# การกวนผสมในการลดความกระด้างด้วยปูน-โซดาเย็นที่มากเกินพอ

นาย เสกสรร ลัคนาวิพุธ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2530

ISBN 974-568-494-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

014171

I 10294089

# MIXING IN EXCESS COLD LIME-SODA SOFTENING

Mr. Seksan Lakkanawiput

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Environmental Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1987

ISBN 974-568-494-5

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | **การกวนผสมในการลดความกระด้างด้วยปูน-โซดาเย็นที่มากเกินพอ** |
| โดย | นาย เสกสรร ลัคนาวิพุธ |
| ภาควิชา | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระ เกรอต |

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สุดใจ จำปา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระ เกรอต)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ พรประภา)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นาย เล่กส่รร สัคนาวิพุธ : การกวนผสมในการลดความกระด้างด้วยปูน-โซดาเย็นที่มากเกินพอ (MIXING IN EXCESS COLD LIME-SODA SOFTENING) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ธีระ เกรอต, 106 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประส่งค์เพื่อศึกษาการลดความกระด้างด้วยปูน-โซดาเย็นที่มากเกินพอโดยใช้จาร์เทส์ต์ พารามิเตอร์ควบคุมที่ศึกษาได้แก่ เกรเดียนท์ความเร็วของการกวนเร็ว, $G_R$ เวลากักน้ำของการกวนเร็ว, $T_R$ เกรเดียนท์ความเร็วของการกวนช้า, $G_S$ และเวลากักน้ำของการกวนช้า, $T_S$ จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า $G_R$ ที่เหมาะส่มมีค่า 250 วท.$^{-1}$ ดังนั้นจึงกำหนด $G_R$ คงที่ตลอดการทดลอง โดยแปรค่า $T_R$ จาก 5 ถึง 10 นาที แปรค่า $G_S$ จาก 20 ถึง 100 วท.$^{-1}$ และแปรค่า $T_S$ จาก 10 ถึง 40 นาที

น้ำดิบที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำบาดาลและน้ำผิวดิน ซึ่งมีความกระด้างทั้งหมดเฉลี่ย 139.6 และ 96.4 มก./ล.เทียบกับ $CaCO_3$ ตามลำดับ

ในกรณีน้ำบาดาล ซึ่งใช้ปูนส่กเฉลี่ย 367.1 มก./ล. และใช้ส่ารส้มประมาณ 20 มก./ล. จะได้การกวนผสมที่ให้ความกระด้างที่เหลือต่ำสุ่ด เมื่อใช้ $T_R$ 10 นาที $G_S$ 40 วท.$^{-1}$ และ $T_S$ 40 นาที โดยความกระด้างที่เหลือต่ำสุ่ดมีค่าประมาณ 9 มก./ล. เทียบกับ $CaCO_3$ และอัตราส่วนความกระด้างแคลเซียมต่อความกระด้างแมกนีเซียมของน้ำที่ผ่านการกำจัดมีค่าอยู่ในช่วง 0.82 ถึง 1.43

ส่วนน้ำผิวดิน จะได้การกวนผสมที่ให้ความกระด้างที่เหลือต่ำสุ่ด เมื่อใช้ $T_R$ 10 นาที $G_S$ 60 ถึง 100 วท.$^{-1}$ และ $T_S$ 40 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมสุขาภิบาล
ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

SEKSAN LAKKANAWIPUT : MIXING IN EXCESS COLD LIME-SODA SOFTENING. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF.THEERA KEROT,Ed.D. 106 pp.

This research was intended to study excess cold lime-soda softening by jar-test. The control parameters which were studied such as velocity gradient of rapid-mixing, $G_R$ detention time of rapid-mixing, $T_R$ velocity gradient of slow-mixing, $G_S$ and detention time of slow-mixing, $T_S$. The primary experiments were found that an optimum $G_R$ was 250 $sec^{-1}$. So, $G_R$ was fixed to be constant for all experiments. Also, $T_R$ varied from 5 to 10 min, $G_S$ varied from 20 to 100 $sec^{-1}$ and $T_S$ varied from 10 to 40 min.

Raw water used in the research were ground water and surface water which theirs average total hardness were 139.6 and 96.4 mg/las$CaCO_3$ respectively.

In case of ground water, the average dosage of hydrated lime of 367.1 mg/l and alum dosage of about 20 mg/l were used. The mixing which gave minimum residual hardness when $T_R$ of 10 min, $G_S$ of 40 $sec^{-1}$ and $T_S$ of 40 min were used. Therefore, minimum residual hardness would be about 9 mg/las$CaCO_3$. In addition, the ratio of calcium hardness to magnesium hardness in softened water ranged from 0.82 to 1.43.

For surface water, the mixing which gave minimum residual hardness when $T_R$ of 10 min, $G_S$ of 60 to 100 $sec^{-1}$ and $T_S$ of 40 min were used.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสุขาภิบาล

ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระ เกรอต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำและปรึกษาด้วยดีตลอด ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคคลากรในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ประสาทความรู้และอนุเคราะห์แก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้มอบทุนอุดหนุนการวิจัย

ท้ายนี้ ความดีที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ พ่อ-แม่ และพี่น้องทุกคน

นาย เสกสรร ลัคนาวิพุธ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญตาราง..... ฎ
สารบัญรูป..... ฑ
คำอธิบายสัญญลักษณ์และอักษรย่อ..... ธ
บทที่
1. บทนำ..... 1
2. วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย..... 3
2.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 3
2.2 ขอบเขตของการวิจัย..... 3
3. ทบทวนเอกสาร..... 4
3.1 การศึกษาที่ผ่านมา..... 4
3.2 เคมีของการตกผลึกความกระด้าง..... 7
3.3 การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ต้องการ..... 8
3.3.1 การปรับแก้ผลของสารรวมตะกอน..... 8
3.3.2 สารเคมีที่ต้องการ..... 9
3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของแคลเซียมคาร์บอเนต. 10
3.4.1 ผลของอุณหภูมิ..... 10
3.4.2 ผลของคาร์บอเนตไอออนที่มีต่อปฏิกิริยาการกำจัด 10
3.4.3 ผลของแคลเซียมไอออน..... 10
3.4.4 ผลของพีเอช..... 12
3.4.5 ผลของตัวขัดขวาง..... 12
3.5 ความสามารถในการละลายน้ำของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ 12
3.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดความกระด้าง..... 12
3.6.1 อัตราการละลายน้ำของสารเคมี..... 12

บทที่ หน้า

3.6.2 อัตราการสร้างผลึก..... 14
3.6.3 อัตราการสร้างฟล้อค..... 14
3.6.4 อัตราการตกตะกอนของฟล้อค..... 14
3.7 ประเภทของระบบกำจัดความกระด้าง..... 15
3.7.1 ประเภทต่อเนื่อง..... 15
3.7.1.1 แบบ conventional softeners 15
3.7.1.2 แบบ solids contact basins 17
3.7.1.3 แบบ catalyst หรือ spiractor 17
3.7.2 ประเภทไม่ต่อเนื่อง..... 19
3.8 ความเข้มของการกวนผสม..... 19
3.8.1 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่..... 20
3.8.2 สำหรับการไหลแบบราบเรียบ..... 20
3.9 การหาค่าเกรเดียนท์ความเร็ว..... 20
3.10 พารามิเตอร์ควบคุมการกวนผสม..... 22
3.10.1 การกวนเร็ว..... 22
3.10.2 การกวนช้า หรือ การรวมตะกอน..... 22
4. แผนการและการดำเนินการวิจัย..... 24
4.1 แผนการวิจัย..... 24
4.1.1 พารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่..... 24
4.1.2 พารามิเตอร์ที่มีค่าแปร..... 24
4.2 การดำเนินการวิจัย..... 25
4.2.1 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบ..... 25
4.2.2 สารเคมีที่ใช้..... 25
4.2.2.1 ปูนขาว..... 25
4.2.2.2 โซดาแอช..... 25
4.2.2.3 สารส้ม..... 26
4.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 26

บทที่ หน้า


4.2.3.1 เครื่องกวนผสม..... 26

4.2.3.2 โถทดลอง..... 26

4.2.3.3 เครื่องวัดความขุ่น..... 26

4.2.3.4 เครื่องวัดพีเอช..... 26

4.2.3.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก..... 26

4.2.3.6 กล้องจุลทรรศน์..... 26

4.2.4 วิธีการทดลอง..... 28

5. ผลการทดลองและวิจารณ์..... 29

5.1 กรณีน้ำบาดาล..... 30

5.1.1 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือ, TH.. 30

5.1.1.1 ที่ค่า $G_s$ คงที่..... 30

5.1.1.2 ที่ค่า $T_s$ คงที่..... 41

5.1.2 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือ, TH.. 43

5.1.2.1 ที่ค่า $T_R$ คงที่..... 43

5.1.2.2 ที่ค่า $T_s$ คงที่..... 51

5.1.3 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือ, TH.. 53

5.1.3.1 ที่ค่า $G_s$ คงที่..... 53

5.1.3.2 ที่ค่า $T_R$ คงที่..... 62

5.2 กรณีน้ำผิวดิน..... 63

5.2.1 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือ, TH.. 63

5.2.2 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือ, TH.. 67

5.2.3 ผลของ $n_o$ (ความขุ่นของน้ำดิบ) ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือ, TH..... 69

5.3 อัตราส่วน Ca-H/Mg-H ในน้ำที่ผ่านการกำจัด..... 70

5.4 ความเป็นด่าง $OH^-$ และ $CO_3^=$ ในน้ำที่ผ่านการกำจัด... 73

5.5 ปริมาณตะกอนแห้ง, $d_s$..... 76

5.6 ขนาดฟล้อค, $d_f$..... 76

บทที่ หน้า

6. สรุปผลการวิจัย..... 80

7. ความสำคัญทางวิศวกรรม..... 82

8. ข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม..... 83

เอกสารอ้างอิง..... 84

ภาคผนวก..... 88

ประวัติผู้วิจัย..... 106

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญตาราง


ตารางที่ หน้า

3.1 ผลของสารส้มที่มีต่อความเป็นด่าง คาร์บอนไดออกไซด์และซัลเฟต..... 9

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า G และ $C_t$ กับ N..... 21

3.3 เกรเดียนท์ความเร็วที่ใช้ในการทดลอง..... 21

5.1 คุณลักษณะของน้ำดิบและปริมาณสารเคมีที่ใช้..... 29

5.2 อัตราส่วน Ca-H/Mg-H ในน้ำที่ผ่านการกำจัด..... 70

5.3 ความเป็นด่าง $OH^-$ และ $CO_3^=$ ในน้ำที่ผ่านการกำจัด.... 73

5.4 ปริมาณตะกอนแห้งที่ผลิตต่อปริมาตรน้ำดิบ 495 มล..... 76


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญตารางภาคผนวก


ตารางที่ หน้า

1. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=5 นาที $G_s$=20 วท.$^{-1}$..... 89
2. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=5 นาที $G_s$=40 วท.$^{-1}$..... 89
3. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=5 นาที $G_s$=60 วท.$^{-1}$..... 90
4. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=5 นาที $G_s$=80 วท.$^{-1}$..... 90
5. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=5 นาที $G_s$=100 วท.$^{-1}$..... 91
6. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=7.5 นาที $G_s$=20 วท.$^{-1}$..... 91
7. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=7.5 นาที $G_s$=40 วท.$^{-1}$..... 92
8. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=7.5 นาที $G_s$=60 วท.$^{-1}$..... 92
9. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=7.5 นาที $G_s$=80 วท.$^{-1}$..... 93
10. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=7.5 นาที $G_s$=100 วท.$^{-1}$..... 93
11. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=10 นาที $G_s$=20 วท.$^{-1}$..... 94
12. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=10 นาที $G_s$=40 วท.$^{-1}$..... 94
13. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=10 นาที $G_s$=60 วท.$^{-1}$..... 95
14. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=10 นาที $G_s$=80 วท.$^{-1}$..... 95
15. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=10 นาที $G_s$=100 วท.$^{-1}$..... 96
16. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=15 นาที $G_s$=60 วท.$^{-1}$..... 96
17. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=5 นาที $G_s$=20 วท.$^{-1}$..... 97
18. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=5 นาที $G_s$=40 วท.$^{-1}$..... 97
19. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=5 นาที $G_s$=60 วท.$^{-1}$..... 98
20. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=5 นาที $G_s$=80 วท.$^{-1}$..... 98
21. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=5 นาที $G_s$=100 วท.$^{-1}$..... 99
22. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=7.5 นาที $G_s$=20 วท.$^{-1}$..... 99
23. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=7.5 นาที $G_s$=40 วท.$^{-1}$..... 100
24. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=7.5 นาที $G_s$=60 วท.$^{-1}$..... 100
25. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=7.5 นาที $G_s$=80 วท.$^{-1}$..... 101
26. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=7.5 นาที $G_s$=100 วท.$^{-1}$..... 101

ตารางที่ หน้า

27. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=10 นาที $G_s$=20 วท.$^{-1}$..... 102
28. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=10 นาที $G_s$=40 วท.$^{-1}$..... 102
29. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=10 นาที $G_s$=60 วท.$^{-1}$..... 103
30. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=10 นาที $G_s$=80 วท.$^{-1}$..... 103
31. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=10 นาที $G_s$=100 วท.$^{-1}$..... 104
32. น้ำที่ผ่านการกำจัดที่ $T_R$=15 นาที $G_s$=60 วท.$^{-1}$..... 104
33. ขนาดฟล้อคที่ค่า $G_s$ ต่าง ๆ..... 105

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูป


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 3.1 | ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลายน้ำของแคลเซียมคาร์บอเนต..... | 11 |
| 3.2 | ผลของคาร์บอเนตที่ละลายน้ำในการลดความกระด้างแคลเซียม..... | 11 |
| 3.3 | ความเข้มข้นสมดุลของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนกับพีเอช..... | 13 |
| 3.4 | ผลของไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำในการลดความกระด้างแมกนีเซียม..... | 13 |
| 3.5 | ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการกำจัดความกระด้าง..... | 14 |
| 3.6 | ผังการไหลของการกำจัดแบบขั้นเดียว..... | 16 |
| 3.7 | ผังการไหลของการกำจัดแบบสองขั้น..... | 16 |
| 3.8 | ผังการไหลของการกำจัดบางส่วน..... | 16 |
| 3.9 | ถังโซลิดซ์คอนแทคท์ชนิดมีชั้นตะกอน..... | 18 |
| 3.10 | ถังโซลิดซ์คอนแทคท์ชนิดหมุนเวียนน้ำตะกอน..... | 18 |
| 4.1 | เครื่องกวนผสมสำหรับจาร์เทสต์..... | 27 |
| 4.2 | โถทดลองและอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่าง..... | 27 |
| 5.1 | ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_s$=10 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) | 31 |
| 5.2 | ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_s$=10 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... | 31 |
| 5.3 | ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_s$=20 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) | 32 |
| 5.4 | ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_s$=20 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... | 32 |
| 5.5 | ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_s$=30 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) | 33 |

รูปที่ หน้า

5.6 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_s$=30 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 33

5.7 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_s$=40 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 34

5.8 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_s$=40 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 34

5.9 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $G_s$=20 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 35

5.10 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $G_s$=20 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 35

5.11 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $G_s$=40 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 36

5.12 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $G_s$=40 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 36

5.13 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $G_s$=60 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 37

5.14 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $G_s$=60 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 37

5.15 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $G_s$=80 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 38

5.16 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $G_s$=80 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 38

5.17 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $G_s$=100 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 39

5.18 ผลของ $T_R$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $G_s$=100 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 39

รูปที่ หน้า

5.19 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $T_s$=10 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 44

5.20 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $T_s$=10 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 44

5.21 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $T_s$=20 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 45

5.22 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $T_s$=20 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 45

5.23 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $T_s$=30 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 46

5.24 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $T_s$=30 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 46

5.25 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $T_s$=40 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 47

5.26 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $T_s$=40 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 47

5.27 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $T_R$=5 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 48

5.28 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $T_R$=5 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 48

5.29 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $T_R$=7.5 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 49

5.30 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $T_R$=7.5 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 49

5.31 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $T_R$=10 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 50

รูปที่ หน้า

5.32 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $T_R$=10 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 50

5.33 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_R$=5 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 54

5.34 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_R$=5 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 54

5.35 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_R$=7.5 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 55

5.36 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_R$=7.5 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 55

5.37 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_R$=10 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 56

5.38 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $G_s$ เมื่อ $T_R$=10 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 56

5.39 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $G_s$=20 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 57

5.40 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $G_s$=20 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 57

5.41 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $G_s$=40 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 58

5.42 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $G_s$=40 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 58

5.43 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $G_s$=60 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 59

5.44 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $G_s$=60 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 59

รูปที่ หน้า

5.45 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $G_s$=80 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 60

5.46 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $G_s$=80 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 60

5.47 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $G_s$=100 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำบาดาล) 61

5.48 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ $G_s$=100 วท.$^{-1}$ SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำบาดาล)..... 61

5.49 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $T_R$=5 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำผิวดิน) 64

5.50 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $T_R$=5 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำผิวดิน). ..... 64

5.51 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $T_R$=7.5 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำผิวดิน) 65

5.52 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $T_R$=7.5 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำผิวดิน)..... 65

5.53 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $T_R$=10 นาที SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำผิวดิน) 66

5.54 ผลของ $G_s$ ที่มีต่อความขุ่นที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ $T_R$=10 นาที SOR=3.15 ซม./นาที (น้ำผิวดิน)..... 66

5.55 ผลของ $T_s$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_R$ เมื่อ SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำผิวดิน)..... 68

5.56 ผลของ $n_o$ ที่มีต่อความกระด้างที่เหลือที่แต่ละค่า $T_s$ เมื่อ SOR=3.15 และ 1.58 ซม./นาที (น้ำผิวดิน)..... 68

5.57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน Ca-H/Mg-H ที่ทุกค่า $T_s$ ของแต่ละค่า $G_s$ และที่แต่ละค่า $T_R$ กับ $G_s$ (น้ำบาดาล) 71

รูปที่ หน้า

5.58 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน Ca-H/Mg-H ที่ทุกค่า $G_s$ ของแต่ละค่า $T_s$ และที่แต่ละค่า $T_R$ กับ $T_s$ (น้ำบาดาล) 71

5.59 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน Ca-H/Mg-H ที่ทุกค่า $T_s$ ของแต่ละค่า $G_s$ และที่แต่ละค่า $T_R$ กับ $G_s$ (น้ำผิวดิน) 72

5.60 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน Ca-H/Mg-H ที่ทุกค่า $G_s$ ของแต่ละค่า $T_s$ และที่แต่ละค่า $T_R$ กับ $T_s$ (น้ำบาดาล) 72

5.61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเป็นด่าง $OH^-$ และ $CO_3^=$ ที่ทุกค่า $T_s$ ของแต่ละค่า $G_s$ และที่แต่ละค่า $T_R$ กับ $G_s$ (น้ำบาดาล)..... 74

5.62 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเป็นด่าง $OH^-$ และ $CO_3^=$ ที่ทุกค่า $G_s$ ของแต่ละค่า $T_s$ และที่แต่ละค่า $T_R$ กับ $T_s$ (น้ำบาดาล)..... 74

5.63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเป็นด่าง $OH^-$ และ $CO_3^=$ ที่ทุกค่า $T_s$ ของแต่ละค่า $G_s$ และที่แต่ละค่า $T_R$ กับ $G_s$ (น้ำผิวดิน)..... 75

5.64 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเป็นด่าง $OH^-$ และ $CO_3^=$ ที่ทุกค่า $G_s$ ของแต่ละค่า $T_s$ และที่แต่ละค่า $T_R$ กับ $T_s$ (น้ำผิวดิน)..... 75

5.65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกอนแห้งที่ทุกค่า $T_s$ ของแต่ละค่า $G_s$ และที่แต่ละค่า $T_R$ กับ $G_s$ (น้ำบาดาล).. 77

5.66 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกอนแห้งที่ทุกค่า $G_s$ ของแต่ละค่า $T_s$ และที่แต่ละค่า $T_R$ กับ $T_s$ (น้ำบาดาล).. 77

5.67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกอนแห้งที่ทุกค่า $T_s$ ของแต่ละค่า $G_s$ และที่แต่ละค่า $T_R$ กับ $G_s$ (น้ำผิวดิน)... 78

5.68 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกอนแห้งที่ทุกค่า $G_s$ ของแต่ละค่า $T_s$ และที่แต่ละค่า $T_R$ กับ $T_s$ (น้ำผิวดิน)... 78

รูปที่ หน้า

5.69 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟล้อคกับ $G_s$ ที่ $T_R$=5 นาที (น้ำบาดาล)..... 79

5.70 แสดงขนาดและลักษณะฟล้อคที่ $G_s$=40 วท.$^{-1}$ เมื่อ $T_R$=5 นาที (น้ำบาดาล)..... 79

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญญลักษณ์และอักษรย่อ

| | | |
|---|---|---|
| a | = | พื้นที่ภาพฉายของใบพัด, ซม.$^2$ |
| Ca-H | = | ความกระด้างแคลเซียม, มก./ล.$CaCO_3$ |
| $C_t$ | = | สัมประสิทธิ์แรงลากรวมแบบปั่นป่วน |
| $C_v$ | = | สัมประสิทธิ์แรงลากรวมแบบหนืด |
| $d_f$ | = | ขนาดฟล้อค, ไมโครเมตร |
| ds | = | ปริมาณตะกอนแห้ง, มก. |
| G | = | เกรเดียนท์ความเร็ว, วท.$^{-1}$ |
| $G_R$ | = | เกรเดียนท์ความเร็วของการกวนเร็ว, วท.$^{-1}$ |
| $G_S$ | = | เกรเดียนท์ความเร็วของการกวนช้า, วท.$^{-1}$ |
| Mg-H | = | ความกระด้างแมกนีเซียม, มก./ล.$CaCO_3$ |
| N | = | อัตราเร็วของเครื่องกวนผสม, รอบ/นาที |
| n | = | ความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกำจัด, NTU |
| $n_o$ | = | ความขุ่นของน้ำดิบ, NTU |
| Na-Alk | = | ความเป็นด่างโซเดียม, มก./ล.$CaCO_3$ |
| NCH | = | ความกระด้างนอนคาร์บอเนต, มก./ล.$CaCO_3$ |
| P | = | กำลังที่ให้กับของไหล, ก.-ซม.$^2$/วท.$^3$ |
| P-Alk | = | ความเป็นด่างฟีนอล์พธาลีน, มก./ล.$CaCO_3$ |
| SOR | = | อัตราการไหลล้นผิว, ซม./นาที |
| s | = | อัตราเร็วของเครื่องกวนผสม, รอบ/วท. |
| T | = | โมเมนต์บิดที่ให้กับของไหล, ดายน์-ซม. |
| T-Alk | = | ความเป็นด่างทั้งหมด, มก./ล.$CaCO_3$ |
| TH | = | ความกระด้างทั้งหมด หรือ ความกระด้างที่เหลือ, มก./ล.$CaCO_3$ |
| $T_R$ | = | เวลากักน้ำของการกวนเร็ว, นาที |
| $T_S$ | = | เวลากักน้ำของการกวนช้า, นาที |
| V | = | ปริมาตรของของไหล, ซม.$^3$ |

$W$ = ฟังก์ชันการสิ้นเปลือง หรือ กำลังที่สูญเสียต่อหน่วยปริมาตรของของไหล, เออร์ก/ซม.$^3$-วท.

$\mu$ = ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล, ก./ซม.-วท.

$\rho$ = ความหนาแน่นของของไหล, ก./ซม.$^3$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย