



# การศึกษาวิธีการไหลของดิสเปอร์สเฟสในท่อยาว

ของ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรพัฒน์ อรรถยุกติ

วุฒิ B.S. (Maryland), M.S. (Maryland), Docteur-Ingenieur (Toulouse)

โครงการวิจัย เลขที่ 40-MRD-2521

ทุนเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันวิทยบริการ

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ ๑

จท  
วศ 15  
002303

ธันวาคม พ.ศ. 2525



การศึกษาวิธีการไหลของคิสเปอร์สเฟสในท่อยาว

ของ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรพัฒน์ อรรถยุกติ

วุฒิ B.S. (Maryland), M.S. (Maryland), Docteur - Ingenieur (Toulouse)

โครงการวิจัยเลขที่ 40-MRD-2521

ทุนเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

ธันวาคม พ.ศ. 2525

หัวข้อ เรื่อง การศึกษาวิธีการไหลของดิส เพอร์ส เฟสในท่อยาว

ผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ อรรถบุษกิติ

### บทคัดย่อ

ผู้วิจัยได้ทำการถ่ายภาพหยดสารเหลวในคอลัมน์สีกัดของเหลวในสภาพที่น้ำซึ่ง เป็นเฟสหลักอยู่นิ่ง การถ่ายภาพหยดแบ่งเป็น 2 ประเภท ประเภทที่หนึ่ง ได้แก่ การถ่ายภาพ เพื่อวัดขนาดของหยด ประเภทที่สอง ได้แก่ การถ่ายภาพโดยเปิดน้ำกลิ้งนาน เพื่อได้มา ซึ่งความเร็วของแต่ละหยด ผลการถ่ายภาพแสดงให้เห็นว่าเฟสหยดไหลผ่านโดยมีโปรไฟล์ ความเร็วที่ขึ้นกับรัศมีของท่อยาว และหยดที่มีความเร็วสูงสุดจะอยู่ตรงกลางท่อ สำหรับการ ทดลองทุกครั้งได้คำนวณเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของกลุ่มหยด (เป็น เส้นผ่าศูนย์กลางขอเตอร์) และจากนั้นสามารถคำนวณความเร็วสุดท้ายของหยดขนาดนั้น (FREE FALL VELOCITY) และ พบว่าความเร็วจริงของกลุ่มหยดซึ่งอยู่ตรงกลางของคอลัมน์ สูงกว่าความเร็วสุดท้ายของหยด ขนาดเฉลี่ย และตรงกันข้ามพบว่ากลุ่มหยดซึ่งอยู่ในบริเวณผนังท่อมีความเร็วจริงที่ต่ำกว่าความ เร็วสุดท้ายของหยดขนาดเฉลี่ย การถ่ายภาพหยดดังกล่าวได้แสดงปรากฏการณ์ที่ว่าหยดที่ไหล ผ่านท่อยาว มีแนวโน้มจะเลื่อนมายังศูนย์กลางของคอลัมน์ ผู้วิจัยได้ประ เนิ่นการผสมย้อนกลับ ในเฟสหยดโดยวัดเบอร์เพเคล็ค และผลปรากฏว่าการไหลของเฟสหยดถือได้ว่าเป็นการไหล แบบทรงกระบอก หรือการไหลที่ใกล้เคียงการไหลแบบทรงกระบอกมาก จากการศึกษาการไหลของ เฟสหยดในท่อยาวสรุปได้ว่าการหมุนเวียนในเฟสหลัก เป็นผลที่สอดคล้องกับข้อตั้ง เกศของนัก วิจัยอื่นที่ศึกษาเฟสหลัก ในที่สุดผู้วิจัยได้เสนอคู่มือการคำนวณจำนวนหนึ่ง เพื่ออธิบายการ ถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบสเปรย์ โดยหลักการของการหมุนเวียนของเฟสหลักปรากฏอยู่

TITLE           STUDIES OF DISPERSED PHASE FLOW IN A COLUMN  
NAME           DR. WORAPHAT ARTHAYUKTI, ASSISTANT PROFESSOR

#### ABSTRACT

Photographic Studies of low holdup dispersed phase flow in a spray column with a stagnant continuous phase were made. Two sets of photographic experiments were conducted, one to obtain drop sizes, the other to obtain drop velocities using long exposures. The results indicate that the velocity profile of the dispersed phase flow depends on radial position within the column with the drops at the center having the greatest velocity. For all experiments this maximum drop velocity at the center is invariably higher than the estimated free fall velocity of a drop of a Sauter-Mean diameter size representing the entire drop population. Also for all experiments this estimated average drop free fall velocity is greater than the velocity of drops in the vicinity of the wall. A second set of results indicates that the drops tend to move towards the center of the column as they flow in the column. Estimations of dispersed phase dispersion through the calculation of Peclet numbers were made and the results indicate that for Engineering purposes the flow observed in this set of experiments was nearly piston flow. The hydrodynamic behavior of the dispersed phase agrees with the continuous phase recirculation in spray columns reported by others. Finally a few mass transfer models were presented that take into account this continuous phase recirculation.

สารบัญ



หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	๘
รายการตาราง .....	๑
รายการภาพประกอบ .....	๑
รายการสัญลักษณ์ .....	๒
บทที่	
1. บทนำ .....	1
2. โครงการทดลอง .....	3
3. วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	48
4. การแสวงหาจุดกาคณิตศาสตร์สำหรับคอดัมพ์แบบสเปร์ย์ .....	81
5. บทสรุปและข้อ เสนอแนะ .....	99
ภาคผนวก ก. ....	101
บรรณานุกรม .....	107

เลขหมู่ ๐๗  
 ๐๗ 15  
 เลขทะเบียน ๐๐๒๓๐๓  
 วัน,เดือน,ปี ๓๐ พค. ๒๕

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยด $d_e = (d_1 d_2)^{1/3}$ มม. ....	10
2. ความเร็วของหยด .....	26
3. สรุปผลการวัดขนาดของหยดในท่อยาว .....	51
4. เปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางขอ เครื่องกับสมการอื่น .....	53
5. คำนวณความเร็วสุดท้ายของหยดโดยอาศัยขนาดตามการทดลอง .....	71
ตัวกระจาย ง. อัตราการไหล 6.67 ซีซี วินาที	
6. เปรียบเทียบการผสมย้อนกลับของ เฟสหยด ในคอลัมน์แบบสเปรย์ และคอลัมน์แบบฟิลล์แผ่นรูปทรงแปดเหลี่ยม .....	76
7. มุมเอียงระหว่างทิศทางของหยดกับแนวตั้ง .....	77

สถาบันวิจัยบิโกล  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
1. การเปรียบเทียบระหว่างการผสมแบบรีโซเจล (รท.) และ การผสมย้อนกลับของ เฟสหลัก (1ข.)	2
2. เครื่องสกัดของ เทลวแบบสเปรย์ที่ใช้ในการทดลอง	6
3. การตั้งอุปกรณ์ในการถ่ายภาพเพื่อวัดขนาดของหยด	7
4. การตั้งอุปกรณ์ในการถ่ายภาพเพื่อวัดความเร็วของหยด	7
5. ภาพของหยดเมื่อเปิดน้ำกลิ้งด้วยความเร็ว 1/1000 วินาที	8
6. ภาพของหยดเมื่อเปิดน้ำกลิ้งด้วยความเร็ว 1/30 วินาที	9
7. การกระจายของเส้นผ่าศูนย์กลางของหยด	50
8. ความเร็วของหยดในคอลัมน์	58
9. เบอร์เพคเล็ต (Peclet Number) สำหรับเฟสในคอลัมน์ (น้ำไม่ไหล) ตามที่คำนวณจากความเร็วของหยด	72
10. อิทธิพลของขนาดของหยดต่อมุมเอียงของหยด	72
11. มุมเอียงของหยด เป็นองศาตามตารางที่ 7	79
12. ความเร็วของเฟสหยดในคอลัมน์จากผลการถ่ายภาพหยด	80
13. การไหลของเฟสหยดและเฟสหลักในคอลัมน์แบบสเปรย์	84
14. ลักษณะของไฮโดรไดนามิกส์ของเฟสทั้งสองสำหรับคอลัมน์แบบ สเปรย์	85
15. การเขียนลักษณะการไหลของเฟสหลัก เพื่อจัดตุ๊กตาคณิตศาสตร์ตาม รูปที่ 14.6	88
16. การเขียนลักษณะการไหลของเฟสหยด เพื่อจัดเขียนตุ๊กตาคณิตศาสตร์ ตามรูปที่ 14.6	88
17. รูปการไหลแบบหมุนเวียนแบบรีเซอร์คิวเลชัน	92
18. ลักษณะความเข้มข้นของมวลสารในแต่ละเฟสตลอดความยาวของ คอลัมน์สำหรับโมเดลแบบเฟสหลักหมุนเวียน $K_1$ , $N$ , $r$ เป็น พารามิเตอร์	92
19. โมเดลการไหลและโมเดลการถ่ายเทมวลสารของเฟสหลักแบบ ถังกวนเป็นแถว	97

## รายการสัญลักษณ์

$A_i$	พื้นที่ตัดของคอลัมน์ที่เฟส $i$ ไหลผ่าน
$a_b$	พื้นที่ถ่ายเทมวลสารระหว่างหยดกับ เฟสหลัก $\text{cm}^2/\text{cm}^3$
$c_i$	ความเข้มข้นของสารละลายต่อ $\text{cm}^3$
$C_i$	$c_i / (n / (A_1 + A_2)H)$
$d_{3, 2}$	เส้นผ่าศูนย์กลางของเดอรัมินประเภทหนึ่ง
$d_e$	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย
$d_{vs}$	เส้นผ่าศูนย์กลางของเดอรัมินประเภทสอง
$E_i$	สัมประสิทธิ์การผสมย้อนกลับของ เฟส $i$
$G_i$	อัตราการไหลของ เฟส $i$
$H$	ความสูงของคอลัมน์
$K$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารระหว่าง เฟสหลัก
$K_{ob}$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารระหว่าง เฟสหลักกับ เฟสหยด
$m$	สัมประสิทธิ์ของมวลสารระหว่างสอง เฟส
$n$	จำนวนโมลของ เดอ เซอร์
$N$	$\frac{K S^2 H}{u_2 A_2}$ หน่วยการถ่ายเทมวลสารระหว่าง เฟสหลัก
$r$	รัศมีของคอลัมน์
$R$	$\frac{u_2 A_2}{u_3 A_3}$ อัตราส่วนของ เฟสหลักที่ไหลย้อนกลับกันกับ เฟสหลักที่ไหลผ่าน
$Re$	เขอร เรนอลด์ส์
$S$	พื้นที่ถ่ายเทมวลสารจาก เฟสหลักที่ 1 ไปยัง เฟสหลักที่ 2 คือนหน่วยความยาวของ คอลัมน์, $\text{cm}^2/\text{cm}^3$
$t$	เวลา



$u_i$	ความเร็วจริงของเฟส $i$
$U_i$	ความเร็วซูเปอร์ฟิเชี่ยลของเฟส $i$ , cm/s
$V_t$	ความเร็วสุดท้ายของหยด
$V$	ความเร็วจริงของหยด
	ปริมาตรของคอคัมน์
$We$	เบอร์เวเบอร์
$Z$	ความสูงของคอคัมน์
$\phi$	$\frac{A_2}{A_2 + A_3}$ ส่วนของ เฟสหลักที่ไหลย้อนกลับ
$\xi$	$Z/H$
$\theta$	$t \frac{u_3 A_3}{(A_2 + A_3)H}$
$\rho_i$	ความหนาแน่นของเฟส $i$
$\mu_i$	ความหนืดของเฟส $i$
$\gamma$	$\frac{U_2}{U_d} = \frac{u_2 A_2}{G_d}$ สัมประสิทธิ์การหน่วงของหยด
$\phi$	ไฮดรอปของ เฟสหยด
$\delta(\theta)$	สมการเคลตา
$\beta$	$\frac{(A_1 + A_2)H}{u_2 A_2}$ เวลาการไหลกลับของ เฟสหลักในปริมาตรที่เท่ากับปริมาตรของ เฟสหลักในคอคัมน์

บทที่ 1

บทนำ



ตามปรกติการไหลในท่อบางในลักษณะสองเฟส จะเป็นการไหลในทางเดียวกัน และเฟสหนึ่ง เป็นก๊าซและอีกเฟสเป็นสารเหลว สำหรับปฏิบัติการเฉพาะหน่วยที่เรียกกันว่าการสกัดของเหลวด้วยของเหลว คำว่าดิสเปอร์สเฟสหมายถึงสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ซึ่งอยู่ในรูปหยด ท่อยาว หมายถึงท่อยาวธรรมดาซึ่งไม่มีอะไรขวางการไหลของเฟสทั้งสอง คือเฟสที่อยู่ในรูปหยด และเฟสที่เป็นเฟสหลักภายในคอลัมน์

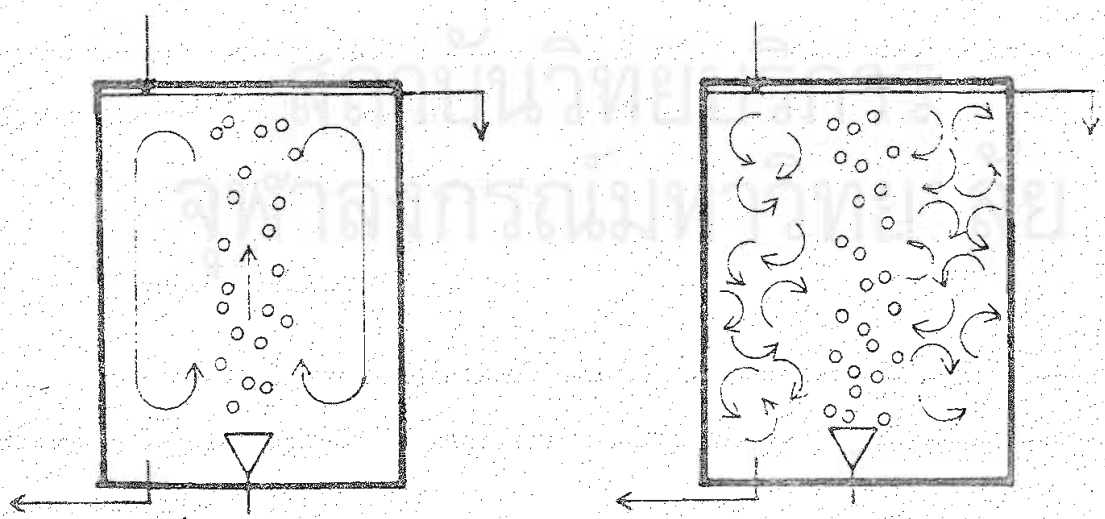
ปฏิบัติการเฉพาะหน่วยซึ่งเรียกว่าการสกัดของเหลวด้วยของเหลวสามารถจำแนกออกได้เป็นเครื่องอีกมากชนิด สำหรับชนิดที่เกี่ยวกับงานวิจัยนี้คือคอลัมน์สกัดของเหลวแบบสเปรย์ คอลัมน์ดังกล่าวประกอบด้วยท่อยาวธรรมดา มีเฟสหลักไหลผ่าน และเฟสที่เป็นหยดไหลผ่านสวนทางกับเฟสหลัก เช่นในระบบน้ำกับธอซิลีน น้ำจะไหลลงและธอซิลีนซึ่งมีความเข้มข้นน้อยกว่าจะไหลขึ้น ในระหว่างการสัมผัสกันระหว่างหยดกับเฟสหลักสามารถทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสาร เช่นหากเราใส่กรดเบนโซอิกผสมเข้าไปในน้ำซึ่งอาจจะ เป็นเฟสหลัก จะพบว่าธอซิลีนซึ่งเป็นหยดจะสามารถดึงกรดเบนโซอิก ดังนั้นคุณสมบัติดังกล่าวทำให้การสกัดของเหลว เป็นปฏิบัติการเฉพาะหน่วยที่มีความสำคัญในวิชาชีพวิศวกรรม เคมี เป็นอย่างมาก

ในการวิเคราะห์การถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบสเปรย์นี้อาศัยตุ๊กตาคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน ล่าสุดนี้ตุ๊กตาคณิตศาสตร์ที่ได้รับความนิยม เป็นอย่างมากได้แก่โมเดลคิวชัน ซึ่งยึดหลักการการไหลย้อนกลับในเฟสหลัก และการไหลแบบทรงกระบอกในดิสเปอร์สเฟส

ปัญหาที่พบกันสำหรับคอลัมน์แบบสเปรย์ได้แก่การที่ข้อมูลสำหรับ เครื่องแบบนี้มีอยู่น้อยประการที่หนึ่ง ซึ่งมีสาเหตุมาจากที่คอลัมน์แบบนี้ประสิทธิภาพไม่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับคอลัมน์อื่น ประการที่สอง มีแนวความคิดเกิดขึ้นว่าโมเดลคิวชันดังที่ใช้นั้นทั่วไปอาจจะไม่สอดคล้องกับความ เป็นจริงในคอลัมน์ และผู้ที่เสนอแนวความคิดดังกล่าวให้ผู้วิจัยฟังคือศาสตราจารย์เทร็ดด์ควีมาโอจี ผู้ซึ่งเพิ่งเกษียณอายุจากภาควิชาวิศวกรรมเคมีมหาวิทยาลัยโคเกียว ประเทศญี่ปุ่น และผู้ซึ่งเสนอคิวชันโมเดลแก่วงการสกัดของเหลวด้วยของเหลวในปี ค.ศ. 1957<sup>(1)</sup> แนวความคิดของศาสตราจารย์มียาโอจีผู้นี้คือโมเดลของเขาซึ่งใช้นั้นอยู่ทั่วไปในการคำนวณคอลัมน์แบบสเปรย์อาจจะ เป็นโมเดลที่ไม่ถูกต้องนัก ทั้งนี้เพราะการค้นคว้าวิจัยของศาสตราจารย์มียาโอจีในหัวข้อคอลัมน์แบบนับเม็ด อันเป็นคอลัมน์แบบเดียวกับคอลัมน์แบบสเปรย์ แต่ในคอลัมน์แบบนับเม็ด เฟสดิสเปอร์ส เป็นฟองอากาศ งานวิจัย

ของศาสตราจารย์บียาโอจีในมัม เมิลคอลลัมน์ทำให้พบว่าการที่หยดของคิส เเปอร์ส เฟสไหลผ่านท่อยาว ทำให้เกิดการผสมในลักษณะรีไซเคิล ซึ่งผิดจากการผสมย้อนกลับดังแสดงไว้ในรูปที่หนึ่ง ข้อนี้เป็นข้อแตกต่างหลักและสาเหตุที่ไม่เคลคิติวชันไม่สามารถอธิบายภาพ 1 ก ได้มีเหตุผลจากการได้มาซึ่งโมเคลคิติวชันดังกล่าว เพราะได้มีการตั้งสมมุติฐานว่าความเข้มข้นในเฟสหลักมีเท่ากันตลอดแผ่นหักของคอลลัมน์ และตามภาพ 1 ก มีเฟสหลักซึ่งขึ้นตรงกลางและลงด้านข้าง ทำให้ความเข้มข้นตลอดแผ่นหักของคอลลัมน์ไม่สามารถเท่ากันได้ แต่อย่างไรก็ตามผู้ออกแบบคอลลัมน์แบบสเปรย์ยังคงยึดรูปแบบของภาพ 1 ข ในการคำนวณความสูงของคอลลัมน์ แต่ข้อสมมุติฐานของศาสตราจารย์บียาโอจีว่าคอลลัมน์แบบสเปรย์มีการผสมแบบรีไซเคิลได้รับการยืนยันอย่างไม่ต้องสงสัยจากบทความหนึ่งที่ตีพิมพ์ใน ค.ศ. 1972<sup>(2)</sup>

เรื่องการผสมแบบรีไซเคิลของ เฟสหลักในคอลลัมน์แบบสเปรย์ทำให้ผู้วิจัยเกิดความคิดว่าถ้าจะเสนอโมเคลคิติวชันแบบใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด จะต้องทราบรายละเอียดในการไหลของคิส เเปอร์ส เฟสในคอลลัมน์แบบสเปรย์ ซึ่งการศึกษาการไหลของคิส เเปอร์ส เฟสในคอลลัมน์แบบสเปรย์ยังไม่เคยทำมาก่อน แต่ได้มีผู้วิจัย<sup>(3)</sup>ตั้งข้อสมมุติฐานว่าการไหลของคิส เเปอร์ส เฟสในคอลลัมน์แบบสเปรย์มีลักษณะเป็นการไหลแบบกลุ่มหยด โดยขนาดของแต่ละหยดเป็นตัวกำหนดความเร็วในการไหลผ่าน ทำให้เกิดขบวนการที่เรียกว่า FORWARD MIXING แต่การศึกษาเฟสที่เป็นหยดเป็นเรื่องที่ยากมาก ทั้งนี้เพราะการวิเคราะห์แต่ละหยด การทราบขนาดของแต่ละหยด เป็นเรื่องลำบากซับซ้อน และยากมากในการปฏิบัติ ผู้วิจัยจึงได้เลือกวิธีถ่ายรูปลในการศึกษาการไหลของคิส เเปอร์ส เฟสในคอลลัมน์แบบสเปรย์ แต่ทั้งนี้เนื่องจากเฟสหลักไม่ได้ไหล จึงได้ตั้งชื่อโครงการวิจัยนี้ว่าการศึกษาการไหลของคิส เเปอร์ส เฟสในท่อยาว



1 ก - การผสมแบบรีไซเคิลใน เฟสหลัก

1 ข - การผสมย้อนกลับใน เฟสหลัก

รูปที่ 1 - การเปรียบเทียบระหว่างการผสมแบบรีไซเคิล (1 ก) และการผสมย้อนกลับของเฟสหลัก (1 ข)

บทที่ 2

โครงการทดลอง

ในการศึกษาการไหลของคิสเปอร์สเฟสในท่อยาวผู้วิจัยได้เลือกวิธีการถ่ายภาพ ในการทดลองชุดที่หนึ่งได้ถ่ายภาพเพื่อได้มาซึ่งขนาดของหยด ในชุดที่สองได้ทำการถ่ายภาพโดยลดความเร็วของหน้าคลื่นให้สามารถเห็นรอยหยดเป็นเส้นยาวเพื่อคำนวณความเร็วของหยด

2.1 ระบบที่ใช้

ระบบที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 และมีรายละเอียดดังนี้

- สารเหลวที่ใช้คือคาร์บอนเตตราคลอไรด์ (CCl<sub>4</sub>) เป็นคิสเปอร์สเฟส และน้ำเป็นเฟสหลัก แต่ตลอดการทดลองนี้น้ำซึ่งเป็นเฟสหลักไม่ได้ไหลผ่านท่อยาว (ตามปรกติแล้วในคอลัมน์แบบสเปรย์ สารทั้งสองจะไหลผ่านสวนทางกัน)

- คอลัมน์ที่ใช้ (คอลัมน์ในที่นี้กับท่อยาวหมายถึงอันเดียวกัน) มีขนาดยาว 133 ซม. และเส้นผ่าศูนย์กลาง 11.2 ซม. ทำด้วยท่อแก้วธรรมดาจำนวน 5 ท่อน มีข้อต่อเป็นพลาสติกแบบแอคริลิก

- อุปกรณ์ประกอบที่ต้องใช้มี สวิตช์อัตราการไหล 0 - 60 ลิตร/นาติ มีขนาดเอ็กกล้องถ่ายรูปขนาด 35 ม.ม. หลอดไฟสำหรับแสงสว่างขนาด 500 W

- ตัวกระจาย สารอินทรีย์จำนวน 4 ตัว ดังรายละเอียดต่อไปนี้: ตัวกระจาย ก มีรูจำนวน 17 รู เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 ม.ม. เนื้อที่ 30.04 ตารางมิลเมตร; ตัวกระจาย ข มีรูจำนวน 9 รู เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 ม.ม. เนื้อที่ 28.27 ตารางมิลเมตร; ตัวกระจาย ค มีรูจำนวน 6 รู เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ม.ม. เนื้อที่ 29.45 ตารางมิลเมตร; ตัวกระจาย ง มีรูจำนวน 4 รู เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 ม.ม.

2.2 แนวปฏิบัติในการทดลอง

- ก่อนจะเริ่มการทดลองให้เติมน้ำในท่อยาว และเติมสารอินทรีย์ในถัง C เสร็จแล้วเปิดบีบ B ให้ได้ระดับในถัง A เท่าที่ต้องการ และจึงเปิดวาล์ว J เพื่อให้หยดสารอินทรีย์ไหลลงในท่อยาว

- เมื่อการไหลของสารอินทรีย์คงที่แล้ว จึงสามารถทำการถ่ายภาพแสดงไว้ในรูปที่ 3 และกล้อง เเปอร์ส เปกส์คืออุปกรณ์ที่ต้อง เติมน้ำให้ เต็ม เพื่อให้สามารถถ่ายภาพหยดโดยไม่ได้รับการรบกวนจากความโค้งของคอลัมน์ ในการถ่ายภาพหยดนี้ใช้ความเร็วของกล้อง 1/1000 วินาที แสดงไว้ในรูปที่ 5 ปัญหาใหญ่ในการวัด เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดคือ ประการที่หนึ่ง ปัญหาการเลือกหยดที่ชัดเจนที่สุด อันหมายถึงหยดที่อยู่ใน เฟลนของแท่ง เหล็กที่อยู่จุดกลางของคอลัมน์ที่เห็นอยู่ในภาพ ประการที่สองจากภาพต่าง ๆ ปรากฏว่าหยดไม่กลม เป็นรูปไข่มากกว่า จึงทำให้ต้องวัด ความสูงและความกว้างของหยด เพื่อกำหนด เส้นผ่าศูนย์กลาง เปรียบ เทียบดังจะได้อธิบายต่อไป

- สำหรับการถ่ายภาพโดยเปิดหน้ากล้องนาน (คือ 1/30 วินาที) เพื่อมองเห็นหยด เป็น เส้นยาว และเพื่อสามารถคำนวณความเร็วและทิศทางของแต่ละหยด ได้จัดวางระบบไฟกับ กล้องถ่ายรูปดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 การถ่ายภาพดังกล่าวทำให้ เห็นหยดเป็น เส้นยาว ทำให้คำนวณ ความเร็วของหยดได้โดยวัดระยะทาง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 แสงไฟจะผ่านช่องขนาด 0.5 ซม. และจะส่องแสงเป็นแนวผ่านส่วนกลางของคอลัมน์ ทั้งนี้เพื่อให้หยดที่ปรากฏบนฟิล์ม เป็นหยดที่อยู่ใน ช่องแสงดังกล่าว ตลอดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ ทำให้สามารถแบ่ง เส้นผ่าศูนย์กลาง เป็นช่อง ๆ และศึกษาความเร็วของหยดตลอดตั้งแต่ริมสุดของท่อยาวจนถึงจุดศูนย์กลาง เมื่อได้ฟิล์มแล้วสามารถ ศึกษาขนาดต่าง ๆ โดยจัดทำสไลด์ และฉายไปบนจอเพื่อขยายขนาดต่าง ๆ ไป 20 กว่าเท่า รูปที่ 6 แสดงถึงภาพถ่ายที่ได้มาสองภาพ

2.3 พารามิเตอร์ที่เปลี่ยน ในการทดลอง

ในการทดลองถ่ายภาพโดยสองวิธีดังได้อธิบายมาแล้ว ได้เปลี่ยนพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- อัตราการไหลของสารอินทรีย์ได้คือ 3.37 ซีซี/วินาที, 5.03 ซีซี/วินาที, 6.67 ซีซี/วินาที 8.68 ซีซี/วินาที, แต่เพื่อหาความเร็วของหยดไม่สามารถถ่ายภาพได้สำหรับอัตราการไหล 3.37 ซีซี/วินาที
- ตัวกระจายได้เปลี่ยนเป็น ก ข ค ง ตามที่อธิบายไว้ในข้อ 2.1

2.4 แนวปฏิบัติ ในการวิเคราะห์ภาพที่ได้มาจากการทดลอง

ในการวัดขนาดของหยด ซึ่งบ่อยครั้งพบว่า เป็นหยดที่ไม่กลม จำเป็นต้องวัด  $d_1$  กับ  $d_2$  ซึ่งหมายถึง เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดแนวนอน และ เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดแนวตั้ง เสร็จแล้วจะได้เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยดังนี้

$$d_e = (d_1 d_2^2)^{1/3} \tag{2.1}$$

ซึ่งสามารถคำนวณได้จากปริมาตรของเอลิซออีดเมื่อเท่ากับปริมาตรของหยดที่กลมพอดี ในการคำนวณ เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดสามารถเขียนผลวิเคราะห์หลายแบบดังนี้

$$d_{3,2} = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางขอ เคอร์มันประเภทหนึ่ง} = \frac{\sum_i n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^2}$$

$$d_{vs} = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางขอ เคอร์มันประเภทสอง} = \frac{\sum_i n_i d_i^3 / e_i}{\sum_i n_i d_i^2 / e_i}$$

$$d_{4,3} = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางมี เซ็ก (MISEK)} = \frac{\sum_i n_i d_i^4}{\sum_i n_i d_i^3}$$

$$d_{op} = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางที่พบมากที่สุดในกลุ่มหยดกลุ่มหนึ่ง}$$



แต่ในการคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางในงานนี้ ได้บันทึกเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น  $d_e$  ซึ่งได้จากสมการที่ 1 ส่วน  $d_1$  กับ  $d_2$  วัดจากภาพถ่ายของฟิล์มโดยยึดขนาดของแท่งเหล็กที่อยู่กลางคอดัมน์เป็นหลัก สำหรับการถ่ายภาพหยดดังกล่าวได้จัดเปลี่ยนตัวกระจายจำนวน 4 ตัว และได้เปลี่ยนอัตราการไหลของสารอินทรีย์รวมทั้งเป็นสี่อัตรา ทำให้ได้สภาวะการเดินเครื่องจำนวน 16 สภาวะ และจำนวนหยดที่ได้นำมาวัดสำหรับแต่ละสภาวะมีตั้งแต่ 113 หยด จนถึง 207 หยด สำหรับการทดลองแต่ละชุดได้จัดทำกราฟการกระจายของเส้นผ่าศูนย์กลางของหยด

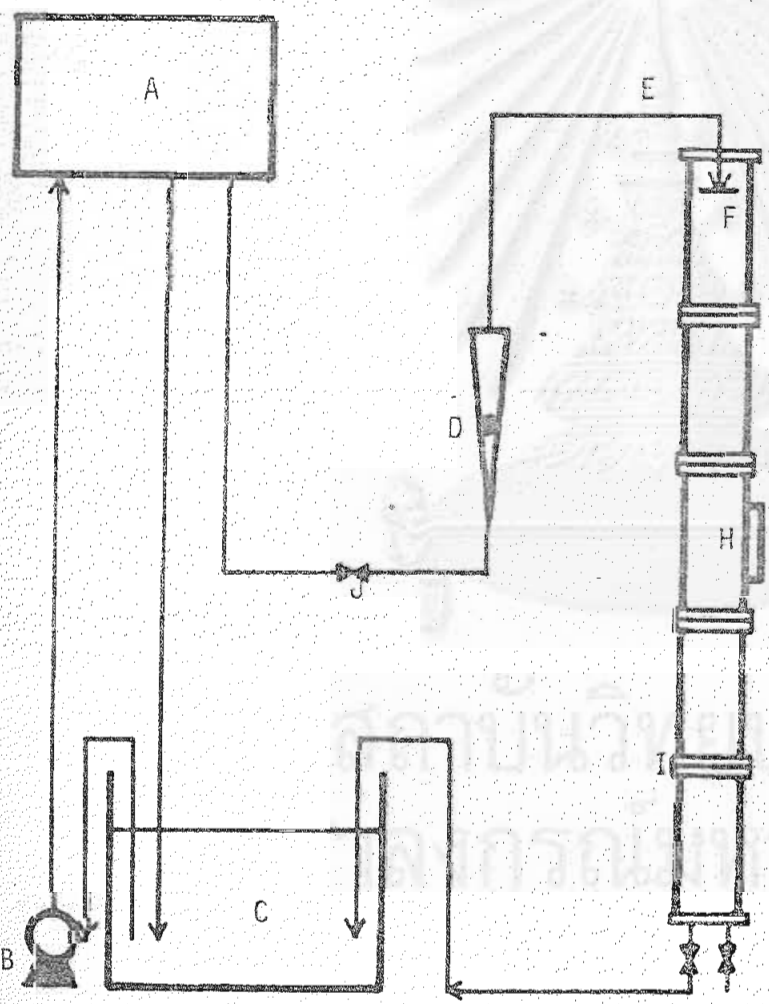
สำหรับการวิเคราะห์ภาพเพื่อให้ได้มาซึ่งความเร็วในการลงของหยด จะเริ่มจากภาพในรูป 6 ในรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเราสามารถวิเคราะห์ทางของหยดในช่วงเวลา  $1/30$  วินาที การที่สามารถมองเห็นหยด เป็นสิ่งประกันว่าหยดดังกล่าวอยู่ในแสงสว่าง อันหมายความว่าหยดที่เห็นอยู่ในเฟรมที่ตัดผ่านคอดัมน์ตรงกลางในแนวตั้ง จึงสามารถหาความเร็วของหยดตลอดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอดัมน์ ประการที่สอง รูป 6 แสดงให้เห็นว่าเกือบทุกหยดทำมุมกับแนวตั้ง ย้อนีเห็นว่าจะอาจจะเป็นข้อมูลที่น่าสนใจอยู่บ้าง จึงได้เลือกบันทึกมุมเหล่านี้เพื่อทำการศึกษาค่าต่อไป

สำหรับการทดลองเพื่อวัดความเร็วของหยด ได้เลือกใช้ตัวกระจายจำนวน 4 ตัว แต่ใช้อัตราการไหลของสารอินทรีย์เพียง 3 ค่า เพราะหากอัตราการไหลค่าไปไม่สามารถได้ภาพที่ดี ดังนั้นมีสภาวะการเดินเครื่องจำนวนเพียง 12 สภาวะ และมีจำนวนหยดคือชุดตั้งแต่ 154 ถึง 305 หยด ซึ่งได้บันทึกตัวเลขเหล่านี้ลงในตารางที่ 2

## 2.5 สรุปโครงการทดลอง

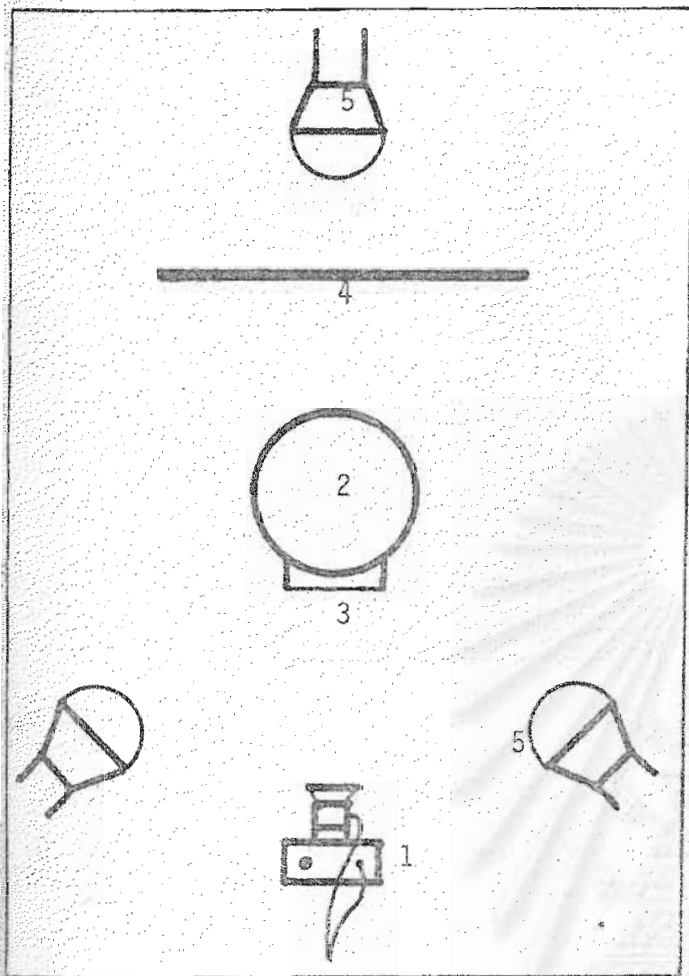
ตาราง 1 แสดงถึงข้อมูลการถ่ายภาพหยดสำหรับการทำงานของคอดัมน์จำนวน 16 สภาวะ

โดยได้เลือกเขียนผลการวิเคราะห์ที่เป็น  $d_e$  (สมการที่ 1) ในตาราง 2 ได้แสดงข้อมูลการคำนวณความเร็วของหยดตามตำแหน่งของหยดในคอสิมน์ พร้อมทั้งทิศทางของหยด สำหรับข้อมูลการคำนวณความเร็วของหยดในคอสิมน์ พร้อมทั้งทิศทางของหยด สำหรับตำแหน่งของหยดนั้นวัดจากจุดศูนย์กลางของคอสิมน์ออกไป ส่วนทิศทางของหยดสามารถวัดได้จากภาพและมุมจากแนวตั้ง



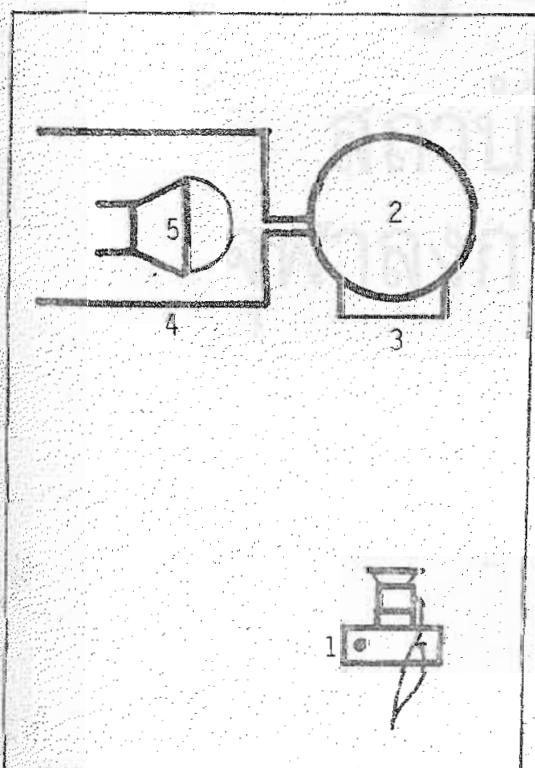
รูปที่ 2 - เครื่องสีกัดของเหลวแบบสเปรย์ที่ใช้ในการทดลอง

- A - ถังเก็บสารอินทรีย์ มีหน้าที่รักษาอัตราการไหลให้คงที่
- B - ปั๊ม
- C - ถังเก็บสารเหลว
- D - ตัววัดและควบคุมอัตราการไหล
- E - ท่อสารอินทรีย์เข้า
- F - ตัวกระจายสารอินทรีย์
- G - ช่องถ่ายภาพ
- H - กล้อง เปรอร์สแพกส์
- I - ข้อต่อพลาสติก
- J - วาล์ว



รูปที่ 3 - การตั้งอุปกรณ์ในการถ่ายภาพ  
เพื่อวัดขนาดของหยด

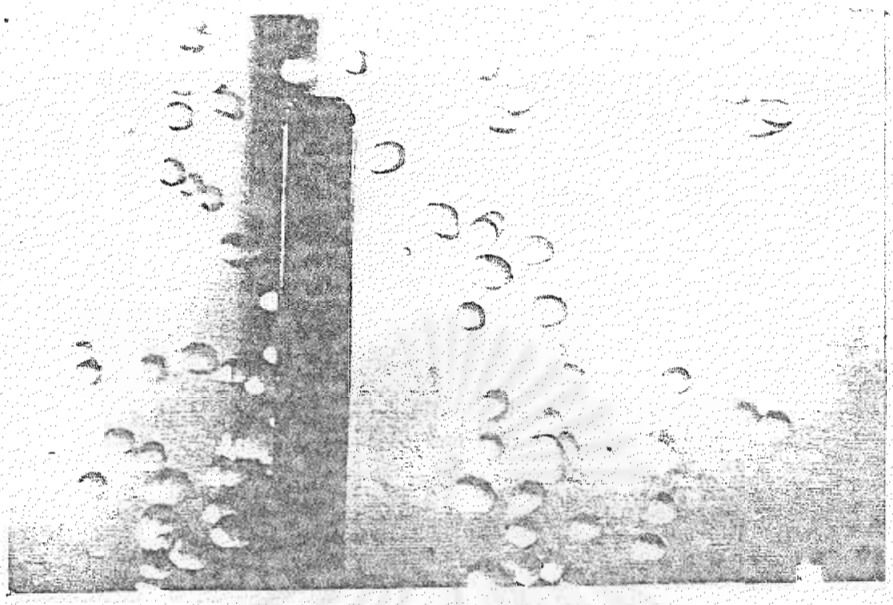
- 1 - กล้องถ่ายภาพพร้อม เลนส์โคลส์อัป
- 2 - คอลัมน์
- 3 - กล้อง เฮอร์สแพกส์
- 4 - แผ่นแก้วชา
- 5 - หลอดไฟ 500 We



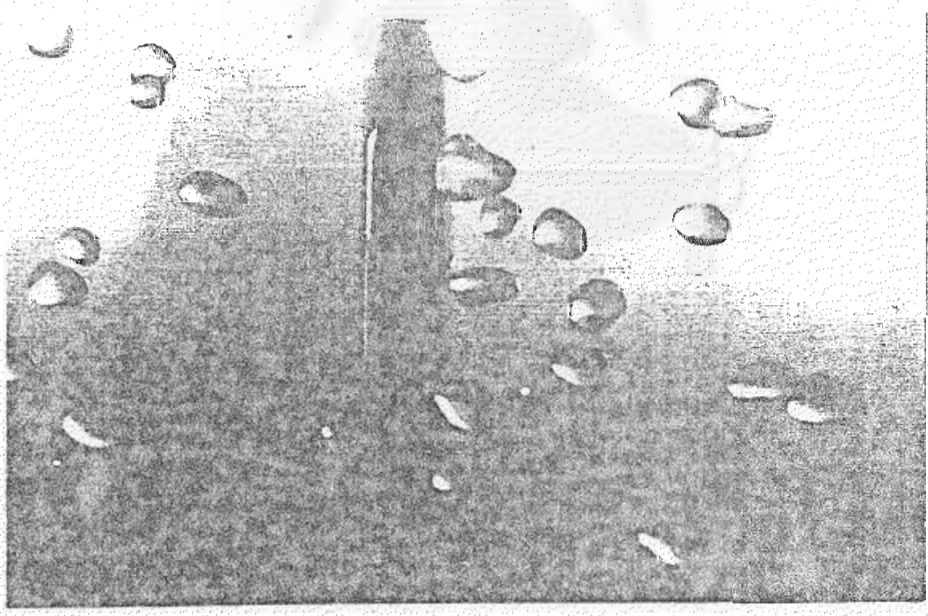
รูปที่ 4 - การตั้งอุปกรณ์ในการถ่ายภาพเพื่อ  
วัดความเร็วของหยด

- 1 - กล้องถ่ายภาพพร้อม เลนส์โคลส์อัป
- 2 - คอลัมน์
- 3 - กล้อง เฮอร์สแพกส์
- 4 - อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดช่องแสงขนาด  
0.5 ซม.
- 5 - หลอดไฟ 500 We



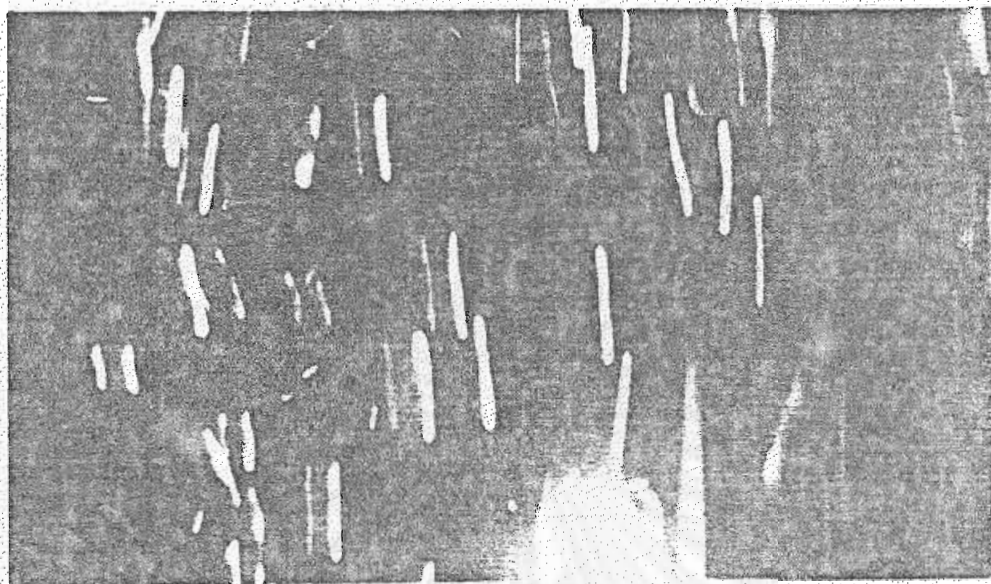


5 ก. ตัวกระจาย ก. . อัตราการไหล 6.67 ซีซี/วินาที

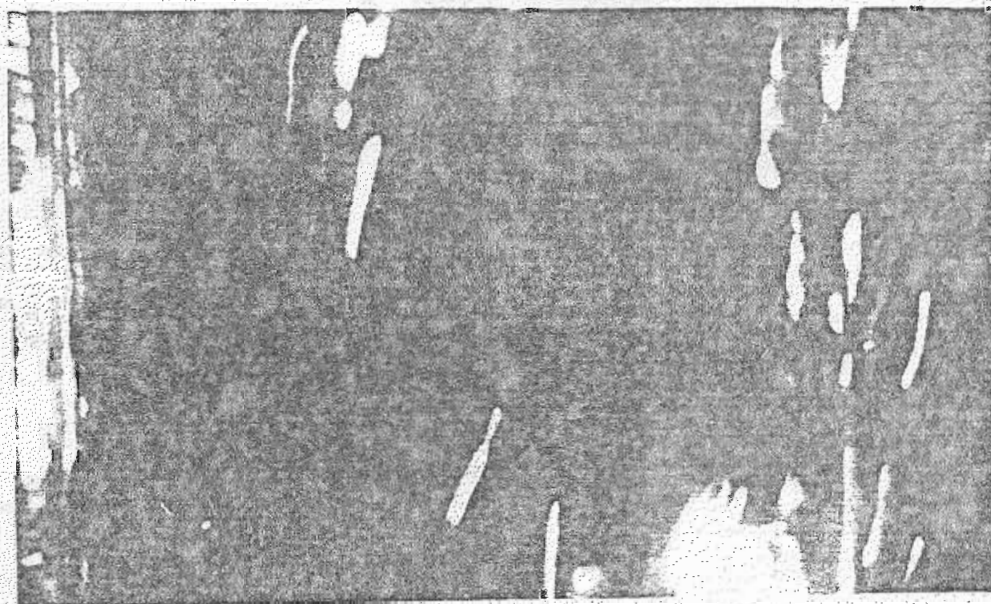


5 ข. ตัวกระจาย ง. . อัตราการไหล 5.03 ซีซี/วินาที

รูปที่ 5 ภาพของหยดเมื่อเปิดน้ำกลองด้วยความเร็ว 1/1000 วินาที



6 ก. ตัวกระจาย ก. , อัตราการไหล 6.67 ซีซี/วินาที



6 ข. ตัวกระจาย ข. , อัตราการไหล 5.03 ซีซี/วินาที

รูปที่ 6 ภาพของหยดเมื่อเปิดหน้ากล้องด้วยความเร็ว 1/30 วินาที

ตารางที่ 1 : เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยด,  $d_e = (d_1 d_2^2)^{1/3}$  ม.ม.

- |                          |                          |                           |                           |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| ตัวกระจาย ก              | ตัวกระจาย ข              | ตัวกระจาย ค               | ตัวกระจาย ง               |
| 1. Gd = 8.68 ซีซี/วินาที | 5. Gd = 8.68 ซีซี/วินาที | 9. Gd = 8.68 ซีซี/วินาที  | 13. Gd = 8.68 ซีซี/วินาที |
| 2. Gd = 6.67 ซีซี/วินาที | 6. Gd = 6.67 ซีซี/วินาที | 10. Gd = 6.67 ซีซี/วินาที | 14. Gd = 6.67 ซีซี/วินาที |
| 3. Gd = 5.03 ซีซี/วินาที | 7. Gd = 5.03 ซีซี/วินาที | 11. Gd = 5.03 ซีซี/วินาที | 15. Gd = 5.03 ซีซี/วินาที |
| 4. Gd = 3.37 ซีซี/วินาที | 8. Gd = 3.37 ซีซี/วินาที | 12. Gd = 3.37 ซีซี/วินาที | 16. Gd = 3.37 ซีซี/วินาที |

d <sub>e</sub> ม.ม.																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	2.19	3.00	2.69	3.53	2.76	2.78	2.62	4.48	3.95	3.81	3.84	3.42	3.50	4.70	3.32	5.33
2	2.07	3.23	2.70	3.29	2.88	2.68	2.67	3.18	2.86	3.01	3.98	3.74	4.15	3.64	4.59	4.31
3	2.07	1.92	2.97	3.86	3.08	3.44	2.80	3.47	4.50	3.52	3.27	3.89	4.24	4.43	4.50	4.37
4	2.07	2.35	2.79	3.54	3.18	3.01	3.79	4.18	4.07	3.24	4.63	4.32	4.57	3.58	4.50	3.43
5	2.48	2.61	2.43	3.68	3.38	2.70	3.30	4.35	4.03	3.44	3.79	3.69	3.23	4.71	3.71	3.96
6	2.22	2.35	3.11	3.53	3.50	2.70	2.53	3.17	3.30	4.46	3.16	3.65	4.17	3.69	3.98	5.67
7	2.04	2.75	3.26	3.34	2.92	2.59	3.30	4.19	3.12	3.94	4.89	3.10	3.68	5.55	4.75	4.44

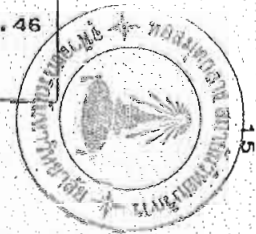
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
8	2.56	2.18	3.23	3.59	3.48	2.84	3.93	4.69	4.43	3.93	3.14	3.97	4.86	4.23	4.16	5.01
9	2.56	2.09	3.31	3.71	2.60	2.69	3.27	3.61	3.54	3.19	2.62	4.02	4.61	4.37	3.89	5.00
10	2.03	2.21	3.06	3.49	3.37	2.96	2.71	3.34	4.51	2.98	3.31	4.18	3.41	4.08	4.78	4.87
11	2.07	3.32	2.71	3.73	2.79	2.55	3.19	3.29	3.06	3.07	3.78	3.77	4.27	3.80	4.28	4.31
12	2.38	2.86	2.98	3.78	3.10	2.61	3.07	3.70	3.54	3.65	5.21	3.22	3.19	5.12	4.77	5.68
13	2.56	3.26	2.80	3.99	2.79	2.69	2.90	4.21	3.28	3.62	2.81	4.11	4.26	4.27	4.63	5.23
14	2.40	3.14	2.66	3.48	2.73	2.45	3.17	3.66	3.41	3.12	3.37	4.11	5.32	3.84	4.17	5.15
15	2.52	2.32	3.71	3.38	3.44	3.12	2.88	4.03	4.48	2.93	4.56	3.32	4.71	5.31	4.57	4.16
16	2.24	2.65	3.11	3.45	3.19	3.98	3.61	3.02	3.99	4.06	4.61	3.44	5.29	4.50	4.07	4.53
17	2.18	2.73	2.96	3.52	3.29	3.89	3.23	3.86	2.92	3.25	3.19	2.68	4.74	4.48	4.51	3.88
18	2.40	2.38	2.63	3.95	2.61	2.82	3.63	4.46	3.11	4.50	3.31	3.20	3.79	3.52	4.14	3.54
19	3.01	2.83	3.06	3.40	2.40	3.43	3.32	4.63	3.05	4.32	4.21	2.95	4.67	5.42	3.70	5.13
20	2.03	2.79	3.39	3.50	2.48	2.62	3.26	4.02	3.20	4.12	2.90	2.73	4.44	3.69	4.80	4.72
21	2.54	2.46	2.93	3.64	2.65	2.98	2.74	4.52	3.30	3.89	3.52	2.64	3.99	4.13	3.90	5.10

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
22	2.28	2.58	2.35	3.10	2.60	3.02	3.31	3.82	3.35	3.25	3.05	3.71	4.09	3.84	4.47	4.51
23	2.92	2.81	2.46	3.61	3.09	3.26	3.07	4.46	3.19	3.50	4.76	3.67	5.43	4.31	4.40	4.19
24	2.31	2.41	2.89	3.37	2.49	2.92	3.63	4.09	3.90	3.40	3.79	3.56	4.35	4.32	4.14	5.89
25	2.29	3.33	2.73	3.05	2.49	2.58	3.50	4.24	2.79	4.56	3.09	3.08	3.62	4.28	4.61	4.87
26	2.29	2.65	3.19	3.58	3.36	2.39	2.94	3.29	3.11	3.30	3.23	3.33	3.76	5.43	4.20	4.03
27	2.42	2.52	2.79	2.84	2.83	3.20	2.65	2.78	3.16	3.48	3.57	4.45	4.70	5.24	5.94	3.87
28	2.90	2.45	2.63	3.93	2.56	3.55	2.96	3.36	3.76	3.20	2.77	4.82	4.99	3.93	4.06	5.05
29	2.89	2.72	3.30	3.52	3.54	3.13	3.21	3.51	4.34	3.28	3.65	4.01	3.83	4.12	3.82	3.92
30	2.31	2.92	2.50	3.60	2.82	3.27	3.03	3.77	3.39	3.69	3.84	3.93	3.62	4.10	3.73	4.63
31	2.31	2.41	2.61	3.60	3.00	3.66	3.16	4.26	3.56	3.13	3.24	3.74	4.15	4.50	5.63	4.42
32	2.47	2.53	2.27	2.75	2.69	2.87	3.45	4.03	3.33	3.15	3.83	3.37	4.93	4.40	4.30	4.65
33	2.33	2.38	2.63	3.08	2.39	2.94	3.55	3.53	3.20	4.70	3.26	3.45	4.21	4.16	5.11	4.04
34	2.55	2.91	3.09	3.14	2.39	2.89	3.83	3.71	3.35	3.14	4.09	3.23	4.86	3.81	4.96	4.21
35	2.62	3.11	2.98	3.32	3.21	3.10	3.70	4.65	3.02	2.88	2.98	2.77	5.73	4.78	5.90	4.51

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
36	3.29	2.13	2.13	2.88	2.47	2.59	3.52	4.02	3.46	3.51	3.54	2.73	4.99	3.91	3.93	4.50
37	2.40	2.19	3.16	3.19	2.59	2.78	3.19	3.92	3.52	3.13	3.78	3.72	4.33	3.59	4.46	3.29
38	2.28	2.49	3.10	3.07	2.98	2.31	2.82	3.93	3.65	3.12	3.40	3.36	4.94	3.72	4.33	3.64
39	2.15	2.22	3.03	2.99	2.96	2.85	3.50	3.48	3.07	2.96	3.49	3.59	4.84	3.49	4.56	4.13
40	2.30	2.15	2.76	3.16	2.86	2.44	2.99	4.03	3.83	3.20	3.32	4.05	3.83	3.96	4.81	5.14
41	2.29	2.22	3.37	2.97	3.46	2.51	3.41	3.93	3.36	3.92	3.86	4.25	5.54	4.61	4.06	4.60
42	2.70	2.57	2.98	2.90	2.96	2.89	3.45	3.79	2.98	3.16	3.54	3.86	3.87	3.26	4.12	4.43
43	2.62	2.65	2.99	2.72	2.93	2.83	3.74	4.29	4.05	3.66	3.10	4.53	4.91	4.66	4.92	4.14
44	2.10	2.56	2.76	2.82	2.41	2.69	3.25	4.53	3.18	3.05	3.42	4.55	4.97	4.53	4.00	5.61
45	2.31	3.06	2.98	3.15	2.94	2.75	4.50	3.65	3.91	3.80	2.88	4.30	4.81	3.90	4.44	4.16
46	2.31	3.04	3.04	3.03	3.04	2.69	3.21	2.71	3.89	3.23	4.37	4.15	4.57	3.98	3.25	4.75
47	2.12	2.44	2.56	2.98	2.69	2.89	3.52	3.38	2.82	3.14	3.81	4.22	4.35	3.47	3.95	4.25
48	2.81	2.79	2.82	3.11	2.32	2.89	3.99	4.14	4.08	3.14	2.75	4.35	4.06	3.65	4.62	4.10
49	1.97	2.60	3.23	2.73	3.09	3.00	3.60	4.18	4.69	3.35	2.07	3.88	3.28	4.20	4.16	4.23

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
50	2.15	2.26	2.98	3.60	3.14	2.98	3.43	3.99	3.35	3.16	2.91	3.31	3.42	3.99	4.70	4.24
51	1.97	2.26	2.35	3.52	2.75	3.25	2.87	4.04	3.62	3.93	2.96	3.31	4.90	3.25	3.64	4.67
52	2.00	2.73	3.09	3.13	2.88	2.55	2.62	3.67	3.58	3.54	3.56	4.18	4.72	3.91	3.56	4.32
53	2.40	3.30	2.98	3.47	2.68	3.03	3.65	4.51	3.89	3.37	3.77	3.98	3.46	3.51	4.24	3.87
54	2.38	3.06	2.77	3.47	2.82	2.92	3.08	3.71	3.33	3.37	3.30	3.67	3.71	4.37	5.14	4.27
55	1.76	2.93	2.76	3.11	2.81	3.05	3.91	4.10	3.88	3.37	3.71	4.18	3.79	5.37	3.53	3.72
56	2.93	3.19	3.50	3.60	3.43	2.84	2.80	4.07	3.50	3.56	3.61	4.05	3.72	4.12	3.56	4.60
57	2.89	2.65	3.13	3.23	3.56	3.36	2.84	3.21	3.96	4.12	3.54	3.72	3.76	4.33	4.89	4.09
58	2.48	2.53	2.49	3.47	3.22	2.97	3.08	3.58	3.75	4.20	3.86	3.65	4.70	3.89	4.14	4.26
59	1.89	3.09	2.94	2.97	3.43	2.47	3.16	4.22	2.92	3.66	4.07		4.95	4.22	3.56	3.82
60	2.61	2.71	2.89	3.38	3.17	2.54	3.14	3.75	3.06	3.06	2.70		3.83	3.46	4.62	4.15
61	2.75	2.85	3.02	3.47	2.64	2.91	2.78	3.92	4.00	3.98	3.10		4.10	3.71	4.33	4.07
62	3.48	2.60	3.05	3.34	2.52	3.33	3.20	3.75	2.92	3.52	3.03		3.96	4.12	4.16	4.81
63	3.20	2.38	3.06	3.27	2.50	3.15	2.78	3.47	3.33	3.20	3.17		4.64	4.23	4.50	5.16

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
64	2.48	2.18	2.58	3.10	3.31	3.31	2.78	4.46	3.22	3.75	3.67		4.74	4.64	4.11	3.86
65	2.61	2.21	2.86	3.60	2.96	3.13	2.47	3.06	3.84	3.10	3.40		4.08	3.99	3.88	4.29
66	2.77	2.34	2.46	3.51	2.84	3.84	4.23	4.13	4.66	4.40	3.39		5.44	4.51	4.91	4.21
67	2.65	2.41	2.94	3.30	2.53	3.00	3.53	3.25	3.49	3.46	3.12		5.20	3.23	3.71	4.10
68	2.96	2.59	2.85	3.48	2.84	2.94	3.41	3.08	3.42	4.24	3.42		4.78	4.10	4.18	4.03
69	2.98	2.86	2.75	2.93	2.46	2.69	3.65	3.72	4.26	4.08	3.53		5.13	4.95	3.99	4.48
70	2.62	3.06	2.73	3.27	2.75	2.64	2.95	3.81	3.44	3.28	2.90		4.21	4.85	4.06	4.21
71	2.72	2.62	2.97	3.05	3.14	2.31	3.42	3.85	4.12	3.09	3.25		3.90	3.83	3.86	3.80
72	2.52	2.89	3.16	3.15	2.57	2.98	3.08	3.52	3.33	3.60	3.94		4.11	4.68	3.58	4.43
73	2.43	3.01	3.47	2.91	2.53	2.80	3.69	3.06	4.10	3.42	3.27		4.22	3.74	4.72	4.83
74	2.01	2.72	3.67	3.05	2.82	3.23	3.21	3.17	3.73	3.35	3.21		5.52	4.57	4.76	3.56
75	2.03	3.32	3.27	2.95	2.75	2.38	3.12	3.38	3.82	3.82	3.20		4.87	3.43	3.99	3.37
76	2.22	2.85	3.15	3.41	2.46	2.88	2.93	2.82	3.16	3.18	3.71		3.49	3.71	3.84	5.80
77	3.41	2.13	2.85	2.95	2.66	2.75	3.25	4.03	3.39	2.99	3.28		3.87	3.89	5.00	4.46





	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
78	1.91	2.44	2.35	3.17	2.60	2.43	3.04	4.63	3.34	3.07	4.11		4.43	3.92	4.62	5.22
79	2.49	2.29	3.02	2.98	2.96	2.41	2.71	4.01	3.33	3.18	3.69	3.89	4.60	4.01	3.96	4.26
80	2.48	2.73	3.29	3.10	2.40	2.95	2.59	3.95	3.37	4.53	3.19	4.23	3.56	4.59	4.33	3.68
81	1.89	2.65	3.39	3.19	2.87	3.05	3.79	4.19	3.13	3.39	3.95	5.06	3.32	4.76	3.82	5.36
82	2.88	3.56	2.44	3.37	2.98	2.70	3.18	4.10	3.53	3.91	4.36	4.35	4.59	4.86	4.21	4.29
83	2.48	3.39	2.47	3.37	3.30	2.99	3.04	3.21	3.34	3.32	2.95	3.56	4.75	3.69	4.27	4.68
84	2.25	2.80	2.86	3.21	2.71	3.07	2.75	3.30	3.67	3.45	4.18	3.87	5.00	4.07	3.69	4.43
85	2.53	3.19	2.88	3.63	2.71	3.17	2.66	3.36	3.25	4.90	4.36	3.89	3.33	4.06	4.06	4.32
86	2.62	3.06	2.38	2.97	3.07	3.06	2.62	3.96	3.35	2.95	2.71	3.62	4.19	4.04	3.75	5.74
87	2.15	2.93	2.32	3.17	2.86	2.61	3.00	3.86	3.34	4.03	3.83	3.70	3.43	4.46	5.45	4.32
88	2.58	2.73	2.24	3.24	2.99	3.11	2.79	3.60	3.39	3.73	4.21	3.61	3.49	4.17	4.43	4.05
89	2.19	2.67	2.99	3.62	2.93	3.06	3.17	4.18	4.03	3.76	3.45	4.06	3.56	4.39	4.20	3.89
90	2.38	2.93	2.40	3.30	3.07	3.06	2.64	3.87	3.48	4.36	3.42	3.40	3.75	4.16	4.56	4.51
91	2.19	2.66	2.52	3.22	2.53	3.67	3.43	3.40	4.88	4.69	3.26	4.55	4.24	4.31	5.37	3.94

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
92	1.94	2.26	2.96	3.55	2.44	2.71	2.85	3.73	4.59	3.40	3.14	3.93	5.60	3.85	3.94	3.27
93	2.44	2.46	2.44	3.74	3.09	2.66	2.64	3.98	4.19	3.78	3.30	3.65	5.03	5.05	5.12	4.25
94	2.16	2.86	2.78	3.22	2.69	2.77	3.05	3.58	3.25	3.08	4.09	3.74	4.82	3.98	3.50	3.75
95	2.35	2.38	2.49	3.46	2.89	3.29	3.67	3.09	3.99	3.20	4.18	3.67	4.07	3.54	4.48	4.03
96	2.99	2.52	2.49	3.29	3.36	2.77	2.85	2.67	3.65	3.00	3.62	3.79	3.65	4.21	4.51	4.82
97	2.44	2.66	2.63	3.55	2.79	2.92	3.78	3.53	3.46	3.20	3.09	4.13	3.34	4.64	4.04	4.66
98	3.15	2.93	2.66	3.76	3.09	3.51	2.82	3.37	3.10	3.28	2.83	4.25	3.56	4.13	4.12	4.02
99	2.95	2.50	2.92	3.40	2.79	3.52	3.28	4.44	3.46	3.72	3.10	3.67	4.54	3.97	4.28	4.87
100	2.39	2.99	3.28	3.29	2.74	2.76	3.40	3.13	3.22	3.13	2.77	3.98	5.10	4.13	4.09	3.36
101	2.13	2.38	2.97	3.68	3.19	2.76	3.06	3.41	4.19	3.18	3.75	4.29	4.07	5.01	3.98	4.31
102	2.10	2.28	2.81	3.32	3.22	3.08	2.85	4.93	4.85	3.30	3.85	4.07	4.14	4.30	3.80	4.68
103	2.47	2.63	2.91	3.15	2.60	4.04	2.85	4.10	3.52	5.04	3.49	5.22	3.86	4.74	4.15	4.71
104	2.25	2.86	3.06	3.06	2.62	2.80	3.43	3.80	3.46	4.30	2.79	4.13	4.40	4.28	4.10	4.59
105	2.61	2.44	3.22	2.96	3.17	3.92	4.24	4.30	3.15	4.01	3.40	3.85	3.76	3.56	4.53	5.21

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
106	2.53	2.52	2.78	3.47	3.25	3.11	4.15	4.08	3.83	3.89	4.45	4.35	4.99	4.31	3.59	5.08
107	2.78	2.46	2.38	2.86	3.46	3.01	4.29	4.39	3.22	3.83	2.79	3.98	4.86	4.80	4.15	4.56
108	2.73	3.10	2.93	3.38	3.01	2.76	3.10	3.67	3.56	3.72	3.21	5.20	5.54	3.65	4.37	4.21
109	2.38	2.91	3.56	3.20	3.36	3.99	3.72	4.29	3.25	3.51	2.48	4.18	4.14	5.39	4.65	3.36
110	3.05	2.65	2.94	3.42	3.01	3.75	2.80	4.73	4.04	3.75	3.36	4.07	4.05	4.25	3.98	4.22
111	2.54	2.72	3.14	3.43	2.67	2.99	2.98	4.41	3.82	4.07	2.85	3.37	4.68	3.74	4.79	4.40
112	2.95	2.68	2.95	3.55	2.67	3.61	3.62	3.46	4.04	4.19	4.17	4.16	5.76	4.68	5.56	5.49
113	2.54	3.51	2.80	3.19	3.58	2.72	3.67	3.24	3.06	3.49	3.23	3.61	4.79	3.80	5.03	3.96
114	2.04	2.61	2.91	3.19	2.96		3.53	3.25	3.30	4.30	3.79	4.20	4.95	4.94	4.32	4.62
115	2.54	2.38	3.32	3.64	2.81		3.50	3.27	3.49	4.04	3.18	5.07	3.88	4.51	5.14	3.77
116	2.01	2.44	2.85	3.81	3.07		2.74	4.30	3.88	3.44	3.00	4.59	4.08	4.23	5.15	3.93
117	2.54	2.18	2.93	3.69	3.11		3.16	3.08	3.48	3.74	3.60	4.55	4.47	3.75	4.30	4.29
118	3.26	2.46	2.86	3.64	3.06		3.28	2.92	3.06	3.97	3.90	4.00	4.04	3.82	4.90	
119	1.97	2.44	2.66	3.71	2.81		3.11	3.92	4.58	3.63	3.01	4.33	4.48	3.89	4.47	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
120	2.32	2.66	3.01	3.36	2.26		3.32	4.46	3.23	3.98	3.14	4.13	4.17	3.35	3.80	
121	3.02	2.96	3.06	3.34	2.96		3.80	2.77	4.21	4.66	3.18	3.57	4.93	4.82	4.49	
122	2.74	2.66	3.16	3.12	3.50		3.05	3.35	3.20	4.73	4.79	3.31	4.55	4.85	4.60	
123	2.35	2.99	2.96	3.37	2.87		3.43	3.77	3.53	4.74	3.18	4.21	4.60	3.42	4.92	
124	2.45	3.39	3.26	3.53	2.87		3.21	4.84	3.47	3.86	3.20	3.98	4.32	4.51	4.27	
125	2.75	2.47		3.32	2.49		3.65		4.67	3.73	3.76	4.48	5.16	3.51	4.64	
126	2.22	3.23		3.45	2.98		3.64		3.81	4.03	3.65	4.00	4.61	3.80	4.91	
127	2.00	3.23		3.48	2.79		3.07		3.23	4.20	2.76	3.34	4.60	4.01	4.31	
128	2.61	2.53		3.17	3.03		3.69		3.24	5.03	4.30	4.07	4.66	4.13	3.92	
129	2.20	3.04		3.28	2.66		3.40		3.41	3.28	3.40	3.93	5.25	4.45	4.23	
130	2.54	3.39		3.23	2.77		2.73		3.50	3.47	3.61	4.13	3.77	4.28	4.55	
131	2.84	2.58		3.40	2.90		3.31		3.20	3.68	4.87	4.09	4.70	3.72	4.78	
132	2.36	2.38		3.60	2.97		3.36		3.81	3.37	3.98	4.91	4.92	4.51	4.60	
133	2.23	2.41		3.40	2.76		3.53		3.03	3.08	3.25	4.21	5.19	4.78	5.22	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
134	2.20	2.72		3.43	3.46		3.51		3.31	3.82	3.93	4.03	5.09	4.83	5.59	
135	2.70	2.64		3.71	2.65		4.02		3.44	3.19	5.06	3.34	4.01	4.45	4.56	
136		2.66		3.43	3.07		3.65		3.14	3.04	4.36	3.22	5.61	5.85	4.59	
137		2.73		3.45	2.60		2.61		3.87	3.64	4.22	4.51	3.43	4.74	4.31	
138		2.59		3.21	2.50		2.83		3.31	3.28	3.48	3.57	4.93	4.30	4.68	
139		3.04		3.09	2.71		3.31		4.32	3.50	3.50	4.71	4.63	3.99	4.65	
140		2.58		2.99	2.89		3.32		2.99	3.02	3.56	4.57	4.94	5.28	4.54	
141		3.18		3.45			3.76		2.89	4.30	3.31	4.62	4.64	3.80	5.14	
142		2.58		3.19			3.30		3.71	3.59	3.88	3.92	4.84	3.92	4.25	
143		3.53		3.39			2.96		3.29	2.92	3.60	4.06	5.20	4.12	4.20	
144		2.68		3.45			3.32		3.43	3.11	4.32	2.85	5.45	5.07	4.27	
145		2.85		3.46			2.96		3.22	3.61	2.90	3.08	5.33	5.37	3.97	
146		2.46		4.05			2.90		2.95	3.06	4.07	3.64	4.82	3.90	4.11	
147		2.73		3.38			3.25		3.43	3.08	3.20	4.17	4.28	4.19	4.27	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
148		2.49		3.28			3.50		3.35	4.21	3.15	3.32	4.28	4.63	4.47	
149		2.21		3.49			3.17		3.65	3.50	3.21	4.04	4.53	3.54	4.33	
150		2.54		3.79			3.46		3.53	4.47	3.49	4.97	4.66	4.17	5.34	
151		2.22		3.40			3.41		3.29	4.00	3.39	3.84	4.60	3.83	4.65	
152		2.99		3.39			3.21		3.27	3.45	3.49	4.54	4.65	4.14	3.88	
153		2.39		3.58			2.94		3.97	3.50	3.70	4.05	3.76	4.83	4.34	
154		2.45		3.86			3.86		3.73	3.78	3.45	3.34	3.52	4.09	4.55	
155		2.88		3.57			4.08		3.40	4.95	3.63	3.85	4.60	3.80	3.77	
156		2.38		3.53			3.71		3.32		3.53	4.56	5.36	4.12	4.97	
157		3.12		3.25			3.97		3.65		3.12	3.49	4.12	5.71	4.14	
158		2.38		3.22			3.72		2.29		2.87	4.28	4.88	4.04	3.96	
159		2.40		3.13			4.24		3.38		3.23	3.10	4.62	4.39	4.45	
160		2.79		3.07			4.07		3.31		3.23	4.04	4.85	4.36	4.41	
161		2.45		3.01			3.99		4.09		4.99	3.54	4.06	3.96	5.08	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
162		2.65		3.07					3.23		3.63	3.74	4.61	3.75	5.17	
163		3.00		3.25					3.19		2.71	3.45	4.72	5.27	5.62	
164		2.73		3.17					3.86		2.96	4.03	4.38	4.20	4.55	
165		2.79		3.46					3.42		3.25	4.49		5.07	4.00	
166		3.01		3.65					3.31		3.12	3.39		4.50	5.23	
167		2.44		3.35					3.71		3.04	3.80		3.91	3.85	
168		2.85		3.47					3.05		3.84	4.11		4.06	5.15	
169		2.63		3.65					3.36		3.48	4.29		3.37	4.50	
170		2.55		3.26					3.47		3.35	4.19		4.78	3.90	
171		2.82		3.41							2.51	4.30		3.67	4.30	
172		2.13		3.23							3.16	3.24		3.76	5.00	
173		2.84		3.40							3.57	2.95		4.85	4.40	
174		2.20		3.88							3.71	3.74		4.54	4.30	
175		2.72		3.56							3.89					

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
176		2.65		3.07							3.43					
177		2.66		3.47							4.05					
178		2.66		3.47							3.93					
179		2.90									3.64					
180		3.40									3.62					
181		2.90									2.93					
182											2.96					
183											3.38					
184											2.87					
185											3.23					
186											2.98					
187											3.23					
188											3.48					
189											3.77					



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
190											3.39					
191											3.52					
192											3.85					
193											3.27					
194											4.45					
195											3.41					
196											3.12					
197											5.25					
198											4.32					
199											2.67					
200											4.34					
201											4.30					
202											3.37					
203											3.87					

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
204											3.44					
205											3.18					
206											4.21					
207											4.03					

สถาบันวิจัยและพัฒนา  
 ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ



## ตารางที่ 2 - ความเร็วของหยด

ตัวกระจาย : ก. (1.5 ม.ม.)			
อัตราการไหลของคาร์บอนเตตราคลอไรด์ : 8.68 ซีซี./วินาที			
ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
1	-1.43	36.89	0 - 2
2	-4.31	37.31	2 - 4
3	-5.03	39.59	4 - 6
4	-0.07	33.48	6 - 8
5	-1.88	32.20	8 - 10
6	-4.33	34.93	10 - 12
7	-2.95	34.03	12 - 14
8	-4.21	33.08	14 - 16
9	-2.98	29.03	16 - 18
10	-2.31	26.76	18 - 20
11	-6.10	29.72	20 - 22
12	-3.07	30.76	22 - 24
13	+0.14	29.31	24 - 26
14	-3.52	26.03	26 - 28
15	-4.31	24.98	28 - 30
16	-7.59	25.26	30 - 32
17	-4.24	23.07	32 - 34
18	-7.61	21.71	34 - 36
19	-4.51	22.11	36 - 38
20	-3.91	19.43	38 - 40
21	+0.61	17.65	40 - 42

	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใบ แต่ละตำแหน่ง
22	-2.33	20.65	42 - 44	7
23	-8.32	17.69	44 - 46	8
24	-5.24	19.26	46 - 48	9
25	-3.10	19.60	48 - 50	2
26	+0.67	17.28	50 - 52	6
27	-2.93	15.10	52 - 54	3

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวกระจาย : ก (1.5 ม.ม.)				
อัตราการใช้ของคาร์บอนเตตราคลอไรด์ : 6.67 ซีซี/วินาที				
	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
1	-2.79	36.19	0 - 2	10
2	-0.26	37.64	2 - 4	11
3	-2.97	35.15	4 - 6	14
4	-1.30	34.29	6 - 8	9
5	-1.86	34.42	8 - 10	14
6	+0.56	33.27	10 - 12	12
7	-1.35	35.82	12 - 14	12
8	-1.48	31.83	14 - 16	11
9	-2.47	33.14	16 - 18	10
10	-1.08	29.33	18 - 20	15
11	-0.15	31.86	20 - 22	14
12	-1.588	27.84	22 - 24	9
13	-1.70	29.09	24 - 26	15
14	-3.47	29.44	26 - 28	14
15	-4.59	27.81	28 - 30	10
16	-1.49	23.90	30 - 32	8
17	-1.81	24.97	32 - 34	12
18	-2.81	24.92	34 - 36	13
19	-5.67	19.14	36 - 38	7
20	-6.04	21.00	40 - 40	12
21	-2.43	20.33	42 - 42	14
22	-5.03	18.29	42 - 44	6

	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
23	-1.70	16.26	44 - 46	3
24	-5.66	19.45	46 - 48	5
25	-2.15	19.71	48 - 50	4
26	-3.07	18.82	50 - 52	3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวกระจาย : ก (1.5 ม.ม.)				
อัตราการไหลของคาร์บอน เดตราคลอไรด์ : 5.03 ซีซี/วินาที				
	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
1	-4.80	31.20	0 - 2	18
2	-4.20	33.93	2 - 4	11
3	-1.68	33.32	4 - 6	11
4	-0.11	31.82	6 - 8	10
5	-2.53	31.31	8 - 10	18
6	-2.87	33.53	10 - 12	12
7	-2.89	30.82	12 - 14	10
8	+4.06	31.92	14 - 16	8
9	-5.04	27.90	16 - 18	11
10	-3.31	29.11	18 - 20	14
11	+0.68	28.02	20 - 22	12
12	-4.36	28.49	22 - 24	17
13	+1.72	30.38	24 - 26	12
14	-1.35	26.79	26 - 28	14
15	-5.16	24.98	28 - 30	13
16	-3.32	24.82	30 - 32	8
17	+1.31	26.24	32 - 34	11
18	-7.43	22.25	34 - 36	7
19	-2.00	23.23	36 - 38	8
20	-3.05	21.58	38 - 40	9
21	+0.80	24.68	40 - 42	2
22	-10.35	20.76	42 - 44	2

	ทิศทางของหยดเป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
23	+2.00	17.13	44 - 46	1
24	+1.80	19.74	46 - 48	1
25	+4.40	15.10	48 - 50	2
26	-3.10	21.19	50 - 52	1

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตัวกระจาย : ข (1.5 ม.ม.)				
อัตราการใช้ของคาร์บอนเตตราคลอไรด์ : 8.68 ซีซี/วินาที				
	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
1	+0.92	39.40	0 - 2	5
2	+0.31	37.82	2 - 4	7
3	+3.74	40.24	4 - 6	5
4	-0.66	38.54	6 - 8	3
5	+1.20	36.12	8 - 10	5
6	+2.35	40.21	10 - 12	4
7	+1.60	38.31	12 - 14	5
8	-4.53	35.17	14 - 16	3
9	-3.43	30.39	16 - 18	3
10	+1.00	29.95	18 - 20	6
11	+0.53	32.44	20 - 22	3
12	-1.80	28.05	22 - 24	3
13	-4.10	30.01	24 - 26	13
14	-4.17	30.23	26 - 28	8
15	+0.47	26.96	28 - 30	4
16	-11.70	24.74	30 - 32	5
17	-2.66	23.85	32 - 34	6
18	+1.10	22.68	34 - 36	5
19	-3.24	23.64	36 - 38	14
20	-2.25	24.29	38 - 40	17
21	+2.60	21.98	40 - 42	5
22	-3.42	22.17	42 - 44	4

	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
23	+3.20	18.88	44 - 46	7
24	+4.98	18.27	46 - 48	5
25	-1.42	14.16	48 - 50	4
26	-7.50	18.88	50 - 52	1
27	+18.00	20.20	52 - 54	2
28	+11.75	14.78	54 - 56	2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวกระจาย : ข (1.5 ม.ม.)

อัตราการไหลของคาร์บอนเตตราคลอไรด์ : 6.67 ซีซี/วินาที

	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
1	+3.20	33.58	0 - 2	3
2	-2.25	33.10	2 - 4	6
3	+0.05	34.50	4 - 6	6
4	+1.53	33.12	6 - 8	6
5	-2.05	30.95	8 - 10	6
6	-2.46	32.59	10 - 12	8
7	-2.97	31.22	12 - 14	10
8	-1.15	33.25	14 - 16	15
9	-2.10	32.28	16 - 18	10
10	-2.64	29.63	18 - 20	11
11	-2.85	27.41	20 - 22	7
12	+0.75	30.38	22 - 24	12
13	+0.33	31.21	24 - 26	14
14	-0.55	26.17	26 - 28	8
15	-1.16	27.46	28 - 30	5
16	-0.79	23.30	30 - 32	8
17	-8.66	21.87	32 - 34	6
18	-1.12	24.26	34 - 36	9
19	+2.47	24.66	36 - 38	13
20	-1.70	23.06	38 - 40	7
21	+0.18	22.45	40 - 42	9
22	-2.86	19.34	42 - 44	8

	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
23	-2.50	20.92	44 - 46	6
24	+1.71	22.86	46 - 48	7
25	+8.50	17.13	48 - 50	1
26	-6.83	23.32	50 - 52	3
27	-1.10	20.61	52 - 54	3



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวกระจาย : ข (1.5 ม.ม.)

อัตราการไหลของคาร์บอนเตตราคลอไรด์ : 5.03 ซีซี/วินาที

	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
1	+3.66	28.82	0 - 2	4
2	-1.30	31.98	2 - 4	3
3	+0.19	32.08	4 - 6	8
4	+1.53	31.61	6 - 8	7
5	-2.14	31.37	8 - 10	11
6	-3.12	33.29	10 - 12	10
7	-4.12	32.33	12 - 14	10
8	-2.07	29.79	14 - 16	13
9	-1.65	28.30	16 - 18	10
10	-2.03	29.47	18 - 20	9
11	-0.44	26.82	20 - 22	19
12	+0.44	27.13	22 - 24	11
13	-0.26	27.80	24 - 26	10
14	-4.53	26.03	26 - 28	9
15	-0.96	27.18	28 - 30	88
16	+0.60	22.78	30 - 32	10
17	-1.23	25.41	32 - 34	5
18	-1.15	24.65	34 - 36	6
19	-2.22	23.74	36 - 40	11
20	-6.55	22.99	38 - 42	6
21	-6.46	22.90	40 - 44	3
22	+2.40	23.81	42 - 46	1
23	+0.75	21.19	44 - 48	2

ตัวกระจาย : ค. (1.5 ม.ม.)

อัตราการไหลของคาร์บอนเตตราคลอไรด์ : 8.68 ซีซี/วินาที

	ทิศทางของหยดเป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
1	-3.30	31.65	0 - 2	5
2	-4.45	34.85	2 - 4	8
3	-0.11	35.68	4 - 6	14
4	-2.33	34.62	6 - 8	6
5	+2.85	32.45	8 - 10	13
6	+1.28	34.05	10 - 12	12
7	+1.04	32.09	12 - 14	16
8	-2.98	32.00	14 - 16	13
9	+0.83	29.48	16 - 18	11
10	-1.03	31.94	18 - 20	16
11	-3.01	29.38	20 - 22	13
12	-2.01	30.54	22 - 24	19
13	-1.14	30.48	24 - 26	12
14	+0.21	29.43	26 - 28	15
15	+0.07	30.73	28 - 30	19
16	+0.13	30.98	30 - 32	11
17	-3.55	27.80	32 - 34	20
18	-0.92	29.54	34 - 36	12
19	-1.71	24.27	36 - 38	10
20	-1.10	24.45	38 - 40	9
21	-0.07	24.22	40 - 42	14
22	+0.35	28.02	42 - 44	13

	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
23	+0.41	20.28	44 - 46	7
24	-3.41	24.55	46 - 48	7
25	-3.75	20.42	48 - 50	3
26	-4.17	20.33	50 - 52	4
27	-0.83	17.71	52 - 54	3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวกระจาย : ค (1.5 ม.ม.)

อัตราการไหลของคาร์บอน เตตราคลอไรด์ : 6.67 ซีซี/วินาที

	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
1	-2.85	34.01	0 - 2	9
2	+0.24	33.60	2 - 4	9
3	-1.43	32.82	4 - 6	8
4	+0.83	32.71	6 - 8	10
5	-1.92	33.75	8 - 10	8
6	+1.36	33.50	10 - 12	10
7	+0.19	31.22	12 - 14	12
8	-1.75	30.61	14 - 16	99
9	-0.58	29.74	16 - 18	6
10	-0.98	31.75	18 - 20	11
11	-5.07	28.22	20 - 22	12
12	-0.33	30.29	22 - 24	12
13	-1.17	33.97	24 - 26	4
14	-1.91	27.45	26 - 28	13
15	-2.53	25.69	28 - 30	10
16	-2.25	29.59	30 - 32	7
17	-1.47	28.54	32 - 34	9
18	+3.29	27.65	34 - 36	10
19	-5.58	23.64	36 - 38	7
20	-1.63	23.29	38 - 40	9
21	-1.53	22.34	40 - 42	9
22	-8.50	18.87	42 - 44	1



	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
23	+2.52	21.85	44 - 46	4
24	+4.30	27.22	46 - 48	2
25	-2.66	16.55	48 - 50	3
26	-6.10	14.23	50 - 52	1



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวกระจาย : ค (๑.๕ ม.ม.)

อัตราการใช้ของคาร์บอนเตตราคลอไรด์ : ๕.๐๓ ซีซี/วินาที

	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
1	-1.74	30.28	0 - 2	12
2	-4.31	32.93	2 - 4	6
3	-0.04	30.42	4 - 6	9
4	-3.57	30.68	6 - 8	12
5	-1.97	29.21	8 - 10	9
6	-1.10	30.07	10 - 12	11
7	-1.13	30.36	12 - 14	14
8	-1.35	30.28	14 - 16	12
9	-3.01	29.26	16 - 18	11
10	-2.29	32.09	18 - 20	11
11	+0.51	30.67	20 - 22	12
12	-0.67	26.39	22 - 24	12
13	+1.33	28.38	24 - 26	15
14	-2.05	28.50	26 - 28	17
15	-2.41	27.39	28 - 30	13
16	-0.66	26.91	30 - 32	8
17	+3.47	26.13	32 - 34	8
18	-2.87	25.13	34 - 36	7
19	-1.34	25.19	36 - 38	11
20	+1.66	21.82	38 - 40	6
21	+1.96	24.39	40 - 42	3
22	-4.26	24.97	42 - 44	3

	ทิศทางของหยดเป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
23	+5.20	13.69	44 - 46	4
24	-6.72	20.14	46 - 48	4



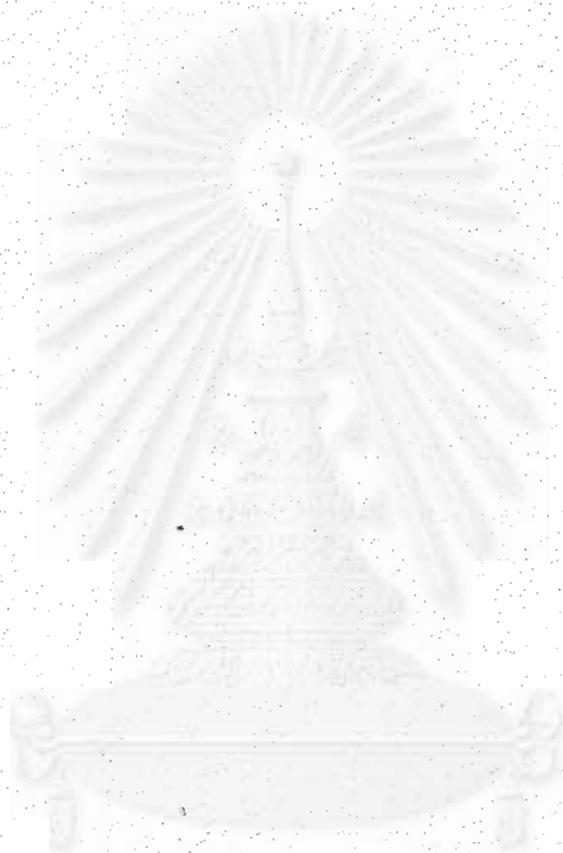
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวกระจาย : ง (1.5 ม.ม.)

อัตราการใช้ของคาร์บอนเตตระคลอไรด์ : 8.68 ซีซี/วินาที

	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
1	-0.91	31.40	0 - 2	13
2	-0.64	33.89	2 - 4	9
3	-2.61	33.20	4 - 6	7
4	+0.22	34.01	6 - 8	16
5	+3.06	31.99	8 - 10	8
6	-1.07	35.23	10 - 12	9
7	+1.62	33.32	12 - 14	11
8	-0.84	34.33	14 - 16	8
9	+2.08	29.61	16 - 18	10
10	-1.82	31.11	18 - 20	12
11	-0.80	31.92	20 - 22	20
12	-0.24	31.31	22 - 24	13
13	+3.17	30.93	24 - 26	10
14	+0.48	30.92	26 - 28	16
15	+0.31	29.34	28 - 30	8
16	+1.43	32.08	30 - 32	10
17	-0.44	33.33	32 - 34	12
18	+0.93	28.03	34 - 36	7
19	-4.40	28.77	36 - 38	4
20	+0.28	29.12	38 - 40	5
21	-1.70	24.61	40 - 42	4
22	-3.05	26.89	42 - 44	4

	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
23	+0.20	27.58	44 - 46	2
24	+3.72	24.28	46 - 48	4



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตัวกระจาย : ง (1.5 ม.ม.)

อัตราการใช้ของคาร์บอนเตตราคลอไรด์ : 6.67 ซีซี/วินาที

	ทิศทางของหยดเป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
1	+1.82	32.15	0 - 2	8
2	+0.14	31.17	2 - 4	10
3	+0.68	28.89	4 - 6	6
4	-1.16	31.05	6 - 8	16
5	-1.54	29.75	8 - 10	11
6	-0.97	29.15	10 - 12	15
7	+1.93	31.33	12 - 14	15
8	-1.15	31.74	14 - 16	13
9	-3.43	30.95	16 - 18	16
10	-1.69	32.01	18 - 20	10
11	+0.14	31.06	20 - 22	19
12	-1.54	28.49	22 - 24	11
13	+0.85	30.02	24 - 26	17
14	-1.70	27.84	26 - 28	10
15	+1.85	29.40	28 - 30	13
16	-0.59	29.93	30 - 32	16
17	-1.61	27.84	32 - 34	9
18	-2.20	23.70	34 - 36	7
19	+1.04	29.35	36 - 38	5
20	-4.60	26.44	38 - 40	6
21	-0.16	28.26	40 - 42	7
22	-1.90	28.74	42 - 44	1
23	-5.00	18.87	44 - 46	1

ตัวกระจาย : ง (1.5 ม.ม.)

อัตราการไหลของคาร์บอนเตตราคลอไรด์ : 5.03 ซีซี/วินาที

	ทิศทางของหยดเป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
1	+1.02	30.77	0 - 2	11
2	-0.15	32.04	2 - 4	6
3	-0.98	30.17	4 - 6	6
4	-1.83	32.74	6 - 8	8
5	+1.94	30.91	8 - 10	12
6	+1.35	28.12	10 - 12	12
7	+3.47	28.19	12 - 14	12
8	-1.62	28.50	14 - 16	17
9	-0.47	26.10	16 - 18	10
10	+2.05	28.18	18 - 20	13
11	-0.61	29.65	20 - 22	7
12	+1.81	27.22	22 - 24	15
13	+0.77	26.69	24 - 26	11
14	+6.17	26.88	26 - 28	12
15	+0.09	28.22	28 - 30	13
16	+1.30	26.91	30 - 32	17
17	+1.38	26.58	32 - 34	13
18	-0.84	25.90	34 - 36	18
19	+3.97	23.02	36 - 38	7
20	-2.22	25.29	38 - 40	6
21	+1.18	21.72	40 - 42	5
22	-3.10	26.71	42 - 44	2

	ทิศทางของหยด เป็น องศาจากแนวตั้ง	ความเร็ว เฉลี่ยของหยด (ม.ม./วินาที)	ตำแหน่งของหยดจาก จุดศูนย์กลางของท่อ (ม.ม.)	จำนวนหยดใน แต่ละตำแหน่ง
23	-1.10	25.78	44 - 46	2
24	-0.00	25.41	46 - 48	2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

## วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 เปรียบเทียบขนาดของหยดกับข้อมูลของบุคคลอื่น

ในคอลัมน์แมกส เปรียบพบว่าการรวมตัวของหยดไม่ค่อยจะเกิดขึ้น ซึ่งในงานวิจัยก็พบ เช่นเดียวกันว่า การรวมตัวของหยดเป็นหยดใหญ่ไม่มีเกิดขึ้น ดังนั้นขนาดของหยดจึงจะถูกกำหนด ด้วยขนาดของรูในหัวกระจายเฟสอินทรีย์ และตัวกำหนดข้อหนึ่งคืออัตราความเร็วของ เฟสอินทรีย์ ที่ผ่านรู ปัญหาที่ถามขึ้นได้คือขนาดเฉลี่ยของหยดในการตีการทดลองนี้สอดคล้องกับขนาดของหยดที่ กลุ่มวิจัยอื่นวัดได้หรือไม่ใช่หรือเปล่าประการใด ในตารางที่ 3 ได้บันทึกผลการของบุคคลอื่นที่ได้ศึกษาขนาด ของหยดในสเปรย์คอลัมน์ และได้เสนอผลการเปรียบเทียบในตาราง 4 จากผลการเปรียบเทียบ ระหว่างขนาดของหยดที่วัดได้ในโครงการนี้กับขนาดหยดที่กลุ่มนักวิจัยอื่นได้เสนอมาในตาราง 4 สิ่งที่พบคือสมการทั้งสองไม่สอดคล้องกันกับขนาดของหยดที่ได้ โดยเฉพาะสมการของ VEDAIYAN ET AL ไม่ตรงกับข้อมูลที่ได้ เว้นแต่เมื่อขนาดของรูในหัวกระจายมีขนาด 3 ม.ม. สำหรับสมการ ของ HORVATH ET AL จะมีลักษณะสอดคล้องกับข้อมูลในโครงการวิจัยนี้ที่รูเล็ก (2.5 ม.ม. หรือ ค่ากว่า) และอัตราการไหลสูงพอสมควร ถ้าอัตราการไหลต่ำ สมการของ HORVATH ET AL นี้จะไม่ค่อยแม่นยำเท่าไรนัก

ได้มีนักวิจัยวัดขนาดของหยดในระบบที่มีรูเดียวในหัวกระจาย และผลการเปรียบเทียบ แสดงถึงความสอดคล้องมากกว่าสมการของ VEDAIYAN ET AL และ HORVATH ET AL แต่สิ่งที่ น่าสังเกตได้แก่การที่สองสมการแรกได้ทำการวัดขนาดของหยดจากคอลัมน์แมกส เปรย์โดยตรง ส่วน สมการของ SKELLAND ET AL ได้วัดมาจากหัวกระจายที่มีรูเดียว ที่จริงแล้วในเมื่อหยดไม่รวมตัว กัน หัวหยดที่ถูกสร้างขึ้นมาไม่มีทางทราบว่าเกิดมาจากหัวกระจายแบบหลายรู หรือหัวกระจายแบบ รูเดียว ทำให้คิดว่าการทดลองที่ใช้หัวกระจายแบบรูเดียว (SINGLE NOZZLE) น่าจะสามารถให้ ข้อมูลเราได้มากในการหาขนาดของหยดในสเปรย์คอลัมน์ใหญ่ ซึ่งในประเด็นนี้การถ่ายภาพหยดใน โครงการนี้ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การศึกษาหัวกระจายแบบรูเดียวสามารถนำมาใช้ประเมินขนาด ของหยดในสเปรย์คอลัมน์ได้

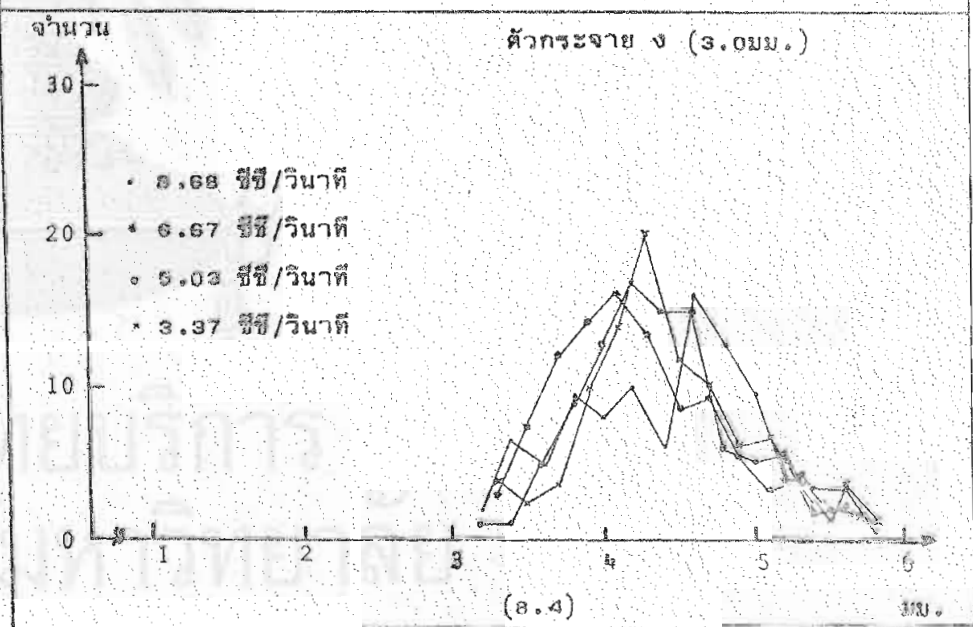
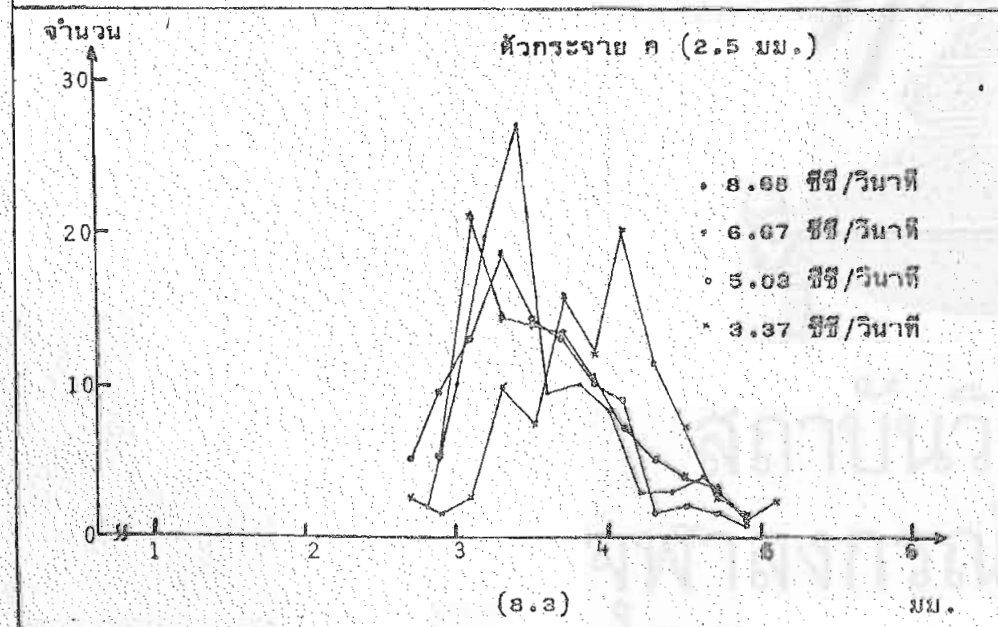
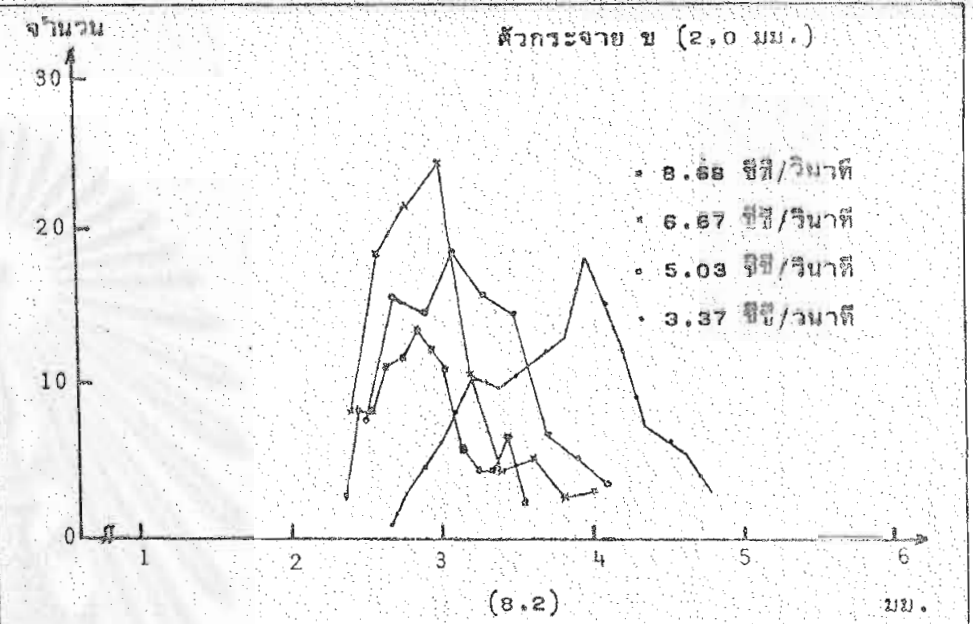
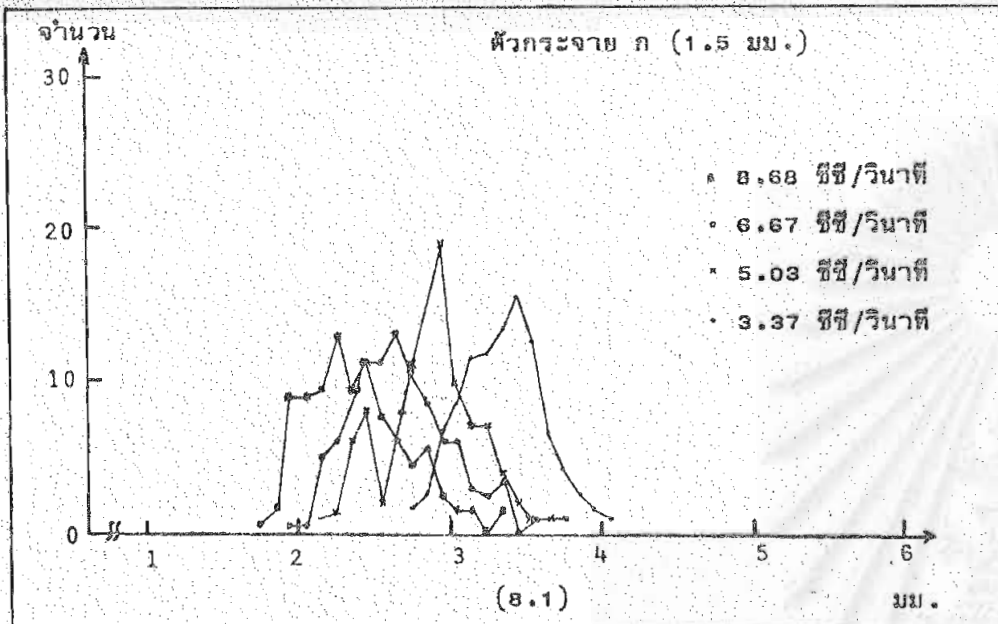
สมการทั้งสามที่เสนอไว้ในตาราง 3 ให้ขนาดของหยดเฉลี่ย เป็น เส้นผ่าศูนย์กลางของ เซอร์ปิน สามารถให้เราคำนวณพื้นที่ถ่ายเทมวลสารได้ พื้นที่ดังกล่าวมีความสำคัญต่อการใช้โมเดล

คณิตศาสตร์ต่าง ๆ ในการคำนวณการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสทั้งสอง ขนาดเฉลี่ยของหยด  
ดังกล่าวที่ได้มาจากวิธีใดวิธีหนึ่งมีความสำคัญมากคือการทำงานของคอลัมน์แบบสเปรย์ เพราะหยด  
จะพาสารเหลวหลักติดตามรอยของหยดมาด้วย ในที่สุดทำให้เกิดการไหลของเฟสหลักในทาง  
เดียวกับหยด ที่เรียกว่าการไหลแบบแอนเทรนด์ (ENTRAINED FLOW)

สรุปในประเด็นของขนาดเฉลี่ยของหยดว่า ขนาดของหยดที่วัดได้อยู่ในเกณฑ์ที่นักวิจัย  
ผู้อื่น เคยสังเกตมา และในกรณีที่จะต้องคำนวณหาขนาดของหยดที่เป็นสารอื่นสามารถทำได้สองวิธี  
คือ หนึ่งหาสมการ วิธีที่สองวัดขนาดของหยดโดยใช้ตัวกระจายรูเดียว เพราะสะดวกแก่การทำมาก  
ที่สุด

ในการทดลองวัดขนาดของหยดในคอลัมน์แบบสเปรย์มีผู้วิจัยอื่นหลายคนรวมทั้งผู้วิจัยนี้  
ด้วย พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดจำนวนมากมีขนาดที่กระจายมากพอสมควรดังได้แสดงไว้ใน  
รูป 7 จากรูปดังกล่าวนี้พบว่าโดยทั่วไปแล้วเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น เส้นการกระจายของขนาด  
ของหยดเลื่อนมาทางซ้ายอันหมายถึงว่าขนาดของหยดเล็กลงซึ่งสอดคล้องกับตาราง 4 ส่วนลักษณะ  
ของเส้นการกระจายของขนาดเป็นโมโนโมดัล (MONOMODAL) ซึ่งได้แก่การวัดขนาดของหยดที่  
ใช้ตัวกระจาย ก อัตราการไหล 3.37 ซีซี/วินาที, 6.67 ซีซี/วินาที, ตัวกระจาย ข อัตราการ  
ไหล 3.37 ซีซี/วินาที, 5.03 ซีซี/วินาที, 6.67 ซีซี/วินาที ตัวกระจาย ค อัตราการไหล  
5.03 ซีซี/วินาที, 6.67 ซีซี/วินาที, 8.68 ซีซี/วินาที ตัวกระจาย ง อัตราการไหล 3.37 ซีซี/วินาที  
6.03 ซีซี/วินาที, 6.67 ซีซี/วินาที ส่วนในบางกรณีเราจะพบว่าเส้นการกระจายของหยดเป็น  
ไดโมดัล (DIMODAL) เช่นการวัดขนาดของหยดที่ใช้ตัวกระจาย ก อัตราการไหล 8.68 ซีซี/วินาที  
ตัวกระจาย ข อัตราการไหล 8.68 ซีซี/วินาที อีกกรณีคือเส้นการกระจายของหยดเป็นไตรโมดัล  
(TRIMODAL) เช่นการทดลองที่ใช้ตัวกระจาย ก อัตราการไหล 5.03 ซีซี/วินาที และตัวกระจาย  
ค อัตราการไหล 3.37 ซีซี/วินาที และอีกหนึ่งกรณีคือเส้นการกระจายของหยดเป็นเตตราโมดัล  
(TETRAMODAL) ได้แก่การทดลองใช้ตัวกระจาย ง อัตราการไหล 8.68 ซีซี/วินาที

ลักษณะการกระจายของหยดเป็นลักษณะที่คล้ายกับที่นักวิจัยผู้อื่นได้เคยวัดได้ เว้นแต่  
เส้นที่มีลักษณะไตรโมดัลกับ เตตราโมดัลยังไม่มีใครเคยพบ อย่างไรก็ตามผลการคำนวณเส้นการ  
กระจายของหยดในการทดลองคราวนี้ ทำให้เห็นว่าการกระจายของขนาดของหยดเป็นการกระจาย  
ของหยดชวนให้คิดว่าการกระจายของขนาดของหยดที่แคบและการกระจายของขนาดของหยดที่กว้าง  
อาจจะมีผลต่อการหาค่าเฟสหลักติดมาด้วย ซึ่งในประเด็นนี้ไม่สามารถศึกษาได้ในโครงการนี้เพราะ



รูปที่ 7 การกระจายของเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของหยด

## ตารางที่ 3 - สรุปผลการวัดขนาดของหยดในท่อยาว

คณะผู้วิจัย	รายละเอียดของระบบที่ใช้ และผลการทดลอง
Skelland and Johnson <sup>(5)</sup> 1974	<p>ตัวกระจายแบบรูเดี่ยวใช้ถึงขนาด 12 X 7 X 6 นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวกระจาย: 0.1575, 0.2337, 0.3327, 0.3937, 0.4750 ซม.</p> <p>ระบบที่ใช้ (เฟสหลัก - เฟสหยด) เฮปเทน - น้ำ; เฮปเทน - น้ำ            น้ำ - คาร์บอนเตตราคลอไรด์            น้ำ - โคลโรเบนซีน</p> <p>สมการที่ได้</p> $\frac{d_F}{d_{jc}} = 2.6051 - 0.7747 \left( \frac{V_n}{V_{nc}} \right) + 0.3994 \left( \frac{V_n}{V_{nc}} \right)^2 \quad (3.1)$ <p><math>d_F</math> : เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดอิสระ</p> <p><math>d_{jc}</math> : เส้นผ่าศูนย์กลางของ "jet" ก่อน "breakup" เพื่อได้พื้นที่สูงสุด</p> <p><math>V_n</math> : ความเร็วของเฟสหยดผ่านตัวกระจายรูเดี่ยว</p> <p><math>V_{nc}</math> : ความเร็วของเฟสหยดที่ให้พื้นที่สูงสุด</p>
Horvath, Steiner, and Hartland <sup>(3)</sup> 1978	<p>ใช้คอลัมน์แบบสเปร์ย์ เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 1.95 ม.</p> <p>ตัวกระจายใช้เข็มเหล็กโรสเนิมปักในแผ่นเรพลอน จำนวน 177 เล่ม และจำนวน 121 เล่ม</p> <p>เส้นผ่าศูนย์กลางของเข็ม = 1 มม. ห่างกัน 7 มม. วางเป็นแถว</p> <p>ระบบที่ใช้ (เฟสหลัก - เฟสหยด)            น้ำ - ไอโซคัน</p> <p>สมการที่ได้</p>

$$\frac{d_{32}}{d_{jc}} = \frac{2.06}{V_n/V_{nc}} + 1.47 \ln \frac{V_n}{V_{nc}} \quad (3.2)$$

$$V_{nc} = 2.69 \left( \frac{d_{jc}}{d_n} \right)^2 \left[ \frac{\gamma}{d_{jc}(0.514\rho_d + 0.470\rho_c)} \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

$$d_{jc} = \frac{d_n}{0.485 K^2 + 1.0}$$

$$K < 0.784$$

$$K = d_n \left( \frac{\gamma}{\Delta\rho g} \right)^{1/2}$$

Vedaiyan,  
Degaleesan  
and Laddha (4)  
1974

ใช้คอลัมน์แบบสเปร์ย์ เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. ยาว 1 ม.

ตัวกระจายมีดังนี้: 1 ม.ม. (24 รู), 2 ม.ม. (12 รู),

2.90 ม.ม. (12 รู), 3.70 ม.ม. (12 รู), 4.75 ม.ม. (12 รู),

2.90 ม.ม. (22 รู), 1 ม.ม. (12 รู)

ระบบที่ใช้ (เฟสหลัก - เฟสหยด)

น้ำ - MIBK

น้ำ - ไอโซอามิลแอลกอฮอล์

น้ำ - เมทซิน

คาร์บอนเตตระคลอไรด์ - น้ำ

สมการที่ได้

$$\frac{d_{vs}}{\left( \frac{\gamma}{\Delta\rho g} \right)^{1/2}} = 1.59 \left( \frac{v_n^2}{2g d_n} \right)^{-0.067} \quad (3.4)$$

$d_n$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของรู

ตารางที่ 4 - เปรียบเทียบเส้นผ่าศูนย์กลางข้อเคอร์กับสมการอื่น

อัตราการใช้ ของเฟสทอยค (ซีซี/วินาที)	$d_{32}$ ม.ม.	$d_F$ จากสมการ ของ Skelland ม.ม.	$d_{32}$ จากสมการ ของ Horvath ม.ม.	$d_{VS}$ จากสมการ ของ Vedaiyan ม.ม.
ตัวกระจาย ก				
8.68	2.55	2.78	2.86	4.13
6.67	2.76	2.88	3.30	4.28
5.03	2.96	3.05	4.10	4.55
3.37	3.39	3.16	6.01	4.69
ตัวกระจาย ข				
8.68	2.97	3.60	3.17	4.18
6.67	3.07	3.57	3.88	4.33
5.03	3.38	3.61	3.87	4.50
3.37	3.92	3.73	5.25	4.75
ตัวกระจาย ค				
8.68	3.67	4.10	3.37	4.27
6.67	3.77	3.84	3.35	4.42
5.03	3.70	3.78	3.54	4.59
3.37	4.02	3.85	4.33	4.84
ตัวกระจาย ง				
8.68	4.59	5.31	3.71	4.30
6.67	4.38	4.39	3.48	4.45
5.03	4.52	3.97	3.38	4.62
3.37	4.56	3.83	3.80	4.38

ไม่ได้วัดอัตราการไหลของ เฟสหลัก เลย ประการที่สองการกระจายของขนาดของหยดน่าจะมีอิทธิพลต่อการไหลผ่านของหยดในท่อยาว เพราะหยดที่ใหญ่มีแนวโน้มจะไหลผ่านเร็วกว่าหยดเล็ก ในการวัดความเร็วของหยดผู้วิจัยเสียสละเป็นอย่างมากที่อุปกรณ์ที่ใช้ไม่สามารถวัดขนาดของหยดควบคู่ไปกับการวัดความเร็วของหยด ทั้งนี้สาเหตุมาจากคุณภาพของภาพดังได้แสดงไว้ในรูป 6 และความยากที่จะส่องแสงสว่างให้สามารถวัดขนาดของหยดที่ไหลผ่านได้

สรุปว่าถึงแม้จะรู้ถึง เส้นการกระจายของขนาดของหยดในท่อยาว การที่จะเข้าใจอิทธิพลของการกระจายของขนาดดังกล่าวต่อปริมาตรเฟสหลักที่ถูกพานำมาด้วยหยด (ENTRAINMENT FLOW) เป็นเรื่องที่ยังไม่สามารถตอบได้เพราะไม่มีข้อมูลเรื่องเฟสหลักเลย ประเด็นที่สองการกระจายของขนาดของหยดคงมีอิทธิพลต่อความเร็วของหยดเอง เช่นหากการพานำของเฟสหลักตามหยดไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยมากเพราะจำนวนหยดมีน้อย ในกรณีแบบนี้ความเร็วของหยดจะขึ้นอยู่กับ เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดเอง และการไหลของกุ่มหยดจะเป็นลักษณะการผสมย้อนกลับ แต่ในกรณีนี้เราจะเรียกว่าการผสมไปข้างหน้า (FORWARD MIXING) ในคอลัมน์แบบสเปรย์หรือในท่อยาวการผสมไปข้างหน้าแบบนี้กับการพานำเฟสหลักตามกุ่มหยด เป็นสองขบวนการที่มารวมกัน ทำให้กุ่มหยดไหลผ่านเร็วกว่าในสภาพปกติในน้ำนิ่ง จึงเป็นการยากลำบากที่จะศึกษาอิทธิพลของการกระจายของขนาดของหยด การที่สามารถวัดการกระจายของขนาดของหยด เป็นประโยชน์ในการคำนวณหาพื้นที่ถ่ายเทมวลสารที่ต้องการ ดีกว่าการที่จะคำนวณพื้นที่จาก เส้นผ่าศูนย์กลางท่อและรัศมีของไฮดรอลิก (HOLDUP) ของเฟสหยดภายในท่อ ประโยชน์ข้อสองคือการที่เราสามารถมองเห็นลักษณะของเฟสหยดที่ไหลผ่าน ถึงแม้ว่าจะยังไม่สามารถนำข้อมูลนี้มาใช้ในโมเดลของคอลัมน์แบบสเปรย์ทันทีทันใด

### ๑.๒ วิเคราะห์ผลการศึกษาเรื่องความเร็วของหยด

จากตารางที่สองสามารถศึกษาความเร็วของหยดที่ไหลผ่านท่อยาวสำหรับสภาวะการเดินเครื่องจำนวน 12 สภาวะ ดังได้แสดงไว้ในรูป 8

จากรูป 8 สิ่งที่น่าสนใจ เกิดเป็นอย่างมากได้แก่การที่หยดซึ่งอยู่กลางคอลัมน์มีอัตราความเร็วระหว่าง 30-40 ซม./วินาที และน้อยลงตามลำดับสำหรับหยดที่ไหลผ่านผนัง ผู้วิจัยได้เก็บยกเส้นกระจายขนาดของหยดสำหรับตัวกระจาย ง อัตราการไหล 6.67 ลิ/วินาที และจากการวิเคราะห์ได้ให้สมการของ VICHE<sup>(7)</sup> ดังต่อไปนี้เพื่อการคำนวณความเร็วสุดท้ายของหยดใน

สภาพน้ำนิ่ง

$$V_t = \frac{d_F}{4.2} \left( \frac{g\Delta\rho}{\rho_c} \right)^{2/3} \left( \frac{\rho_c}{\mu_c} \right)^{1/3} \left( 1 - \frac{g\Delta\rho d_F^2}{G\gamma} \right) \quad (3.5)$$

และได้บันทึกข้อมูลในตารางที่ 5 จากตารางนี้สามารถแลเห็นหลายประเด็นด้วยกัน ประเด็นแรก ถ้าดูรูปที่ 8 สำหรับสภาวะที่สอดคล้องกับตารางที่ 5 คือการทดลองที่ใช้ตัวกระจาย และอัตราการไหล 6.75 ซีซี/วินาที จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลของหยดวัดได้ค่าเฉลี่ยราว 31.0 ซีซี/วินาที ตรงจุดศูนย์กลางของคอคดมันน์ และค่าเฉลี่ยราว 20 ซีซี/วินาที ใกล้ผนังท่อแก้ว แต่จากผลการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดโดยวิธีการถ่ายภาพได้คำนวณความเร็วสุดท้ายของกลุ่มหยด ตั้งบันทึกไว้ในตาราง 5 อันแสดงถึงการที่หยดควรมีความเร็วสุดท้ายในน้ำนิ่งตั้งแต่ 15.47 ซม./วินาที จนถึง 21.51 ซม./วินาที อันเป็นช่วงที่ไม่สอดคล้องกับการวัดความเร็วจริง ความเป็นจริงคงมีอยู่สองทางคือสมการ 5 ผิดพลาด หรือเฟสหลักไม่นิ่ง ที่จริงแล้ว สมการที่ 5 คงไม่ถูกต้องแม่นยำเสมอไป เช่นสมการที่ HU AND KINTER<sup>(8)</sup> ได้เสนอไว้เพื่อหา  $V_t$  ไม่ตรงกับสมการของ VIGNE<sup>(7)</sup> สำหรับความนิ่งของเฟสหลักนั้นนักวิจัยหลายกลุ่มได้พิสูจน์เฟสหลักในคอคดมันน์แบบสเปรย์ไม่นิ่ง<sup>(2)</sup> และผู้วิจัยได้พยายามใช้ท่อปีโค (PITOT TUBE) เพื่อมาวัดความเร็วเฉพาะจุดของเฟสหลักแต่ไม่ได้ประสบผลสำเร็จ

สาเหตุที่พอจะเชื่อได้ว่าเฟสหลักไม่นิ่ง และมีอาการไหลตามหยดในบริเวณกลางคอคดมันน์ เห็นได้จากรูป 8 ว่าทั้ง 12 ภาพซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนแจ้งว่าในส่วนกลางของคอคดมันน์ หยดจะไหลเร็วกว่าด้านนอก เส้นที่เขียนไว้ว่าความเร็วสุดท้ายของหยดขนาดสองเตอร์ได้มาโดยวิธีดังนี้ คือสำหรับการทดลองทุกชุดได้คำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของหยด เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางสองเตอร์ จากเส้นผ่าศูนย์กลางสองเตอร์นี้สามารถคำนวณความเร็วสุดท้ายได้ (TERMINAL VELOCITY) โดยอาศัยสมการของ VIGNE คือสมการที่ 3.5 และโดยอาศัยสมการของ HU AND KINTER<sup>(8)</sup> ดังเสนอไว้ในสมการต่อไป

$$Re P^{-0.15} < 8 ; C_D = 2.5 Re We^{-1} P^{-0.30} \quad (3.6 n)$$

$$Re P^{-0.15} > 8 ; C_D = 5 We^{-1} P^{-0.15} (Re P^{-0.15} - 4) \quad (3.6 o)$$



$$Re = \frac{d_F \rho_c V_t}{\mu_c}$$

$$P = \frac{\rho_c^2 \gamma^3}{g \Delta \rho \mu_c^4}$$

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{g \Delta \rho d_F}{\rho_c V_t^2}$$

$$We = \frac{d_F V_t^2 \rho_c}{\gamma}$$

ในการคำนวณความเร็วสุดท้ายของหยดพบว่าสมการ ๑.๕ กับ ๑.๖ ไม่สอดคล้องกัน บางทีผิดกัน ๑ ซม./วินาที บางทีผิดกันถึง 17 ซม./วินาที แต่เนื่องจากสมการทั้งสองเป็นสมการที่นิยมใช้จึงได้นำผลเฉลี่ยของสมการทั้งสองมาบันทึกไว้ในรูป ๘ ความหมายของความเร็วสุดท้ายของหยดขนาดขอเตอร์ที่บันทึกไว้ในรูป ๘ คือการเปรียบเทียบว่าหากเฟสหลักนิ่งจริงแล้วความเร็วเฉลี่ยของกลุ่มหยดจะอยู่รอบ ๆ เส้นตรงดังกล่าว อันหมายความว่า หากเฟสหลักนิ่งจริงความเร็วเฉลี่ยของหยดจะเท่ากันตลอดความกว้างของท่อ แต่ผลที่ปรากฏในรูป ๘ แสดงไว้ว่าความเร็วเฉลี่ยของหยดมีจุดสูงสุดตรงศูนย์กลางของท่อ ดังนั้นผลการคำนวณความเร็วของหยดที่ได้ศึกษาในงานวิจัย เป็นการแสดงถึงการที่เฟสหลักไหลตามหยดในบริเวณกลางคอลัมน์ ซึ่งข้อสรุปนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาเฟสหลักในคอลัมน์แบบสเปรย์ แต่งานวิจัยนี้เป็นงานศึกษาการไหลของเฟสหยดเป็นครั้งแรก ไม่เคยมีกลุ่มวิจัยใดทำมาก่อน และผลสำคัญมีอยู่ดังนี้ คือหนึ่งจากลักษณะความเร็วของหยดซึ่งมีรูปร่างเหมือนพาราโบลอยด์ แสดงให้เห็นว่าเฟสหลักไหลตามหยดในบริเวณกลางคอลัมน์ อันที่สองงานวิจัยนี้ได้พิสูจน์ว่าความเร็วของหยดที่ไหลผ่านคอลัมน์มีลักษณะพาราโบลอยด์ ซึ่งเป็นความรู้ใหม่ที่อาจจะมียุทธิพลต่อการเขียนคู่มือการติดตามคณิตศาสตร์ของคอลัมน์แบบสเปรย์ในอนาคต

สรุปว่าลักษณะทั่วไปของความเร็วของหยดที่ไหลผ่านคอลัมน์ เป็นลักษณะพาราโบลอยด์ ในรายละเอียดจะพบว่า เส้นความเร็วเฉลี่ยเป็นผลของการถ่ายภาพหยดจำนวนมาก และแต่ละจุดในรูป ๘ เป็นผลเฉลี่ยของหลายหยดด้วยกัน แต่ไม่สามารถจำแนกความเร็วจริงของหยดกับขนาดของหยดได้ จึงได้เส้นความเร็วในรูปที่ ๘ เป็นความเร็วเฉลี่ยของหยดทุกขนาด

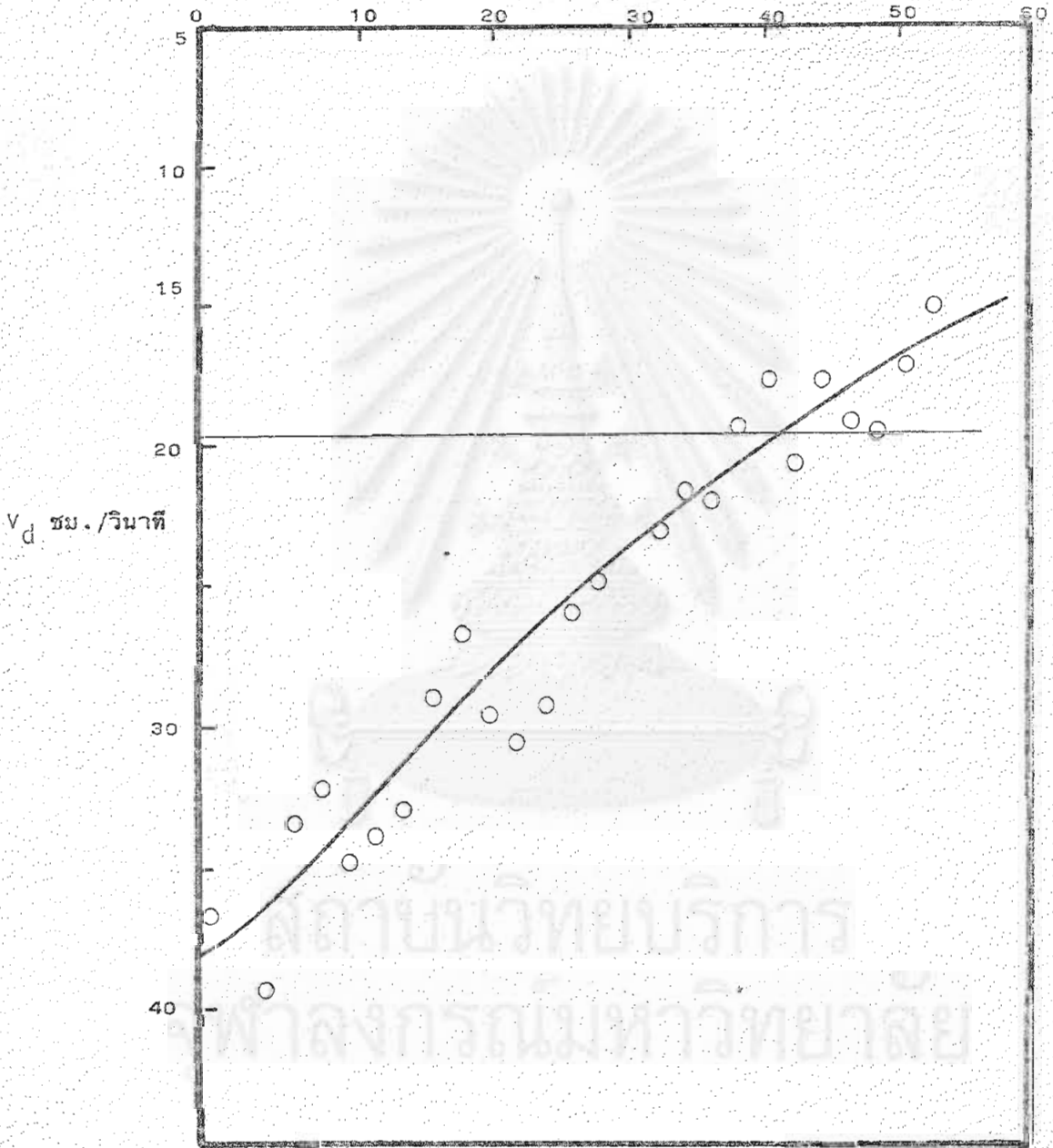
ในการวิเคราะห์ความเร็วของหยด และ เมื่อพบว่าความเร็วของหยดขึ้นอยู่กับตำแหน่งในแผ่นตัดของคอลัมน์ โดยไม่คำนึงถึงขนาดของหยดซึ่ง เข้าใจว่ากระจายภายในคอลัมน์อย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม เมื่อทราบว่าลักษณะการไหลของ เฟสหยด เป็นแบบนี้ คำถามคือสมควรหรือไม่ในเชิงวิศวกรรมศาสตร์ที่จะคิดโมเดลใหม่สำหรับการไหลของ เฟสหยด ซึ่งตามปรกติแล้วถือว่า เฟสหยดไหลแบบทรงกระบอกในคอลัมน์แบบสเปร์รี่ ปัญหาดังกล่าวนี้เป็นปัญหาสำคัญเพราะถ้าถือว่าเป็นการไหลแบบพาราโบลอยด์ ในลักษณะเดียวกับการไหลแบบลามินาร์ การเขียนคู่มือคณิตศาสตร์จะยากขึ้นและจะต้องทำการศึกษาอีกมาก โดยเฉพาะจะต้องศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่นขนาดของท่อ ระบบที่ใช้ ตัวกระจาย และอื่น ๆ อีก ดังนั้นวิธีหนึ่งที่จะวิเคราะห์ประเด็นนี้คือหาเบอร์เพเคล็ต (PECLET NUMBER) ในเฟสหยดสำหรับท่อยาวราว ๓ เมตร และหากเบอร์เพเคล็ตมีค่าสูง จะแสดงว่าการไหลเป็นการไหลแบบทรงกระบอก และตรงกันข้ามหากเบอร์เพเคล็ตมีค่าน้อย แสดงว่าการผสมเกิดขึ้นมาก และไม่สามารถถือว่าเป็นการไหลทรงกระบอกได้ จุดเริ่มในการวิเคราะห์คือสมการที่ให้ความเร็ว เฉลี่ยของหยดสำหรับการทดลองที่ใช้ตัวกระจาย ง และอัตราการไหลของเฟสอินทรีย์ 6.67 ซีซี/วินาที ดังนี้

$$V = 31.0 - 0.13 r^{2.58} \quad (3.7)$$

V คือความเร็วของหยด ซม./วินาที และ r คือรัศมีของคอลัมน์เป็นเซนติเมตร ( $0 < r < 5.7$  ซม.) แนวในการหาเบอร์ของเพเคล็ตคือหา เวลาที่กลุ่มหยดอยู่ในคอลัมน์ หากจะมองเห็นการกระจายของหยดในลักษณะคล้าย ๆ การผสมย้อนกลับ เป็นการผสมไปข้างหน้า (FORWARD MIXING) จะต้องสมมุติว่าเราฉีดสารกับมันตกภาพรังสีใส่เข้าไปในเฟสหยด ตรงระดับ  $Z = 0$  เสร็จแล้วมี เครื่องวัดกับมันตกภาพรังสีที่ระดับ  $Z = 1$  เมตร ซึ่งจะแลเห็นเป็นเส้นตีสตรีบิวชัน และจากเส้นนี้จึงสามารถหาเบอร์เพเคล็ตได้ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก

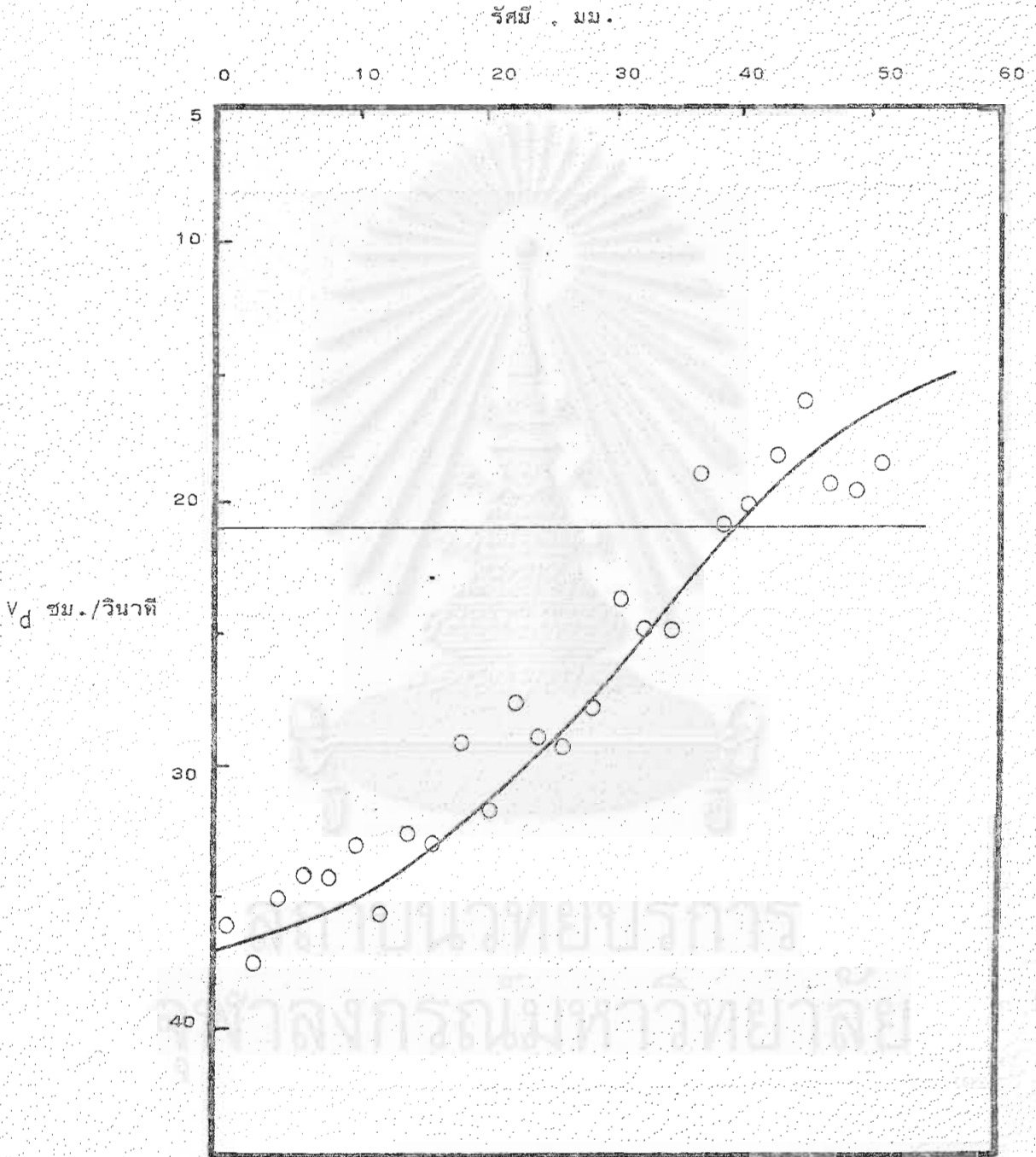
รูปที่ ๑ เสนอผลการวิเคราะห์หาเบอร์เพเคล็ตสำหรับการทดลอง 12 ชุด การวิเคราะห์ลักษณะการไหลของ เฟสหยดในรูปของเบอร์เพเคล็ต ได้ตั้งข้อสมมุติฐานดังนี้ คือ ถือว่าการกระจายของหยดในท่อ เป็นการกระจายที่สม่ำเสมอ ประการที่สองถือว่าการกระจายของขนาดของหยดสม่ำเสมอ เช่นเดียวกัน ดังนั้นหากการไหลของ เฟสหยดใกล้เคียงข้อสมมุติฐานทั้งสอง ถือได้ว่าสามารถคำนวณเส้นระยะ เวลาที่สารอยู่ในท่อ (RESIDENCE TIME DISTRIBUTION)

รัศมี , มม.



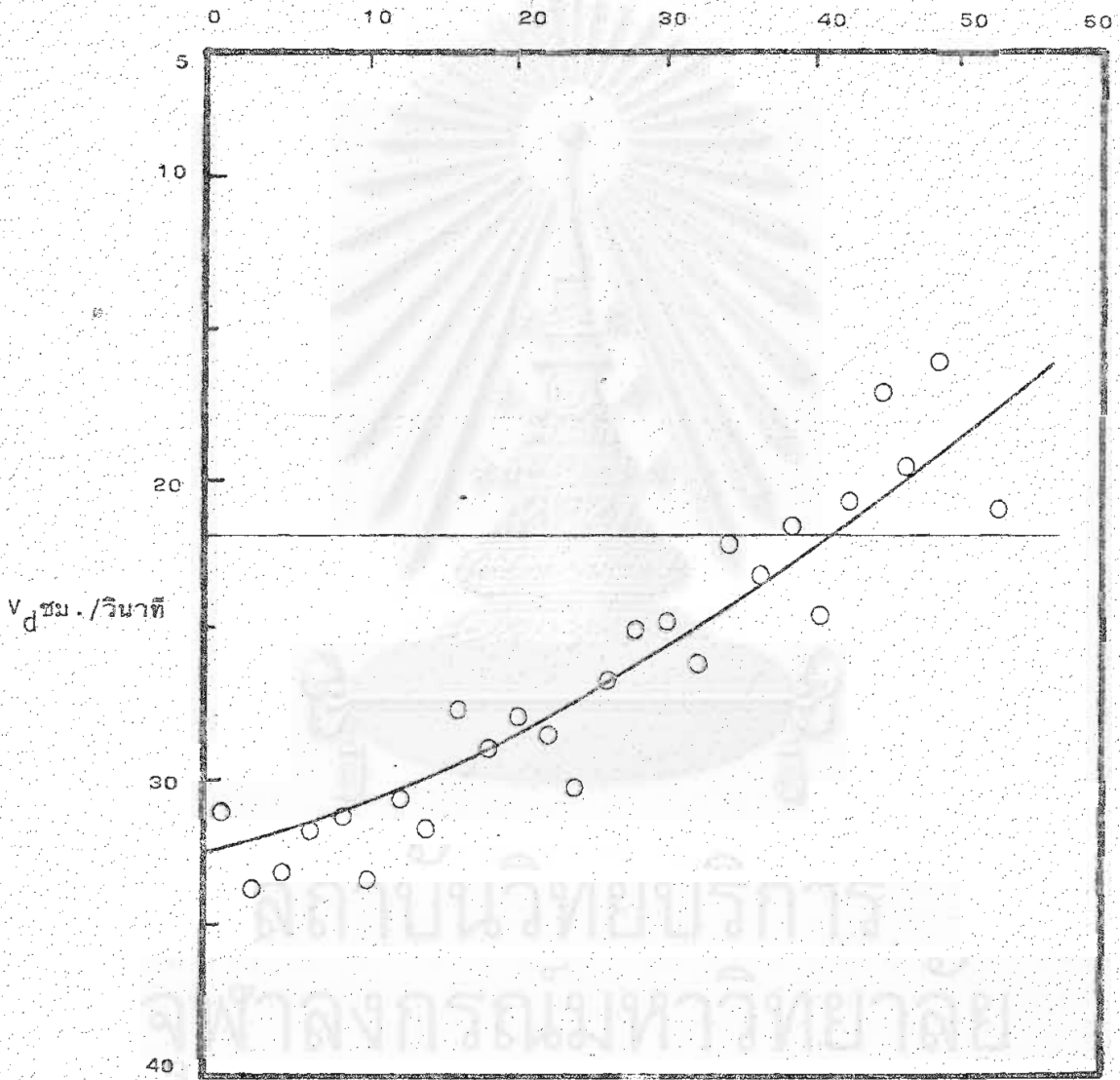
(8.1) ตัวกระจาย ก. 8.68 ซีซี/วินาที

รูปที่ 8 ความเร็วของหยดในคอถัมป์



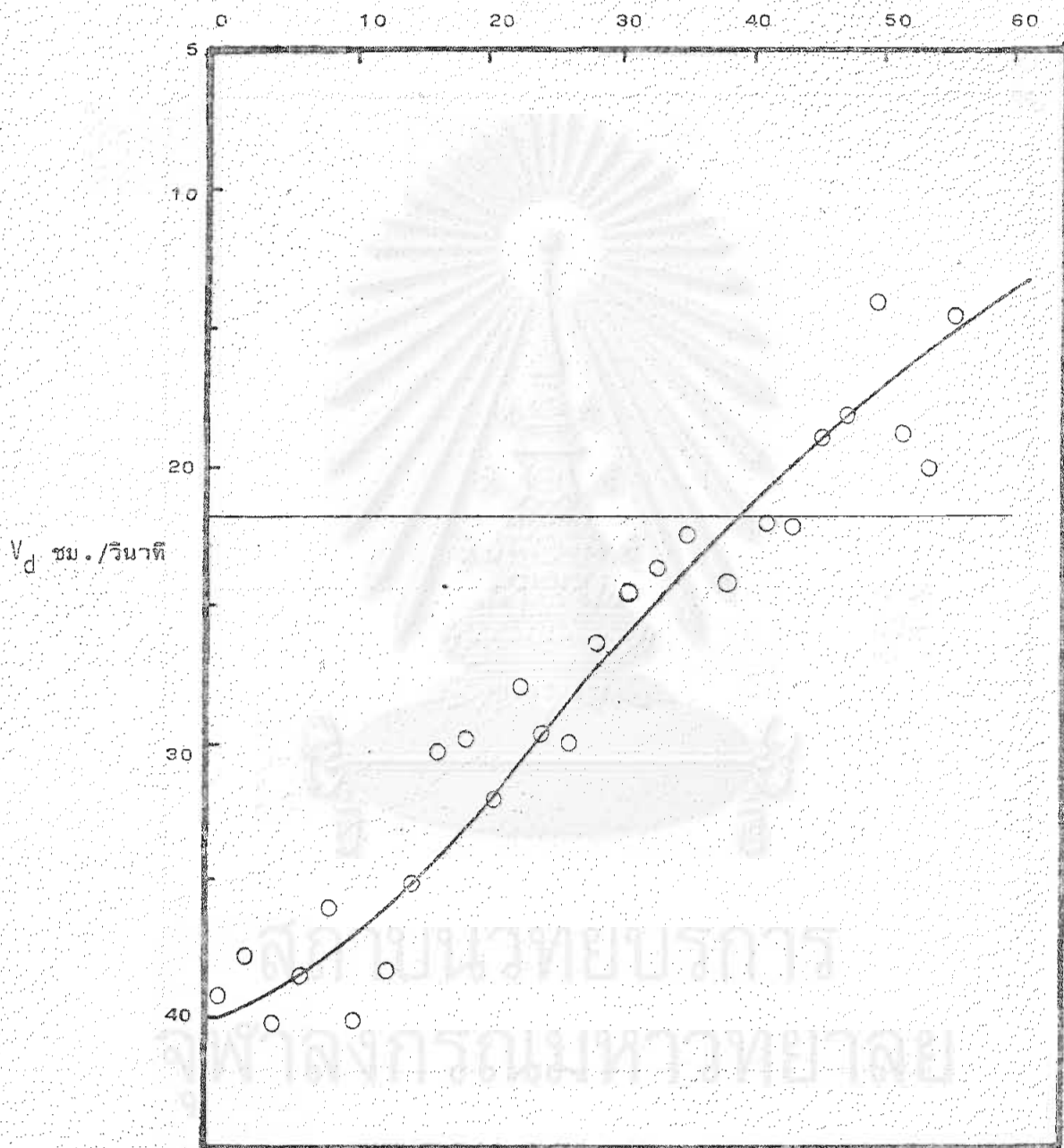
(3.2) ตัวกระจาย ก. 6.57 ซีซี/วินาที

รัศมี, มม.



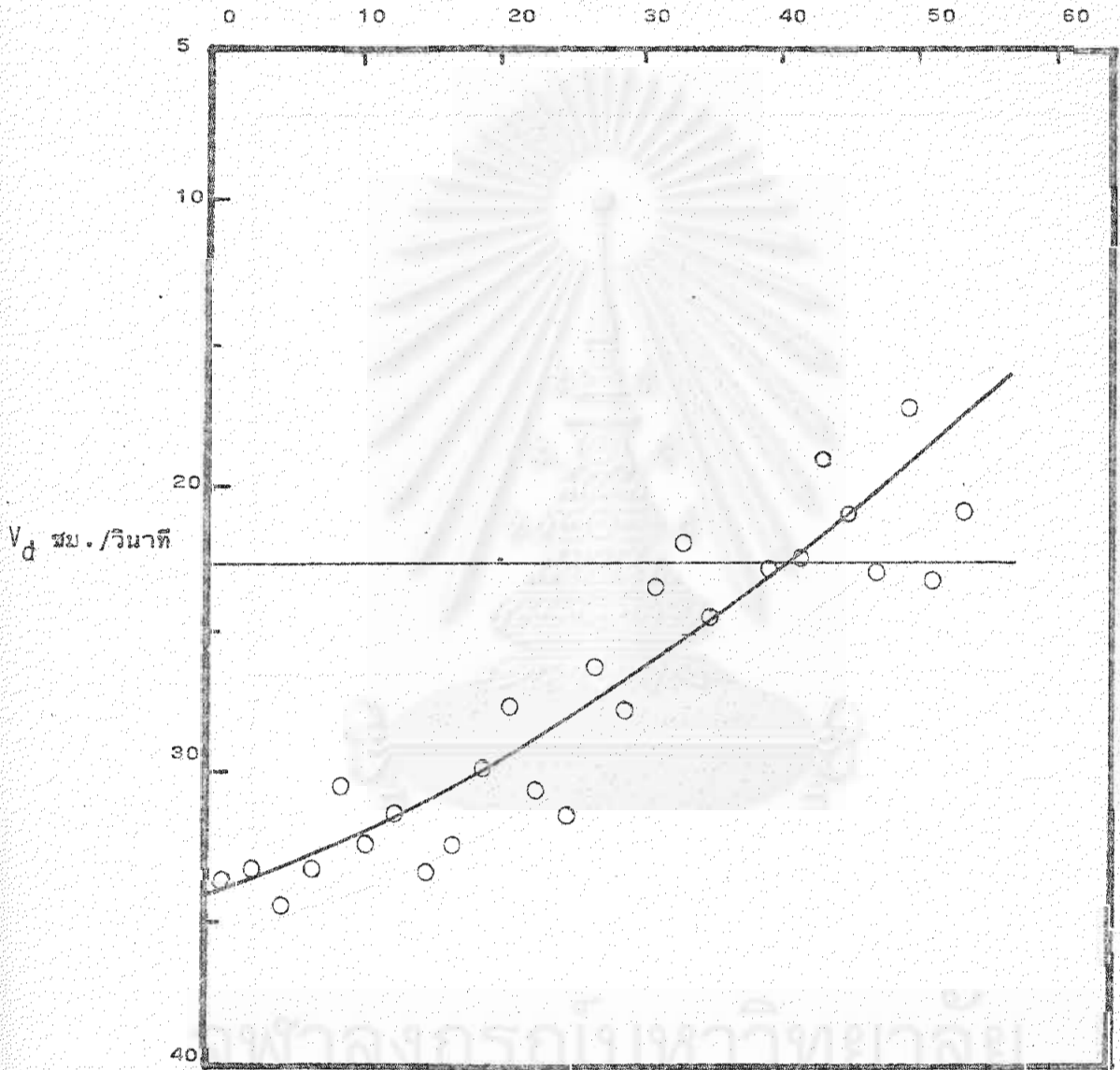
(8.3) ตัวกระจาย ก. 5.03 ซีซี/วินาที

รัศมี , มม.

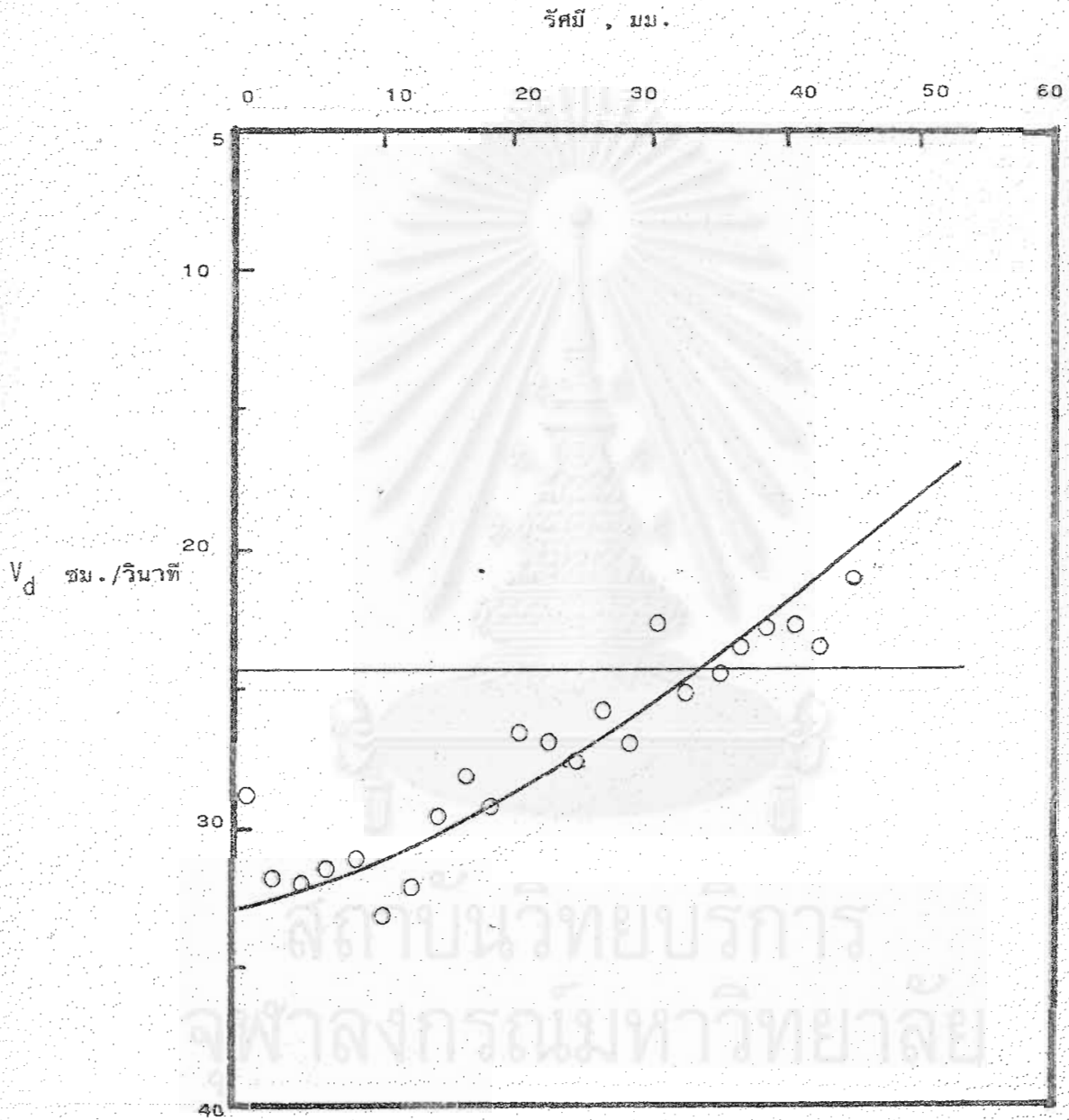


( 8.4) ตัวกระจาย ข. 8.68 ซีซี/วินาที

รัศมี , มม.

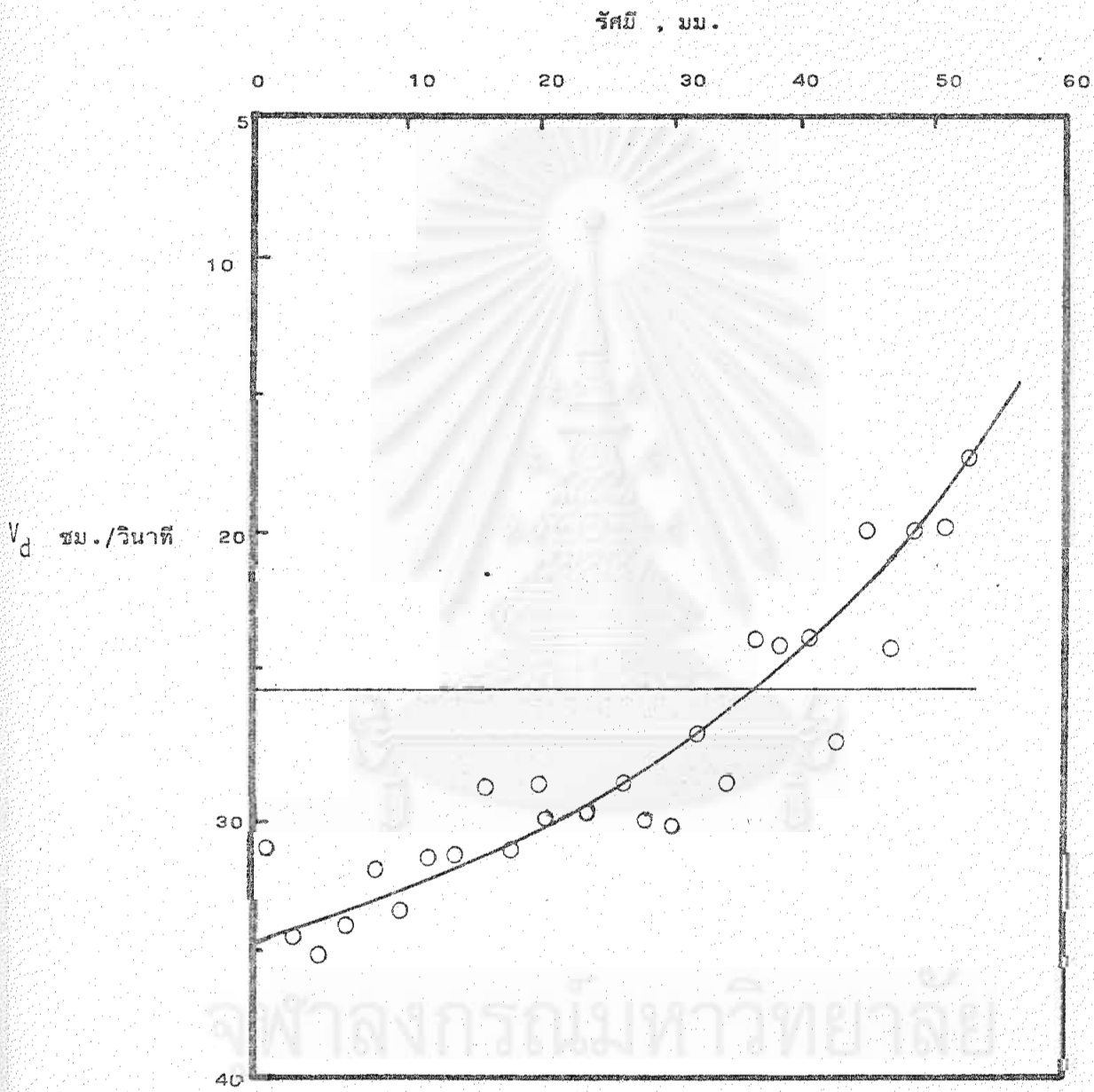


(8.5) ตัวกระจาย ข. 6.67 ซีซี/วินาที

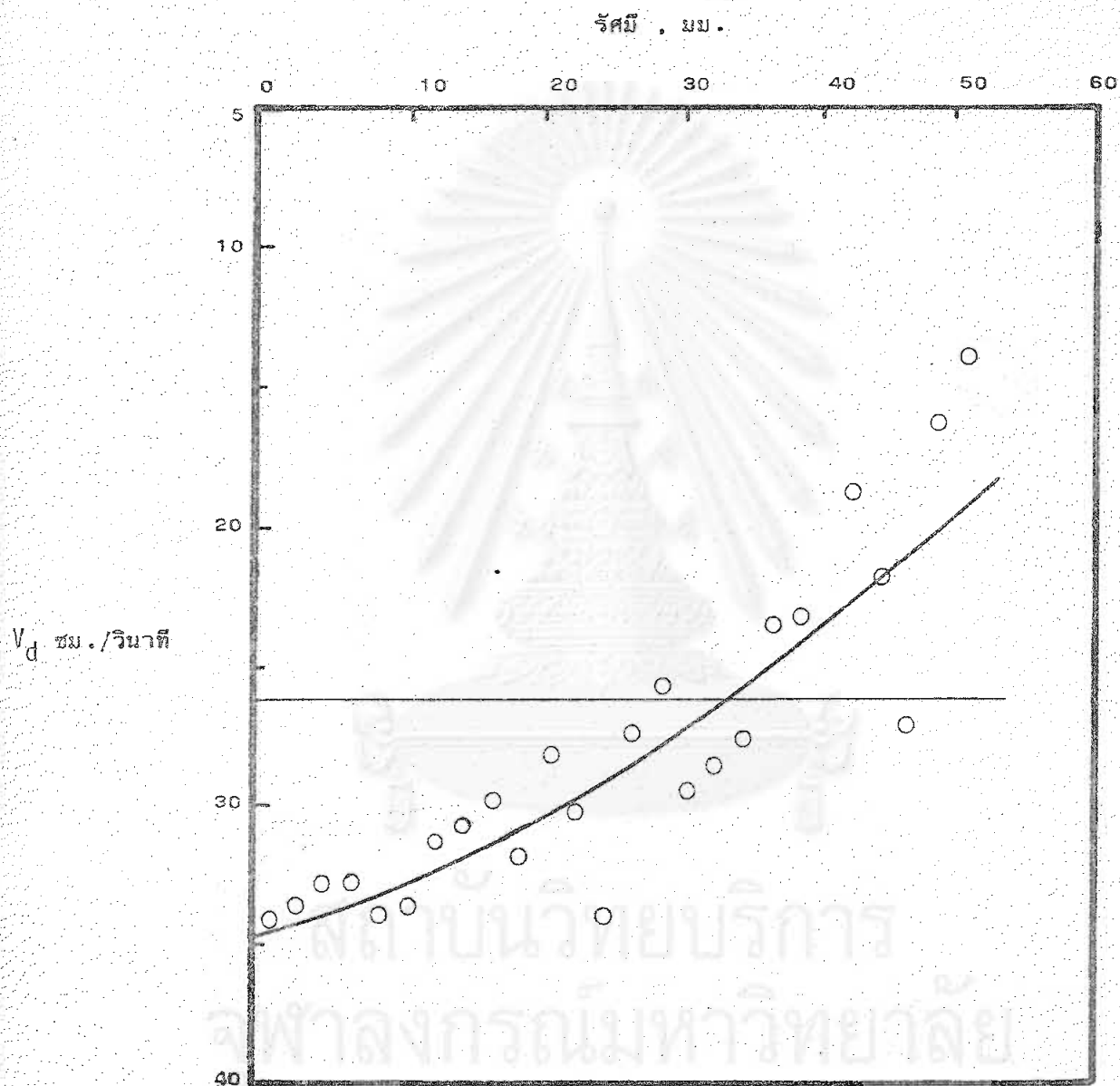


(8.6) ตัวกระจาย ข. 5.03 ซีซี/วินาที



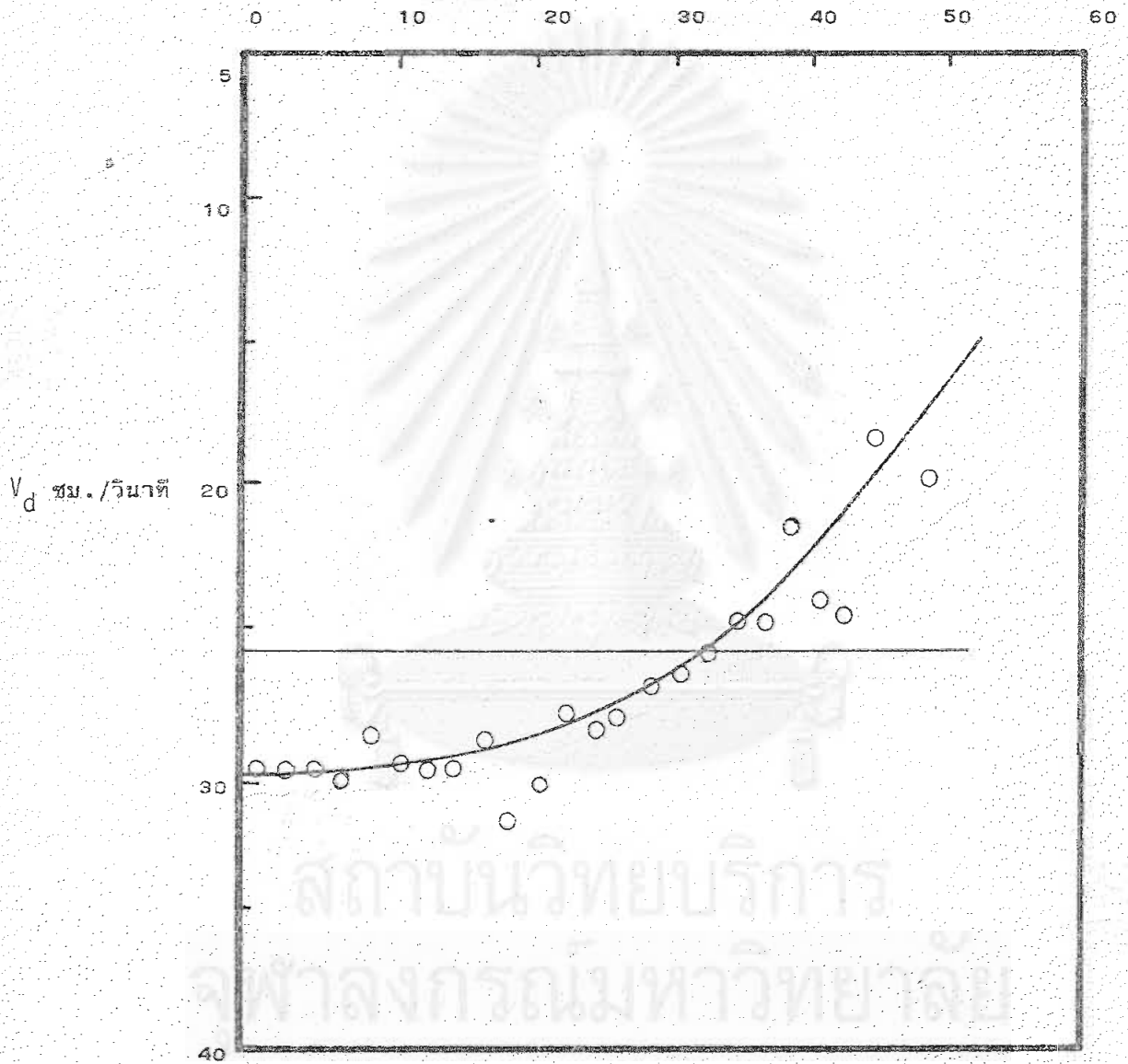


(8.7) ตัวกระจาย ค. 8.68 ซีซี/วินาที



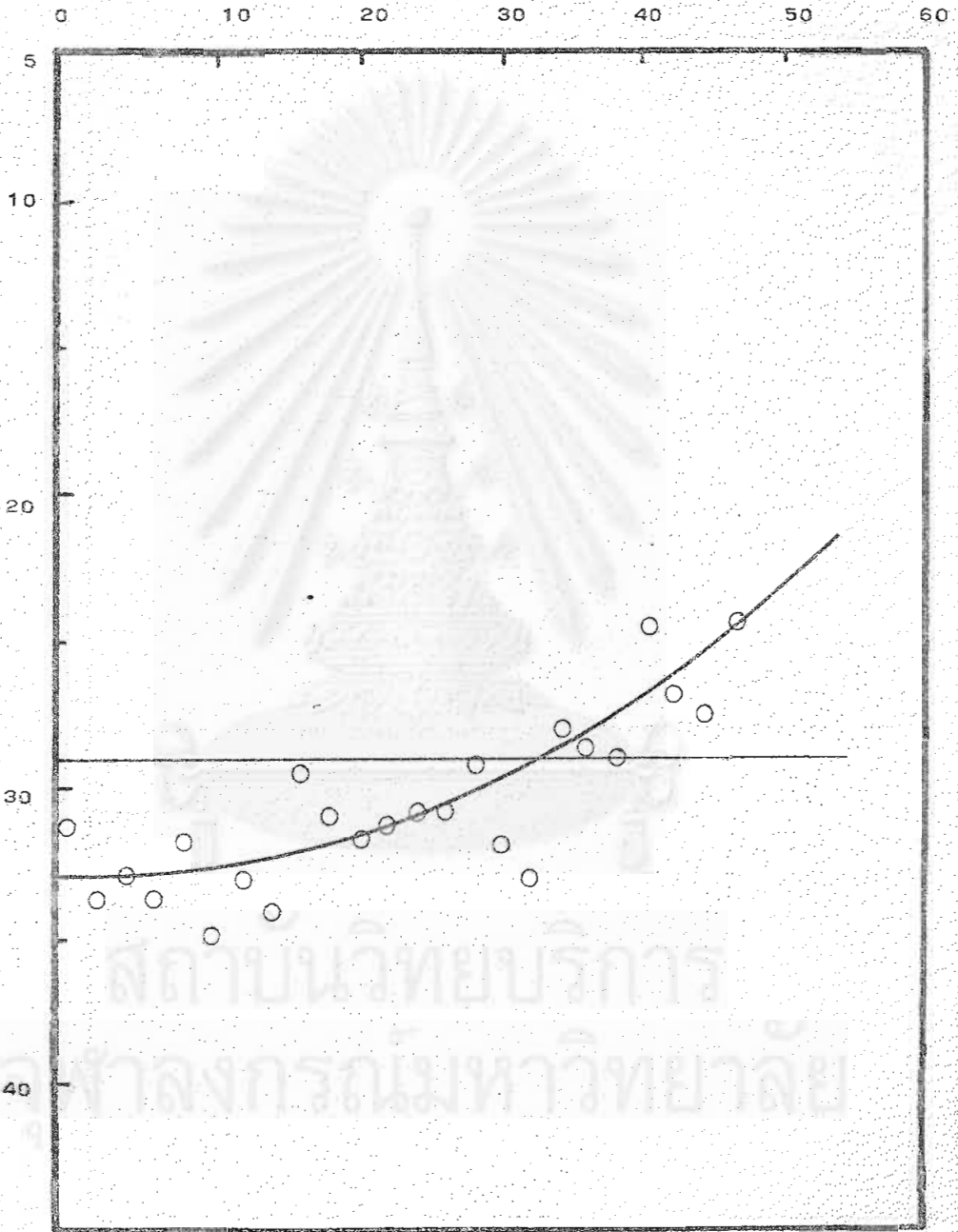
(8.8) ตัวกระจาย ค. 6.67 ซีซี/วินาที

รัศมี, ซม.

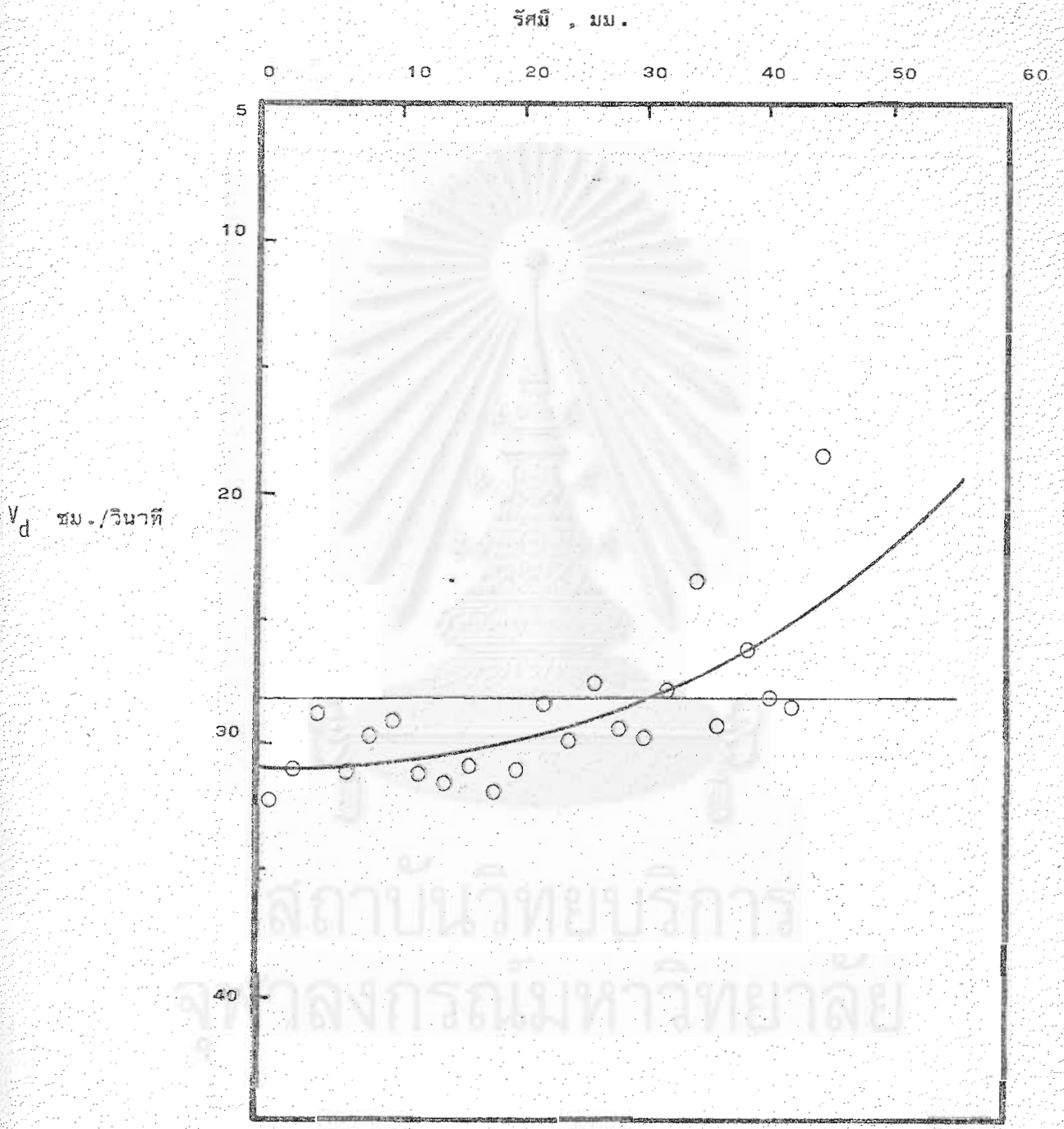


(8.9) ตัวกระจาย ค. 5.03 รัศมี/วินาที

รังสี, มม.

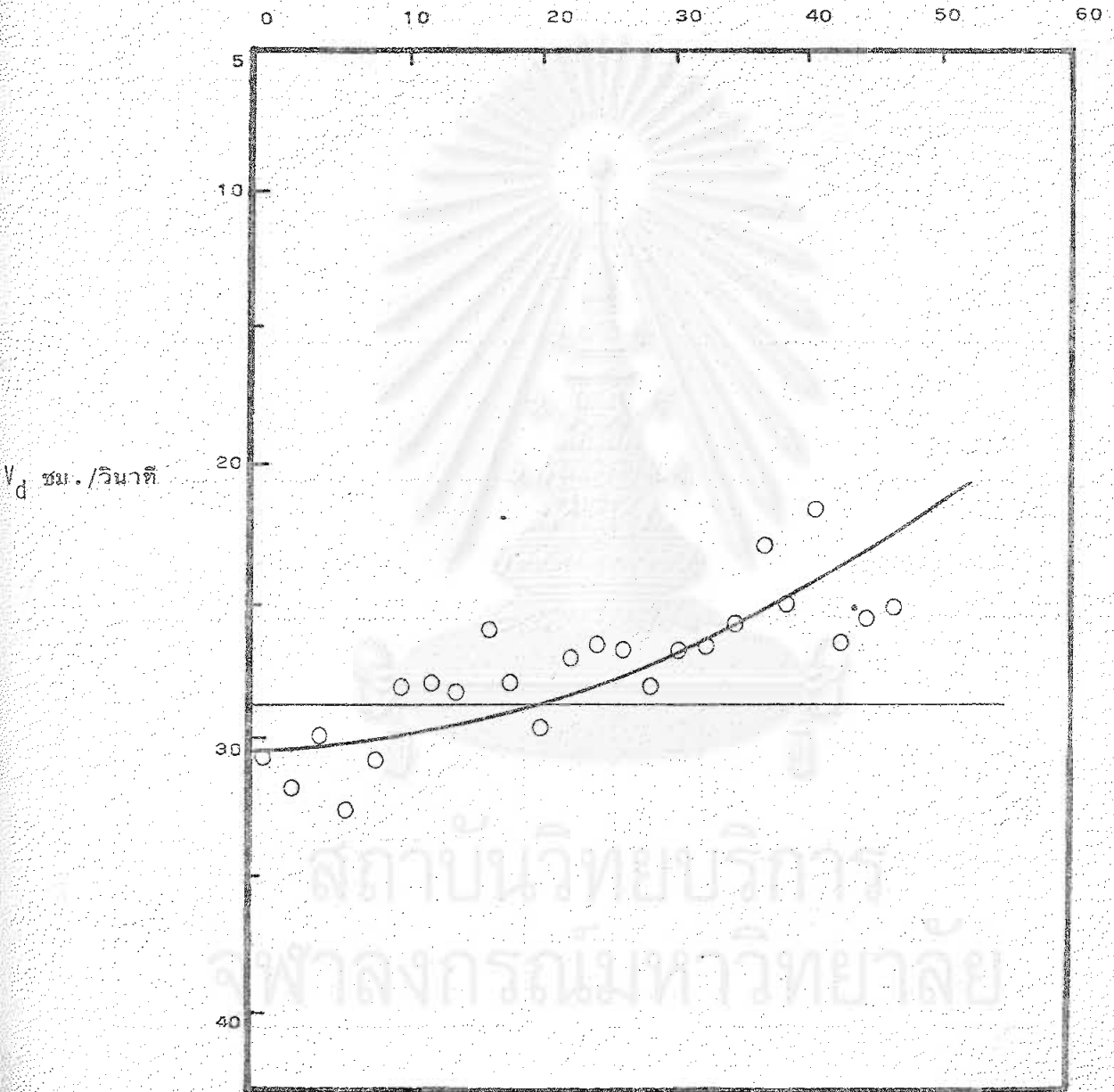


(2.1c) ตัวกระจาย ง. 8.68 ซีซี/วินาที

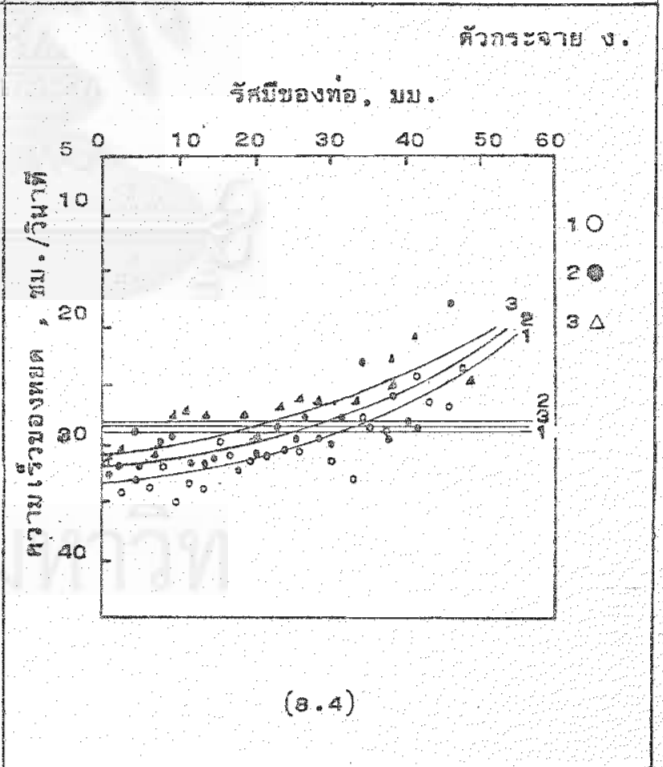
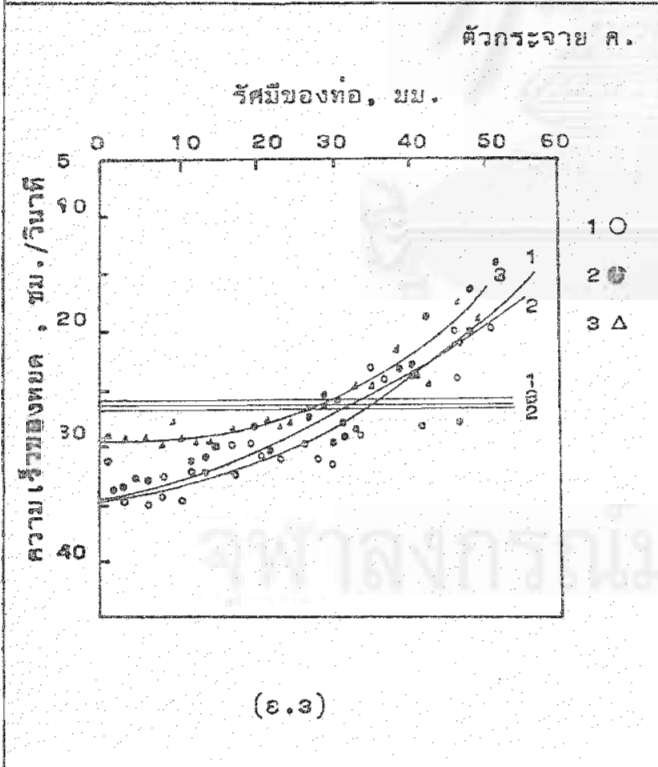
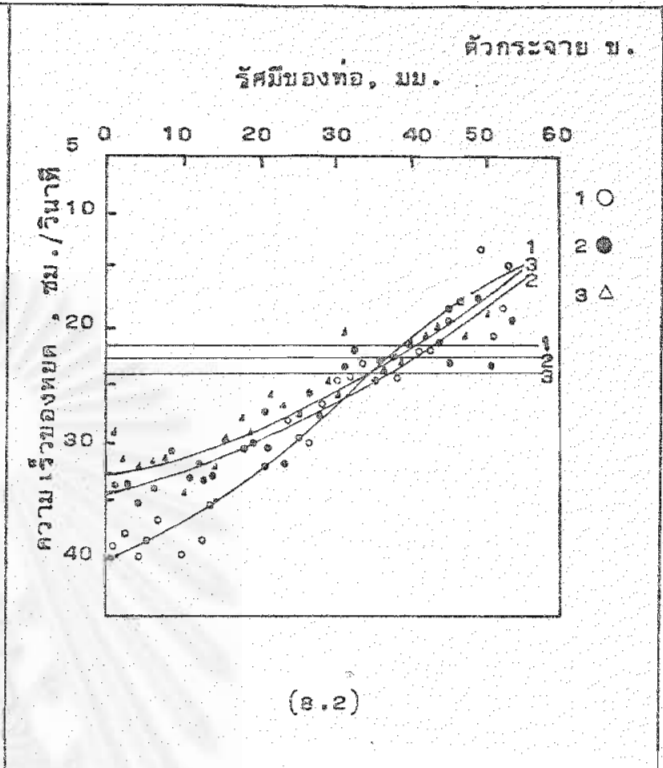
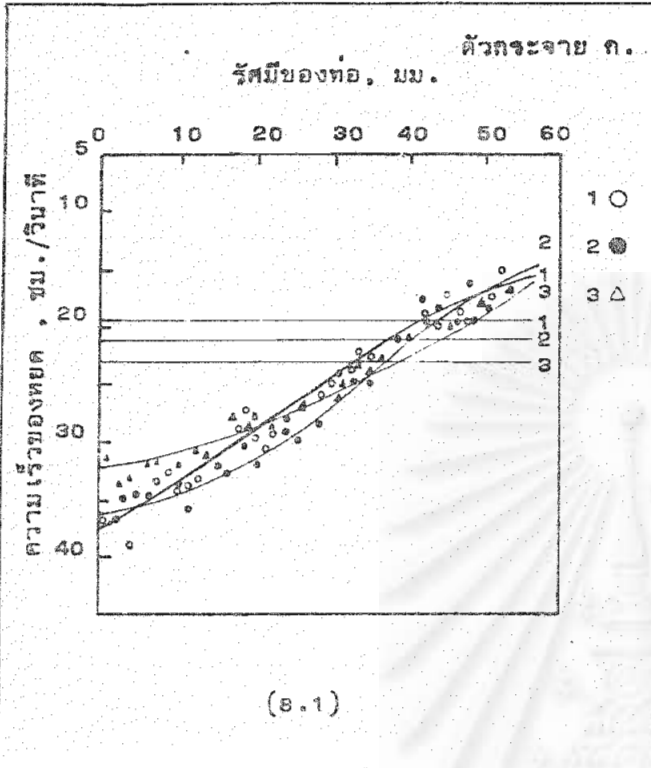


(8.11) ตัวกระจาย ง. 6.67 ซีซี/วินาที

รัศมี , มม.



(8.12) ตัวกระจาย 5.03 ซีซี/วินาที



รูปที่ 8-13

ความเร็วของหยดในท่อยาว (อัตราการใช้ของคาร์บอนเตตราคลอไรด์

1-8.68 ซม./วินาที , 2-6.67 ซม./วินาที , 3-5.03 ซม./วินาที

เส้นตรงหมายถึงความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณจากสมการของ Vigne และ

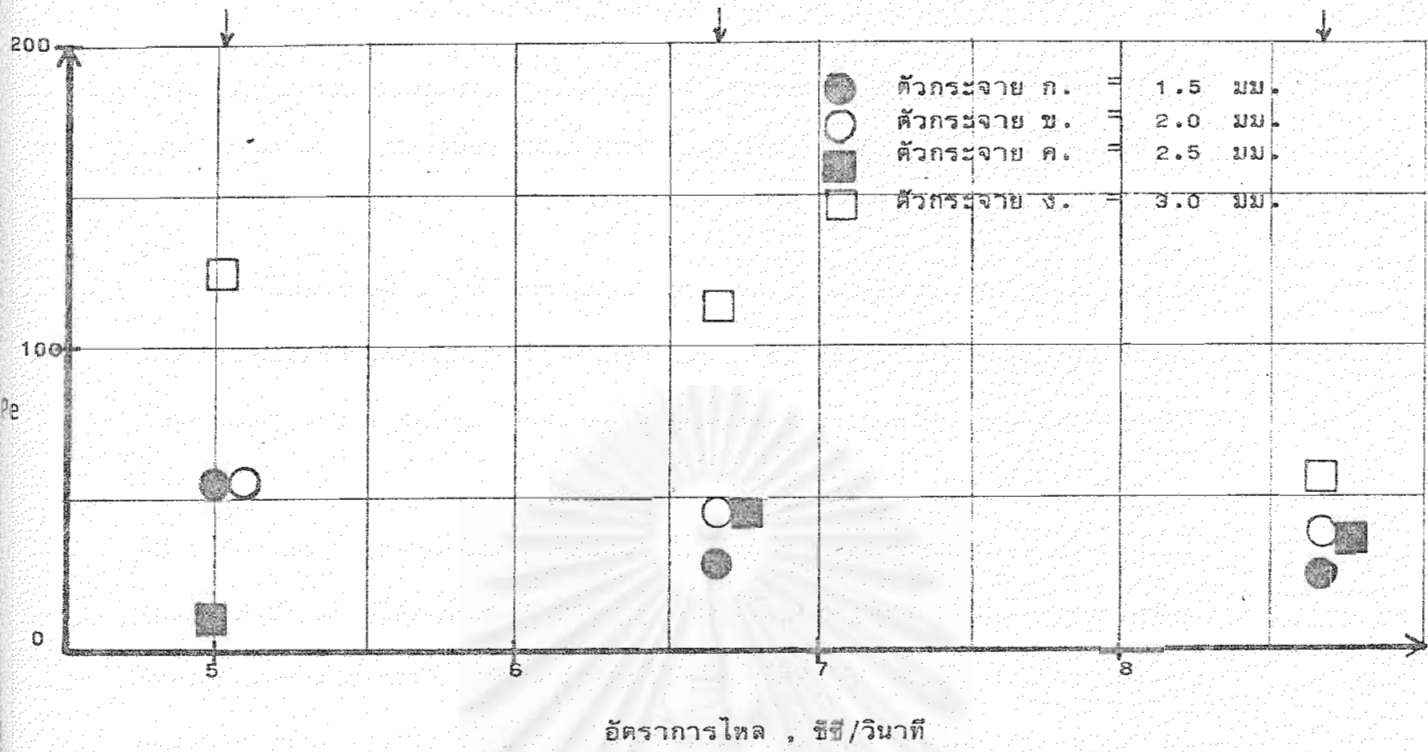
สมการของ Hu and Kinter โดยอาศัยขนาดของหยดแบบข้อเตอร์มัน)

ตารางที่ 5 - คำนวณความเร็วสุดท้ายของหยดโดยอาศัยขนาดตามการทดลองตัวกระจาย  
อัตราการใช้ 6.67 ซีซี/วินาที

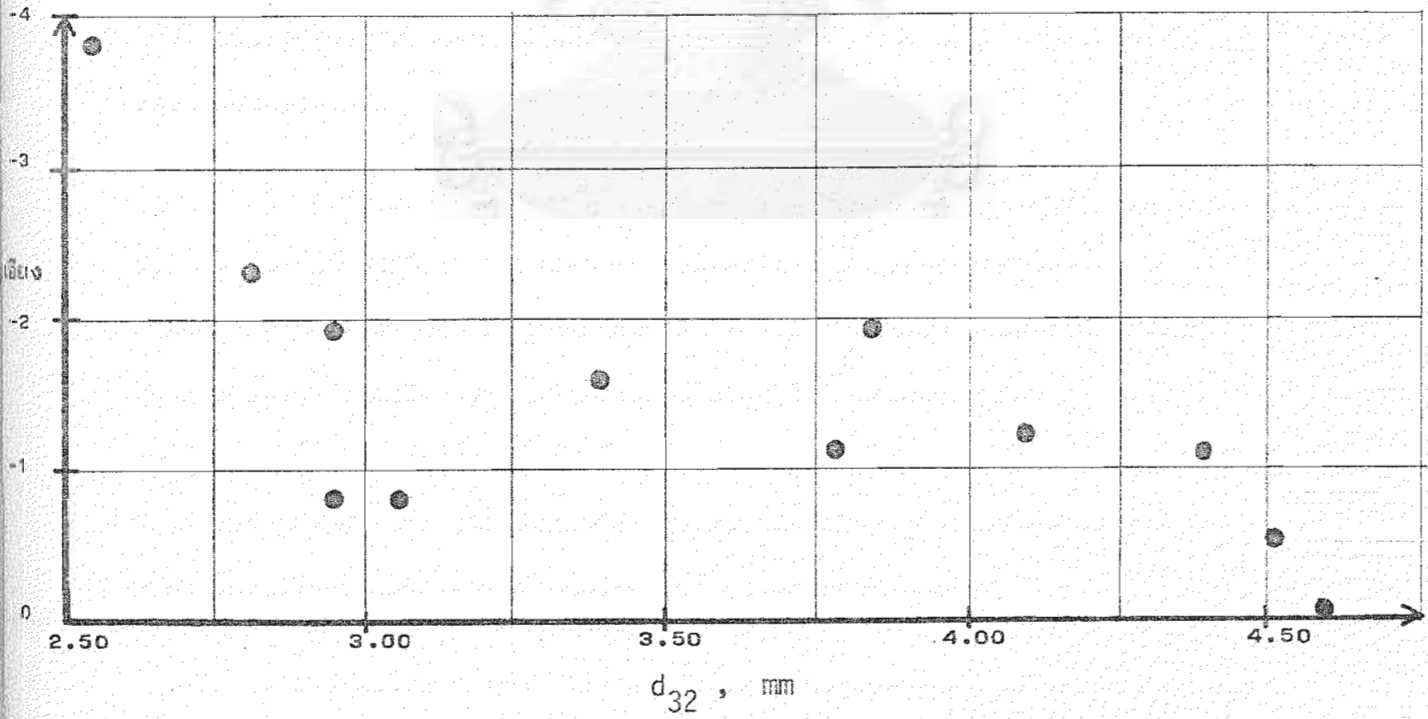
ขนาด	$d_F, \text{ cm}$	จำนวนหยด จาก 100	ปริมาตรของหยด จาก 100	$V_t, \text{ cm/s}$	เวลาการไหลผ่าน ระยะทาง 100 ซม. (วินาที)
1	0.33	3.0	1.79	20.47	4.88
2	0.35	7.4	4.97	20.94	4.78
3	0.37	12.1	9.07	21.29	4.70
4	0.39	14.3	11.91	21.47	4.66
5	0.41	16.2	14.91	21.51	4.65
6	0.43	13.7	13.87	21.40	4.67
7	0.45	8.7	9.65	21.11	4.74
8	0.47	9.1	11.00	20.65	4.84
9	0.49	5.2	6.84	20.01	5.00
10	0.51	3.1	4.41	19.18	5.21
11	0.53	4.1	6.31	18.15	5.51
12	0.55	1.8	2.98	16.92	5.91
13	0.57	1.3	2.31	15.47	6.46
		100.0	100.00		

หมายเหตุ: ในการคำนวณ  $V_t$  จากสมการ (5) ได้ใช้ตัวเลขดังนี้  $\mu_c = 0.008937 \text{ g/cm-s}$   
และ  $\gamma = 47.5 \text{ g/s}^2$





รูปที่ 9 เมอร์เพเคล็ด (Peclet Number) สำหรับเฟสหยดในคอลัมน์ (น้ำไม่ไหล)  
 ตามที่คำนวณจากความเร็วยของหยด



รูปที่ 10 อิทธิพลของขนาดของหยดต่อมุมเอียงของหยด

จากเส้นความเร็วของเฟสหยดตามเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อยาว จากรูปที่ 9 เห็นได้ว่าเบอร์เพเคล็คเกิน 24 เว้นแต่หนึ่งจุดซึ่งได้เบอร์เพเคล็คเป็น 10.5

ในตารางที่ 6 ได้ทำการเปรียบเทียบการผสมย้อนกลับของเฟสหยดในคอลัมน์แบบสเปรย์กับคอลัมน์แบบพัลสแผ่นรูปทูน จากตารางที่ 6 พบว่าระดับการผสมย้อนกลับในคอลัมน์แบบพัลสแผ่นรูปทูนมีระดับที่สูง ดังจะเห็นได้จากค่าของเบอร์เพเคล็ค โดยเฉพาะเมื่ออัตราการเขย่าแรงถึง 7 และ 8 ซ.ม./วินาที ในระดับการเขย่านั้นพบว่าเบอร์เพเคล็คมีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งแสดงว่าการผสมย้อนกลับเกิดขึ้นมากในเฟสหยด ตรงกันข้ามในคอลัมน์แบบท่อยาว (หรือสเปรย์) แบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าเบอร์เพเคล็คสูงมาก แสดงว่าเฟสหยดไหลในท่อยาวแบบทรงกระบอก เพราะสำหรับเบอร์เพเคล็คซึ่งเกิด 10 ถือว่าการผสมย้อนกลับมีน้อยมาก ยิ่งตัวเลข 30 ขึ้นไปสามารถถือได้ว่าเฟสหยดไหลผ่านท่อแบบทรงกระบอก ดังนั้นสำหรับระบบและอุปกรณ์ที่ได้ใช้ในโครงการวิจัยนี้ถือได้ว่า ถ้าหากใช้โมเดลตีวชั้นเป็นคูคาคณิตศาสตร์ที่จะอธิบายการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบสเปรย์ซึ่งมีลักษณะแบบนี้ ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการผสมย้อนกลับในเฟสหยดสำหรับงานออกแบบทางวิศวกรรม ดังนั้นผลการวิเคราะห์การไหลของเฟสหยดในโครงการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวปฏิบัติทางวิศวกรรม ในการคำนวณความสูงของคอลัมน์แบบสเปรย์

ในการวัดเบอร์เพเคล็คโดยวิธีการวัดเส้นความเร็วของหยด บัซสมุคิฐานมีอยู่สองประเด็น ประเด็นแรกคือไฮดรอลิกจะต้องสม่ำเสมอตลอดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ ประเด็นที่สองต้องถือว่าหยดลง (หรือขึ้น) ในแนวตั้งพอดี จะไม่มีการลงเฉียง ในประเด็นไฮดรอลิกของคอลัมน์จากตาเปล่ามีความรู้สึกว่าจะเฟสหยดจะไหลเข้าในส่วนกลางของท่อมากกว่ารอบนอกของท่อ แต่ไม่สามารถวัดได้ แต่ข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพเพื่อวัดความเร็วของหยด สามารถวัดมุมลงของหยด เมื่อเปรียบเทียบกับแนวตั้ง โดยข้อมูลดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าหยดต่าง ๆ มีแนวโน้มจะเลื่อนเข้ามาในส่วนกลางของคอลัมน์ หรือส่วนนอกของคอลัมน์

จากตัวเลขในตารางที่ 7 พบว่าสามในสี่ของจำนวนหยดที่ไหลขึ้นไปในท่อยาวมีแนวโน้มที่จะเข้าหาจุดกลางของคอลัมน์ อันนี้อาจจะหมายถึงว่าในที่สุดไฮดรอลิกของเฟสหยดจะสูงที่สุดตรงจุดกลางของคอลัมน์ แต่ทั้งนี้โครงการวิจัยนี้ไม่ได้หาไฮดรอลิกเลย ข้อสังเกตนี้สอดคล้อง

กับการที่เฟสหลักไหลตามหยดในบริ เวณกลางคอลัมน์ และไหลย้อนทิศทางของหยดในบริ เวณรอบนอก อันจะทำให้หยด เข้าหาจุดกลางของคอลัมน์ ถ้าจะกล่าวถึงอิทธิพลของปรากฏการณ์นี้ในคอลัมน์คือ เบอร์ เพ เคล็ดที่ทำได้จาก เส้นความเร็วของหยดบอกได้ว่าถ้าไฮลด์อัปของเฟสหยดสูงขึ้นในบริ เวณกลาง จะหมายความว่าในกรณีนี้ เบอร์ เพ เคล็ดจะสูงกว่าในกรณีที่สมมุติว่าไฮลด์อัปสม่ำเสมอ

จากตารางที่ 7 ไม่สามารถบอกได้อย่างแน่ชัดว่าค่าแห่งใดในคอลัมน์จะมีแนวโน้มให้หยด เข้าหาจุดกลางของคอลัมน์มากที่สุด แต่สิ่งที่พบคือในบริ เวณราว 16 ม.ม. จากจุดศูนย์กลางคอลัมน์จนถึง 26 ม.ม. จากศูนย์กลางของคอลัมน์ พบว่าหยดทำมุม เอียงกับแนวตั้งมาก เป็นพิเศษ อันอาจจะแสดงว่า SHEAR STRESS ในบริ เวณนี้สูง สิ่งที่เป็นไปได้คือ ในบริ เวณนี้เป็นเขตที่เฟสหลัก เปลี่ยนทิศทาง

จากตารางที่ 7 พบว่ามุม เอียงของหยดน้อยลง เมื่อหยดโคขึ้น ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 10. จากรูปที่ 10 สามารถบอกได้ว่าอิทธิพลของการไหลของ เฟสหลักต่อการจะพ่นน้ำหยดตาม กระแส มีแนวโน้มน้อยลง ดังนั้นถ้าหยดมีขนาดใหญ่แนวโน้มที่จะรวมตัวในจุดกลางของท่อยาว มีน้อยลง ในรูปที่ 11 ได้ใช้ตัวเลขจากตารางที่ 7 มาเขียนในลักษณะที่สามารถมองเห็น

ผลการศึกษาการไหลของเฟสหยดในท่อยาว สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ท่อยาวที่ใช้หรือคอลัมน์แบบสเปรย์ที่ใช้ ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 113 ม.ม. ยาว 133 ซม. มีคาร์บอนเตตราคลอไรด์ไหลเป็นหยดขนาดเฉลี่ย 2.5 ม.ม. ถึง 4.5 ม.ม. และในอัตราการไหลเร็วที่สุด 8.68 ซีซี/วินาที เป็นคอลัมน์ที่ทำงานแบบไฮลด์อัปต่ำ (ควายเร็วซูเปอร์ซีเชิลเท่ากับ 0.09 ซม./วินาที) ข้อแตกต่างข้อนี้สำคัญเพราะพบว่าบางคอลัมน์อาจจะทำงานในสภาพไฮลด์อัปสูงก็ได้ ในกรณีเช่นนี้ไฮโครไดนามิกส์ของคอลัมน์จะไม่เหมือนกันเลย

2. ขนาดของหยดและลักษณะการกระจายของขนาดของหยด สำหรับตัวกระจายและท่อยาวที่ใช้ สอดคล้องกับสมการของผลงานอื่นพอสมควร แต่อาจจะมีข้อแตกต่างอยู่บ้าง อย่างไรก็ตามความถี่การรวมตัวของหยดไม่เกิดขึ้น สามารถคำนวณขนาด เฉลี่ยของหยดได้โดยสมการสองแบบ แบบที่หนึ่งได้แก่สมการที่ได้มาจากการถ่ายภาพหยดในคอลัมน์แบบสเปรย์แบบที่สองได้แก่สมการที่ได้มาจากการวัดขนาดของหยดที่ยออกมาจากรูเดียว (SINGLE NOZZLE

EXPERIMENT) และไม่สามารถบอกได้ว่าแบบใดดีกว่า แต่สมการแบบนี้มีมาก ยากที่จะเลือกสมการที่เหมาะสม สำหรับสารคาร์บอนเตตราคลอไรด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้พบว่าสมการของ SKELLAND AND JOHNSON<sup>(5)</sup> จะดีที่สุด ซึ่งเป็นสมการที่ได้มาจากตัวกระจายรูเดียว

3. ความเร็วของหยดที่ไหลผ่านท่อที่น่าสนใจมาก เพราะจากการถ่ายภาพพบว่าหยดไหลผ่านท่อแบบพาราบอลอยด์ ในลักษณะเดียวกับสารเหลวที่สภาพการไหลเป็นลามินาร์ (LAMINAR FLOW) แต่หยดที่อยู่ในบริเวณติดผนังท่อไม่อยู่นิ่ง เพียงแต่มีความเร็วน้อยกว่ากลุ่มหยดที่อยู่ตรงกลางของท่อ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 12 ปรากฏการณ์นี้ไม่เคยมีการอ้างถึงแต่ก่อน เสร็จแล้ว เมื่อ เปรียบเทียบ เส้นความเร็วดังกล่าวกับความเร็วสุดท้ายของหยดขนาด  $d_{32}$  พบว่าความเร็วของหยดขนาด  $d_{32}$  ซึ่งเป็นขนาดเฉลี่ย มีค่าน้อยกว่าความเร็วสูงสุดตรงจุดศูนย์กลางของท่อ ข้อสังเกตดังกล่าวเหล่านี้อธิบายได้ในกรณีที่มีการไหลของเฟสหลักตามกลุ่มหยด เรียกว่า รีเซอร์คิวเลชัน (RECIRCULATION) ของเฟสหลัก โดยที่ตรงผนังการไหลของเฟสหลักจะย้อนทิศทางของเฟสหยด

4. จากการศึกษาทิศทางการไหลของหยดแต่ละหยด ตลอดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อยาวพบว่าหยดจำนวน 3 ใน 4 มีแนวโน้มจะไหลลงโดยทิศทางเข้าไปหาจุดศูนย์กลางของคอลัมน์ สำหรับหยดขนาดเล็ก (ในกรณีนี้ 2.5 - 4.0 ม.ม.) แนวโน้มนี้ชัดเจน สำหรับหยดขนาดใหญ่หน่อย (ในกรณีนี้ราว 4.5 ม.ม.) แนวโน้มนี้ไม่มี และลักษณะ เส้นความเร็วแบบรูปที่ 12 มีลักษณะที่แบนกว่า ตรงกันข้ามในกรณีที่หยดมีแนวโน้มจะมีทิศทางเข้าหาจุดกลางมาก พบว่าเส้นความเร็วแบบรูปที่ 12 มีลักษณะแหลมกว่า

5. จากรูปที่ 12 สามารถคำนวณระยะเวลาของหยดในแต่ละตำแหน่งภายในท่อจะไหลลงในคอลัมน์ในระยะเวลาเท่าใด ซึ่งทำให้เกิดการกระจายตัวภายในท่อคล้าย ๆ กับการผสมย้อนกลับ (BACKMIXING) ผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลแบบรูปที่ 12 มาคำนวณเบอร์เพเคล็ดซึ่งแสดงถึงความเข้มข้นของการผสมย้อนกลับ และพบว่าเบอร์เพเคล็ดสูงมาก ซึ่งแสดงว่าในทางวิศวกรรมศาสตร์ถือว่าเป็นการไหลทรงกระบอกได้ แต่ตั้งนี้การไปยึด เส้นความเร็วแบบรูปที่ 12 มาคำนวณเบอร์เพเคล็ดอาจจะไม่ถูกต้องนัก เพราะไม่ทราบว่าไฮดรอลิคตลอดแนว เส้นผ่าศูนย์กลาง เท่ากันหรือเปล่าและยังได้พบว่าหยดมีแนวโน้มจะ เข้ามาอยู่ในส่วนกลางของท่อ แต่ในกรณีเช่นนี้ที่ว่าหยดมีแนวโน้มจะเข้ามาในส่วนกลางของท่อ จะทำให้เบอร์เพเคล็ดยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น ฉะนั้นสามารถสรุปได้ว่าในทางวิศวกรรมการถือว่าการไหลแบบทรงกระบอก เป็นข้อสมมุติที่ถูกต้องแล้วสำหรับ



ตารางที่ 6 - เปรียบเทียบการผสมย้อนกลับของเฟสหยดในคอลัมน์แบบสเปรย์ และคอลัมน์แบบ  
ฟิลล์แผ่นรูปทรงแท่ง

ประเภท ของ คอลัมน์	ขนาดของ คอลัมน์	ระบบที่ใช้	เบอร์ เพ เซลล์สำหรับ เฟสหยด	
			การเขย่า A f	Pe
ฟิลล์แผ่น รูปทรงแท่ง (10)	- เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม.  - ยาว 2 เมตร  - แผ่นรูปทรงแท่ง ขนาด 2 ซม.	- $\text{CCl}_4 - \text{H}_2\text{O}$	3 cm/s	30
		- $\text{CCl}_4$ เป็นเฟส หยด	4 cm/s	15
		- อัตราการไหล ของเฟสหยด:	5 cm/s	8
		1 l/h	6 cm/s	4
		- อัตราการไหล ของน้ำ:	7 cm/s	3
		40 l/h	8 cm/s	3
สเปรย์ (งานวิจัยนี้)	- เส้นผ่าศูนย์กลาง 11.2 ซม.  - ยาว 133 ซม.  - ตัวกระจายมีรู ขนาด 2 ซม.  (ตัวกระจาย ข)	- $\text{CCl}_4 - \text{H}_2\text{O}$	อัตราการไหล ของ $\text{CCl}_4$	Pe
		- $\text{CCl}_4$ เป็นเฟส หยด		
		- อัตราการไหล ของน้ำ:	18.18 l/h	55
		0 l/h	24.00 l/h	44
			31.25 l/h	24

ตารางที่ 7 - มุม เอียงระหว่างทิศทางของหยดกับแนวตั้ง (นับเป็นองศาและสัญลักษณ์ลบ หมายถึงว่า ทิศทางของหยด เข้าหาจุดศูนย์กลางของคอลัมน์ ส่วนตัวเลขใน วงเล็บหมายถึง จำนวนหยดที่ศึกษาในตำแหน่งของคอลัมน์นั้น ๆ)

I	0 - 10 ม.ม.	จากขอบนอก	IV	30 - 40 ม.ม.	จากขอบนอก
II	10 - 20 ม.ม.	จากขอบนอก	V	40 - 50 ม.ม.	จากขอบนอก
III	20 - 30 ม.ม.	จากขอบนอก	VI	51 - 56 ม.ม.	จากขอบนอก

0 56 mm

I      II      III      IV      V      VI       $d_{32}$  mm

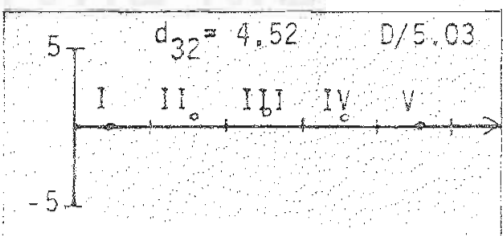
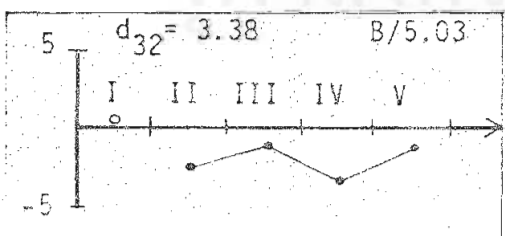
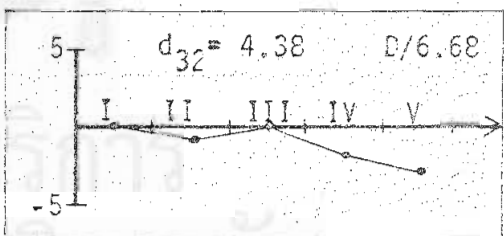
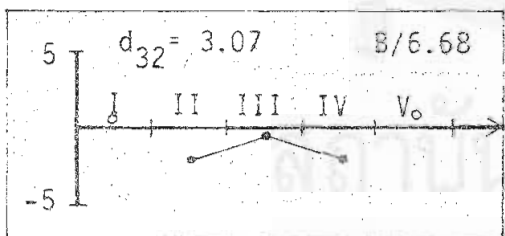
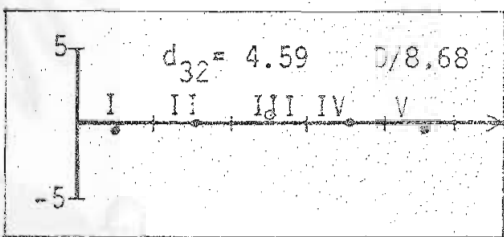
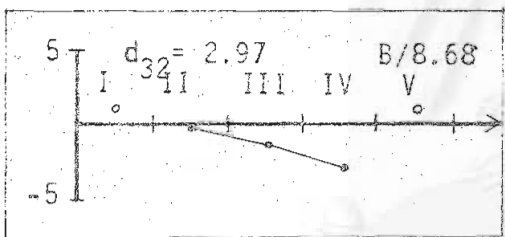
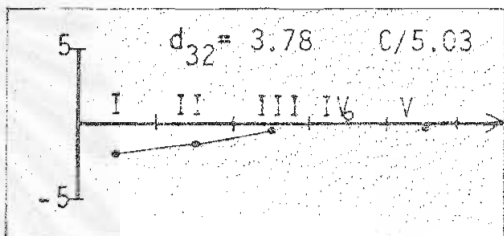
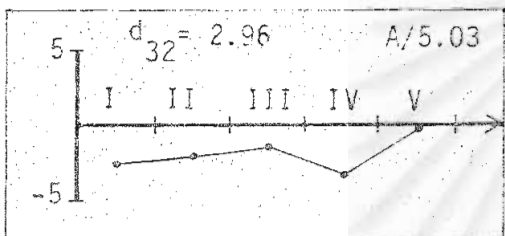
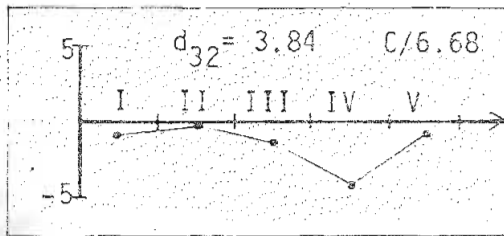
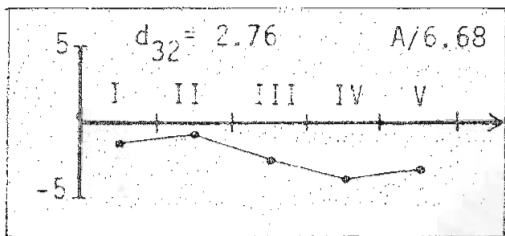
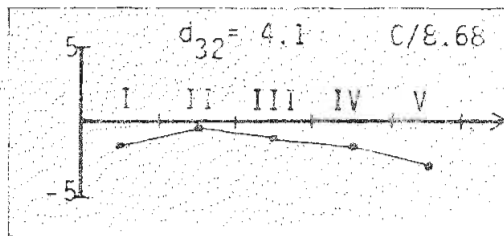
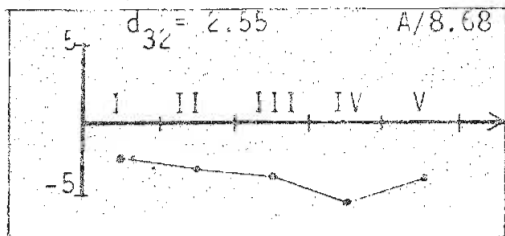
A							
8.68 cc/s	-2.54 (51)	-3.36 (56)	-3.43 (56)	-5.57 (60)	-3.88 (38)	-1.13 (9)	2.55
A							
6.68 cc/s	-1.84 (58)	-0.57 (60)	-2.30 (62)	-3.56 (52)	-3.40 (32)	-3.07 (3)	2.76
A							
5.03 cc/s	-2.68 (68)	-2.01 (55)	-1.69 (68)	-2.90 (43)	-0.27 (8)	-3.10 (1)	2.96
B							
8.68 cc/s	+1.10 (25)	-0.60 (21)	-1.81 (31)	-3.75 (47)	+1.20 (25)	+4.45 (5)	2.97
B							
6.67 cc/s	+0.10 (27)	-2.26 (54)	-0.70 (46)	-1.96 (43)	+1.01 (31)	-3.97 (6)	3.07
B							
5.03 cc/s	+0.39 (33)	-2.60 (52)	-1.23 (57)	-3.16 (35)	-1.16 (9)	-	3.38

0

56 mm

I II III IV V VI

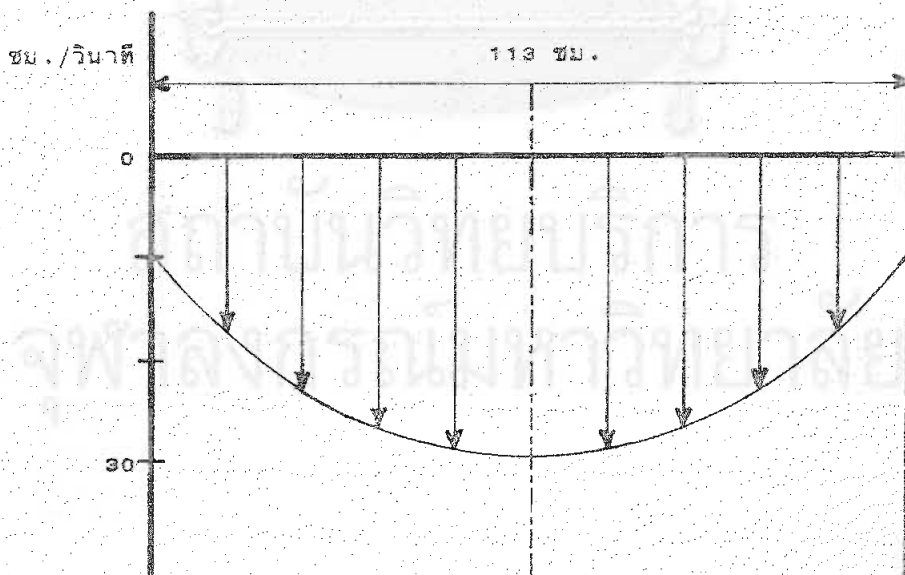
C							
8.68 cc/s	-1.47 (46)	-0.86 (68)	-1.18 (78)	-1.43 (62)	-1.42 (44)	-2.50 (7)	4.10
C							
6.67 cc/s	-1.03 (44)	-0.35 (48)	-2.20 (51)	-4.84 (42)	-1.17 (19)	-6.10 (1)	3.84
C							
5.03 cc/s	-2.31 (48)	-1.78 (59)	-0.66 (69)	+0.05 (40)	-0.96 (14)	-	3.78
D							
8.68 cc/s	-0.18 (53)	-0.01 (50)	+0.58 (67)	-0.43 (38)	-0.21 (14)	-	4.59
D							
6.67 cc/s	-0.01 (51)	-1.06 (69)	-0.07 (70)	-2.01 (43)	-2.35 (9)	-	4.38
D							
5.03 cc/s	0.00 (43)	+1.14 (64)	+1.65 (58)	+0.72 (61)	-1.01 (11)	-	4.52





ระบบที่ใช้กันในโครงการวิจัยนี้ การจะถือการไหลของเฟสหยดเป็นพาราบอลอยด์เป็นเรื่องที่ถูกต้องตามหลัก

6. จากรูปที่ 1.1 ที่แสดงถึงมุมเอียงของหยด พบว่าในการทดลองที่ใช้ตัวกระจาย ก กกับ ข ทุกครั้ง และในการทดลองที่ใช้ตัวกระจาย ค 1 ครั้ง พบว่าในบริเวณระหว่าง 16 ม.ม. ถึง 26 ม.ม. จากจุดศูนย์กลาง (จากจุดศูนย์กลางออกไปหนึ่งระยะทางเท่ากับ 56 ม.ม.) มุมเอียงของหยดในทิศทางที่เข้าหาจุดกลางของท่อ มีค่าสูงอยู่เสมออันแสดงว่ามีบางสิ่งภายในท่อที่ทำให้ เป็นเช่นนั้น เช่นบริเวณดังกล่าวอาจจะเป็นบริเวณที่ทิศทางของเฟสหลักเปลี่ยน: ส่วนกลางลงตามหยด ส่วนติดผนังขึ้นสวนทาง ซึ่งทราบกันอยู่แล้วว่าปรากฏการณ์รีเซอร์คิวเลชันมีจริง แต่สิ่งที่น่าสนใจได้แก่การที่จุดดังกล่าวที่เราคิดว่าเกิดการเปลี่ยนในทิศทาง การไหลของเฟสหลัก เป็นจุดที่อยู่คงที่เมื่อเราเปลี่ยนอัตราการไหล ประเด็นที่สืบเนื่องได้แก่การตั้งคำถามว่าตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อหรือเปล่า ซึ่งคำถามนี้ไม่สามารถตอบได้ในโครงการวิจัยนี้



รูปที่ 1.2 ความเร็วของ เฟสหยดในคอลัมน์จากผลการฉายภาพหยด

## บทที่ 4

## การแสวงหาคูกักตาดนิคศาสตร์สำหรับคอลัมน์แบบสเปรย์

4.1 บทนำ การทำงานของคอลัมน์แบบสเปรย์สามารถแบ่งได้เป็นสองสภาวะ สภาวะแรกได้แก่ สภาวะไฮลด์อัปค่า สภาวะที่สองได้แก่ไฮลด์อัปเกือบสูงสุด สภาวะที่สองภาษาอังกฤษเรียกว่า เด็นส์ แพคิง (DENSE PACKING) เป็นสภาวะที่หยดอยู่ติดกันตลอดความยาวของคอลัมน์ และใช้ค่า เปล่าไม่สามารถของผ่านท่อแก้วได้

ในแง่ของไฮโดรไดนามิกส์ของคอลัมน์ (2, 11, 12, 13, 14, 15, 16) สามารถสรุปความรู้ความ เข้าใจ เกี่ยวกับคอลัมน์แบบสเปรย์ได้ดังนี้

สำหรับสภาวะการทำงานของสเปรย์คอลัมน์แบบไฮลด์อัปค่าสามารถสรุปความ เข้าใจ ที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้อย่างแสดงไว้ในรูปที่ 13 ประการแรกได้มีการสังเกตว่า เฟสหยดไหลขึ้น (หรือ ลงสุดแล้วแต่ความแตกต่างในความหนาแน่น) ในลักษณะที่มีหยดจำนวนมากในส่วนกลางของคอลัมน์ โดยเป็นการสังเกตที่ใช้ค่า เปล่า ไม่เคยมีการวัดไฮลด์อัปตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง การผสมย้อนกลับของหยดไม่เกิดขึ้นแต่สิ่งที่เกิดขึ้นคือการผสมไปข้างหน้า (FORWARD MIXING) ซึ่งการผสมไปข้างหน้าดังที่ว่ามีเกิดขึ้นจากข้อแตกต่างในขนาดของหยดข้อสังเกตนี้ไม่มีหลักฐานยืนยันอย่างแน่ชัด และวิศวกรผู้ออกแบบ เครื่องแบบนี้มักจะถือว่าสามารถถือได้ว่า เฟสหยดไหลผ่านคอลัมน์แบบสเปรย์ในลักษณะทรงกระบอกอยู่เสมอ จุดที่สามที่สามารถกล่าวได้เกี่ยวกับเฟสหยดได้แก่การที่หยดทุกหยดมีคุณสมบัติในการพ่นาเฟสหลักติด เป็นทางตามหยดได้ จะติดตามมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระบบต่าง ๆ ที่ใช้ ในเรื่องนี้ได้มีผู้ศึกษาการพ่นาแบบนี้โดยอาศัยการศึกษาาระดับหยด และพบว่าสิ่งนี้เกิดขึ้นจริงสำหรับกลุ่มหยด เช่นในคอลัมน์แบบสเปรย์ได้มีผู้ค้นพบว่าเฟสหลักจะไหลตามกลุ่มหยด จนสามารถวัดความเร็วของ เฟสหลักในคอลัมน์แบบสเปรย์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 13 หมายความว่า เฟสจะไหลตามหยดในส่วนกลางของคอลัมน์ และไหลกลับในบริเวณด้านนอกของคอลัมน์ ทำให้เกิดการผสมแบบรีเวอร์คิว เลชันใน เฟสหลัก วิธีหนึ่งที่ใช้ในการวัดความเร็วของเฟสหลักได้แก่การฉีดสีเข้าไปในคอลัมน์และถ่ายภาพเมื่อระยะหนึ่งค่านไป<sup>(2)</sup> และจากการช้อนหลายภาพสามารถได้เส้นความเร็วแบบในรูปที่ 13 แต่จากการศึกษาคอลัมน์แบบนาเบิล<sup>(17)</sup> ที่เป็นคอลัมน์แบบสเปรย์ทุกอย่าง แต่เฟสหยดเป็นอากาศ พบว่าเส้นความเร็วของเฟสหลักดังแสดงไว้ในรูป 13 เป็นความเร็วเฉลี่ย เพราะสภาพในคอลัมน์ เป็นสภาพปั่นป่วน (TURBULENT) ดังนั้นสำหรับ

ข้อสังเกตที่น่าสนใจได้แก่การที่ความเร็วของหยดมิได้ขึ้นกับขนาดของหยด แต่กลับขึ้นอยู่กับตำแหน่งของหยดในคอลัมน์ และรูปลักษณะของพาราบอลอยด์ดังกล่าวแหลมข้างไม่แหลมข้างสุดแล้วแต่ขนาดของหยดและอัตราการไหลของสารอินทรีย์ ประการที่สองได้คำนวณหาเบอร์เพเคล็คสำหรับ เฟสหยดและพบว่าเบอร์เพเคล็คมีค่าสูง ตั้งแต่ 10 ขึ้นไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในทางวิศวกรรมสามารถถือได้ว่า เฟสหยดไหลแบบทรงกระบอกได้ แต่ทั้งนี้ไม้อาจจะบอกได้ว่า เบอร์เพเคล็คจะสูงเสมอไปสำหรับระบบอื่น โดยเฉพาะสำหรับระบบที่ความแตกต่างในความหนาแน่นระหว่างเฟสทั้งสองมีค่าน้อย ประการที่สองสิ่งที่พบคือหยดมีแนวโน้มจะเข้าหาจุดกลางของคอลัมน์เมื่อไหลผ่านคอลัมน์ ความหมายของปรากฏการณ์นี้อาจจะอธิบายได้ว่าหยดในจุดศูนย์กลางของคอลัมน์มีมากกว่าในบริเวณรอบนอก และตำแหน่งที่ทำการถ่ายภาพไม่ห่างเพียงพอจากตัวกระจายหยด ทำให้การวัดยังคงอยู่ในเกณฑ์ไม่คงที่ ประการที่สามพบว่าในจุด ๆ หนึ่งในคอลัมน์ซึ่งอยู่ในตำแหน่ง 16 ถึง 26 ม.ม. จากจุดศูนย์กลางของคอลัมน์ มีปรากฏการณ์ในคอลัมน์ที่ทำให้หยดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าประมาณ 4 ม.ม. เข้าไปหาจุดศูนย์กลางของคอลัมน์อย่างเห็นได้ชัด เป็นการชักชวนให้คิดว่าจุดในคอลัมน์ที่เป็นจุดที่ทิศทางของเฟสหลักเปลี่ยน อาจจะ เป็นจุดที่ถูกกำหนดด้วยขนาดของคอลัมน์มากกว่าสภาพการอื่น ๆ

#### 4.2 เสนอตุ๊กตาคณิตศาสตร์สำหรับสภาวะ โอลด์อ์ปต์ว่ในคอลัมน์แบบสเปรย์

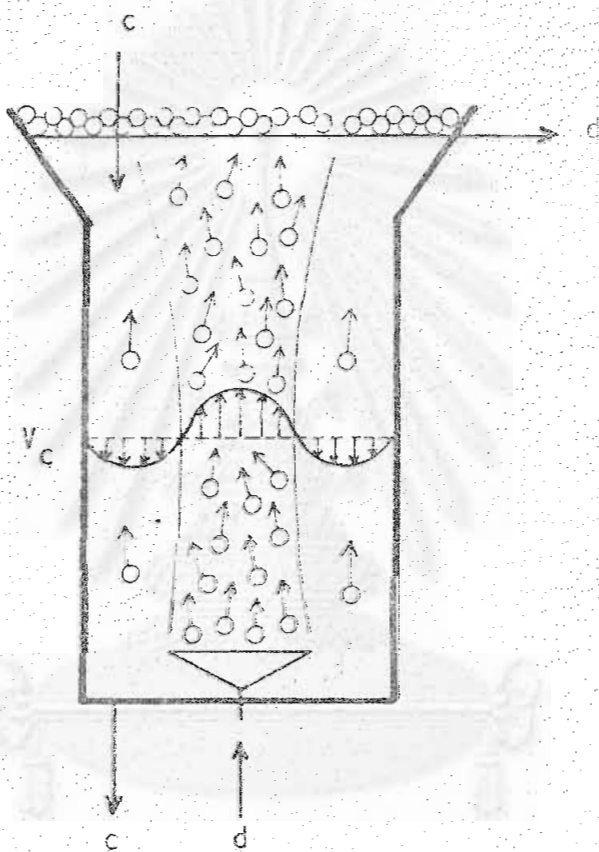
ในรูปที่ 14 ได้เสนอลักษณะของไฮโดรไดนามิกส์ของเฟสทั้งสองในคอลัมน์แบบสเปรย์ จากประวัติเดิมการคำนวณคอลัมน์แบบต่าง ๆ รวมถึงคอลัมน์แบบสเปรย์ อาศัยรูปแบบของรูปที่ 14.3 ที่ถือว่าการไหลของเฟสทั้งสอง เป็นการไหลทรงกระบอก และภายหลังพบว่าไม่เป็นเช่นนั้น ต่อมาได้มีการคิดค้นตุ๊กตาคณิตศาสตร์ที่เรียกว่าตีฟิวชันโมเดล ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 14.1 และที่เป็นที่นิยมใช้กับคอลัมน์อื่น ๆ จนกระทั่งทุกวันนี้ แต่สำหรับคอลัมน์แบบสเปรย์นั้นถือว่าการไหลของเฟสหยดเป็นการไหลแบบทรงกระบอกดังแสดงไว้ในรูปที่ 14.2 และจนถึงทุกวันนี้ยังเป็นที่ยอมรับใช้ในการคำนวณคอลัมน์แบบสเปรย์อยู่ บางที่สามารถเขียนตุ๊กตาคณิตศาสตร์ดังเสนอ ในรูปที่ 14.2 เป็นตุ๊กตาคณิตศาสตร์ที่อาศัยหลักการของถึงกวนจำนวนหลายถึง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 14.4 แต่ตุ๊กตาคณิตศาสตร์ในรูปที่ 14.2 และรูปที่ 14.4 ถึงแม้จะดูไม่คล้ายกันแต่ผลสามารถทำให้เหมือนได้ เช่นถ้าหากจำนวนถึงกวนมีมาก จะกลายเป็นตุ๊กตาคณิตศาสตร์แบบในรูปที่ 14.2 ได้ จากรูปที่ 14.4 สามารถเขียนไฮโดรไดนามิกส์ให้ละเอียดกว่าดังที่เสนอไว้ในรูปที่ 14.5

เมื่อมาศึกษาคอลัมน์แบบสเปรย์ที่ทำงานในระดับไฮลด์อัปดาวน์นี้ โดยใช้ตุ๊กตาคณิตศาสตร์คิฟิซัน พบว่า เบอร์ เพ เคิลด์ค่าซึ่งแสดงว่าการผสมย้อนกลับใน เฟสหลักสูงมาก แต่ที่แท้จริง การผสมย้อนกลับดังกล่าว เกิดขึ้นจากรี เซอร์คิว เลชันมิได้ เกิดขึ้นจากการปั่นป่วนที่สม่ำเสมอในคอลัมน์ อันที่จริงแล้วข้อสมมุติฐานหลักของตุ๊กตาคณิตศาสตร์คิฟิซันไม่สามารถรับการที่เฟสหลักมีรี เซอร์คิว เลชันได้ แต่วิศวกรผู้จะต้องคำนวณคอลัมน์แบบนี้พบว่าตุ๊กตาคณิตศาสตร์คิฟิซันนี้ดีแล้ว และเหมาะสมแก่การนำมาใช้

เมื่อจะขยาย เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์โดยรักษาสภาพอื่นคงที่ พบว่าการปั่นป่วนในคอลัมน์สูงขึ้น<sup>(11)</sup> ซึ่งข้อนี้สอดคล้องกับคอลัมน์แบบบา เบล<sup>(17)</sup> ส่วนสำหรับ เฟสหยดไม่มีข้อมูลเลย เพียงแต่คาดว่า การขยาย เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์คงจะไม่มีอิทธิพลต่อวิธีการไหลของหยด แต่โดยทั่วไปแล้ว เมื่อขยาย เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ไม่มีการทราบกันอย่างแน่นอนว่าอะไร เปลี่ยนแปลงไป เพียงแต่รู้ว่า เบอร์ เพ เคิลด์ค่าลงอันแสดงว่าการปั่นป่วนในเฟสหลักสูงขึ้น

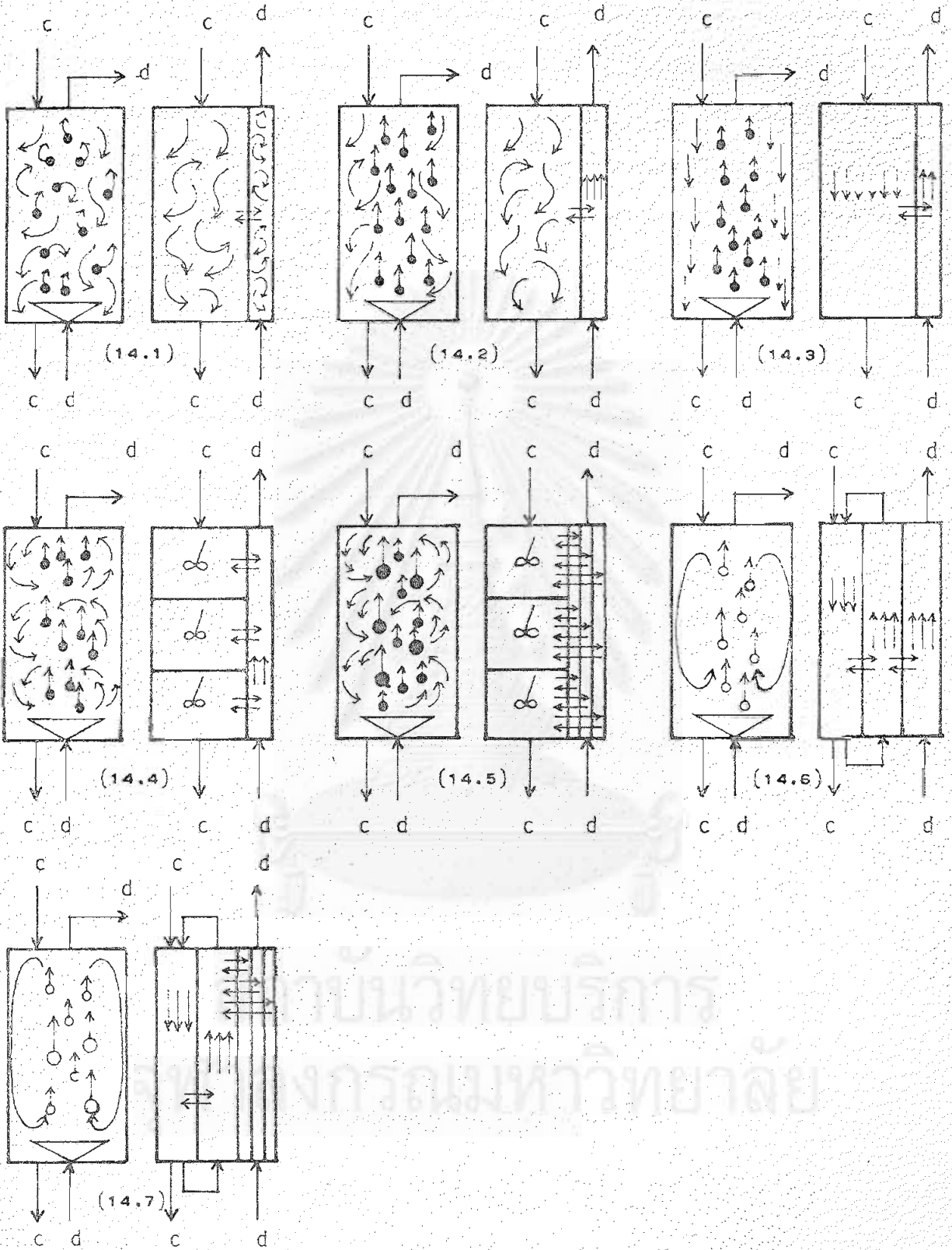
สำหรับสภาวะการทำงานของสเปรย์คอลัมน์แบบไฮลด์อัปสูง หรือที่เรียกว่า เคนส์ แพคิง มีการศึกษาสภาวะการทำงานนี้ไม่มากนัก แต่สรุปความรู้ดังนี้คือ การผสมย้อนกลับซึ่งจะเกิดจากรี เซอร์คิว เลชันก็ดี หรือจากการปั่นป่วนโดยหยดที่ไหลผ่านก็ดี มีแนว ไนซ์ที่จะน้อยกว่าคอลัมน์แบบสเปรย์ที่ใช้ไฮลด์อัปดาวน์ ทั้งนี้มีการอธิบายว่ากลุ่มหยดเองซึ่งมี เติมคอลัมน์ทำหน้าที่ ระงับรี เซอร์คิว เลชันในเฟสหลัก ทำให้ เบอร์ เพ เคิลด์ค่าสำหรับ เฟสหลักสูงขึ้น ข้อที่สองพบว่า การผสมย้อนกลับของเฟสหยดมีอยู่มาก ไม่เหมือนกับตรงสภาพการไฮลด์อัปดาวน์ และเมื่อขยายเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์พบว่า การผสมย้อนกลับมีมากขึ้นในเฟสหลัก และอยู่คงที่ในเฟสหยด ดังนั้นถ้า เปรียบ เทียบทั้งสองสภาวะการในสเปรย์คอลัมน์ เป็นที่เข้าใจว่าตุ๊กตาคณิตศาสตร์คิฟิซันเหมาะสมสำหรับสเปรย์คอลัมน์ที่ทำงานในช่วงไฮลด์อัปสูง (แบบ เคนส์ แพคิง) มากกว่าในช่วงไฮลด์อัปดาวน์

เมื่อสรุปความรู้ใหม่ที่ค้นพบในโครงการวิจัยนี้ บอกได้ว่าการไหลของเฟสหยดในคอลัมน์แบบสเปรย์ เป็นการไหลแบบตรงหารามอลอยด์ โดยที่หยดที่ไหลผ่านเร็วที่สุดอยู่ตรงจุดกลางของคอลัมน์ และหยดที่อยู่ในบริเวณผนังของท่อไม่อยู่นิ่ง แต่ไหลผ่านท่อช้ากว่าจุดกลาง



รูปที่ 13 การไหลของเฟสของเหลวและเฟสแก๊สในคอลัมน์เมสเยอรั

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 14 ลักษณะของไฮโดรไดนามิกส์ของเฟสทั้งสองสำหรับคอลัมน์แบบสเปซ

สำหรับลักษณะของไฮโดรไดนามิกส์ที่กล่าวถึง ได้มีการเขียนตุ๊กตาคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบสเปรย์มากค้อมากแล้ว แต่เมื่อไม่นานนี้ที่ผ่านมาได้ค้นพบว่าเฟสหลักในคอลัมน์แบบสเปรย์ ถูกเฟสหยดพ่นำตามไป และทำให้เกิดการไหลแบบหมุนเวียน (รีเซอร์คิวเลชัน) ในเฟสหลัก ทำให้สมมุติฐานของตุ๊กตาคณิตศาสตร์อื่น ๆ ล้มเหลวไป ในความเป็นจริงขึ้นละเอียดภายในคอลัมน์ ดังนั้นเพื่อค้นหาตุ๊กตาคณิตศาสตร์ซึ่งใกล้เคียงความจริงที่เกิดขึ้นในคอลัมน์แบบสเปรย์มากที่สุด ผู้วิจัยจึงเสนอตุ๊กตาคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับรูปที่ 14.6 ตามความเป็นจริงของผลงานทดลองในโครงการวิจัยนี้รูปที่ 14.7 น่าจะถูกค้อมากกว่า แต่รูปที่ 14.7 มีพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นอีกมากและคงล่ำมากกว่าที่จะเขียนและแก้ จึงขอเสนอตุ๊กตาคณิตศาสตร์ตามรูปแบบของรูปที่ 14.6 เพื่อเป็นหลักที่จะเอาไว้อีกศึกษาต่อ

#### 4.2.1 หลักการในการไหลแบบหมุนเวียนในเฟสหลักของคอลัมน์แบบสเปรย์

ตามความเป็นจริงแล้วลักษณะการไหลของเฟสหลักเป็นดังที่รูปที่ 15.1 ได้แสดงให้เห็นและเพื่อเป็นการสะดวกที่จะเขียนตุ๊กตาคณิตศาสตร์ของลักษณะการไหล ได้เขียนรูปที่ 15.2 และ 15.3 ไว้

ตามปรกติจะมีการผสมกันระหว่างเฟสหลักที่ขึ้นกับ เฟสหลักที่ลง และการผสมนี้สามารถเขียนได้เป็น  $KS(C_2 - C_3)$  ดังแสดงไว้ในรูปที่ 17.1 จากรูปที่ 17.1 สามารถเขียนตุ๊กตาคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

สำหรับ เฟสที่ไหลลงสามารถเขียนบาลานส์ได้ดังนี้

$$u_3 A_3 C_3 \Big|_Z - u_3 A_3 C_3 \Big|_{Z + \Delta Z} + KS \Delta Z (C_2 - C_3) = A_3 \Delta Z \frac{\partial C_3}{\partial t} \quad [4.1]$$

สำหรับ เฟสที่ไหลตามกลุ่มหยดสามารถเขียนบาลานส์ได้ดังนี้

$$u_2 A_2 C_2 \Big|_{Z + \Delta Z} - u_2 A_2 C_2 \Big|_Z - KS \Delta Z (C_2 - C_3) = A_2 \Delta Z \frac{\partial C_2}{\partial t} \quad [4.2]$$

สมการ 4.1 กับ 4.2 สามารถตัดแปลงโดยอาศัยหลักการของคาลคิวลัสให้เป็น

$$-\frac{\partial C_3}{\partial \xi} + \frac{K S H}{u_3 A_3} (C_2 - C_3) = \frac{H}{u_3} \frac{\partial C_3}{\partial t} \quad [4.3ก]$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial \xi} - \frac{K S H}{u_2 A_2} (C_2 - C_3) = \frac{H}{u_2} \frac{\partial C_2}{\partial t} \quad [4.4ก]$$

ถ้าเขียน  $\frac{K S H}{u_3 A_3} = NR$  และ  $\theta = t \frac{u_3 A_3}{(A_2 + A_3) H} = t \frac{3}{H} (1 - \psi)$  และใส่ในสมการ 4.3ก

และเขียน  $\frac{K S H}{u_2 A_2} = N$  และ  $\theta = t \frac{1}{R} \frac{u_3 A_3}{(A_2 + A_3) H} = t \frac{u_2}{H} \frac{\psi}{R}$  และใส่ในสมการ 4.4ก

สามารถเขียนสมการจาก 4.3ก และ 4.4ก ดังนี้

$$-\frac{\partial C_3}{\partial \xi} + NR (C_2 - C_3) = (1 - \psi) \frac{\partial C_3}{\partial \theta} \quad [4.3ข]$$

$$\frac{\partial C_3}{\partial \xi} - N (C_2 - C_3) = \frac{\psi}{R} \frac{\partial C_3}{\partial \theta} \quad [4.4ข]$$

โดยที่  $N$  หมายถึงหน่วยถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสหลักที่ขึ้นและเฟสหลักที่ลง  $R$  คือ ส่วนของเฟสหลักที่ไหลย้อนกลับ และ  $\psi$  คือส่วนของคอลัมน์ที่เฟสหลักไหลย้อนกลับ

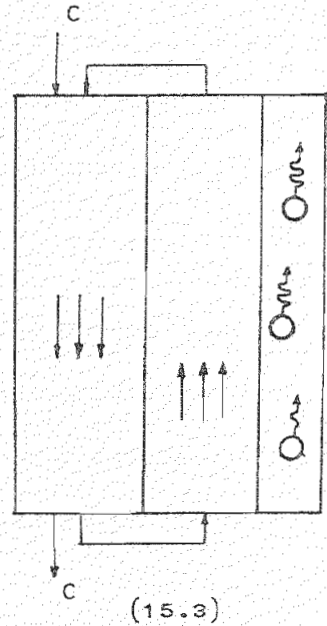
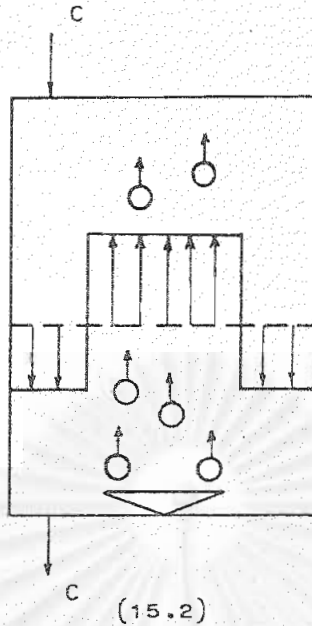
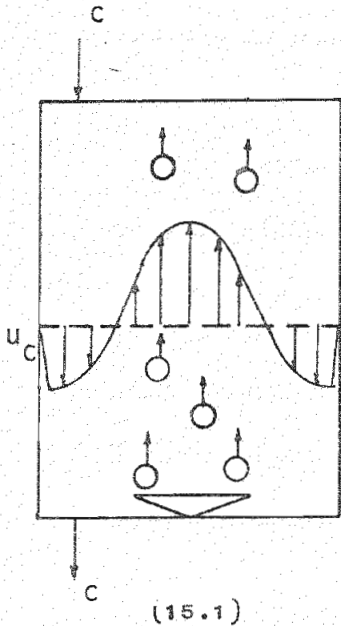
ไมเคลคิตศาสตร์ตั้งเขียนไว้ในสมการ 4.3ก และ 4.4ขสามารถแก้ให้ค่านวม  $C_2$  และ  $C_3$  ตลอดความยาวของคอลัมน์ ถ้าหากเราให้ข้อจำกัดตรงเขตร ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้ สำหรับการทดสอบไมเคลด้วยสมการเคลตา กล่าวคือ

$$\text{เมื่อ } \xi = 0 \quad n\delta(t) + u_2 A_2 C_2 = u_3 A_3 C_3^+ \quad [4.5ก]$$

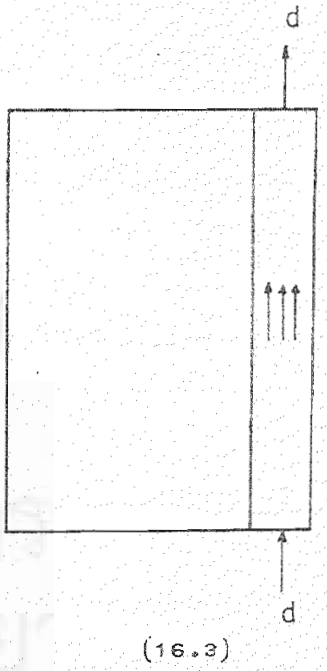
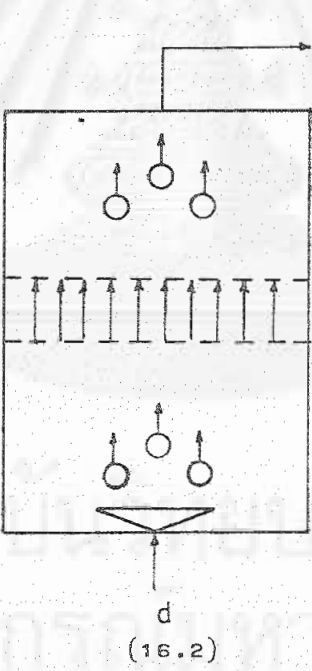
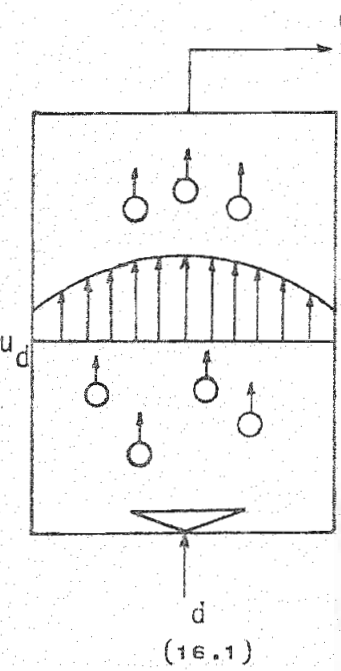
$$\text{เมื่อ } \xi = 1 \quad C_2 = C_3 \quad [4.6]$$

$$\text{เมื่อ } \theta = 0 \quad C_1 = 0 \quad C_2 = 0 \quad [4.7]$$





รูปที่ 15- การเขียนลักษณะการไหลของ เฟสหลัก เพื่อจัด เขียนคูักคาคณิตศาสตร์ตามรูปที่ 14.6



รูปที่ 16- การเขียนลักษณะการไหลของ เฟสหยด เพื่อจัด เขียนคูักคาคณิตศาสตร์ตามรูปที่ 14.6

สมการ 4.5ก สามารถเขียนใหม่ดังนี้ เมื่อ  $\zeta = 0$   $\delta(\theta) + \frac{1}{\beta} C_2 = \frac{R}{\beta} C_3$  [4.5ข]

ความหมายของ  $\beta$  ได้แก่ เวลาการไหลกลับของเฟสหลักในปริมาตรเท่ากับปริมาตรของเฟสหลักในคอลัมน์ทั้งหมด

ดังนั้นสมการ 4.3ข, 4.4ข, 4.6, 4.7 และ 4.5ข เป็นสมการของโมเดลคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงการไหลแบบย้อนกลับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 17 ข้อสังเกตของโมเดลการไหลนี้ได้แก่ การที่โมเดลนี้มีพารามิเตอร์ถึง 4 ตัว อันได้แก่  $N$ ,  $R$ ,  $\psi$ , และ  $\beta$  ถ้าจะวัดพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวคงไม่ดีเท่าไร สมควรหาพารามิเตอร์สองตัวก่อน จึงมาใช้วิธีดังกล่าว

ผู้วิจัยไม่ได้แก้สมการนี้ แต่แนวปฏิบัติได้แก่การใช้แตรนฟอร์มแบบลาปลาส ซึ่งจะให้สมการในลักษณะดังกล่าว

$$\bar{C}(1, S) = \frac{1}{r_1 - r_2} \left\{ \frac{\zeta e^{r_1} + \mu e^{r_2}}{\gamma e^{r_1} + \nu e^{r_2}} \left[ \sigma e^{r_1} + \lambda e^{r_2} \right] + \beta K_2 (e^{r_1} - e^{r_2}) \right\} \quad [4.8]$$

โดยที่  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $\zeta$ ,  $\mu$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$ ,  $\sigma$  ล้วนแต่เป็นฟังก์ชันของ  $S$  แนวปฏิบัติในการย้อนกลับมาในโดเมน  $\theta$  ได้แก่ วิธีการทางนิวเมอริคัล

จากโมเดลในการไหลหมุนเวียนดังที่ได้เสนอมานี้ สามารถเอาไปเขียนเป็นโมเดลการถ่ายเทมวลสารของคอลัมน์แบบสเปรย์ทั้งคอลัมน์ได้ ดังจะเสนอต่อไปนี้

4.2.2 หลักการของโมเดลการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบสเปรย์ที่มีการหมุนเวียนในเฟสหลัก

ถ้านำโมเดลการไหลแบบหมุนเวียนมาต่อกับโมเดลการไหลแบบทรงกระบอกของเฟสหยด โดยมีการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสหลักกับเฟสหยดที่อาศัยสัมประสิทธิ์  $K_{ob}$  ดังนั้นสามารถเขียนบาลานซ์มวลสารในสภาพต่อเนื่อง ดังนี้

เฟสหยด  $\frac{u_d A \phi c_1}{Z + \Delta Z} - \frac{u_d A c_1}{Z} + K_{ob} a_b A Z (c_1^* - c_1) = 0$  [4.9ก]

เฟสหลักขึ้น  $\frac{u_2 A_2 c_2}{Z + \Delta Z} - \frac{u_2 A_2 c_2}{Z} - K_{ob} a_b A \Delta Z (c_1^* - c_1) - K_S \Delta Z (c_2 - c_3) = 0$

$$\text{เฟสหลักของ } u_3 A_3 c_3 \left| \frac{1}{Z} - u_3 A_3 c_3 \left| \frac{1}{Z} + \Delta Z \right. + K S \Delta Z (c_2 - c_3) = 0 \quad [4.11ก]$$

ในที่สุดเมื่อหารด้วย  $\Delta Z$  และให้  $\Delta Z \rightarrow 0$  สามารถได้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{dc_1}{d\xi} - \frac{K_{ob} a_b H}{U_d} (c_1 - m c_2) = 0 \quad [4.9ข]$$

$$\frac{dc_2}{d\xi} + \frac{K_{ob} a_b H}{U_2} (c_1 - m c_2) - \frac{K S H}{u_2 A_2} (c_2 - c_3) = 0 \quad [4.10ข]$$

$$-\frac{dc_3}{d\xi} + \frac{K S H}{u_3 A_3} (c_2 - c_3) = 0 \quad [4.11ข]$$

$\frac{K S H}{u_2 A_2}$  สามารถเปลี่ยนเป็น  $N$  ได้ และ  $\frac{K S H}{u_3 A_3}$  เปลี่ยนเป็น  $NR$  ได้

$\frac{K_{ob} a_b H}{U_d}$  เปลี่ยนเป็น  $K_1$  ได้ และ  $\frac{K_{ob} a_b H}{U_2}$  เปลี่ยนเป็น  $K_1/\gamma$  ได้

ในที่สุดจะได้

$$\frac{dc_1}{d\xi} - K_1 (c_1 - m c_2) = 0 \quad [4.12]$$

$$\frac{dc_2}{d\xi} + \frac{K_1}{\gamma} (c_1 - m c_2) - N (c_2 - c_3) = 0 \quad [4.13]$$

$$-\frac{dc_3}{d\xi} + N \left( \frac{1}{\frac{G_c}{\gamma G_d} + 1} \right) (c_2 - c_3) = 0 \quad [4.14]$$

$$\text{เมื่อ } \xi = 1 \quad c_1 = c_d \quad [4.15]$$

$$c_2 = c_3 \quad [4.16]$$

$$\text{เมื่อ } \xi = 0 \quad \frac{c_2 - c_{in}}{c_3 - c_{in}} = \frac{G_c}{\gamma G_d} + 1 \quad [4.17]$$

เมื่อแก้สมการ 4.9ค, 4.10ค, และ 4.11ค จะได้เส้นความเข้มข้นของมวลสาร ดังรูปที่ 18

โมเดลนี้ได้แนวความคิดมาจากบทความฉบับหนึ่งของมียาโอจิ (\*) แต่ในบทความดังกล่าว เป็นโมเดลที่ใช้สำหรับฟลูอิดส์เบค แต่สำหรับโครงการวิจัยนี้ได้ดัดแปลงโมเดลให้ใช้กับคอลัมน์สกัดของเหลวแบบสเปร์รี่

การแก้สมการโดยวิธีอานาลิติคัล โดยถือว่า  $m$  คงที่สามารถทำได้จากแนวทางนี้ คือใช้ลาปลาซแทรนส์ฟอร์ม และในที่สุดสมการ 4.12, 4.13, 4.14 จะกลายเป็นดังนี้

$$\bar{c}_1(S - K_1) + \bar{c}_2(m K_1) = c_d \quad [4.18]$$

$$\bar{c}_1\left(-\frac{K_1}{\gamma}\right) + \bar{c}_2(S + m - N) + \bar{c}_3(N) = c_2^0 \quad [4.19]$$

$$\bar{c}_2(N\sigma) + \bar{c}_3(-S - N\sigma) = c_3^0 \quad [4.20]$$

โดยที่  $c_d$  คือความเข้มข้นของมวลสารในเฟสหยดที่เข้าคอลัมน์  $c_2^0$  และ  $c_3^0$  คือความเข้มข้นของมวลสารในเฟสหลักตรงจุด  $\xi = 0$  และ  $\sigma$  คือ

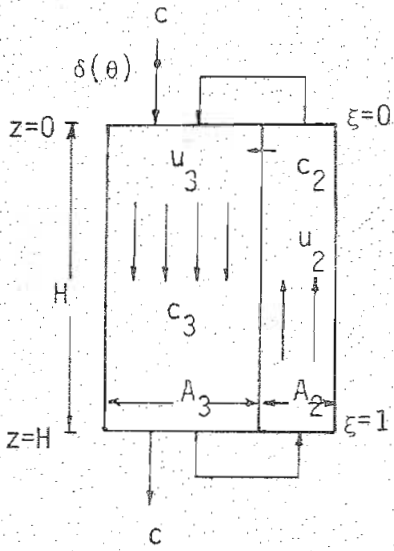
$$\frac{1}{\frac{G_c}{\gamma G_d} + 1}$$

คำนวณหา  $\bar{c}_1, \bar{c}_2, \bar{c}_3$  จะได้สมการดังนี้

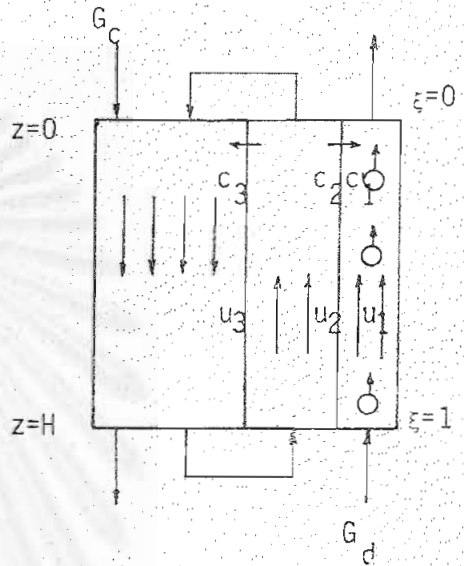
$$\bar{c}_i(S) = a_i \frac{S^2 + \frac{b_i}{a_i} S + \frac{c_i}{a_i}}{(S + \lambda_1)(S + \lambda_2)(S + \lambda_3)} \quad [4.21]$$

และในโดเมนของ  $\xi$  จะได้สมการดังนี้

(\*) MIYAUCHI T., NOROOKA S., INTERNATIONAL CHEMICAL ENGINEERING, VOL. 9, NO. 4, P. 713. (1969)

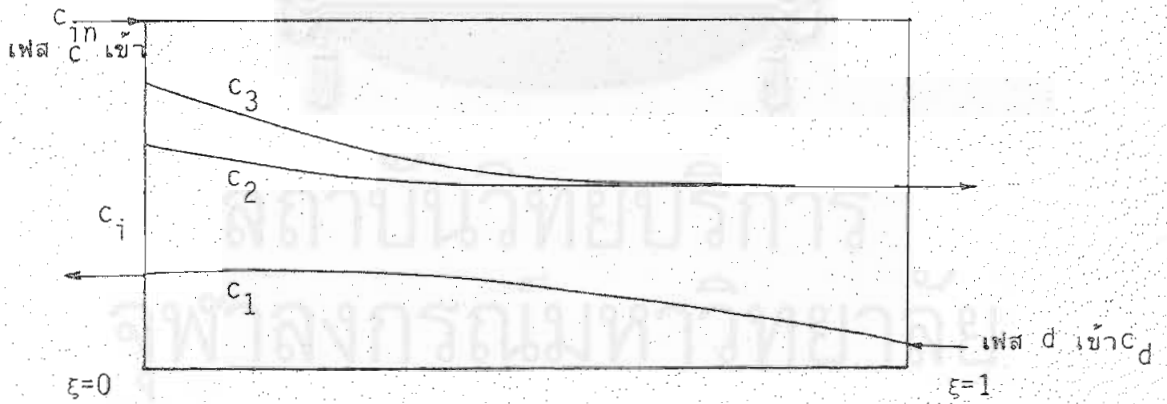


(17.1)



(17.2)

รูปที่ 17 รูปการไหลแบบหมุนเวียนแบบรี เซอร์คิว เลชั่น



รูปที่ 18 ลักษณะความเข้มข้นของมวลสารในแต่ละเฟสตลอดความยาวของคอลัมน์ สำหรับโมเดลแบบเฟสลักษณะหมุนเวียน  $K_1, N, r$  เป็นพารามิเตอร์

$$\begin{aligned} \bar{c}_i(\xi) = & \frac{\lambda_1^2 - \frac{b_i}{a_i} \lambda_1 + \frac{c_i}{a_i}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 \xi} + \frac{\lambda_2^2 - \frac{b_i}{a_i} \lambda_2 + \frac{c_i}{a_i}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 \xi} \\ & + \frac{\lambda_3^2 - \frac{b_i}{a_i} \lambda_3 + \frac{c_i}{a_i}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 \xi} \end{aligned} \quad [4.22]$$

โดยที่  $-\lambda_1, -\lambda_2, -\lambda_3$  เป็นรากของสมการต่อไปนี้

$$(S - K)(S + m - N)(-S - N\sigma) - (S - K_1)N^2\delta - \frac{m K_1^2}{\gamma} (S + N\sigma) = 0$$

และ

$$a_1 = -c_d$$

$$b_1 = -c_d(m - N) + c_d(-N\sigma) + m K_1 c_2^0$$

$$c_1 = c_d(m - N)(-N\sigma) - c_d N^2 \delta + m K_1 c_2^0 N\sigma + m K_1 N c_3^0$$

$$a_2 = -c_2^0$$

$$b_2 = c_2^0 N\sigma + c_2^0 K_1 - \frac{c_d K_1}{\gamma}$$

$$c_2 = c_2^0 K_1 N\sigma - N c_3^0 - c_d \frac{K_1}{\gamma} N\sigma$$

$$a_3 = c_3^0$$

$$b_3 = c_3^0 (m - N) - c_3^0 K_1$$

$$c_3 = -c_2^0 N\sigma + \frac{K_1}{\gamma} c_3^0 m K_1 - \frac{K_1}{\gamma} c_d N\sigma$$

โมเดลที่มีการหมุนเวียนในเฟสดังที่ได้เสนอไว้ในข้อนี้ เป็นโมเดลที่มีพารามิเตอร์อยู่ 3 ตัว คือ  $K_1$  ซึ่งเป็นหน่วยถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสหยดกับเฟสหลัก  $N$  ซึ่งเป็นหน่วยถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสหลักที่ไหลกลับคาบหยด และเฟสหลักที่ไหลผ่าน และ  $\gamma$  คือสัมประสิทธิ์การพาหน้าเฟสหลักโดยกลุ่มหยด ดังนั้นถ้าสามารถหาค่าของพารามิเตอร์ทั้งสามจะสามารถคำนวณความเข้มข้นของมวลสารตามรูปที่ 18 ได้

ในทางปฏิบัติการจะหาพารามิเตอร์เหล่านี้จะต้องได้มาจากการวัดค่าของพารามิเตอร์เหล่านี้จากคอลัมน์แบบสเปรย์ขนาดต่าง ๆ ที่ใช้ตัวกระจายต่าง ๆ และสำหรับระบบต่าง ๆ เสร็จแล้วจึงหาสมการรวมที่สามารถบอกได้เลยว่า หากใช้คอลัมน์แบบสเปรย์ลักษณะนั้นใช้ระบบนั้นจะได้ค่าของ  $K_1$ ,  $N$  และ  $\gamma$  อย่างนั้น และในที่สุดสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารแนวปฏิบัติในการวัด  $N$  กับ  $\gamma$  ควรทำได้โดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบโคนามิกโดยใช้การฉีด เตร เซอร์ (tracer) ในเฟสหลัก และจากการกระจายของ เตร เซอร์ ในทางออกของเฟสหลัก จะสามารถวัดเส้นระยะเวลาที่ตัว เตร เซอร์ อยู่ในคอลัมน์ และหากมาวิเคราะห์ผลโดยใช้โมเดลของการไหลหมุนเวียนในเฟสหลัก ดังเสนอไว้ในสมการ 4.3x และ 4.4x ตามหลักการแล้วแนวดังกล่าวเป็นแนวปฏิบัติที่ถูกต้อง เมื่อได้ค่าของพารามิเตอร์  $N$  กับ  $\gamma$  แล้ว จึงสามารถทำการทดลองการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์เพื่อวัด  $K_1$  โดยอาศัยการแก๊สสมการ 4.12 ถึง 4.17 สำหรับค่าต่าง ๆ ของ  $K_1$  เสร็จแล้วเปรียบเทียบดูว่าค่าของ  $K_1$  ค่าใดทำให้เส้นความเข้มข้นในลักษณะของรูปที่ 18 ใกล้เคียงความเข้มข้นจริงดังที่สามารถวัดได้จากคอลัมน์แบบสเปรย์จริง

ผู้วิจัยไม่ได้ทำการทดลองชุดนี้เพราะไม่ได้อยู่ในโครงการวิจัยนี้ แต่เสนอไว้เป็นหลักในสองข้อนี้ คือข้อ 4.2.1 กับ 4.2.2

ถ้าจะประเมินโมเดลแบบหมุนเวียนดังที่ได้เสนอนานี้ อาจจะกล่าวข้อสังเกตรวมต่อไปนี้ สำหรับผู้อื่นที่จะมาศึกษาเรื่องนี้คือ ดังนี้

1. โมเดลหมุนเวียน (RECIRCULATION MODEL) สำหรับคอลัมน์แบบสเปรย์ เป็นโมเดลที่น่าจะใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงภายในคอลัมน์มากกว่าโมเดลแบบการไหลตรงกระบอก หรือโมเดลตีพิวชัน ซึ่งโมเดลแรกเคยนิยมกันใช้ในอดีต และโมเดลที่สองใช้กันอยู่ในปัจจุบันทั้งนี้ข้อแตกต่างหลักอยู่ที่การหมุนเวียนของเฟสหลัก
2. โมเดลหมุนเวียนมีพารามิเตอร์จำนวน 3 ตัว ซึ่งมากกว่าโมเดลตีพิวชันที่มีพารามิเตอร์เพียง 2 ตัว

3. ในการวัดหารามีเตอร์ของโมเดลหมุนเวียน ต้องระมัดระวังการวัด  $C_2$  และ  $C_3$  เพราะอาจจะไม่สามารถหาข้อแตกต่างระหว่างทั้งสองค่า ทั้งนี้เพราะทั้งสองเป็นความเข้มข้นของตัวเฟสหลัก แต่เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลในการทดลองยังไม่สามารถสรุปอะไรได้

#### 4.2.3 หลักการของโมเดลการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบสเปรย์แบบถังกวนเป็นแนว

ในการหาโมเดลสำหรับการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบสเปรย์ สิ่งที่อยู่อกแบบโมเดลต้องการคือการวาดภาพข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ โดยสมการคณิตศาสตร์ที่มีคุณลักษณะสองประการ ประการแรกคือใกล้เคียงข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้นในคอลัมน์มากที่สุด ประการที่สองจะต้องเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ง่ายต่อการวิเคราะห์และการใช้ ซึ่งสองข้อดังกล่าวขัดกัน ดังนั้นต้องหาวิธีที่เป็นกลางที่สามารถตอบสนองสองหลักการดังกล่าว

ถ้าจะศึกษาโมเดลแบบถังกวนเป็นแนว และแบบการไหลของเฟสหยดเป็นทรงกระบอกสามารถเขียนสมการดังต่อไปนี้

(1) โมเดลการไหลของเฟสหลักแบบถังกวนเป็นแนว: ถ้ามีถังกวนเป็นแนวตามรูปที่ 19 สามารถเขียนบาลานซ์สำหรับถังกวนหนึ่งถังได้ดังนี้ในโดเมนของลาปลาซ

$$\frac{\bar{c}_n}{\bar{c}_{n-1}} = \frac{1}{1 + \frac{V}{G_c N} S} \quad [4.23]$$

สำหรับจำนวนถังกวนจำนวน  $N$  ถังจะได้สมการดังนี้

$$\frac{\bar{c}_N(S)}{\bar{c}_{in}(S)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{V}{G_c N} S\right)^N} \quad [4.24]$$

และถ้า  $C_{in}(t) = \delta(t)$  ถือว่าเป็นการสมมติการฉีดเตรเซอร์เข้าไปเฟสหลักในลักษณะพัลส์ หมายถึงว่า  $\bar{c}_{in}(S)$  จะเท่ากับ 1 และในที่สุดเมื่อกลับมายังโดเมน  $t$  จะได้

$$c_N(t) = \frac{1}{\left(\frac{V}{G_c N}\right)^N} \frac{t^{N-1} e^{-t/\left(\frac{V}{G_c N}\right)}}{(N-1)!} \quad [4.25]$$



จากสมการที่ 4.25 จะสามารถเปรียบเทียบเส้นระยะเวลาที่เฟสหลักอยู่ในคอกอิมน์ (RESIDENCE TIME DISTRIBUTION) และในที่สุดจะสามารถวัด  $N$  ได้ ส่วน  $V$  และ  $G_c$  ทราบกันอยู่แล้ว  $V$  คือปริมาตรของคอกอิมน์เมื่อนำปริมาตรของเฟสหยดออกแล้ว และ  $G_c$  คืออัตราการไหลของเฟสหลัก

(2) โมเดลการถ่ายเทมวลสารในถังกวนเป็นแนว: เมื่อจะให้มีการถ่ายเทมวลสารจากเฟสหลักไปถึงเฟสหยด สามารถอธิบายลักษณะโมเดลดังแสดงไว้ในรูปที่ 19.2 และ 19.3 ในรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเฟสหลักแบ่งออกเป็นถังกวนจำนวน  $N$  และในเฟสหยดแบ่งออกเป็นถังกวนจำนวน  $Nr$  ซึ่งแสดงว่าการไหลของเฟสหยดเป็นการไหลในลักษณะทรงกระบอกมากกว่าเฟสหลัก ทั้งนี้ เมื่อ  $r \rightarrow \infty$  ถือว่าเป็นการไหลทรงกระบอกอย่างแท้จริง

ในการเขียนโมเดลการถ่ายเทมวลสาร สามารถใช้บาลานซ์ดังนี้

$$\text{เฟสหลัก} \quad c_{2, n-1} G_c = c_{2, n} G_c + \sum_{j=1}^r K_{ob} \cdot a_b \cdot \frac{H/N}{r} (m c_{2, n} - c_{1, n, j}) \quad [4.26]$$

$$\text{เฟสหยด} \quad c_{1, n+1, j} G_d = c_{1, n, j} G_d - K_{ob} \cdot a_b \cdot \frac{H/N}{r} (m c_{2, n} - c_{1, n, j}) \quad j=1, r \quad [4.27]$$

สำหรับ  $n = 1$  จะได้

$$c_{2, 1} G_c = c_{2, 1} G_c + \sum_{j=1}^r \frac{K_{ob} \cdot a_b \cdot H}{Nr} (m c_{2, 1} - c_{1, 1, j}) \quad [4.28]$$

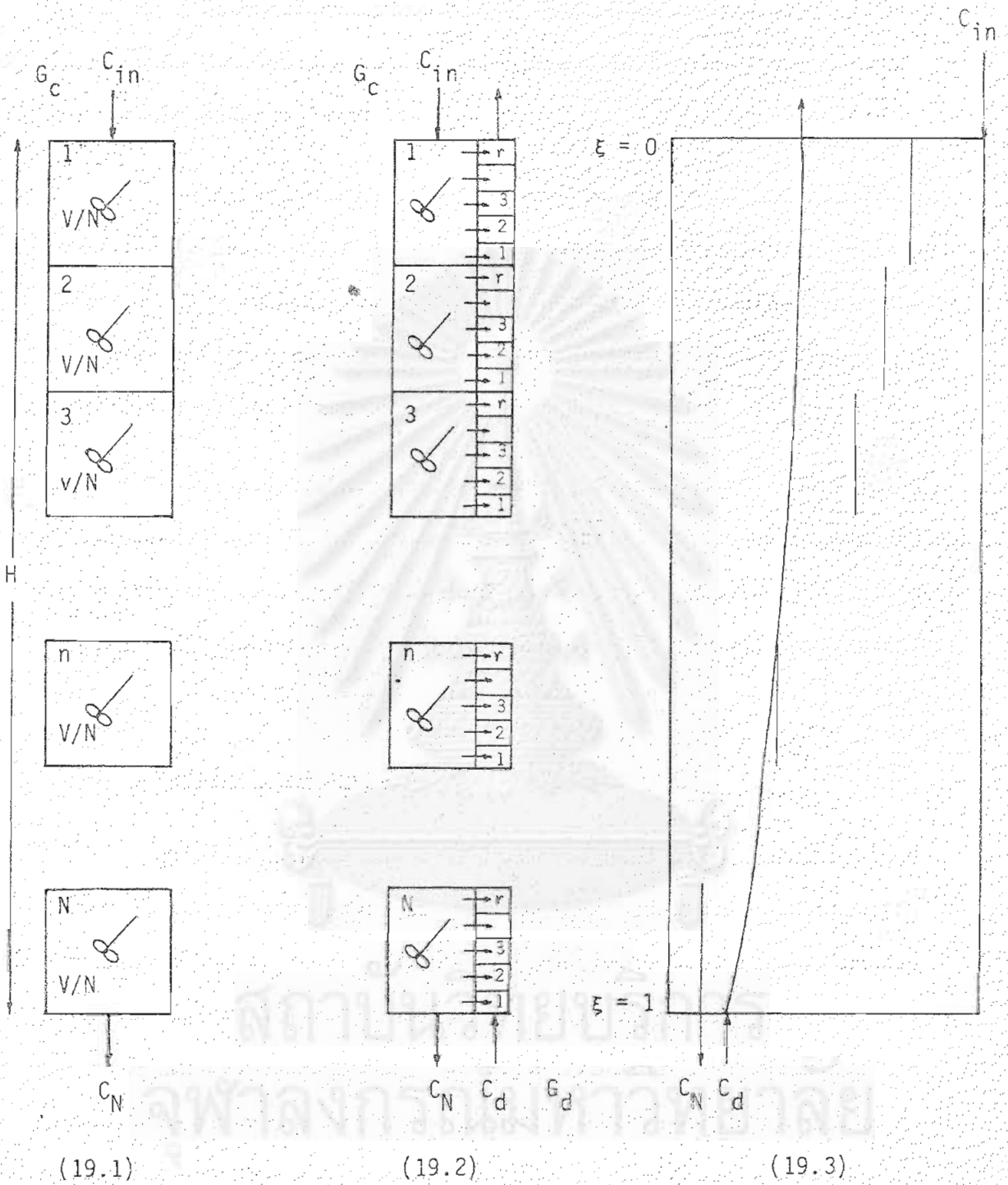
$$c_{1, 2, j} G_d = c_{1, 1, j} G_d - \frac{K_{ob} \cdot a_b \cdot H}{Nr} (m c_{2, 1} - c_{1, 1, j}) \quad j=1, r \quad [4.29]$$

สำหรับ  $n = N$  จะได้

$$c_{2, N-1} G_c = c_{2, N} G_c + \sum_{j=1}^r \frac{K_{ob} \cdot a_b \cdot H}{Nr} (m c_{2, N} - c_{1, N, j}) \quad [4.30]$$

$$c_{1, N, j} G_d = c_{1, N, j} G_d - \frac{K_{ob} \cdot a_b \cdot H}{Nr} (m c_{2, N} - c_{1, N, j}) \quad j=1, r \quad [4.31]$$

จำนวนคิวแบร์ทั้งหมดมีอยู่จำนวน  $Nr$  สำหรับเฟสหยด และจำนวน  $N$  สำหรับเฟสหลัก รวมเป็นจำนวน  $N(r+1)$  ซึ่งถูกต้องตามที่เขียนไว้เป็นสมการ



รูปที่ 19 โมเดลการไหลและโมเดลการถ่ายเทมวลสารของเฟสหลักแบบถึงกรณ เป็นแกว

สำหรับพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ของโมเดลนี้มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส คือ  $K_{ob} \cdot a_b$  มี  $N$  คือจำนวนถึงกวนสำหรับเฟสหลัก และมี  $r$  คือจำนวนถึงกวนสำหรับเฟสหยด ตัวแปรที่รู้ค่าคือ  $H$  ความยาวของคอลัมน์ และ  $m$  คือสัมประสิทธิ์การกระจายของมวลสารระหว่างสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์

การแก้โมเดลการถ่ายเทมวลสารในถึงกวนเป็นแนวสามารถทำได้โดยสองวิธี หนึ่งคือวิธีการแก้มเมตริกขนาด  $N(r + 1) \times N(r + 1)$  และสองคือวิธีไอเคอเรชัน โดยเริ่มการคำนวณตรง  $\xi = 0$  และสมมุติค่าของ  $C_{1, 1, r}$  คือความเข้มข้นของเฟสหยดที่ออกจากคอลัมน์ และคำนวณต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงหา  $C_d$  เสร็จแล้วตรวจสอบว่าค่าของ  $C_d$  ถูกต้องหรือเปล่า และทำอย่างนี้เรื่อย ๆ ไปจนกว่าทุกอย่างถูกต้องแล้ว

(3) ข้อวิจารณ์เรื่องโมเดลการถ่ายเทมวลสารแบบถึงกวนเป็นแนว: ผู้วิจัยยังไม่เคยผ่านตาโมเดลดังที่เสนอนี้ และรู้สึกว่าเป็นโมเดลที่น่าสนใจ เพราะการคำนวณหาพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ต่าง ๆ ดูจะสะดวก เช่นการหา  $N$  โดยกรรมวิธีทางเครเซอร์ที่อธิบายไว้ในข้อ (1) น่าจะทำได้โดยสะดวก และในที่สุดจากการทดลองหาความเข้มข้นของเฟสทั้งสองในคอลัมน์ และเปรียบเทียบกับโมเดล สามารถคำนวณ  $\frac{K_{ob} \cdot a_b}{r}$  ได้

#### 4.2.4 สรุปเรื่องโมเดลคณิตศาสตร์

ผู้วิจัยได้เสนอโมเดลคณิตศาสตร์ที่อธิบายการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบสเปรย์จำนวนสองโมเดล ทั้งเป็นเพียงการเสนอโมเดลโดยไม่ได้คำนวณและเปรียบเทียบกับคอลัมน์แบบสเปรย์ ในการเสนอโมเดลเหล่านี้ได้พิจารณาไฮโดรไดนามิกส์ของทั้งสองเฟสในคอลัมน์ เพื่อที่จะได้มาซึ่งโมเดลที่ใกล้เคียงความเป็นจริงในคอลัมน์ และความสะดวกในการใช้งาน ในรูปที่ 14 ได้แสดงแนวความคิดหลายแนว แต่ไม่ได้นำเสนอโมเดลที่อาจจะเป็นไปได้อื่น ๆ ซึ่งน่าจะเป็นโครงการวิจัยอื่น ๆ ในโมเดลที่เสนอในข้อนี้ ทั้งสองโมเดลได้สมมุติการไหลของเฟสหยดเป็นทรงกระบอกสำหรับโมเดลแรก และเป็นการไหลแบบถึงกวนในโมเดลคณิตศาสตร์ของระบบการถ่ายเทมวลสาร พิจารณาแล้วเป็นเรื่องไม่ง่ายเลย และคงต้องฝากเรื่องนี้ไว้กับกลุ่มวิจัยอื่นๆ

## บทที่ 5

## บทสรุปและข้อ เสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้ได้มุ่งศึกษาการไหลของเฟสหยดในท่อยาว เพื่อเกิดความเข้าใจของปรากฏการณ์ในเฟสหยดของคอลลอยด์ของเหลวแบบสเปรย์ ทั้งนี้เพราะเมื่อเฟสหลักไม่ไหลผ่านในคอลลอยด์แบบสเปรย์ คอลลอยด์ดังกล่าวจะกลายเป็นท่อยาวธรรมดา แต่เนื่องจากสมมุติกันได้ว่าอิทธิพลของอัตราการไหลของเฟสหลักในคอลลอยด์แบบสเปรย์ต่อลักษณะของไฮโดรไดนามิกทั่วไปไม่น่าจะสูงนัก จึงได้เลือกศึกษาการไหลของเฟสหยดในท่อยาวที่มีน้ำนิ่งอยู่ภายใน

ผลที่ได้จากโครงการวิจัยนี้คือได้วัดขนาดและลักษณะการกระจายของขนาดของหยด และได้ตรวจสอบกับสมการของผู้อื่น ๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบที่ใช้ และเพื่อดูว่าสมการใดน่าเชื่อถือมากที่สุดสำหรับระบบที่ใช้ คือคาร์บอนเตตราคลอไรด์และน้ำ โดยน้ำเป็นเฟสหลัก ประการที่สองพบว่าเฟสหยดไหลลงในท่อยาวในลักษณะพาราบอลอยด์ และหยดมีแนวโน้มจะเข้าหาจุดกลาง ซึ่งปรากฏการณ์นี้ไม่เคยค้นพบมาก่อน แต่สิ่งที่น่าสนใจได้แก่ การที่ความเร็วของกลุ่มหยดที่อยู่กลางคอลลอยด์ มีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้ายทางทฤษฎี (TERMINAL VELOCITY) ของหยดขนาดเฉลี่ยของการทดลองทุกครั้งแสดงให้เห็นว่ามีการหมุนเวียนเกิดขึ้นในคอลลอยด์ในสภาพไฮลด์อัปดาวน์ที่ใช้ ซึ่งข้อนี้สอดคล้องกับสิ่งที่ผู้อื่นสังเกตเห็น โดยเฉพาะการที่กลุ่มหยดจะทวนว่าเฟสหลักไหลย้อนกลับไปในบริเวณช่วงกลางของคอลลอยด์ และไหลผ่านแบบปรกติในบริเวณคอดมึงของคอลลอยด์

การไหลของเฟสหยดในระบบที่ใช้แสดงให้เห็นว่าเป็นการไหลที่เกือบจะเป็นการไหลแบบทรงกระบอก ประโยชน์ที่จะได้จากการสมมุติว่าเป็นการไหลแบบอื่นคงมีน้อย แต่ทั้งนี้ต้องไม่ลืมว่าความแตกต่างของความหนาแน่นในระบบที่ใช้เท่ากับ 0.59 โดยประมาณ และการใช้คอลลอยด์แบบสเปรย์เป็นการใช้ในช่วงไฮลด์อัปดาวน์

จากความรู้ที่มีอยู่เรื่องการไหลแบบหมุนเวียนของเฟสหลักในคอลลอยด์แบบสเปรย์ ผู้วิจัยได้เสนอแนวการถ่ายเทมวลสารสองแนวที่สอดคล้องกับปรากฏการณ์ในคอลลอยด์ กล่าวคือการไหลแบบหมุนเวียนในเฟสหลักและการไหลแบบทรงกระบอกในเฟสหยด โมเดลแรกมีลักษณะใกล้เคียงข้อเท็จจริงในคอลลอยด์พอสมควร แต่สมการที่ได้ใช้ไม่ง่ายนัก โดยเฉพาะการที่จะวัดความเข้มข้นของมวลสารในเฟสหลักทั้งสอง ส่วนโมเดลที่สองได้แก่ โมเดลแบบถังกวนเป็นแนว ในโมเดลนี้การหมุนเวียน

ในเฟสหลักจะเป็นลักษณะการผสมใบถึงกวนเป็นแนว ส่วนเฟสหยดจะไหลแบบการไหลในถึงกวนจำนวนมาก ซึ่งในที่สุดคล้ายกับการไหลทรงกระบอก แต่โมเดลที่สองสามารถคำนวณได้สะดวกกว่าโมเดลแรก

ปัจจุบันนี้วิศวกรผู้ออกแบบคอลัมน์แบบสเปรย์มีความพอใจพอสมควรในการจะใช้โมเดลคิวชันที่ถือการไหลของเฟสหยดเป็นการไหลทรงกระบอก แต่เนื่องจากนักวิจัยหลายกลุ่มได้ค้นพบปรากฏการณ์ของการหมุนเวียนในเฟสหลัก จึงมีความสนใจที่จะแสวงหาโมเดลใหม่ ทั้งนี้เพื่อแสวงหาความรู้ใหม่ที่จะทำให้การคำนวณแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ปรากฏการณ์ของการหมุนเวียนที่เคยพบ เกิดขึ้นในสภาพทำงานแบบไฮลด์อัปค่า เมื่อไฮลด์อัปสูง เช่น เกือบถึงจุดความจุสูงสุด พบว่าการไหลแบบหมุนลดลงมาก ที่จริงในสภาพไฮลด์อัปสูงหยดจะเต็มคอลัมน์จนไม่สามารถมองผ่านคอลัมน์แก้วได้ และในสภาพการเดินเครื่องแบบนี้ไม่ทราบว่าไฮลด์ใดเหมาะสมที่สุด

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ในคอลัมน์แบบสเปรย์ได้แก่ การแสวงหากลวิธีในการวัดและวิเคราะห์การหมุนเวียนในเฟสหลัก เป็นการวัดและวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ซึ่งปัจจุบันนี้ไม่มีวิธีที่สะดวก

ข้อเสนอแนะข้อที่สองได้แก่ การเปรียบเทียบโมเดลคิวชันกับโมเดลใหม่ที่จะมาเป็นคู่แข่ง

ข้อเสนอแนะข้อที่สามได้แก่การศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ภายในคอลัมน์ในสภาพการทำงานแบบไฮลด์อัปค่า และไฮลด์อัปสูง เพราะสำหรับสองสภาพดังกล่าวไฮโดรไดนามิกส์ภายในคอลัมน์ย่อมไม่เหมือนกันแน่



## ภาคผนวก ก

การหาเบอร์เพเคล็ด (PECLET NUMBER) จากโปรไฟล์ความเร็วของหยดในท่อยาว

จากการวัดความเร็วของหยดในท่อยาว ในสภาพที่ใช้ตัวกระจาย ง และอัตรา  
การไหลของเฟสหยด 6.67 ซีซี คาร์บอนเตตราคลอไรด์/วินาที จะได้โปรไฟล์ความเร็วดัง  
สมการ 7 ดังนี้

$$V = 31 - 0.13 r^{2.58} \quad (7)$$

และจากสมการนี้สามารถคำนวณระยะเวลาการไหลผ่านของหยดที่อยู่ในแต่ละตำแหน่งในแนว  
เส้นผ่าศูนย์กลางจากระดับที่หนึ่งในท่อไปยังระดับที่สอง อันหมายความว่าถ้าท่อมีความยาว  
1 เมตร จะสามารถคำนวณระยะเวลาในการไหลผ่านของกลุ่มหยดที่อยู่ในท่อ โดยใช้สมการ  
ดังนี้

$$t = 100 / (31 - 0.13 r^{2.58}) \quad (ก1)$$

โดย  $r$  เป็นเรเดียสของท่อในหน่วยเซนติเมตร จากสมการ (ก1) จะได้คำตอบดังเสนอไว้  
ในตารางที่ 1

$r$ , ซม.	$t$ , วินาที	$r$ , ซม.	$t$ , วินาที	$r$ , ซม.	$t$ , วินาที	$r$ , ซม.	$t$ , วินาที
0.1	3.23	1.1	3.24	2.1	3.32	3.1	3.50
0.2	3.23	1.2	3.25	2.2	3.33	3.2	3.52
0.3	3.23	1.3	3.25	2.3	3.35	3.3	3.55
0.4	3.23	1.4	3.26	2.4	3.36	3.4	3.58
0.5	3.23	1.5	3.26	2.5	3.38	3.5	3.61
0.6	3.23	1.6	3.27	2.6	3.39	3.6	3.64
0.7	3.23	1.7	3.28	2.7	3.41	3.7	3.68
0.8	3.23	1.8	3.29	2.8	3.43	3.8	3.71
0.9	3.24	1.9	3.30	2.9	3.45	3.9	3.75
1.0	3.24	2.0	3.31	3.0	3.47	4.0	3.79

r, ซม.	t, วินาที	r, ซม.	t, วินาที	r, ซม.	t, วินาที	r, ซม.	t, วินาที
4.1	3.84	4.5	4.05	4.9	4.32	5.3	4.67
4.2	3.89	4.6	4.11	5.0	4.40	5.4	4.78
4.3	3.94	4.7	4.17	5.1	4.48	5.5	4.89
4.4	3.99	4.8	4.24	5.2	4.56	5.6	5.02

ตารางที่ 1 - ระยะเวลาสำหรับหยดที่อยู่ตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางที่จะไหลผ่านท่อยาว 1 เมตร

ตารางที่ 1 มีความหมายดังนี้คือ ถ้าสมมุติว่าเรามีคอลัมน์แบบสเปร์ยขนาด 1 เมตร และทำการฉีดสารที่มีกัมมันตภาพรังสีในบริเวณปลายตัวกระจาย เช่นถ้าสารที่เป็นหยดเป็นสารอินทรีย์เราสามารถฉีดเอธิลไอโอดีนที่เตรียมด้วย  $I^{131}$  เข้าไปในตัวกระจาย และในระดับจุด L เท่ากับ 1 เมตร ให้ใช้เครื่องวัดกัมมันตภาพรังสีและจะได้เส้นแบบรูปที่ 1 แต่รูปที่ 1 ไม่ได้มาโดยวิธีนี้ แต่ได้มาโดยวิธีการใช้ข้อมูลจากความเร็วของหยดตลอดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์

จากรูปที่ 1 ซึ่งแสดงถึงระยะเวลาที่หยดอยู่ในท่อยาว (DROP RESIDENCE TIME DISTRIBUTION) เราสามารถคำนวณหาเบอร์เพเคลต์ได้ เบอร์เพเคลต์ในที่นี้คือพารามิเตอร์ของโมเดลอันดับที่หนึ่งซึ่งแสดงถึงการผสมภายในแต่ละเฟส เช่นในกรณีของการไหลทรงกระบอก เบอร์เพเคลต์จะเท่ากับอินฟินิตี้ และในกรณีที่การผสมภายในเฟสมีความรุนแรงมากแบบถึงกวน ถือได้ว่าเบอร์เพเคลต์เท่ากับศูนย์ได้ ในโมเดลอันดับที่หนึ่ง สามารถแก้โมเดลได้โดยภาวะตรงเขต (BOUNDARY CONDITIONS) แตกต่างกัน สำหรับภาวะตรงเขตซึ่งสอดคล้องกับการไหลของเฟสหยดในท่อยาวมากที่สุด รู้สึกว่าได้แก่ภาวะตรงเขตที่เป็น ปิด - เปิด (CLOSED - OPEN BOUNDARY CONDITIONS) และเมื่อแก้สมการแล้วจะได้เส้นระยะเวลาที่สารอยู่ในท่อยาว (RESIDENCE TIME) ดังนี้

$$C(t') = \left(\frac{Pe}{\pi t'}\right)^{1/2} e^{-\frac{Pe(1-t')^2}{4t'}} - \frac{Pe}{2} e^{-Pe} \operatorname{erfc}\left(\left(\frac{Pe}{t'}\right)^{1/2} \left(\frac{1+t'}{2}\right)\right) \quad (n2)$$

โดยที่  $t'$  คือ  $t/\tau$  แต่ในทางปฏิบัติพบว่าภาวะตรงเขตที่เป็นเปิด - เปิด (OPEN - OPEN BOUNDARY CONDITIONS) ให้เส้นระยะเวลาที่สารอยู่ในท่อยาวที่ใกล้เคียงเส้นภาวะตรงเขต ปิด - เปิด มาก และมีสมการดังต่อไปนี้

$$C(t') = \frac{1}{2} \left(\frac{Pe}{\pi t'}\right)^{1/2} e^{-\frac{Pe(1-t')^2}{4t'}} \quad (n3)$$

จากสมการ ก3 สามารถใช้หลักการของการออปติไมส์ในการหาเบอร์เพเคล็ค แต่วิธีที่เร็วกว่าในการหาเบอร์เพเคล็คได้แก่การใช้สมการดังต่อไปนี้<sup>(๑)</sup>

$$\frac{\sigma^{*2}}{\mu_1^{*2}} = \frac{\frac{2}{Pe} \frac{8}{Pe^2}}{1 + \frac{4}{Pe} + \frac{4}{Pe^2}} \tag{ก4}$$

$\sigma^{*2}$  เรียกว่าแวนเรียนส์ (VARIANCE) ของเส้นระยะเวลาที่สารอยู่ในท่อยาวและ  $\mu_1^*$  คือค่าเฉลี่ยของเส้นระยะเวลา สมการ ก4 เป็นสมการที่ได้มาสำหรับภาวะตรงเขตที่เป็น เปิด - ปิด แต่ตัวเลขที่ได้จะมีความแม่นยำกว่าวิธีออปติไมส์ แต่จะเป็นวิธีที่เร็วกว่า  $\mu_1^*$  เรียกว่าค่าเฉลี่ยของเส้นระยะเวลา  $\sigma^{*2}$  เรียกว่าแวนเรียนส์ และวิธีคำนวณดังกล่าวจากเส้นระยะเวลาที่สารอยู่ในท่อยาว (RESIDENCE TIME DISTRIBUTION) เป็นดังนี้

$$\mu_1^* = \frac{\sum t_i \cdot x_i}{\sum x_i} \tag{ก5}$$

$$\sigma^{*2} = \frac{\sum t_i^2 \cdot x_i}{\sum x_i} - \mu_1^{*2} \tag{ก6}$$

ข้อมูลจากกรุปที่ 1 สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

i	t	$x_i$	$t_i \cdot x_i$	$t_i^2 \cdot x_i$
0	3.15	0	0.00	0.000
1	3.25	18	58.50	190.125
2	3.35	8	26.80	89.780
3	3.45	4	13.80	47.610
4	3.55	4	14.20	50.410
5	3.65	3	10.95	39.968
6	3.75	3	11.25	47.188
7	3.85	2	7.70	29.645
8	3.95	2	7.90	31.205



i	t	$x_i$	$t_i x_i$	$t_i^2 \cdot x_i$
9	4.05	1	4.05	16.402
10	4.15	2	8.30	34.445
11	4.25	1	4.25	18.062
12	4.35	1	4.35	18.922
13	4.45	2	8.90	39.605
14	4.55	1	4.55	20.702
15	4.65	1	4.65	21.622
16	4.75	1	4.75	22.562
17	4.85	1	4.85	23.522
18	4.95	0	0.00	0.000
19	5.05	1	5.05	25.502
20	5.15	0	0.00	0.000
		56	204.80	762.277

$\mu_1^* = 3.657 \text{ sec.}$        $\sigma^{*2} = 13.612 - 13.374 = 0.238$

$\frac{\sigma^{*2}}{\mu_1^{*2}} = 0.0178$        $P_e = 115$

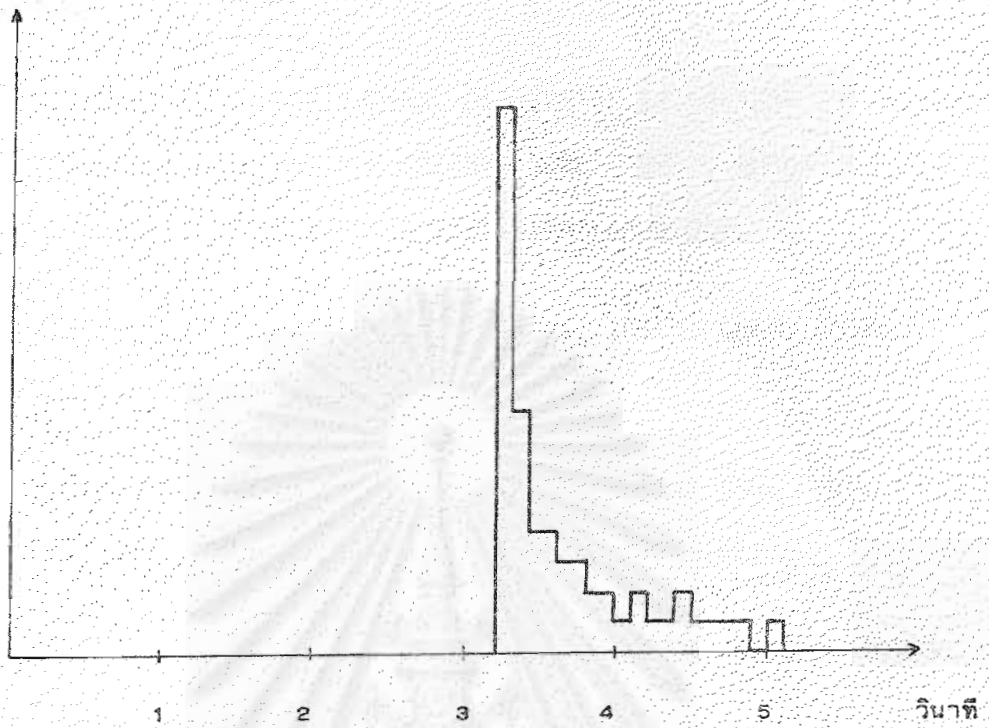
จากสมการ (ก4) สามารถคำนวณ  $\sigma^{*2}/\mu_1^{*2}$  จากค่าของ  $P_e$  ได้ดังนี้

$P_e$	$\sigma^{*2}/\mu_1^{*2}$
150	0.013333
120	0.016662
110	0.018176
100	0.019992
50	0.039941
30	0.066406

$P_e$	$\sigma^{*2}/\mu_i^{*2}$
20	0.099174
10	0.194444
5	0.367347
3	0.560000
1	1.111111
0.5	1.440000
0.3	1.625709
0.1	1.859410

สำหรับการทดลองทั้ง 12 ชุด ได้บันทึกการคำนวณเบอร์เพเคล็ดดังต่อไปนี้

ตัวกระจาย	อัตราการไหลของ เฟสหยด ซีซี/วินาที	สมการเส้นความเร็ว ของหยด ซม./วินาที	เบอร์เพเคล็ด ที่คำนวณได้
ก	5.03	$V = 32.5 - 1.54 r^{1.32}$	55
ก	6.67	$V = 37 - 3.93 r$	27
ก	8.68	$V = 38 - 4.11 r$	24
ข	5.09	$V = 33 - 1.38 r^{1.47}$	55
ข	6.67	$V = 34 - 1.94 r^{1.27}$	44
ข	8.68	$V = 40 - 4.46 r$	37
ค	5.03	$V = 30.5 - 0.12 r^{2.98}$	10.5
ค	6.67	$V = 34.5 - 1.39 r^{1.46}$	46
ค	8.68	$V = 35 - 1.48 r^{1.30}$	35
ง	5.03	$V = 30.5 - 0.39 r^{1.90}$	125
ง	6.67	$V = 31 - 0.13 r^{2.58}$	115
ง	8.68	$V = 33 - 0.15 r^{2.70}$	56



รูปที่ 1 - ระยะเวลาที่หยุดอยู่ในท่อยาว 1 เมตร (Residence time Distribution)

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรณานุกรม

1. MIYAUCHI T. - LONGITUDINAL DISPERSION IN SOLVENT EXTRACTION COLUMNS : MATHEMATICAL THEORY, UCRL - 3911, AUGUST 15, 1957, UNIVERSITY OF CALIFORNIA RADIATION LABORATORY.
2. WIJFFELS J. B., RIETEMA K. - TRANS. INSTN. CHEM. ENGRS., VOL. 50, 1972, P. 224 - 239.
3. STEINER L., HORVATH M., HARTLAND S. - IND. ENG. CHEM. PROCESS DES. DEV., VOL. 17., NO. 1, 1978, P. 175 -182.
4. VEDAIYAN S., DEGALEESAN, T. E., AND LADDHA, G. S. - INDIAN J. TECH., 12, 1974.
5. SKELLAND, A. H. P., AND JOHNSON K. R. - CAN. J. CHEM. ENGG., 52, 732, 1974.
6. HAYWORTH, C. B., TREYBAL, R. E. - IND. ENGG. CHEM., 42, 6, 1950.
7. VIGNE A. - GENIE CHIMIQUE, 93, 6, 173, 1965.
8. HU S., KINTER R. T. - A. I. CHE. JL., 1, 1, 42, 1955.
9. BARAME S. - THESE DOCTEUR - INGENIEUR, UNIVERSITY PAUL SABATIER DE TOULOUSE, JUIN 1972.
10. ARTHAYUKTI W. - THESE DOCTEUR INGENIEUR, UNIVERSITY PAUL SABATIER DE TOULOUSE, JUIN 1975.
11. LADDHA G. S., DEGALEESAN T.E. - TRANSPORT PHENOMENA IN LIQUID EXTRACTION TATA MCGRAW - HILL, NEW DELHI, FEBRUARY 1974.

12. HANSON C. - RECENT ADVANCES IN LIQUID - LIQUID EXTRACTION, PERGAMON PERSS, 1971.
13. ANDERSON W. J., PRATT H. R. C., CHEM. ENGG. SCI., 33, P. 995 - 1002, 1978.
14. RIETEMA K., OTTENGRAF S. P. P., TRANS. INSTN. CHEM. ENGRS., 48, T54, 1970.
15. YEHEKEL J., KEHAT E., CHEM. ENGG. SCI., 26, 2037, 1971.
16. OMRAN N. M., FOSTER P. J., TRANS. INSTN. CHEM. ENGRS., 55, 171, 1977.
17. UEYAMA K., MIYAUCHI T, "PROPERTIES OF RECIRCULATING TURBULENT TWO PHASE FLOW IN GAS BUBBLE COLUMNS" TO HAVE BEEN PUBLISHED IN A. I. CH. E. J. IN LATE 1979 OR 1980.