

บทที่ 2

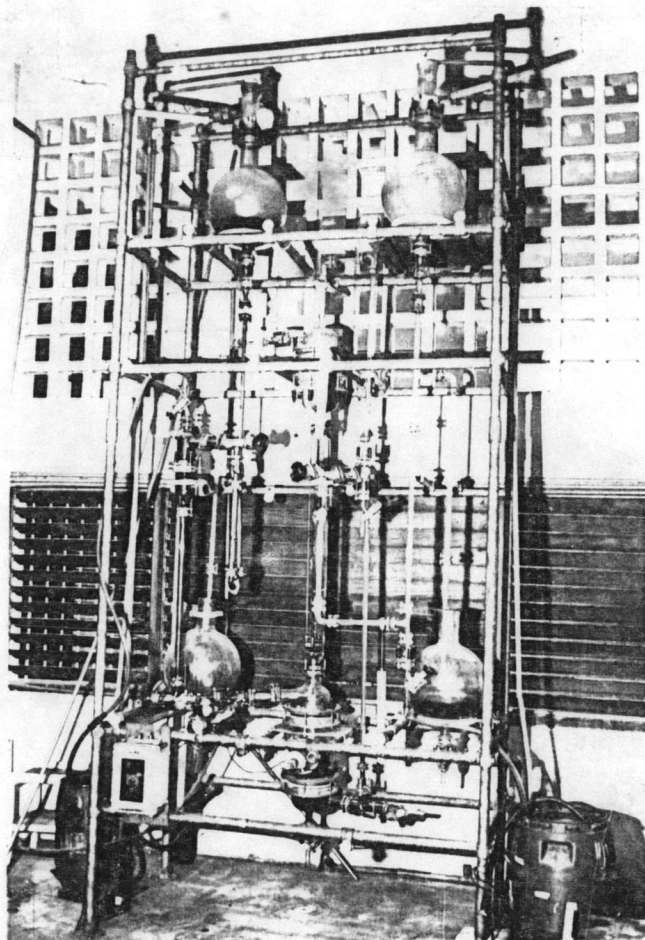
ระบบการลัดของเหลวในคอสัมน์แบบฟิลล์



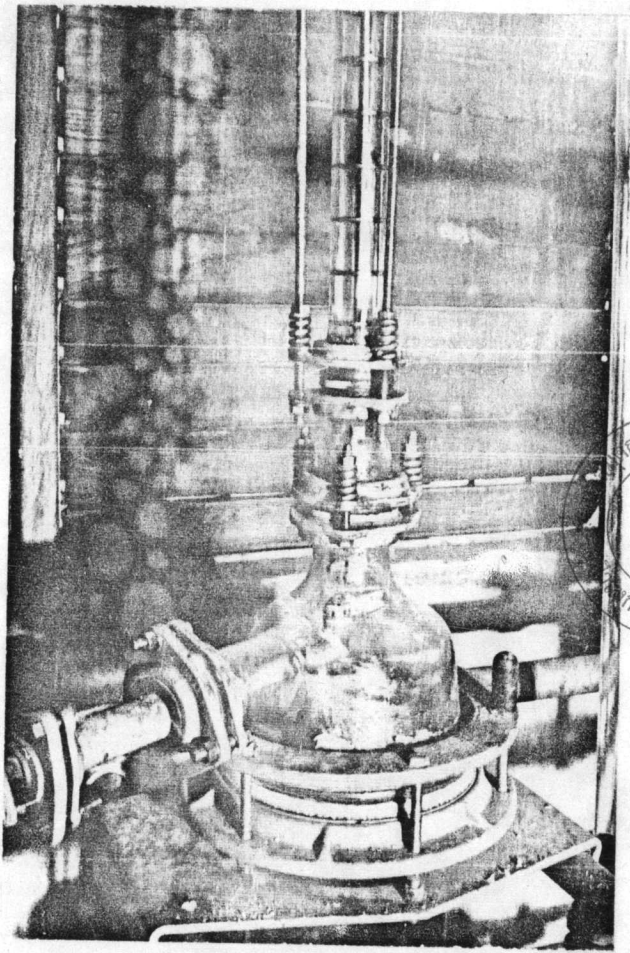
2.1 ลักษณะของคอสัมน์ลัดของเหลวแบบฟิลล์ที่ใช้ในงานวิจัย

คอสัมน์ลัดของเหลวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เรียกว่า "ฟิลล์-เพอร์ฟอเรตเต็ดเพลตคอสัมน์" (ภาพที่ 2.1) ลักษณะสำคัญของเครื่องก็คือส่วนที่เรียกว่า คอสัมน์ ซึ่งเป็นท่อยาวตั้งในแนวตั้ง ภายในคอสัมน์เรียงซ้อนกันด้วยแผ่นโลหะรูพรุน (เพอร์ฟอเรตเต็ดเพลต) โดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นต่อแผ่นที่แกนกลางของแผ่นเท่ากันตลอดความยาวของคอสัมน์ แผ่นโลหะรูพรุนนี้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพอดีสวมเข้ากับคอสัมน์ (ภาพที่ 2.2) ส่วนล่างของคอสัมน์ติดตั้งเครื่องให้กำเนิดฟิลล์หรือเรียกว่า ฟิลล์เชอร์ (ภาพที่ 2.3) โดยมีคอมเพรสเซอร์เป็นตัวกำเนิดแรงอัดลม ทำให้พาสติกส์ของเครื่องให้กำเนิดฟิลล์ยัดตัวเข้า-ออก เป็นสภาวะที่ลุ่มน้ำ-ลุ่มอถ่ายเทพลังงานให้แก่ของเหลว

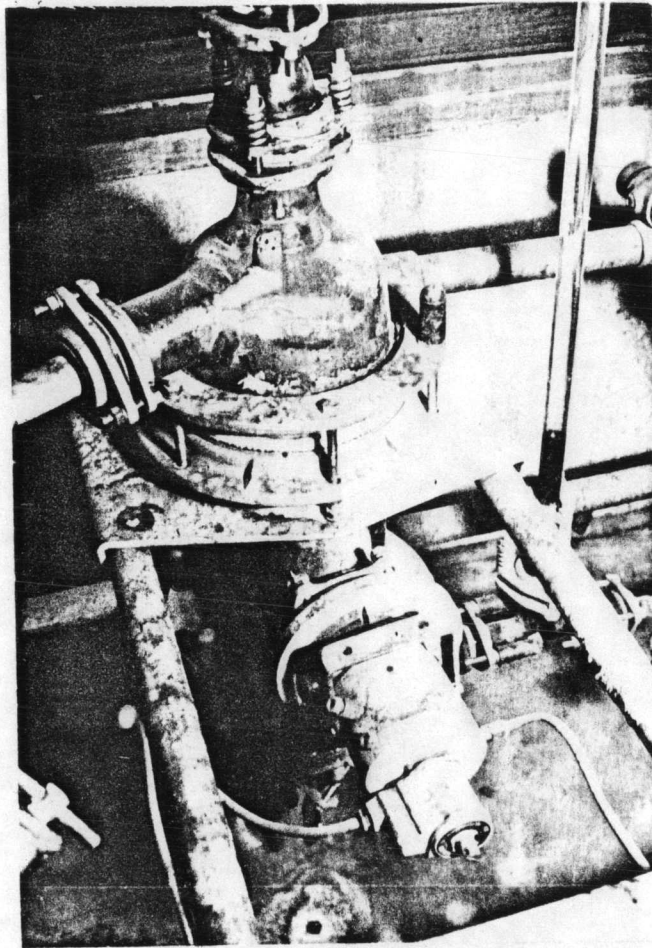
โดยหลักการของการลัดของเหลวในคอสัมน์แบบฟิลล์นี้ ใช้วิธีการนำของเหลวสองเฟสไหลสวนทางกันในคอสัมน์ โดยอาศัยความแตกต่างกันของความหนาแน่นของแต่ละเฟสเป็นแรงทำให้เกิดการผลักระหว่างเฟสทั้งสอง ดิสเพอส์เฟสเข้าสู่คอสัมน์ทางด้านล่าง เป็นของเหลวที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนตินิวอัลเฟสซึ่งเข้าทางด้านบนของคอสัมน์ ดังนั้นดิสเพอส์เฟสจึงมีแนวโน้มที่จะกระจายออกจากหัวฉีดขึ้นสู่ที่สูงผ่านคอนตินิวอัลเฟส โดยมีเครื่องให้กำเนิดฟิลล์เป็นตัวส่งแรงกระตุ้นให้ไหลผ่านตามรูพรุนของแผ่นโลหะในคอสัมน์ เช่นเดียวกับคอนตินิวอัลเฟสก็ไหลผ่านรูพรุนนี้เช่นกัน ดังนั้นแผ่นโลหะรูพรุนจึงเป็นตัวทำให้ของเหลวทั้งสองเฟสแตกตัวและรวมตัวกันใหม่ตามสภาวะที่ลุ่มน้ำ-ลุ่มอของการฟิลล์ เป็นเหตุให้พื้นที่ที่ทั้งสองเฟสสัมผัสกันนี้สูงขึ้น โอกาสในการถ่ายเทมวลสารก็สูงตามไปด้วย จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของคอสัมน์



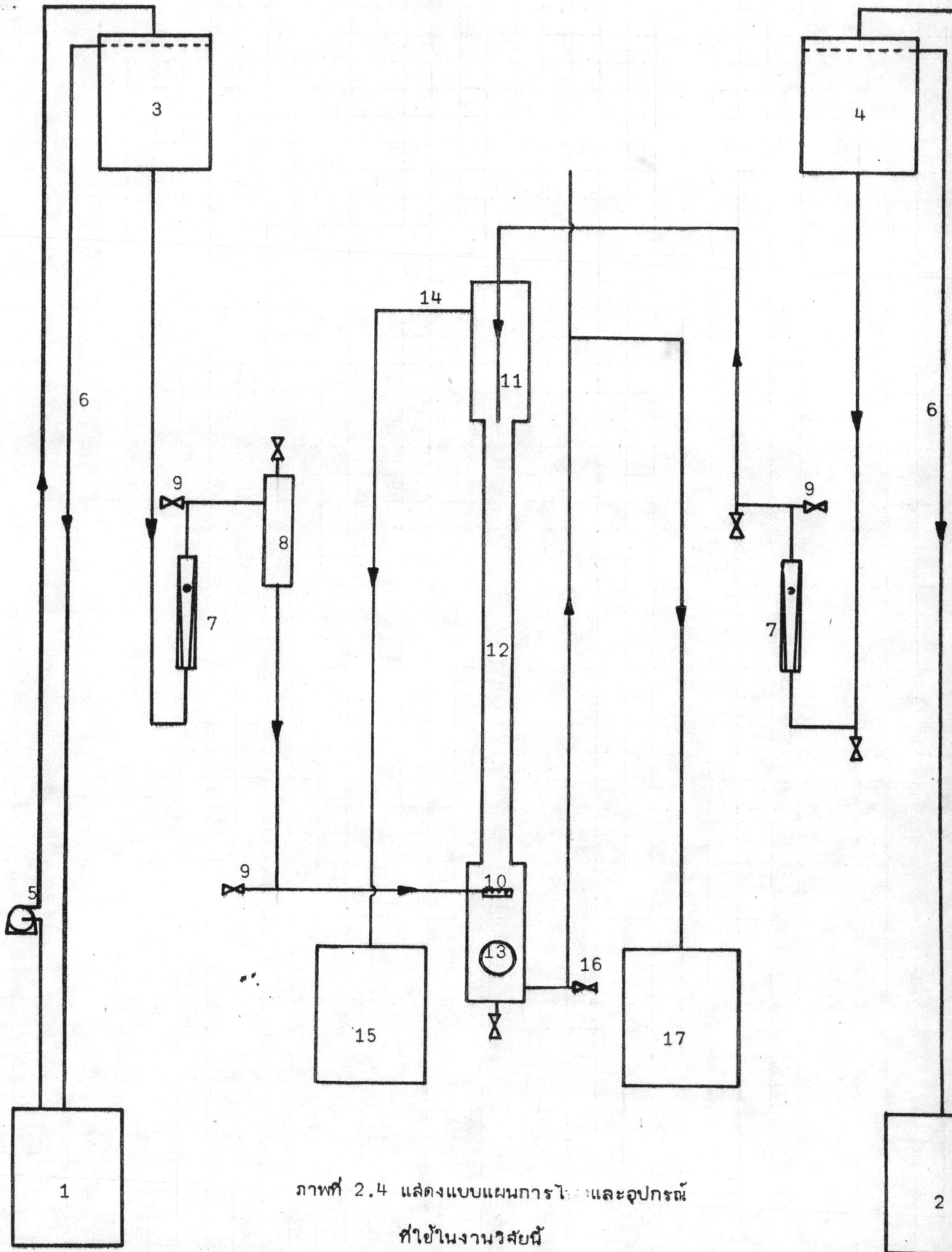
ภาพที่ 2.1 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 2.2 แสดงคอสัมพันธ์กับแผ่นโลหะรูปกรวย



ภาพที่ 2.3 เครื่องให้กำเนิดฟลักซ์ (ฟลักซ์เซอร์)



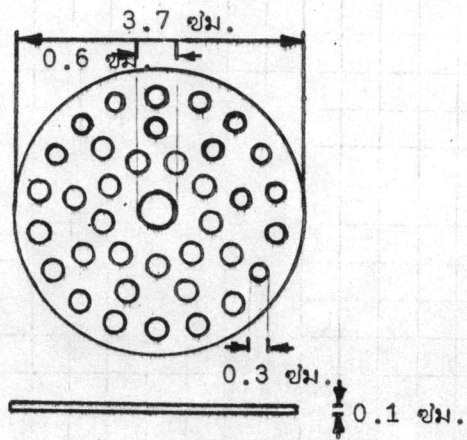
ภาพที่ 2.4 แสดงแบบแผนการไหลและอุปกรณ์
ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

รายชื่ออุปกรณ์จากเครื่องมือที่ใช้ทดลอง

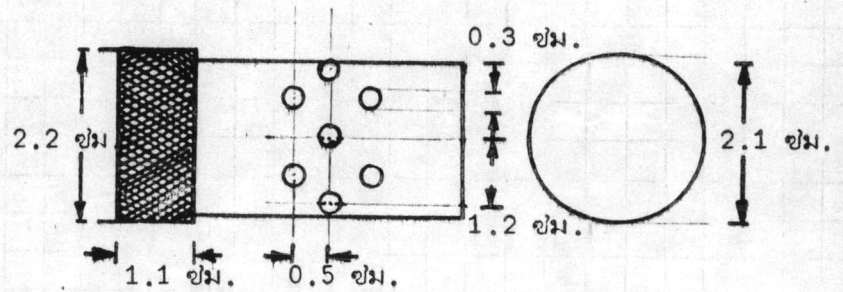
1. ถังเก็บน้ำมันก๊าด (กับกรตน้ำส้ม)
2. ถังเก็บน้ำ
3. ถังสูงเก็บน้ำมันก๊าด (กับกรตน้ำส้ม)
4. ถังสูงเก็บน้ำ
5. เครื่องสูบน้ำขนาด 0.35 แรงม้า
6. ท่อน้ำล้น
7. โรตاميเตอร์ (Rotameter)
8. หลอดควบคุมการไหล
9. วาวล์ควบคุมอัตราการไหล
10. หัวฉีด
11. ท่อปล่อยน้ำสู่คอถัง
12. คอถัง
13. พัลส์เฮลเลอร์ (Pulser)
14. ท่อน้ำมันก๊าด (กับกรตน้ำส้ม) ล้นออก
15. ถังเก็บน้ำมันก๊าด (กับกรตน้ำส้ม) ที่ผ่านการสกัดแล้ว
16. วาล์วควบคุมระดับสัมผัสของ 2 เฟส
17. ถังเก็บน้ำ (กับกรตน้ำส้ม) ที่ผ่านการสกัดแล้ว

จากภาพที่ 2.4 ซึ่งแสดงแบบแผนการไหลและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อธิบายภาพโดยเริ่มจากการใส่ดิสเพลสเพลลงในถังหมายเลข 1 และใส่คอนดิทิวอัลเพลลงในถังหมายเลข 2 ดูดขึ้นสู่ถังหมายเลข 3 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งถังหมายเลข 3 และ 4 นี้มีระบบการล้นออกเพื่อรักษาระดับของเหลวให้สูงคงที่ตลอดเวลา เป็นการทำให้อัตราการไหลของของเหลวทั้งสองเพลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ของเหลวทั้งสองไหลออกจากถังผ่านโรตารีเตอร์ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหล (หมายเลข 7) เพื่อควบคุมให้อัตราการไหลเป็นไปตามที่ต้องการ ดิสเพลสเพลเมื่อไหลผ่านโรตารีเตอร์แล้วยังต้องผ่านตัวควบคุมการไหล (หมายเลข 8) เพื่อป้องกันการไหลกลับและแรงกระแทกของพัลส์เชอร์ จากนั้นจึงไหลผ่านหัวฉีด (หมายเลข 10 และภาพที่ 2.6) ซึ่งเราสามารถถอดเปลี่ยนแบบและขนาดได้ (ขนาดที่ใช้ในการวิจัยดังภาพที่ 2.7) หัวฉีดจะปล่อยดิสเพลสเพลออกมาในรูปของเม็ดหยดผ่านเข้าสู่ส่วนล่างของคอสัมน์โดยมีพัลส์เชอร์ (หมายเลข 13) เป็นตัวส่งแรงกระตุ้นให้ไหลผ่านโลหะรูปพรุน (ภาพที่ 2.5) ขึ้นสู่ส่วนบนของคอสัมน์ ส่วนคอนดิทิวอัลเพลเมื่อผ่านโรตารีเตอร์แล้วจะไหลเข้าสู่ส่วนบนของคอสัมน์ (หมายเลข 11)

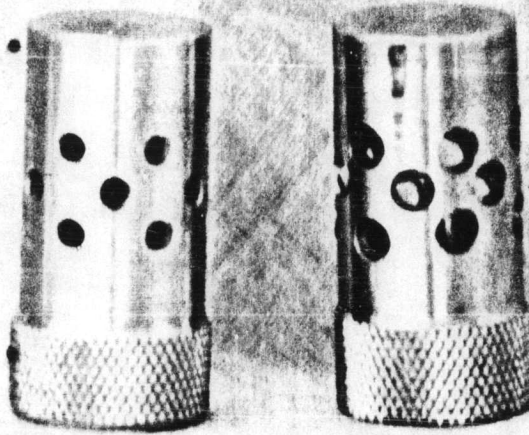
ในคอสัมน์ (หมายเลข 12) นี้เองที่จะเกิดการไหลสวนทางกันของของเหลวทั้งสองและมีการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้น เนื่องจากตัวถูกละลายในดิสเพลสเพลมีอัตราการละลายในคอนดิทิวอัลเพลสูงกว่าในดิสเพลสเพลที่พามา เมื่อทั้งสองเพลสัมผัสกัน มวลสารของตัวถูกละลายจึงถ่ายเทจากดิสเพลสเพลเข้าสู่คอนดิทิวอัลเพล (หรือในทางกลับกันหากตัวถูกละลายละลายอยู่ในคอนดิทิวอัลเพลและมีอัตราการละลายในดิสเพลสเพลสูงกว่าในคอนดิทิวอัลเพล) เมื่อผ่านการสัมผัสกันตลอดความยาวคอสัมน์แล้ว ดิสเพลสเพลจะลอยตัวขึ้นสู่ส่วนบนเหนือคอสัมน์ซึ่งเปิดออกสู่บรรยากาศ และล้นออกตามท่อ (หมายเลข 14) เก็บรวมไว้ในถัง (หมายเลข 15) เป็นดิสเพลสเพลที่ผ่านการสกัดเอาตัวถูกละลายออกแล้ว ส่วนคอนดิทิวอัลเพลที่ไหลสวนทางกับดิสเพลสเพลจากส่วนบนลงสู่ส่วนล่างของคอสัมน์ จะมีตัวถูกละลายติดมาด้วยเป็นปริมาณมากไหลออกเก็บในถัง (หมายเลข 17)



ภาพที่ 2.5 แผ่นโลหะ (Stainless Steel) รูพรุน (Perforated Plate)



ภาพที่ 2.6 หัวฉีดสเตนเลส สตีล



ภาพที่ 2.7 แสดงหัวฉีด (ซ้าย \varnothing 3 มม. ขวา 4.5 มม.)

จะเห็นได้ว่าความสำคัญของ เครื่องมือสกัดของเหลวด้วยของเหลวอยู่ที่การทำให้ โอกาสสัมผัสกันของทั้งสองเฟส เป็นไปได้มากที่สุด ทำให้เกิดคำว่า "ประสิทธิภาพของคอลัมน์" ซึ่งก็คือการพิจารณาว่าคอนตินิวอัสเฟสสามารถดึงตัวถูกละลายออกจากดิสเฟสเฟสได้มากน้อยเท่าใดเมื่อผ่านคอลัมน์นี้แล้วนั่นเอง

2.2 การพัลส์ (Pulsation)

แวน ดิลค⁽³⁵⁾ เป็นผู้ให้กำเนิด "พัลส์ คอลัมน์" ซึ่งกลับกลายมาเป็นที่ยอมรับ โดยทั่วไปของการสกัดของเหลวด้วยของเหลว ทั้งนี้เพราะการใช้พัลส์เป็นเหตุให้เราสามารถลดขนาดหรือความยาวของคอลัมน์ลง โดยที่อัตราการส่งผ่านของมวลสูงขึ้นถึงแม้ความสูงของคอลัมน์ลดลงก็ตาม การนี้เช่นนี้เป็นประโยชน์มากในการสกัดสารกัมมันตภาพรังสี ซึ่งราคาของการทำดำนจะสูงมาก นอกจากนี้แวนดิลคแล้วยังมีผู้ให้ความสนใจศึกษาในด้านการให้พัลส์แก่ของเหลวอีกหลายท่านด้วยกัน^(2,4,5,6)

ก) การให้กำเนิดพัลส์

การให้กำเนิดพัลส์นี้ทำได้หลายวิธีด้วยกัน เครื่องให้กำเนิดพัลส์แต่ละตัวก็ให้ค่าของ ความถี่ ของจังหวะการพัลส์ (Frequency) และแอมพลิจูด (Amplitude) แตกต่างกันไป ถ้าพิจารณาในรูปคลื่นของการเกิดก็มีหลายแบบเช่นกัน แบบใบเลื่อย (Saw-tooth), แบบรูปครึ่งจตุรัส (Semi-Square) และแบบ ไซน์ซอยดอล (Sinusoidal)⁽⁷⁾ เป็นต้น

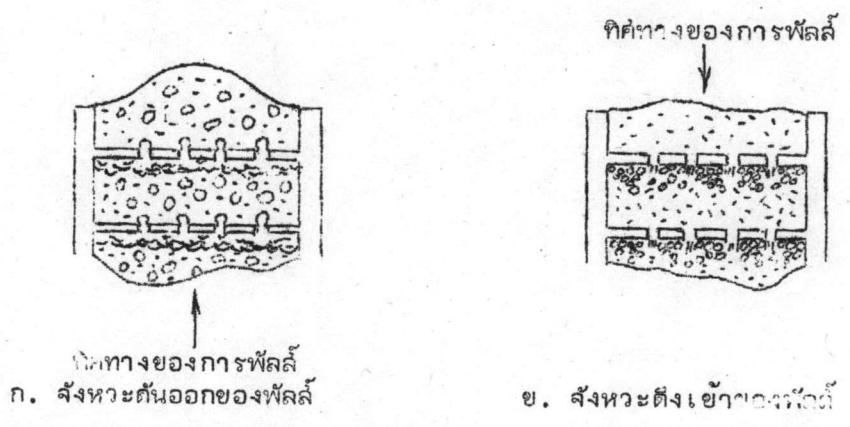
เครื่องให้กำเนิดพัลส์แบ่ง ออกเป็น 3 แบบใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ

- 1) แบบปั๊มไม่มีวาล์ว (Valveless pump)
- 2) แบบใช้กระบังลม (Diaphragm)
- 3) แบบใช้พลาสติกหรือโลหะลูกสูบ (Plastic or Mettalic Bellows)

นอกจากทั้ง 3 แบบนี้แล้ว หากมีกรณีพิเศษ เช่น การใช้สารที่มีการกัดกร่อนสูงหรือ สารกัมมันตภาพรังสี เราต้องใช้การสัมผัสกันโดยตรงของของเหลว เช่น การใช้ถุงลม (Air Pocket) (8,9) เป็นต้น

ข) ลักษณะพิเศษของการปฏิบัติการของฟิล์มคอลลอยด์

มีผู้สังเกตลักษณะพิเศษของการปฏิบัติการของฟิล์มคอลลอยด์หลายท่านด้วยกัน (5,7,10, 11,12,13) การให้ฟิล์มเป็นการทำให้เกิดการหมุนวนของการแตกตัวและการเกิดเม็ดของเหลว ขึ้นใหม่ โดยที่ดิสเพอส์เฟสจะผ่านแผ่นโลหะรูพรุนทำให้เกิดการรวมตัวบริเวณด้านบนหรือด้านข้างของแผ่นโลหะ (ตามภาพที่ 2.8) ทั้งนี้ขึ้นกับการใช้ของเหลวหนักหรือเบา (heavy or light liquid) เป็นตัวดิสเพอส์เฟส ซึ่งโดยสภาวะขึ้นของการรวมตัวนี้ไม่สามารถผ่านแผ่นโลหะรูพรุนไปได้เพราะไม่สามารถเอาชนะแรงตึงระหว่างผิว (Interfacial tension forces) ได้ ดังนั้นเราจึงต้องใช้ฟิล์มเป็นตัวกระตุ้นทางด้านบนหรือด้านล่างของคอลลอยด์ เพื่อเพิ่มแรงส่งให้ผ่านแผ่นโลหะรูพรุน ทำให้เกิดการกระจายไปสู่แผ่นโลหะรูพรุนแผ่นต่อไป ดังนั้นการปฏิบัติการที่มีประสิทธิภาพของฟิล์มคอลลอยด์จึงต้องทำให้เฟสทั้งสองผ่านจากแผ่นโลหะรูพรุนแผ่นหนึ่งไปสู่อีกแผ่นหนึ่งได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการกระจายและการรวมตัวสลับกัน เรื่อยไปนั่นเอง (14,15,16)



ภาพที่ 2.8 แสดงดิสเพอส์เฟสในสัณหะการฟิล์ม (ของเหลวเบาเป็นตัวดิสเพอส์)
 (o ดิสเพอส์เฟส ; ■■■■■ คอนตินิวอัลเฟส)

2.3 ความจุสูงสุดของพัลส์คอลัมน์ (Flooding Characteristic of Pulsed Column)

ในการปฏิบัติการต้องมีข้อจำกัดของเครื่องมือ สำหรับพัลส์คอลัมน์มีความเข้าใจของการไหลของของเหลวเป็นข้อจำกัด ซึ่งชี้ให้เห็นได้ด้วย "ความจุสูงสุดของคอลัมน์" ซึ่งพบได้เมื่อการไหลออกของของเหลวที่หนักกว่า (Heavy-liquid effluent) ลังของเหลวที่เบากว่าขึ้นไปหรือตกลงมาจากคอลัมน์ตามไปด้วย หรือในทำนองกลับกันก็ตาม (2)

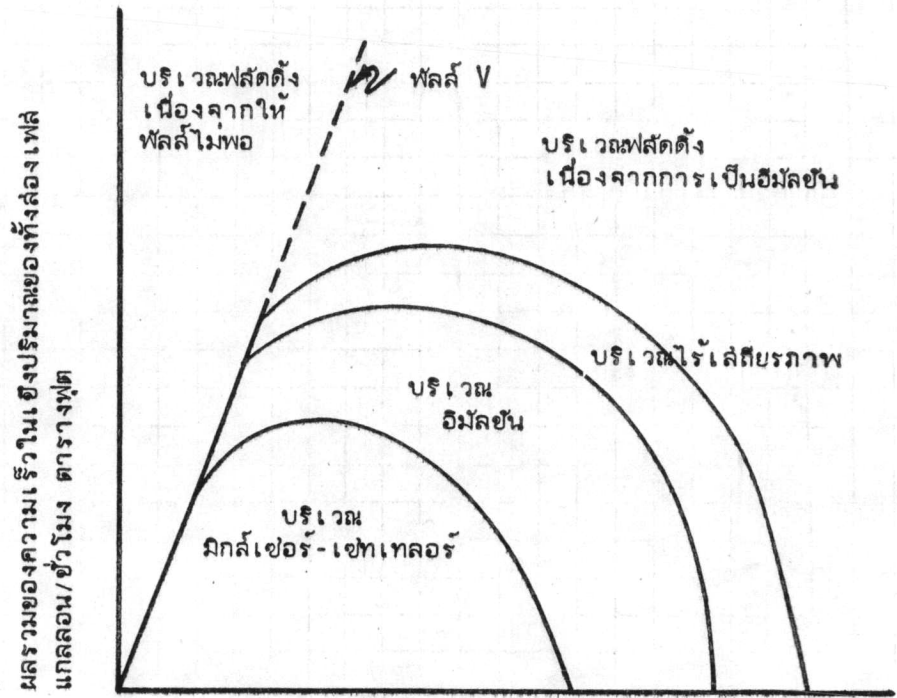
สีกกับวูดพิวด์⁽⁴⁾ และผู้สังเกตุการณ์ท่านอื่น^(17,18) ได้ศึกษาลักษณะพิเศษของพัลส์คอลัมน์ในด้านนี้ไว้และแสดงความสัมพันธ์ให้เห็นตามภาพที่ 2.9 โดยแสดงการพิจารณาระหว่างผลรวมของความเร็วในการไหลของของเหลวกับสังหระความถี่ห่างของพัลส์ โดยให้แอมพลิจูด (Amplitude) คงที่ ทำให้มองเห็นถึงการแบ่งส่วนของความจุสูงสุดของคอลัมน์และส่วนต่างๆ ของการปฏิบัติการของพัลส์คอลัมน์ ดังต่อไปนี้ 003968

ก) บริเวณฟลัดดิง (Flooding region) สืบเนื่องมาจากกาทำให้พัลส์แรงไม่เพียงพอ (19)

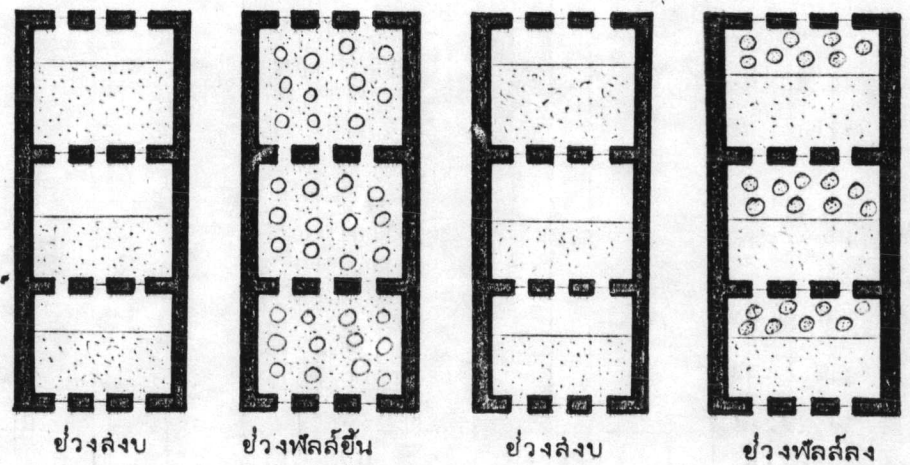
ข) บริเวณมิกซ์เชอร์-เซตเทิลเลอร์ (Mixer-settler region) เกิดขึ้นเมื่อผลรวมของความเร็วของการไหลของของเหลวและความถี่ห่างของการพัลส์มีค่าต่ำ แสดงให้เห็นโดยการแยกตัวของเฟสเบาและเฟสหนักในแต่ละช่วงเวลา โดยมีชั้นใสอยู่ระหว่างแผ่นโลหะรูปทรงแท่งในขณะที่ไม่มีการพัลส์ตามภาพที่ 2.10 เฟสเบาซึ่งแต่เดิมอยู่ด้านล่างของแผ่นโลหะรูปทรงแท่งเมื่อถูกพัลส์ก็จะถูกดันขึ้นผ่านแผ่นโลหะนั้นในลักษณะเป็นก้อนใหญ่ผ่านเฟสหนักซึ่งอยู่เหนือแผ่นโลหะรูปทรงแท่งเดียวกันนี้ขึ้นไปอยู่ใต้แผ่นโลหะรูปทรงแท่งต่อไป (ถ้ารูปทรงแท่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 เซนติเมตร จะเกิดเม็ดของเฟสเบาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3-0.6 เซนติเมตร) และเช่นเดียวกันกับเฟสหนักก็เคลื่อนต่ำลงในสังหระการเคลื่อนตัวลงของพัลส์เซตเทิลเลอร์

ภายใต้บริเวณของมิกซ์เชอร์-เซตเทิลเลอร์นี้ มีการกระจายของเฟสเป็นไปอย่างสม่ำเสมอแต่ก็ยังมีประสิทธิภาพของคอลัมน์ด้อยกว่าบริเวณเอมัลชัน

ค) บริเวณเอมัลชัน (Emulsion region) ตามภาพที่ 2.11 เกิดขึ้นเมื่อผลรวมของการไหลของของเหลวและความถี่ห่างของการพัลส์สูงขึ้น แสดงให้เห็นได้โดยขนาดของเม็ดละเอียดลง (คือมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.2 เซนติเมตรหรือน้อยกว่านี้) มีการกระจายของ

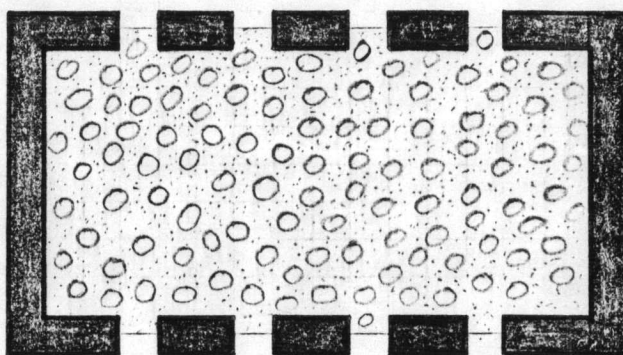


ความถี่ห่างของสังหระในการฟิล์ม (รอบ/นาที)
 ภาพที่ 2.9 แสดงส่วนทั้งสามของการปฏิบัติการของฟิล์มคอสมันน์



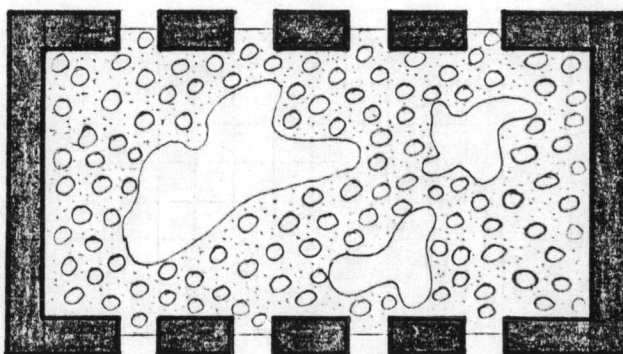
ภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะบริเวณมิกล์เซอร์-เซทเทลอร์

(□ ○ คิลเพอสเฟส, ∴ คอนตินิวอัลเฟส)



ภาพที่ 2.11 แสดงลักษณะของบริเวณอิมัลชัน

(○ ดิสเพอส์เฟล, ∴ คอนตินิวอัลเฟล)



ภาพที่ 2.12 แสดงลักษณะบริเวณโรลส์ติยรภาพ

(○ ◊ ดิสเพอส์เฟล, ∴ คอนตินิวอัลเฟล)

ดิสเพนส์เพลเป็นแบบเดียวกันมาก แต่ก็มี การเปลี่ยนแปลงไปบ้างในสภาวะของการฟลล ใน บริเวณของอิมัลชันนี้ จะมีการสัมผัสกันระหว่างเพลลิ่งที่ลุดเมื่อคิดพื้นที่ในการสัมผัสระหว่างผิวต่อ หนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งทำให้ช่วงนี้ยังมีประสิทธิภาพของคอสมัน์ลิ่งที่ลุด

ง) บริเวณไรล์เสถียรภาพ (Unstable region) ตามภาพที่ 2.12 เกิดขึ้น เมื่อเพิ่มผลรวมของการไหลของของเหลวและความถี่ห่างของการฟลลิ่งขึ้นไปอีก แสดงให้เห็น ได้โดยการเกิดการผลมกันของ ดิสเพนส์เพลที่มีขนาดหยาบและละเอียดเกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้าง, มี ขนาดต่างๆ กันและมีรูปร่างไม่แน่นอนกับทั้งอาจมีการไหลกลับของคอนดิติวอ์ลเพลในบางช่วง ของคอสมัน์ เรียกว่าเกิด "ไซคลิก โลคอล ฟลลิ่ง" (Cyclic local flooding) ดัง นั้นประสิทธิภาพของคอสมัน์จึงไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงกว้างมาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีประสิทธิ- ภาพต่ำกว่าในช่วงอิมัลชัน

หากเราเพิ่มผลรวมของความเร็วของการไหลและความถี่ห่างของการฟลลิ่งขึ้นอีก จะทำให้เกิดการฟลลิ่ง ซึ่งสังเกตเห็นได้จากกรณีที่เพลลิ่งไหลออกพร้อมกับอีกเพลลิ่ง

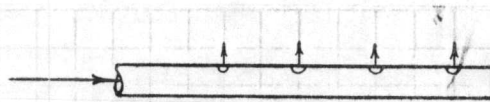
2.4 อิทธิพลของหัวฉีดที่มีต่อเม็ดหยด

หัวฉีดมีได้หลายลักษณะด้วยกัน ทั้งนี้ก็เพื่อให้มีการกระจายที่ดี ซึ่งแต่ละแบบก็จะมี การไหลผ่านหัวฉีดนั้นๆ แตกต่างกันไป ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะหัวฉีดที่เป็นรูพรุน (Perforated- pipe distributors) เท่านั้น

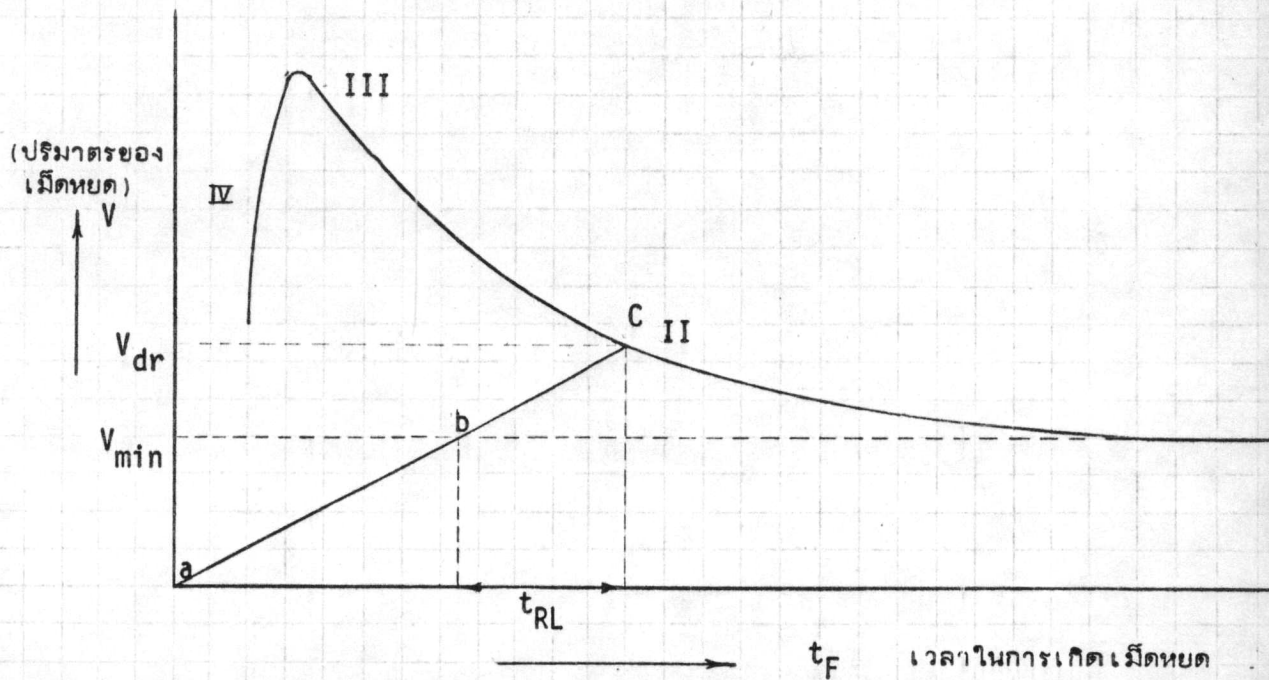
ลักษณะง่าย ๆ ของหัวฉีดแบบนี้ ปรากฏในภาพที่ 2.13 ซึ่งมีส่วนอย่างแพร่หลาย การที่จะมีการไหลผ่านหัวฉีดได้อย่างสม่ำเสมอจะต้องมีคุณสมบัติของ⁽²⁰⁾

- 1) พลังงานคลื่นและโมเมนตัมของกระแสการไหลของของเหลวเข้าสู่หัวฉีด
- 2) ความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (Friction losses) ตลอดความยาว ของท่อ
- 3) ความดันที่ลดลง (Pressure drop) ที่รูของหัวฉีด

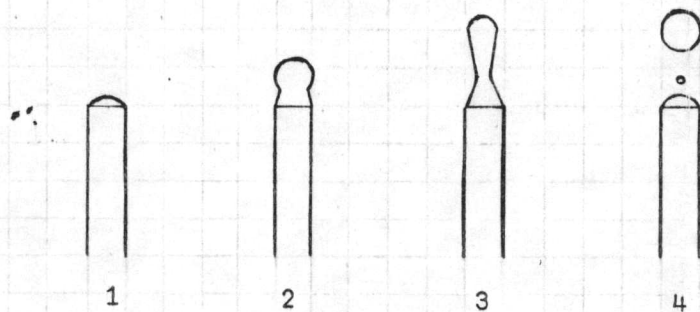
หากไม่ลุ่มดุลย์ดังเช่นข้อ 1) สูงกว่าข้ออื่นๆ จะเป็นการเพิ่มปริมาณของเหลวให้มีการไหล เข้าสู่หัวฉีดลงในท่อปิดปลาย แต่ถ้าข้อ 2) สูงกว่าข้ออื่นๆ ก็เป็นการลดปริมาณของเหลวลง ทำให้ มีการไหลตั้งในท่อปิดปลายเช่นเดียวกันกับข้อ 1) หากข้อ 3) สูงหรือต่ำไปก็จะเป็นเหตุให้ความเร็ว



ภาพที่ 2.13 แสดงหัวฉีดพรุน (Perforated pipe distributor)



ภาพที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณของน้ำที่ไหล (V) กับเวลาในการเกิดน้ำที่ไหล



ภาพที่ 2.15 แสดงขั้นตอน 4 ขั้นตอน ในการเกิดน้ำที่ไหล

ของไหลผ่านรูหัวฉีดบริเวณตอนต้น, ตอนกลางและตอนปลายของหัวฉีดไม่เท่ากัน

สำหรับเม็ดหยดที่เกิดขึ้นนั้น เราแบ่งขั้นตอนของการเกิดออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) เริ่มกำเนิดเม็ดหยดโดยยังติดอยู่กับผิวของหัวฉีด (Formation)
- 2) ช่วงขณะแยกตัวออกจากผิวของหัวฉีด (Release)
- 3) กำเนิดเม็ดหยด (Formed drops) เริ่มจากมีการเคลื่อนที่หลุดเป็นเม็ดหยด, อยู่ในสภาพเป็นเม็ดหยดที่สมบูรณ์ ตลอดจนการมีปริมาตร
- 4) ช่วงแตกตัว (Coalescence) เริ่มจากก่อนการแตกตัวเล็กน้อยจนมีการแตกตัวอย่างสมบูรณ์

1) เริ่มกำเนิดเม็ดหยดโดยยังติดอยู่กับผิวของหัวฉีด

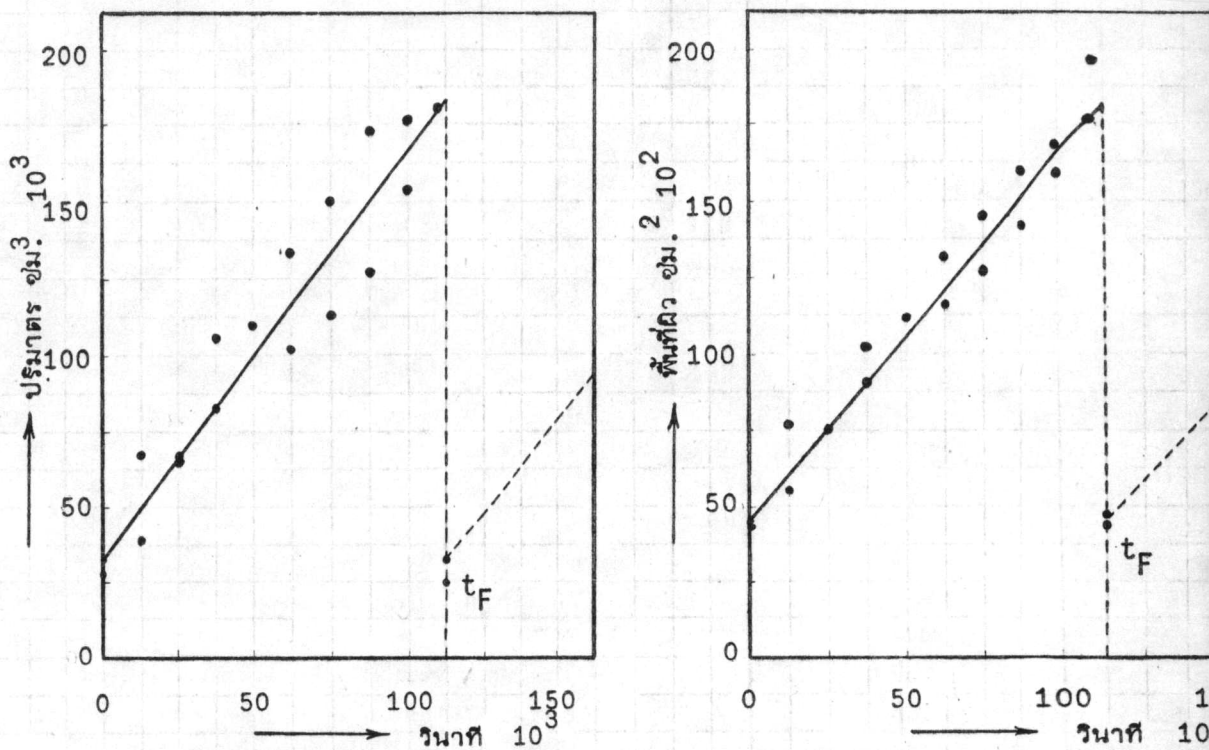
ถ้าเราพิจารณาถึงการส่งผ่านของมวลของเม็ดหยด สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คือพื้นที่ผิวที่เกิดการส่งผ่าน ดังนั้นการพิจารณาเม็ดหยดในขณะที่เริ่มกำเนิด เราจำเป็นต้องทราบ⁽²²⁾

2 ประการ คือ

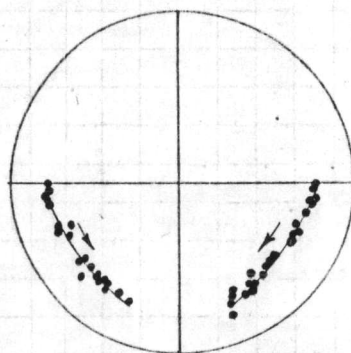
(1) ปริมาตรของเม็ดหยดเมื่อเทียบกับเวลาในการเกิด ตามภาพที่ 2.14 แสดงถึงปริมาตรของเม็ดหยดที่ปล่อยออกจากหัวฉีดโดยคิดเทียบกับเวลาในการเกิด ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ฮาร์กินส์และบราวน์⁽²³⁾ ได้แสดงวิธีหาของปริมาตรของเม็ดหยด (V_{min}) ที่อยู่ในส่วนนี้ ซึ่งไม่ขึ้นกับเวลาในการเกิดโดยมีแรงลอยตัวและแรงดึงระหว่างผิวอยู่ในสภาวะสมดุลย์

ส่วนที่ 2 ถ้าเราให้อัตราการเกิดของหยดคงที่^(23,24) ปริมาตรของหยดจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับเวลาตามเส้นตรง ab และในขณะที่เกิดนี้ในช่วงเวลาหนึ่ง คือที่จุด b เม็ดหยดจะมีปริมาตรเป็น V_{min} ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เม็ดหยดจะเริ่มแยกตัว (ตามภาพที่ 2.15 ในขั้นตอนที่ 3) ของเหลวซึ่งสอดเข้าไปหากันเพื่อทำให้เกิดเม็ดหยดก็มีอัตราคงที่เดิม ดังนั้นจึงทำให้เส้น V_{dr} เป็นเส้นตรงต่อไปจนกระทั่งเกิดเม็ดหยดที่มีปริมาตรเป็น V_{dr}



ภาพที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลาและพื้นที่ผิวกับเวลาสำหรับการเกิดเม็ดหยด



ภาพที่ 2.17 แสดงการเคลื่อนย้ายของจุดศูนย์กลางของการหมุนวนด้วยการหมุนวน

ρ คือ ความหนาแน่นของคอนตินิวอัลเฟลล์
 σ คือ แรงตึงระหว่างผิว

(2) การเคลื่อนไหว (Movement) ของเม็ดหยด เนื่องมาจากแรงตึงระหว่างผิวที่ด้านหน้ากับด้านหลังของเม็ดหยดต่างกัน อันเป็นผลมาจากความแตกต่างกันของความเข้มข้นที่ผิวของเม็ดหยด⁽³⁰⁾

(3) การหมุนวน (Oscillation) ของเม็ดหยด จะเกิดขึ้นเมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์มีค่าสูงกว่า 200 ($Re > 200$)⁽³¹⁾

(4) การเคลื่อนไหวภายในเม็ดหยด (Movement in a drop) ตามภาพที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนย้ายอย่างช้าๆ สละสลวยเข้าไปสู่จุดกึ่งกลางของการหมุนวนของเม็ดหยด โดยเกิดขึ้นบริเวณผิว สามารถพิจารณาได้โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพ⁽³²⁾

(5) หยดบริวาร (Satellite drop) มีปริมาตรประมาณ 1% ของเม็ดหยด

4) ช่วงแตกตัว (Coalescence)

การแตกตัวของเม็ดหยดเกิดขึ้นที่ระหว่างผิว เป็นการแยกออกจากกันของคอนตินิวอัลเฟลล์กับดีสเฟอส์เฟลล์ที่ติดไปด้วยกัน การแตกตัวทำให้เกิดกลุ่มของเม็ดหยดเป็นเหตุให้การหมุนวนเพิ่มขึ้น และเมื่อผิวของเม็ดหยดกระทบกันกับผิวของของเหลวการหมุนวนก็ยิ่งเพิ่มขึ้นอีก ของเหลวที่เคลือบเม็ดหยดอย่างบางๆ นี้จะเกิดการส่งมวลสารที่บริเวณผิวของเม็ดหยดขึ้นอีก เพราะเกิดขึ้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นช่วงของการแตกตัวนี้จะเป็นตัวชี้ขนาดของแรงที่ทำให้เกิดการส่งผ่านของมวลว่ามากน้อยเช่นไร

อนึ่ง จอห์นสันและบลิสส์⁽³³⁾ ค้นพบในปี 1946 ว่าการส่งผ่านของมวลของตัวถูกละลายจากเม็ดหยดไปสู่คอนตินิวอัลเฟลล์ จะมีค่าสูงกว่าในทิศทางกลับกัน

2.5 กฎของการกระจาย (Distribution law)

ในระบบของของเหลวสองชนิดซึ่งไม่ละลายเข้าด้วยกัน อยู่รวมกับของเหลวอีกชนิดหนึ่งซึ่งสามารถกระจายอยู่ในของเหลวทั้งสองชนิดนี้ได้ หากเรากำหนดค่าของอุณหภูมิและความดัน

ให้คงที่ จะเหลือตัวที่สามารถแปรค่าได้อีกเพียงตัวเดียวตามเฟสรูล (Phase rule) ซึ่งตัวนี้จะเป็นค่าอัตราส่วนของความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของเหลวสองชนิดนั้น ค่าที่ปรากฏนี้จะเข้าไปตามกฎของการกระจาย⁽³⁴⁾ (Distribution law) ดังนั้นกฎของการกระจายจึงแสดงถึงค่าอัตราส่วนของความเข้มข้นของตัวถูกละลายซึ่งกระจายตัวของมันเองในของเหลวสองชนิดซึ่งไม่ละลายเข้าด้วยกัน ในสถานะที่สมดุล ณ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ค่าอัตราส่วนนี้จะคงที่ถ้าสภาพของโมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวทั้งสองเฟสนั้นเหมือนกัน⁽³⁵⁾

$$\text{ดังนั้น} \quad K = \frac{x_{AW}}{x_{AK}}$$

เมื่อ

K คือ สัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient)

x_{AW} คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย, A ในเฟส W

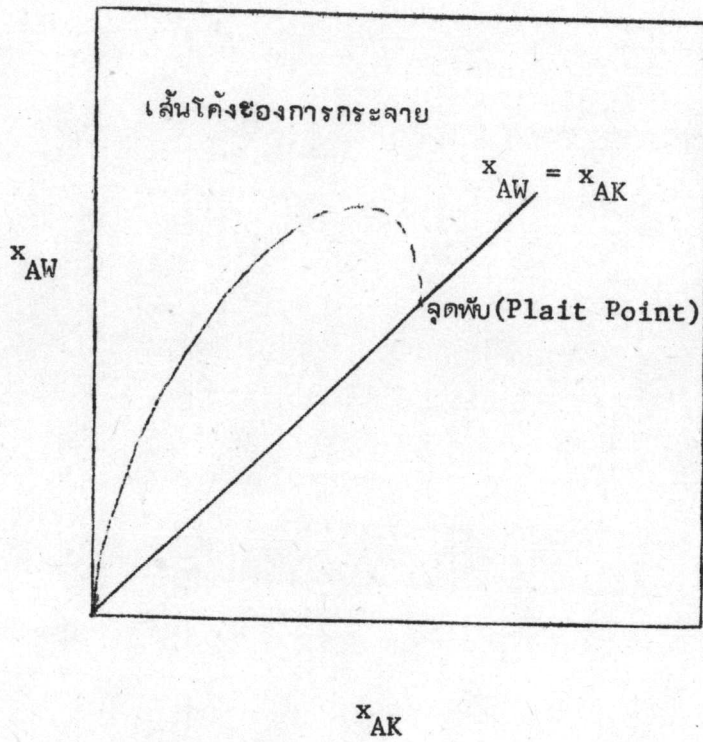
x_{AK} " " " " , A " K

อย่างไรก็ตามกฎของการกระจายอย่างง่าย ๆ นี้ จะเป็นไปได้ในสถานะสิ้นเพราะขึ้นอยู่กับหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic principles) แต่ถ้าหากตัวถูกละลายประกอบขึ้นด้วยส่วนต่างๆ ที่มากมายอันเป็นผลต่อการรวมตัวและการแยกตัวของตัวมันเองในแต่ละเฟส เราก็ไม่สามารถใช้กฎนี้ได้

2.6 เส้นโค้งของการกระจาย (Distribution Curve)

เส้นโค้งของการกระจาย⁽³⁴⁾ ได้มาจากการกำหนดค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสที่เป็นตัวทำละลายที่ดี กับในเฟสที่เป็นตัวทำละลายได้บ้าง ตามภาพที่ 2.18 ค่าความลาดเอียงของเส้นโค้งของการกระจาย จะเป็นค่าของสัมประสิทธิ์การกระจาย, K ค่านี้จะมีค่ามากกว่า 1 หากเส้นโค้งนี้อยู่เหนือเส้น 45° ซึ่งแสดงถึงตัวถูกละลายได้ดีในเฟสของตัวทำละลายที่ดี, W เส้นโค้งของการกระจายนี้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้นต่ำๆ ใกล้จุดกำเนิด (0,0) และสิ้นสุดที่จุดพับ (Plait Point) ซึ่งเป็นจุดแสดงความเข้มข้นสูงสุดของตัวถูกละลาย

โดยไม่ว่าเป็นต้องเป็นส่วนหนึ่งของเส้นโค้งของการกระจาย



ภาพที่ 2.18 แสดงสมมูลการกระจาย

2.7 ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสาร

โดยปกติแล้วปฏิปฏิกิริยาซึ่งมีการไหลสวนทางกันอย่างต่อเนื่อง เราจะกำหนดให้ของเหลวมีการไหลแบบพิสตัน (Piston) ซึ่งที่จริงในเชิงปฏิบัติแล้วเป็นไปได้ เพราะเส้นทางของการไหลจะขึ้นกับลักษณะของเครื่องมือที่ใช้, ขึ้นกับความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปในเครื่องมือนั้นๆ อันมีผลส่งกระทบไปถึงประสิทธิภาพของขบวนการสกัด และเป็นการยากสำหรับ การประมาณค่าที่ถูกต้องของการส่งผ่านมวล ดังนั้นการแสดงประสิทธิภาพของเครื่องมือ, η_n จึงต้องแสดงในรูปของจำนวนขั้นสมมูลตามทฤษฎี (Number of Equivalent Theoretical Stages, (NETS) (NETS) Theoretical) กับจำนวนขั้นที่ปรากฏหรือ (NETS) apparent นั่นคือ

$$\eta_n = \frac{(\text{NETS})_{\text{Theoretical}}}{(\text{NETS})_{\text{apparent}}} \quad 2.1$$

หากเครื่องมือที่ใช้มีการสัมผัสกันของของเหลวเป็นขั้นๆ เราจะใช้หลักการของประสิทธิภาพเมอร์ฟี่ (Murphree Efficiency) โดยยึดตัวเลขเพื่อสเฟลเป็นตัวพื้นฐานในการคิด หากเป็นของเหลวเพียง 2 ขั้นตอนในการส่งผ่านเพียงขั้นเดียวจะได้ว่า

$$\eta_{Md} = \frac{(Cd)_n - (Cd)_{n+1}}{(Cd)_n - (Cd)_{n+1}^*} \quad 2.2$$

- η_{Md} คือ ประสิทธิภาพเมอร์ฟี่
- $(Cd)_n, (Cd)_{n+1}$ คือ ส่วนประกอบของคิลเพอส์เฟลที่เข้าสู่และไหลออกจากขั้นนั้นตามลำดับ
- $(Cd)_{n+1}^*$ คือ ส่วนประกอบของคิลเพอส์เฟลเมื่อถึงสมดุลกับคอนดิทิวฮิลเฟลในขั้นนั้น

คำว่า "ขั้น" (Stage) หมายถึงส่วนทั้งหมดหรือส่วนหนึ่งของเครื่องมือที่มีการสัมผัสกันของของเหลว หรือเพียงจุดใดจุดหนึ่ง ซึ่งทั้งนี้คอนดิทิวฮิลเฟลจะมีการผสมเข้ากันอย่างสมบูรณ์



ประสิทธิภาพเฉพาะจุด⁽⁵⁾ สำหรับดิสเพลสเมนต์ในทุกๆ หยดแสดงได้ในรูปของสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านมวลทั้งหมด (The overall mass transfer coefficient, $K_{od} a$) ดังนี้

$$(\eta_{Md})_1 = 1 - \exp \left[-K_{od} a \left(\frac{Z}{U_d} \right) \right] \quad 2.3$$

สำหรับของคอนติวาล์สเพลสก็แสดงในทำนองเดียวกันได้ดังนี้

$$(\eta_{Mc})_1 = 1 - \exp \left[-mK_{oc} a \left(\frac{Z}{U_d} \right) \right] \quad 2.4$$

เมื่อ $(\eta_{Md})_1$ และ $(\eta_{Mc})_1$ คือประสิทธิภาพเมอฟรีเฉพาะจุดหรือเฉพาะตำแหน่ง, Z คือระยะทางหรือความสูงที่เกิดหยดเคลื่อนที่ และ U_d คือความเร็วพื้นผิวผิว (Superficial velocity) ของดิสเพลสเมนต์ และจากการที่เราให้คอนติวาล์สเพลสมีการผสมอย่างสมบูรณ์ในชั้นนั้น ความเข้มข้นของคอนติวาล์สเพลสในแต่ละชั้นจึงมีค่าคงที่และมีค่าเกือบเท่ากับกับค่าของความเข้มข้นของคอนติวาล์สเพลสที่ออกจากชั้นนั้น ดังนั้นประสิทธิภาพเฉพาะจุดจึงถือว่ามีความเท่ากันกับประสิทธิภาพเมอฟรีของชั้นทั้งหมด ดังนั้น

$$(\eta_{Mc})_1 = (\eta_{Md})_1 = \eta_{Md} = \eta_{Mc} \quad 2.5$$

สมมติฐานตามที่กล่าวไปนี้ใช้ได้เฉพาะส่วนหรือชั้นเล็กๆ เท่านั้น แต่หากชั้นใหญ่ขึ้นเราต้องสมมติให้คอนติวาล์สเพลส มีการไหลแบบเป็นก้อนและมีการผสมที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งในกรณีเช่นนี้ประสิทธิภาพเมอฟรีจะได้ออกมาเป็น

$$\eta_{Md} = \frac{\exp \left[\frac{m U_d}{U_c} (\eta_{Md})_1 \right] - 1}{\frac{m U_d}{U_c}} \quad 2.6$$

และ

$$\eta_{Mc} = \frac{\exp \left[\frac{m U_d}{U_c} (\eta_{Mc})_1 \right] - 1}{\frac{m U_d}{U_c}} \quad 2.7$$

และเพราะว่า $\eta_{Md} = \eta_{Mc}$ ดังนั้นประสิทธิภาพของชั้นทั้งหมดจึงเขียนได้เป็น

$$\eta_o = \frac{(1 + \eta_{Md} (\frac{m Ud}{Uc} - 1))}{\text{Log}(\frac{m Ud}{Uc})} \quad 2.8$$

ในกรณีที่ $\frac{m Ud}{Uc}$ มีค่าเท่ากับ 1 สมการที่ 2.8 นี้จะใช้ไม่ได้ ค่าของ η_o ต้องเปลี่ยนไปเป็น

$$\eta_o = \frac{\eta_{Md} (1 + \frac{m Ud}{Uc})}{1 + (\frac{m Ud}{Uc} (\eta_{Md}))} \quad 2.9$$

อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านมวลทั้งหมดในสมการที่ 2.3 และ 2.4 จะรวมผลของการเกิดการปั่นป่วนที่ผิว (Interfacial turbulence) และปรากฏการณ์อื่นๆ ที่ผิว ซึ่งมีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลสาร ดังนั้นค่าของประสิทธิภาพของทั้งหมด, η_o ในสมการที่ 2.9 จึงมีค่าเป็นเกือวกวกับในสมการที่ 2.2 โดยคิดจากความเข้มข้นของของเหลวเป็นพื้นฐาน

เมื่อเรานำชั้นมาต่อเรียงกันเข้า n ชั้น แต่ละชั้นจะมีประสิทธิภาพเป็น η_o เราสามารถหาประสิทธิภาพรวมของทุกชั้นเป็น η_n ได้เป็นดังนี้

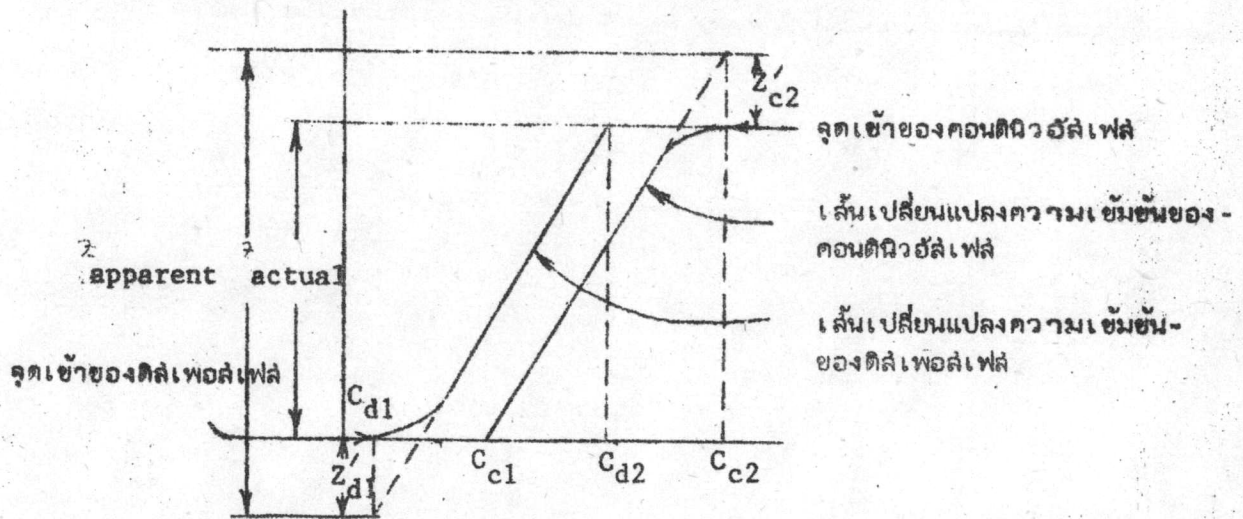
$$\eta_n = \eta_o [1 + (1 - \eta_o) + (1 - \eta_o)^2 + (1 - \eta_o)^3 + \dots + (1 - \eta_o)^{n-1}] \quad 2.10$$

จะเห็นได้ว่าจำนวนชั้นยิ่งเพิ่มมากขึ้นเท่าไร ค่าประสิทธิภาพก็ยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้เพราะเราให้ของเหลวไหลแบบปลัดขิ้น ยิ่งมีชั้นเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ผลของการผสมรอบแกน (Axial Mixing) ลดน้อยลง

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติในการใช้คอลัมน์ ส่วนใหญ่มีค่าจนถึงเฉพาะความเข้มข้นของของเหลวที่จุดเข้าและออกของคอลัมน์ ซึ่งจริงๆ แล้วควรคำนึงถึงผลที่จุดเข้าและออกที่นิมิตต่ออัตราในการส่งผ่านมวลด้วย กับทั้งควรพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นที่เป็นจริงในคอลัมน์เมื่อมีการปฏิบัติการด้วย

ในส่วนสุดท้ายที่จุดออกของคอสัมพันธ์มีการลดลงอย่างทันทีทันใดของแรงขับเคลื่อน (Driving force) (36, 37, 38, 39) การลดลงนี้เกิดขึ้นในระยะทางสั้นๆ ผลของมันทำให้มีการเพิ่มขึ้นของความสูงของคอสัมพันธ์ที่เป็นจริง สมมุติให้เป็น Z'_{c2} และ Z'_{d1} ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.19 ส่วนที่จุดเข้าของคอสัมพันธ์ของคอนติวอร์ลเฟล จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของความเข้มข้นของคอนติวอร์ลเฟล ปรากฏการณ์นี้มีผล (37, 40) ทำให้ความสูงสัมพันธ์ Z'_{c2} เป็นค่าความสูงที่เป็นไปได้ที่จะต้องเพิ่มขึ้นของคอสัมพันธ์ ซึ่งประมาณค่า Z'_{c2} ได้โดยการต่อเส้นตรงของเส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไปตัดกับเส้นตรงในแนวตั้งที่ผ่านจุดแสดงความเข้มข้นขณะเข้าที่แท้จริงของของเหลวหรือจุด C_{c2} ตามภาพ

ดีลเพลสเฟลจะมีการเปลี่ยนแปลงทำนองเดียวกันนี้ที่หัวฉีดในขณะที่เริ่มเกิดเม็ดหยด ซึ่งแสดงโดยความสูงสัมพันธ์ Z'_{d1} ที่หัวฉีดส่วนล่างของคอสัมพันธ์ หากค่า Z'_{d1} ได้โดยการลากต่อเส้นตรงแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของดีลเพลสเฟลตัดกับเส้นในแนวตั้งที่ผ่านจุดแสดงความเข้มข้นขณะเข้าคอสัมพันธ์ที่แท้จริงหรือจุด C_{d1} ตามภาพ



ภาพที่ 2.19 แสดงความสูงของคอสัมพันธ์ที่ต้องเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของจุดเข้าและออกของคอสัมพันธ์

2.8 การศึกษาอิทธิพลของขนาดของหยดต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารโดยรูปแบบคณิตศาสตร์

การถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์สกัดของเหลวขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวด้วยกัน ตัวแปรสำคัญคือพื้นที่ผิวรอบหยดสารออร์แกนิก ถ้าหัวฉีดสารออร์แกนิกมีรูฉีดขนาดใหญ่ หยดที่ถูกสร้างขึ้นจะมีขนาดใหญ่ด้วย เมื่อหยดเหล่านี้ไหลผ่านชั้นหรือลงในคอลัมน์จะแตกตัวเป็นหยดเล็กๆ แต่หากหัวฉีดสารออร์แกนิกมีรูฉีดขนาดเล็ก หยดที่ถูกสร้างขึ้นก็มีขนาดเล็กด้วย แนวโน้มของเม็ดหยดที่จะแตกตัวเป็นหยดเล็กลงไปอีกจะมีน้อยกว่าในกรณีแรก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวรอบหยดทั้งหมดอาจจะเปลี่ยนตามความยาวของคอลัมน์ได้ โดยการเปลี่ยนขนาดของพื้นที่ผิวนี้มีแนวโน้มจะสูงขึ้นเมื่อออกห่างจากหัวฉีด จุดประสงค์ของการวิจัยในเรื่องนี้ก็คือการอาศัยรูปแบบคณิตศาสตร์เฉพาะสำหรับคอลัมน์สกัดของเหลวซึ่งมีชื่อเรียกว่าดิฟฟิวชันโมเดล (Diffusion model) หรือ มียาโอชิโมเดล (Miyachi model) พิจารณาถึงการแปรขนาดของหยดตลอดความยาวของคอลัมน์ว่ามีประสิทธิภาพของคอลัมน์เหมือนดังกรณีที่เป็นสมมติให้หยดมีขนาดคงที่หรือไม่มีการแปรขนาดตลอดความยาวของคอลัมน์ เพราะถ้าหากแสดงได้ว่าอิทธิพลของการแปรขนาดของหยดมีน้อย ค่าการผู้ออกแบบคอลัมน์จะได้ไม่ต้องคำนึงถึงความไม่คงที่ของพื้นที่ผิวรอบหยดในระดับต่างๆ ของคอลัมน์ ทำให้เกิดความสะดวกในการออกแบบขึ้นอีกมาก

รูปแบบคณิตศาสตร์ดิฟฟิวชัน

"ดิฟฟิวชัน โมเดล" เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้อธิบายคุณลักษณะของการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์ของเครื่องสกัดของเหลวด้วยของเหลว (41, 42) และยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบคอลัมน์ โดยอาศัยข้อมูลที่ได้อิมพ์เผยแพร่แล้วหรือข้อมูลจากโรงงานต้นแบบ ทั้งนี้แนวความคิดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงรูปแบบทางคณิตศาสตร์นี้ จะได้มาจากการสังเกตข้อบ่งชี้ของรูปแบบทางคณิตศาสตร์จากเครื่องสกัดจริง อันนำไปสู่การวิจัยในหัวข้อต่างๆ ซึ่งอาจจะเกี่ยวข้องหรือไม่เกี่ยวข้องับบรรทัดฐานของความถูกต้องและความสะดวกในการออกแบบคอลัมน์ก็ได้

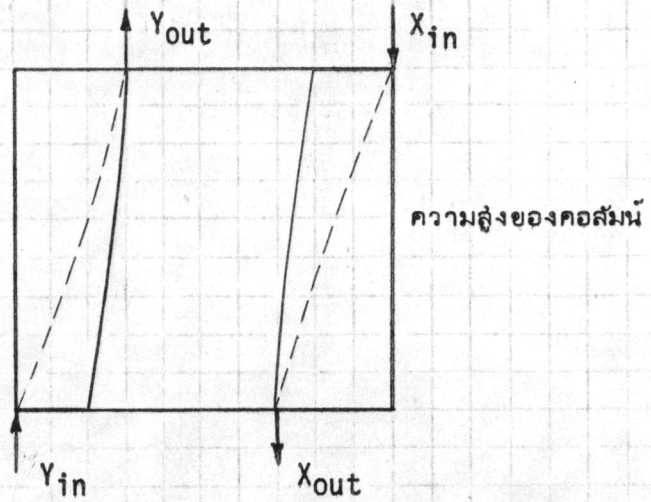


แต่เดิม เครื่องสกัดของเหลวด้วยของเหลวเราใช้หลักการของทรานส์เฟอร์ ยูนิตส์ (Transfer units) ก็สามารรถออกแบบหรือใช้ในการคำนวณได้ แต่ในยุคทศวรรษปัจจุบันได้มีการปรับปรุงให้การสกัดของเหลวด้วยของเหลวในแบบของคอลัมน์นี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างมาก เช่น โดยการใส่เครื่องจักรกลเพิ่มแรงกวนในคอลัมน์ ดังนั้นการออกแบบและการคำนวณจึงจำเป็นต้องใช้รูปแบบคณิตศาสตร์ดิฟฟิวชัน (41, 42, 43) ซึ่งหลักการทั้งสองนี้มีข้อแตกต่างกันดังภาพที่ 2.20

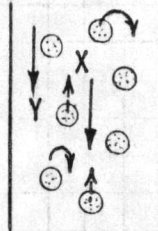
ทรานส์เฟอร์ ยูนิตส์ เป็นหลักการที่มีการสมมุติให้มีการไหลแบบพิสตัน (Piston flow) ของทั้งสองเฟส จึงเป็นการสมมุติที่ทำให้เส้นแนวแสดงการแปรของความเข้มข้นในคอลัมน์เป็นไปตามเส้นประในภาพที่ 2.20 ซึ่งจริงๆ แล้วเส้นแนวแสดงการแปรของความเข้มข้นจะเป็นไปตามเส้นเต็ม ซึ่งสามารถวัดได้โดยการทำการทดลอง เราจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นจะแปรเปลี่ยนไปอย่างมากในช่วงต้นและช่วงสุดท้ายของคอลัมน์ ซึ่งเราใช้หลักการของ "ดิฟฟิวชัน โมเดล" อธิบายได้นอกจากนี้ "ดิฟฟิวชัน โมเดล" ยังใช้ตัวแปรถึงสามตัวสำหรับอธิบายในหลักการเดิม ซึ่งพบว่าไดรวิง ฟอर्स (Driving force) ของทั้งสองหลักการจะแตกต่างกันดังภาพที่ 2.20 ที่ตั้งนั้นในปัจจุบันนี้ "ดิฟฟิวชัน โมเดล" จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอลัมน์ที่มีการเพิ่มการกวนในคอลัมน์ เช่น พัลส์คอลัมน์ เป็นต้น

โดยความเป็นจริงของการไหลส่วนทางกันของของเหลวทั้งสองเฟสในการสกัดของเหลวด้วยของเหลวนี้ จะมีเฟสหนึ่งคือดีสเพอส์เฟสที่จะอยู่ในรูปของหยด ไหลผ่านไปสู่อีกเฟสหนึ่งคือคอนตินิวอัสเฟส ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยภาพที่ 2.21 ซึ่งตามภาพนี้จะเห็นว่ามีการผสมกลับของหยด ทำให้เกิดการผสมกันของทั้งสองเฟส อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการไหลส่วนทางและการไหลผ่านกัน

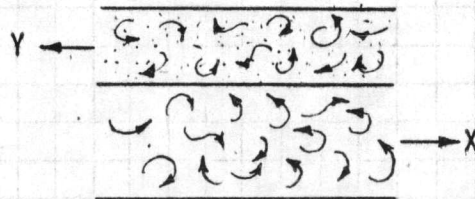
สำหรับ "ดิฟฟิวชัน โมเดล" นี้ เราจะให้ทิศทางของการไหลของทั้งสองเฟสตรงกันข้ามกันด้วยความเร็ว (Superficial velocity) F_x และ F_y สม่่าเสมอ การส่งผ่านของมวลสารจากเฟสหนึ่งสู่อีกเฟสหนึ่งจะดำเนินไปตลอดความยาวของคอลัมน์ โดยเราสมมุติให้ทั้งสองเฟสมีการไหลแบบพิสตันดิฟฟิวชันและมีการถ่ายเทมวลสารระหว่างทั้งสองเฟสนี้ด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.22



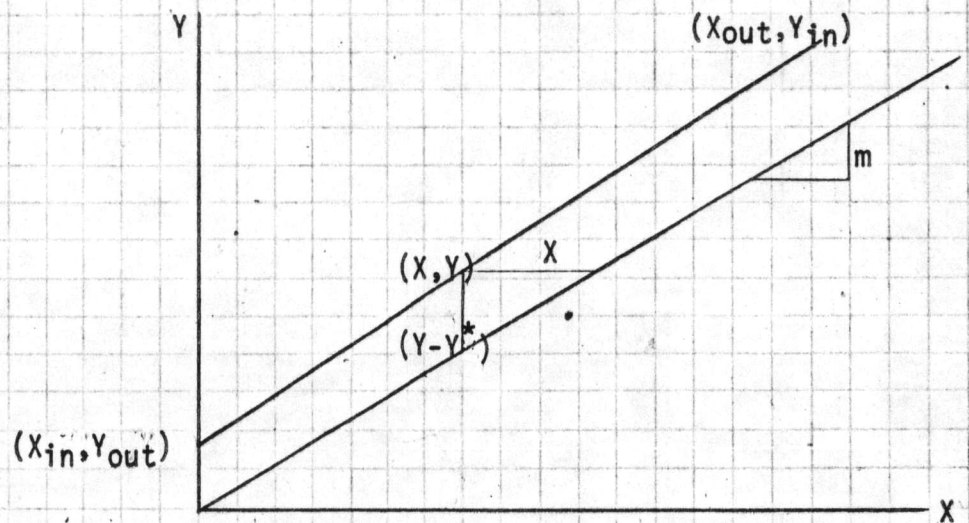
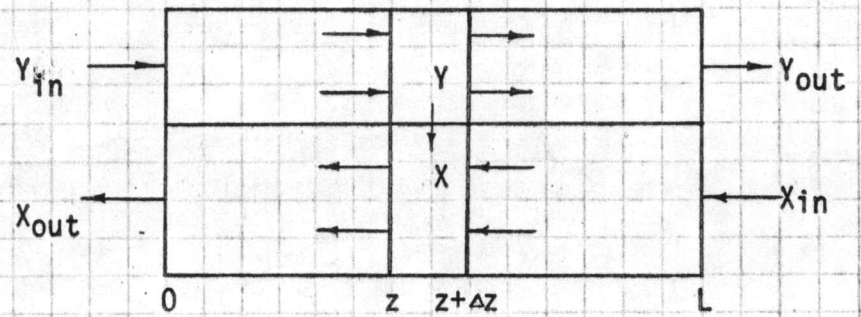
ภาพที่ 2.20 แสดงเส้นแนวแปรความเข้มข้นในการสกัดของเหลวด้วยของเหลวไหลส่วนทางในคอสัมน์ เส้นทึบแสดงการแปรความเข้มข้นจริง เส้นปรูแสดงการแปรโดยสมให้มีการไหลแบบฟิลล์ดาวน์



ภาพที่ 2.21 แสดงการผสมกลับของเม็ดหยดในคอสัมน์



ภาพที่ 2.22 แสดงการไหลแบบฟิลล์ดาวน์ ดิฟฟิวชัน เพื่อความสะดวกในการเขียนรูปแบบคณิตศาสตร์



ภาพที่ 2.23 แสดงส่วนของคอสมัน และอีควิลิเบรียมโตอะแกรม

เราพบว่าความเข้มข้นในคอลัมน์และช่วงปลายทั้งสองของคอลัมน์ขึ้นกับกลุ่มพารามิเตอร์ไร้มิติ (Dimensionless parameters) สี่ตัวด้วยกัน คืออัตราในการกระจาย (Dispersion rates) , ความเร็วของการไหล, อีควิลิเบียม พาร์ติชัน โคเอฟฟิเชียน (The equilibrium partition coefficient) และสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสารทั้งหมด (The "true" over-all mass transfer coefficient)

ในรูปแบบคณิตศาสตร์ที่พบบ่อยหรือที่เรียกกันว่า นิยามโอซี โมเดล⁽⁴⁴⁾ มีการสมมติให้ของเหลวทั้งสองเฟสมีการไหลแบบฟิลล์ต้นตีฟิวชันและมีการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสทั้งสอง เราจึงตัดคอลัมน์ออกเป็นส่วนใหญ่ๆ เพื่อนำมาพิจารณาสมดุลของตัวถูกละลาย ดังภาพที่ 2.23 ซึ่งเราให้ส่วนล่างสุดของคอลัมน์ มีค่า $Z = 0$ โดยมีเฟส Y เข้าที่ด้านล่างของคอลัมน์นี้ ส่วนเฟส X เข้าด้านบนของคอลัมน์ที่ $Z = L$ การถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นจากเฟส Y ไปสู่เฟส X

(ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง. ประกอบ)

สำหรับเฟส Y :

$$U_y \left[(1-\phi)Y \right]_Z - U_y A_T (1-\phi)Y_{Z+\Delta Z} + J_y A_T \left[Y \right]_Z - J_y A_T \left[Y \right]_{Z+\Delta Z} - K_y \cdot a' \cdot A_T \cdot \Delta Z \cdot (Y-Y^*) = 0 \quad (2-11)$$

$$(1-\phi)U_y \frac{(-Y|_{Z+\Delta Z} + Y|_Z)}{\Delta Z} + \frac{(D_y \frac{dy}{dz} |_{Z+\Delta Z} - D_y \frac{dy}{dz} |_Z)}{\Delta Z} - K_y \cdot a' \cdot (Y-Y^*) = 0 \quad (2-12)$$

กำหนดให้ข้อจำกัดเป็น $\Delta Z \rightarrow 0$

$$-(1-\phi)U_y \frac{dY}{dz} + D_y \frac{d^2 Y}{dz^2} - K_y \cdot a' \cdot (Y-Y^*) = 0 \quad (2-13)$$

โดยกำหนดเดี่ยวกั้กับเฟส X ซึ่งกำหนดให้ข้อจำกัด $\Delta Z \rightarrow 0$ เช่นกัน เราจะได้

$$\phi U_x \frac{dx}{dz} + D_x \frac{d^2 X}{dz^2} + K_y \cdot a' \cdot (Y-Y^*) = 0 \quad (2-14)$$

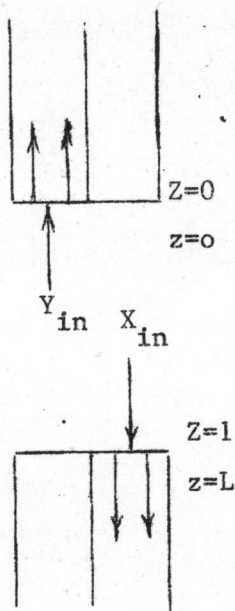
เราจัดดิฟเฟอเรนเชียลใหม่ โดยการใช้ F_x , P_y และ R_y ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระ จะได้

$$\frac{1}{P_y} \frac{d^2 Y}{dz^2} - \frac{dY}{dz} - R_y (Y - Y^*) = 0 \quad (2-15)$$

$$\frac{1}{P_x} \frac{d^2 X}{dz^2} + \frac{dX}{dz} + R_x (Y - Y^*) = 0 \quad (2-16)$$

สำหรับสมการของตัวถูกละลายที่ส่วนล่างสุดและบนสุดของคอลัมน์ ในกรณีที่มีการส่ง

ผ่านมวลจากเฟส Y ไปสู่เฟส X จะได้สมการเพิ่มขึ้นอีกเป็น



ที่ $z = 0$

$$\frac{dX(0)}{dz} = 0 \quad (2-17 ก)$$

$$G_y Y_{in} = A_T (1-\theta) U_y Y(0^+) + J_y A_T \Big|_{z=0}$$

$$F_y Y_{in} = F_y Y(0^+) - D_y \frac{dY(0^+)}{dz} \Big|_{z=0}$$

$$Y_{in} = Y(0^+) \frac{1}{P_y} \frac{dY(0^+)}{dz} \quad (2-17 ข)$$

ที่ $z = 1$

$$\frac{dY(1)}{dz} = 0 \quad (2-18 ก.)$$

$$G_x X_{in} = A_T \theta U_x X(1^-) + J_x A_T \Big|_{z=L}$$

$$F_x X_{in} = F_x X(1^-) + D_x \frac{dX(1^-)}{dz} \Big|_{z=L}$$

$$X_{in} = X(1^-) + \frac{1}{P_x} \frac{dX(1^-)}{dz} \quad (2-18 ข)$$

แนวความคิดของเราในขณะนี้ก็คือการอินทิเกรต (integrate) สมการข้างบน

ทั้งสองในกรณี Px กับ Py และ Rx กับ m' แปรค่าตามความสูงของคอลัมน์ Z

$$A(x) \frac{d^2 X}{dz^2} + B \frac{dX}{dz} + C(x)X = D(x)Y \quad (2-21)$$

$$E(x) \frac{d^2 Y}{dz^2} + F \frac{dY}{dz} + G(x)Y = H(x)X \quad (2-22)$$

สมการที่ (2-217 และ (2-22) อยู่ในรูปของ ไฟไนต์ ดิฟเฟอเรนซ์ (finite-difference form)

$$\frac{d^2 X}{dz^2} = \frac{X_{n-1} - 2X_n + X_{n+1}}{\Delta Z^2} \quad ; \quad \frac{dX}{dz} = \frac{X_{n+1} - X_n}{\Delta Z} \quad ; \quad \Delta Z = \frac{H_T}{N}$$

$$A(I) \left[\frac{X(I-1) - 2X(I) + X(I+1)}{\Delta Z^2} \right] + B \left[\frac{-X(I) + X(I+1)}{\Delta Z} \right] + C(I)X(I) = D(I)Y(I)$$

$$\frac{A(I)}{(H_T/N)^2} X(I-1) + \left[-\frac{2A(I)}{(H_T/N)^2} - \frac{B}{(H_T/N)} + C(I) \right] X(I) + \left[\frac{A(I)}{(H_T/N)^2} + \frac{B}{(H_T/N)} \right] X(I+1) = D(I)Y(I)$$

$$SA(I)X(I-1) + SB(I)X(I) + SC(I)X(I+1) = D(I)Y(I) \quad (2-23 ก)$$

ในทำนองเดียวกันอีกสมการหนึ่งเราจะได้

$$\frac{E(I)}{(H_T/N)^2} Y(I-1) + \left[-\frac{2E(I)}{(H_T/N)^2} - \frac{F}{(H_T/N)} + G(I) \right] Y(I) + \left[\frac{E(I)}{(H_T/N)^2} + \frac{F}{(H_T/N)} \right] Y(I+1) = H(I)X(I)$$

$$SE(I)Y(I-1) + SE(I)Y(I) + SG(I)Y(I+1) = H(I)X(I) \quad (2-23 ข)$$

สำหรับตัว A, B, C, D, E, G, H, SA, SB, SC, SE, SF, SG

คำนวณหาได้จาก

Px, Py, Rx, m' ในรูปของค่า x ปัญหาก็คือหากเราแบ่ง 0 ถึง H_T ออกเป็น 100 ช่วง

เราต้องเตรียมสมการเพื่อคำนวณ (โดยใช้คอมพิวเตอร์) ค่าที่ต้องการทั้ง 100 คำนวน หากแบ่ง

น้อยช่วงเช่น 20 ช่วง เราก็สามารถคำนวณเองโดยตรงเพื่อนำค่านี้เข้าไปในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ต่อไปได้

การแก้ปัญหาก็แบ่งออกเป็น 2 ทาง ทางแรกเป็นการแบ่งออกเป็น 20 ช่วง แปลงค่าโดยตรงเป็นแมทริกซ์ (Matrix) โดยวิธีนี้เราต้องทำการคำนวณลู่เปล่าโดยไม่จำเป็นหลายครั้ง เพราะในแมทริกซ์มีเส้นขวางถึงสามเส้น และมีเลขศูนย์หลายตัวด้วยกัน ในหนทางที่สองเป็นการแบ่งออกเป็น 100 ช่วง ใช้วิธีแปลงค่าอย่างง่าย ๆ สำหรับไตรไดอะกอนอล แมทริกซ์ (Tridiagonal matrix) จำนวนที่ว่างของความจำ (Memory space) ที่ต้องการใช้มีจำนวนเท่ากับวิธีแรก กับต้องใช้ออปทิไมเซชัน (Optimization) ทำให้วิธีที่สองมีได้ค่าทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำมากกว่า ถึงแม้ว่าวิธีแรกจะเป็นคำนวณอย่างตรงไปตรงมาและง่ายต่อการทำความเข้าใจแต่ก็เป็นวิธีที่ต้องใช้ที่ว่างความจำในคอมพิวเตอร์มากเกินไปจนความจำเป็นกับทั้งมีความแม่นยำทางคณิตศาสตร์น้อย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้วิธีที่สอง โดยในขั้นแรกนี้พิจารณาถึงการแบ่งเป็น N ช่วง

จากสมการที่ (2-23 ก.) และ (2-23 ข.) เรานำมาเขียนใหม่เป็น

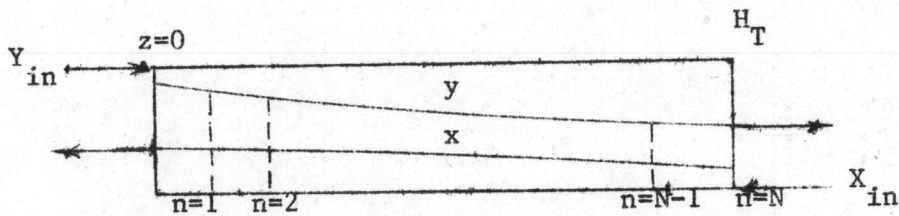
$$SA X (I-1) + SB(I) X(I) + SC X(I+1) = DY(I) \quad (2-24ก.)$$

$$SE Y (I-1) + SF Y (I) + SG Y (I+1) = H(I)X(I) \quad (2-24ข.)$$

ดังนั้นเราจะเหลือเวกเตอร์ (Vectors) เพียงตัว SB และ H ส่วนค่าของตัวอื่นๆ จะมีค่าคงที่โดยคำนวณได้จากค่าของ P_x, P_y, R_x สำหรับเวกเตอร์ที่เหลืออยู่นี้เราจะหาค่ามาได้จากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับ m ในรูปของ X

สำหรับส่วนบนสุดและล่างสุด ซึ่งเราได้เป็นสมการที่ (2-17 ก.) , (2-17 ข.)

(2-18 ก.) และ (2-18 ข.) นั้น เรานำมาเขียนใหม่ในรูปของไฟไนต์ ดิฟเฟอเรนซ์ได้เป็น



เมื่อ $Z=0$ $\frac{dX(0)}{dZ} = 0$ จะได้ $X(0) = X(1)$ หรือ $X(0) - X(1) = 0$ (2-25 ก)

$$Y_{in} = Y(0^+) - \frac{1}{P_y} \frac{dY(0^+)}{dZ} \quad \text{จะได้} \quad Y_{in} = Y(0) - \frac{1}{P_y} \frac{Y(1) - Y(0)}{(H_T/N)}$$

$$\text{หรือ} \quad \left(1 + \frac{1}{P_y (H_T/N)} \right) Y(0) + \left(- \frac{1}{P_y (H_T/N)} \right) Y(1) = Y_{in}$$

$$\text{หรือ} \quad \alpha Y(0) + \beta Y(1) = Y_{in} \quad (2-25 ข)$$

เมื่อ $Z=1$ $\frac{dY(1)}{dZ} = 0$ จะได้ $Y(N-1) - Y(N) = 0$ (2-25 ค)

$$X_{in} = X(1^-) + \frac{1}{P_x} \frac{dX(1^-)}{dZ} \quad \text{จะได้} \quad X_{in} = X(N) + \frac{1}{P_x} \frac{X(N) - X(N-1)}{(H_T/N)}$$

$$\text{หรือ} \quad \left(- \frac{1}{P_x (H_T/N)} \right) X(N-1) + \left(1 + \frac{1}{P_x (H_T/N)} \right) X(N) = X_{in}$$

$$\text{หรือ} \quad \gamma X(N-1) + \lambda X(N) = X_{in} \quad (2-25 ง)$$

มีข้อสังเกตคือ หากเราแบ่งออกเป็น N ช่วง สมการที่ (2-24 ก.) สามารถเขียนค่า $n = 1, 2, 3, \dots, N-1$ ไม่มีค่าของ $n = N$ เพราะค่าของ $X(N+1)$ ไม่มีจริง และเช่นกันสำหรับ $n = 0$ จากสมการเดิมนี้ $n=0-1 = -1$ ก็ไม่มีจริงเช่นกัน อย่างไรก็ตาม สำหรับสมการที่ (2-25 ก.) และ (2-25 ง.) เราจะได้ $(N-1)+1+1 = N+1$ สมการ และ $N+1$ ตัวสำหรับตัวไม่ทราบค่าของค่า X เช่นเดียวกับค่าของ Y เรามีสมการ $N+1$ สมการและ $N+1$ ตัว สำหรับตัวไม่ทราบค่า

ตัวอย่าง การสร้างแมทริกซ์ $2N+2$

$X(0), X(1), X(2), \dots, P(1), P(2), P(3), \dots, P(N+1)$

$Y(0), Y(1), Y(2), \dots$

$P(N+2), P(N+3) \dots P(2N+2)$

1	-1					P(1)	0	จากสมการที่ (2-24ก)
SA	SB(1)	SC		D		P(2)	0	" " " เมื่อ n=1
	SA	SB(2)	SC	D		P(3)	0	" " " เมื่อ n=2
	H(1)			SE SF SG			0	จากสมการที่ (2-24ข) เมื่อ n=1
				1	-1	P(2N+2)	0	จากสมการที่ (2-25ค)

วิธีหนึ่งของการแก้แมทริกซ์นี้ทำได้โดยการคำนวณ $P(1), P(2), \dots$

ซึ่งจะได้ค่าของ $X(0), X(1), X(2), \dots, Y(0), Y(1), \dots$ ตามที่เราต้องการ

อย่างไรก็ดีหาก มีค่าเป็น 100 แมทริกซ์นี้ก็จะใหญ่โตมากเกินไป