

การออกแบบเครื่องกลั่นเอทานอลไร้น้ำด้วยเทคนิค Heterogeneous Azeotropic Ethanol Heterogeneous Azeotropic Distiller Design

วิจิตร อุดอ้าย^{*1}, มัทนี สงวนเสริมศรี^{*2}, ศิรินุช จินดารักษ์^{*3}, ศิริลักษณ์ ชัยจำรัส^{*4}, อนุสรณ์ วรสิงห์^{*5}

^{*1} ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, จ.พิษณุโลก 65000 Email: vijitru@nu.ac.th

^{*2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, จ.พิษณุโลก 65000 Email: mathanees@nu.ac.th

^{*3} ภาควิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, จ.พิษณุโลก 65000 Email: sirinuchc@nu.ac.th

^{*4} ภาควิชาชีววิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, จ.พิษณุโลก 65000 Email: sirilukc@nu.ac.th

^{*5} ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, จ.พิษณุโลก 65000 Email: anusornv@nu.ac.th

บทคัดย่อ— การออกแบบและติดตั้งเครื่องกลั่นเอทานอลไร้ น้ำแบบต่อเนื่องด้วยเทคนิค Heterogeneous Azeotropic ซึ่งใช้นอร์มอลเฮปเทน (n-Heptane) เป็นสารตัวพา(Entrainer) เป็น การศึกษาเครื่องกลั่นต้นแบบเพื่อนำมาเขียนแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ (Mathematic Model) และวิเคราะห์ผลทางด้าน เศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis) ของกระบวนการแยกน้ำ ออกจากเอทานอล (Dehydrating) เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเอ ทานอล (Bioethanol) กระบวนการกลั่นของเครื่องต้นแบบมี การควบคุมอัตราการไหล (Feed Flow Rate) ของเอทานอล 95% นอร์มอลเฮปเทน และการกลั่นกลับ (Reflux) ของของ ผสมระหว่างเฮปเทนและเอทานอลในหอกลั่น เพื่อหา ประสิทธิภาพของเครื่องกลั่นโดยวิเคราะห์จากเปอร์เซ็นต์เอทา นอลที่กลั่นได้ พลังงานที่ใช้ในการกลั่น และอัตราการกลั่นกลับ เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ในการเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ ต่อไป

คำสำคัญ : Heterogeneous Azeotropic Distillation, Ethanol Dehydration, Feed Flow Rate

1. บทนำ

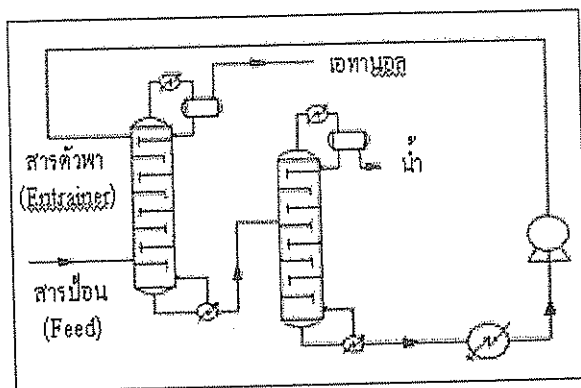
เทคนิคของกระบวนการกลั่นแบบ Azeotropic ถูกนำมาใช้ สำหรับแยกของผสมที่ประกอบด้วยสารสองชนิดออกจากกัน ด้วยการเติมสารตัวที่สามซึ่งเรียกทั่วไปว่า สารตัวพา (entrainer) ซึ่งขึ้นอยู่กับทางเลือกสารตัวพาที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถ แยกไอผสมที่อยู่ในรูป binary หรือ ternary azeotropic mixture

ได้ดี ซึ่งจะช่วยทำให้การกลั่นสามารถแยกสารได้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น กระบวนการกลั่นด้วยวิธีนี้สามารถที่จะนำสารตัวพากลับมาใช้ ใหม่ได้ ปัจจุบันการกลั่นโดยวิธีการนี้ถูกนำมาใช้ใน อุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง สามารถนำเทคโนโลยีนี้มาใช้ใน กระบวนการขจัดน้ำออกจากเอทานอล 95% โดยปริมาตร ให้ เป็นเอทานอล 99.5% โดยปริมาตร นำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงไบ โอเอทานอลแทนน้ำมันเบนซินได้

2. การกลั่นแบบ Azeotropic

การกลั่นแบบ Azeotropic แบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่

1. Homogeneous Azeotropic Distillation เป็นการกลั่นที่มี การเติมสารตัวพาที่มีสถานะเป็นของเหลวผสมกับสารที่เป็น ของผสม Azeotrope แล้วเกิดเป็นสารละลายอยู่ในสถานะเดียว วิธีนี้จะนิยมใช้สำหรับการสกัดสาร สารตัวพาที่เติมเข้าจะต้อง มีจุดเดือดสูงและละลายได้ดีในของผสมและจะต้อง ไม่เกิด Azeotrope กับของผสมที่ต้องการแยก ดังนั้นสารตัวพาที่เติมเข้า ไปจะทำให้เกิดไอสัมพัทธ์ (relative vapour) เพิ่มขึ้น ทำให้ได้ สารที่สกัดได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น เช่น การสกัดเอทานอลที่มี น้ำเป็น azeotropic mixture จะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ของเอทานอล มากขึ้น โดยเอทานอลที่ได้จากการสกัดจะออกทางด้านบนของ หอกลั่น ส่วนสารละลายน้ำกับสารตัวพาที่อยู่ด้านล่างของหอ กลั่นจะถูกนำมาแยกและนำกลับมาใช้ใหม่ (recovery) ดังรูปที่ 1



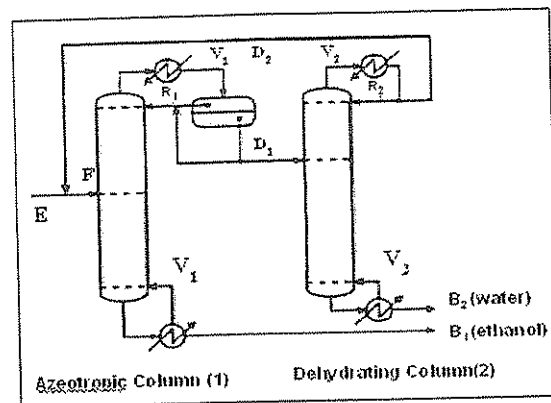
รูปที่ 1 หอกลิ้นแบบ Homogeneous Azeotropic Distillation [1]

2. Heterogeneous Azeotropic Distillation นับเป็นวิธีการกลั่นที่นิยมกันในการอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล การผลิตยา และการผลิตเคมีภัณฑ์ต่างๆ เทคโนโลยีนี้นำมาใช้แยกของผสมที่มีไอสัมพันธ์ของระบบปิด โดยมีสารตัวพาทำหน้าที่แยก (break) ของผสมที่เป็น Azeotrope เช่น เอทานอลหรือแอลกอฮอล์อื่นๆ กับน้ำ การคละชิดกับน้ำ เป็นต้น

2.1 กระบวนการกลั่นแบบ Heterogeneous Azeotropic

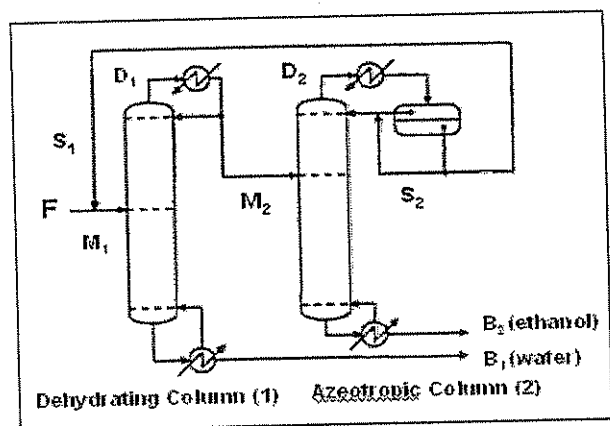
กระบวนการกลั่นแบบ Heterogeneous Azeotropic แบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้

2.1.1 Direct Sequences ประกอบด้วยหอกลิ้น 2 อัน โดยหอกลิ้นแรกเป็นแบบ Azeotropic Distillation Column เพื่อเติมสารป้อน (Feed) และสารตัวพา (Entrainer) รวมเป็นของเหลว 2 สถานะ (รวมทั้งหมดเป็น 3 สถานะคือ ไอ ของเหลว 1 และของเหลว 2) การกลั่นโดยวิธีนี้จะได้สารบริสุทธิ์อยู่ด้านล่างของหอกลิ้น ส่วนสารที่เป็น Azeotrope กับสารตัวพาจะควบแน่นออกมาด้านล่างของหอกลิ้นแล้วมารวมกันตรงบริเวณ Decanter โดยจะแยกเป็น 2 ชั้น คือ ชั้นสารอินทรีย์ (Organic Phase) และชั้นสารละลาย (Aqueous Phase) โดยชั้นสารอินทรีย์ก็คือสารตัวพานั่นเอง ส่วนในชั้นสารละลายก็จะถูกควบแน่นอีกครั้งในหอกลิ้นที่สองเพื่อสกัดแยกเอาส่วนของสารละลายที่เป็น Azeotrope ออกไป ดังรูปที่ 2

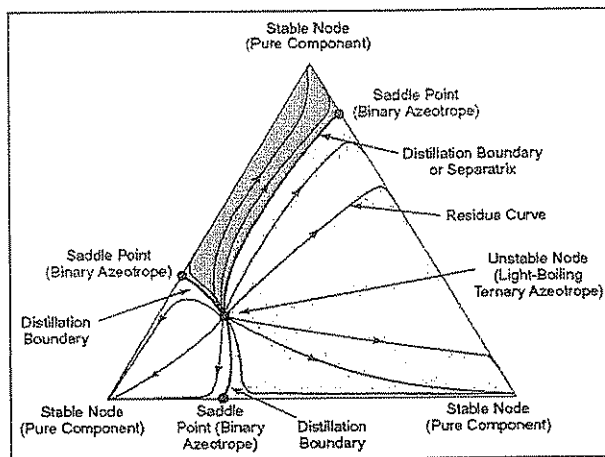


รูปที่ 2 หอกลิ้นแบบ Heterogeneous Azeotropic Distillation - Direct Sequences [2]

2.1.2 Indirect Sequences ประกอบด้วยหอกลิ้น 2 อัน โดยจะมีตัวพาเข้าไปในหอกลิ้นแรกที่ทำหน้าที่จะแยกน้ำออกไปทำให้ได้สารที่เป็นของผสมระหว่างสารตัวพา กับของผสมซึ่งจะควบแน่นด้านล่างของหอกลิ้นแล้วเข้าสู่หอกลิ้นที่สอง ซึ่งจะทำให้สารบริสุทธิ์ออกด้านล่างของหอกลิ้น ส่วนของผสมระหว่างสารตัวพา กับสารละลายของของผสมจะควบแน่นตรงด้านล่างของหอกลิ้นแล้วมารวมตรง Decanter เกิดการแยกชั้นระหว่างชั้นสารอินทรีย์กับชั้นสารละลาย ส่วนสารอินทรีย์หรือสารตั้งต้นก็จะถูกนำกลับมาใช้ในการกลั่น Azeotrope ต่อเนื่องกัน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 หอกลิ้นแบบ Heterogeneous Azeotropic Distillation - Indirect Sequences [2]



รูปที่ 4 เฟสไดอะแกรม [3]

2.2 เฟสไดอะแกรมที่ใช้ในการทดลองแบบ Azeotropic

เฟสไดอะแกรม (Phase Diagram) เป็นกราฟแสดงสัดส่วนขององค์ประกอบของสาร 3 องค์ประกอบ ซึ่งใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำการกลั่นเพื่อจะได้ทราบทิศทางของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่น เฟสไดอะแกรมนี้จะมีเส้นแบ่งขอบเขตและเส้นแนวโน้มของสารที่จะเหลือเป็นผลิตภัณฑ์ มีการแสดงรายละเอียดของเฟสไดอะแกรมของสาร 3 องค์ประกอบดังรูปที่ 4

โดยที่

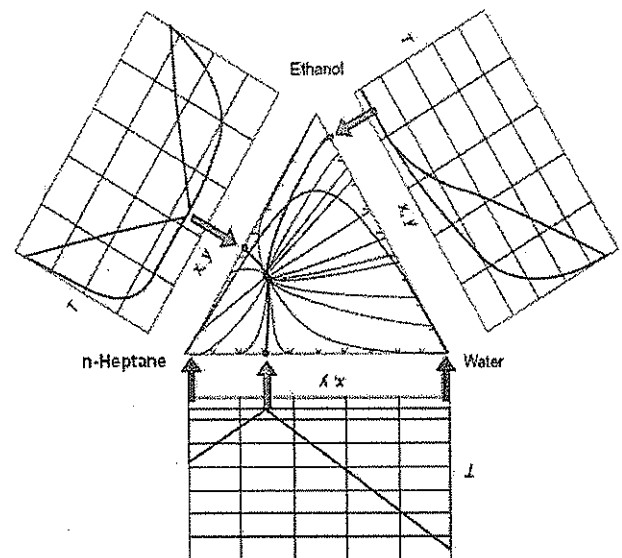
Node คือ จุดทุกจุดที่อยู่บนกราฟเป็นทั้งจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของเส้นกราฟบนเฟสไดอะแกรม

Stable Node คือ จุดคงที่บนเฟสไดอะแกรมที่สารมีความบริสุทธิ์สูงสุดและเป็นจุดที่มีจุดเดือดสูงที่สุด

Unstable Node คือ จุดบนเฟสไดอะแกรมที่มีจุดเดือดต่ำสุดของสาร 3 องค์ประกอบ หรือจุด Ternary Azeotrope

Saddle Point คือ จุดบนเฟสไดอะแกรมที่แสดงจุด Azeotrope ของสาร 2 ชนิดจากกราฟ เมื่ออัตราส่วนของสาร 3 ชนิดตกอยู่บริเวณใดของไดอะแกรมพฤติกรรมของสารจะเดินไปตามเส้น residue curve

จากเฟสไดอะแกรมดังรูปที่ 4 ที่แสดงความสัมพันธ์ของสาร 3 องค์ประกอบ สามารถที่จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสาร 2 องค์ประกอบได้ด้วย ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เฟสไดอะแกรมของ Water-Ethanol-n-Heptane (ดัดแปลงจาก [3])

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงจุด Azeotrope ของสาร 3 องค์ประกอบและสาร 2 องค์ประกอบที่แสดงไว้ในเฟสไดอะแกรมของสาร 3 องค์ประกอบ จากตำแหน่งจุดสี่ค่าที่อยู่ในกราฟของเฟสไดอะแกรมของสารผสม 3 องค์ประกอบ (Water, Ethanol, n-Heptane) สามารถนำมาหาอัตราส่วนอย่างง่ายของแต่ละองค์ประกอบได้

2.3 การออกแบบหม้อต้มและหอกลั่นแบบ Heterogeneous

การกลั่นเป็นการแยกสารผสมที่ประกอบด้วยสาร 2 องค์ประกอบหรือมากกว่าออกจากกันโดยอาศัยจุดเดือดที่ต่างกัน สารผสมเมื่อได้รับความร้อนสารที่มีจุดเดือดต่ำกว่าจะเดือดและระเหยกลายเป็นไอก่อน หากไอนั้นได้รับความเย็นก็จะควบแน่นกลายเป็นของเหลว เมื่อเวลาผ่านไปสารผสมตั้งต้นจะมีสารที่ระเหยง่ายลดลงเรื่อยๆ หลักการนี้สามารถนำมาใช้แยกสารให้บริสุทธิ์ขึ้น

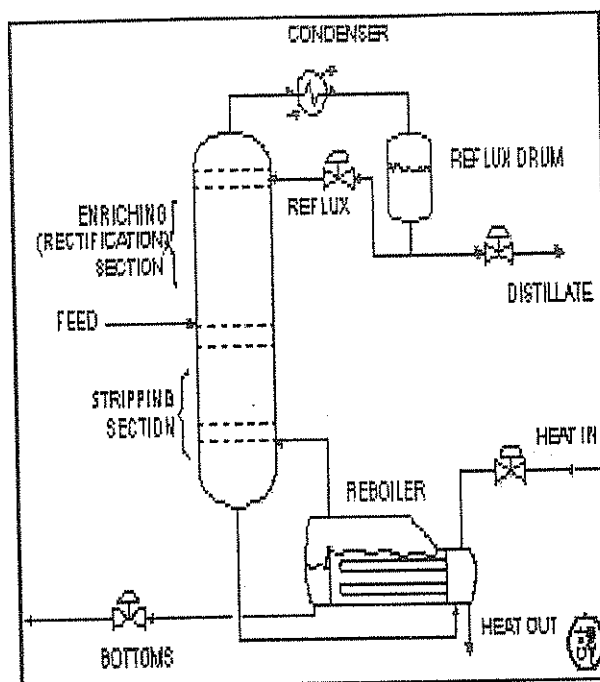
อย่างไรก็ตามแม้ว่าการกลั่นจะเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุดในกระบวนการแยกสารแต่ก็ต้องใช้พลังงานและใช้ทุนในการดำเนินการมาก การพัฒนาประสิทธิภาพของหอกลั่น การออกแบบและควบคุมเพื่อให้เกิดการกลั่นที่มีประสิทธิภาพสูงอาจจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่างๆ ดังนี้ ชนิดของหอกลั่น, ประเภทของพลังงานในกระบวนการกลั่น, อุปกรณ์พื้นฐาน, หม้อต้ม

กลั่น, หลักการกลั่น, สมดุลไอกับของเหลว, การออกแบบหอกลั่น, ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการกลั่น และการควบคุมพลังงานในระบบ

หอกลั่น (Column) ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีหลายรูปแบบ ในการออกแบบหอกลั่นจะขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการนำไปใช้ แยกสารผสมซึ่งจะมีความซับซ้อนต่างกัน โดยจะแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ 2 ประเภทได้แก่ หอกลั่นชนิดไม่ต่อเนื่อง (Batch Distillation Column) และหอกลั่นแบบต่อเนื่อง (Continuous Distillation Column) หอกลั่นแบบไม่ต่อเนื่องจะสามารถให้สารผสมได้เพียงครั้งเดียว แต่หอกลั่นแบบต่อเนื่องสามารถป้อนสารผสมและได้สารที่แยกได้อย่างต่อเนื่องจะมีความสะดวกและมีความต่อเนื่องการกลั่น ทำให้ประหยัดเวลา และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการกลั่นได้ดีกว่าหอกลั่นชนิดไม่ต่อเนื่อง

ประเภทของพลังงานในกระบวนการกลั่น เป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงมากเนื่องจากพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นในกระบวนการผลิต ดังนั้นหากเลือกพลังงานที่เหมาะสมหรือสามารถใช้พลังงานทดแทนมาแทนการใช้พลังงานสิ้นเปลืองได้จะสามารถแก้ปัญหาด้านทุนการผลิตได้ พลังงานพื้นฐานที่นำมาใช้ในกระบวนการกลั่นได้แก่ ไฟฟ้า พลังงานฟอสซิลเช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน ส่วนพลังงานทดแทนที่จะสามารถนำมาใช้ในกระบวนการนี้ได้เช่น พลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวลเช่น ก๊าซชีวภาพ ถ่าน แก๊สซิฟิเคชัน (วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร)

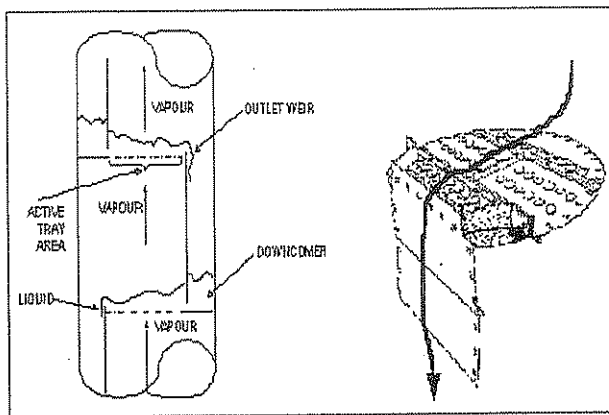
องค์ประกอบหลักของหอกลั่นดังแสดงในรูปที่ 6 ได้แก่ ตัวให้ความร้อน (Heater), หม้อต้ม (Reboiler) สำหรับต้มกลั่นเพื่อทำให้สารผสมกลายเป็นไอ, ชุดควบแน่น (Condenser) ใช้สำหรับควบแน่นไอให้กลายเป็นของเหลว, ชุดกลั่นกลับ (Reflux Drum) สำหรับนำของเหลวที่ควบแน่นจากชุดควบแน่นกลับสู่หอกลั่น, และ Column Internal สำหรับช่วยในการแยกสารผสมให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น



รูปที่ 6 หอกลั่น [4]

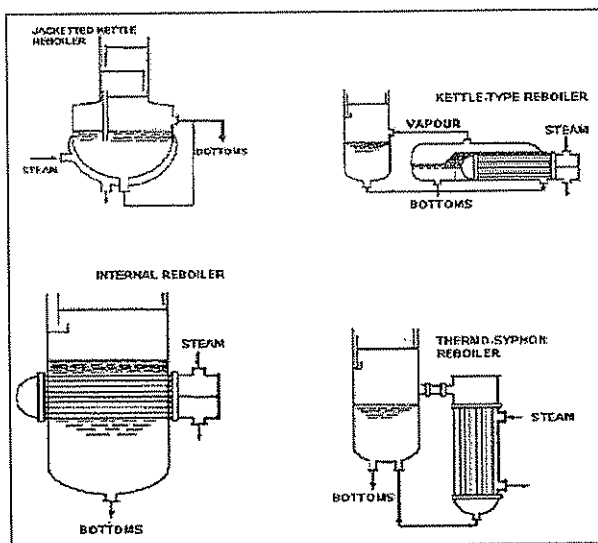
การออกแบบหอกลั่น ในส่วนของ Column Internal จะมี ถาด รูปแบบของถาดที่นิยมเช่น ถาดแบบ Bubble Cap, ถาดแบบ Valve, ถาดแบบ Perforate รูปแบบนี้บนถาดจะมีปล่องอยู่ตรงกลางและมี Cap ครอบอยู่เหนือปล่องของถาดเพื่อทำหน้าที่ดักไอของสารผสมที่ระเหยขึ้นกระทบบ ทำให้ไอบางส่วนกลั่นตัวลงมา

การไหลของไอและของเหลวในหอกลั่น จะมีทิศทางไหลตรงข้ามกันโดยไอของของเหลวจะไหลขึ้นไปตามความสูงของหอกลั่นผ่านรูที่เจาะไว้ในแต่ละชั้นของหอกลั่น ส่วนของเหลวจะไหลลงด้านล่างของหอกลั่นโดยผ่านรูที่เรียกว่า Downcomer ของเหลวบางส่วนจะถูกกักไว้โดยท้านบ (Weir) ดังรูปที่ 7 โดยท้านบจะมีระดับต่ำกว่าความสูงของช่อง Cap เมื่อของเหลวมีระดับสูงขึ้นก็จะล้นมาทาง Downcomer และไหลต่ำลงมาเรื่อยๆ ของหอกลั่น



รูปที่ 7 การไหลของไอและของเหลว [4]

หม้อต้มสำหรับหอกลั่น (Column Reboiler) จะทำหน้าที่ให้ความร้อนในหอกลั่น เมื่อของเหลวไหลลงมาถึงสุดของหอกลั่นจะมารวมในถังต้มกลั่นและถูกทำให้เป็นไอขึ้นไปยังหอกลั่น หม้อต้มมีได้หลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 รูปแบบหม้อต้ม [4]

2.4 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการกลั่นต่อเนื่องของระบบ 2 องค์ประกอบ (Continuous Distillation of Binary System)

2.4.1 สมดุลมวล (Mass Balance) เป็นไปดังสมการ

$$FX_F = D X_D + W X_W \quad (1)$$

โดยที่ F , D , W คือ อัตราการไหล (kmol/hr) ของสารป้อน (Feed), สารกลั่นแยก (Distillate) และสารก้นหอ (Waste or Bottom) ตามลำดับ X_F , X_D , X_W คือ สัดส่วนเชิงโมลของ

องค์ประกอบที่มีจุดเดือดต่ำ (ระเหยง่ายกว่า) ในสารป้อน, สารกลั่นแยก และสารก้นหอ ตามลำดับ

2.4.2 เส้นปฏิบัติการ (Operation Line)

ให้ X_n และ L_n คือ สัดส่วนเชิงโมลและอัตราการไหลของเหลวที่ไหลออกจากชั้นที่ n นับจากยอดหอกลั่นลงมา และให้ Y_{n+1} และ V_{n+1} คือ ส่วนประกอบและอัตราการไหลของไอที่ลอยขึ้นมาจากชั้นที่ $n+1$ จะได้เส้นปฏิบัติการของช่วงเพิ่มความเข้มข้น (Enriching Section; ช่วงที่อยู่เหนือตำแหน่งป้อนสาร)

$$Y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} X_n + \frac{D}{V_{n+1}} X_D$$

$$= \frac{L_n}{L_n + D} X_n + \frac{D}{L_n + D} X_D$$

ถ้าให้อัตราส่วนป้อนกลับ (Reflux Ratio) $R = L/D$ แล้วแทนในสมการข้างบน จะได้

$$Y_{n+1} = \frac{R}{R+1} X_n + \frac{1}{R+1} X_D \quad (2)$$

ในขณะเดียวกันให้ Y_m และ V_m คือ ส่วนประกอบและอัตราการไหลของไอที่ลอยขึ้นจากชั้นที่ m โดยนับจากก้นหอกลั่นขึ้นไป และให้ X_{m+1} และ L_{m+1} คือ ส่วนประกอบและอัตราการไหลของของเหลวที่ไหลลงมาจากชั้นที่ $m+1$ จะได้เส้นปฏิบัติการของช่วงไล่สารระเหยง่าย (Stripping Section; ช่วงที่อยู่ต่ำกว่าตำแหน่งป้อนสาร)

$$Y_m = \frac{L_{m+1}}{V_m} X_{m+1} - \frac{W}{V_m} X_W$$

$$= \frac{L_{m+1}}{L_{m+1} - W} X_{m+1} + \frac{W}{L_{m+1} - W} X_W$$

ในกรณีที่สารป้อน 1 โมล มีของเหลว q โมล และไอ $1-q$ โมล จะได้ความสัมพันธ์ $L_{m+1} = L_n + qF$ และ $V_m = V_{n+1} - (1-q)F$ ดังนั้น

$$Y_m = \frac{R+q\frac{F}{D}}{R+1-(1-q)\frac{F}{D}} X_{m+1} - \frac{\frac{F}{D}-1}{R+1-(1-q)\frac{F}{D}} X_W \quad (3)$$

ถ้าให้อัตราส่วนป้อนกลับ R คงที่ แล้วเขียนสมการ (2) และสมการ (3) ลงบนกราฟที่กำหนดให้ (แกนนอนคือ X ; แกนตั้งคือ Y) โดยถือว่า X_n , Y_{n+1} , X_{m+1} , Y_m เป็นตัวแปร จะได้เส้นปฏิบัติการเป็นเส้นตรง

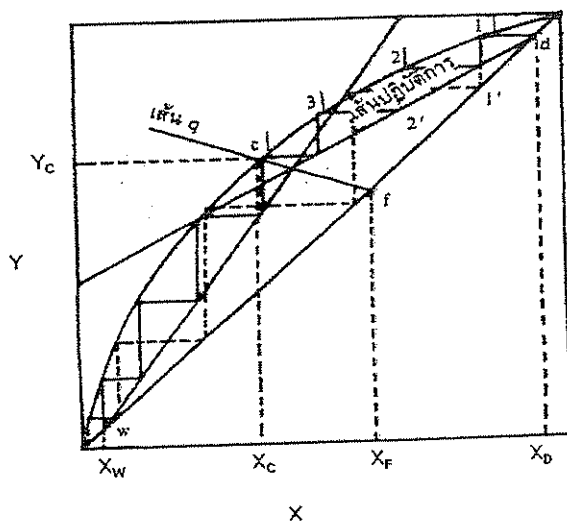
2.4.3 เส้น q (q -Line) คือเส้นตรงที่แสดงได้ด้วยสมการ

$$qX + (1-q)Y = X_F \quad (4)$$

ในทางปฏิบัติควรจะทำให้ค่าของ X บนจุดตัดระหว่างเส้น q กับเส้นปฏิบัติการ มีค่าใกล้เคียงมากที่สุดกับส่วนประกอบของของเหลวบนชั้นที่ป้อนสารเข้า

2.4.4 จำนวนชั้นเชิงทฤษฎี (Number of Stage) ตามวิธีของ McCabe-Thiele ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยการพล็อตเส้นสมดุลของไอและของเหลวบนกราฟ X - Y แล้วลงจุด d , f , w บนเส้นทแยงมุมเพื่อแทนตำแหน่งของความเข้มข้น X_D , X_F , X_W ตามลำดับ โดยอาศัยสมการ (2), (3) และ (4) ลากเส้นตรงแสดงเส้นปฏิบัติการของช่วงเพิ่มความเข้มข้น เส้นปฏิบัติการของช่วงไล่สารระเหยง่าย และเส้น q ตามลำดับ เส้นทั้งสามจะตัดกันที่จุดๆ หนึ่ง

จากจุด d ลากเส้นระดับตัดกับเส้นสมดุลที่จุด 1 จากนั้นลากเส้นตั้งฉากเส้นปฏิบัติการที่จุด 1' จากจุด 1' ลากเส้นระดับตัดเส้นสมดุลที่จุด 2 ทำดังนี้เรื่อยไปจนลงจุด w ให้นับชั้นที่ป้อนสารรวมอยู่ในช่วงเพิ่มความเข้มข้นซึ่งมีจำนวน n ชั้น และให้ชั้นของช่วงไล่สารระเหยง่ายมีจำนวน m ชั้น จะได้ว่าจำนวนชั้นในทางทฤษฎีมีทั้งหมด $n + m$ ชั้น



รูปที่ 9 แสดงการหาจำนวนชั้นเชิงทฤษฎีโดยวิธีของ McCabe-Thiele [5]

2.4.5 จำนวนชั้นเชิงทฤษฎีที่น้อยที่สุด (Minimum of Stage Number; n_m)

ในกรณีที่อัตราส่วนสารป้อนกลับมีค่ามหาศาลไม่จำกัด ถ้าใช้วิธีเขียนกราฟของ McCabe-Thiele เส้นปฏิบัติการจะกลายเป็นเส้นทแยงมุม ซึ่งจะให้อัตราส่วนชั้นทางทฤษฎีมีน้อยที่สุดดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 9

แต่ถ้าใช้กฎของ Raoult คำนวณชั้นโดยใช้ค่าดัชนีการระเหยสัมพัทธ์ (α) จะได้

$$n_m + 1 = \frac{\log \left[\left(\frac{X_D}{1-X_D} \right) \left(\frac{1-X_W}{X_W} \right) \right]}{\log \alpha} \quad (5)$$

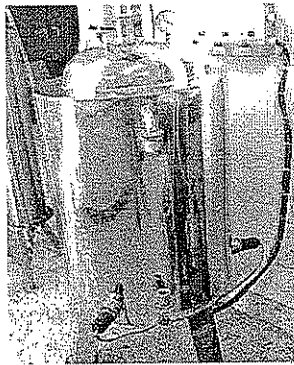
2.4.6 อัตราส่วนป้อนกลับน้อยสุด (Minimum of Reflux ratio; R_m)

กรณีที่จำนวนชั้นมีมหาศาลไม่จำกัด ถ้าใช้วิธีเขียนกราฟของ McCabe-Thiele จะได้จุดตัดของเส้นปฏิบัติการกับเส้น q อยู่บนเส้นสมดุลพอดี (นั่นคือจุด c ดังแสดงในรูปที่ 9) อัตราส่วนป้อนกลับในกรณีนี้เรียกว่า อัตราส่วนป้อนกลับน้อยที่สุด ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

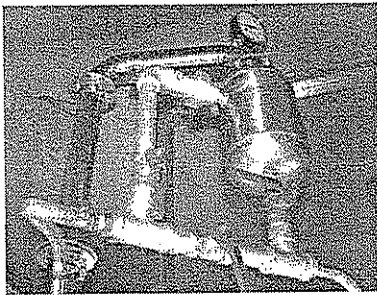
$$R_m = \frac{X_D - Y_c}{Y_c - X_c} \quad (6)$$

3. ผลการออกแบบและติดตั้ง

หม้อต้ม (Reboiler) ประกอบด้วยตัวถังถ่ายความร้อน (Heat Transfer) ทำด้วยถังสแตนเลสรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 m สูง 0.65 m หนา 0.003 m สำหรับบรรจุน้ำมันเพื่อถ่ายความร้อน หม้อต้มทำด้วยถังสแตนเลสรูปทรงกระบอก (Cylinder) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.35 m สูง 0.60 m หนา 0.003 m อยู่ภายในถังถ่ายความร้อน ตัวให้ความร้อนทำด้วยหลอดความร้อนขนาด 1,500 W จำนวน 3 ตัว ใช้ระบบควบคุมความร้อนโดยแผงควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 10



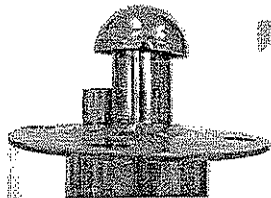
รูปที่ 10 หม้อดัดและชุดควบคุมกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 11 เครื่องดักไอ

เครื่องดักไอ (Decanter or Reflux Drum) เป็นโลหะสเตนเลสทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1150 m สูง 0.1750 m หนา 0.003 m ความสูงของช่องของเหลวไหลออก (Reflux Flow Height) เท่ากับ 0.1020 m ดังแสดงในรูปที่ 11

ถาดแบบ Bubble Cap เป็นโลหะสเตนเลสเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.0262 m หนา 0.003 m มีช่องไหลผ่านสูง 0.0045 m ดังแสดงในรูปที่ 12



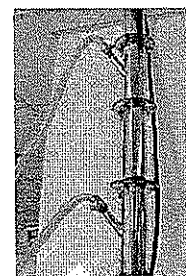
รูปที่ 12 ถาดแบบ Bubble Cap

ถังบรรจุสารป้อน (Feed Storage) และถังบรรจุสารตัวที่สาม (The Third Component or Entrainer Storage) ออกแบบให้

มีลักษณะเหมือนกันคือทำด้วยโลหะสเตนเลสรูปทรงกระบอก หนา 0.0150 m ที่มีขนาดความจุ 25 ลิตร

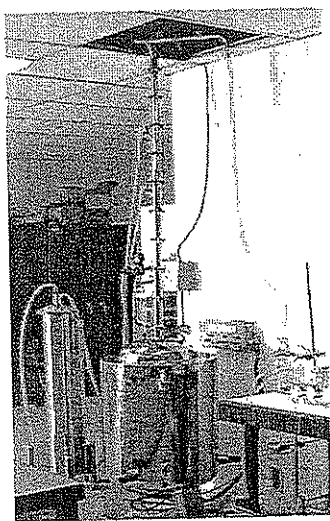
หอกลิ้นและจุดป้อนสารแสดงในรูปที่ 13 ภายในหอกลิ้น (Internal Distillation Column) ใช้โลหะสเตนเลสขัดเงาหนา 0.0015 m มีรายละเอียดการออกแบบภายในเครื่องกลั่นดังนี้

เส้นผ่าศูนย์กลางของหอกลิ้น (Column Diameter)	0.0380 m
ช่องว่างของถาด (Tray Spacing)	0.0420 m
จำนวนช่องไหลผ่าน (Number of Flow Pass)	1 ช่อง
ความยาวของช่องของเหลวไหลผ่าน (Liquid Flow Path Length)	0.0400 m
ช่องของเหลวไหลผ่าน (Downcomer Clearance)	0.0040 m
ความหนาของวัสดุ (Deck Thickness)	0.0030 m
เส้นผ่าศูนย์กลางของช่องไหลผ่าน (Hole Diameter)	0.0160 m
ชนิดของทำนบ (Weir Type)	หมุนวน
ความยาวของทำนบ (Weir Length)	0.0280 m
ความสูงของทำนบ (Weir Height)	0.0100 m
เส้นผ่าศูนย์กลางของทำนบ (Weir Diameter)	0.0082 m
ความหนาของช่องไอ (Hole Pitch)	0.0152 m
เส้นผ่าศูนย์กลางของ Cap (Cap Diameter)	0.0262 m
ความกว้างของขอบนอก (Skirt Clearance)	0.0025 m
ความสูงของช่องของเหลวไหลผ่าน (Slot Height)	0.0045 m
พื้นที่ของการเปลี่ยนสถานะ (Active Area)	82.28 %
พื้นที่ของช่องทั้งหมด (Total Hole Area)	22.37 %
จำนวนชั้นของหอกลิ้น (Number of Stage)	11
ความสูงของชั้น (Stage Height)	0.1500 m



รูปที่ 13 หอกลิ้นและจุดป้อนสาร

ชุดเครื่องกลั่นต้นแบบที่ออกแบบเสร็จแล้วเมื่อนำมาติดตั้งจะเป็นไปดังรูปที่ 14



รูปที่ 14. เครื่องกลั่นต้นแบบ

4. สรุปผลการออกแบบและติดตั้ง

เครื่องกลั่นที่ออกแบบจะเป็นเครื่องกลั่นแบบลำดับส่วน โดยหอกกลั่นจะมีชั้นจำนวน 11 ชั้น ชั้นที่ 9, 10 และ 11 จะมีวาล์วที่สามารถต่อกับสารป้อนและสารตัวที่สาม สำหรับใช้ในกระบวนการกลั่นแบบต่อเนื่องด้วยเทคนิค Heterogeneous Azeotropic เพื่อหาความประสิทธิภาพของเครื่องกลั่น สำหรับหม้อต้มกลั่นจะมีวาล์วเพื่อติดเครื่องวัดความดัน เครื่องวัดอุณหภูมิ และเครื่องปรับความดัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ แล้วนำมาเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ ในส่วนของเครื่องดักไอน้ำ (Decanter) จะมีการหาความสัมพันธ์ของระหว่างสารที่กลั่นกลับกับสารที่กลั่นสมบูรณ์ขณะที่มีการกลั่น ในการออกแบบชุดกลั่นนี้ได้ออกแบบไว้สำหรับใช้พลังงานทดแทนอื่นๆ แทนพลังงานจากไฟฟ้าได้ด้วย เช่น พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนจากก๊าซชีวภาพและจากชีวมวลอื่นเช่น แก๊สซิไฟเออร์ เป็นต้น

ขั้นตอนต่อไปผู้วิจัยจะทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ ได้เพื่อนำมาเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ของเครื่องมือต้นแบบ เช่น อัตราการป้อนสาร (Feed Flow Rate), อัตราการป้อนสารตัวที่สาม (Entrainer Flow Rate), อุณหภูมิไอ (Vapour Pressure), สัดส่วนโมลของเหลว (Liquid Mole

Fractional Component), อัตราส่วนของเหลวกลั่นกลับ (Reflux Flow Rate), เปอร์เซ็นต์ของเอทานอลที่กลั่นได้ (Percent Ethanol Out), เปอร์เซ็นต์ของเหลวผสม (Percent Liquid Component), สมดุลพลังงาน (Energy Balance) และสมดุลมวล (Mass Balance)

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Muller, D. *Heterogeneous Azeotropic Distillation*, Bayer AG, Leverkusen, Prague Institute of Chemical Technology, 1998.
- [2] K.Esbjerg, T.R. Andersen, D. Muller, W. Marquardt and St. B. Jorgensen, "Multiple Steady States in Heterogeneous Azeotropic Distillation Sequences", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 37(11), pp. 4434-4452, 1998.
- [3] W.E. De Villiers, R.N. French and G.J. Koplos, "Navigate Phase Equilibria via Residue Curve Maps", 2002.
- [4] M.T. Tham, "Distillation", 1997. [Online]. Available: <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/distil/distil0.htm>
- [5] W.Camdee, S.Chamchang and S.Phoopumma, "Study of Azeotropic Distillation Ethanol", Project Report No. ChE 2004-09, Dept. Chem. Eng., Univ. Khon Kaen, 2004.