

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

การลดปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟน-
ตอนแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอนในระบบกะและ
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอนในระบบต่อเนื่อง

กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอน ซึ่งเป็นกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการรวมตัวด้วย
กระแสไฟฟ้าและกระบวนการเฟนตอนซึ่งเป็นกระบวนการในการสร้างอนุมูลอิสระของ OH^\bullet
(Hydroxyl radicals) มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงซึ่งจะไปออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทำ
ให้โมเลกุลของสารอินทรีย์มีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอมีสีขาวขุ่น มีเศษกาวลอยอยู่บริเวณผิวน้ำ มีกลิ่นเหม็น
เล็กน้อย ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเทียบกับ
มาตรฐานน้ำทิ้ง พบว่าค่าความเป็นกรด - เบส อุณหภูมิ ปริมาณของแข็งแขวนลอย และปริมาณ
ของแข็งละลายน้ำมีค่าผ่านมาตรฐาน ส่วนค่าน้ำมันและไขมัน ค่าบีโอดี และค่าซีโอดีมีค่าสูงกว่า
มาตรฐาน โดยค่าน้ำมันและไขมันสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 30 - 90 เท่า ค่าบีโอดีสูงกว่า
มาตรฐานประมาณ 5 เท่า และค่าซีโอดีสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 4.5 เท่า ดังนั้นน้ำเสียจาก
อุตสาหกรรมดังกล่าวจึงต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม

4.2 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอน

การลดปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟน-
ตอนในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าจะทำในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร สูง 0.4
เมตร ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่ทำจากเหล็ก พื้นที่ผิวขั้วแอโนด 968.7 ตารางเซนติเมตร และขั้ว
แคโทด 1073.5 ตารางเซนติเมตร ที่ปลายขั้วไฟฟ้าจะต่อกับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง และ
มีปั๊มเพื่อทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำตัวอย่าง การทดลองแต่ละครั้งใช้น้ำตัวอย่างประมาณ 6
ลิตร ค่าความเป็นกรด - เบสประมาณ 7 - 9 การทดลองทำในระบบกระแสไฟฟ้าคงที่
(Galvanostatic mode) และวิเคราะห์หาปริมาณของสารมลพิษที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเปรียบเทียบกับ
มาตรฐานน้ำทิ้ง

รายการ	ปริมาณ	ค่ามาตรฐานน้ำ ทิ้ง*
ค่าความเป็นกรด - เบส	7.0 - 9.0	5.5-9
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	27 - 29	≤ 40
ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)	23 - 25	-
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	60 - 75	≤ 150
ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,600 - 1,750	≤ 3,000
ไขมันและน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	150 - 450	≤ 5
ค่าบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	290 - 300	< 60
ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,700 - 1,800	≤ 400

*ที่มา ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ. ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภท โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

4.2.1 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอน ในระบบกะ

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอน ในระบบกะ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า อัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งในการศึกษาตัวแปร 3 ตัวแรกได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ กลไกการลดสารมลพิษ จะเกิดเพียงกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า ส่วนในการศึกษาผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดกระบวนการเฟนตอนร่วมด้วย

4.2.1.1 ผลของปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้น

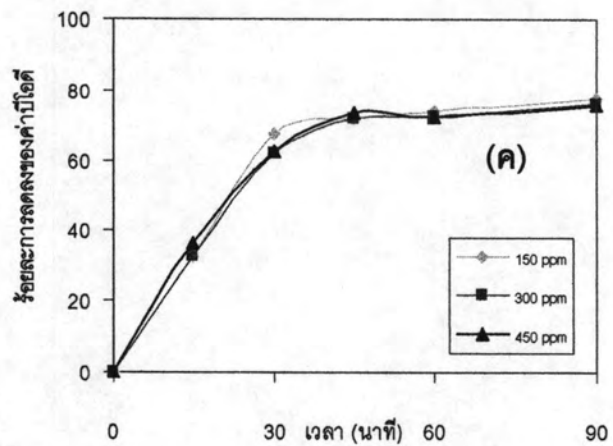
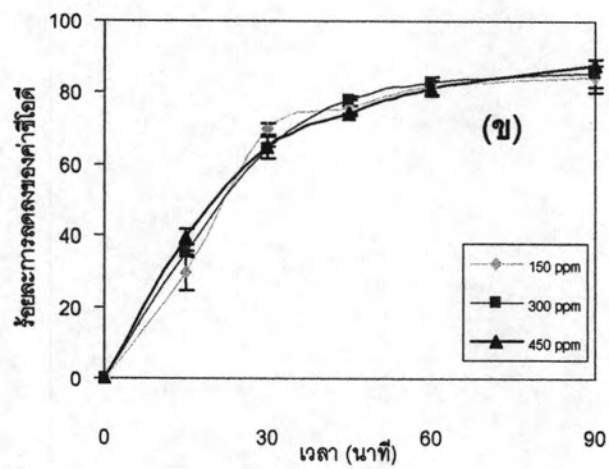
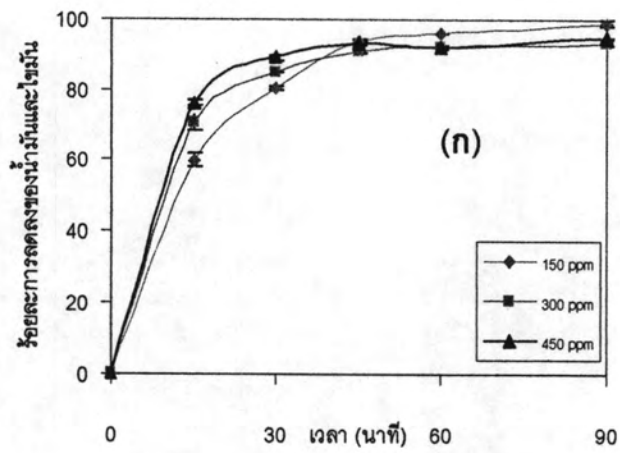
เนื่องจากน้ำเสียจากเครื่องทอผ้าแบบใช้น้ำในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการปนเปื้อนของปริมาณน้ำมันและไขมันในปริมาณไม่คงที่ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นต่อการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีไอดี บีไอดี โดยการทดลองนี้จะทำที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที และค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 ที่ปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นที่ 150, 300 และ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีค่าบีไอดีและค่าซีไอดีอยู่ระหว่าง 270-285 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1372 -1724 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

รูปที่ 4.1 (ก) - (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษกับเวลา พบว่าในช่วงความเข้มข้นปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นระหว่าง 150-450 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีผลต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษ กล่าวคือที่เวลา 45 นาที ร้อยละลดลงของน้ำมันและไขมันของค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 150, 300 และ 450 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าร้อยละ 94.0, 91.4 และ 93.3 ตามลำดับ ซึ่งร้อยละการลดลงของค่าบีไอดีและค่าซีไอดีก็เป็นไปในทำนองเดียวกันเนื่องจากที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถสร้างสารก่อการจับตัวเพียงพอต่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมันในช่วง 150-450 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นในทดลองต่อไปจะศึกษาที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมันที่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นค่าความเข้มข้นสูงสุดของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

4.2.1.2 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีไอดี และบีไอดี ในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 14-24 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 และปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นที่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.2 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมันกับเวลา พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอัตราการลดลงของน้ำมันและไขมันจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะทำให้ปริมาณของเหล็กละลายออกมาในสารละลายมากขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ ทำให้เกิดสารก่อการจับตัวมากขึ้น รูปที่ 4.2 (ข) และ(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีและบีไอดีกับเวลา พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอัตราการลดลงของซีไอดีและบีไอดีจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับน้ำมันและไขมัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะทำให้ปริมาณของเหล็กที่ใช้เป็นอิเล็กโทรดละลายออกมาเพิ่มขึ้นในสารละลาย ทำให้เกิดปริมาณสารก่อการจับตัวมากขึ้น

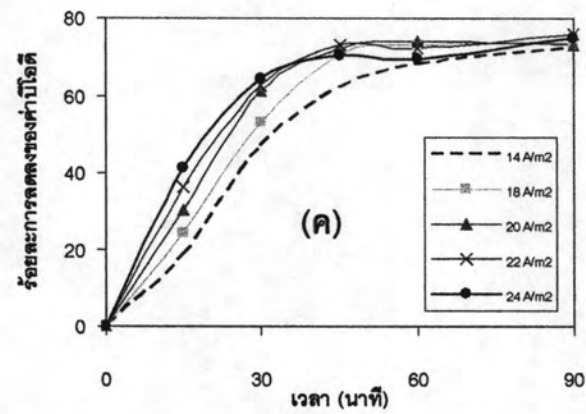
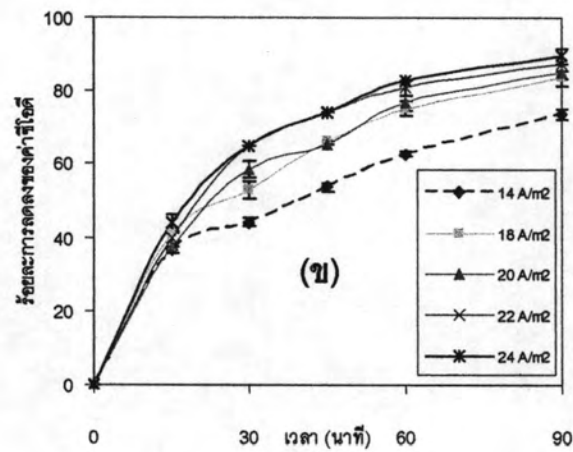
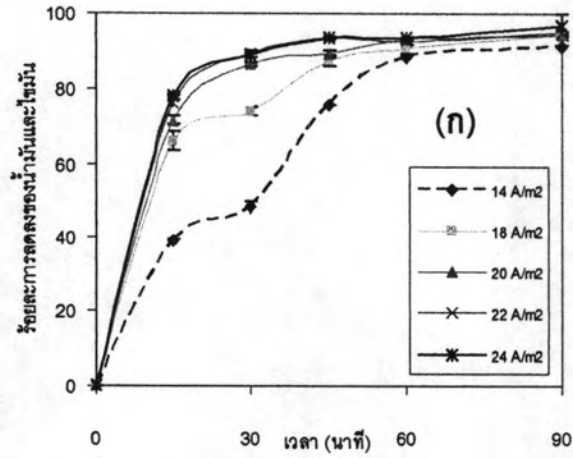


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน (ก) ซีไอดี (ข) บีไอดี (ค) กับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมันค่าต่าง ๆ

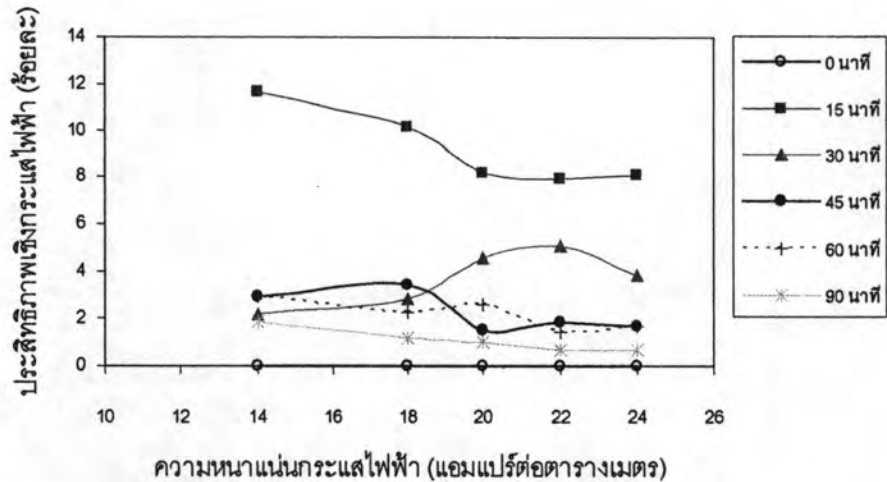
สำหรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจะพิจารณาจากประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าโดยคำนวณจากการลดลงของค่าซีโอดี แสดงดังสมการที่ (4.1) พบว่าในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 14-24 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนักดังแสดงในรูปที่ 4.3 และเมื่อพิจารณาจากร้อยละการลดลงของค่าน้ำมันและไขมันที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตรซึ่งมีค่าร้อยละ 93.3 พบว่าร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมันมีค่าใกล้เคียงกับที่ 24 แอมแปร์ต่อตารางเมตรซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 93.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมันจะไม่เพิ่มขึ้น จึงกล่าวได้ว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณน้ำมันและไขมัน โดยใช้เวลา 45 นาที สามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีโอดี และ บีโอดีได้ร้อยละ 93.5, 74.1 และ 73.3 ตามลำดับ

$$CE(\%) = \frac{(COD)_t - (COD)_{t+\Delta t}}{8I\Delta t} FL100 \quad (4.1)$$

CE(%)	=	ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า (เปอร์เซ็นต์)
(COD) _t	=	ค่าซีโอดีที่เวลา t (มิลลิกรัมต่อลิตร)
(COD) _{t+Δt}	=	ค่าซีโอดีที่เวลา t + Δt (มิลลิกรัมต่อลิตร)
I	=	ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (26.8 แอมแปร์•ชั่วโมง)
L	=	ปริมาณสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ลิตร)
Δt	=	ผลต่างของเวลา (ชั่วโมง)



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลา ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าของการกำจัดซีโอติกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ

4.2.1.3 ผลของอัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์

ผลกระทบของอัตราการไหลวนต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีโอติ และ บีโอติ จะศึกษาที่อัตราการไหลวนระหว่าง 1.5-6 ลิตรต่อนาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 และปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นที่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.4 (ก) - (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษกับเวลา พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ จะทำให้ค่าร้อยละการลดลงของสารมลพิษเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากค่า Reynold number ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (4.2) ในช่วงอัตราการไหล 1.5- 6 ลิตรต่อนาที จะมีค่า Reynold number อยู่ระหว่าง 212.12 - 848.48 ซึ่งเป็นช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) พบว่าที่อัตราการไหล 6 ลิตรต่อนาทีจะให้อัตราการลดลงของสารมลพิษสูงกว่าที่อัตราการไหลอื่น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกันของสารมลพิษกับสารก่อการจับตัวทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น ทำให้สามารถลดสารมลพิษได้มากขึ้น

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (4.2)$$

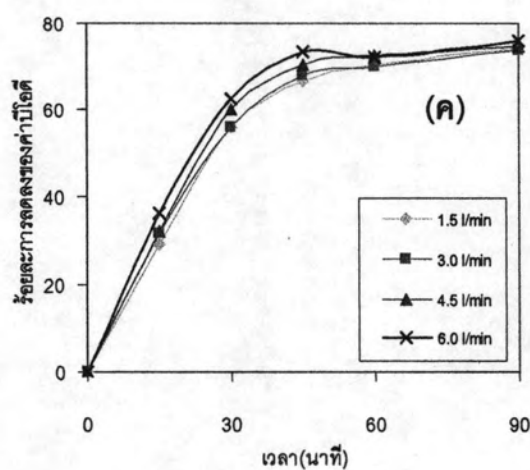
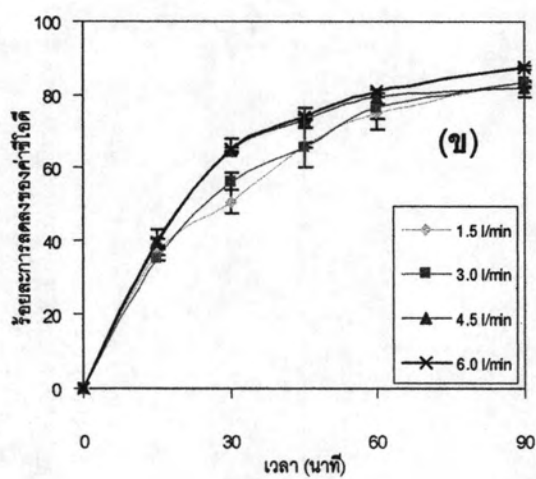
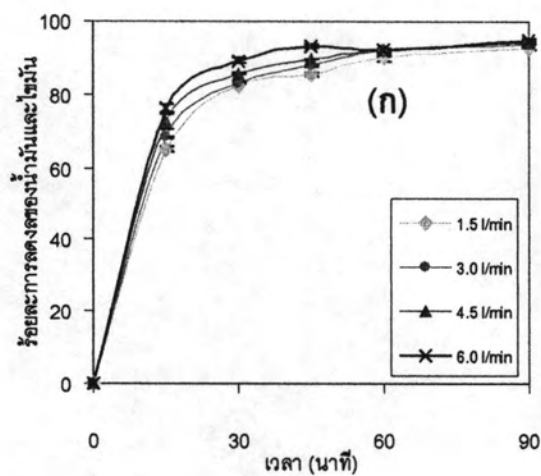
Re = Reynolds number

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (เมตร)

V = ความเร็วของของเหลว (เมตรต่อวินาที)

μ = ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)



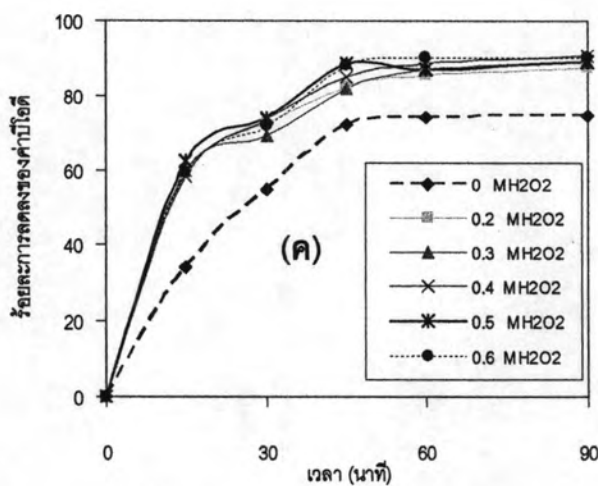
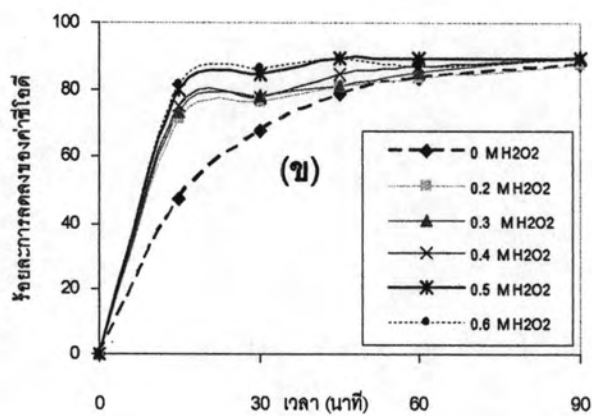
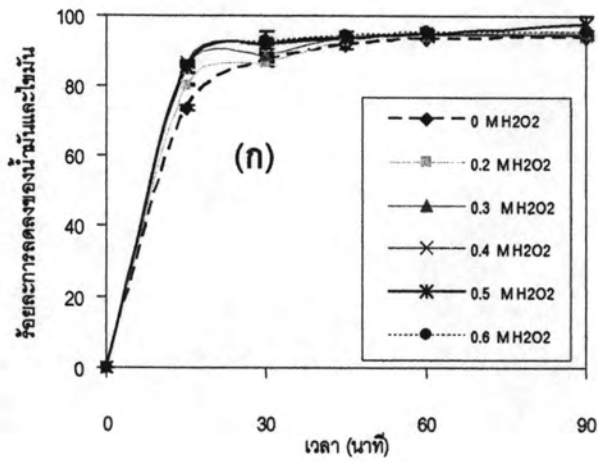
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน (ก) ซีไอดี (ข) บีไอดี (ค) กับเวลา ที่ค่าอัตราการไหลวนต่าง ๆ

4.2.1.4 ผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

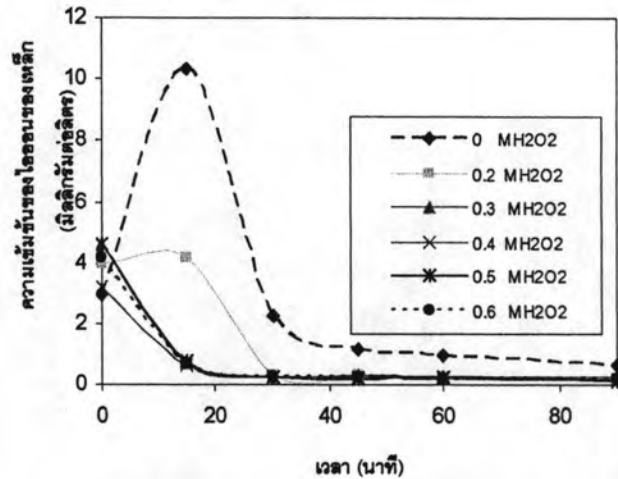
ผลกระทบของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีไอดี และบีไอดี จะศึกษาที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 0-0.6 โมลต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นที่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 และอัตราการไหลวน 6 ลิตร

รูปที่ 4.5 (ก) – (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษกับเวลา พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ร้อยละการลดลงของสารมลพิษจะเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่เวลา 30 นาที สามารถลดน้ำมันและไขมัน ซีไอดี และบีไอดี ได้มากกว่าการไม่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร้อยละ 5.39, 16.84 และ 19.22 ตามลำดับ เนื่องจากการมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้การลดลงของสารมลพิษเกิดทั้งจากกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าควบคู่กับกระบวนการเฟนตอน ซึ่งเรียกรวมว่ากระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน แต่อย่างไรก็ดีเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะคงที่เนื่องจากถูกจำกัดด้วยปริมาณของ Fe^{2+} ไอออนในระบบ ซึ่งจากรูปที่ 4.5 (ก) – (ค) ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นภาวะที่เหมาะสมเนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.6 โมลต่อลิตร อัตราการลดลงของสารมลพิษไม่เพิ่มขึ้น โดยสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีไอดีและบีไอดี ร้อยละ 93.9, 84.89 และ 88.9 ที่เวลา 45 นาที

รูปที่ 4.6 แสดงความเข้มข้นของไอออนของเหล็กในสารละลายกับเวลา จากกราฟเมื่อไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบจะเห็นว่าในช่วงแรกปริมาณเหล็กในสารละลายจะสูงมากเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับระบบเนื่องจากการหลุดของเหล็กที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด แต่เมื่อเวลาผ่านไปไอออนของเหล็กจะเกิดเป็นสารก่อกองจับก่อนปริมาณของไอออนของเหล็กจึงลดลงซึ่งกลไกแสดงดังปฏิกิริยาที่ 2.38-2.39 แต่เมื่อมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบ พบว่าปริมาณของไอออนของเหล็กจะลดลงตั้งแต่แรกเนื่องจากถูกนำไปใช้ในกระบวนการเฟนตอนจึงเป็นการยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบว่าเป็นปฏิกิริยาอิเล็กโตรเฟนตอนจริง นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นอีกว่าเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นปริมาณของไอออนของเหล็กจะลดลงเร็วขึ้น



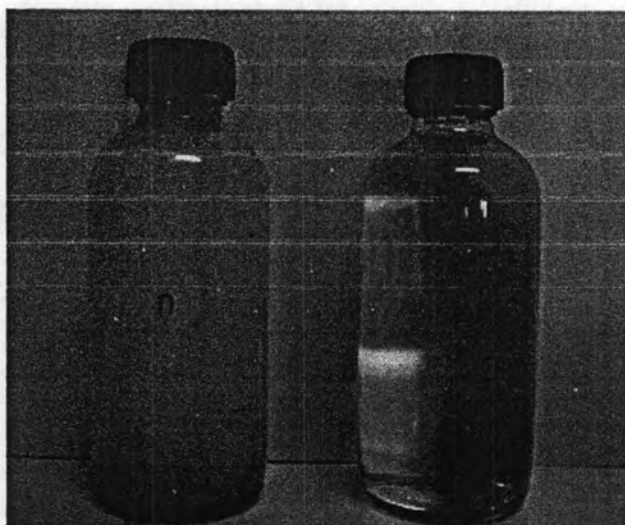
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน (ก) ซีไอดี (ข) บีไอดี (ค) กับเวลา ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ



รูปที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายกับเวลา

รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของน้ำเสียโดยรูป ก. แสดงน้ำเสียก่อนผ่านกระบวนการบำบัดจะเห็นว่ามีส่วนที่ปนเปื้อนซึ่งเกิดจากมีน้ำมันปนเปื้อนในปริมาณที่มาก รูป ข. แสดงน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะเห็นว่ามีส่วนที่ปนเปื้อนซึ่งเกิดจากมีน้ำมันและไขมันปนเปื้อนอยู่เพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณของสารมลพิษของน้ำก่อนบำบัด และหลังบำบัดที่ด้วยกระบวนการรวมอิเล็กโทรเฟนตอนเปรียบเทียบกับมาตรฐาน พบว่าน้ำก่อนบำบัดมีค่าของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำมีค่าผ่านมาตรฐานอยู่แล้ว แต่ค่าปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าบีโอดี และซีโอดี ไม่ผ่านมาตรฐานจึงจำเป็นต้องทำการบำบัด เมื่อบำบัดแล้วพบว่าที่ภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองคือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร ที่เวลา 45 นาที สามารถบำบัดค่าซีโอดีและบีโอดีได้ผ่านมาตรฐาน แต่ยังทำการบำบัดปริมาณน้ำมันและไขมันไม่ผ่านมาตรฐานคือ ปริมาณน้ำมันและไขมันสูงกว่ามาตรฐาน 5 เท่า แต่อย่างไรก็ตามน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดก็มีสีใสและสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตได้



รูปที่ 4.7 ลักษณะของน้ำเสีย (ก) ก่อนบำบัด (ข) หลังบำบัด

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอน

รายการ	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง	น้ำก่อนบำบัด	น้ำหลังการบำบัด (45 นาที)					
			ก	ข	ค	ง	จ	ฉ
ไขมันและน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 5	437	33	32	28	32	25	23
ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 400	1746	392	353	353	274	196	196
ค่าบีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 60	287	85	55	55	45	35	33
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 150	71	15	10	10	10	7	7
ของแข็งที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$\leq 3,000$	1685	1386	1333	1343	1337	1333	1343

ก: j = 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที

ข: j = 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที, H_2O_2 0.2 โมลต่อลิตร

ค: j = 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที, H_2O_2 0.3 โมลต่อลิตร

ง: j = 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที, H_2O_2 0.4 โมลต่อลิตร

จ: j = 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที, H_2O_2 0.5 โมลต่อลิตร

ฉ: j = 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที, H_2O_2 0.6 โมลต่อลิตร

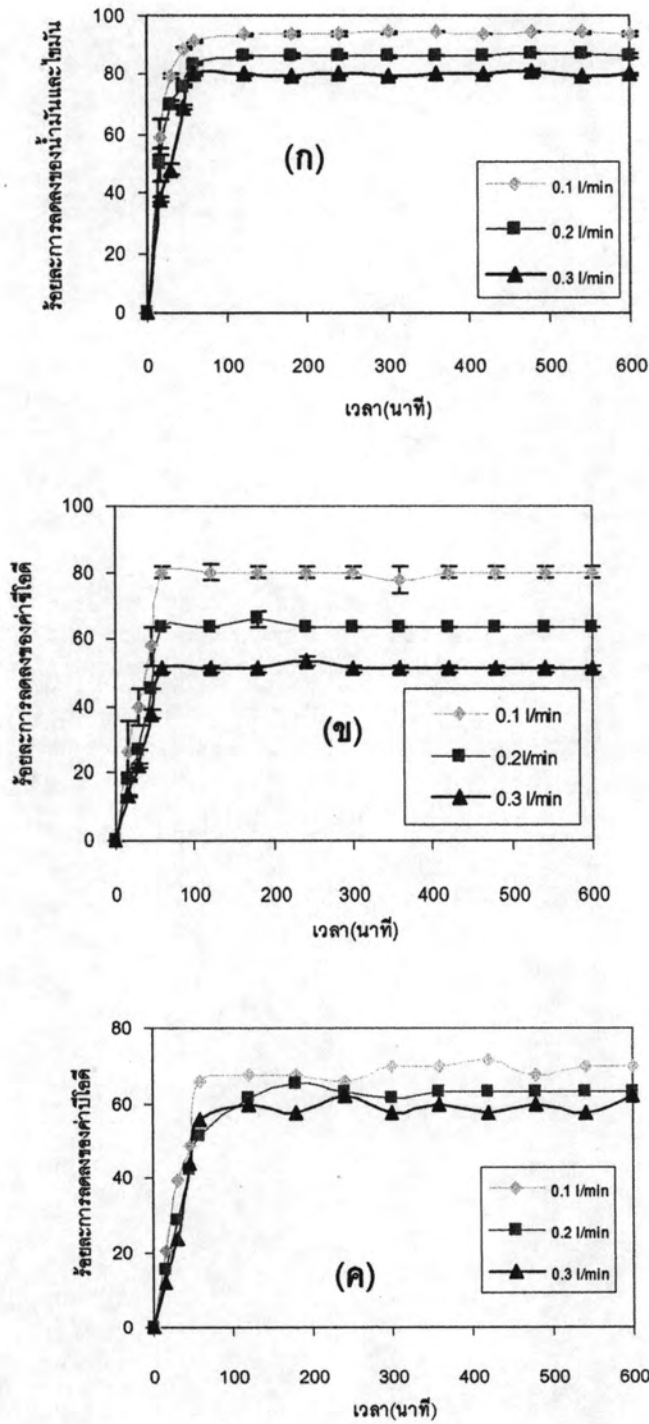
4.2.2 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตอนในระบบต่อเนื่อง

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตอนในระบบต่อเนื่องโดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ และลักษณะการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำการศึกษ ตัวแปรที่มีผลต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีไอดี และบีไอดี โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในระบบกะในกรณีที่ไม่ได้เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาใช้ คือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นที่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากข้อมูลเวลาที่ใช้ในการทดลอง 45 นาที และเครื่องปฏิกรณ์มีขนาด 6 ลิตร จะได้อัตราการไหลในระบบต่อเนื่องคือ 1.33 ลิตรต่อนาที การทดลองนี้จึงทำที่อัตราการไหลในช่วง 0.1 – 0.3 ลิตรต่อนาที

4.2.2.1 ผลของอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์

หัวข้อนี้จะศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีไอดี และบีไอดี โดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นที่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 และอัตราการไหลของน้ำเสียในช่วง 0.1 – 0.3 ลิตรต่อนาที ในช่วงเริ่มต้นจะรอให้น้ำเสียไหลเข้าสู่ระบบจนเต็มเครื่องปฏิกรณ์แล้วทำการทดลองทันที โดยจะปล่อยน้ำเสียออกจากเครื่องปฏิกรณ์ตลอดเวลา

พบว่าเมื่ออัตราการไหลมากขึ้นร้อยละการลดลงของสารมลพิษจะลดขึ้นเนื่องจาก เมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลจะไปลดเวลาที่น้ำเสียอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้โอกาสการเจอกันของสารมลพิษและสารก่อการจับตัวลดลงดังรูปที่ 4.8 โดยที่อัตราการไหล 0.1 ลิตรต่อนาทีระบบจะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลา 60 นาที โดยจะสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีไอดี บีไอดี ได้ร้อยละ 91.3, 80 และ 66 ตามลำดับ



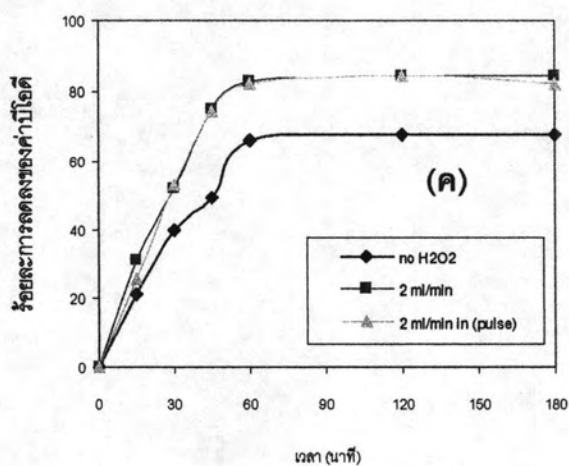
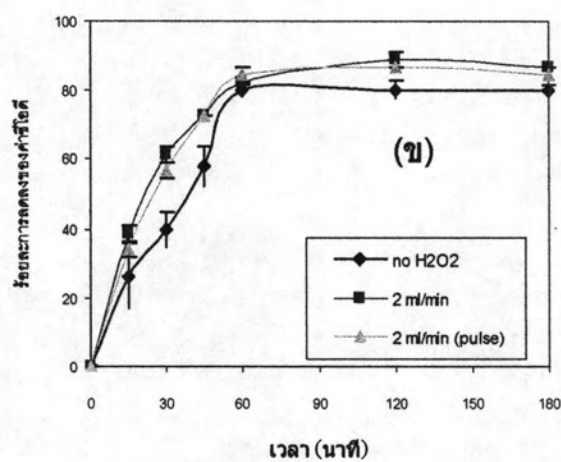
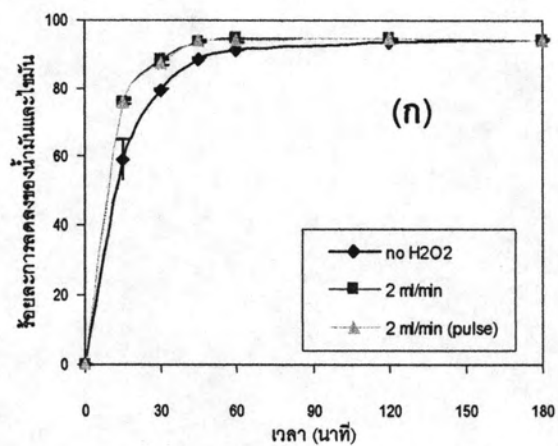
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน (ก) ซีไอดี (ข) บีไอดี (ค) กับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ ในระบบต่อเนื่อง

4.2.2.2 ผลของลักษณะการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลของลักษณะการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีไอดี และบีไอดี จะศึกษาที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 9.71 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้น ด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที โดยจะป้อนเป็นสองลักษณะคือป้อนแบบต่อเนื่องและป้อนแบบเป็นจังหวะ (Pulse) คือป้อนสลับนาที่หยุดป้อนสลับนาที่ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 และอัตราการไหลของ น้ำเสีย 0.1 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.9 (ก) – (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษกับเวลา พบว่าเมื่อมีการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 มิลลิลิตรต่อนาที ร้อยละการลดลงของสารมลพิษจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบจะทำให้กลไกการลดลงของมลพิษเป็นแบบอเล็กโตรเฟนตอนคือ เกิดปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอรัสไอออนจากการสลายตัวของอเล็กโตรด แสดงดังปฏิกิริยา (2.41) ซึ่งที่เวลา 60 นาที สามารถลดปริมาณสารมลพิษได้สูงกว่าในระบบที่ไม่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี ได้ร้อยละ 94.6, 81.82 และ 82.7 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แบบเป็นจังหวะจะให้ร้อยละการลดลงของสารมลพิษใกล้เคียงกับการป้อนแบบต่อเนื่องคือลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี ได้ร้อยละ 94.3, 84.1 และ 82.4 ที่เวลา 60 นาที และสิ้นเปลืองปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์น้อยกว่าในระบบต่อเนื่อง ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงใช้การไหลแบบเป็นจังหวะ

เมื่อเปรียบกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ(2005)^[26] พบว่าผลการทดลองจะไม่สอดคล้องกันคืองานวิจัยดังกล่าวจะกล่าวว่าการป้อนไฮโดรเจนแบบต่อเนื่องให้ผลการทดลองที่ดีกว่า เนื่องจากการทดลองดังกล่าวทำโดยการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทีละหยดในแต่ละเวลาที่กำหนด แต่ในการทดลองนี้จะป้อนแบบต่อเนื่องเป็นช่วงเวลาทุก 10 นาที เว้น 10 นาที ทำให้ได้ผลไม่เหมือนกันคือ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทดลองนี้จะมีสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงพอในการทดลองในแต่ละช่วงเวลา แต่การทดลองของ Zhang อาจจะมีสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยา

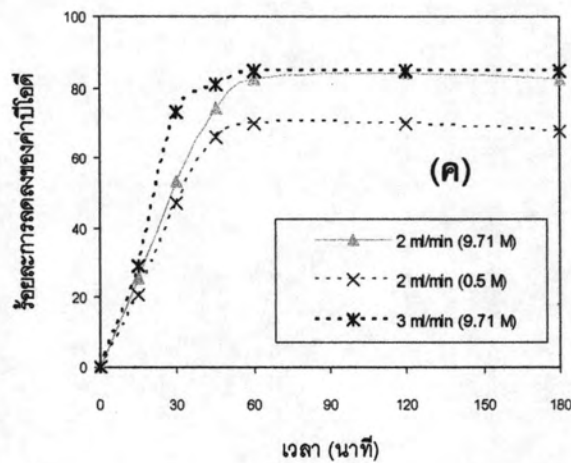
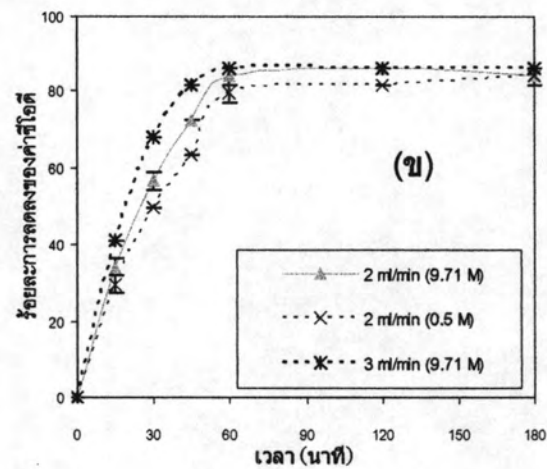
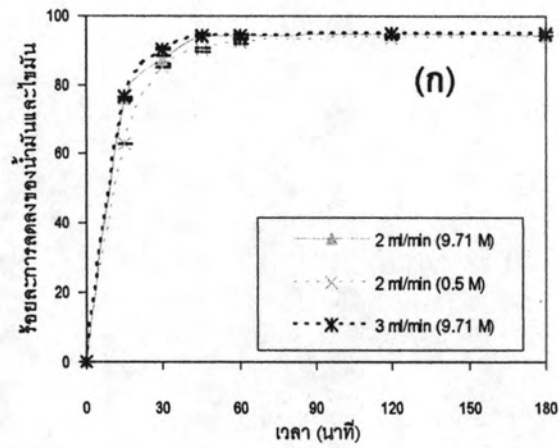


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน (ก) ซีไอดี (ข) บีไอดี (ค) กับเวลาที่ลักษณะการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.2.2.3 ผลกระทบของอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีไอดี และบีไอดี โดยการทดลองนี้จะใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 9.71 มิลต่อลิตรและ 0.5 มิลต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในระบบกะ ด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 9.71 มิลต่อลิตร ด้วยอัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที โดยจะป้อนแบบเป็นจังหวะคือป้อน 10 นาทีหยุด 10 นาที และทำที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 0.1 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.10 (ก) – (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษกับเวลา พบว่าที่อัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้น 9.71 มิลต่อลิตร ให้ค่าร้อยละการลดลงของสารมลพิษสูงกว่าภาวะอื่นเล็กน้อย และถ้าพิจารณาจากต้นทุนในการบำบัดพบว่าที่การป้อนสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.5 มิลต่อลิตร ด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที มีต้นทุนต่ำกว่าการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 มิลลิลิตรต่อนาทีด้วยที่ความเข้มข้น 9.71 มิลต่อลิตรประมาณ 29 เท่า ดังนั้นอัตราการการป้อนสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.5 มิลต่อลิตร ด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที จึงเป็นภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยสามารถลดน้ำมันและไขมัน ซีไอดี และ บีไอดีได้ร้อยละ 92.5, 79.6 และ 69.8 ในเวลา 60 นาที

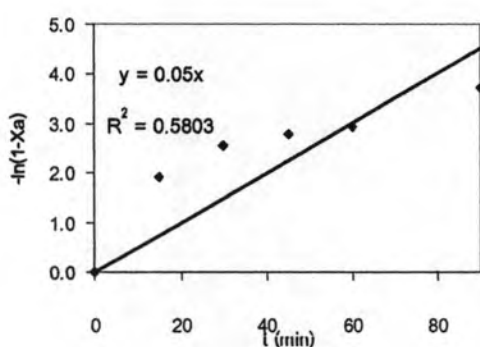


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน (ก) ซีไอดี (ข) บีไอดี (ค) กับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

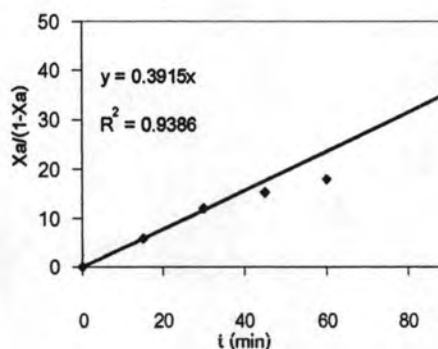
4.3) สมการจลนพลศาสตร์ (Kinetics equation)^[28]

1) อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate constant หรือ ค่า k)

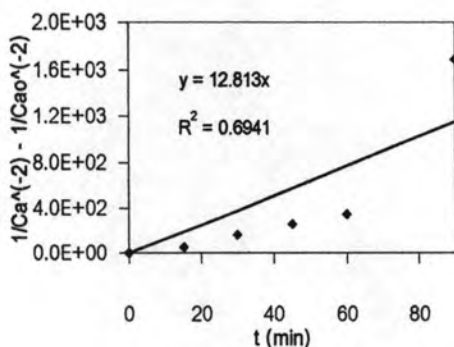
ในหัวข้อนี้จะศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของน้ำมันและไขมัน โดยภาวะที่ศึกษาคือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร ที่เวลา 45 นาที



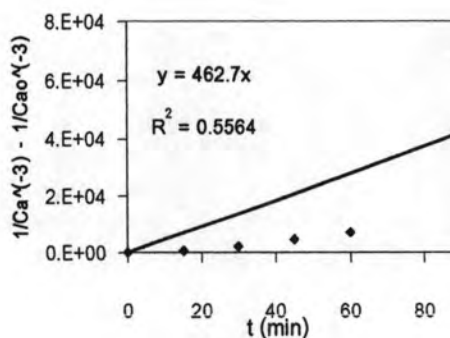
(ก) ปฏิกิริยาอันดับที่ 1



(ข) ปฏิกิริยาอันดับที่ 2



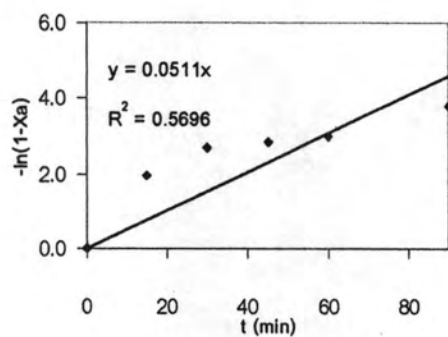
(ค) ปฏิกิริยาอันดับที่ 3



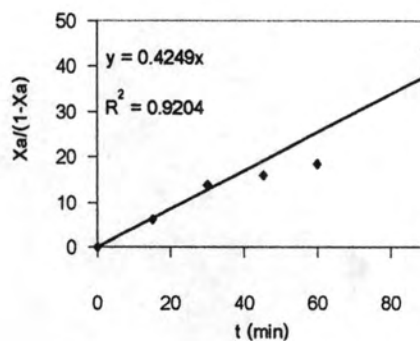
(ง) ปฏิกิริยาอันดับที่ 4

รูปที่ 4.11 ปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

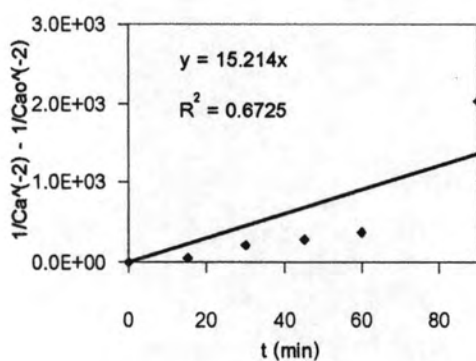
รูปที่ 4.11 แสดงปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ของความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมันกับเวลาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด เพราะให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9386 ซึ่งมีค่ามากที่สุดและใกล้เคียง 1 ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดน้ำมันและไขมันเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ค่า k เท่ากับ $0.3915 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$



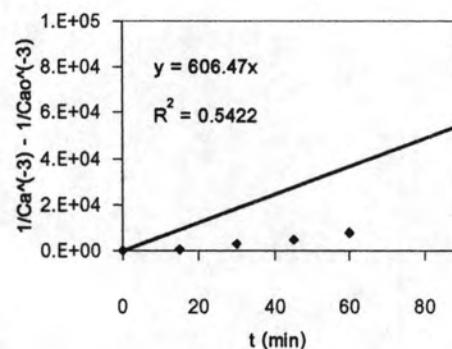
(ก) ปฏิกิริยาอันดับที่ 1



(ข) ปฏิกิริยาอันดับที่ 2



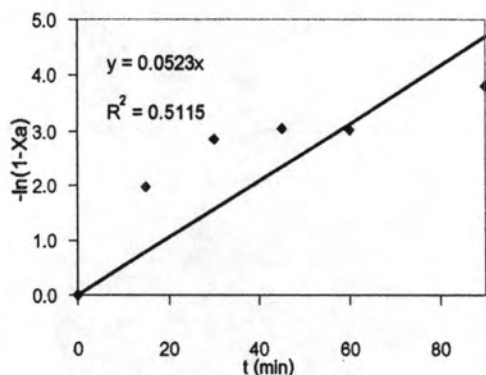
(ค) ปฏิกิริยาอันดับที่ 3



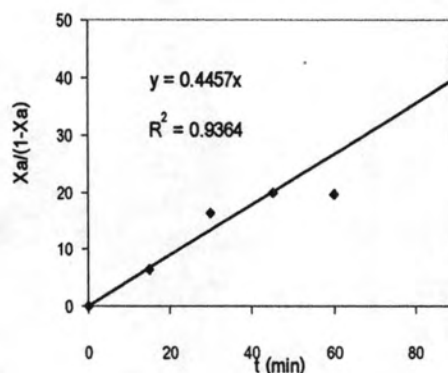
(ง) ปฏิกิริยาอันดับที่ 4

รูปที่ 4.12 ปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

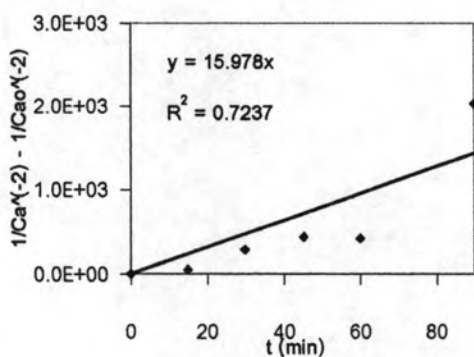
รูปที่ 4.12 แสดงปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ของความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมันกับเวลาที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส พบว่าความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด เพราะให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9204 ซึ่งมีค่ามากที่สุดและใกล้เคียง 1 ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดน้ำมันและไขมันเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ค่า k เท่ากับ $0.4249 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$



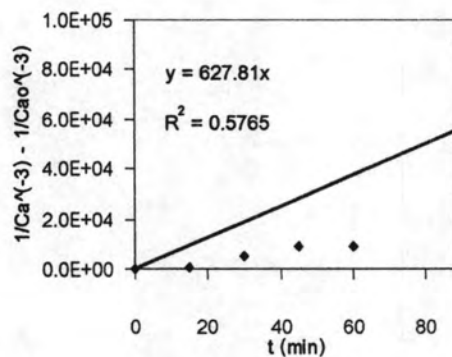
(ก) ปฏิกิริยาอันดับที่ 1



(ข) ปฏิกิริยาอันดับที่ 2



(ค) ปฏิกิริยาอันดับที่ 3



(ง) ปฏิกิริยาอันดับที่ 4

รูปที่ 4.13 ปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.13 แสดงปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ของความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมันกับเวลาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด เพราะให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9364 ซึ่งมีค่ามากที่สุดและใกล้เคียง 1 ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดน้ำมันและไขมันเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ค่า k เท่ากับ $0.4457 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

- 2) ค่าความถี่หรือปัจจัยพรีเอ็กโปเนนเชียล (Frequency or pre-exponential factor ; K_0)
 กัมพลังงานกระตุ้น (Activation energy ; E_a)

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิ

T (°C)	T (K)	$\frac{1}{T}$ (K ⁻¹)	K (L·mol ⁻¹ ·s ⁻¹)	ln(K)
25	303	0.00336	0.3915	-0.9777
28	306	0.00332	0.4249	-0.8559
30	308	0.00330	0.4457	-0.8081

จากกฎของอาร์เรเนียส (Arrhenius' law)

$$k = k_0 e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (4.9)$$

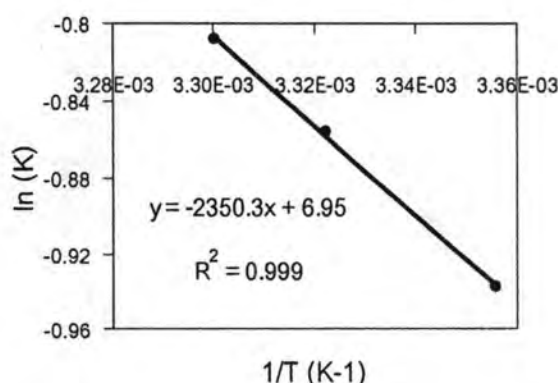
$$\ln k = \frac{-E_a}{RT} + \ln(k_0) \quad (4.10)$$

รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างล็อกกาลีทีมฐานสิบของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (ln k) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ (1/T) พบว่ากราฟตัดแกน Y ที่ 6.95 ดังนั้นจะได้ค่า k_0 เท่ากับ 1043.15 L·mol⁻¹·s⁻¹ ส่วนความชันของกราฟ ซึ่งหมายถึง $-E_a/R$ มีค่าเท่ากับ -2350.3 ดังนั้น E_a มีค่าเท่ากับ 19,540 จูลต่อโมล หรือประมาณ 19.54 กิโลจูลต่อโมล ดังนั้นสมการจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน คือ

$$-r = kC \quad (4.3)$$

$$-r = k_0 e^{\frac{-E_a}{RT}} (C) \quad (4.4)$$

$$-r = 1043.15 e^{\frac{-19540}{T}} (C) \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างล็อกกาลีที่มีฐานอีของค่าคงที่อัตรา
เกิดปฏิกิริยา ($\ln k$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$)

4.4 ต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอในระบบต่อเนื่องพบว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียในระบบต่อเนื่องของทั้งกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอน พบว่าระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที จากการคำนวณต้นทุนการบำบัดดังแสดงไว้ในภาคผนวก ง. พบว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดของกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอนเท่ากับ 18.69 และ 203.12 บาทต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอนมีค่าสูงมากเนื่องจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้มีราคาสูงทำให้กระบวนการนี้ยังไม่เหมาะที่จะนำมาใช้จริง

4.5 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ในการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณน้ำมันและไขมันเจือปน พบว่าของกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงกว่าและสามารถลดสารมลพิษในน้ำเสียได้หลายค่า และสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมันได้มากกว่าร้อยละ 90 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ (ตารางที่ 4.7) เช่น การใช้แบคทีเรียในการช่วยย่อยหรือกระบวนการใช้เอนไซม์ช่วยในการย่อยจะต้องใช้เวลาในการทดลองนานมากซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้อุตสาหกรรม แต่หากเทียบกันเองระหว่างกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอนพบว่า กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้จริงมากกว่ากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอนเนื่องจากกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้ามีต้นทุนในการบำบัดต่ำกว่ากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอน

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันปนอยู่

ผู้วิจัย (ปี)	กระบวนการ บำบัด	น้ำมันและไขมัน		ซีไอดี		บีไอดี	
		ก	ข	ก	ข	ก	ข
Faisal ^[29] (2000)	Anaerobic Baffled Reactor	410	91.3	16000	95.3	-	-
Marcia C.M.R. Leal ^[30] (2006)	Enzymatic hydrolysis	600 -1000	82-88	-	-	-	-
งานวิจัยนี้ (2007)	Electrocoagulation (ในระบบต่อเนื่อง)	463	92.5	1725	79.6	265	69.8
	Electro-Fenton (ในระบบต่อเนื่อง)	463	91.3	1725	80.0	265	66

หมายเหตุ ก คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำเสียก่อนการบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ข คือ ร้อยละการลดของสารมลพิษหลังการบำบัด