

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

มันสิน ตันกุลเวศม์. 2542, วิศวกรรมประปา. เล่ม 1, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

Anthony B. 2006. Sustainable separation treatment. Filtration Separation Global solutions within filtration and separation 02127: 32-35.

Bidault A., Clauss F., Helaine D. and Balavoine C. 1997. Floc agglomeration and structuration by a specific talc mineral composition. Wat. Sci. Tech 36: 57-68.

Borts M.A., Ek'Skay N.S. and Lur'e I.G. 1982. Koks I Khimiya. 6: 8-10. Cited in Roldan-villasana, E.J. and Williams R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering 12: 1225-1243.

Bradley D. 1965. The Hydrocyclone. New York: Pergamon Press Ltd.

Bratby J. and Marais G.V.R. 1975. Water Resources & Public Health Engineering. South Africa. University of Cape Town. 157-197

Puprasert C. 2004. contribution a la mise au point d'application specifique des hydrocyclones en traitement des eaux (In French). Thèse de Doctorat. Sciences des procédés-spécialité: Génie des Procédés de l'Environnement. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

Monod J. 1991. Water Treatment Handbook. 6<sup>th</sup> ed. 1 vol. Paris: Degremont.

- Kelsall D.F. 1952. A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone. Trans. Inst. Chem. Eng 30: 87-104
- Kraipech W. 2005. An investigation of the effect of the particle-fluid and particle-particle interactions on the flow within a hydrocyclone. Chemical Engineering Journal 111: 189-197
- Metcalf & Eddy. 2003. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill.
- Plitt L.R. and Lilje E.O. 1967. Trans Soc Mining Eng. Dec: 435-439. Cited in Roldan-villasana, E.J. and Williams R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering 12: 1225-1243.
- Roldan-villasana E.J. and Williams R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering 12: 1225-1243.
- Rushton A., Ward A.S. and Holdich R.G. 2000. Solid-Liquid Filtration and Separation Technology. 2<sup>nd</sup> ed. Weinheim: Wiley-VCH.
- Svarovsky L. 1984. Hydrocyclone. Pennsylvania: Rinehart and Winston Ltd. 30-43.
- Visman J. and Hamza H.A. 1973. CIM Bull. Feb. 78-81. Cited in Roldan-villasana, E.J. and Williams R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering 12: 1225-1243.
- Wallace L.B., Dabir B. and Petty C.A. 1980. Che Eng Commun. 7: 27-36. Cited in Roldan-villasana, E.J. and Williams R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering 12: 1225-1243.

McCabe W.L., Smith J.C. and Harroitt P. 1993. Unit operations of chemical engineering. Singapore: McGraw-Hill Book Co.

Williams R.A. and Roldan-Villasana E.J. 1991. Advances in Measurement and Control of Colloidal Processes. Butterworth-Heinemann. Oxford. 18-34. Cited in Roldan-villasana, E.J. and Williams R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering 12: 1225-1243.

Woodfield D. and Bickert G. 2004. Separation of flocs in hydrocyclones-significance of floc breakage and floc hydrodynamics. Mineral processing 73: 239-249

ภาคผนวก ก

การทำจารีทดสอบ

## การทำจารทดสอบ

สารโคเอกกุลแลนทที่มีชื่อทางการค้าได้แก่

- FC300 โพลีเมอร์ประจุบวก
- FO107 โพลีเมอร์ประจุบวก
- FO4190 โพลีเมอร์ประจุบวก
- AN910 โพลีเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุ (ขึ้นกับค่าพีเอช)
- AN934 โพลีเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุ (ขึ้นกับค่าพีเอช)

ความเข้มข้นของแต่ละสารละลายโคเอกกุลแลนทที่มีค่า 1 กรัมต่อลิตร ซึ่งโพลีเมอร์ทั้ง 5 ชนิดนี้ เป็นสารเคมีที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ INSA แต่เมื่อทำการทดลองแล้ว เลือกสารโพลีเมอร์ FO107, AN910 และ AN934 เท่านั้น ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติไว้ในหัวข้อที่ ก.5

### ก.1 หาชนิดของสารละลายโคเอกกุลแลนทสำหรับกระบวนการโคเอกกุลเลชัน และฟลอกกุลเลชัน

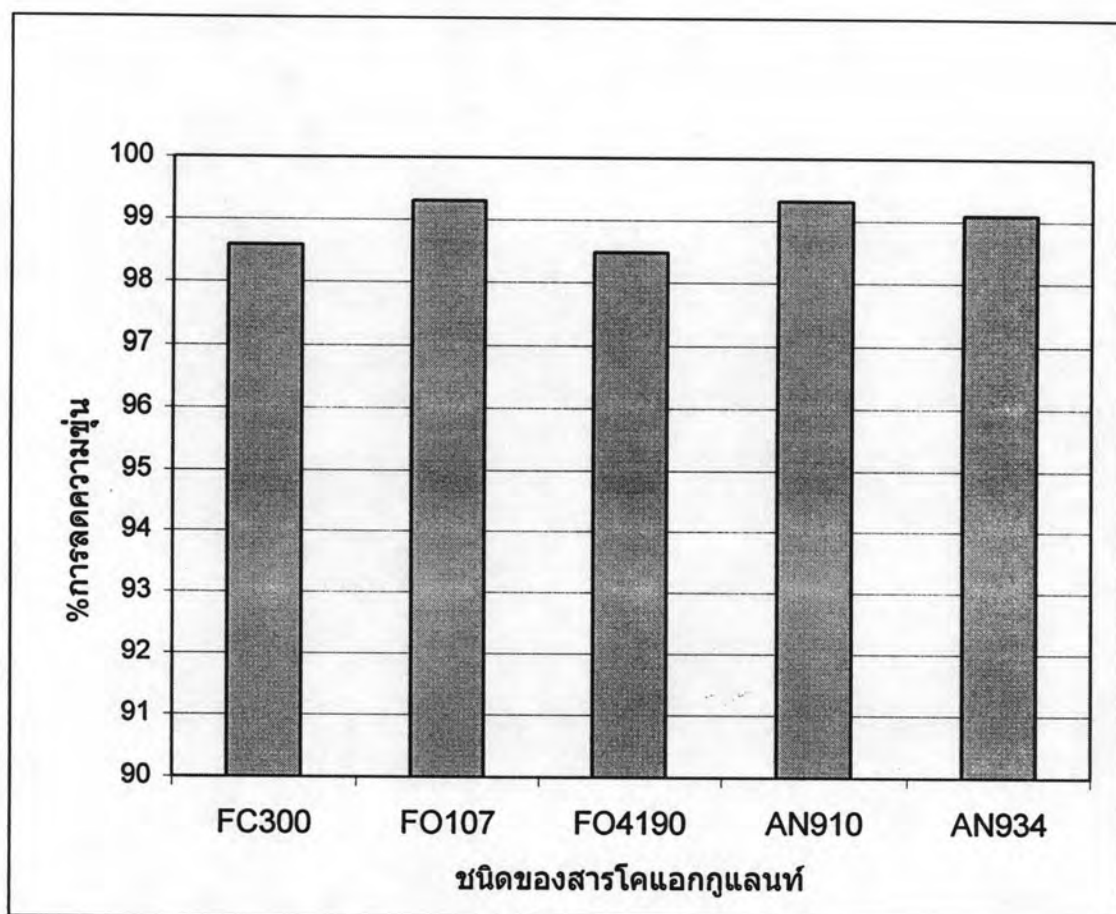
#### วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารแขวนลอยเบนโทไนต์เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร จำนวน 5 บีกเกอร์
2. เติมสารละลายโคเอกกุลแลนทแต่ละชนิดปริมาตร 1 มิลลิลิตรลงในสารแขวนลอยเบนโทไนต์ที่อยู่ในบีกเกอร์ ให้มีความเข้มข้น 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ทำการกวนเร็วด้วยความเร็วการกวน 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที
4. ทำการกวนช้าด้วยความเร็วการกวน 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
5. ปลอ่ยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที
6. เก็บตัวอย่างน้ำใสภายในบีกเกอร์นำมาวัดความขุ่นเปรียบเทียบกับน้ำดิบสังเคราะห์ที่ไม่ได้เติมสารละลายโคเอกกุลแลนท

ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ค่าความขุ่นหลังจากตกตะกอน

ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์	ค่าความขุ่น (NTU)	% การลดความขุ่น
Blank	345.00	0
FC300	4.86	98.59
FO107	2.40	99.30
FO4190	5.24	98.48
AN910	2.35	99.32
AN934	3.13	99.09

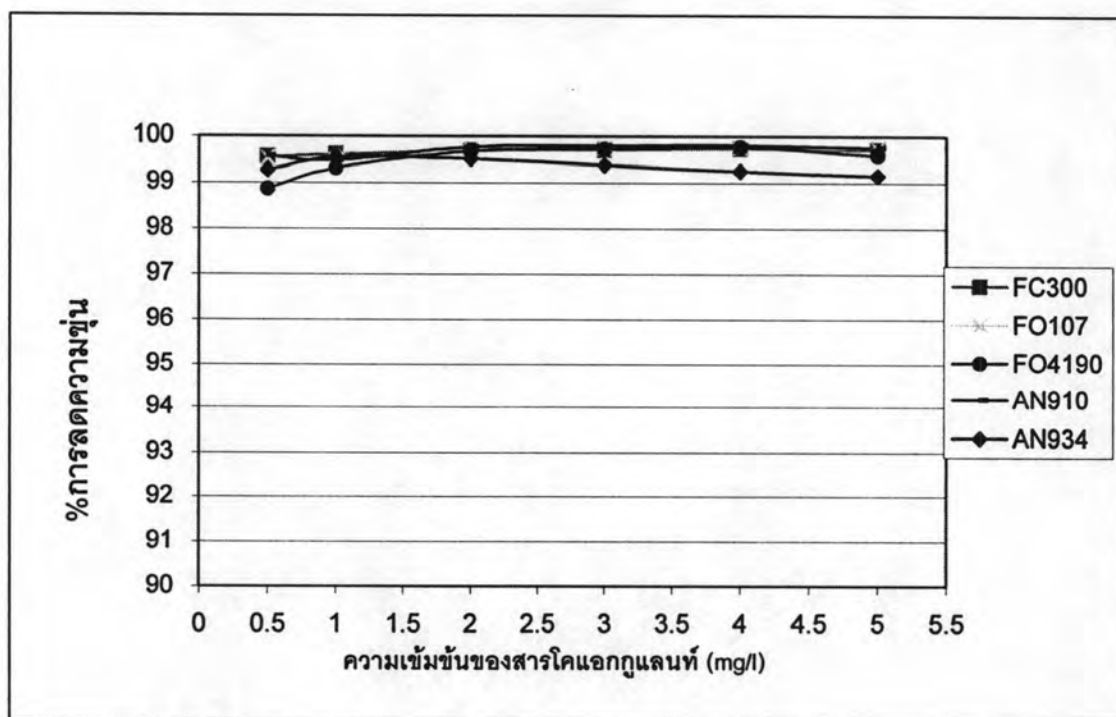


รูปที่ ก.1 เปรียบเทียบการลดความขุ่นด้วยความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร  
ของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด

## ก.2 หาความเข้มข้นสารละลายโคแอกกูแลนต์เพื่อใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชัน

### วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารแขวนลอยเบนโทไนต์เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร จำนวน 6 บีกเกอร์
2. เติมสารละลายโคแอกกูแลนต์แต่ละความเข้มข้น ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ทำการกวนเร็วด้วยความเร็วการกวน 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที
4. ทำการกวนช้าด้วยความเร็วการกวน 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
5. ปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที
6. เก็บตัวอย่างน้ำใสภายในบีกเกอร์นำมาวัดความขุ่นเปรียบเทียบกับน้ำดิบสังเคราะห์ที่ไม่ได้เติมสารละลายโคแอกกูแลนต์



รูปที่ ก.2 เปรียบเทียบการลดความขุ่นที่แต่ละความเข้มข้นของสารละลายโคแอกกูแลนต์

### ก.3 ตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลสำหรับกระบวนการโคแอกกูแลชั่น

ในการคำนวณหัวข้อนี้เพื่อหาความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ที่จะใช้ในการทดลองกับถังปฏิกริยาไฮบริด ซึ่งในการทดลองจะเตรียมความเข้มข้นให้คงที่และปรับเปลี่ยนปริมาณอัตราการจ่ายสารโคแอกกูแลนท์เข้าสู่ถังปฏิกริยา โดยที่ความเข้มข้นออกสุดท้าย จะต้องมีความเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง

วิธีการคำนวณ

สารโคแอกกูแลนท์

ต้องการหาความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ :  $C_C$

อัตราการไหล :  $Q_C = 2.144 \text{ l/hr}$

สารแขวนลอยเบนโทไนต์

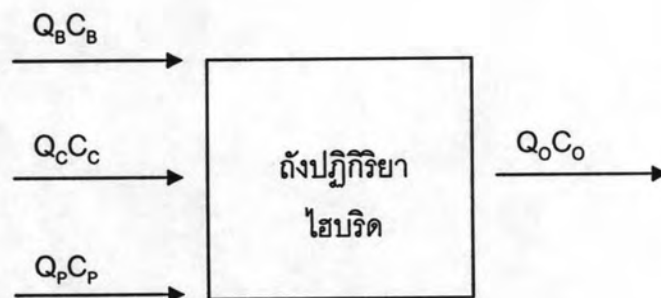
ความเข้มข้น :  $C_B = 0$

อัตราการไหล :  $Q_B = 550 \text{ l/hr}$

น้ำที่อิมิตัวด้วยอากาศ

ความเข้มข้น :  $C_P = 0$

อัตราการไหล :  $Q_P = 36 \text{ l/hr}$



รูป ก.3 สมดุลมวลของถังปฏิกริยาไฮบริด

จากการทำจาร์เทสต์ต้องการความเข้มข้น  $C_O = 1 \text{ mg/l}$

$$Q_O C_O = Q_B C_B + Q_C C_C + Q_P C_P \quad (1)$$

$$C_B = 0, \quad Q_B C_B = 0$$



$$\begin{aligned}
 C_p=0, \quad Q_p C_p &= 0 \\
 Q_o &= Q_b + Q_c + Q_p \\
 Q_o &= 550 + 2.144 + 36 \text{ l/hr} \\
 &= 558.144 \text{ l/hr}
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก (1), } C_c &= \frac{Q_o C_o}{Q_c} \\
 C_c &= \frac{(558.144 \text{ l/hr} \times 1 \text{ mg/l})}{2.144 \text{ l/hr}}
 \end{aligned}$$

$C_c$	=	0.274 g/l
-------	---	-----------

ความเข้มข้นของสารละลายโคแอกกูแลนต์ที่ต้องเตรียมก่อนจ่ายเข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริด เท่ากับ 0.274 กรัมต่อลิตร

#### ก.4 การคำนวณสมดุลมวล เพื่อหาอัตราการจ่ายสารละลายโคแอกกูแลนต์ซึ่งขึ้นกับอัตรา การจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ :  $Q_b = 150, 200, 300, 400, 500, 550 \text{ l/hr}$

ความเข้มข้น :  $C_b$

โคแอกกูแลนต์

ความเข้มข้น :  $C_c = 0.274 \text{ g/l}$

ต้องการหาอัตราการจ่ายโคแอกกูแลนต์เข้า :  $Q_c$

น้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ

ความเข้มข้น :  $C_a$

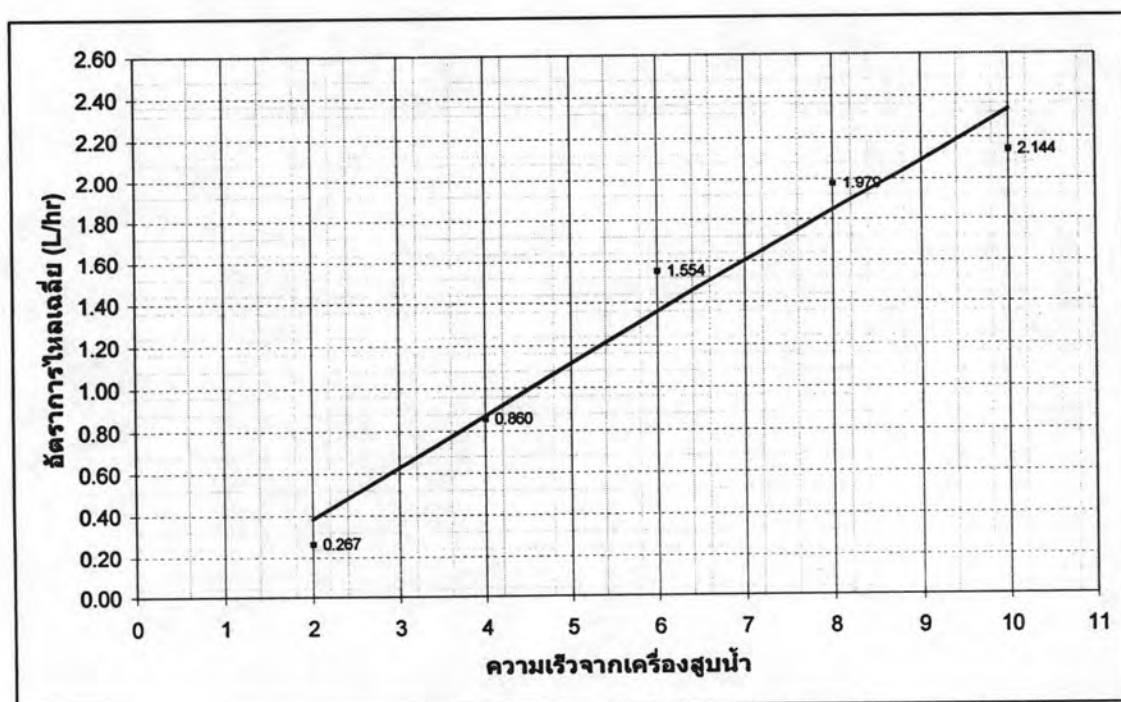
อัตราการไหล :  $Q_a = 36 \text{ l/hr}$

จากรูปที่ ก.3. ด้วยวิธีการคำนวณเดียวกัน ทำให้สามารถคำนวณหาอัตราการจ่ายสารละลายโคแอกกูแลนท์เข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริด เพื่อคงความเข้มข้นสุดท้ายที่ออกจากถังปฏิกิริยาให้มีค่า 0.274 กรัมต่อลิตร โดยผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 อัตราการจ่ายสารละลายโคแอกกูแลนท์ที่ขึ้นกับอัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	อัตราการจ่ายสารโคแอกกูแลนท์ (l/hr)	Scale of flowmeter
150	0.681	3.2
200	0.864	4.0
300	1.230	5.5
400	1.600	7.0
500	1.963	8.4
550	2.144	10.0

ค่า Scale of flowmeter แสดงไว้ในตารางเพื่อใช้ในการทำการทดลองจริง ในการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารโคแอกกูแลนท์ที่ต้องการจ่ายเข้าสู่ถังปฏิกิริยา



รูปที่ ก.4 การปรับเทียบค่าอัตราการไหลสารละลายโคแอกกูแลนท์จากเครื่องวัดอัตราการไหล

ก.5 คุณสมบัติของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด

FO107(FO9107)

ลักษณะ	ผงสีขาว	
ประจุบวก	มีความเป็นประจุบวกต่ำ	
น้ำหนักโมเลกุล	8	
ขนาดที่ผ่านการร่อนตะแกรง	2.0	มิลลิเมตร
น้ำหนักจำเพาะโดยประมาณ	0.8	
ความหนืดในหน่วย cps		
5 g/l	130	cps (centipoises)
2.5 g/l	30	cps
1 g/l	8	cps
ความเข้มข้นสูงสุด	15	g/l
ความเข้มข้นที่ใช้ทั่วไป	5	g/l
ระยะเวลาการทำละลาย	60	นาที
ความคงตัวของสารละลาย	1	วัน
อายุของผลิตภัณฑ์	12	เดือน

AN 934

ลักษณะ	ผงสีขาว	
ขนาด	1.5	มิลลิเมตร
น้ำหนักจำเพาะ	0.8	
ความหนืดในหน่วย cps		
5 g/l	1200	cps
2.5 g/l	500	cps
1 g/l	250	cps
ความเข้มข้นสูงสุด	5	g/l
ความเข้มข้นที่ใช้ทั่วไป	3	g/l
ระยะเวลาการทำละลาย	60	นาที

ความคงตัวของสารละลาย	10	วัน
อายุของผลิตภัณฑ์	10	เดือน
เป็นสารโคเอกกูแลนต์ที่ประจุลบและไม่มีประจุ		

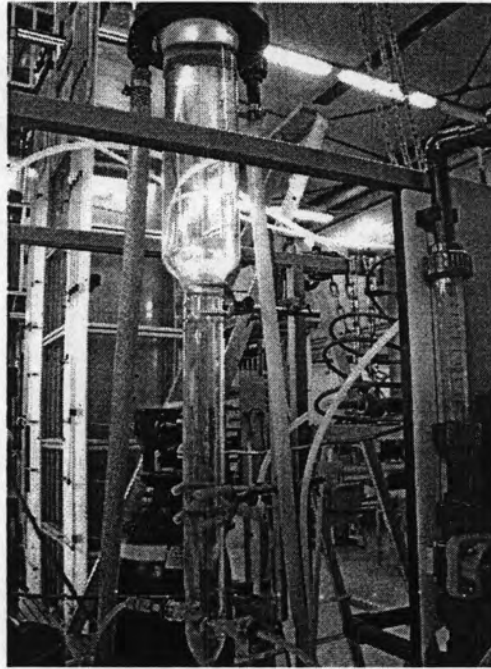
## AN910

ลักษณะ	ผงสีขาว	
ขนาดที่ผ่านการร่อนตะแกรง	1.5	มิลลิเมตร
น้ำหนักจำเพาะโดยประมาณ	0.8	
ความหนืดในหน่วย cps		
5 g/l	700	cps
2.5 g/l	350	cps
1 g/l	150	cps
ความเข้มข้นสูงสุด	10	g/l
ความเข้มข้นที่ใช้ทั่วไป	5	g/l
ระยะเวลาการทำละลาย	90	นาที
ความคงตัวของสารละลาย	5	วัน
อายุของผลิตภัณฑ์	10	เดือน
เป็นสารโคเอกกูแลนต์ที่ประจุลบและไม่มีประจุ		

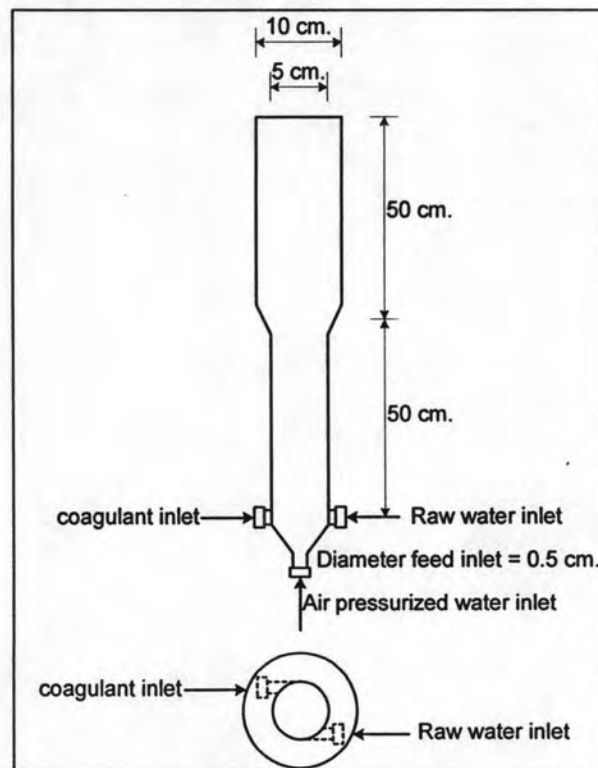
ภาคผนวก ข

การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับ  
ถังปฏิริยาไฮบริดด้วยถังปฏิริยาไฮบริดทรงกระบอก  
ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด

ข.1 รายละเอียดดั่งปฏิกิริยาไฮบริดด้วยดั่งปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก



รูปที่ ข.1 ดั่งปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด



รูปที่ ข.2 ขนาดและรายละเอียดของดั่งปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก  
ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด

ถังปฏิบัติการไฮบริดทรงกระบอกนี้ ทำการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณตอนบนของถังปฏิบัติการ เพื่อลดความเร็วแรงแผ่นต้นที่ให้เหมาะสมกับกระบวนการฟลอกกูเลชัน ถังปฏิบัติการดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

1. ช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} = 0.5 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} = \frac{\pi d^2}{4} = 1.96 \times 10^{-5} \text{ ตารางเมตร}$$

2. ช่องจ่ายน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศ Pressurized water inlet

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} = 0.5 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} = 1.96 \times 10^{-5} \text{ ตารางเมตร}$$

3. ช่องจ่ายสารละลายโคแอกกูแลนต์

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} = 0.5 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} = 1.96 \times 10^{-5} \text{ ตารางเมตร}$$

4. ถังปฏิบัติการไฮบริด

ส่วนล่าง

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} = 5 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{ความสูง} = 50 \text{ เซนติเมตร}$$

ส่วนบน

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} = 10 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{ความสูง} = 50 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{ปริมาตรของถังปฏิบัติการไฮบริด} = \frac{\pi D^2 h_2}{4} + \frac{\pi d^2 h_1}{4}$$

$$= 4.908 \times 10^{-3} \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

ประมาณ 5 ลิตร

## ข.2 เวลาที่กักเก็บน้ำของถังปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก

การคำนวณเวลาที่กักเก็บน้ำในถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก

$$\text{เวลาที่กักเก็บน้ำ} = \frac{V}{Q}$$

เมื่อ

$$V : \text{ปริมาตรของถังปฏิกิริยาทรงกระบอก} = 4.908 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$Q : \text{อัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์} = 150\text{-}550 \text{ l/hr}$$

$$A_r : \text{พื้นที่หน้าตัดของช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์} = 1.96 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\text{เวลาที่กักเก็บน้ำ} = \frac{V}{Q}$$

$$\text{เมื่อ } Q = 150 \text{ l/hr}$$

$$\text{ฉะนั้น เวลาที่กักเก็บน้ำเท่ากับ} = \frac{4.908 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{150 \text{ l/hr}} \times \frac{1000 \text{ l}}{\text{m}^3} \times \frac{3600 \text{ s}}{\text{hr}}$$

$$= 117.8 \text{ วินาที}$$

$$= 2 \text{ นาที}$$

## ข.3 คำนวณความเร็วแกรเดียนท์ที่ตำแหน่งจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริด

$$\text{จากสมการ} \quad G = \frac{Q \times \alpha \times n}{A_r R}$$

$$\text{เมื่อ } Q = 150 \text{ l/hr}$$

$$G = \frac{150 \text{ l/hr} \times 0.6 \times 0.8}{1.96 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \times 0.025 \text{ m}} \times \frac{\text{hr}}{3600 \text{ s}} \times \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ l}}$$

$$G = 40.8 \text{ ต่อวินาที}$$



ตารางที่ ข1. เวลาซักเก็บน้ำ ความเร็วแกรเดียนท์ และเทอม Gt ของถังปฏิบัติการไฮบริด  
ทรงระบอบ

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	150	200	300	400	500	550
เวลาซักเก็บ (วินาที)	118	88	59	44	35	32
ความเร็วแกรเดียนท์ (ต่อวินาที)	41	54	82	109	136	150
Gt	4830	4768	4830	4818	4800	4820

#### ข.4 ผลการทดลองด้วยสารโพลีเมอร์โคแอกกูแลนต์ FO107

สภาวะดำเนินการ

ตัวแปรควบคุม

น้ำที่อิมตัวด้วยอากาศ

ความดันในถัง = 3 บาร์

อัตราการไหล = 36.0 ลิตรต่อชั่วโมง

โคแอกกูแลนต์

ชนิด FO107

ความเข้มข้นที่ออก 0.274 กรัมต่อลิตร

อัตราการไหล ขึ้นกับอัตราการจ่ายน้ำดิบ

ดังแสดงในตารางภาคผนวก ก.2

น้ำดิบสังเคราะห์

ความเข้มข้นของเบนโทไนด์ 1 กรัมต่อลิตร

ความขุ่น 177 NTU

ตัวแปรอิสระ

อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

อัตราการไหล = 150, 200, 300, 400, 500, 550 ลิตรต่อชั่วโมง

## ผลการทดลอง

## ตารางที่ ข.2 ผลการวัดความชุ่ม

อัตราการจ่ายน้ำ ดิบสังเคราะห์ (ลิตรต่อชั่วโมง)	ความชุ่มบริเวณ แกนกลาง (NTU)	ความชุ่มบริเวณ ผิวด้านใน ไซโคลน (NTU)	หลังจากหยุด ดำเนินการ (NTU)	เปอร์เซ็นต์การลด ความชุ่ม
150	110	109	96.0	45.76
200	160	164	73.3	58.59
300	177	183	24.5	86.16
400	223	217	12.2	93.11
500	175	165	81.8	53.79
550	175	163	127.0	28.25

## ผลการทดลองแบบแบตช์ (หลังจากหยุดดำเนินการ)

- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 150 ลิตรต่อชั่วโมง  
เกิดการรวมตัวของฟลอกมีขนาดใหญ่ขึ้นและแขวนลอยอยู่ในไซโคลน น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วยังคงชุ่มอยู่จากฟลอกที่แขวนลอยนั่นเอง
- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 200 ลิตรต่อชั่วโมง  
เกิดการรวมตัวของฟลอกมีขนาดใหญ่ขึ้น ฟลอกจำนวนหนึ่งลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา แต่ส่วนใหญ่ยังคงแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกิริยา
- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 300 ลิตรต่อชั่วโมง  
ฟลอกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ค่อยๆ ตกตะกอนลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามมีฟลอกบางส่วนลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยาเช่นกัน
- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 400 ลิตรต่อชั่วโมง  
ฟลอกที่เกิดขึ้นลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยาทั้งหมด

5. อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 500 ลิตรต่อชั่วโมง

ฟลอกส่วนใหญ่ค่อยๆตกตะกอนลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกิริยา แต่มีจำนวนน้อยที่ลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา

6. อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 550 ลิตรต่อชั่วโมง

ฟลอกที่เกิดขึ้นลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยาทั้งหมด

#### ข.5 ผลการทดลองด้วยสารโพลีเมอร์โคแอกกูแลนต์ AN910

##### สภาวะดำเนินการ

##### ตัวแปรควบคุม

น้ำที่อ้อมตัวด้วยอากาศ

ความดันในถัง = 3 บาร์

อัตราการไหล = 36.0 ลิตรต่อชั่วโมง

โคแอกกูแลนต์

ชนิด AN910

ความเข้มข้นที่ออก 0.274 กรัมต่อลิตร

อัตราการไหล ขึ้นกับอัตราการจ่ายน้ำดิบ

ดังแสดงในตารางภาคผนวก ก.2

น้ำดิบสังเคราะห์

ความเข้มข้นของเบนโทไนด์ 1 กรัมต่อลิตร

ความขุ่น 187 NTU

##### ตัวแปรอิสระ

อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

อัตราการไหล = 150, 200, 300, 400, 500, 550 ลิตรต่อชั่วโมง

##### ผลการทดลอง



ตารางที่ ข.4 ผลการวัดความขุ่น

อัตราการจ่ายน้ำ ดิบสังเคราะห์ (ลิตรต่อชั่วโมง)	ความขุ่นบริเวณ แกนกลาง (NTU)	ความขุ่นบริเวณ ผิวด้านใน ไซโคลน (NTU)	หลังจากหยุด ดำเนินการ (NTU)	เปอร์เซ็นต์การลด ความขุ่น ในการดำเนินการ แบบแบตช์
150	142	115	37.0	80.2
200	152	134	34.2	81.7
300	174	184	32.7	82.5
400	173	182	29.2	84.4
500	178	178	38.3	79.5
550	177	177	41.6	76.5

ผลการทดลองแบบแบตช์ (หลังจากหยุดดำเนินการ)

- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 150 ลิตรต่อชั่วโมง  
ฟลอกที่เกิดขึ้นมีขนาดไม่ใหญ่มาก แต่ยังคงรวมตัวจนมีขนาดใหญ่ขึ้นและแขวนลอยภายในไซโคลน น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วขุ่นจากฟลอกที่แขวนลอย อย่างไรก็ตาม ที่อัตราการไหลนี้ไม่มีฟลอกตกตะกอนด้านล่างของถังปฏิกริยา
- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 200 ลิตรต่อชั่วโมง  
ฟลอกที่เกิดขึ้นรวมตัวจนมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยที่ฟลอกบางส่วนลอยขึ้นสู่ด้านบนของไซโคลน แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะแขวนลอยอยู่ในน้ำ อย่างไรก็ตามไม่มีฟลอกตกตะกอนลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกริยา
- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 300 ลิตรต่อชั่วโมง  
ฟลอกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่แขวนลอยอยู่ในน้ำและค่อยๆตกตะกอนลงด้านล่าง น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วยังขุ่นจากฟลอกที่แขวนลอยอยู่ในน้ำนั้น
- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 400 ลิตรต่อชั่วโมง  
ฟลอกที่เกิดขึ้นแขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยมีฟลอกบางส่วนลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกริยา และมีบางส่วนที่ตกตะกอนลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกริยา

5. อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 500 ลิตรต่อชั่วโมง  
 ฟลอกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ค่อยๆตกตะกอนลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกริยา แต่มีบางส่วนที่ลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกริยาเช่นกัน

6. อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 550 ลิตรต่อชั่วโมง  
 ฟลอกที่เกิดขึ้นลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกริยาทั้งหมด

#### ข.6 ผลการทดลองด้วยสารโพลิเมอร์โคแอกกูแลนท์ AN934

##### สภาวะดำเนินการ

##### ตัวแปรควบคุม

##### น้ำที่อิมตัวด้วยอากาศ

ความดันในถัง = 3 บาร์

อัตราการไหล = 36.0 ลิตรต่อชั่วโมง

##### โคแอกกูแลนท์

ชนิด AN934

ความเข้มข้นที่ออก 0.274 กรัมต่อลิตร

อัตราการไหล ขึ้นกับอัตราการจ่ายน้ำดิบ

ดังแสดงในตารางภาคผนวก ก.2

##### น้ำดิบสังเคราะห์

ความเข้มข้นของเบนโทไนต์ 1 กรัมต่อลิตร

ความขุ่น 199 NTU

##### ตัวแปรอิสระ

##### อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

อัตราการไหล = 150, 200, 300, 400, 500, 550 ลิตรต่อชั่วโมง

## ผลการทดลอง

## ตารางที่ ข.5 ผลการวัดความขุ่น

อัตราการจ่ายน้ำ ดิบสังเคราะห์ (ลิตรต่อชั่วโมง)	ความขุ่นบริเวณ แกนกลาง (NTU)	ความขุ่นบริเวณ ผิวด้านในไซโคลน (NTU)	หลังจากหยุด ดำเนินการ (NTU)	เปอร์เซ็นต์การลด ความขุ่น
150	147	92.5	22.7	88.6
200	128	122	21.1	89.4
300	179	186	17.5	91.2
400	187	177	19.5	90.2
500	95	162	36.4	81.7
550	169	200	47.0	63.3

## ผลการทดลองแบบเบตซ์ (หลังจากหยุดดำเนินการ)

- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 150 ลิตรต่อชั่วโมง  
ฟลอกที่เกิดขึ้นค่อยๆลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา แต่น้ำที่ผ่านการบำบัดยังคงขุ่นจากฟลอกที่แขวนลอยอยู่ภายใน
- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 200 ลิตรต่อชั่วโมง  
ฟลอกที่เกิดขึ้นค่อยๆลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา แต่น้ำที่ผ่านการบำบัดยังคงขุ่นจากฟลอกที่แขวนลอยอยู่ภายใน
- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 300 ลิตรต่อชั่วโมง  
ฟลอกที่เกิดขึ้นค่อยๆลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา แต่น้ำที่ผ่านการบำบัดยังคงขุ่นจากฟลอกที่แขวนลอยอยู่ภายใน
- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 400 ลิตรต่อชั่วโมง  
ฟลอกที่เกิดขึ้นลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยาทั้งหมด
- อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 500 ลิตรต่อชั่วโมง  
ฟลอกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ค่อยๆลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา

6. อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ = 550 ลิตรต่อชั่วโมง

ฟลอกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่แขวนลอยกระจายทั่วภายในถังปฏิกิริยา แต่มีฟลอกบางส่วนลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา อีกทั้งตกตะกอนด้านล่างเช่นกัน

### ข.7 การคำนวณด้วยกฎของเฮนรี

วิธีการคำนวณหาสัดส่วนปริมาตรการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลเข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริดทั้งหมด

ความเข้มข้นที่คงที่หรืออิ่มตัวของแก๊สที่ละลายในของไหลนั้น ขึ้นกับชนิดของแก๊สและความดันย่อยของแก๊สที่สัมผัสกับของไหล โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของแก๊สในบรรยากาศเหนือของไหล และสัดส่วนโมลของแก๊สในของไหลแสดงได้ดังสมการที่ 2.26 ซึ่งเรียกว่ากฎของเฮนรี (Metcalf and Eddy, 2003)

$$P_g = \frac{H}{P_T} x_g \quad (2.26)$$

โดยที่  $P_g$  = สัดส่วนโมลของแก๊สในอากาศ, โมลแก๊ส/โมลอากาศ  
 $H$  = ค่าคงที่กฎของเฮนรี, บรรยากาศ (โมลแก๊ส/โมลอากาศ)  
 (โมลแก๊ส/โมลน้ำ)

$P_T$  = ความดันรวม ซึ่งโดยทั่วไปใช้ 1 บรรยากาศ

$x_g$  = สัดส่วนโมลของอากาศในน้ำ, โมลแก๊ส/โมลน้ำ

$$= \frac{\text{moleGas}(n_g)}{\text{moleGas}(n_g) + \text{moleWater}(n_w)}$$

สำหรับอากาศ  $P_g = 1.0$  โมลอากาศต่อโมลอากาศ

$$H = 66400 \frac{\text{atm}(\text{moleGas} / \text{moleAir})}{(\text{moleGas} / \text{moleWater})} \quad (\text{Metcalf and Eddy, 2003})$$

$$x_g = \frac{P_g \times P_T}{H}$$

$$x_g = \frac{1.0(\text{moleAir} / \text{moleAir}) \times 1.0\text{atm}}{66400\text{atm} \frac{(\text{moleGas} / \text{moleAir})}{(\text{moleGas} / \text{moleWater})}}$$

$$= 1.506 \times 10^{-5} \text{ moleAir/moleWater}$$

## การคำนวณโมลอากาศ

$$\text{น้ำ 1 ลิตรประกอบไปด้วย } \frac{1000g}{18g/mole} = 55.6mole$$

$$\frac{n_g}{n_g + n_w} = 1.506 \times 10^{-5} \text{ moleAir/moleWater}$$

$$\frac{n_g}{n_g + 55.6} = 1.506 \times 10^{-5} \text{ moleAir/moleWater}$$

$$n_g = 8.373 \times 10^{-4} \text{ moleAir/L}$$

ความดัน (บาร์ ≈ บรรยากาศ)	$n_g$ (mole Air/L)
1.0	$0.837 \times 10^{-3}$
2.0	$1.675 \times 10^{-3}$
2.5	$2.093 \times 10^{-3}$
3.0	$2.512 \times 10^{-3}$
3.5	$2.931 \times 10^{-3}$
4.0	$3.350 \times 10^{-3}$

## การคำนวณความเข้มข้นที่อิ่มตัวของอากาศ

เมื่อความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศ

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ} = 28.97 \text{ g/mole}$$

$$C_s \approx \frac{0.837 \times 10^{-3} \text{ moleAir / L} (28.97 \text{ g / moleAir})}{(1g / 10^3 \text{ mg})}$$

$$C_s \approx 24.26 \text{ mg/L}$$

ความดัน (บาร์)	ความเข้มข้นของอากาศ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1.0	24.26
2.0	48.52
2.5	60.63
3.0	72.77
3.5	84.91
4.0	97.05



### การคำนวณอัตราการไหลมวลอากาศ (Air mass flowrate)

เมื่อน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศไหลเข้าสู่ถังปฏิริยาไฮบริด อากาศที่อิ่มตัวในน้ำจะแทรกตัวออกมาเป็นฟองอากาศ

ภายในถังปฏิริยาไฮบริดมีความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศ

ดังนั้น เมื่อความดันภายในถังความดันมีค่าเท่ากับ 2 บรรยากาศ จะทำให้ฟองอากาศปรากฏภายในถังปฏิริยาไฮบริดมีปริมาตรเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 &= \text{ความเข้มข้นอากาศที่ 2 บรรยากาศ} - \text{ความเข้มข้นอากาศที่ 1 บรรยากาศ} \\
 &= 48.52 - 24.26 \text{ mg/L} \\
 &= 24.26 \text{ mg/L}
 \end{aligned}$$

อัตราการไหลสูงสุดของน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ = 36 L/hr

ดังนั้นอัตราการไหลมวลอากาศ เมื่อความดันมีค่าเท่ากับ 2 บรรยากาศ

$$\begin{aligned}
 Q_{Air} \times C_{Air} &= \frac{24.26 \text{ mg}}{\text{L}} \times \frac{36 \text{ L}}{\text{hr}} \\
 Q_{Air} \times C_{Air} &= 873.36 \text{ mg/hr}
 \end{aligned}$$

ความดัน (บรรยากาศ)	$n_g$ (mole/L)	ฟองอากาศภายใน ถังปฏิริยาไฮบริด(mg/L)	อัตราการไหลของฟองอากาศใน ถังปฏิริยาไฮบริด (mg/hr)
1.0	$0.837 \times 10^{-3}$	0	0
2.0	$1.675 \times 10^{-3}$	24.26	873.36
2.5	$2.093 \times 10^{-3}$	36.37	1309.32
3.0	$2.512 \times 10^{-3}$	48.51	1746.36
3.5	$2.931 \times 10^{-3}$	60.65	2183.40
4.0	$3.350 \times 10^{-3}$	72.79	2620.44

### การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ

จากกฎแก๊สในอุดมคติ

$$PV = nRT$$

$P$	=	ความดันบรรยากาศ, atm	
$V$	=	ปริมาตรอากาศ, m <sup>3</sup>	
$n$	=	โมลอากาศ, mole	
$R$	=	ค่าคงที่ของแก๊ส,	= 0.08206 L atm / mol K = 8.3145 J / mole K
$T$	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์, K, อุณหภูมิห้องประมาณ	= 298 K

$$\text{อัตราการไหลของอากาศภายในถังปฏิกิริยาไฮบริด} = 873.36 \text{ mg/hr}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของโมลอากาศ ; } n &= \frac{873.36 \text{ mg/hr}}{28.97 \text{ g/mole Air}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \\ &= 0.030 \text{ mole/hr} \end{aligned}$$

เมื่อความดัน = 2.0 บรรยากาศ,

$$\begin{aligned} V &= \frac{nRT}{P} \\ V &= \frac{0.030 \frac{\text{mole}}{\text{hr}} \times 0.08206 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mole} \cdot \text{K}} \times 298 \text{K}}{2.0 \text{atm}} \\ V &= 0.369 \text{ L/hr} \end{aligned}$$

ความดัน (บรรยากาศ)	$n_g$ (mole/L)	ฟองอากาศภายใน ถังปฏิกิริยาไฮบริด (mg/L)	อัตราการไหลฟองอากาศ ภายในถังปฏิกิริยาไฮบริด (mg/hr)	อัตราการไหล ปริมาตรของอากาศ (L/hr)
1.0	$0.837 \times 10^{-3}$	0	0	0
2.0	$1.675 \times 10^{-3}$	24.26	873.36	0.369
2.5	$2.093 \times 10^{-3}$	36.37	1309.32	0.442
3.0	$2.512 \times 10^{-3}$	48.51	1746.36	0.491
3.5	$2.931 \times 10^{-3}$	60.65	2183.40	0.527
4.0	$3.350 \times 10^{-3}$	72.79	2620.44	0.553

การคำนวณสัดส่วนการไหลปริมาตรอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมด (Air flow-  
Inlet flow fraction)

$$\begin{aligned} \text{อัตราไหลเข้าทั้งหมด} &= \text{อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)} \\ &+ \text{อัตราการจ่ายสารละลายโคแอกกูแลนต์ (L/hr)} \\ &+ \text{อัตราการจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ (L/hr)} \end{aligned}$$

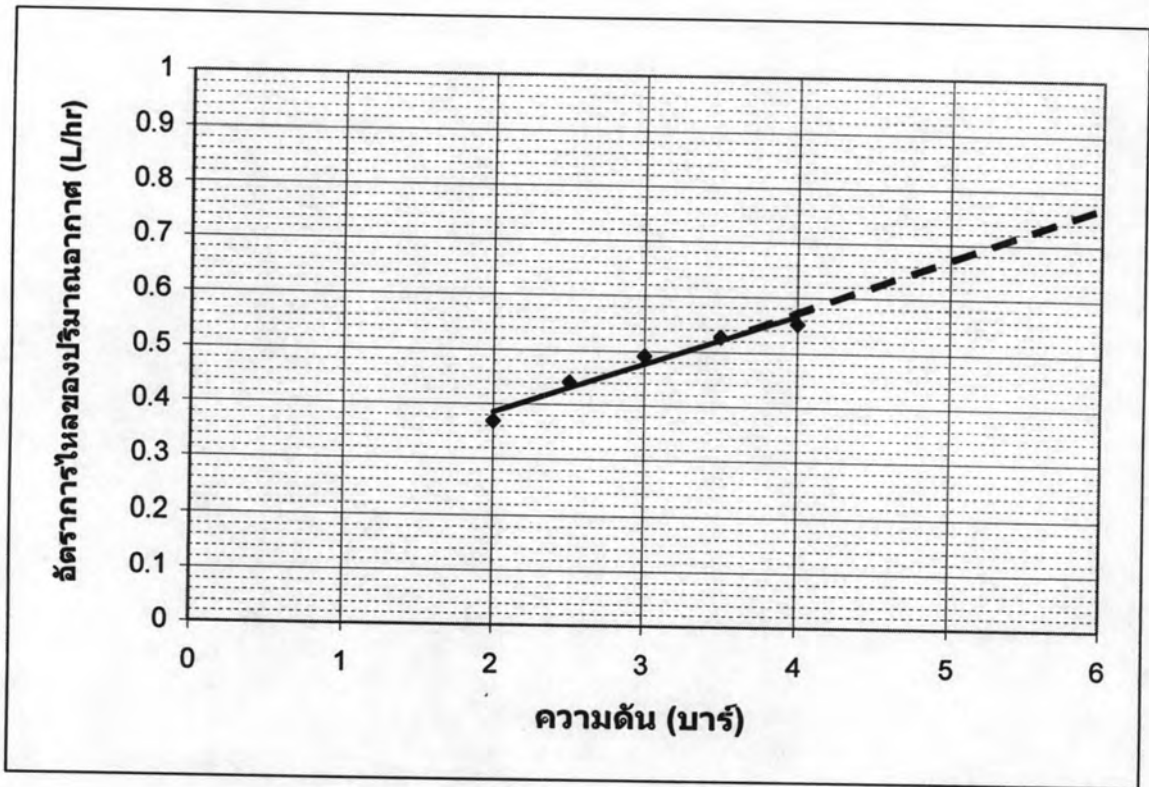
สัดส่วนการไหลปริมาตรอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมด =

$$\frac{\text{Air Volumn Flowrate (L/hr)}}{Q_{\text{bentonite}} + Q_{\text{coagulant}} + Q_{\text{air}} \cdot \text{pressurized Flowrate (L/hr)}}$$

หมายเหตุ อัตราการจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศคงที่ที่ค่าสูงสุดเท่ากับ 36 L/hr

ตารางที่ ข.6 สัดส่วนการไหลปริมาตรอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมด

Q bentonite L/hr	Q coagulant L/hr	ความดัน (bar)				
		2	2,5	3	3,5	4
Air flowrate - Inlet flowrate Fraction						
150	0,681	0,0020	0,0024	0,0026	(0,0028)	(0,0030)
200	0,864	0,0016	0,0019	0,0021	(0,0022)	(0,0023)
300	1,230	0,0011	0,0013	0,0015	(0,0016)	(0,0016)
400	1,600	0,0008	0,0010	(0,0011)	(0,0012)	(0,0013)
500	1,963	0,0007	0,0008	0,0009	(0,0010)	(0,0010)
550	2,144	0,0006	0,0008	0,0008	(0,0009)	0,0009

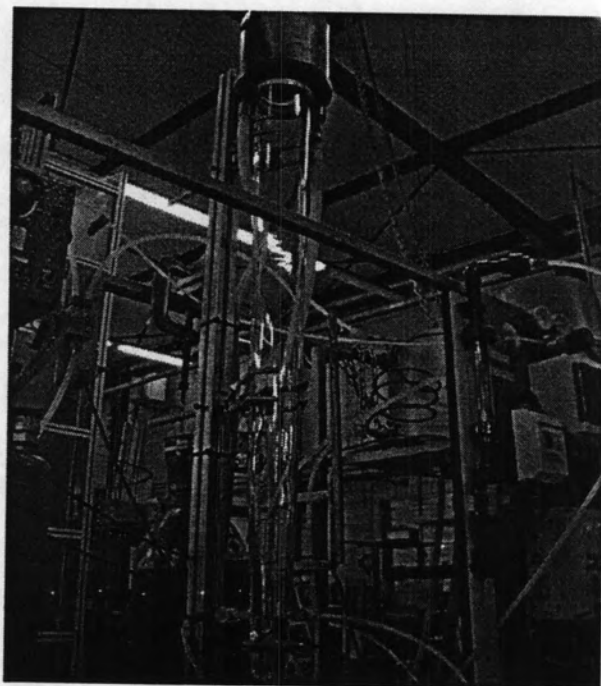


รูปที่ ข.3 ผลการเปรียบเทียบค่าระหว่างความดันภายในถังกับปริมาตรการไหลอากาศ

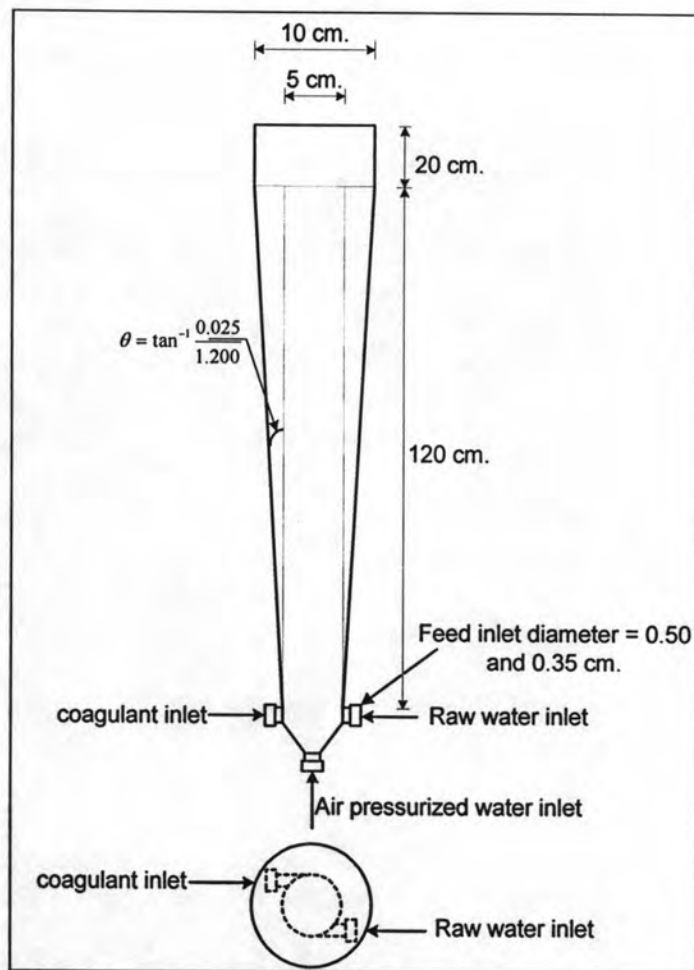
ภาคผนวก ค

การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับ  
ถังปฏิบัติการไฮบริดทรงกรวย  
ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน

ค.1 รายละเอียดถึงปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวย



รูปที่ ค.1 ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน



รูปที่ ค.2 รายละเอียดถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน

ถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกรวย ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกนนี้ ไม่มีจุดเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นตามแนวแกนนี้ เพื่อลดความเร็วแกรเดียนท์ภายในถังปฏิกริยาไฮบริด ให้เหมาะกับกระบวนการฟล็อกกูเลชัน รายละเอียดลักษณะของถังปฏิกริยามีดังนี้

1. ช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.5 และ 0.35 เซนติเมตร

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} = \frac{\pi d^2}{4} = 1.96 \times 10^{-5} \text{ ตารางเมตร}$$

2. ช่องจ่ายน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศ (Pressurized water inlet)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.5 เซนติเมตร

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} = 1.96 \times 10^{-5} \text{ ตารางเมตร}$$

## 3. ช่องจ่ายสารละลายโคแอกกูแลนต์

$$\begin{aligned} \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} &= 0.5 \text{ เซนติเมตร} \\ \text{พื้นที่หน้าตัด} &= 1.96 \times 10^{-5} \text{ ตารางเมตร} \end{aligned}$$

## 4. ถังปฏิกิริยาไฮบริด

ตำแหน่งล่างสุด

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} = 5 \text{ เซนติเมตร}$$

ตำแหน่งบนสุด

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} = 10 \text{ เซนติเมตร}$$

ปริมาตรของถังปฏิกิริยาไฮบริด

$$\text{ผลจากการทำกาลักน้ำ} = 7.2 \text{ ลิตร}$$

## ค.2 เวลาที่กักเก็บน้ำของถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก

การคำนวณเวลาที่กักเก็บน้ำในถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำเข้าเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร

$$\text{เวลาที่กักเก็บน้ำ} = \frac{V}{Q}$$

$$V : \text{ปริมาตรของถังปฏิกิริยาทรงกระบอก} = 7.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$Q : \text{อัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์} = 150\text{--}450 \text{ l/hr}$$

$$A_f : \text{พื้นที่หน้าตัดของช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์} = 1.96 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

ตัวอย่างการคำนวณ

เมื่อ  $Q=150 \text{ l/hr}$ 

$$\text{ฉะนั้น เวลาที่กักเก็บน้ำเท่ากับ} = \frac{7.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{150 \text{ l/hr}} \times \frac{1000 \text{ l}}{\text{m}^3} \times \frac{3600 \text{ s}}{\text{hr}}$$

$$= 172.8 \text{ วินาที}$$

$$= 2.88 \text{ นาที}$$



คำนวณความเร็วแกระเดียนท์ที่ตำแหน่งจ่ายน้ำเข้าสู่ถังปฏิบัติการ

$$\text{จากสมการ} \quad G = \frac{Q \times \alpha \times n}{A_i(H \tan \theta + r)}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

โดยที่ตำแหน่งการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้าค่าความสูง  $H = 0$  เมตร

$$\text{ดังนั้นจะได้} \quad G = \frac{Q \times \alpha \times n}{A_i R}$$

เมื่อ  $Q = 150$  l/hr

$$G = \frac{150 \text{ l/hr} \times 0.6 \times 0.8}{1.96 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \times 0.020 \text{ m}} \times \frac{\text{hr}}{3600 \text{ s}} \times \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ l}}$$

$$G = 51 \text{ ต่อวินาที}$$

ในทำนองเดียวกัน เวลาเก็บน้ำ และความเร็วแกระเดียนท์ที่อัตราการไหลต่างๆกัน แสดงในตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 เวลาเก็บน้ำ ความเร็วแกระเดียนท์ และเทอม  $Gt$  ของถังปฏิบัติการไฮบริดทรงกรวย ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	150	200	300	400	450
เวลาเก็บ (วินาที)	173	130	86.4	65	58
ความเร็วแกระเดียนท์ที่จุดจ่ายน้ำเข้า (ต่อวินาที)	51	68	102	136	153

ด้วยวิธีการคำนวณเดียวกันนี้ ทำให้สามารถคำนวณเวลาเก็บน้ำ ความเร็วแกระเดียนท์ ณ ตำแหน่งของจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้า สำหรับถังปฏิบัติการไฮบริดทรงกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้าขนาด 0.35 เซนติเมตรได้ดังนี้

การคำนวณเวลาเก็บน้ำในถังปฏิบัติการไฮบริดทรงกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของจ่ายน้ำเข้าเท่ากับ 0.35 เซนติเมตร

$$\text{เวลากักเก็บน้ำ} = \frac{V}{Q}$$

$$V : \text{ปริมาตรของถังปฏิกริยาทรงกระบอก} = 7.2 \times 10^3 \text{ m}^3$$

$$Q : \text{อัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์} = 150-450 \text{ l/hr}$$

$$A_f : \text{พื้นที่หน้าตัดของช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์} = 9.62 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

ตารางที่ ค.2 เวลากักเก็บน้ำ ความเร็วแกรเดียนท์ และเทอม Gt ของถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกรวย ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เท่ากับ 0.35 เซนติเมตร

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	150	200	300	400	450
เวลากักเก็บ (วินาที)	173	130	86.4	65	58
ความเร็วแกรเดียนท์ที่จุดจ่ายน้ำ เข้า(ต่อวินาที)	104	139	208	277	311

### ค.3 ผลการทดลองด้วยสารโพลีเมอร์โคแอกกูแลนต์ FO107

#### สภาวะดำเนินการ

##### ตัวแปรควบคุม

##### น้ำที่อิมตัวด้วยอากาศ

$$\text{ความดันในถัง} = 3.5 \text{ บาร์}$$

$$\text{อัตราการไหล} = 36.0 \text{ ลิตรต่อชั่วโมง}$$

##### โคแอกกูแลนต์

$$\text{ชนิด} = \text{FO107}$$

$$\text{ความเข้มข้นที่ออก} = 0.274 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

$$\text{อัตราการไหล} = \text{ขึ้นกับอัตราการจ่ายน้ำดิบ}$$

ดังแสดงในตารางภาคผนวก ก.2

##### น้ำดิบสังเคราะห์

$$\text{ความเข้มข้นของเบนโทไนด์} = 1 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

$$\text{ความขุ่น} = 177 \text{ NTU}$$

##### ตัวแปรอิสระ

##### อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

$$\text{อัตราการไหล} = 150, 200, 300, 400, 450 \text{ ลิตรต่อชั่วโมง}$$

ตารางที่ ค.3 การทดลองวัดความขุ่น

1. การทดลองด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง

อัตราการไหล (L/hr)	ความขุ่น (NTU)	
	บริเวณแกนกลางของไซโคลน	บริเวณผิวด้านในของไซโคลน
150	47	48
200	75	67
300	98	84
400	92	86
450	86	83
น้ำดิบสังเคราะห์	87.8	

ตารางที่ ค.4 การทดลองแบบแบตช์

2. การทดลองแบบแบตช์

อัตราการไหล (L/hr)	ความขุ่นของน้ำ (NTU)	% การลดความขุ่น
150	18.0	79.50
200	13.0	85.19
300	13.0	85.19
400	15.5	82.35
450	13.6	84.51
น้ำดิบสังเคราะห์	87.8	

ตารางที่ ค.5 การทดลองวัดค่าของแข็งแขวนลอย





1 บริเวณแกนกลางของไซโคลน


อัตราการไหล (L/hr)	น้ำหนัก กระดาษกรอง (g)	นน.กระดาษ กรอง+ฟล็อก (g)	ปริมาตร ตัวอย่างน้ำ. (ml)	นน.ฟล็อก (g)	Suspended solid (mg/L)
150	0.1299	0.1380	50	0.0081	162
200	0.1394	0.1525	50	0.0131	262
300	0.1419	0.1586	50	0.0167	334
400	0.135	0.1501	50	0.0151	302
450	0.1502	0.1653	50	0.0151	302
น้ำดิบสังเคราะห์	0.1444	0.16	50	0.0156	312

2 บริเวณผิวด้านในไซโคลน

อัตราการไหล (L/hr)	น้ำหนัก กระดาษกรอง (g)	นน.กระดาษ กรอง+ฟล็อก (g)	ปริมาตร ตัวอย่างน้ำ. (ml)	นน.ฟล็อก (g)	Suspended solid (mg/L)
150	0.1423	0.1509	50	0.0086	172
200	0.1379	0.1511	50	0.0132	264
300	0.1381	0.1531	50	0.0150	300
400	0.1405	0.1556	50	0.0151	302
450	0.1358	0.1510	50	0.0152	304

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองจากการสังเกตการณ์

<p>อัตราการไหล</p> 	<p>150 L/hr</p> <p>ไม่เกิดการไหลแบบหมุนวน.</p> <p>มีฟลอคลอยด้านบน (5 นาที)</p> <p>น้ำยังคงขุ่นจากฟลอกที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ</p>
<p>อัตราการไหล</p> 	<p>200 L/hr</p> <p>ไม่เกิดการไหลแบบหมุนวน.</p> <p>มีฟลอคลอยด้านบน (5 นาที)</p> <p>น้ำยังคงขุ่นจากฟลอกที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ</p>
<p>อัตราการไหล</p> 	<p>300 L/hr</p> <p>เกิดฟลอคเล็กๆขึ้น</p> <p>ขนาดของฟลอคใหญ่กว่าฟลอกที่เกิดจาก 150, 200 L/hr</p> <p>ฟลอคบางส่วนลอยขึ้นด้านบน และบางส่วนตกตะกอนลงหลังจากหยุดดำเนินการ 5 นาที</p> <p>น้ำยังคงขุ่นด้วยฟลอกที่แขวนลอย.</p>
<p>อัตราการไหล</p> 	<p>400 L/hr</p> <p>เกิดฟลอคเล็กๆขึ้น</p> <p>มีการหมุนวนภายในถังปฏิบัติการไฮบริด แต่ยังไม่เกิดปรากฏการณ์แยกระหว่างฟลอกกับน้ำใส</p> <p>ฟลอคค่อยๆตกตะกอนลงหลังจากเวลาผ่านไป 5 นาที</p>

อัตราการไหล	450 L/hr
	<p>เกิดการหมุนวนตลอดความยาวของไซโคลน</p> <p>ฟล็อกมีแนวโน้มมารวมตัวกันที่บริเวณแกนกลาง</p> <p>ขนาดของฟล็อกใหญ่กว่าฟล็อกที่เกิดจากอัตราการไหลอื่นๆ</p> <p>ฟล็อกค่อยๆตกตะกอนลงหลังจากเวลาผ่านไป 5 นาที</p>

#### ค.4 ผลการทดลองด้วยสารโพลีเมอร์โคแอกกูแลนท์ AN910

##### สภาวะดำเนินการ

##### ตัวแปรควบคุม

น้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ

ความดันในถัง = 3.5 บาร์

อัตราการไหล = 36.0 ลิตรต่อชั่วโมง

##### โคแอกกูแลนท์

ชนิด AN910

ความเข้มข้นที่ออก 0.274 กรัมต่อลิตร

อัตราการไหล ขึ้นกับอัตราการจ่ายน้ำดิบ

ดังแสดงในตารางภาคผนวก ก.2

##### น้ำดิบสังเคราะห์

ความเข้มข้นของเบนโทไนต์ 1 กรัมต่อลิตร

ความขุ่น 78.3 NTU

##### ตัวแปรอิสระ

อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

อัตราการไหล = 150, 200, 300, 400, 450 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ค.7 การทดลองวัดความขุ่น

1 การทดลองด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง

อัตราการไหล (L/hr)	ความขุ่นของน้ำ (NTU)	
	บริเวณแกนกลาง	บริเวณผิวด้านในไฮโคลน
150	30.7	21.2
200	51.7	47.4
300	110	63.1
400	63.7	56.8
450	63.4	87.6
น้ำดิบสังเคราะห์	78.3	

2 การทดลองแบบแบตช์

อัตราการไหล(L/hr)	ความขุ่นของน้ำ(NTU)	% การลดความขุ่น
150	27.8	64.50
200	10.2	86.97
300	9.3	88.08
400	10.2	86.97
450	10.8	86.21
น้ำดิบสังเคราะห์	78.3	

ตารางที่ ค.8 การทดลองวัดค่าของแข็งแขวนลอย

1 บริเวณแกนกลาง





อัตราการไหล(L/hr)	นน.กระดาษกรอง (g)	นน.กระดาษกรอง+ฟล็อก (g)	ปริมาตรตัวอย่าง (ml)	นน.ฟล็อก (g)	Suspended solid (mg/L)
150	0.1425	0.1479	50	0.0054	108
200	0.1342	0.147	50	0.0128	256
300	0.1441	0.1619	50	0.0178	356
400	0.1389	0.1531	50	0.0142	284
450	0.1405	0.1574	50	0.0169	338


น้ำดิบสังเคราะห์	0.1351	0.1478	50	0.0127	254
------------------	--------	--------	----	--------	-----

2 ผิวด้านในของไฮโคลน

อัตราการไหล (L/hr)	นน.กระดาษกรอง (g)	นน.กระดาษกรอง+ฟล็อก (g)	ปริมาตรตัวอย่าง (ml)	นน.ฟล็อก (g)	Suspended solid (mg/L)
150	0.1456	0.1522	50	0.0066	132
200	0.1431	0.1539	50	0.0108	216
300	0.1405	0.1571	50	0.0166	332
400	0.1323	0.1473	50	0.015	300
450	0.1372	0.1526	50	0.0154	308

ตารางที่ ค.9 ผลการทดลองจากการสังเกตการณ์

อัตราการไหล	150 L/hr
	<p>ไม่มีการไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้นภายในไซโคลน</p> <p>มีฟล็อกลอยขึ้นด้านบนของไซโคลน</p> <p>น้ำยังคงขุ่นจากฟล็อกที่แขวนลอยอยู่</p>
อัตราการไหล	200 L/hr
	<p>ไม่มีการไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้นภายในไซโคลน</p> <p>ฟล็อกทั้งหมดลอยขึ้นสู่ด้านบนของไซโคลน</p> <p>น้ำยังคงขุ่นจากฟล็อกที่แขวนลอยอยู่</p>
อัตราการไหล	300 L/hr
	<p>เกิดฟล็อกเล็กๆขึ้นภายในไซโคลน</p> <p>ขนาดของฟล็อกที่เกิดใหญ่กว่าฟล็อกจาก 150-200 l/hr</p> <p>ฟล็อกบางส่วนลอยขึ้นด้านบน</p> <p>และบางส่วนตกตะกอนลงด้านล่างหลังจาก 5 นาที</p> <p>น้ำยังคงขุ่นจากฟล็อกที่แขวนลอย</p>
อัตราการไหล	400 L/hr
	<p>เกิดฟล็อกเล็กๆขึ้น</p> <p>การไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้นอย่างชัดเจน</p> <p>แต่ยังไม่เกิดปรากฏการณ์แยกแหว่งฟล็อกกับน้ำ</p> <p>เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ฟล็อกค่อยๆตกตะกอนลงด้านล่าง</p>

อัตราการไหล	450 L/hr
	<p>การไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้นอย่างชัดเจน</p> <p>ฟลอกมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันบริเวณแกนกลาง</p> <p>ขนาดของฟลอกที่เกิดขึ้นใหญ่กว่าอัตราการไหลอื่นๆ</p> <p>เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ฟลอกค่อยๆตกตะกอนลงด้านล่าง</p>

### ค.5 ผลการทดลองด้วยสารโพลีเมอร์โคเอกกูแลนท์ AN934

#### สภาวะดำเนินการ

##### ตัวแปรควบคุม

น้ำที่อิมิตัวด้วยอากาศ

ความดันในถัง = 3.5 บาร์

อัตราการไหล = 36.0 ลิตรต่อชั่วโมง

##### โคเอกกูแลนท์

ชนิด AN934

ความเข้มข้นที่ออก 0.274 กรัมต่อลิตร

อัตราการไหล ขึ้นกับอัตราการจ่ายน้ำดิบ

ดังแสดงในตารางภาคผนวก ก.2

##### น้ำดิบสังเคราะห์

ความเข้มข้นของเบนโทไนต์ 1 กรัมต่อลิตร

ความขุ่น 94.4 NTU

##### ตัวแปรอิสระ

อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

อัตราการไหล = 150, 200, 300, 400, 450 ลิตรต่อชั่วโมง



ตารางที่ ค.10 การทดลองวัดความขุ่น

1 การทดลองด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง

อัตราการไหล (L/hr)	ความขุ่นของน้ำ (NTU)	
	บริเวณแกนกลาง	บริเวณผิวด้านในไซโคลน
150	72.0	53.0
200	57.8	45.0
300	105.5	76.5
400	108.0	84.35
450	99.5	62.15
น้ำดิบสังเคราะห์	98.4	

2 การทดลองแบบแบตช์

อัตราการไหล (L/hr)	ความขุ่นของน้ำ (NTU)	% การลดความขุ่น
150	9.7	90.14
200	16.0	83.74
300	15.3	84.45
400	29.3	70.22
450	21.8	77.85
น้ำดิบสังเคราะห์	98.4	

ตารางที่ ค.11 ผลการทดลองวัดค่าของแข็งแขวนลอย

1 บริเวณแกนกลางของไซโคลน





อัตราการไหล (L/hr)	นน.กระดาศกรอง (g)	นน.กระดาศกรอง+ฟล็อก (g)	ปริมาตรตัวอย่าง (ml)	นน.ฟล็อก (g)	Suspended solid (mg/L)
150	0.1340	0.14390	50	0.0099	198
200	0.1449	0.15630	50	0.0114	228
300	0.1430	0.15960	50	0.0166	332
400	0.1398	0.15330	50	0.0135	270
450	0.1275	0.14100	50	0.0135	270


น้ำดิบสังเคราะห์	0.1472	0.1661	50	0.0189	378
------------------	--------	--------	----	--------	-----

2 บริเวณผิวด้านในของไซโคลน

อัตราการไหล (L/hr)	นน.กระดาศกรอง (g)	นน.กระดาศกรอง+ฟล็อก (g)	ปริมาตรตัวอย่าง (ml)	นน.ฟล็อก (g)	Suspended solid (mg/L)
150	0.1351	0.14060	50	0.00550	110
200	0.1387	0.15270	50	0.01400	280
300	0.1327	0.14970	50	0.01700	340
400	0.1347	0.14650	50	0.01180	236
450	0.1425	0.15800	50	0.01550	310

ตารางที่ ค.12 ผลการทดลองจากการสังเกตการณ์

อัตราการไหล	150 L/hr
	<p>ไม่เกิดการไหลแบบหมุนวน</p> <p>ฟลอคค่อยๆลอยขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที</p> <p>น้ำยังคงขุ่นจากฟลอคที่แขวนลอยอยู่ภายใน</p>
อัตราการไหล	200 L/hr
	<p>ไม่เกิดการไหลแบบหมุนวน</p> <p>มีฟลอคบางส่วนลอยขึ้นด้านบน และบางส่วนตกตะกอนลงด้านล่างเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที</p> <p>น้ำยังคงขุ่นจากฟลอคที่แขวนลอย</p>
อัตราการไหล	300 L/hr
	<p>เกิดการไหลแบบหมุนวนขึ้นภายในไซโคลน</p> <p>ขนาดของฟลอคที่เกิดขึ้นใหญ่กว่าจาก 150-200 l/hr</p> <p>ฟลอคบางส่วนลอยขึ้นด้านบน และบางส่วนตกตะกอนลงด้านล่างเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที</p> <p>น้ำยังคงขุ่นจากฟลอคที่แขวนลอย</p>
อัตราการไหล	400 L/hr
	<p>เกิดฟลอคเล็กๆขึ้น</p> <p>เกิดการไหลแบบหมุนวนขึ้นชัดเจนภายในไซโคลนตลอดความยาวแกน</p> <p>แต่ยังไม่เกิดปรากฏการณ์แยกระหว่างฟลอกกับน้ำใส</p> <p>ฟลอคค่อยๆตกตะกอนลงสู่ด้านล่างเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที</p>

อัตราการไหล	450 L/hr
	เกิดการไหลแบบหมุนวนขึ้นอย่างชัดเจน ฟลอกมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันบริเวณแกนกลางของไฮโคลน ขนาดของฟลอกที่เกิดขึ้นใหญ่กว่าฟลอกจากอัตราการไหลอื่นๆ เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ฟลอกเริ่มตกตะกอนลงสู่ด้านล่าง

ค.6 การคำนวณความเร็วแกรเดียนท์  $G_t$  ของถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำเข้า 0.50 เซนติเมตร

G	ความเร็วแกรเดียนท์	ต่อวินาที	
$\alpha$	สัดส่วนความเร็วภายในไฮโคลนต่อความเร็วที่จ่ายเข้า		0.6
n	ค่าคงที่รูปร่างของไฮโคลน		0.8
$D_i$	เส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำดิบ		0.005 m
$A_i$	พื้นที่หน้าตัดช่องจ่ายน้ำดิบ		$1.96 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
$\tan \theta$	(0.025/1.20)	$\theta$	$1.193^\circ$

$$\text{จากสมการ } G = \frac{Q \times \alpha \times n}{A_i (H \tan \theta + r)}$$

ตารางที่ ค.13 ความเร็วแกรเดียนท์ที่ความสูงใด ๆ ภายในไฮโคลน

H (m)	$H \tan \theta + r$	Q (L/hr)					
		150	200	300	400	500	550
		G ( $\text{s}^{-1}$ )					
0.10	0.022083	46.2	61.6	92.4	123.2	154.0	169.4
0.20	0.024166	42.2	56.3	84.4	112.6	140.7	154.8
0.30	0.026249	38.9	51.8	77.7	103.7	129.6	142.5
0.40	0.028332	36.0	48.0	72.0	96.0	120.1	132.1
0.50	0.030415	33.5	44.7	67.1	89.5	111.8	123.0
0.60	0.032498	31.4	41.9	62.8	83.7	104.7	115.1
0.70	0.034581	29.5	39.3	59.0	78.7	98.4	108.2
0.80	0.036664	27.8	37.1	55.7	74.2	92.8	102.0
0.90	0.038747	26.3	35.1	52.7	70.2	87.8	96.6
1.00	0.040830	25.0	33.3	50.0	66.6	83.3	91.6
1.10	0.042913	23.8	31.7	47.6	63.4	79.3	87.2
1.20	0.044996	22.7	30.2	45.4	60.5	75.6	83.2



ตารางที่ ค.14 เวลาที่เก็บน้ำ

t (s)	contact time	174	130.7	87.12	65.34	52.27	47.52
-------	--------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------

ตารางที่ ค.15 ค่า Gt ที่ความสูงใดๆภายในถังปฏิกริยาไฮบริดที่อัตราการไหลต่างๆ

H (m)	Q (L/hr)					
	150	200	300	400	500	550
	G*t					
0.10	8040.2	8009.4	8051.3	8051.3	8050.9	8051.3
0.20	7347.1	7319.0	7357.3	7357.3	7357.0	7357.3
0.30	6764.1	6738.2	6773.4	6773.4	6773.2	6773.4
0.40	6266.8	6276.4	6275.4	6275.4	6275.2	6275.4
0.50	5837.6	5846.6	5845.7	5845.7	5845.4	5845.7
0.60	5463.4	5471.8	5471.0	5471.0	5470.8	5471.0
0.70	5134.4	5142.2	5141.4	5141.4	5141.2	5141.4
0.80	4842.7	4850.1	4849.3	4849.3	4849.1	4849.3
0.90	4582.3	4589.3	4588.6	4588.6	4588.5	4588.6
1.00	4348.5	4355.2	4354.5	4354.5	4354.4	4354.5
1.10	4137.5	4143.8	4143.2	4143.2	4143.0	4143.2
1.20	3945.9	3952.0	3951.4	3951.4	3951.2	3951.4

ค.7 การคำนวณความเร็วแกรเดียนท์ Gt ของถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำเข้า 0.35 เซนติเมตร

G	ความเร็วแกรเดียนท์	ต่อวินาที		
$\alpha$	สัดส่วนความเร็วภายในไฮโคลนต่อความเร็วที่จ่ายเข้า		0.6	
n	ค่าคงที่รูปร่างของไฮโคลน		0.8	
$D_i$	เส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำดิบ		0.0035	m
$A_i$	พื้นที่หน้าตัดช่องจ่ายน้ำดิบ		$9.62 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup>
$\tan \theta$	(0.025/1.20)	$\theta$	1.193°	

จากสมการ  $G = \frac{Q \times \alpha \times n}{A_i (H \tan \theta + r)}$  ได้ผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ ค.16

ตารางที่ ค.16 ความเร็วแกรเดียนท์ที่ความสูงใดๆของไซโคลน

H (m)	H tan $\theta$ + r	Q (L/hr)					
		150	200	300	400	500	550
		G (s <sup>-1</sup> )					
0.10	0.022083	94.14	125.53	188.29	251.05	313.82	345.20
0.20	0.024166	86.03	114.71	172.06	229.41	286.77	315.44
0.30	0.026249	79.20	105.60	158.41	211.21	264.01	290.41
0.40	0.028332	73.38	97.84	146.76	195.68	244.60	269.06
0.50	0.030415	68.35	91.14	136.71	182.28	227.85	250.63
0.60	0.032498	63.97	85.30	127.95	170.60	213.24	234.57
0.70	0.034581	60.12	80.16	120.24	160.32	200.40	220.44
0.80	0.036664	56.70	75.61	113.41	151.21	189.01	207.92
0.90	0.038747	53.66	71.54	107.31	143.08	178.85	196.74
1.00	0.040830	50.92	67.89	101.84	135.78	169.73	186.70
1.10	0.042913	48.45	64.60	96.89	129.19	161.49	177.64
1.20	0.044996	46.20	61.61	92.41	123.21	154.01	169.42
0.00	0.020000	103.95	138.60	207.90	277.20	346.50	381.15

ตารางที่ ค.17 เวลาที่กักเก็บน้ำภายในไซโคลน

t (s)	contact time	174	130.7	87.12	65.34	52.27	47.52

ตารางที่ ค.18 ค่า Gt ที่ความสูงใดๆของไซโคลนและที่อัตราการไหลต่างๆ

H (m)	Q (L/hr)					
	150	200	300	400	500	550
	G*t					
0.10	16381.2	16406.3	16403.8	16403.8	16403.2	16403.8
0.20	14969.2	14992.2	14989.9	14989.9	14989.3	14989.9
0.30	13781.3	13802.5	13800.3	13800.3	13799.8	13800.3
0.40	12768.1	12787.7	12785.7	12785.7	12785.2	12785.7
0.50	11893.7	11911.9	11910.1	11910.1	11909.6	11910.1
0.60	11131.3	11148.4	11146.7	11146.7	11146.3	11146.7
0.70	10460.8	10476.9	10475.3	10475.3	10474.9	10475.3
0.80	9866.5	9881.6	9880.1	9880.1	9879.8	9880.1
0.90	9336.1	9350.4	9349.0	9349.0	9348.6	9349.0
1.00	8859.8	8873.4	8872.0	8872.0	8871.7	8872.0
1.10	8429.8	8442.7	8441.4	8441.4	8441.1	8441.4
1.20	8039.5	8051.8	8050.6	8050.6	8050.3	8050.6



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรศิริ เสียงสนัน เกิดเมื่อวันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2546