บทที่ 4

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาสภาวะเหมาะสมในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำเสียโดยการรวมตะกอนทางเคมีและไฟฟ้า และเพื่อหาประสิทธิภาพของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนทางเคมีและไฟฟ้า เมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในการกำจัดไซยาไนด์โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตลอดการทดลอง

ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและหาประสิทธิภาพ จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทดลอง ดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยการรวมตะกอนทางเคมี โดยใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอร์รัสซัลเฟตและแคลเซียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณโคแอกกูแลนต์ และพีเอชเริ่มต้น

การทดลองที่ 2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยทำการปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า พีเอช กระแสไฟฟ้า และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนทางเคมีและการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในการกำจัดไซยาไนด์โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

4.1 การตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการรวมตะกอนทางเคมี

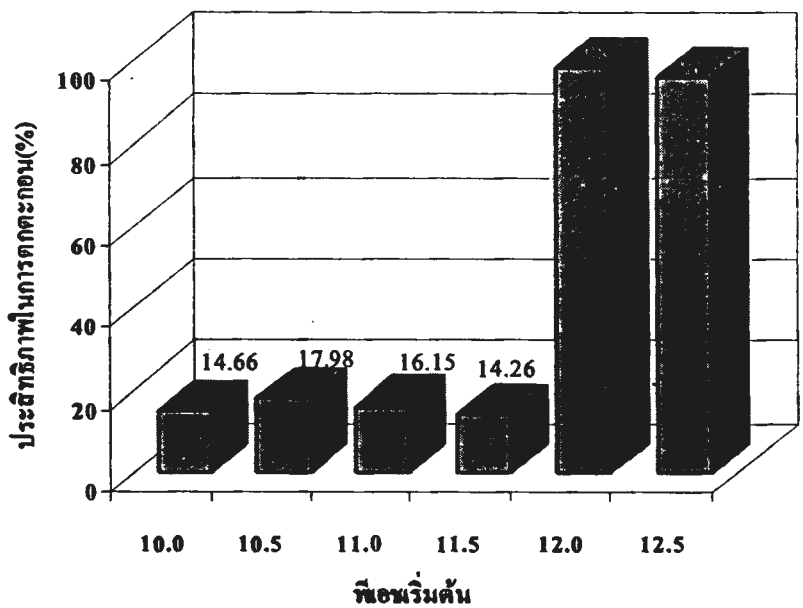
การศึกษาในขั้นตอนนี้เป็นการหาสภาวะเหมาะสมในการรวมตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้โคแอกกูแลนต์ 3 ชนิด ได้แก่ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอร์รัสซัลเฟตและแคลเซียมคลอไรด์ ทำการทดสอบด้วยวิธีจาร์เทสต์โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณโคแอกกูแลนต์และพีเอชเริ่มต้น

4.1.1 การตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์

4.1.1.1 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเป็น 6 ค่า คือ 10.0 10.5 11.0 11.5 12.0 และ 12.5 จะเห็นว่าช่วงค่าพีเอชที่เลือกใช้ค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องการความปลอดภัยเมื่อนำไปใช้ในการทดลองที่มีไซยาไนด์ร่วมอยู่ด้วย กำหนดความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.1 กรัม

ต่อลิตร และใช้ปริมาณโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ 1 กรัม จากการทดลองพบว่าที่พีเอชต่ำกว่า 12 ประสิทธิภาพในการตกตะกอนจะต่ำอาจเนื่องมาจากยังมีสภาพด่างไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอน เมื่อพีเอชสูงขึ้นเท่ากับ 12.0 และ 12.5 ประสิทธิภาพในการตกตะกอนเท่ากับ 98.24% และ 96.43% ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นสูงกว่า 11 พีเอชที่ได้หลังการทดลองจะสูงกว่าค่า pk_a ของกรดไฮโดรไซยานิคซึ่งเท่ากับ 9.24 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่ปลอดภัยสำหรับการทดลองนี้ ดังนั้นพีเอชที่เหมาะสมคือ 12.0 ซึ่งจะนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นและค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนแสดงในรูปที่ 4.1 สำหรับรายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ก

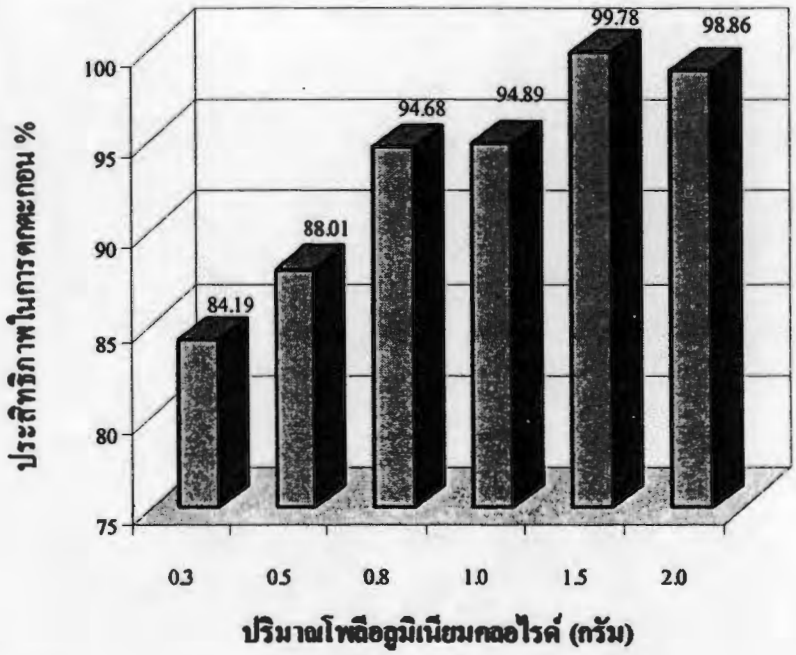


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นและค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์

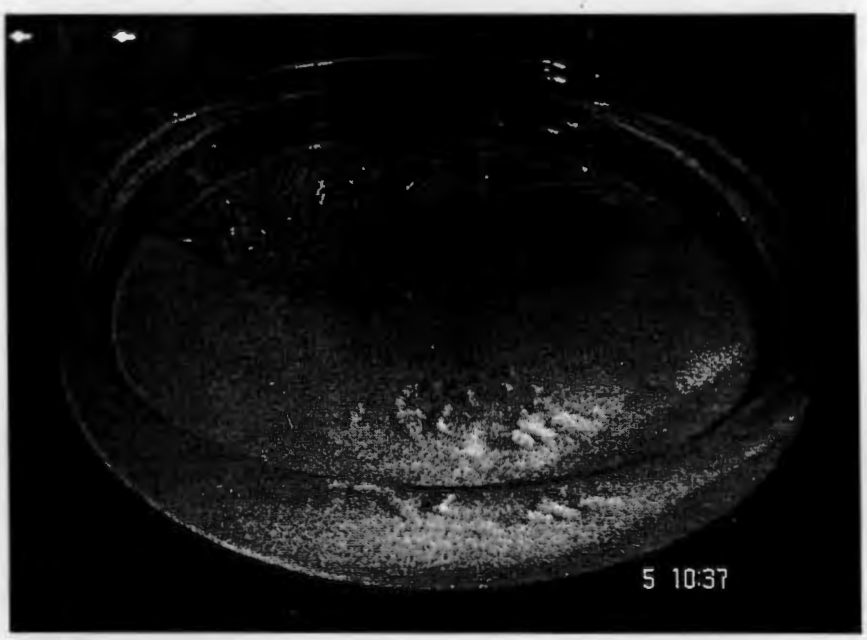
4.1.1.2 การหาปริมาณโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสม

การทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนปริมาณโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์เป็น 6 ค่า คือ 0.25 0.5 0.75 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม โดยปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 12 จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์มากขึ้นถึง 1.5 กรัมประสิทธิภาพในการตกตะกอนจะสูงขึ้นและจะเริ่มลดลงเมื่อโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์มากกว่า 1.5 กรัม โดยประสิทธิภาพในการตกตะกอนที่ได้ คือ 84.19 88.01 94.68 94.89 99.78 และ 98.86 % ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์และค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนแสดงในรูปที่ 4.2 ฟล็อคที่ได้จะมีลักษณะเป็นปุยเล็กๆ สีขาว มีปริมาณไม่มากนัก จับตัวกันไม่แน่น น้ำหนักค่อนข้างเบา เนื่องจากทำการทดลองในช่วงพีเอชค่อนข้างสูง แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนตามเวลาที่กำหนด พบว่าสามารถตกตะกอนได้ดี น้ำ

ส่วนบนใส ฟล็อคจับตัวกันดี ลักษณะของฟล็อคที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 4.3 สำหรับค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์และค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอน



รูปที่ 4.3 ลักษณะฟล็อคจากการใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์

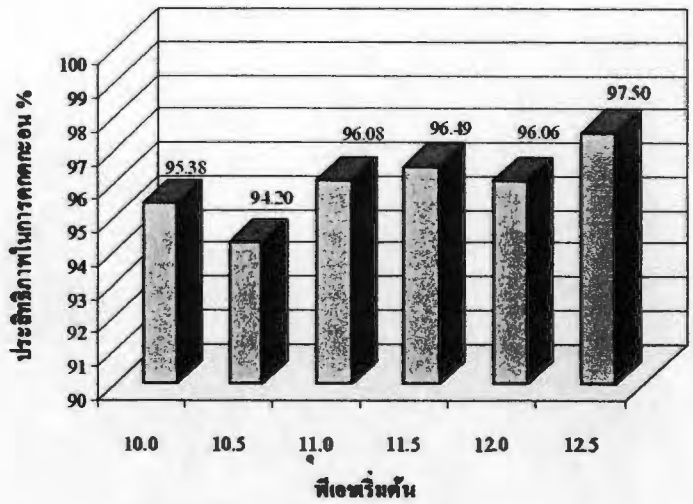
4.1.2 การตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์

ในสภาพด่างผิวของไททาเนียมไดออกไซด์จะมีประจุเป็นลบ ซึ่งทำให้ไททาเนียมไดออกไซด์แพร่กระจายได้เป็นอย่างดีในสารละลายและจะตกตะกอนได้ช้ามาก การเติมประจุบวกบางชนิด เช่น Na^+ หรือ Ca^{2+} สามารถช่วยให้เกิดการรวมตัวกันระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์ประจุลบได้ จากการศึกษาของ Mangeและคณะ, 1993 อ้างถึงใน langphasuk, 1997 พบว่า Na^+ หรือ Ca^{2+} จะถูกดูดติดผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ได้เป็นอย่างดี และจะปรับสภาพประจุบนผิวไททาเนียมไดออกไซด์ได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$TiOH + M^+ + OH^- \longrightarrow TiO^-M^+ + H_2O$$

4.1.2.1 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

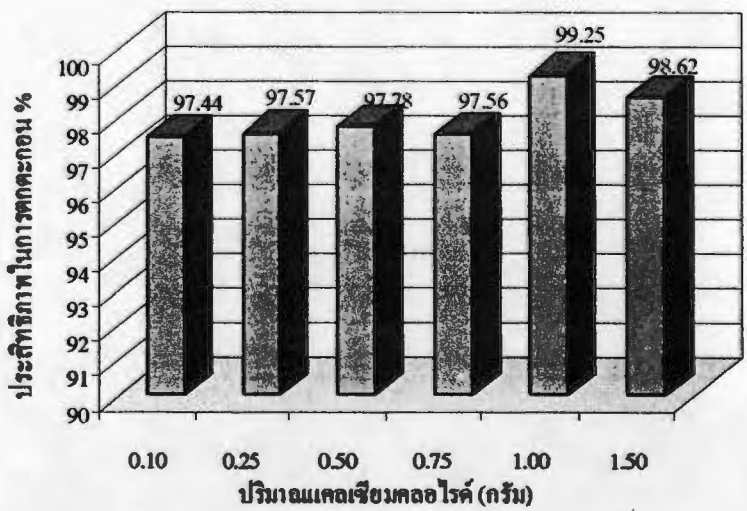
ในการทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเป็น 6 ค่า คือ 10.0 10.5 11.0 11.5 12.0 และ 12.5 โดยใช้ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์เท่ากับ 0.5 กรัม จากการทดลองพบว่าที่ทุกๆค่าพีเอชให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนไม่แตกต่างกันมากนัก คือ 95.38 94.20 96.08 96.49 96.06 และ 97.50% ตามลำดับ ฟล็อคที่ได้จะมีขนาดเล็กและมีปริมาณน้อยกว่า แต่จะใช้เวลาในการตกตะกอนมากกว่าเมื่อเทียบกับโพลีอลูมีเนียมคลอไรด์ โดยในการทดลองนี้ใช้เวลาในการทิ้งให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง ในขณะที่เมื่อใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์จะใช้เวลาเพียงครึ่งชั่วโมง สอดคล้องกับรายงานของ Kagayaและคณะ,1999 และเนื่องจากแคลเซียมคลอไรด์สามารถใช้ได้ดีในช่วงพีเอชสูงจึงให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงกว่าการใช้โพลีอลูมีเนียมคลอไรด์ ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นและค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนแสดงในรูปที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในภาคผนวก ก นำค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 12.5 ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นและค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนเมื่อใช้แคลเซียมคลอไรด์

4.1.2.2 การหาปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนปริมาณแคลเซียมคลอไรด์เป็น 6 ค่าคือ 0.10 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.50 กรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 12.5 จากการทดลองพบว่าที่ทุกค่าปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนไม่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อใช้ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ 1 กรัมต่อลิตรสามารถตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดีที่สุด จึงเลือกใช้ค่านี้สำหรับการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 ต่อไป

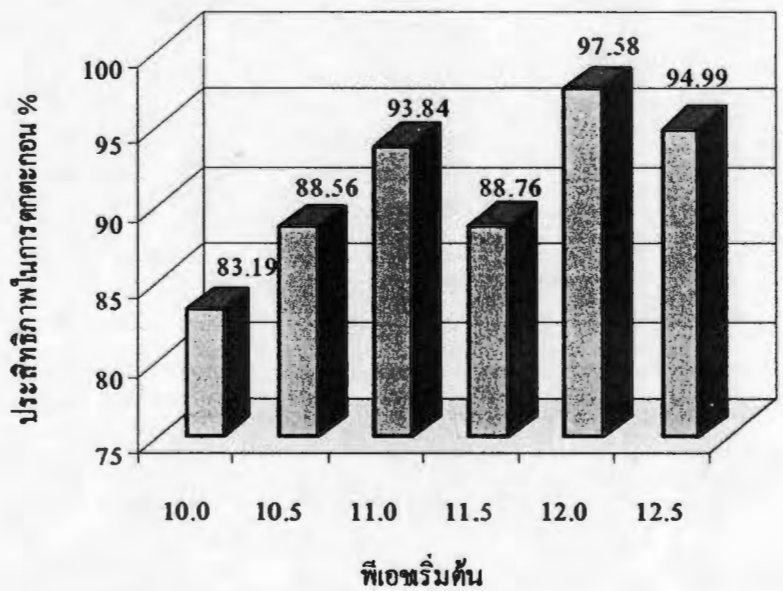


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมคลอไรด์และค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอน

4.1.3 การตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต

4.1.3.1 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเป็น 6 ค่า คือ 10.0 10.5 11.0 11.5 12.0 และ 12.5 โดยใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเริ่มต้นเท่ากับ 1.0 กรัม จากการทดลองพบว่าที่พีเอชเริ่มต้นตั้งแต่ 12.0 ขึ้นไปฟล็อคจะมีน้ำหนักและปริมาณค่อนข้างมาก ลักษณะของฟล็อคจะเป็นเม็ดใหญ่ ตกตะกอนอย่างรวดเร็ว มีสีเข้มเกือบดำ ค่าพีเอชหลังการทดลองจะสูงกว่าค่า pk_a ของกรดไฮโดรไซยานิก ส่วนที่พีเอชเริ่มต้นต่ำกว่า 12.0 ฟล็อคและน้ำเสียจะเป็นสีส้มและค่าพีเอชหลังการทดลองต่ำกว่าค่า pk_a ของกรดไฮโดรไซยานิก ดังนั้นพีเอชที่เหมาะสมคือ 12.0 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นและค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนแสดงในรูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองต่างๆ แสดงในภาคผนวก ก

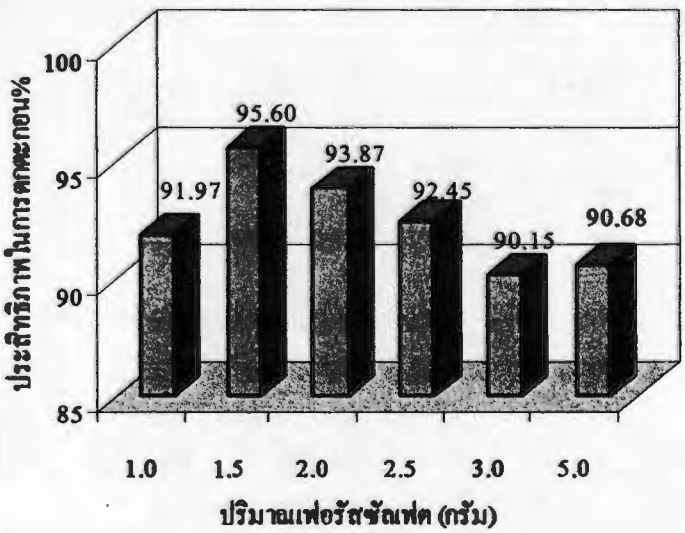


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนเมื่อใช้เฟอร์รัสซัลเฟต

4.1.3.2 การหาปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสม

การทดลองนี้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเป็น 6 ค่า คือ 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 5.0 กรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 12 จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 1.5 กรัม จะให้ประสิทธิในการตกตะกอนสูงที่สุด คือ 95.60 % เมื่อปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตสูงกว่า 1.5 กรัม ประสิทธิภาพในการตกตะกอนมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบ

กับโคแอกกูแลนต์อีกสองชนิดที่ใช้ พบว่าฟล็อคที่เกิดจากการใช้เฟอร์ริสซัลเฟตจะมีปริมาณมากกว่า และมีน้ำหนักมากกว่าเนื่องจากเป็นออกไซด์ของเหล็ก จึงใช้เวลาน้อยและสามารถตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองคือปริมาณเฟอร์ริสซัลเฟต 1.5 กรัม ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนและปริมาณเฟอร์ริสซัลเฟตแสดงในรูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในภาคผนวก ก และรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะของฟล็อคที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอร์ริสซัลเฟตและค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอน

รูปที่ 4.8 ลักษณะฟล็อคจากการใช้เฟอร์ริสซัลเฟต

สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.1 นี้ จะนำไปใช้ในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในหัวข้อที่ 4.3 ต่อไป ซึ่งก่อนจะนำไททาเนียมไดออกไซด์ที่ตกตะกอนได้กลับมาใช้ใหม่ จะต้องนำตะกอนที่ได้ไปล้างด้วยกรดเพื่อละลายฟล็อคออกให้เหลือแต่ไททาเนียมไดออกไซด์ จากการทดลองพบว่าสามารถใช้กรดไฮโดรคลอริคล้างฟล็อคที่ได้จากการตกตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ได้เป็นอย่างดี ในขณะที่ฟล็อคที่ได้จากการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตไม่สามารถใช้กรดละลายฟล็อคออกได้ ตะกอนที่ได้ยังคงเป็นสีดำและมีปริมาณมากเช่นเดิม จึงไม่สามารถนำไททาเนียมไดออกไซด์จากการตกตะกอนด้วยเฟอร์รัสซัลเฟตมาใช้ซ้ำได้

4.2 การตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

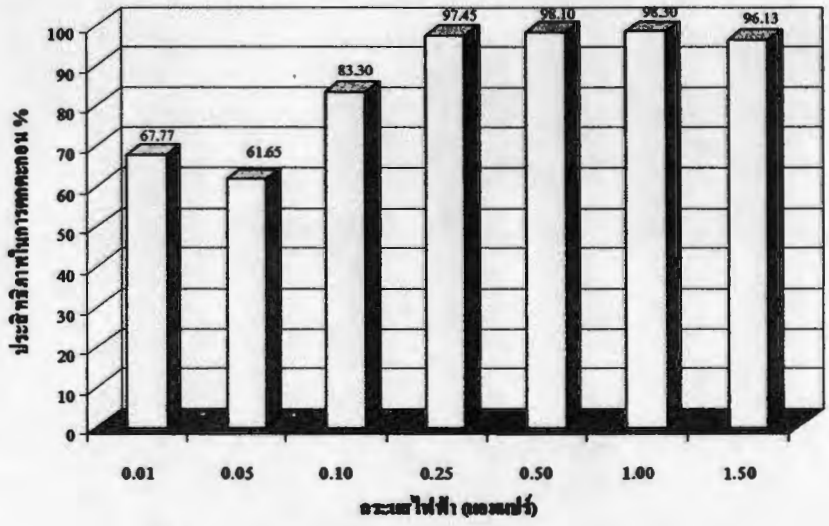
4.2.1 การทดลองหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้ใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียมขนาด 6x6.5 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร ทำการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็น 7 ค่า คือ 0.01 0.05 0.10 0.25 0.50 1.00 และ 1.50 แอมแปร์ ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ใช้เท่ากับ 11 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาครึ่งชั่วโมง ปรับค่าความนำไฟฟ้าให้เท่ากับน้ำเสียจริงประมาณ 13.54 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร โดยใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการศึกษาแสดงในภาคผนวก ข

4.2.1.1 ประสิทธิภาพการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์

จากการทดลองพบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้ามีผลต่อการตกตะกอนของไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณประจุที่ถูกปล่อยออกมาจากขั้วไฟฟ้า โดยประสิทธิภาพในการตกตะกอนมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อกระแสไฟฟ้าสูงกว่า 0.25 แอมแปร์ แต่ลักษณะตะกอนจะแตกต่างกัน ที่ 0.25 แอมแปร์ฟล็อคจะจมอยู่ด้านล่าง เป็นปุยเล็กๆ ไม่เกาะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ มีฟล็อคเพียงเล็กน้อยที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ ในขณะที่เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่า 0.5 แอมแปร์ ปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาจากขั้วไฟฟ้าจะมากขึ้นและเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนจากขั้วลบมากขึ้นด้วย ทำให้ฟล็อคเกาะตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ โดยประสิทธิภาพในการตกตะกอนเท่ากับ 67.77 61.65 83.30 97.45 98.10 98.30 และ 96.13 % ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ฟล็อคจะมีปริมาณมากขึ้นและจะมีฟองก๊าซแทรกอยู่มากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงลักษณะของฟล็อคในรูปที่ 4.10 ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1.00 แอมแปร์พบว่าให้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่เนื่องจากปริมาณฟล็อคที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณมากเมื่อกระแสไฟฟ้ายิ่งสูงและต้องใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น ในขณะที่เมื่อ

เปรียบเทียบกับการใช้กระแสไฟฟ้า 0.50 แอมแปร์พบว่าให้ประสิทธิภาพไม่ต่างกันมากนักแต่เก็บรวบรวมฟล็อคได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีปริมาณฟล็อคน้อยกว่า เกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนดีอยู่บนผิวสารละลาย และใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า จึงเลือกใช้กระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์สำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป

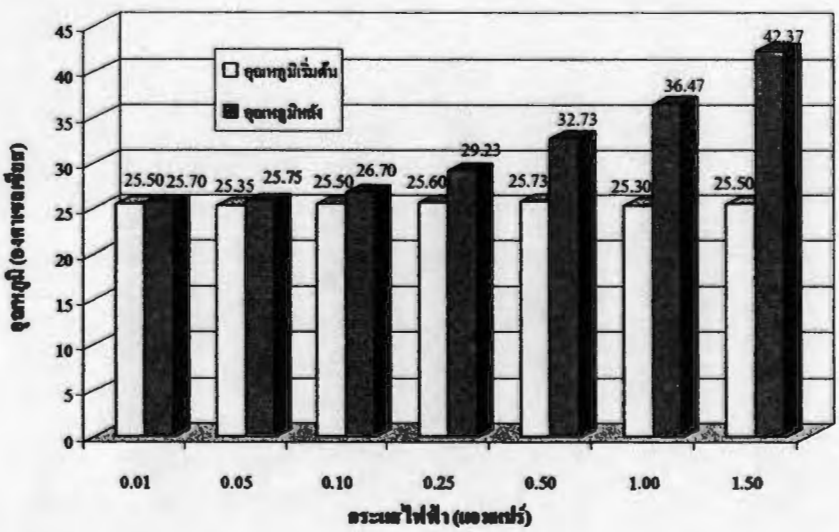


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนและกระแสไฟฟ้าที่ใช้

รูปที่ 4.10 ลักษณะฟล็อคที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยไฟฟ้า

4.2.1.2 อุณหภูมิ

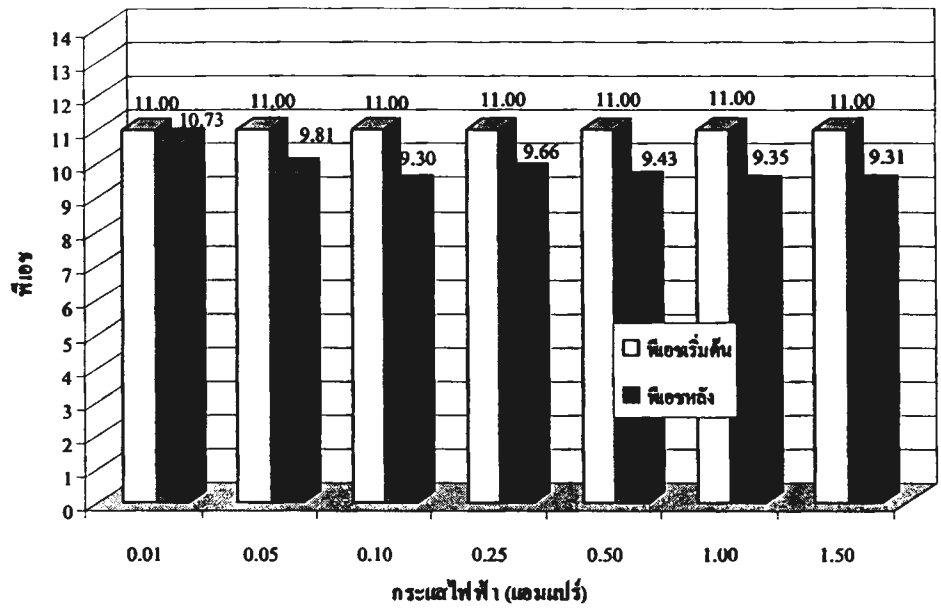
กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้านี้ทำให้อุณหภูมิของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าสูงขึ้น จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าก่อนการทดลองสารละลายนำไฟฟ้ามีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 25.5 องศาเซลเซียส ภายหลังการทดลองพบว่าการปรับกระแสไฟฟ้าทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่เท่ากัน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 25.70 องศาเซลเซียส ในขณะที่เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ อุณหภูมิภายหลังการทดลองจะสูงถึง 42.37 องศาเซลเซียส เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าบางส่วนจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน อุณหภูมิที่สูงขึ้นของสารละลายนำไฟฟ้าทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง จึงอาจส่งผลให้ฟล็อคสามารถตกตะกอนได้ง่ายขึ้น ดังผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประสิทธิภาพในการตกตะกอนจะสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณกระแสไฟฟ้า

4.2.1.3 พีเอช

เมื่อปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นพบว่าพีเอชหลังการทดลองจะลดลง ในการทดลองกำหนดพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 11 พบว่าพีเอชภายหลังการทดลองจะอยู่ในช่วง 9.31-10.73 เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของ $Al(OH)_3$ ทำให้ความเป็นด่างของน้ำเสียลดลง การเปลี่ยนแปลงพีเอชก่อนและหลังการทดลองแสดงในรูปที่ 4.12



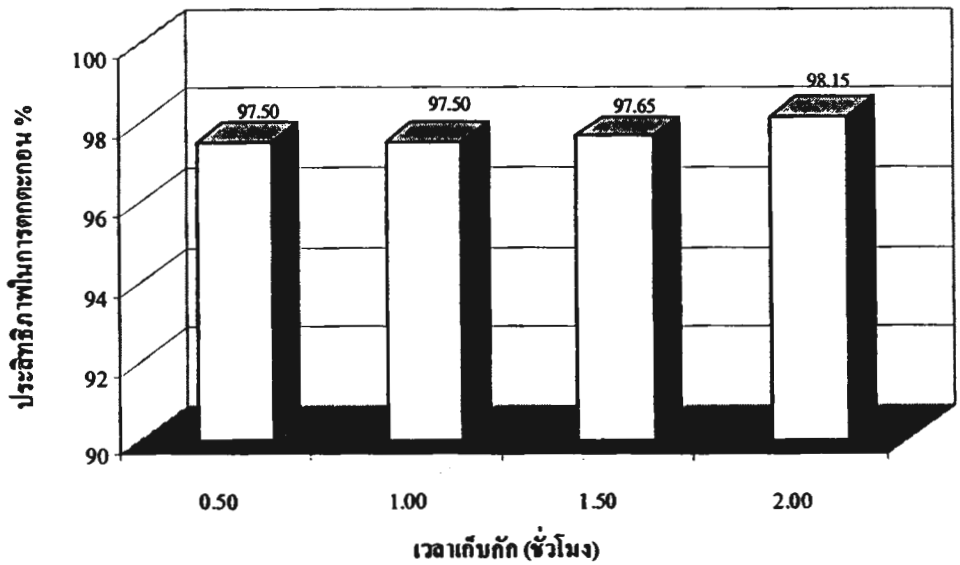
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงของพีเอชก่อนและหลังการทดลองที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่างๆ

4.2.2 การทดลองหาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้ใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 แอมแปร์ พีเอชเริ่มต้น คือ 11 และปรับเปลี่ยนเวลาเป็น 4 ค่า คือ 0.5 1.0 1.5 และ 2 ชั่วโมง รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่วัดได้แสดงในภาคผนวก ข

4.2.2.1 ประสิทธิภาพการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์

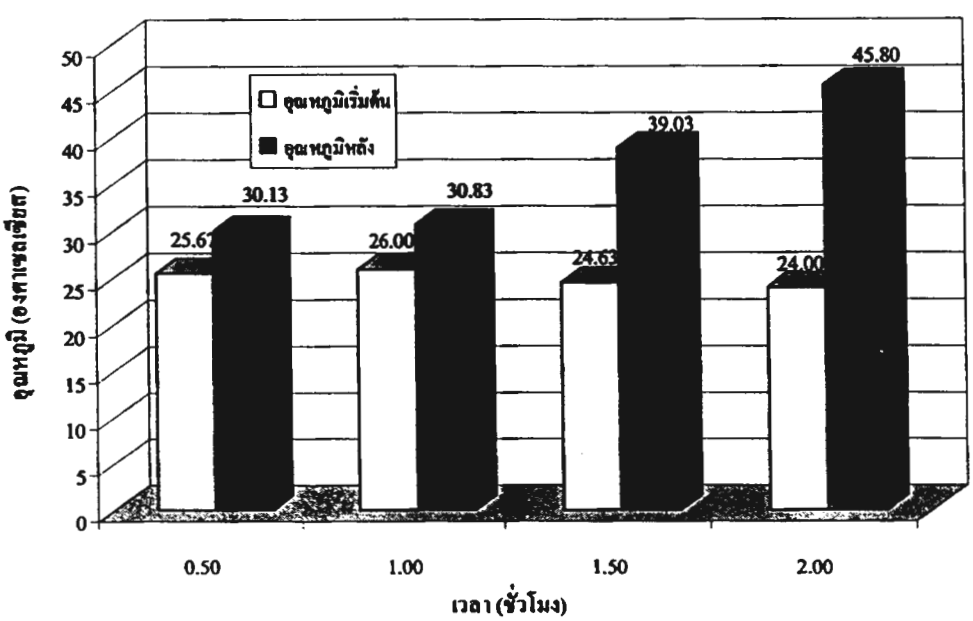
จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 0.5 – 2 ชั่วโมงจะให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนใกล้เคียงกัน คือ 97.50 97.50 97.65 และ 98.18 % ที่เวลา 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ชั่วโมงตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.13 ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาครึ่งชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่น้อยที่สุดในการทดลองขั้นต่อไปเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการบำบัด



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา

4.2.2.2 อุณหภูมิ

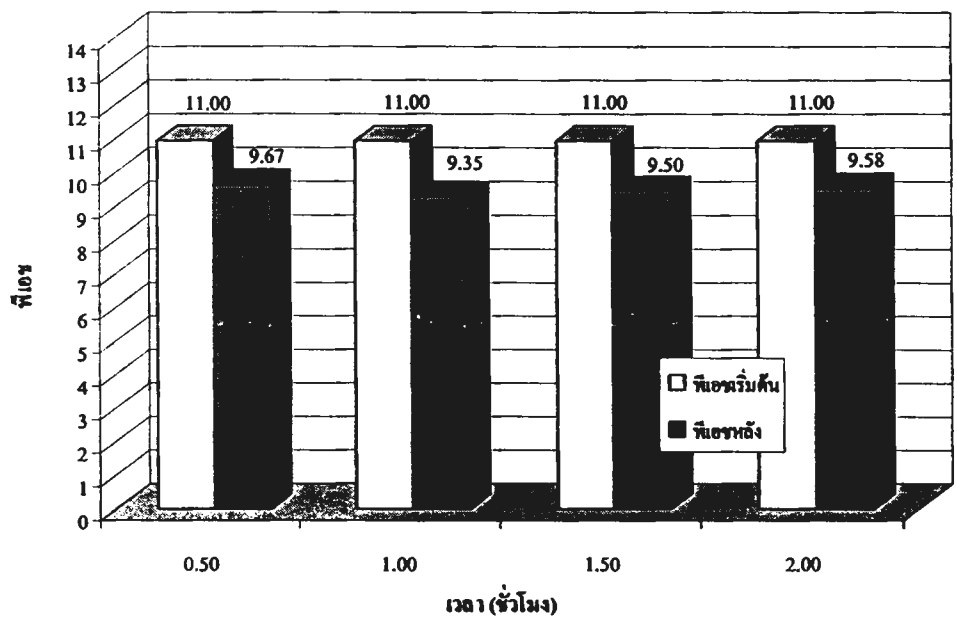
พบว่าเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น อุณหภูมิของน้ำเสียภายหลังการทดลองจะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้น น้ำเสียจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นสัมพันธ์กับเวลาที่สัมผัสกับขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ

4.2.2.3 พีเอช

จากรูปที่ 4.15 พบว่าพีเอชหลังการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากพีเอชเริ่มต้นที่กำหนดไว้มีค่าเท่ากัน และจากประสิทธิภาพในการตกตะกอนที่ให้ผลใกล้เคียงกันแสดงว่าค่าพีเอชของน้ำเสียภายหลังการทดลองไม่ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง แต่จะขึ้นกับพีเอชเริ่มต้นและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้



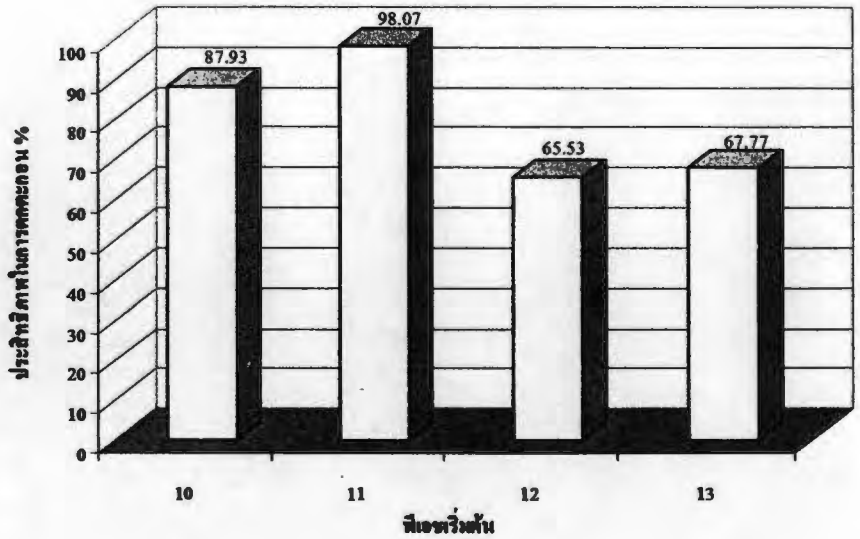
รูปที่ 4.15 พีเอชก่อนและหลังการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ

4.2.3 การทดลองหาพีเอชที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้ใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 แอมแปร์ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับครึ่งชั่วโมง ปรับเปลี่ยนพีเอชเป็น 4 ค่า คือ 10 11 12 และ 13 ในการทดลองได้วัดพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาคผนวก ข

4.2.3.1 ประสิทธิภาพการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์

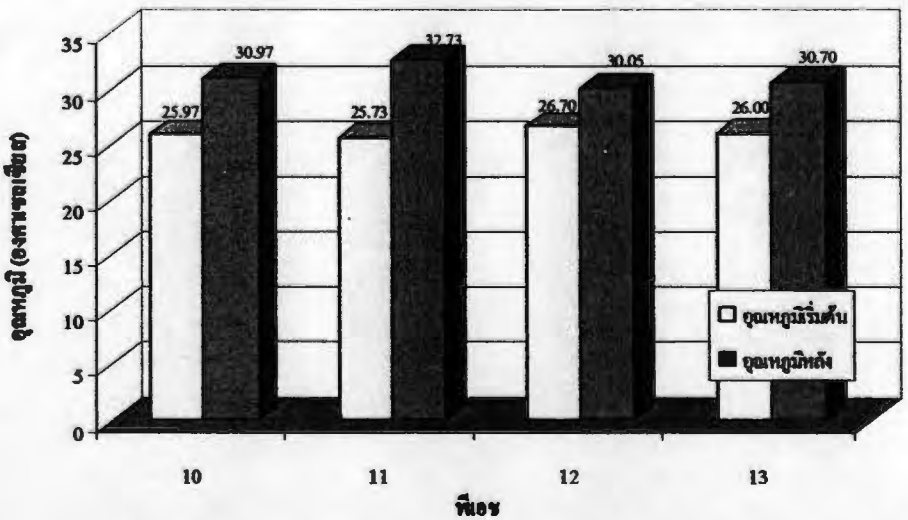
จากผลการทดลองพบว่าพีเอชหลังการทดลองจะลดลง โดยจะให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอน เท่ากับ 87.93 98.07 65.53 และ 67.77 % ที่พีเอช 10 11 12 และ 13 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 11 ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงสุดสำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป ดังผลการทดลองในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ที่พีเอชเริ่มต้นต่างๆ

4.2.3.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของน้ำเสียภายหลังการทดลองจะเพิ่มขึ้นมากกว่า 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน น้ำเสียจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.1.2 และ 4.2.2.2



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่พีเอชเริ่มต้นต่างๆ

4.2.3.3 พีเอช

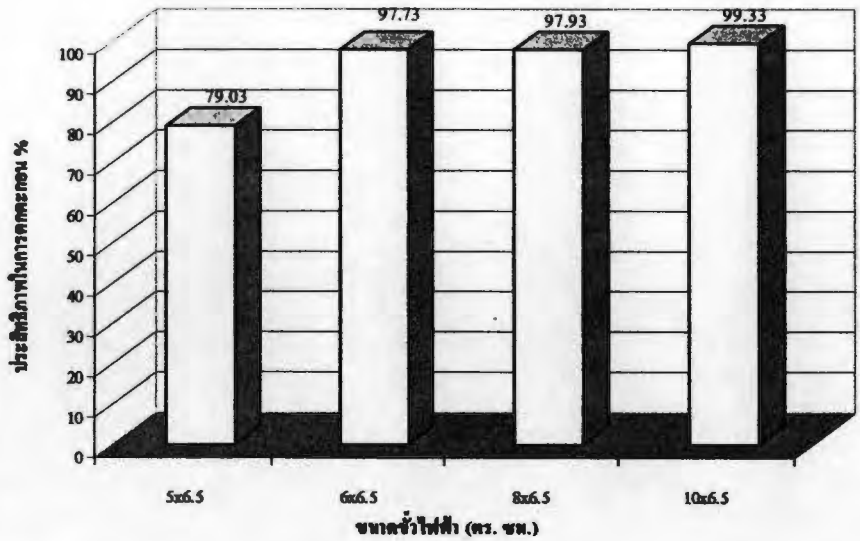
พีเอชหลังการทดลองจะลดลง โดยพีเอชที่ได้เท่ากับ 8.45 9.43 11.59 และ 12.73 เมื่อพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 11 12 และ 13 ตามลำดับ ที่พีเอชเริ่มต้นสูงกว่า 12 พีเอชหลังการทดลองจะลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเป็นช่วงพีเอชที่ค่อนข้างสูงไม่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอน ทำให้ประจุของอลูมิเนียมที่หลุดออกจากขั้วมีปริมาณน้อยซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จะต่ำตามไปด้วยดังรูปที่ 4.16

4.2.4 การทดลองหาขนาดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้ใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 แอมแปร์ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับครึ่งชั่วโมง พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 11 ปรับเปลี่ยนขนาดขั้วไฟฟ้าเป็น 4 ขนาด คือ 5x6.5 6x6.5 8x6.5และ10x6.5 ตารางเซนติเมตร ในการทดลองได้วัดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก ข

4.2.4.1 ประสิทธิภาพการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์

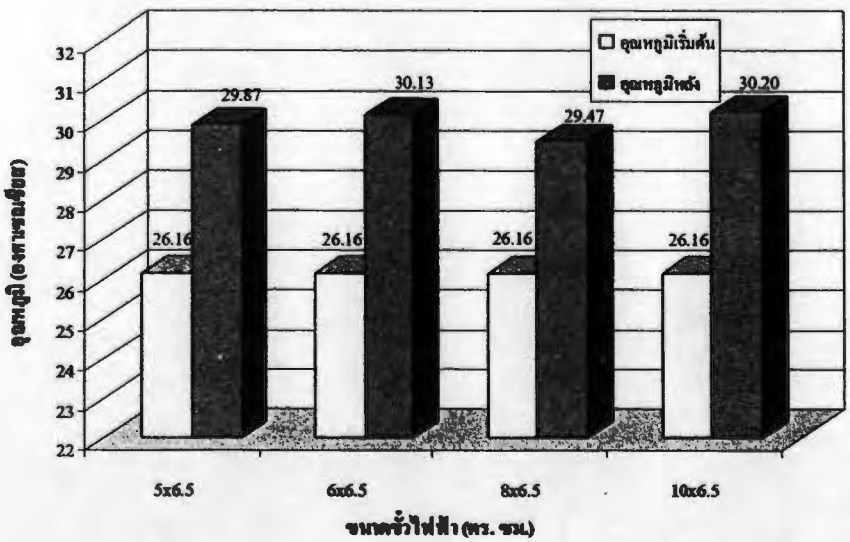
เมื่อทดลองเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าเป็นขนาดต่างๆ พบว่าจะได้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนเท่ากับ 79.03 97.73 97.93 และ 99.33 % ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อขั้วไฟฟ้ามีขนาดใหญ่กว่า 6x6.5 ตารางเซนติเมตรประสิทธิภาพในการตกตะกอนจะใกล้เคียงกัน แต่จะสูญเสียขั้วไฟฟ้ามากขึ้นตามขนาดขั้วไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อประหยัดต้นทุนในการบำบัดจึงเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าขนาด 6x6.5 ตารางเซนติเมตรในการทดลองขั้นต่อไป ซึ่งนอกจากจะประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของขั้วไฟฟ้าแล้ว ตะกอนที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่เกินไปยังมีปริมาณมาก ทำให้เกิดความยุ่งยากในการรวบรวมฟล็อคและแยกไททาเนียมไดออกไซด์ก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าขนาดต่างๆ

4.2.4.2 อุณหภูมิ

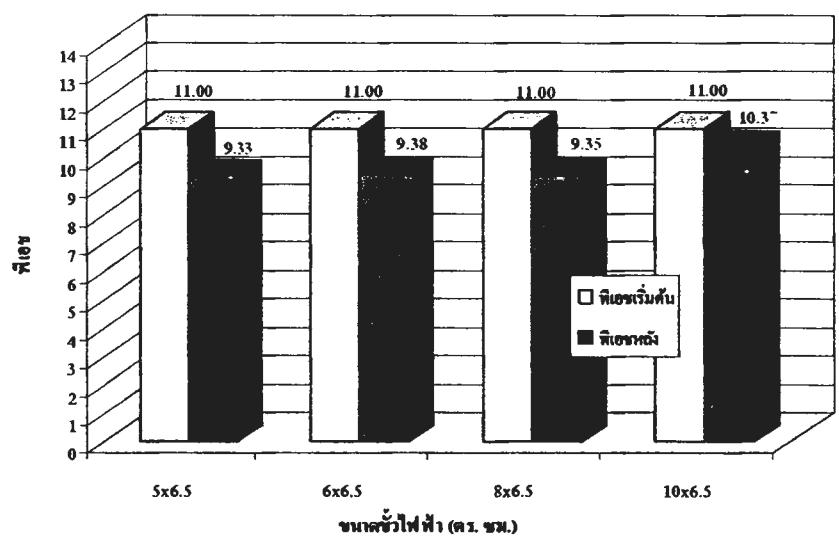
พบว่าอุณหภูมิของน้ำเสียภายหลังการทดลองจะเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 29.47 - 30.20 องศาเซลเซียสดังที่แสดงในรูปที่ 4.13 เนื่องจากใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาและกระแสไฟฟ้าเท่ากัน



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายหลังการทดลองเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดขั้วไฟฟ้า

4.2.4.3 พีเอช

จากรูปที่ 4.20 พบว่าพีเอชหลังการทดลองจะลดลง โดยพีเอชที่ได้เท่ากับ 9.33 9.38 9.35 และ 10.37 จะเห็นว่าเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าขนาด 10x6.5 ตารางเซนติเมตร พีเอชหลังการทดลองจะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กกว่า เนื่องจากประจุของอลูมิเนียมที่หลุดออกจากขั้วไฟฟ้ามีปริมาณมาก รวมทั้งไฮดรอกไซด์ไอออน และฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่ขั้วลบจะมีปริมาณมากตามไปด้วยทำให้สามารถตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดี มีปริมาณฟล็อคที่จับตัวกันลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการตกตะกอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จะสูงที่สุด ดังรูปที่ 4.18



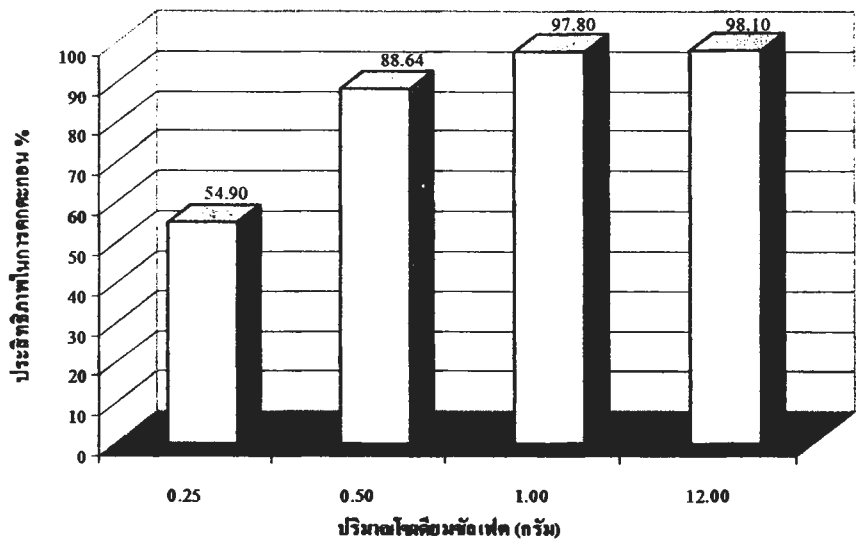
รูปที่ 4.20 พีเอชก่อนและหลังการทดลองที่ขนาดขั้วไฟฟ้าต่างๆ

4.2.5 การทดลองปรับเปลี่ยนค่าความนำไฟฟ้า

เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียจริงที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าค่อนข้างสูง ในการทดลองตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยไฟฟ้าซึ่งใช้น้ำเสียสังเคราะห์จึงต้องเติม Na_2SO_4 เป็นจำนวนมากเพื่อปรับความนำไฟฟ้าให้เท่ากับน้ำเสียจริง จึงทำการทดลองลดปริมาณ Na_2SO_4 ที่เติมลงในน้ำเสียเพื่อประหยัดสารเคมีที่ต้องใช้ โดยจะปรับเปลี่ยนปริมาณ Na_2SO_4 เป็น 4 ค่า คือ 0.25 0.5 1.0 และ 12 กรัม ซึ่งค่าหลังสุดเป็นปริมาณที่ใช้ในการปรับให้มีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับน้ำเสียจริง และใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.1 ถึง 4.2.4 ได้ผลการทดลองดังแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในภาคผนวก ข

4.2.5.1 ประสิทธิภาพการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์

เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณโซเดียมซัลเฟต เป็น 0.25 0.50 1.00 และ 12.0 กรัม จะให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนเท่ากับ 54.90 88.65 97.80 และ 98.10% ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.21 เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมซัลเฟต 0.25 กรัม ซึ่งจะให้ค่าความนำไฟฟ้าต่ำ ประสิทธิภาพในการตกตะกอนจึงต่ำตามไปด้วย ในขณะที่เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมซัลเฟต 1.00 และ 12.00 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนไม่ต่างกันมากนัก เนื่องจากมีค่าความนำไฟฟ้าสูงมากพอที่จะทำให้เกิดถ่ายเทอิเล็กตรอนในสารละลายนำไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อประหยัดต้นทุนในการบำบัดจึงเลือกใช้โซเดียมซัลเฟต 1.00 กรัม สำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนความนำไฟฟ้า

สรุปภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยการรวมตะกอนไฟฟ้า จะใช้ขั้วอลูมิเนียมขนาด 6X6.5 ตารางเซนติเมตร ใช้กระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ ระยะเวลาเก็บกักครึ่งชั่วโมง พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 11 พลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้เท่ากับ 7.86 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าไฟฟ้าในการตกตะกอนเท่ากับ 23.41 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งกระบวนการทางเคมีและไฟฟ้า พบว่าการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด สรุปค่าใช้จ่ายได้ตามตารางที่ 4.1 สำหรับรายละเอียดการคำนวณค่าใช้จ่ายได้แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ

ตารางที่ 4.1 ค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีต่างๆ

กระบวนการ	ค่าใช้จ่าย (บาท/ลบ.ม.)	หมายเหตุ
โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์	111.00	PACl 60 บาท/กก.
แคลเซียมคลอไรด์	71.00	$CaCl_2$ 50 บาท/กก.
เฟอร์รัสซัลเฟต	271.00	$FeSO_4$ 250 บาท/กก.
ไฟฟ้า	70.49	ค่าไฟฟ้าหน่วยละ 2.978 บาท* อลูมิเนียมแผ่น 51 บาท/กก.

*หมายเหตุ ค่าไฟฟ้าคิดจากอัตราปกติสำหรับกิจการขนาดเล็ก ไม่รวมค่าบริการรายเดือน ตามประกาศการปรับโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้า ในวันที่ 3 ต.ค. 2543 (ที่มา http://www.pea.co.th/peas1/ratesom.html. [2549, ก.ค.])

4.3 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนทางเคมีและไฟฟ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์นี้ ในครั้งแรกจะใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ใหม่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นประมาณ 12.5 เติมอากาศด้วยอัตรา 1.1 ลิตรต่อนาที เมื่อบำบัดจนครบตามระยะเวลาที่เหมาะสมแล้วจึงนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนั้นไปตกตะกอนด้วยกระบวนการทางเคมีและไฟฟ้าในสภาวะที่เหมาะสมตามหัวข้อ 4.1 และ 4.2 จากนั้นจึงนำฟล็อคที่ได้มาเหวี่ยง และนำไปละลายฟล็อคออกด้วยกรดไฮโดรคลอริคเพื่อให้เหลือไททาเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวก่อนจะนำกลับมาใช้บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทำซ้ำเช่นนี้ไปจนกว่าไททาเนียมไดออกไซด์จะหมดประสิทธิภาพ

ในการทดลองจะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีความเข้มข้นในรูปของไซยาไนด์ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในทุกการทดลองพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของไซยาไนด์จะลดลง เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าไอออนที่เวลาต่างๆ พบว่าจะเกิดไซยาเนตเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยความเข้มข้นของไซยาเนตจะเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของไซยาไนด์จะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Frank และ Bard(1977) และ Augugliaro และคณะ(1997) ที่ได้เสนอไว้ว่าไซยาไนด์จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นไซยาเนต ดังสมการ (4-1) และ (4-2)

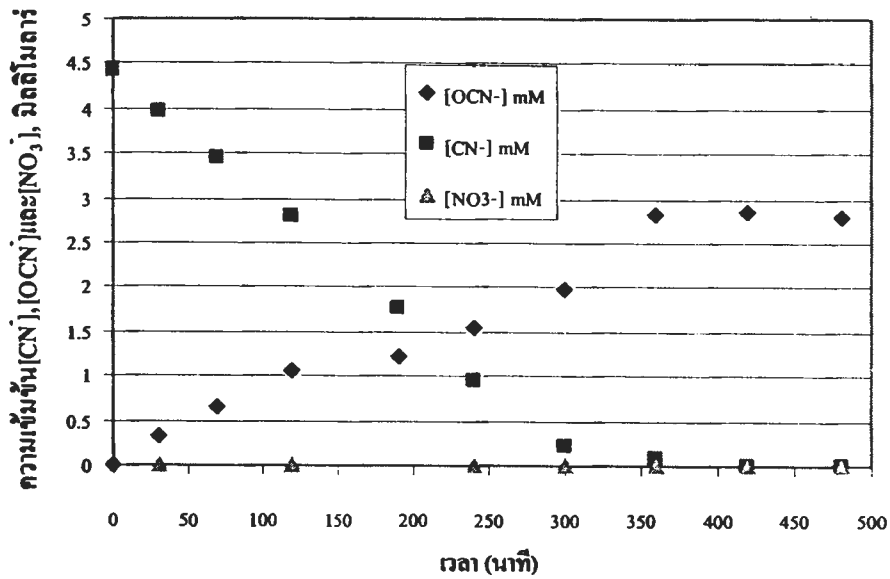
$$CN^- + 2h^+ + 2OH^- \longrightarrow CNO^- + H_2O \qquad (4\text{-}1)$$

$$O_2 + 2e^- + 2H_2O \longrightarrow H_2O_2 + 2OH^- \qquad (4\text{-}2)$$

และไซยาเนตยังสามารถถูกออกซิไดซ์ต่อไปกลายเป็นไนเตรต ดังสมการ (4-3)

$$CNO^- + 2O_2 + 2OH^- + 3H_2O \longrightarrow CO_3^{2-} + NO_3^- + 4H_2O \qquad (4\text{-}3)$$

โดยรูปที่ 4.22 แสดงความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยาเนตและไนเตรตที่เวลาต่างๆ เมื่อทำการทดลองโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ใหม่



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยาเนตและไนเตรตที่เวลาต่างๆ

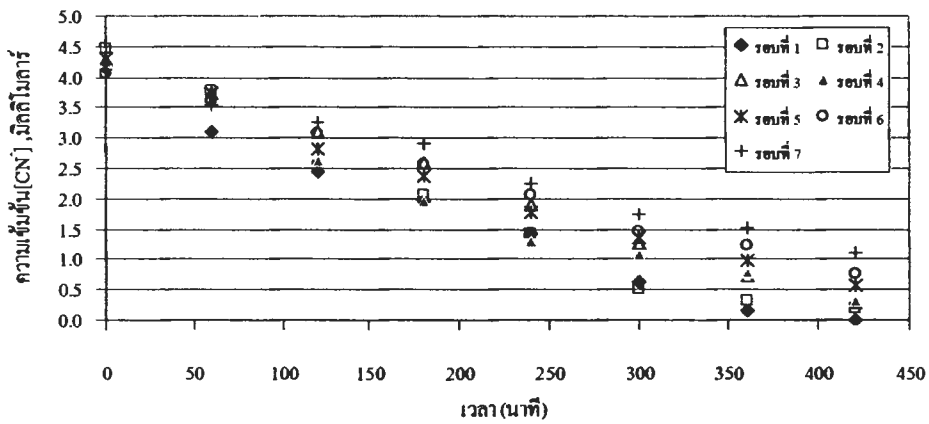
4.3.1 ผลของการบำบัดไซยาไนด์โดยการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนทางเคมี

ในการทดลองนี้จะใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ตกตะกอนออกจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วเท่านั้น เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนด้วยเฟอรัสซัลเฟตไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.1.3.2 สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการวิเคราะห์ เช่น ความเข้มข้นของไซยาไนด์และไซยาเนตแสดงไว้ในภาคผนวก ค

4.3.1.1 ผลของการบำบัดไซยาไนด์โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์

เมื่อทำการทดลองโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ใหม่พบว่าสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้มากกว่า 99% ภายในเวลา 420 นาที ดังแสดงความเข้มข้นของไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ที่เวลาต่างๆในรูปที่ 4.23 เมื่อนำไททาเนียมไดออกไซด์มาใช้ซ้ำโดยนำไปตกตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์

พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์จะลดลงเรื่อยๆตามจำนวนการใช้ซ้ำ ดังค่าเฉลี่ยผลการทดลองในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่าเดิม คือ 420 นาที ภายหลังจากการใช้ 4 ครั้ง ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์จะลดลงต่ำกว่า 90% เนื่องจากเกิดการสะสมของคลอไรด์ไอออนจากการตกตะกอน และจากการแยกไททาเนียมไดออกไซด์ออกจากฟล็อคบนผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งจะขัดขวางการออกซิไดซ์ของไซยาไนด์ ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างน้ำเสียแสดงไว้ในภาคผนวก ง และคลอไรด์ไอออนที่ตรวจวัดได้จากไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องเทคนิคX-Ray Fluorescence Spectrometerแสดงในภาคผนวก จ



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซยาไนด์และเวลาเมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ตกตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ (%)						
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5	รอบที่ 6	รอบที่ 7
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	25.21	15.75	12.10	13.82	12.75	11.15	15.53
120	41.49	43.53	27.50	38.14	34.38	24.70	22.11
180	52.42	53.78	39.11	53.88	44.50	37.06	30.73
240	65.70	67.87	55.27	69.73	59.01	49.38	46.53
300	84.47	88.46	69.97	74.94	68.06	64.24	58.77
360	96.37	92.86	82.74	81.18	76.88	69.66	63.58
420	99.99	95.99	93.58	92.24	86.49	80.97	73.59

จากค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าในการใช้ซ้ำในรอบที่ 3 ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์จะค่อนข้างต่ำซึ่งอาจเกิดจากการใช้กรดไฮโดรคลอริคเพื่อกำจัดฟล็อคในปริมาณที่มากเกินไป หรืออาจเกิดจากการล้างไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยน้ำกลั่นก่อนที่จะนำมาใช้ซ้ำไม่ดีพอ จึงทำให้เกิดการดูดซับของคลอไรด์ไอออนบนผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณมากส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ต่ำกว่าที่ควร

4.3.1.2 ผลของการบำบัดไซยาไนด์โดยการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนด้วยแคลเซียมคลอไรด์

ผลการทดลองเมื่อบำบัดไซยาไนด์ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ใหม่พบว่าให้ผลเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.3.1.1 จากการตรวจวัดค่าไอออนพบว่าสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ 99.53% เมื่อฉายแสงนาน 420 นาที แต่เมื่อนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปตกตะกอนด้วยแคลเซียมคลอไรด์แล้วนำกลับมาใช้ซ้ำ พบว่าประสิทธิภาพลดลงอย่างมากเหลือเพียง 74.42 และ 69.88 % ในครั้งที่ 2 และ 3 ดังแสดงความความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซยาไนด์และเวลาในรูปที่ 4.24 อันเป็นผลเนื่องมาจากคลอไรด์ไอออนคงเหลือจากการตกตะกอนและจากการละลายฟล็อครบกวนการออกซิไดซ์ของไซยาไนด์ โดยคลอไรด์ไอออนเหล่านี้จะส่งผลให้การดูดซับออกซิเจนบนผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ลดลง และจะไปแทนที่กลุ่มไฮดรอกซิลบนผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ ทำให้ hydroxyl radicals($OH^{\cdot}$) และ surface trap hole ($\equiv TiO^{\cdot}$) ที่จะเกิดขึ้นลดลง (Augugliaro และคณะ, 1997) ดังสมการ (4-4) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงด้วย เนื่องจากทั้งสองตัวนี้เป็นออกซิแดนท์ที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไซยาไนด์ในน้ำเสีย

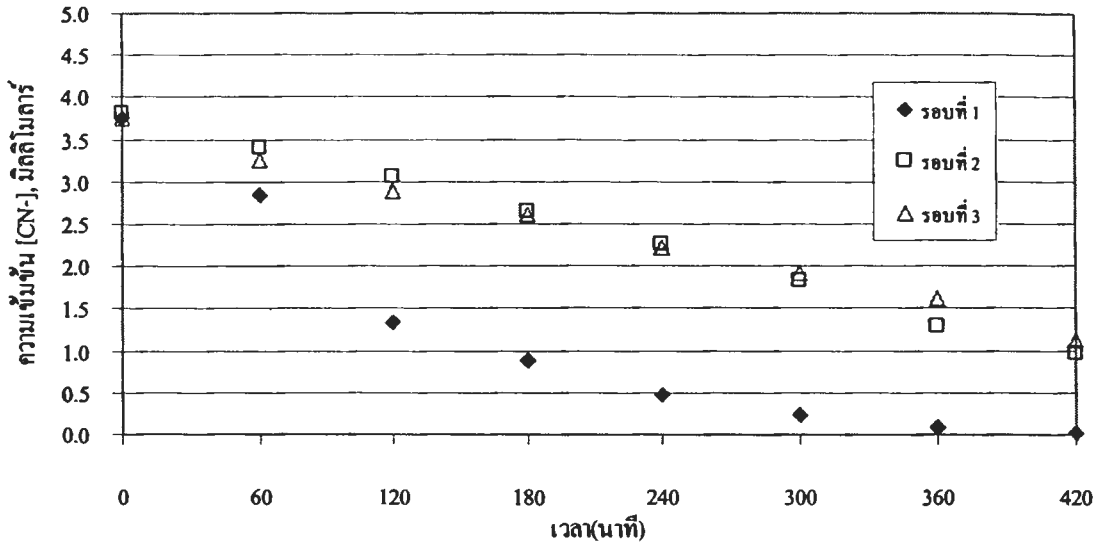
$$\equiv TiOH + Cl^{-} \longrightarrow TiCl + HO^{-} \qquad (4\text{-}4)$$

คลอไรด์ไอออนไม่เพียงแค่ปิดกั้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ส่วนที่จะทำปฏิกิริยาได้ (active site) เท่านั้น แต่ยังลดปริมาณ hydroxyl radicals($OH^{\cdot}$) ในระบบจาก 2 ปฏิกิริยาดังนี้ (1) คลอไรด์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับ oxidizing radicals บางตัว เช่น $OH^{\cdot}$ ทำให้เกิด oxidizing radicals ชนิดอื่นที่มีกำลังน้อยกว่าขึ้นมาแทน ดังสมการ (4-5) และ (4-6) (2) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง h^{+} และคลอไรด์ไอออน จะขัดขวางการเกิด $OH^{\cdot}$ ดังสมการ(4-7) (Tanaka และ Saha, 1994)

$$OH^{\cdot} + Cl^{-} \longrightarrow Cl^{\cdot} + OH^{-} \qquad (4\text{-}5)$$

$$Cl^{\cdot} + Cl^{-} \longrightarrow Cl_2^{\cdot -} \qquad (4\text{-}6)$$

$$2h^{+} + 2Cl^{-} \longrightarrow Cl_2 \qquad (4\text{-}7)$$



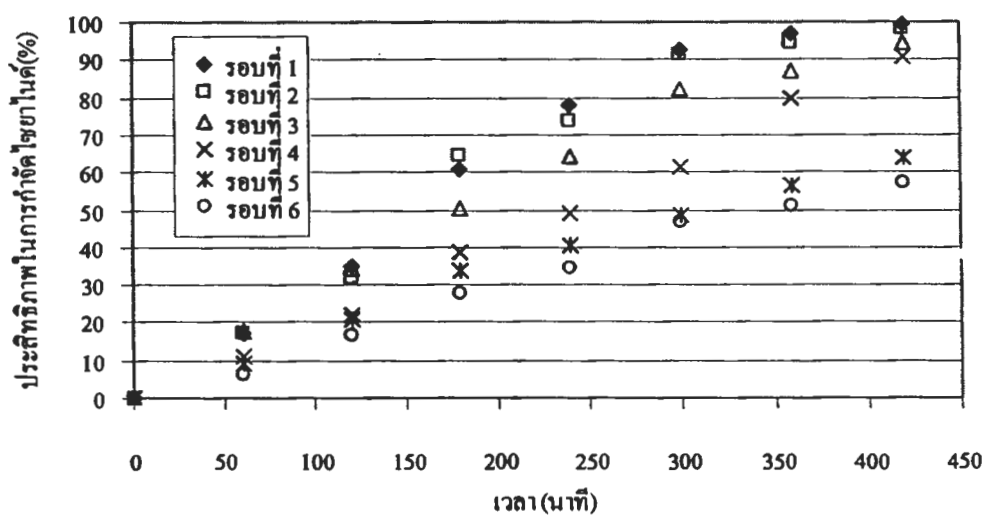
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซยาไนด์และเวลาเมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนด้วยแคลเซียมคลอไรด์

4.3.2 ผลของการบำบัดไซยาไนด์โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนไฟฟ้า

การทดลองนี้จะใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนไฟฟ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าเมื่อนำไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนมาใช้ซ้ำ ประสิทธิภาพในการบำบัดไซยาไนด์จะลดลงเรื่อยๆตามจำนวนรอบการใช้ซ้ำดังรูปที่ 4.25 และตารางที่ 4.3 โดยจะลดลงต่ำกว่า 90% เมื่อผ่านการใช้ซ้ำ 4 รอบ เช่นเดียวกับการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนไฟฟ้า

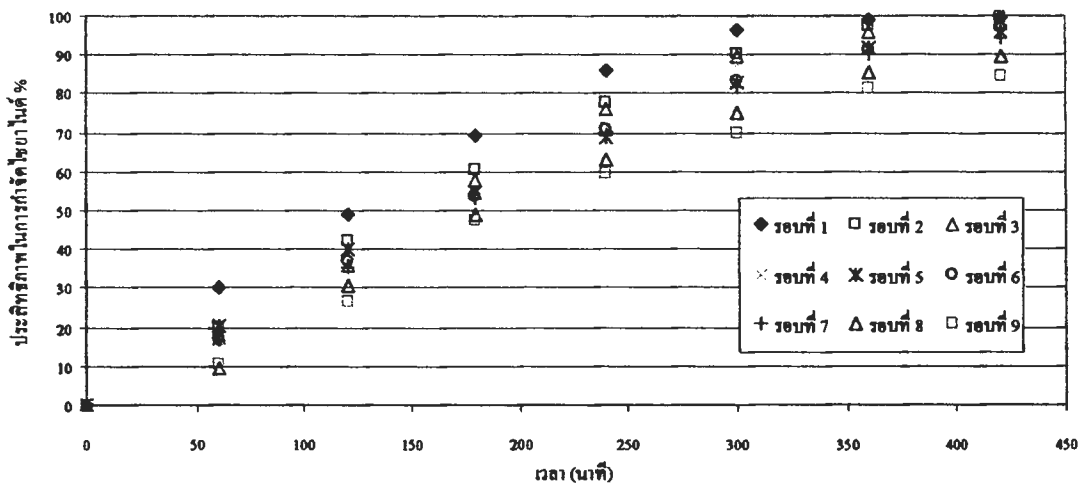
เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ (%)					
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5	รอบที่ 6
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	17.25	17.07	17.68	10.82	9.15	6.30
120	35.01	31.80	34.08	21.97	20.64	16.70
180	60.85	64.62	50.01	38.49	34.03	27.40
240	77.93	73.73	64.53	49.04	40.45	34.45
300	92.63	91.23	81.95	61.25	48.57	46.80
360	97.10	94.72	87.05	79.51	56.68	50.69
420	99.08	98.16	94.45	90.79	63.79	57.04



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการบำบัดไซยาไนด์และเวลาเมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนไฟฟ้า

4.3.3 ผลของการบำบัดไซยาไนด์โดยการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการกรอง

เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการกรองเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดไซยาไนด์โดยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต พบว่าสามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้งโดยประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลงต่ำกว่า 90 % เมื่อผ่านการใช้ซ้ำ 7 รอบ ดังรูปที่ 4.26 เมื่อเทียบกับการบำบัดโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่นำกลับได้จากกระบวนการตกตะกอนทั้งทางเคมีและไฟฟ้า ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการกรองจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า เนื่องจากไม่มีการสะสมของคลอไรด์ไอออนจากกระบวนการนำกลับมารบกวนปฏิกิริยา ตารางที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการกรองที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการบำบัดไซยาไนด์และเวลาเมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการกรอง

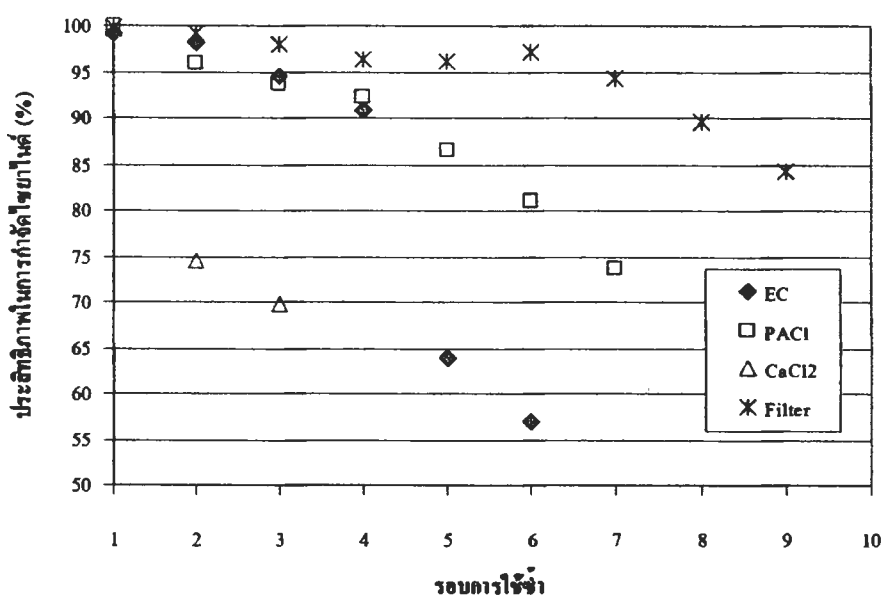
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการกรองที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ (%)								
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5	รอบที่ 6	รอบที่ 7	รอบที่ 8	รอบที่ 9
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	30.41	20.01	17.37	16.93	20.29	17.13	16.58	9.38	10.20
120	49.19	42.19	35.77	36.46	40.32	36.98	35.39	30.70	26.72
180	69.18	60.63	57.61	53.50	54.90	53.81	53.19	48.88	47.29
240	85.80	77.71	75.98	71.17	69.00	70.59	69.21	63.19	59.53
300	96.21	90.30	89.65	87.63	82.85	83.15	81.62	74.93	69.69
360	98.92	97.25	95.89	91.82	91.90	91.20	89.96	85.39	81.31
420	99.73	99.26	98.01	96.39	96.09	97.11	94.35	89.52	84.28

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.20 ที่ประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ 90 % เท่ากัน พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการกรองสามารถใช้ซ้ำได้ถึง 7 รอบ ในขณะที่ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนไฟฟ้าและใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์จะใช้ซ้ำได้ 4 รอบเท่ากัน แม้ว่าจำนวนรอบการใช้ซ้ำจะน้อยกว่าแต่ค่าใช้จ่ายในการบำบัดเมื่อใช้ไฟฟ้าและโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์จะต่ำกว่ามาก ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.5 ซึ่งถ้าใช้กระบวนการกรองจะต้องเสียค่าใช้จ่ายประมาณ 10,000 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ฉ

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ ที่เวลา 420 นาที ในแต่ละรอบการใช้ซ้ำ

รอบการใช้ซ้ำ	ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ %			
	EC	PACl	$CaCl_2$	Filter
1	99.08	99.99	99.53	99.73
2	98.16	95.99	74.42	99.26
3	94.45	93.58	69.88	98.01
4	90.79	92.24	-	96.39
5	63.79	86.49	-	96.09
6	57.04	80.97	-	97.11
7	-	73.59	-	94.35
8	-	-	-	89.52
9	-	-	-	84.28



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ ที่เวลา 420 นาที ในแต่ละรอบการใช้ซ้ำ