสเมทาคริเลต (Ethyleneglycolbismethacrylate (EGDMA)) [7] ดังรูปที่ 2.1 A ไฮโดรเจลที่ได้นำมาใช้เป็คอนแทคเลนส์แบบนิ่ม การพอลิเมอไรซ์ของไวนิลมอนอเมอร์ส่วนใหญ่จะใช้ตัวริเริ่มแบบอนุมูลอิสระ เช่น เปอร์ออกไซด์ หรือสารประกอบเอโซ เป็นต้น โดยที่ตัวริเริ่มจะแตกตัวให้อนุมูลอิสระเมื่อมีการให้ความ

ร้อนหรืออาจใช้ตัวริเริ่มแบบรีดอกซ์ เช่น ammonium persulfate คู่กับ N,N-tetramethyl ethylene diamine (TEMED) รวมไปถึงการใช้ photo initiator ด้วย

2) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพรีพอลิเมอร์ ไฮโดรเจลประเภทนี้เตรียมโดยการเชื่อมโยงพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือโอลิโกเมอร์ ตัวอย่างเช่น การเชื่อมโยง α, ω -hydroxyl poly(ethylene glycol) ด้วย diisocyanate ดังรูปที่ 2.1 B ซึ่งเป็นตัวเชื่อมโยงแบบไตรออลไฮโดรเจลที่ได้จัดเป็นพอลิยูริเทนที่ชอบน้ำ

3) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ ไฮโดรเจลประเภทนี้เกิดจากการเชื่อมโยงทางเคมีของพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ ตัวอย่างเช่น การเชื่อมโยงโมเลกุลของโปรตีนด้วยฟอร์มัลอัลดีไฮด์หรือออกลูตารอลดีไฮด์ ดังรูปที่ 2.1 C นอกจากนี้ไอออนิกพอลิเมอร์ยังสามารถเชื่อมโยงได้ด้วยการใช้ตัวเชื่อมโยงที่มีประจุเป็น 2+ หรือ 3+ เช่น การสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากไซเตียมอัลจินเนตด้วยตัวเชื่อมโยงที่ให้ Ca^{2+} [7]



รูปที่ 2.1 ประเภทของไฮโดรเจลที่ใช้แบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้ [7]

2.1.1.2 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ (Fabrication of hydrogel) มีด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

1) *ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast film hydrogel)* ไฮโดรเจลแบบนี้มักนำไปใช้เคลือบผิววัสดุต่างๆ มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic bond) เพื่อป้องกันไม่ให้เจลละลายในตัวกลางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหรือในบางกรณีหลังจากที่เคลือบบนพื้นผิววัสดุแล้ว อาจจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะโควาเลนต์ โครงสร้างของไฮโดรเจลแบบนี้ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเมทิลเมทาคริเลต) (Poly(2-hydroxy methylmethacrylate), PHEMA) [8] เป็นต้น

2) *ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network hydrogel)* ไฮโดรเจลแบบนี้เตรียมโดยการฉีดสารผสมของมอนอเมอร์ ตัวริเริ่ม และสารเชื่อมโยง เข้าไปในแม่พิมพ์ ซึ่งในบางกรณีอาจผสมตัวทำละลายลงไปด้วย จากนั้นทำให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันในแม่พิมพ์นั้น ตัวอย่างเช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol), PVA) [9] เป็นต้น

3) *ไฮโดรเจลแบบต่อกิ่งบนพื้นผิว (Surface grafted hydrogel)* ไฮโดรเจลแบบนี้เตรียมโดยการนำพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำไปทำการต่อกิ่งบนพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้ไฮโดรเจลที่ได้ไม่ละลายน้ำ วิธีการนี้สามารถใช้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้ด้วย โดยนำไฮโดรเจลไปต่อกิ่งบนพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น การต่อกิ่งบนพื้นผิวด้วยพอลิเมอร์ร่วมของเจลาติน พอลิ(2-ไฮดรอกซีเมทิลเมทาคริเลต) และพอลิไวนิลอะคริเลต [10]

4) *ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์พีเนเตรตติ้งพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค (Interpenetrating polymer network hydrogel)* ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นการแทรกพอลิเมอร์สองชนิดที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่ายเข้าด้วยกัน โดยโครงร่างทั้งสองไม่สามารถแยกออกจากกันได้และมีความแข็งแรง วิธีการนี้เป็น การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้อีกวิธีหนึ่ง เช่น พอลิ(ไวนิลแอลกอฮอล์)/พอลิ(อะคริลิกแอซิด) อินเตอร์พีเนเตรตติ้งพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค (Poly(vinyl alcohol)/Poly(acrylic acid) IPN) [2] เป็นต้น

2.1.1.3 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

1) *ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical hydrogel)* มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมาก โดยในหนึ่งโมเลกุลของมอนอเมอร์ที่เกิดพันธะมักมีหมู่ฟังก์ชันอยู่หลายตำแหน่งที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ ไฮโดรเจลที่ได้จะไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับทางความร้อน คือ ไม่สามารถทำให้หลอมได้อีก หากให้ความร้อนจนถึงจุดที่พันธะแตกออกจะเกิดการสลายตัวสมบัติจะเปลี่ยนไปจากเดิม ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกได้อีกอย่างว่าไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมเซตเนื่องจากไฮโดรเจลชนิดนี้มีความคงทน ไม่หลอมเหลว และไม่ละลายในตัวทำละลาย ทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูป ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่มีการเชื่อมโยงด้วยเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต [11] เป็นต้น

2) *ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical hydrogel)* การเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เกิดจากพันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงระหว่างประจุ ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เกิดการผันกลับทางความร้อนได้จึงเรียกได้อีกอย่างว่าไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก สามารถหลอมได้เมื่อให้ความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง ซึ่งการให้ความร้อน

ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไฮโดรเจล นอกจากนี้ไฮโดรเจลชนิดนี้ยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิดทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายรวมทั้งการผสมสารอื่นลงในเจลด้วย เช่น สารต้านจุลินทรีย์ ยา เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ(อะคริลาไมด์-โค-เมทิลเมทาคริเลต-โค-ไวนิลเอมีน) (Poly(acrylamide-co-methylmethacrylate-co-vinylamine)) [12] เป็นต้น

2.1.1.4 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามขนาดของรูพรุน

1) ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (*Microporous hydrogel*) เป็นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ในตัวทำละลายที่ดี โดยที่มอนอเมอร์ สารเชื่อมโยง และพอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลายได้ เจลที่ได้มีลักษณะใส ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกว่า ไฮโดรเจลแบบเนื้อเดียว (*Homogeneous hydrogel*) เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA:H₂O เท่ากับ 2:1 [9] เป็นต้น

2) ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (*Macroporous hydrogel*) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดนี้พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะไม่ละลายในตัวทำละลายที่ใช้สำหรับการพอลิเมอไรซ์แต่จะตกตะกอนแยกออกมา ไฮโดรเจลที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีสีขาวขุ่น เรียกได้ว่าเป็นไฮโดรเจลแบบเนื้อผสม (*Heterogeneous hydrogel*) เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA: H₂O เท่ากับ 1.25:1 [9] เป็นต้น

2.1.2 การบวมตัวและปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล [9]

สมบัติที่สำคัญของไฮโดรเจล คือ สามารถบวมตัวได้เมื่ออยู่ในน้ำเนื่องจากโครงสร้างของไฮโดรเจลที่ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ทั้งยังมีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆด้วย เมื่อแช่ไฮโดรเจลในน้ำแรงดันออสโมติก (*Osmotic driving force*) จะผลักดันน้ำให้แทรกเข้าไประหว่างสายโซ่ของไฮโดรเจลซึ่งไม่มีน้ำอยู่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวและปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่ หากน้ำสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ต่างๆในสายโซ่ของพอลิเมอร์นั้น เช่น พันธะไฮโดรเจนจะเป็นแรงเสริมที่ทำให้น้ำเข้าไปในโครงสร้างของไฮโดรเจลได้มากขึ้น น้ำที่เข้าไปในไฮโดรเจลจะดันสายโซ่ให้ยืดออก แต่เนื่องจากสายโซ่ชอบอยู่ในสถานะเดิมซึ่งมีเอนโทรปีต่ำจึงมีแรงต้านการขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดขึ้น เช่น แรงต้านการขยายตัวที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล เป็นต้น เมื่อแรงดันออสโมติกที่ผลักดันให้น้ำเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของไฮโดรเจลกับแรงที่ต้านการขยายตัวของสายโซ่มีค่าเท่ากันการบวมตัวของไฮโดรเจลก็จะถึงจุดสมดุลและปริมาณน้ำในโครงสร้าง ณ จุดนี้เรียกว่า ปริมาณน้ำสมดุล (*Equilibrium water content*) ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับโดยไฮโดรเจลสามารถคำนวณได้จากสมการ [9]

$$\text{ปริมาณน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่แห้ง}}{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ}} \times 100\%$$

เมื่อไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวในน้ำ น้ำที่อยู่ในไฮโดรเจลจะมีลักษณะดังต่อไปนี้ [13, 14]

1. Free water คือ น้ำที่อยู่บริเวณผิวนอกของไฮโดรเจลที่ไม่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่พอลิเมอร์ สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ระบายง่าย ไม่มีผลของสายโซ่พอลิเมอร์มาเกี่ยวข้อง

2. Bound water คือ น้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่พอลิเมอร์เป็นน้ำที่เคลื่อนที่ได้ยาก ต้องใช้พลังงานความร้อนสูงในการเอาน้ำนี้ออกจากไฮโดรเจล

ปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล ได้แก่

1. **อันตรกิริยาระหว่างน้ำกับสายโซ่ของไฮโดรเจล** ถ้าพอลิเมอร์มีโครงสร้างที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้มาก เช่น เกิดพันธะไฮโดรเจนได้จะทำให้น้ำแพร่เข้าสู่โครงสร้างได้มากขึ้นทำให้เกิดการพองตัวได้ดี

2. **ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์** หากสายโซ่พอลิเมอร์ของไฮโดรเจลมีช่องว่างระหว่างกันมากหรือมีรูพรุนในโครงสร้างมาก การบวมตัวจะเกิดขึ้นได้ดีเนื่องจากน้ำสามารถเข้าไปได้มากปริมาณน้ำสมดุลจะมีค่าสูง

3. **ความยืดหยุ่นของสายโซ่** หากสายโซ่มีความยืดหยุ่นมากน้ำสามารถแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่ได้ง่ายและมีแรงต้านการขยายตัวของสายโซ่น้อย ทำให้ปริมาณน้ำสมดุลมีค่าสูงและเกิดการบวมตัวได้มาก

4. **ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์** ถ้ามีการเชื่อมโยงในปริมาณมากสายโซ่อยู่ใกล้กันมากขึ้น ช่องว่างระหว่างสายโซ่น้อยลง รวมถึงความยืดหยุ่นของสายโซ่ที่ลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งทำให้การขยายตัวของสายโซ่เกิดได้น้อยเนื่องจากเกิดการดึงรั้งกันของสายโซ่ แรงต้านการขยายตัวของไฮโดรเจลมีค่าสูงทำให้ไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวได้น้อย

2.2 กัมธรรมชาติ (Natural gums) [15]

กัม (Gum) จากธรรมชาติเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซคคาไรด์และอนุพันธ์ของพอลิแซคคาไรด์ส่วนใหญ่มีแหล่งที่มาจากพืช สามารถละลายได้ทั้งในน้ำเย็น น้ำอุ่น และน้ำร้อน โดยสารละลายที่ได้จะมีความหนืดสูงแม้ว่ามีความเข้มข้นของกัมน้อยก็ตาม ดังนั้นจึงมีการนำกัมจากแหล่งธรรมชาติมาใช้ประโยชน์อย่างมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหารโดยใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดหรือสารข้น สารเพิ่มเสถียรภาพ ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดเป็นเจลอิมัลซิไฟเออร์ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาผลิตเป็นกาวได้

กัมจากธรรมชาติมีที่มาจากหลายแหล่ง แบ่งตามแหล่งที่มาสามารถแยกได้เป็น 3 แหล่งใหญ่ๆ ดังนี้

1. กัมจากสาหร่ายทะเล (Algae Source) เช่น อะการ์ (Agar), อัลจีเนต (Alginate), คาร์ราจีแนน (Carrageenan)

2. กัมจากพืช (Botanical Source) ได้จากส่วนต่างๆของพืช เช่น

— Plant Extrudates เช่น กัมอาระบิก กัมคารายา

— เมล็ด (Seed Gums) จำพวกเมล็ดมะขาม เช่น กัวร์กัม (Guar gum), Lucust Bean Gum

— เยื่อไม้ (Plant Tissue) เช่น Larch Gum, Pectin

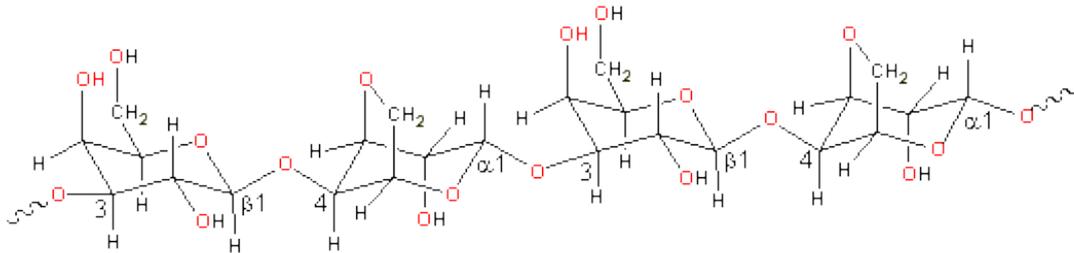
3. กัมจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (Microbial Gums) เช่น แซนแทนกัม (Xanthan Gum)

2.2.1 กัมจากสาหร่ายทะเล

แหล่งวัตถุดิบที่ได้จากสาหร่ายทะเล (Marine algae) เช่น กลุ่มสาหร่ายสีแดงและสาหร่ายสีน้ำตาล เป็นต้น

2.2.1.1 อะการ์ (Agar)

อะการ์ (Agar) ได้จากผนังเซลล์ของสาหร่ายสีแดง อะการ์จัดเป็นพอลิแซคคาไรด์ชนิดสายโซ่ตรงประกอบไปด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) ประเทศแรกที่พบ คือ ญี่ปุ่น เมื่อประมาณปี ค.ศ. 1700 แต่เริ่มมีการนำมาใช้ประโยชน์เมื่อประมาณปี ค.ศ. 1900 ประเทศที่ผลิตอะการ์จากสาหร่าย ได้แก่ สเปน โมร็อกโก ชิลี สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ไต้หวัน เกาหลีใต้ และโปรตุเกส



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะการ์ [16]

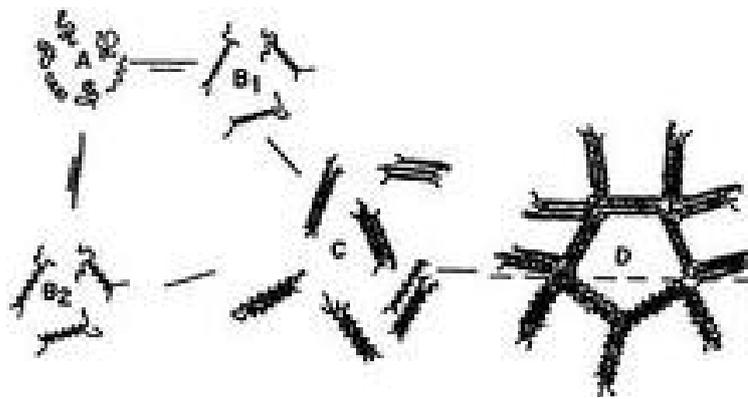
อะการ์มีองค์ประกอบของพอลิแซคคาไรด์ 2 ประเภทหลัก คือ อะกาโรส (Agarose) และอะกาโรเปคติน (Agarpectin) ซึ่งทั้งอะกาโรสและอะกาโรเปคตินนี้เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีโครงสร้างหลักเป็นหน่วยย่อยของน้ำตาลกาแลคโตส

- **อะกาโรส** มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ระหว่าง 1,3 linked β -D-galactopyranose และ 1,4 linked 3,6-anhydro- α -L-galactopyranose เรียงสลับกันไปทำหน้าที่ตำแหน่ง 1,3 linked สายโซ่สามารถถูกตัดได้ด้วยกรด แต่ที่ตำแหน่ง 1,4 linked สายโซ่จะต้องตัดโดยใช้เอนไซม์
- **อะกาโรเปคติน** เป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟต มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับอะกาโรส คือ มีหน่วยซ้ำของ β -D-galactopyranose และมีโครงสร้างเหมือนอะกาโรส แต่ 3,6-anhydro- α -L-galactopyranose บางโมเลกุลถูกแทนที่ด้วยซัลเฟตประมาณ 5-8%

อะการ์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดจะอยู่ในรูปที่เป็นผง เกล็ด รวมทั้งเป็นแผ่น มีสีขาวขุ่นสามารถละลายได้ในน้ำเย็นและละลายได้ดีในน้ำเดือด อะการ์ยังสามารถเกิดเป็นเจลได้ด้วยเมื่อมีความเข้มข้นของเนื้ออะการ์มากกว่า 0.5% ที่อุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส และจะละลายเมื่อมีอุณหภูมิประมาณ 75-90 องศาเซลเซียส การเกิดเจลแบบนี้เรียกว่า physical gels โดยเมื่อโมเลกุลของอะกาโรสละลายอยู่ในน้ำจะมีลักษณะเป็น random coil และเมื่ออุณหภูมิลดลงใกล้อุณหภูมิจุดเกิดเจลจะเกิดการจับกันของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นแบบ B1 (Antisymmetric double helices) ได้โครงสร้างเป็นแบบ C, D (ส่วนบน) หรือ จับกันแบบ B2 (Symmetric double helices) ได้โครงสร้าง C, D (ส่วนล่าง) การที่จะเกิดเจลรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วในการลดลงของอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจะได้โครงสร้างเป็นแบบรูป B1 และ C, D (ส่วนบน) เจลที่ได้สามารถเกิดการผันกลับทางความร้อนได้ เรียกว่า เทอร์โมรีเวอซิเบิลเจล (Thermaoreversible gel) อะการ์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย อาทิ

- ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารเพิ่มความข้นของซอสหรือน้ำซุ๊ป
- ในอุตสาหกรรมกระดาษ (Paper Sizing)
- ในทางเภสัชศาสตร์ใช้ช่วยให้ตัวยาถูกปล่อยออกมาช้าลง (Slow release ingredient) เพราะอะการ์ไม่สามารถย่อยในร่างกายมนุษย์ได้เนื่องจากไม่มีเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อย

- ใช้เป็น tissue culture media ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ



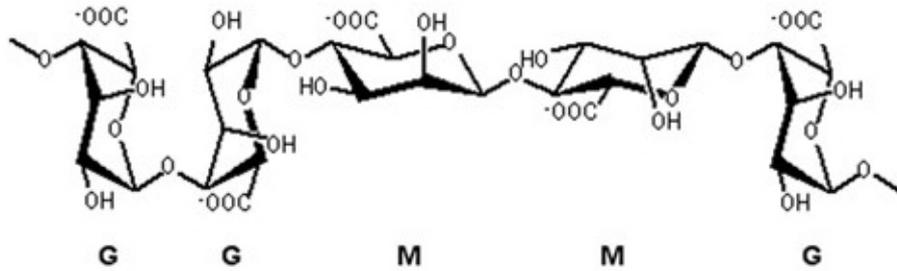
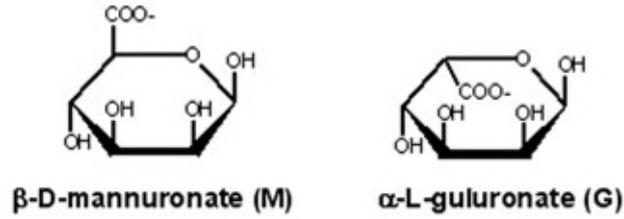
รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดเจลของอะการ์ [16]

2.2.1.2 อัลจิเนต (Alginate)

กัมประเภทนี้จะอยู่ที่ผนังเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาล (Phaeophyceae) อัลจิเนตจะอยู่ในรูปเกลือโซเดียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียมของกรดอัลจินิก พบเมื่อประมาณปี ค.ศ.1800 ในประเทศสหราชอาณาจักรและเริ่มมีการผลิตเชิงอุตสาหกรรมในปี ค.ศ.1929 ในรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา

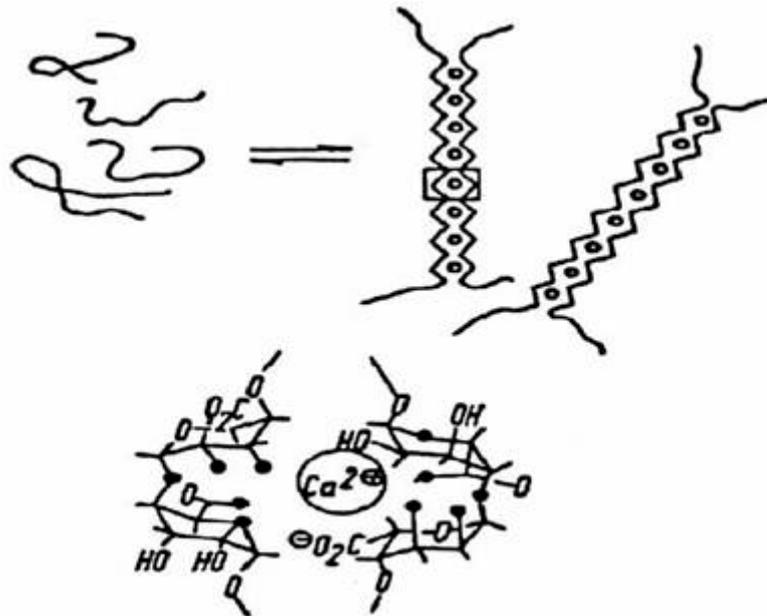
การผลิตอัลจิเนตในเชิงอุตสาหกรรมนั้น สาหร่ายทะเลที่ใช้ ได้แก่ *Macrocystis pyrifera* มีอัลจินประมาณ 14-19%, *Laminaria cloustoni* และ *Laminaria digitata* มีอัลจินประมาณ 15-40% ปริมาณที่พบจะขึ้นกับชนิดของสาหร่าย ฤดูกาล และแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต สาหร่ายเหล่านี้พบได้ทั่วยุโรปในโลกร ประเทศที่ผลิตอัลจิเนตมาก คือ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนาดา และญี่ปุ่น

อัลจิเนตเป็นพอลิแซคคาไรด์เชิงเส้นซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยของมอนอแซคคาไรด์สองตัว คือ 1,4- β -D-manuronic acid (M) และ L-guluronic acid (G) โมเลกุลประกอบด้วยบริเวณที่มีพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวของ G และ M ที่เรียกว่า G-blocks และ M-blocks ตามลำดับ และบางส่วนของโมเลกุลเป็น MG-blocks ดังรูปที่ 2.4 สัดส่วนของพอลิเมอร์รวมและโครงสร้างที่แตกต่างจะเป็นตัวกำหนดสมบัติของอัลจิเนต เช่น ถ้าในสายโซ่มีพอลิเมอร์ G ในปริมาณสูงจะมีสมบัติเป็น เจลแข็งที่ความเข้มข้นหนึ่งของประจุบวกของโลหะ แต่ถ้าในสายโซ่มีพอลิเมอร์ M ในปริมาณสูงเจลที่เกิดจะมีแนวโน้มอ่อนนุ่มและมีสภาวะในการเกิดเจลที่กว้างกว่าสายโซ่ที่มีพอลิเมอร์ G ปริมาณสูง



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอัลจิเนต [16]

อัลจิเนตบางชนิดไม่มีสมบัติเป็นเจลแต่เกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) โครงสร้างของเจลที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (Egg Box) โดยมี Ca^{2+} เกาะอยู่กับสายโซ่พอลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.5 สมบัติที่ดีของอัลจิเนตเมื่อเกิดเป็นเจล คือ เจลที่ได้จะไม่สามารถผันกลับ (Irreversible gel) ในน้ำเย็นที่มีแคลเซียมไอออนอยู่ได้



รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดเจลของแคลเซียมอัลจิเนต แบบ Egg – box [16]

อัลจิเนตที่ผลิตและจำหน่ายในเชิงการค้ามีหลายอนุพันธ์จึงมีสมบัติการละลายในน้ำที่

แตกต่างกันไป เช่น อนุพันธ์ของเกลือ Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ และยังผลิตในรูปของพอลิอัลจินเนต คอลอัลจินเนต (Propylene glycol alginate) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาของกรดอัลจินิก (Alginic acid) กับ พอลิออกไซด์ (Propylene oxide) ภายใต้ความดัน อนุพันธ์เหล่านี้จะละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและ น้ำเย็น ความหนืดของสารละลายอัลจินเนตที่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุล ประจุบวกของโลหะที่อยู่ในโครงสร้าง รวมถึงค่าการเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วย เช่น ความหนืดของ สารละลายอัลจินเนตจะคงที่เมื่อมีค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 5 แต่ความหนืดของสารละลายจะ เพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่า 4.5 หากสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 จะ เริ่มมีผลึกของกรดอัลจินิกเกิดขึ้น

อัลจินเนตถูกนำไปใช้ผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดตั้งแต่ปีค.ศ.1920 โดยเติมในอาหารกระป๋อง บางชนิดเพื่อเป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว หรือใช้เป็นสารทำให้เกิดเจล ทำให้อิมัลชันคง ตัว นอกจากนี้ยังใช้อัลจินเนตในอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกด้วย ตัวอย่างของการนำอัลจินเนตไปใช้ใน อุตสาหกรรมต่างๆ เช่น

- ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารข้นหรือสารทำให้เกิดเจลในซูป เครื่องดื่ม ไอศกรีมและเจลลี่
- ใช้เป็นสารข้นในการผลิตเครื่องสำอาง
- แคลเซียมอัลจินเนตใช้ทำเป็นแผ่นปิดแผลไฟไหม้ซึ่งจะช่วยให้แผลหายเร็วขึ้นและช่วยลด อาการบาดเจ็บได้ดีกว่าแผ่นปิดแผลแบบดั้งเดิม
- ช่วยดูดซึมโลหะที่เป็นพิษจากเลือด

2.2.1.3 คาร์ราจีแนน (Carrageenan)

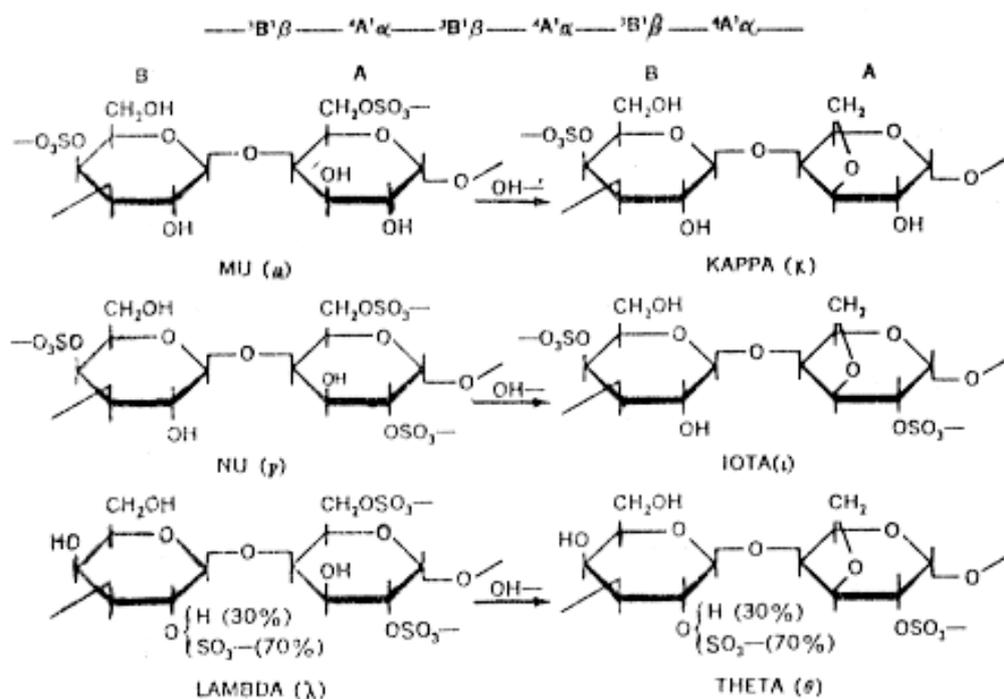
ชื่อคาร์ราจีแนน (Carrageenan) มาจาก Carrageen ซึ่งเป็นชื่อแหล่งที่มีการพบสาหร่ายใน ปริมาณมากอยู่ในแถบชายฝั่งของประเทศไอร์แลนด์ คาร์ราจีแนนเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสี แดง (Rhodophyceae) มีการนำมาใช้ครั้งแรกในประเทศจีนเมื่อประมาณ 600 ปีก่อนคริสตกาล ในขณะที่การผลิตในระดับอุตสาหกรรมเกิดขึ้นเมื่อประมาณช่วงทศวรรษ 1930

โครงสร้างของคาร์ราจีแนนบิดเป็นเกลียว (Helical) โดยมีโครงสร้างหลักเป็นกาแลคโทสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic linkage) และเป็น sulphated polysaccharides คาร์ราจีแนนสามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้อีกหลายชนิดตามจำนวนและตำแหน่งของกลุ่มเอสเตอ์ ซัลเฟต (Ester sulphate) และจำนวน 3,6 anhydro-D-galactose (3,6-AG) ได้แก่ Kappa, Iota และ Lambda ซึ่งคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิดนี้ ประกอบด้วยโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์หลักที่ซ้ำๆ กันหลายหน่วย ดังรูปที่ 2.6 Unit A แสดง 1,4-linked galactoside ในขณะที่ Unit B แสดง 1,3-linked galactoside

- **Kappa Carrageenan** ประกอบด้วย 1,3-linked galactoside มีกลุ่มซัลเฟตที่ ตำแหน่งที่ 4 และ 1,4-linked 3,6 anhydro-D-galactose (3,6-AG) โดยมีสารตั้งต้น เป็น mu-carrageenan ถ้ามีปริมาณแอนไฮไดรด์จากการปิดวงเป็น 3,6 anhydride มากถึง 28-35% จะมีผลทำให้ไวต่อโปรเตสตีเอสและมีความสามารถในการเกิดเจล แม้ จะมีการดัดแปรให้มี 3,6-AG สูงที่สุด แต่อาจจะมีความแตกต่างกันที่จำนวนของซัลเฟตที่ ตำแหน่งที่ 4 ใน 1,3-linked galactoside และกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 หรือ 6 ใน 1,4-linked galactoside จะทำให้คาร์ราจีแนนชนิด Kappa มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป
- **Iota Carrageenan** มีสารตั้งต้นเป็น mu-carrageenan ประกอบด้วย 1,3-linked

galactoside มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 4 และ 1,4-linked 3,6-AG มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 ความแตกต่างระหว่างแอนไฮดราไซม์ในคาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota คือ จำนวนกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 ใน 1,4-linked galactoside ของ Iota จะมีมากกว่า Kappa ประมาณ 25-50% ความว่องไวต่อโปแตสเซียมลดลงซึ่งจะมีผลทำให้ได้เจลที่อ่อนนุ่ม แต่ถ้ามีซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 มากถึง 80% จะไวต่อแคลเซียม

- **Lambda Carrageenan** ประกอบด้วย 1,3-linked galactose ซึ่งมีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 ประมาณ 70% และ 1,4-linked galactose มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 6 ซึ่งคาร์ราจีแนนชนิดนี้จะไม่เกิดการปิดวงเป็น 3,6-AG จึงทำให้ไม่มีสมบัติในการเกิดเจล

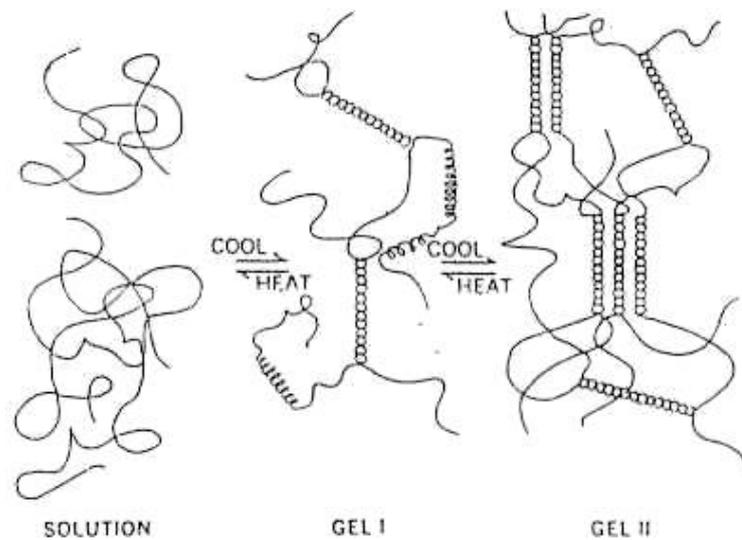


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ประเภท [16]

คาร์ราจีแนนทุกชนิดละลายได้ในน้ำร้อน ถ้าเป็นเกลือโซเดียมของคาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota จะสามารถละลายได้ในน้ำเย็น ในขณะที่เกลือไอออนชนิดอื่นๆ เช่น โปแตสเซียมหรือแคลเซียมไม่สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนคาร์ราจีแนนชนิด Lambda จะละลายได้ในน้ำเย็นโดยไม่ขึ้นกับชนิดของไอออน อุณหภูมิที่ใช้ในการละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์ราจีแนนและไอออนที่เกี่ยวข้อง ส่วนใหญ่คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota ต้องใช้อุณหภูมิในการละลายมากกว่า 70°C นอกจากนี้คาร์ราจีแนนทุกชนิดจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายในตัวทำละลายที่รวมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำได้ เช่น แอลกอฮอล์ โพรพิลีนไกลคอล เป็นต้น

คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota มีความสามารถที่จะเกิดเจลได้เมื่อสารละลายของคาร์ราจีแนนเย็นตัวลงซึ่งเจลที่ได้ถือเป็น thermoreversible aqueous gel คือ เจลที่สามารถละลายได้เมื่อได้รับความร้อนและเกิดเจลได้อีกครั้งเมื่อเย็นตัวลง ในปีค.ศ.1969 Rees ได้กล่าวว่า เมื่อคาร์ราจีแนนละลายน้ำจะเกิดเจล เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลเกิดการรวมตัวกันแบบเกลียวคู่ (Double helix) หากให้

ความร้อนจนอุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลวของเจล อุณหภูมิและการปั่นกววนจะทำให้เกลียวคลายตัวเป็น random coil และเมื่อเย็นตัวลงแต่ละสายโซ่จะรวมตัวกันเกิด junction point (GEL I) และหากปล่อยให้เย็นลงอีกจะเกิดการเกาะกันของแต่ละเกลียวเป็น junction point (GEL II) จนเป็นโครงสร้างแบบโครงร่างสามมิติ (Polymer network 3D) ทำให้เจลเกิดการแข็งตัว การเติมโลหะไอออนจะมีผลต่อการเกิดเจล เช่น คาร์ราจีแนนชนิด Kappa ถ้าเติม K^+ จะเกิดเป็นเจลที่มีความยืดหยุ่น (Elastic gel) แต่หากเติม Ca^{2+} จะเกิดเป็นเจลแข็ง (Rigid gel) ส่วนคาร์ราจีแนนชนิด Iota เมื่อเติม Ca^{2+} จะเกิดเป็นเจลที่มีความยืดหยุ่น ถ้าผสมคาร์ราจีแนนชนิด Kappa กับ Iota เข้าด้วยกันแล้วจะทำให้มีสมบัติในการเกิดเจลได้มากขึ้น เจลที่ได้มีความยืดหยุ่นนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน [16]

คาร์ราจีแนนเกรดการค้าโดยทั่วไปจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100,000 ถึง 1,000,000 สามารถละลายได้ในน้ำซึ่งมีความหนืดสูงและเกิดเจลได้ สารละลายของคาร์ราจีแนนมีสมบัติเฉพาะประการหนึ่งซึ่งถือเป็นข้อดี คือ มีสมบัติการไหลแบบ thixotropic คือ ที่สภาวะปกติจะมีความหนืดสูงแต่หากให้แรงเฉือน เช่น การคนหรือเขย่าจะทำให้สารละลายมีความหนืดลดลง แต่จะมีความหนืดสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อเอาแรงออก คาร์ราจีแนนถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยใช้เป็นสารข้นหรือสารเพิ่มเสถียรภาพ เช่น ในอุตสาหกรรมอาหารใช้ช่วยเพิ่มความหนืด เช่น ไอศกรีม ซอส หากใช้คาร์ราจีแนนผสมกับโปรตีนเคซีนจะได้โยเกิร์ต ในเครื่องสำอางใช้เป็นสารข้น

2.2.2 Gums จาก Botanical Sources

กัมประเภทนี้เป็นกัมที่ได้จากส่วนต่างๆของพืช แบ่งได้ดังนี้

1. Plant Extrudate เช่น Gum Arabic, Gum Karaya
2. Plant seed gums เช่น Guar Gum, Lucust Bean Gum
3. Plant Tissue Gum เช่น Pectin

2.2.2.1 Plant Extrudate

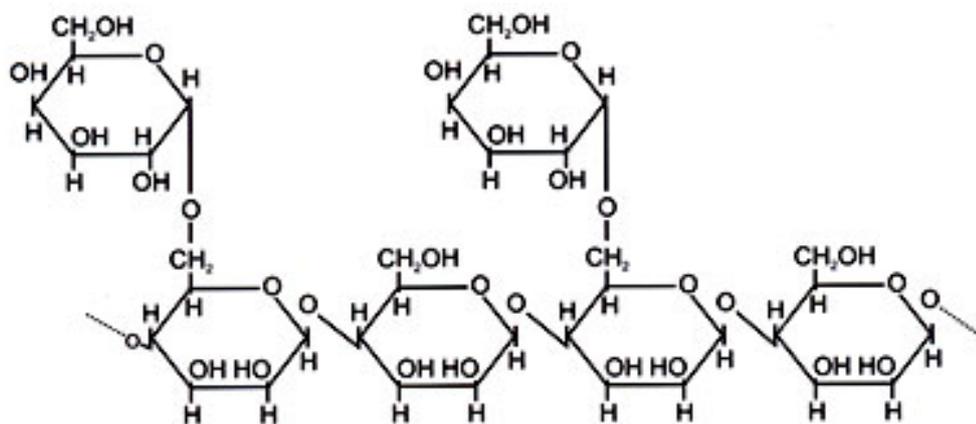
ส่วนใหญ่กัมอาระบิกจะนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารจำพวกขนมหวาน เช่น มาร์ชเมลโล ลูกกวาด เป็นต้น โดยทำหน้าที่ยับยั้งการตกผลึกของน้ำตาลและช่วยให้เกิดอิมชันได้ดี ในอุตสาหกรรม การผลิตสารที่ให้กลิ่นจะใช้กัมอาระบิกเป็นสารยึดติดเพราะขณะทำการพ่นสารที่ให้กลิ่นลงบน ผลิตภัณฑ์อาหารกัมอาระบิกจะไปช่วยเคลือบผิวบนอกของผลิตภัณฑ์อาหารทำให้สารที่ให้กลิ่นติดอยู่ บนผิวของอาหารและยังช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันรวมทั้งการระเหยของสารที่ให้กลิ่นออกไปจาก อาหารอีกด้วย นอกจากนี้ยังใช้เป็น Flavor encapsulating agent เพื่อนำไปใช้ในพวกผลิตภัณฑ์ แบบผง เช่น ชูปผง ในเบียร์ กัมอาระบิกจะช่วยทำให้ฟองเบียร์คงตัวและช่วยเป็น emulsifier และ stabilizer ให้กับเครื่องดื่มที่อยู่ในรูปของอิมัลชันด้วย

2.2.2.2 Seed Gums

กัมประเภทนี้เป็นกลุ่มของ Galactomannan gums ที่สกัดได้จากเมล็ดของพืช เช่น Locust bean gum, Guar gum, Tamarind gum เป็นต้น

กัวร์กัม (Guar Gum)

กัวร์กัมได้จาก endosperm ของเมล็ดต้นกัวร์ (Cyamopsis Tetragonolobus) มีถิ่นกำเนิด ในประเทศอินเดียและปากีสถาน ปัจจุบันมีปลูกในรัฐเทกซัส สหรัฐอเมริกา โครงสร้างของกัวร์กัมเป็น พอลิเมอร์สายยาวของแมนโนสที่ต่อกันด้วย 1,4-linked และมีกิ่งแขนงของกาแลคโตสโดยทุกๆ 2 โมเลกุลของแมนโนสจะต่อกับ 1 โมเลกุลของกาแลคโตสด้วย 1,6-linked ทำให้อัตราส่วนของแมน โนสต่อกาแลคโตสเป็น 2:1 กัวร์กัมมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 220,000



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของกัวร์กัม [16]

กัวร์กัมจัดเป็น non-gelling แต่สามารถกระจายตัวและอุมน้ำได้ดีในน้ำเย็น จึงใช้ทำหน้าที่ หลักรเป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัวและอุมน้ำ กัวร์กัมมีความสามารถในการอุมน้ำได้สูงสุดที่ pH 7.5-9.0 ความหนืดของสารละลายขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ pH เวลา ความเข้มข้น และขนาดของ อนุภาคด้วย นอกจากนี้ยังสามารถเกิดอันตรกิริยากับกัมแซนแทน (Xanthan Gum) ได้สารละลายที่มี ความหนืดเพิ่มขึ้นกัวร์กัมเป็น Non-Ionic ทนต่อ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 4-10 ทำให้สามารถเติมอิลค

โตร์ไลต์ได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีความเข้มข้นของอิลคโตร์ไลต์สูงกว่า 5% จะมีผลต่อการอุ้มน้ำและการเกิดเจล กั้วร์กัมสามารถนำไปใช้งานได้หลายอุตสาหกรรม โดยทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืดเป็นอิมัลซิไฟเออร์ รวมทั้งเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพด้วย เช่น

- อุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น sizing agent และ thickner
- อุตสาหกรรมกระดาษ
- อุตสาหกรรมอาหาร เช่น เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพในไอศกรีมและพวกอาหารแช่แข็ง หรือใช้เป็นพวกอิมัลซิไฟเออร์

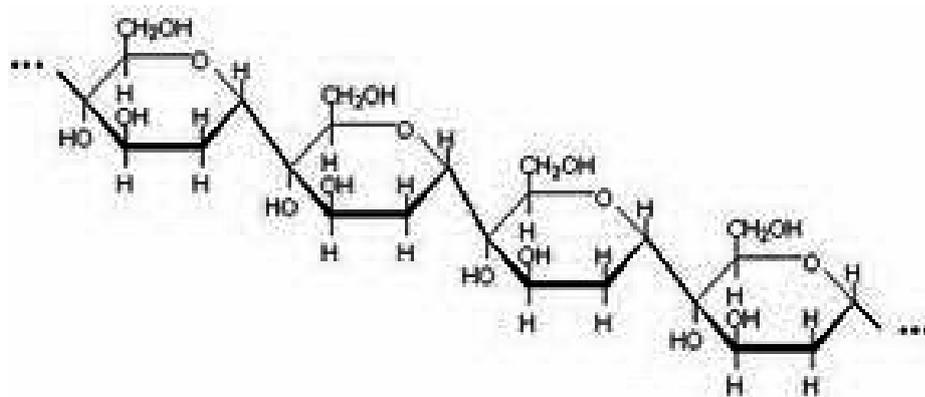
2.2.2.3 Plant Tissue Gums

กัมที่ได้จากเนื้อเยื่อพืชที่สำคัญคือ เพคติน (Pectin) สกัดได้จากผลไม้ตระกูลส้มและยังพบว่าเป็นส่วนประกอบในเนื้อผลไม้บางชนิด เช่น แอปเปิล ฝรั่ง เป็นต้น

เพคติน (Pectin)

เพคติน (Pectin) มีลักษณะเป็นผงสีขาวถึงน้ำตาลอ่อน น้ำหนักโมเลกุลสูง ได้จากการตัดสายโซ่ของ Protopectin ที่อยู่ที่ผนังเซลล์ของเนื้อเยื่อของต้นไม้ (Plant Tissue) ประกอบด้วยกลุ่มของพอลิแซคคาไรด์ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น Polygalacturonic acid ที่หมู่กรดบางส่วนถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์ (Partially Methylated) การสกัดแยกเพคตินเกิดขึ้นเมื่อปีค.ศ.1825 โดย Henri Braconnot เมื่อผสมเพคตินกับน้ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดและมีเสถียรภาพซึ่งจะเกิดเป็นเจลขึ้น

เพคตินเป็น Heteropolysaccharide ที่มีสายโซ่ตรงของ α -(1-4)-linked D-galacturonic acid (ประมาณ 65% โดยน้ำหนัก) เป็นสายหลักที่เรียกว่า Smooth Regions และมีกิ่งแขนงหรือ Hair Regions เป็นอะราบิโนส กาแลคโตส หรือแรมโนส บางส่วนของหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ที่ D-galacturonic acid จะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) กับหมู่เมทิล (-CH₃) เป็นเมทิลเอสเทอร์และมี Degree of Methylation (DM) แตกต่างกัน ซึ่ง DM คืออัตราส่วนของหมู่ methylated galacturonic acid ต่อหมู่ galacturonic acid ทั้งหมดที่มีอยู่ในโมเลกุลของเพคติน ดังนั้นวัตถุดิบแต่ละแหล่งจะได้เพคตินที่มีโครงสร้างต่างกันและซับซ้อนมากเพราะมีค่า DM ที่ต่างกัันนั่นเอง



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเพคติน [16]

ชนิดของเปคตินสามารถแบ่งออกตามค่า DM ได้เป็น 2 ชนิด คือ

- **เปคตินชนิดเมทอกซีต่ำ (Low methoxy pectin, LM)** มีค่า DM น้อยกว่า 50% สามารถเกิดเจลโดยมีปริมาณของ Ca^{2+} สามารถละลายได้ที่ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 2.9-5.5 เจลที่ได้เป็นชนิดที่สามารถผันกลับได้ทางความร้อน (Thermoreversible) ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลจะมีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นมากกว่าเจลที่ได้จากเปคตินชนิด HM หรืออะการ์
- **เปคตินชนิดเมทอกซีสูง (High methoxy pectin, HM)** มีค่า DM มากกว่า 50% ใช้กับอาหารที่มี pH 2.0-3.5 เปคตินชนิดนี้ยังแบ่งย่อยออกเป็นอีก 3 ชนิด ตามเวลาที่ใช้ในการเกิดเจล (Gelling time) คือ เกิดเจลได้ช้า (Slow set) ปานกลาง (Medium set) และรวดเร็ว (Rapid set) ซึ่งจะแตกต่างกันที่ค่า DM เช่น ชนิดที่เกิดเจลได้ช้าจะมีค่า DM ประมาณ 60% และชนิดที่เกิดเจลได้เร็วมีค่า DM ประมาณ 75%

เปคตินที่สกัดได้จากธรรมชาติจะเป็นชนิด HM ที่มีค่า DM สูงถึง 75% เมื่อนำมาทำให้เกิดปฏิกิริยา De-esterification จะได้เปคตินชนิด LM เปคตินทั้งชนิด LM และ HM จะมีสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ที่ต่างกัน การนำเปคตินมาใช้ประโยชน์ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และชนิดของผลิตภัณฑ์อาหาร เปคตินนิยมใช้ในอาหารประเภท Jam, Jelly, Bakery filling, fruit topping, เครื่องดื่ม และผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อคล้ายเยลลี่ เช่น

- การเติมเปคตินชนิด LM จำนวนเล็กน้อยลงในโยเกิร์ตจะช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อของโยเกิร์ตให้ดีขึ้น
- สำหรับน้ำผลไม้เข้มข้นจะเติมเปคตินชนิด HM เพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับอนุภาคของเนื้อผลไม้ ทำให้อนุภาคกระจายตัวแขวนลอยอยู่ได้โดยไม่ตกตะกอน
- ในน้ำผลไม้ผงสำเร็จรูปจะมีการเติมเปคตินชนิด HM ลงไปเพื่อให้เกิดความรู้สึกเหมือนน้ำผลไม้ธรรมชาติขณะดื่ม
- ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ เช่น แยมที่นำมาเติมในทาร์ตจะให้ลักษณะผิวเรียบเป็นเงาหลังจากอบแล้วและทนต่อการอบ

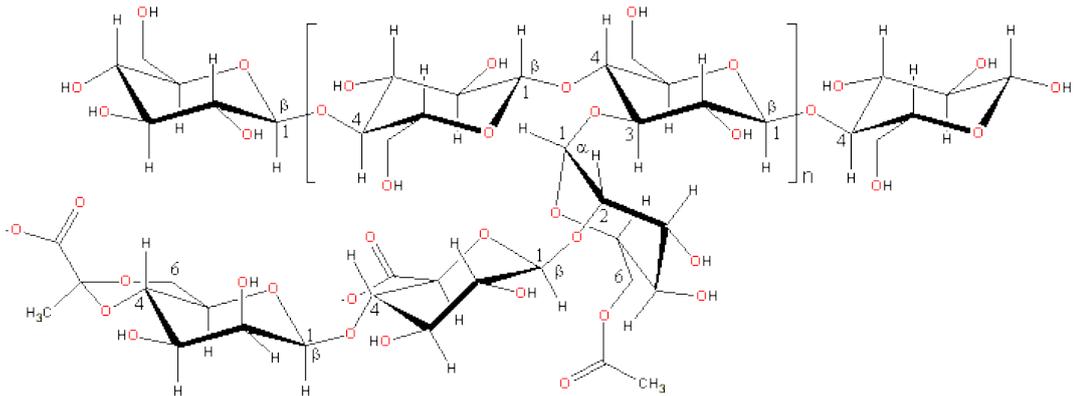
2.2.3 Microbial Gum

กัมที่มีแหล่งที่มาจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กถูกค้นพบครั้งแรกในปีค.ศ.1822 สารที่สกัดได้ คือ Dextrans ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 50,000-100,000 ได้จากการหมักกลูโคสด้วยแบคทีเรีย ในช่วงปี 1950-1960 ได้เริ่มการผลิตกัมที่มาจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (Microbial Gum) ในระดับอุตสาหกรรมนั้นคือ กัมแซนแทน (Xanthan Gum)

กัมแซนแทน (Xanthan Gum)

กัมแซนแทน (Xanthan Gum) เป็นพอลิแซคคาไรด์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในอาหารและเป็นสารที่ช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลได้ เป็นกัมที่ได้จากการหมักด้วยน้ำตาลกลูโคสหรือซูโคสด้วยเชื้อแบคทีเรียปริสซูทรี คือ Xanthomonas Campestris หลังจากกระบวนการหมักแล้วจะนำมาตกตะกอนด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์แยกเอากัมแซนแทนออกมาทำให้แห้งแล้วบดให้ละเอียด

กัมแซนแทนเป็น Heteropolysaccharide ที่ประกอบด้วย glucose, mannose และ glucuronic acid ในอัตราส่วน 2.8:3:2 มีหมู่อะซิติลประมาณ 4.7% และกรดไพรูวิก (Pyruvic acid) ประมาณ 3% โครงสร้างทางเคมีของกัมแซนแทนนั้นมีสายโซ่หลักเป็นกลูโคสซึ่งเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง 1,4 β -D-glucose โดยมีสายโซ่ข้างเคียงต่ออยู่ที่ตำแหน่งที่ 1,3 เป็นไตรแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วย α -D-mannose ซึ่งมีหมู่อะซิติลในโครงสร้างที่ตำแหน่งที่ 6, β -D-glucuronic และ terminal β -D-mannose



รูปที่ 2.11 โครงสร้างโมเลกุลของกัมแซนแทน [16]

กัมแซนแทนละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน สารละลายของกัมแซนแทนที่มีสารที่มีสมบัตินำไฟฟ้า (Electrolyte) ผสมอยู่เล็กน้อยจะมีสมบัติในการรักษาเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal Stability) ที่ดีมากและมีความหนืดคงที่ในช่วงอุณหภูมิ -18°C ถึง 80°C และความหนืดคงที่ในช่วง pH 1-11 นอกจากนั้นสารละลายกัมแซนแทนยังมีคุณสมบัติเป็นซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) คือความหนืดของสารละลายจะลดลงเมื่อมีแรงเฉือนเพิ่มขึ้นซึ่งมีประโยชน์ต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมอาหาร กัมแซนแทนนำไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายอุตสาหกรรม โดยหลักๆทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัว และทำให้อุณหภูมิแขวนลอยได้ดี เช่น

- ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ช่วยให้อุณหภูมิต่างๆแขวนลอยได้ดีและช่วยให้เกิดเป็นครีม ซึ่งส่วนใหญ่พบได้ในน้ำสลัดและซอส รวมทั้งไอศกรีม นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอาหารแช่แข็งและเครื่องดื่มด้วย
- นำกัมแซนแทนไปใส่ในยาสีฟันเพื่อใช้เป็นตัวผสม (Binder) ช่วยให้ไม่เสียรูป
- ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง การเติมกัมแซนแทนช่วยให้หยดน้ำมันสามารถคงตัวอยู่ในระบบอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำได้
- ในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน ใช้กัมแซนแทนในปริมาณมากเพื่อใช้เป็น thicken drilling fluids ซึ่งช่วยให้น้ำของแข็งที่เจาะได้กลับขึ้นมาที่พื้นผิวได้ง่ายขึ้น
- ในงานก่อสร้าง ใช้กัมแซนแทนผสมกับคอนกรีตที่จะเทได้น้ำเพื่อให้คอนกรีตมีความหนืดสูงขึ้นและป้องกันการกัดเซาะ

2.3 ซิลเวอร์

เป็นธาตุโลหะมีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ Ag (มาจากภาษาละตินคำว่า Argentum) มีเลขอะตอม 47 จัดเป็นธาตุโลหะทรานซิชันที่มีลักษณะนุ่ม ขาว และมันวาว มีสมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดีเยี่ยมกว่าธาตุอื่นๆ โลหะที่เกิดขึ้นในธรรมชาติจะอยู่ในรูปธาตุบริสุทธิ์, ธาตุอิสระ, โลหะผสมกับทองและโลหะอื่นๆ หรืออยู่ในรูปแร่ เช่น argentite และ chlorargyrite ธาตุซิลเวอร์ส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากธาตุทองแดง ทอง ตะกั่ว และสังกะสี

ซิลเวอร์มีการค้นพบมานานแล้วเป็นโลหะมีค่าและใช้ในการทำเครื่องประดับ, จิวเวลรี่, เครื่องใช้ในบ้าน, เหยี่ยงู ในทุกวันนี้ธาตุซิลเวอร์มักถูกนำมาใช้ในการต่อวงจรไฟฟ้าและเป็นตัวนำไฟฟ้า, เป็นส่วนประกอบของกระจก, เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเคมี สารประกอบซิลเวอร์ถูกใช้ในฟิล์มถ่ายรูป, สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเจือจางหรือสารประกอบซิลเวอร์ถูกใช้เป็นสารยับยั้งเชื้อโรคขณะที่ยาด้านเชื้อโรคจำนวนมากที่ใช้ซิลเวอร์ถูกแทนที่ด้วยยาปฏิชีวนะ

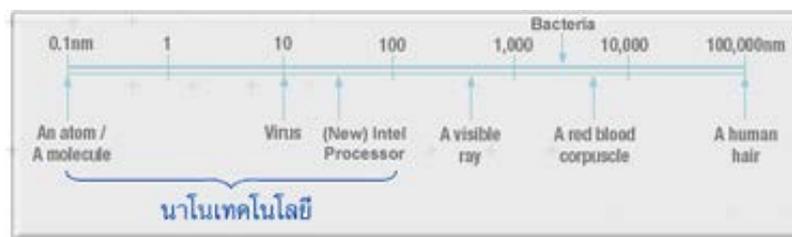
2.3.1 สมบัติของซิลเวอร์

ซิลเวอร์ถูกใช้งานตั้งแต่ยุคอาณาจักรกรีกโบราณโดยใช้ทำเป็นภาชนะในการเก็บรักษา น้ำ เพื่อให้ปราศจากเชื้อโรคและป้องกันการเกิดโรคภัยไข้เจ็บ ในทวีปยุโรปซิลเวอร์ก็เริ่มมีการใช้งานมาตั้งแต่หลายร้อยปีก่อนโดยการนำเหยี่ยงูเงินใส่ลงไปในถังนมเพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น ต่อมาจึงมีการศึกษาทดลองและพบว่าซิลเวอร์สามารถฆ่าเชื้อโรคที่เป็นต้นเหตุของการเจ็บป่วยได้มากกว่า 650 ชนิด เช่น

- *Escherichia coli* สาเหตุของโรคท้องร่วงในเด็กเล็ก
- *Pseudomonas* สาเหตุของการติดเชื้อในกระแสเลือด
- *Staphylococcus* สาเหตุของโรคผิวหนังต่างๆ
- *Salmonella* สาเหตุของโรคไข้ไทฟอยด์

2.3.2 นาโนเทคโนโลยีคืออะไร [5]

คำว่านาโน (Nano) แปลว่า คนแคระในภาษากรีก แต่โดยมากจะเป็นคำที่เรียกกันติดปากและย่อมาจากคำว่านาโนเมตร (Nanometre) ซึ่งหมายถึง สิบกำลังลบเก้าเมตร หรือ 1 ส่วนพันล้านของเมตร คำนิยามคร่าวๆของนาโนศาสตร์ (Nanoscience) ก็คือการศึกษาทางธรรมชาติของวัตถุที่มีขนาดในช่วงนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร)



รูปที่ 2.12 สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในระดับนาโนเมตร [6]

นาโนเทคโนโลยี หมายถึง เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้าง การสังเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร หรือผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตรเทียบเท่ากับระดับอนุภาค

ของโมเลกุลหรืออะตอม รวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือสร้างวัสดุที่อยู่ในระดับเล็กมากหรือ การเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำและถูกต้อง ทำให้โครงสร้างของวัสดุ หรือสสารมีคุณสมบัติพิเศษไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพส่งผลให้มีผลประโยชน์ต่อผู้ใช้สอย

2.3.3 ซิลเวอร์นาโน

ซิลเวอร์นาโน คือ อนุภาคซิลเวอร์ที่ถูกทำให้มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตรเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับเชื้อโรค และด้วยขนาดที่เล็กมากทำให้ใช้ซิลเวอร์เพียงเล็กน้อยก็สามารถครอบคลุมพื้นที่และเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกับเชื้อโรคได้มากขึ้น โดยประโยชน์ของซิลเวอร์นาโน มีดังนี้

1. เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดีที่สุด
2. ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดอินทรีย์
3. สามารถฆ่าเชื้อโรคได้

ซึ่งมีการทดลองใช้ซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) กับแบคทีเรียแกรมบวก *S.aureus* [17] และแบคทีเรียแกรมลบ *E. coli* [17] พบว่าซิลเวอร์ไอออนสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่าซิลเวอร์ไอออนจะกระจายอยู่ตามผนังเซลล์และแทรกเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรียและทำให้เกิดการรวมตัว (condensation) ของดีเอ็นเอภายในเซลล์ ทำให้คาดได้ว่ากลไกในการฆ่าแบคทีเรียของซิลเวอร์ไอออน คือ ซิลเวอร์ไอออนจับกับโปรตีนที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่หมู่ thiol (-SH) เนื่องจากซิลเวอร์ไอออนเป็นเบสอ่อนจึงสามารถจับกับกรดอ่อน เช่น กำมะถัน (S) และฟอสฟอรัส (P) ได้ดี ซิลเวอร์ไอออนทำให้โปรตีนแปลงสภาพ (Denature) ส่งผลให้การควบคุมการขนส่งสารเข้าและออกจากเซลล์ผิดปกติ ซิลเวอร์ไอออนจึงสามารถแทรกเข้าไปภายในเซลล์ได้ ซิลเวอร์ไอออนที่แทรกเข้าไปภายในเซลล์ทำให้ดีเอ็นเอภายในเซลล์ซึ่งประกอบด้วยฟอสฟอรัสจำนวนมากเกิดการรวมตัวและสูญเสียความสามารถในการเพิ่มจำนวน (Replication) แบคทีเรียจึงไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้และซิลเวอร์ไอออนที่แทรกเข้าไปภายในเซลล์ยังสามารถจับกับโปรตีนที่สำคัญอื่นๆอีก เช่น โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการหายใจระดับเซลล์ เมื่อโปรตีนเหล่านั้นไม่สามารถทำงานได้ตามปกติแบคทีเรียก็จะตาย นอกจากนี้การขนส่งสารเข้าออกเซลล์ที่ผิดปกตินี้จะทำให้เซลล์แตกทำให้แบคทีเรียตายในที่สุด กลไกการทำงานของซิลเวอร์ไอออนข้างต้นมีประสิทธิภาพสูงกับแบคทีเรียแกรมลบมากกว่าแบคทีเรียแกรมบวกเนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบมีชั้น Peptidoglycan ที่บางกว่าแบคทีเรียแกรมบวก

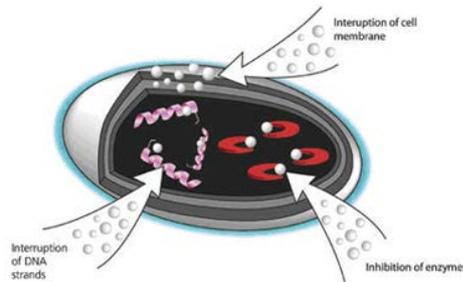
2.3.4 การผลิตซิลเวอร์นาโน

การผลิตซิลเวอร์นาโนโดยวิธีการทางเคมีมีหลายวิธี โดยส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้ปฏิกิริยารีดักชันของเกลือซิลเวอร์ เช่น การรีดิวซ์ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) เกิดเป็นอนุภาคของซิลเวอร์นาโนซึ่งเป็นคอลลอยด์ที่มีสีเหลืองใส ทำการวัด UV Spectrophotometry เพื่อดู absorption spectrum ยืนยันการเกิดซิลเวอร์นาโนโดยมี absorption band ที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตร [18] คอลลอยด์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน มีความคงตัวอยู่เพียงช่วงหนึ่งจึงทำการเติมสารที่ช่วยเพิ่มความคงตัวของคอลลอยด์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน เพื่อช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคซิลเวอร์นาโนทำให้คอลลอยด์มีความคงตัวมากขึ้น สารเพิ่มเสถียรภาพที่นิยมใช้คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์, พอลิไวนิลไพโรลิโดน, Bovine serum albumin, โซเดียมโตนเดคซิล

2.3.5 กระบวนการในการฆ่าเชื้อของซิลเวอร์นาโน [19]

3 กลไกหลักที่ทำให้อนุภาคนาโนของซิลเวอร์สามารถต่อต้านแบคทีเรียได้ดี ได้แก่

1. อนุภาคนาโนของซิลเวอร์ในช่วง 1 – 10 nm จับกับผิวหน้าของเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียและรบกวนการทำงานระดับเซลล์ของแบคทีเรีย เช่น การขนส่งสารเข้าออกจากเซลล์และการหายใจ
2. อนุภาคนาโนของซิลเวอร์สามารถแทรกเข้าไปภายในเซลล์แบคทีเรียได้และรบกวนการทำงานในระดับโมเลกุล โดยจับกับสารที่มีกำมะถันและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ เช่น ดีเอ็นเอ
3. อนุภาคนาโนของซิลเวอร์เกิดการสลายตัวและปลดปล่อยซิลเวอร์ไอออนเนื่องจากอนุภาคนาโนของซิลเวอร์มีขนาดเล็กและมีเป็นจำนวนมาก ทำให้สามารถปลดปล่อยซิลเวอร์ไอออนออกมาด้วยความเข้มข้นสูง สามารถฆ่าแบคทีเรียได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.13 การทำงานของซิลเวอร์นาโนในการฆ่าเชื้อ [19]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

P.S.K. Murthy และคณะ (2008) [2] เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ Semi-IPN hydrogel โดย IPN (Interpenetrating polymer network) เป็นพอลิเมอร์ผสมกันที่เป็นโครงร่างตาข่าย แต่ไม่ได้เชื่อมโยงแบบพันธะเคมี ในงานวิจัยนี้เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) กับพอลิอะคริลาไมด์ (PAM) โดยสามารถเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์เข้าไปได้ โดยขนาดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่เหมาะสมคือ 3-5 nm ทำได้โดยเตรียม Semi-IPN hydrogel โดยผสมพอลิอะคริลาไมด์กับพอลิไวนิลไพโรลิโดนให้เกิดปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ โดยใช้ N,N-methylenebisacrylamide (MBA) เป็นสารเชื่อมโยง และใช้ Ammonium persulfate/N,N,N',N'-tetramethylethylenediamine (TMEDA) เป็น Redox-initiating pair เมื่อยังเพิ่มความเข้มข้นของ MBA จะทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในโครงร่างตาข่ายไฮโดรเจลได้มากขึ้น

Y. Murali Mohan และคณะ (2007) [3] การสังเคราะห์ไฮโดรเจลระหว่างเอ็น-ไอโซพโรพิลอะคริลาไมด์ (NIPAM) และโซเดียมอะคริเลต (SA) เตรียมจากปฏิกิริยา Redox-polymerization เมื่อใส่อนุภาคนาโนซิลเวอร์จะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอนุภาคนาโนซิลเวอร์มาจากปฏิกิริยารีดอกซ์ของซิลเวอร์ในเทรตจากโซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ใช้ N,N-methylenebisacrylamide (MBA) เป็นสารเชื่อมโยง และใช้ Ammonium persulfate/N,N,N',N'-tetramethylethylenediamine (TMEDA) เป็น redox-initiating pair นำมาทำปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระหลังจากนั้นเติมซิลเวอร์ในเทรตจะทำให้ซิลเวอร์ไอออนเข้าไปในเจล

ได้ศึกษาการเปลี่ยนความเข้มข้นของ MBA ทำให้ได้โครงสร้างที่มีการเชื่อมโยงที่ต่างกัน ตรวจสอบว่าเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโนจาก XRD หาปริมาณอนุภาคซิลเวอร์จาก UV-vis ดูลักษณะพื้นผิวของเจลจาก SEM หา T_g ของเจลได้จาก DSC นำไปทดสอบสมบัติการต้านเชื้อ E.coil พบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนขนาดเล็กจะแพร่ออกมาได้ดีกว่าขนาดใหญ่ แต่ประสิทธิภาพการต้านเชื้อด้อยกว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดใหญ่กว่า

K.C. Song และคณะ (2009) [18] เป็นการศึกษาปฏิกิริยารีดักชันของซิลเวอร์ในเทรตในน้ำกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์มีโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพ โดยอนุภาคซิลเวอร์นาโนอยู่ในสถานะคอลลอยด์ สามารถตรวจสอบขนาดอนุภาคนาโนด้วย UV-Vis Absorption Spectra และ TEM โดยพิกที่ได้จะมีพิกของโซเดียมโบโรไฮไดรด์และโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต โดยโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) เป็นตัวป้องกันการรวมตัวเป็นก้อนของอนุภาคซิลเวอร์ จากภาพ TEM พบว่า เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์มากขึ้นอนุภาคนาโนมีการกระจายตัวมากขึ้น ตัวแปรที่ศึกษาคือ ผลของความเข้มข้นของซิลเวอร์ในเทรตเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้อนุภาคซิลเวอร์นาโนมากขึ้นตรวจสอบได้จากพิกใน UV-Vis Absorption Spectra ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 400 nm พิกที่ได้จะสูงและแหลมขึ้น ผลของความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ โดยเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนระหว่าง $\text{NaBH}_4/\text{AgNO}_3$ ที่อัตราส่วนต่ำพบว่าความเข้มข้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโนน้อยลง และที่อัตราส่วนมากกว่า 2 จะพบอนุภาคซิลเวอร์นาโนมากขึ้นและมีการกระจายตัวที่ดี ซึ่งยืนยันได้จากภาพ TEM ผลของความเข้มข้นของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) มีผลมาจาก Steric effect ยิ่งอัตราส่วนมากจะยิ่งมีการกระจายมากขึ้น

L.C. de Santa Maria และคณะ (2009) [19] เป็นการศึกษาสังเคราะห์และยืนยันซิลเวอร์ที่นำไปผสมกับเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสให้อยู่ในรูปเจลลาติน โดยใช้ตัวรีดิวซ์ต่างกันคือ ไฮดราซีน (Hydrazine), ไฮดรอกซีลามีน (Hydroxylamine) และกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) เพื่อดูว่าสารตัวไหนสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีที่สุด โดยการนำเยื่อแบคทีเรียเซลลูโลสมาแช่ในสารละลายซิลเวอร์ในเทรต จากนั้นเติมตัวรีดิวซ์ แล้วนำของผสมทั้งหมดมาบวมตัวในเจลลาติน จากสมการ $2\text{AgOH} \rightleftharpoons \text{Ag}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ พบว่าเมื่อปริมาณไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลให้เกิดซิลเวอร์ออกไซด์มากขึ้น โดยกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) จะทำให้ไฮดรอกไซด์ลดลงมากที่สุด จึงมีปริมาณซิลเวอร์ที่อยู่ในเจลมากที่สุด hydrazine รองลงมา และ hydroxylamine น้อยที่สุดเพราะมีหมู่ไฮดรอกไซด์อยู่ในโครงสร้าง

Y.M. Mohan และคณะ (2009) [20] เตรียมไฮโดรเจลที่เกิดจากพอลิอะคริลาไมด์ (PAM) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนเข้าไปในโครงสร้าง โดยใช้ซิลเวอร์ในเทรต เป็นสารที่ให้ Ag^+ เกิดการแลกเปลี่ยนจากสารละลายไปสู่โครงสร้างตาข่ายของเจล หลังจากนั้นใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันเปลี่ยนจาก Ag^+ เป็น Ag^0 แล้วทำการตรวจวิเคราะห์ลักษณะด้วย UV-visible spectrophotometry, SPR phenomenon (Surface Plasmon Resonance), x-ray diffraction (XRD), TEM (Transmission Electron Microscopy) เพื่อยืนยันว่ามีซิลเวอร์นาโนในโครงสร้างของไฮโดรเจล และ ตรวจการฆ่าเชื้อเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบ คือ

E.coli และ Bacillus โดยดูจากการเจริญเติบโตของ 2 ตัวนี้ ยังมีปริมาณซิลเวอร์มากจะก็ยิ่งฆ่าเชื้อได้เร็วแสดงถึงประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อของซิลเวอร์

Y. Lu และคณะ (2007) [21] เป็นการใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยอาศัยตัวกลางเป็นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ที่ใช้ตัวเชื่อมโยงเป็นไดไวนิลซัลโฟน (DVS) ในไฮโดรเจลผสมที่เกิดจากพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนไกลคอลเมทาอะคริเลต โดยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เป็นตัวหลักในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันซึ่งใช้ตัวเร่งช่วยเป็น 4-nitrophenol ทำให้เกิดการเปลี่ยนจาก Ag^+ เป็น Ag^0 เตรียมไฮโดรเจลโดยการผสม PVA+DVS+PS-PEGMA particle จะทำให้เกิดไฮโดรเจลที่มีพื้นที่ว่างและมีการเชื่อมกันของ PS-PEGMA particle กับ PVA ด้วย DVS หลังจากนั้นทำการใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยการเติมซิลเวอร์ในเทรตที่เข้มข้น 0.06 M จะทำให้ Ag^+ เข้าไปในพื้นที่ว่างของเจลแล้วทำการแช่น้ำและพ่นแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 20 นาที ทำการรีดักชันด้วยการเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์เข้มข้น 0.03 M ซึ่งเมื่อใช้ตัวเร่งช่วยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น ทำให้ได้อนุภาคซิลเวอร์นาโนไปอยู่ในไฮโดรเจล ตรวจด้วย FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) พบการกระจายของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในไฮโดรเจล

V.K. Sharma และคณะ (2009) [22] เป็นการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนแบบ Green โดยใช้ตัวรีดิวซ์ต่างชนิดกัน ได้แก่

แบบที่ 1 ใช้ Polysaccharide เป็นการเตรียมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยให้ Polysaccharide บวมตัวในน้ำใช้ Polysaccharide เป็นทั้งตัวรีดิวซ์และ capping agent และเติมเฮพาริน (heparin) เป็นตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มเสถียรภาพ (stabilizing) โดยยังเพิ่มความเข้มข้นของซิลเวอร์ในเทรตและเฮพารินมาก จะยิ่งทำให้เกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์มากขึ้น

แบบที่ 2 ใช้ Tollens เกิดปฏิกิริยาดังสมการนี้

$Ag(NH_3)_2^+ (aq) + RCHO (aq) \longrightarrow Ag (s) + RCOOH (aq)$ โดย $Ag(NH_3)_2^+ (aq)$ เป็น Tollens reagent โดย Ag^+ จะถูกรีดักชัน โดย Polysaccharide โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียมีผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ยิ่งความเข้มข้นน้อย จะทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็ก

แบบที่ 3 วิธี Biological โดนการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของซิลเวอร์ไอออน ด้วยเอนไซม์/โปรตีน, กรดอะมิโน, Polysaccharide และวิตามิน โดยเกิดอยู่ในรูปสารเชิงซ้อน ซึ่งสารที่นำมาเป็นตัวรีดิวซ์ต้องมี 2 หมู่ฟังก์ชันคือ หมู่ carboxyl กับหมู่ hydroxyl

แบบที่ 4 ใช้ Polyoxometalate เนื่องจาก Polyoxometalate เป็นสารที่ละลายได้ในน้ำ และมีอิเล็กตรอนมาก สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดี จึงใช้ Polyoxometalate เป็นทั้ง Photocatalyst, ตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มเสถียรภาพ โดยใช้ซิลเวอร์ซัลเฟตในการทำปฏิกิริयरูปร่างและขนาดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ขึ้นกับชนิดของ Polyoxometalate

J.W. Kwon และคณะ (2005) [23] เป็นฟิล์มที่ผสมเซลล์ลูโลสอะซิเทรตกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโนจากปฏิกิริยาดังสมการ $2AgNO_3 \longrightarrow 2Ag + 2NO_2 + O_2$ แต่จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 414 องศาเซลเซียสที่บรรยากาศปกติ แต่ที่สุญญากาศหรือที่บรรยากาศเป็นก๊าซเฉื่อย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือไนโตรเจน (N_2) จะสลายตัวที่อุณหภูมิ 100 องศา

เซลเซียส โดยฟิล์มจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีดำของอนุภาคซิลเวอร์นาโน หลังจากเกิดปฏิกิริยา Thermal reduction ถ้าเกิดการการรีดักชันที่บรรยากาศ H_2 หรือ O_2 ฟิล์มจะเริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิห้อง และที่ 120 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ ยืนยันได้จาก IR และ TEM

N.D. Luong และคณะ (2009) [24] เป็นการศึกษาการใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโนในปริมาณมากเข้าสู่สารชีวภาพที่สามารถย่อยสลายตัวได้และสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพของเส้นใยนาโนเซลลูโลสอะซิเตตแอโรเจล (Cellulose Acetate Nanofibrillar Aerogel) โดยเตรียมเส้นใยนาโนเซลลูโลสอะซิเตตแอโรเจลโดยการผสมเซลลูโลสอะซิเตตกับแคลเซียมไทโอไซยาเนต นำไปใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยแช่ในซิลเวอร์ไนเตรต 0.1 M จะทำให้ Ag^+ เข้าไปในแอโรเจล ทำการแช่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (100 mM) เป็นการรีดักชัน เนื่องจากเส้นใยนาโนเซลลูโลสอะซิเตตแอโรเจล มีอิเล็กตรอนที่ออกซิเจนจึงทำให้ Ag^+ เข้าไปได้ โดยอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 2.8 nm และสามารถวัดปริมาณซิลเวอร์ได้ถึง 6.98%wt ทำการวัดโครงสร้างของเส้นใยนาโนมีเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 20-50 nm วัดพื้นที่ผิวด้วย BET surface area เท่ากับ $110\text{ m}^2/\text{g}$ และมี Porosity คือ 96% ตรวจวัดด้วย TEM บอกขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่กระจายตัวอยู่ได้

บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินการ

3.1 สารเคมี

1. กัวร์กัม (Guar Gum: GG) บริษัทรวมเคมี จำกัด เกรดการค้า
2. โซเดียมอัลจีเนต (Sodium alginate: Na-ALG) เกรดการค้า
3. โซเดียมเตตระโบเรต (Sodium tetraborate: $\text{Na[B}_4\text{O}_5(\text{OH})\cdot 8\text{H}_2\text{O}]$) เกรดวิเคราะห์
4. โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride: NaBH_4) เกรดวิเคราะห์
5. ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate: AgNO_3) เกรดวิเคราะห์

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องปั่นกวนแบบแม่เหล็ก บริษัท IKA รุ่น HS-5
2. ตู้อบ บริษัท Fisher Scientific รุ่น Isotemp
3. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument รุ่น TC-254
4. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyser, TGA) บริษัท Perkin Elmer รุ่น Pyris I
5. เครื่องวัดการคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence spectrometer, XRF) บริษัท Bruker AG รุ่น SRS 3400
6. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) บริษัท Bruker AG รุ่น D8 Advance

3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายตั้งต้น

3.3.1 สารละลายโซเดียมเตตระโบเรต

ชั่งโซเดียมเตตระโบเรต 0.1 g, 0.2 g และ 0.3 g ละลายในน้ำกลั่น 10 ml จะได้โซเดียมเตตระโบเรตเข้มข้น 1, 2 และ 3 %โดยน้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ

3.3.2 สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต

ชั่งซิลเวอร์ไนเตรต 0.34 g, 0.85 g และ 1.7 g ลงในขวดวัดปริมาตร 100 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเข้มข้น 0.02 M, 0.05 M และ 0.1 M ตามลำดับ

3.3.3 สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.01 M

ชั่งโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.019 g ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น (เตรียมสารละลายใหม่ทุกครั้ง)

3.4 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจล

1. ชั่งโซเดียมอัลจีเนตและกัวร์กัมตามตารางที่ 3.1
2. ผสมโซเดียมอัลจีเนตและกัวร์กัมเข้าด้วยกัน
3. ละลายของผสมในน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน ของผสม : น้ำกลั่น เท่ากับ 1:40 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 °C

4. เติมสารละลายโซเดียมเทรสบอเรตปริมาณ 10 ml ลงในสารละลายข้อ 3.
5. ปั่นกวนต่ออีก 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60 °C
6. นำไฮโดรเจลที่ได้ไปล้างสารตั้งต้นที่ตกค้างอยู่โดยการแช่ในน้ำกลั่น
7. นำไฮโดรเจลที่ล้างแล้วไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C
8. บดให้ละเอียด

3.4.1 ความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเทรต

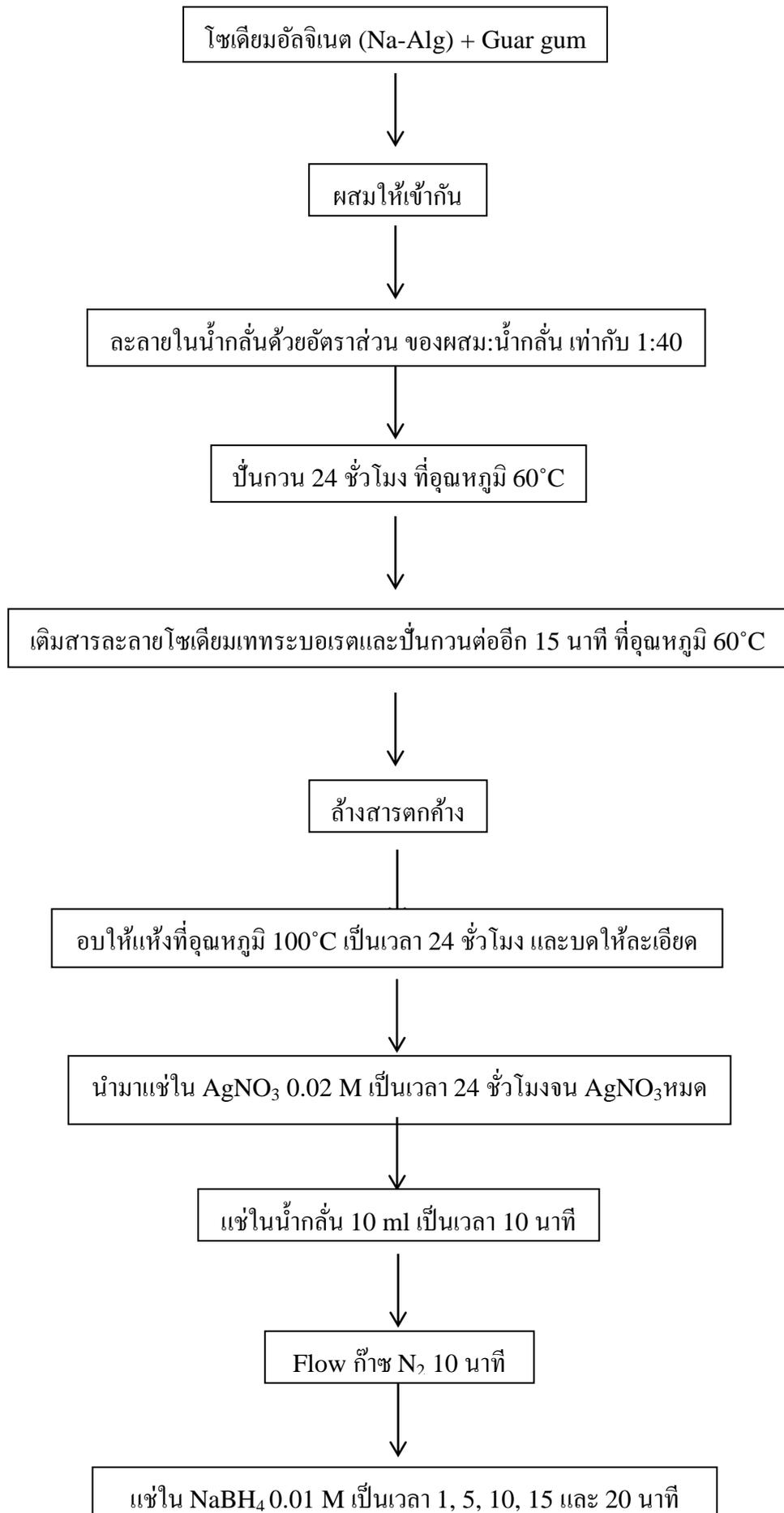
1. ชั่งไฮโดรเจลที่บดละเอียดมา 0.1 g แช่ในสารละลายซิลเวอร์ไนเทรต 15 เท่าของน้ำหนักไฮโดรเจลที่ความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเทรตต่างกันคือ 0.02 ,0.05 และ 0.1 M
2. วัดระยะเวลาในการดูดซับสารละลายซิลเวอร์ไนเทรต เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสม

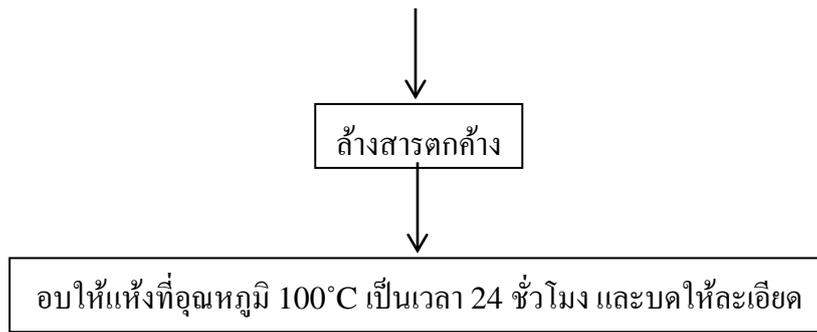
3.4.2 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจลที่มีซิลเวอร์เป็นองค์ประกอบ

1. ชั่งไฮโดรเจลที่บดละเอียดมา 0.1g แช่ในสารละลายซิลเวอร์ไนเทรต 0.02 M ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไฮโดรเจล : สารละลายซิลเวอร์ไนเทรตเท่ากับ 1:10 ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ไฮโดรเจลดูดซับสารละลายซิลเวอร์ไนเทรตจนสมบูรณ์
2. นำไฮโดรเจลมาแช่ในน้ำกลั่น 10 ml เป็นเวลา 10 นาที
3. จากนั้นนำมาผ่านก๊าซไนโตรเจนอีก 10 นาที
4. นำไฮโดรเจลที่ผ่านก๊าซไนโตรเจนแล้วมาแช่สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์เข้มข้น 0.01 M เป็นเวลา 1, 5, 10 15 และ 20 นาที
5. ล้างไฮโดรเจลด้วยน้ำกลั่น
6. นำไฮโดรเจลที่ล้างแล้วไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบดให้ละเอียด

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนตกับกัวร์กัม

สูตร	องค์ประกอบ		ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโซเดียมเทรสบอเรต (%โดยน้ำหนัก)
	Na-Alg	Guar gum	
A4G6-2	40	60	0.2
A6G4-2	60	40	
A4G6-4	40	60	0.4
A6G4-4	60	40	
A4G6-6	40	60	0.6
A6G4-6	60	40	





รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการเตรียมไฮโดรเจล

3.5 การตรวจวิเคราะห์

3.5.1 X-Ray Diffractometer, XRD

นำไฮโดรเจลที่บดแล้วไปทดสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

- โหมควิเคราะห์ธาตุเพื่อบอกปริมาณของซิลเวอร์ในโครงสร้าง

3.5.2 X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF

นำไฮโดรเจลที่บดแล้วไปทดสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF)

- โดย scan ที่ช่วง 2θ เท่ากับ 0 ถึง 80 เพื่อยืนยันชนิดของซิลเวอร์ในโครงสร้าง

3.5.3 Thermogravimetric Analysis, TGA

นำไฮโดรเจลที่บดแล้วไปทดสอบด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA) โดยมีสภาวะในการทดลองดังนี้

อัตราการให้ความร้อน : 20 °C/min

ช่วงอุณหภูมิในการวิเคราะห์ : 50-700 °C

ภายใต้บรรยากาศ : ไนโตรเจน

3.6 การทดสอบการฆ่าเชื้อ

โดยใช้เทคนิค Agar well diffusion

1. ชั่งน้ำหนักไฮโดรเจลที่บดละเอียด 0.5 g แล้วมาทำการบวมตัวด้วยน้ำกลั่น (ปริมาณ 5 ml) จนอิ่มตัวในเวลา 24 ชั่วโมงในหลอดทดลองขนาดเล็ก
2. เตรียมแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบ คือ *Bacillus subtilis* และ *Escherichia coli* ที่หน่วยบริหารจัดการทรัพยากรจุลินทรีย์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. นำไปวางในจานเพาะเชื้อ
4. วัดขนาดของพื้นที่ของเชื้อแบคทีเรียที่เวลา 24 ชั่วโมง

โดยทำการทดสอบการฆ่าเชื้อที่หน่วยบริหารจัดการทรัพยากรจุลินทรีย์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.7 การทดสอบการบวมตัว

1. ชั่งไฮโดรเจลที่บดละเอียดมา 0.05 g
2. ห่อด้วยตะแกรงลวด
3. แช่ตะแกรงลวดที่มีไฮโดรเจลอยู่ในลงน้ำกลั่น
4. ชั่งน้ำหนักที่เวลา 10, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที
5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมตัวโดยใช้สูตร

$$\% \text{ การบวมตัว} = \frac{\text{น้ำหนักของเจลที่บวมตัว} - \text{น้ำหนักเจลแห้ง}}{\text{น้ำหนักเจลแห้ง}} \times 100$$

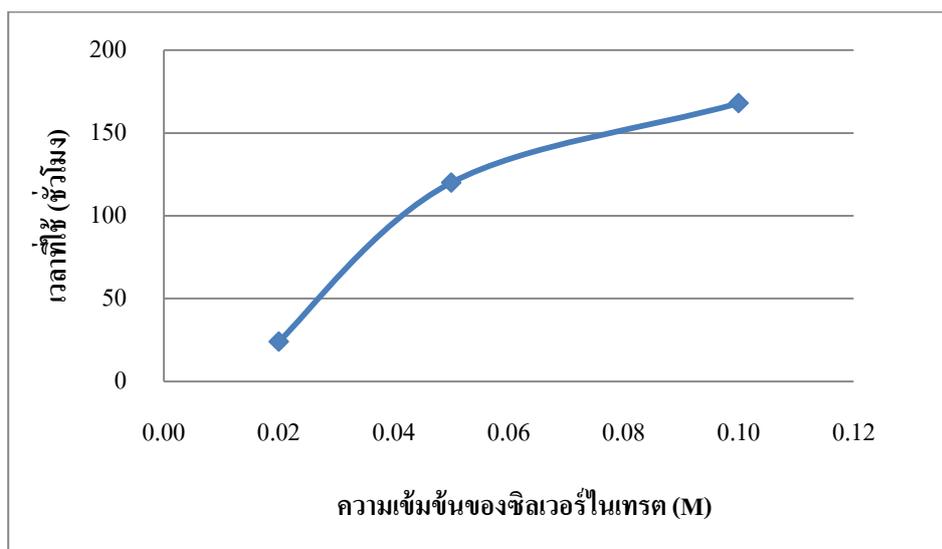
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติการต้านเชื้อของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัมเมื่อมีองค์ประกอบของซิลเวอร์อยู่ภายใน ซึ่งเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยารีดักชันของซิลเวอร์ในเทรตด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล โดยมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเทรตและระยะเวลาในการแช่เจลในสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ผลการทดลองแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเทรต

การทดลองในส่วนนี้ศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเทรตที่มีผลต่อระยะเวลาในการดูดซับสารของไฮโดรเจล โดยใช้ความเข้มข้นในช่วง 0.02 M ถึง 0.10 M ภายใต้อุณหภูมิ 30°C ปริมาณ 15 เท่าของน้ำหนักเจลแห้ง โดยเลือกใช้เจลสูตร A4G6B0.6



รูปที่ 4.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเทรตที่มีต่อเวลาในการดูดซับของไฮโดรเจลที่ 30°C ปริมาณ 15 เท่า

รูปที่ 4.1 แสดงผลของเวลาที่เจลใช้ในการดูดซับสารละลายซิลเวอร์ในเทรตที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งพบว่าที่ความเข้มข้น 0.02 M ไฮโดรเจลใช้เวลาในการดูดซับสารละลายซิลเวอร์ในเทรตน้อยที่สุด โดยสามารถดูดซับสารละลายซิลเวอร์ในเทรตปริมาณ 15 เท่าได้หมดภายในเวลา 24 ชั่วโมง (ทดสอบโดยการคว่ำภาชนะที่บรรจุไม่พบสารละลายเหลืออยู่) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเทรตเป็น 0.05M และ 0.1M พบระยะเวลาที่เจลใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากเป็น 120 ชั่วโมง และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ เนื่องจากมีจำนวนซิลเวอร์ปริมาณมาก ทำให้ต้องใช้เวลานานในการดูดซับจนหมด ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้สารละลายซิลเวอร์ในเทรตเข้มข้น

0.02 M และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์เท่ากับ 0.01 M โดยการอ้างอิงจากเอกสารอ้างอิง [21]

4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรเจลที่บรรจุธาตุซิลเวอร์

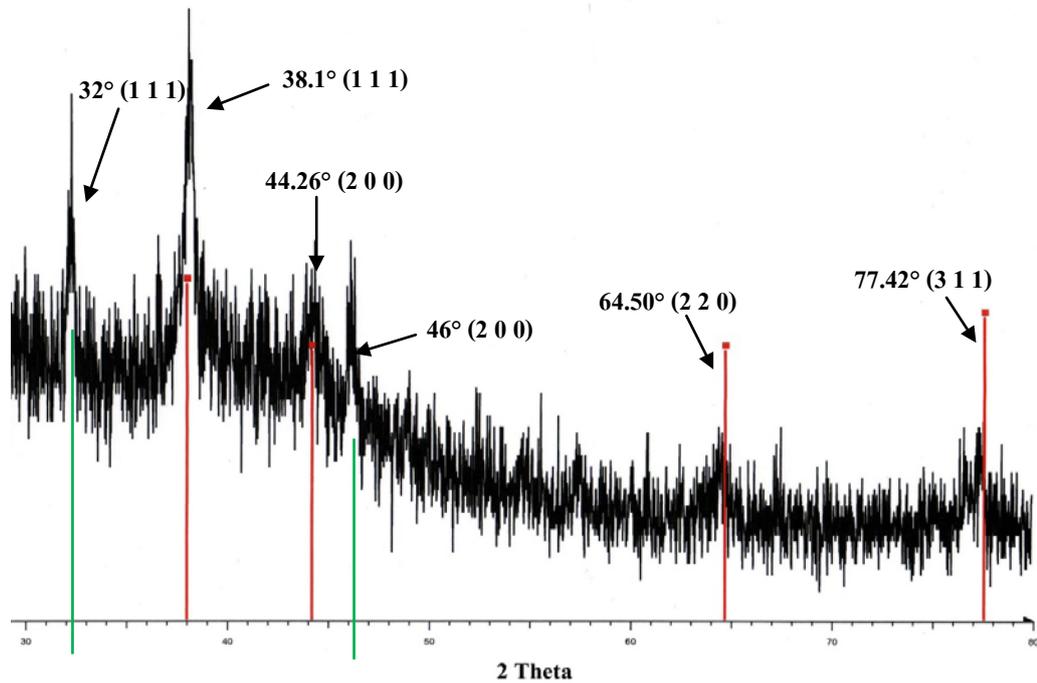
ไฮโดรเจลที่บรรจุซิลเวอร์แล้วนำมาตรวจสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD, XRF, TGA และ ศึกษาการบวมตัวไฮโดรเจลที่บรรจุซิลเวอร์แล้วในรูปของแข็งที่บดละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าลักษณะของไฮโดรเจลที่บรรจุซิลเวอร์มีสีดำ



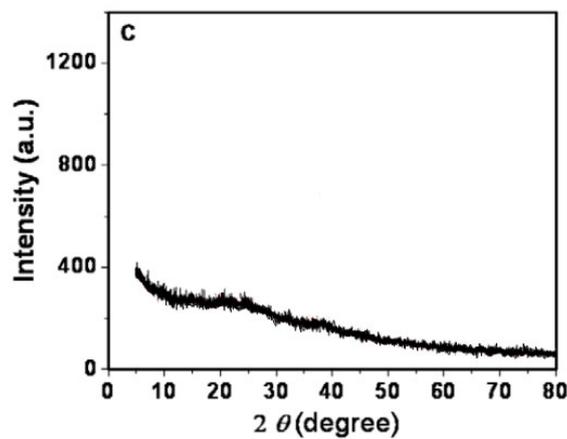
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายกำลังขยาย (60 เท่า) ผงไฮโดรเจลที่บรรจุซิลเวอร์แล้ว

4.2.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

เมื่อนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าภูมิภาคที่เป็นผลึกประกอบด้วยพีคของซิลเวอร์ ซึ่งมีพีคที่สำคัญที่ตำแหน่งของ 2θ เท่ากับ 38.1° ($1\ 1\ 1$), 44.26° ($2\ 0\ 0$), 64.50° ($2\ 2\ 0$) และ 77.42° ($3\ 1\ 1$) ที่เป็นสัญญาณของซิลเวอร์แบบ FCC [25] พีคที่สำคัญที่ตำแหน่งของ 2θ เท่ากับ 32° ($1\ 1\ 1$) คือ พีคของซิลเวอร์ออกไซด์ [25] และพีคที่สำคัญที่ตำแหน่งของ 2θ เท่ากับ 46° ($2\ 0\ 0$) คาดว่าเป็น พีคของซิลเวอร์คลอไรด์และนิกเกิลออกไซด์ที่ปนเปื้อนจากการวิเคราะห์ [26] โดยผลจาก XRF พบองค์ประกอบธาตุ Cl และ สารประกอบ NiO ดังแสดงในตารางที่ ก.1 – ก.15

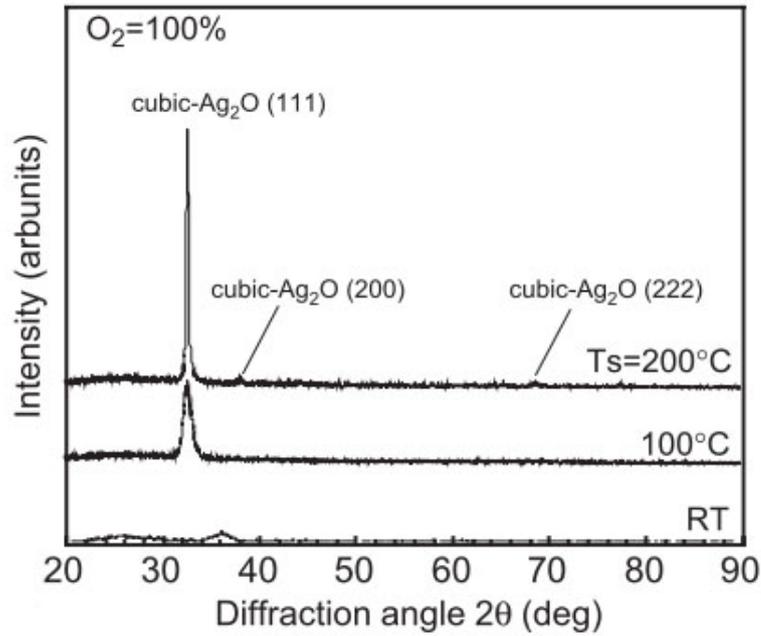


รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรเจลที่บรรจุซิลเวอร์



รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรเจลที่ไม่มีการเติมซิลเวอร์ [20]

ไฮโดรเจลที่ไม่มีการเติมซิลเวอร์ลงไปจะไม่ปรากฏพีกที่สำคัญที่ตำแหน่งของ 2θ ดังกล่าว (รูปที่ 4.4) [20] ในรูปที่ 4.3 พบพีกที่สำคัญที่ตำแหน่งของ 2θ เท่ากับ 32° คือสารประกอบ Ag_2O โดยยืนยันได้จากรูปที่ 4.5 [25] ซึ่งผลของ XRD ที่แสดงเอกลักษณ์ของ Ag^0 และ Ag_2O ดังที่กล่าวแล้ว



รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของซิลเวอร์ออกไซด์ [25]

4.2.2 เทคนิคการคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence, XRF)

เมื่อนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRF พบว่ามีซิลเวอร์เป็นองค์ประกอบ โดย XRF จะให้ผลในรูปของธาตุซิลเวอร์ เนื่องจากใช้โหนดวิเคราะห์เป็นธาตุ ดังตารางที่ 4.1 ข้อมูลรายงานผลจาก XRF แสดงในตารางที่ ก.1 - ก.15

ปริมาณของซิลเวอร์ในไฮโดรเจลแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 12-45 %โดยน้ำหนักซึ่งเป็นปริมาณของธาตุซิลเวอร์และซิลเวอร์ออกไซด์ รวมกันโดยไม่สามารถแบ่งแยกหาปริมาณได้ เนื่องจาก XRF เป็นการวิเคราะห์แต่ไอเล็กตรอนในธาตุโดยไม่สนใจอะตอมที่ติดอยู่

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซิลเวอร์ในไฮโดรเจลแต่ละสูตร

ตัวอย่าง	Na-Alg	GG	ความเข้มข้นของ Borax(M)	ระยะเวลาในการแช่ NaBH ₄ (นาที)	ปริมาณ Ag (%)
A4G6B0.6, 1	40	60	0.6	1	16.50
A4G6B0.6, 5	40	60	0.6	5	12.00
A4G6B0.6, 10	40	60	0.6	10	23.10
A4G6B0.6, 15	40	60	0.6	15	26.80
A4G6B0.6, 20	40	60	0.6	20	26.50
A4G6B0.2, 1	40	60	0.2	1	17.60
A4G6B0.2, 20	40	60	0.2	20	17.60
A4G6B0.4, 1	40	60	0.4	1	16.70
A4G6B0.4, 20	40	60	0.4	20	26.50

A6G4B0.2, 1	60	40	0.2	1	26.30
A6G4B0.2, 20	60	40	0.2	20	22.20
A6G4B0.4, 1	60	40	0.4	1	32.10
A6G4B0.4, 20	60	40	0.4	20	45.90
A6G4B0.6, 1	60	40	0.6	1	19.10
A6G4B0.6, 20	60	40	0.6	20	23.70

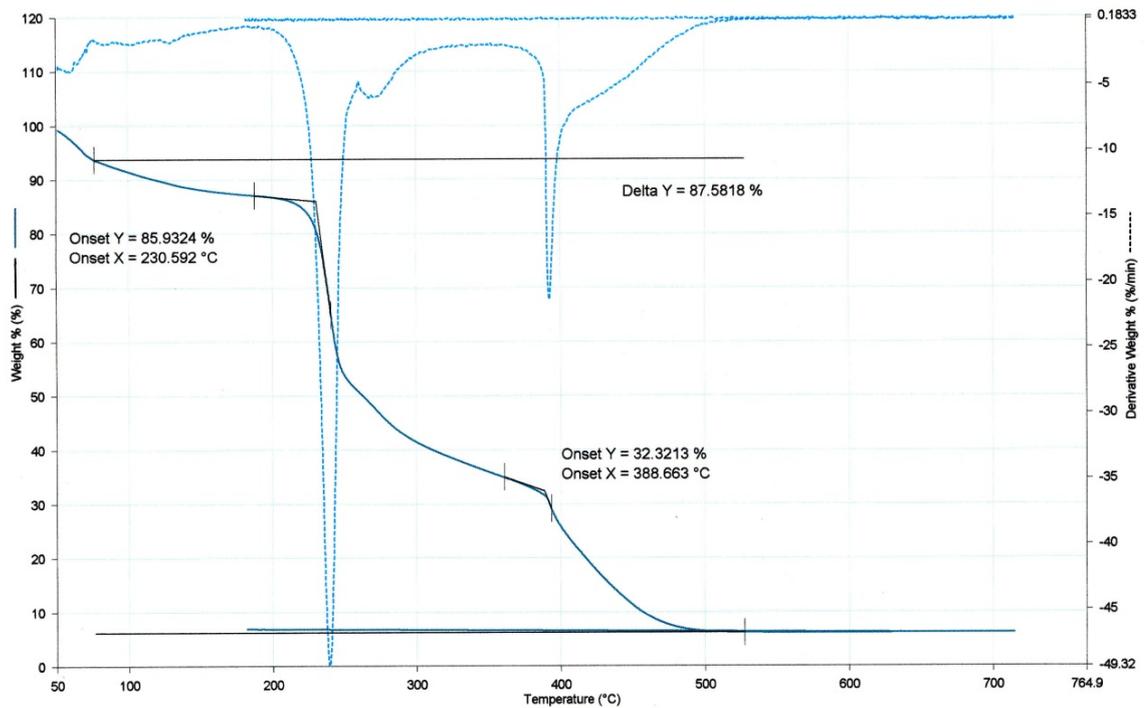
จากข้อมูลข้างต้นพบว่า

- เวลาในการแช่โซเดียมโบโรไฮไดรด์มีผลต่อปริมาณของซิลเวอร์ในไฮโดรเจล โดยไฮโดรเจลที่แช่โซเดียมโบโรไฮไดรด์นานกว่าพบว่ามีปริมาณของซิลเวอร์มากกว่าเนื่องจากโซเดียมโบโรไฮไดรด์มีเวลาในการแทรกตัวเข้าไปในไฮโดรเจลและทำปฏิกิริยากับซิลเวอร์ในเทรตได้ดีขึ้นทำให้พบซิลเวอร์มากกว่า
- สูตรที่มีการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเทตระบอเรตความเข้มข้น 0.4 % พบว่ามีปริมาณซิลเวอร์มากที่สุด เนื่องจากมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่เหมาะสมทำให้โซเดียมโบโรไฮไดรด์แทรกตัวเข้าไปในไฮโดรเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทำปฏิกิริยากับซิลเวอร์ในเทรตได้ซิลเวอร์ในปริมาณที่มากที่สุด สูตรที่มีการเชื่อมโยงโซเดียมเทตระบอเรตความเข้มข้น 0.6 % การเชื่อมโยงหนาแน่นมากกว่าทำให้สามารถดูดซับซิลเวอร์ได้ในปริมาณที่น้อยกว่าจึงพบปริมาณซิลเวอร์น้อยกว่า
- สูตรที่มีการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเทตระบอเรตความเข้มข้น 0.2 % พบว่ามีปริมาณซิลเวอร์น้อยกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจากไฮโดรเจลกลุ่มดังกล่าวมีการเชื่อมโยงน้อยอาจทำให้สารละลายซิลเวอร์ในเทรตละลายออกมาขณะเวลาที่แช่สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ส่งผลให้ปฏิกิริยารีดักชันบางส่วนเกิดภายนอกเจล ทำให้มีปริมาณซิลเวอร์ในไฮโดรเจล น้อยกว่าปกติ
- สูตรที่มีอัตราส่วนโซเดียมอัลจินตมากกว่ากัวร์กัมพบว่ามีซิลเวอร์ในไฮโดรเจลปริมาณที่มากกว่า เนื่องจากกัวร์กัมมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าโซเดียมอัลจินตเมื่อมีปริมาณกัวร์กัมมากอัตราการบวมตัวในช่วงต้นจะช้ากว่า ทำให้การแพร่ของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เข้าไปในเจลช้าและมีปริมาณน้อยจึงพบซิลเวอร์ในปริมาณน้อยกว่า
- สูตรไฮโดรเจลที่พบปริมาณซิลเวอร์สูงสุด คือ สูตร A6G4B0.4, 20 โดยพบซิลเวอร์ในปริมาณ 45.90 % โดยน้ำหนัก

4.2.3 Thermogravimetric Analysis, TGA

เมื่อนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค TGA ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนในช่วงอุณหภูมิ 50-700°C โดยอัตราการให้ความร้อน 20°C/min พบว่าไฮโดรเจลทุกสูตรมีลักษณะของกราฟที่วิเคราะห์จากเทคนิค TGA เหมือนกัน ในรูปที่ 4.6 ซึ่งกราฟของไฮโดรเจลสูตร A6G4B0.4, 1 พบว่าที่อุณหภูมิช่วง 220-245°C มีการสลายตัวของกัวร์กัมและอัลจินต (โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลในเอกสารอ้างอิงที่ [27]) ที่ช่วงอุณหภูมิ 380-400°C มีการสลายตัวของโซเดียม

คาร์บอนเนต (ที่เหลือจากการสลายตัวของอัลจินเนต) [28] และที่อุณหภูมิ 700°C ยังมีสารเหลืออยู่ซึ่ง คาดว่าเป็นสารประกอบของโลหะ อย่างไรก็ตามไม่สามารถหาปริมาณซิลเวอร์ที่ชัดเจนได้จากเทคนิค TGA เนื่องจากสารตั้งต้นของไฮโดรเจล ได้แก่ โซเดียมอัลจินเตมีองค์ประกอบของโลหะโดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะโซเดียมในโครงสร้าง จึงทำให้ไม่สามารถชี้ชัดได้ว่าส่วนที่เหลืออยู่หลังจากที่อุณหภูมิ 700°C เป็นองค์ประกอบของโลหะหรือออกไซด์ของโลหะซิลเวอร์หรือโลหะอื่นมีอยู่ในสารตั้งต้น ดังกล่าว โดยปริมาณองค์ประกอบที่เหลือในช่วง 12 ถึง 24 % wt



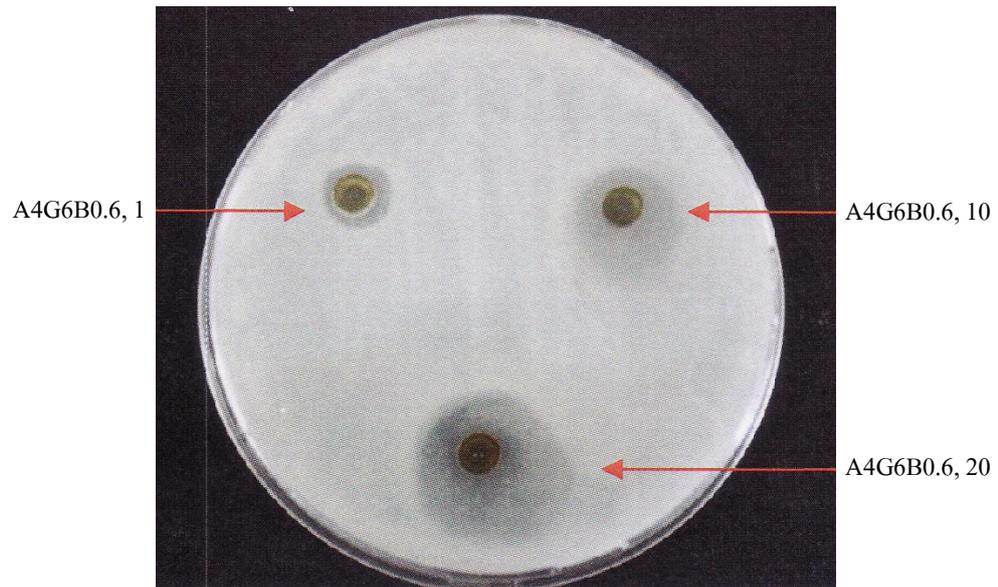
รูปที่ 4.6 กราฟจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของไฮโดรเจลสูตร A6G4B0.4, 1

4.3 การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย

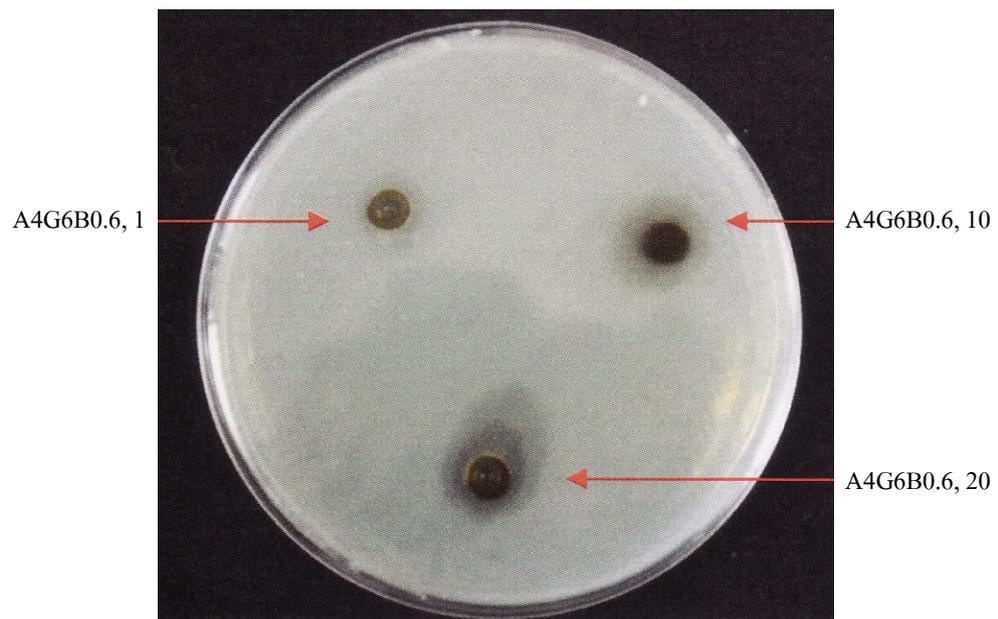
การทดสอบการฆ่าเชื้อโดยนำไฮโดรเจลที่บรรจุซิลเวอร์ไปบวมตัวในน้ำกลั่น (รูปที่ 4.7) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบของไฮโดรเจลสูตร A6G4B0.6 ใช้เทคนิค Agar well diffusion ชนิดแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบ คือ *Bacillus subtilis* และ *Escherichia coli* โดยทดสอบฤทธิ์การต้านเชื้อจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิ 36°C วัดพื้นที่ที่เวลา 24 ชั่วโมง (วัดระยะจากขอบของไฮโดรเจลถึงขอบบริเวณที่ฆ่าเชื้อ) พบว่าไฮโดรเจลที่บรรจุซิลเวอร์สามารถฆ่าเชื้อได้ทั้ง 2 ชนิดโดยสามารถต้านเชื้อจุลินทรีย์ชนิด *Escherichia coli* ได้ดีกว่าเชื้อจุลินทรีย์ชนิด *Bacillus subtilis* ดังรูปที่ 4.8-4.9 และผลการวัดระยะการต้านเชื้อแสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.7 ไฮโดรเจลสูตร A6G4B0.6 ที่ทำการบวมตัวแล้วที่มีปริมาณซิลเวอร์แตกต่างกัน



รูปที่ 4.8 ภาพแสดงการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ชนิด *Bacillus subtilis*



รูปที่ 4.9 ภาพแสดงการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ชนิด *Escherichia coli*

จากผลการทดสอบพบว่า

- เวลาในการแช่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ของเจลมีผลต่อความสามารถในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ โดยเจลสูตรที่แช่สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์นาน ความสามารถในการต้านเชื้อจุลินทรีย์จะดีขึ้น เนื่องจากมีปริมาณซิลเวอร์มากกว่าเจลสูตรที่มีการแช่โซเดียมเทรโบเรตที่เวลาสั้นกว่า
- เจลสูตรที่มีการเชื่อมโยงโซเดียมเทรโบเรตความเข้มข้น 0.4 % สามารถต้านเชื้อจุลินทรีย์

ได้ดีกว่าเจลสูตรที่มีการเชื่อมโยงโซเดียมเทตระบอเร็ตความเข้มข้น 0.6 % เนื่องจากเจลสูตรที่มีการเชื่อมโยงโซเดียมเทตระบอเร็ตความเข้มข้น 0.4 % ซิลเวอร์สามารถแพร่ออกมาจากไฮโดรเจลได้ง่ายกว่าเพราะเจลสูตรที่มีการเชื่อมโยงโซเดียมเทตระบอเร็ตความเข้มข้น 0.6 % มีการเชื่อมโยงที่หนาแน่นกว่าจึงใช้เวลาในการปลดปล่อยซิลเวอร์นานกว่าและในไฮโดรเจลก็มีปริมาณซิลเวอร์น้อยกว่า (จากผลของเทคนิค XRF ในตารางที่ 4.1) สูตรที่มีการเชื่อมโยงโซเดียมเทตระบอเร็ตความเข้มข้น 0.4 %

- เจลสูตรที่มีอัตราส่วนโซเดียมอัลจินเตมากกว่ากั้วร็กัมสามารถต้านเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีกว่าเจลที่มีอัตราส่วนโซเดียมอัลจินเตน้อยกว่ากั้วร็กัมเนื่องจากเจลสูตรที่มีปริมาณโซเดียมอัลจินเตมากพบว่ามีปริมาณซิลเวอร์ในไฮโดรเจลมากกว่าเจลสูตรที่มีปริมาณกั้วร็กัมมากและกั้วร็กัมมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าโซเดียมอัลจินเตทำให้การปลดปล่อยซิลเวอร์ต้องใช้เวลาานกว่าเจลสูตรที่มีอัตราส่วนโซเดียมอัลจินเตมากกว่ากั้วร็กัม

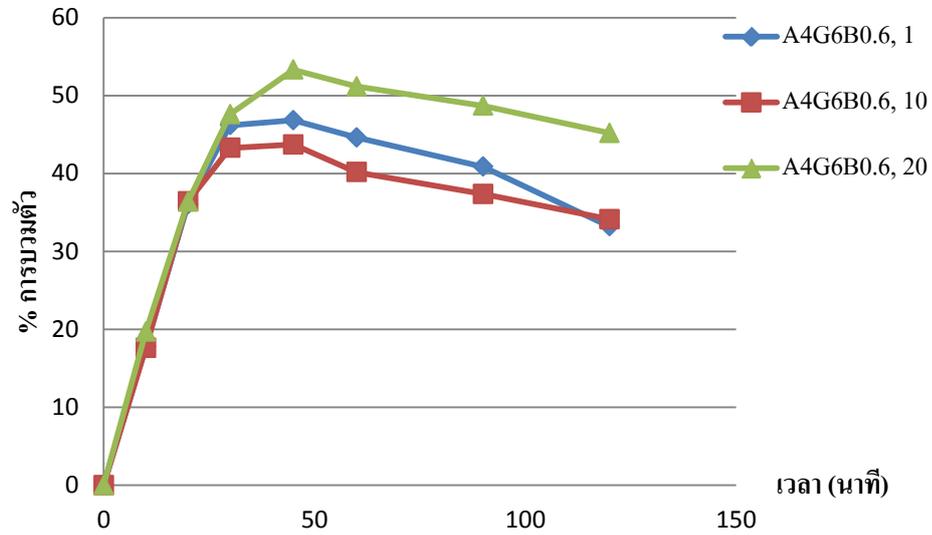
ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของไฮโดรเจลในแต่ละสูตร

SAMPLE	บริเวณการยับยั้ง (มิลลิเมตร)	
	<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Esherichia coli</i>
A4G6B0.6, 1	4.5	1.5
A4G6B0.6, 10	7.0	5.5
A4G6B0.6, 20	10.0	8.0
A4G6B0.4, 20	6.0	0.5
A6G4B0.4, 20	6.5	3.0
A6G4B0.6, 20	6.0	2.5

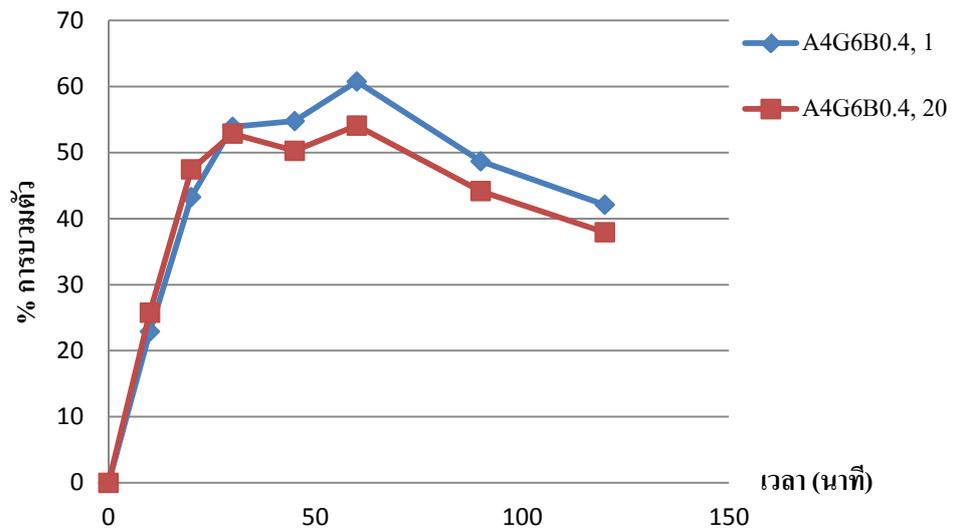
4.4 พฤติกรรมการบวมตัว

จากการทดสอบการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 25°C วัดที่เวลา 10, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที ผลแสดงดังรูปที่ 4.10 โดยพบว่า ค่าการบวมตัวสูงสุดอยู่ในช่วง 43-62 % ที่ช่วงเวลา 45-60 นาทีและค่าการบวมตัวมีค่าลดลงหลังจากเวลาการแช่นานกว่า 60 นาที โดยไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณโซเดียมอัลจินเตมากกว่ามีค่าการบวมตัวหลังการแช่นานกว่า 60 นาที และลดเร็วกว่าเจลสูตรที่มีปริมาณโซเดียมอัลจินเตน้อยกว่า โดยระยะเวลาในการแช่สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ต่างกันหรือสูตรเจลที่ต่างกันไม่ค่อยส่งผลให้ค่าการบวมตัวในน้ำกลั่นแตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลที่บรรจุซิลเวอร์ทุกสูตรมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับความสามารถในการบวม

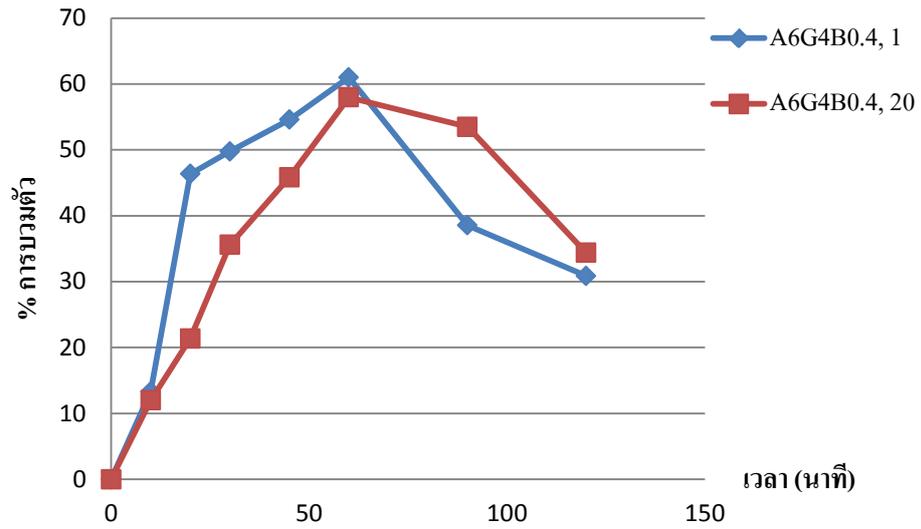
ตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลสูตรเดียวกันและไม่ได้บรรจุซิลเวอร์ลงไปซึ่งมีค่าการบวมตัวอยู่ในช่วง 60 เท่า [29]



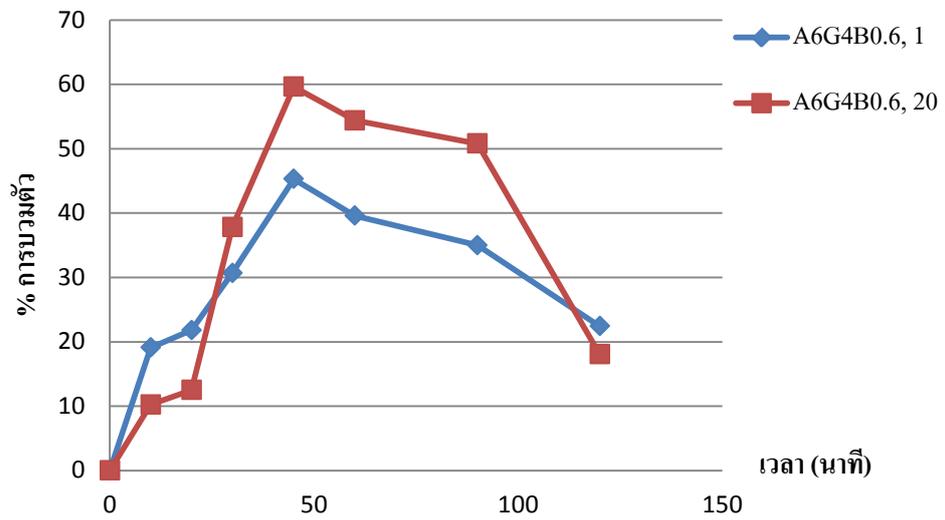
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.10 (ก) กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของไฮโดรเจลสูตร A4G6B0.6
 (ข) กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของไฮโดรเจลสูตร A4G6B0.4
 (ค) กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของไฮโดรเจลสูตร A6G4B0.4
 (ง) กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของไฮโดรเจลสูตร A6G4B0.6

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นมีสารตั้งต้นคือโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัมโดยใช้การเชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเทตระโบเรตปรับปรุงสมบัติการต้านเชื้อของไฮโดรเจล โดยการเติมซิลเวอร์ในรูปสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทเข้าไปในไฮโดรเจล แล้วทำการเปลี่ยนให้เป็นซิลเวอร์ โดยใช้ปฏิกิริยารีดักชันกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ซึ่งได้ทำการเปลี่ยนแปลงสูตรไฮโดรเจลคือ อัตราส่วนของโซเดียมอัลจิเนตกับกัวร์กัม (6:4 และ 4:6) ปริมาณการเชื่อมโยงของสารละลายโซเดียมเทตระโบเรต (0.2, 0.4 และ 0.6 %) และเวลาในการแช่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (1, 5, 10 และ 20 นาที) นำไปทดสอบการฆ่าเชื้อโดยวิธี Agar well diffusion ด้วย *Escherichia coli* และ *Bacillus subtilis* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ พบว่าสามารถต้านเชื้อจุลินทรีย์ชนิด *Bacillus subtilis* ได้ดีกว่าเชื้อจุลินทรีย์ชนิด *Escherichia coli* สูตรไฮโดรเจลที่ต้านเชื้อดีที่สุดคือ A4G6B0.6, 20 ไฮโดรเจลที่ได้นำไปตรวจสอบยืนยันองค์ประกอบซิลเวอร์ในเจล ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งพบว่าเจลทุกสูตรมีซิลเวอร์และซิลเวอร์ออกไซด์อยู่ในโครงสร้าง จากการหาปริมาณซิลเวอร์ด้วยเทคนิค XRF พบว่า ไฮโดรเจลมีปริมาณซิลเวอร์อยู่ในช่วง 12 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยสูตรที่มีปริมาณซิลเวอร์มากที่สุดคือ A6G4B0.4, 20 นอกจากนั้นนำเจลไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ซึ่งพบการสลายตัวของอัลจิเนตและกัวร์กัมที่อุณหภูมิช่วง 220-245°C โดยพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 380-400°C มีการสลายตัวของโซเดียมคาร์บอเนตและที่อุณหภูมิ 700°C ยังมีสารเหลืออยู่ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะ หรือออกไซด์ของโลหะ เมื่อนำเจลมาบวมตัวในน้ำกลั่นพบว่า สูตรที่ A6G4B0.6, 20 และ A6G4B0.4, 1 มีการบวมตัวสูงสุด โดยมีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยสูตรที่เหมาะสมที่จะใช้งานในการต้านเชื้อที่ใช้ระยะเวลาสั้นคือ A6G4B0.4, 20 เพราะว่ามีปริมาณซิลเวอร์มากที่สุดและมีอัตราการแพร่ของซิลเวอร์ช้าที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. เปลี่ยนชนิดไฮโดรเจลหรือปรับปรุงให้มีการปลดปล่อยซิลเวอร์ที่ช้าลง เพื่อปรับระยะเวลาการต้านเชื้อให้ยาวนานขึ้น
2. นำโคโตซานมาใช้เตรียมไฮโดรเจล และศึกษาความสามารถในการต้านเชื้อเปรียบเทียบกับผลที่ได้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. S. Nagashima, S. Ando, T. Tsukamoto, H. Ohshima and K.Makino. (1998). **“Preparation of monodisperse poly(acrylamide-co-acrylic acid) hydrogel microspheres by a membrane emulsification technique and their size-dependent surface properties”**. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 11, 47-56.
2. P.S.K. Murthy, Y. Murali Mohan, K. Varaprasad, B. Sreedhar and K. Mohana Raju. (2008). **“First successful design of semi-IPN hydrogel-silver nanocomposites: A facile approach for antibacterial application”**. Journal of Colloid and Interface Science, 318, 217-224.
3. Y. M. Mohan, K. Lee, T. Premkumar and K. E. Geckeler. (2007). **“Hydrogel networks as nanoreactors: A novel approach to silver nanoparticles for antibacterial applications”**. Polymer, 48, 158-164.
4. X. Li, W. Wu, J. Wang and Y. Duan. (2006). **“The swelling behavior and network parameters of guar gum/poly(acrylic acid) semi-interpenetrating polymer network hydrogels”**. Carbohydrate Polymers, 66, 473-479.
5. M. George and T.E. Abraha. (2007). **“pH sensitive alginate-guar gum hydrogel for the controlled delivery of protein drug”**. International Journal of Pharmaceutics, 335, 123-129.
6. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2007). **“ไฮโดรเจล (Hydrogel) เจลมหัศจรรย์”**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://www.nanotec.or.th/nanotec_th/view/index.php?c_id=96
7. E.H. Schacht. (2004). **“Polymer chemistry and hydrogel systems”**. Journal of Physics: Conference, Series 3, 22-28.
8. Y. Lui, M.B. Huglin and T.P. Davis. (1994). **“Preparation and characterization of some linear copolymer as precursors to thermoplastic hydrogels”**. European Polymer Journal, 30, 457-463.
9. B.D. Ratner. (1981). Biomedical Application of Hydrogel; Review and Critical Appraisal. In D.F. Williams. **Biocompatibility of Clinical Implant Material vol II** (p. 145-152), Boca Raton: CRC Press, Inc.
10. P.R. Babu, I.P. Sastry, C. Rose and N.M. Rao. (1997). **“Hydrogels based on gelation Poly(hydroxyethyl methacrylate) and Poly(butyl acrylate) graft copolymer Impregnated with fibrin”**. Journal Applied Polymer Science, 65, 555-560.

11. Y. Liu, M.B. Huglin and R. Mao. (1996). “Characteristics of copolymerisations involving dimethacrylamide and swelling behavior of the copolymers in water”. *Polymer*, 37, 5068-5075.
12. M.V. Seflon and Y. Yamamoto. (1996). “Hofmann degradation of acrylamide copolymer : Synthesis of amine function thermoplastic hydrogel”. *Journal Applied Polymer Science*, 61, 351-358.
13. M.B. Ahmad and M.B. Huglin. (1994). “State of water in Poly(methyl methacrylate-co-N-vinyl-2-pyrrolidone) hydrogels during swelling”. *Polymer*, 35,1997-2000.
14. F.M. Pathe. (1998). “Different states of water in hydrogels”. *Macromolecules*, 31, 6721- 6723.
15. ภัทธรานุช มนต์วิเศษ. (2553). เอกสารการสอนวิชา ไบโอฟอลิเมอร์. สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
16. ดุษฎี อุดภาพ. “Carbohydrate Technology”. (2554). [ออนไลน์].
เข้าถึงได้จาก
: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/subject.html>
17. ศูนย์วิจัยและบริการตรวจวินิจฉัยโรคติดต่อเชื้อโรคระบาดใหม่. (2551). “ความรู้เกี่ยวกับเชื้อ *Escherichia coli*”. [ออนไลน์]
เข้าถึงได้จาก http://emerging.kku.ac.th/news_ecoli
18. K.C. Song, S.M. Lee, T.S. Park and B.S. Lee. (2009). “Preparation of colloidal silver nanoparticles by chemical reduction method”. *Korean Journal Chemical Engineering*, 26, 153-155.
19. L.C. de S. Maria, A. L.C. Santos, P.C. Oliveira, H.S. Barud, Y. Messaddeq and Sidney J.L. Ribeiro.(2009). “Synthesis and characterization of silver nanoparticles impregnated into bacterial cellulose”. *Materials Letters*, 63, 797-799.
20. Y. M. Mohan, K. Vimala, V. Thomas, K. Varaprasad, B. Sreedhar, S.K. Bajpai, K.M. Raju. (2009). “Controlling of silver nanoparticles structure by hydrogel networks”. *Journal of Colloid and Interface Science*, 342, 73-82.
21. Y. Lu, P. Spyra, Y. Mei, M. Ballauff and A. Pich. (2007). “Composite Hydrogels: Robust Carriers for Catalytic Nanoparticles”. *Macromolecules Chemical Physic*, 208, 254-261.

22. V.K. Sharma, R.A. Yngard and Y. Lin. (2009). **“Silver nanoparticles:Green synthesis and their antimicrobial activities”**. Advances in Colloid and Interface Science, 145, 83-96.
23. J.W. Kwon, S.H. Yoon, S.S. Lee, K.W. Seo, and I.W. Shim. (2005). **“Preparation of Silver Nanoparticles in cellulose Acetate Polymer and the Reaction Chemistry of Silver Complex in the Polymer”**. Bulletin of the Korean Chemical , 26, 837-840.
24. N.D. Luong, Y.K. Lee and J.D. Nam. (2009). **“Highly-loaded silver nanoparticles in ultrafine cellulose acetate nanofibrillar aerogel”**. European Polymer Journal, 44, 3116-3121.
- 25.Y.Abe,T. Hasegawa, M. Kawamura and K. Sasaki. (2004). **“Characterization of Ag oxide thin films prepared by reactive RF sputtering”**. Vacuum, 76, 1-6.
- 26.M. Mahdieh, A. Zolanvari, A.S. Azimi and M. Mahdieh. (2012). **“Green biosynthesis of silver nanoparticles by Spirulina platensis”**. Scientia Iranica, 297, 1-4.
- 26.T. Thimma Reddy and S. Tammishetti. (2004). **“Free radical of guar gum”**. Polymer Degradation and Stability, 86, 455-459.
- 27.Y.N. Phang, S.Y. Chee, C.O. Lee and Y.L. Teh. (2011). **“Thermal and microbial degradation of alginate-based superabsorbent polymer”**. Polymer Degradation and Stability, 96, 1653-1661.
- 28.ชามาศ มินสาคร. **“การเตรียมและตรวจวิเคราะห์ไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม/โซเดียมอัลจิเนต”**. งานวิจัยสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (ข้อมูลยังไม่เผยแพร่).

ภาคผนวก ก

ผลจากการทดสอบเทคนิคการคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence, XRF)

ตารางที่ ก.1

Sample 1

A4G6B0.6, 1

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO
0.2 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps	0.3 KCps	0.3 KCps	0.4 KCps
27.9 %	6.30 %	6.13 %	15.9 %	9.48 %	3.37 %

Fe ₂ O ₃	CuO	Ag	HfO ₂	Compton	Rayleigh	Norm.
2.1 KCps	3.5 KCps	1.2 KCps	1.1 KCps			
4.30 %	4.41 %	16.5 %	3.67 %	0.83	1.04	100.00 %

ตารางที่ ก.2

Sample 2

A4G6B0.6, 5

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O
0.2 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps	0.4 KCps	0.3 KCps	0.4 KCps
29.9 %	6.66 %	4.66 %	19.3 %	8.42 %	2.65 %

CaO	Fe ₂ O ₃	CuO	Ag	Compton	Rayleigh	Norm.
0.6 KCps	2.1 KCps	3.4 KCps	0.9 KCps			
5.32 %	3.98 %	3.92 %	12.0 %	0.86	1.04	100.00 %

ตารางที่ ก.3

Sample 3

A4G6B0.6, 10

Na ₂ O	SiO ₂	SO ₃	Cl	CaO	Fe ₂ O ₃
0.1 KCps	0.1 KCps	0.3 KCps	0.4 KCps	0.2 KCps	2.2 KCps
33.3 %	4.69 %	11.7 %	6.89 %	2.12 %	6.50 %

CuO	ZnO	Ag	Compton	Rayleigh	Sum
3.5 KCps	0.5 KCps	1.2 KCps			
6.26 %	0.747 %	23.1 %	0.81	1.03	100.00 %

ตารางที่ ก.4

Sample 4

A4G6B0.6, 15

Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	CaO	Cr ₂ O ₃
0.2 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps	0.4 KCps	0.6 KCps	0.2 KCps	0.6 KCps
28.1 %	4.79 %	4.32 %	10.9 %	6.89 %	1.51 %	3.67 %

Fe ₂ O ₃	CuO	Ag	Au	Compton	Rayleigh	Sum
2.0 KCps	3.5 KCps	1.8 KCps	0.6 KCps			
4.47 %	4.83 %	26.8 %	1.07 %	0.83	1.05	100.00 %

ตารางที่ ก.5

Sample 5

A4G6B0.6, 20

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl
0.2 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps	0.4 KCps	0.5 KCps
28.6 %	6.16 %	4.85 %	2.93 %	11.0 %	5.23 %

CaO	Fe ₂ O ₃	CuO	Ag	Compton	Rayleigh	Norm.
0.2 KCps	2.4 KCps	3.4 KCps	1.8 KCps			
1.65 %	5.31 %	4.57 %	26.5 %	0.85	1.08	100.00 %

ตารางที่ ก.6

Sample 6

A4G6B0.2, 1

Na ₂ O	SiO ₂	SO ₃	Cl	Fe ₂ O ₃	NiO
0.2 KCps	0.1 KCps	0.4 KCps	0.4 KCps	2.4 KCps	0.4 KCps
28.6 %	6.16 %	14.2 %	6.86 %	6.85 %	0.752 %

CuO	Ag	Compton	Rayleigh	Sum
3.3 KCps	0.9 KCps			
5.81 %	17.6 %	0.87	1.05	100.00 %

ตารางที่ ก.7

Sample 7

A4G6B0.2, 20

Na ₂ O	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
0.1 KCps	0.2 KCps	0.4 KCps	0.5 KCps	0.2 KCps	0.2 KCps	2.3 KCps
28.0 %	10.7 %	11.9 %	6.72 %	1.61 %	2.66 %	5.64 %

NiO	CuO	ZnO	Pd	Ag	Compton	Rayleigh	Sum
0.8 KCps	3.6 KCps	0.6 KCps	0.3 KCps	1.0 KCps			
1.43 %	5.42 %	0.682 %	4.24 %	17.6 %	0.86	1.05	100.00 %

ตารางที่ ก.8

Sample 8

A4G6B0.4, 1

Na ₂ O	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	NiO
0.2 KCps	0.3 KCps	0.2 KCps	2.2 KCps	0.4 KCps
46.7 %	13.9 %	2.54 %	7.21 %	0.944 %

CuO	Ag	Compton	Rayleigh	Norm.
3.5 KCps	0.7 KCps			
7.02 %	16.7 %	0.89	1.05	100.00 %

ตารางที่ ก.9

Sample 9

A4G6B0.4, 20

SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
0.1 KCps	0.3 KCps	0.1 KCps	0.2 KCps	2.3 KCps
7.70 %	17.0 %	2.50 %	4.02 %	11.8 %

CuO	MoO ₃	Ag	Compton	Rayleigh	Norm.
3.5 KCps	8.0 KCps	0.8 KCps			
10.7 %	11.5 %	26.5 %	0.81	1.00	100.00 %

ตารางที่ ก.10

Sample 10

A6G4B0.2, 1

SiO ₂	SO ₃	Cl	Fe ₂ O ₃	NiO
0.1 KCps	0.3 KCps	0.4 KCps	2.2 KCps	0.4 KCps
8.23 %	21.7 %	11.2 %	11.0 %	1.37 %

CuO	Ag	Au	Compton	Rayleigh	Sum
3.5 KCps	0.8 KCps	0.6 KCps			
10.6 %	26.3 %	2.65 %	0.83	1.04	100.00 %

ตารางที่ ก.11

Sample 11

A6G4B0.2, 20

SO ₃	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CuO	ZnO
0.3 KCps	0.1 KCps	0.5 KCps	2.1 KCps	3.5 KCps	0.5 KCps
20.4 %	2.51 %	7.40 %	11.4 %	11.7 %	1.27 %

Pd	Ag	HfO ₂	Compton	Rayleigh	Norm.
0.2 KCps	0.6 KCps	1.0 KCps			
6.54 %	22.2 %	9.57 %	0.79	1.03	100.00 %

ตารางที่ ก.12

Sample 12

A6G4B0.4, 1

Na ₂ O	SiO ₂	SO ₃	Cl	Fe ₂ O ₃
0.1 KCps	0.1 KCps	0.3 KCps	0.4 KCps	2.5 KCps
26.0 %	5.84 %	12.0 %	6.32 %	7.09 %

CuO	Ag	Compton	Rayleigh	Sum
3.5 KCps	1.6 KCps			
6.04 %	32.1 %	0.85	1.06	100.00 %

ตารางที่ ก.13

Sample 13

A6G4B0.4, 20

SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	CuO
0.1 KCps	0.3 KCps	2.6 KCps	3.5 KCps
8.52 %	17.6 %	11.0 %	9.08 %

Pd	Ag	Compton	Rayleigh	Norm.
0.2 KCps	1.6 KCps			
5.32 %	45.9 %	0.83	1.07	100.00 %

ตารางที่ ก.14

Sample 14

A6G4B0.6, 1

Na ₂ O	SiO ₂	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃
0.2 KCps	0.3 KCps	0.3 KCps	0.6 KCps	2.6 KCps
32.6 %	17.8 %	8.30 %	6.37 %	6.09 %

CuO	Ag	Pt	Compton	Rayleigh	Norm.
3.2 KCps	1.2 KCps	0.8 KCps			
4.51 %	19.1 %	1.52 %	0.88	1.07	100.00 %

ตารางที่ ก.15

Sample 15

A6G4B0.6, 20

Na ₂ O	SiO ₂	SO ₃	Cl	CaO	Fe ₂ O ₃
0.1 KCps	0.1 KCps	0.3 KCps	0.5 KCps	0.3 KCps	2.8 KCps
30.1 %	8.86 %	9.73 %	6.37 %	3.01 %	7.15 %

CuO	Ag	Au	Compton	Rayleigh	Sum
3.6 KCps	1.3 KCps	0.7 KCps			
5.56 %	23.7 %	1.38 %	0.84	1.04	100.00 %

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุลดร.ภัทธวาท มนต์วิเศษ.....

ตำแหน่งปัจจุบัน.....ผู้ช่วยศาสตราจารย์.....

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ.	เคมีอุตสาหกรรม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง	2534-2538
M.Sc.	Polymer Science and Technology	The University of Manchester	2539-2540
Ph.D.	Polymer Chemistry	The University of Manchester	2540-2543

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

1. วัสดุประกอบบรุ่มระหว่างเซรามิกซ์และพอลิเมอร์
2. วัสดุประกอบระดับนาโนระหว่างเซรามิกซ์และพอลิเมอร์
3. กาวสำหรับติดไม้
4. การสังเคราะห์สาร cyclic oligomers ด้วยเทคนิคดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง และการสังเคราะห์พอลิเมอร์ พอลิเมอร์ร่วม ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง
5. การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของ polypseudorotaxanes
6. การสังเคราะห์ soluble combinatorial libraries of crown ether-ester analogues
7. การเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซิน

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

- 1.การนำพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการดีพอลิเมอไรซ์แบบปิดวงแหวนและการพอลิเมอไรซ์แบบเปิดวงแหวน ทุนศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ รหัสโครงการ MT-S-43-POL-22-179-G ปี 2543
- 2.การรีไซเคิลโพลีเอสเทอร์โดยการดีพอลิเมอไรซ์แบบปิดวงแหวนและการพอลิเมอไรซ์แบบเปิดวงแหวน ทุนงบประมาณประจำปี 2544
- 3.การสังเคราะห์วัสดุประกอบไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอสเทอร์สำหรับการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้สถาบันประจำปี 2545
- 4.การเตรียมซีเมนต์แคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต ทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ จากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2549
- 5.การพัฒนา กาวติดไม้ปราศจากฟอร์มาลดีไฮด์จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยน้ำมันทั้ง ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้การเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว-อุตสาหกรรม (MAG Window I) วรวิทย์ ชุ่มชื่น สัญญาเลขที่ MRG-WI515S129 ปี 2551
- 6.ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (คปก 11) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) พิชญา ตรีเนตร ปรัชญาดุษฐ์บัณฑิต สาขาเคมี

ประยุกต์ 1 มิถุนายน ปี 2552 ถึง 31 พฤษภาคม 2557 สัญญาเลขที่ PHD/0264/2551

7.การพัฒนาการตัดไม้ชนิดปราศจากฟอร์มาลดีไฮด์จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และน้ำมันทั้ง ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2553 ประเภทงานวิจัยเชิงบูรณาการและพาณิชย์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล

8.การตัดไม้ไร้สารฟอร์มาลดีไฮด์จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับน้ำมันซีกแห่งธรรมชาติสำหรับงานแผ่นพาร์ทิเคิล ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้การเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว-อุตสาหกรรม (MAG Window I) ภคพล ลัคนาพรวิสิฐ สัญญาเลขที่ MRG-WI535S901 ปี 2553

9.ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (คปก 12) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) อภิขญา เจียนประเสริฐ ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี 1 ธันวาคม ปี 2553 ถึง 30 พฤศจิกายน 2556 สัญญาเลขที่ PHD/0075/2552

10.สมบัติเชิงกลและการต้านทานน้ำของกาวอะครีเลตพอลิยูรีเทนด้วยน้ำมันลินสีด ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2554 ประเภททุนส่งเสริมนักวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สจล

11. การเตรียมและสมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม/ไฮเดียมอัลจินต ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555 ประเภททุนส่งเสริมนักวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สจล

12. การปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นพาร์ทิเคิลที่ใช้กาวไร้สารฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยน้ำยางพารา โครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา (Medium-size Project on Rubber; MPR) สกว-อุตสาหกรรม สัญญาเลขที่ RDG5550060 ปี 1 สิงหาคม 2555 ถึง 31 กรกฎาคม 2556

13.ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (คปก 13) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) สานิตย์ สิริปาณิชาติ ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ 1 มิถุนายน ปี 2555 ถึง 31 พฤษภาคม 2558 สัญญาเลขที่ PHD/53K0235/2553 ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Monvisade P., Hodge P., Ruddick C.L. Synthesis of soluble combinatorial libraries of crown ether-ester analogues via the cyclodepolymerisation of linear polyester. Chem.Comm. 1999; 1987-1988. (Impact factor 2005 = 3.902)
2. Hodge P., Monvisade P., Owen G.J., Heatley F., Pang Y. ¹H-NMR spectroscopic studies of the structures of a series of pseudopolyrotaxanes formed by "threading". New J.Chem. 2000; 24: 703-709. (Impact factor 2005 = 2.44)
3. Hodge P., Monvisade P., Morris G.A., Preece I. A novel nuclear magnetic resonance spectroscopy method for screening small soluble compound libraries. Chem.Comm. 2001; 239-240. (Impact factor 2005 = 3.902)
4. Siriphannon P., Monvisade P., Jinawath S, Hemachandra K. Preparation and characterization of hydroxyapatite/poly(ethylene glutarate) biomaterials.

J.Biomed.Mater.Res.Part A; 2007; 81A(2): 381-391.(Impact factor 2005 = 2.743, 2006 = 2.467)

5. Monvisade P., Loungvanidprapa P., Synthesis of Poly(ethylene adipate) and Poly(ethylene adipate-co-terephthalate) via Ring-opening Polymerization. Eur.Polym.J.; 2007; 43: 3408-3414. (Impact factor 2005 = 1.765, 2006 = 2.113)

6. Monvisade P., Siriphannon P., Jermungnern R., Rattanabodee S., Preparation of hydroxyapatite/poly(methyl methacrylate) and calcium silicate/poly(methyl methacrylate) interpenetrating hybrid composites. J.Mater.Sci.Mater.Med.; 2007; 18: 1955-1959. (Impact factor 2005 = 1.248, 2006 = 1.562)

7. Monvisade P., Loungvanidprapa P., Synthesis of Poly(ethylene terephthalate-co-isophthalate) via Ring-opening Polymerization of Their Cyclic Oligomers. J.Polym.Res.; 2008; 15, 381-387. (impact factor 2006 = 0.616)

8. Siriphannon P., Monvisade P., Preparation and Characterization of Hydroxyapatite/Poly(ethylene adipate) Hybrid Composites. J.Biomater.Sci-Polym.E.; 2008;19(7), 925-936. (Impact factor 2006 = 1.607)

9. Monvisade P., and Siriphannon P., Chitosan Intercalated Montmorillonite: Preparation, Characterization and Basic Dye Adsorption. Appl.Clay.Sci.; 2009; 42, 427-431. (impact factor 2006 = 1.652)

10. Siriphannon P., Monvisade P., Poly(ethylene terephthalate)/hydroxyapatite biomaterials: Preparation, characterization and in vitro bioactivity. J.Biomed.Mater.Res.Part A; 2009; 88A (2) 464-469.(Impact factor 2005 = 2.743, 2006 = 2.467)

11. Monvisade P., Siriphannon P. and Tapcharoen W., Effect of Ring-opening Polymerization Condition on Characteristic and Mechanical Properties of Hydroxyapatite/Poly(ethylene glutarate) Biomaterials. J.Biomed.Mater.Res.Part A; 2009; 90A (3) 656-663. (impact factor 2006 = 2.497)

12. Sirapanichart S., Khouchaf L., Siriphannon P., Monvisade P., Louarn G. and Elouadi B. Chemical and Dielectric Study of PMMA/Montmorillonite Nano-Composite Films. FERROELECTRIC; 2010; 402 47-54. (impact factor 2009 = 0.447)

13. Sanit Sirapanichart, Pathavuth Monvisade, Punnama Siriphannon, and Jiti Nukeaw, Poly(methyl methacrylate-co-butyl acrylate)/Organophosphate-modified Montmorillonite Composites. Iranian Polymer Journal 2011; 20(10) 803-811. (impact factor 2010 = 1.189)

14. Pannasri P., Siriphannon P., Monvisade P. and Nookaew J., Hydrothermal growth of ZnO nanostructures from nano-ZnO seeded in P(MMA-co-BA) matrix. J.Polym.Res.; 2011 ; 18(6) 2245-2254. (impact factor 2010 = 1.186)

15. Suebpong Suebwongnat, Apichaya Jianprasert, Punnama Siriphannon

and Pathavuth Monvisade, Calcium silicate/Poly(ethylene terephthalate) Biomaterials via Ring-opening Polymerization. J.Polym.Res.; 2012 ; 19(10) 9985 DOI 10.1007/s10965-012-9985-3. (impact factor 2011 = 1.733)

16. Siriphannon P. and Monvisade P., In situ ring-opening polymerization of hydroxyapatite/poly(ethylene adipate)-co-(ethylene terephthalate) biomimetic composites. Bulletin of Materials Science; 2013; 36(1), February, 121-128. (impact factor 2012 = 0.88)

17. Chutima Kaemkit, Pathavuth Monvisade, Punnama Siriphannon and Jiti Nukeaw, Water-Soluble Chitosan Intercalated Montmorillonite Nanocomposites for Removal of Basic Blue 66 and Basic Yellow 1 from Aqueous Solution. J. APPL. POLYM. SCI. 2013; 128(1) 879-887. (impact factor 2011 = 1.3)

18. Monvisade P., Mongkolaussavarat T., Chalermksukri T. and Chanthad C., Recycle of poly(ethylene terephthalate) by cyclo-depolymerisation and ring-opening polymerization. KU Science Journal, 2545 (2002), 20 (1-3), 21-29. (in Thai)

19. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ, กมลวรรณ รัตนภักดิ์, พนอ วรรณวงศ์ และ ศิริยา เจียมสกุล การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตกับพอลิเอทิลีนกลูตาเรตด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง วารสารวิทยาศาสตร์มช. ปีที่ 31 ฉบับที่ 1 2546(2003) หน้า 46-53.

20. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ สุภาณี ชนะวงศ์ การสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 2547(2004) หน้า 36-45.

21. ภคพล ลัคนาพรวิสิฐ, ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ วรธรรม อุ่นจิตติชัย กาวติดไม้ไร้สารฟอร์มาลดีไฮด์จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับน้ำมันชักแห้งธรรมชาติสำหรับงานแผ่นพาร์ทิเคิล วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ปีที่ 3 (ฉบับพิเศษที่ 2) มีนาคม 2554 หน้า 23-31.

การเสนอผลงานวิชาการ

1. Hodge P., Monvisade P., Ruddick C.L. Synthesis of soluble libraries of macrocycles which potentially have recognition properties. in Innovation and perspectives in solid-phase synthesis and combinatorial libraries; Ed. Epton R. Mayflower worldwide limited, Kingswinford, UK, 2001; .181-184.

2. Monvisade P., Choeykomhaeng M. The formation of the inclusion complex of β -cyclodextrin with PMMA. PPC8, Bangkok, Thailand. 24-27 November 2003. 91.

3. Monvisade P., Siriphannon P., Chanawong S. Synthesis of hydroxyapatite/poly(ethylene adipate) composites by in situ ring-opening polymerization. PPC8, Bangkok, Thailand. 24-27 November 2003. 115-116.

4. Monvisade P., Siriphannon P., Chitosan intercalated montmorillonite adsorbent for dye containing wastewater treatment. The Sixth Princess Chulabhorn

International Science Congress, The interface of chemistry and biology in the “Omics” era: Environment & Health, and Drug Discovery, Shangri-La Hotel, Bangkok, Thailand. 25-29 November 2007.

5. Siriphannon P., Monvisade P., Hybrid ceramic-polymer biomaterials. The French-Thai Workshop on “Advanced Materials and Technology”, (Krabi, Thailand), March 23-27, 2008.

6. Siriphannon P., Monvisade P., Biomimetic ceramic-polymer composites for medical applications. AUN/SEED Net 1st Regional Workshop on Natural Resources and Materials for Sustainable Development of ASEAN, (Phnom Penh, Kingdom of Cambodia), August 18-19, 2008.

7. Monvisade P., Siriphannon P., Adsorption of dye onto chitosan intercalated montmorillonite. The IUMRS International Conference in Asia 2008, (Nagoya, Japan), December 9-13, 2008.

8. Chumchuen W., Monvisade P., Siriphannon P., and Oonjittichai W., Tung oil modified poly(vinyl alcohol) as formaldehyde-free wood adhesives. The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (6th ISAMAP), Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, November 21-23, 2009.

9. Monvisade P. and Intharavichain T., Synthesis of poly(diethylene adipate), poly(diethylene terephthalate) and their copolymer via ring-opening polymerization. 7th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific (7th ISAMAP), Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST), Ishikawa High-Tech Exchange Center, Ishikawa, Japan, Sep. 30-Oct. 1, 2010.

10. Lakkanapornwisit P., Monvisade P. and Oonjittichai W., Effect of silica on mechanical properties of particle board using formaldehyde free adhesive. Proceeding of The 8th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific Rim (8th ISAMAP) and The 2nd International Workshop on Nanogrid Materials (IWNM), Hotel Novotel Ambassador Busan, Haeundae, Busan, Korea, Nov. 2-5, 2011, p 36-41.

11. Suebpong Suebwongnat, Punnama Siriphannon and Pathavuth Monvisade, Mechanical properties and bioactivity of calcium silicate/poly(ethylene terephthalate-co-carprolactone) composites. 15th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies (AMPT 2012), Novotel Wollongong Northbeach Hotel, Wollongong, Australia, Sep. 23-26, 2012.

12. อมรรัตน์ สวัสดิมงคล **ภัทราวุธ มนต์วิเศษ** ปุณณมา ศิริพันธ์โนน และ ชลลดา ฤตวิรุฬห์ การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์ร่วมพอลิเมทิลเมทาคริเลตพอลิอะคริลิกแอซิดกับไคโตซาน-มอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีพอลิเมอร์ไรซ์ขณะขึ้นรูป การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่ 29-30 ตุลาคม 2550(2007) NP05_1

13. ณิชชา ปานกุล, **ภัทราวุธ มนต์วิเศษ**, และปุณณมา ศิริพันธ์โนน, การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการต้านทานน้ำของกาวอะครีเลตพอลิยูรีเทนด้วยน้ำมันลินสีด, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่34 (ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ), 31ตุลาคม – 2 พฤศจิกายน 2551(2008) E_E0037 page 213.
14. สานิตย์ สิริปาณชาติ, สุรลักษณ์ มรรคศศิธร, สุวิชา บัวเขียว, ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, และ**ภัทราวุธ มนต์วิเศษ**, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนพอลิเมทิลเมทาครีเลต/มอนต์มอริลโลไนต์, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่34 (ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ), 31ตุลาคม – 2 พฤศจิกายน 2551(2008) E_E0104 page 230.
15. Shamas Minsakorn and **Pathavuth Monvisade**, Preparation and swelling behavior of sodium carboxymethylcellulose/guar gum hydrogels, 2nd Polymer Conference of Thailand, Convention Center, Chulabhorn Research Institute, Bangkok, October 20-21 2011 page 120-123.
16. Suebpong Suebwongnat, Punnama Siriphannon, **Pathavuth Monvisade**, Preparation of Calcium Silicate/Poly(ethylene terephthalate-co-caprolactone) Composites for Medical Applications, Proceeding of Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2012), Chiang Mai, Thailand, 11th-13th January 2012 page 65.
17. Sirinan Lawchoochaisakul, **Pathavuth Monvisade**, Punnama Siriphannon and Jiti Nukeaw, Adsorption of Basic Yellow 1 (BY1) by Cationic Starch Intercalated Montmorillonite Nanocomposite, The 9th KU-KPS Conference, December 6-7 2012 page 114.
18. Sirinan Lawchoochaisakul, **Pathavuth Monvisade**, Punnama Siriphannon and Jiti Nukeaw, The Adsorption of Acid Red 91 of Nanocomposite Material between Montmorillonite and Cationic Starch, การประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อการพัฒนาด้านวิจัยอย่างยั่งยืน, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 25-26 ธันวาคม 2555, SRD-94 หน้า 70.

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ **ภคพล ลักณาพรวิสิฐ** (ผู้ประดิษฐ์) กาวติดไม้ชนิดไม่มีสารฟอร์มัลดีไฮด์จากพอลิไวนิลอัลกอฮอล์กับน้ำมันชักแห้งเสริมแรงด้วยซิลิกาสำหรับงานพาร์ทิเคิลบอร์ด คำขอเลขที่ 1101002357 ยื่นคำขอเมื่อวันที่ 29 กันยายน 2554