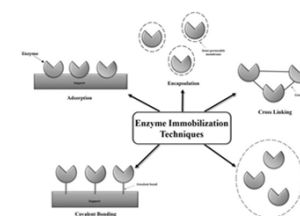


เทคโนโลยีเอนไซม์

อาจารย์ ดร. หัสลินดา บินมะแอ
คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร
มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

เทคโนโลยีการตรึงเอนไซม์ (Immobilized enzyme technology)



เทคโนโลยีการตรึงเอนไซม์ (Immobilized enzyme technology)

- เป็นการตรึงเอนไซม์ให้อยึดติดกับที่ ซึ่งจะให้สารตั้งต้นที่จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ไหลผ่านไป
- ข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถนำเอนไซม์กลับมาใช้ใหม่อีก และสะดวกในการเก็บและทำให้ผลผลิตบริสุทธิ์ เนื่องจากไม่มีเอนไซม์ติดมาด้วย



เทคโนโลยีการตรึงเอนไซม์ (Immobilized enzyme technology)

เอนไซม์ตรึงรูป (immobilized enzyme)

- คือรูปแบบของเอนไซม์ที่พัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการแปรรูป
- โดยการเปลี่ยนสถานะของเอนไซม์จากสารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของเหลว ให้กลายเป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งที่ไม่ละลายในน้ำ หรือละลายในได้น้อยมาก
- โดยการนำเอาเอนไซม์อิสระมาจำกัดให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดหรือจัดไว้ หรือนำมาจับยึดไว้กับตัวกลางที่ไม่ละลายในน้ำ หรือทำให้โมเลกุลเอนไซม์จับเชื่อมกันเองจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ก่อนทำปฏิกิริยาเป็นของแข็ง ขณะทำปฏิกิริยาก็เป็นของแข็ง หลังทำปฏิกิริยาก็ยังคงสภาพเป็นของแข็งอยู่

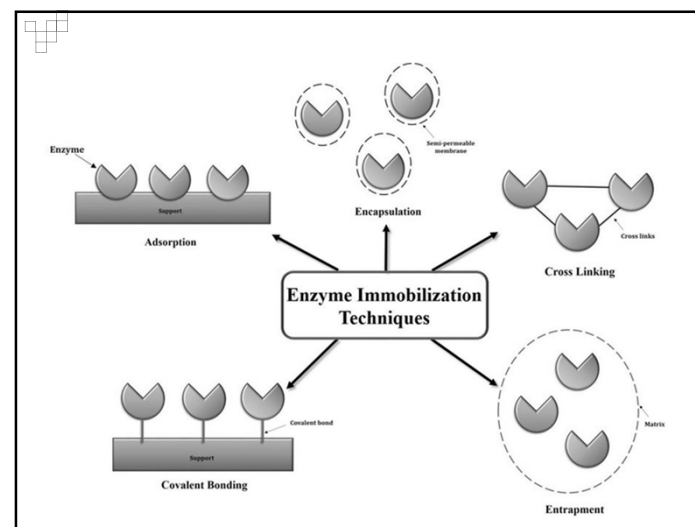
เทคโนโลยีการตรึงเอนไซม์ (Immobilized enzyme technology)

การตรึงเอนไซม์ (ปราชญ์ พัฒนพิพิธ ไพศาล, 2556)

การตรึงเอนไซม์ (Enzyme immobilization) หมายถึงการนำเอนไซม์มายึดติดไว้กับวัสดุหรือสารพองใดๆ และยังคงมีกิจกรรมเหมือนเอนไซม์อิสระ โดยที่สารตั้งต้นหรือซับสเตรตสามารถผ่านเข้าไปและถูกเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ได้ เอนไซม์ที่ผ่านการตรึงเรียกว่า เอนไซม์ตรึงรูป (Immobilized enzyme) การให้เอนไซม์ตรึงรูปจะช่วยให้สามารถนำเอนไซม์ไปใช้ในการจัดการ ดูแลรักษา และเพิ่มความปลอดภัยในการทำงาน ความสะดวกในการนำกลับมาใช้ใหม่หรือการใช้อย่างต่อเนื่อง การตรึงเอนไซม์เหมาะสำหรับเอนไซม์ที่มีกระบวนการผลิตยุ่งยาก ราคาแพง และที่สำคัญช่วยลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้กระบวนการสกัดแยกผลิตภัณฑ์ออกจากเอนไซม์ยังทำได้ง่าย ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นเอนไซม์น้อยลง

เอนไซม์ตรึงรูปยังคงมีข้อจำกัดในการใช้งาน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ตรึงรูปได้แก่ ระยะระหว่างเอนไซม์กับสารพอง การเปลี่ยนแปลงเพื่อขบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเข้มข้นของซับสเตรต อย่างไรก็ตามกระบวนการตรึงเอนไซม์ยังอาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของเอนไซม์ โดยพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์อาจจะลดลงหลังจากผ่านกระบวนการตรึง ซึ่งอาจเป็นผลเกี่ยวเนื่องจากการทำลายโครงสร้างบางส่วนของโปรตีนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการตรึง นอกจากนี้สภาวะแวดล้อมของเอนไซม์ตรึงรูปจะแตกต่างจากสภาวะแวดล้อมของเอนไซม์อิสระ ซึ่งอาจเกิดจากสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของสารพอง หรือการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารพองและซับสเตรต นอกจากนี้ข้อจำกัดที่กล่าวมาแล้ว สารพองบางชนิดยังมีราคาสูง มีขั้นตอนใน

ประโยชน์ของการตรึงเอนไซม์ การนำเอนไซม์มาตรึงอยู่กับสารพองมีข้อดีหลายประการที่สำคัญคือ (1) สามารถนำกลับมาใช้ใหม่หรือใช้ซ้ำได้ (2) สามารถหยุดหรือระงับปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วโดยการแยกเอนไซม์ตรึงรูปออกจากสารละลาย (3) เอนไซม์ตรึงรูปมีความคงตัวสูง (4) เกี่ยวข้องผลิตภัณฑ์ได้ง่ายเนื่องจากไม่มีการผสมรวมกันระหว่างผลิตภัณฑ์กับเอนไซม์ตรึงรูป (5) มีประโยชน์ทางการวิเคราะห์ต่างๆ เช่น มีครั้งชีวิตที่ยาว ช่วยลดขั้นตอนการเตรียมสารเคมี และการคัดแยกเอนไซม์การสลายตัว



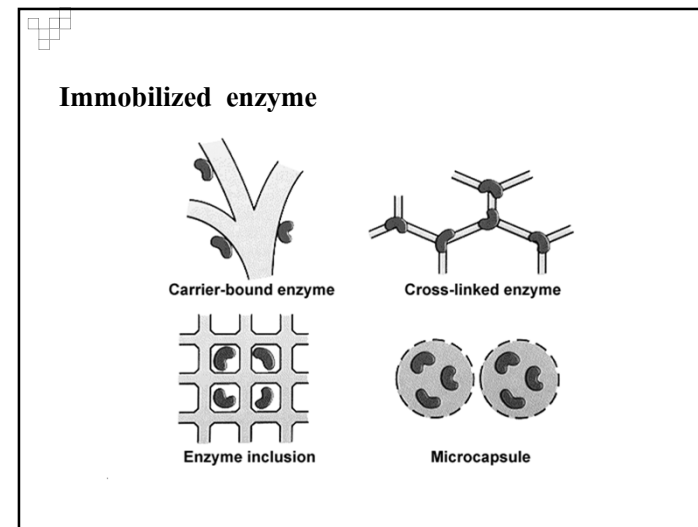
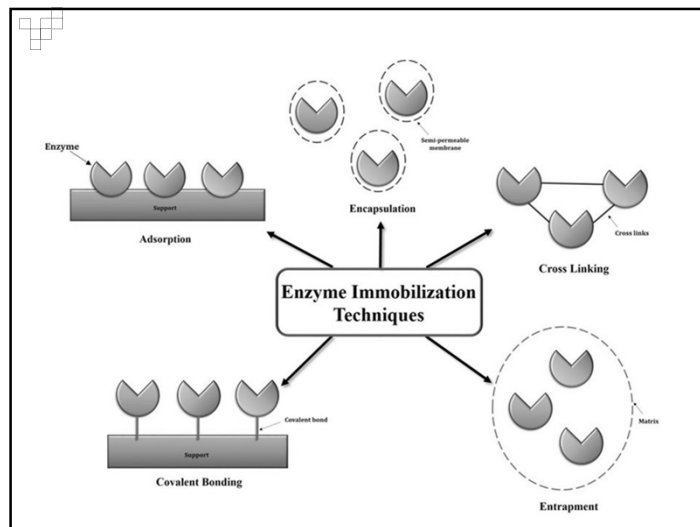
วิธีการตรึงเอนไซม์กับสารพวงแบ่งออกเป็น 3 วิธีใหญ่ๆ ดังนี้

1. การยึดเกาะ (Carrier-binding) เป็นการเอาเอนไซม์มายึดเกาะอยู่กับสารพวงที่ไม่ละลายน้ำด้วยพันธะโควาเลนต์ พันธะไอออน การดูดซับทางกายภาพ หรือความจำเพาะทางชีวภาพ โดยกิจกรรมของเอนไซม์จะขึ้นอยู่กับสมบัติของสารพวงนั้นๆ การตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีนี้แบ่งย่อยออกเป็น 4 วิธีตามลักษณะการยึดเกาะ คือ (1) การยึดเกาะหรือการดูดซับทางกายภาพ (2) การยึดเกาะด้วยความจำเพาะทางชีวภาพ (3) การยึดเกาะด้วยไอออน (4) การยึดเกาะด้วยพันธะโควาเลนต์

การยึดเกาะหรือการดูดซับทางกายภาพและเคมี (Physical-chemical adsorption) การดูดซับของเอนไซม์บริเวณพื้นผิวของสารพวงที่ไม่ละลายน้ำเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย มีการนำไปใช้ทั่วไป และสามารถใส่เอนไซม์ได้ในปริมาณที่สูง การตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีการยึดเกาะทางกายภาพของเอนไซม์กับสารพวงโดยอาศัยพันธะไฮโดรเจน การทำปฏิกิริยาร่วมกับสารที่ไม่ชอบน้ำ การเชื่อมต่อของเกลือและแรงแวนเดอร์วาลส์ ขั้นตอนการตรึงประกอบด้วยกรรมผสมเอนไซม์กับสารพวงภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เช่น pH และความแรงไอออน และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ จากนั้นจึงเป็นขั้นตอนการแยกและล้างส่วนที่ไม่ถูกตรึงออก โดยวิธีนี้เป็นที่นิยมทำทั่วไปเนื่องจากทำได้ง่าย รวดเร็ว และเสียค่าใช้จ่ายน้อย ไม่ต้องการการปรับหรือกระตุ้นสารพวงหรือเอนไซม์ก่อนการตรึง เนื่องจากวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีจึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของเอนไซม์ หรือมีผลในการทำลายบริเวณเร่งที่น้อยที่สุดหรือไม่เกิดขึ้นเลย จึงมีผลในการทำลายเอนไซม์น้อยกว่าวิธีที่ใช้สารเคมีร่วมด้วย นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่พบได้ทั่วไปในเอมเมมเบรนของสิ่งมีชีวิต ข้อเสียของวิธีนี้คือ เป็นการยึดเกาะด้วยพันธะที่ไม่แข็งแรง เอนไซม์จึงหลุดออกจากสารพวงได้ง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ pH และความเข้มข้นของสารละลาย ข้อเสียอื่นๆคือไม่มีความจำเพาะจึงอาจเกิดการยึดเกาะของโปรตีนหรือสารอื่นร่วมด้วย ซึ่งมีผลต่อสมบัติของเอนไซม์

2. การเชื่อมประสาน (Cross-linking) การตรึงเอนไซม์วิธีนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเชื่อมประสาน โดยวิธีทางเคมี หรือทางกายภาพระหว่างโมเลกุลของเอนไซม์กับโมเลกุลของโปรตีน หรือหมู่ฟังก์ชันอื่นที่อยู่บนสารพวงที่ไม่ละลายน้ำเพื่อเกิดเป็นโครงสร้างสามมิติขนาดใหญ่ การเชื่อมประสานระหว่างโมเลกุลของเอนไซม์จะเสียค่าใช้จ่ายสูงและไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ เพราะโปรตีนบางชนิดจะทำหน้าที่หลักเป็นสารพวงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ซึ่งมีผลทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีนี้ร่วมกับการตรึงวิธีอื่นเพื่อให้เอนไซม์ที่ยึดเกาะมีความคงทนและลดการหลุดออกของเอนไซม์

3. การกักเก็บ (Entrapment) เป็นการนำเอนไซม์บรรจุลงในช่องของสารพวงพอลิเมอร์หรือเอมเมมเบรน โดยที่ซับสเตรตสามารถผ่านเข้า-ออกได้ วิธีนี้ไม่มีการเกิดพันธะใดๆระหว่างเอนไซม์กับสารพวง จึงสามารถใช้กับเอนไซม์ได้หลายชนิดและเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ข้อเสียคือการผ่านเข้าออกของมวลสาร สารที่มีมวลโมเลกุลสูงจะผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ได้ยาก ขั้นตอนการตรึงเกิดขึ้นในสภาวะการพอลิเมอไรเซชันของสารเคมีที่มีความรุนแรง ซึ่งอาจมีผลทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง นอกจากนี้การนำเอาสารพวงกลับมาใช้ใหม่เป็นไปได้ยาก การตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีนี้แบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ (1) การกักเก็บในเจล (2) การกักเก็บในไฟเบอร์ (3) การกักเก็บในไมโครแคปซูล



เอนไซม์ตรึงรูปมีข้อดี คือ

- เมื่อใช้งานแล้วสามารถแยกนำกลับมาใช้งานได้อีกหลายครั้ง จนกว่าความสามารถในการเร่ง
- ปฏิกิริยาของเอนไซม์จะลดต่ำลงมาก ทำให้ประหยัดกว่าการใช้เอนไซม์อิสระ
- และสามารถใส่สภาวะในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างไปจากเอนไซม์อิสระดั้งเดิมได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการเลือกชนิดของตัวกลางที่ใช้จับยึด กับวิธีการตรึงรูป
- ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางมากกว่าการใช้เอนไซม์อิสระ ซึ่งจะต้องใช้สภาวะการทำปฏิกิริยาที่จุดหนึ่งที่เหมาะสมเท่านั้น

ตัวอย่าง

การตรึงเอนไซม์

งานวิจัยซึ่งได้ศึกษาการตรึงเอนไซม์ไลโปสจากเชื้อ *Bacillus* sp. BLCD 003 บนแบร่อนท์-มอริลไลโนท์ และแร่เวอร์มิคูไลต์ โดยวิธี Physical adsorption และศึกษาสภาวะต่างๆที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ไลโปสตรึง พบว่า เอนไซม์ไลโปสตรึงบนแบร่อนท์มอริลไลโนท์ มีสภาวะที่เหมาะสมในการตรึงดังนี้ การใช้ปริมาณเอนไซม์ต่อสารพูนเท่ากับ 5:1 ใช้เวลาในการตรึง 90 นาที เมื่อศึกษาคุณสมบัติของเอนไซม์ไลโปสตรึงบนแบร่อนท์มอริลไลโนท์พบว่า ค่าพิเออร์ซีที่เหมาะสมในการทำงานคือ พีเออร์ซี 9 มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานคือ 70 องศาเซลเซียส มีความเสถียรต่อพีเออร์ซีในช่วง 6-9 และมีความเสถียรต่ออุณหภูมิในช่วง 45-80 องศาเซลเซียส ส่วนเอนไซม์ตรึงบนแร่เวอร์มิคูไลต์มีสภาวะที่เหมาะสมในการตรึง ได้แก่ ปริมาณเอนไซม์ต่อสารพูนเท่ากับ 3:1 ใช้เวลาในการตรึง 30 นาที ค่าพิเออร์ซีที่เหมาะสมในการทำงานคือพีเออร์ซี 6-7 มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานคือ 45 องศาเซลเซียส มีความเสถียรต่อพีเออร์ซีช่วงพีเออร์ซี 7-10 และมีความเสถียรต่ออุณหภูมิในช่วง 45-80 องศาเซลเซียส ผลการศึกษานี้บ่งชี้ว่าแบร่อนท์มอริลไลโนท์ และแร่เวอร์มิคูไลต์มีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นสารพูนสำหรับเอนไซม์ไลโปส แต่อย่างไรก็ตามยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาสภาวะที่สามารถนำเอนไซม์ตรึงรูปทั้งสองแบบไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อไป

การพัฒนาการตรึงเอนไซม์ไลโปสประสิทธิภาพสูงบนแบร่อนท์มอริลไลโนท์และแร่เวอร์มิคูไลต์ เพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล
(Development of high-efficiency lipase immobilization on economic efficiency carrier for biodiesel production)

พัชราภรณ์ ธรรมจักร
ดร. พัทธนาพร ธรรมจักรเกียรติ
ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

งานวิจัยซึ่งได้ศึกษาการตรึงเอนไซม์ไลโปสจากเชื้อ *Bacillus* sp. BLCD 003 บนแบร่อนท์-มอริลไลโนท์ และแร่เวอร์มิคูไลต์ โดยวิธี Physical adsorption และศึกษาสภาวะต่างๆที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ไลโปสตรึง พบว่า เอนไซม์ไลโปสตรึงบนแบร่อนท์มอริลไลโนท์ มีสภาวะที่เหมาะสมในการตรึงดังนี้ การใช้ปริมาณเอนไซม์ต่อสารพูนเท่ากับ 5:1 ใช้เวลาในการตรึง 90 นาที เมื่อศึกษาคุณสมบัติของเอนไซม์ไลโปสตรึงบนแบร่อนท์มอริลไลโนท์พบว่า ค่าพิเออร์ซีที่เหมาะสมในการทำงานคือ พีเออร์ซี 9 มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานคือ 70 องศาเซลเซียส มีความเสถียรต่อพีเออร์ซีในช่วง 6-9 และมีความเสถียรต่ออุณหภูมิในช่วง 45-80 องศาเซลเซียส ส่วนเอนไซม์ตรึงบนแร่เวอร์มิคูไลต์มีสภาวะที่เหมาะสมในการตรึง ได้แก่ ปริมาณเอนไซม์ต่อสารพูนเท่ากับ 3:1 ใช้เวลาในการตรึง 30 นาที ค่าพิเออร์ซีที่เหมาะสมในการทำงานคือพีเออร์ซี 6-7 มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานคือ 45 องศาเซลเซียส มีความเสถียรต่อพีเออร์ซีช่วงพีเออร์ซี 7-10 และมีความเสถียรต่ออุณหภูมิในช่วง 45-80 องศาเซลเซียส ผลการศึกษานี้บ่งชี้ว่าแบร่อนท์มอริลไลโนท์ และแร่เวอร์มิคูไลต์มีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นสารพูนสำหรับเอนไซม์ไลโปส แต่อย่างไรก็ตามยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาสภาวะที่สามารถนำเอนไซม์ตรึงรูปทั้งสองแบบไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อไป

ภาพที่ 5 ลักษณะของแร่เวอร์มิคูไลต์
(ที่มา : จากการศึกษา)

ภาพที่ 6 ลักษณะของแบร่อนท์มอริลไลโนท์
(ที่มา : จากการศึกษา)

1. การเตรียมเอนไซม์กึ่งบริสุทธิ์และการตรึงเอนไซม์

เมื่อเลี้ยงเชื้อ *Bacillus* sp. BLCD 003 ใน Production medium เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อเก็บ Crude enzyme ไปตกตะกอนโปรตีนแบบด้วยเอนโมเนียมซัลเฟตที่มีความอิ่มตัว 80 เปอร์เซ็นต์ นำไปวิเคราะห์ค่ากิจกรรมเอนไซม์ทั้งหมด ปริมาณ โปรตีนทั้งหมด กิจกรรมจำเพาะ ความบริสุทธิ์ และปริมาณเอนไซม์คงเหลือ พบว่า เมื่อตกตะกอนโปรตีนด้วยเอนโมเนียมซัลเฟต 80 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์ทั้งหมด และปริมาณ โปรตีนทั้งหมด เท่ากับ 0.2361 ยูนิต และ 12.436 มิลลิกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีปริมาณเอนไซม์คงเหลือสูงที่สุด เท่ากับ 14.070 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามเมื่อเอนไซม์กึ่งบริสุทธิ์ที่ได้ไปทำ dialysis และนำไปตรึงบนแบร่อนท์มอริลไลโนท์เปรียบเทียบกับกรดโคริกโดยใช้ Crude enzyme พบว่า เอนไซม์ที่ตรึงโดยใช้ Crude enzyme ให้ค่ากิจกรรมสัมพัทธ์ (Relative activity) สูงกว่าเอนไซม์ที่ตรึงโดยใช้เอนไซม์กึ่งบริสุทธิ์ประมาณ 1.6 เท่า ที่เวลา 30 นาที จึงได้เลือกใช้ Crude enzyme ในการทดลองการตรึงเอนไซม์ในขั้นต่อไป

2. การศึกษาผลของปริมาณเอนไซม์ต่อการตรึงเอนไซม์ไลโปส

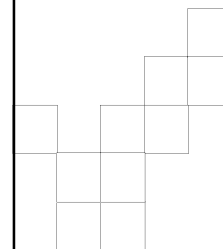
เมื่อนำ Crude enzyme มาผสมกับสารพูน ซึ่งได้แก่ แร่บร่อนท์มอริลไลโนท์ และแร่เวอร์มิคูไลต์ ด้วยอัตราส่วนระหว่าง Crude enzyme ต่อสารพูน ดังนี้ 3:1, 4:1, 5:1 และ 6:1 โดยใช้เวลาตรึง 60 นาที พบว่า อัตราส่วนระหว่าง Crude enzyme ต่อสารพูน ที่ให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์สูงสุดเอนไซม์ที่ตรึงบนแบร่อนท์มอริลไลโนท์คือ 5:1 ซึ่งมีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เท่ากับ 15.64 มิลลิยูนิตต่อกรัม ส่วนเอนไซม์ที่ตรึงบนเวอร์มิคูไลต์พบว่าอัตราส่วนระหว่าง Crude enzyme ต่อสารพูนที่ให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์สูงสุดคือ 3:1 ซึ่งมีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เท่ากับ 12.90 มิลลิยูนิตต่อกรัม ดังแสดงในภาพที่ 6 จึงเลือกอัตราส่วนทั้งสองค่าไปทำการทดลองต่อไป

อัตราส่วน Crude enzyme : สารพูน	Montmorillonite (มิลลิยูนิตต่อกรัม)	Vermiculite (มิลลิยูนิตต่อกรัม)
3:1	~13.5	~12.5
4:1	~11.0	~7.5
5:1	~15.5	~7.0
6:1	~11.5	~8.5

ภาพที่ 6 กิจกรรมของเอนไซม์ไลโปส (มิลลิยูนิตต่อกรัม) เมื่อตรึงเอนไซม์ด้วยอัตราส่วนระหว่าง Crude enzyme ต่อสารพูน ที่แตกต่างกัน



งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการตรึงเอนไซม์ไลเปสจากเชื้อ *Bacillus* sp. BLCD 003 บนแรม่อนท์-มอริลโลไนท์ และแร่เวอร์มิคูไลท์ โดยวิธี Physical adsorption และศึกษาสภาวะต่างๆที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ไลเปสตรึง พบว่า เอนไซม์ไลเปสตรึงบนแรม่อนท์มอริลโลไนท์ที่มีสภาวะที่เหมาะสมในการตรึงครั้งนี้ การใช้ปริมาณเอนไซม์ต่อสารพองเท่ากับ 5:1 ให้ความเวลาในการตรึง 90 นาที เมื่อศึกษาคุณสมบัติของเอนไซม์ไลเปสตรึงบนแรม่อนท์มอริลโลไนท์พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการทำงานคือ พีเอช 9 มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานคือ 70 องศาเซลเซียส มีความเสถียรต่อพีเอชในช่วง 6-9 และมีความเสถียรต่ออุณหภูมิในช่วง 45-80 องศาเซลเซียส ส่วนเอนไซม์ตรึงบนแร่เวอร์มิคูไลท์ที่มีสภาวะที่เหมาะสมในการตรึง ได้แก่ ปริมาณเอนไซม์ต่อสารพองเท่ากับ 3:1 ให้ความเวลาในการตรึง 30 นาที ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการทำงานคือพีเอช 6-7 มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานคือ 45 องศาเซลเซียส มีความเสถียรต่อพีเอชในช่วงพีเอช 7-10 และมีความเสถียรต่ออุณหภูมิในช่วง 45-80 องศาเซลเซียส ผลการศึกษานี้บ่งชี้ว่าแรม่อนท์มอริลโลไนท์ และแร่เวอร์มิคูไลท์มีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นสารพองสำหรับตรึงเอนไซม์ไลเปส แต่อย่างไรก็ตามยังต้องการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาสภาวะที่สามารถนำเอนไซม์ตรึงรูปทั้งสองแบบไปใช้ในการผลิตไบโอ-ดีเซลต่อไป



เทคโนโลยีเอนไซม์

อาจารย์ ดร. หัสลินดา บินมะแอ
คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร
มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา