บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง เอนไซม์แอลคาไลน์โพรทีเอส ค่าสัมประสิทธิ์การแยก การสกัดของเหลวด้วยของเหลว โพรไฟล์ความเข้มข้นของเอนไซม์ในวัฏภาคต่อเนื่องตามความสูงของหอสกัด ลักษณะของหอสกัดโอลชูรัชตัน และการพิจารณาประสิทธิภาพของหอสกัดโอลชูรัชตัน

2.2 แอลคาไลน์โพรทีเอส

แอลคาไลน์โพรทีเอส หรือ เซอรีนโพรทีเอส(serine protease) เป็นโพรทีเอสที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายโปรตีนโดยเฉพาะพันธะเปปไทด์ของโปรตีน ซึ่งโพรทีเอสนั้นมีความสำคัญในกระบวนการอุตสาหกรรม ทั้งในอุตสาหกรรมการฟอกหนัง อุตสาหกรรมการผลิตยา อุตสาหกรรมผงซักฟอก และอุตสาหกรรมอาหาร(Anshu และคณะ, 2005)

แอลคาไลน์โพรทีเอส มีน้ำหนักโมเลกุล 26 kDa (gel filtration) และเร่งปฏิกิริยาได้ดีที่สุดที่สภาวะเป็นด่างคือ 7.5 โดยเอนไซม์ชนิดนี้มีหมู่ OH อยู่บริเวณตำแหน่งกัมมันต์(active site)และเอนไซม์ที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ ไคโมทริปซิน(chymotripsin), ทริปซิน(tripsin), อิลาสเตส(elastase), ทรอมบิน(thrombin), ซับทิลิซิน(subtilitin) โดยเอนไซม์แอลคาไลน์โพรทีเอสจะถูกยับยั้งการทำงานโดยตัวยับยั้งจำเพาะที่มีผลต่อกรดอะมิโนเซอรีน ได้แก่ ไค-ไอโซ โพรพิลฟลูออโรฟอสโฟเนต(di-iso propy flourophosphonate, DFP) และฟีนิลเมททิลซัลโฟนิล ฟลูออไรด์ (phenylmethyl sulphonyl fluoride, PMSF)(นันทิญา, 2543) เนื่องจากเอนไซม์มีความจำเพาะเจาะจงต่อค่าความเป็นกรด-ด่างและสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ดังนั้นในการสกัดจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของเอนไซม์ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ สารเคมี และแรงกล

2.3 สมดุลระหว่างสองวัฏภาค

2.3.1 เงื่อนไขของสมดุลวัฏภาค

สำหรับในระบบที่มีสารผสมมากกว่า 1 ชนิด ซึ่งในระบบจะมีส่วนประกอบ C ชนิดและ ϕ วัฏภาค ในสภาวะที่ระบบอยู่ในสมดุลทางอุณหพลศาสตร์นั้น จะสามารถเขียนสมการของระบบได้ดังสมการที่ 2.1

$$\begin{aligned} T_{(1)} &= T_{(2)} = \ldots\ldots = T_{(\phi)}, \\ P_{(1)} &= P_{(2)} = \ldots\ldots = P_{(\phi)}, \\ \mu_{i(1)} &= \mu_{i(2)} = \ldots\ldots = \mu_{i(\phi)}, i = 1,\ldots\ldots, C \end{aligned} \qquad 2.1$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย $\mu_{(i)}$ แสดงถึงค่าศักย์เคมีของส่วนประกอบ i ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างศักย์เคมีและพลังงานอิสระกิปป์ $(G_{(\phi)})$ ได้ดังสมการที่ 2.2 ดังนี้

$$\mu_{i(\phi)} = (\partial G_{(\phi)} / \partial n_{i(\phi)})_{T,P,n_{j(\phi)}} \qquad 2.2$$

ดังนั้นการเข้าสู่สมดุลของระบบจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ประกอบด้วย อุณหภูมิ ความดัน และศักย์เคมีของแต่ละสารประกอบที่อยู่ในระบบ โดยปกติแล้วระบบที่ประกอบด้วยของเหลว-ของเหลว จะดำเนินการที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ดังนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลระบบจะมีพลังงานอิสระกิปป์ของระบบน้อยที่สุดดังสมการที่ 2.3 ดังนี้

$$d(G_{(\phi)})_{T,P} = 0 \qquad 2.3$$

2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแยก (Partition coefficient, m)

ค่าสัมประสิทธิ์การแยกเป็นอัตราส่วนของความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่กระจายตัวอยู่ในระบบสองวัฏภาคที่สภาวะสมดุล โดยกล่าวเฉพาะในกรณีที่สภาวะสมดุลของของเหลวเท่านั้น

นิยามค่าสัมประสิทธิ์การแยกสำหรับระบบของเหลว-ของเหลวโดยมีลักษณะเป็นสารละลายเจือจาง (dilute solution) แสดงได้ดังสมการที่ 2.4

$$m_i = \frac{C_i^{(1)}}{C_i^{(2)}} \qquad 2.4$$

สมการที่ 2.4 จะถูกนำไปใช้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแยกของตัวถูกละลายสำหรับระบบของเหลว-ของเหลวที่เข้าสู่สมดุล ซึ่งระบบที่เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วนั้นจะเป็นระบบที่มีพลังงานอิสระกิปป์น้อยที่สุดดังสมการที่ 2.3

<u>กำหนดตัวแปรต่างๆดังนี้</u>

i คือ ตัวถูกละลายในระบบ

$C_i^{(1)}$และ $C_i^{(2)}$ คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในวัฏภาคกระจายตัวและวัฏภาคต่อเนื่องตามลำดับ

m_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแยกของตัวถูกละลายสำหรับระบบของเหลว-ของเหลว

2.4 การสกัดของเหลวด้วยของเหลว

การสกัดของเหลวด้วยของเหลวนั้นเป็นการแยกตัวถูกละลาย(solute) ออกจากสารละลาย(solution) โดยนำมาสัมผัสกับตัวทำละลาย(solvent) ที่มีคุณสมบัติไม่ผสมกันกับสารละลาย ดังนั้นตัวถูกละลายจะถูกสกัดได้ดี ต้องมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายได้ดีด้วย ซึ่งจะอาศัย

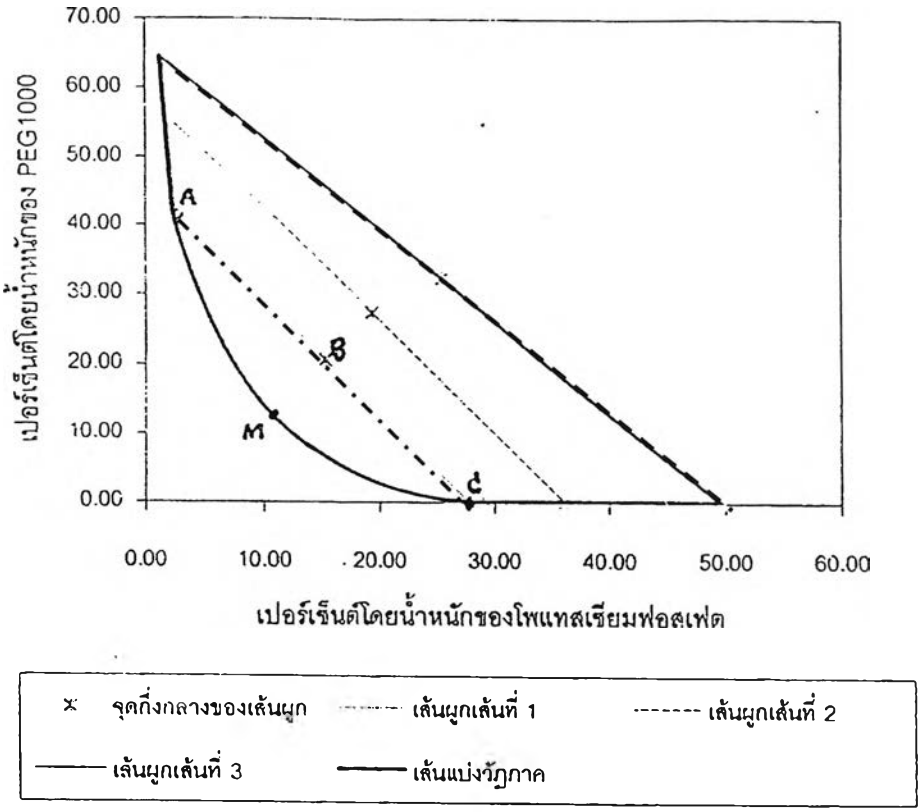
สมบัติทางกายภาพและเคมีของระบบ การสกัดของเหลวด้วยของเหลวนั้นนิยมใช้ในกรณีที่ไม่สามารถแยกสารได้หรือแยกสารได้ไม่ดีด้วยการกลั่น การระเหย การตกผลึก ซึ่งอาจเนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

2.4.1 ระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาค (Aqueous two-phase Systems, ATPS)

ระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาคเป็นรูปแบบหนึ่งของการสกัดของเหลวด้วยของเหลว(liquid-liquid extraction) เป็นระบบที่ทำได้ง่าย มีประสิทธิภาพสูง สะดวกในการดำเนินงาน และมีสภาวะแวดล้อมของระบบที่เหมาะสมกับเอนไซม์ เนื่องจากเป็นระบบที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายหลัก ซึ่งน้ำก็เป็นตัวทำละลายตามธรรมชาติของเอนไซม์ด้วย โดยทั่วไปรูปแบบของการสกัดด้วยวิธีนี้จะมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ แบบที่มีองค์ประกอบเป็นพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ และมีองค์ประกอบเป็นพอลิเมอร์กับเกลือ ส่วนใหญ่พอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการสกัดด้วยวิธีนี้ได้แก่ พอลีเอทีลีนไกลคอล(PEG)และเด็กแทรน แล้วแต่การเลือกใช้งานและตามความเหมาะสม และระบบที่มีองค์ประกอบเป็นพอลิเมอร์กับเกลือส่วนมากจะนิยมใช้พอลิเอทีลีนไกลคอล(PEG)กับโพแทสเซียมฟอสเฟต หรือพอลีเอทิลีนไกลคอลกับแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งพอลิเอทีลีนไกลคอลที่นิยมใช้นั้นจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 200-40,000(Andersson และ คณะ, 1984) ในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบการสกัดด้วยสารละลายน้ำสองวัฏภาค โดยองค์ประกอบของระบบที่ใช้จะประกอบด้วย พอลิเมอร์กับเกลือ และพอลิเมอร์ที่ใช้คือ พอลีเอทีลีนไกลคอล 1000(PEG 1000) ส่วนเกลือที่ใช้คือโพแทสเซียมฟอสเฟต ในการสกัดนั้นจะใช้แรงกลเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด จึงทำให้ในระหว่างการสกัดจะเกิดการผสมกันของทั้งสองวัฏภาค และการผสมกันของวัฏภาคจะเกิดขึ้นได้ง่ายเนื่องจากระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาคมีแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคต่ำ (interfacial tension) คือประมาณ 0.0001-0.1 dyn/cm (Andersson และ คณะ, 1984)

2.4.2 แผนภาพวัฏภาค (Phase diagram)

แผนภาพวัฏภาคนั้น เป็นแผนภาพที่ใช้ในการแสดงการแบ่งวัฏภาคออกเป็นส่วนๆ โดยมีเส้นแบ่งวัฏภาคเป็นตัวกำหนด แผนภาพวัฏภาคนั้นสามารถเขียนได้ 2 แบบได้แก่ เขียนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าและเขียนแบบสามเหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งการเขียนแบบหลังนั้นเป็นที่นิยมมากกว่าแบบแรก โดยแกน y (แนวตั้ง) จะแสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่มีมากในวัฏภาคบน ส่วนแกน x (แนวนอน) แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งหรือเกลือที่มีมากในวัฏภาคล่าง ดังนั้นทุกจุดบนแผนภาพวัฏภาคจะมีน้ำหนักรวมเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเสมอ ในแผนภาพวัฏภาคที่เขียนเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก จะไม่แสดงความเข้มข้นของตัวทำละลายน้ำ ซึ่งจะแตกต่างจากแผนภาพวัฏภาครูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ในหัวข้อนี้จะแสดงองค์ประกอบของวัฏภาคเฉพาะแผนภาพแบบสามเหลี่ยมมุมฉาก ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาควัฏภาคของระบบพอลิเอทิลีนไกลคอล 1000 (PEG 1000) โพแทสเซียมฟอสเฟต/น้ำ ความเป็นกรด-ด่างที่ 7.5 อุณหภูมิ 30 $\pm$ 2 องศาเซลเซียส และที่ความดันบรรยากาศ (นันทิญา, 2543)

กราฟเส้นโค้งที่แสดงในรูปที่ 2.1 เรียกว่า เส้นแบ่งวัฏภาค (binodal curve) โดยที่เส้นโค้งดังกล่าวจะเป็นเส้นแบ่งลักษณะของวัฏภาคที่เกิดขึ้นในระบบ โดยจุดที่อยู่เหนือเส้นแบ่งวัฏภาค สารละลายจะมีลักษณะเป็นของเหลว 2 วัฏภาค ส่วนจุดที่อยู่ใต้เส้นแบ่งวัฏภาคนั้น สารละลายจะมีลักษณะเป็นของเหลววัฏภาคเดียว เส้นตรงที่เชื่อมระหว่างจุดบนเส้นแบ่งวัฏภาค เรียกว่า เส้นผูก (tie line) สารละลายผสมที่แสดงบนเส้นผูกเดียวกันจะมีองค์ประกอบในแต่ละวัฏภาคเท่ากัน แต่สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาคบนต่อ วัฏภาคล่าง (V_1/V_2) จะแตกต่างกัน โดยสัดส่วนเชิงปริมาตรดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของเส้นผูก (AB/BC) จุด M ที่อยู่บนเส้นแบ่งวัฏภาคเรียกว่าจุดวิกฤติ (critical point) ซึ่งมีองค์ประกอบของทั้งสองวัฏภาคเท่ากัน

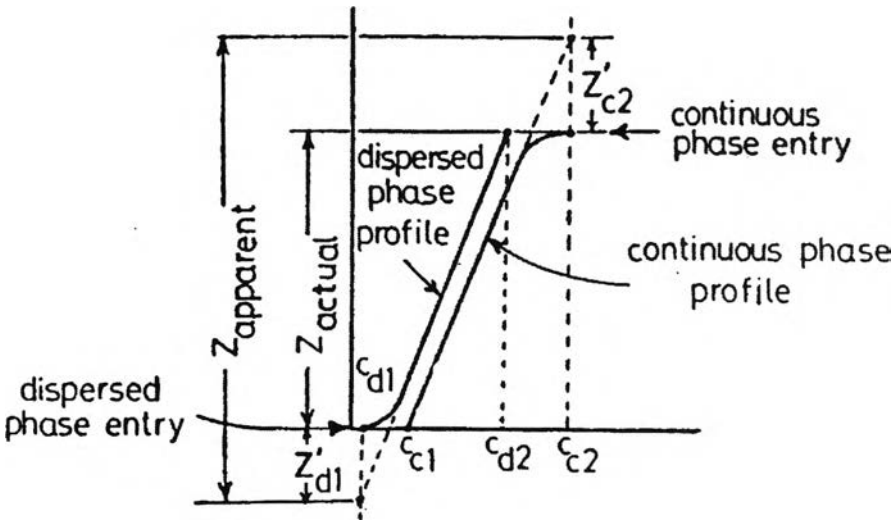
2.5 โพรไฟล์ความเข้มข้นของเอนไซม์ในวัฏภาคต่อเนื่องตามความสูงของหอสกัด

การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของเอนไซม์ภายในหอสกัดระหว่างการดำเนินการสกัด เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการประมาณค่าความเข้มข้นที่เป็นผลมาจากอัตราการถ่ายเทมวลสาร(Mass transfer rate) จากการศึกษาของ Laddha และคณะ (1978) ซึ่งทำการศึกษาการความแตกต่างกันของความเข้มข้นของตัวถูกละลายแต่ละวัฏภาคบริเวณทางเข้าและทางออกปลายสุดของหอสกัด (Spray column) จากรูปที่ 2.2 แสดงถึงผลที่เกิดขึ้นบริเวณทางเข้าหอสกัด (Entrance effect) และจากงานวิจัยพบว่า Entrance effect ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารมีค่ามากตรงบริเวณขาเข้าของทั้งสองวัฏภาค สาเหตุเกิดขึ้นจาก

2.5.1 บริเวณสายป้อนของวัฏภาคต่อเนื่อง(Continuous phase entry) เมื่อตัวถูกละลายที่อยู่ในสายป้อนของวัฏภาคต่อเนื่องถูกป้อนเข้ามาจะมีการถ่ายเทมวลสาร 2 ทางคือ ถ่ายเทมวลสารระหว่างสายป้อนของวัฏภาคต่อเนื่องกับวัฏภาคกระจายตัวที่มีอยู่เดิมในหอสกัด ทางที่สองคือ ถ่ายเทมวลสารระหว่างสายป้อนของวัฏภาคต่อเนื่องกับวัฏภาคกระจายตัวที่แยกชั้นอยู่ทางด้านบน (settling zone) ดังนั้นบริเวณด้านบนของหอสกัดจึงมีการถ่ายเทมวลสารมากเมื่อเทียบกับความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย

2.5.2 เมื่อหยดของวัฏภาคกระจายตัวลอยตัวขึ้นไปในหอสกัดจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อสัมผัสกับบริเวณ interface จะแตกออกเป็นหยดขนาดเล็กๆ ดังนั้นเมื่อสัมผัสกับตัวถูกละลายที่อยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องสายป้อนที่ป้อนเข้ามาทางด้านบน จะมีการถ่ายเทมวลมากกว่าทางด้านล่างของหอสกัด ความเข้มข้นของตัวถูกละลายทางด้านบนจึงเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเทียบกับความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย

จากเหตุผลทั้งสองข้อ สามารถอธิบายได้ว่า Z_{actual} เป็นความสูงของหอสกัดที่เกิด Entrance effect ขึ้นบริเวณทางเข้า(ความสูงจริงของหอสกัด) ส่วนค่า $Z_{apparent}$ เป็นค่าความสูงของหอสกัดที่มี driving force เท่ากันกับหอสกัดที่เกิด Entrance effect บริเวณทางเข้าและ Z'_{C2} เป็นผลต่างความสูงของความสูงที่เกิดจากจุดตัดของเส้นตรง 2 เส้น(เส้นตรงที่ลากจากจุด C_{C1} ผ่านโพรไฟล์ความเข้มข้นของเอนไซม์ในวัฏภาคต่อเนื่องตามความสูงขอหอสกัด(Continuous phase profile) กับเส้นตรงที่ตั้งฉากกับจุด C_{C2}) กับความสูงจากจุดป้อนของวัฏภาคต่อเนื่องและค่า Z'_{d1} สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันคือเป็นผลต่างความสูงจากจุดป้อนของวัฏภาคกระจายตัวกับความสูงที่เกิดจากจุดตัดของเส้นตรง 2 เส้น(เส้นตรงที่ลากจากจุด C_{d2} ผ่านโพรไฟล์ความเข้มข้นของเอนไซม์ในวัฏภาคกระจายตัวตามความสูง (Dispersed phase profile) กับเส้นตรงที่ตั้งฉากกับจุด



รูปที่ 2.2 แสดงถึง Entrance effect ของหอสกัดชนิดสเปรย์ (Laddha และ คณะ, 1978)

2.6 หอสกัดโอลชูรัชตัน

เครื่องมือที่ใช้สำหรับการสกัดของเหลวด้วยของเหลวแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ หอสกัดแบบตั้งฉากกับพื้นและหอสกัดแบบขนานกับพื้น ซึ่งแต่ละแบบสามารถแบ่งออกเป็นประเภทย่อยๆได้หลายประเภท แต่ในงานวิจัยนี้ใช้หอสกัดแบบตั้งฉากกับพื้นที่มีแรงกลช่วยในการสกัด (mechanical column) ซึ่งหอสกัดชนิดนี้นิยมใช้กับของเหลวที่มีความหนืด ส่วนแรงกลที่ใช้นั้นยังสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกันของทั้งสองวัฏภาค จึงทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารของเหลวทั้งสองวัฏภาคที่อยู่ภายในหอสกัดเพิ่มขึ้น โดยงานวิจัยนี้จะใช้หอสกัดโอลชูรัชตันขนาด 5.7 ลิตรซึ่งจะมีลักษณะดังนี้

หอสกัดชนิดนี้ปรากฏขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1952 ลักษณะของหอสกัดจะประกอบด้วยตัวหอที่ตั้งฉากกับพื้นภายในประกอบด้วยวงแหวนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งหอสกัดออกเป็นส่วนๆตามความสูงของหอสกัด ในแต่ละส่วนจะประกอบด้วยใบกวน แบบ 4 bladed disc turbines ที่ติดอยู่ที่แกนหมุน ดังรูปที่ 2.3 และยังประกอบด้วย baffle อีก 4 อันติดอยู่ที่ผนังในแนวตั้งตามความสูงของหอ หอสกัดชนิดนี้เป็นหอสกัดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวน ระยะห่างระหว่างวงแหวน และขนาดของใบพัด มีแนวทางในการออกแบบดังสมการ 2.6 (Thornton, 1992) แต่อย่างไรก็ตาม รัศมีและระยะห่างของวงแหวนที่เหมาะสมต่อการสกัดได้จากการทดลองเท่านั้น(วิไลวรรณ, 2544)

$$d_r/d_c = 0.33\text{-}0.5$$
$$d_s/d_c = 0.35\text{-}0.55 \qquad 2.5$$
$$w_b/d_c = 0.08$$
$$h_c/d_c = 0.4\text{-}0.6$$

กำหนดตัวแปรต่างๆ ดังนี้

d_r คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน (cm)

d_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหอสกัด (cm)

d_s คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวงแหวน (cm)

h_c คือ ระยะห่างระหว่างวงแหวน (cm)

w_b คือ ความกว้างของ buffer ในหอสกัด (cm)

ส่วนการสกัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นแบบไหลสวนทางระหว่างวัฏภาคกระจายตัว (dispersed phase) กับวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) ซึ่งการดำเนินการสกัดแบบนี้จะเกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่าแบบไหลไปในทางเดียวกัน

2.7 ประสิทธิภาพของหอสกัดโอลชูรัสตัน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเอนไซม์แอลคาไลน์โพรทีเอส โดยใช้ระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาคในหอสกัดโอลชูรัชตัน ซึ่งสามารถประเมินภาวะที่เหมาะสมในการสกัดของหอสกัดได้จากปัจจัยต่างๆ เหล่านี้

2.7.1 จำนวนเท่าของความบริสุทธิ์ (Purification factor)

จำนวนเท่าของความบริสุทธิ์ เป็นอัตราส่วนระหว่าง ค่ากิจกรรมเอนไซม์จำเพาะ (Specific activity) ของวัฏภาคกระจายตัวที่สถานะคงตัว (steady state) และค่ากิจกรรมเอนไซม์จำเพาะ (Specific activity) ของเอนไซม์เริ่มต้นก่อนป้อนเข้าหอสกัดดังสมการที่ 2.7 ดังนี้

$$PF = \frac{\left(Specific \quad activity_{(topphase)_{steadystate}}\right)}{\left(Specific \quad activity\right)_{(inlet)}} \qquad 2.7$$

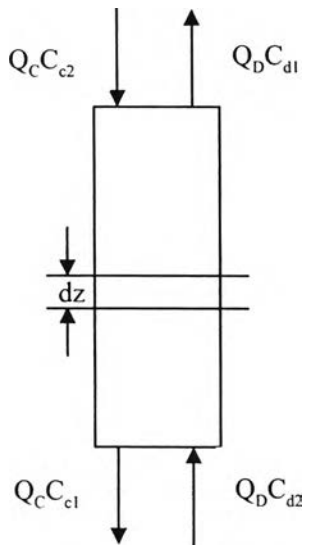
2.7.2 เปอร์เซ็นต์ผลได้ (% Yield)

เปอร์เซ็นต์ผลได้ คือปริมาณเอมไซม์ที่สามารถสกัดได้เมื่อเทียบกับปริมาณเอนไซม์เริ่มต้นก่อนการสกัด คำนวณได้โดยนำค่าอัตราการไหลของวัฏภาคกระจายตัวคูณกับค่ากิจกรรมเอนไซม์ของวัฏภาคกระจายตัวที่สภาวะคงตัว นำค่าที่ได้หารด้วยค่าอัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่องคูณกับค่ากิจกรรมเอนไซม์เริ่มต้น จากนั้นนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาคูณ 100เพื่อทำเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 2.8 ดังนี้

$$\%Yield = \frac{(\text{Flow rate}_{\text{dispersed outlet}} \times \text{Activity}_{\text{dispersed outlet}}) \times 100}{(\text{Flow rate}_{\text{continuous phase inlet}} \times \text{Activity}_{\text{inlet}})} \qquad 2.8$$

2.7.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของวัฏภาคกระจายตัวภายในหอสกัดนั้น เริ่มต้นจากการทำสมดุลมวลรวมของวัฏภาคกระจายตัว จากบริเวณช่วงย่อย dz



รูปที่ 2.3 แสดงการถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดขึ้นในหอสกัดชนิดโอลชูรัชตัน

สมการการถ่ายเทมวลสารภายในหอสกัดเป็นดังนี้

$$Q_D (C_{d1} - C_{d2}) = N_A A \qquad 2.9$$

<u>กำหนดให้</u>

$$N_A = K_{OD}\left(C^*_d - C_d\right)_{lm} \qquad 2.10$$

และ $\left(C^*_d - C_d\right)_{lm}$ เป็นค่าความเข้มข้นของเอนไซม์ในวัฏภาคต่อเนื่องเฉลี่ยตลอดทั้งหอสกัดจึง กำหนดให้

$$\left(C^*_d - C_d\right)_{lm} = \frac{\left(C^*_{d1} - C_{d1}\right) - \left(C^*_{d2} - C_{d2}\right)}{\ln \frac{\left(C^*_{d1} - C_{d1}\right)}{\left(C^*_{d2} - C_{d2}\right)}} \qquad 2.11$$

และพื้นที่ในการถ่ายเทมวลคือ A โดยกำหนดให้

$$A = aV_D \qquad 2.12$$

แทนค่าสมการที่ 2.10, 2.11 และ 2.12 ลงในสมการที่ 2.9 และทำการจัดรูปของสมการ จึงได้สมการที่ 2.13 ดังนี้

$$K_{OD}a = \frac{Q_D}{V_D}\frac{(C_{d1} - C_{d2})}{(\Delta C_d)_{lm}} \qquad 2.13$$

<u>กำหนดให้</u>

และ $C^*_{d1} = mC_{C1}$; $C^*_{d2} = mC_{C2}$ 2.14

กำหนดตัวแปรต่างๆ ดังนี้

a คือ พื้นที่ในการถ่ายเทมวลต่อ dispersion volume ทั้งหมดภายในหอสกัด (cm^2/cm^3)

A คือ พื้นที่ในการถ่ายเทมวล (cm^2)

C_{c1} คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ในวัฏภาคต่อเนื่องขาออก ($unit/cm^3$)

C_{c2} คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ในวัฏภาคต่อเนื่องขาเข้า ($unit/cm^3$)

C_{d1} คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ในวัฏภาคกระจายตัวขาออก ($unit/cm^3$)

C_{d2} คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ในวัฏวัฏภาคกระจายตัวขาเข้า ($unit/cm^3$)

C^*_{d1} คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ในวัฏภาคกระจายตัวขาออกที่สภาวะสมดุล ($unit/cm^3$)

C^*_{d2} คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ในวัฏภาคกระจายตัวขาเข้าที่สภาวะสมดุล ($unit/cm^3$)

K_{OD} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม อ้างอิงวัฏภาคกระจายตัว (cm/min)

$K_{OD}a$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม อ้างอิงวัฏภาคกระจายตัว (min^{-1})

m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแยก

N_A คือ ฟลักซ์ ($unit/cm^2.sec$)

Q_D คือ อัตราการไหลของวัฏภาคกระจายตัว (cm^3/min)

Q_C คือ อัตราการไหลของวัฏภาคต่อเนื่อง (cm^3/min)

V_D คือ ปริมาตรของ dispersion volume ทั้งหมดภายในหอสกัด (cm^3)