บทที่ 4

ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย

จากการทดลองหาวิธีการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสีย โดยใช้วิธีออกซิเดชัน ร่วมกับการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีตัวออกซิไดซ์ 4 ชนิด คือ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โซเดียมไฮโปคลอไรต์ อากาศ และโอโซน ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอน 3 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และตัวช่วยให้ตะกอนจมตัว 2 ชนิด คือ สารส้ม และ PAC ซึ่งแบ่งการทดลองได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังรายละเอียดดังนี้

4.1 ทดสอบความสามารถในการตกตะกอนที่ระดับพีเอช 1-9 และระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี (พีเอชอ้างอิง)

4.2 ทดสอบความสามารถในการตกตะกอนโดยใช้ตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ที่ระดับพีเอช 5-9 และระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี (พีเอชอ้างอิง)

4.3 ทดสอบความสามารถในการจมตัวของตะกอนที่ระดับพีเอช 5-9 และระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี (พีเอชอ้างอิง)

4.4 ทดสอบความสามารถในการจมตัวของตะกอน โดยใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวที่ปริมาณ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.5 ทดสอบความสามารถในการตกตะกอนของเหล็กในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก

ในการทดลองนี้ขั้นตอนที่ 4.1-4.4 จะทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงในการทดลองที่ 4.5 โดยน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม จะนำมาจากโรงงาน ไทยสะเปเชียลไวร์ จำกัด คุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก (โรงงาน ไทยสะเปเชียลไวร์ จำกัด)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	น้ำเสียสังเคราะห์	น้ำเสียกรด
ระดับพีเอช (pH)	1.7	-2.1
ค่าความเป็นเบส (alkalinity) (มก./ล.เทียบกับ $CaCO_3$)	0.0	0.0
ค่าความกระด้าง (hardness) (มก./ล.เทียบกับ $CaCO_3$)	0.0	0.0
ปริมาณเหล็กทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)	5.58	141.55

งานวิจัยนี้มุ่งหาสภาวะในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยให้มีปริมาณเหล็กทั้งหมดที่เหลืออยู่ในน้ำมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน คือ 0.300 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองจะแสดงตามหัวข้อต่างๆ ตามลำดับดังนี้

4.1 ทดสอบความสามารถในการตกตะกอนที่ระดับพีเอช 1-9 และระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี (พีเอชอ้างอิง)

การทดลองในขั้นตอนนี้ เป็นการเปรียบเทียบการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียโดยใช้วิธีออกซิเดชัน และไม่ใช้วิธีออกซิเดชัน ที่ระดับพีเอชต่างๆ เพื่อหาสภาวะเริ่มต้นในการกำจัดเหล็ก โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ไม่ใช้อากาศในออกซิเดชัน กลุ่มที่ 2 ใช้อากาศในออกซิเดชัน หลังการปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับพีเอช 1-9 และพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี ซึ่งปริมาณของตัวช่วยตกตะกอนที่ใช้จะมีปริมาณที่แตกต่างกัน ผลการทดลองที่ได้ คือ ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย โดยแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4.2 - 4.3 และรูปที่ 4.1 ผลการทดลองที่ได้นำไปเปรียบเทียบทางสถิติ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ one-way analysis of varience เพื่อทดสอบความแปรปรวนของปริมาณเหล็กทั้งหมดในการกำจัดเหล็กที่ระดับพีเอชต่างๆ ของวิธีการทั้ง 2 กลุ่มที่ $\alpha = 0.05$ หากพบว่ามีความแปรปรวนในกลุ่มค่าเฉลี่ยนี้ จะทำการวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี multiple comparison แบบ Duncan เพื่อหาว่าปริมาณเหล็กทั้งหมดเฉลี่ยคู่ใดที่มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งทำให้เกิดค่าความแปรปรวนดังกล่าว ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

จากผลการทดลองพบว่า ที่ระดับพีเอช 1 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ได้จากวิธีที่ใช้ และไม่ใช้ออกซิเดชัน แสดงว่าที่ระดับพีเอชนี้ไม่สามารถออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสไปเป็นเหล็กเฟอร์ริคได้ และการตกตะกอนของตะกอนยังไม่เกิดขึ้น การออกซิไดซ์จะเริ่มต้นเมื่อระดับพีเอช 2 ขึ้นไป ที่ระดับพีเอช 5 การออกซิไดซ์และการตกตะกอนจะเกิดได้มากขึ้น และเมื่อระดับพีเอชสูงขึ้นการออกซิไดซ์ และการตกตะกอนจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Stumm และ Lee (1961) ที่พบว่าระดับพีเอช 5 ขึ้นไปจนถึงระดับพีเอชที่เป็นเบสจะสามารถกำจัดเหล็กได้มากที่สุด และการออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสไปเป็นเหล็กเฟอร์ริคจะเกิดได้ดีขึ้นที่ระดับพีเอชกลางจนถึงเบส

ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่เหลืออยู่ในวิธีที่ใช้ และไม่ใช้ออกซิเดชัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ที่ระดับพีเอช 2 ขึ้นไป ซึ่งพบว่าปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ได้จากวิธีที่ไม่ใช้ออกซิเดชันจะมีค่าสูงกว่าวิธีที่ใช้ออกซิเดชันทุกระดับพีเอช ระดับพีเอชที่ได้หลังการทดลองพบว่า วิธีที่ไม่ใช้ออกซิเดชัน และมีระดับพีเอชเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับระดับพีเอชเริ่มต้น แต่วิธีที่ใช้ออกซิเดชันพบว่าระดับพีเอชหลังทดลองอยู่ในช่วงที่เป็นกรด ซึ่งต่างจากระดับพีเอชเริ่มต้น

ทั้งนี้เนื่องจากการออกซิไดซ์ด้วยอากาศจะทำให้ได้อนุมูลไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกมา โดยจะมีผลทำให้มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น เหล็กเฟอร์รัสยิ่งถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นเฟอร์ริคมาก จะมีผลให้ได้อนุมูลไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นด้วย (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.1ดังนี้

$$Fe^{2+} + 1/4\ O_2 + 5/2\ H_2O \longrightarrow Fe(OH)_3 + 2H^+ \qquad 4.1$$

ดังนั้นที่ระดับพีเอช 4-9 ระดับพีเอชหลังการทดลองจึงอยู่ในช่วง 3.0-4.6 แต่ที่ระดับพีเอชอ้างอิง*หลังทดลองระดับพีเอชที่ได้เป็น 12.5 ทั้งนี้เนื่องจากระดับพีเอชอ้างอิงเกิดจากการใช้ปริมาณตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎีที่ทำปฏิกิริยากันพอดี ซึ่งปริมาณเพียงเล็กน้อยของตัวช่วยตกตะกอนที่เป็นเบสสามารถทำให้ระดับพีเอชเปลี่ยนไปได้มาก

การตกตะกอนของเหล็กในวิธีที่ไม่ใช้ออกซิเดชัน ตะกอนของเหล็กจะอยู่ในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะเริ่มเกิดตะกอนขึ้นที่ระดับพีเอช 6 และเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ระดับพีเอช 8-9 แต่ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่เหลืออยู่มีปริมาณสูงกว่าค่ามาตรฐานปริมาณเหล็กที่ยอมให้มีได้ในแหล่งน้ำ คือ 0.300 มิลลิกรัมต่อลิตร (จัดการคุณภาพน้ำ, 2538) สำหรับระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี คือ 12.5 ปริมาณเหล็กทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ คือ 0.215 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากทฤษฎีในการตกตะกอนของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์พบว่า ระดับพีเอชที่ทำให้เริ่มเกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์คือ ระดับพีเอช 6.5 และการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์จะเกิดขึ้นได้ดีในระดับพีเอช 11 (Lide, 1992) ดังนั้นการตกตะกอนของเหล็กในวิธีที่ไม่ใช้ออกซิเดชันจะกำจัดเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ระดับพีเอชมากกว่า 11

สำหรับการตกตะกอนของเหล็กในวิธีที่ใช้ออกซิเดชัน Hauer (1950) พบว่าการออกซิไดซ์เหล็กด้วยวิธีการเติมอากาศ ถ้าระดับพีเอชของน้ำเป็นกรด การออกซิไดซ์จะเกิดขึ้นได้ยากมาก และเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนจะใช้เวลาประมาณ 12-24 ชั่วโมง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสอดคล้องกับของ Hauer คือ การออกซิไดซ์และการตกตะกอนในรูปเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในระดับพีเอช 1-4 ตะกอนของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์เริ่มเกิดขึ้นที่ระดับพีเอช 5 และการตกตะกอนของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์มีถึง 7.9848 % ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพีเอชมากขึ้น จากงานวิจัยของ Walker (1978) พบว่าการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล โดยใช้วิธีแบบเติมอากาศจะเกิดได้ดีในระดับพีเอช 7.5-8.0 และเวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์ประมาณ 30-60 นาที ซึ่งการออกซิไดซ์เหล็กด้วยการเติมอากาศจะทำพร้อมกับการเติมตัวช่วยตกตะกอน โดยจะเกิดตะกอนของเฟอร์รัส

ไฮดรอกไซด์ก่อนแล้วจึงจะถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศให้กลายเป็นเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ง่ายและเร็วในระดับพีเอชที่เป็นกลาง

ปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่ของวิธีที่ใช้ออกซิเดชันที่ระดับพีเอช 9 เป็น 0.20 กรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้เช่นเดียวกัน และที่ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี คือ 12.5 ปริมาณเหล็กทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน คือ 0.097 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าต่ำกว่าปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ได้จากการตกตะกอนในวิธีที่ไม่ใช้ออกซิเดชันด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีที่ใช้ออกซิเดชัน จะสามารถกำจัดเหล็กได้มากกว่าวิธีที่ไม่ใช้ออกซิเดชัน ระดับพีเอช ปริมาณของตัวช่วยตกตะกอนมีผลต่อปริมาณของตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ กล่าวคือ ต้องใช้ปริมาณตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี โดยคำนวณเทียบกับปริมาณเหล็กทั้งหมดตอนเริ่มต้น และการออกซิไดซ์จะเกิดควบคู่กับการเติมตัวช่วยตกตะกอนจึงจะสามารถกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีที่ใช้ออกซิเดชันที่ระดับพีเอชอ้างอิงมีค่าสูงถึง 99.9982 % ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์สูงมาก เมื่อเทียบกับวิธีที่ไม่ใช้ออกซิเดชันคือ 99.9959 %

การกำจัดเหล็กในรูปเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ น่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าการกำจัดเหล็กในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ เนื่องจากตะกอนของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์มีความอยู่ตัวมากกว่า ทำให้ไม่มีปัญหาจากการกำจัดตะกอนเหล็ก เพราะตะกอนเหล็กที่ได้ส่วนใหญ่จะมีการกำจัดโดยการนำไปฝังกลบ สภาวะที่เกิดขึ้นจากการฝังกลบจะมีความเป็นกรดสูง อาจจะทำให้ตะกอนเหล็กเกิดการละลายออกมาปนเปื้อนกับน้ำใต้ดินได้ ซึ่งการกำจัดเหล็กในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์จะเกิดปัญหานี้ได้มาก เนื่องจากค่าคงที่ของการละลายของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีค่ามากกว่าเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์มาก คือ $8x10^{-16}$ และ $4x10^{-38}$ ตามลำดับ (Lide, 1992) ดังนั้นความสามารถในการละลายของตะกอนทั้งสองในระดับพีเอชต่างๆจะมีความแตกต่างกัน แสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎี คือ ความสามารถในการละลายของตะกอนเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์เกิดได้มากกว่าเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ในระดับพีเอชเดียวกัน และตะกอนทั้งสองสามารถเกิดการละลายได้เมื่อระดับพีเอชลดลง

จากการทดลองในขั้นตอนนี้แสดงให้เห็นว่า การกำจัดเหล็กโดยใช้วิธีการออกซิเดชันสามารถกำจัดเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมมากกว่าในการกำจัดเหล็กที่ไม่ใช้ออกซิเดชัน เนื่องจากความสามารถในการตกตะกอน และการละลายของตะกอนทั้งสองมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยการกำจัดเหล็กที่ใช้วิธีออกซิเดชันมีความสามารถในการตกตะกอนมากกว่าและมีความสามารถในการละลายที่ต่ำกว่าการกำจัดเหล็กที่ไม่ใช้วิธีออกซิเดชัน

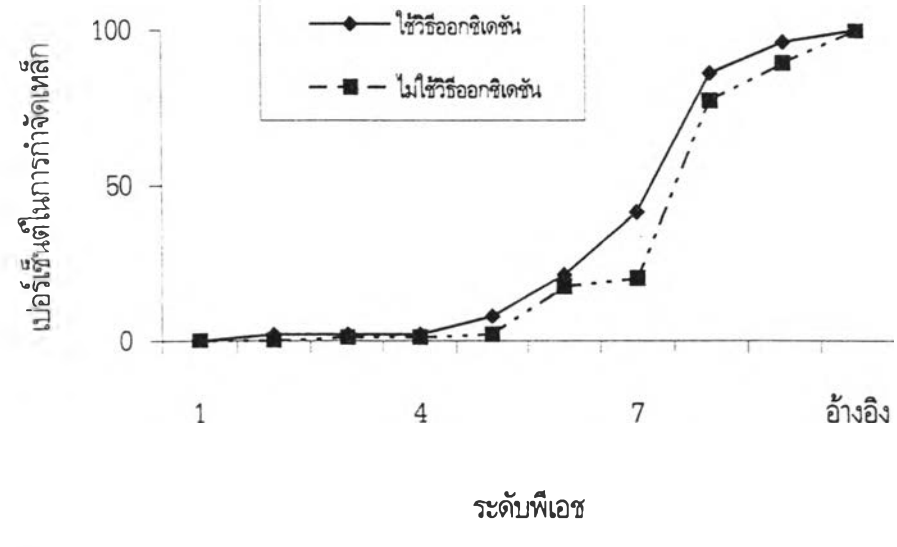
ดังนั้นการทดลองในขั้นตอนที่ 4.2 จะทดสอบความสามารถในการตกตะกอนของเหล็กที่ใช้วิธีออกซิเดชันในระดับพีเอชต่างๆ โดยใช้ปริมาณตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎีของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด เพื่อเปรียบเทียบหาวิธีการที่เหมาะสมในการกำจัดเหล็กที่มีดัชนีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับให้มีได้ในแหล่งน้ำ ได้แก่ ระดับพีเอช ค่าความเป็นเบส ค่าความกระด้าง และปริมาณเหล็กทั้งหมด

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ได้จากการกำจัดเหล็ก ของวิธีที่ใช้ออกซิเดชัน และวิธีที่ไม่ใช้ออกซิเดชัน ที่ระดับพีเอชต่างๆ

ระดับพีเอช เริ่มต้น	ใช้วิธีออกซิเดชัน		ไม่ใช้วิธีออกซิเดชัน	
	ปริมาณเหล็ก (กรัม/ลิตร)	ระดับพีเอชหลังทดลอง	ปริมาณเหล็ก (กรัม/ลิตร)	ระดับพีเอชหลังทดลอง
1	5.26	1.3	5.26	1.3
2	5.15	2.2	5.26	2.2
3	5.15	2.9	5.20	3.2
4	5.15	3.0	5.20	4.3
5	4.84	3.8	5.15	4.6
6	4.14	4.1	4.34	5.5
7	3.08	4.4	4.20	6.8
8	0.73	4.4	1.20	7.9
9	0.20	4.6	0.56	9.0
อ้างอิง	0.097 (มก./ล.)	12.5	0.215 (มก./ล.)	12.5

ตารางที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ที่ได้จากการกำจัดเหล็กที่ระดับพีเอชต่างๆ ของวิธีที่ใช้ออกซิเดชั่นและวิธีที่ไม่ใช้ออกซิเดชัน

ระดับพีเอช เริ่มต้น	เปอร์เซ็นต์การตกตะกอน	
	ใช้วิธีออกซิเดชัน	ไม่ใช่วิธีออกซิเดชัน
1	0.0000	0.0000
2	2.0913	0.0000
3	2.0913	1.1407
4	2.0913	1.1407
5	7.9848	2.0913
6	21.2928	17.4905
7	41.4449	20.1521
8	86.1217	77.1863
9	96.1977	89.3536
อ้างอิง	99.9982	99.9959



รูปที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ที่ได้จากการกำจัดเหล็กของวิธีที่ใช้ และไม่ใช้ออกซิเดชัน

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของวิธีที่ใช้ออกซิเดชันและวิธีที่ไม่ใช้ออกซิเดชัน ที่ระดับพีเอชต่างๆ

ระดับพีเอชเริ่มต้น	ปริมาณเหล็กทั้งหมด (กรัม/ลิตร)		ความแตกต่างทางสถิติ
	ใช้วิธีออกซิเดชัน	ไม่ใช้วิธีออกซิเดชัน	
1	5.26	5.26	ไม่แตกต่างกัน
2	5.15	5.26	แตกต่างกัน
3	5.15	5.20	แตกต่างกัน
4	5.15	5.20	แตกต่างกัน
5	4.84	5.15	แตกต่างกัน
6	4.14	4.34	แตกต่างกัน
7	3.08	4.20	แตกต่างกัน
8	0.73	1.20	แตกต่างกัน
9	0.20	0.56	แตกต่างกัน
อ้างอิง	0.097 (มก./ล.)	0.215 (มก./ล.)	แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการละลายของตะกอนเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ และเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ที่ระดับพีเอช 5-9

ระดับพีเอช	ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ละลาย	
	เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ (กรัม/ลิตร)	เฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ (มก./ล.)
5	3.471	0.097
6	2.070	0.095
7	1.010	0.087
8	0.391	0.076
9	0.112	0.067

4.2 ทดสอบความสามารถในการตกตะกอนโดยใช้ตัวออกซิไดซ์ ตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ที่ระดับพีเอช 5-9 และระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี (พีเอชอ้างอิง)

การทดลองนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์ทั้ง 4 ชนิด คือ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โซเดียมไฮโปคลอไรต์ อากาศ และโอโซน ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในระดับพีเอช 5-9 และระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี ดัชนีคุณภาพน้ำที่ได้จากการทดลองของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ได้แก่ ระดับพีเอช ค่าความเป็นเบส ค่าความกระด้าง ปริมาณเหล็กทั้งหมด และประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก โดยแสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.6 - 4.10 และรูปที่ 4.2 - 4.17

ประสิทธิภาพของการกำจัดเหล็กที่ได้ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ซึ่งนำไปวิเคราะห์ทางสถิติหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก การเปรียบเทียบทางสถิติทำโดยการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ One-way Analysis of Varience เพื่อทดสอบความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด ที่ α = 0.05 หากพบว่ามีความแปรปรวนในกลุ่มค่าเฉลี่ยนี้ จะทำการวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Multiple Comparison แบบ Duncan เพื่อหาว่าค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กคู่ใดที่มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งทำให้เกิดค่าความแปรปรวนดังกล่าว

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม โดยพิจารณาถึงชนิดของตัวออกซิไดซ์ ตัวช่วยตกตะกอน และระดับพีเอช ซึ่งแบ่งกลุ่มได้ดังนี้คือ

4.2.1 การเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด ที่ระดับพีเอชและตัวช่วยตกตะกอนเดียวกัน

4.2.2 การเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด ที่ระดับพีเอชต่างกัน แต่ตัวช่วยตกตะกอนเดียวกัน

4.2.3 การเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด ที่มีตัวช่วยตกตะกอนต่างกันแต่มีระดับพีเอชเดียวกัน

ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.11 - 4.13 และรูปที่ 4.18-4.28

ตารางที่ 4.6 แสดงระดับพีเอชเริ่มต้น และสุดท้ายที่ได้ของการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ระดับพีเอช		สภาวะ	ระดับพีเอช	
	เริ่มต้น	สุดท้าย		เริ่มต้น	สุดท้าย
$KMnO_4$/NaOH	5	7.6	NaOCl/NaOH	5	7.4
	6	8.0		6	8.1
	7	8.6		7	8.6
	8	9.1		8	9.1
	9	9.5		9	9.6
	12.5 (อ)	12.5		12.5 (อ)	12.5
$KMnO_4/Na_2CO_3$	5	7.8	$NaOCl/Na_2CO_3$	5	7.7
	6	8.5		6	8.4
	7	8.7		7	8.7
	8	8.9		8	8.9
	9	9.3		9	9.2
	9.5 (อ)	9.5		9.5 (อ)	9.5
$KMnO_4/Ca(OH)_2$	5	6.4	$NaOCl/Ca(OH)_2$	5	6.4
	6	7.4		6	7.4
	7	7.7		7	7.6
	8	8.0		8	7.9
	9	8.4		9	8.3
	12.5 (อ)	11.8		12.5 (อ)	11.7

หมายเหตุ : (อ) หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี

ตารางที่ 4.6 ต่อ

สภาวะ	ระดับพีเอช		สภาวะ	ระดับพีเอช	
	เริ่มต้น	สุดท้าย		เริ่มต้น	สุดท้าย
อากาศ/NaOH	5	7.4	โอโซน/NaOH	5	7.5
	6	8.0		6	8.2
	7	8.6		7	8.6
	8	8.9		8	9.0
	9	9.4		9	9.5
	12.5 (อ)	12.5		12.5 (อ)	12.2
อากาศ/Na_2CO_3	5	7.7	โอโซน/Na_2CO_3	5	7.8
	6	8.3		6	8.2
	7	8.6		7	8.6
	8	8.8		8	8.9
	9	9.2		9	9.3
	9.5 (อ)	9.5		9.5 (อ)	9.5
อากาศ/$Ca(OH)_2$	5	6.4	โอโซน/$Ca(OH)_2$	5	6.4
	6	7.4		6	7.4
	7	7.6		7	7.6
	8	7.9		8	7.9
	9	8.4		9	8.2
	12.5 (อ)	11.3		12.5 (อ)	11.8

หมายเหตุ : (อ) หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความเป็นเบสที่ได้ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดที่ระดับพีเอชต่างๆ

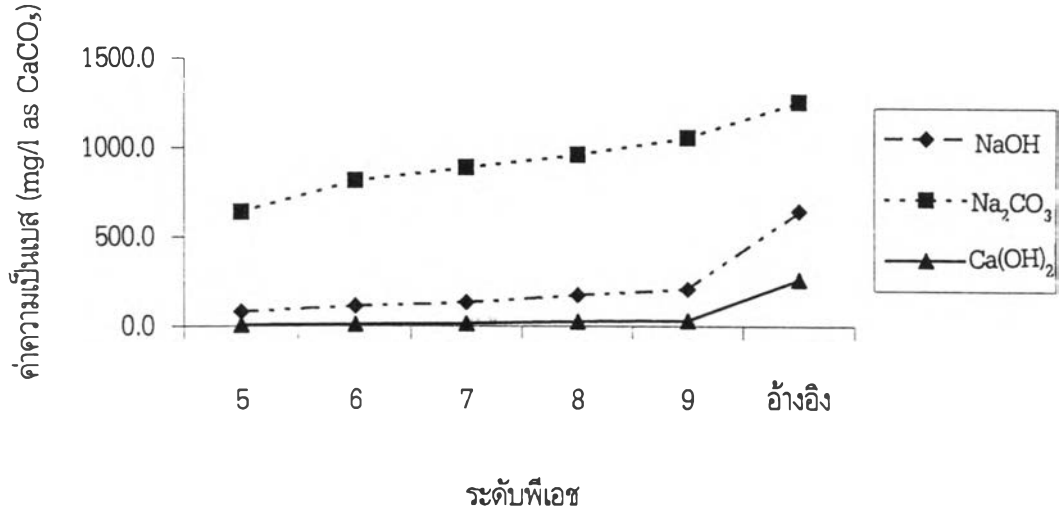
สภาวะ	ระดับพีเอช	ค่าความเป็นเบส (มก/ล)	สภาวะ	ระดับพีเอช	ค่าความเป็นเบส (มก/ล)
$KMnO_4$/NaOH	5	81.5	NaOCl/NaOH	5	75.5
	6	112.9		6	112.9
	7	131.9		7	133.9
	8	172.1		8	171.4
	9	206.1		9	210.0
	12.5 (อ)	645.1		12.5 (อ)	646.9
$KMnO_4/Na_2CO_3$	5	639.1	$NaOCl/Na_2CO_3$	5	645.6
	6	815.7		6	816.3
	7	888.9		7	887.6
	8	961.3		8	979.4
	9	1,057.9		9	1,066.2
	9.5 (อ)	1,258		9.5 (อ)	1,224.4
$KMnO_4/Ca(OH)_2$	5	8.2	$NaOCl/Ca(OH)_2$	5	8.2
	6	11.9		6	11.4
	7	15.1		7	14.9
	8	26.0		8	23.8
	9	31.7		9	31.7
	12.5 (อ)	259.3		12.5 (อ)	274.1

หมายเหตุ : (อ) หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี

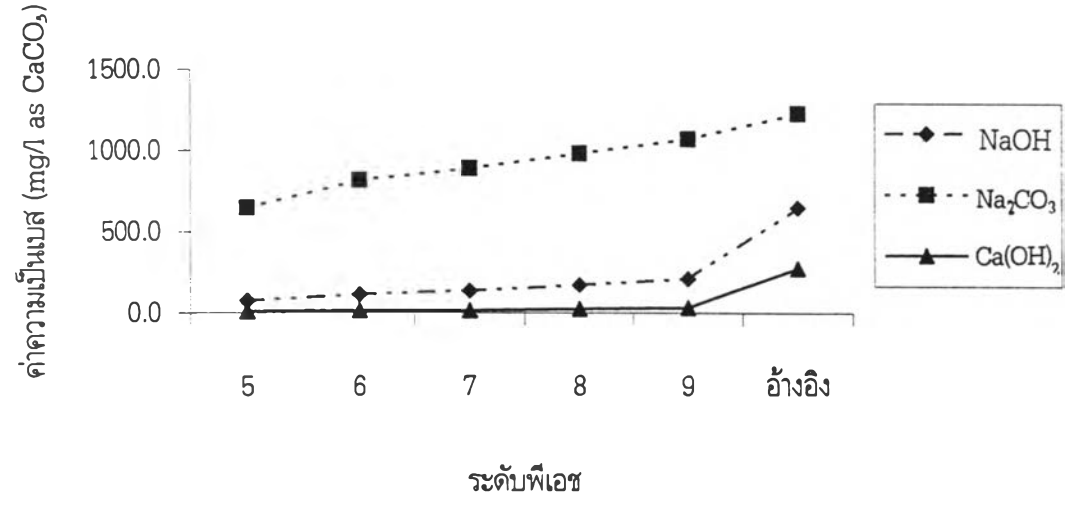
ตารางที่ 4.7 ต่อ

สภาวะ	ระดับพีเอช	ค่าความเป็นเบส (มก/ล)	สภาวะ	ระดับพีเอช	ค่าความเป็นเบส (มก/ล)
อากาศ/NaOH	5	77.5	โอโซน/NaOH	5	80.3
	6	110.2		6	115.3
	7	137.6		7	137.1
	8	163.2		8	167.0
	9	209.1		9	212.1
	12.5 (อ)	664.7		12.5 (อ)	656.9
อากาศ/Na_2CO_3	5	624.7	โอโซน/Na_2CO_3	5	628.3
	6	816.8		6	816.0
	7	879.2		7	870.4
	8	975.2		8	971.0
	9	1,064.7		9	1,066.0
	9.5 (อ)	1,293.3		9.5 (อ)	1,227.6
อากาศ/$Ca(OH)_2$	5	8.2	โอโซน/$Ca(OH)_2$	5	8.2
	6	12.8		6	12.9
	7	15.9		7	15.1
	8	24.4		8	24.2
	9	31.5		9	31.5
	12.5 (อ)	261.0		12.5 (อ)	277.4

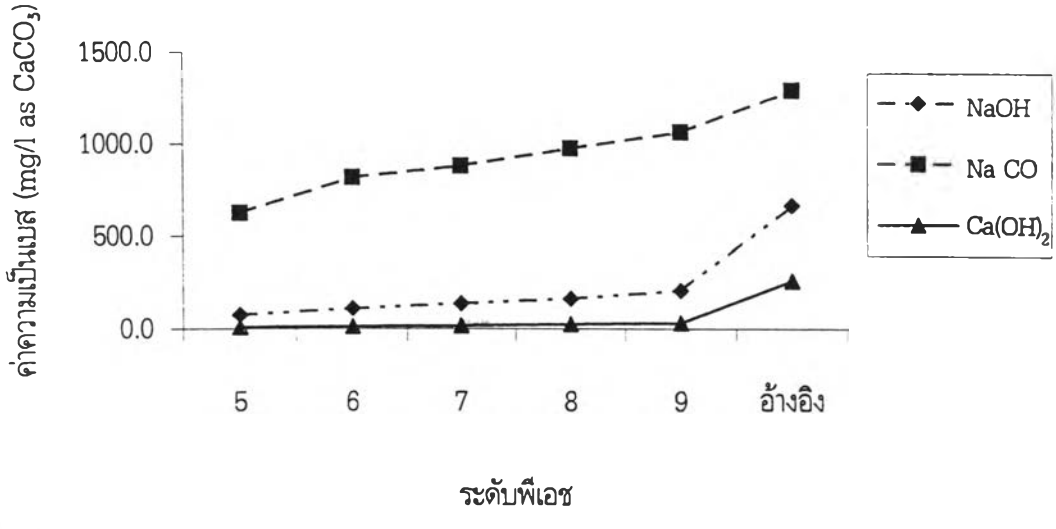
หมายเหตุ : (อ) หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี



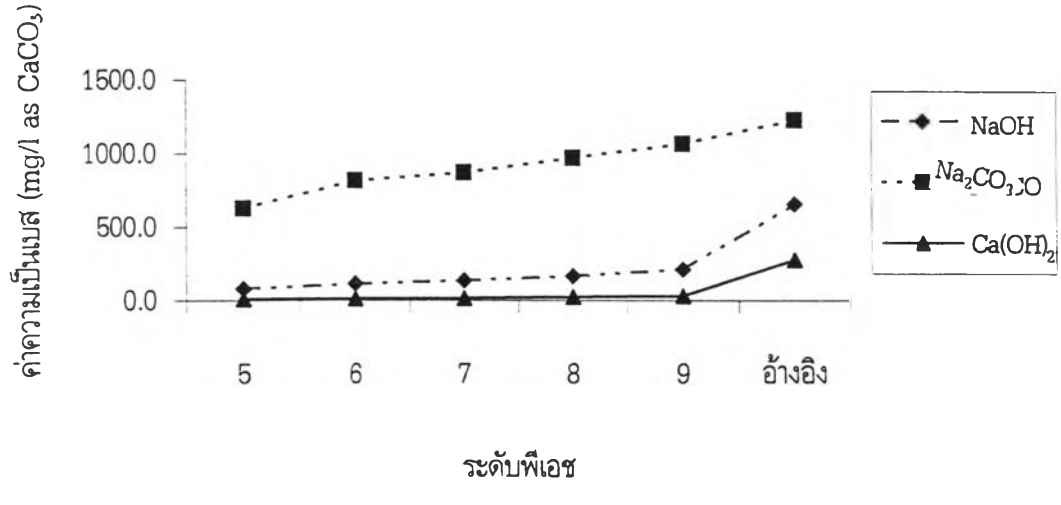
รูปที่ 4.2 แสดงค่าความเป็นเบสที่ได้หลังจากการกำจัดเหล็ก โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความเป็นเบสที่ได้หลังจากการกำจัดเหล็ก โดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง



รูปที่ 4.4 แสดงค่าความเป็นเบสที่ได้หลังจากการกำจัดเหล็ก โดยใช้อากาศ ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง



รูปที่ 4.5 แสดงค่าความเป็นเบสที่ได้หลังจากการกำจัดเหล็ก โดยใช้โอโซน ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความกระด้างที่ได้ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดที่ระดับพีเอชต่างๆ

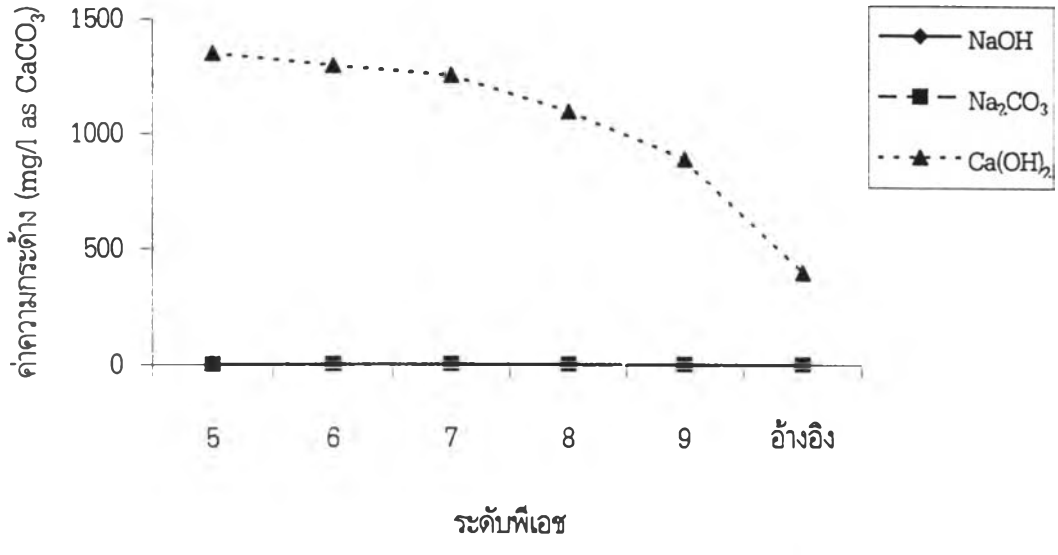
สภาวะ	ระดับพีเอช	ค่าความกระด้าง(มก/ล)	สภาวะ	ระดับพีเอช	ค่าความกระด้าง(มก/ล)
$KMnO_4$/NaOH	5	0.0	NaOCl/NaOH	5	0.0
	6	0.0		6	0.0
	7	0.0		7	0.0
	8	0.0		8	0.0
	9	0.0		9	0.0
	12.5 (อ)	0.0		12.5 (อ)	0.0
$KMnO_4/Na_2CO_3$	5	0.0	$NaOCl/Na_2CO_3$	5	0.0
	6	0.0		6	0.0
	7	0.0		7	0.0
	8	0.0		8	0.0
	9	0.0		9	0.0
	9.5 (อ)	0.0		9.5 (อ)	0.0
$KMnO_4/Ca(OH)_2$	5	1,350.0	$NaOCl/Ca(OH)_2$	5	1,310.0
	6	1,296.7		6	1,290.0
	7	1,253.3		7	1,156.7
	8	1,096.7		8	1,080.0
	9	890.0		9	866.7
	12.5 (อ)	396.7		12.5 (อ)	396.7

หมายเหตุ : (อ) หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี

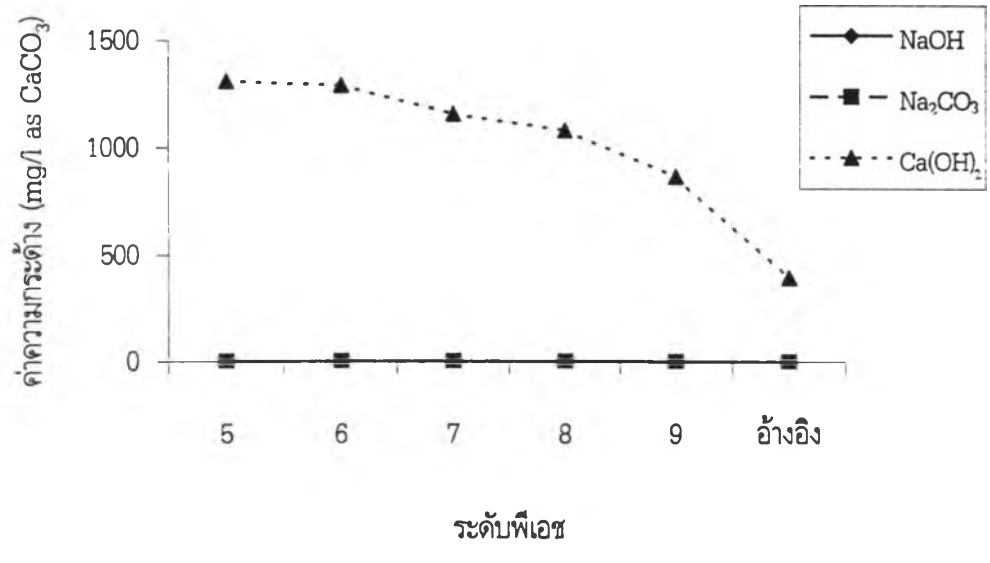
ตารางที่ 4.8 ต่อ

สภาวะ	ระดับพีเอช	ค่าความกระด้าง(มก/ล)	สภาวะ	ระดับพีเอช	ค่าความกระด้าง(มก/ล)
อากาศ/NaOH	5	0.0	โอโซน/NaOH	5	0.0
	6	0.0		6	0.0
	7	0.0		7	0.0
	8	0.0		8	0.0
	9	0.0		9	0.0
	12.5 (อ)	0.0		12.5 (อ)	0.0
อากาศ/Na_2CO_3	5	0.0	โอโซน/Na_2CO_3	5	0.0
	6	0.0		6	0.0
	7	0.0		7	0.0
	8	0.0		8	0.0
	9	0.0		9	0.0
	9.5 (อ)	0.0		9.5 (อ)	0.0
อากาศ/$Ca(OH)_2$	5	1,303.3	โอโซน/$Ca(OH)_2$	5	1,293.3
	6	1,270.0		6	1,260.0
	7	1,153.3		7	1,143.3
	8	1,090.0		8	1,073.3
	9	863.3		9	856.7
	12.5 (อ)	386.7		12.5 (อ)	386.7

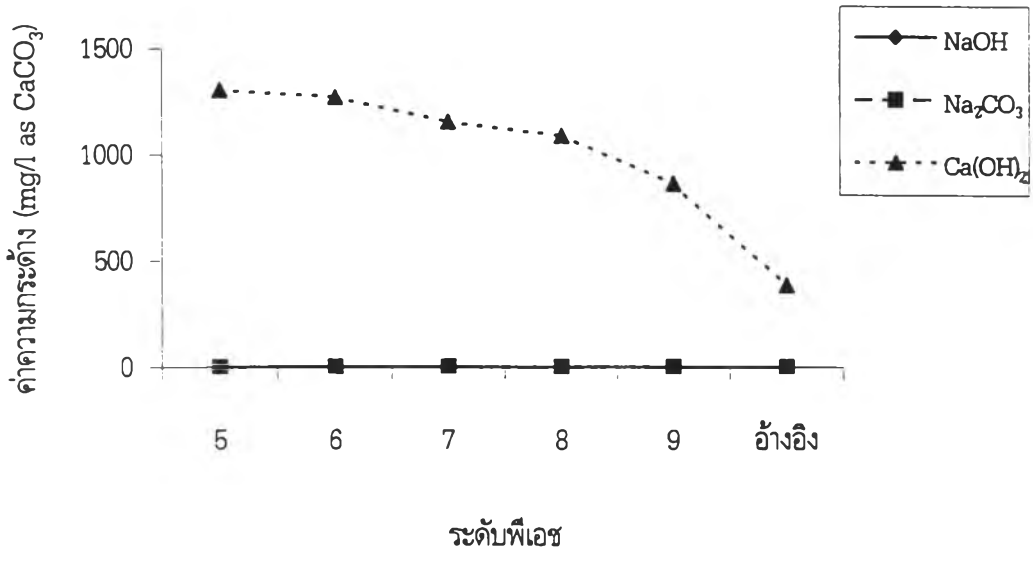
หมายเหตุ : (อ) หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี



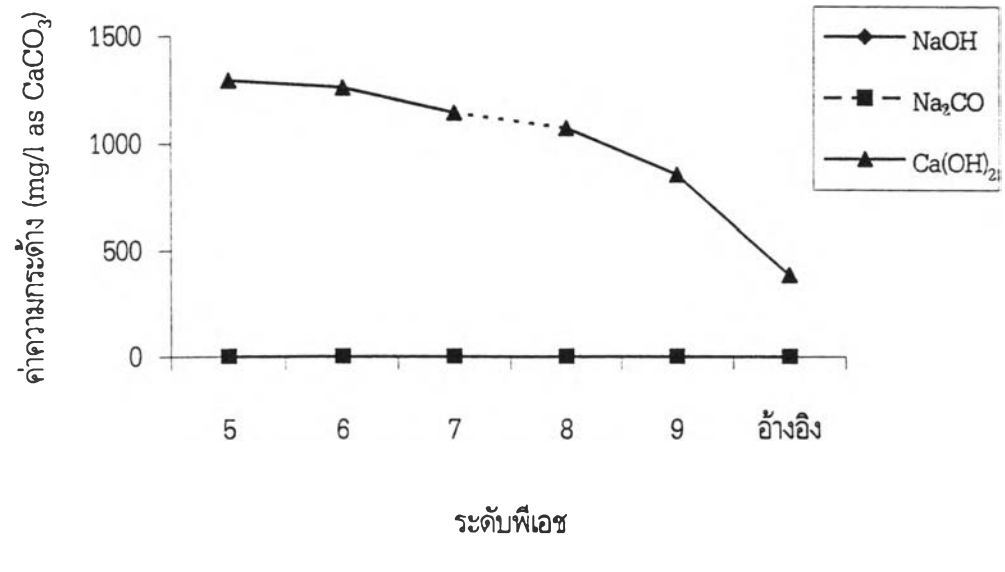
รูปที่ 4.6 แสดงค่าความกระด้างที่ได้หลังจากการกำจัดเหล็ก โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง



รูปที่ 4.7 แสดงค่าความกระด้างที่ได้หลังจากการกำจัดเหล็ก โดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง



รูปที่ 4.8 แสดงค่าความกระด้างที่ได้หลังจากการกำจัดเหล็ก โดยใช้อากาศ ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง



รูปที่ 4.9 แสดงค่าความกระด้างที่ได้หลังจากการกำจัดเหล็ก โดยใช้โอโซน ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง

ตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณเหล็กทั้งหมดของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดที่ระดับพีเอชต่างๆ

สภาวะ	ระดับพีเอช	เหล็ก (มก./ล.)	หมายเหตุ	สภาวะ	ระดับพีเอช	เหล็ก (มก./ล.)	หมายเหตุ
$KMnO_4$/	5	0.112	ไม่เกิน	NaOCl/	5	0.133	ไม่เกิน
NaOH	6	0.107	ไม่เกิน	NaOH	6	0.124	ไม่เกิน
	7	0.105	ไม่เกิน		7	0.112	ไม่เกิน
	8	0.100	ไม่เกิน		8	0.103	ไม่เกิน
	9	0.096	ไม่เกิน		9	0.100	ไม่เกิน
	อ้างอิง	0.087	ไม่เกิน		อ้างอิง	0.094	ไม่เกิน
$KMnO_4$/	5	0.147	ไม่เกิน	NaOCl/	5	0.197	ไม่เกิน
Na_2CO_3	6	0.119	ไม่เกิน	Na_2CO_3	6	0.183	ไม่เกิน
	7	0.112	ไม่เกิน		7	0.181	ไม่เกิน
	8	0.110	ไม่เกิน		8	0.169	ไม่เกิน
	9	0.106	ไม่เกิน		9	0.166	ไม่เกิน
	อ้างอิง	0.097	ไม่เกิน		อ้างอิง	0.166	ไม่เกิน
$KMnO_4$/	5	0.421	เกิน	NaOCl/	5	0.346	เกิน
$Ca(OH)_2$	6	0.390	เกิน	$Ca(OH)_2$	6	0.269	ไม่เกิน
	7	0.374	เกิน		7	0.249	ไม่เกิน
	8	0.265	ไม่เกิน		8	0.229	ไม่เกิน
	9	0.129	ไม่เกิน		9	0.227	ไม่เกิน
	อ้างอิง	0.084	ไม่เกิน		อ้างอิง	0.201	ไม่เกิน

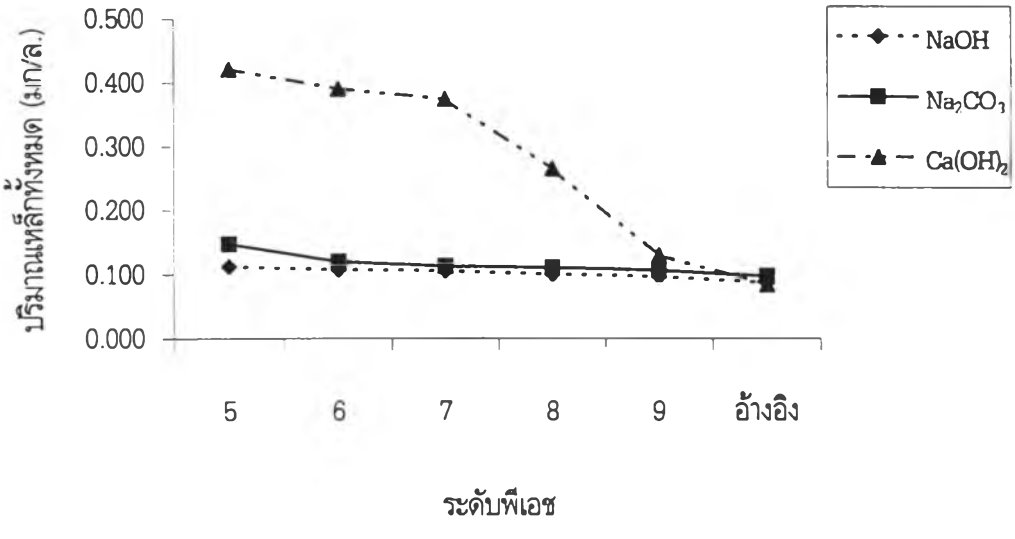
หมายเหตุ : ปริมาณเหล็กทั้งหมดเฉลี่ยที่ได้เทียบกับค่ามาตรฐาน (0.300 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ระดับพีเอชอ้างอิง หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี

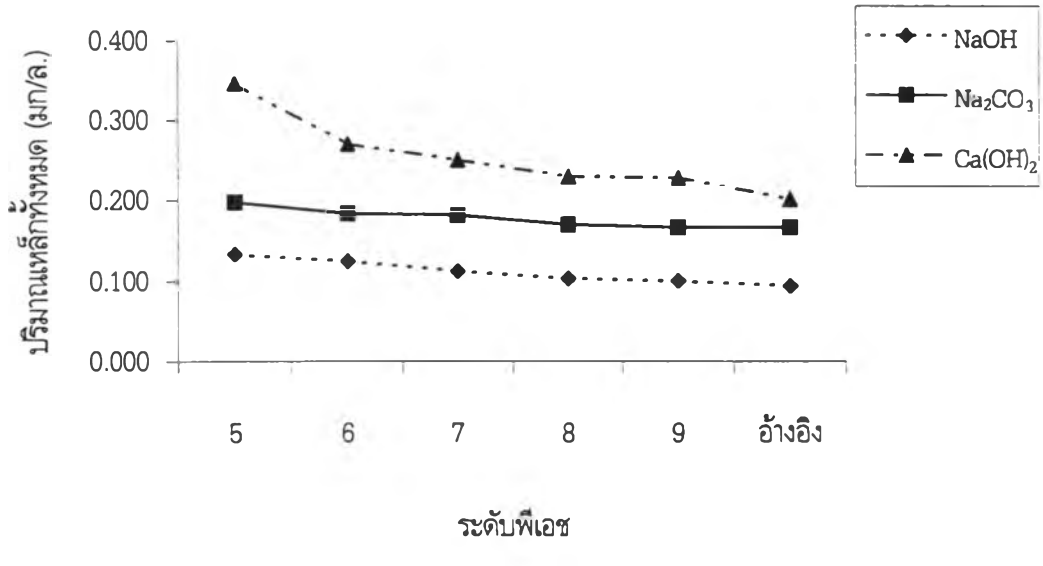
ตารางที่ 4.9 ต่อ

สภาวะ	ระดับพีเอช	เหล็ก (มก./ล.)	หมายเหตุ	สภาวะ	ระดับพีเอช	เหล็ก (มก./ล.)	หมายเหตุ
อากาศ/	5	0.097	ไม่เกิน	โอโซน/	5	0.210	ไม่เกิน
NaOH	6	0.095	ไม่เกิน	NaOH	6	0.206	ไม่เกิน
	7	0.087	ไม่เกิน		7	0.196	ไม่เกิน
	8	0.076	ไม่เกิน		8	0.196	ไม่เกิน
	9	0.067	ไม่เกิน		9	0.183	ไม่เกิน
	อ้างอิง	0.059	ไม่เกิน		อ้างอิง	0.175	ไม่เกิน
อากาศ/	5	0.109	ไม่เกิน	โอโซน/	5	0.241	ไม่เกิน
Na_2CO_3	6	0.100	ไม่เกิน	Na_2CO_3	6	0.233	ไม่เกิน
	7	0.087	ไม่เกิน		7	0.229	ไม่เกิน
	8	0.085	ไม่เกิน		8	0.227	ไม่เกิน
	9	0.079	ไม่เกิน		9	0.227	ไม่เกิน
	อ้างอิง	0.075	ไม่เกิน		อ้างอิง	0.221	ไม่เกิน
อากาศ/	5	0.346	เกิน	โอโซน/	5	0.300	ไม่เกิน
$Ca(OH)_2$	6	0.319	เกิน	$Ca(OH)_2$	6	0.262	ไม่เกิน
	7	0.298	ไม่เกิน		7	0.221	ไม่เกิน
	8	0.265	ไม่เกิน		8	0.190	ไม่เกิน
	9	0.248	ไม่เกิน		9	0.183	ไม่เกิน
	อ้างอิง	0.215	ไม่เกิน		อ้างอิง	0.161	ไม่เกิน

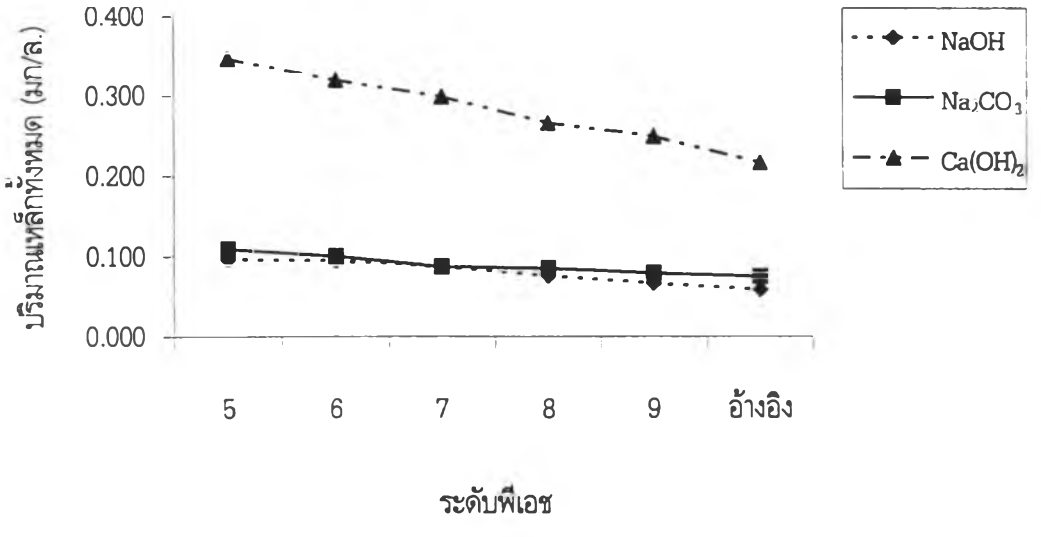
หมายเหตุ : ปริมาณเหล็กทั้งหมดเฉลี่ยที่ได้เทียบกับค่ามาตรฐาน (0.300 มิลลิกรัมต่อลิตร)
ระดับพีเอชอ้างอิง หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี



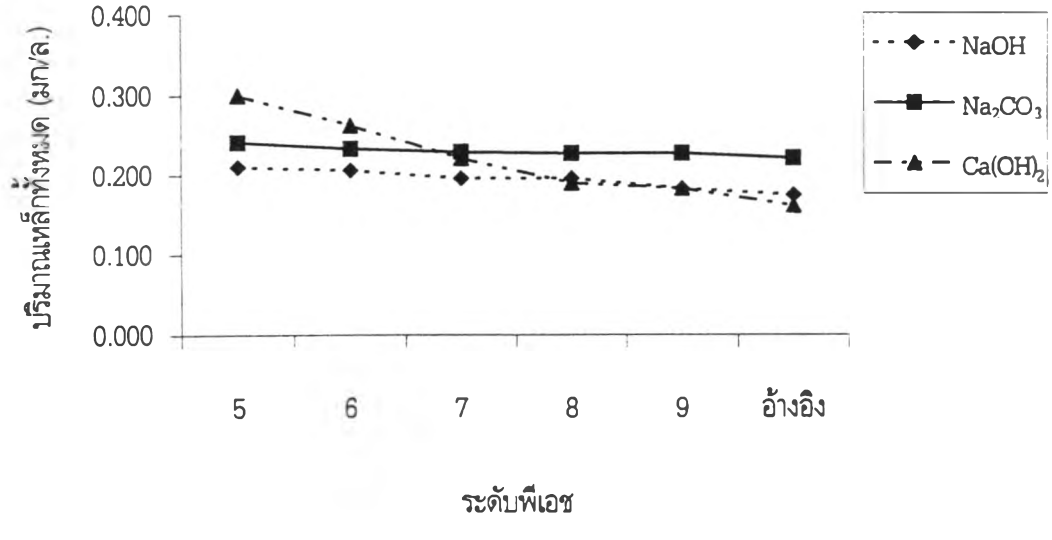
รูปที่ 4.10 แสดงปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ได้หลังการกำจัดเหล็ก โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง



รูปที่ 4.11 แสดงปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ได้หลังการกำจัดเหล็ก โดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง



รูปที่ 4.12 แสดงปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ได้หลังการกำจัดเหล็ก โดยใช้อากาศ ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง

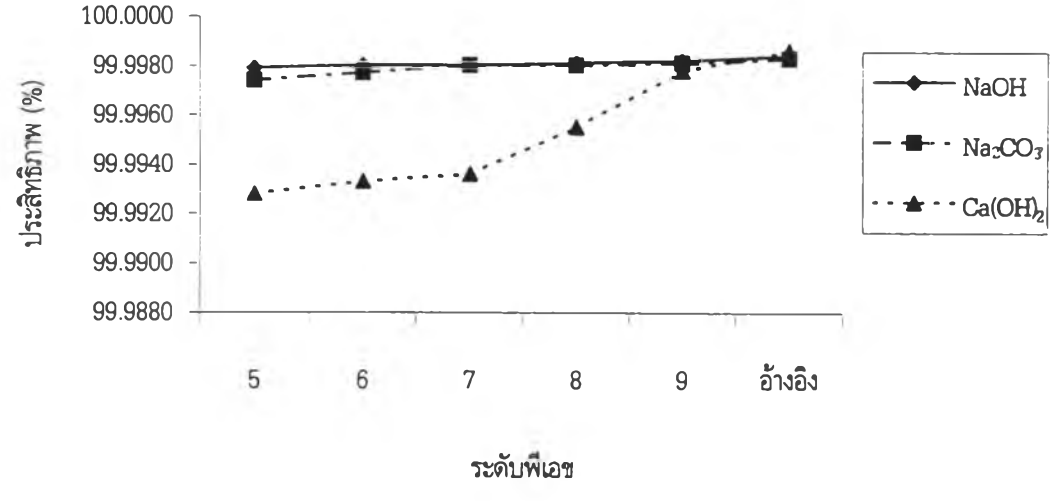


รูปที่ 4.13 แสดงปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ได้หลังการกำจัดเหล็ก โดยใช้โอโซน ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง

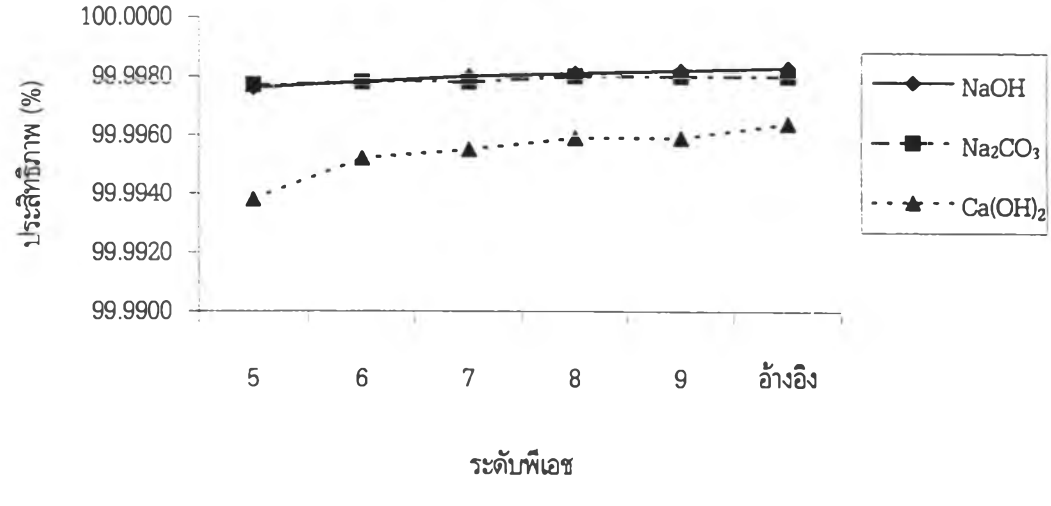
ตารางที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสีย โดยใช้วิธีออกซิเดชัน ร่วมกับการตกตะกอน ที่ระดับพีเอชต่างๆ

ตัวช่วยตกตะกอน	ระดับพีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก (%) ของตัวออกซิไดซ์			
		$KMnO_4$	NaOCl	อากาศ	โอโซน
NaOH	5	99.9979	99.9976	99.9983	99.9962
	6	99.9980	99.9978	99.9983	99.9963
	7	99.9980	99.9980	99.9984	99.9965
	8	99.9981	99.9981	99.9986	99.9965
	9	99.9982	99.9982	99.9988	99.9967
	อ้างอิง	99.9984	99.9983	99.9989	99.9969
Na_2CO_3	5	99.9974	99.9977	99.9983	99.9957
	6	99.9977	99.9978	99.9984	99.9958
	7	99.9980	99.9978	99.9986	99.9959
	8	99.9980	99.9980	99.9986	99.9959
	9	99.9981	99.9980	99.9988	99.9959
	อ้างอิง	99.9983	99.9980	99.9988	99.9961
$Ca(OH)_2$	5	99.9928	99.9938	99.9924	99.9946
	6	99.9933	99.9952	99.9940	99.9953
	7	99.9936	99.9955	99.9945	99.9960
	8	99.9955	99.9959	99.9948	99.9966
	9	99.9978	99.9959	99.9957	99.9967
	อ้างอิง	99.9986	99.9964	99.9963	99.9971

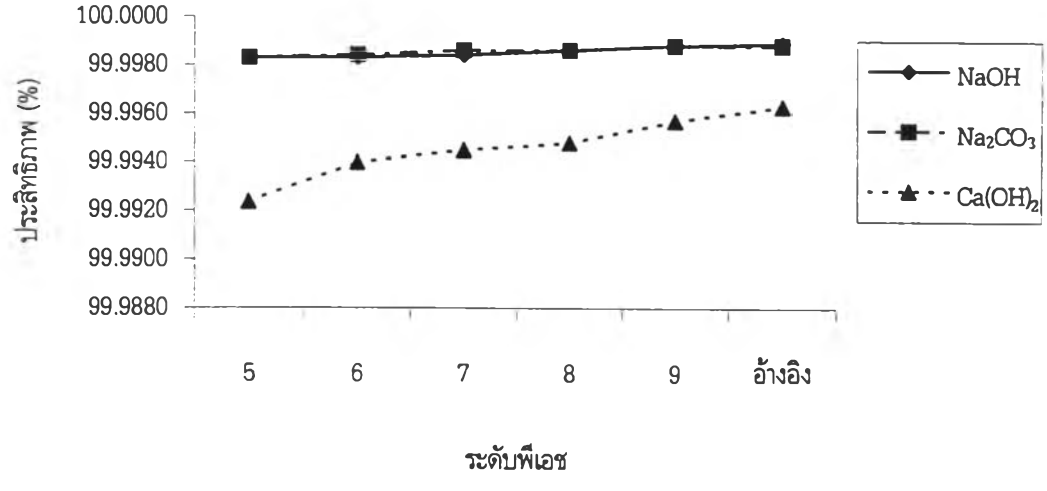
หมายเหตุ : ระดับพีเอชอ้างอิง หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี



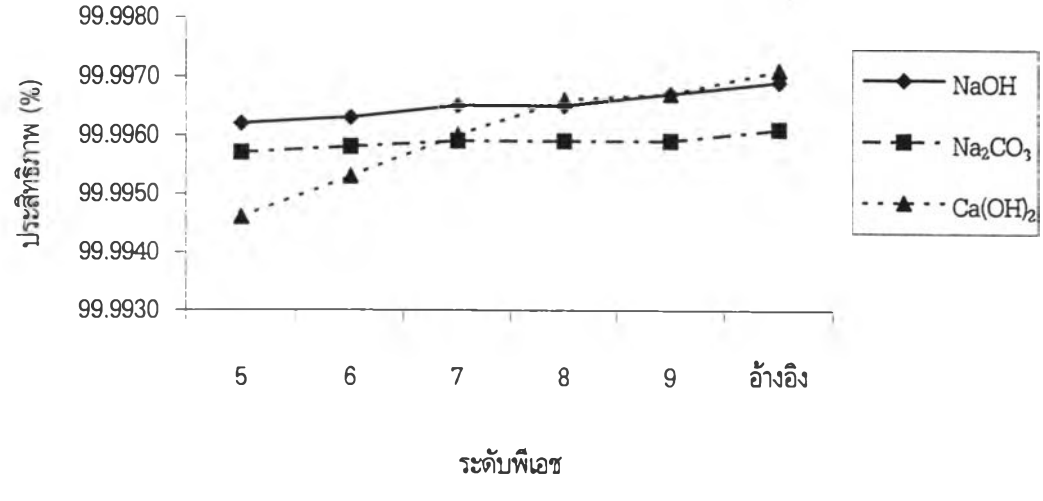
รูปที่ 4.14 แสดงประสิทธิภาพที่ได้หลังจากการกำจัดเหล็ก โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง



รูปที่ 4.15 แสดงประสิทธิภาพที่ได้หลังจากการกำจัดเหล็ก โดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง



รูปที่ 4.16 แสดงประสิทธิภาพที่ได้หลังจากการกำจัดเหล็ก โดยใช้อากาศ
ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง



รูปที่ 4.17 แสดงประสิทธิภาพที่ได้หลังจากการกำจัดเหล็ก โดยใช้โอโซน
ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

ดัชนีคุณภาพน้ำ

ก. ระดับพีเอช (pH)

หลังการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ระดับพีเอชที่ได้ จะมีค่ามากกว่าระดับพีเอชที่กำหนดไว้ทุกระดับพีเอช ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4.6 ระดับพีเอชที่ได้ของตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันดังนี้ คือ กรณีที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ระดับพีเอชที่ได้ คือ 7.5, 8.0, 8.6, 9.0, 9.5 และ 12.5 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับโซเดียมคาร์บอเนต คือ 7.7, 8.3, 8.7, 8.9, 9.3 และ9.5 ตามลำดับ แต่สำหรับกรณีที่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ระดับพีเอชที่ได้ส่วนใหญ่มีสภาวะเป็นกลางถึงเบสอ่อน คือ 6.4, 7.4, 7.6, 8.0, 8.3 และ 11.8 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์สามารถละลายได้บางส่วนในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งการละลายของตะกอนนี้ จะทำให้ได้อนุมูลไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้น มีผลให้ระดับพีเอชที่กำหนดไว้มีค่าเพิ่มขึ้น

ข. ค่าความเป็นเบส (alkalinity)

หลังการกำจัดเหล็กด้วยตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ค่าความเป็นเบสของน้ำที่ได้ของตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับระดับพีเอช คือ ค่าความเป็นเบสแปรผันตรงกับระดับพีเอช เมื่อระดับพีเอชเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นเบสเพิ่มขึ้นด้วย ของตัวช่วยตกตะกอนทุกชนิด ซึ่งรายละเอียดแสดงได้ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.2-4.5

คุณสมบัติของตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน คือ โซเดียมคาร์บอเนตจะให้ค่าความเป็นเบสมากที่สุด รองลงมาเป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดจะให้อนุมูลแอนไอออนแตกต่างกัน ได้แก่ คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เป็นต้น และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดมีสภาพความแรงของการเป็นเบสแตกต่างกันด้วย

จะเห็นได้ว่า แนวโน้มของค่าความเป็นเบสของโซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพีเอชเพิ่มขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.2-4.5 ที่ระดับพีเอช 5-9 ค่าความเป็นเบสเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน แต่ที่ระดับพีเอชอ้างอิงจะมีค่าความเป็นเบสมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากระดับพีเอชอ้างอิงเกิดจากการใช้ปริมาณตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี

ที่คำนวณได้ ดังนั้นความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน หรือคาร์บอเนตไอออนจึงมีปริมาณสูงมาก ประกอบกับสภาพความเป็นเบสของตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดมีค่าคงที่ของความเป็นกรด-เบส (K_a หรือ K_b) ที่แตกต่างกัน (Lide, 1992) ทำให้ค่าความเป็นเบสที่ได้ในระดับพีเอชอ้างอิงมีค่าสูง

ค่าความเป็นเบสที่ได้จากโซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากสภาพความเป็นเบสของตัวช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดนี้แตกต่างกัน สภาพความเป็นเบสของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่าโซเดียมคาร์บอเนต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ แต่ค่าความเป็นเบสของโซเดียมคาร์บอเนตมีค่ามากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากอนุมูลไอออนที่แสดงค่าความเป็นเบสคือ คาร์บอเนตไอออน ซึ่งมีสภาพความเป็นเบสน้อยกว่าไฮดรอกไซด์ไอออน แต่สัดส่วนในการทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกเป็น 2 เท่าของไฮดรอกไซด์ไอออน จึงทำให้มีค่าความเป็นเบสมากที่สุด สำหรับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ค่าความเป็นเบสมีค่าน้อยที่สุด เพราะมีสภาพความเป็นเบสอ่อน และการละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าต่ำ จึงทำให้มีความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ต่ำ มีผลให้ค่าความเป็นเบสต่ำด้วย

ค. ค่าความกระด้าง (hardness)

จากผลการทดลองพบว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนตไม่มีผลต่อความกระด้างของน้ำ เนื่องจากอนุมูลไอออนที่ได้จากการใช้ตัวช่วยตกตะกอนทั้ง 2 ชนิดนี้ คือ โซเดียมไอออน เพราะความกระด้างส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) หรือแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ดังนั้นการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีผลต่อความกระด้างของน้ำอย่างมาก ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.6-4.9

ผลของค่าความกระด้างของการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับพีเอชต่างๆ ของตัวออกซิไดซ์ทุกชนิด แสดงให้เห็นว่าค่าความกระด้างแปรผกผันกับระดับพีเอช คือ เมื่อระดับพีเอชเพิ่มขึ้น ค่าความกระด้างจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำมีค่าน้อยมาก และในสภาวะความเป็นเบส แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะละลายได้ยากขึ้น ทำให้มีปริมาณของแคลเซียมไอออนน้อยกว่าในสภาวะที่เป็นกรด ความกระด้างจึงมีค่าต่ำ แต่ในสภาวะที่เป็นกรดแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการละลายได้มากขึ้น ค่าความกระด้างจึงสูงขึ้น ค่าความกระด้างที่ได้ตามระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง คือ 1,314.2, 1,280.0, 1,150.0, 1,080.0, 870.0 และ 390.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ

ง. ปริมาณเหล็กทั้งหมด (total iron)

ปริมาณเหล็กทั้งหมดของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 - 4.13 พบว่าปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ได้เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานปริมาณเหล็กที่ยอมให้มีได้ในแหล่งน้ำไม่มากกว่า 0.300 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น ส่วนใหญ่ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ได้จะมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน ยกเว้นที่ระดับพีเอช 5-7 ของวิธีที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะมีปริมาณเหล็กทั้งหมดมากกว่า 0.300 มิลลิกรัม คือ 0.421, 0.390 และ 0.374 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่ระดับพีเอช 5 ของวิธีที่ใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณเหล็กทั้งหมด 0.346 มิลลิกรัมต่อลิตร และวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับพีเอช 5 และ 6 ปริมาณเหล็กทั้งหมดเป็น 0.346 และ 0.319 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้เช่นกัน

จากตารางที่ 4.9 พบว่าปริมาณเหล็กทั้งหมดจากวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าต่ำสุด รองลงมาคือ อากาศร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต โอโซนร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ โอโซนร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต โอโซนร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ

จากงานวิจัยของ Robinson และ Dixon (1968) พบว่าการใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวออกซิไดซ์ร่วมกับปูนขาว สามารถออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสได้ 100 % ที่ระดับพีเอช 5.5-7.0 และวิธีที่ใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์จะสามารถกำจัดเหล็กได้เพียง 20 % เท่านั้น ที่ระดับพีเอช 6.5-7.0 ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดลองที่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวศึกษาการกำจัดเหล็กออกจากน้ำบาดาลที่มีค่าความเป็นเบสต่ำ ซึ่งปริมาณเหล็กที่ต้องการกำจัดมีปริมาณที่น้อยและแตกต่างจากการทดลองในครั้งนี้มาก และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงจึงสามารถออกซิไดซ์เหล็กในน้ำบาดาลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า สำหรับกรณีที่ใช้อากาศ งานวิจัยของ Robinson และ Dixon (1968) ใช้เวลาเพียง 2 นาที จึงน่าจะทำให้เหล็กเฟอร์รัสถูกออกซิไดซ์ได้เพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น

จ. ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก

ในแต่ละวิธีการกำจัดเหล็กโดยใช้ตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กลดลงเมื่อระดับพีเอชลดลง เนื่องจากตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์มีความเสถียร และมีความอยู่ตัวในสภาวะที่เป็นเบส ซึ่งสามารถละลายได้บางส่วนในสภาวะที่เป็นกรดหรือกลาง ที่ระดับพีเอชอ้างอิงประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กจึงมีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วง 99.9961-99.9988 % โดยแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.14-4.17

ความสามารถในการออกซิไดซ์ และตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์

ความสามารถในการกำจัดเหล็กโดยใช้ตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด จะมีลักษณะที่แตกต่างกันในกระบวนการกำจัดเหล็กในน้ำ ทั้งนี้ขึ้นกับความสามารถของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด และสภาพความเป็นเบสของตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดด้วย เนื่องจากสภาวะในการออกซิไดซ์ของแต่ละชนิดตัวออกซิไดซ์แตกต่างกัน (Knocke, 1991) จากการทดลองสามารถสรุปวิธีการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิดได้ดังนี้

ก. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสให้เป็นเหล็กเฟอร์ริคได้ในสภาวะที่เป็นกรด โดยที่ไม่ต้องเติมตัวช่วยตกตะกอน เพื่อให้เกิดตะกอนเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ก่อน แล้วจึงออกซิไดซ์เปลี่ยนเป็นเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง หลังจากเกิดการออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์แล้ว จึงเติมตัวช่วยตกตะกอนลงไป ทำให้ได้ตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ที่สามารถกำจัดเหล็กออกจากน้ำได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับ Willy และ Jenning (1963) ในการใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตกำจัดเหล็ก พบว่าสามารถกำจัดเหล็กได้สูงมากกว่ากรณีที่ไม่ใช้ตัวออกซิไดซ์

ข. โซเดียมไฮโปคลอไรต์ โอโซน และอากาศ

ตัวออกซิไดซ์ทั้ง 3 ชนิดนี้มีความสามารถในการออกซิไดซ์ต่ำกว่าโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตตามลำดับ ซึ่งสภาวะในการเกิดออกซิไดซ์จะเกิดได้ดีในสภาวะที่เป็นกลางหรือเบส ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้ต้องเติมตัวช่วยตกตะกอน เพื่อให้เกิดตะกอนเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ก่อน แล้วจึงเติมตัวออกซิไดซ์ลงไปเพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์ตะกอนเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ไปเป็นเฟอร์ริค

ไฮดรอกไซด์ในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสีย จากงานวิจัยของ Ficek (1980) พบว่าการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ จะต้องใช้ปริมาณที่มากกว่าทางทฤษฎี เพราะไฮโปคลอไรต์บางส่วนสามารถเปลี่ยนรูปได้ และเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ง่าย นอกจากนี้การใช้โอโซน และอากาศ ถ้ามีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น คอปเปอร์ซัลเฟตอย่างน้อย 0.1 มิลลิกรัม จะช่วยให้ใช้เวลาในการกำจัดเหล็กได้น้อยลง และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

สำหรับกรณีตัวช่วยตกตะกอน ความสามารถในการละลายและสภาพความเป็นเบสมีผลต่อการตกตะกอนเหล็กเช่นกัน

ค. โซเดียมไฮดรอกไซด์

มีคุณสมบัติเป็นสารที่ละลายน้ำได้ง่าย และมีสภาพความเป็นเบสแก่ ดังนั้นความสามารถในการตกตะกอนจึงเกิดได้ง่าย และรวดเร็ว โดยสอดคล้องกับการศึกษาของ Engelbrecht และคณะ (1967) พบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการเพิ่มค่าความเป็นเบส และระดับพีเอช ซึ่งเหมาะสมกับน้ำที่มีเหล็กสูง โดยจะช่วยให้เกิดตะกอนได้ง่าย

ง. โซเดียมคาร์บอเนต

คุณสมบัติคล้ายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่มีสภาพความเป็นเบสที่อ่อนกว่า อีกทั้งสภาพความเป็นเบสจะอยู่ในรูปคาร์บอเนตไอออน แต่จะมีค่าความเป็นเบสสูงกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ การเกิดตะกอนจะเกิดในรูปของเกลือคาร์บอเนตก่อน แล้วจึงเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของเกลือไฮดรอกไซด์เมื่อระดับพีเอชเพิ่มขึ้น (Olson และ Twardowski, 1975)

จ. แคลเซียมไฮดรอกไซด์

มีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้ช้ามาก ต้องใช้เวลา มีสภาพความเป็นเบสอ่อน ทำให้ต้องใช้ในปริมาณมาก อีกทั้งยังมีปริมาณของแข็งเหลืออยู่มากด้วย แต่มีราคาถูกกว่าตัวช่วยตกตะกอนชนิดอื่นๆ การเกิดตะกอนจะเกิดอย่างช้าๆ ต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และจากการศึกษาของ Engelbrecht และคณะ (1967) พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อค่าความเป็นเบส ระดับพีเอช และความกระด้าง

การกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสีย โดยใช้วิธีการออกซิเดชันร่วมกับการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ประสิทธิภาพที่ได้จากการกำจัดเหล็กนำไปเปรียบเทียบหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดังนี้

4.2.1 การเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด ที่ระดับพีเอชและตัวช่วยตกตะกอนเดียวกัน

ศึกษาถึงชนิดของตัวออกซิไดซ์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด โดยพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.18 - 4.20

จากผลการเปรียบเทียบพบว่า แต่ละระดับพีเอชในตัวช่วยตกตะกอนชนิดเดียวกัน ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด จะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ α = 0.05 และบางระดับพีเอชจะมีอย่างน้อย 1 คู่ของชนิดตัวออกซิไดซ์ที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ α = 0.05 โดยผลการเปรียบเทียบสามารถสรุปตามชนิดของตัวช่วยตกตะกอนดังนี้

ก. โซเดียมไฮดรอกไซด์

ที่ระดับพีเอช 6, 8 และ 9 ประสิทธิภาพที่ได้จากการกำจัดเหล็กโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ เป็น 99.9978, 99.9981, 99.9982, 99.9981, 99.9981 และ 99.9982 ตามลำดับ โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ α = 0.05

ข. โซเดียมคาร์บอเนต

ที่ระดับพีเอช 7, 8 และ 9 ประสิทธิภาพที่ได้จากการกำจัดเหล็กโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและโซเดียมไฮโปคลอไรต์ เป็น 99.9980, 99.9981 และ 99.9982 % เท่ากันตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ α = 0.05 เช่นเดียวกัน

และที่ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี ประสิทธิภาพที่ได้จากการกำจัดเหล็กโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมไฮโปคลอไรต์เป็น 99.9984 และ 99.9983 % ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ α = 0.05 เช่นเดียวกัน

ค . แคลเซียมไฮดรอกไซด์

ที่ระดับพีเอช 6 ประสิทธิภาพที่ได้จากการกำจัดเหล็กโดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์และโอโซน เป็น 99.9952 และ 99.9953 % ตามลำดับ โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับพีเอช 8 ประสิทธิภาพที่ได้จากการกำจัดเหล็กโดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็น 99.9959 และ 99.9955 % ตามลำดับ และที่ระดับพีเอช 9 และพีเอชอ้างอิง ประสิทธิภาพที่ได้จากการกำจัดเหล็กโดยใช้อากาศ และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพที่ได้จากการกำจัดเหล็กโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ที่ระดับพีเอช 7 ขึ้นไป ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่แรงกว่าอากาศ และโอโซน จึงสามารถออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสให้เป็นเหล็กเฟอร์ริคได้ง่ายกว่า เมื่อเติมตัวช่วยตกตะกอนที่มีสภาพเป็นเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมคาร์บอเนต จึงทำให้เกิดตะกอนของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ได้มากกว่า มีผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กไม่แตกต่างกันที่ระดับพีเอชเดียวกัน ถึงแม้ว่าลักษณะการเกิดตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์จะแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวออกซิไดซ์ ปริมาณที่ใช้จะน้อยกว่าทางทฤษฎีที่คำนวณได้ คือ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 1 มิลลิกรัม ออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสได้ 2.66 มิลลิกรัม (Walker, 1978) แต่สำหรับโซเดียมไฮโปคลอไรต์พบว่า ปริมาณที่ใช้ต้องมากกว่าทางทฤษฎี เนื่องจากโซเดียมไฮโปคลอไรต์เมื่อละลายน้ำแล้วจะอยู่ในรูปของกรดไฮโปคลอริก (HOCl) และไฮโปคลอไรต์ (OCl^-) ทำให้อนุมูลไฮโปคลอไรต์ไอออนที่จะทำปฏิกิริยากับเหล็กเฟอร์รัสลดลง และการออกซิไดซ์จะต้องใช้เวลานานกว่าโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมาก (Knocke และคณะ, 1991) และจากงานวิจัยในองค์กร AWWA (1969) พบว่าการใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่ระดับพีเอช 6.8-8.4 และใช้เวลาอย่างน้อย 1-2 ชั่วโมง ในการตกตะกอนเหล็กออกจากน้ำบาดาล

ในกรณีที่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ การตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับการละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์ของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด จึงทำให้ที่ระดับพีเอช 9 และพีเอชอ้างอิง ประสิทธิภาพที่ได้จากการกำจัดเหล็กโดยใช้อากาศ และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$

ประสิทธิภาพที่ได้จากการกำจัดเหล็ก โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมคาร์บอเนต สามารถเรียงลำดับของประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้ตัวออกซิไดซ์ชนิดต่างๆ จากมากไปน้อยได้ดังนี้ คือ ประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้ตัวออกซิไดซ์เป็นอากาศ มีประสิทธิภาพมากที่สุด รองลงมาคือ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โซเดียมไฮโปคลอไรต์ และโอโซน ตามลำดับ สำหรับการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพจากมากไปน้อยได้เป็น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โอโซน โซเดียมไฮโปคลอไรต์ และอากาศ ตามลำดับ

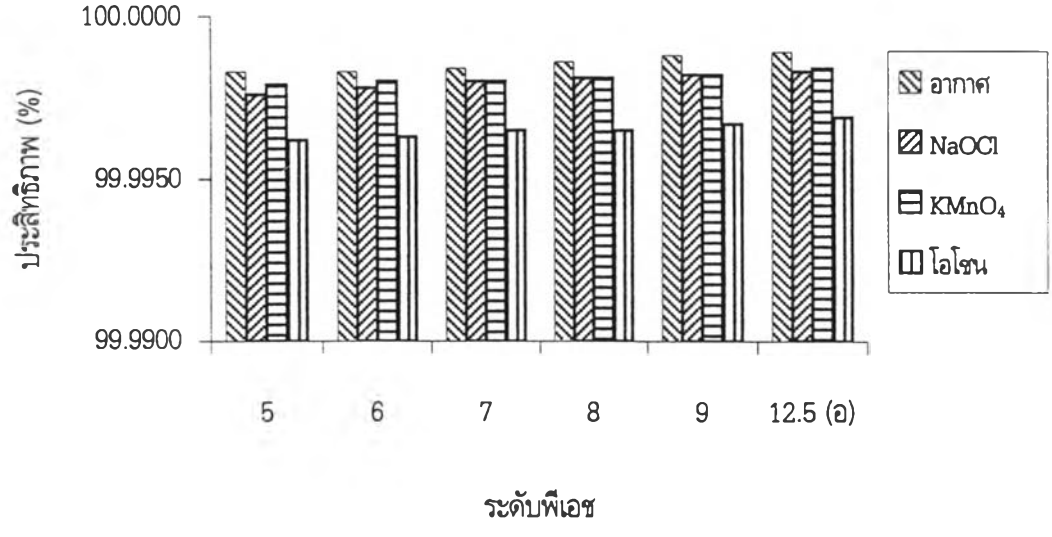
ดังนั้นจากการเปรียบเทียบในขั้นตอน 4.2.1 นี้สามารถสรุปได้ว่าชนิดของตัวออกซิไดซ์มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก กล่าวคือ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมไฮโปคลอไรต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างจากอากาศ และโอโซน แต่ประสิทธิภาพที่ได้จากตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด มีผลทำให้ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่เหลืออยู่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ในบางระดับพีเอช

ตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิดที่ระดับพีเอช และตัวช่วยตกตะกอนเดียวกัน

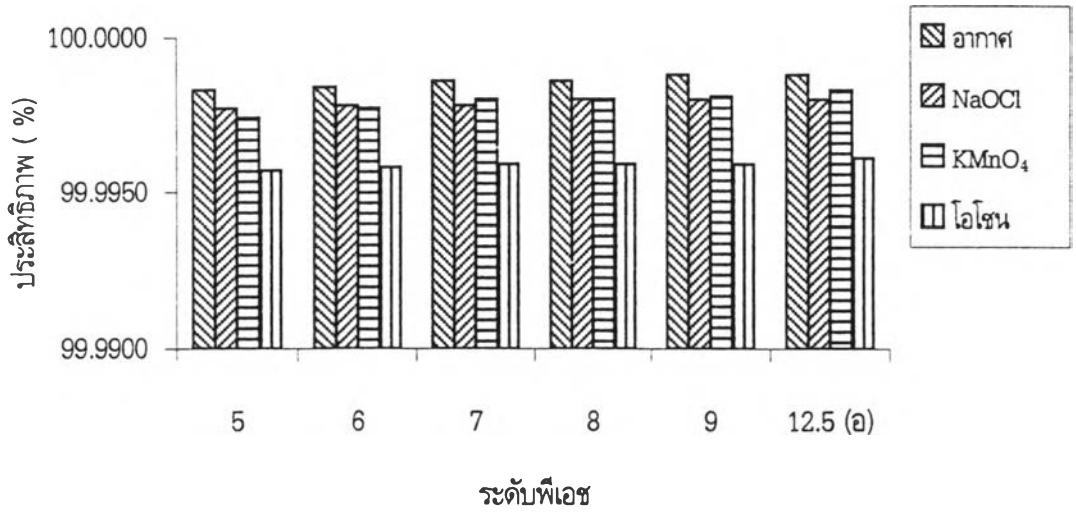
ตัวช่วยตกตะกอน	ระดับพีเอช	ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์ (%)				ผลเปรียบเทียบทางสถิติ
		$KMnO_4$	NaOCl	อากาศ	โอโซน	
NaOH	5	99.9979	99.9976	99.9983	99.9962	แตกต่างกัน
	6	99.9980 [a]	99.9978 [a]	99.9983	99.9963	แตกต่างกัน
	7	99.9980	99.9980	99.9984	99.9965	แตกต่างกัน
	8	99.9981 [a]	99.9981 [a]	99.9986	99.9965	แตกต่างกัน
	9	99.9982 [a]	99.9982 [a]	99.9988	99.9967	แตกต่างกัน
	12.5 (อ)	99.9984	99.9983	99.9989	99.9969	แตกต่างกัน
Na_2CO_3	5	99.9974	99.9977	99.9983	99.9957	แตกต่างกัน
	6	99.9977	99.9978	99.9984	99.9958	แตกต่างกัน
	7	99.9980 [a]	99.9978 [a]	99.9986	99.9959	แตกต่างกัน
	8	99.9980 [a]	99.9980 [a]	99.9986	99.9959	แตกต่างกัน
	9	99.9981 [a]	99.9980 [a]	99.9988	99.9959	แตกต่างกัน
	9.5 (อ)	99.9983 [a]	99.9980 [a]	99.9988	99.9961	แตกต่างกัน
$Ca(OH)_2$	5	99.9928	99.9938	99.9924	99.9946	แตกต่างกัน
	6	99.9933	99.9952 [a]	99.9940	99.9953 [a]	แตกต่างกัน
	7	99.9936	99.9955	99.9945	99.9960	แตกต่างกัน
	8	99.9955 [a]	99.9959 [a]	99.9948	99.9966	แตกต่างกัน
	9	99.9978	99.9959 [a]	99.9957 [a]	99.9967	แตกต่างกัน
	12.5 (อ)	99.9986	99.9964 [a]	99.9963 [a]	99.9971	แตกต่างกัน

หมายเหตุ : a หมายถึง ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก คู่ที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

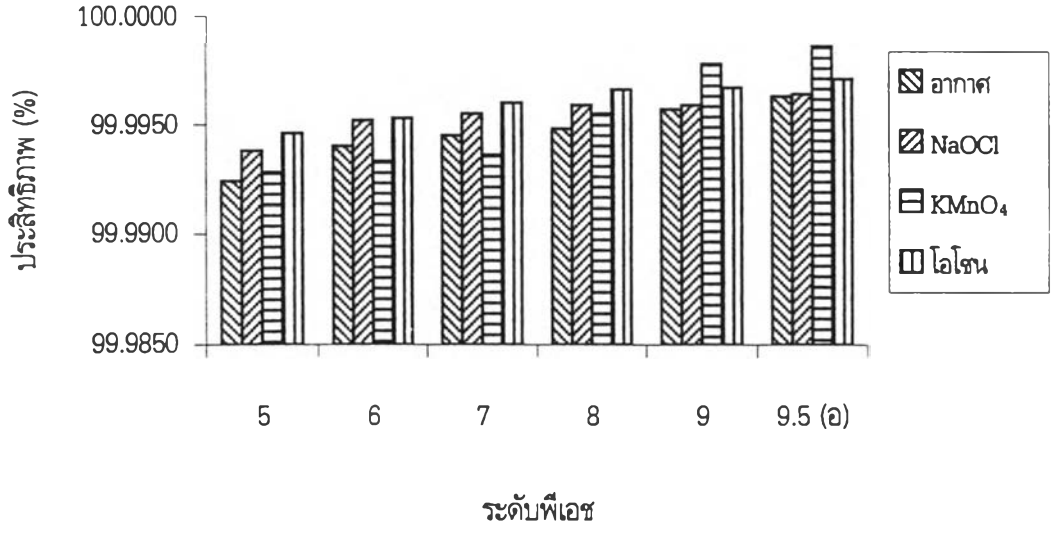
(อ) หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี



รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของแต่ละชนิดตัวออกซิไดซ์ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับพีเอชเดียวกัน



รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของแต่ละชนิดตัวออกซิไดซ์ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต ที่ระดับพีเอชเดียวกัน



รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของแต่ละชนิดตัวออกซิไดซ์ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับพีเอชเดียวกัน

4.2.2 การเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด ที่ระดับพีเอชต่างกัน แต่ตัวช่วยตกตะกอนเดียวกัน

ศึกษาถึงผลของระดับพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กตัวออกซิไดซ์และตัวช่วยตกตะกอนของแต่ละชนิด โดยพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังจะเห็นได้จากผลการเปรียบเทียบที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.21-4.24

จากผลการเปรียบเทียบพบว่า ในตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด และตัวช่วยตกตะกอนชนิดเดียวกัน ที่ระดับพีเอชต่างๆ ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของแต่ละระดับพีเอชมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ และที่ตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดมีอย่างน้อย 1 คู่ของระดับพีเอชที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$

ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ในกรณีใช้อากาศหรือโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทุกค่า การใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต ที่ระดับพีเอช 5-9 และอ้างอิง พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กที่ได้ คือ 99.9979, 99.9978, 99.9978, 99.9980, 99.9980 และ 99.9980 % ตามลำดับ โดยสามารถแบ่งความแตกต่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ที่ระดับพีเอช 5, 6 และ 7 ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และที่ระดับพีเอช 6, 7, 8, 9 และ อ้างอิง ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

จากผลการทดลองพบว่า ในระดับพีเอชที่ใกล้เคียงกัน ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการละลายของตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์มีค่าต่ำมาก พิจารณาได้จากค่าคงที่ของการละลาย (Ksp) ที่มีค่าเป็น $4x10^{-38}$ (Lide, 1992) โดยแสดงการคำนวณได้จากสมการที่ 4.2 - 4.3

$$Fe(OH)_3\ (s) = Fe^{3+}\ (aq) + 3OH^-(aq) \qquad 4.2$$

$$Ksp = 4x10^{-38} = [Fe^{3+}][OH^-]^3 \qquad 4.3$$

จะเห็นได้ว่าการละลายของตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ จะได้ความเข้มข้นต่ำสุดของเฟอร์ริคไอออน (Fe^{3+}) และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เป็น $1.96x10^{-10}$ และ $5.88x10^{-10}$ โมลาร์ตามลำดับ (Lide, 1992) โดยความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนจะเป็น 3 เท่าของเฟอร์ริคไอออน การลดลงของระดับพีเอช 1 หน่วย จะทำให้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนลดลง 10 เท่า ซึ่งมีผลทำให้ความเข้มข้นของเฟอร์ริคไอออนเพิ่มขึ้นเป็น 1000 เท่า แต่ก็เป็นปริมาณที่น้อยมาก (หน่วยเป็นไมโครกรัมต่อลิตร) ทำให้เมื่อระดับพีเอชลดลง 1 หน่วย ประสิทธิภาพที่ได้จากการกำจัดเหล็กในระดับพีเอชที่ใกล้เคียงกันจึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

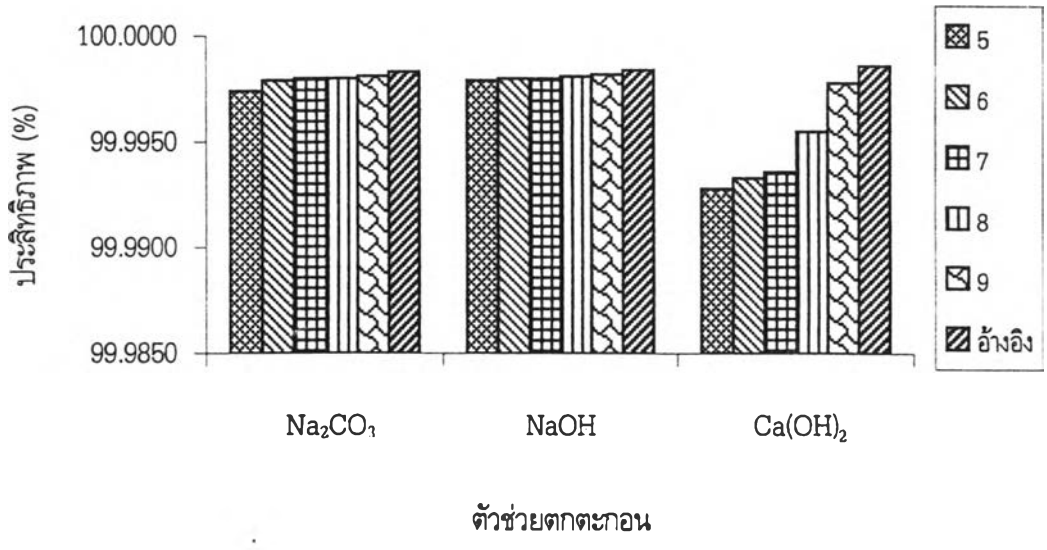
จากการศึกษาของ Snoeyink และ Jenkins (1980) พบว่าตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์สามารถละลายได้ที่ระดับพีเอช 8 ลงไป และที่ระดับพีเอชต่างๆ เฟอร์ริคไอออนจะอยู่ในรูปต่างๆ โดยเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอนุมูลไฮดรอกไซด์ และจะอยู่รวมตัวกันเป็นโพลีเมอร์ซึ่งจะถูกดูดซับไว้ในตะกอนของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ ทำให้ปริมาณเหล็กที่ได้ในระดับพีเอชต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนัก และจากการศึกษาของ Robinson และ Breland (1968) พบว่าระดับพีเอชมีผลต่อค่าความเป็นเบสในน้ำ และค่าความเป็นเบสในการเติมอากาศมีผลอย่างมากในการกำจัดเหล็ก เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเติมอากาศของน้ำที่มีค่าความเป็นเบสน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต จะใช้เวลานานถึง 20 ชั่วโมง แต่ถ้ามีค่าความเป็นเบสมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต จะใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

ดังนั้นจากการเปรียบเทียบทางสถิติในขั้นตอนนี้ทำให้สรุปได้ว่า ระดับพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ยกเว้นที่ระดับพีเอช 7, 8, 9 และพีเอชอ้างอิง กล่าวคือ การลดลงของระดับพีเอชจนถึงระดับพีเอช 7 ประสิทธิภาพที่ได้ส่วนใหญ่จะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่ระดับพีเอช 6 และ 5 จะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับระดับพีเอช 7

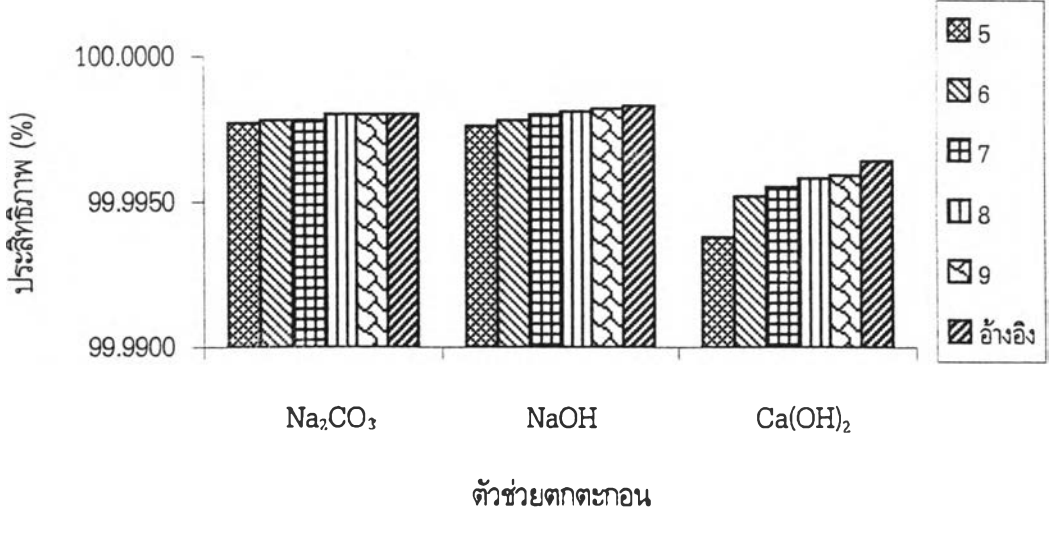
ตารางที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด ที่ระดับพีเอชต่างกัน แต่ตัวช่วยตกตะกอนเดียวกัน

ตัวออกซิไดซ์	ตัวช่วยตกตะกอน	ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กที่ระดับพีเอช (%)						ผลการเปรียบเทียบทางสถิติ
		5	6	7	8	9	อ้างอิง	
$KMnO_4$	Na_2CO_3	99.9974	99.9979	99.9980 [a]	99.9980 [a]	99.9981 [a]	99.9983	แตกต่างกัน
	NaOH	99.9979 [a]	99.9980 [a,b]	99.9980 [a b,c]	99.9981 [c,d]	99.9982 [d,e]	99.9984 [e]	แตกต่างกัน
	$Ca(OH)_2$	99.9928	99.9933	99.9936	99.9955	99.9978	99.9986	แตกต่างกัน
NaOCl	Na_2CO_3	99.9977 [a]	99.9978 [a,b]	99.9978 [a,b]	99.9980 [b]	99.9980 [b]	99.9980 [b]	แตกต่างกัน
	NaOH	99.9976 [a]	99.9978 [a]	99.9980 [b]	99.9981 [b,c]	99.9982 [c,d]	99.9983 [d]	แตกต่างกัน
	$Ca(OH)_2$	99.9938	99.9952	99.9955	99.9958 [a]	99.9959 [a]	99.9964	แตกต่างกัน
อากาศ	Na_2CO_3	99.9983	99.9984	99.9986 [a]	99.9986 [a]	99.9988 [b]	99.9988 [b]	แตกต่างกัน
	NaOH	99.9983 [a]	99.9983 [a]	99.9984	99.9986	99.9988	99.9989	แตกต่างกัน
	$Ca(OH)_2$	99.9924	99.9940	99.9945	99.9948	99.9957	99.9963	แตกต่างกัน
โอโซน	Na_2CO_3	99.9957	99.9958 [a]	99.9959 [a,b]	99.9959 [a,b]	99.9959 [b]	99.9961	แตกต่างกัน
	NaOH	99.9962 [a]	99.9963 [a]	99.9965 [b]	99.9965 [b]	99.9967	99.9969	แตกต่างกัน
	$Ca(OH)_2$	99.9946	99.9953	99.9960	99.9966 [a]	99.9967 [a]	99.9971	แตกต่างกัน

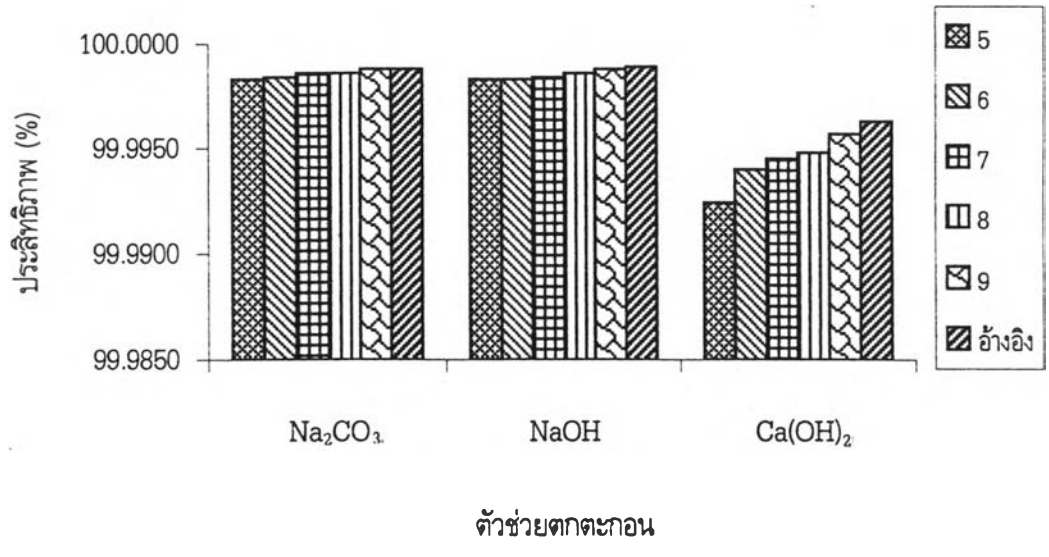
หมายเหตุ : a,b,c,d,e หมายถึง ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก คู่ที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ



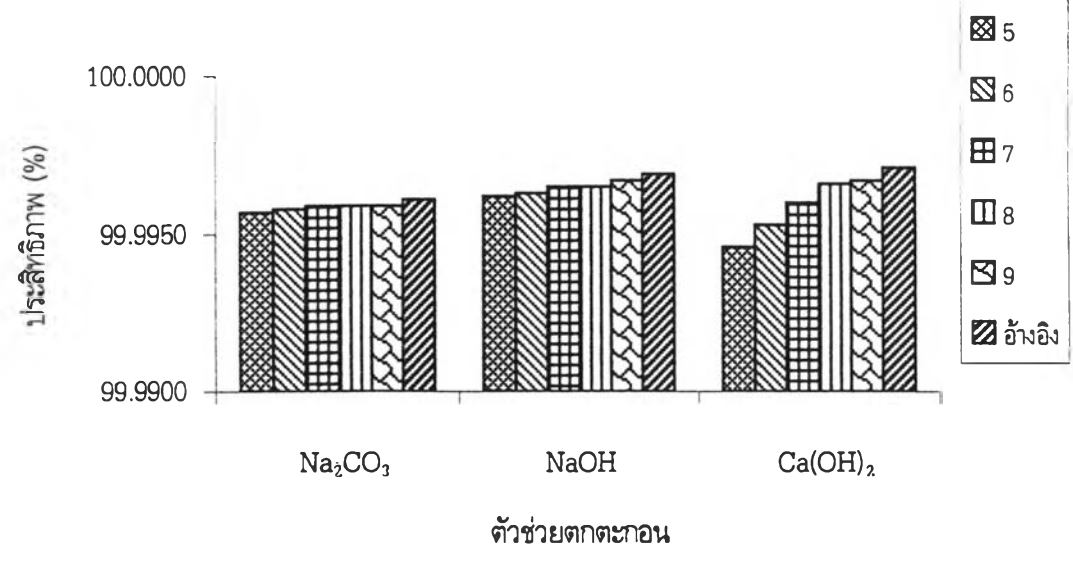
รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของวิธีโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอชต่างกัน



รูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของวิธีโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอชต่างกัน



รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของวิธีอากาศร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอชต่างกัน



รูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของวิธีโอโซนร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอชต่างกัน

4.2.3 การเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด ที่มีตัวช่วยตกตะกอนต่างกัน แต่มีระดับพีเอชเดียวกัน

ศึกษาถึงผลของชนิดตัวช่วยตกตะกอนว่ามีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิดที่ระดับพีเอชเดียวกัน โดยพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

จากผลการเปรียบเทียบพบว่า ในตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิดที่ระดับพีเอชเดียวกัน ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ และบางระดับพีเอชประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของตัวช่วยตกตะกอนบางคู่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ซึ่งรายละเอียดแสดงให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.25-4.28

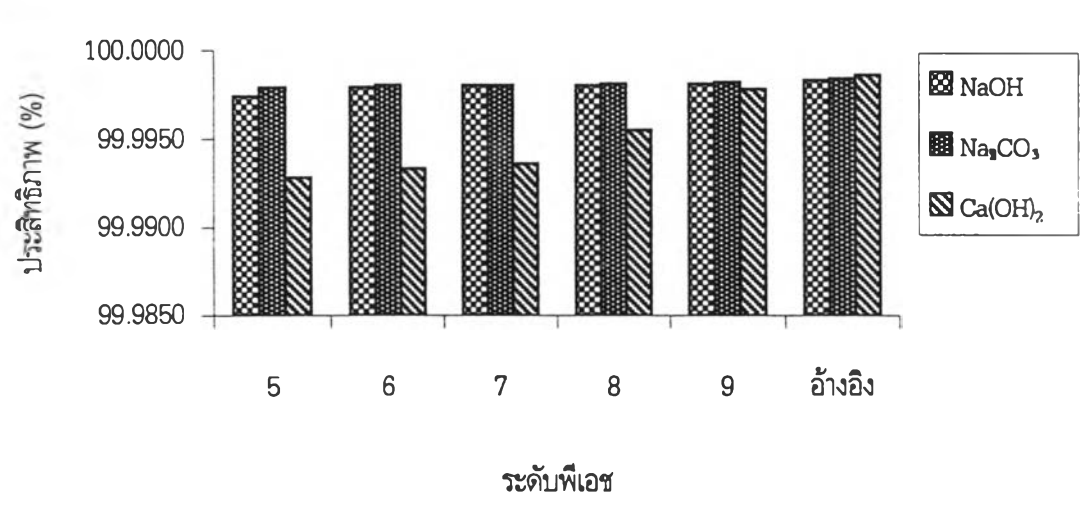
จะเห็นได้ว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวช่วยตกตะกอนที่ระดับพีเอชต่างๆ ของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด ยกเว้นโอโซน ประสิทธิภาพที่ได้ในการกำจัดเหล็กไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ แต่จะแตกต่างจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์อย่างมีนัยสำคัญของตัวออกซิไดซ์ทุกชนิด ทั้งนี้เนื่องจากสภาพความเป็นเบสของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต มีความเป็นเบสที่มากกว่า และมีความสามารถในการละลายได้ดีกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ได้ง่าย และมากกว่าในทางปฏิบัติ ซึ่งการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Robinson และ Dixon (1968) คือ ตัวช่วยตกตะกอนที่สามารถเพิ่มระดับพีเอช หรือค่าความเป็นเบสให้มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต จะสามารถให้เกิดการตกตะกอนของเหล็กได้ง่าย นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ปูนขาวหรือโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งสามารถช่วยให้เกิดการตกตะกอนเหล็กได้ดีที่ระดับพีเอช 5.5-7.0 และที่ระดับพีเอช 9.0-9.5 ในกรณีของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และจากการศึกษาของ Ghosh และคณะ (1966) พบว่าในกรณีที่ตัวช่วยตกตะกอนเพิ่มค่าความเป็นเบสในรูปอนุมูลไบคาร์บอเนตไอออน หรือคาร์บอเนตไอออน ซึ่งได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต เหล็กจะเกิดการตกตะกอนในรูปเฟอร์รัสคาร์บอเนตก่อน แล้วจึงจะถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Stumm และ Morgan (1970)

ตารางที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิด ที่มีตัวช่วยตกตะกอนต่างกัน แต่มีระดับพีเอชเดียวกัน

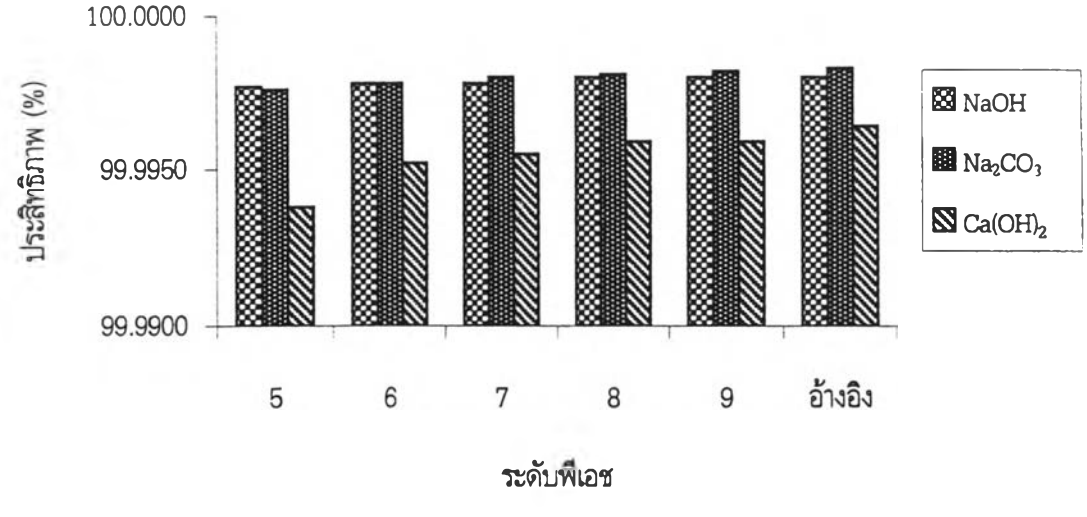
ตัวออกซิไดซ์	ระดับพีเอช	ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของตัวช่วยตกตะกอน (%)			ผลการเปรียบเทียบทางสถิติ
		NaOH	Na_2CO_3	$Ca(OH)_2$	
$KMnO_4$	5	99.9974	99.9979	99.9928	แตกต่างกัน
	6	99.9979 [a]	99.9980 [a]	99.9933	แตกต่างกัน
	7	99.9980 [a]	99.9980 [a]	99.9936	แตกต่างกัน
	8	99.9980 [a]	99.9981 [a]	99.9955	แตกต่างกัน
	9	99.9981 [a]	99.9982 [a]	99.9978	แตกต่างกัน
	อ้างอิง	99.9983 [a]	99.9984 [a]	99.9986	แตกต่างกัน
NaOCl	5	99.9977 [a]	99.9976 [a]	99.9938	แตกต่างกัน
	6	99.9978 [a]	99.9978 [a]	99.9952	แตกต่างกัน
	7	99.9978 [a]	99.9980 [a]	99.9955	แตกต่างกัน
	8	99.9980 [a]	99.9981 [a]	99.9959	แตกต่างกัน
	9	99.9980 [a]	99.9982 [a]	99.9959	แตกต่างกัน
	อ้างอิง	99.9980	99.9983	99.9964	แตกต่างกัน
อากาศ	5	99.9983 [a]	99.9983 [a]	99.9924	แตกต่างกัน
	6	99.9984	99.9983	99.9940	แตกต่างกัน
	7	99.9986	99.9984	99.9944	แตกต่างกัน
	8	99.9987 [a]	99.9986 [a]	99.9948	แตกต่างกัน
	9	99.9988 [a]	99.9988 [a]	99.9957	แตกต่างกัน
	อ้างอิง	99.9988 [a]	99.9989 [a]	99.9963	แตกต่างกัน
โอโซน	5	99.9957	99.9962	99.9946	แตกต่างกัน
	6	99.9958	99.9963	99.9953	แตกต่างกัน
	7	99.9959 [a]	99.9965	99.9960 [a]	แตกต่างกัน
	8	99.9959	99.9965	99.9966	แตกต่างกัน
	9	99.9959	99.9967 [a]	99.9967 [a]	แตกต่างกัน
	อ้างอิง	99.9960	99.9969	99.9971	แตกต่างกัน

หมายเหตุ : a หมายถึง ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก คู่ที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

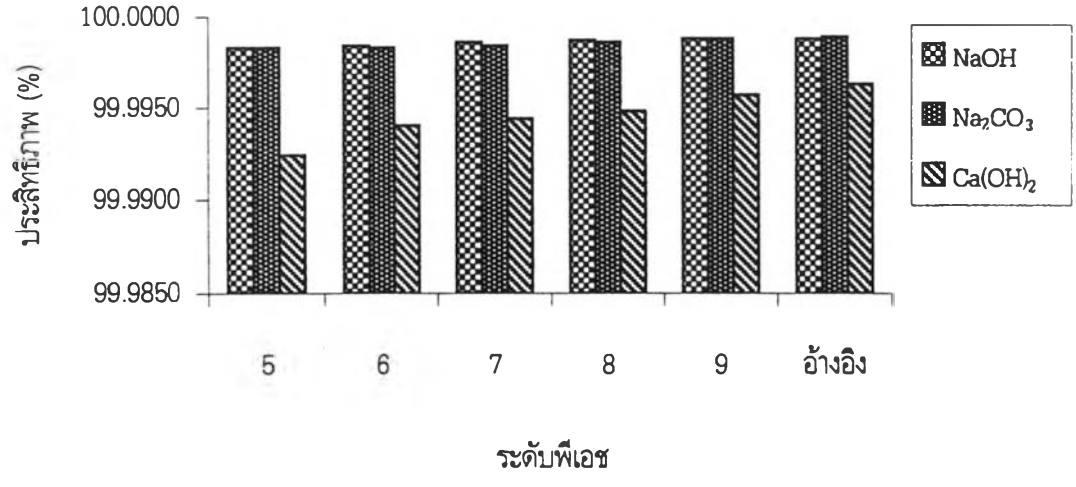
อ้างอิง หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี



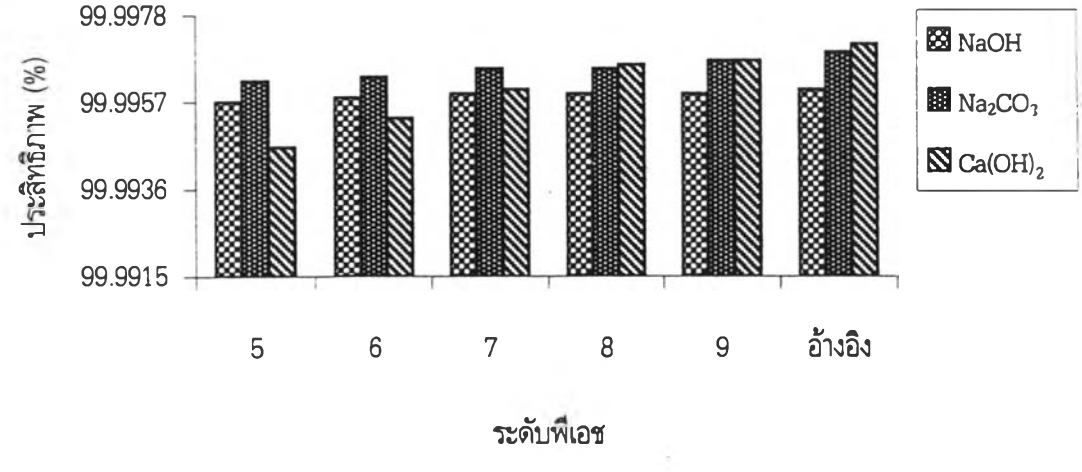
รูปที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของวิธีโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอชเดียวกัน



รูปที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของวิธีโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอชเดียวกัน



รูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของวิธีอากาศร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอชเดียวกัน



รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของวิธีโอโซนร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ที่ระดับพีเอชเดียวกัน

4.3 ทดสอบความสามารถในการจมตัวของตะกอนที่ระดับพีเอช 5-9 และระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี (พีเอชอ้างอิง)

การทดลองนี้ศึกษาถึงปริมาตรในการจมตัวของตะกอนในแต่ละวิธีการ ที่ระดับพีเอชต่างๆของตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวแต่ละชนิดคือ สารส้ม หรือ PAC เพื่อกำจัดเหล็ก โดยใช้ตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัว เนื่องจากสามารถช่วยลดเวลาในการพักให้ตะกอนนอนก้นในระบบบำบัดได้ วัตถุประสงค์ของการทดลองต้องการหาระดับพีเอชที่เหมาะสมในการใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ที่จะทำให้มีปริมาตรการจมตัวของตะกอนมากที่สุด ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะนำไปทดสอบทางสถิติหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของปริมาตรการจมตัวของตะกอน

การเปรียบเทียบทางสถิติจะทำการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ one-way analysis of varience เพื่อทดสอบความแปรปรวนของปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ระดับพีเอชต่างๆ ที่ ^{a} = 0.05 หากพบว่ามีความแปรปรวนในกลุ่มค่าเฉลี่ยนี้ จะทำการวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของปริมาตรการจมตัวของตะกอนในการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์ ตัวช่วยตกตะกอน และตัวช่วยให้ตะกนจมตัวแต่ละชนิด โดย multiple comparison แบบ Duncan เพื่อหาว่าค่าเฉลี่ยของปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ระดับพีเอชต่างๆ คู่ใดที่มีค่าแตกต่างกันที่ทำให้เกิดความแปรปรวนดังกล่าว

จากการทดลองที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง ในการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด โดยการใช้สารส้ม หรือ PAC เป็นตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวในปริมาณ 0.05 กรัม (500 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่าปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ได้ในแต่ละระดับพีเอชมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ ^{a} = 0.05 และมีบางวิธีการที่มีระดับพีเอชอย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ ^{a} = 0.05 ซึ่งแสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.14 - 4.24 และรูปที่ 4.29 - 4.52

ตารางที่ 4.14 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ระดับพีเอช		ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	เริ่มต้น	สุดท้าย	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
$KMnO_4/NaOH$	5	7.6	77.9	-	0.118	99.9979	33.0	47.0	57.0	62.0	67.0	70.0
	6	8.0	111.0		0.115	99.9979	31.0	44.5	50.0	52.0	52.0	52.0
	7	8.6	134.7		0.112	99.9980	31.0	43.0	49.0	49.0	49.0	49.0
	8	9.1	166.5		0.109	99.9980	29.0	38.0	42.0	42.0	42.0	42.0
	9	9.5	201.0		0.107	99.9981	28.0	34.0	39.0	39.0	39.0	39.0
	อ้างอิง	12.5	645.3		0.105	99.9981	27.0	32.0	35.0	35.0	35.0	35.0
$KMnO_4/Na_2CO_3$	5	7.8	638.3	-	0.151	99.9973	34.0	40.0	46.0	54.0	58.0	58.0
	6	8.5	817.3		0.123	99.9978	32.0	37.0	43.0	50.0	53.0	53.0
	7	8.7	896.2		0.117	99.9979	30.0	34.5	41.0	48.0	50.0	50.0
	8	8.9	968.7		0.112	99.9980	28.0	32.0	37.0	43.0	45.0	45.0
	9	9.3	1,069.9		0.106	99.9981	27.0	30.0	34.0	39.0	41.0	41.0
	อ้างอิง	9.5	1,211.4		0.101	99.9982	26.0	28.0	32.0	37.0	39.0	39.0
$KMnO_4/Ca(OH)_2$	5	6.3	8.2	1,340.0	0.398	99.9929	65.0	80.0	90.0	95.0	95.0	95.0
	6	7.4	11.4	1,290.0	0.386	99.9931	60.0	74.0	83.0	86.0	86.0	86.0
	7	7.7	14.6	1,250.0	0.363	99.9935	54.0	65.0	71.0	77.0	77.0	77.0
	8	8	27.1	1,100.0	0.269	99.9952	50.0	61.0	68.0	74.0	74.0	74.0
	9	8.4	31.4	890.0	0.198	99.9965	45.0	54.0	60.0	62.0	62.0	62.0
	อ้างอิง	11.8	261.0	400.0	0.169	99.9970	35.0	43.0	47.0	50.0	50.0	50.0

ตารางที่ 4.15 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

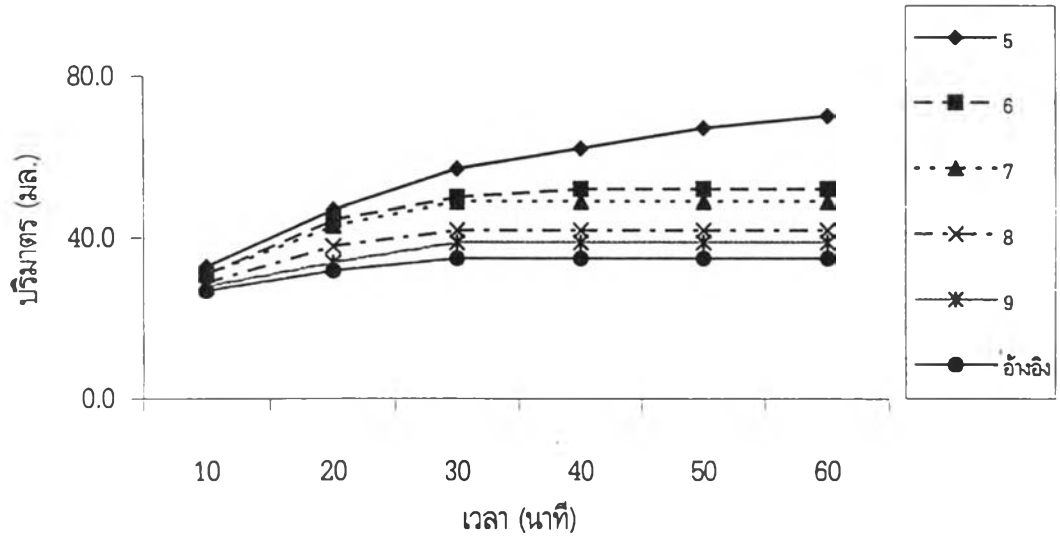
สภาวะ	ระดับพีเอช		ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	เริ่มต้น	สุดท้าย	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
NaOCl/NaOH	5	7.4	66.9	-	0.128	99.9977	48.0	68.0	83.0	83.0	83.0	83.0
	6	8.1	106.1		0.122	99.9978	45.0	63.0	76.0	76.0	76.0	76.0
	7	8.6	132.4		0.116	99.9979	42.0	58.0	69.0	69.0	69.0	69.0
	8	9.1	171.4		0.114	99.9980	40.0	54.0	63.0	63.0	63.0	63.0
	9	9.6	204.8		0.107	99.9981	37.0	49.0	56.0	56.0	56.0	56.0
	อ้างอิง	12.5	622.9		0.104	99.9981	35.0	45.0	50.0	50.0	50.0	50.0
NaOCl/Na_2CO_3	5	7.7	641.8	-	0.203	99.9964	34.0	46.0	52.0	54.0	54.0	54.0
(*เวลาทุกๆ 30 นาที)	6	8.4	816.3		0.186	99.9967	30.0	40.0	46.0	47.0	47.0	47.0
	7	8.7	890.9		0.178	99.9968	27.0	35.0	41.0	41.5	41.5	41.5
	8	8.9	979.4		0.169	99.9970	25.0	31.0	37.0	37.5	37.5	37.5
	9	9.2	1,092.4		0.152	99.9973	23.0	27.0	33.0	33.0	33.0	33.0
	อ้างอิง	9.5	1,224.4		0.147	99.9974	21.0	24.0	30.0	30.0	30.0	30.0
NaOCl/$Ca(OH)_2$	5	6.4	8.2	1,300.0	0.340	99.9939	88.0	98.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	6	7.4	11.0	1,280.0	0.267	99.9952	85.0	93.0	96.0	96.0	96.0	96.0
	7	7.6	14.9	1,160.0	0.245	99.9956	80.0	90.0	93.0	93.0	93.0	93.0
	8	7.9	23.8	1,080.0	0.236	99.9958	75.0	83.0	85.0	85.0	85.0	85.0
	9	8.3	31.7	870.0	0.225	99.9960	70.0	76.0	77.0	77.0	77.0	77.0
	อ้างอิง	11.7	277.1	390.0	0.195	99.9965	65.0	69.0	70.0	70.0	70.0	70.0

ตารางที่ 4.16 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของ อากาศร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

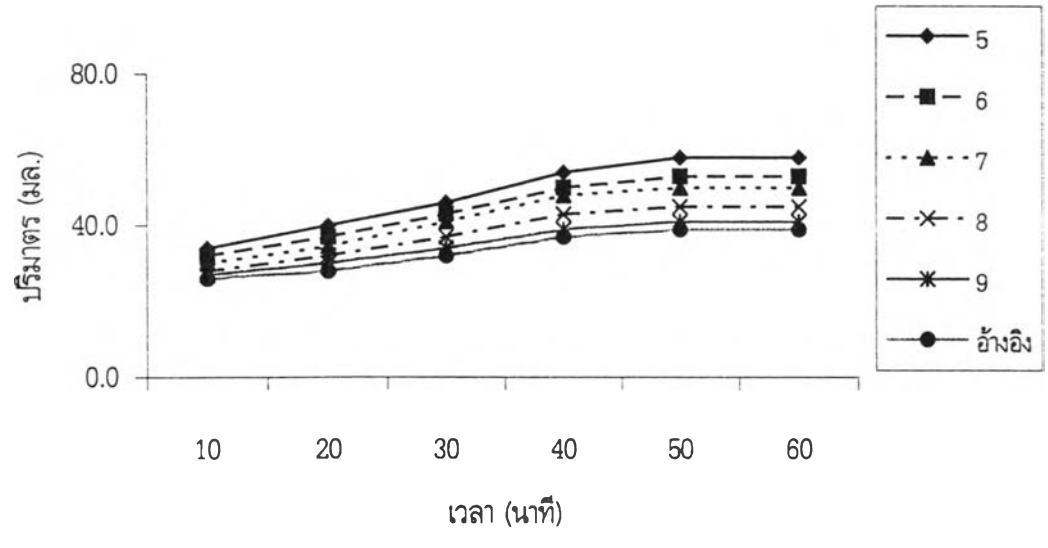
สภาวะ	ระดับพีเอช		ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	เริ่มต้น	สุดท้าย	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
อากาศ/NaOH	5	7.4	73.4	-	0.212	99.9962	14.0	23.5	29.5	36.0	45.0	53.0
	6	8.0	106.1		0.196	99.9965	14.0	23.0	29.0	32.0	36.0	44.0
	7	8.6	138.7		0.168	99.9970	14.0	22.0	26.0	30.5	36.5	36.5
	8	8.9	163.2		0.153	99.9973	14.0	17.0	21.5	25.5	29.5	29.5
	9	9.4	205.6		0.147	99.9974	13.0	17.0	20.5	25.0	28.5	28.5
	อ้างอิง	12.5	688.9		0.135	99.9976	13.0	17.0	20.5	24.0	28.0	28.0
อากาศ/Na_2CO_3	5	7.7	617.8	-	0.298	99.9947	24.0	34.0	44.0	46.0	48.0	48.0
(*เวลาทุกๆ 30 นาที)	6	8.3	827.7		0.295	99.9947	20.0	28.0	36.0	38.0	40.0	40.0
	7	8.6	879.2		0.280	99.9950	15.0	21.0	27.0	28.5	29.5	29.5
	8	8.8	975.2		0.273	99.9951	13.0	18.0	23.0	24.0	24.0	24.0
	9	9.2	1,064.5		0.270	99.9952	12.0	17.0	22.0	22.0	22.0	22.0
	อ้างอิง	9.5	1,293.3		0.264	99.9953	12.0	16.0	21.0	22.0	22.0	22.0
อากาศ/$Ca(OH)_2$	5	6.4	8.2	1,300.0	0.335	99.9940	60.0	85.0	92.0	92.0	92.0	92.0
	6	7.1	12.8	1,260.0	0.317	99.9943	55.0	77.0	83.0	83.0	83.0	83.0
	7	7.6	15.1	1,160.0	0.285	99.9949	50.0	70.0	75.0	75.0	75.0	75.0
	8	7.9	24.1	1,100.0	0.267	99.9952	47.0	62.0	66.0	66.0	66.0	66.0
	9	8.4	31.7	860.0	0.248	99.9956	45.0	55.0	59.0	59.0	59.0	59.0
	อ้างอิง	11.3	261.0	390.0	0.213	99.9962	43.0	50.0	54.0	54.0	54.0	54.0

ตารางที่ 4.17 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

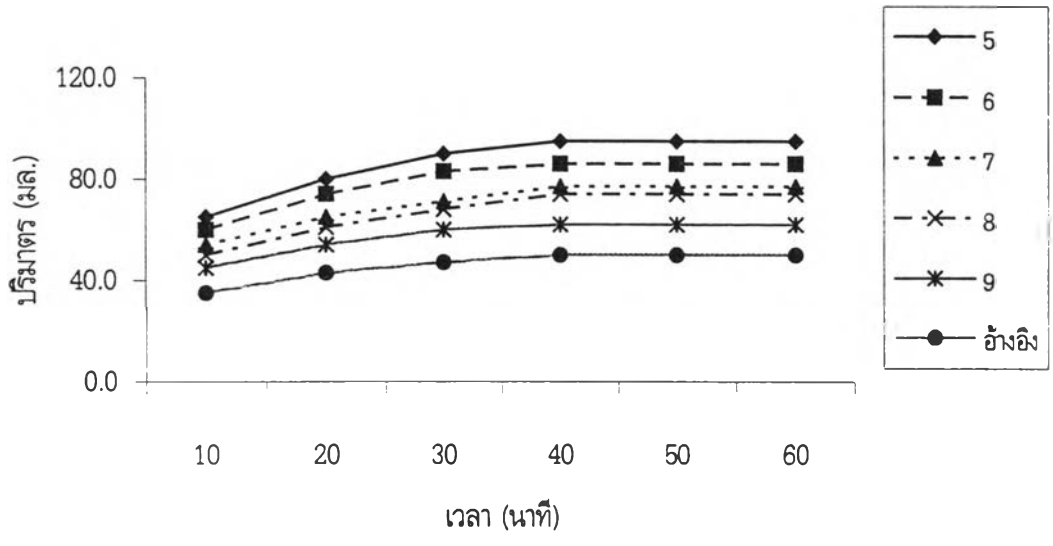
สภาวะ	ระดับพีเอช		ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	เริ่มต้น	สุดท้าย	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
โอโซน/NaOH	5	7.5	77.9	-	0.211	99.9962	28.0	40.0	55.0	65.0	74.0	74.0
	6	8.2	113.4		0.204	99.9963	25.0	35.0	48.0	57.0	65.0	65.0
	7	8.6	137.1		0.196	99.9965	23.0	32.0	42.0	50.0	57.0	57.0
	8	9.0	163.2		0.195	99.9965	21.0	29.0	37.0	44.0	50.0	50.0
	9	9.5	211.3		0.181	99.9968	18.0	25.0	32.0	38.0	44.0	44.0
	อ้างอิง	12.2	644.3		0.175	99.9969	17.0	23.0	29.0	34.0	39.0	39.0
โอโซน/Na_2CO_3	5	7.8	636.5	-	0.255	99.9954	21.0	29.0	31.0	33.0	36.0	36.0
(*เวลาทุกๆ 30 นาที)	6	8.2	824.2		0.242	99.9957	18.0	24.0	26.0	28.0	30.0	30.0
	7	8.6	873.1		0.233	99.9958	15.0	20.0	22.0	24.0	28.0	28.0
	8	8.9	971.0		0.230	99.9959	14.0	18.0	20.0	21.0	22.0	22.0
	9	9.3	1,064.7		0.227	99.9959	13.0	17.0	19.0	20.0	21.0	21.0
	อ้างอิง	9.5	1,224.4		0.223	99.9960	13.0	16.0	18.0	19.0	20.0	20.0
โอโซน/$Ca(OH)_2$	5	6.4	8.2	1,300.0	0.340	99.9939	72.0	80.0	86.0	86.0	86.0	86.0
	6	7.5	12.8	1,270.0	0.310	99.9944	70.0	76.0	80.0	80.0	80.0	80.0
	7	7.7	14.9	1,150.0	0.292	99.9948	65.0	70.0	72.0	72.0	72.0	72.0
	8	7.9	24.5	1,070.0	0.028	99.9995	60.0	64.0	66.0	66.0	66.0	66.0
	9	8.3	31.8	860.0	0.269	99.9952	55.0	58.0	60.0	60.0	60.0	60.0
	อ้างอิง	11.8	277.4	380.0	0.254	99.9954	50.0	52.0	54.0	54.0	54.0	54.0



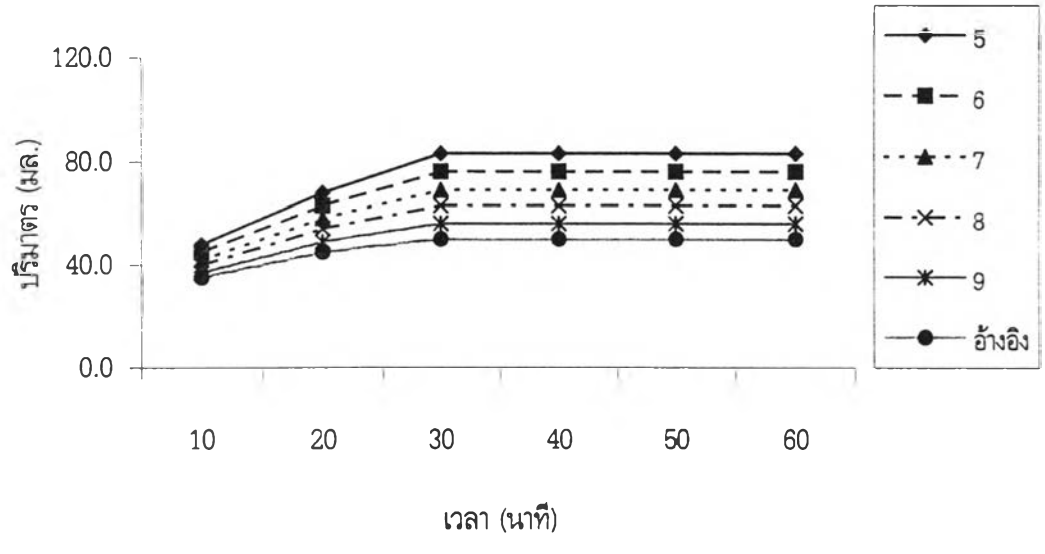
รูปที่ 4.29 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



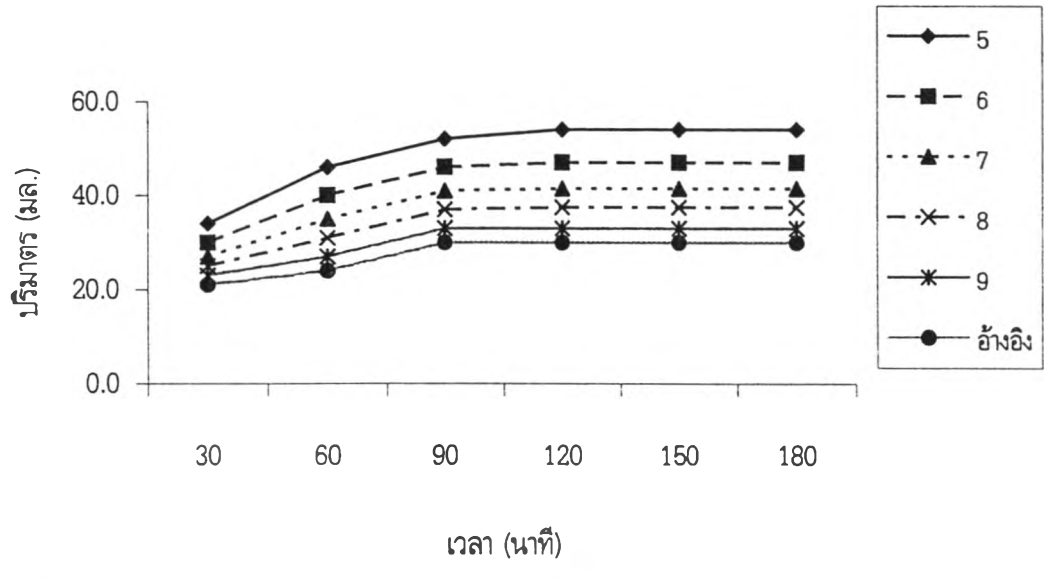
รูปที่ 4.30 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



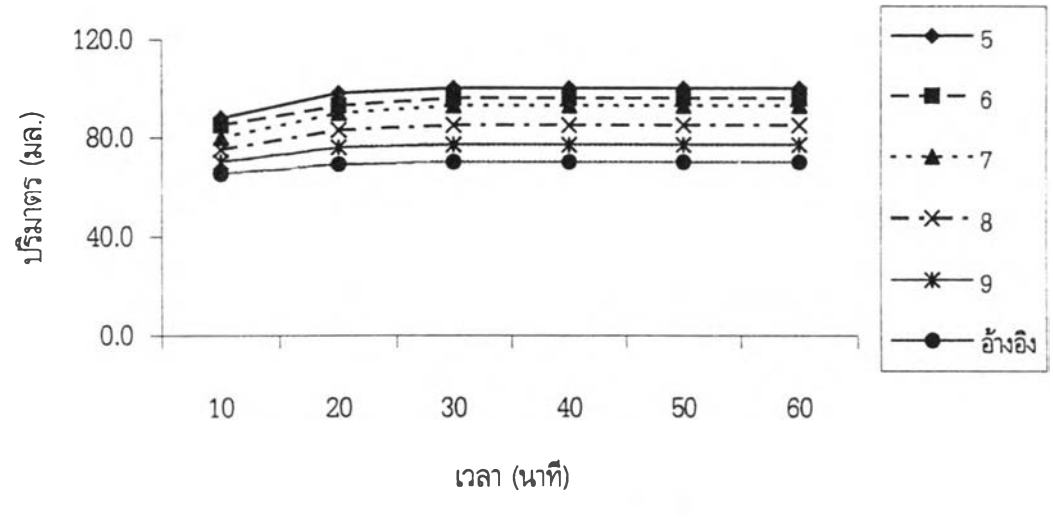
รูปที่ 4.31 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



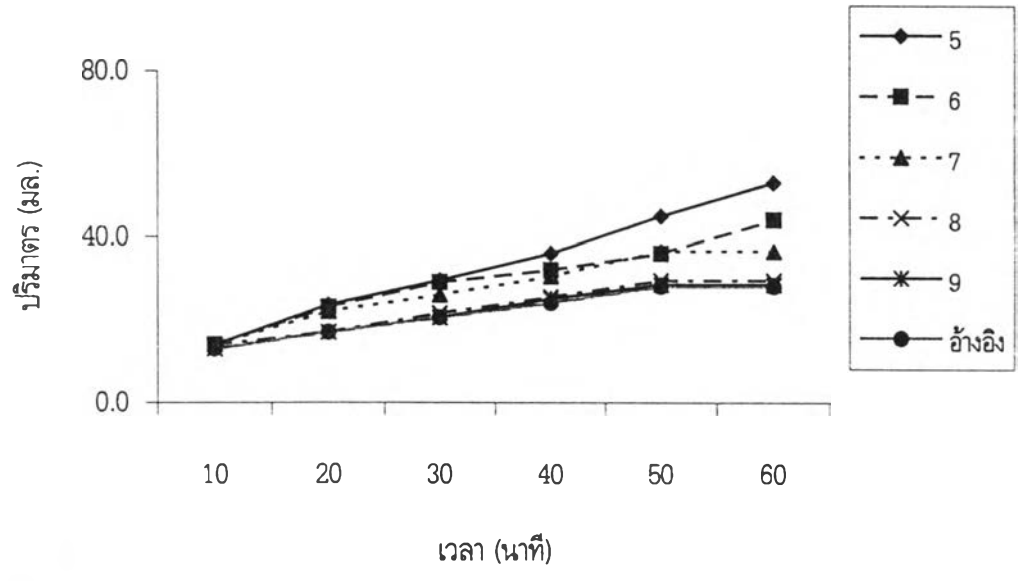
รูปที่ 4.32 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



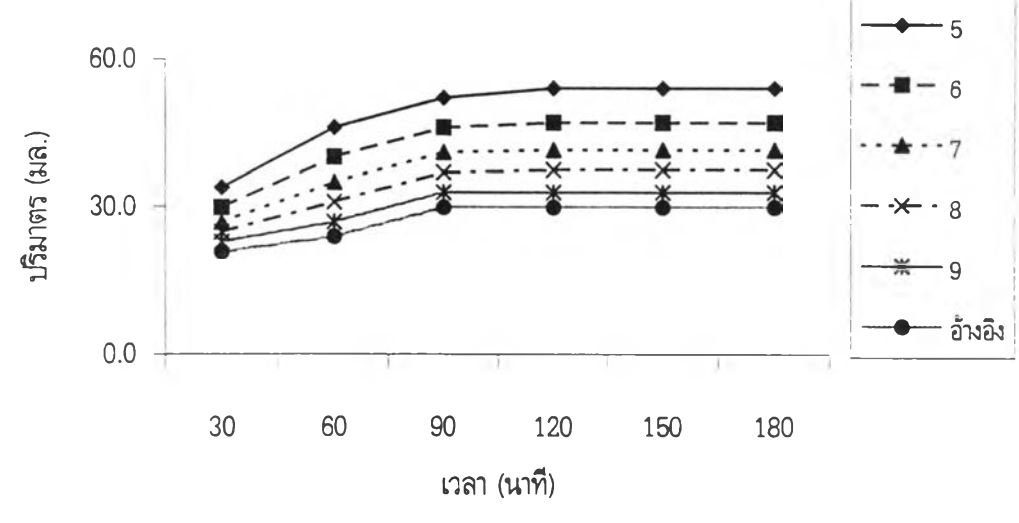
รูปที่ 4.33 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



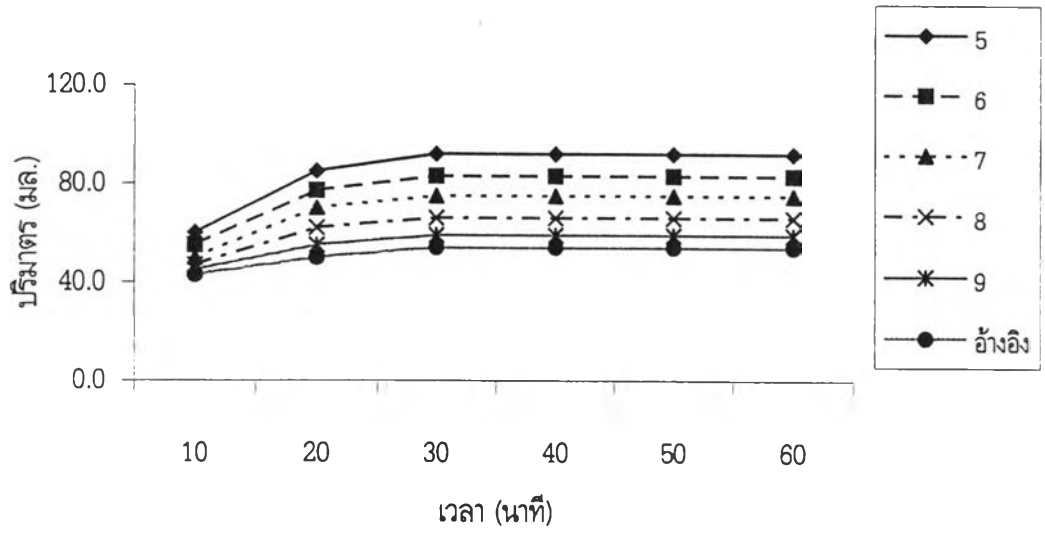
รูปที่ 4.34 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



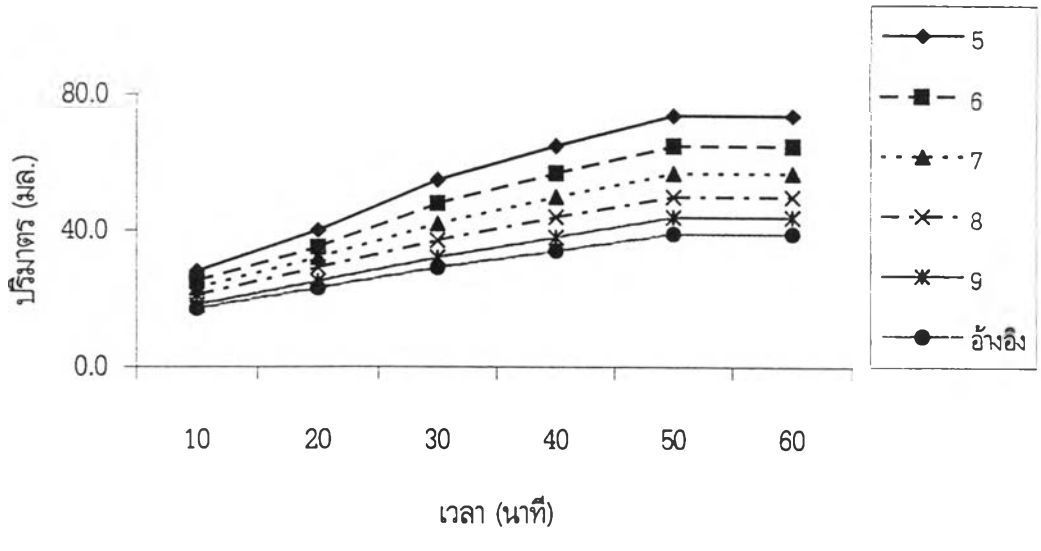
รูปที่ 4.35 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



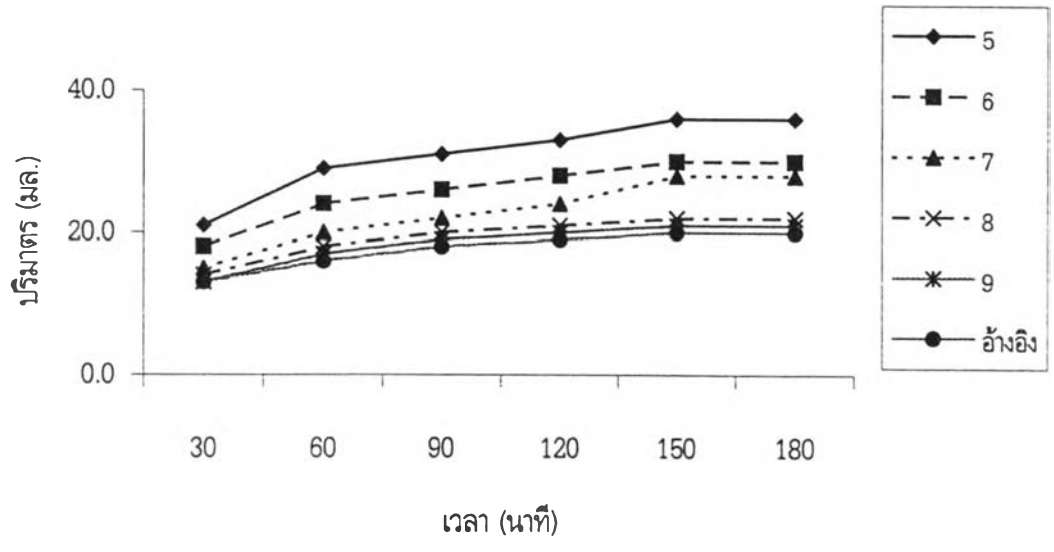
รูปที่ 4.36 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



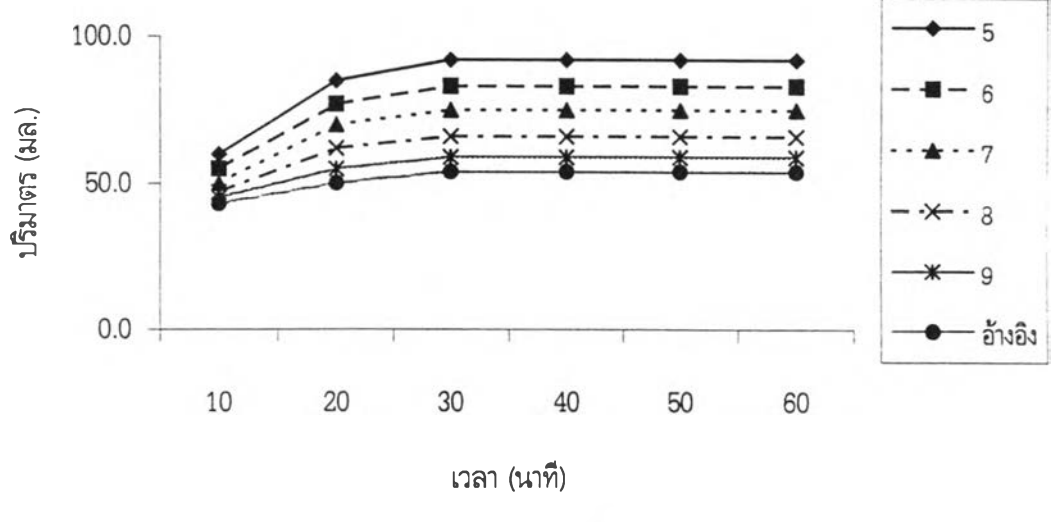
รูปที่ 4.37 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.38 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.39 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.40 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ระดับพีเอช						ผลการเปรียบเทียบทางสถิติ
	5	6	7	8	9	อ้างอิง	
$KMnO_4$/NaOH	70.0	52.0	49.0	42.0	39.0	35.0	แตกต่างกัน
$KMnO_4$/Na_2CO_3	58.0	53.0	50.0	45.0	41.0	39.0	แตกต่างกัน
$KMnO_4$/$Ca(OH)_2$	95.0	86.0	77.0	74.0	62.0	50.0	แตกต่างกัน
NaOCl/NaOH	83.0	76.0	69.0	63.0	56.0	50.0	แตกต่างกัน
NaOCl/Na_2CO_3	54.0	47.0 [a]	41.5 [a]	37.5 [b]	33.0 [c,b]	30.0 [c]	แตกต่างกัน
NaOCl/$Ca(OH)_2$	100.0	96.0	93.0	85.0	77.0	70.0	แตกต่างกัน
อากาศ/NaOH	53.0	44.0	36.5	29.5 [a]	28.5 [a]	28.0 [a]	แตกต่างกัน
อากาศ/Na_2CO_3	48.0	40.0	29.5	24.0	22.0 [a]	22.0 [a]	แตกต่างกัน
อากาศ/$Ca(OH)_2$	92.0	83.0	75.0	66.0	59.0	54.0	แตกต่างกัน
โอโซน/NaOH	74.0	65.0	57.0	50.0	44.0	39.0	แตกต่างกัน
โอโซน/Na_2CO_3	36.0	30.0	28.0	22.0 [a]	21 [a,b]	20.0 [b]	แตกต่างกัน
โอโซน/$Ca(OH)_2$	86.0	80.0	72.0	66.0	60.0	54.0	แตกต่างกัน

หมายเหตุ : a,b,c หมายถึง ค่าเฉลี่ยของปริมาตรการจมตัวของตะกอน คู่ที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ระดับพีเอชอ้างอิง หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี

ตารางที่ 4.19 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ระดับพีเอช		ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	เริ่มต้น	สุดท้าย	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
$KMnO_4/NaOH$	5	7.5	85.1	-	0.128	99.9977	28.0	44.0	54.0	62.0	62.0	62.0
	6	8.1	114.2		0.120	99.9978	25.0	39.0	47.0	51.0	51.0	51.0
	7	8.6	122.4		0.118	99.9979	23.0	35.0	42.5	46.0	46.0	46.0
	8	9.0	163.2		0.114	99.9980	21.0	31.0	37.0	41.0	41.0	41.0
	9	9.5	204.0		0.108	99.9981	18.0	26.0	31.0	34.0	34.0	34.0
	อ้างอิง	12.5	620.2		0.104	99.9981	17.0	23.0	27.0	29.0	29.0	29.0
$KMnO_4/Na_2CO_3$	5	7.6	639.2	-	0.169	99.9970	38.0	52.0	65.0	77.0	77.0	77.0
	6	8.5	816.3		0.151	99.9973	35.0	47.0	58.0	68.0	68.0	68.0
	7	8.7	879.5		0.143	99.9974	33.5	45.0	54.0	62.0	62.0	62.0
	8	8.9	924.3		0.127	99.9977	31.0	41.0	48.0	54.0	54.0	54.0
	9	9.2	1,043.5		0.117	99.9979	28.0	38.0	43.0	48.0	48.0	48.0
	อ้างอิง	9.5	1,269.8		0.106	99.9981	25.0	35.0	38.0	44.0	44.0	44.0
$KMnO_4/Ca(OH)_2$	5	6.4	8.2	1,340.0	0.386	99.9931	68.0	88.0	94.0	94.0	94.0	94.0
	6	7.3	12.1	1,290.0	0.363	99.9935	65.0	85.0	90.0	90.0	90.0	90.0
	7	7.7	15.4	1,250.0	0.275	99.9951	60.0	80.0	85.0	85.0	85.0	85.0
	8	8.0	26.3	1,090.0	0.248	99.9956	55.0	70.0	74.0	74.0	74.0	74.0
	9	8.3	30.7	๘๐.0	0.226	99.9959	53.0	68.0	71.0	71.0	71.0	71.0
	อ้างอิง	11.9	260.1	400.0	0.209	99.9963	50.0	๖5.0	68.0	68.0	68.0	68.0

ตารางที่ 4.20 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

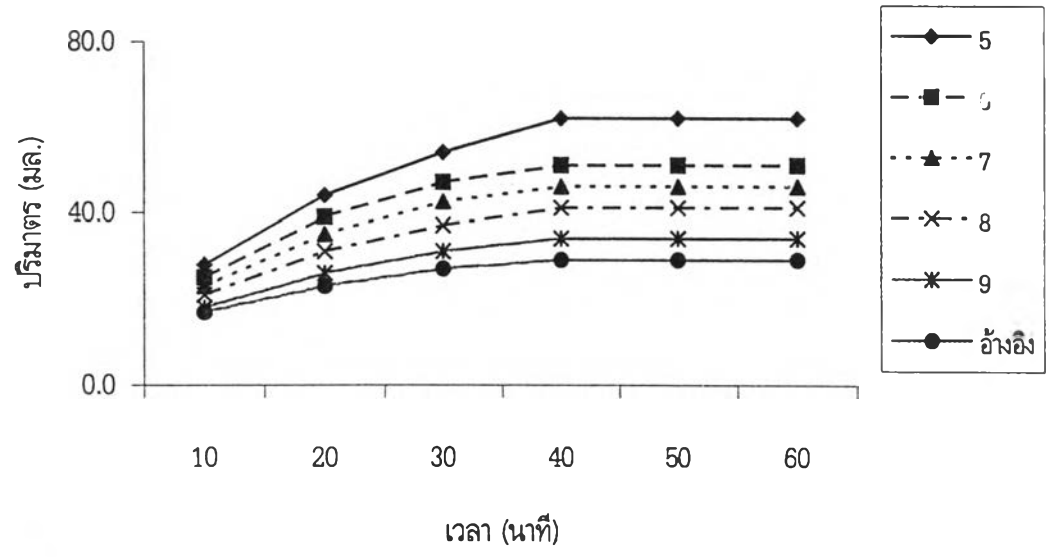
สภาวะ	ระดับพีเอช		ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	เริ่มต้น	สุดท้าย	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
NaOCl/NaOH	5	7.4	77.9	-	0.155	99.9972	46.0	67.0	79.0	79.0	79.0	79.0
	6	8.2	114.2		0.137	99.9975	43.0	63.0	73.0	73.0	73.0	73.0
	7	8.5	130.6		0.126	99.9977	40.0	57.0	66.0	66.0	66.0	66.0
	8	9.2	163.2		0.118	99.9979	38.0	53.0	61.0	61.0	61.0	61.0
	9	9.6	212.2		0.115	99.9979	37.0	50.0	57.0	57.0	57.0	57.0
	อ้างอิง	12.5	685.4		0.112	99.9980	36.0	49.0	55.0	55.0	55.0	55.0
$NaOCl/Na_2CO_3$	5	7.7	633.2	-	0.239	99.9957	30.0	42.0	52.0	52.0	52.0	52.0
(*เวลาทุกๆ 30 นาที)	6	8.4	816.3		0.228	99.9959	27.0	37.0	45.0	45.0	45.0	45.0
	7	8.7	879.4		0.216	99.9961	25.0	34.0	40.0	40.0	40.0	40.0
	8	8.9	979.4		0.205	99.9963	22.0	30.0	34.0	34.0	34.0	34.0
	9	9.2	1,067.9		0.194	99.9965	20.0	27.0	30.0	30.0	30.0	30.0
	อ้างอิง	9.5	1,224.4		0.189	99.9966	18.0	24.0	26.0	26.0	26.0	26.0
$NaOCl/Ca(OH)_2$	5	6.3	8.2	1,310.0	0.346	99.9938	68.0	85.0	93.0	93.0	93.0	93.0
	6	7.3	12.1	1,280.0	0.273	99.9951	65.0	80.0	86.0	86.0	86.0	86.0
	7	7.6	14.9	1,160.0	0.245	99.9956	60.0	73.0	77.0	77.0	77.0	77.0
	8	7.9	23.8	1,080.0	0.234	99.9958	58.0	68.0	71.0	71.0	71.0	71.0
	9	8.4	31.7	860.0	0.226	99.9959	55.0	63.0	65.0	65.0	65.0	65.0
	อ้างอิง	11.8	270.8	390.0	0.207	99.9963	53.0	59.0	61.0	61.0	61.0	61.0

ตารางที่ 4.21 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

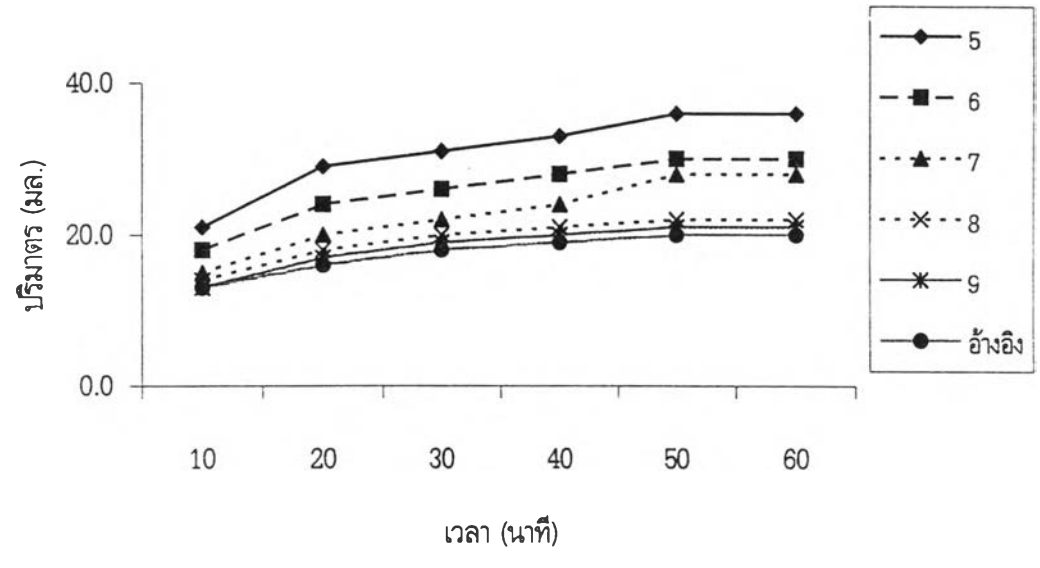
สภาวะ	ระดับพีเอช		ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	เริ่มต้น	สุดท้าย	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
อากาศ/NaOH	5	7.4	77.5	-	0.196	99.9965	27.0	39.0	48.0	59.0	59.0	59.0
	6	8.1	111.0		0.183	99.9967	24.0	34.0	41.0	58.0	58.0	58.0
	7	8.6	136.3		0.172	99.9969	22.0	30.5	35.5	42.0	42.0	42.0
	8	8.9	155.0		0.165	99.9970	20.0	28.0	32.0	37.0	37.0	37.0
	9	9.5	211.3		0.153	99.9973	18.0	25.0	28.0	32.0	32.0	32.0
	อ้างอิง	12.5	660.7		0.127	99.9977	17.0	23.0	25.0	28.0	28.0	28.0
อากาศ/Na_2CO_3	5	7.7	627.0	-	0.258	99.9954	25.0	37.0	46.0	46.0	46.0	46.0
(*เวลาทุกๆ 30 นาที)	6	8.4	803.1		0.243	99.9956	20.0	30.0	37.0	37.0	37.0	37.0
	7	8.6	879.2		0.237	99.9958	17.0	25.5	30.0	30.0	30.0	30.0
	8	8.8	975.2		0.225	99.9960	15.0	21.0	26.0	26.0	26.0	26.0
	9	9.2	1,068.9		0.214	99.9962	13.0	18.0	22.0	22.0	22.0	22.0
	อ้างอิง	9.5	1,293.3		0.201	99.9964	13.0	16.0	20.0	20.0	20.0	20.0
อากาศ/$Ca(OH)_2$	5	6.4	8.2	1,300.0	0.323	99.9942	46.0	71.0	91.0	91.0	91.0	91.0
	6	7.3	12.6	1,280.0	0.300	99.9946	43.0	66.0	85.0	85.0	85.0	85.0
	7	7.6	16.7	1,150.0	0.284	99.9949	40.0	60.0	77.0	77.0	77.0	77.0
	8	7.9	24.1	1,090.0	0.268	99.9952	37.0	55.0	70.0	70.0	70.0	70.0
	9	8.4	31.9	860.0	0.248	99.9956	35.0	51.0	64.0	64.0	64.0	64.0
	อ้างอิง	11.8	261.8	380.0	0.224	99.9960	33.0	47.0	57.0	57.0	57.0	57.0

ตารางที่ 4.22 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของ โอโซนร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

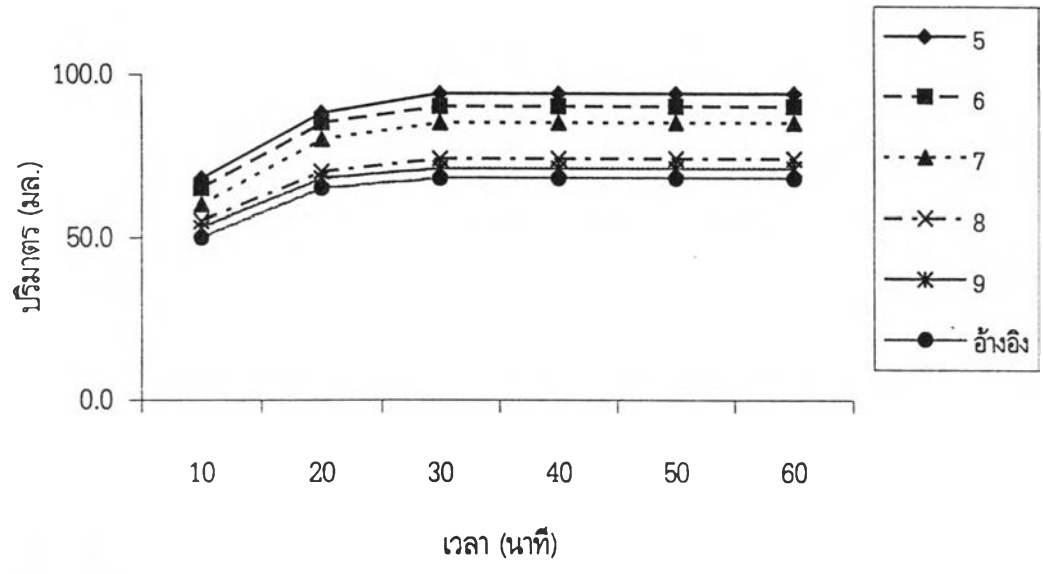
สภาวะ	ระดับพีเอช		ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	เริ่มต้น	สุดท้าย	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
โอโซน/NaOH	5	7.5	77.9	-	0.211	99.9962	23.0	35.0	49.0	59.0	59.0	59.0
	6	8.4	114.2		0.207	99.9963	20.0	30.0	42.0	50.0	50.0	50.0
	7	8.8	137.9		0.196	99.9965	18.0	26.0	36.0	42.0	42.0	42.0
	8	9.0	166.5		0.194	99.9965	15.0	21.0	29.0	36.0	36.0	36.0
	9	9.3	212.9		0.183	99.9967	13.0	18.0	25.0	30.0	30.0	30.0
	อ้างอิง	9.5	659.8		0.175	99.9969	13.0	16.0	22.0	27.0	27.0	27.0
โอโซน/Na_2CO_3	5	7.4	620.2	-	0.241	99.9957	30.0	50.0	58.0	58.0	58.0	58.0
(*เวลาทุกๆ 30 นาที)	6	8.3	816.0		0.237	99.9958	26.0	44.0	50.0	50.0	50.0	50.0
	7	8.6	865.0		0.230	99.9959	24.0	40.0	45.0	45.0	45.0	45.0
	8	8.9	979.2		0.228	99.9959	22.0	36.0	41.0	41.0	41.0	41.0
	9	9.2	1,068.9		0.224	99.9960	20.0	32.0	36.0	36.0	36.0	36.0
	อ้างอิง	9.5	1,226.1		0.219	99.9961	18.0	28.0	31.0	31.0	31.0	31.0
โอโซน/$Ca(OH)_2$	5	6.4	8.2	1,280.0	0.311	99.9944	46.0	65.0	78.0	88.0	88.0	88.0
	6	7.4	13.1	1,250.0	0.306	99.9945	43.0	60.0	71.0	79.0	79.0	79.0
	7	7.7	15.8	1,130.0	0.233	99.9958	40.0	55.0	64.0	70.0	70.0	70.0
	8	8.0	24.5	1,070.0	0.214	99.9962	35.0	48.0	55.0	61.0	61.0	61.0
	9	8.4	31.8	850.0	0.200	99.9964	33.0	44.0	50.0	55.0	55.0	55.0
	อ้างอิง	11.8	277.4	390.0	0.169	99.9970	30.0	41.0	45.0	49.0	49.0	49.0



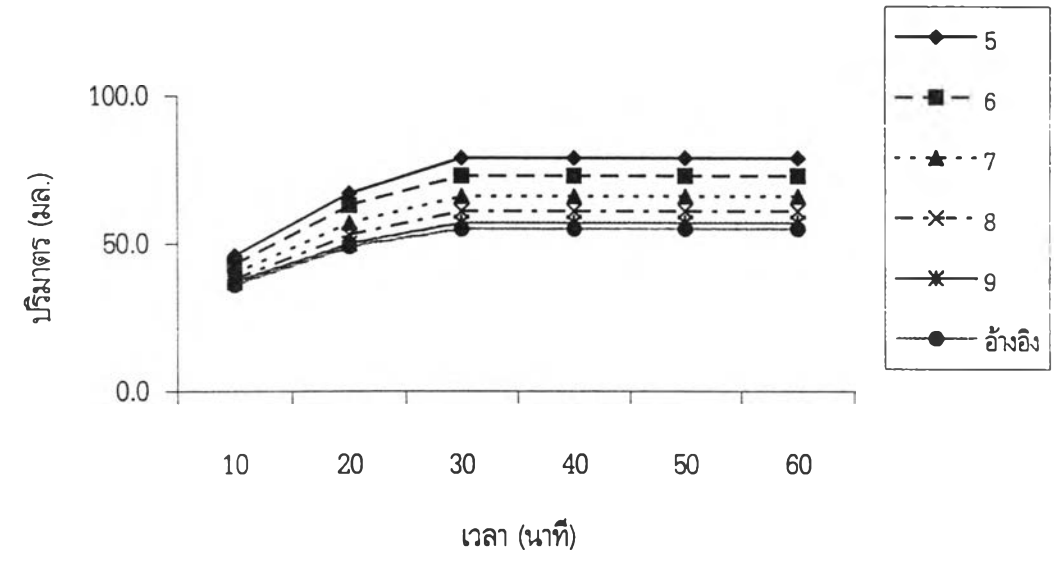
รูปที่ 4.41 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



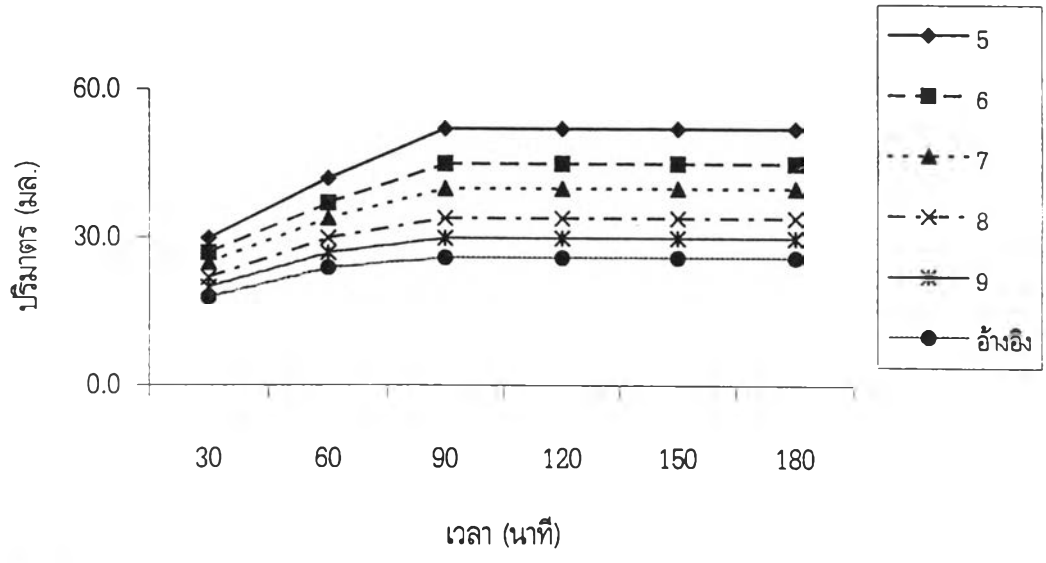
รูปที่ 4.42 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



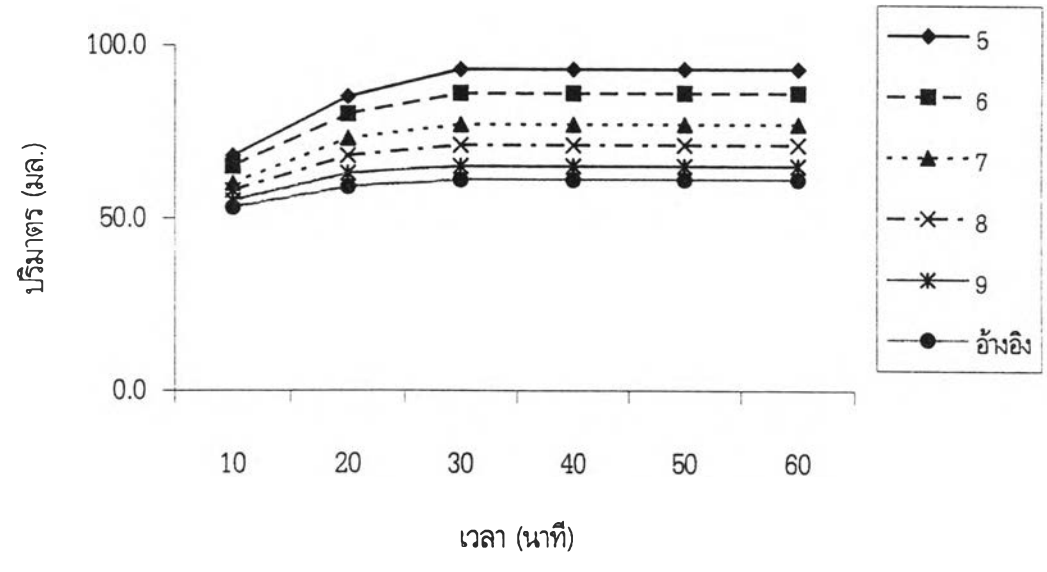
รูปที่ 4.43 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



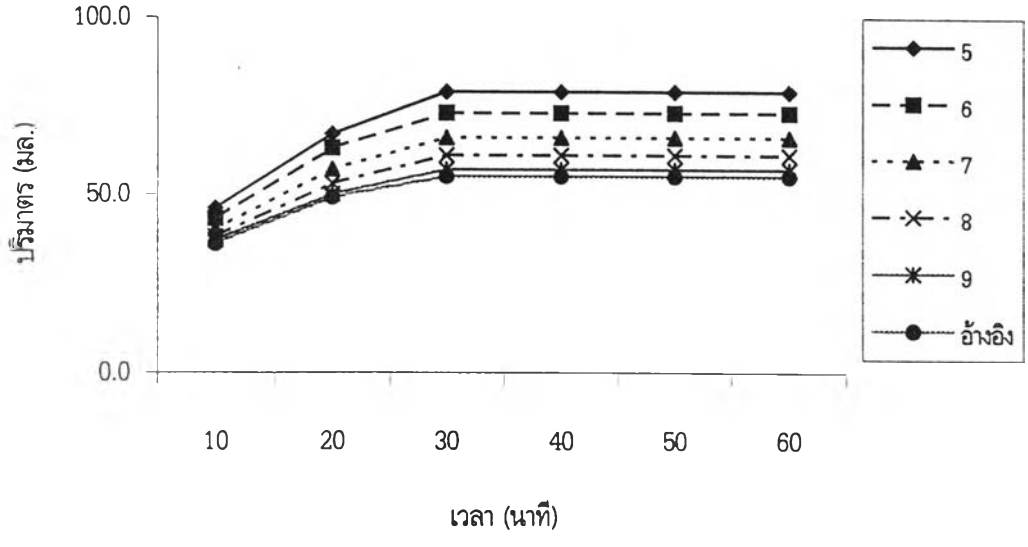
รูปที่ 4.44 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



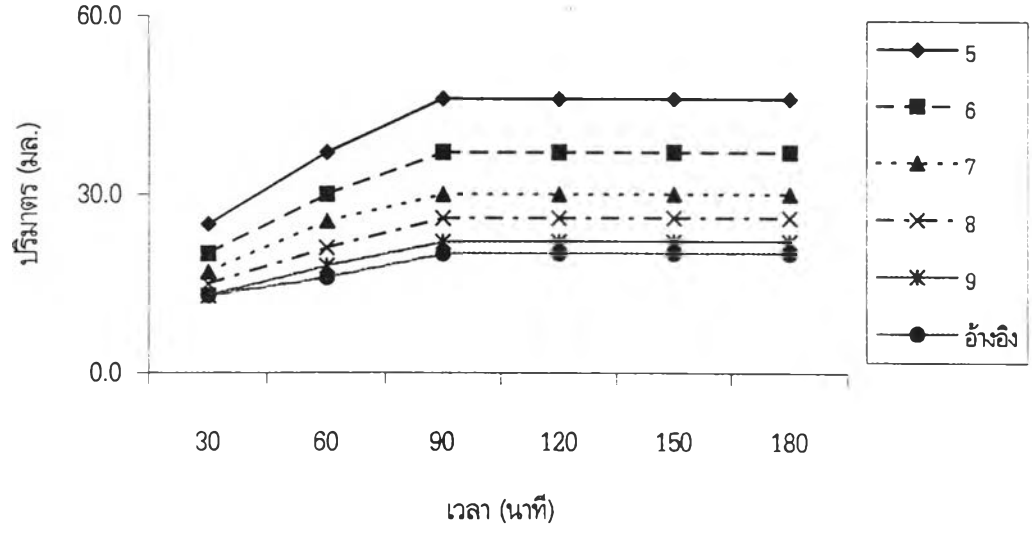
รูปที่ 4.45 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



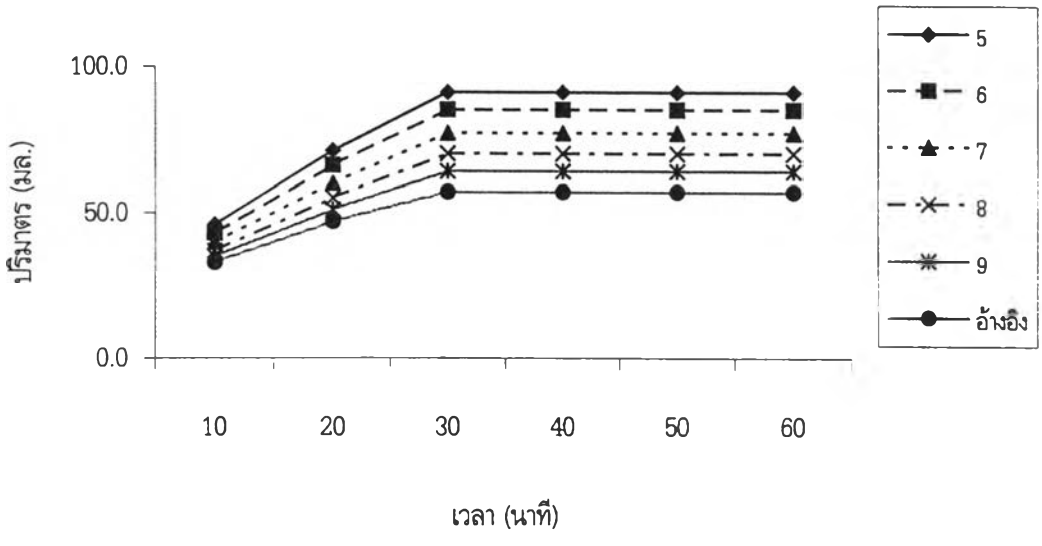
รูปที่ 4.46 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



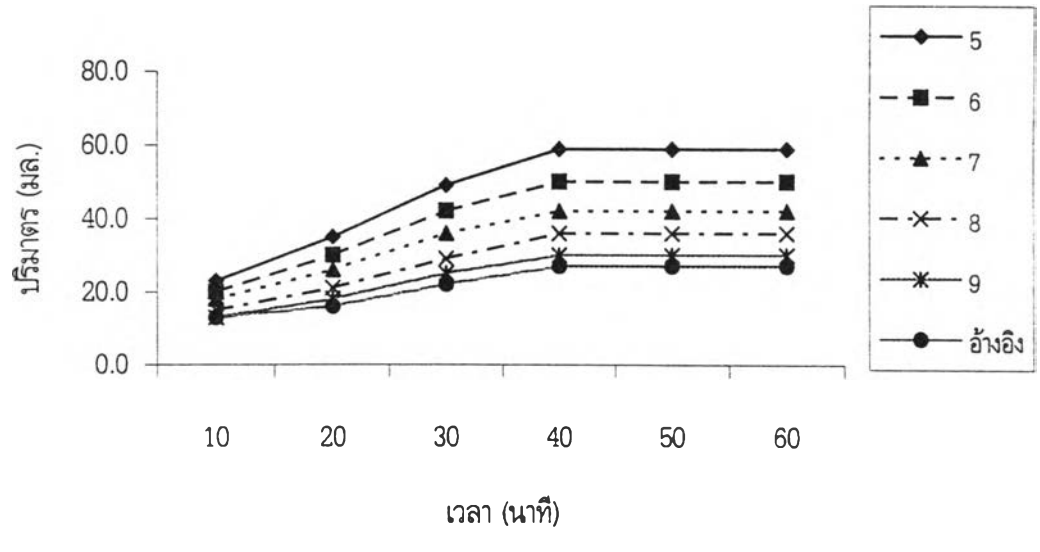
รูปที่ 4.47 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



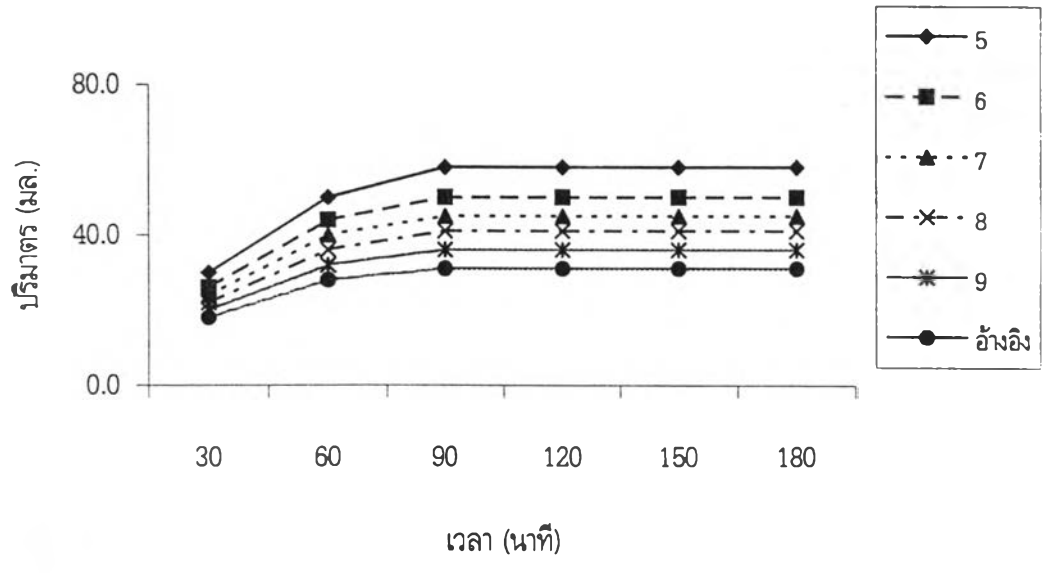
รูปที่ 4.48 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



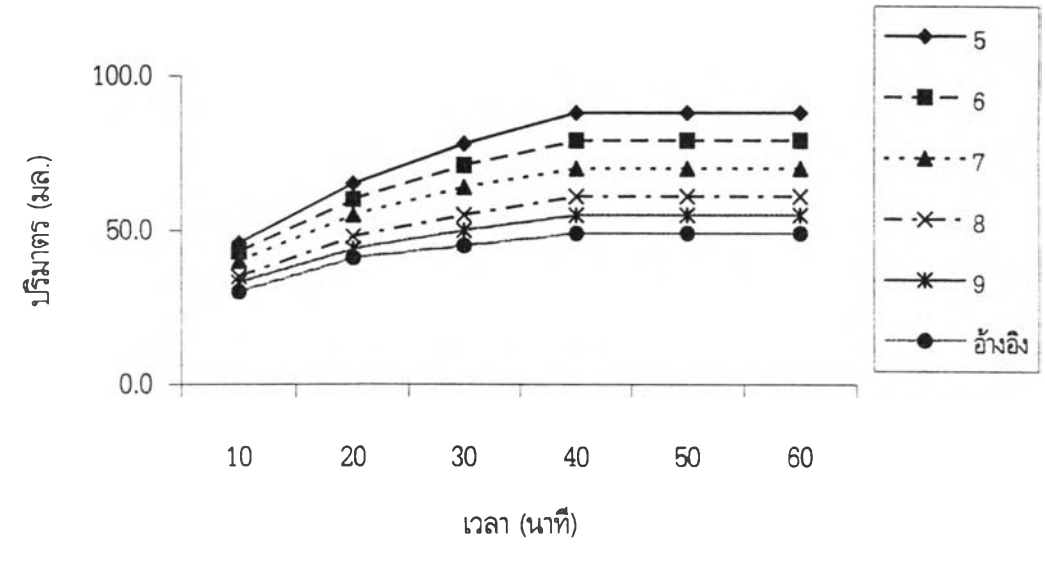
รูปที่ 4.49 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.50 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.51 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.52 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ระดับพีเอช						ผลการเปรียบเทียบทางสถิติ
	5	6	7	8	9	อ้างอิง	
$KMnO_4$/NaOH	62.0	51.0	46.0	41.0	34.0	29.0	แตกต่างกัน
$KMnO_4$/Na_2CO_3	77.0	68.0	62.0	54.0	48.0	44.0	แตกต่างกัน
$KMnO_4$/$Ca(OH)_2$	94.0	90.0	85.0	74.0	71.0	68.0	แตกต่างกัน
NaOCl/NaOH	79.0	73.0	66.0	61.0	57.0	55.0	แตกต่างกัน
NaOCl/Na_2CO_3	52.0	45.0	40.0	34.0	30.0	26.0	แตกต่างกัน
NaOCl/$Ca(OH)_2$	93.0	86.0	77.0	71.0	65.0	61.0	แตกต่างกัน
อากาศ/NaOH	59.0 [a]	58.0 [a]	42.0	37.0	32.0	28.0	แตกต่างกัน
อากาศ/Na_2CO_3	46.0	37.0	30.0	26.0	22.0	20.0	แตกต่างกัน
อากาศ/$Ca(OH)_2$	91.0	85.0	77.0	70.0	64.0	57.0	แตกต่างกัน
โอโซน/NaOH	59.0	50.0	42.0	36.0	30.0	27.0	แตกต่างกัน
โอโซน/Na_2CO_3	58.0	50.0	45.0	41.0	36.0	31.0	แตกต่างกัน
โอโซน/$Ca(OH)_2$	88.0	79.0	70.0	61.0	55.0	49.0	แตกต่างกัน

หมายเหตุ : a หมายถึง ค่าเฉลี่ยของปริมาตรการจมตัวของตะกอน คู่ที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ระดับพีเอชอ้างอิง หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี

ตารางที่ 4.24 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ระดับพีเอชต่างๆ ของตัวออกซิไดซ์และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	การจมตัวของตะกอนเมื่อใช้		แสดงดังรูปที่
	สารส้ม	PAC	
$KMnO_4$/NaOH	-ที่ระดับพีเอช 5 เริ่มคงที่ที่เวลามากกว่า 1 ชม. -ที่ระดับพีเอช 6 เริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที -ที่ระดับพีเอช 7 ขึ้นไป เริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที	4.29,4.41
$KMnO_4/Na_2CO_3$	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 50 นาที	4.30,4.42
$KMnO_4/Ca(OH)_2$	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที	4.31,4.43
NaOCl/NaOH	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	4.32,4.44
NaOCl/ Na_2CO_3	-ที่ระดับพีเอช 5-8 เริ่มคงที่ที่เวลา 120 นาที -ที่ระดับพีเอช 9 และพีเอชอ้างอิงเริ่มคงที่ที่เวลา 90นาที	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 90 นาที	4.33,4.45
$NaOCl/Ca(OH)_2$	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	4.34,4.46
อากาศ/NaOH	-ที่ระดับพีเอช 5 - 6 เริ่มคงที่ที่เวลามากกว่า 1 ชม. -ที่ระดับพีเอช 7 ขึ้นไป เริ่มคงที่ที่เวลา 50 นาที	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที	4.35,4.47

หมายเหตุ : ระดับพีเอชอ้างอิง หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี

PAC หมายถึง Polyaluminiumchloride

ตารางที่ 4.24 ต่อ

สภาวะ	การจมตัวของตะกอนเมื่อใช้		แสดงดังรูปที่
	สารส้ม	PAC	
อากาศ/ Na_2CO_3	-ที่ระดับพีเอช 5 - 7 เริ่มคงที่ที่เวลา 150 นาที -ที่ระดับพีเอช 8 ขึ้นไป เริ่มคงที่ที่เวลา 120 นาที	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 90 นาที	4.36,4.48
อากาศ/$Ca(OH)_2$	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	4.37,4.49
โอโซน/NaOH	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 50 นาที	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที	4.38,4.50
โอโซน/ Na_2CO_3	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 150 นาที	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 90 นาที	4.39,4.51
โอโซน/$Ca(OH)_2$	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	-ทุกระดับพีเอชเริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที	4.40,4.52

หมายเหตุ : ระดับพีเอชอ้างอิง หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี

PAC หมายถึง Polyaluminiumchloride

ก. สารส้ม

จากตารางที่ 4.14 - 4.17 และรูปที่ 4.29 - 4.40 พบว่าในตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดที่ระดับพีเอช 5-9 และพีเอชอ้างอิง ปริมาตรการจมตัวของตะกอนแปรผกผันกับระดับพีเอช กล่าวคือ ปริมาตรการจมตัวของตะกอนลดลงเมื่อระดับพีเอชเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการจมตัวของตะกอนของแต่ละวิธีจะใช้เวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.24

จากการเปรียบเทียบทางสถิติดังตารางที่ 4.18 พบว่า การใช้สารส้มเป็นตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวที่ระดับพีเอชต่างๆ ปริมาตรการจมตัวของตะกอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ในตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ยกเว้นในวิธีการที่ใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต มีระดับพีเอชอย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ ที่ระดับพีเอช 6 - 7 ระดับพีเอช 8 - 9 และระดับพีเอช 9 - อ้างอิง แต่ละคู่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$

วิธีการที่ใช้อากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับพีเอช 8, 9 และพีเอชอ้างอิง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ เช่นกัน ที่ระดับพีเอช 9 และพีเอชอ้างอิงในวิธีการของอากาศร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต และระดับพีเอช 8 - 9 และ พีเอช 9 - อ้างอิง ในวิธีการของโอโซนร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.18

ข. PAC

จากตารางที่ 4.19 - 4.22 และรูปที่ 4.41 - 4.52 พบว่ามีผลการทดลองเช่นเดียวกับกรณีที่ใช้สารส้ม เป็นตัวช่วยให้ตะกอนจมตัว คือ ปริมาตรการจมตัวของตะกอนแปรผกผันกับระดับพีเอช และจากการเปรียบเทียบทางสถิติ พบว่าทุกระดับพีเอช ปริมาตรการจมตัวของตะกอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ยกเว้นในวิธีการที่ใช้อากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับพีเอช 5 และ 6 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งรายละเอียดการเปรียบเทียบทางสถิติแสดงให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.23 และเวลาที่ใช้ในการจมตัวของตะกอนในแต่ละวิธีมีเวลาที่แตกต่างกันเช่นเดียวกับกรณีของสารส้ม โดยแสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.24

ที่ระดับพีเอชต่างๆ พบว่าเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์จะอยู่ในรูปที่แตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับอนุมูลไฮดรอกไซด์ไอออน ได้แก่ $Fe_2(OH)_2^{4+}$, $Fe(OH)^{2+}$, $Fe(OH)_2^{+}$ และ $Fe(OH)_4^{-}$ โดยสารประกอบเหล่านี้จะถูกดูดซับไว้บนผิวของตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำให้ตะกอนไม่เสถียร เกิดแรงผลักกัน จึงเกิดการรวมตัวและจมตัวกันได้ยาก โดยเฉพาะระดับพีเอชที่เป็นเบส ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.53 (Snoeyink และ Jenkins,1980)

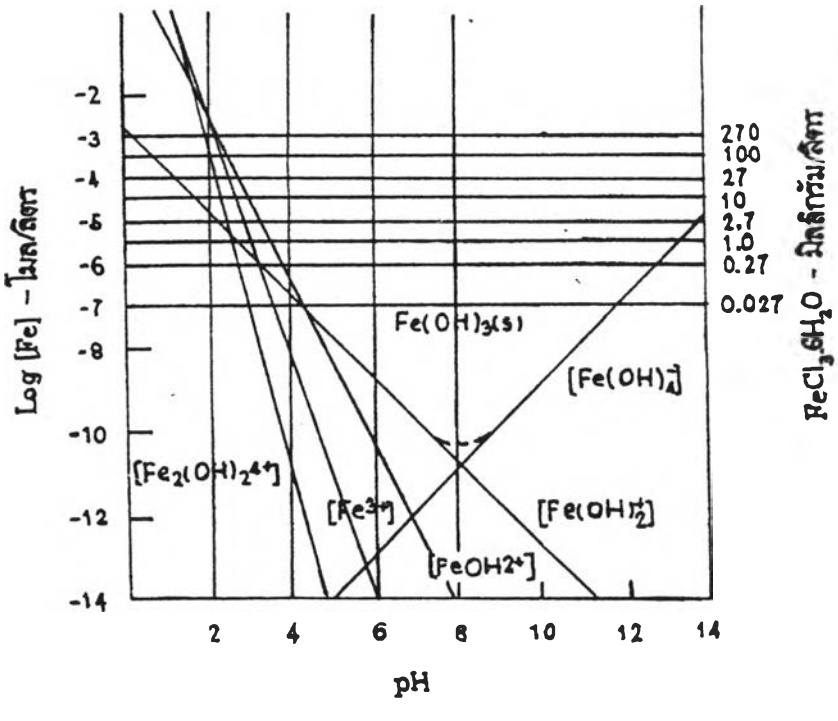
การใช้สารส้ม หรือ PAC พบว่าตัวที่เข้าไปช่วยให้ตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์รวมตัว คือ สารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $[Al(OH)_x]^{3+}$ เนื่องจากทั้งสารส้ม และ PAC มีธาตุอลูมิเนียม (Al) เป็นองค์ประกอบอยู่ เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้อนุมูลอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ออกมา ซึ่งจะรวมตัวกับอนุมูลไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ขึ้น ได้แก่ $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^{+}$, $Al(OH)_4^{-}$ โดยสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไปรวมตัวกับสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กบนผิวของตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดการสมมูลของประจุบนผิว หรือช่วยดึงดูดประจุตรงข้ามทำให้เกิดการรวมตัว และจมตัวกันได้มากขึ้น ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.54 (Snoeyink และ Jenkins,1980) และจากการศึกษาของนักวิจัย AWWA (1990) พบว่าสารส้มจะช่วยให้เกิดการจมตัวได้ดีที่ระดับพีเอช 5.5-7.5 แต่ที่ดีที่สุด คือ ระดับพีเอช 7

ในการทดลองของ Vitayaudom Veera (1967) พบว่าถ้าระดับพีเอชของน้ำอยู่ในช่วง 8.0-9.0 ตะกอนของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์จะสามารถจมตัวและตกตะกอนลงมาเองได้ โดยที่ไม่ต้องเติมตัวช่วยให้ตะกอนจมตัว ซึ่งขัดแย้งกับการผลการทดลองที่ได้ โดยที่ระดับพีเอช 8 และ 9 จะมีปริมาตรการจมตัวของตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ในปริมาตรที่น้อยกว่าระดับพีเอช 7 ตามลำดับ ทั้งนี้เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ต่างๆ เกาะอยู่ที่ผิวของตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดแรงผลักกันการรวมตัวและการจมตัวจึงเกิดได้ยาก

จากปริมาตรการจมตัวของตะกอนในทุกระดับพีเอชของตัวออกซิไดซ์และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด พบว่า ในกรณีที่ใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวช่วยตกตะกอน จะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการจมตัวของตะกอน จะใช้เวลามากกว่า 2 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเป็นเบสของน้ำมีค่าสูงมาก ทำให้ตะกอนเกิดการรวมตัวและจมตัวกันได้ยาก สำหรับในกรณีที่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า การจมตัวของตะกอนเกิดได้ดี และมีปริมาตรการจมตัวของตะกอนมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยให้ตะกอนรวมตัวชนิดหนึ่ง (Floculant) เวลาที่ใช้ใน

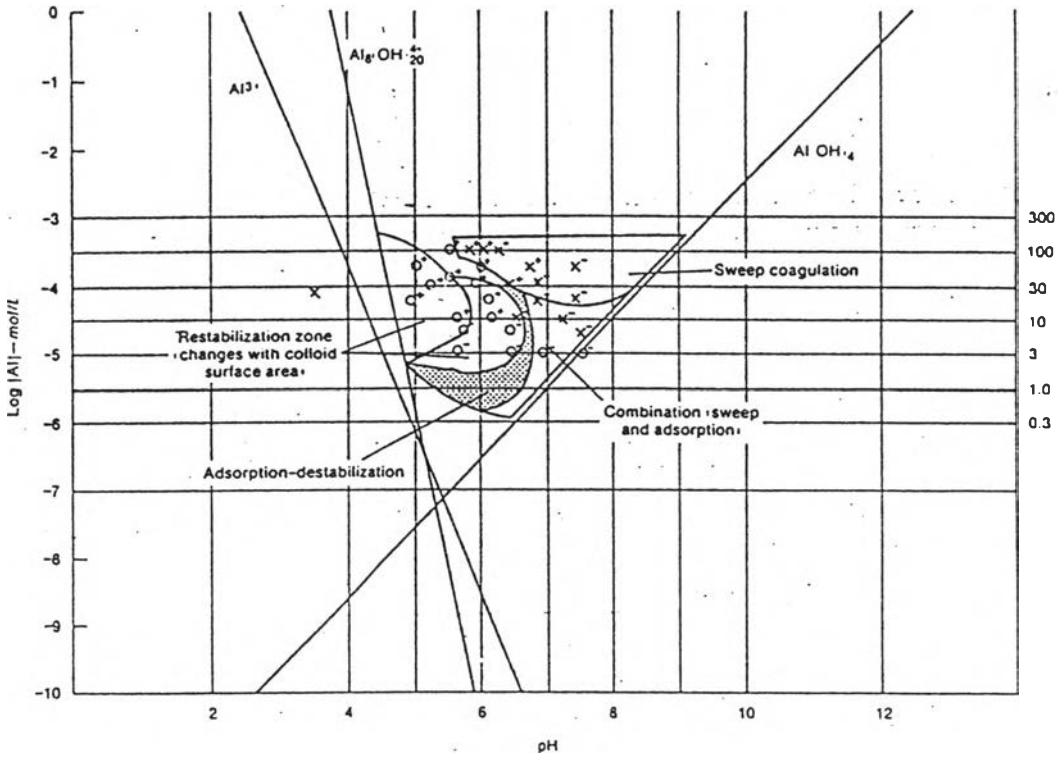
การจมตัวของตะกอนเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 30-50 นาที ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวแต่ละชนิด

จากการทดลองจะพบว่าทุกระดับพีเอชมีปริมาตรการจมตัวของตะกอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับพีเอช 5 - 9 และพีเอชอ้างอิงมีปริมาตรการจมตัวของตะกอนเรียงลำดับจากมากไปน้อยตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการจมตัวของตะกอนจะเกิดขึ้นได้ดีในสภาวะที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง เมื่อพิจารณาดัชนีคุณภาพน้ำที่ได้จากการกำจัดเหล็ก พบว่าการใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวแต่ละชนิดที่ระดับพีเอชต่างๆ ไม่มีผลต่อดัชนีคุณภาพน้ำ เนื่องจากค่าที่วิเคราะห์ได้มีแนวโน้มเหมือนกับการทดลองที่ 4.2 และความเข้มข้นของเหล็กที่เหลืออยู่มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้เช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Vitayaudom Veera (1967) คือ การใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวไม่มีผลต่อการกำจัดเหล็ก การเติมตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวเป็นเพียงตัวช่วยให้ตะกอนเกิดการรวมตัวและจมตัวกันได้รวดเร็วขึ้น เพื่อช่วยลดเวลาในการพักให้ตะกอนจมตัวก่อนปล่อยสารละลายส่วนใสที่ได้ไปกรองในระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมได้



รูปที่ 4.53 แสดงรูปของสารประกอบเชิงซ้อน $[Fe(OH)_x]^{3+}$ ที่ระดับพีเอชต่างๆ

ที่มา : Snoeylink และ Jenkins, 1980.



รูปที่ 4.54 แสดงรูปของสารประกอบเชิงซ้อน $[Al(OH)_x]^{3+}$ ที่ระดับพีเอชต่างๆ
ที่มา : Snoeylink และ Jenkins, 1980.

จากวัตถุประสงค์ในการทดลองนี้ เพื่อหาระดับพีเอชที่เหมาะสมในการใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวของตัวออกซิไดซ์ ตัวช่วยตกตะกอน และตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวแต่ละชนิดที่จะทำให้มีปริมาตรการจมตัวของตะกอนมากที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองทำให้สามารถเลือกระดับพีเอชที่เหมาะสมได้ คือ ระดับพีเอช 5-7 เนื่องจากมีปริมาตรการจมตัวมากกว่าระดับพีเอชอ้างอิง และเวลาที่ใช้ในการจมตัวของตะกอนประมาณ 30-50 นาที แต่เมื่อพิจารณาค่าดัชนีคุณภาพน้ำแล้วพบว่า ที่ระดับพีเอช 5 และ 6 ปริมาณเหล็กทั้งหมดมีมากกว่าที่ระดับพีเอช 7 และในวิธีที่ใช้ตัวออกซิไดซ์และตัวช่วยตกตะกอนบางชนิด จะพบว่ามีปริมาณเหล็กทั้งหมดมากกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ เช่น ในวิธีที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโอโซนร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับพีเอช 5 และวิธีที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโอโซนร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับพีเอช 6 จะมีปริมาณเหล็กทั้งหมด 0.392, 0.343, 0.329, 0.326, 0.375, 0.309 และ 0.308 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.300 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นระดับพีเอช 5 และ 6 ไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นสภาวะในการกำจัดเหล็ก เมื่อพิจารณาดัชนีคุณภาพน้ำในการกำจัดเหล็กที่ระดับพีเอช

7 ได้แก่ ระดับพีเอช ค่าความเป็นเบส ค่าความกระด้าง และปริมาณเหล็กทั้งหมด ของตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด พบว่า ในกรณีโซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่าดัชนีคุณภาพเป็น 8.6, 133.8 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต, 0.0 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต และ 0.151 มิลลิกรัม ตามลำดับ โซเดียมคาร์บอเนตเป็น 8.7, 880.3 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต, 0.0 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต และ 0.204 มิลลิกรัม ตามลำดับ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 7.7, 15.3 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต, 1176.3 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต และ 0.278 มิลลิกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ดังแสดงในภาคผนวก

ดังนั้นในการทดลองที่ 4.4 จะทดสอบความสามารถในการจมตัวของตะกอน โดยใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวปริมาณต่างๆ ที่ระดับพีเอช 7 เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของตัวช่วยให้ตะกอนจมตัว ตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนักวิจัย AWWA (1990) ด้วย

4.4 ทดสอบความสามารถในการจมตัวของตะกอน โดยใช้ตัวช่วยตกตะกอนปริมาณ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

การทดลองนี้ศึกษาถึงปริมาตรการจมตัวของตะกอนในแต่ละวิธีการ และการใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวแต่ละชนิดในปริมาณต่างๆ ที่ระดับพีเอช 7 เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวแต่ละชนิด การวิเคราะห์ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการทดลองที่ 4.3 คือ นำปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ได้ในแต่ละวิธีการไปทดสอบทางสถิติหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของปริมาตรการจมตัวของตะกอน โดยทำการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ One-way Analysis of Varience เพื่อทดสอบความแปรปรวนของปริมาตรการจมตัวของตะกอนในปริมาณต่างๆ ที่ $\alpha = 0.05$ หากพบว่ามีความแปรปรวนในกลุ่มค่าเฉลี่ยนี้ จะทำการวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของปริมาตรการจมตัวของตะกอนในการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์ ตัวช่วยตกตะกอน และตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวแต่ละชนิด โดย Multiple Comparison แบบ Duncan เพื่อหาว่าค่าเฉลี่ยของปริมาตรการจมตัวของตะกอนในปริมาณต่างๆ คู่ใดที่มีค่าความแตกต่างกันที่ทำให้เกิดความแปรปรวนดังกล่าว

จากการทดลองปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ได้ในแต่ละวิธีการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนที่ระดับพีเอช 7 ที่ใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวแต่ละชนิดที่ปริมาณ 0-500 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ได้ของตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวในแต่ละปริมาณ โดยมีอย่างน้อย 1 คู่ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ซึ่งแสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.25-4.34 และรูปที่ 4.55-4.78

ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกันในทุกวิธีการกำจัดเหล็กของตัวออกซิไดซ์ ตัวช่วยตกตะกอน และตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวแต่ละชนิด ที่ระดับพีเอช 7 กล่าวคือ ปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ได้ในกรณีที่ใช้สารส้ม หรือ PAC มีแนวโน้มเดียวกัน ดังนี้ ปริมาตรการจมตัวของตะกอนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณหนึ่งจะพบว่าปริมาตรการจมตัวของตะกอนจะลดลงเมื่อปริมาณของตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าปริมาณของตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวมีผลต่อปริมาตรการจมตัวของตะกอน และปริมาณที่เหมาะสมของสารส้ม หรือ PAC ที่ใช้มีปริมาณที่แตกต่างกันด้วย

ตารางที่ 4.25 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ปริมาณ	ระดับ	ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	(มก/ล.)	พีเอช	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
$KMnO_4/NaOH$	0	8.2	114.2	-	0.167	99.9970	28.5	41.0	51.0	57.0	57.0	57.0
	100	8.2	114.2		0.161	99.9971	31.0	43.0	49.0	49.0	49.0	49.0
	200	8.1	110.2		0.169	99.9970	35.0	48.0	56.0	56.0	56.0	56.0
	300	8.2	112.6		0.166	99.9970	45.0	54.0	61.5	61.5	61.5	61.5
	400	8.2	114.2		0.164	99.9971	27.0	41.0	54.0	54.0	54.0	54.0
	500	8.1	110.2		0.161	99.9971	26.0	40.0	50.0	53.0	53.0	53.0
$KMnO_4/Na_2CO_3$	0	8.5	850.6	-	0.177	99.9968	27.0	38.0	43.5	49.0	49.0	49.0
	100	8.6	887.2		0.175	99.9969	23.0	34.0	42.0	46.0	52.0	52.0
	200	8.6	895.5		0.178	99.9968	28.0	40.0	47.0	52.0	55.0	55.0
	300	8.6	896.6		0.177	99.9968	33.0	42.0	50.0	56.0	59.0	59.0
	400	8.5	843.9		0.174	99.9969	30.0	37.0	48.0	53.0	55.5	55.5
	500	8.5	857.6		0.171	99.9969	30.0	34.5	41.0	48.0	50.0	50.0
$KMnO_4/Ca(OH)_2$	0	7.8	19.6	1,090.0	0.265	99.9953	54.0	62.0	70.0	70.0	70.0	70.0
	100	7.6	15.6	1,120.0	0.269	99.9952	55.5	67.0	84.5	84.5	84.5	84.5
	200	7.5	15.6	1,100.0	0.278	99.9950	65.0	86.5	95.5	95.5	95.5	95.5
	300	7.1	12.2	1,130.0	0.278	99.9950	69.5	86.5	97.5	97.5	97.5	97.5
	400	7.5	15.8	1,120.0	0.273	99.9951	67.0	79.0	85.0	85.0	85.0	85.0
	500	7.6	15.8	1,100.0	0.270	99.9952	65.0	74.0	79.0	79.0	79.0	79.0

ตารางที่ 4.26 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ปริมาณ (มก/ล.)	ระดับพีเอช	ค่าความเป็นเบส (มก/ล.)	ค่าความกระด้าง (มก/ล.)	ปริมาณเหล็ก (มก/ล.)	ประสิทธิภาพ (%)	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
							10	20	30	40	50	60
NaOCl/NaOH	0	8.4	140.4	-	0.140	99.9975	41.0	62.0	75.0	75.0	75.0	75.0
	100	8.4	140.4		0.136	99.9976	40.0	60.0	73.0	73.0	73.0	73.0
	200	8.4	140.4		0.132	99.9976	41.0	65.0	80.0	80.0	80.0	80.0
	300	8.5	143.6		0.142	99.9975	43.0	68.0	88.0	88.0	88.0	88.0
	400	8.6	146.9		0.146	99.9974	42.0	59.0	70.0	70.0	70.0	70.0
	500	8.3	120.4		0.135	99.9976	42.0	58.0	69.0	69.0	69.0	69.0
$NaOCl/Na_2CO_3$	0	8.5	812.0	-	0.210	99.9962	24.0	33.0	35.0	35.0	35.0	35.0
(*เวลาทุกๆ 30 นาที)	100	8.5	803.8		0.223	99.9960	23.0	28.0	30.0	30.0	30.0	30.0
	200	8.7	839.9		0.228	99.9959	24.0	29.0	35.0	37.0	37.0	37.0
	300	8.7	853.6		0.210	99.9962	29.0	37.0	44.0	46.0	46.0	46.0
	400	8.6	820.2		0.212	99.9962	28.0	35.0	41.0	42.0	42.0	42.0
	500	8.7	871.8		0.223	99.9960	27.0	35.0	41.0	41.5	41.5	41.5
$NaOCl/Ca(OH)_2$	0	7.5	12.2	990.0	0.245	99.9956	65.0	80.0	83.0	83.0	83.0	83.0
	100	7.5	12.2	1,000.0	0.240	99.9957	76.5	85.0	88.0	88.0	88.0	88.0
	200	7.4	11.4	990.0	0.247	99.9956	80.0	90.0	94.0	94.0	94.0	94.0
	300	7.4	11.4	990.0	0.242	99.9957	84.0	96.0	98.0	98.0	98.0	98.0
	400	7.4	10.6	990.0	0.240	99.9957	82.0	92.0	94.0	94.0	94.0	94.0
	500	7.5	12.2	980.0	0.250	99.9955	80.0	90.0	93.0	93.0	93.0	93.0

ตารางที่ 4.27 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ปริมาณ (มก/ล.)	ระดับพีเอช	ค่าความเป็นเบส (มก/ล.)	ค่าความกระด้าง (มก/ล.)	ปริมาณเหล็ก (มก/ล.)	ประสิทธิภาพ (%)	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
							10	20	30	40	50	60
อากาศ/NaOH	0	8.4	141.1	-	0.222	99.9960	13.0	20.0	25.0	31.5	37.5	37.5
	100	8.2	122.4		0.221	99.9960	14.0	19.0	26.0	36.0	40.0	40.0
	200	8.4	140.4		0.220	99.9961	14.0	21.0	28.5	38.0	42.0	42.0
	300	8.2	122.4		0.220	99.9961	14.0	23.5	33.5	43.0	51.0	51.0
	400	8.2	122.4		0.228	99.9959	14.0	22.5	33.0	38.0	43.5	43.5
	500	8.1	115.7		0.227	99.9959	14.0	22.0	26.0	30.5	36.5	36.5
อากาศ/Na_2CO_3	0	8.7	840.6	-	0.237	99.9958	15.0	21.0	27.0	30.0	32.0	32.0
(*เวลาทุกๆ 30 นาที)	100	8.9	953.2		0.235	99.9958	15.0	24.0	31.0	33.0	35.0	35.0
	200	8.8	896.1		0.237	99.9958	18.0	26.0	33.0	35.0	37.0	37.0
	300	8.9	961.4		0.236	99.9958	19.0	29.0	38.5	41.0	43.0	43.0
	400	8.8	842.4		0.238	99.9957	16.0	25.0	30.0	31.5	32.0	32.0
	500	8.6	835.3		0.235	99.9958	15.0	21.0	27.0	28.5	29.5	29.5
อากาศ/$Ca(OH)_2$	0	7.6	15.9	1,140.0	0.269	99.9952	50.0	66.0	70.0	70.0	70.0	70.0
	100	7.6	15.9	1100',.0	0.272	99.9951	55.0	75.0	80.0	80.0	80.0	80.0
	200	7.5	13.9	1,150.0	0.275	99.9951	76.5	93.0	98.0	98.0	98.0	98.0
	300	7.8	18.4	1,120.0	0.264	99.9953	85.0	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0
	400	7.8	18.4	1,080.0	0.268	99.9952	54.5	78.0	83.0	83.0	83.0	83.0
	500	7.8	18.4	1,120.0	0.270	99.9952	50.0	70.0	75.0	75.0	75.0	75.0

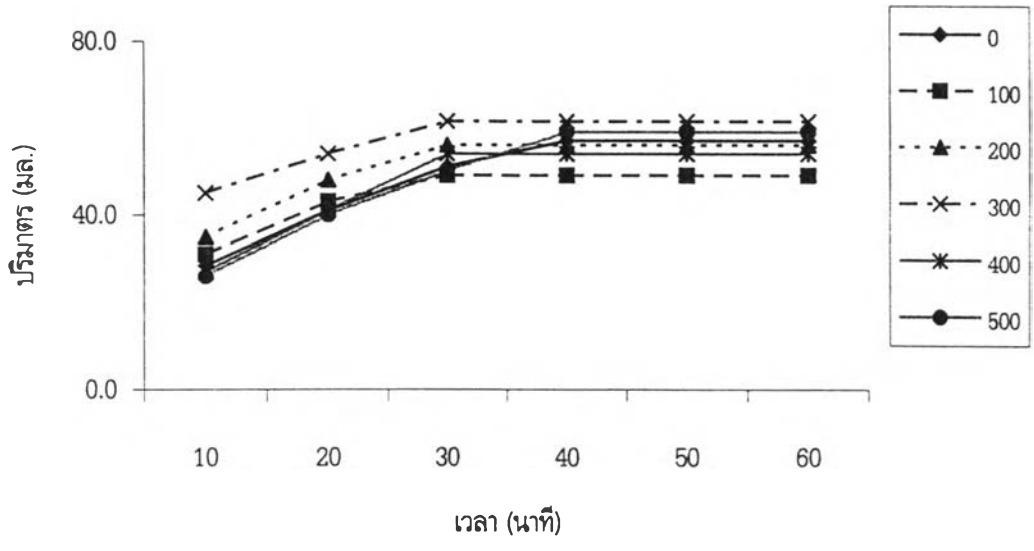
ตารางที่ 4.28 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ปริมาณ	ระดับ	ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	(มก/ล.)	พีเอช	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
โอโซน/NaOH	0	8.2	115.3	-	0.160	99.9971	18.0	25.5	36.0	42.5	47.5	54.5
	100	8.2	115.3		0.165	99.9970	20.0	27.0	35.0	44.0	49.0	55.0
	200	8.5	137.1		0.166	99.9970	24.0	32.5	42.0	52.0	57.0	63.0
	300	8.2	115.3		0.163	99.9971	25.0	35.0	45.0	57.0	67.0	72.0
	400	8.5	137.1		0.161	99.9971	23.0	32.0	42.0	50.0	57.0	62.5
	500	8.2	115.3		0.167	99.9970	23.0	32.0	42.0	50.0	57.0	62.5
โอโซน/Na_2CO_3	0	8.6	851.8	-	0.182	99.9967	15.0	19.0	23.5	25.0	32.0	32.0
(*เวลาทุกๆ 30 นาที)	100	8.6	857.6		0.180	99.9968	15.5	20.0	23.0	28.0	30.0	30.0
	200	8.7	885.3		0.185	99.9967	16.0	22.0	26.0	29.0	34.0	34.0
	300	8.5	827.8		0.180	99.9968	17.5	25.0	30.5	35.0	38.0	38.0
	400	8.8	897.9		0.187	99.9966	15.0	20.0	22.0	26.0	30.0	30.0
	500	8.9	935.6		0.181	99.9968	15.0	20.0	22.0	24.0	28.0	28.0
โอโซน/$Ca(OH)_2$	0	7.2	11.4	1,000.0	0.202	99.9964	27.0	45.0	53.5	57.0	63.0	63.0
	100	7.4	12.2	1,000.0	0.198	99.9965	34.0	57.5	71.0	74.0	74.0	74.0
	200	7.4	12.2	990.0	0.200	99.9964	49.0	70.0	74.0	80.5	80.5	80.5
	300	7.4	12.2	1,010.0	0.198	99.9965	73.0	83.0	87.0	87.0	87.0	87.0
	400	7.4	12.2	990.0	0.202	99.9964	69.5	80.0	82.0	82.0	82.0	82.0
	500	7.4	12.2	990.0	0.204	99.9963	65.0	70.0	72.0	72.0	72.0	72.0

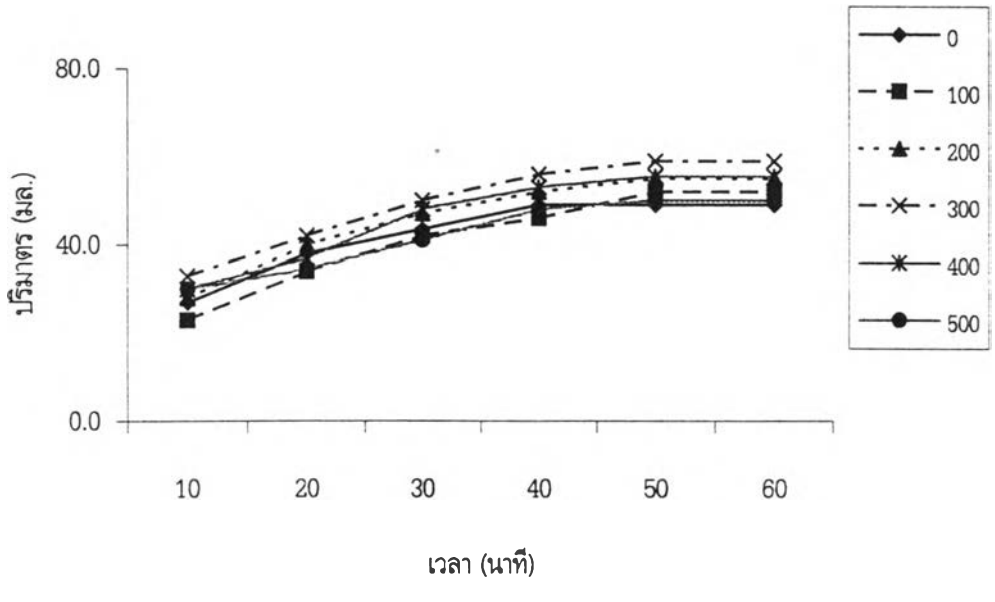
ตารางที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ปริมาณตัวช่วยตกตะกอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)						ผลการเปรียบเทียบทางสถิติ
	0	100	200	300	400	500	
$KMnO_4$/NaOH	57.0 [a]	49.0	56.0 [a]	61.5	54.0 [b]	53.0 [b]	แตกต่างกัน
$KMnO_4$/Na_2CO_3	49.0 [a]	52.0	55.0 [b]	59.0	55.5 [b]	50.0 [a]	แตกต่างกัน
$KMnO_4$/$Ca(OH)_2$	70.0	84.5 [a]	95.5	97.5	85.0 [a]	79.0	แตกต่างกัน
NaOCl/NaOH	75.0	73.0	80.0	88.0	70.0 [a]	69.0 [a]	แตกต่างกัน
NaOCl/Na_2CO_3	35.0	30.0	37.0	46.0	42.0 [a]	41.5 [a]	แตกต่างกัน
NaOCl/$Ca(OH)_2$	83.0	88.0	94.0 [a]	98.0	94.0 [a]	93.0 [a]	แตกต่างกัน
อากาศ/NaOH	37.5 [a]	40.0	42.0 [b]	51.0	43.5 [b]	36.5 [a]	แตกต่างกัน
อากาศ/Na_2CO_3	32.0 [a]	35.0	37.0	43.0	32.0 [a]	29.5	แตกต่างกัน
อากาศ/$Ca(OH)_2$	70.0	80.0	98.0 [a]	98.0 [a]	83.0	75.0	แตกต่างกัน
โอโซน/NaOH	54.5 [a]	55.0 [a]	63.0 [b]	72.0	62.5 [b]	62.5 [b]	แตกต่างกัน
โอโซน/Na_2CO_3	32.0	30.0 [a]	34.0	38.0	30.0 [a]	28.0	แตกต่างกัน
โอโซน/$Ca(OH)_2$	96.0	74.0	80.5 [a]	87.0	82.0 [a]	72.0	แตกต่างกัน

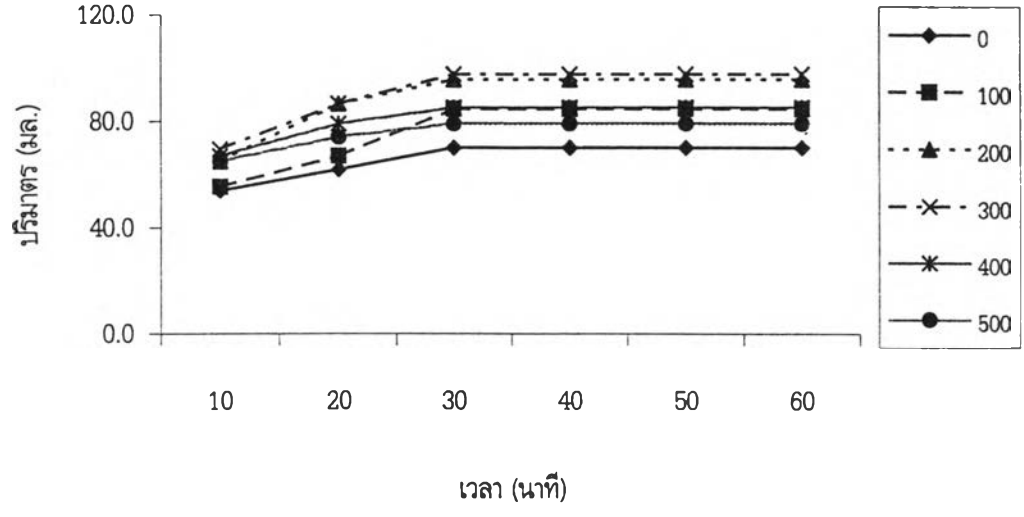
หมายเหตุ : a,b หมายถึง ค่าเฉลี่ยของปริมาตรการจมตัวของตะกอน คู่ที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ



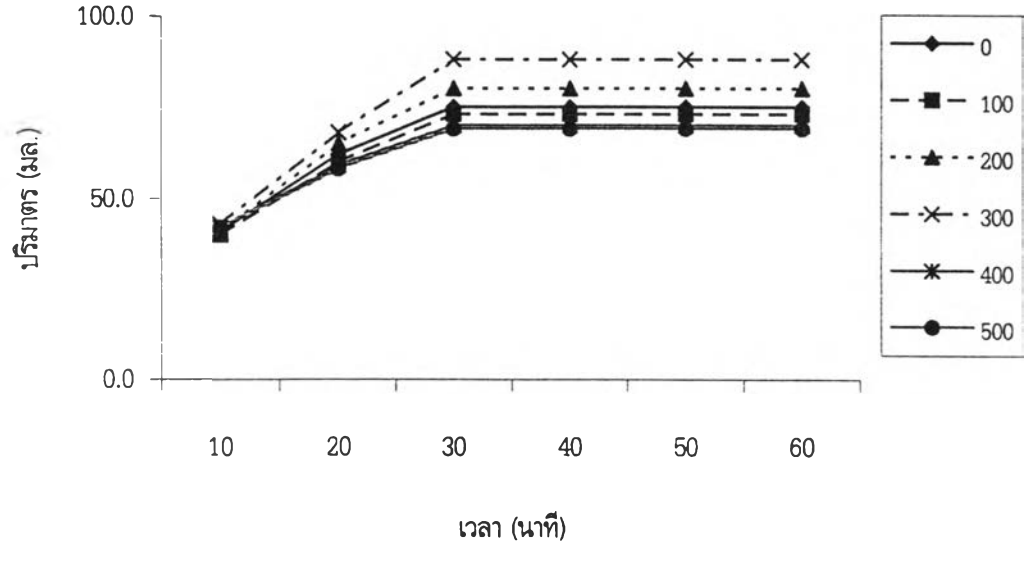
รูปที่ 4.55 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



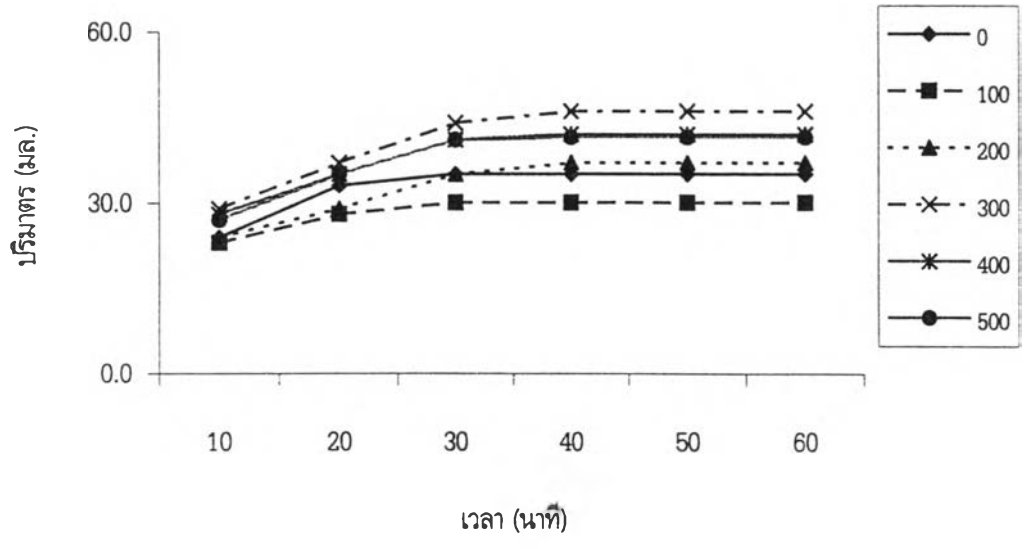
รูปที่ 4.56 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



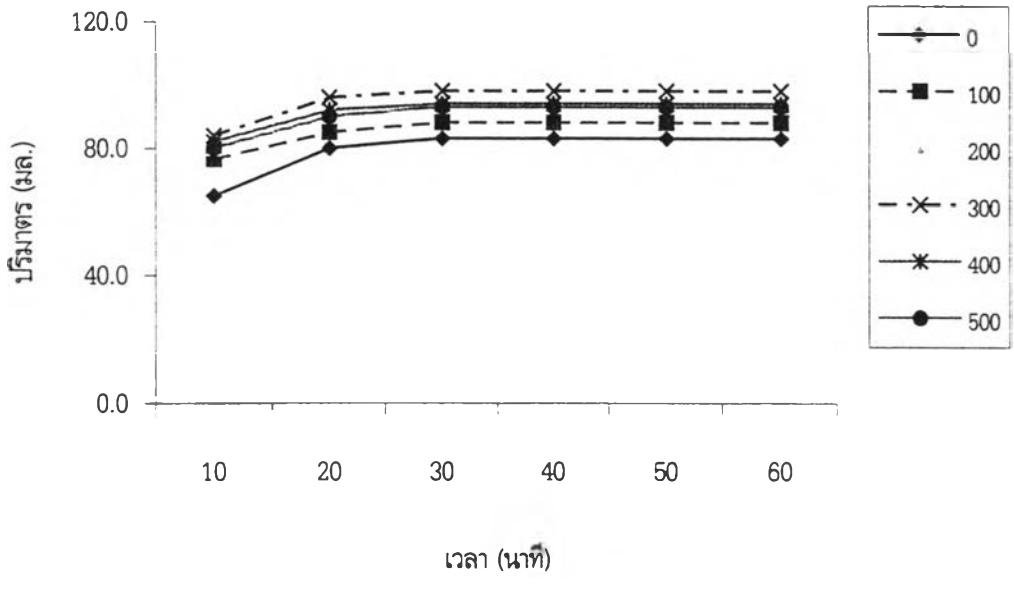
รูปที่ 4.57 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



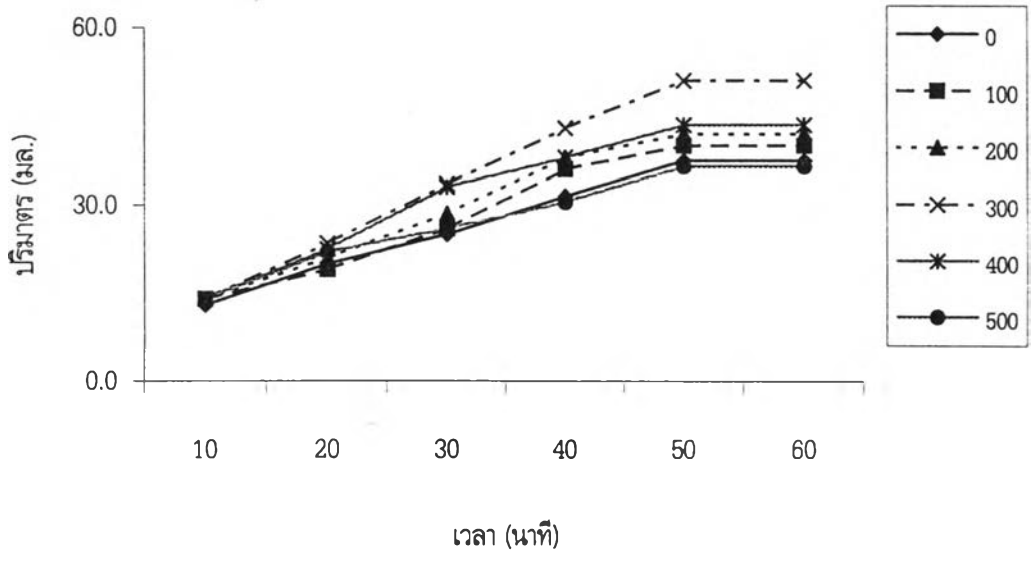
รูปที่ 4.58 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



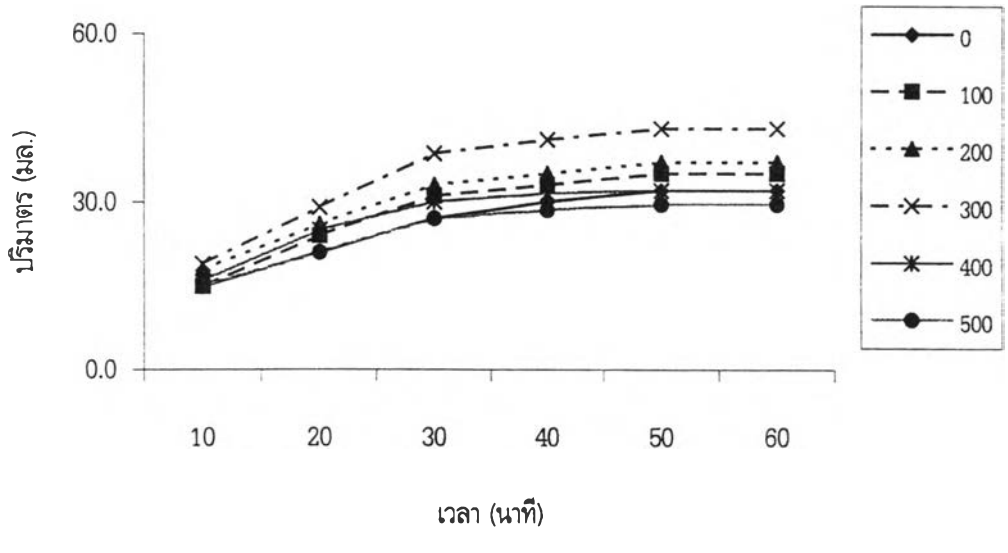
รูปที่ 4.59 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



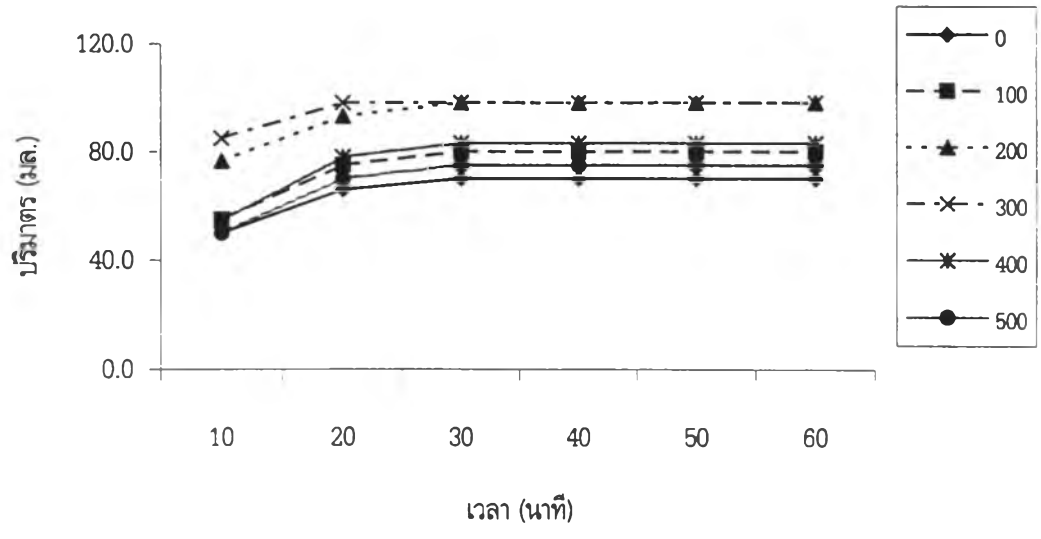
รูปที่ 4.60 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



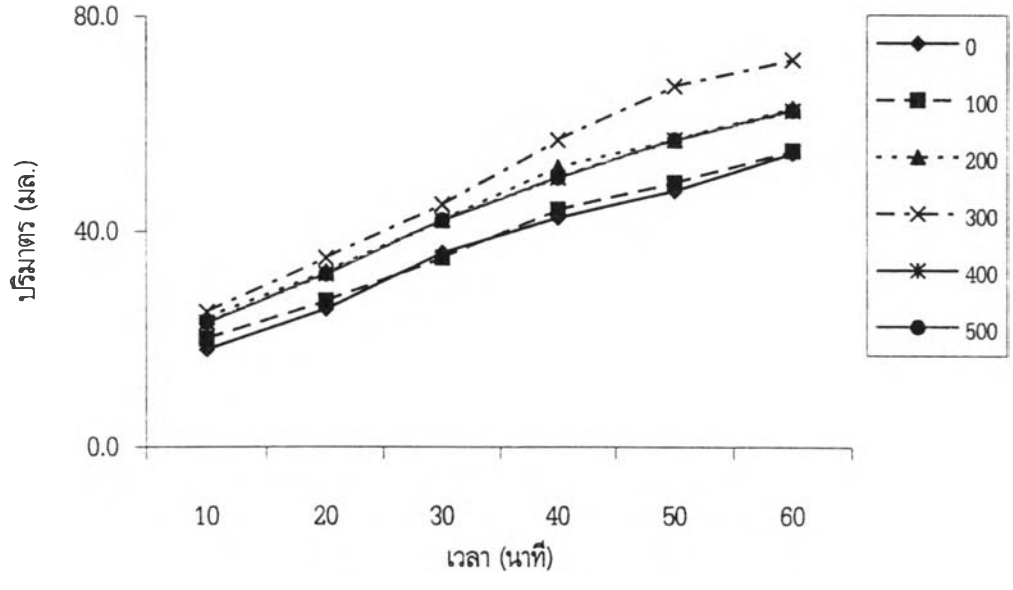
รูปที่ 4.61 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



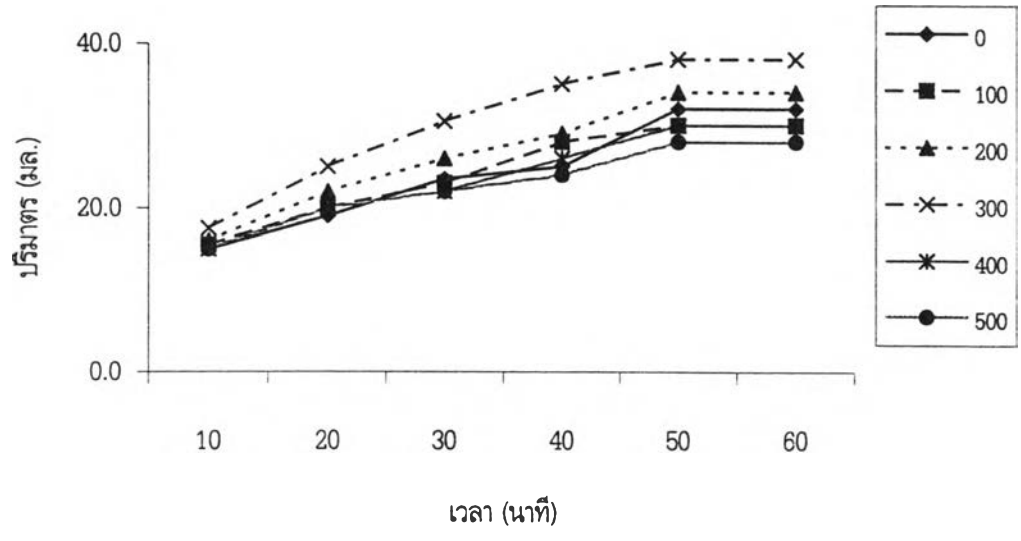
รูปที่ 4.62 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



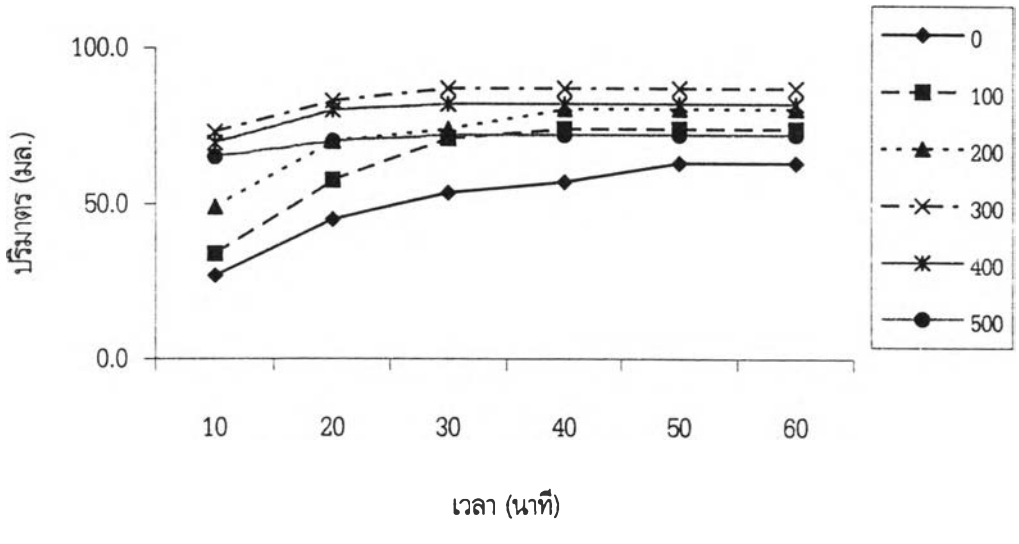
รูปที่ 4.63 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.64 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.65 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.66 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4.30 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ปริมาณ	ระดับ	ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	(มก/ล.)	พีเอช	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
$KMnO_4/NaOH$	0	8.2	115.3	-	0.156	99.9972	22.5	35.0	43.0	52.0	52.0	52.0
	100	8.2	115.3		0.158	99.9972	21.0	36.0	46.0	52.5	52.5	52.5
	200	8.3	121.4		0.167	99.9970	24.0	37.0	46.5	56.0	56.0	56.0
	300	8.3	121.4		0.158	99.9972	23.5	37.0	42.0	50.0	50.0	50.0
	400	8.2	114.2		0.166	99.9970	23.0	36.0	41.0	48.0	48.0	48.0
	500	8.2	114.2		0.161	99.9971	26.0	35.0	42.5	46.0	46.0	46.0
$KMnO_4/Na_2CO_3$	0	8.6	895.5	-	0.169	99.9970	25.0	44.0	61.5	71.0	73.5	73.5
	100	8.6	895.5		0.167	99.9970	33.0	47.5	57.0	67.5	75.0	75.0
	200	8.5	878.3		0.168	99.9970	35.0	58.5	65.5	72.5	78.0	78.0
	300	8.6	890.8		0.172	99.9969	35.0	53.0	60.5	70.0	70.0	70.0
	400	8.5	879.6		0.169	99.9970	35.0	47.0	59.0	68.5	68.5	68.5
	500	8.6	893.4		0.168	99.9970	33.5	45.0	54.0	62.0	62.0	62.0
$KMnO_4/Ca(OH)_2$	0	7.1	12.2	1,160.0	0.202	99.9964	64.5	86.0	95.0	95.0	95.0	95.0
	100	7.1	12.2	1,140.0	0.200	99.9964	82.0	90.0	92.0	92.0	92.0	92.0
	200	7.1	12.2	1,140.0	0.201	99.9964	83.0	95.0	98.0	98.0	98.0	98.0
	300	7.1	12.2	1,080.0	0.204	99.9963	77.5	88.0	92.0	92.0	92.0	92.0
	400	7.2	13.6	1,080.0	0.198	99.9965	63.0	81.0	90.0	90.0	90.0	90.0
	500	7.2	13.6	1,080.0	0.198	99.9965	60.0	80.0	85.0	85.0	85.0	85.0

ตารางที่ 4.31 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

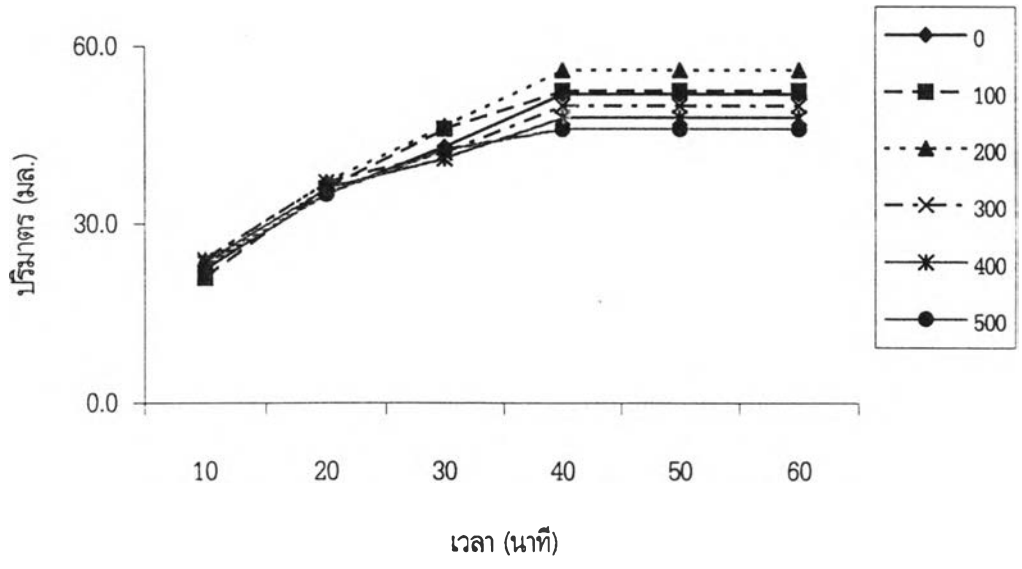
สภาวะ	ปริมาณ	ระดับ	ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	(มก/ล.)	พีเอช	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
NaOCl/NaOH	0	8.4	139.6	-	0.210	99.9962	41.0	62.0	75.0	75.0	75.0	75.0
	100	8.1	110.7		0.212	99.9962	46.0	64.5	82.5	82.5	82.5	82.5
	200	8.4	140.4		0.213	99.9962	54.0	72.0	85.0	85.0	85.0	85.0
	300	8.1	110.7		0.219	99.9961	45.0	57.0	75.0	75.0	75.0	75.0
	400	8.2	114.2		0.217	99.9961	43.0	64.0	73.0	73.0	73.0	73.0
	500	8.5	143.6		0.222	99.9960	40.0	57.0	66.0	66.0	66.0	66.0
$NaOCl/Na_2CO_3$	0	8.5	813.4	-	0.225	99.9960	24.0	35.0	41.0	41.0	41.0	41.0
(*เวลาทุกๆ 30 นาที)	100	8.6	820.2		0.228	99.9959	30.0	38.0	45.0	45.0	45.0	45.0
	200	8.6	823.2		0.222	99.9960	35.0	43.0	52.0	52.0	52.0	52.0
	300	8.5	812.0		0.225	99.9960	32.0	40.0	48.0	48.0	48.0	48.0
	400	8.5	812.0		0.218	99.9961	28.0	37.0	43.0	43.0	43.0	43.0
	500	8.6	820.2		0.219	99.9961	25.0	34.0	40.0	40.0	40.0	40.0
$NaOCl/Ca(OH)_2$	0	7.3	10.6	990.0	0.253	99.9955	62.0	81.0	85.0	88.0	88.0	88.0
	100	7.4	11.4	970.0	0.246	99.9956	53.0	69.0	76.0	76.0	76.0	76.0
	200	7.4	11.4	950.0	0.250	99.9955	78.0	88.0	91.5	91.5	91.5	91.5
	300	7.3	10.6	940.0	0.263	99.9953	72.0	86.0	90.0	90.0	90.0	90.0
	400	7.4	11.4	960.0	0.253	99.9955	67.0	80.0	84.0	84.0	84.0	84.0
	500	7.3	10.6	980.0	0.248	99.9956	60.0	73.0	77.0	77.0	77.0	77.0

ตารางที่ 4.32 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

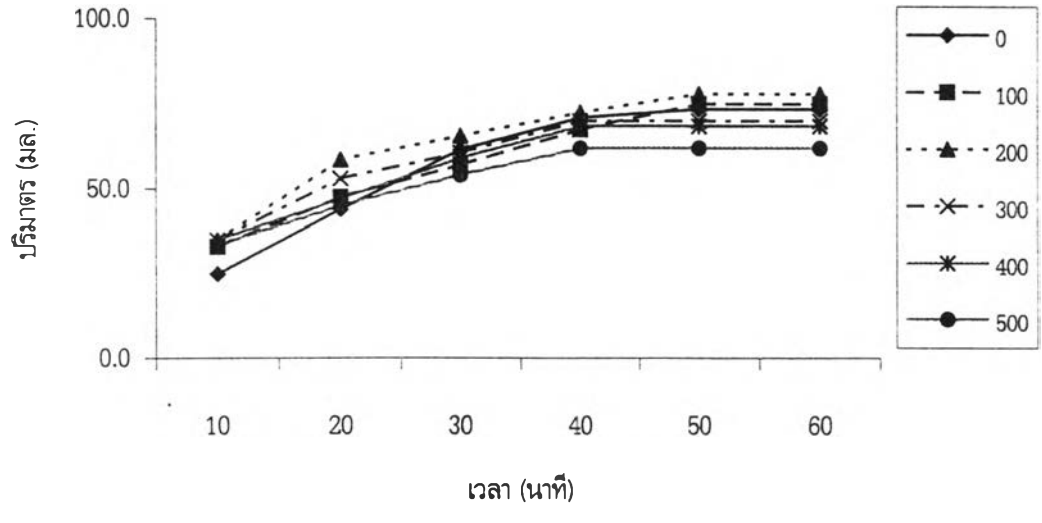
สภาวะ	ปริมาณ (มก/ล.)	ระดับพีเอช	ค่าความเป็นเบส (มก/ล.)	ค่าความกระด้าง (มก/ล.)	ปริมาณเหล็ก (มก/ล.)	ประสิทธิภาพ (%)	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
							10	20	30	40	50	60
อากาศ/NaOH	0	8.4	141.4	-	0.212	99.9962	22.5	33.0	42.0	48.0	55.0	55.0
	100	8.4	141.4		0.218	99.9961	21.0	34.0	42.0	48.0	55.0	55.0
	200	8.3	122.4		0.213	99.9962	22.0	34.0	43.0	52.0	58.0	58.0
	300	8.4	140.4		0.219	99.9961	22.0	34.0	43.0	53.0	53.0	53.0
	400	8.4	140.4		0.229	99.9959	22.0	31.0	37.5	44.0	44.0	44.0
	500	8.3	122.4		0.223	99.9960	22.0	30.5	35.5	42.0	42.0	42.0
อากาศ/Na_2CO_3	0	8.6	861.1	-	0.242	99.9957	17.0	24.0	30.5	30.5	30.5	30.5
(*เวลาทุกๆ 30 นาที)	100	8.7	879.3		0.232	99.9958	19.0	28.0	32.0	32.0	32.0	32.0
	200	8.8	886.1		0.229	99.9959	23.0	32.0	37.5	37.5	37.5	37.5
	300	8.9	924.4		0.225	99.9960	21.0	30.0	34.0	34.0	34.0	34.0
	400	8.7	879.3		0.232	99.9958	19.0	27.5	31.0	31.0	31.0	31.0
	500	8.6	861.1		0.241	99.9957	17.0	25.5	30.0	30.0	30.0	30.0
อากาศ/$Ca(OH)_2$	0	7.4	12.2	910.0	0.278	99.9950	32.0	44.5	52.0	52.0	52.0	52.0
	100	7.5	13.6	900.0	0.269	99.9952	31.0	50.0	62.0	68.0	72.5	72.5
	200	7.4	12.2	930.0	0.275	99.9951	55.0	67.0	76.0	83.0	88.5	88.5
	300	7.5	13.6	900.0	0.268	99.9952	50.0	65.0	75.0	80.0	85.0	85.0
	400	7.5	13.6	900.0	0.264	99.9953	45.0	63.5	82.0	82.0	82.0	82.0
	500	7.4	12.2	900.0	0.278	99.9950	40.0	60.0	77.0	77.0	77.0	77.0

ตารางที่ 4.33 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

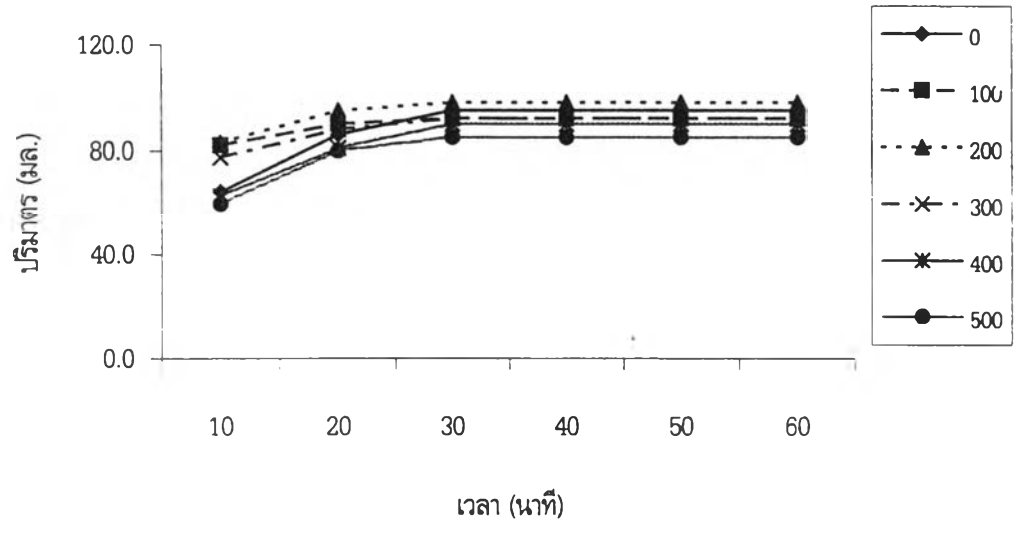
สภาวะ	ปริมาณ (มก/ล.)	ระดับพีเอช	ค่าความเป็นเบส (มก/ล.)	ค่าความกระด้าง (มก/ล.)	ปริมาณเหล็ก (มก/ล.)	ประสิทธิภาพ (%)	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
							10	20	30	40	50	60
โอโซน/NaOH	0	8	109.8	-	0.224	99.9960	19.0	25.0	36.0	45.0	45.0	45.0
	100	8.2	115.3		0.218	99.9961	21.0	29.0	42.0	48.0	48.0	48.0
	200	8.2	114.2		0.216	99.9961	25.0	33.5	46.5	54.0	54.0	54.0
	300	8.1	110.7		0.221	99.9960	23.0	31.0	42.5	50.0	50.0	50.0
	400	8.1	110.4		0.221	99.9960	20.5	29.5	40.0	47.0	47.0	47.0
	500	8.2	114.2		0.218	99.9961	18.0	26.0	36.0	42.0	42.0	42.0
โอโซน/Na_2CO_3	0	8.9	915.6	-	0.224	99.9960	24.5	41.0	45.0	45.0	45.0	45.0
(*เวลาทุกๆ 30 นาที)	100	8.8	887.3		0.236	99.9958	32.0	51.0	59.0	59.0	59.0	59.0
	200	8.9	987.4		0.230	99.9959	39.0	67.0	71.5	71.5	71.5	71.5
	300	8.9	980.7		0.228	99.9959	30.0	49.5	54.0	54.0	54.0	54.0
	400	8.7	865.3		0.230	99.9959	26.0	43.0	50.0	50.0	50.0	50.0
	500	8.7	865.3		0.230	99.9959	24.0	40.0	45.0	45.0	45.0	45.0
โอโซน/$Ca(OH)_2$	0	7.4	12.2	1,010.0	0.269	99.9952	32.0	45.0	55.0	67.0	67.0	67.0
	100	7.4	12.2	1,010.0	0.272	99.9951	45.0	50.0	59.0	70.0	70.0	70.0
	200	7.4	12.2	1,000.0	0.270	99.9952	50.0	68.0	78.0	88.0	88.0	88.0
	300	7.4	12.2	1,000.0	0.268	99.9952	45.0	63.0	73.0	80.0	80.0	80.0
	400	7.4	12.2	1,000.0	0.271	99.9951	43.0	58.0	67.0	75.0	75.0	75.0
	500	7.4	12.2	1,000.0	0.272	99.9951	40.0	55.0	64.0	70.0	70.0	70.0



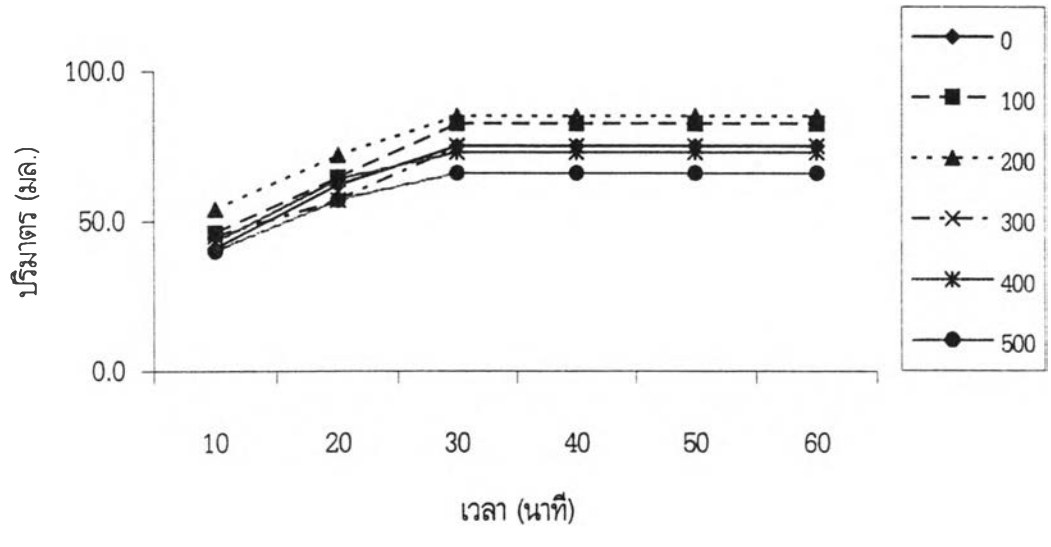
รูปที่ 4.67 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



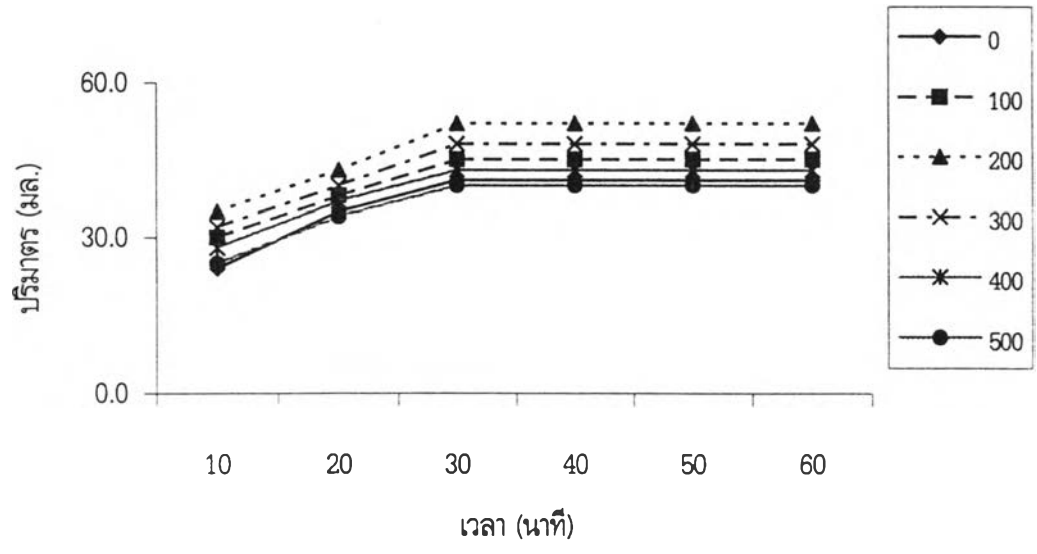
รูปที่ 4.68 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



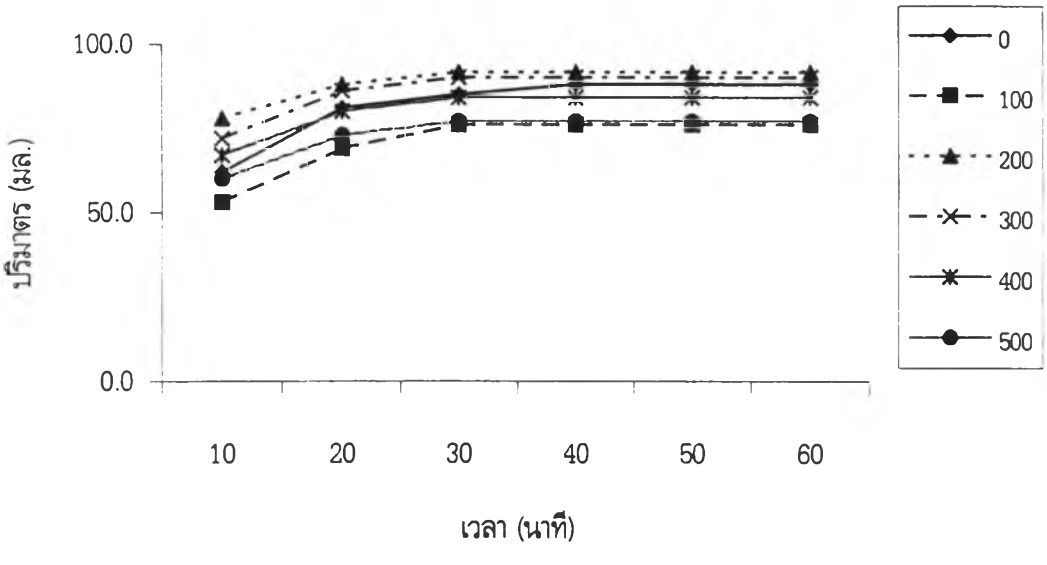
รูปที่ 4.69 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



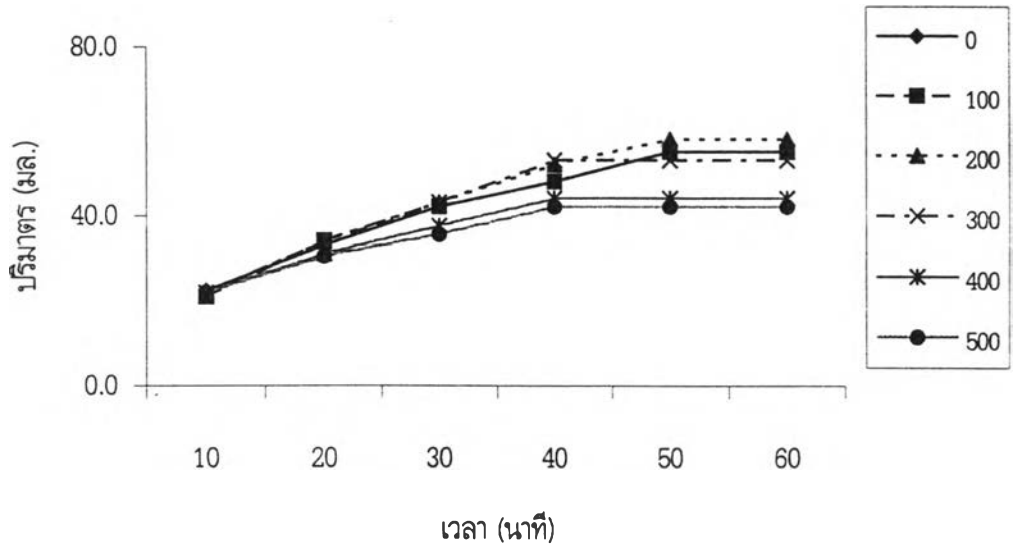
รูปที่ 4.70 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



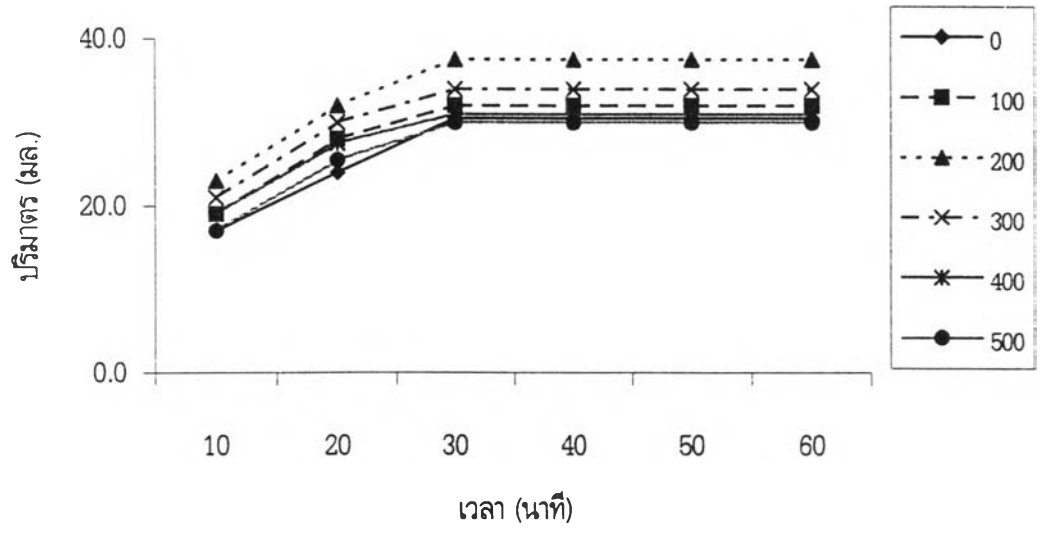
รูปที่ 4.71 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



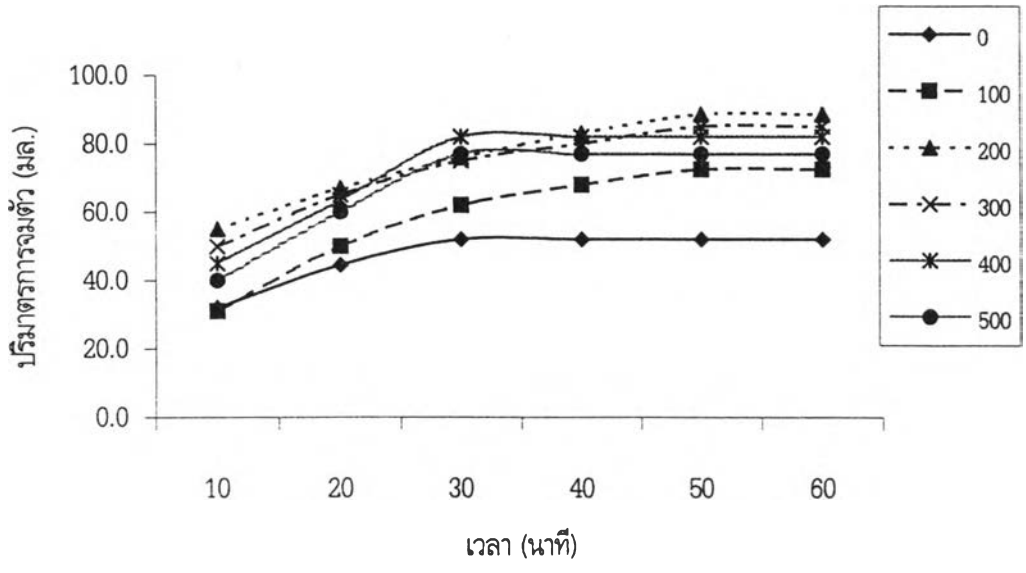
รูปที่ 4.72 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



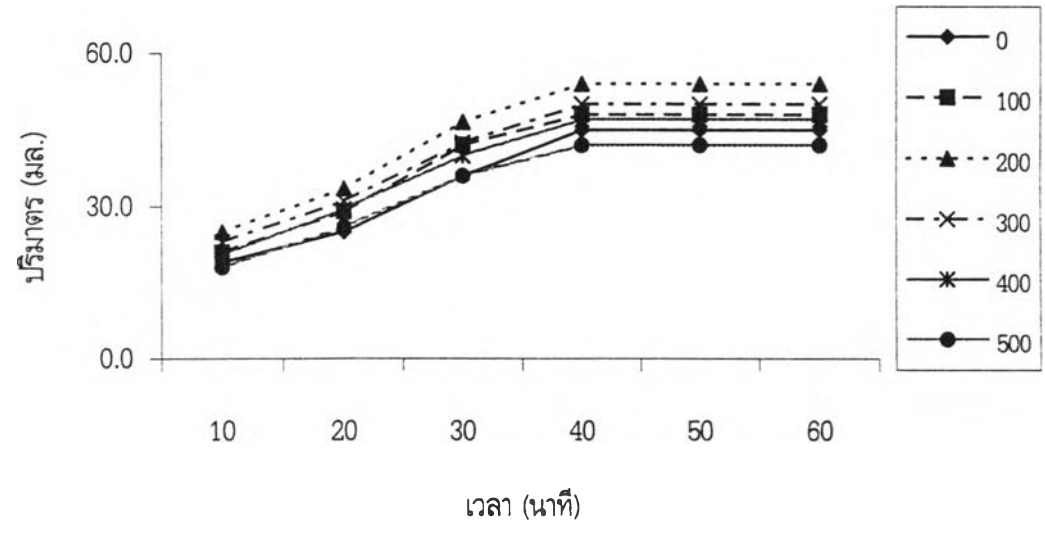
รูปที่ 4.73 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



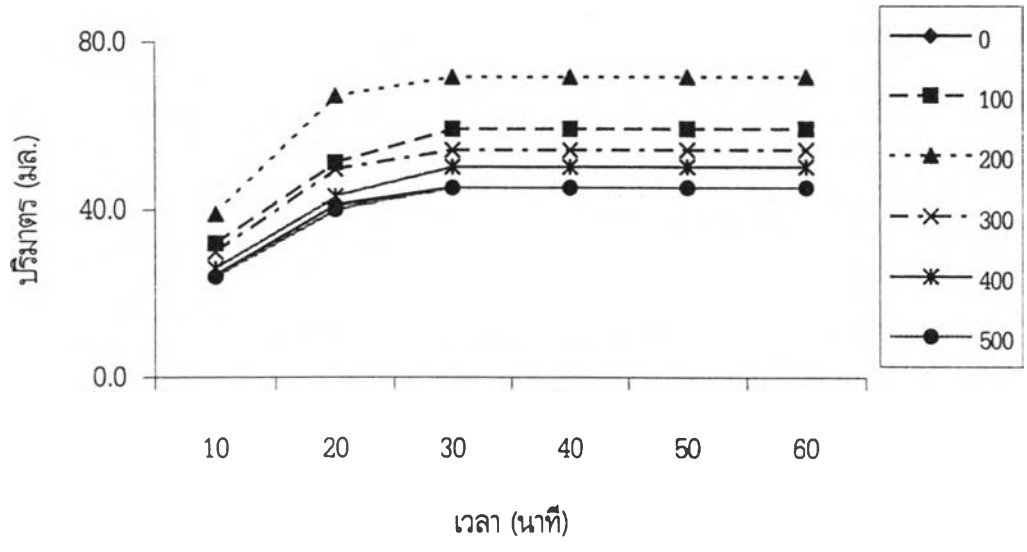
รูปที่ 4.74 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



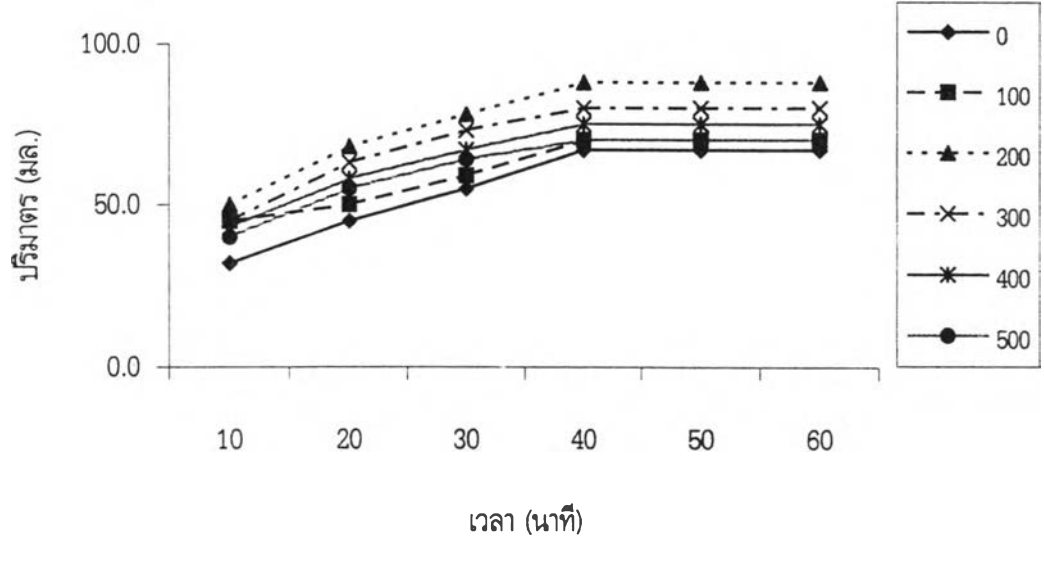
รูปที่ 4.75 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.76 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.77 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.78 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของโอโซนร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ปริมาณตัวช่วยตกตะกอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)						ผลการเปรียบเทียบทางสถิติ
	0	100	200	300	400	500	
$KMnO_4$/NaOH	52.0 [a]	52.5 [a]	56.0	50.0	48.0	46.0	แตกต่างกัน
$KMnO_4$/Na_2CO_3	73.5 [a]	75.0 [a]	78.0	70.0 [b]	68.5 [b]	62.0	แตกต่างกัน
$KMnO_4$/$Ca(OH)_2$	95.0	92.0 [a]	98.0	92.0 [a]	90.0	85.0	แตกต่างกัน
NaOCl/NaOH	75.0 [a]	82.5	85.0	75.0 [a]	73.0	66.0	แตกต่างกัน
NaOCl/Na_2CO_3	41.0 [a]	45.0	52.0	48.0	43.0	40.0 [a]	แตกต่างกัน
NaOCl/$Ca(OH)_2$	88.0	76.0 [a]	91.5 [b]	90.0 [b]	84.0	77.0 [a]	แตกต่างกัน
อากาศ/NaOH	55.0 [a]	55.0 [a]	58.0	53.0	44.0	42.0	แตกต่างกัน
อากาศ/Na_2CO_3	30.5 [a,b]	32.0 [b]	37.5	34.0	31.0 [a,b]	30.0 [a]	แตกต่างกัน
อากาศ/$Ca(OH)_2$	52.0 [a]	72.5 [a]	88.5 [b]	85.0 [b]	82.0 [b]	77.0 [b]	แตกต่างกัน
โอโซน/NaOH	45.0	48.0 [a]	54.0	50.0	47.0 [a]	42.0	แตกต่างกัน
โอโซน/Na_2CO_3	45.0 [a]	59.0	71.5	54.0	50.0	45.0 [a]	แตกต่างกัน
โอโซน/$Ca(OH)_2$	67.0	70.0 [a]	88.0	80.0	75.0	70.0 [a]	แตกต่างกัน

หมายเหตุ : a,b หมายถึง ค่าเฉลี่ยของปริมาตรการจมตัวของตะกอน คู่ที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 4.35 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอนในปริมาณต่างๆ ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	การจมตัวของตะกอนเมื่อใช้		แสดงดังรูปที่
	สารส้ม	PAC	
$KMnO_4$/NaOH	- ปริมาณที่ 0 และ 500 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที - ปริมาณที่ 100 และ 400 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	4.55, 4.67
$KMnO_4$/Na_2CO_3	- ปริมาณที่ 0 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 120 นาที - ปริมาณที่ 100 - 500 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 150 นาที	- ปริมาณที่ 0 - 200 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 150 นาที - ปริมาณที่ 300 - 500 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 120 นาที	4.56, 4.68
$KMnO_4$/$Ca(OH)_2$	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	4.57, 4.69
NaOCl/NaOH	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	4.58, 4.70
NaOCl/Na_2CO_3	- ปริมาณที่ 0 - 100 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 90 นาที - ปริมาณที่ 200 - 500 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 120 นาที	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 90 นาที	4.59, 4.71
NaOCl/$Ca(OH)_2$	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	- ปริมาณที่ 0 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที - ปริมาณที่ 100 - 500 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	4.60, 4.72
อากาศ/NaOH	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 50 นาที	- ปริมาณที่ 0 - 200 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 50 นาที - ปริมาณที่ 300 - 500 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที	4.61, 4.73

ตารางที่ 4.35 ต่อ

สภาวะ	การจมตัวของตะกอนเมื่อใช้		แสดงดังรูปที่
	สารส้ม	PAC	
อากาศ/Na_2CO_3	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 150 นาที	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 90 นาที	4.62, 4.74
อากาศ/$Ca(OH)_2$	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	- ปริมาณที่ 0 และ 400 - 500 มก./ล เริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที - ปริมาณที่ 100 - 300 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 50 นาที	4.63, 4.75
โอโซน/NaOH	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลามากกว่า 60 นาที	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที	4.64, 4.76
โอโซน/Na_2CO_3	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 150 นาที	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 90 นาที	4.65, 4.77
โอโซน/$Ca(OH)_2$	- ปริมาณที่ 0 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 50 นาที - ปริมาณที่ 100 - 200 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที - ปริมาณที่ 300 - 500 มก./ล. เริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที	- ทุกปริมาณเริ่มคงที่ที่เวลา 40 นาที	4.66, 4.78

ก. สารส้ม

จากตารางที่ 4.25-4.28 และรูปที่ 4.55-4.66 พบว่าปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ได้ในตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวแต่ละปริมาณมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึงปริมาณหนึ่งแล้วจะลดลง ปริมาณที่เหมาะสมในการใช้สารส้มเป็นตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวที่ระดับพีเอช 7 คือปริมาณที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ทำให้มีปริมาตรการจมตัวของตะกอนมากที่สุด ปริมาตรการจมตัวของตะกอนในตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดที่ตัวออกซิไดซ์ชนิดเดียวกัน มีปริมาตรการจมตัวที่แตกต่างกัน คือ ปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ได้จากการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ถึงแม้ว่าเวลาที่ใช้ในการจมตัวของโซเดียมคาร์บอเนตจะใช้เวลาที่มากกว่าก็ตาม เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยให้ตะกอนรวมตัว จึงเกิดการจมตัวของตะกอนได้มาก สำหรับการใช้โซเดียมคาร์บอเนตจะทำให้น้ำมีค่าความเป็นเบสสูง ซึ่งมีผลให้ตะกอนเกิดการรวมตัว และจมตัวกันได้ยากมากขึ้น ปริมาตรการจมตัวของตะกอนจึงมีปริมาตรน้อยที่สุดของตัวออกซิไดซ์ทุกชนิด เวลาที่ใช้ในการจมตัวของตะกอนในแต่ละวิธีการจะใช้เวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.35 เวลาที่ใช้ในการจมตัวของตะกอนในวิธีที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะใช้เวลาประมาณ 30-50 นาที สำหรับในวิธีที่ใช้โซเดียมคาร์บอเนตจะใช้เวลาประมาณ 120-150 นาที

จากการเปรียบเทียบทางสถิติพบว่า ปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ได้ในแต่ละปริมาณของตัวช่วยให้ตะกอนจมตัว มีอย่างน้อย 1 คู่ ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ α = 0.05 ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด พบว่าที่ปริมาณ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีความแตกต่างกับปริมาณอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญที่ α = 0.05 ยกเว้นในวิธีของอากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณของตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวในปริมาณ 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.29

ข. PAC

จากตารางที่ 4.30-4.33 และรูปที่ 4.67-4.78 พบว่าแนวโน้มของปริมาตรการจมตัวของตะกอนเมื่อปริมาณของตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวเพิ่มขึ้นมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีที่ใช้สารส้ม ปริมาณที่เหมาะสมในการใช้ PAC เป็นตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวที่ระดับพีเอช 7 คือปริมาณที่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ทำให้มีปริมาตรการจมตัวของตะกอนมากที่สุด ปริมาตรการจมตัวของตะกอนในตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดที่มีตัวออกซิไดซ์ชนิดเดียวกัน จะมีปริมาตรการจมตัวที่แตกต่างกันเช่นกัน แต่แนวโน้มจะแตกต่างจากกรณีที่ใช้สารส้มคือ ปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ได้จากการใช้

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะมีปริมาตรมากที่สุด รองลงมาคือ โซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก PAC เมื่อละลายน้ำจะมีคุณสมบัติเป็นกรด ดังนั้นจึงไปช่วยลดความเป็นเบสของโซเดียมคาร์บอเนตได้บ้าง ทำให้ตะกอนเกิดการรวมตัว และจมตัวกันได้มากขึ้น และเวลาที่ใช้ในการจมตัวของตะกอนใช้เวลามากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์มาก จึงทำให้ตะกอนเกิดการจมตัวได้มากด้วย แสดงให้เห็นว่า PAC มีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวที่มีประสิทธิภาพมากกว่าสารส้ม ในกรณีที่ใช้กับโซเดียมคาร์บอเนต เวลาที่ใช้ในการจมตัวของตะกอนของแต่ละวิธีการมีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้สารส้ม ซึ่งแสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.35

จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4.3 และ 4.4 นี้ทำให้เห็นว่าถ้าต้องการจะใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัว เพื่อลดเวลาในการพักตะกอนพบว่า จะต้องมีการปรับระดับพีเอชให้อยู่ในสภาวะที่เป็นกรด หรือกลาง หรือระดับพีเอช 7 ก่อน ทั้งนี้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวจะได้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในกรณีที่ใช้สารส้มจะใช้ปริมาณที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับ PAC จะใช้ปริมาณที่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่จะทำให้ปริมาตรการจมตัวของตะกอนมีปริมาณมากที่สุด ในช่วงเวลาประมาณ 1-3 ชั่วโมง ที่จะทำให้ตะกอนเกิดการจมตัว แต่ถ้าให้เวลาในการจมตัวของตะกอนเป็น 24 ชั่วโมง จะพบว่าปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ได้ในปริมาณต่างๆ ของตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวจะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ซึ่งแสดงให้เห็นรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4.36 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเหล็กเฟอร์รัสไอออนในสารละลายตัวอย่างที่ใช้มีความเข้มข้นเท่ากัน ปริมาณตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ที่ได้จึงมีปริมาณเท่ากันด้วย ดังนั้นเมื่อปล่อยให้ตะกอนจมตัวเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมงจะเกิดการจมตัวของตะกอนอย่างสมบูรณ์ โดยตะกอนจะเกิดการแยกออกจากสารละลายส่วนใสอย่างชัดเจน ปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ได้จะมีปริมาตรใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าปริมาณของตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวจะต่างกันก็ตาม ในช่วงแรกของการจมตัวของตะกอนจะเกิดได้ยากเนื่องจากตะกอนมีขนาดเล็ก และเป็นอนุภาคคอลลอยด์จึงเกิดการรวมตัวได้ยากถ้าไม่มีตัวช่วยให้ตะกอนจมตัว แต่เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งตะกอนจะเกิดการรวมตัวมีอนุภาคใหญ่ขึ้น น้ำหนักมากขึ้นก็จะสามารถจมตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาตรการจมตัวของตะกอนไม่แตกต่างกัน (Snoeyink และ Jenkins, 1980) ดังนั้นถ้าให้เวลาในการจมตัวมากขึ้น ตัวช่วยให้ตะกอนจะไม่มีผลต่อการจมตัวของตะกอน

ตารางที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบทางสถิติของปริมาตรการจมตัวของตะกอนเมื่อใช้สารส้ม หรือ PAC ที่ปริมาณต่างๆ ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด ในเวลา 24 ชั่วโมง

สภาวะ	ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัว	ปริมาณ (มิลลิกรัมต่อลิตร)						ผลเปรียบเทียบทางสถิติ
		0	100	200	300	400	500	
$KMnO_4$/NaOH	สารส้ม	90.5	90.5	90.0	90.5	90.0	90.0	ไม่แตกต่างกัน
	PAC	90.5	90.0	90.0	90.0	90.0	90.5	ไม่แตกต่างกัน
$KMnO_4/Na_2CO_3$	สารส้ม	85.5	85.0	85.0	85.5	85.5	85.0	ไม่แตกต่างกัน
	PAC	85.5	85.5	85.0	85.0	85.0	85.5	ไม่แตกต่างกัน
$KMnO_4/Ca(OH)_2$	สารส้ม	115.0	115.5	115.5	115.0	115.0	115.5	ไม่แตกต่างกัน
	PAC	115.0	115.0	115.0	115.5	115.5	115.5	ไม่แตกต่างกัน
NaOCl/NaOH	สารส้ม	89.0	89.5	89.0	88.5	89.0	88.5	ไม่แตกต่างกัน
	PAC	89.0	88.5	88.5	89.0	89.0	89.0	ไม่แตกต่างกัน
$NaOCl/Na_2CO_3$	สารส้ม	84.5	85.0	84.5	85.0	85.0	85.0	ไม่แตกต่างกัน
	PAC	84.5	84.5	84.5	85.0	85.0	85.0	ไม่แตกต่างกัน
$NaOCl/Ca(OH)_2$	สารส้ม	112.5	113.0	113.0	113.0	112.5	112.5	ไม่แตกต่างกัน
	PAC	112.5	112.5	113.0	113.0	113.0	112.5	ไม่แตกต่างกัน
อากาศ/NaOH	สารส้ม	88.0	87.5	88.0	87.5	87.5	88.0	ไม่แตกต่างกัน
	PAC	88.0	88.0	87.5	87.5	87.5	87.5	ไม่แตกต่างกัน
อากาศ/Na_2CO_3	สารส้ม	82.0	82.0	82.5	82.5	82.0	82.5	ไม่แตกต่างกัน
	PAC	82.0	82.5	82.5	82.0	82.5	82.5	ไม่แตกต่างกัน
อากาศ/$Ca(OH)_2$	สารส้ม	105.0	105.5	105.0	105.0	105.0	105.0	ไม่แตกต่างกัน
	PAC	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	ไม่แตกต่างกัน
โอโซน/NaOH	สารส้ม	87.0	87.5	87.5	87.0	87.5	87.0	ไม่แตกต่างกัน
	PAC	87.0	87.0	87.0	87.5	87.5	87.5	ไม่แตกต่างกัน
โอโซน/Na_2CO_3	สารส้ม	82.5	82.0	82.0	82.0	82.5	82.5	ไม่แตกต่างกัน
	PAC	82.5	82.5	82.5	82.0	82.0	82.0	ไม่แตกต่างกัน
โอโซน/$Ca(OH)_2$	สารส้ม	105.0	105.5	105.5	105.0	105.5	105.5	ไม่แตกต่างกัน
	PAC	105.0	105.0	105.0	105.5	105.5	105.0	ไม่แตกต่างกัน

หมายเหตุ : ปริมาตรการจมตัวของตะกอนที่ปริมาณต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$

จากประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก และปริมาณเหล็กทั้งหมดที่เหลืออยู่ในแต่ละวิธีการกำจัดเหล็ก พบว่าในแต่ละวิธีที่ใช้ตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนมีความสามารถใกล้เคียงกัน โดยขึ้นกับระดับพีเอช ที่ระดับพีเอชอ้างอิงจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กมากที่สุด และจะลดลงเมื่อระดับพีเอชลดลงในทุกวิธีการกำจัดเหล็ก ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดในโรงงานอุตสาหกรรม จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการใช้สารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กมากที่สุด และมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ ซึ่งจะต้องไม่เป็นภาระต่อโรงงานอุตสาหกรรม

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในแต่ละวิธีการกำจัดเหล็ก แสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.37 โดยแสดงค่าใช้จ่ายที่ใช้ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด เทียบกับปริมาณเหล็กทั้งหมดเริ่มต้น 1 กิโลกรัม พบว่า โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีราคาแพงที่สุด รองลงมาคือ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ โอโซน และอากาศ ตามลำดับ สำหรับตัวช่วยตกตะกอน โซเดียมไฮดรอกไซด์มีราคาแพงที่สุด รองลงมา คือ โซเดียมคาร์บอเนต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ จากการคำนวณหาปริมาณที่ใช้ของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดสามารถนำไปคำนวณค่าใช้จ่ายของสารเคมีแต่ละชนิดที่ใช้ได้ พบว่าค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นของวิธีที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนตมีค่าใช้จ่ายมากที่สุด คือ 51.76 บาท รองลงมาคือ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ โอโซนร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต* อากาศร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต โอโซนร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์* อากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โอโซนร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์* และอากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ คือ 51.41 บาท, 47.73 บาท, 47.38 บาท, 48.01* บาท, 48.01 บาท, 43.98* บาท, 43.98 บาท, 17.07 บาท, 16.72 บาท, 13.32* บาท และ 13.32 บาท (*การใช้โอโซน และอากาศนอกจากคิดค่าไฟฟ้าที่ใช้ยังต้องคิดค่าอุปกรณ์ที่ผลิตโอโซนจากอากาศ และเครื่องเป่าอากาศด้วย ซึ่งอุปกรณ์ผลิตโอโซนมีค่าใช้จ่ายแพงกว่ามาก)

การใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวออกซิไดซ์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กสูง แต่มีปัญหาที่จะต้องระวังด้วยคือ ต้องมีการกำจัดแมงกานีสไอออน (Mn^{2+}) ที่ได้จากการออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสไปเป็นเหล็กเฟอร์ริคด้วย และการตกตะกอนแมงกานีสไฮดรอกไซด์จะเกิดตะกอนได้ดีที่ระดับพีเอชมากกว่า 9 (Robinson และคณะ, 1968) ซึ่งจะทำให้ต้องมีการใช้ปริมาณตัวช่วยตกตะกอนมากขึ้น ค่าความเป็นเบสที่ได้ของน้ำมีค่าสูงขึ้น และค่าใช้จ่ายในการกำจัด

เหล็กจะมีค่าสูงขึ้นอีก สำหรับโซเดียมไฮโปคลอไรต์หลังจากการกำจัดเหล็กแล้วจะต้องคำนึงถึงปริมาณคลอรีนที่มากเกินพอด้วย คือ จะต้องมีการออกซิไดซ์คลอรีนให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (Mathews, 1947) ซึ่งคล้ายกับการใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ดังนั้นวิธีที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ไม่น่าจะเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดเหล็กในโรงงานอุตสาหกรรม

ในกรณีของโอโซน และอากาศพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กใกล้เคียงกัน แต่โอโซนมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าอากาศ การใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์จึงน่าจะเหมาะสมที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดเหล็กในโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์เติมอากาศสามารถนำมาติดตั้งในระบบบำบัด มีหลายขนาดและหลายแบบ ซึ่งหาซื้อได้ง่ายในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นวิธีที่มีประสิทธิภาพ และค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้คือ วิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ รองลงมาคือ อากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอากาศร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต ตามลำดับ

จากการพิจารณาดัชนีคุณภาพน้ำที่ได้หลังการกำจัดพบว่า การใช้อากาศร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กสูง และปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ได้หลังการกำจัดมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ ยกเว้นที่ระดับพีเอช 5 และ 6 ในวิธีของอากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่าเกินค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ เมื่อพิจารณาระดับพีเอช พบว่าตัวช่วยตกตะกอนทุกชนิดมีแนวโน้มเดียวกันคือ ระดับพีเอชที่ได้อยู่ในช่วงที่เป็นกลางหรือเบส โดยที่ระดับพีเอช 9 และพีเอชอ้างอิงจะมีระดับพีเอชหลังการกำจัดเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังนั้นหลังการกรองตะกอนต้องมีการปรับความเป็นกรด-เบสของน้ำให้อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ก่อนที่จะระบายออกสู่แหล่งน้ำ

สำหรับค่าความเป็นเบสพบว่ากรณีที่ใช้โซเดียมคาร์บอเนต ค่าความเป็นเบสหลังการกำจัดเหล็กมีค่าสูงมากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ ดังนั้นวิธีของอากาศร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนตจะก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องของค่าความเป็นเบส ซึ่งมีค่าเกินค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ คือ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต (จัดการคุณภาพน้ำ,2538) จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก อีกทั้งโซเดียมคาร์บอเนตมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์มาก ในกรณีของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าความเป็นเบสสูงกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์เช่นกัน แต่จะไม่มีปัญหาในเรื่องความกระด้างของน้ำ เหมือนกับกรณีที่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่าความกระด้างสูงกว่าค่ามาตร

ฐานที่กำหนดไว้ แต่สามารถแก้ปัญหาเรื่องความกระด้างได้โดยทำการแลกเปลี่ยนไอออนก่อนที่จะระบายน้ำออกสู่แหล่งน้ำ เพื่อลดปริมาณแคลเซียมไอออนให้น้อยลง

ดังนั้นในการลดปัญหาเรื่องความเป็นเบส และความกระด้างนี้ ได้ทำการศึกษาวิธีการกำจัดเหล็กโดยใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ขึ้น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถนำมาปรับระดับพีเอชได้ระดับหนึ่งจากการละลายในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งจะทำให้ระดับพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกรดอ่อนหรือกลางได้ ทำให้สามารถช่วยลดปริมาณตัวช่วยตกตะกอนให้น้อยลงได้ การศึกษาจะทำการศึกษาที่ระดับพีเอชต่างๆ และปริมาตรการจมตัวของตะกอนเมื่อใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวด้วย แล้วทำการวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำต่างๆ ซึ่งแสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.38-4.40 และรูปที่ 4.79-4.86

จากการศึกษาวิธีของอากาศร่วมกับกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้สามารถปรับระดับพีเอชจาก 1.7 ให้เป็น 5.0-5.3 ได้มากที่สุด ในการทดลองนี้ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เป็น 1.5 เท่าของปริมาณเหล็กทั้งหมดเริ่มต้น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการละลายได้อย่างอิ่มตัว หลังการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตแล้วทำการออกซิไดซ์ด้วยอากาศประมาณ 3-5 นาที พบว่าสามารถกำจัดเหล็กในรูปเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ได้ 44.80 % และมีปริมาณเหล็กเหลืออยู่ในน้ำประมาณ 55.20 % ซึ่งต้องนำไปคำนวณหาปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่จะต้องเติมลงไปเพิ่ม เพื่อที่จะกำจัดเหล็กให้ได้มากที่สุด

ตารางที่ 4.37 แสดงค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอน แต่ละชนิด โดยเทียบกับปริมาณเหล็กเริ่มต้น 1 กิโลกรัม

สภาวะ	ตัวออกซิไดซ์		ตัวช่วยตกตะกอน		ค่าใช้จ่ายรวม
	ปริมาณ (กรัม)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ปริมาณ (กรัม)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	(บาท)
$KMnO_4$/NaOH	566.0	9.05	2,149.0	38.68	47.73
$KMnO_4$/Na_2CO_3	566.0	9.05	2,847.4	42.71	51.76
KMnO4/$Ca(OH)_2$	566.0	9.05	4,011.5	8.02	17.07
NaOCl/NaOH	667.1	8.70	2,149.0	38.68	47.38
NaOCl/Na_2CO_3	667.1	8.70	2,847.4	42.71	51.41
NaOCl/$Ca(OH)_2$	677.1	8.70	4,011.5	8.02	16.72
อากาศ/NaOH	5.0 (ชม.)	5.30	2,149.0	38.68	43.98
อากาศ/Na_2CO_3	5.0 (ชม.)	5.30	2,847.4	42.71	48.01
อากาศ/$Ca(OH)_2$	5.0 (ชม.)	5.30	4,011.5	8.02	13.32
โอโซน/NaOH	5.0 (ชม.)	5.30	2,149.0	38.68	43.98
โอโซน/Na_2CO_3	5.0 (ชม.)	5.30	2,847.4	42.71	48.01
โอโซน/$Ca(OH)_2$	5.0 (ชม.)	5.30	4,011.5	8.02	13.32

หมายเหตุ : ค่าใช้จ่ายของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็น 16 บาทต่อกิโลกรัม

ค่าใช้จ่ายของโซเดียมไฮโปคลอไรต์เป็น 15 บาทต่อลิตร หรือ 13 บาทต่อกิโลกรัม

ค่าใช้จ่ายของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 18 บาทต่อกิโลกรัม

ค่าใช้จ่ายของโซเดียมคาร์บอเนตเป็น 15 บาทต่อกิโลกรัม

ค่าใช้จ่ายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 2 บาทต่อกิโลกรัม

ค่าไฟฟ้าเป็น 1.06 บาทต่อกิโลวัตต์ต่อชั่วโมง

ชม. คือ ชั่วโมง

ที่มา : บริษัทกรุงเทพค้าเคมีภัณฑ์ จำกัด

ตารางที่ 4.38 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้ม หรือ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการทำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์

สภาวะ	ระดับพีเอช		ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	เริ่มต้น	สุดท้าย	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
สารส้ม	5	7.5	48.4	230.0	0.211	99.9962	17.0	21.5	30.0	35.0	35.0	35.0
	6	7.7	87.3	223.3	0.204	99.9963	16.0	20.0	28.5	33.0	33.0	33.0
	7	8.4	163.2	223.3	0.196	99.9965	15.0	18.0	26.0	30.0	30.0	30.0
	8 (อ)	8.6	248.3	223.3	0.185	99.9967	14.0	16.5	24.5	28.0	28.0	28.0
	9	8.8	367.2	230.0	0.175	99.9969	13.0	15.0	23.0	26.0	26.0	26.0
PAC	5	7.6	49.0	230.0	0.215	99.9962	17.0	26.0	35.5	44.0	52.5	52.5
	6	7.9	97.9	223.3	0.205	99.9963	16.0	24.0	34.0	43.5	47.0	47.0
	7	8.4	155.0	230.0	0.198	99.9965	14.0	23.5	33.0	40.5	45.5	45.5
	8 (อ)	8.7	253.0	223.3	0.185	99.9967	13.0	20.0	26.0	31.0	37.0	37.0
	9	8.9	375.4	230.0	0.178	99.9968	11.0	17.0	26.0	30.0	35.0	35.0

หมายเหตุ : (อ) คือ ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี

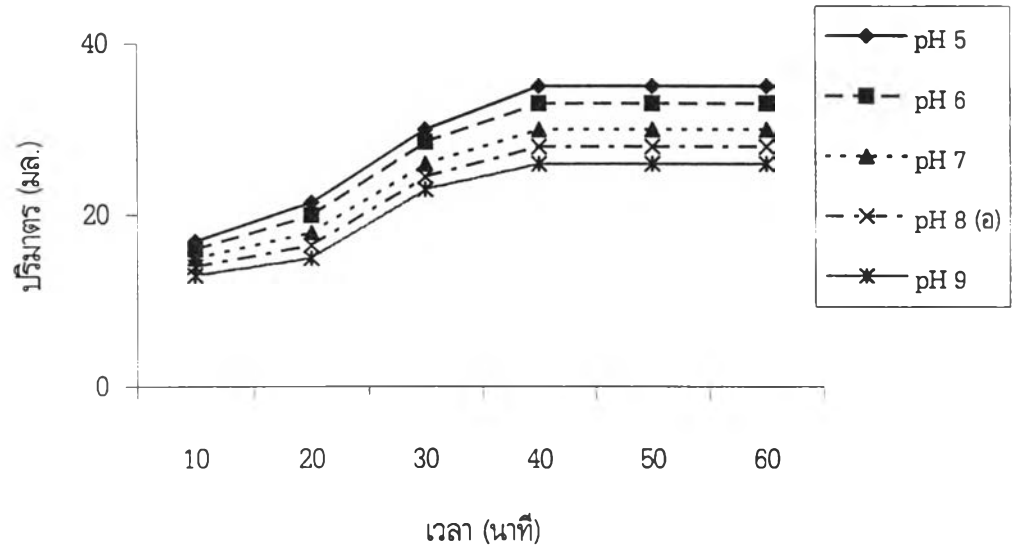
ตารางที่ 4.39 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำ และปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้ม หรือ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์

สภาวะ	ปริมาณ	ระดับ	ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ	ปริมาตรการจมตัวของตะกอน (ลบ. ซม.^{3}) / เวลา (นาที)					
	(มก/ล.)	พีเอช	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)	10	20	30	40	50	60
สารส้ม	0	8.2	142.8	220.0	0.167	99.9971	15.0	18.0	26.0	30.0	30.0	30.0
	100	8.3	163.2	220.0	0.165	99.9970	15.0	21.0	27.0	31.0	31.0	31.0
	200	8.3	153.0	213.3	0.166	99.9970	18.0	24.0	31.0	35.0	35.0	35.0
	300	8.2	148.9	220.0	0.163	99.9971	19.0	26.0	32.0	38.0	38.0	38.0
	400	8.3	167.3	220.0	0.165	99.9970	16.0	23.0	29.0	35.0	35.0	35.0
	500	8.3	167.3	213.3	0.160	99.9971	15.0	21.0	27.0	33.0	33.0	33.0
PAC	0	8.2	142.8	223.3	0.182	99.9967	14.0	23.5	33.0	40.5	45.5	45.5
	100	8.2	142.8	220.0	0.180	99.9968	15.0	25.0	34.0	41.0	47.0	47.0
	200	8.3	153.0	223.3	0.180	99.9968	16.0	27.0	37.0	43.0	51.0	51.0
	300	8.3	163.2	220.0	0.180	99.9968	16.0	26.0	35.0	42.0	49.0	49.0
	400	8.2	148.9	220.0	0.187	99.9966	15.0	25.0	33.0	41.0	46.0	46.0
	500	8.2	153.0	220.0	0.181	99.9968	15.0	24.5	31.0	38.0	43.0	43.0

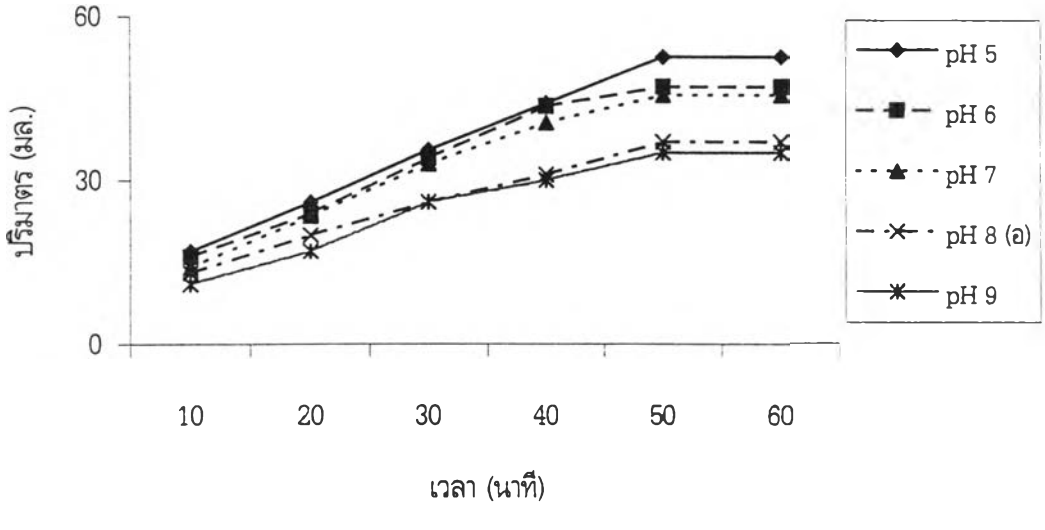
ตารางที่ 4.40 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำที่ได้ เมื่อใช้สารส้ม หรือ PAC ที่ระดับพีเอช 7 และพีเอชอ้างอิง ในวิธีการกำจัดเหล็กของวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ระดับพีเอช		ค่าความเป็นเบส	ค่าความกระด้าง	ปริมาณเหล็ก	ประสิทธิภาพ
	เริ่มต้น	สุดท้าย	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(มก/ล.)	(%)
อากาศ/NaOH	5	7.4	77.5	0.0	0.097	99.9983
	6	8.0	110.2	0.0	0.095	99.9983
	7	8.6	137.6	0.0	0.087	99.9984
	8	8.9	163.2	0.0	0.076	99.9986
	9	9.4	209.1	0.0	0.067	99.9988
	อ้างอิง	12.5	664.7	0.0	0.059	99.9989
อากาศ/$Ca(OH)_2$	5	6.4	8.2	1303.3	0.346	99.9924
	6	7.4	12.8	1207.0	0.300	99.9940
	7	7.6	15.9	115.3	0.298	99.9945
	8	7.9	24.4	1090.0	0.265	99.9948
	9	8.4	31.5	863.3	0.248	99.9957
	อ้างอิง	11.3	261.0	386.7	0.215	99.9963
อากาศ/$CaCO_3$/	5	7.6	48.7	230.0	0.216	99.9962
NaOH	6	7.8	87.7	223.3	0.210	99.9962
	7	8.3	159.1	226.7	0.197	99.9965
	8 (อ)	8.7	250.7	223.3	0.185	99.9966
	9	8.9	371.3	230.0	0.177	99.9968

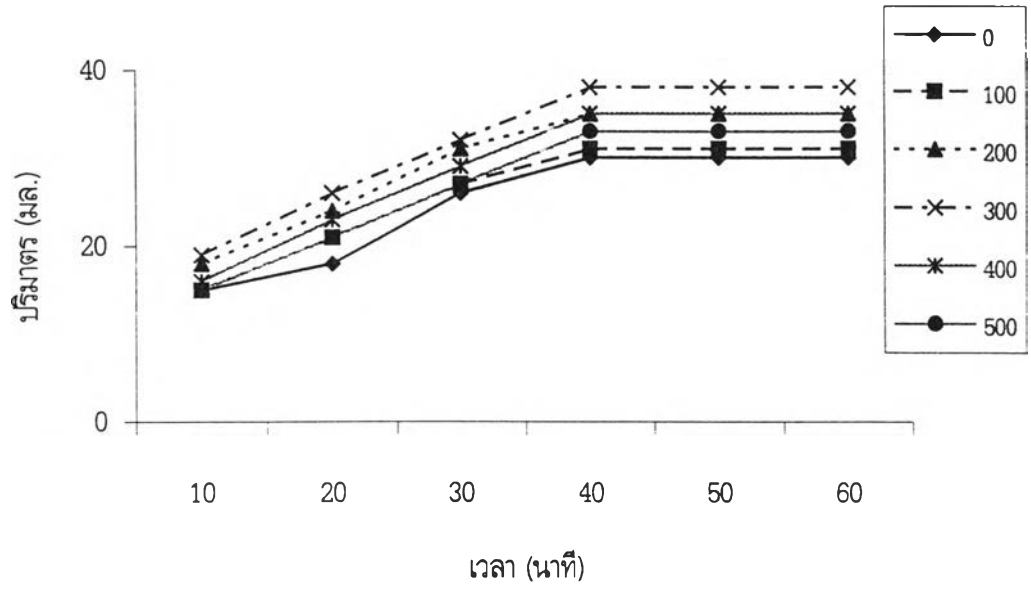
หมายเหตุ : อ้างอิง และ (อ) หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี



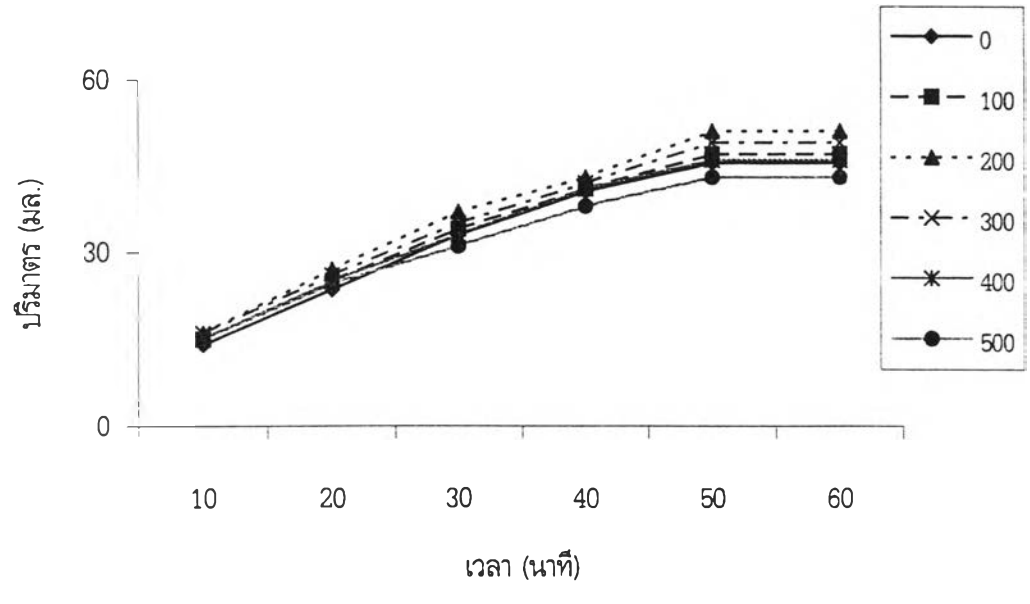
รูปที่ 4.79 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์



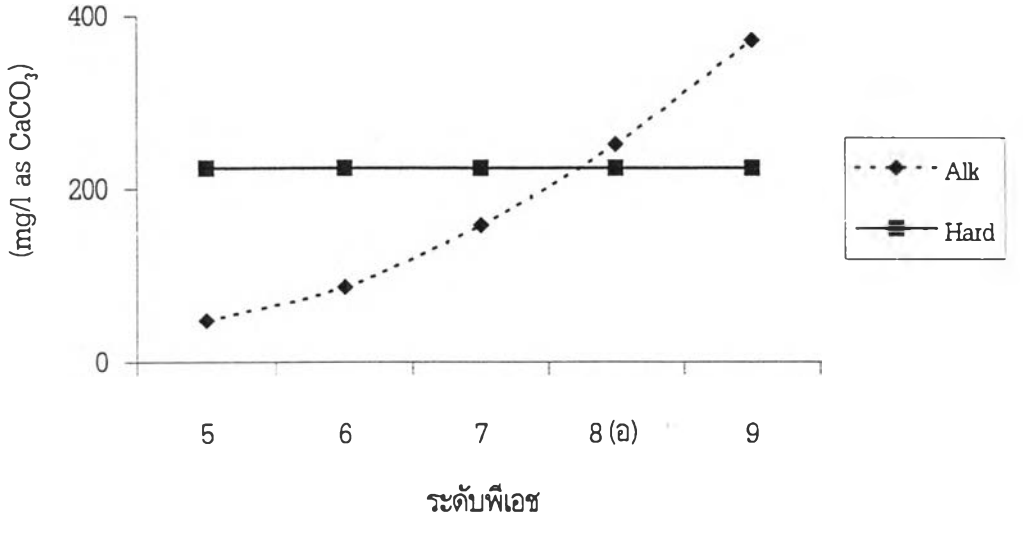
รูปที่ 4.80 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.81 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้มในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.82 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.83 แสดงค่าความเป็นเบส และความกระด้างที่ได้ในการกำจัดเหล็ก ที่ระดับพีเอชต่างๆ ในวิธีการของอากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากการพิจารณาดัชนีคุณภาพน้ำพบว่า ค่าความเป็นเบสที่ได้มีค่าน้อยกว่าวิธีที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่มากกว่าวิธีที่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีทั้งอนุมูลคาร์บอเนตไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออน แต่มีความเข้มข้นของอนุมูลแอนไอออนทั้งสองน้อยกว่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในวิธีที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อพิจารณาความกระด้างพบว่า มีค่าน้อยกว่าวิธีที่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์มาก และมีค่าคงที่ในทุกระดับพีเอช ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้สามารถละลายได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด และเกิดการละลายอย่างอิ่มตัว ดังนั้นวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ เหมาะสมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดเหล็กในโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กได้เช่นเดียวกัน ค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้เมื่อเทียบกับวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.41 จาก 3 วิธีดังกล่าวนี้พบว่าวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด รองลงมาคือวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถช่วยปรับสภาพของน้ำโดยลดความเป็นเบสลงและสามารถกำจัดเหล็กได้ 44.80 % จึงช่วยลดปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ 44.80 % เมื่อพิจารณาดัชนีคุณภาพน้ำ พบว่าวิธีที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีปัญหาเรื่องความกระด้างน้อยกว่าวิธีที่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสามารถช่วยลดค่าความเป็นเบสของน้ำให้มีค่าน้อยกว่าวิธีที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4.41 แสดงค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือแคลเซียมคาร์บอเนต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยเทียบกับปริมาณเหล็กทั้งหมดเริ่มต้น 1 กิโลกรัม

สภาวะ	ตัวออกซิไดซ์		ตัวช่วยตกตะกอน		ค่าใช่จ่ายรวม
	ปริมาณ (ชม.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ปริมาณ (กรัม)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	(บาท)
อากาศ/NaOH	5.0	5.30	2,149.0	38.68	43.98
อากาศ/$Ca(OH)_2$	5.0	5.30	4,011.5	24.07	29.37
อากาศ/$CaCO_3$& NaOH	5.0	5.30	2,686.2 1,186.2	2.15 21.35	23.50

หมายเหตุ : ค่าใช้จ่ายของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็น 0.80 บาทต่อกิโลกรัม
ค่าใช้จ่ายของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 18 บาทต่อกิโลกรัม
ค่าใช้จ่ายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 2 บาทต่อกิโลกรัม
ค่าไฟฟ้าเป็น 1.06 บาทต่อกิโลวัตต์ต่อชั่วโมง

ที่มา : บริษัทกรุงเทพค้าเคมีภัณฑ์ จำกัด

โรงงานไทยสะเปเชียลไวร์ จำกัด เป็นโรงงานที่ผลิตเหล็กเส้นที่ใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งจะมีน้ำกรดเสียที่เกิดจากการล้างสนิมเหล็กเป็นจำนวนมาก พบว่า มีการปรับสภาพของน้ำกรดเสีย โดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปเพื่อปรับสภาพให้เป็นกลาง ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเป็น 349 กิโลกรัมต่อวันต่อน้ำเสียกรดที่มีปริมาณเหล็กเฟอร์รัสละลายอยู่ 121.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร จากการปรับสภาพให้เป็นกลางหรือที่ระดับพีเอช 7 นี้ พบว่าสามารถช่วยกำจัดเหล็กได้บางส่วน แต่ยังคงมีเหล็กเฟอร์รัสเหลืออยู่ในน้ำเสียที่จะต้องนำไปกำจัดเหล็กต่อไป จากการบำบัดน้ำเสียกรดนี้พบว่าค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปรับสภาพนี้ประมาณ 200,000 บาทต่อเดือน หรือ 6,282 บาทต่อวัน ซึ่งค่อนข้างสูงมาก อีกทั้งยังต้องไปกำจัดเหล็กในน้ำเสียอีกให้มีปริมาณตามค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ การกำจัดเหล็กของโรงงานจะใช้วิธีการตกตะกอนในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ โดยไม่มีการออกซิเดชันเปลี่ยนรูปไปเป็นเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ จากการศึกษาวิจัยทั้งหมดในครั้งนี้ พบว่าวิธีที่จะกำจัดเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพคือ การกำจัดเหล็กในรูปเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ ที่ระดับพีเอชอ้างอิงหรือพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี ซึ่งจะสามารถกำจัดเหล็กได้ตามค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

จากการทดลองที่ 4.1 พบว่าที่ระดับพีเอช 7 สามารถกำจัดเหล็กได้โดยไม่ใช้วิธีการออกซิเดชันได้ 20.1521 % และ 41.4449 % ถ้าใช้ร่วมกับวิธีการออกซิเดชัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีที่ใช้ในโรงงานไทยสะเปเชียลไวร์ จำกัด จะเป็นวิธีที่ไม่ใช้การออกซิเดชัน จึงทำให้มีการกำจัดเหล็กได้น้อยกว่า ถ้าคิดคำนวณเปรียบเทียบกันจะพบว่า ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 349 กิโลกรัมต่อวันที่ใช้ในการปรับระดับพีเอช 7 จะสามารถกำจัดเหล็กได้ 20.1521 % ดังนั้นถ้าต้องการกำจัดเหล็กให้ได้เกือบ 100 % จะต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 1,731.8 กิโลกรัมต่อวัน (ไม่ใช้การออกซิเดชัน) คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 31,172 บาทต่อวัน ซึ่งมากกว่าเดิมประมาณ 5 เท่า ในทำนองเดียวกันถ้าใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 349 กิโลกรัมต่อวันในการปรับระดับพีเอช 7 และใช้ร่วมกับการออกซิเดชันจะสามารถกำจัดเหล็กได้ 41.4449 % และถ้าใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 842 กิโลกรัมต่อวันร่วมกับการออกซิเดชันจะสามารถกำจัดเหล็กได้เกือบ 100 % คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 15,696 บาทต่อวันซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่ามาก (เครื่องเติมอากาศที่ใช้แม้มีราคาสูง แต่จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กสูงกว่ามาก และสามารถใช้ได้นาน จึงนับว่าคุ้มค่ากว่ากันมาก)

จากการคำนวณดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์กับตัวช่วยตกตะกอนชนิดอื่นๆ ได้ด้วย คือ ถ้าใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 842 กิโลกรัมในการกำจัดเหล็กเฟอร์รัส 121.8 กิโลกรัม ต้องใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ 1,572.0 กิโลกรัมแทนได้ หรือต้องใช้แคลเซียมคาร์บอเนต 1,052.74 กิโลกรัมร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 464.92 กิโลกรัมแทนได้ เพื่อที่จะกำจัดเหล็กให้ได้

เกือบ 100 % การเปรียบเทียบวิธีการกำจัดเหล็กของโรงงานและวิธีที่ได้ศึกษาไว้ แสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.42 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่าใช้จ่ายต่ำสุด รองลงมาคือ วิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิธีที่ใช้อากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว และวิธีที่ได้จากโรงงาน ซึ่งค่าใช้จ่ายเป็น 3,143, 9,210, 15,696 และ 31,172 บาทต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งถ้าโรงงานจะนำวิธีที่ได้ศึกษาไว้ไปประยุกต์ใช้จะสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้อย่างมาก

ตารางที่ 4.42 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของวิธีที่ได้จากโรงงาน ไทยสะเปเชียลไวร์ และจากการศึกษา โดยเทียบกับปริมาณเหล็กเริ่มต้น 121.8 กิโลกรัม

วิธีการ กำจัดเหล็ก	สภาวะ ระดับพีเอช	ประสิทธิภาพใน การกำจัดเหล็ก (%)	ตัวช่วยตกตะกอน	
			ปริมาณ (kg.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
NaOH [1]	7	≈ 20	349.0	6,282.00
	อ้างอิง	≈ 100	1,731.8	31,172.00
อากาศ/NaOH [2]	7	≈ 40	349.0	6,282.00*
	อ้างอิง	≈ 100	872.0	15,696.00*
อากาศ/$Ca(OH)_2$ [2]	อ้างอิง	≈ 100	1,571.7	3,143.00*
อากาศ/$CaCO_3$& NaOH [2]	อ้างอิง	≈ 100	1,052.7 464.9	842.00 8,368.00 (9,210.00*)

หมายเหตุ : 1 หมายถึง วิธีที่ได้จากโรงงาน ไทยสะเปเชียลไวร์ จำกัด

2 หมายถึง วิธีที่ได้จากการศึกษา

ค่าใช้จ่ายของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 18 บาทต่อกิโลกรัม

ค่าใช้จ่ายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 2 บาทต่อกิโลกรัม

ค่าใช้จ่ายของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็น 0.80 บาทต่อกิโลกรัม

* หมายถึง รวมค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศประมาณ 250 บาทต่อวันด้วย (1.06 บาทต่อชั่วโมง)

ดังนั้นจากการทดลองในขั้นตอนที่ 4.1-4.4 สามารถสรุปวิธีการที่เหมาะสมที่น่าจะนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กได้ดังนี้ คือ วิธีที่ใช้อากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นในการทดลองที่ 4.5 จะทำการทดสอบความสามารถในการตกตะกอนของเหล็กในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก โดยเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมทั้ง 3 วิธีดังกล่าว

4.5 ทดสอบความสามารถในการตกตะกอนของเหล็กในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก

เป็นการศึกษาที่นำผลการทดลองที่ได้จากน้ำเสียสังเคราะห์ไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก โดยในทางปฏิบัติของโรงงาน ไทยสะเปเชียลไวร์ จำกัด จะมีการนำน้ำกรดเสียที่ได้นี้ไปบำบัดต่อเมื่อมีปริมาณเหล็กทั้งหมดเฉลี่ยประมาณ 121.8 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณต่ำกว่าน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้ไปนำมาทำการทดลอง โดยคุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 นั้นพบว่าปริมาณเหล็กทั้งหมดตอนเริ่มต้นเฉลี่ยประมาณ 141.55 กรัมต่อลิตร

ในการทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กนี้ จำเป็นต้องมีการปรับความเข้มข้นของเหล็กตอนเริ่มต้นให้มีปริมาณเหล็กทั้งหมดใกล้เคียงกับปริมาณเหล็กในน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้เนื่องจากมีขีดจำกัดของเครื่องเติมอากาศที่ใช้ในห้องปฏิบัติการที่มีขนาดเล็กเกินไปไม่สามารถออกซิไดซ์เหล็กที่มีปริมาณมากในน้ำเสียจริงได้ อีกทั้งการเกิดตะกอนเหล็กในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมีปริมาณมากคล้ายกับโคลนเหลว (slurry) ทำให้ยากต่อการออกซิไดซ์โดยการเติมอากาศ ดังนั้นในการทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงต้องเจือจางน้ำเสียประมาณ 20 เท่า เพื่อให้สามารถที่จะทำการทดลองได้ ดังแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4.43

ตารางที่ 4.43 แสดงสภาพของการออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสที่มีปริมาณต่างๆ กันในการเจือจาง ให้มีปริมาตรสุดท้ายเป็น 100 มิลลิลิตร

ปริมาตรเหล็ก	เวลาที่ใช้ (ชม.)	สภาพของการออกซิไดซ์
100 (มิลลิลิตร)	2	ได้ตะกอนสีเขียวอมน้ำเงิน ลักษณะสารเป็นโคลนเหลว (slurry) ไม่สามารถเติมอากาศได้
50 (มิลลิลิตร)	2	ได้ตะกอนสีเขียวอมน้ำเงิน ลักษณะของเป็นโคลนเหลว (slurry) ยากต่อการเติมอากาศ
25 (มิลลิลิตร)	2	ได้ตะกอนสีเขียวอมเหลือง ลักษณะสารเป็นสารแขวนลอย (suspended solid) สามารถเติมอากาศได้
10 (มิลลิลิตร)	2	ได้ตะกอนสีเขียวอมเหลือง ลักษณะสารเป็นสารแขวนลอย (suspended solid) สามารถเติมอากาศได้
5 (มิลลิลิตร)	2	ได้ตะกอนสีเหลืองเข้ม ลักษณะสารเป็นสารแขวนลอย (suspended solid) สามารถเติมอากาศได้

การศึกษาในขั้นตอนนี้ คือ ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับพีเอช 7 และพีเอชอ้างอิง และศึกษาถึงปริมาตรการจมตัวของตะกอนเมื่อใช้สารส้ม หรือ PAC ที่ระดับพีเอช 7 ในปริมาณต่างๆ ซึ่งในทำนองเดียวกันของวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่ก่อนหลังการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อที่จะหาปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วย ผลการทดลองแสดงรายละเอียดให้เห็นได้ดังตารางที่ 4.44-4.45 และรูปที่ 4.84 - 4.86

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับพีเอชอ้างอิง สามารถกำจัดเหล็กได้มากกว่าที่ระดับพีเอช 7 และปริมาตรการจมตัวของตะกอนเมื่อใช้สารส้ม หรือ PAC ในปริมาณ 300 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ทำให้มีปริมาตรการจมตัวของตะกอนมากที่สุด ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของวิธีทั้ง 3 คือ 99.9989, 99.9963 และ 99.9974 % ตามลำดับ เมื่อพิจารณาดัชนีคุณภาพน้ำพบว่า ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่เหลืออยู่ในน้ำ มีค่าต่ำกว่า 0.300 มิลลิกรัม ที่ระดับพีเอช 7 และพีเอชอ้างอิง ค่าความเป็นเบสที่ระดับพีเอชอ้างอิงมีค่ามากกว่าที่ระดับพีเอช 7 และมากกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ด้วยของการกำจัดเหล็กทุกวิธีการ สำหรับค่าความกระด้างของวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพีเอชลดลง คือ 1,383.3 และ 2,560.0 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ระดับพีเอชอ้างอิงและที่ระดับพีเอช 7 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์มาก คือ 320.0 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต

การวิจัยนี้จึงเป็นเพียงแนวทางของการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสีย โดยใช้วิธีการออกซิเดชันร่วมกับการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ ในสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กมากที่สุด โดยสามารถสรุปได้ว่าวิธีการกำจัดเหล็กโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ แคลเซียมคาร์บอเนตร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับพีเอชอ้างอิงที่เกิดจากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎีที่คำนวณได้ จึงจะสามารถที่จะกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ทั้งนี้วิธีการกำจัดเหล็กที่จะเลือกใช้ไปประยุกต์ในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นขึ้นกับความพอใจของผู้ประกอบการที่จะเลือกชนิดของตัวช่วยตกตะกอน ค่าใช้จ่ายที่รองรับได้ และความสะดวกในการใช้ นอกจากนี้วิธีการกำจัดเหล็กสามารถที่จะเลือกใช้หรือไม่ใช้ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวก็ได้ ซึ่งขึ้นกับระบบบำบัดในโรงงานอุตสาห

กรรมว่ามีระบบที่พักตะกอน หรือถังตกตะกอนหรือไม่ และเวลาที่ใช้ในการบำบัด (Retention Times) หลังการกำจัดเหล็กแล้วในแต่ละวิธี จะต้องมีการบำบัดดัชนีคุณภาพน้ำอื่นๆ ด้วย ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เช่น ระดับพีเอช ค่าความเป็นเบส ค่าความกระด้าง ซึ่งสามารถแก้ไขได้ดังนี้คือ หลังการกำจัดเหล็กแล้ว น้ำเสียจะมีค่าความเป็นเบสสูง โดยขึ้นกับชนิดของตัวช่วยตกตะกอน ระดับพีเอชที่ได้จะอยู่ในช่วง 9 - 12 ซึ่งจำเป็นที่จะต้องปรับระดับพีเอชให้อยู่ในช่วงมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 5 - 9 การปรับระดับพีเอชนี้จะช่วยลดค่าความเป็นเบสให้ลดลงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ สำหรับความกระด้างสามารถแก้ไขได้โดยให้น้ำที่ผ่านการปรับระดับพีเอชแล้วผ่านไอออนเอกเชนจ์เรซินก่อนที่จะระบายออกสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และเฟอร์ริคไอออน (Fe^{3+}) ในน้ำให้ลดน้อยลงเพื่อมิให้เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และไม่เป็นการละเมิดข้อบังคับของกรมโรงงานในการปล่อยน้ำเสียออกจากโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งเรซินที่ใช้สามารถล้างและนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย

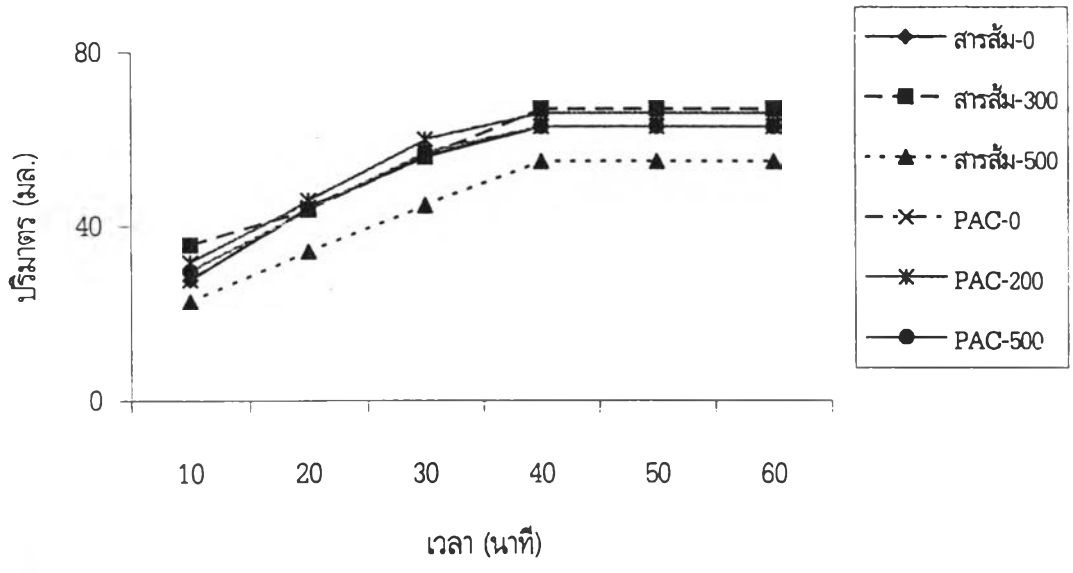
ตารางที่ 4.44 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำที่ได้ เมื่อใช้สารส้ม หรือ PAC ที่ระดับพีเอช 7 และพีเอชอ้างอิง ในวิธีการกำจัดเหล็กของวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

สภาวะ	ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัว	ระดับพีเอช		ค่าความเป็นเบส (มก/ล.)	ค่าความกระด้าง (มก/ล.)	ปริมาณเหล็กทั้งหมด (มก/ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
		เริ่มต้น	สุดท้าย				
อากาศ/NaOH	สารส้ม	7.0	8.4	71.4	0.0	0.120	99.9983
	PAC	7.0	8.2	64.6	0.0	0.113	99.9984
	-	13.0	13.0	2,169.2	0.0	0.085	99.9989
อากาศ/$Ca(OH)_2$	สารส้ม	7.0	7.8	24.3	2,553.3	0.375	99.9947
	PAC	7.0	7.6	22.4	2,560.0	0.383	99.9946
	-	13.0	12.9	378.1	1,383.3	0.265	99.9963
อากาศ/$CaCO_3$/ NaOH	สารส้ม	7.0	8.2	156.4	313.3	0.193	99.9973
	PAC	7.0	8.2	152.9	320.0	0.195	99.9972
	-	8.0	8.4	367.2	320.0	0.182	99.9974

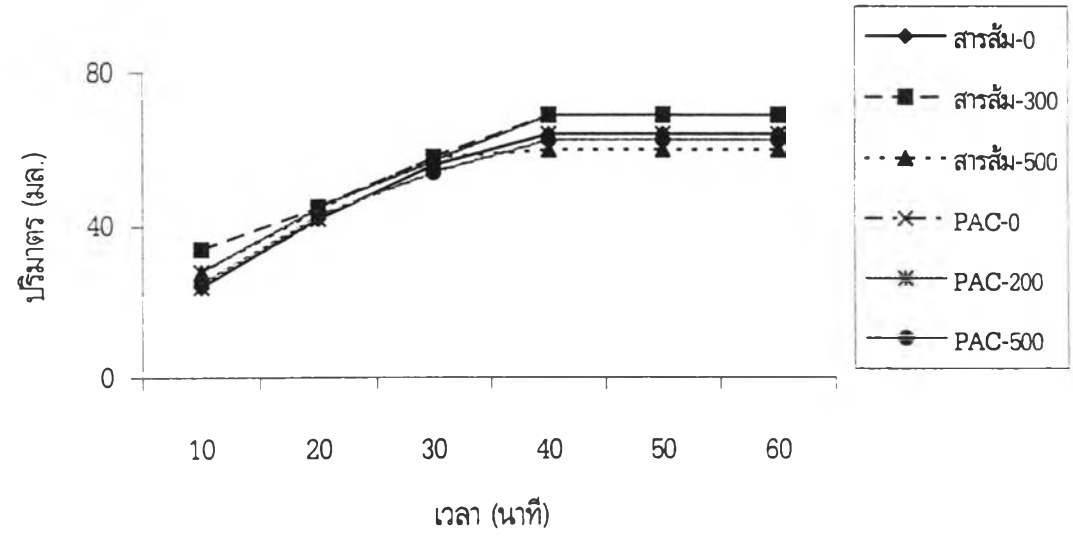
หมายเหตุ : อ้างอิง หมายถึง ระดับพีเอชที่ได้จากการเติมตัวช่วยตกตะกอนตามทฤษฎี

ตารางที่ 4.45 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้ม หรือ PAC ในปริมาณต่างๆ ในวิธีการกำจัดเหล็กของวิธีที่ใช้อากาศร่วมกับตัวช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด

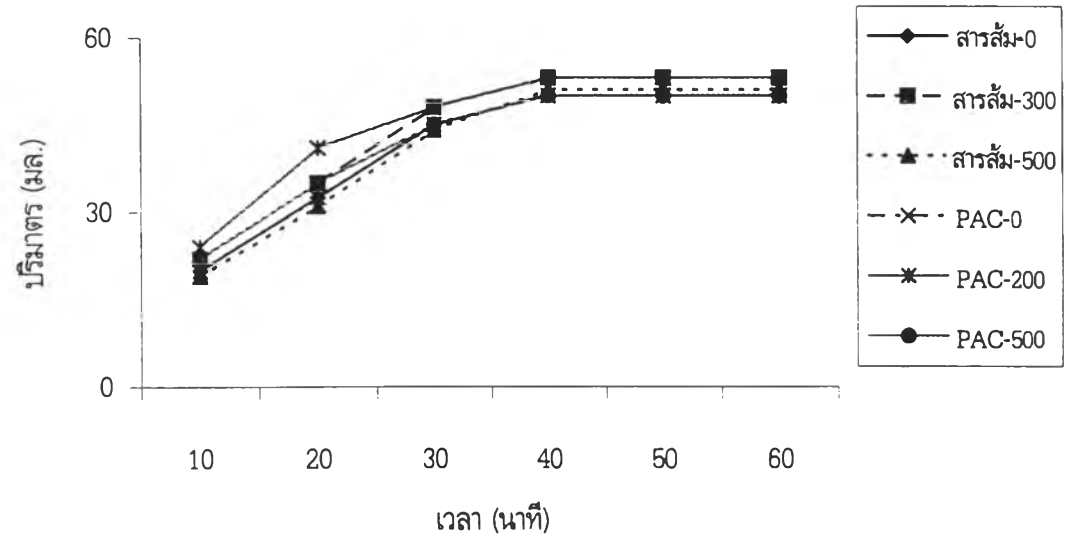
สภาวะ	ตัวช่วยให้ตะกอนจมตัว	ปริมาณ (มก./ล.)	เวลา (นาที)					
			10	20	30	40	50	60
อากาศ/ NaOH	สารส้ม	0	28.0	44.5	56.0	63.0	63.0	63.0
		300	36.0	44.0	56.0	67.0	67.0	67.0
		500	23.0	34.5	45.0	55.0	55.0	55.0
	PAC	0	28.0	44.5	56.0	63.0	63.0	63.0
		200	32.0	46.0	60.0	66.0	66.0	66.0
		500	30.0	44.0	57.0	63.0	63.0	63.0
อากาศ/ $Ca(OH)_2$	สารส้ม	0	24.0	42.0	56.0	64.0	64.0	64.0
		300	34.0	45.0	58.0	69.0	69.0	69.0
		500	28.0	44.5	58.0	60.0	60.0	60.0
	PAC	0	24.0	42.0	56.0	64.0	64.0	64.0
		200	28.0	45.0	57.0	69.0	69.0	69.0
		500	25.0	43.0	54.0	62.5	62.5	62.5
อากาศ/ $CaCO_3$/ NaOH	สารส้ม	0	20.0	32.5	45.0	50.0	50.0	50.0
		300	22.0	35.0	48.0	53.0	53.0	53.0
		500	19.0	31.0	44.0	51.0	51.0	51.0
	PAC	0	20.0	32.5	45.0	50.0	50.0	50.0
		200	24.0	41.0	48.0	53.0	53.0	53.0
		500	22.0	35.0	45.0	50.0	50.0	50.0



รูปที่ 4.84 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้ม หรือ PAC ในปริมาณ 300 และ 200 มก/ล. ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.85 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้ม หรือ PAC ในปริมาณ 300 และ 200 มก/ล. ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.86 แสดงปริมาตรการจมตัวของตะกอน เมื่อใช้สารส้ม หรือ PAC ในปริมาณ 300 และ 200 มก/ล. ในวิธีการกำจัดเหล็กของอากาศร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์