

กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟลอกกูเลชัน
และการลอยตะกอนในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ



นางสาววราศิริ เสียงสนัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-3908-3

ลิขสิทธิ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYBRID PROCESS: HYDROCYCLONE, COAGULATION-
FLOCCULATION AND FLOTATION
IN WATER TREATMENT PROCESS

Miss Vorasiri Siangsanun

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2006

ISBN 974-14-3908-3

490268

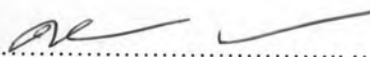
หัวข้อวิทยานิพนธ์ กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชันฟลอกกูเลชันและ
การลอยตะกอนในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

โดย นางสาววรศิริ เสียงสนั่น


สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

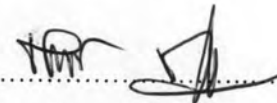
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ

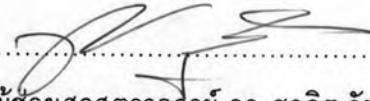
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมกุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

วรศิริ เสียงสนั่น : กระบวนการไฮบริด ไฮโดรไซโคลน, โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกกูเลชัน
และการลอยตะกอนในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

(HYBRID PROCESS: HYDROCYCLONE, COAGULATION-FLOCCULATION AND
FLOTATION IN WATER TREATMENT PROCESS)

อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ, 180 หน้า ISBN 974-14-3908-3

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าในการสร้างกระบวนการผลิตน้ำประปาแบบใหม่ หรือเรียกว่าระบบไฮบริด ซึ่งประกอบไปด้วยการใช้ไฮโดรไซโคลนทำหน้าที่เป็นถังปฏิกรณ์สำหรับการโคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชันและการแยกตะกอนภายในถังเดียวกัน โดยศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อัตราการจ่ายน้ำ ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ และความดันของน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศ ที่ส่งต่อผลการบำบัดน้ำดิบสังเคราะห์ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ไฮบริด 2 ชนิดคือ ถังปฏิกรณ์ทรงกระบอก (ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด) และถังปฏิกรณ์ทรงกรวย โดยแต่ละชนิดทำการทดลองแบบแบตช์และการไหลแบบต่อเนื่อง

ผลการวิจัยพบว่า ในการทดลองแบบแบตช์ ถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 สามารถสร้างฟล็อกชนิดพิเศษที่มีฟองอากาศแทรกอยู่ภายในซึ่งจะทำให้ตะกอนลอยขึ้นได้ โดยที่ชนิดประจุของสารโคแอกกูแลนต์ไม่แสดงผลต่อกลไกที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน แต่สังเกตพบว่าโพลีเมอร์ประจุบวกสร้างฟล็อกได้ดีที่สุด สัดส่วนอัตราการไหลของฟองอากาศต่ออัตราการจ่ายน้ำเข้าทั้งหมดที่เหมาะสมต่อการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษในงานวิจัยนี้ คือ 0.0009 และ ความดันที่เหมาะสมสำหรับสร้างน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศคืออย่างน้อย 3.5 บาร์สำหรับถังทรงกระบอกและ 4.0 ขึ้นไปสำหรับถังทรงกรวย ในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องนั้น ในถังทรงกระบอกเกิดการไหลแบบหมุนวนขึ้นที่อัตราการจ่ายน้ำดิบ 400 ลิตรต่อชั่วโมง และยังพบว่ามีกระบวนการไหลที่บริเวณจุดเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ทำให้การไหลแบบหมุนวนอ่อนกำลังลง สำหรับถังทรงกรวยพบว่าการไหลแบบหมุนวนที่ 300 ลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นในการทดลองแบบแบตช์มีค่าร้อยละ 80 สำหรับถังทรงกระบอกและ ร้อยละ 65-90 สำหรับถังทรงกรวย

การเพิ่มความเร็วของการไหลหมุนวน ทำได้โดยการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายน้ำดิบจาก 0.50 เป็น 0.35 เซนติเมตร โดยจะทำให้ความเร็วแรงแผ่นผิวเพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษลดลงเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น เนื่องจากมีการรวมตัวกันเองของฟองอากาศทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่เกินไป

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต วรศิริ เสียงสนั่น

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

4670471021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD : HYBRID PROCESS / HYDROCYCLONE / COAGULATION-FLOCCULATION
/FLOTATION/WATER TREATMENT

VORASIRI SIANGSANUN : HYBRID PROCESS: HYDROCYCLONE, COAGULATION-
FLOCCULATION AND FLOTATION IN WATER TREATMENT PROCESS

THESIS ADVISOR: CHAIYAPORN PUPRASERT, Ph.D., 180pp. ISBN 974-14-3908-3

This research is aimed to study the first step of using hydrocyclones as the reactor to perform coagulation-flocculation, flotation and solid separation in the same time which is called hybrid process. The affects of several parameters such as feed flowrate, type of coagulant and pressurized water pressure were studied. Two types of geometrical shapes reactor, cylindrical reactor and conical reactor, were tested. In these 2 reactors, there were 2 different operations, batch and continuous.

The results from the batch operation were found that both types of reactor could produce the special floc which contained the micro air bubbles inside. The types of coagulants showed no significant effect in term of turbidity decreased but it was obvious that the cationic polymer was the best polymer to produce the special floc. The critical value of air volume flowrate/Inlet flows ratio for producing the special floc in this research was 0.0009. The pressure in the pressurized tank should be at least 3.5 bars for cylindrical hybrid reactor and at least 4.0 bars for conical hybrid reactor in order to float all special floc. In continuous operation, the vortex flow commenced at 400 L/hr by cylindrical hybrid reactor. At the diameter changed point in cylindrical hybrid reactor, the vortex flow was obviously disturbed and decreased water velocity. In conical hybrid reactor, the vortex flow commenced at 300 L/hr.

Decreasing the inlet flow diameter from 0.50 to be 0.35 cm. could improve the vortex flow and increased velocity gradient. On the other hand, when the inlet flow was increased, the amount of special floc decreased because the micro air-bubbles summon up together and increased its size.

Department Environmental Engineering.....
Field of Study Environmental Engineering.....
Academic year 2006.....

Student's signature Vorasiri Siangsanun
Advisor's signature Chaiyaporn Pupasert

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้แนวทาง และคำแนะนำอย่างดียิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา รวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลองและการตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ Prof.Dr.Gilles Hebrard และ Prof.Dr.Christelle Guigui สำหรับการดูแล แนะนำ และช่วยเหลือเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินชีวิตตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยที่ประเทศฝรั่งเศส

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ อาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณทุนการวิจัยร่วมระหว่างไทยและฝรั่งเศส ที่สนับสนุนโดยรัฐบาลไทย ร่วมกับฝรั่งเศส

ขอขอบพระคุณ บริษัท Veolia water ประเทศฝรั่งเศส ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย

ขอขอบคุณสถาบันวิจัย INSA Toulouse ประเทศฝรั่งเศส ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือสำหรับการทำการวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภายในห้องปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือในการทำการวิจัย ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้แก่ผู้ทำวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนนิสิตปริญญาโททุกคน อีกทั้งเพื่อนนักเรียนไทยในประเทศฝรั่งเศส ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้อง เป็นอย่างสูง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านทุนทรัพย์ และกำลังใจที่สำคัญ ให้ผู้วิจัยสามารถฝ่าฟันปัญหาต่างๆ ได้ตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฒ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 คำสำคัญ (Key Word).....	1
1.3 บทนำ.....	1
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone).....	5
2.1.1 ความรู้เบื้องต้นของไฮโดรไซโคลน.....	5
2.1.2 การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลน.....	8
2.1.3 ความเร็วของการไหลในไฮโดรไซโคลน (Velocity in hydrocyclone).....	10
2.1.3.1 ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential Velocity), V_t	10
2.1.3.2 ความเร็วในแนวแกน (Axial velocity).....	11
2.1.3.3 ความเร็วในแนวรัศมี (Radial velocity).....	12
2.1.4 กฎของสโตค (Stoke's law).....	13
2.1.5 ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลน.....	14
2.1.5.1 เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน.....	14

2.1.5.2	เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหล (Aperture diameters).....	15
2.1.5.3	ความยาว ขนาดและรูปร่างของช่องน้ำออกด้านบน	17
2.1.5.4	ลักษณะทางกายภาพของตัวเรือนไฮโดรไซโคลน (Body dimension).....	19
2.1.5.5	ขนาดและลักษณะของช่องท่อจ่ายของผสมเข้าไฮโดรไซโคลน	20
2.1.5.6	สรุปผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อไฮโดรไซโคลน	21
2.1.6	ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน.....	22
2.1.6.1	ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency, Mass recovery, Retention).....	22
2.1.6.2	ประสิทธิภาพลด (Reduced efficiency)	23
2.1.6.3	Grade efficiency.....	24
2.1.7	ขนาดตัด (Cut size)	25
2.2	กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชัน	26
2.2.1	หน้าที่ของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชัน.....	26
2.2.2	กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation process)	26
2.2.2.1	เสถียรภาพของคอลลอยด์.....	26
2.2.2.2	ทฤษฎีดับเบิลเลเยอร์ (The double layer theory).....	27
2.2.2.3	ซีตาโพเทนเชียล	28
2.2.2.4	ทฤษฎีทางเคมี	29
2.2.3	กระบวนการฟลอกกูเลชัน (Flocculation process)	29
2.2.3.1	Perikinetic flocculation	30
2.2.3.2	Orthokinetic Flocculation	30
2.2.4	ความสำคัญของความเร็วแรงแผ่นต้น.....	30
2.2.5	สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชัน.....	31
2.2.5.1	โคแอกกูแลนต์ (Coagulant).....	31
2.2.5.2	ฟลอกกูแลนต์ (Flocculant).....	32
2.2.6	การเลือกสารโคแอกกูแลนต์	32
2.2.6.1	สารเคมีสำหรับน้ำที่มีความขุ่นมากและมีความเป็นด่างสูง	32
2.2.6.2	สารเคมีสำหรับน้ำที่มีความขุ่นสูงแต่มีความเป็นด่างต่ำ.....	33
2.2.6.3	สารเคมีสำหรับน้ำที่มีความขุ่นน้อยแต่มีความเป็นด่างสูง	33
2.2.6.4	สารเคมีสำหรับน้ำที่มีความขุ่นน้อยและมีความเป็นด่างน้อย	33
2.2.6.5	กลไกการโคแอกกูเลชันต่างๆ	33
2.2.7	การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชัน.....	35

2.2.7.1	การควบคุมค่าความเร็วแก๊สเฉื่อยที่ในถังกวนเร็ว	35
2.2.7.2	การควบคุมค่าความเร็วแก๊สเฉื่อยที่ในถังกวนช้า	36
2.3	กระบวนการลอยตะกอน (Flotation process)	37
2.4	กระบวนการลอยตะกอนด้วยการอัดอากาศให้อิมตัวในน้ำ	38
2.4.1	กระบวนการและกลไกการทำงาน	38
2.4.2	กลไกการทำให้อากาศละลาย	39
2.4.2.1	Sparged air system	39
2.4.2.2	Air injection system	39
2.4.2.3	Packed column system	40
2.5	กฎของเฮนรี (Henry's law)	41
2.6	แนวคิดเกี่ยวกับกระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชันและ การลอยตะกอนของงานวิจัยนี้	42
2.7	การคำนวณในถังปฏิกิริยาไฮบริดที่ใช้ในการวิจัย	43
2.8	การออกแบบถังปฏิกิริยาไฮบริด ที่มีรัศมีเพิ่มขึ้นตามแนวแกน	44
2.9	งานวิจัยที่ผ่านมา	47
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย		54
3.1	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	54
3.1.1	อุปกรณ์สำหรับกระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน- ฟล็อกคูเลชันและลอยตะกอน	54
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง	54
3.1.3	สารเคมี	55
3.2	การดำเนินการทดลอง	55
3.3	ส่วนประกอบและการติดตั้งของ Pilot plant ที่ใช้ในการทดลอง	56
3.3.1	ส่วนที่ใช้สร้างน้ำให้อิมตัวด้วยอากาศ	58
3.3.2	ส่วนที่เตรียมน้ำดิบสังเคราะห์และสารโคแอกกูแลนต์	58
3.3.3	ส่วนถังปฏิกิริยาไฮบริด	59
3.3.3.1	ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด	59
3.3.3.2	ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน ..	62
3.4	วิธีการทดลอง	64

3.4.1	การทดลองตอนที่ 1 การหาชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสม	64
3.4.2	การทดลองตอนที่ 2 การศึกษาผลของรูปร่างลักษณะของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีผลต่อการบำบัดน้ำสำหรับกระบวนการไฮบริด	65
3.4.2.1	รายละเอียดและขั้นตอนการทดลองตอนที่ 2	65
3.4.2.2	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2	66
3.4.3	การทดลองตอนที่ 3 การศึกษาชนิดของโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในกระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกกูเลชันและการลอยตะกอน	67
3.4.3.1	รายละเอียดการทดลองตอนที่ 3	67
3.4.3.2	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 3	68
3.4.4	การทดลองตอนที่ 4 การศึกษาผลของความเร็วแรงแเดียนท์ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริด	69
3.4.4.1	รายละเอียดการทดลองตอนที่ 4	69
3.4.4.2	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 4	70
3.4.5	การทดลองตอนที่ 5 การศึกษาผลของความดันภายในถังความดันที่ใช้ในระบบการสูบน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศต่อการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษด้วยกระบวนการไฮบริด	70
3.4.5.1	รายละเอียดการทดลองตอนที่ 5	70
3.4.5.2	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 5	71
3.4.6	การทดลองตอนที่ 6 การศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำดิบเข้าของถังปฏิกริยาไฮบริด ที่มีต่อค่าความเร็วแรงแเดียนท์และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยา	72
3.4.6.1	รายละเอียดการทดลองตอนที่ 6	72
3.4.6.2	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 6	73
3.4.7	การทดลองตอนที่ 7 การศึกษาพฤติกรรมของฟองอากาศภายในถังปฏิกริยาไฮบริดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายน้ำเข้า	74
3.4.7.1	รายละเอียดขั้นตอนการทดลองตอนที่ 7	74
3.4.7.2	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 7	74
3.5	วิธีการและตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำภายในถังปฏิกริยา	75
3.5.1	การเก็บตัวอย่างน้ำในการทดลองด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง	76
3.5.2	การเก็บตัวอย่างน้ำในการทดลองแบบแบตช์	77

บทที่ 4 ผลการวิจัย	78
4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์โพลีเมอร์ที่เหมาะสม ด้วยวิธีจาร์เทสต์	78
4.2 ผลการทดลองด้วยถังปฏิริยาไฮบริดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด.....	81
4.2.1 ผลการทดลองกับสารโคแอกกูแลนท์ชนิดต่างๆ.....	82
4.2.1.1 โพลีเมอร์ทั้งสามชนิด ด้วยการทดลองแบบแบตช์	82
4.2.1.2 ผลของโพลีเมอร์ทั้งสามชนิด ในการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง.....	88
4.2.2 ผลของความดันภายในถังความดันที่ใช้ในระบบการสร้างน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศ ต่อการเกิดฟลอกชนิดพิเศษด้วยกระบวนการไฮบริด.....	95
4.2.3 สรุปผลการทดลองกับถังปฏิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสอง ขนาด.....	100
4.3 ผลการทดลองด้วยถังปฏิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตาม แนวแกน	101
4.3.1 ผลการทดลองกับสารโคแอกกูแลนท์ชนิดต่างๆ.....	102
4.3.1.1 ผลของโพลีเมอร์ทั้งสามชนิด ในการทดลองแบบแบตช์	102
4.3.1.2 ผลของโพลีเมอร์ทั้ง 3 ชนิด ในการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง	105
4.3.2 ผลของความดันภายในถังความดันที่ใช้ในระบบสร้างน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศ ต่อการเกิดฟลอกชนิดพิเศษด้วยกระบวนการไฮบริด.....	112
4.3.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ เข้าสู่ค่าความเร็วแกรเดียนท์และปรากฏการณ์ภายในถังปฏิริยาไฮบริด.....	114
4.3.3.1 ผลการทดลองเมื่อใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 เซนติเมตร.....	115
4.3.3.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 เซนติเมตร.....	117
4.3.3.3 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อลักษณะการไหลแบบหมุนวน ในถัง ปฏิริยาไฮบริด.....	119
4.3.4 พฤติกรรมของฟองอากาศภายในถังปฏิริยาไฮบริด เมื่อเปลี่ยนแปลง อัตราการจ่ายน้ำประปาเข้าสู่ถังปฏิริยาไฮบริด.....	120
4.3.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ ที่มีต่อการรวมตัวกันของฟองอากาศภายในถังปฏิริยาไฮบริด.....	123
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	127

5.1	สรุปผลการวิจัย	127
5.1.1	ดั่งปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด.....	127
5.1.2	ดั่งปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน ...	128
5.2	สรุปผลการเปรียบเทียบระหว่างดั่งปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาดกับทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน	129
5.3	ข้อเสนอแนะ.....	130
รายการอ้างอิง.....		134
ภาคผนวก.....		136
	ภาคผนวก ก ผลการทำจารทดสอบ.....	138
	ภาคผนวก ข การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับดั่งปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด	147
	ภาคผนวก ค การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับดั่งปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน.....	163
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	180

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ค่าพีเอชที่เหมาะสมตามชนิดอ็อนของโคแอกกูแลนท์..... 32
ตารางที่ 3.1	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2..... 66
ตารางที่ 3.2	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 3..... 68
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 4..... 70
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 5..... 71
ตารางที่ 3.5	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 6..... 73
ตารางที่ 3.6	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 7..... 74
ตารางที่ 4.1	อัตราการจ่ายสารละลายโคแอกกูแลนท์เข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริด..... 81
ตารางที่ 4.2	เปอร์เซ็นต์การลดความขุ่นด้วยการทดลองแบบแบตช์และโพลีเมอร์สามชนิด... 82
ตารางที่ 4.3	ผลการสังเกตฟลอกที่ลอยด้านบนจนถึงปฏิกรณ์ด้วยการทดลองแบบแบตช์..... 84
ตารางที่ 4.4	ผลการสังเกตฟลอกตกตะกอนด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ด้วยการทดลองแบบแบตช์..... 84
ตารางที่ 4.5	ผลการทดลองวัดความขุ่นด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง 89
ตารางที่ 4.6	ผลการทดลองวัดความขุ่นด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง ด้วยโคแอกกูแลนท์ AN910..... 90
ตารางที่ 4.7	ผลการทดลองวัดความขุ่นด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง ด้วยโคแอกกูแลนท์ AN934..... 92
ตารางที่ 4.8	ผลการลอยของฟลอกเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันภายในถังความดัน ด้วยการทดลองแบบแบตช์..... 96
ตารางที่ 4.9	สัดส่วนระหว่างปริมาณของอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมด..... 98
ตารางที่ 4.10	เปอร์เซ็นต์การลดความขุ่นด้วยการทดลองแบบแบตช์และโพลีเมอร์สามชนิด. 103
ตารางที่ 4.11	ผลการสังเกตฟลอกที่ลอยด้านบนจนถึงปฏิกิริยาไฮบริด ด้วยการทดลองแบบแบตช์..... 104
ตารางที่ 4.12	ผลการสังเกตฟลอกที่ตกลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกิริยาไฮบริด ด้วยการทดลองแบบแบตช์..... 104
ตารางที่ 4.13	ผลการทดลองลักษณะการลอยของฟลอก ณ เวลาต่างๆ หลังจากหยุดเดินระบบ..... 113
ตารางที่ 4.14	ผลของการเกิดการไหลแบบหมุนวนและลักษณะของฟองอากาศภายใน 121

ตารางที่	ก.1 ค่าความชุ่มหลังจากตกตะกอน	140
ตารางที่	ก.2 อัตราการจ่ายสารละลายโคแอกกูแลนต์ที่ขึ้นกับอัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์.	144
ตารางที่	ข.1 เวลาที่เก็บน้ำ ความเร็วแกรเดียนท์ และเทอม Gt ของถังปฏิกริยาไฮบริด ทรงกระบอก.....	151
ตารางที่	ข.2 ผลการวัดความชุ่ม	152
ตารางที่	ข.4 ผลการวัดความชุ่ม	154
ตารางที่	ข.5 ผลการวัดความชุ่ม	156
ตารางที่	ข.6 สัดส่วนการไหลปริมาตรอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมด	161
ตารางที่	ค.1 เวลาที่เก็บน้ำ ความเร็วแกรเดียนท์ และเทอม Gt ของถังปฏิกริยา ไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร.....	167
ตารางที่	ค.2 เวลาที่เก็บน้ำ ความเร็วแกรเดียนท์ และเทอม Gt ของถังปฏิกริยา ไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ เท่ากับ 0.35 เซนติเมตร.....	168
ตารางที่	ค.3 การทดลองวัดความชุ่ม.....	169
ตารางที่	ค.4 การทดลองแบบแบตช์	169
ตารางที่	ค.5 การทดลองวัดค่าของแข็งแขวนลอย.....	169
ตารางที่	ค.6 ผลการทดลองจากการสังเกตการณ์.....	170
ตารางที่	ค.7 การทดลองวัดความชุ่ม.....	172
ตารางที่	ค.8 การทดลองวัดค่าของแข็งแขวนลอย.....	172
ตารางที่	ค.9 ผลการทดลองจากการสังเกตการณ์.....	173
ตารางที่	ค.10 การทดลองวัดความชุ่ม.....	175
ตารางที่	ค.11 ผลการทดลองวัดค่าของแข็งแขวนลอย	175
ตารางที่	ค.12 ผลการทดลองจากการสังเกตการณ์.....	176
ตารางที่	ค.13 ความเร็วแกรเดียนท์ที่ความสูงใดๆภายในไซโคลน.....	177
ตารางที่	ค.14 เวลาที่เก็บน้ำ	178
ตารางที่	ค.15 ค่า Gt ที่ความสูงใดๆภายในถังปฏิกริยาไฮบริดที่อัตราการไหลต่างๆ.....	178
ตารางที่	ค.16 ความเร็วแกรเดียนท์ที่ความสูงใดๆของไซโคลน	179
ตารางที่	ค.17 เวลาที่เก็บน้ำภายในไซโคลน.....	179
ตารางที่	ค.18 ค่า Gt ที่ความสูงใดๆของไซโคลนและที่อัตราการไหลต่างๆ	179

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	เส้นทางการไหลทั้งสามส่วนของไฮโดรไซโคลน..... 6
รูปที่ 2.2	ลักษณะการไหลแบบหมุนวน (Vortex flow) ภายในไฮโดรไซโคลน 8
รูปที่ 2.3	ภาพการไหลตามแนวแกนและตามแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลน..... 9
รูปที่ 2.4	การกระจายความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงภายในไฮโดรไซโคลน (V_y) 11
รูปที่ 2.5	การกระจายความเร็วในแนวแกนภายในไฮโดรไซโคลน..... 12
รูปที่ 2.6	การกระจายความเร็วแนวรัศมีในไฮโดรไซโคลน..... 12
รูปที่ 2.7	Grade efficiency curve และ Reduced efficiency curve 25
รูปที่ 2.8	แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ..... 27
รูปที่ 2.9	ศักร์ของประจุรอบๆผิวคอลลอยด์ 28
รูปที่ 2.10	กลไกการเกิดการติดติดผิวและการรวมตะกอนด้วยโพลิเมอร์ (Polymer bridging).. 34
รูปที่ 2.11	แนวคิดของกระบวนการไฮบริด ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชันและการลอยตะกอน..... 42
รูปที่ 2.12	การออกแบบถังปฏิกิริยาไฮบริดที่มีรัศมีเพิ่มขึ้นตามแนวแกน..... 46
รูปที่ 2.13	ปรากฏการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นสำหรับงานวิจัยของ Puprasert..... 51
รูปที่ 3.1	แผนผังและลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ 57
รูปที่ 3.2	ขนาดและรายละเอียดของถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก 60
รูปที่ 3.3	ถังปฏิกิริยาทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด 60
รูปที่ 3.4	ขนาดและรายละเอียดถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวย..... 62
รูปที่ 3.5	ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน 63
รูปที่ 3.6	การเก็บตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกิริยาด้วยการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง 76
รูปที่ 3.7	การเก็บน้ำตัวอย่างด้วยการทดลองแบบแบตช์ 77
รูปที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์การทำจาร์เทสต์ด้วยสารโคแอกกูแลนต์ 5 ชนิด 78
รูปที่ 4.2	ผลการทำจาร์เทสต์ด้วยโพลิเมอร์ทั้ง 5 ชนิด ในแต่ละความเข้มข้น..... 79
รูปที่ 4.3	ลักษณะและขนาดของถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก 81
รูปที่ 4.4	เปอร์เซ็นต์การลดความขุ่นด้วยการทดลองแบบแบตช์และโพลิเมอร์สามชนิด 83
รูปที่ 4.5	ฟล็อกชนิดพิเศษที่มีฟองอากาศเล็กๆ แทรกอยู่ภายใน..... 85
รูปที่ 4.6	ฟล็อกชนิดพิเศษที่ลอยขึ้นด้านบนของถังปฏิกิริยา 86
รูปที่ 4.7	สภาวะที่มีฟล็อกชนิดพิเศษเกิดขึ้นน้อย 86

รูปที่ 4.8	สภาวะที่ไม่เกิดฟลอกชนิดพิเศษและไม่สามารถลอยขึ้นสู่ด้านบนได้	87
รูปที่ 4.9	รูปถ่ายจากกล้องไมโครสโคปของฟลอกที่ไม่มีฟองอากาศแทรกภายใน	87
รูปที่ 4.10	ปรากฏการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการทดลองด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง	88
รูปที่ 4.11	ค่าความขุ่นของน้ำที่บริเวณแกนกลางและผิวด้านในของถังปฏิกริยาไฮบริด สำหรับโพลีเมอร์ FO107	89
รูปที่ 4.12	ค่าความขุ่นของน้ำที่บริเวณแกนกลางและผิวด้านในของถังปฏิกริยาไฮบริดด้วย โพลีเมอร์ AN910	91
รูปที่ 4.13	ค่าความขุ่นของน้ำที่บริเวณแกนกลางและผิวด้านในของถังปฏิกริยาไฮบริดด้วย โพลีเมอร์ AN934	92
รูปที่ 4.14	ตำแหน่งการเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง	94
รูปที่ 4.15	ภาพแสดงลักษณะการตกตะกอนของฟลอกที่ความดัน 2.0 บาร์	97
รูปที่ 4.16	ตัวอย่างลักษณะการตกตะกอนของฟลอกที่สภาวะความดัน 3 บาร์และอัตราการ ไหลที่ 500 ลิตรต่อชั่วโมง	97
รูปที่ 4.17	รูปร่างและขนาดของถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกรวย	101
รูปที่ 4.18	เปอร์เซ็นต์การลดความขุ่นด้วยการทดลองแบบแบตช์	103
รูปที่ 4.19	ปรากฏการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการทดลองด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง	105
รูปที่ 4.20	ค่าความขุ่นของน้ำบริเวณแกนกลางและผิวด้านในด้วยโคแอกกูแลนท์ FO107	106
รูปที่ 4.21	ค่าของแข็งแขวนลอยที่บริเวณแกนกลางและผนังด้านในถังปฏิกริยาด้วย โคแอกกูแลนท์ FO107	107
รูปที่ 4.22	ค่าความขุ่นของน้ำที่แกนกลางและผิวด้านในของถังปฏิกริยาด้วยโคแอกกูแลนท์ AN910	108
รูปที่ 4.23	ค่าของแข็งแขวนลอยที่บริเวณแกนกลางและผิวด้านในของถังปฏิกริยาด้วย โคแอกกูแลนท์ AN910	109
รูปที่ 4.24	ค่าความขุ่นของน้ำที่แกนกลางและผิวด้านในของถังปฏิกริยาด้วยโคแอกกูแลนท์ AN934	110
รูปที่ 4.25	ค่าของแข็งแขวนลอยที่บริเวณแกนกลางและผิวด้านในของถังปฏิกริยาด้วย โคแอกกูแลนท์ AN934	110
รูปที่ 4.26	ค่าความเร็วแกรเดียนท์เทียบกับความสูงของถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกรวยขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ 0.50 เซนติเมตร	115
รูปที่ 4.27	ค่าGt ที่ความสูงใดๆของถังปฏิกริยาไฮบริดด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่อง จ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เท่ากับ 0.50 เซนติเมตร	116

รูปที่ 4.28	ค่าความเร็วแกว่งที่ความสูงใดๆของถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกรวย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ 0.35 เซนติเมตร.....	118
รูปที่ 4.29	ค่า Gt ที่ความสูงใดๆของถังปฏิกริยาไฮบริดด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เท่ากับ 0.35 เซนติเมตร.....	119
รูปที่ 4.30	แสดงลักษณะการรวมตัวของฟองอากาศเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น.....	121
รูปที่ 4.31	ภาพหน้าตัดของถังปฏิกริยาไฮบริดบริเวณด้านล่างซึ่งอธิบายลักษณะการเกิด สนามความเร็วที่ผิวด้านในของไซโคลน.....	123
รูปที่ 4.32	จุดศูนย์กลางการหมุนที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลสูงขึ้น.....	124
รูปที่ 4.33	อธิบายปรากฏการณ์การไหลทวนลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกริยา.....	124
รูปที่ 5.1	แนวความคิดปรับปรุงถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอก.....	131
รูปที่ 5.2	แนวความคิดในการปรับปรุงถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกรวย.....	132
รูปที่ ก.1	เปอร์เซ็นต์การลดความขุ่นด้วยความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรของสารโคแอกกูแลนต์ แต่ละชนิด.....	140
รูปที่ ก.2	เปอร์เซ็นต์การลดความขุ่นที่แต่ละความเข้มข้นของสารละลายโคแอกกูแลนต์.....	141
รูปที่ ก.3	สมมูลมวลของถังปฏิกริยาไฮบริด.....	142
รูปที่ ก.4	การเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลสารละลายโคแอกกูแลนต์จากเครื่องวัด อัตราการไหล.....	144
รูปที่ ข.1	ถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด.....	148
รูปที่ ข.2	ขนาดและรายละเอียดของถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอก.....	148
รูปที่ ข.3	ผลการเปรียบเทียบค่าระหว่างความดันภายในถังกับปริมาตรการไหลอากาศ.....	162
รูปที่ ค.1	ถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน.....	164
รูปที่ ค.2	รายละเอียดถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตาม แนวแกน.....	165

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

V_y	ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลอน ณ จุดที่อนุภาคเริ่มเข้าสู่ถัง (เมตรต่อวินาที)
V_i	ความเร็วที่จุดจ่ายน้ำเข้า (Inlet velocity) (เมตรต่อวินาที)
V_c	ความเร็วของอนุภาคในแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลอน ที่ผนังของไฮโดรไซโคลอน (เมตรต่อวินาที)
α	อัตราส่วนระหว่างความเร็วสัมผัสเส้นรอบวงไฮโดรไซโคลอน V_y กับความเร็วที่ท่อจ่ายเข้า V_i (Bradley, 1965)
r	รัศมีการหมุน (เมตร)
n	ค่าคงที่ของรูปร่างไฮโดรไซโคลอน มีค่าอยู่ในช่วง 0.4-0.9 (Bradley, 1965)
G	ความเร็วแกรเดียนท์ (ต่อวินาที)
Q	อัตราการไหล (Flowrate) (ลิตรต่อชั่วโมง)
A_i	พื้นที่ช่องจ่ายน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน (Inlet area) (ตารางเมตร)
v_p	ความเร็วการตกตะกอน (Terminal velocity) (เมตรต่อวินาที)
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration due to gravity) (9.81 เมตรต่อวินาที ²)
$\Delta\rho$	ความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาค (Particle density) (กิโลกรัมต่อเมตร ³)
d_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (Particle diameter) (เมตร)
μ	ความหนืดพลศาสตร์ของของเหลว (Dynamic viscosity) (นิวตัน วินาทีต่อตารางเมตร)
ζ	ความเร่งแรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ภายในไฮโดรไซโคลอน (Relative centrifugal acceleration in hydrocyclone)
d_{50}	ขนาดตัด (Cut size)
Δp	ความดันลด (Pressure drop)
D_c	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอนตรงส่วนที่เป็นทรงกระบอก (เมตร)
D_i	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายเข้า (เมตร)
D_o	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านบน (เมตร)
D_u	ขนาดเส้นผ่านช่องทางออกด้านล่าง (เมตร)
E_T	ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลอน
M_u	มวลของของแข็งที่ถูกแยกออกมายังส่วนล่างของไฮโดรไซโคลอน (Underflow)
M	มวลของของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน (Feed inlet)
U	อัตราการไหลที่ออกทางด้านล่างของไซโคลอน (Underflow)

- c_u ความเข้มข้นของของผสมที่ออกทางด้านล่างของไซโคลน
- E'_T Reduced total efficiency ของไฮโดรไซโคลน
- R_f สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลที่ออกด้านบนไซโคลนกับปริมาณที่จ่ายเข้าไป
- v_p ความเร็วการตกตะกอน (Terminal velocity) (เมตรต่อวินาที)
- g ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration due to gravity) มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที²
- $\Delta\rho$ ความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาค (Particle density) (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- d_p เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (Particle diameter) (เมตร)
- μ ความหนืดพลศาสตร์ของเหลว (Dynamic viscosity) (นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร)
- me แรงการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า (Electrophoretic mobility)
- ϵ ค่าคงที่ความเฉื่อยของตัวกลาง
- η ความหนืดของตัวกลาง

กฎของเฮนรี

- p_g สัดส่วนโมลของแก๊สในอากาศ, โมลแก๊ส/โมลอากาศ
- H ค่าคงที่กฎของเฮนรี, $\frac{atm(moleGas / moleAir)}{(moleGas / moleWater)}$
- P_T ความดันรวม (บรรยากาศ)
- x_g สัดส่วนโมลของอากาศในน้ำ (โมลแก๊ส/โมลน้ำ) $\frac{moleGas(n_g)}{moleGas(n_g) + moleWater(n_w)}$