ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง อัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (CaO_2)

Rate of Oxygen Release of Calcium Peroxide (CaO_2)

นามผู้วิจัย นางสาววรัญญา เลิศเจริญสมบัติ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(อาจารย์พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ, D.Tech.Sci)

หัวหน้าภาควิชา .....

(รองศาสตราจารย์ชาติ เจียมไชยศรี, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (CaO_2)

Rate of Oxygen Release of Calcium Peroxide (CaO_2)

โดย

นางสาววรัญญา เลิศเจริญสมบัติ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วรัญญา เลิศเจริญสมบัติ 2555: อัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (CaO_2) ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D. 111 หน้า

กระบวนการทางชีวภาพ เป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ระเหย โดยการใช้สารประกอบประเภท Oxygen Releasing Compounds (ORC) ที่สามารถปลดปล่อยออกซิเจนออกสู่สภาพแวดล้อมทีละน้อย ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างต่อเนื่อง ในการศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของ Oxygen Releasing Compounds (ORC) ในสภาวะที่เหมาะสม โดยเลือกใช้สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ เป็นสาร ORC

ในงานวิจัยได้ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบถังเดียว (Batch reactor) ถังทรงกระบอกระบบปิด ขนาด 1.5 ลิตร ทำจากแก้ว มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร สูง 12 เซนติเมตร โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 สภาวะ คือ สภาวะสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำประปาที่ pH 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้า และกวนเร็ว, สภาวะสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำประปาที่ pH 7 ในระบบกวนช้า และสภาวะสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำใต้ดินในระบบกวนช้า ช่วงเวลา 4 ชั่วโมง

ผลการศึกษาพบว่าระบบกวนช้า สามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่าระบบกวนเร็วที่พีเอช 5 และ 6 และที่ระบบกวนเร็วสามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่าระบบกวนช้าที่พีเอช 7 และ 8 และสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกที่อัตราส่วน 1:1 สามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้ดีที่สุด และการเติมแคลเซียมเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวในน้ำใต้ดินสามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้ดีกว่าในการทดลองที่มีการเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ร่วมกับกรดทาร์ทาริก

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Varanya Lertcharoensombat 2012: Rate of Oxygen Release of Calcium Peroxide (CaO_2). Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Sanya Sirivithayapakorn, Ph.D. 111 pages.

Bioremediation is a remedial option for treatment of groundwater contaminated with volatile organic compounds. The application of Oxygen Releasing Compounds (ORC), which release small increments of oxygen into the environment, can support constant degradation of these organic compounds. This study focused on the effects of oxygen release rate by ORC under optimal conditions. Calcium peroxide was the selected ORC compound used in this experiment.

Batch reactor with total volume 1.5 litre, diameter of 13 centimeter and high of 12 centimeter was used in this research. This research was divide into 3 experiments. The first experiment is to study the optimum condition of oxygen release from calcium peroxide in tap water at pH 5, 6, 7 and 8 under both slow and rapid mixing condition. The second experiment is to study the optimum condition of oxygen release from calcium peroxide and tartaric acid in tap water at pH 7 under slow speed mixing condition. The last experiment is to study the optimum condition of oxygen release from calcium peroxide and tartaric acid in underground water under slow mixing condition for 4 hr.

The results indicated that at pH 5 and 6, oxygen can be released more under slow speed mixing condition, while at pH 7 and 8, oxygen can be released more under fast mixing condition. Further study that the ratio of found calcium peroxide and tartaric acid of 1:1 ratio was optimum condition. The study in the groundwater found that oxygen can release more when calcium peroxide alone was added in comparison to when calcium peroxide and tartaric acid were added.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงและสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก อาจารย์พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร. สุชาติ เหลืองประเสริฐ ประธานกรรมการสอบ และรองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเธียร ผู้ทรงคุณวุฒิจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาความรู้ในการค้นคว้าวิจัย และคำแนะนำ ตลอดระยะเวลาในการวิจัย และทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วง

ขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม 1 และ2 ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ช่วยเหลือในการทำถังปฏิกรณ์ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆในการทำการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และเพื่อนๆ ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ซึ่งมิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุกๆ ท่าน จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้

วรัญญา เลิศเจริญสมบัติ

เมษายน 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ (1)

สารบัญตาราง (3)

สารบัญภาพ (6)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (8)

คำนำ 1

วัตถุประสงค์ 2

การตรวจเอกสาร 3

อุปกรณ์และวิธีการ 11

อุปกรณ์ 11

วิธีการ 13

ผลและวิจารณ์ 19

สรุปและข้อเสนอแนะ 45

สรุป 45

ข้อเสนอแนะ 46

เอกสารและสิ่งอ้างอิง 47

ภาคผนวก 50

ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำประปา ที่ระบบกวนช้า ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 51

ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำประปา ที่ระบบกวนเร็ว ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 60

ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 69

ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 72

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก จ ข้อมูลการทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกที่อัตราส่วนต่างๆ ในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 75
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำประปา ในระบบกวนช้า ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 82
ภาคผนวก ช ข้อมูลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำประปา ในระบบกวนเร็ว ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 91
ภาคผนวก ซ ข้อมูลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 100
ภาคผนวก ฌ การคำนวณ 107
ประวัติการศึกษาและการทำงาน 111

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1	การละลายของออกซิเจนละลายน้ำในน้ำบริสุทธิ์ที่ระดับมาตรฐานน้ำทะเล (1 บรรยากาศ)	4
2	ผลผลิตของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 0.2% (w/v) ส่วนผสมของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และเวลาที่ต้องการสำหรับการสลายตัวที่สมบูรณ์ของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่การทดสอบที่ค่าพีเอชต่างๆ	9
3	พารามิเตอร์ และวิธีวิเคราะห์ลักษณะ และสมบัติของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์	16
4	ผลการคำนวณค่า Solubility Product ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระบบกวนช้า	26
5	ผลการคำนวณค่า Solubility Product ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระบบกวนเร็ว	26
6	ค่าเอสเอสและทีดีเอสที่สภาวะพีเอช 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว	29
7	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ปลดปล่อยจากแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว ในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง	31
8	การคำนวณค่า Solubility Product ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2	35
9	ค่าเอสเอสและทีดีเอสที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2	37
10	การคำนวณค่า Solubility Product ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก	42
11	ค่าเอสเอส และค่าทีดีเอส ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก	44

ตารางผนวกที่

ก1	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 5 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	52
ก2	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 6 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	54

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก3	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	56
ก4	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 8 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	58
ข1	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 5 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	61
ข2	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 6 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	63
ข3	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 7 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	65
ข4	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 8 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	67
ค1	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	70
ง1	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และทาร์ทาริกในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	73
จ1	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และทาร์ทาริก ที่อัตราส่วน 1:1 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	76
จ2	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และทาร์ทาริก ที่อัตราส่วน 1:1.5 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	78
จ3	ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และทาร์ทาริก ที่อัตราส่วน 1:2 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	80
ฉ1	ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 5 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	83
ฉ2	ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 6 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	85

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ฉ3	ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	87
ฉ4	ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 8 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	89
ช1	ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 5 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	92
ช2	ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 6 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	94
ช3	ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 7 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	96
ช4	ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 8 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	98
ซ1	ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในอัตราส่วน 1:1 ในน้ำใต้ดินที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	101
ซ2	ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในอัตราส่วน 1:1.5 ในน้ำใต้ดินที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	103
ซ3	ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในอัตราส่วน 1:2 ในน้ำใต้ดินที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	105
ฌ1	ปริมาณสารที่คำนวณได้ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในระบบกวนช้า	109
ฌ2	ปริมาณสารที่คำนวณได้ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในระบบกวนเร็ว	109
ฌ3	ปริมาณสารที่คำนวณได้ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำประปาที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า ในอัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2	109
ฌ4	ปริมาณสารที่คำนวณได้ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า	110

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Eh และ DO ในน้ำใต้ดิน Choshui fan delta (R1 จาก Rose and Long (1998), R2 จาก Smedley and Edmunds (2002), R3 จาก Chen and Liu (2003))	6
2	ความสัมพันธ์การปลดปล่อยของออกซิเจนจากสารสี่ชนิดในน้ำ	8
3	ถังปฏิกรณ์แบบถังเดียวที่ใช้ในการทดลอง	11
4	ลำดับขั้นตอนในการวิจัย	13
5	วิธีการต้มน้ำเพื่อไล่ออกซิเจนออกจากน้ำ	14
6	การเปรียบเทียบค่าออกซิเจนละลายน้ำของระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว ที่ (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 6 (ค) พีเอช 7 และ (ง) พีเอช 8	21
7	ความต่างของออกซิเจนละลายน้ำของระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว ที่ (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 6 (ค) พีเอช 7 และ (ง) พีเอช 8	
8	ค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นสุทธิในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง แต่ละพีเอชที่ระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว	23
9	ปริมาณสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ละลายได้ในสภาวะที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 ของระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว	23
10	ค่าพีเอชสุดท้ายในช่วงเวลา 4 ชั่วโมงที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 (ก) ระบบกวนช้า (ข) ระบบกวนเร็ว	27
11	ค่าโออาร์พีและค่าออกซิเจนละลายน้ำที่สภาวะพีเอชที่ 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้า	28
12	ค่าโออาร์พีและค่าออกซิเจนละลายน้ำที่สภาวะพีเอชที่ 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนเร็ว	28
13	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจน (Cs-Ct) กับ เวลา (t) ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่การกวนช้าและกวนเร็วที่สภาวะพีเอช (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 6 (ค) พีเอช 7 (ง) พีเอช	32
14	ค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นสุทธิในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2	33

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	ปริมาณสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ละลายได้ที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2	34
16	การเปรียบเทียบการปลดปล่อยออกซิเจนละลายน้ำของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 กับแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ไม่ได้เติมกรดทาร์ทาริก	34
17	ค่าพีเอชในช่วงเวลา 4 ชั่วโมงที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2	36
18	ค่าโออาร์พีและค่าออกซิเจนละลายน้ำที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2	36
19	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจน (Cs-Ct) กับ เวลา (t)ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกที่อัตราส่วน (ก) อัตราส่วน 1:1 (ข) อัตราส่วน 1:1.5 (ค) อัตราส่วน 1:2	38
20	การเปรียบเทียบการปลดปล่อยออกซิเจนละลายน้ำที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก	40
21	(ก) ค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นสุทธิในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก (ข) ปริมาณสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ละลายในสภาวะที่เติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และที่เติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก	41
22	ค่าพีเอชในช่วงเวลา 4 ชั่วโมงที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก	42
23	ค่าโออาร์พีและค่าออกซิเจนละลายน้ำที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก	43

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_s	=	ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ
C_0	=	ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ที่เวลาเริ่มต้น
C_s	=	ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ
DO	=	Dissolved Oxygen
Eh	=	ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล
K_La	=	ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำ
Ksp	=	Solubility Product Constant
ND	=	Not Detectable
O_{rel}	=	ออกซิเจนที่ได้จากการทดลอง
O_{final}	=	ออกซิเจนสุดท้าย
O_{in}	=	ออกซิเจนเริ่มต้น
ORC	=	Oxygen Releasing Compounds
ORP	=	Oxidation Reduction potential
PVDC	=	Polyvinylidene Chloride
SS	=	Suspended Solid
t	=	เวลา
TDS	=	Total Dissolved Solid
V_{total}	=	ปริมาตรของน้ำทั้งหมด
VOCs	=	สารอินทรีย์ระเหยง่าย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (CaO_2)

Rate of Oxygen Release of Calcium Peroxide (CaO_2)

คำนำ

ในปัจจุบันการขยายตัวด้านอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมที่สืบเนื่องจากปิโตรเคมี ส่งผลให้มีการใช้ และเกิดขึ้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) มีปริมาณสูงขึ้น ทั้งนี้แหล่งสำคัญที่อาจทำให้เกิดการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยในน้ำใต้ดิน เช่น พื้นที่ที่มีการลักลอบทิ้งกากอุตสาหกรรม พื้นที่ฝังกลบขยะ ที่ไม่ได้มาตรฐาน พื้นที่ที่มีการฝังสารเคมีใต้ดิน ซึ่งในพื้นที่ดังกล่าวอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนในชั้นดิน และเนื่องจากการชะสารปนเปื้อนในชั้นดินจากน้ำฝน หรือกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนลงในแนวดิ่ง ทำให้สารอินทรีย์ระเหยเคลื่อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินในที่สุด และทำให้น้ำใต้ดินมีการปนเปื้อน ด้วยคุณสมบัติของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย โดยทั่วไปมีความสามารถในการละลายได้น้อย ดังนั้น หากมีการปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน แล้วจะทำให้มีการปนเปื้อนเป็นเวลานาน ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหลายเหล่านี้ได้ส่งผลเป็นประเด็นปัญหาที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, ชุมชน และสุขภาพของผู้คนที่ได้รับ

เทคโนโลยีการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม มีทั้งวิธีทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ นับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน และการป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาต่อเนื่องถึงอนาคต การเลือกใช้เทคโนโลยีการฟื้นฟูที่เหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศและสภาพพื้นที่ ย่อมส่งผลให้ปัญหาสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ได้รับการแก้ไขที่ถูกต้อง

การฟื้นฟูสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมด้วยวิธีทางชีวภาพ (Bioremediation) เป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ระเหย โดยการใช้สารประกอบประเภท Oxygen Releasing Compounds (ORC) ที่สามารถปลดปล่อยออกซิเจนออกสู่สภาพแวดล้อมทีละน้อย ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างต่อเนื่อง ในการศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (CaO_2) ในสภาวะที่เหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

ศึกษาอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสารประกอบแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ ที่สภาวะระดับพีเอชต่างๆ

ขอบเขตของการศึกษา

1. เป็นการวิจัยศึกษาการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์

2. ทำการทดลองใช้สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกร่วมด้วย ในการทดสอบการปลดปล่อยออกซิเจน

3. ทดสอบในระบบปิด ณ สภาวะพีเอช เท่ากับ 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้าและกวนเร็ว เพื่อหาสภาวะที่มีความเหมาะสมในการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์

4. ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ด้วยขนาดถังปฏิกรณ์ระดับปฏิบัติการ (Lab scale)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการขยายตัวด้านอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมที่สืบเนื่องจากปิโตรเคมี ส่งผลให้มีการใช้ และเกิดขึ้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) มีปริมาณสูงขึ้น ทั้งนี้แหล่งสำคัญที่อาจทำให้เกิดการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยในน้ำใต้ดิน เช่น พื้นที่ที่มีการลักลอบทิ้งกากอุตสาหกรรม พื้นที่ฝังกลบขยะ ที่ไม่ได้มาตรฐาน พื้นที่ที่มีการฝังสารเคมีใต้ดิน เป็นต้น ซึ่งในพื้นที่ดังกล่าวอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนในชั้นดินและเนื่องจากการชะสารปนเปื้อนในชั้นดินจากน้ำฝน หรือกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนลงในแนวดิ่ง ทำให้สารอินทรีย์ระเหยเคลื่อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินในที่สุด

ในการฟื้นฟูสารปนเปื้อนต้องอาศัยเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม ซึ่งการฟื้นฟูสารปนเปื้อนด้วยวิธีทางชีวภาพ (Bioremediation) เป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ระเหย ในงานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการบำบัดโดยใช้ออกซิเจน (Enhanced Aerobic Bioremediation) คือ สารประกอบประเภท Oxygen Releasing Compounds (ORC) ซึ่งเป็นการบำบัดทางชีวภาพ โดยการเติมออกซิเจน ส่วนใหญ่จะใช้ Oxygen Releasing Compounds ที่ประกอบด้วยแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และแมกนีเซียมเปอร์ออกไซด์ (EPA, 2004; Chevalier and McCann, 2008) ลงไปในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated zone) ในรูปของของแข็งหรือของเหลว ซึ่งเปอร์ออกไซด์เหล่านี้จะปลดปล่อยออกซิเจนไปยังชั้นหินอุ้มน้ำ (aquifer) เมื่อรวมตัวกับน้ำใต้ดิน ทำให้สารเปอร์ออกไซด์นี้ในตอนสุดท้ายจะเปลี่ยนรูปอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ (EPA, 2004)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สารประกอบแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ เป็น ORC เนื่องจาก Khodaveisi *et al*. (2011) กล่าวว่า แคลเซียมเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสารปนเปื้อนทางชีวภาพในดินและน้ำใต้ดิน แต่ความเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และสารปนเปื้อนเป็นไปอย่างช้าๆ และ Schmidtke *et al*. (1999) กล่าวว่าใช้เป็นแหล่งออกซิเจนให้กับจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ เพื่อย่อยสลายพวกผลิตปิโตรเลียมได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายของออกซิเจน

ในทฤษฎีปริมาณของออกซิเจนในสารละลายจะขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ, ความเค็ม และ ความดันบรรยากาศ

1. อุณหภูมิของน้ำ

การละลายของออกซิเจนจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อน้ำเย็น การละลายของออกซิเจนก็มากตามไปด้วย เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อการละลายและอัตราการแพร่ของออกซิเจน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การละลายของออกซิเจนละลายน้ำในน้ำบริสุทธิ์ที่ระดับมาตรฐานน้ำทะเล (1 บรรยากาศ)

°C	mg/liter	°C	mg/liter	°C	mg/liter
0	14.16	12	10.43	24	8.25
1	13.77	13	10.92	25	8.11
2	13.40	14	9.98	26	7.99
3	13.05	15	9.76	27	7.86
4	12.70	16	9.56	28	7.75
5	12.37	17	9.37	29	7.64
6	12.06	18	9.18	30	7.53
7	11.76	19	9.01	31	7.42
8	11.47	20	8.84	32	7.32
9	11.19	21	8.68	33	7.22
10	10.92	22	8.53	34	7.13
11	10.67	23	8.38	35	7.04

ที่มา: Boyd and Lichtkoppler (1979)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ความเค็ม

ปริมาณของออกซิเจนละลายละลายในน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเค็มลดลง หรือในอีกแง่หนึ่งคือ น้ำจืดมีออกซิเจนละลายได้มากกว่าน้ำเกลือ และเนื่องจากความสามารถในการละลายของเกลือเป็นตัวกำหนดปริมาณออกซิเจนที่สามารถละลายในน้ำ และความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะแปรผันตามความเค็มของตัวอย่าง

3. ความดันบรรยากาศ

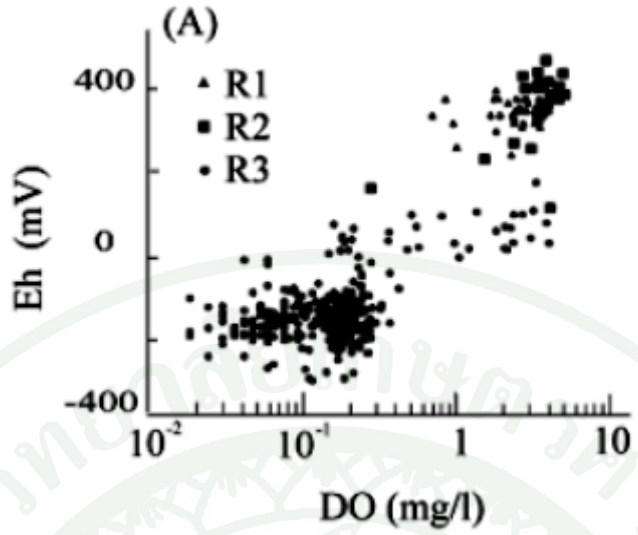
ความสัมพันธ์ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงระหว่างความสามารถในการละลายได้ของออกซิเจนละลายน้ำและความดันบรรยากาศโดยรอบ ความดันลดลงเมื่อระดับความสูงเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นปริมาณของออกซิเจนละลายในน้ำจึงลดลง

3. ความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายน้ำและค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล

ออกซิเจนในน้ำมีความสำคัญในการเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยพารามิเตอร์ที่สามารถวัดปฏิกิริยารีดอกซ์ในน้ำได้ คือ ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Redox potential, Eh) หรือ ค่า ORP (Oxidation-Reduction Potential) ซึ่งเป็นมาตรวัดพลังงานศักย์ไฟฟ้าในการส่งผ่านอิเล็กตรอนในตัวอย่างน้ำเทียบกับเซลล์ไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน (Standard reference electrode cell) มีหน่วยเป็น โวลต์ (V) หรือ มิลลิโวลต์ (mV) โดยค่า Eh จะบ่งชี้ถึงสภาพรีดอกซ์ในน้ำ กล่าวคือ สภาวะที่มีค่า Eh ในน้ำสูง แสดงว่าปฏิกิริยารีดอกซ์อยู่ในสภาวะออกซิเดชั่น ในทางกลับกัน ถ้าค่า Eh ต่ำ แสดงว่าอยู่ในสภาวะรีดักชั่น

จากการศึกษาของ Chen and Liu (2003) พบว่า ค่า Eh ที่วัดได้ในน้ำใต้ดินทั้งแบบออกซิก (DO $\geq$ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร) และแอน็อกซิก (DO < 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร) นั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0 - 200 มิลลิโวลต์ และ -400 - 0 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยแสดงความสัมพันธ์ของค่า Eh และค่า DO ที่ตรวจวัดได้ดังภาพที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Eh และ DO ในน้ำใต้ดิน Choshui fan delta (R1 จาก Rose and Long (1988), R2 จาก Smedley and Edmunds (2002), R3 จาก Chen and Liu (2003))

ที่มา: Chen and Liu (2003)

4. ประเภทของสาร Oxygen Releasing Compound

สารที่มีความสามารถในการปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนเรียกว่า Solid Peroxygens (Oxidizers) ได้แก่ Calcium Peroxide (CaO_2), Magnesium Peroxide (MgO_2), Sodium Percarbonate (Na_2CO_3. $1.5H_2O_2$) -Encapsulated in Polyvinylidene Chloride (PVDC), Unencapsulated Na_2CO_3. $1.5H_2O_2$, Hydrogen Peroxide (H_2O_2) และ Calcium Oxyhydroxide ($CaO(OH)_2$) (ORC Advanced™; Koenigsberg and Willett, 2005) เป็นต้น

Calcium Peroxide (CaO_2) เป็นของแข็งสีขาวหรือสีเหลือง ในทางปฏิบัติแคลเซียมเปอร์ออกไซด์จะไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในสภาวะกรด (Waite *et al.*, 1999) และเป็นตัวปลดปล่อยออกซิเจนอย่างช้าๆ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้สารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นผลิตภัณฑ์ (Hanh *et al.*, 2005; Walawska *et al.*, 2007) ตามสมการดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$2CaO_2 + 4H_2O \longrightarrow 2Ca(OH)_2 + 2H_2O_2 \quad (1)$$

$$2H_2O_2 \longrightarrow 2H_2O + O_2 \quad (2)$$

รวมสมการ (1) และ สมการ (2) จะได้

$$2CaO_2 + 2H_2O \longrightarrow O_2 + 2Ca(OH)_2 \quad (3)$$

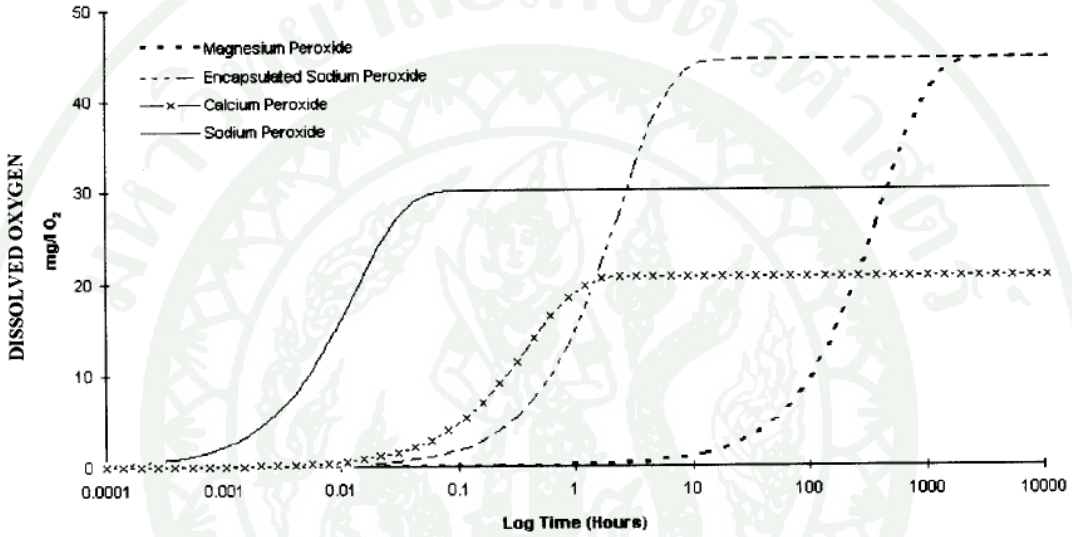
Hanh *et al.* (2005) ได้ศึกษาทดสอบถังปฏิกรณ์เบื้องต้นในการปลดปล่อยออกซิเจนจากแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ภายใต้สภาวะต่างๆดังนี้ แคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (ทางการค้าจะมีปริมาณแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 60% โดยน้ำหนัก) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.69 กรัมต่อลิตร ถูกเติมลงในขวด บีโอดี ที่มีน้ำเสียสังเคราะห์ โดยที่ขวดหนึ่งจะมีการเติมสลัดจ์ ส่วนอีกขวดหนึ่งจะไม่มีการเติมสลัดจ์ และทำการวัดอัตราการปลดปล่อยออกซิเจน ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้มีความเข้มข้นของซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 135 มิลลิกรัมต่อลิตร และ อัตราส่วนของ C : N : P เท่ากับ 100 : 1.5 : 1 และในขวดที่มีการเติมสลัดจ์จะรักษาอัตราส่วนของ F/M เท่ากับ 0.25 ในส่วนของชุดควบคุมจะใช้น้ำกลั่นเท่านั้น ชุดทดลองทั้งหมดจะถูกบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนจะคำนวณได้จากสมการที่ (4) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 0.2222 ต่อกรัมของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์จากสมการที่ (3) การเก็บตัวอย่างจะเก็บตัวอย่างทุกๆ วันเป็นเวลา 10 วันจากแต่ละขวดเพื่อวิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์ของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และค่าซีโอดีที่เหลืออยู่ รวมถึงค่าออกซิเจนละลายน้ำ และพีเอช ก็ทำการตรวจวิเคราะห์ด้วย

$$O_2 \text{ release} = (\%\ CaO_2 \text{ initial} - \%\ CaO_2 \text{ remaining}) \times 0.2222 \quad (4)$$

งานวิจัยของ Waite *et al.* (1999) กล่าวไว้ว่า unencapsulated Na_2CO_3. $1.5H_2O_2$ มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนได้สูงที่สุด คือ 132 มิลลิกรัมต่อลิตรชั่วโมง และ magnesium peroxide (MgO_2) มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนได้ต่ำที่สุด คือ 1.57×10^{-3} มิลลิกรัมต่อลิตรชั่วโมง จากการศึกษา solid oxidants 4 ตัว คือ calcium peroxide (CaO_2), magnesium peroxide (MgO_2), sodium percarbonate (Na_2CO_3. $1.5H_2O_2$) -encapsulated in polyvinylidene chloride (PVDC) และ unencapsulated Na_2CO_3 ดังภาพที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในงานวิจัยของ Kao *et al.* (2001) ได้ศึกษาองค์ประกอบที่เหมาะสมของ oxygen-organic releasing material จากการผสมเตรียมสาร โดย ซีเมนต์ผสม, แคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (CaO_2), ทราย, ถ่านพีท, เถ้าลอย, และน้ำ เข้าด้วยกันในอัตราส่วน 1.3 : 1.5 : 0.2 : 0.4 : 1.3 : 1.8 โดยน้ำหนัก ซึ่ง ซีเมนต์ใช้เป็นตัวเชื่อมประสาน ทรายใช้เป็นตัวเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านได้ และเถ้าลอยใช้ปรับค่าความเป็นกรดด่างให้ต่ำลง ถ่านพีทใช้เป็นตัวปลดปล่อยการละลายของสารประกอบอินทรีย์ และปรับค่าความเป็นกรดด่างให้ต่ำลง และ แคลเซียมเปอร์ออกไซด์ใช้เป็นแหล่งของก๊าซออกซิเจน



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์การปลดปล่อยของออกซิเจนจากสารสี่ชนิดในน้ำ

ที่มา: Waite *et al.* (1999)

Gino *et al*. (1994) ได้นำ ORC ชนิดผงมาผสมรวมกับซีเมนต์กลายเป็น “ORC concrete” โดยการผสมคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 2 นิ้ว × 2 นิ้ว × 2 นิ้ว ซึ่งออกซิเจนที่ใช้ประโยชน์ได้ใน ORC ชนิดผงที่ใช้ในงานคือ 6.5% (±0.3%) โดยน้ำหนัก หลังจากรวมตัวกันเป็นคอนกรีตแล้ว ออกซิเจนที่ใช้ประโยชน์คงเหลือใน ORC คือ 5.2% (±0.3%) โดยน้ำหนัก

Northup and Cassidy (2008) ทำการทดลองได้ผลผลิตของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากการสลายตัวแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ค่าพีเอชต่างๆ แสดงการปลดปล่อยของ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เวลาในถังปฏิกรณ์จากการสลายตัวของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่การทดสอบที่ค่าพีเอชต่างๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลผลิตของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 0.2% (w/v) ส่วนผสมของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และเวลาที่ต้องการสำหรับการสลายตัวที่สมบูรณ์ของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่การทดสอบที่ค่าพีเอชต่างๆ

พีเอช	ผลผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิโมล)[a]	เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์[b]	เปอร์เซ็นต์ผลผลิตแคลเซียมเปอร์ออกไซด์[c]	การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาที่ต้องการสำหรับการสลายตัว
6	22.75	82	18	8.2	4 ชั่วโมง
7	20.53	74	26	3.7	20 ชั่วโมง
8	18.04	65	35	1.8	52 ชั่วโมง
9	13.06	47	53	0.7	6 วัน
12-13	0	0	100	0	62 วัน

[a] จากการตรวจวัดความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ไซด์ในสารละลายสุดท้าย (โดย มิลลิโมล × 2 ลิตร)

[b] ขึ้นอยู่กับ 100% ตามทฤษฎีของ 27.76 มิลลิโมลไฮโดรเจนเปอร์ไซด์จาก 2 กรัม แคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ใส่ลงไป

[c] คำนวณมาจากการสมมติปริมาณแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ไม่ปลดปล่อยในรูปของไฮโดรเจนเปอร์ แต่ปลดปล่อยในรูปของออกซิเจน

จากตารางที่ 2 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในการเชื่อมโยงอุณหภูมิและเวลาที่จำเป็นสำหรับการสลายตัวที่สมบูรณ์ของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ ซึ่งการสลายตัวที่สมบูรณ์ของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์คือ การทดสอบโดยการเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนคลอไรด์ลงในตัวอย่าง เพื่อลดค่าพีเอชให้เป็น 2 และทำการตรวจวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าไม่มีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หลังจากที่แคลเซียมเปอร์ออกไซด์ละลายหมด ถึงแม้ไม่ได้ทำการตรวจวัดออกซิเจนในการศึกษานี้ แต่สมมติฐานได้ว่าแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ไม่ได้เปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้โดยตรง

ซึ่งจากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าผลผลิตของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และอัตราการสลายตัวของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลง

5. การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง

ทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดประสิทธิภาพการเติมอากาศ (เกรียงศักดิ์, 2545; มั่นสิน และไพพรรณ, 2536) มีดังนี้

5.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำ (K_La) จะขึ้น อยู่กับชนิดของเครื่องเติมออกซิเจน อุณหภูมิ และอื่นๆ และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 5

$$K_La = \frac{\ln(C_s-C_0) - \ln(C_s-C_t)}{(t - t_0)} \qquad (5)$$

เมื่อ K_La คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำ, ต่อเวลา

C_t คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ, มิลลิกรัมต่อลิตร

C_0 คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ที่เวลาเริ่มต้น, มิลลิกรัมต่อลิตร

C_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ, มิลลิกรัมต่อลิตร

t คือ เวลา, นาที

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1 ถังปฏิกรณ์แบบถังเดียว (Batch reactor) ถังทรงกระบอกระบบปิด ขนาด 1.5 ลิตร ทำจากแก้ว มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร สูง 12 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3

ภาพที่ 3 ถังปฏิกรณ์แบบถังเดียวที่ใช้ในการทดลอง

1.2 เครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) รุ่น Cyberscan DO 100

1.3 เครื่องวัดความเป็นกรดและด่าง (pH meter) รุ่น Cyberscan pH 5 / pH 6

1.4 เครื่องวัด Oxidation-Reduction Potential (ORP) รุ่น Cyberscan pH 5 / pH 6

1.5 เครื่องชั่งละเอียด รุ่น 2100 MP2 ยี่ห้อ Sartorius

1.6 ชุดกรองสุญญากาศและกระดาษกรองใยแก้ว (GF/c) เส้นผ่าศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร

1.7 ตู้เดสิเคเตอร์ พร้อมสารดูดความชื้น

1.8 ตู้อบที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิภายใน (Hot air oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น ED53/E2

1.9 เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hotplate stirrer) ยี่ห้อ Cole-Parmer

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. สารเคมี

2.1 แคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (CaO_2) 75% ยี่ห้อ ALDRICH

2.2 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล

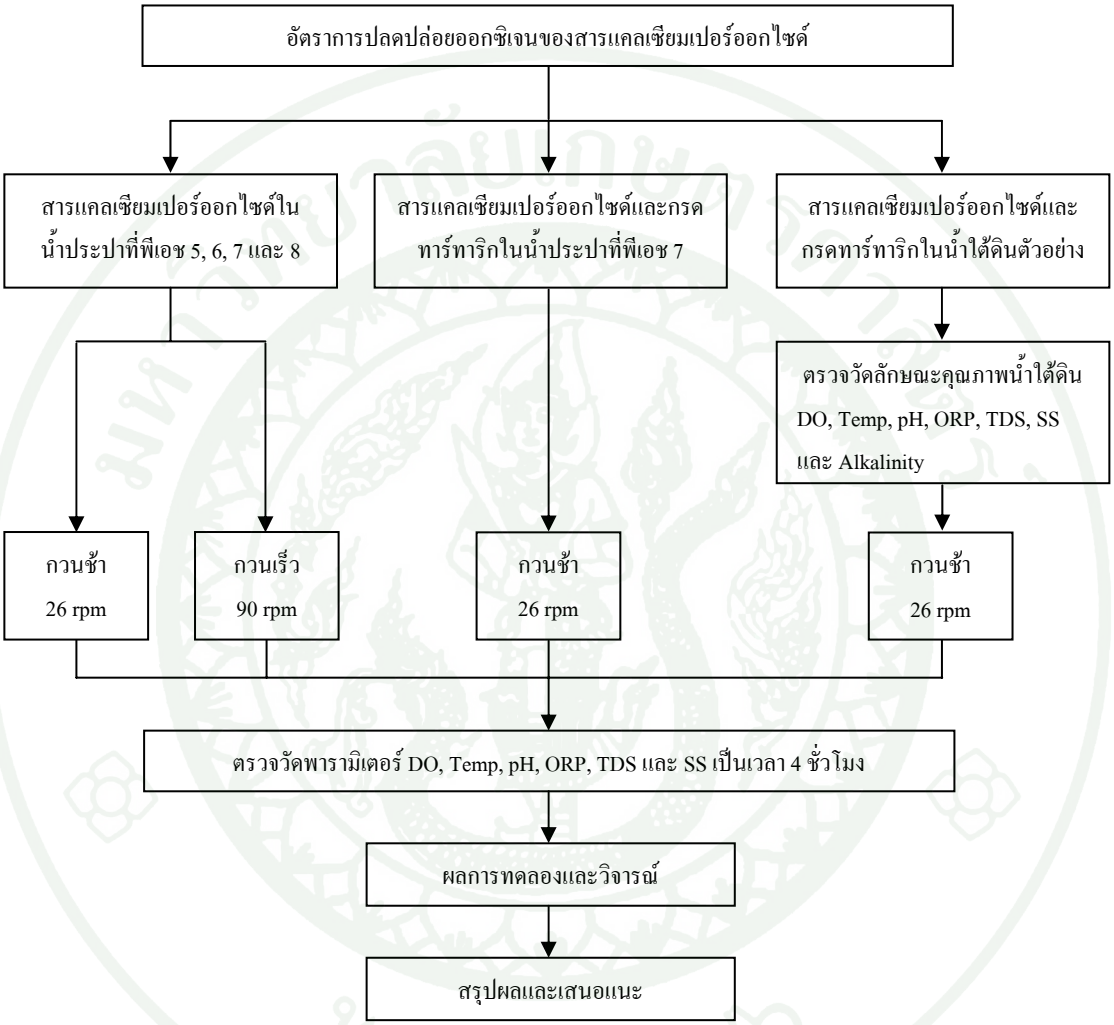
2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 นอร์มอล และ 0.1 นอร์มอล

2.4 กรดทาร์ทาริก $(CHOH.COOH)_2$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

งานวิจัยนี้สามารถอธิบายลำดับขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ลำดับขั้นตอนในการวิจัย

1. ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลจำเป็นพื้นฐาน

ค้นคว้า และรวบรวมข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น การตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Oxygen Release Compound (ORC) คุณสมบัติของสารเคมี และอื่น ๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ศึกษาลักษณะคุณสมบัติของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (CaO_2)

ศึกษาลักษณะคุณสมบัติของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์เบื้องต้น ด้านความสามารถในการละลายได้ และการปลดปล่อยออกซิเจน มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนการศึกษาลักษณะคุณสมบัติของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์

2.1 เตรียมน้ำประปาปริมาณ 1,800 มิลลิลิตร และแท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Bar) ใส่ใน suction flask ขนาด 2,000 มิลลิลิตร ตั้งบน hotplate stirrer ต้มจนน้ำเดือด เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำออกไปให้ได้มากที่สุด ดังภาพที่ 5 รอให้น้ำเย็นที่อุณหภูมิห้อง เทใส่ใน batch reactor จนเต็ม ไม่ให้มี headspace

ภาพที่ 5 วิธีการต้มน้ำเพื่อไล่ออกซิเจนออกจากน้ำ

2.2 ชั่งสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม ใส่ลงใน Batch reactor

2.3 วัดค่าการปลดปล่อยออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นของสาร และนำไปคำนวณความสามารถในการละลายได้ต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การคำนวณความสามารถในการละลายได้ของสาร ดังนี้

$$O_{rel}\ (mg/l) = [O_{final}\ (mg/l) - O_{in}\ (mg/l)] \times V_{total}\ (l) \quad (6)$$

โดยที่ O_{rel} = ออกซิเจนที่ได้จากการทดลอง(mg/l)

O_{final} = ปริมาณออกซิเจนสุดท้าย (mg/l)

O_{in} = ปริมาณออกซิเจนเริ่มต้น (mg/l)

V_{total} = ปริมาตรของน้ำทั้งหมด (l)

นำออกซิเจนที่ได้จากการทดลอง ไปเทียบกับทฤษฎีว่ามาจากสารกี่กรัม เมื่อทราบปริมาณของสาร นำไปหักลบกับปริมาณสารที่แท้จริงทางทฤษฎีก็จะทราบปริมาณสารที่ละลายจริงๆ ได้

3. ศึกษาการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (CaO_2)

แบ่งการทดลองออกเป็น 3 สภาวะ คือ

1. สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำประปาที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้า และกวนเร็ว
2. สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำประปาที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า
3. สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำใต้ดินในระบบกวนช้า

3.1 การทดลองสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำประปาที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้า และกวนเร็ว

ขั้นตอนการทดลอง มีดังนี้

1. เตรียมน้ำประปาปริมาณ 1,800 มิลลิลิตร และแท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Bar) ใส่ใน suction flask ขนาด 2,000 มิลลิลิตร ตั้งบน hotplate stirrer ต้มจนน้ำเดือด เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำออกไปให้ได้มากที่สุด รอให้น้ำเย็นที่อุณหภูมิห้อง เทใส่ใน batch reactor จนเต็ม ไม่ให้มี headspace

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ปรับสภาพความเป็นกรดด่าง (พีเอช) ของน้ำด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 0.1 M และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 N ให้ได้ตามพีเอชที่ต้องการ

3. ชั่งสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม ใส่ลงใน batch reactor

4. ทำการทดลองในระบบกวนช้า ปรับรอบของใบพัดที่ใช้ คือ 26 รอบต่อนาที และระบบกวนเร็ว ปรับรอบของใบพัดที่ใช้ คือ 90 รอบต่อนาที

5. ตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ และวิธีวิเคราะห์ลักษณะ และสมบัติของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์

พารามิเตอร์	**วิธีการ**
ออกซิเจนละลายน้ำ (DO)	DO meter
ความเป็นกรดด่าง (pH)	pH meter
โออาร์พี (ORP)	ORP meter
ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TDS) และค่าปริมาณสารแขวนลอย (SS)	Dried at 103-105 °C

3.2 การทดลองสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำประปาที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า

แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง คือ

1. อัตราส่วนสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ต่อกรดทาร์ทาริก ที่อัตราส่วน 1:1
2. อัตราส่วนสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ต่อกรดทาร์ทาริก ที่อัตราส่วน 1:1.5
3. และอัตราส่วนสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ต่อกรดทาร์ทาริก ที่อัตราส่วน 1:2

ขั้นตอนการทดลอง มีดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. เตรียมน้ำประปาปริมาณ 1,800 มิลลิลิตร และแท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Bar) ใส่ใน suction flask ขนาด 2,000 มิลลิลิตร ตั้งบน hotplate stirrer ต้มจนน้ำเดือด เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำออกไปให้ได้มากที่สุด รอให้น้ำเย็นที่อุณหภูมิห้อง เทใส่ใน batch reactor จนเต็ม ไม่ให้มีheadspace

2. ปรับสภาพความเป็นกรดด่าง (พีเอช) ของน้ำ ด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 0.1 M และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 N จนกระทั่งน้ำมีค่าพีเอช เป็น 7

3. ชั่งสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกตามอัตราส่วนต่างๆดังนี้

- อัตราส่วนสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ต่อกรดทาร์ทาริก ที่อัตราส่วน 1:1 ใส่สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม และกรดทาร์ทาริก 0.0132 กรัม

- อัตราส่วนสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ต่อกรดทาร์ทาริก ที่อัตราส่วน 1:1.5 ใส่สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม และกรดทาร์ทาริก 0.0200 กรัม

- และอัตราส่วนสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ต่อกรดทาร์ทาริก ที่อัตราส่วน 1:2 ใส่สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม และกรดทาร์ทาริก 0.0269 กรัม

4. ทำการทดลองในระบบกวนช้า ปรับรอบของใบพัดที่ใช้ คือ 26 รอบต่อนาที

5. ตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังตารางที่ 3

3.3 การทดลองสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำใต้ดินในระบบกวนช้า

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง คือ

1. สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำใต้ดิน
2. สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำใต้ดิน ที่อัตราส่วน 1:1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขั้นตอนการทดลอง มีดังนี้

1. เตรียมน้ำใต้ดินปริมาณ 1,660 มิลลิลิตร เทใส่ใน batch reactor จนเต็ม ไม่ให้มี headspace

2. ชั่งสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกตามอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้

- ชั่งสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม ใส่ลงใน batch reactor

- ชั่งสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม และกรดทาร์ทาริก 0.0132 กรัม ใส่ลงใน Batch reactor

3. ทำการทดลองในระบบกวนช้า ปรับรอบของใบพัดที่ใช้ คือ 26 รอบต่อนาที

4. ตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังตารางที่ 3

4. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 1 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. ระยะเวลาที่ทำการวิจัย

เดือนมีนาคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 สภาวะ คือ สภาวะสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำประปาที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้า และกวนเร็ว, สภาวะสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำประปาที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า และสภาวะสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำใต้ดินในระบบกวนช้า ช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

การศึกษาอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์

การศึกษาอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำประปาที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้า และกวนเร็ว
2. สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำประปาที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า
3. สารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำใต้ดินในระบบกวนช้า

1. การทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำประปาที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้า และกวนเร็ว

จากการทดลองได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่า Oxidation-Reduction Potential (ORP), ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Dissolved solids: TDS), ค่าปริมาณสารแขวนลอย (Suspended Solids: SS), และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) แสดงได้ดังต่อไปนี้

1.1 ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

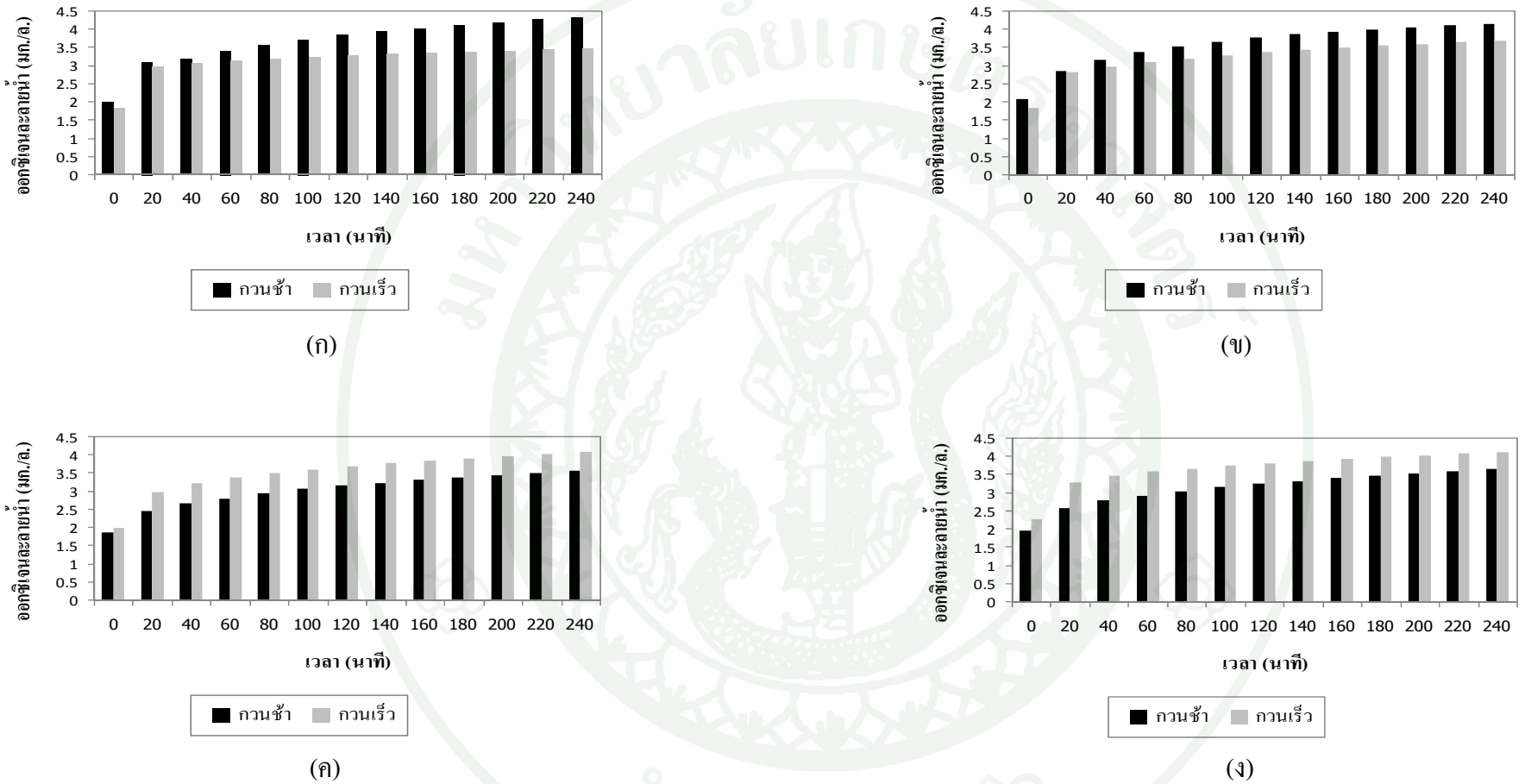
ผลการทดลองค่าออกซิเจนละลายน้ำของระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว พบว่า ระบบกวนช้า จะปลดปล่อยออกซิเจนได้ดีในช่วงของกรด คือ ที่พีเอช 5 และ 6 (ดังภาพที่ 6ก และ 6 ข) เนื่องจากสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ สามารถละลายได้ดีในสภาวะกรด (Waite *et al.*, 1999) ได้ค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นสุทธิในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 2.35, 2.07, 1.70 และ 1.71 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังภาพที่ 8 ที่เกิดจากการละลายของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 0.018, 0.015, 0.013 และ 0.013 กรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 9 จะเห็นได้ว่า ที่พีเอช 5 และ 6 นั้น มีอัตราการละลายของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์มากที่สุด แสดงว่าถ้าอัตราการละลายมาก การปลดปล่อยออกซิเจนก็จะมากตามไปด้วยเช่นกัน ซึ่งผลสอดคล้องกับการทดลองของ Northup and Cassidy (2007) ที่กล่าวไว้ว่า อัตราการสลายตัวของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลง

และจากค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ได้โดยเฉลี่ยของระบบกวนช้าทั้ง 4 พีเอชได้เท่ากับ 1.96 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.00326 กรัม นั้น เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 1 และ 2 พบว่าออกซิเจนที่ได้เกิดจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพราะฉะนั้นเมื่อคิดตามสมการมวลสารสัมพันธ์ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 0.00326 กรัม มาจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.00976 กรัม และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.00976 กรัม มาจากแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.0207 กรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ละลายจากการทดลอง คือ 0.0150 กรัม จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

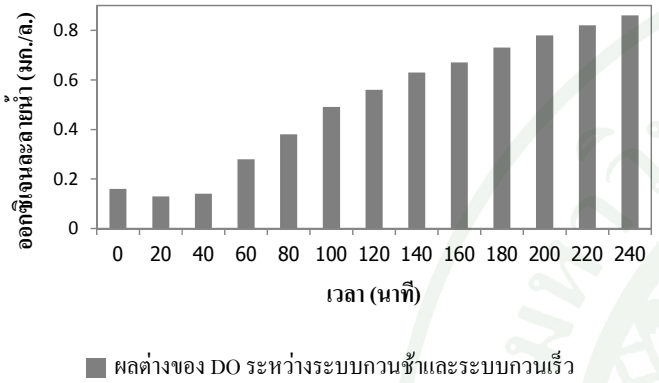
ในระบบกวนเร็วจะปลดปล่อยออกซิเจนได้ดีในช่วงของด่าง คือ ที่พีเอช 7 และ 8 (ดังภาพที่ 6ค และ 6ง) ได้ค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นสุทธิในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 1.65, 1.88, 2.11 และ 1.87 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังภาพที่ 8 ที่เกิดจากการละลายของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 0.012, 0.014, 0.016 และ 0.014 กรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 9

และจากค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ได้โดยเฉลี่ยของระบบกวนเร็วทั้ง 4 พีเอชได้เท่ากับ 1.88 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.00312 กรัม นั้น เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 1 และ 2 พบว่าออกซิเจนที่ได้เกิดจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพราะฉะนั้นเมื่อคิดตามสมการมวลสารสัมพันธ์ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 0.00312 กรัม มาจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.00934

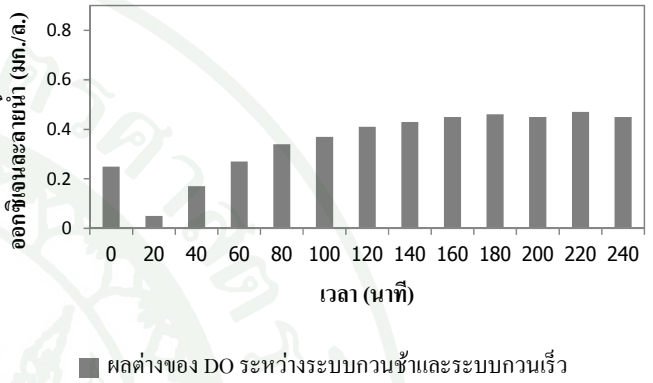
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



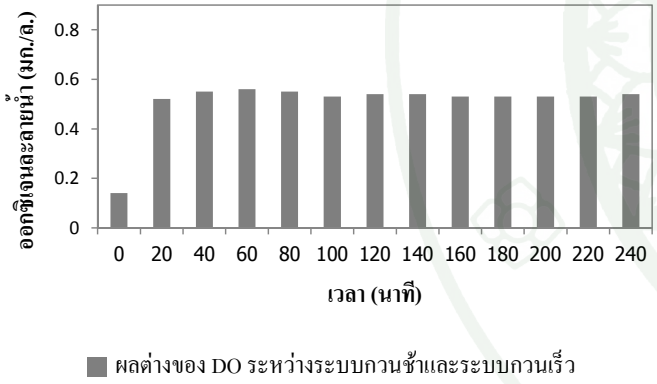
ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบค่าออกซิเจนละลายน้ำของระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว ที่ (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 6 (ค) พีเอช 7 และ (ง) พีเอช 8



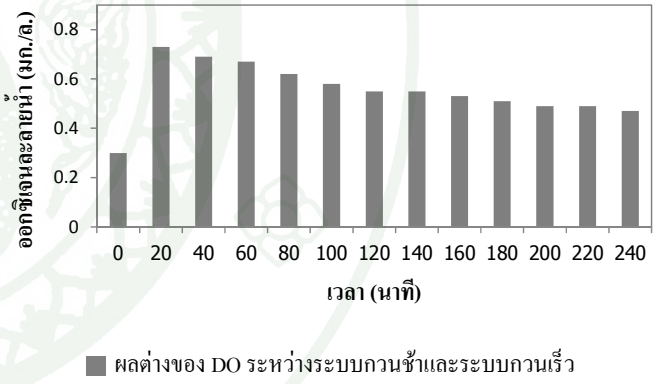
(ก)



(ข)

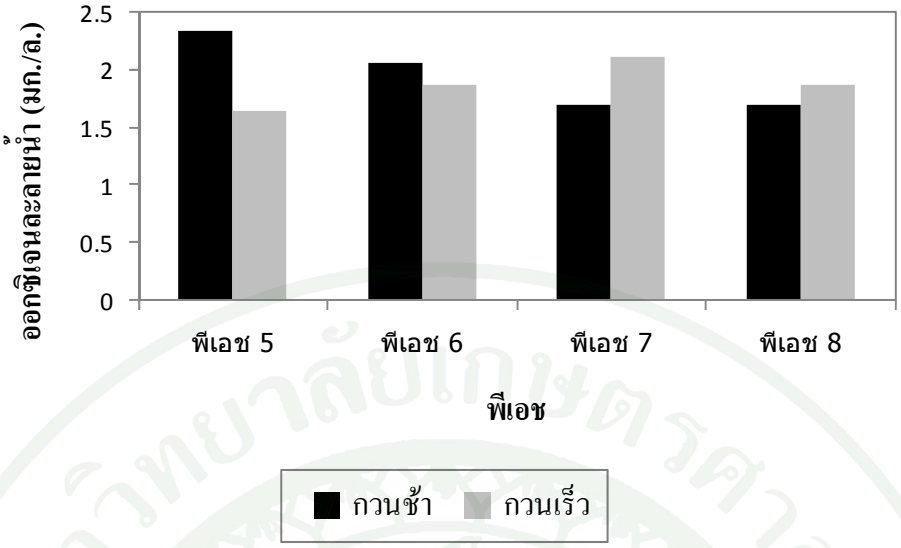


(ค)

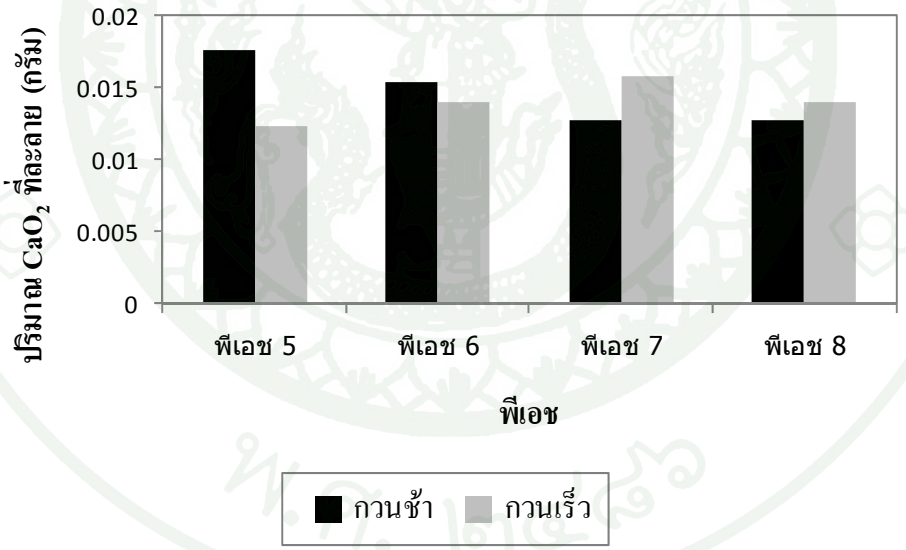


(ง)

ภาพที่ 7 ความต่างของออกซิเจนละลายน้ำของระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว ที่ (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 6 (ค) พีเอช 7 และ (ง) พีเอช 8



ภาพที่ 8 ค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นสุทธิในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง แต่ละพีเอชที่ระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว



ภาพที่ 9 ปริมาณสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ละลายได้ในสภาวะที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 ของระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว

กรัม และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.00934 กรัม มาจากแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.0198 กรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ละลายจากการทดลอง คือ 0.0140 กรัม จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

และการเปรียบเทียบค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว ที่พีเอช 5 พบว่า ระบบกวนช้ามีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่าระบบกวนเร็ว โดยระบบกวนช้ามีการปลดปล่อยออกซิเจนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ที่ระบบกวนเร็วอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนเพิ่มขึ้นอย่างเร็วเพียงช่วง 20 นาทีแรก หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นเกือบคงที่ โดยค่าความแตกต่างระหว่างระบบกวนช้าและระบบกวนเร็วน้อยสุด เท่ากับ 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร และมากสุด เท่ากับ 0.86 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังภาพที่ 6 และ 7

การเปรียบเทียบค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว ที่พีเอช 6 พบว่า ระบบกวนช้ามีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่าระบบกวนเร็ว โดยระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว มีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลา แต่ระบบกวนช้าสามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่า โดยมีค่าความแตกต่างระหว่างระบบกวนช้าและระบบกวนเร็วน้อยสุด เท่ากับ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร และมากสุด เท่ากับ 0.47 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังภาพที่ 6 และ 7

การเปรียบเทียบค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว ที่พีเอช 7 พบว่า ระบบกวนเร็วมีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่าระบบกวนช้า โดยระบบกวนเร็วและระบบกวนช้ามีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลา แต่ระบบกวนเร็วสามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่า โดยมีค่าความแตกต่างระหว่างระบบกวนช้าและระบบกวนเร็วน้อยสุด เท่ากับ 2.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และมากสุด เท่ากับ 4.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังภาพที่ 6 และ 7 โดยหากพิจารณาจากภาพที่ 7ค จะพบว่าความแตกต่างช่วง 20-240 นาที จะมีความแตกต่างที่ใกล้เคียงกัน

การเปรียบเทียบค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว ที่พีเอช 8 พบว่า ระบบกวนเร็วมีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่าระบบกวนช้า โดยระบบกวนเร็วและระบบกวนช้ามีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลา แต่ระบบกวนเร็ว สามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่า แต่จากภาพที่ 7ง จะเห็นว่าความแตกต่างของออกซิเจนในช่วงเวลาแรกๆ จะมีความแตกต่างที่มากกว่าในช่วงเวลาหลังๆ แสดงว่าในช่วงแรกของการทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของระบบกวนเร็วในช่วงแรกปลดปล่อยออกซิเจนได้มาก และเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนค่อยๆ ลดน้อยลง แต่ยังคงมีอัตราการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปลดปล่อยเพิ่มขึ้นตามเวลาอยู่ โดยมีค่าความแตกต่างระหว่างระบบกวนช้าและระบบกวนเร็วน้อยสุด เท่ากับ 0.30 มิลลิกรัมต่อลิตร และมากสุด เท่ากับ 0.73 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังภาพที่ 6 และ 7

จากการเปรียบเทียบค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ระบบกวนช้าและระบบกวนเร็วที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 จะเห็นได้ว่าที่พีเอช 5 และ 6 ระบบกวนช้ามีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่าระบบกวนเร็ว และที่พีเอช 7 และ 8 ระบบกวนเร็วมีอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่า ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วระบบกวนเร็วน่าจะปลดปล่อยออกซิเจนได้ดีกว่าทุกพีเอช แต่อาจมีผลเนื่องมาจากที่พีเอช 5 และ 6 มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของพีเอช ดังภาพที่ 10ข ทำให้พีเอชมีความเป็นด่างมากขึ้น ส่งผลต่อการละลายของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ ละลายได้น้อยลง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบกวนเร็วในช่วงพีเอช 5 และ 6 มีการปลดปล่อยออกซิเจนได้น้อยกว่าที่ระบบกวนช้านั่นเอง

1.2 พีเอช

ผลการทดลองค่าพีเอชของระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว พบว่า ระบบกวนช้าค่าพีเอชสุดท้ายของชั่วโมงที่ 4 พีเอชที่ 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 6.2, 7.11, 9.31 และ 9.38 ตามลำดับ และระบบกวนเร็ว ค่าพีเอชสุดท้ายของชั่วโมงที่ 4 พีเอชที่ 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 8.37, 9.26, 9.56 และ 9.96 ตามลำดับ ดังภาพที่ 10 ค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นในทุกๆสภาวะ เนื่องจากสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้สารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นผลิตภัณฑ์ (Hanh, 2005) ดังสมการที่ 7 ที่แตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออน ซึ่งมีความเป็นด่าง จึงทำให้ค่าพีเอชของน้ำมีค่าสูงขึ้น

$$Ca(OH)_2\,(s) \rightleftharpoons Ca^{2+}\,(aq) + 2OH^-\,(aq) \qquad (7)$$

และที่ระบบกวนช้า ค่า Solubility Product ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่คำนวณได้ ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ $1.47 \times 10^{-19.6}$, $1.29 \times 10^{-17.78}$, $1.06 \times 10^{-13.38}$ และ $1.07 \times 10^{-13.24}$ ตามลำดับ ดังตารางที่ 4 ซึ่งค่า Solubility Product ที่คำนวณได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่า Solubility Product Constant (Ksp) ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ คือ 5×10^{-9} แสดงว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถละลายได้อีก จึงทำให้มีไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และทำให้ค่าพีเอชของน้ำมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณค่า Solubility Product ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระบบกวนช้า

พีเอช	$[Ca^{2+}]$	$[OH^-]$	Solubility Product $[Ca^{2+}][OH^-]^2$
5	1.47×10^{-4}	$1 \times 10^{-7.8}$	$1.47 \times 10^{-19.6}$
6	1.29×10^{-4}	$1 \times 10^{-6.89}$	$1.29 \times 10^{-17.78}$
7	1.06×10^{-4}	$1 \times 10^{-4.69}$	$1.06 \times 10^{-13.38}$
8	1.07×10^{-4}	$1 \times 10^{-4.62}$	$1.07 \times 10^{-13.24}$

และที่ระบบกวนเร็ว ค่า Solubility Product ของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่คำนวณได้ ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ $1.03 \times 10^{-15.26}$, $1.18 \times 10^{-13.48}$, $1.32 \times 10^{-12.88}$ และ $1.17 \times 10^{-12.08}$ ตามลำดับ ดังตารางที่ 5 ซึ่งค่า Solubility Product ที่คำนวณได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่า Solubility Product Constant (Ksp) ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ คือ 5×10^{-9} แสดงว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถละลายได้อีก จึงทำให้มีไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และทำให้ค่าพีเอชของน้ำมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณค่า Solubility Product ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระบบกวนเร็ว

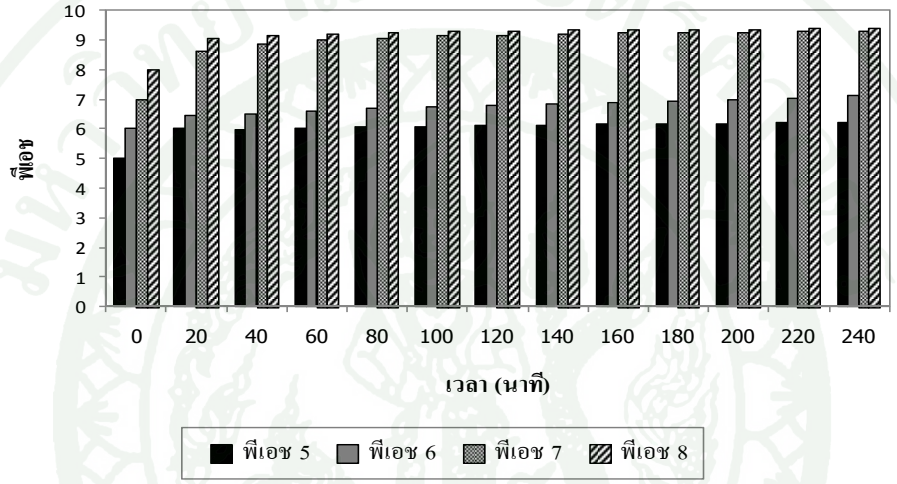
พีเอช	$[Ca^{2+}]$	$[OH^-]$	Solubility Product $[Ca^{2+}][OH^-]^2$
5	1.03×10^{-4}	$1 \times 10^{-5.63}$	$1.03 \times 10^{-15.26}$
6	1.18×10^{-4}	$1 \times 10^{-4.74}$	$1.18 \times 10^{-13.48}$
7	1.32×10^{-4}	$1 \times 10^{-4.44}$	$1.32 \times 10^{-12.88}$
8	1.17×10^{-4}	$1 \times 10^{-4.04}$	$1.17 \times 10^{-12.08}$

1.3 ค่า Oxidation-Reduction Potential (ORP)

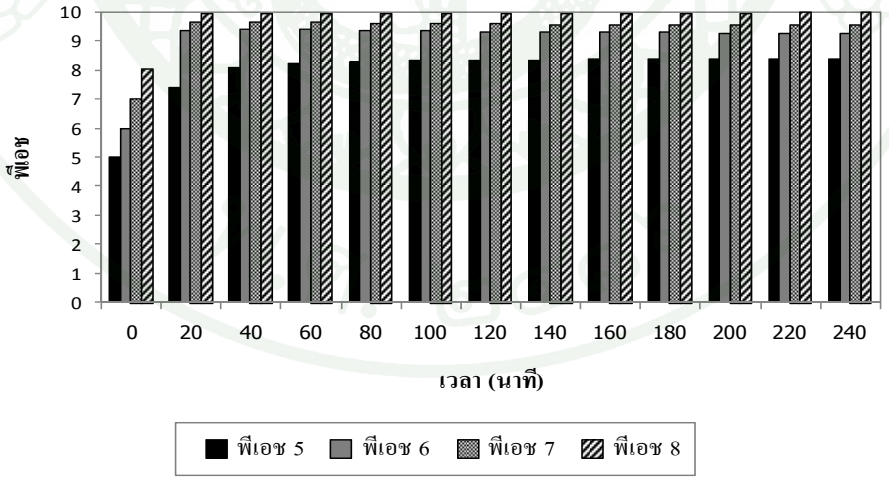
ผลการทดลองค่าโออาร์พีของระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว พบว่า ระบบกวนช้า ค่าโออาร์พีเริ่มต้นที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 143, 82, 21 และ 35 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และค่าสุดท้าย ของโออาร์พีที่ชั่วโมงที่ 4 มีค่าเท่ากับ 72, 18, -114 และ -115 มิลลิโวลต์ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จะเห็นได้ว่าค่าโออาร์พีมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ ตามเวลา และเมื่อค่าพีเอชมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี คือ ค่าโออาร์พี แปรผกผันกับค่าพีเอช โดยค่าโออาร์พี มีค่าต่ำ เมื่อค่าพีเอชมีค่ามากขึ้น (มีความเป็นด่างมากขึ้น) (Trevor, 2004) ดังภาพที่ 11 และระบบกวนเร็วค่าโออาร์พีเริ่มต้นที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 137, 77, 20 และ 38 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และค่าสุดท้าย ของโออาร์พีที่ชั่วโมงที่ 4 มีค่าเท่ากับ -61, -113, -131 และ -153 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 12 ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีเช่นเดียวกันกับระบบกวนช้า



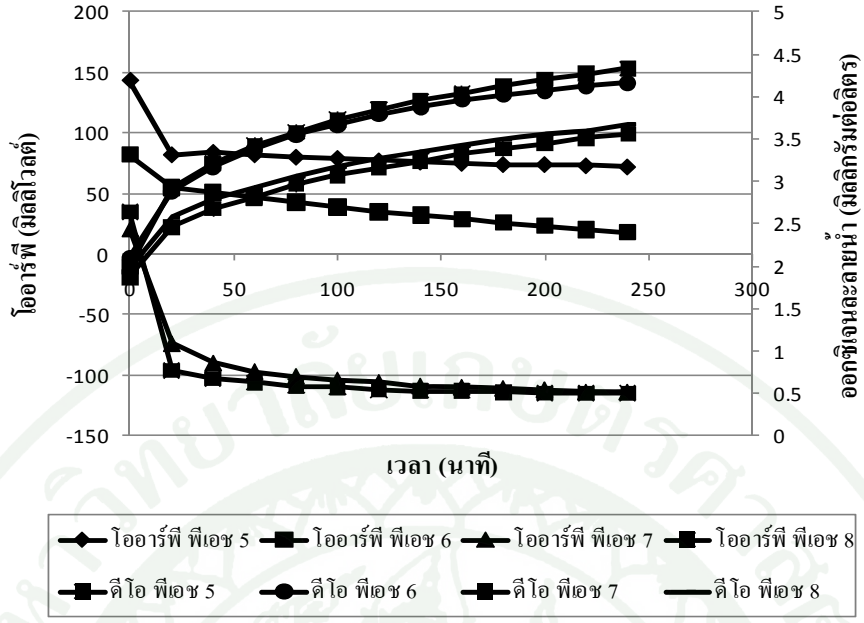
(ก)



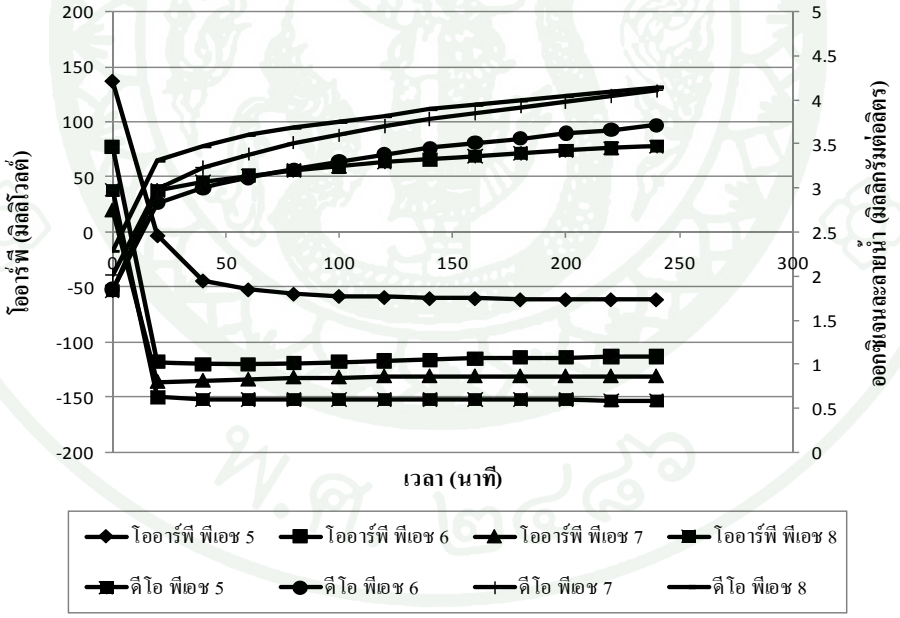
(ข)

ภาพที่ 10 ค่าพีเอชสุดท้ายในช่วงเวลา 4 ชั่วโมงที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 (ก) ระบบกวนช้า (ข) ระบบกวนเร็ว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 11 ค่าโออาร์พีและค่าออกซิเจนละลายน้ำที่สภาวะพีเอชที่ 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้า



ภาพที่ 12 ค่าโออาร์พีและค่าออกซิเจนละลายน้ำที่สภาวะพีเอชที่ 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนเร็ว

1.4 ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Dissolved solids: TDS) และค่าปริมาณสารแขวนลอย (Suspended Solids: SS)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดลองค่าทีดีเอสและเอสเอสของระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว พบว่า ระบบกวนช้า ค่าทีดีเอสที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 75, 85.5, ND และ ND มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ค่าพีเอชที่ 7 และ 8 ไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ เนื่องจากเกิดความผิดพลาดจากการทดลอง) และค่าเอสเอส ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 16, 40, 38.5 และ 92 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และระบบกวนเร็ว ค่าทีดีเอสที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 87, 29.5, ND และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ค่าพีเอชที่ 7 ไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ เนื่องจากเกิดความผิดพลาดจากการทดลอง) และค่าเอสเอส ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 12.5, 30.5, 73 และ 69.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าทีดีเอสและค่าเอสเอสที่ได้แปรผกผันซึ่งกันและกัน คือปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำน้อย ค่าปริมาณสารแขวนลอยก็จะมาก และในทางกลับกันถ้าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มาก ค่าปริมาณสารแขวนลอยก็จะน้อยเช่นกัน และถ้าพิจารณาจากค่าเอสเอส จะเห็นได้ว่าที่สภาวะเป็นกรด มีค่าเอสเอสน้อยกว่าที่สภาวะเป็นด่าง แสดงว่าที่สภาวะเป็นกรดแคลเซียมเปอร์ออกไซด์สามารถละลายได้ดีกว่า

ตารางที่ 6 ค่าเอสเอสและทีดีเอสที่สภาวะพีเอช 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว

	กวนช้า				**กวนเร็ว**			
พารามิเตอร์	พีเอช 5	พีเอช 6	พีเอช 7	พีเอช 8	พีเอช 5	พีเอช 6	พีเอช 7	พีเอช 8
เอสเอส	16	40	38.5	92	12.5	30.5	73	69
ทีดีเอส	75	85.5	ND	ND	87	29.5	ND	1

หมายเหตุ ND = Not Detectable

1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La)

การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ระบบกวนช้าและกวนเร็วในสภาวะพีเอชที่ 5, 6, 7 และ 8 ซึ่งการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงในน้ำ (K_La) ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ โดยนำข้อมูล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดลองมาหาค่า K_La จาก ค่าความชันของกราฟ Semi-log ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจน (Cs-Ct) กับ เวลา (t)

ที่สภาวะพีเอช 5

ผลการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ที่พีเอช 5 ในระบบกวนช้าและกวนเร็ว พบว่า ที่ระบบกวนช้าได้สมการเส้นแนวโน้มเท่ากับ $y = -0.006x + 4.616$ และ $R^2 = 0.890$ และระบบกวนเร็ว เท่ากับ $y = -0.003x + 4.549$ และ $R^2 = 0.741$ ดังภาพที่ 13ก โดยค่า K_La ที่คำนวณได้จากสมการเส้นแนวโน้ม ที่ระบบกวนช้า มีค่าเท่ากับ 0.11 ต่อชั่วโมง และที่ระบบกวนเร็วมีค่าเท่ากับ 0.04 ต่อชั่วโมง

ที่สภาวะพีเอช 6

ผลการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ที่พีเอช 6 ในระบบกวนช้าและกวนเร็ว พบว่า ที่ระบบกวนช้าได้สมการเส้นแนวโน้มเท่ากับ $y = -0.006x + 4.642$ และ $R^2 = 0.893$ และระบบกวนเร็ว เท่ากับ $y = -0.004x + 4.945$ และ $R^2 = 0.859$ ดังภาพที่ 13ข โดยค่า K_La ที่คำนวณได้จากสมการเส้นแนวโน้ม ที่ระบบกวนช้า มีค่าเท่ากับ 0.10 ต่อชั่วโมง และที่ระบบกวนเร็วมีค่าเท่ากับ 0.06 ต่อชั่วโมง

ที่สภาวะพีเอช 7

ผลการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้าและกวนเร็ว พบว่า ที่ระบบกวนช้าได้สมการเส้นแนวโน้มเท่ากับ $y = -0.005x + 5.020$ และ $R^2 = 0.910$ และระบบกวนเร็ว เท่ากับ $y = -0.005x + 4.452$ และ $R^2 = 0.870$ ดังภาพที่ 13ค โดยค่า K_La ที่คำนวณได้จากสมการเส้นแนวโน้ม ที่ระบบกวนช้า มีค่าเท่ากับ 0.07 ต่อชั่วโมง และที่ระบบกวนเร็วมีค่าเท่ากับ 0.08 ต่อชั่วโมง

ที่สภาวะพีเอช 8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ที่พีเอช 8 ในระบบกวนช้าและกวนเร็ว พบว่า ที่ระบบกวนช้าได้สมการเส้นแนวโน้มเท่ากับ $y = -0.005x + 4.858$ และ $R^2 = 0.94$ และระบบกวนเร็ว เท่ากับ $y = -0.003x + 4.267$ และ $R^2 = 0.783$ ดังภาพที่ 13ง โดยค่า K_La ที่คำนวณได้จากสมการเส้นแนวโน้ม ที่ระบบกวนช้า มีค่าเท่ากับ 0.07 ต่อชั่วโมง และที่ระบบกวนเร็วมีค่าเท่ากับ 0.06 ต่อชั่วโมง

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 ที่คำนวณได้จากสมการเส้นแนวโน้ม แสดงดังตารางที่ 7

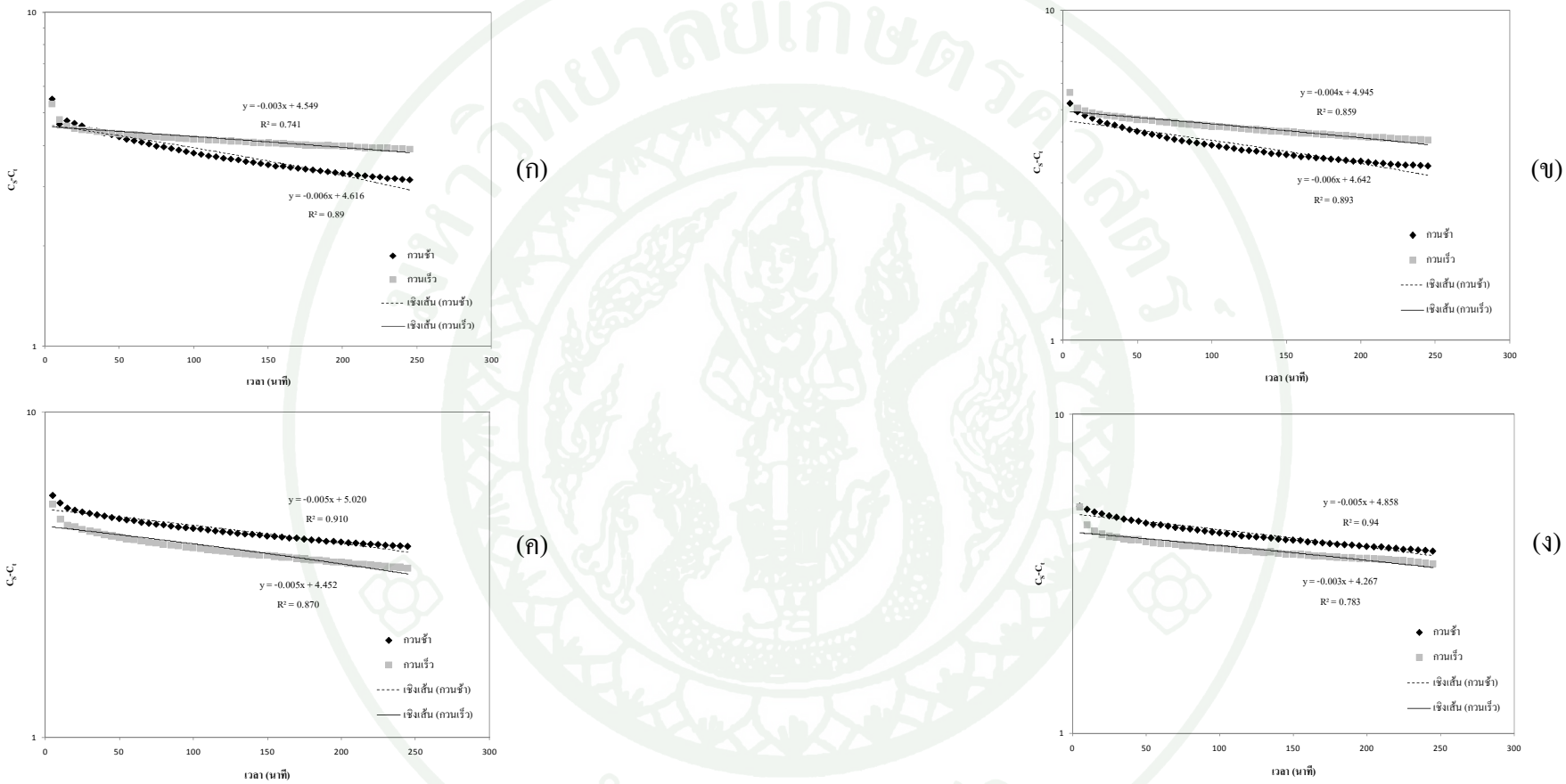
ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ปลดปล่อยจากแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้าและระบบกวนเร็ว ในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง

ระบบ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) (ต่อชั่วโมง)			
	พีเอช 5	พีเอช 6	พีเอช 7	พีเอช 8
กวนช้า	0.11	0.10	0.07	0.07
กวนเร็ว	0.04	0.06	0.08	0.06

จากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ระบบกวนช้า ที่สภาวะเป็นกรดจะมีค่ามากกว่าที่สภาวะเป็นด่าง อาจมีผลเนื่องมาจากที่สภาวะเป็นกรดมีค่าออกซิเจนละลายน้ำที่มากกว่า และค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ โดยเทียบกับการทดลองที่ผ่านมา จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่มากกว่า และที่ระบบกวนเร็ว ที่สภาวะเป็นด่างมีค่ามากกว่าที่สภาวะเป็นกรด อาจมีผลเนื่องมาจากที่สภาวะเป็นด่างมีค่าออกซิเจนละลายน้ำที่มากกว่า และค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงของสภาวะเป็นกรด ซึ่งส่งผลต่อการละลายของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะเป็นกรดมีค่าต่ำกว่านั่นเอง

2. ผลการทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำประปาที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า ในอัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจน (Cs-Ct) กับ เวลา (t) ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่การกวนช้าและกวนเร็วที่สภาวะพีเอช (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 6 (ค) พีเอช 7 (ง) พีเอช

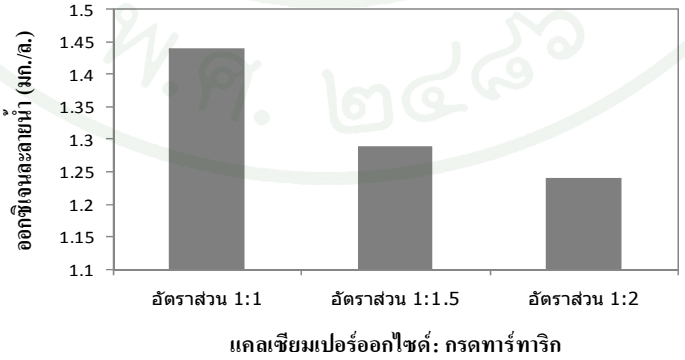
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากการทดลองได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่า Oxidation-Reduction Potential (ORP), ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Dissolved solids: TDS), ค่าปริมาณสารแขวนลอย (Suspended Solids: SS), และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) แสดงได้ดังต่อไปนี้

2.1 ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO)

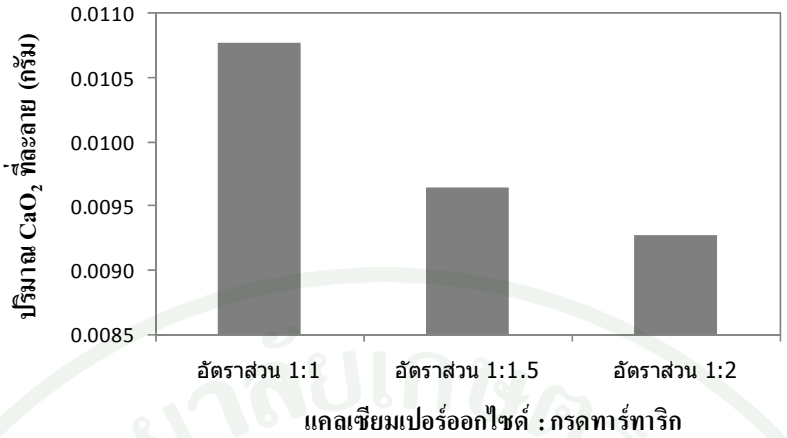
ผลการทดลองค่าออกซิเจนละลายน้ำ พบว่า ค่าออกซิเจนเริ่มต้นที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 มีค่าเท่ากับ 1.72, 1.61 และ 2.45 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และค่าออกซิเจนสุดท้ายที่ชั่วโมงที่ 4 มีค่าเท่ากับ 3.16, 2.90 และ 3.69 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังภาพที่ 16 โดยค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นสุทธิในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 มีค่าเท่ากับ 1.44, 1.29 และ 1.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังภาพที่ 14 ที่เกิดจากการละลายของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ ที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 มีค่าเท่ากับ 0.0108, 0.0096 และ 0.0093 กรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 15 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วน 1:1 นั้นสามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้ดีที่สุด

และหากเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนละลายน้ำของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 กับแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ไม่ได้เติมกรดทาร์ทาริก ดังภาพที่ 16 พบว่า แคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ไม่ได้เติมกรดทาร์ทาริกปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่าแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2

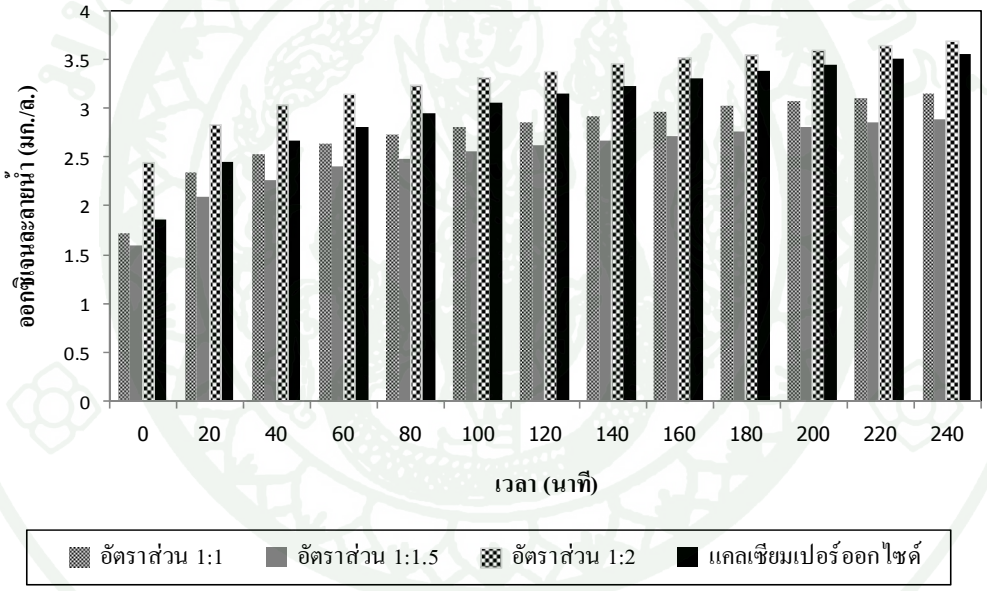


ภาพที่ 14 ค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นสุทธิในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 15 ปริมาณสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ละลายได้ที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2



ภาพที่ 16 การเปรียบเทียบการปลดปล่อยออกซิเจนละลายน้ำของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 กับแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ไม่ได้เติมกรดทาร์ทาริก

และจากค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ได้โดยเฉลี่ยของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 ได้เท่ากับ 1.32 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.00219 กรัม นั้น เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 1 และ 2 พบว่า ออกซิเจนที่ได้เกิดจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพราะฉะนั้นเมื่อคิดตามสมการมวลสารสัมพันธ์ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 0.00219 กรัม มา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.0066 กรัม และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.0066 กรัม มาจากแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.0139 กรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ละลายจากการทดลอง คือ 0.0123 กรัม จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

2.2 พีเอช

ผลการทดลองค่าพีเอช พบว่า ค่าพีเอชสุดท้ายของชั่วโมงที่ 4 พีเอชที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 มีค่าเท่ากับ 9.11, 9.06 และ 8.98 ตามลำดับ จากค่าพีเอชเริ่มต้นที่พีเอช 7 ดังภาพที่ 17 แสดงให้เห็นว่ายิ่งอัตราส่วนของกรดทาร์ทาริกมากขึ้น ค่าพีเอชจะต่ำลงหรือมีค่าพีเอชเป็นกรดมากขึ้นเช่นกัน

และค่า Solubility Product ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่คำนวณได้ ที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 มีค่าเท่ากับ $9.00 \times 10^{-14.78}$, $8.06 \times 10^{-14.88}$ และ $7.75 \times 10^{-15.04}$ ตามลำดับ ดังตารางที่ 8 ซึ่งค่า Solubility Product ที่คำนวณได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่า Solubility Product Constant (Ksp) ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ คือ 5×10^{-9} แสดงว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถละลายได้อีก จึงทำให้มีไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และทำให้ค่าพีเอชของน้ำมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 8 การคำนวณค่า Solubility Product ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2

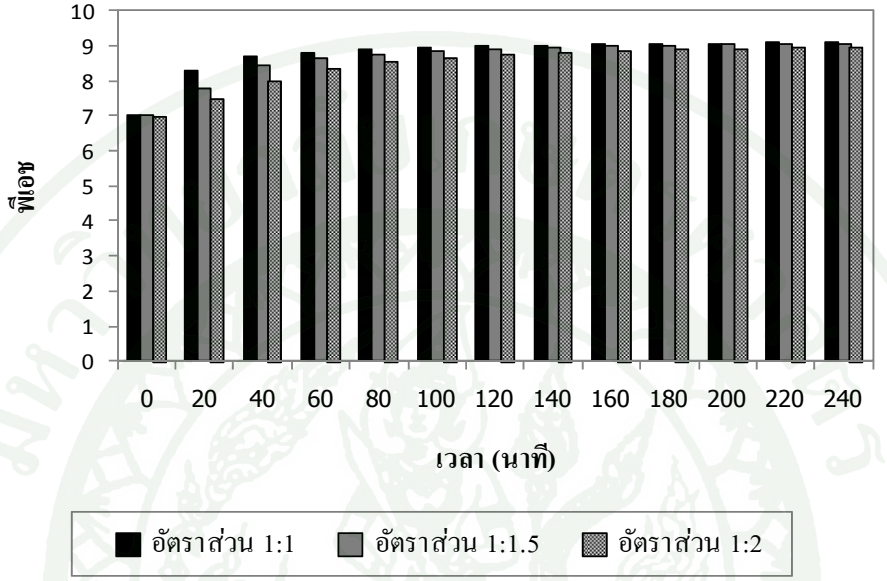
อัตราส่วน	$[Ca^{2+}]$	$[OH^-]$	Solubility Product $[Ca^{2+}][OH^-]^2$
1:1	9.00×10^{-5}	$1 \times 10^{-4.89}$	$9.00 \times 10^{-14.78}$
1:1.5	8.06×10^{-5}	$1 \times 10^{-4.94}$	$8.06 \times 10^{-14.88}$
1:2	7.75×10^{-5}	$1 \times 10^{-5.02}$	$7.75 \times 10^{-15.04}$

2.3 ค่า Oxidation-Reduction Potential (ORP)

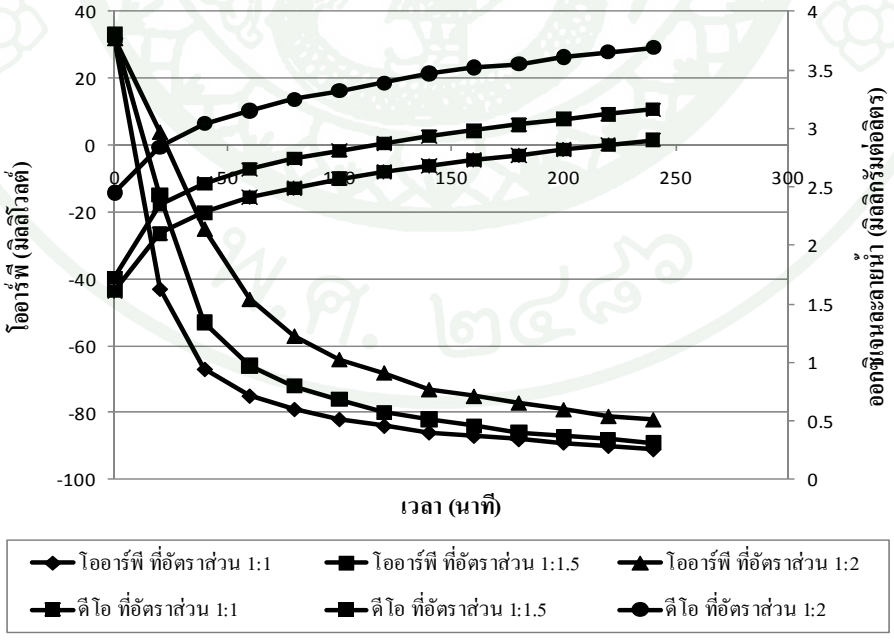
ผลการทดลองค่าโออาร์พี พบว่า ค่าโออาร์พีเริ่มต้นที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 มีค่าเท่ากับ 32, 33 และ 32 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และค่าสุดท้ายของโออาร์พีที่ชั่วโมงที่ 4 มีค่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เท่ากับ -91, -89 และ -82 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าโออาร์พีมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ ตามเวลาและเมื่อค่าพีเอชมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี คือ ค่าโออาร์พี แปรผกผันกับค่าพีเอช โดยค่าโออาร์พี มีค่าต่ำ เมื่อค่าพีเอชมีค่ามากขึ้น (มีความเป็นด่างมากขึ้น) ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 17 ค่าพีเอชในช่วงเวลา 4 ชั่วโมงที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2



ภาพที่ 18 ค่าโออาร์พีและค่าออกซิเจนละลายน้ำที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.4 ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Dissolved solids: TDS) และค่าปริมาณสารแขวนลอย (Suspended Solids: SS)

ผลการทดลองค่าทีดีเอสและเอสเอส พบว่า ค่าทีดีเอส ที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 มีค่าเท่ากับ ND, 7.5 และ 17.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ที่อัตราส่วน 1:1 ไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ เนื่องจากเกิดความผิดพลาดจากการทดลอง) และค่าเอสเอส ที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 มีค่าเท่ากับ 800, 74 และ 61.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าทีดีเอสและค่าเอสเอสที่ได้แปรผกผันซึ่งกันและกัน คือปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำน้อย ค่าปริมาณสารแขวนลอยก็จะมาก และในทางกลับกันถ้าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มาก ค่าปริมาณสารแขวนลอยก็จะน้อยเช่นกัน

ตารางที่ 9 ค่าเอสเอสและทีดีเอสที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2

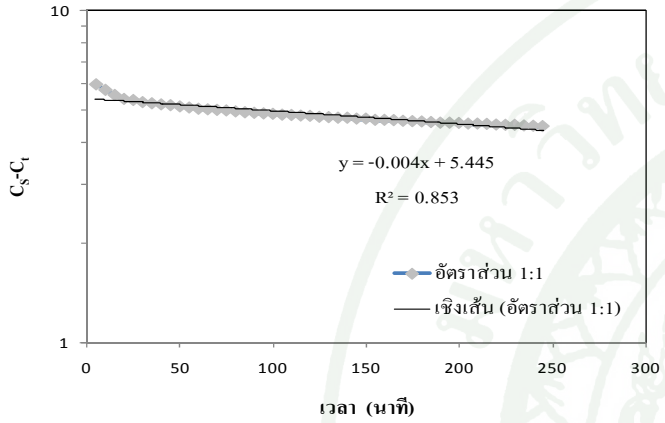
พารามิเตอร์	อัตราส่วนแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ต่อกรดทาร์ทาริก		
	อัตราส่วน 1:1	อัตราส่วน 1:1.5	อัตราส่วน 1:2
เอสเอส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	800	74	61.5
ทีดีเอส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ND	7.5	17.5

หมายเหตุ ND = Not Detectable

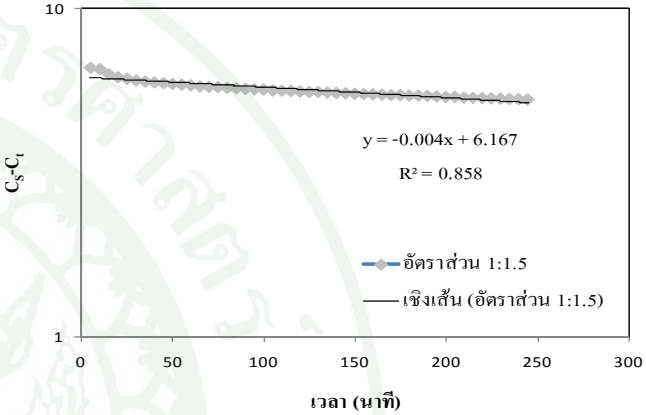
2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La)

การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกที่อัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 ซึ่งการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงในน้ำ (K_La) ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ โดยนำข้อมูลผลการทดลองมาหาค่า K_La จาก ค่าความชันของกราฟ Semi-log ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจน (Cs-Ct) กับ เวลา (t)

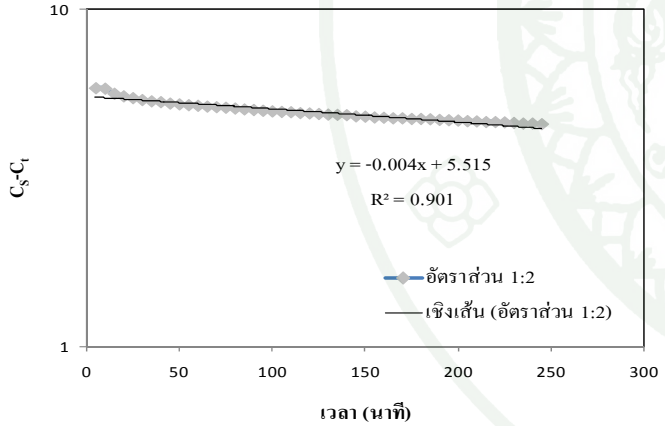
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจน (Cs-Ct) กับ เวลา (t) ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกที่อัตราส่วน (ก) อัตราส่วน 1:1 (ข) อัตราส่วน 1:1.5 (ค) อัตราส่วน 1:2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่อัตราส่วน 1:1

ผลการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ที่อัตราส่วน 1:1 พบว่าได้สมการเส้นแนวโน้มเท่ากับ $y = -0.004x + 5.445$ และ $R^2 = 0.853$ ดังภาพที่ 19ก โดยค่า K_La ที่คำนวณได้จากสมการเส้นแนวโน้ม มีค่าเท่ากับ 0.05 h^{-1}

ที่อัตราส่วน 1:1.5

ผลการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ที่อัตราส่วน 1:1.5 พบว่าได้สมการเส้นแนวโน้มเท่ากับ $y = -0.004x + 6.167$ และ $R^2 = 0.858$ ดังภาพที่ 19ข โดยค่า K_La ที่คำนวณได้จากสมการเส้นแนวโน้ม มีค่าเท่ากับ 0.04 h^{-1}

ที่อัตราส่วน 1:2

ผลการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ที่อัตราส่วน 1:2 พบว่าได้สมการเส้นแนวโน้มเท่ากับ $y = -0.004x + 5.515$ และ $R^2 = 0.901$ ดังภาพที่ 19ค โดยค่า K_La ที่คำนวณได้จากสมการเส้นแนวโน้ม มีค่าเท่ากับ 0.05 h^{-1}

3. การทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองคือ 1. เติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 2. เติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก

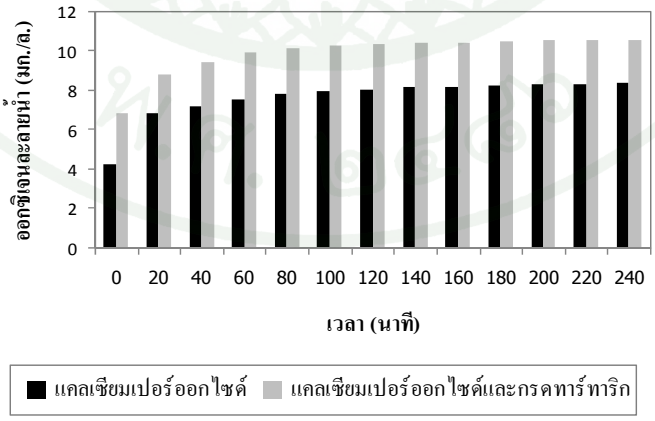
จากการทดลองได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่า Oxidation-Reduction Potential (ORP), ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Dissolved solids: TDS), ค่าปริมาณสารแขวนลอย (Suspended Solids: SS), และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) แสดงได้ดังต่อไปนี้

3.1 ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

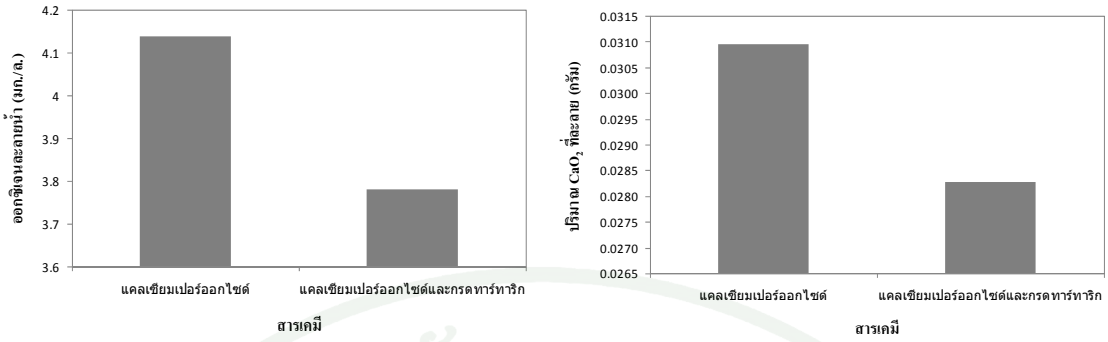
ผลการทดลองค่าออกซิเจนละลายน้ำ พบว่า ค่าออกซิเจนเริ่มต้นที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก มีค่าเท่ากับ 4.27 และ 6.85 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และค่าออกซิเจนสุดท้ายที่ชั่วโมงที่ 4 มีค่าเท่ากับ 8.41 และ 10.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังภาพที่ 20 โดยค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นสุทธิในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกมีค่าเท่ากับ 4.14 และ 3.78 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังภาพที่ 21ก ที่เกิดจากการละลายของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก มีค่าเท่ากับ 0.0310 และ 0.0283 กรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 21ข จะเห็นได้ว่า ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวจะปลดปล่อยออกซิเจนได้มากกว่า

และจากค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ได้โดยเฉลี่ยของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกได้เท่ากับ 3.96 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.00658 กรัม นั้น เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 1 และ 2 พบว่า ออกซิเจนที่ได้เกิดจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพราะฉะนั้นเมื่อคิดตามสมการมวลสารสัมพันธ์ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 0.00658 กรัม มาจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.0198 กรัม และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.0198 กรัม มาจากแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.0419 กรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ละลายจากการทดลอง คือ 0.0298 กรัม จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบการปลดปล่อยออกซิเจนละลายน้ำที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) (ข)

ภาพที่ 21 (ก) ค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นสุทธิในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก
(ข) ปริมาณสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ละลายในสภาวะที่เติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และที่เติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก

3.2 พีเอช

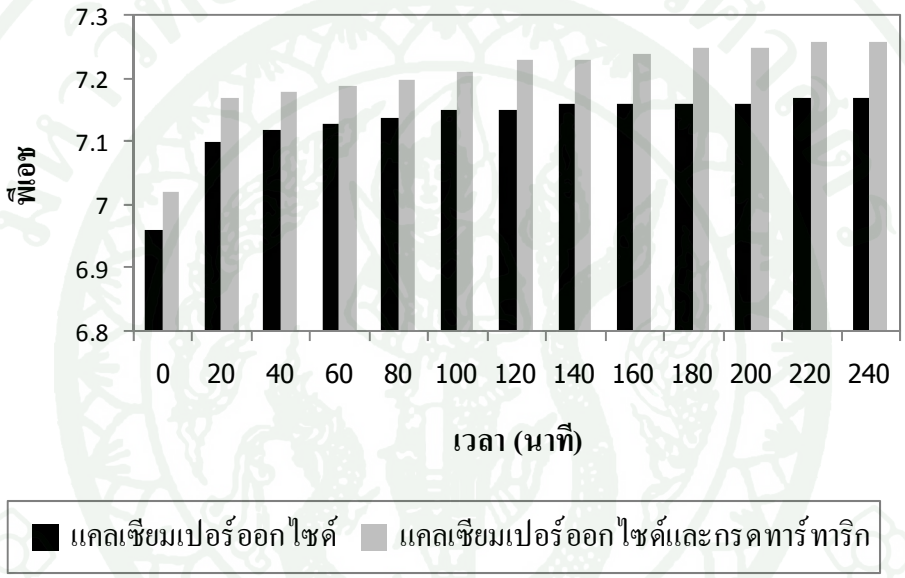
ผลการทดลองค่าพีเอช พบว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำบาดาลที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก มีค่าเท่ากับ 6.96 และ 7.02 ตามลำดับ และค่าพีเอชสุดท้ายของชั่วโมงที่ 4 พีเอชที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก มีค่าเท่ากับ 7.17 และ 7.26 ดังภาพที่ 22

และค่า Solubility Product ของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่คำนวณได้ ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก มีค่าเท่ากับ $2.59 \times 10^{-17.66}$ และ $2.36 \times 10^{-17.48}$ ตามลำดับ ดังตารางที่ 10 ซึ่งค่า Solubility Product ที่คำนวณได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่า Solubility Product Constant (Ksp) ของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ คือ 5×10^{-9} แสดงว่า แคลเซียมเปอร์ออกไซด์สามารถละลายได้อีก จึงทำให้มีไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และทำให้ค่าพีเอชของน้ำมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 10 การคำนวณค่า Solubility Product ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก

สารเคมี	$[Ca^{2+}]$	$[OH^-]$	Solubility Product $[Ca^{2+}][OH^-]^2$
แคลเซียมเปอร์ออกไซด์	2.59×10^{-4}	$1 \times 10^{-6.83}$	$2.59 \times 10^{-17.66}$
แคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก	2.36×10^{-4}	$1 \times 10^{-6.74}$	$2.36 \times 10^{-17.48}$

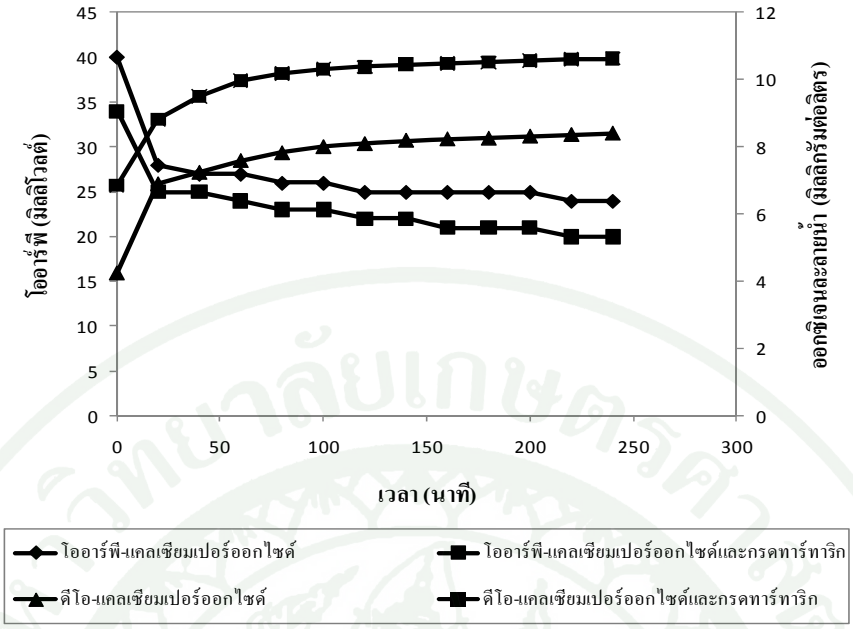


ภาพที่ 22 ค่าพีเอชในช่วงเวลา 4 ชั่วโมงที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก

3.3 ค่า Oxidation-Reduction Potential (ORP)

ผลการทดลองค่าโออาร์พี พบว่า ระบบกวนช้า ค่าโออาร์พีเริ่มต้นที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก มีค่าเท่ากับ 40 และ 34 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และค่าสุดท้ายของโออาร์พีที่ชั่วโมงที่ 4 มีค่าเท่ากับ 24 และ 20 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าโออาร์พีมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ ตามเวลา และเมื่อค่าพีเอชมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี คือ ค่าโออาร์พี แปรผกผันกับค่าพีเอช โดยค่าโออาร์พี มีค่าต่ำ เมื่อค่าพีเอชมีค่ามากขึ้น (มีความเป็นด่างมากขึ้น) ดังภาพที่ 23

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 23 ค่าโออาร์พีและค่าออกซิเจนละลายน้ำที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก

3.4 ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Dissolved solids: TDS) และค่าปริมาณสารแขวนลอย (Suspended Solids: SS)

ผลการทดลองค่าทีดีเอสและเอสเอส พบว่า ค่าทีดีเอส ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก มีค่าเท่ากับ NDและ 101 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ ไม่สามารถตรวจวัดค่าได้เนื่องจากเกิดความผิดพลาดจากการทดลอง) และค่าเอสเอส ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก มีค่าเท่ากับ 329 และ 129.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าทีดีเอสและค่าเอสเอสที่ได้แปรผกผันซึ่งกันและกัน คือปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำน้อย ค่าปริมาณสารแขวนลอยก็จะมาก และในทางกลับกันถ้าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มาก ค่าปริมาณสารแขวนลอยก็จะน้อยเช่นกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 11 ค่าเอสเอส และค่าทีดีเอส ที่สภาวะเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ และเติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก

พารามิเตอร์	สารเคมี	
	แคลเซียมเปอร์ออกไซด์	แคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก
เอสเอส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	329	129.5
ทีดีเอส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ND	101

หมายเหตุ ND = Not Detectable

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์

1. การทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำประปาที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 ในระบบกวนช้า และกวนเร็ว

อัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ ของระบบกวนช้า และระบบกวนเร็ว มีผลตรงข้ามซึ่งกันและกัน คือ ระบบกวนช้า พีเอช 5 สามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้มากที่สุดคือ 2.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด และที่พีเอช 7 ปลดปล่อยออกซิเจนได้น้อยที่สุด คือ 1.70 มิลลิกรัมต่อลิตร และระบบกวนเร็ว พีเอช 7 สามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้มากที่สุดคือ 2.11 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่สภาวะพีเอช 5 ปลดปล่อยออกซิเจนได้น้อยที่สุด คือ 1.65 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. การทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำประปาที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า ในอัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2 ตามลำดับ

อัตราการปลดปล่อยออกซิเจนที่อัตราส่วน 1:1 เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด สามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้ 1.44 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นที่ทำการทดลอง

3. การทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำใต้ดินในระบบกวนช้า

อัตราการปลดปล่อยออกซิเจน ที่เติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด สามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้ 4.14 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับที่เติมสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ ควรทำการทดลองซ้ำ เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น และเพิ่มจำนวนชั่วโมงในการทดลองที่นานขึ้น เพื่อดูแนวโน้มของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ว่ามีผลต่อการปลดปล่อยออกซิเจนมากน้อยเพียงใด

2. ทำการศึกษาการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำบาดาลจากหลายๆ แหล่ง เพื่อดูลักษณะการปลดปล่อยออกซิเจนว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ ในสภาวะของน้ำที่มีความต่างกัน หรือทำการทดลองโดยใช้น้ำบาดาลในทุกๆสภาวะ เพื่อดูอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ไซด์ที่ใส่เข้าไปว่าเป็นอย่างไร และการทดลองที่ใส่ทั้งสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกว่าเป็นอย่างไร มีความแตกต่างจากการใช้น้ำประปามากน้อยเพียงใด

3. เปลี่ยนสารในการทดลองที่มีคุณสมบัติในการปลดปล่อยออกซิเจนได้เหมือนกัน เช่น แมกนีเซียมเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ว่าสารตัวใด มีความสามารถในการปลดปล่อยออกซิเจนมากกว่ากัน

4. ในการปรับสภาพพีเอชของน้ำด้วยกรดซัลฟิวริกอาจมีผลต่อการละลายได้ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ ควรใช้สารตัวอื่นแทน เช่น กรดคาร์บอนิก เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2545. **วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย. เล่มที่ 3 = Wastewater engineering.** พิมพ์ครั้งที่ 2. มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา. 2536. **การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ : เล่ม 1 การจัดการคุณภาพน้ำ.** ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Boyd, C.E. and F. Lichtkoppler. 1979. **Water Quality Management in pond Fish Culture**. International Center for Aquaculture. Auburn University. Auburn, Alabama. 7.

Chen, W. and T. Liu. 2003. Dissolved oxygen and intrate of groundwater in Choshui Fan-Delta, western Taiwan. **Environmental Geology.** 44: 731–737.

Chevalier, L.R. and C.D. McCann. 2008. Feasibility of Calcium Peroxide as an Oxygen Releasing Compound in Treatment Walls. **International Journal of Environment and Waste Management.** 2(3): 245-256.

EPA. 2004**. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide For Corrective Action Plan Reviewers Chapter XII Enhanced Aerobic Bioremediation.** Solid Waste and Emergency Response, United States of America.

Gino, C., M. Richelle and M. Douglas. 1994. Enhanced Degradation of Dissolved Benzene and Toluene Using a Solid Oxygen-Releasing Compound. **Ground Water Monitoring & Remediation.** 120-128.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Hanh, D.N., B.K. Rajbhandari and A.P. Annachhatre. 2005. Bioremediation of sediments from intensive aquaculture shrimp farms by using calcium peroxide as slow oxygen release agent. **Environmental Technology.** 26(5): 581-589.

Kao, C.M., S.C. Chen and M.C. Su. 2001. Laboratory column studies for evaluating a barrier system for providing oxygen and substrate for TCE biodegradation. **Chemospere.** 44: 925-934.

Khodaveisi, J., H. Banejadb, A. Afkhamic, E. Olyaieb, S. Lashgaria and R. Dashtia. 2011. Synthesis of calcium peroxide nanoparticles as an innovative reagent for in situ chemical oxidation. **Journal of Hazardous Materials.** 192: 1437-1440.

Koenigsberg, S.S. and A. Willett. 2005. **Accelerated Bioremediation with Oxygen Release Compound Advanced (ORC Advanced™): Evolution of Time-Release Electron Acceptors.** The Eighth International in Situ and On-Site Bioremediation Symposium. Baltimore, Maryland.

Northup, A. and D. Cassidy. 2008. Calcium peroxide (CaO_2) for use in modified Fenton chemistry. **Journal of Hazardous Materials.** 152: 1164-1170.

Rose, S. and A. Long. 1988. Dissolved oxygen systematics in the Tucson Basin Aquifer. **Water Resources Research.** 24(1): 127–136.

Schmidtke, T., D. White and C. Woolard. 1999. Oxygen release kinetics from solid phase oxygen in Arctic Alaska. **Journal of Hazardous Materials.** 157-165.

Smedley, P.L. and W.M. Edmunds. 2002. Redox Patterns and Trace-Element Behavior in the East Midlands Triassic Sandstone Aquifer, U.K.. **Ground Water.** 40(1): 44–58.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Waite, A.J., J.S. Bonner and R. Autenrieth. 1999. Kinetics and Stoichiometry of Oxygen Release from Solid Peroxides. **Environmental Engineering Science.** 16 (3): 187-199.

Walawska, B., J. Gluziñska, K. Miksch and J. Turek-Szytow. 2007. Solid inorganic peroxy compounds in environmental protection. **Polish Journal of Chemical Technology.** 9(3): 68-72.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำประปา ที่ระบบกวนช้า ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 5 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.09	29.7	124	5.28
10	2.96	29.7	81	6.06
15	2.85	29.7	79	6.08
20	2.92	29.8	82	6.02
25	3.00	29.8	84	5.99
30	3.14	29.8	85	5.98
35	3.15	29.9	84	5.99
40	3.21	29.9	84	5.99
45	3.26	29.9	84	6.00
50	3.31	30.0	83	6.01
55	3.38	30.0	82	6.02
60	3.42	30.0	82	6.03
65	3.45	30.1	81	6.04
70	3.50	30.1	81	6.04
75	3.56	30.1	81	6.05
80	3.58	30.1	80	6.06
85	3.61	30.2	80	6.07
90	3.65	30.2	79	6.07
95	3.69	30.2	79	6.08
100	3.73	30.2	79	6.08
105	3.75	30.3	78	6.09
110	3.79	30.3	78	6.09
115	3.81	30.3	78	6.10
120	3.85	30.3	77	6.11
125	3.87	30.3	77	6.11

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.89	30.3	77	6.11
135	3.93	30.3	77	6.12
140	3.95	30.3	76	6.12
145	3.98	30.3	76	6.13
150	4.01	30.3	76	6.13
155	4.03	30.4	75	6.14
160	4.03	30.4	75	6.14
165	4.06	30.4	75	6.15
170	4.08	30.4	75	6.15
175	4.10	30.4	74	6.16
180	4.12	30.4	74	6.16
185	4.14	30.4	74	6.16
190	4.16	30.4	74	6.17
195	4.18	30.4	74	6.17
200	4.20	30.4	74	6.17
205	4.21	30.4	73	6.18
210	4.24	30.4	73	6.18
215	4.25	30.4	73	6.19
220	4.27	30.4	73	6.19
225	4.28	30.4	72	6.19
230	4.31	30.4	72	6.19
235	4.31	30.4	72	6.20
240	4.33	30.4	72	6.20
245	4.34	30.4	72	6.20

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 6 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.37	29.7	66	6.27
10	2.68	29.6	54	6.47
15	2.79	29.7	54	6.46
20	2.88	29.7	55	6.45
25	2.99	29.7	54	6.47
30	3.05	29.7	53	6.48
35	3.10	29.7	52	6.50
40	3.17	29.7	51	6.52
45	3.24	29.7	50	6.54
50	3.29	29.7	49	6.56
55	3.34	29.7	48	6.57
60	3.38	29.7	47	6.59
65	3.42	29.7	46	6.61
70	3.47	29.8	44	6.63
75	3.51	29.8	43	6.65
80	3.55	29.8	43	6.67
85	3.58	29.8	42	6.68
90	3.61	29.8	41	6.70
95	3.64	29.8	40	6.71
100	3.67	29.8	39	6.74
105	3.70	29.8	38	6.75
110	3.73	29.8	37	6.76
115	3.76	29.8	36	6.77
120	3.79	29.9	35	6.79
125	3.80	29.9	35	6.80

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.82	29.9	34	6.82
135	3.84	29.9	33	6.83
140	3.88	29.9	32	6.85
145	3.89	29.9	31	6.86
150	3.91	29.9	30	6.87
155	3.93	29.9	30	6.89
160	3.96	29.9	29	6.90
165	3.96	29.9	28	6.91
170	3.99	29.9	28	6.92
175	4.00	29.9	27	6.94
180	4.02	29.9	26	6.95
185	4.03	29.9	25	6.97
190	4.05	29.9	24	6.99
195	4.07	29.9	24	6.99
200	4.07	29.9	23	7.00
205	4.08	30.0	22	7.01
210	4.10	30.0	21	7.03
215	4.11	30.0	21	7.04
220	4.13	30.0	20	7.05
225	4.14	30.0	20	7.07
230	4.15	30.0	19	7.08
235	4.15	30.0	18	7.10
240	4.16	30.0	18	7.11
245	4.17	30.0	17	7.12

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	1.91	30.6	11	7.1
10	2.2	30.6	-22	7.74
15	2.39	30.6	-64	8.45
20	2.46	30.6	-74	8.62
25	2.54	30.5	-79	8.71
30	2.59	30.5	-84	8.79
35	2.64	30.5	-87	8.85
40	2.68	30.5	-90	8.88
45	2.73	30.5	-93	8.94
50	2.77	30.5	-95	8.97
55	2.8	30.6	-96	8.99
60	2.82	30.6	-97	9.01
65	2.88	30.6	-99	9.03
70	2.91	30.6	-100	9.05
75	2.94	30.6	-100	9.07
80	2.96	30.6	-101	9.08
85	3	30.6	-103	9.1
90	3.03	30.6	-103	9.11
95	3.05	30.6	-104	9.13
100	3.07	30.6	-104	9.14
105	3.09	30.6	-105	9.14
110	3.12	30.6	-105	9.15
115	3.15	30.6	-106	9.16
120	3.16	30.7	-106	9.17
125	3.18	30.7	-107	9.19

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.21	30.7	-108	9.2
135	3.23	30.7	-108	9.2
140	3.24	30.7	-109	9.21
145	3.26	30.7	-109	9.21
150	3.29	30.7	-110	9.23
155	3.3	30.7	-110	9.23
160	3.32	30.7	-110	9.24
165	3.35	30.7	-110	9.24
170	3.35	30.7	-111	9.25
175	3.38	30.7	-111	9.25
180	3.39	30.8	-111	9.26
185	3.4	30.8	-112	9.26
190	3.43	30.8	-112	9.26
195	3.43	30.8	-112	9.27
200	3.45	30.8	-112	9.27
205	3.47	30.8	-113	9.28
210	3.48	30.8	-113	9.29
215	3.5	30.8	-113	9.29
220	3.51	30.8	-114	9.29
225	3.52	30.8	-114	9.3
230	3.54	30.8	-114	9.3
235	3.55	30.8	-114	9.31
240	3.56	30.8	-114	9.31
245	3.57	30.8	-114	9.31

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 8 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.30	30.7	-80	8.86
10	2.41	30.7	-88	8.92
15	2.52	30.6	-92	8.98
20	2.58	30.6	-96	9.04
25	2.64	30.7	-98	9.08
30	2.69	30.7	-100	9.11
35	2.75	30.7	-101	9.14
40	2.79	30.7	-103	9.17
45	2.82	30.7	-104	9.18
50	2.87	30.8	-105	9.20
55	2.92	30.8	-106	9.22
60	2.93	30.8	-106	9.23
65	2.97	30.8	-107	9.24
70	3.01	30.8	-108	9.25
75	3.04	30.8	-108	9.26
80	3.06	30.8	-109	9.27
85	3.08	30.9	-109	9.27
90	3.11	30.9	-109	9.28
95	3.14	30.9	-110	9.29
100	3.17	30.9	-110	9.29
105	3.19	30.9	-110	9.30
110	3.21	30.9	-111	9.31
115	3.26	30.9	-111	9.31
120	3.27	30.9	-112	9.32
125	3.29	30.9	-112	9.32

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.30	30.9	-112	9.32
135	3.32	30.9	-112	9.33
140	3.34	31.0	-113	9.33
145	3.36	31.0	-113	9.33
150	3.37	31.0	-113	9.33
155	3.38	31.0	-113	9.34
160	3.42	31.0	-113	9.34
165	3.43	31.0	-113	9.35
170	3.45	31.0	-114	9.36
175	3.47	31.0	-114	9.36
180	3.49	31.0	-114	9.35
185	3.50	31.0	-114	9.36
190	3.51	31.0	-115	9.36
195	3.53	31.0	-114	9.36
200	3.55	31.0	-115	9.36
205	3.56	31.0	-115	9.37
210	3.56	31.0	-115	9.37
215	3.59	31.0	-115	9.38
220	3.60	31.0	-115	9.38
225	3.63	31.0	-115	9.38
230	3.64	30.9	-116	9.38
235	3.66	30.9	-115	9.38
240	3.67	30.9	-115	9.38
245	3.69	30.9	-116	9.38

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำประปา ที่ระบบกวนเร็ว ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 5 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.15	30.7	91	5.87
10	2.68	30.7	48	6.53
15	2.89	30.7	24	6.92
20	2.97	30.7	-3	7.39
25	3.00	30.7	-22	7.70
30	3.03	30.7	-34	7.90
35	3.06	30.7	-40	8.01
40	3.07	30.8	-44	8.08
45	3.09	30.8	-47	8.13
50	3.12	30.8	-49	8.17
55	3.13	30.8	-51	8.19
60	3.14	30.8	-52	8.21
65	3.16	30.9	-53	8.23
70	3.17	30.9	-55	8.25
75	3.19	30.9	-55	8.27
80	3.20	30.9	-56	8.27
85	3.21	30.9	-57	8.28
90	3.23	30.9	-57	8.29
95	3.23	31.0	-58	8.30
100	3.24	31.0	-58	8.31
105	3.25	31.0	-58	8.31
110	3.26	31.0	-58	8.32
115	3.27	31.0	-58	8.32
120	3.29	31.0	-59	8.33
125	3.30	31.0	-59	8.33

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.30	31.1	-59	8.33
135	3.31	31.1	-59	8.34
140	3.32	31.1	-60	8.34
145	3.33	31.1	-60	8.34
150	3.34	31.1	-60	8.35
155	3.35	31.1	-60	8.35
160	3.36	31.1	-60	8.35
165	3.36	31.2	-60	8.35
170	3.37	31.2	-60	8.35
175	3.38	31.2	-61	8.36
180	3.39	31.2	-61	8.36
185	3.39	31.2	-61	8.36
190	3.40	31.2	-61	8.36
195	3.41	31.2	-61	8.36
200	3.42	31.2	-61	8.36
205	3.42	31.2	-61	8.37
210	3.43	31.3	-61	8.37
215	3.44	31.3	-61	8.37
220	3.45	31.3	-61	8.37
225	3.46	31.3	-61	8.37
230	3.46	31.3	-61	8.37
235	3.47	31.3	-61	8.37
240	3.47	31.3	-61	8.37
245	3.48	31.3	-62	8.38

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 6 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.10	28.5	40	6.65
10	2.69	28.5	-103	9.09
15	2.77	28.6	-112	9.25
20	2.83	28.6	-118	9.35
25	2.88	28.6	-119	9.36
30	2.94	28.5	-120	9.38
35	2.96	28.5	-120	9.38
40	3.00	28.5	-120	9.38
45	3.03	28.5	-120	9.38
50	3.07	28.5	-120	9.38
55	3.08	28.5	-120	9.38
60	3.11	28.5	-120	9.38
65	3.14	28.5	-119	9.37
70	3.16	28.5	-119	9.37
75	3.18	28.5	-119	9.36
80	3.21	28.5	-119	9.36
85	3.24	28.4	-118	9.36
90	3.26	28.4	-118	9.35
95	3.28	28.4	-118	9.34
100	3.30	28.4	-118	9.34
105	3.32	28.4	-117	9.33
110	3.34	28.4	-117	9.32
115	3.36	28.4	-117	9.32
120	3.38	28.4	-117	9.32
125	3.39	28.4	-116	9.32

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.41	28.4	-116	9.31
135	3.43	28.4	-116	9.31
140	3.45	28.4	-116	9.31
145	3.46	28.4	-115	9.30
150	3.47	28.4	-115	9.30
155	3.49	28.4	-115	9.29
160	3.51	28.4	-115	9.29
165	3.52	28.4	-115	9.29
170	3.54	28.4	-114	9.29
175	3.55	28.4	-114	9.28
180	3.56	28.4	-114	9.28
185	3.58	28.4	-114	9.28
190	3.59	28.4	-114	9.28
195	3.60	28.4	-114	9.27
200	3.62	28.4	-114	9.27
205	3.64	28.4	-113	9.27
210	3.64	28.4	-113	9.27
215	3.65	28.4	-113	9.27
220	3.66	28.4	-113	9.26
225	3.68	28.4	-113	9.26
230	3.69	28.4	-113	9.26
235	3.70	28.4	-113	9.26
240	3.71	28.4	-113	9.26
245	3.73	28.3	-113	9.26

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 7 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.21	30.9	-64	8.35
10	2.73	30.9	-126	9.49
15	2.93	30.9	-135	9.64
20	2.98	30.9	-136	9.64
25	3.06	30.9	-136	9.65
30	3.11	30.9	-136	9.65
35	3.17	30.8	-135	9.64
40	3.23	30.8	-135	9.63
45	3.27	30.8	-134	9.62
50	3.31	30.8	-134	9.62
55	3.35	30.8	-134	9.61
60	3.38	30.8	-134	9.61
65	3.42	30.8	-133	9.60
70	3.45	30.8	-133	9.59
75	3.47	30.8	-132	9.59
80	3.51	30.8	-132	9.58
85	3.53	30.8	-132	9.58
90	3.55	30.8	-132	9.58
95	3.59	30.8	-132	9.58
100	3.60	30.8	-132	9.57
105	3.63	30.8	-131	9.57
110	3.65	30.8	-131	9.57
115	3.68	30.8	-131	9.57
120	3.70	30.8	-131	9.57
125	3.72	30.8	-131	9.57

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.74	30.8	-131	9.56
135	3.76	30.8	-131	9.56
140	3.78	30.8	-131	9.56
145	3.80	30.8	-131	9.56
150	3.81	30.8	-131	9.56
155	3.83	30.8	-131	9.56
160	3.85	30.8	-131	9.56
165	3.86	30.8	-131	9.56
170	3.88	30.8	-131	9.56
175	3.90	30.8	-131	9.56
180	3.92	30.8	-131	9.56
185	3.93	30.8	-131	9.56
190	3.95	30.8	-131	9.56
195	3.97	30.8	-131	9.56
200	3.98	30.8	-131	9.56
205	4.00	30.8	-131	9.56
210	4.02	30.8	-131	9.56
215	4.03	30.8	-131	9.56
220	4.04	30.8	-131	9.56
225	4.06	30.8	-131	9.56
230	4.08	30.8	-131	9.56
235	4.09	30.8	-131	9.56
240	4.10	30.8	-131	9.56
245	4.12	30.8	-131	9.56

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 8 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.40	30.2	-99	9.00
10	3.02	30.2	-134	9.96
15	3.22	30.2	-146	9.89
20	3.31	30.2	-150	9.95
25	3.39	30.1	-150	9.99
30	3.42	30.1	-152	9.99
35	3.46	30.1	-152	10.00
40	3.48	30.1	-152	9.95
45	3.51	29.9	-153	9.95
50	3.55	30.0	-152	9.95
55	3.58	30.1	-152	9.95
60	3.60	30.1	-152	9.95
65	3.61	30.0	-152	9.95
70	3.63	30.0	-152	9.95
75	3.66	30.0	-152	9.94
80	3.68	29.9	-152	9.94
85	3.70	29.9	-152	9.94
90	3.72	29.9	-152	9.94
95	3.74	29.9	-152	9.94
100	3.75	29.8	-152	9.94
105	3.77	29.9	-152	9.94
110	3.79	29.9	-152	9.94
115	3.81	29.9	-152	9.94
120	3.82	29.9	-152	9.94
125	3.84	29.9	-152	9.94

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.86	29.9	-152	9.94
135	3.87	29.8	-152	9.94
140	3.89	29.9	-152	9.94
145	3.91	29.9	-152	9.94
150	3.92	29.8	-152	9.94
155	3.93	29.8	-152	9.94
160	3.95	29.8	-152	9.94
165	3.97	29.8	-152	9.94
170	3.97	29.8	-152	9.94
175	3.99	29.8	-152	9.94
180	4.00	29.8	-152	9.94
185	4.01	29.8	-152	9.95
190	4.02	29.8	-152	9.95
195	4.03	29.8	-152	9.95
200	4.04	29.7	-152	9.95
205	4.06	29.7	-152	9.95
210	4.07	29.7	-152	9.95
215	4.08	29.7	-152	9.96
220	4.09	29.7	-153	9.96
225	4.10	29.7	-153	9.96
230	4.11	29.8	-153	9.96
235	4.13	29.8	-153	9.96
240	4.14	29.9	-153	9.96
245	4.15	29.9	-153	9.96

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำใต้ดิน
ที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	4.27	29.7	40	6.96
10	5.27	29.7	33	7.02
15	6.98	29.7	30	7.07
20	6.64	29.7	29	7.09
25	6.91	29.8	28	7.10
30	6.82	29.8	28	7.11
35	7.01	29.8	28	7.12
40	7.12	29.8	27	7.12
45	7.25	29.9	27	7.12
50	7.36	29.9	27	7.12
55	7.45	29.9	27	7.13
60	7.51	29.9	27	7.13
65	7.60	29.9	27	7.13
70	7.61	30.0	27	7.13
75	7.70	30.0	26	7.14
80	7.82	30.0	26	7.14
85	7.83	30.0	26	7.14
90	7.85	30.0	26	7.14
95	7.87	30.1	26	7.15
100	7.95	30.1	26	7.15
105	8.01	30.1	26	7.15
110	8.03	30.2	26	7.15
115	8.06	30.2	26	7.15
120	8.10	30.2	25	7.15
125	8.10	30.3	25	7.15

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	8.15	30.3	25	7.16
135	8.16	30.3	25	7.16
140	8.19	30.3	25	7.16
145	8.20	30.4	25	7.16
150	8.21	30.4	25	7.16
155	8.24	30.4	25	7.16
160	8.26	30.4	25	7.16
165	8.24	30.5	25	7.16
170	8.24	30.5	25	7.16
175	8.29	30.5	25	7.16
180	8.22	30.5	25	7.16
185	8.26	30.6	25	7.16
190	8.26	30.6	25	7.16
195	8.28	30.6	25	7.16
200	8.30	30.6	25	7.16
205	8.32	30.6	25	7.16
210	8.33	30.6	25	7.17
215	8.34	30.6	25	7.17
220	8.37	30.6	24	7.17
225	8.37	30.6	24	7.17
230	8.36	30.6	24	7.17
235	8.40	30.6	24	7.17
240	8.41	30.6	24	7.17
245	8.41	30.6	24	7.17

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก
ในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และทาร์ทาริกในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	6.85	29.9	34	7.02
10	6.83	30.0	35	7.45
15	8.36	30.0	22	7.23
20	8.94	30.0	24	7.20
25	8.81	30.0	25	7.17
30	8.81	30.0	26	7.17
35	9.06	30.0	26	7.17
40	9.25	30.0	25	7.17
45	9.50	30.0	25	7.18
50	9.61	30.0	25	7.18
55	9.78	30.0	24	7.19
60	9.87	30.0	24	7.19
65	9.98	30.1	24	7.19
70	10.03	30.1	24	7.19
75	10.12	30.1	24	7.20
80	10.16	30.1	24	7.20
85	10.19	30.1	23	7.20
90	10.22	30.1	23	7.21
95	10.25	30.1	23	7.21
100	10.30	30.1	23	7.21
105	10.32	30.1	23	7.21
110	10.33	30.1	23	7.22
115	10.37	30.1	22	7.22
120	10.37	30.1	22	7.22
125	10.38	30.2	22	7.23

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	10.40	30.2	22	7.23
135	10.44	30.2	22	7.23
140	10.44	30.2	22	7.23
145	10.46	30.2	22	7.23
150	10.47	30.2	22	7.23
155	10.48	30.3	22	7.24
160	10.48	30.3	21	7.24
165	10.48	30.3	21	7.24
170	10.54	30.3	21	7.24
175	10.49	30.3	21	7.24
180	10.50	30.3	21	7.24
185	10.52	30.3	21	7.25
190	10.53	30.3	21	7.25
195	10.53	30.3	21	7.25
200	10.54	30.3	21	7.25
205	10.57	30.3	21	7.25
210	10.59	30.3	21	7.25
215	10.64	30.3	20	7.26
220	10.59	30.4	20	7.26
225	10.61	30.4	20	7.26
230	10.6	30.4	20	7.26
235	10.61	30.4	20	7.26
240	10.60	30.4	20	7.26
245	10.63	30.4	20	7.26

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดลองอัตราการปลดปล่อยออกซิเจนของแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกที่อัตราส่วนต่างๆ ในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และทาร์ทาริก ที่อัตราส่วน 1:1 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	1.72	28.5	32	7.00
10	1.95	28.5	6	7.41
15	2.17	28.4	-11	7.7
20	2.31	28.5	-29	8.03
25	2.35	28.5	-43	8.28
30	2.43	28.5	-53	8.44
35	2.46	28.6	-59	8.54
40	2.50	28.6	-63	8.62
45	2.53	28.6	-67	8.68
50	2.56	28.7	-69	8.73
55	2.6	28.7	-72	8.77
60	2.63	28.8	-74	8.80
65	2.65	28.8	-75	8.82
70	2.67	28.8	-76	8.84
75	2.69	28.8	-77	8.86
80	2.71	28.9	-78	8.88
85	2.74	28.9	-79	8.90
90	2.76	28.9	-80	8.92
95	2.78	28.9	-81	8.93
100	2.78	29.0	-82	8.94
105	2.81	29.0	-82	8.95
110	2.82	29.0	-83	8.96
115	2.84	29.0	-83	8.97
120	2.85	29.0	-84	8.98
125	2.87	29.1	-84	8.98

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	2.88	29.1	-85	8.99
135	2.90	29.1	-85	8.99
140	2.90	29.1	-85	9.00
145	2.93	29.1	-86	9.01
150	2.93	29.1	-86	9.01
155	2.97	29.1	-86	9.02
160	2.97	29.1	-87	9.02
165	2.98	29.1	-87	9.03
170	2.99	29.2	-87	9.02
175	3.00	29.2	-87	9.04
180	3.01	29.2	-88	9.05
185	3.03	29.2	-88	9.05
190	3.05	29.2	-88	9.05
195	3.05	29.2	-88	9.06
200	3.06	29.2	-89	9.06
205	3.08	29.2	-89	9.07
210	3.08	29.2	-89	9.07
215	3.09	29.2	-90	9.08
220	3.11	29.2	-90	9.08
225	3.12	29.2	-90	9.09
230	3.12	29.2	-91	9.09
235	3.14	29.2	-91	9.09
240	3.15	29.2	-91	9.10
245	3.16	29.2	-91	9.11

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ2 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และทาร์ทาริก ที่อัตราส่วน 1:1.5 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	1.61	25.2	33	7.00
10	1.67	25.2	23	7.13
15	1.90	25.2	3	7.48
20	2.03	25.2	-6	7.63
25	2.10	25.2	-15	7.79
30	2.17	25.2	-29	8.03
35	2.21	25.2	-39	8.21
40	2.25	25.2	-47	8.35
45	2.28	25.2	-53	8.44
50	2.31	25.2	-57	8.52
55	2.34	25.2	-61	8.57
60	2.37	25.2	-63	8.62
65	2.41	25.2	-66	8.67
70	2.43	25.2	-67	8.69
75	2.44	25.2	-69	8.72
80	2.47	25.2	-71	8.75
85	2.49	25.2	-72	8.77
90	2.51	25.2	-73	8.80
95	2.53	25.2	-74	8.82
100	2.54	25.2	-75	8.83
105	2.57	25.2	-76	8.85
110	2.58	25.2	-77	8.86
115	2.59	25.2	-78	8.88
120	2.61	25.2	-79	8.89
125	2.63	25.2	-80	8.90

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ2 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	2.63	25.2	-80	8.91
135	2.65	25.2	-81	8.92
140	2.67	25.2	-81	8.94
145	2.68	25.2	-82	8.94
150	2.70	25.2	-83	8.95
155	2.71	25.2	-83	8.96
160	2.72	25.2	-83	8.97
165	2.73	25.2	-84	8.98
170	2.75	25.2	-84	8.99
175	2.75	25.2	-85	8.99
180	2.77	25.2	-85	9.00
185	2.77	25.2	-86	9.01
190	2.78	25.2	-86	9.01
195	2.80	25.2	-86	9.02
200	2.82	25.2	-87	9.03
205	2.82	25.2	-87	9.03
210	2.83	25.3	-87	9.03
215	2.84	25.3	-88	9.04
220	2.85	25.3	-88	9.04
225	2.86	25.3	-88	9.05
230	2.87	25.3	-88	9.05
235	2.88	25.3	-88	9.06
240	2.89	25.3	-89	9.06
245	2.90	25.3	-89	9.06

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ3 ผลการทดลองการปลดปล่อยออกซิเจนของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และทาร์ทาริก ที่อัตราส่วน 1:2 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.45	24.6	32	7.00
10	2.47	24.6	26	7.09
15	2.67	24.6	10	7.37
20	2.77	24.6	8	7.42
25	2.84	24.6	4	7.47
30	2.91	24.6	-1	7.57
35	2.96	24.6	-8	7.70
40	2.99	24.6	-16	7.83
45	3.04	24.6	-25	7.98
50	3.07	24.6	-32	8.10
55	3.10	24.6	-38	8.20
60	3.12	24.6	-42	8.29
65	3.15	24.6	-46	8.36
70	3.17	24.6	-50	8.42
75	3.19	24.6	-52	8.47
80	3.22	24.6	-54	8.51
85	3.25	24.6	-57	8.55
90	3.27	24.6	-59	8.58
95	3.28	24.7	-61	8.61
100	3.30	24.7	-62	8.63
105	3.32	24.7	-64	8.66
110	3.33	24.7	-65	8.69
115	3.36	24.7	-66	8.71
120	3.37	24.7	-67	8.72
125	3.39	24.7	-68	8.74

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ3 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.41	24.7	-69	8.76
135	3.42	24.7	-70	8.78
140	3.43	24.7	-71	8.79
145	3.47	24.7	-73	8.82
150	3.48	24.7	-73	8.83
155	3.49	24.8	-74	8.84
160	3.50	24.8	-75	8.85
165	3.52	24.8	-75	8.86
170	3.52	24.8	-76	8.87
175	3.54	24.8	-76	8.87
180	3.54	24.8	-76	8.88
185	3.55	24.8	-77	8.90
190	3.57	24.8	-77	8.90
195	3.58	24.8	-78	8.91
200	3.59	24.8	-78	8.92
205	3.61	24.8	-79	8.93
210	3.62	24.8	-79	8.93
215	3.64	24.8	-80	8.94
220	3.64	24.8	-80	8.95
225	3.65	24.8	-81	8.95
230	3.67	24.8	-81	8.96
235	3.69	24.8	-81	8.97
240	3.69	24.8	-82	8.98
245	3.69	24.9	-82	8.98

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำประปา
ในระบบกวนช้า ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 5 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.09	29.7	7.579	5.489
10	2.96	29.7	7.579	4.619
15	2.85	29.7	7.579	4.729
20	2.92	29.8	7.566	4.646
25	3.00	29.8	7.566	4.566
30	3.14	29.8	7.566	4.426
35	3.15	29.9	7.553	4.403
40	3.21	29.9	7.553	4.343
45	3.26	29.9	7.553	4.293
50	3.31	30.0	7.540	4.230
55	3.38	30.0	7.540	4.160
60	3.42	30.0	7.540	4.120
65	3.45	30.1	7.527	4.077
70	3.50	30.1	7.527	4.027
75	3.56	30.1	7.527	3.967
80	3.58	30.1	7.527	3.947
85	3.61	30.2	7.514	3.904
90	3.65	30.2	7.514	3.864
95	3.69	30.2	7.514	3.824
100	3.73	30.2	7.514	3.784
105	3.75	30.3	7.501	3.751
110	3.79	30.3	7.501	3.711
115	3.81	30.3	7.501	3.691
120	3.85	30.3	7.501	3.651
125	3.87	30.3	7.501	3.631

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.89	30.3	7.501	3.611
135	3.93	30.3	7.501	3.571
140	3.95	30.3	7.501	3.551
145	3.98	30.3	7.501	3.521
150	4.01	30.3	7.501	3.491
155	4.03	30.4	7.488	3.458
160	4.03	30.4	7.488	3.458
165	4.06	30.4	7.488	3.428
170	4.08	30.4	7.488	3.408
175	4.1	30.4	7.488	3.388
180	4.12	30.4	7.488	3.368
185	4.14	30.4	7.488	3.348
190	4.16	30.4	7.488	3.328
195	4.18	30.4	7.488	3.308
200	4.2	30.4	7.488	3.288
205	4.21	30.4	7.488	3.278
210	4.24	30.4	7.488	3.248
215	4.25	30.4	7.488	3.238
220	4.27	30.4	7.488	3.218
225	4.28	30.4	7.488	3.208
230	4.31	30.4	7.488	3.178
235	4.31	30.4	7.488	3.178
240	4.33	30.4	7.488	3.158
245	4.34	30.4	7.488	3.148

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ2 ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 6 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.37	29.7	7.579	5.209
10	2.68	29.6	7.592	4.912
15	2.79	29.7	7.579	4.789
20	2.88	29.7	7.579	4.699
25	2.99	29.7	7.579	4.589
30	3.05	29.7	7.579	4.529
35	3.10	29.7	7.579	4.479
40	3.17	29.7	7.579	4.409
45	3.24	29.7	7.579	4.339
50	3.29	29.7	7.579	4.289
55	3.34	29.7	7.579	4.239
60	3.38	29.7	7.579	4.199
65	3.42	29.7	7.579	4.159
70	3.47	29.8	7.566	4.096
75	3.51	29.8	7.566	4.056
80	3.55	29.8	7.566	4.016
85	3.58	29.8	7.566	3.986
90	3.61	29.8	7.566	3.956
95	3.64	29.8	7.566	3.926
100	3.67	29.8	7.566	3.896
105	3.70	29.8	7.566	3.866
110	3.73	29.8	7.566	3.836
115	3.76	29.8	7.566	3.806
120	3.79	29.9	7.553	3.763
125	3.80	29.9	7.553	3.753

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ2 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.82	29.9	7.553	3.733
135	3.84	29.9	7.553	3.713
140	3.88	29.9	7.553	3.673
145	3.89	29.9	7.553	3.663
150	3.91	29.9	7.553	3.643
155	3.93	29.9	7.553	3.623
160	3.96	29.9	7.553	3.593
165	3.96	29.9	7.553	3.593
170	3.99	29.9	7.553	3.563
175	4.00	29.9	7.553	3.553
180	4.02	29.9	7.553	3.533
185	4.03	29.9	7.553	3.523
190	4.05	29.9	7.553	3.503
195	4.07	29.9	7.553	3.483
200	4.07	29.9	7.553	3.483
205	4.08	30.0	7.540	3.460
210	4.10	30.0	7.540	3.440
215	4.11	30.0	7.540	3.430
220	4.13	30.0	7.540	3.410
225	4.14	30.0	7.540	3.40
230	4.15	30.0	7.540	3.390
235	4.15	30.0	7.540	3.390
240	4.16	30.0	7.540	3.380
245	4.17	30.0	7.540	3.370

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ3 ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	1.91	30.6	7.462	5.552
10	2.20	30.6	7.462	5.262
15	2.39	30.6	7.462	5.072
20	2.46	30.6	7.462	5.002
25	2.54	30.5	7.475	4.935
30	2.59	30.5	7.475	4.885
35	2.64	30.5	7.475	4.835
40	2.68	30.5	7.475	4.795
45	2.73	30.5	7.475	4.745
50	2.77	30.5	7.475	4.705
55	2.80	30.6	7.462	4.662
60	2.82	30.6	7.462	4.642
65	2.88	30.6	7.462	4.582
70	2.91	30.6	7.462	4.552
75	2.94	30.6	7.462	4.522
80	2.96	30.6	7.462	4.502
85	3.00	30.6	7.462	4.462
90	3.03	30.6	7.462	4.432
95	3.05	30.6	7.462	4.412
100	3.07	30.6	7.462	4.392
105	3.09	30.6	7.462	4.372
110	3.12	30.6	7.462	4.342
115	3.15	30.6	7.462	4.312
120	3.16	30.7	7.449	4.289
125	3.18	30.7	7.449	4.269

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ3 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.21	30.7	7.449	4.239
135	3.23	30.7	7.449	4.219
140	3.24	30.7	7.449	4.209
145	3.26	30.7	7.449	4.189
150	3.29	30.7	7.449	4.159
155	3.30	30.7	7.449	4.149
160	3.32	30.7	7.449	4.129
165	3.35	30.7	7.449	4.099
170	3.35	30.7	7.449	4.099
175	3.38	30.7	7.449	4.069
180	3.39	30.8	7.436	4.046
185	3.40	30.8	7.436	4.036
190	3.43	30.8	7.436	4.006
195	3.43	30.8	7.436	4.006
200	3.45	30.8	7.436	3.986
205	3.47	30.8	7.436	3.966
210	3.48	30.8	7.436	3.956
215	3.50	30.8	7.436	3.936
220	3.51	30.8	7.436	3.926
225	3.52	30.8	7.436	3.916
230	3.54	30.8	7.436	3.896
235	3.55	30.8	7.436	3.886
240	3.56	30.8	7.436	3.876
245	3.57	30.8	7.436	3.866

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ4 ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 8 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.30	30.7	7.449	5.149
10	2.41	30.7	7.449	5.039
15	2.52	30.6	7.462	4.942
20	2.58	30.6	7.462	4.882
25	2.64	30.7	7.449	4.809
30	2.69	30.7	7.449	4.759
35	2.75	30.7	7.449	4.699
40	2.79	30.7	7.449	4.659
45	2.82	30.7	7.449	4.629
50	2.87	30.8	7.436	4.566
55	2.92	30.8	7.436	4.516
60	2.93	30.8	7.436	4.506
65	2.97	30.8	7.436	4.466
70	3.01	30.8	7.436	4.426
75	3.04	30.8	7.436	4.396
80	3.06	30.8	7.436	4.376
85	3.08	30.9	7.423	4.343
90	3.11	30.9	7.423	4.313
95	3.14	30.9	7.423	4.283
100	3.17	30.9	7.423	4.253
105	3.19	30.9	7.423	4.233
110	3.21	30.9	7.423	4.213
115	3.26	30.9	7.423	4.163
120	3.27	30.9	7.423	4.153

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฉ4 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
125	3.29	30.9	7.423	4.133
130	3.30	30.9	7.423	4.123
135	3.32	30.9	7.423	4.103
140	3.34	31.0	7.410	4.070
145	3.36	31.0	7.410	4.050
150	3.37	31.0	7.410	4.040
155	3.38	31.0	7.410	4.030
160	3.42	31.0	7.410	3.990
165	3.43	31.0	7.410	3.980
170	3.45	31.0	7.410	3.960
175	3.47	31.0	7.410	3.940
180	3.49	31.0	7.410	3.920
185	3.50	31.0	7.410	3.910
190	3.51	31.0	7.410	3.900
195	3.53	31.0	7.410	3.880
200	3.55	31.0	7.410	3.860
205	3.56	31.0	7.410	3.850
210	3.56	31.0	7.410	3.850
215	3.59	31.0	7.410	3.820
220	3.60	31.0	7.410	3.810
225	3.63	31.0	7.410	3.780
230	3.64	30.9	7.423	3.783
235	3.66	30.9	7.423	3.763
240	3.67	30.9	7.423	3.753
245	3.69	30.9	7.423	3.733

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ช

ข้อมูลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำประปา
ในระบบกวนเร็ว ที่พีเอช 5, 6, 7 และ 8 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ช1 ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 5 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.15	30.7	7.449	5.299
10	2.68	30.7	7.449	4.769
15	2.89	30.7	7.449	4.559
20	2.97	30.7	7.449	4.479
25	3.00	30.7	7.449	4.449
30	3.03	30.7	7.449	4.419
35	3.06	30.7	7.449	4.389
40	3.07	30.8	7.436	4.366
45	3.09	30.8	7.436	4.346
50	3.12	30.8	7.436	4.316
55	3.13	30.8	7.436	4.306
60	3.14	30.8	7.436	4.296
65	3.16	30.9	7.423	4.263
70	3.17	30.9	7.423	4.253
75	3.19	30.9	7.423	4.233
80	3.20	30.9	7.423	4.223
85	3.21	30.9	7.423	4.213
90	3.23	30.9	7.423	4.193
95	3.23	31.0	7.410	4.180
100	3.24	31.0	7.410	4.170
105	3.25	31.0	7.410	4.160
110	3.26	31.0	7.410	4.150
115	3.27	31.0	7.410	4.140
120	3.29	31.0	7.410	4.120
125	3.30	31.0	7.410	4.110

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ช1 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.30	31.1	7.398	4.098
135	3.31	31.1	7.398	4.088
140	3.32	31.1	7.398	4.078
145	3.33	31.1	7.398	4.068
150	3.34	31.1	7.398	4.058
155	3.35	31.1	7.398	4.048
160	3.36	31.1	7.398	4.038
165	3.36	31.2	7.386	4.026
170	3.37	31.2	7.386	4.016
175	3.38	31.2	7.386	4.006
180	3.39	31.2	7.386	3.996
185	3.39	31.2	7.386	3.996
190	3.40	31.2	7.386	3.986
195	3.41	31.2	7.386	3.976
200	3.42	31.2	7.386	3.966
205	3.42	31.2	7.386	3.966
210	3.43	31.3	7.374	3.944
215	3.44	31.3	7.374	3.934
220	3.45	31.3	7.374	3.924
225	3.46	31.3	7.374	3.914
230	3.46	31.3	7.374	3.914
235	3.47	31.3	7.374	3.904
240	3.47	31.3	7.374	3.904
245	3.48	31.3	7.374	3.894

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ช2 ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 6 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.10	28.5	7.740	5.640
10	2.69	28.5	7.740	5.050
15	2.77	28.6	7.726	4.956
20	2.83	28.6	7.726	4.896
25	2.88	28.6	7.726	4.846
30	2.94	28.5	7.740	4.800
35	2.96	28.5	7.740	4.780
40	3.00	28.5	7.740	4.740
45	3.03	28.5	7.740	4.710
50	3.07	28.5	7.740	4.670
55	3.08	28.5	7.740	4.660
60	3.11	28.5	7.740	4.630
65	3.14	28.5	7.740	4.600
70	3.16	28.5	7.740	4.580
75	3.18	28.5	7.740	4.560
80	3.21	28.5	7.740	4.530
85	3.24	28.4	7.754	4.514
90	3.26	28.4	7.754	4.494
95	3.28	28.4	7.754	4.474
100	3.30	28.4	7.754	4.454
105	3.32	28.4	7.754	4.434
110	3.34	28.4	7.754	4.414
115	3.36	28.4	7.754	4.394
120	3.38	28.4	7.754	4.374
125	3.39	28.4	7.754	4.364

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ช2 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.41	28.4	7.754	4.344
135	3.43	28.4	7.754	4.324
140	3.45	28.4	7.754	4.304
145	3.46	28.4	7.754	4.294
150	3.47	28.4	7.754	4.284
155	3.49	28.4	7.754	4.264
160	3.51	28.4	7.754	4.244
165	3.52	28.4	7.754	4.234
170	3.54	28.4	7.754	4.214
175	3.55	28.4	7.754	4.204
180	3.56	28.4	7.754	4.194
185	3.58	28.4	7.754	4.174
190	3.59	28.4	7.754	4.164
195	3.60	28.4	7.754	4.154
200	3.62	28.4	7.754	4.134
205	3.64	28.4	7.754	4.114
210	3.64	28.4	7.754	4.114
215	3.65	28.4	7.754	4.104
220	3.66	28.4	7.754	4.094
225	3.68	28.4	7.754	4.074
230	3.69	28.4	7.754	4.064
235	3.70	28.4	7.754	4.054
240	3.71	28.4	7.754	4.044
245	3.73	28.3	7.768	4.038

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ช3 ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 7 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.21	30.9	7.414	5.204
10	2.73	30.9	7.414	4.684
15	2.93	30.9	7.414	4.484
20	2.98	30.9	7.414	4.434
25	3.06	30.9	7.414	4.354
30	3.11	30.9	7.414	4.304
35	3.17	30.8	7.428	4.258
40	3.23	30.8	7.428	4.198
45	3.27	30.8	7.428	4.158
50	3.31	30.8	7.428	4.118
55	3.35	30.8	7.428	4.078
60	3.38	30.8	7.428	4.048
65	3.42	30.8	7.428	4.008
70	3.45	30.8	7.428	3.978
75	3.47	30.8	7.428	3.958
80	3.51	30.8	7.428	3.918
85	3.53	30.8	7.428	3.898
90	3.55	30.8	7.428	3.878
95	3.59	30.8	7.428	3.838
100	3.60	30.8	7.428	3.828
105	3.63	30.8	7.428	3.798
110	3.65	30.8	7.428	3.778
115	3.68	30.8	7.428	3.748
120	3.70	30.8	7.428	3.728
125	3.72	30.8	7.428	3.708

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ช3 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.74	30.8	7.428	3.688
135	3.76	30.8	7.428	3.668
140	3.78	30.8	7.428	3.648
145	3.80	30.8	7.428	3.628
150	3.81	30.8	7.428	3.618
155	3.83	30.8	7.428	3.598
160	3.85	30.8	7.428	3.578
165	3.86	30.8	7.428	3.568
170	3.88	30.8	7.428	3.548
175	3.90	30.8	7.428	3.528
180	3.92	30.8	7.428	3.508
185	3.93	30.8	7.428	3.498
190	3.95	30.8	7.428	3.478
195	3.97	30.8	7.428	3.458
200	3.98	30.8	7.428	3.448
205	4.00	30.8	7.428	3.428
210	4.02	30.8	7.428	3.408
215	4.03	30.8	7.428	3.398
220	4.04	30.8	7.428	3.388
225	4.06	30.8	7.428	3.368
230	4.08	30.8	7.428	3.348
235	4.09	30.8	7.428	3.338
240	4.10	30.8	7.428	3.328
245	4.12	30.8	7.428	3.308

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ช4 ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำที่พีเอช 8 ในระบบกวนเร็ว เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.40	30.2	7.512	5.112
10	3.02	30.2	7.512	4.492
15	3.22	30.2	7.512	4.292
20	3.31	30.2	7.512	4.202
25	3.39	30.1	7.526	4.136
30	3.42	30.1	7.526	4.106
35	3.46	30.1	7.526	4.066
40	3.48	30.1	7.526	4.046
45	3.51	29.9	7.553	4.043
50	3.55	30.0	7.540	3.990
55	3.58	30.1	7.526	3.946
60	3.60	30.1	7.526	3.926
65	3.61	30.0	7.540	3.930
70	3.63	30.0	7.540	3.910
75	3.66	30.0	7.540	3.880
80	3.68	29.9	7.553	3.873
85	3.70	29.9	7.553	3.853
90	3.72	29.9	7.553	3.833
95	3.74	29.9	7.553	3.813
100	3.75	29.8	7.553	3.803
105	3.77	29.9	7.553	3.783
110	3.79	29.9	7.553	3.763
115	3.81	29.9	7.553	3.743
120	3.82	29.9	7.553	3.733
125	3.84	29.9	7.553	3.713

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ช4 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
130	3.86	29.9	7.553	3.693
135	3.87	29.8	7.566	3.696
140	3.89	29.9	7.553	3.663
145	3.91	29.9	7.553	3.643
150	3.92	29.8	7.566	3.646
155	3.93	29.8	7.566	3.636
160	3.95	29.8	7.566	3.616
165	3.97	29.8	7.566	3.596
170	3.97	29.8	7.566	3.596
175	3.99	29.8	7.566	3.576
180	4.00	29.8	7.566	3.566
185	4.01	29.8	7.566	3.556
190	4.02	29.8	7.566	3.546
195	4.03	29.8	7.566	3.536
200	4.04	29.7	7.579	3.539
205	4.06	29.7	7.579	3.519
210	4.07	29.7	7.579	3.509
215	4.08	29.7	7.579	3.499
220	4.09	29.7	7.579	3.489
225	4.10	29.7	7.579	3.479
230	4.11	29.8	7.566	3.456
235	4.13	29.8	7.566	3.436
240	4.14	29.9	7.553	3.413
245	4.15	29.9	7.553	3.403

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ซ

ข้อมูลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำใต้ดิน
ที่ระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ซ1 ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในอัตราส่วน 1:1 ในน้ำใต้ดินที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	1.72	28.5	7.74	6.020
10	1.95	28.5	7.74	5.790
15	2.17	28.4	7.754	5.584
20	2.31	28.5	7.74	5.430
25	2.35	28.5	7.74	5.390
30	2.43	28.5	7.74	5.310
35	2.46	28.6	7.726	5.266
40	2.5	28.6	7.726	5.226
45	2.53	28.6	7.726	5.196
50	2.56	28.7	7.712	5.152
55	2.60	28.7	7.712	5.112
60	2.63	28.8	7.698	5.068
65	2.65	28.8	7.698	5.048
70	2.67	28.8	7.698	5.028
75	2.69	28.8	7.698	5.008
80	2.71	28.9	7.684	4.974
85	2.74	28.9	7.684	4.944
90	2.76	28.9	7.684	4.924
95	2.78	28.9	7.684	4.904
100	2.78	29.0	7.670	4.890
105	2.81	29.0	7.670	4.860
110	2.82	29.0	7.670	4.850
115	2.84	29.0	7.670	4.830

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ซ1 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
120	2.85	29.0	7.670	4.820
125	2.87	29.1	7.657	4.787
130	2.88	29.1	7.657	4.777
135	2.90	29.1	7.657	4.757
140	2.90	29.1	7.657	4.757
145	2.93	29.1	7.657	4.727
150	2.93	29.1	7.657	4.727
155	2.97	29.1	7.657	4.687
160	2.97	29.1	7.657	4.687
165	2.98	29.1	7.657	4.677
170	2.99	29.2	7.644	4.654
175	3.00	29.2	7.644	4.644
180	3.01	29.2	7.644	4.634
185	3.03	29.2	7.644	4.614
190	3.05	29.2	7.644	4.594
195	3.05	29.2	7.644	4.594
200	3.06	29.2	7.644	4.584
205	3.08	29.2	7.644	4.564
210	3.08	29.2	7.644	4.564
215	3.09	29.2	7.644	4.554
220	3.11	29.2	7.644	4.534
225	3.12	29.2	7.644	4.524
230	3.12	29.2	7.644	4.524
235	3.14	29.2	7.644	4.504
240	3.15	29.2	7.644	4.494
245	3.16	29.2	7.644	4.484

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ซ2 ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในอัตราส่วน 1:1.5 ในน้ำใต้ดินที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	1.61	25.2	8.210	6.600
10	1.67	25.2	8.210	6.540
15	1.90	25.2	8.210	6.310
20	2.03	25.2	8.210	6.180
25	2.10	25.2	8.210	6.110
30	2.17	25.2	8.210	6.040
35	2.21	25.2	8.210	6.000
40	2.25	25.2	8.210	5.960
45	2.28	25.2	8.210	5.930
50	2.31	25.2	8.210	5.900
55	2.34	25.2	8.210	5.870
60	2.37	25.2	8.210	5.840
65	2.41	25.2	8.210	5.800
70	2.43	25.2	8.210	5.780
75	2.44	25.2	8.210	5.770
80	2.47	25.2	8.210	5.740
85	2.49	25.2	8.210	5.720
90	2.51	25.2	8.210	5.700
95	2.53	25.2	8.210	5.680
100	2.54	25.2	8.210	5.670
105	2.57	25.2	8.210	5.640
110	2.58	25.2	8.210	5.630
115	2.59	25.2	8.210	5.620

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ซ2 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
120	2.61	25.2	8.210	5.600
125	2.63	25.2	8.210	5.580
130	2.63	25.2	8.210	5.580
135	2.65	25.2	8.210	5.560
140	2.67	25.2	8.210	5.540
145	2.68	25.2	8.210	5.530
150	2.70	25.2	8.210	5.510
155	2.71	25.2	8.210	5.500
160	2.72	25.2	8.210	5.490
165	2.73	25.2	8.210	5.480
170	2.75	25.2	8.210	5.460
175	2.75	25.2	8.210	5.460
180	2.77	25.2	8.210	5.440
185	2.77	25.2	8.210	5.440
190	2.78	25.2	8.210	5.430
195	2.80	25.2	8.210	5.410
200	2.82	25.2	8.210	5.390
205	2.82	25.2	8.210	5.390
210	2.83	25.3	8.195	5.365
215	2.84	25.3	8.195	5.355
220	2.85	25.3	8.195	5.345
225	2.86	25.3	8.195	5.335
230	2.87	25.3	8.195	5.325
235	2.88	25.3	8.195	5.315
240	2.89	25.3	8.195	5.305
245	2.90	25.3	8.195	5.295

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ซ3 ผลการทดลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในอัตราส่วน 1:2 ในน้ำใต้ดินที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
5	2.45	24.6	8.305	5.855
10	2.47	24.6	8.305	5.835
15	2.67	24.6	8.305	5.635
20	2.77	24.6	8.305	5.535
25	2.84	24.6	8.305	5.465
30	2.91	24.6	8.305	5.395
35	2.96	24.6	8.305	5.345
40	2.99	24.6	8.305	5.315
45	3.04	24.6	8.305	5.265
50	3.07	24.6	8.305	5.235
55	3.10	24.6	8.305	5.205
60	3.12	24.6	8.305	5.185
65	3.15	24.6	8.305	5.155
70	3.17	24.6	8.305	5.135
75	3.19	24.6	8.305	5.115
80	3.22	24.6	8.305	5.085
85	3.25	24.6	8.305	5.055
90	3.27	24.6	8.305	5.035
95	3.28	24.7	8.288	5.008
100	3.30	24.7	8.288	4.988
105	3.32	24.7	8.288	4.968
110	3.33	24.7	8.288	4.958
115	3.36	24.7	8.288	4.928

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ซ3 (ต่อ)

Time	Dissolved Oxygen (mg/l)	Temperature (°C)	ORP (mV)	pH
120	3.37	24.7	8.288	4.918
125	3.39	24.7	8.288	4.898
130	3.41	24.7	8.288	4.878
135	3.42	24.7	8.288	4.868
140	3.43	24.7	8.288	4.858
145	3.47	24.7	8.288	4.818
150	3.48	24.7	8.288	4.808
155	3.49	24.8	8.272	4.782
160	3.50	24.8	8.272	4.772
165	3.52	24.8	8.272	4.752
170	3.52	24.8	8.272	4.752
175	3.54	24.8	8.272	4.732
180	3.54	24.8	8.272	4.732
185	3.55	24.8	8.272	4.722
190	3.57	24.8	8.272	4.702
195	3.58	24.8	8.272	4.692
200	3.59	24.8	8.272	4.682
205	3.61	24.8	8.272	4.662
210	3.62	24.8	8.272	4.652
215	3.64	24.8	8.272	4.632
220	3.64	24.8	8.272	4.632
225	3.65	24.8	8.272	4.622
230	3.67	24.8	8.272	4.602
235	3.69	24.8	8.272	4.582
240	3.69	24.8	8.272	4.582
245	3.69	24.9	8.256	4.566

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ฌ

การคำนวณ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. คำนวณปริมาณกรดทาร์ทาริกที่ใช้ในการทดลอง

กรดทาร์ทาริก ($C_4H_6O_6$)

จากสมการ

$$C_4H_6O_6 + 2.5O_2 \longrightarrow 4CO_2 + 3H_2O \quad (8)$$

กรดทาร์ทาริก 1 โมล มีน้ำหนัก เท่ากับ 150 กรัม และ ออกซิเจน 2.5 โมล มีน้ำหนัก เท่ากับ 80 กรัม

จากสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ 0.5 กรัม ปลดปล่อยออกซิเจน 2.76×10^{-3} กรัม หรือ 0.086×10^{-3} โมล เพราะฉะนั้นออกซิเจน 2.5 โมล จะเท่ากับ 7.04×10^{-3} กรัม

ออกซิเจน 80 กรัม ทำปฏิกิริยากับกรดทาร์ทาริก 150 กรัม เพราะฉะนั้นถ้ามีออกซิเจน 7.04×10^{-3} กรัม จะมีกรดทาร์ทาริก $\frac{150 \times 7.04 \times 10^{-3}}{80}$ เท่ากับ 0.0132 กรัม

คำนวณสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ที่ละลายได้

จากสมการ

$$CaO_2 + H_2O \longrightarrow 0.5O_2 + Ca(OH)_2 \quad (9)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฌ1 ปริมาณสารที่คำนวณได้ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในระบบกวนช้า

พีเอช	ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ออกซิเจน (มิลลิกรัม)	CaO_2 ที่ละลายได้ (กรัม)
5	2.35	3.9057	0.018
6	2.07	3.4403	0.015
7	1.70	2.8254	0.013
8	1.71	2.8420	0.013

ตารางผนวกที่ ฌ2 ปริมาณสารที่คำนวณได้ที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในระบบกวนเร็ว

พีเอช	ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ออกซิเจน (มิลลิกรัม)	CaO_2 ที่ละลายได้ (กรัม)
5	1.65	2.7423	0.012
6	1.88	3.1245	0.014
7	2.11	3.5068	0.016
8	1.87	3.1079	0.014

ตารางผนวกที่ ฌ3 ปริมาณสารที่คำนวณได้ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำประปาที่พีเอช 7 ในระบบกวนช้า ในอัตราส่วน 1:1, 1:1.5 และ 1:2

อัตราส่วน	ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ออกซิเจน (มิลลิกรัม)	CaO_2 ที่ละลายได้ (กรัม)
อัตราส่วน 1:1	1.44	2.3932	0.0108
อัตราส่วน 1:1.5	1.29	2.1439	0.0096
อัตราส่วน 1:2	1.24	2.0608	0.0093

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ฌ4 ปริมาณสารที่คำนวณได้ของสารแคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริกในน้ำใต้ดินที่ระบบกวนช้า

สารเคมีที่เติม	ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ออกซิเจน (มิลลิกรัม)	CaO_2 ที่ละลายได้ (กรัม)
แคลเซียมเปอร์ออกไซด์	4.14	6.8807	0.0310
แคลเซียมเปอร์ออกไซด์และกรดทาร์ทาริก	3.78	6.2824	0.0283

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาววรัญญา เลิศเจริญสมบัติ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2548 จบการศึกษา วท.บ. (วิทยาศาสตร์ทั่วไป) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
นำเสนอผลงานที่	งาน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 (16^{th} National Convention on Civil Engineering) วันที่ 18-20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554 โรงแรมเดอะซายน์ พัทยา ชลบุรี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์