บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การศึกษานี้ทำการทดลองกับปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสีย้อม เมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างชนิดกัน ผลการทดลองทำการวิเคราะห์ความสามารถในการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีของขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ และเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสีย้อมชนิดแอซิด ซึ่งมีแผนการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียล และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ในแต่ละการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้หลักการเชิงสถิติวิศวกรรม

4.1 ความสามารถในการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีโดยขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก

ทั้งขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็กต่างก็เป็นขั้วไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้ สำหรับการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดี สำหรับวิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยเคมีไฟฟ้าอยู่เสมอ ซึ่งขั้วทั้งสองชนิดจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีได้ดี อีกทั้งเป็นขั้วที่นิยมนำมาใช้ในการทดลองสำหรับวิธีเคมีไฟฟ้าแบบตกตะกอน (Electrocoagulation) เนื่องจากขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด สามารถเกิดการหลุดออกของไอออนได้ดี และสามารถรวมตัวกับ ไฮดรอกไซด์ไอออน สร้างเป็นตัวตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพสำหรับการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในหัวข้อนี้จะศึกษาความสามารถในการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดี โดยพิจารณาในภาพรวมของการทดลอง และเปรียบเทียบการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีของขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ที่ระดับการทดลองของแต่ละปัจจัย รวมถึงความแตกต่างในการตกตะกอนของตัวตกตะกอนทั้งอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ ซึ่งผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 4.1-4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็กที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

การทดลอง	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A, mA/cm^2)	เวลา (B, min)	ความเข้มข้นสีย้อม (C, mg/L)	ค่าเฉลี่ยของการกำจัดสีโดยขั้วอะลูมิเนียม (%)	S.D.	ค่าเฉลี่ยของการกำจัดสีโดยขั้วเหล็ก (%)	S.D.
1	-	-	-	90.14	0.24	12.79	0.11
a	+	-	-	98.19	0.37	88.99	0.24
b	-	+	-	98.02	0.40	56.19	0.64
ab	+	+	-	97.34	0.25	96.88	0.16
c	-	-	+	17.60	0.86	9.04	0.40
ac	+	-	+	93.69	1.73	18.39	0.35
bc	-	+	+	88.27	0.71	28.00	0.21
abc	+	+	+	96.68	0.68	95.36	0.28
Axial	-1.414	0	0	52.38	0.61	20.93	0.54
Axial	+1.414	0	0	98.31	0.86	96.37	0.37
Axial	0	-1.414	0	38.09	0.78	27.00	0.59
Axial	0	+1.414	0	97.19	1.10	87.93	0.45
Axial	0	0	-1.414	95.95	1.30	71.13	0.42
Axial	0	0	+1.414	22.46	1.92	6.96	0.23
center	0	0	0	84.01	0.21	25.38	0.20
center	0	0	0				
center	0	0	0				
center	0	0	0				
center	0	0	0				

4.1.1 ผลการทดลองของขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็กที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 ที่ระดับการทดลองต่างๆ ของขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด เป็นดังนี้ ที่ปัจจัยระดับสูง (+) ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดี เช่นเดียวกับที่ปัจจัยระดับสูง (+) ของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดีเช่นกัน แต่ที่ระดับสูง (+) ของปัจจัยความเข้มข้นของสีย้อม (C) จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่ำ แต่ที่ระดับปัจจัยต่ำ (-) ของความเข้มข้นของสีย้อม การกำจัดสีสามารถกำจัดได้สูง ไม่ว่าจะที่ระดับปัจจัยของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า หรือระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นที่

ระดับต่ำ หรือ ระดับสูง ในกรณีที่ความเข้มข้นของสีย้อมมีระดับที่สูง (+) ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะเกิดขึ้นได้ดีกับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ก็ต่อเมื่อทำการเพิ่มระดับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเพิ่มระดับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้น ปัจจัยของความเข้มข้นของสีย้อมมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของทั้งการใช้ขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก นอกจากระดับที่กล่าวมาแล้วนั้น ยังพบว่าที่ปัจจัยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระดับ +1.414 โดยที่ปัจจัยของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และปัจจัยความเข้มข้นของสีย้อมมีค่าอยู่ที่ระดับกลาง (0) ยังให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดีเช่นของกันใช้ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็กที่มีต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดี

การทดลอง	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A, mA/cm^2)	เวลา (B, min)	ความเข้มข้นสีย้อม (C, mg/L)	ค่าเฉลี่ยของการลดค่าซีโอดีโดยขั้วอะลูมิเนียม (%)	S.D.	ค่าเฉลี่ยของการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้ขั้วเหล็ก (%)	S.D.
1	-	-	-	40.00	0.00	16.96	0.41
a	+	-	-	68.40	2.22	33.33	0.00
b	-	+	-	69.46	0.76	33.46	0.18
ab	+	+	-	67.71	1.47	66.67	0.00
c	-	-	+	5.56	0.00	10.55	0.78
ac	+	-	+	40.73	0.37	5.90	0.49
bc	-	+	+	40.82	0.50	21.14	0.63
abc	+	+	+	48.78	0.62	55.90	0.49
Axial	-1.414	0	0	49.61	1.24	31.61	1.53
Axial	+1.414	0	0	76.16	1.07	60.15	1.97
Axial	0	-1.414	0	16.57	1.68	16.13	1.06
Axial	0	+1.414	0	61.78	0.37	45.59	0.79
Axial	0	0	-1.414	74.22	1.10	75.70	1.73
Axial	0	0	+1.414	41.79	0.59	7.20	0.55
center	0	0	0	36.65	0.53	19.67	0.35
center	0	0	0				
center	0	0	0				
center	0	0	0				
center	0	0	0				

4.1.2 ผลการทดลองของขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็กที่มีต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดี

การใช้ขั้วอะลูมิเนียมในการลดค่าซีโอดีเกิดขึ้นได้ดี ที่ระดับปัจจัยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีระดับที่ +1.414 โดยที่ปัจจัยเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และปัจจัยความเข้มข้นของสีย้อม อยู่ที่ระดับกลาง (0) ส่วนการใช้ขั้วเหล็ก การลดค่าซีโอดีจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อปัจจัยความเข้มข้นของสีย้อมอยู่ที่ระดับ -1.414 โดยที่ปัจจัยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับปัจจัยของเวลามีค่าอยู่ที่ระดับกลาง (0) ดังนั้น ปัจจัยของความเข้มข้นของสีย้อมมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีของทั้งการใช้ขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก

จากหัวข้อที่ 4.1.1 และหัวข้อที่ 4.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีของขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดนี้ได้เป็นอย่างดี โดยขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากความเข้มข้นของสีย้อมซึ่งเป็นเงื่อนไขในการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

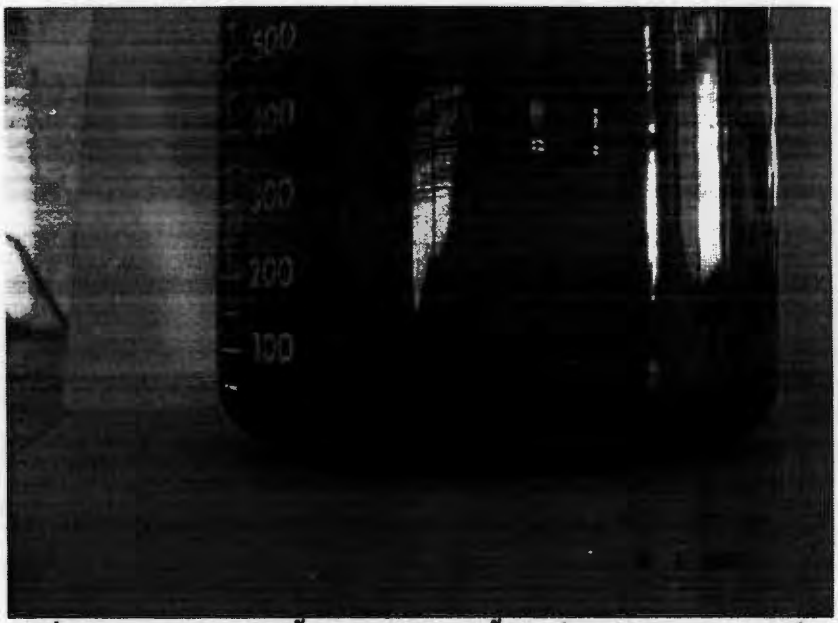
4.1.3 ผลของขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็กที่มีต่อระยะเวลาในการตกตะกอน

จากหัวข้อที่ 4.1.1 และหัวข้อที่ 4.1.2 ความสามารถในการกำจัดสี การลดค่าซีโอดีของขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่คล้ายกัน แต่ขณะที่ทำการทดลอง พบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วอิเล็กโทรด จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ในกรณีของอะลูมิเนียมพบว่าขณะทำปฏิกิริยาจะเกิดตัวตกตะกอนที่มีสีขาว จับกับโมเลกุลของสีย้อมแล้วลอยขึ้นสู่ผิวด้านบน ส่วนขั้วเหล็กจะเกิดตัวตกตะกอนสีที่มีสีดำ แล้วจับกับโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งทำให้การมองเห็นว่าโมเลกุลของสีย้อมอยู่ในลักษณะใดนั้นทำได้ยากกว่าการใช้ขั้วอะลูมิเนียม ซึ่งตัวตกตะกอนเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าหลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แล้วนั้นระยะเวลาในการตกตะกอนของขั้วเหล็กจะเกิดได้เร็ว และให้ตะกอนที่มีน้ำหนักมากกว่าการใช้ขั้วอะลูมิเนียม

รูปที่ 4.1 ภาพซ้าย : เป็นการใช้ขั้วเหล็ก เป็นภาพหลังจากการบำบัดที่เวลา 5 นาที
ภาพขวา : เป็นการใช้ขั้วอะลูมิเนียม เป็นภาพหลังจากการบำบัดที่เวลา 5 นาที

จากรูปที่ 4.1 ภาวะที่ใช้ในการบำบัด คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 mA/cm^2 เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5 นาที และความเข้มข้นสีย้อมสังเคราะห์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากการบำบัดขั้วเหล็กให้ สีน้ำตาลแดง ส่วนการบำบัดด้วยขั้วอะลูมิเนียม พบว่าน้ำใสกว่า และสีจะลอยขึ้นด้านบน แต่เมื่อขั้วเหล็กเมื่อตั้งทิ้งไว้เพียง 10 นาที ก็สามารถตกตะกอนได้ดี ดังรูปที่ 4.2 และเมื่อครบ 15 นาที ก็สามารถตกตะกอนได้ทั้งหมด เพียงแต่น้ำหลังการบำบัดจะมีสีดำ บางภาวะจะมีสีเขียวอ่อน ซึ่งต่างกับขั้วอะลูมิเนียม ซึ่งใช้เวลาในการตกตะกอนทั้งหมดถึง 30 นาที ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งนานกว่าการใช้ขั้วเหล็ก และพบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดมีความใสมากกว่าการใช้ขั้วเหล็ก

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในหัวข้อที่ 4.1.1 และหัวข้อที่ 4.1.2 นั้นจะไม่พบความแตกต่างของการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีโดยขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด แต่เมื่อพิจารณาในเรื่องของการตกตะกอน จะมีความแตกต่างเกิดขึ้น เนื่องจากเหล็กมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 55.847 ซึ่งมีน้ำหนักมากกว่าอะลูมิเนียมที่มีน้ำหนักโมเลกุลเพียง 26.981 จึงทำให้การตกตะกอนของขั้วเหล็กเกิดได้รวดเร็ว อีกทั้งการรวมตัวระหว่างตัวตกตะกอนกับโมเลกุลของสีย้อมเกิดขึ้นได้ดีกว่า จึงทำให้ได้ตะกอนที่หนัก และสามารถกำจัดออกได้ง่าย ส่วนการใช้ขั้วอะลูมิเนียมสามารถกำจัดได้ง่ายเช่นกัน พบว่าหลังการบำบัดตัวตกตะกอนที่ลอยขึ้นสามารถช้อนออกได้โดยที่ไม่ต้องรอให้ตกตะกอน



รูปที่ 4.2 ภาพของการใช้ขั้วเหล็ก หลังจากทิ้งไว้เพื่อรอการตกตะกอนซึ่งใช้เวลา 10 นาที

รูปที่ 4.3 ภาพของการใช้ขั้วอะลูมิเนียม หลังจากทิ้งไว้เพื่อรอการตกตะกอนซึ่งใช้เวลา 30 นาที

การที่ขั้วเหล็กกำจัดสีได้น้อยกว่าขั้วอะลูมิเนียมนั้น เนื่องจาก ตามตารางธาตุ เหล็กอยู่ในหมู่ของโลหะแทรนสิชัน ซึ่งมีสมบัติ คือ ไอออนที่เกิดขึ้นจะมีสีเฉพาะตามเลขออกซิเดชันที่ปรากฏ ในกรณีที่มองเห็นสีเขียว เป็น ไอออนของ Fe^{2+} ซึ่งต่างกับอะลูมิเนียม เพราะ ไอออนของอะลูมิเนียมนั้นไม่มีสี ทำให้น้ำเสียสังเกตุยาก หลังการบำบัดของการใช้ขั้วเหล็กจะมีสีต่างๆ กันขึ้นกับชนิดของไอออนที่ละลายน้ำอยู่ ดังรูปที่ 4.2 ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีของขั้วเหล็กจะมีค่าไม่มากเมื่อเทียบกับขั้วอะลูมิเนียม แต่ข้อดีของขั้วเหล็กคือมีราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย

4.2 ผลของตัวแปรที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมโดยวิธีเคมีไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา ความต่างศักย์ไฟฟ้า เป็นต้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดี โดยทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบ2^k รวมกับการออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลาง โดยตัวแปรที่นำมาทำการออกแบบการทดลองมี 3 ตัวแปรด้วยกัน คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) และความเข้มข้นของสีย้อม (C) โดยผลตอบสนองของการทดลอง คือ การกำจัดสี (% color removal) และการลดค่าซีโอดี (% COD) ผลการทดลองได้แสดงดังตารางที่ 4.3 สำหรับการใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด และตารางที่ 4.4 เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของขั้วอะลูมิเนียมจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การทดลอง	A	B	C	ค่าเฉลี่ยของการกำจัดสี	S.D.	ค่าเฉลี่ยของการลดค่าซีโอดี	S.D.
1	-	-	-	90.14	0.24	40.00	0.00
a	+	-	-	98.19	0.37	68.40	2.22
b	-	+	-	98.02	0.40	69.46	0.76
ab	+	+	-	97.34	0.25	67.71	1.47
c	-	-	+	17.60	0.86	5.56	0.00
ac	+	-	+	93.69	1.73	40.73	0.37
bc	-	+	+	88.27	0.71	40.82	0.50
abc	+	+	+	96.68	0.68	48.78	0.62
Axial	-1.414	0	0	52.38	0.61	49.61	1.24
Axial	+1.414	0	0	98.31	0.86	76.16	1.07
Axial	0	-1.414	0	38.09	0.78	16.57	1.68
Axial	0	+1.414	0	97.19	1.10	61.78	0.37
Axial	0	0	-1.414	95.95	1.30	74.22	1.10
Axial	0	0	+1.414	22.46	1.92	41.79	0.59
center	0	0	0	84.01	0.21	36.65	0.53
center	0	0	0				
center	0	0	0				
center	0	0	0				
center	0	0	0				

4.2.1 การวิเคราะห์การกำจัดสีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการกำจัดสีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือระดับความสำคัญเท่ากับ 0.05 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการกำจัดสีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F – Value	P - Value
A	1360.632	1	1360.632	11.61553	0.0025
B	4763.273	1	4763.273	40.66342	< 0.0001
C	6385.878	1	6385.878	54.51537	< 0.0001
A^2	1062.966	1	1062.966	9.074392	0.0064
B^2	233.4676	1	233.4676	1.993081	0.1720
C^2	740.0603	1	740.0603	6.317794	0.0198
AB	1448.754	1	1448.754	12.36781	0.0019
AC	1498.658	1	1498.658	12.79384	0.0017
BC	1144.3	1	1144.3	9.768731	0.0049
ABC	843.7573	1	843.7573	7.203041	0.0136
Error	6.55392	18	0.364107		
Total	23132.59	32			

ทำการทดสอบสมมติฐาน โดยการทดสอบความเท่ากันของค่าสังเกต ดังนี้

$H_0 : \beta_i = 0$

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ $\beta_i \neq 0$

จากตารางที่ 4.4 สามารถสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ได้ตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมมติฐานของการกำจัดสีโดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม

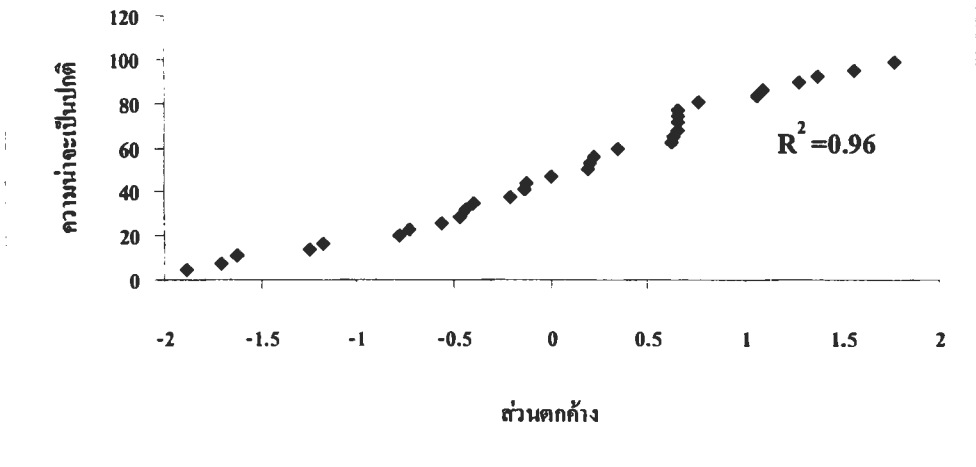
Source	F-value	$F_{0.05,1,18}$	การทดสอบสมมติฐาน	ผลการทดสอบสมมติฐาน F-test
A	11.61553	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี
B	40.66342	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี
C	54.51537	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี
A^2	9.074392	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีส่วนโค้งเกิดขึ้น
B^2	1.993081	4.41	ยอมรับ H_0	ไม่มีส่วนโค้งเกิดขึ้น
C^2	6.317794	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีส่วนโค้งเกิดขึ้น
AB	12.36781	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี
AC	12.79384	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี
BC	9.768731	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี
ABC	7.203041	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี

จากผลการทดสอบสมมติฐานในตารางที่ 4.5 พบว่าตัวแปรที่มีค่า F_0 ต่ำกว่าค่าวิกฤติ คือ ค่ากำลังสองของตัวแปร B จึงสามารถบอกได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดสีคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) ความเข้มข้นสีย้อม (C) และมีอันตรกิริยาทั้งหมดของตัวแปร จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการกำจัดสีโดยขั้วอะลูมิเนียมตามตารางที่ 4.6

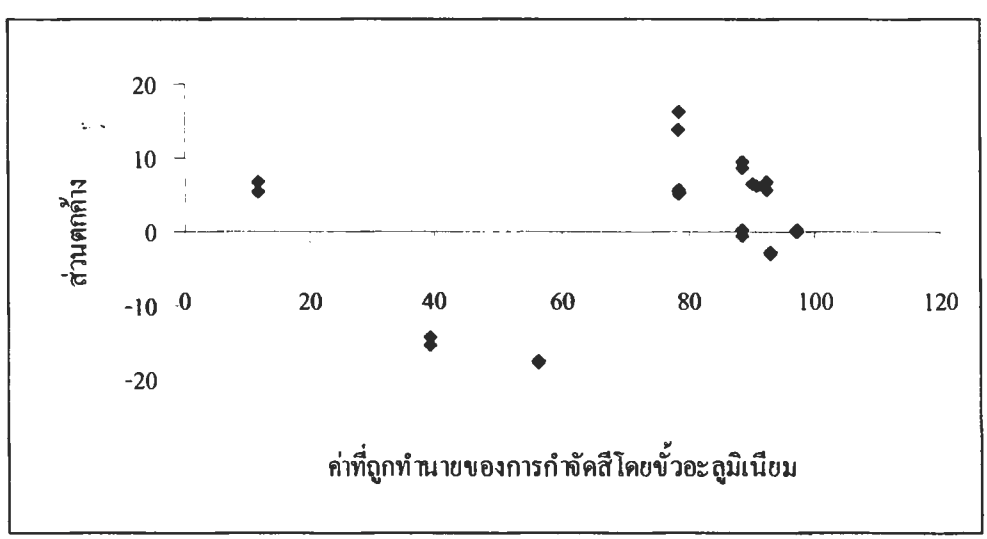
ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของการกำจัดสีโดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม

Factor	Coefficient Estimate
Intercept	78.51
A	7.06
B	13.2
C	-15.29
A^2	8.34
C^2	-4.79
AB	-9.52
AC	9.68
BC	8.46
ABC	-7.26

จากนั้นนำมาตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องโดยการตรวจสอบการกระจายแบบปกติ ด้วยกราฟความน่าจะเป็นปกติ ดังรูปที่ 4.4 พบว่าค่าของส่วนตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.96 และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างค่าที่ถูกทำนายกับค่าส่วนตกค้าง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เปอร์เซ็นต์สูง ค่าของส่วนตกค้างมีค่าน้อย ทำให้ค่าการพยากรณ์มีความแม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 4.4 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการกำจัดสีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.5 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของการกำจัดสีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด

จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในสมการที่ 4.1 สามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

$$\%\text{color removal} = 78.51 + 7.06x_A + 13.2x_B - 15.29x_C + 8.34x_A^2 - 4.79x_C^2 - 9.52x_Ax_B + 9.68x_Ax_C + 8.46x_Bx_C - 7.26x_Ax_Bx_C \quad (4.1)$$

โดยที่ x คือ ค่าของตัวแปรที่เข้ารหัส

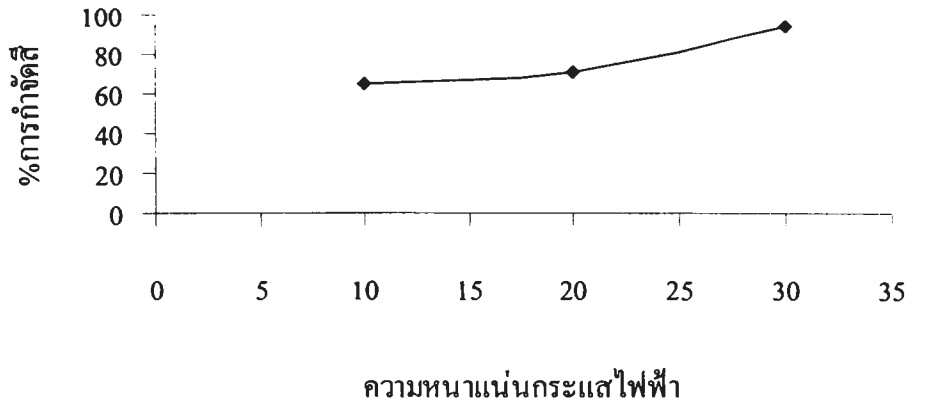
จากสมการที่ 4.1 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์พบว่า ค่าความเข้มข้นสีย้อม (C) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญกับการกำจัดสีมาก รองมาเป็นเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัย เป็นปัจจัยหลักที่มีความสำคัญ

พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีดีขึ้น ส่วนค่าความเข้มข้นของสีย้อม (C) ที่มีค่าติดลบนั้น หมายถึงว่าการกำจัดสีจะทำได้ง่ายขึ้น เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของสีย้อมต่ำ และอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) มีเครื่องหมายเป็นลบ หมายถึงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ ต้องใช้เวลาในการกำจัดสีนานขึ้น ส่วนอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A)และความเข้มข้นของสีย้อม (C) มีค่าเป็นบวก ต้องใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เช่นเดียวกับอันตรกิริยาระหว่าง เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) กับความเข้มข้นของสีย้อม (C) มีเครื่องหมายเป็นบวก เช่นกัน นั่นคือ ถ้าใช้เวลามากก็สามารถกำจัดสีที่ความเข้มข้นสูงๆได้เช่นกัน

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.4 สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A)

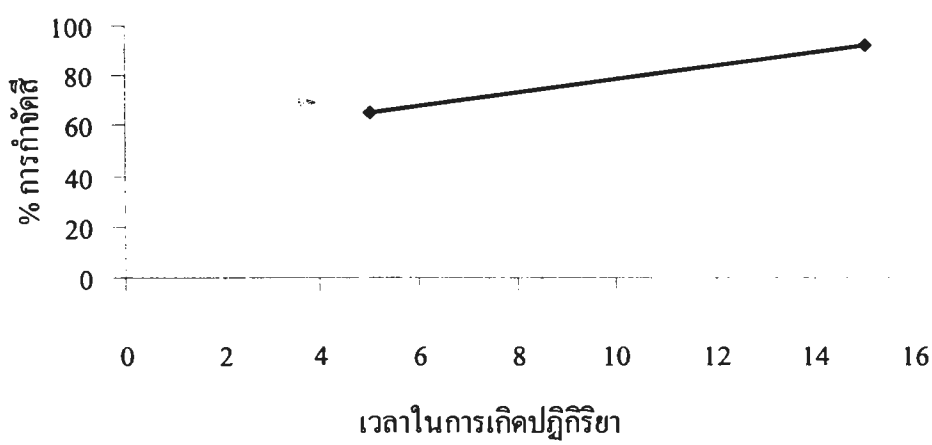
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.4 และจากสมการที่ 4.1 ทำให้ทราบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจากอิทธิพลของค่ากำลังสองของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A^2) ดังรูปที่ 4.6 จากกราฟ พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจาก 5 – 15mA/cm^2 ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีดีขึ้น จากร้อยละ 79.79 – 93.90 ตามลำดับ



รูปที่4.6 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

2. เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B)

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.4 และจากสมการที่ 4.1 ทำให้ทราบว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยา(B) มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตรงเนื่องจากไม่มีอิทธิพลค่ากำลังสองของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) ดังรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 5 - 15 นาที ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีดีขึ้น จากร้อยละ 65.30 – 91.71 ตามลำดับ

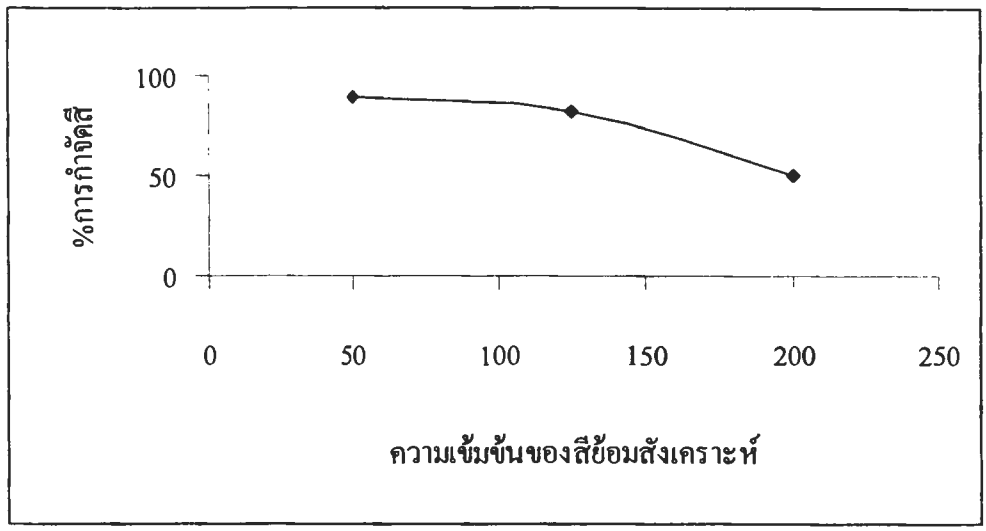


รูปที่ 4.7 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

3. ความเข้มข้นของสีย้อม (C)

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.4 และจากสมการที่ 4.1 ทำให้ทราบว่าความเข้มข้นของสีย้อม (C) มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจาก

อิทธิพลของค่ากำลังสองของความเข้มข้น (C^2) ดังรูป 4.8 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มจาก 50 เป็น 200 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลง จาก ร้อยละ 89.00 – 58.42 ตามลำดับ

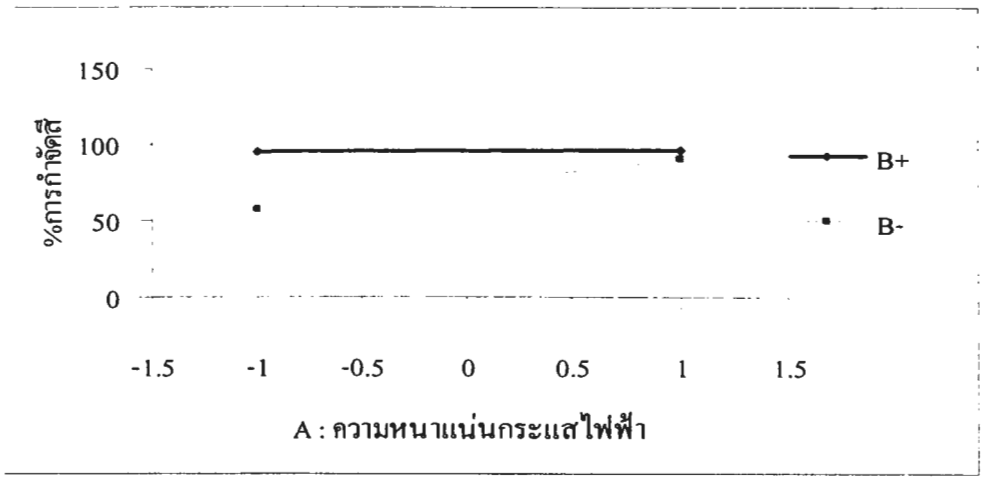


รูปที่ 4.8 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

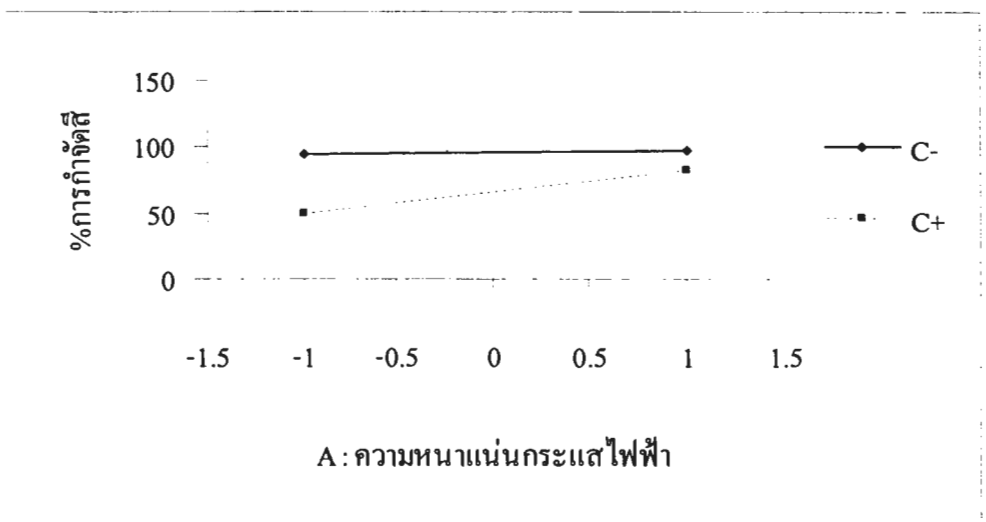
4. ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อการกำจัดสีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด

อิทธิพลร่วมระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสีย้อม จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนจากตารางที่ 4.4 ทำให้ทราบว่าอันตรกิริยา AB AC BC และ ABC มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีในสัดส่วนที่ไม่มากนักเมื่อเทียบกับอิทธิพลของปัจจัยหลัก แต่การอธิบายความสัมพันธ์ของอันตรกิริยา 3 ตัวแปรขึ้นไปมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงแสดงผลของอันตรกิริยาของ 2 ตัวแปรเท่านั้น ดังรูปที่ 4.9 - 4.11

จากรูปที่ 4.9 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) ที่มีต่อค่าการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด พบว่าที่เวลาในการทำปฏิกิริยามาก ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่ามาก ในทางตรงข้าม ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้มากขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น อาจเป็นเพราะที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีค่ามากทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตตัวตกตะกอนออกมาในปริมาณมากพอที่จะไปจับกับโมเลกุลของสีย้อมผ้า ทำให้เกิดการกำจัดสีได้ดีขึ้น

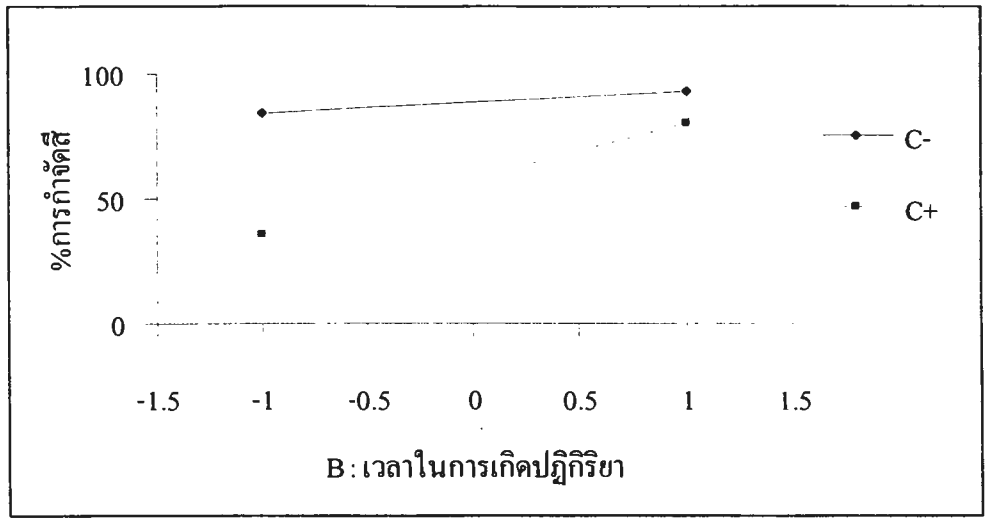


รูปที่ 4.9 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อค่าการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.10 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสีย้อมที่มีต่อค่าการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 4.10 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) กับความเข้มข้นของสีย้อม (C) ที่มีต่อค่าการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดี ก็ต่อเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของสีย้อมต่ำ แต่ถ้าความเข้มข้นของสีย้อมมีความเข้มข้นสูง การกำจัดสีจะสามารถเกิดขึ้นได้ดีก็ต่อเมื่อต้องเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเข้าไป จึงจะสามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดี



รูปที่ 4.11 ผลของอันตรกิริยาระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสีย้อมที่มีต่อค่าการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 4.11 ผลของอันตรกิริยาระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) กับความเข้มข้นของสีย้อม (C) ที่มีต่อค่าการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมที่ความเข้มข้นสูง จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และในทำนองเดียวกันความเข้มข้นของสีย้อมที่ความเข้มข้นต่ำ จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

4.2.2 การวิเคราะห์การลดค่าซีโอดีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือระดับความสำคัญเท่ากับ 0.05 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F - Value	P - Value
A	1079.093	1	1079.093	9.769379	0.0049
B	2560.277	1	2560.277	23.17903	< 0.0001
C	6430.262	1	6430.262	58.21527	< 0.0001
A^2	2674.166	1	2674.166	24.2101	< 0.0001
B^2	107.6088	1	107.6088	0.974218	0.3344
C^2	1197.348	1	1197.348	10.83998	0.0033
AB	1348.358	1	1348.358	12.20713	0.0021
AC	0.0441	1	0.0441	0.000399	0.9842
BC	234.09	1	234.09	2.119293	0.1596
ABC	90.25	1	90.25	0.817063	0.3758
Error	426.2317	18	23.67954		
Total	18473.56	32			

ทำการทดสอบสมมติฐาน โดยการทดสอบความเท่ากันของค่าสังเกต ดังนี้

$H_0 : \beta_i = 0$

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ $\beta_i \neq 0$

จากตารางที่ 4.7 สามารถสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่4.8 ผลการทดสอบสมมติฐานของตัวแปรในการลดค่าซีโอดี

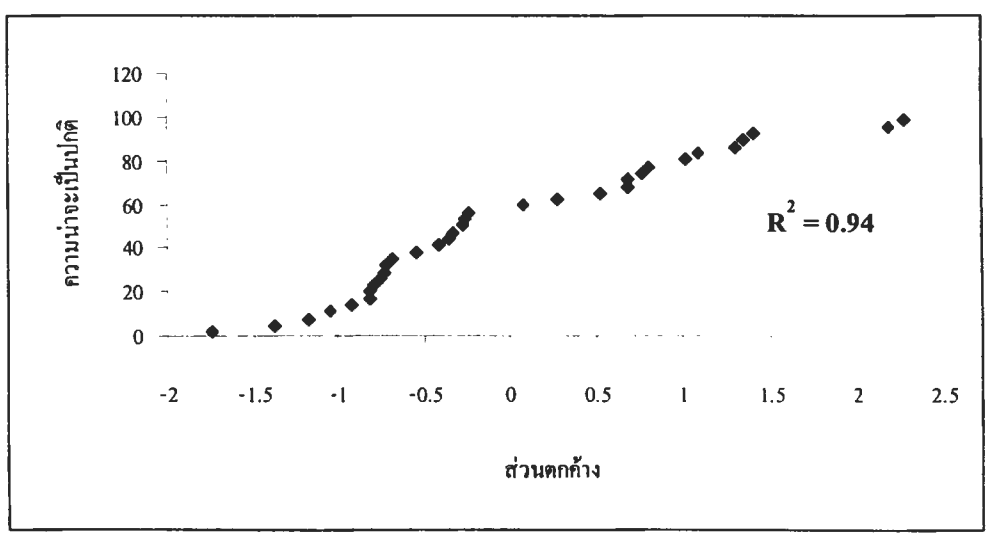
Source	F-value	$F_{0.05,\,1,\,18}$	การทดสอบสมมติฐาน	การทดสอบสมมติฐาน F-test
A	9.769379	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี
B	23.17903	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี
C	58.21527	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี
A^2	24.2101	4.41	ยอมรับ H_0	มีอิทธิพลจากส่วนโค้ง
B^2	0.974218	4.41	ยอมรับ H_0	ไม่มีอิทธิพลจากส่วนโค้ง
C^2	10.83998	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลจากส่วนโค้ง
AB	12.20713	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี
AC	0.000399	4.41	ยอมรับ H_0	ไม่มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี
BC	2.119293	4.41	ยอมรับ H_0	ไม่มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี
ABC	0.817063	4.41	ยอมรับ H_0	ไม่อิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี

จากผลการทดสอบสมมติฐาน ในตารางที่ 4.8 พบว่าตัวแปรที่มีค่า F_0 ต่ำกว่าค่าวิกฤติ คือ AC BC ABC และค่ากำลังสองของตัวแปร B จึงสามารถบอกได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อการลดค่าซีโอดี คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) และอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (A) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดค่าซีโอดีโดยขั้วอะลูมิเนียมตามตารางที่ 4.9

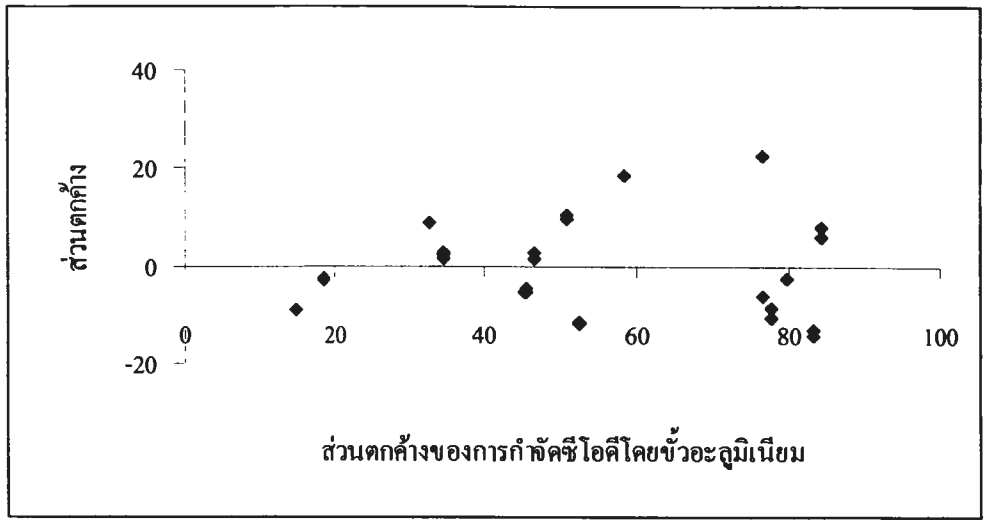
ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของการลดค่าซีโอดีโดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม

Factor	Coefficient Estimate
Intercept	34.69
A	6.29
B	9.682
C	-15.34
A^2	12.15
C^2	-8.4
AB	-9.18

นำผลการทดลองมาตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องโดยการตรวจสอบการกระจายแบบปกติ ด้วยกราฟความน่าจะเป็นปกติ ดังรูปที่ 4.12 พบว่าค่าของส่วนตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ คือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.94 และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.13 การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีค่าคงที่และไม่มีรูปแบบที่แน่นอน



รูปที่ 4.12 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.13 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของลดค่าซีโอดีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด

จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในสมการที่ 4.2 สามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

$$\%COD = 34.69+6.29x_A+9.682x_B-15.34x_C+12.154x_A^2-8.40x_C^2-9.18x_Ax_B \qquad (4.2)$$

โดยที่ x คือ ค่าของตัวแปรที่เข้ารหัส

จากสมการที่ 4.2 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์พบว่า ค่าความเข้มข้นของสีย้อม(C) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญกับการลดค่าซีโอดี รองมาเป็นเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัย เป็นปัจจัยหลักที่มีความสำคัญ

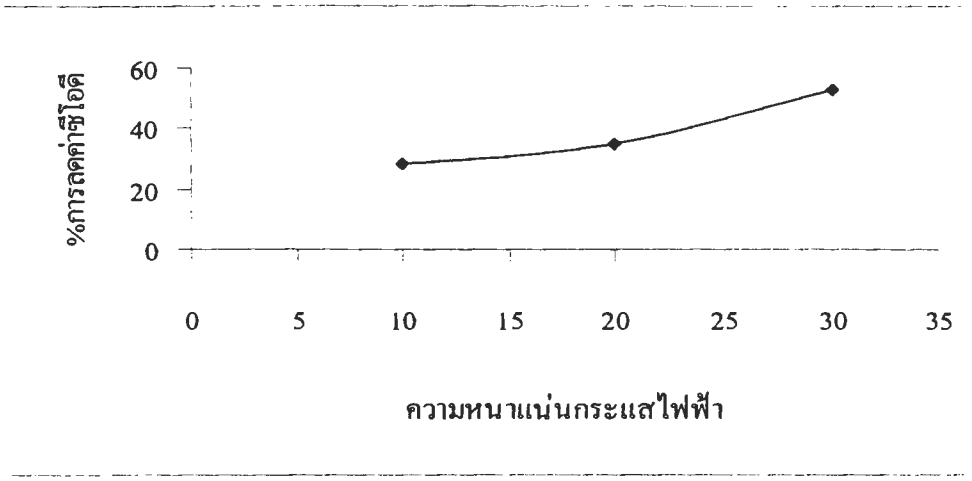
พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) ทำให้ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีดีขึ้น ส่วนค่าความเข้มข้นของสีย้อม (C) ที่มีค่าติดลบนั้น หมายถึงว่าการลดค่าซีโอดีจะทำได้ง่ายขึ้น เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของสีย้อมต่ำ และอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) มีเครื่องหมายเป็นลบ หมายถึงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ ต้องใช้เวลามากขึ้นจึงจะสามารถลดค่าซีโอดีได้ดีขึ้น หรือในทางกลับกัน เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อย ต้องใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้น

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.7 สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A)

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.7 และจากสมการที่ 4.2 ทำให้ทราบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) มีผลต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจาก

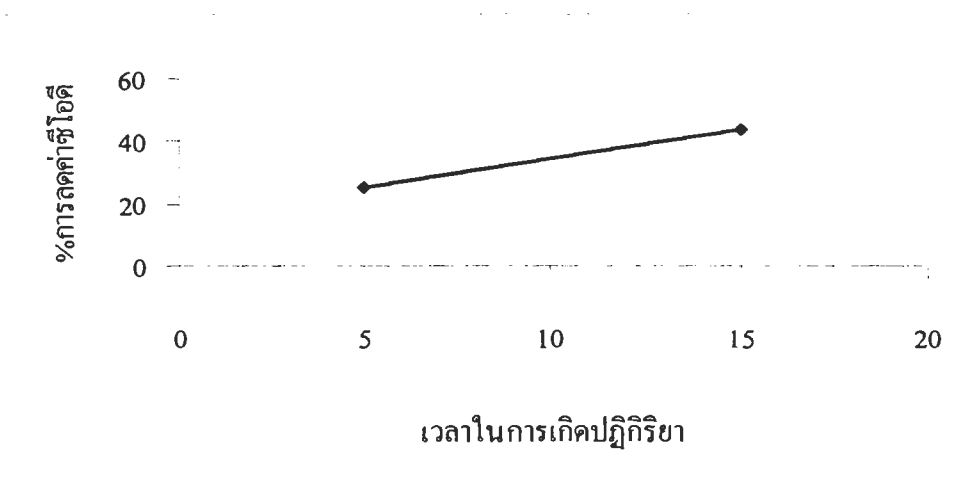
อิทธิพลของค่ากำลังสองของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A^2) ดังรูปที่ 4.14 จากกราฟ พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจาก 5 – 15 mA/cm^2 ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีขึ้นจากร้อยละ 40.56 – 53.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด

2. เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B)

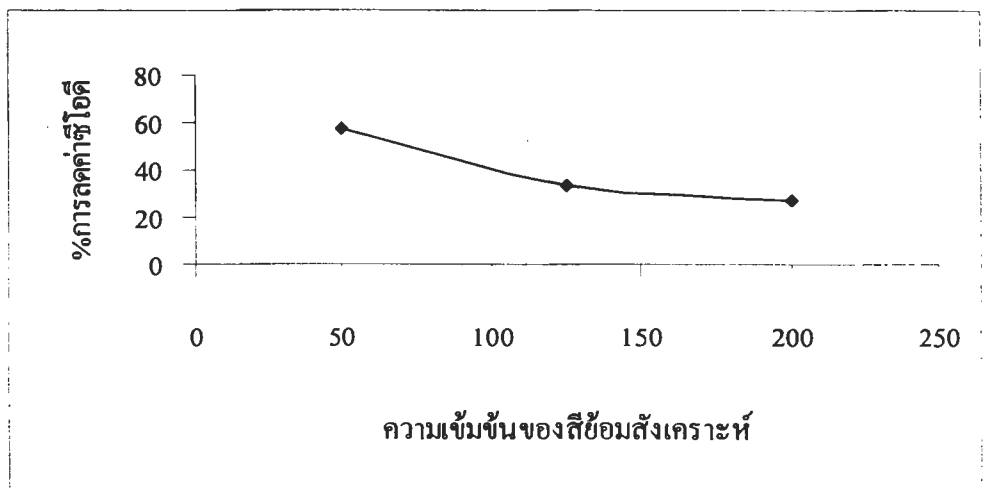
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.7 และจากสมการที่ 4.2 ทำให้ทราบว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) มีผลต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตรง เนื่องจากไม่มีอิทธิพลของค่ากำลังสองของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B^2) ดังรูป 4.15 พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดจาก 5 - 15นาที ทำให้ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีขึ้น จากร้อยละ 25.00 – 44.37 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดี เมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด

3. ความเข้มข้นของสีย้อม (C)

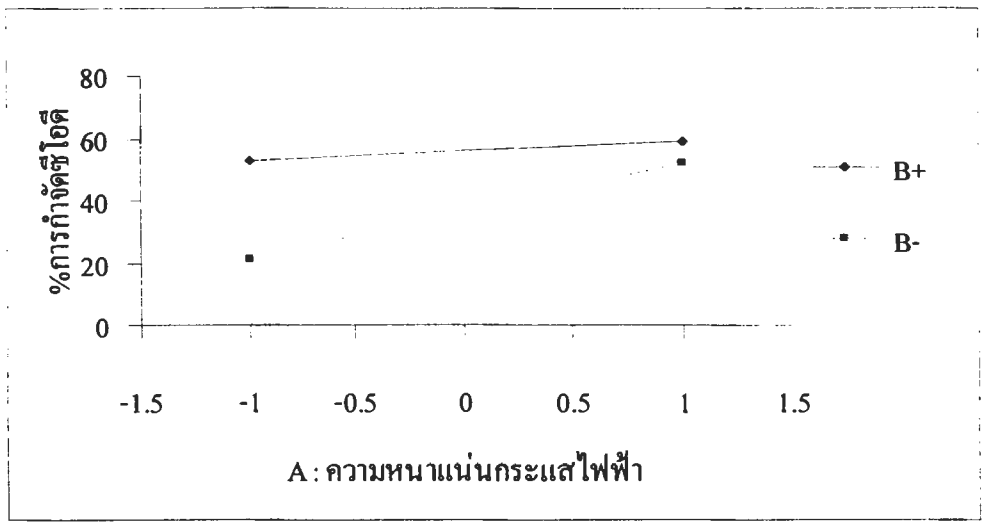
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.7 และจากสมการที่ 4.2 ทำให้ทราบว่าความเข้มข้นของสีย้อม (C) มีผลต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีที่ลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจากอิทธิพลของค่ากำลังสองของความเข้มข้นสีย้อม (C^2) ดังรูป 4.16 พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มจาก 50 เป็น 200 mg/L ทำให้ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีลดลง จากร้อยละ 58.43 – 27.75 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมที่มีต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดี เมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด

4. ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด

อิทธิพลร่วมระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสีย้อม จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนจากตารางที่ 4.9 ทำให้ทราบว่าอันตรกิริยามีเฉพาะ AB ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดี ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 4.17 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า(A) กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา(B) ที่มีต่อค่าการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด พบว่าที่เวลาในการทำปฏิกิริยามาก ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่ามาก ในทางตรงข้าม ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยจะให้ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีค่ามากทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตตัวตกตะกอนออกมาในปริมาณมากพอที่จะไปจับกับโมเลกุลของสีย้อมผ้า ทำให้เกิดการลดค่าซีโอดีได้ดีขึ้น เหมือนกับการกำจัดสี

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองของขั้วเหล็กจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล2^k

การทดลอง	A	B	C	ค่าเฉลี่ยของการกำจัดสี	S.D.	ค่าเฉลี่ยของการลดค่าซีโอดี	S.D.
1	-	-	-	12.79	0.11	16.96	0.41
a	+	-	-	88.99	0.24	33.33	0.00
b	-	+	-	56.19	0.64	33.46	0.18
ab	+	+	-	96.88	0.16	66.67	0.00
c	-	-	+	9.04	0.40	10.55	0.78
ac	+	-	+	18.39	0.35	5.90	0.49
bc	-	+	+	28.00	0.21	21.14	0.63
abc	+	+	+	95.36	0.28	55.90	0.49
Axial	-1.414	0	0	20.93	0.54	31.61	1.53
Axial	+1.414	0	0	96.37	0.37	60.15	1.97
Axial	0	-1.414	0	27.00	0.59	16.13	1.06
Axial	0	+1.414	0	87.93	0.45	45.59	0.79
Axial	0	0	-1.414	71.13	0.42	75.70	1.73
Axial	0	0	+1.414	6.96	0.23	7.20	0.55
center	0	0	0	25.38	0.20	19.67	0.35
center	0	0	0				
center	0	0	0				
center	0	0	0				
center	0	0	0				

4.2.3 การวิเคราะห์การกำจัดสีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการกำจัดสีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือระดับความสำคัญเท่ากับ 0.05 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการกำจัดสีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F - Value	P - Value
A	15174.37	1	15174.37	602.538	< 0.0001
B	9090.336	1	9090.336	360.9556	< 0.0001
C	2715.732	1	2715.732	107.8353	< 0.0001
A^2	3460.858	1	3460.858	137.4224	< 0.0001
B^2	3289.205	1	3289.205	130.6065	< 0.0001
C^2	70.85958	1	70.85958	2.813666	0.1076
AB	132.6528	1	132.6528	5.267328	0.0316
AC	393.7248	1	393.7248	15.63388	0.0007
BC	509.0664	1	509.0664	20.21382	0.0002
ABC	2211.116	1	2211.116	87.79814	< 0.0001
Error	6.72323	18	0.373513		
Total	37603.94	32			

ทำการทดสอบสมมติฐาน โดยการทดสอบความเท่ากันของค่าสังเกต ดังนี้

$H_0 : \beta_i = 0$

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ $\beta_i \neq 0$

จากตารางที่ 4.11 สามารถสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบสมมติฐานของการกำจัดสีเมื่อใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรด

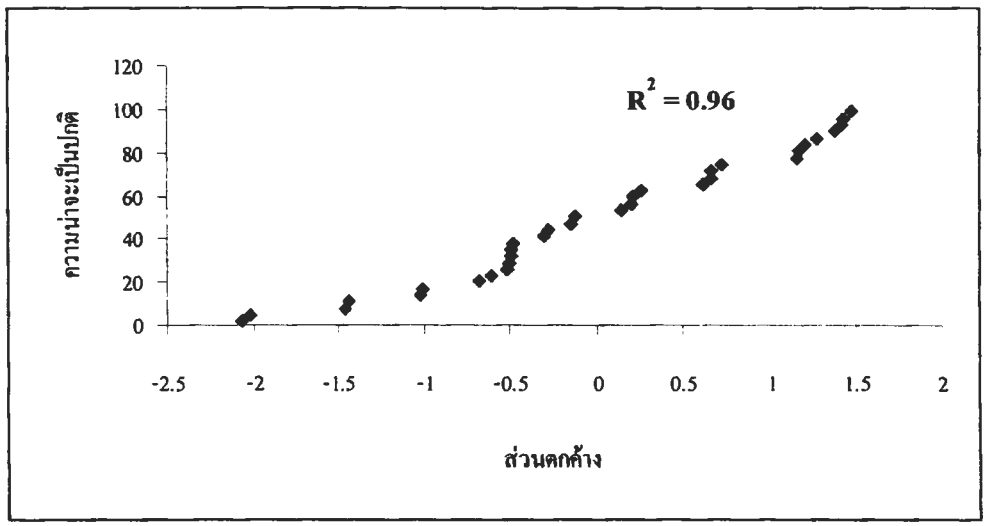
Source	F-value	$F_{0.05,\,1,\,18}$	การทดสอบสมมติฐาน	การทดสอบสมมติฐาน F-test
A	602.538	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี
B	360.9556	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี
C	107.8353	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี
A^2	137.4224	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลของส่วนโค้ง
B^2	130.6065	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลของส่วนโค้ง
C^2	2.813666	4.41	ยอมรับ H_0	ไม่มีอิทธิพลของส่วนโค้ง
AB	5.267328	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี
AC	15.63388	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี
BC	20.21382	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี
ABC	87.79814	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการกำจัดสี

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.12 พบว่าตัวแปรที่มีค่า F_0 ต่ำกว่าค่าวิกฤติ คือ ค่ากำลังสองของตัวแปร C จึงสามารถบอกได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดสีคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) ความเข้มข้นของสีย้อม (C) และมีอันตรกิริยาทั้งหมดของตัวแปร จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการกำจัดสีโดยขั้วเหล็กตามตารางที่ 4.13

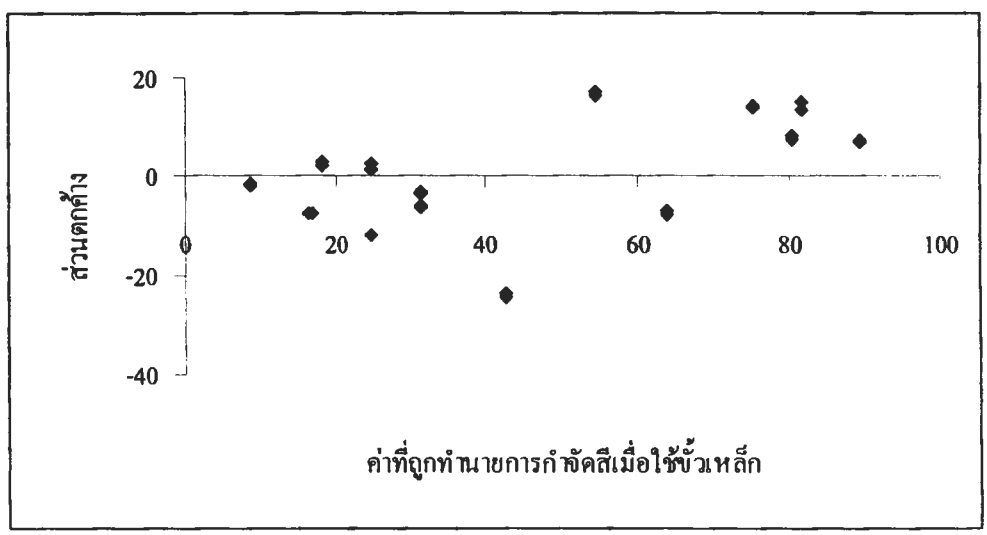
ตารางที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของการกำจัดสีโดยใช้ขั้วเหล็ก

Factor	Coefficient Estimate
Intercept	22.35
A	23.57
B	18.24
C	-9.97
A^2	13.57
B^2	13.24
AB	2.88
AC	-4.96
BC	5.64
ABC	11.76

จากนั้นนำมาตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องโดยการตรวจสอบการกระจายแบบปกติ ด้วยกราฟความน่าจะเป็นปกติ ดังรูปที่ 4.18 พบว่าค่าของส่วนตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.96 และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.19 ค่าของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ และมีการกระจายตัวไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอน



รูปที่ 4.18 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการกำจัดสีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.19 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของการกำจัดสีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด

จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในสมการที่ 4.3 สามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

$$\%\text{color removal} = 22.35 + 23.57x_A + 18.24x_B - 9.97x_C + 13.57x_A^2 + 13.24x_B^2 + 2.88x_Ax_B - 4.96x_Ax_C + 5.64x_Bx_C + 11.76x_Ax_Bx_C \quad (4.3)$$

โดยที่ x คือ ค่าของตัวแปรที่เข้ารหัส

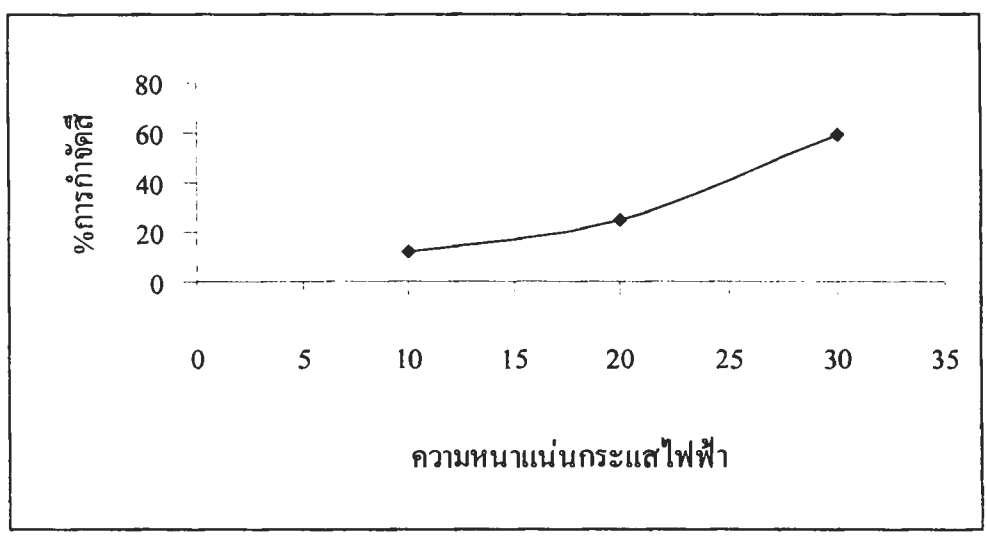
จากสมการที่ 4.3 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์พบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญกับการกำจัดสีมาก รองมาเป็นเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) และค่าความเข้มข้นของสีย้อม (C) ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัย เป็นปัจจัยหลักที่มีความสำคัญ

พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีดีขึ้น ส่วนค่าความเข้มข้นของสีย้อม (C) ที่มีค่าติดลบนั้น หมายถึงว่าการกำจัดสีจะทำได้ง่ายขึ้น เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของสีย้อมต่ำ และอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) มีเครื่องหมายเป็นบวก หมายถึง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง และ ต้องใช้ระยะเวลามากจึงทำให้การกำจัดสีมีประสิทธิภาพ ส่วนอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) และความเข้มข้นของสีย้อม (C) มีค่าเป็นลบ ต้องใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ และอันตรกิริยาระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) กับความเข้มข้นของสีย้อม (C) มีเครื่องหมายเป็นบวก เช่นกัน นั่นคือ ถ้าใช้เวลามากก็สามารถกำจัดสีที่ความเข้มข้นสูงๆได้

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.11 สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A)

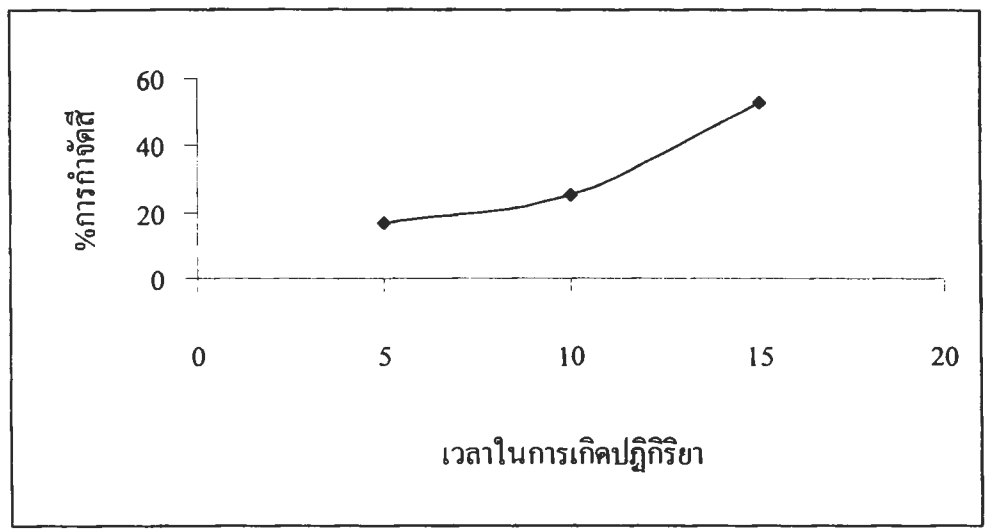
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.11 และสมการที่ 4.3 ทำให้ทราบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจากอิทธิพลของค่ากำลังสองของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A^2) ดังรูปที่ 4.20 จากกราฟ พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจาก 5 – 15 mA/cm^2 ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีดีขึ้น จากร้อยละ 19.79 – 58.90 ตามลำดับ



รูปที่4.20 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วเหล็ก

2. เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B)

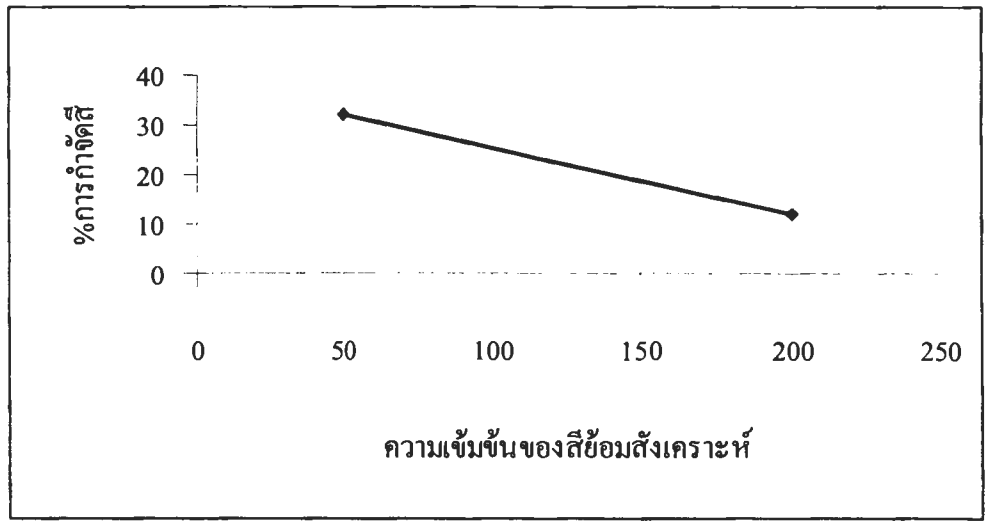
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.11 และจากสมการที่ 4.3 ทำให้ทราบว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจากอิทธิพลของค่ากำลังสองของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B^2) ดังรูปที่ 4.21 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 5 - 15 นาที ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีดีขึ้น จากร้อยละ 25.30 – 51.71 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีเมื่อใช้ขี้วเหล็ก

3. ความเข้มข้นของสีย้อม (C)

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.11 และจากสมการที่ 4.3 ทำให้ทราบว่าความเข้มข้นของสีย้อมสังเคราะห์ (C) มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ลดลงแบบเป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจากไม่อิทธิพลของค่ากำลังสองของความเข้มข้นสีย้อม (C^2) ดังรูป 4.22 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมสังเคราะห์เพิ่มจาก 50 เป็น 200 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลง จากร้อยละ 38.00 – 10.42 ตามลำดับ

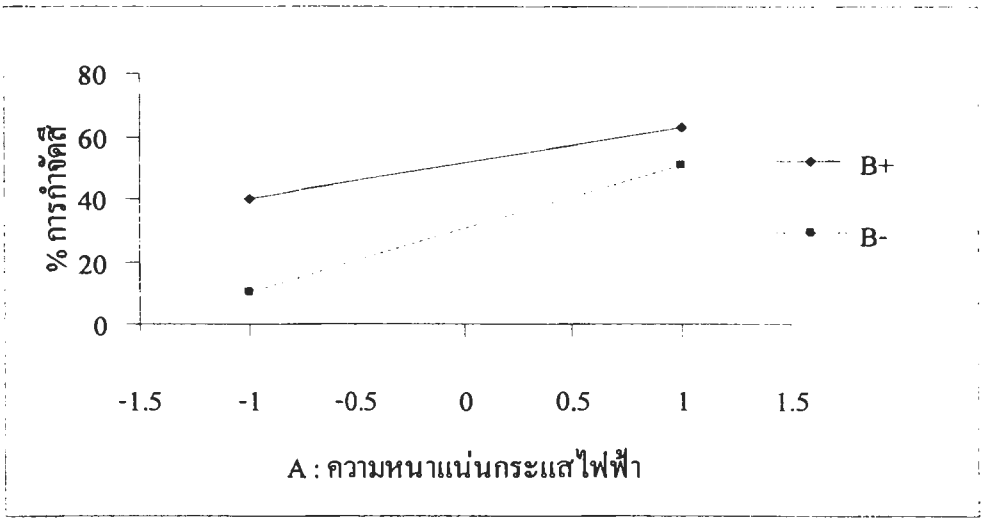


รูปที่ 4.22 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

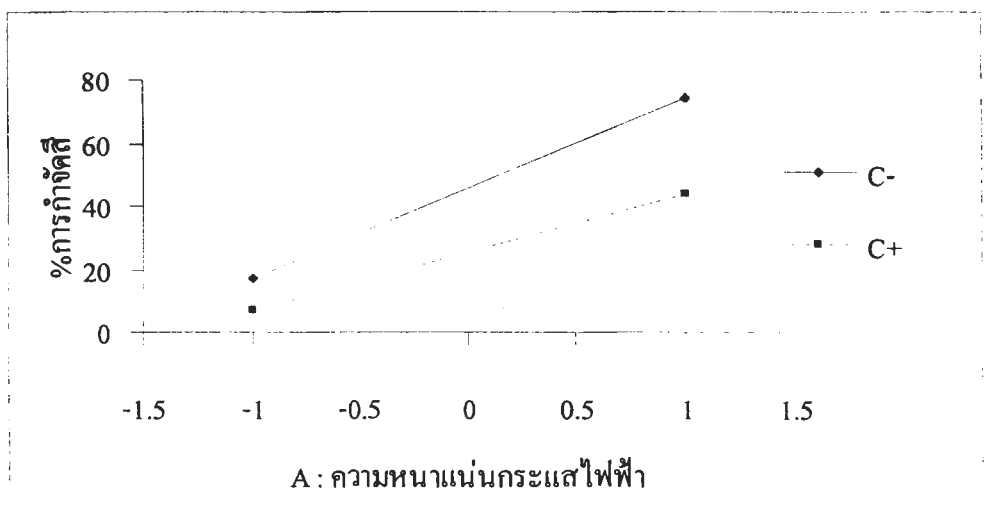
4. ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อการกำจัดสีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด

อิทธิพลร่วมระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และ ความเข้มข้นของสีย้อม จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนจากตารางที่ 4.11 ทำให้ทราบว่าอันตรกิริยา AB AC BC และ ABC มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ซึ่งมีค่าไม่มากนักเมื่อเทียบกับอิทธิพลของปัจจัยหลัก แต่การอธิบายความสัมพันธ์ของอันตรกิริยา 3 ตัวแปรขึ้นไปมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงแสดงผลของอันตรกิริยาของ 2 ตัวแปรเท่านั้น ดังรูปที่ 4.23 - 4.26

จากรูปที่ 4.23 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อค่าการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรด พบว่าที่เวลาในการทำปฏิกิริยามากประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่ามาก ในทางตรงข้าม ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้มากขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น อาจเป็นเพราะที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีค่ามากทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตตัวตกตะกอนออกมาในปริมาณมากพอที่จะไปจับกับโมเลกุลของสีย้อมผ้า ทำให้เกิดการกำจัดสีได้ดีขึ้น

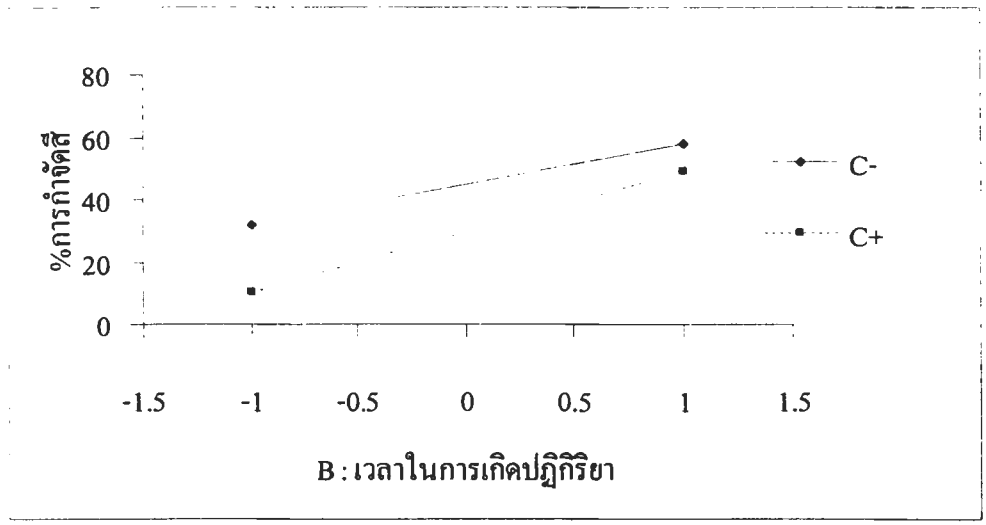


รูปที่ 4.23 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อค่าการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วเหล็กปีนอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.24 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสีย้อมที่มีต่อค่าการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 4.24 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสีย้อมที่มีต่อค่าการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรด พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดี ก็ต่อเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของสีย้อมต่ำ แต่ถ้าความเข้มข้นของสีย้อมมีความเข้มข้นสูงการกำจัดสีจะสามารถเกิดขึ้นได้ดีก็ต่อเมื่อต้องเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเข้าไป จึงจะสามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดี



รูปที่ 4.25 ผลของอันตรกิริยาระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสีย้อมที่มีต่อค่าการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 4.25 ผลของอันตรกิริยาระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสีย้อมที่มีต่อค่าการกำจัดสีเมื่อใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรด พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมที่ความเข้มข้นสูง จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และในทำนองเดียวกันความเข้มข้นของสีย้อมที่ความเข้มข้นต่ำ จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเช่นกัน

4.2.4 การวิเคราะห์การกำจัดซีโอดีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือระดับความสำคัญเท่ากับ 0.05 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F - Value	P - Value
A	930.0086	1	930.0086	5.606881	0.0271
B	3893.886	1	3893.886	23.47565	< 0.0001
C	4477.023	1	4477.023	26.9913	< 0.0001
A^2	2608.765	1	2608.765	15.72785	0.0007
B^2	3.894519	1	3.894519	0.023479	0.8796
C^2	382.8352	1	382.8352	2.308056	0.1429
AB	791.0156	1	791.0156	4.768913	0.0399
AC	94.77022	1	94.77022	0.571355	0.4577
BC	28.89063	1	28.89063	0.174177	0.6805
ABC	127.3512	1	127.3512	0.767781	0.3904
Error	2.7481	18	0.152672		
Total	16933.29	32			

ทำการทดสอบสมมติฐาน โดยการทดสอบความเท่ากันของค่าสังเกต ดังนี้

$H_0 : \beta_i = 0$

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ $\beta_i \neq 0$

จากตารางที่ 4.14 สามารถสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ได้ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่4.15 ผลการทดสอบสมมติฐานของตัวแปรในการลดค่าซีโอดี

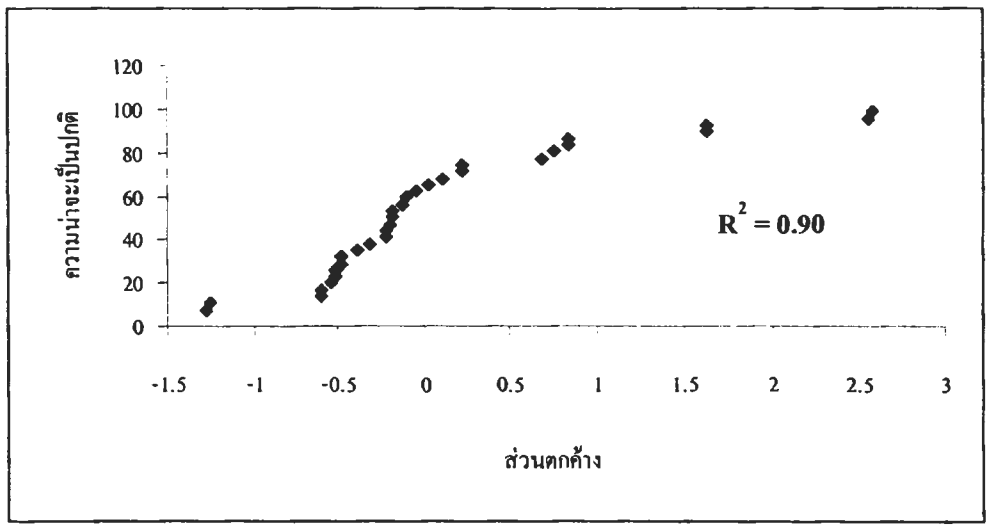
Source	F-value	$F_{0.05,\,1,\,18}$	การทดสอบสมมติฐาน	การทดสอบสมมติฐาน F-test
A	5.606881	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี
B	23.47565	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี
C	26.9913	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี
A^2	15.72785	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลของส่วนโค้ง
B^2	0.023479	4.41	ยอมรับ H_0	ไม่มีอิทธิพลของส่วนโค้ง
C^2	2.308056	4.41	ยอมรับ H_0	ไม่มีอิทธิพลของส่วนโค้ง
AB	4.768913	4.41	ปฏิเสธ H_0	มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี
AC	0.571355	4.41	ยอมรับ H_0	ไม่มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี
BC	0.174177	4.41	ยอมรับ H_0	ไม่มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี
ABC	0.767781	4.41	ยอมรับ H_0	ไม่มีอิทธิพลต่อการลดค่าซีโอดี

จากผลการทดสอบสมมติฐานในตารางที่ 4.15 พบว่าตัวแปรที่มีค่า F_0 ต่ำกว่าค่าวิกฤติ คือ ค่ากำลังสองของตัวแปร B และ C จึงสามารถบอกได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดสีคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) ความเข้มข้นสีย้อม (C) และมีอันตรกิริยาทั้งหมดของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (AB) แปร จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรดตามตารางที่ 4.16

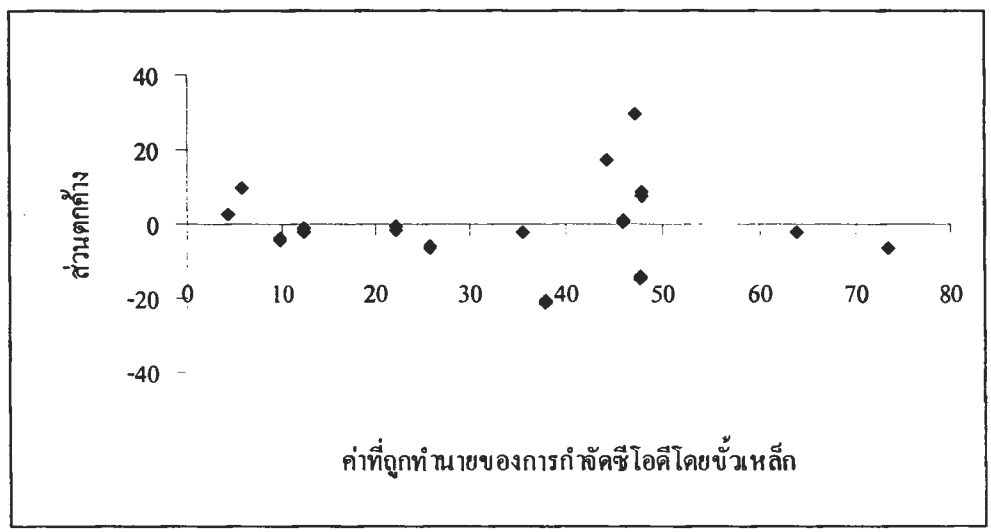
ตารางที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของการลดค่าซีโอดีโดยใช้ขั้วเหล็ก

Factor	Coefficient Estimate
Intercept	25.87
A	5.84
B	11.94
C	-12.8
A^2	9.98
AB	7.03

จากนั้นนำมาตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องโดยการตรวจสอบการกระจายแบบปกติ ด้วยกราฟความน่าจะเป็นปกติ ดังรูปที่ 4.26 พบว่าค่าของส่วนตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.90 และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดี มีค่าคงที่ และมีการกระจายตัวไม่มีรูปแบบที่แน่นอน



รูปที่ 4.26 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการกำจัดซีโอดีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.27 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายการกำจัดซีโอดีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 4.4

$$\%COD = 25.87 + 5.84x_A + 11.94x_B - 12.8x_C + 9.98x_A^2 + 7.03x_{AB} \qquad (4.4)$$

โดยที่ x คือ ค่าของตัวแปรที่เข้ารหัส

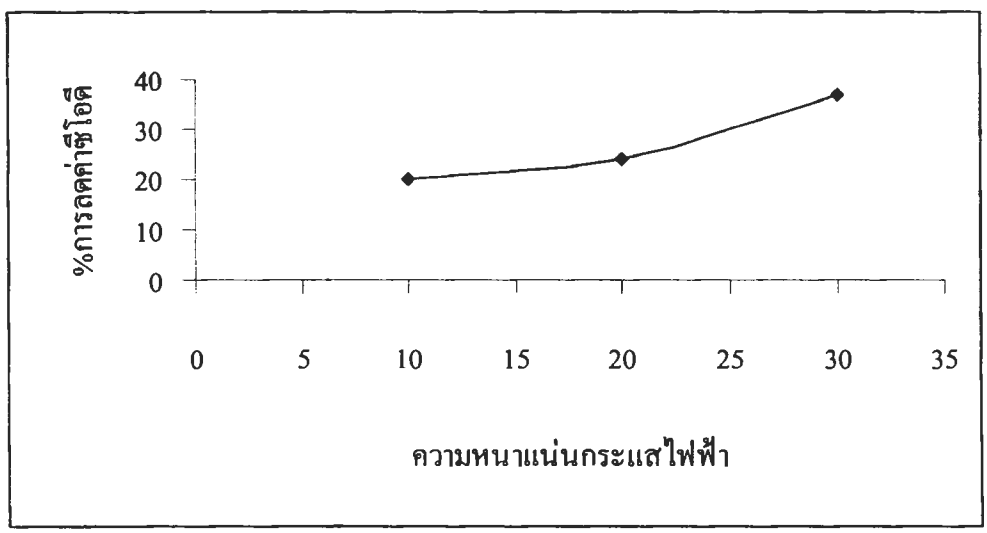
จากสมการที่ 4.4 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์พบว่า ค่าความเข้มข้นของสีย้อม (C) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญกับการลดค่าซีโอดีมาก รองมาเป็นเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัย เป็นปัจจัยหลักที่มีความสำคัญ

พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) ทำให้ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีดีขึ้น ส่วนค่าความเข้มข้นของสีย้อม (C) ที่มีค่าติดลบนั้น หมายถึงว่าการลดค่าซีโอดีจะทำได้ง่ายขึ้น เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของสีย้อมต่ำ และ อันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B) มีเครื่องหมายเป็นบวก หมายถึงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามาก ต้องใช้เวลาในการกำจัดสีนานขึ้น

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.14 สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A)

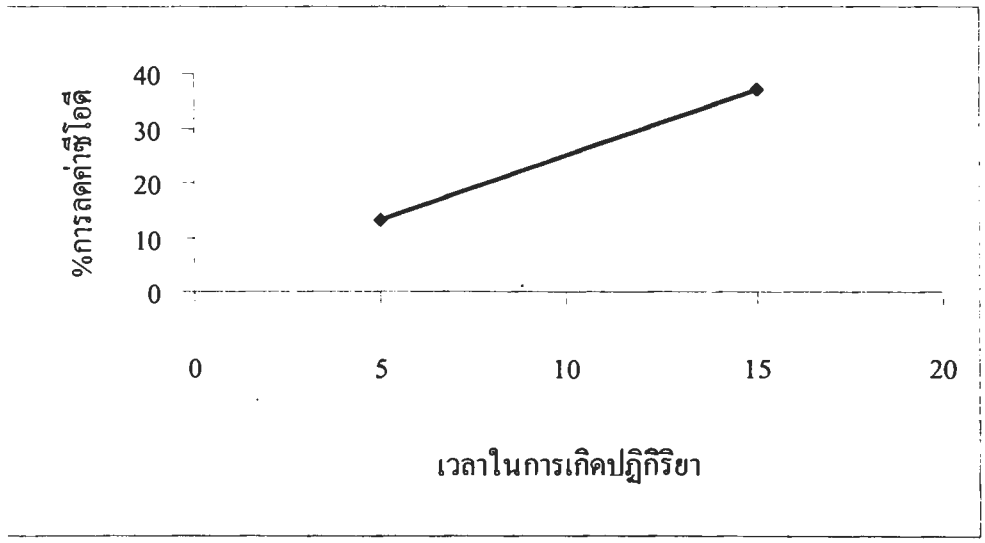
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.14 และจากสมการที่ 4.4 ทำให้ทราบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) มีผลต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจากอิทธิพลของค่ากำลังสองของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A^2) ดังรูปที่ 4.28 จากกราฟ พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจาก 5 – 15 mA/cm^2 ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีดีขึ้น จากร้อยละ 20.79 – 37.90 ตามลำดับ



รูปที่4.28 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้ขั้วเหล็ก

2. เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B)

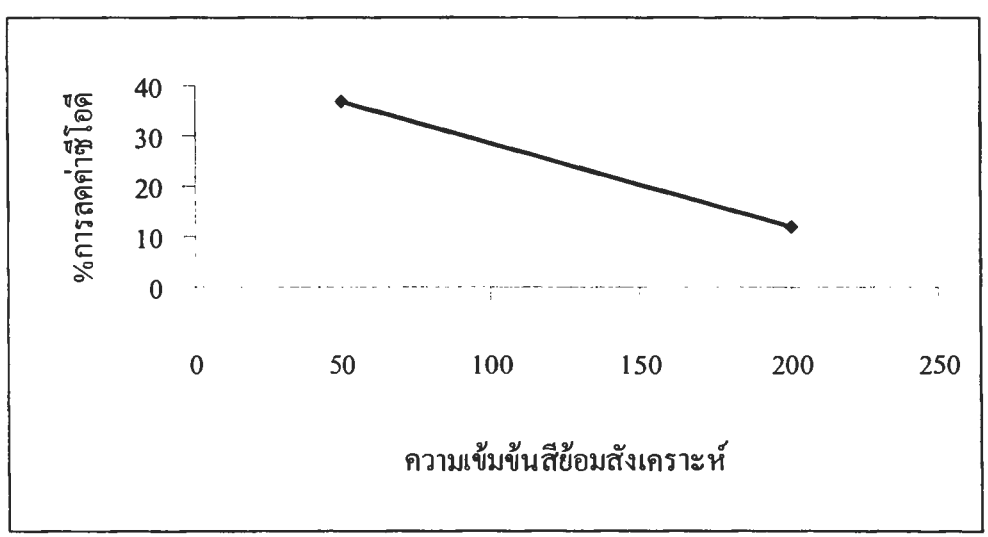
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.15 และจากสมการที่ 4.4 ทำให้ทราบว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยา(B) มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจาก ไม่มีอิทธิพลของค่ากำลังสองของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (B^2) ดังรูปที่ 4.29 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 5 - 15 นาที ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีดีขึ้น จากร้อยละ 37.30 – 13.71 ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้ขั้วเหล็ก

3. ความเข้มข้นของสีย้อม (C)

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.14 และจากสมการที่ 4.4 ทำให้ทราบว่าความเข้มข้นของสีย้อม (C) มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ลดลงแบบเป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจากไม่มีอิทธิพลของค่ากำลังสองของความเข้มข้นสีย้อม (C^2) ดังรูป 4.30 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มจาก 50 เป็น 200 mg/L ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลง จากร้อยละ 37.00 – 12.42 ตามลำดับ

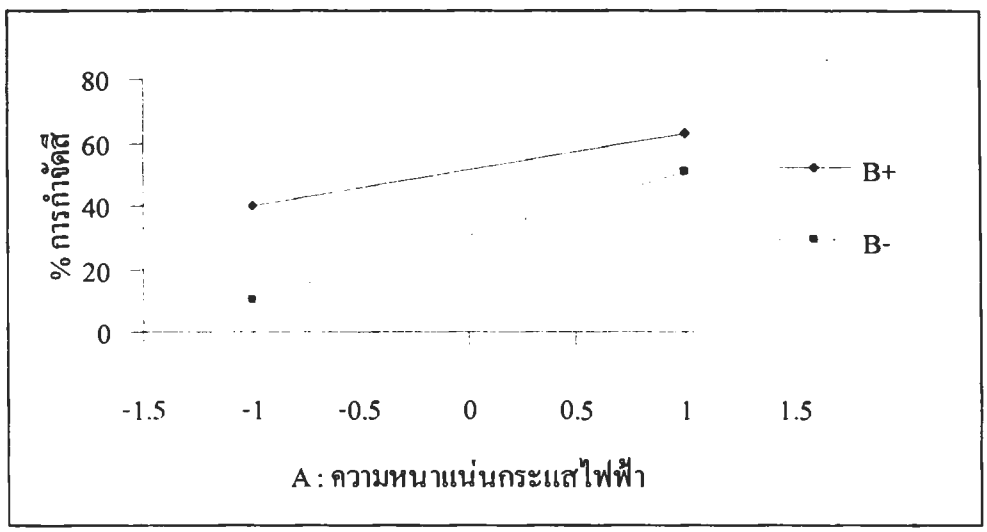


รูปที่ 4.30 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

4. ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด

อิทธิพลร่วมระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสีย้อมจากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนจากตารางที่ 4.14 ทำให้ทราบว่าอันตรกิริยา AB

จากรูปที่ 4.31 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อค่าการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรด พบว่าที่เวลาในการทำปฏิกิริยามาก ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่ามาก ในทางตรงข้าม ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยให้ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีได้มากขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น อาจเป็นเพราะที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีค่ามากทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตตัวตกตะกอนออกมาในปริมาณมากพอที่จะไปจับกับโมเลกุลของสีย้อมผ้า ทำให้เกิดการลดค่าซีโอดีได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.31 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อค่าการลดค่าซีโอดีเมื่อใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรด

4.3 อิทธิพลของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยจากการใช้ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด

จากหัวข้อที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากผลการทดลอง นำมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน และเมื่อนำมาตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องของแบบจำลองแล้ว พบว่ามีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลที่เลือกใช้ในทุกการทดลอง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ซึ่งมีความสำคัญกับแบบจำลอง เนื่องจากว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับค่าของตัวแปรตอบสนอง (y) ต่อหนึ่งหน่วยการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้น (x_i) เมื่อตัวแปรต้นที่เหลือทั้งหมด (x_j) มีค่าคงตัว

4.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของการกำจัดสีโดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก

จากผลการทดลองของการกำจัดสีโดยการใช้ขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็กเมื่อนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับแบบจำลองจะได้ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของการกำจัดสีโดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก

Factor	Coefficient Estimate of aluminum electrode	Coefficient Estimate of iron electrode
Intercept	78.51	22.35
A	7.06	23.57
B	13.2	18.24
C	-15.29	-9.97
A^2	8.34	13.57
B^2	-	13.24
C^2	-4.79	-
AB	-9.52	2.88
AC	9.68	-4.96
BC	8.46	5.64
ABC	-7.26	11.76

ค่าจุดตัดแกน (intercept) เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด 33 จากการทดลอง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของขั้วอะลูมิเนียม คือ 78.51 และของขั้วเหล็ก คือ 22.35 จากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยในตารางที่ 4.16 การใช้อะลูมิเนียม และขั้วเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ค่าของปัจจัยหลักมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีมากกว่าผลจากการเกิดอันตรกิริยา

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสีโดย การใช้ขั้วเหล็ก คือ ปัจจัยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา แต่พบว่าปัจจัยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมากกว่า ซึ่งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็นตัวกำหนดอัตราการสร้างตัวตกตะกอน และยังเป็นตัวกำหนดการเติบโตของการรวมอนุภาคสีย้อมกับตัวตกตะกอนให้เป็นกลุ่มก้อน (floc) อีกทั้งจากสมการของฟาราเดย์

$$W = \frac{MIT}{ZF}$$

จะเห็นได้ว่าการสร้างไอออนสำหรับการตกตะกอนมีความสมสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา พบว่า ที่กระแสไฟฟ้า และเวลาเท่ากัน การผลิตตัวตกตะกอนของ

เหล็กจะเกิดได้มากกว่าอะลูมิเนียม เนื่องจากเหล็กมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าอะลูมิเนียม เช่นที่กระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ เวลา 60 นาที ขั้วเหล็กจะผลิตไอออนได้ถึง 0.347 กรัม ในขณะที่กระแสไฟฟ้า และเวลาดังกล่าว อะลูมิเนียมจะผลิตไอออนได้เพียง 0.167 กรัม ดังนั้นในช่วงการทดลองที่เลือกนั้น ตัวตกตะกอนของเหล็กมีปริมาณมากพอกับจำนวนโมเลกุลของสีย้อม ในขณะที่การผลิตตัวตกตะกอนของอะลูมิเนียมที่ภาวะเดียวกันจะมีปริมาณน้อยกว่าจึงทำให้การกำจัดสีด้วยอะลูมิเนียมขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสีย้อม เพราะตัวตกตะกอนที่ผลิตนั้นไม่เพียงพอกับโมเลกุลของสีย้อม และจากตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของขั้วอะลูมิเนียมจะปัจจัยของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาอีกด้วย เนื่องจากเวลาเป็นตัวกำหนดอัตราการสร้างไอออนจากขั้วไฟฟ้าเช่นกัน ดังนั้น ถ้าเวลาในการเกิดปฏิกิริยามาก การสร้างอะลูมิเนียมไอออน และไฮดรอกไซด์เกิดได้มากพอที่จะจับโมเลกุลสีย้อม จะเห็นได้ว่าจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของขั้วอะลูมิเนียม ปัจจัยที่มีผลมาก คือ ปัจจัยของความเข้มข้นสีย้อมที่ระดับต่ำ (-) เพราะเมื่อแทนค่าเข้ารหัส (coded) ที่ระดับต่ำ (-) จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ดีมาก และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า มีอิทธิพลต่อการกำจัดสีน้อยเมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียม

4.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของการลดค่าซีโอดีโดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก

จากผลการทดลองของการกำจัดสีโดยการใช้ขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็กเมื่อนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับแบบจำลองจะได้ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของการลดค่าซีโอดีโดยใช้ขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก

Factor	Coefficient Estimate of aluminum electrode	Coefficient Estimate of iron electrode
Intercept	34.69	25.87
A	6.29	5.84
B	9.68	11.94
C	-15.34	-12.8
A^2	12.15	9.98
C^2	-8.4	-
AB	-9.18	7.03

จากตารางแสดงค่าสัมประสิทธ์การถดถอย พบว่าทั้งขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก มีปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีเหมือนกัน นั่นคือ ปัจจัยของความเข้มข้นสีย้อม และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา แต่เนื่องจากการลดค่าซีโอดีด้วยขั้วเหล็ก เนื่องจากมีไอออนของเหล็กเกิดขึ้น และอาจมีปัจจัยอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้การวิเคราะห์อาจเกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้น

จึงพิจารณา เฉพาะสัมประสิทธิ์การถดถอยของขั้วอะลูมิเนียม ซึ่งปัจจัยของความเข้มข้นสีย้อม และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา เข้ามามีอิทธิพลมาก เนื่องจาก เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น จะมีเวลามากพอให้การสร้างไอออนของตัวตกตะกอนทั้งที่เกิดจากขั้วบวก และขั้วลบ จึงทำให้ตัวตกตะกอนมีปริมาณมากพอที่จะรวมตัวกับโมเลกุลของสีย้อม ทำให้ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีเกิดขึ้นได้ดี อีกทั้งที่เวลามากขึ้นยังทำให้การรวมตัวของตัวตกตะกอน และโมเลกุลสีย้อมเกิดได้ดีขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีดีมากขึ้น และปัจจัยของความเข้มข้นสีย้อมส่งผลโดยตรงกับการลดค่าซีโอดี และอันตรกิริยาระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการเกิดปฏิกิริยามีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่น่าสนใจเช่นกัน เนื่องด้วยการผลิตไอออนมีความเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า และเวลาตามกฎของฟาราเดย์ ซึ่งส่งผลต่อการลดค่าซีโอดี

4.4 ภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีโดยขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก

จากสมการทั้ง 4 สมการ ในหัวข้อที่ 4.2 สามารถที่จะนำมาทำนายภาวะที่เหมาะสมกับช่วงที่เลือกทำการทดลองได้ โดยการเลือกภาวะที่เหมาะสมนั้น จะใช้ภาวะที่เหมาะสมร่วมกัน คือ การกำจัดสี และการลดค่าซีโอดี ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมได้ แต่ต้องเป็นที่ภาวะเดียวกัน จากสมการทั้ง 4 สมการ จากการใช้ขั้วอะลูมิเนียม และขั้วหล็ก จึงได้ภาวะที่เหมาะสมร่วมกัน 2 ภาวะ คือ ภาวะการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีด้วยขั้วอะลูมิเนียม และภาวะการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีด้วยขั้วเหล็ก ดังตารางที่ 4.18-4.21

4.4.1 ภาวะที่เหมาะสมร่วมของการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีโดยขั้วอะลูมิเนียม

ซึ่งใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density : X_A) ที่ +1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Time : X_B)ที่ 0.09 และความเข้มข้นของสีย้อม (Concentration dye : X_C)ที่ 0.03ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ดี คือที่ 94.51 % และการลดค่าซีโอดีเท่ากับ 78.93%

จากโปรแกรม สามารถคำนวณค่า coded ออกมาได้ดังนี้

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : X_A = +1 คำนวณเป็นค่าจริง = 15 mA/cm^2

เวลาในการเกิดปฏิกิริยา : X_B = +1 คำนวณเป็นค่าจริง = 15 นาที

ความเข้มข้นสีย้อม : X_C = 0.03 คำนวณเป็นค่าจริง = 127.25 มิลลกรัมต่อลิตร

นำตัวแปรทั้งหมดแทนค่าในสมการที่ 4.1 และสมการที่ 4.2

- การกำจัดสีโดยขั้วอะลูมิเนียมที่ภาวะเหมาะสมร่วม

$$\%\text{color removal} = 78.51 + 7.06x_A + 13.2x_B - 15.29x_C + 8.34x_A^2 - 4.79x_C^2 - 9.52x_Ax_B + 9.68x_Ax_C + 8.46x_Bx_C - 7.26x_Ax_Bx_C \quad (4.1)$$

โดยที่ x คือ ค่าของตัวแปรที่เข้ารหัส

%color removal = 94.51

นำค่า coded ที่ได้มาทำการทดลองซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.19 ภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีโดยขั้วอะลูมิเนียม

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า: X_A	เวลา: X_B	ความเข้มข้นสีย้อม: X_C	ผลจากสมการ	%การกำจัดสี ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	%เฉลี่ยจากการทดลอง
+1	+1	0.03	94.51	93.11	94.02	93.82	93.65

$$\%error = \frac{(94.51 - 93.65)}{94.51} x100$$

$$= 0.90\%$$

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างกับผลที่ได้จากสมการอยู่เล็กน้อย แสดงว่าภาวะเหมาะสมจากการคำนวณสามารถนำมาใช้ได้กับการทดลองจริง

-การลดค่าซีโอดีโดยขั้วอะลูมิเนียมที่ภาวะเหมาะสมร่วม

$$\%COD = 34.69+6.29x_A+9.682x_B-15.34x_C+12.154x_A^2-8.40x_C^2-9.18x_Ax_B \quad (4.2)$$

โดยที่ x คือ ค่าของตัวแปรที่เข้ารหัส

%COD = 78.93

นำค่า coded ที่ได้มาทำการทดลองซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.20 ภาวะที่เหมาะสมของการลดค่าซีโอดีโดยขั้วอะลูมิเนียม

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า: X_A	เวลา: X_B	ความเข้มข้นสีย้อม: X_C	ผลจากสมการ	%การลดค่าซีโอดี ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	%เฉลี่ยจากการทดลอง
+1	+1	0.03	78.93	76.67	75.75	75.00	75.97

$$\%error = \frac{(78.93 - 75.97)}{78.93} x100$$

$= 3.75\%$

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างกับผลที่ได้จากสมการ จะเห็นได้ว่าวิธีเคมีไฟฟ้าจะให้การลดค่าซีโอดีน้อยกว่าการกำจัดสี

4.4.2 ภาวะที่เหมาะสมร่วมของการกำจัดสี และการลดค่าซีโอดีโดยขั้วเหล็ก

ซึ่งใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density : X_A) ที่+1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Time : X_B)ที่ +1 และความเข้มข้นของสีย้อมสังเคราะห์ (Concentration dye : X_C)ที่ -1 ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ดี คือที่ 91.38 % และสามารถลดค่าซีโอดีเท่ากับ 65.98%

จากโปรแกรม สามารถคำนวณค่า coded ออกมาได้ดังนี้

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า: X_A = +1 คำนวณเป็นค่าจริง = 15 mA/cm^2

เวลาในการเกิดปฏิกิริยา: X_B = +1 คำนวณเป็นค่าจริง = 15 นาที

ความเข้มข้นสีย้อม: X_C = -1 คำนวณเป็นค่าจริง = 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

นำตัวแปรทั้งหมดแทนค่าในสมการที่ 4.3 และสมการที่ 4.4

- การกำจัดสีโดยขั้วเหล็กที่ภาวะเหมาะสมร่วม

$$\%color\ removal = 22.35 + 23.57x_A + 18.24x_B - 9.97x_C + 13.57x_A^2 + 13.24x_B^2 + 2.88x_Ax_B - 4.96x_Ax_C + 5.64x_Bx_C + 11.76x_Ax_Bx_C \quad (4.3)$$

โดยที่ x คือ ค่าของตัวแปรที่เข้ารหัส

%color removal = 91.38

นำค่า coded ที่ได้มาทำการทดลองซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีโดยขั้วเหล็ก

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า: X_A	เวลา: X_B	ความเข้มข้นสีย้อม: X_C	ผลจากสมการ	%การกำจัดสี ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	%เฉลี่ยจากการทดลอง
+1	+1	-1	91.38	90.50	91.11	90.82	90.81

$$\%error = \frac{(91.38 - 90.81)}{91.38} x100$$

$= 0.62\%$

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากสมการ นั่นคือ ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากสมการเป็นภาวะที่สามารถทำการกำจัดสีได้จริงในช่วงที่ทำการเลือก

- การใช้ขั้วเหล็กในการลดค่าซีโอดีที่ภาวะเหมาะสมร่วม

$$\%COD = 25.87 + 5.84x_A + 11.94x_B - 12.8x_C + 9.98x_A^2 + 7.03x_{AB} \qquad (4.4)$$

โดยที่ x คือ ค่าของตัวแปรที่เข้ารหัส

$\%COD = 65.98$

นำค่า coded ที่ได้มาทำการทดลองซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 ภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดซีโอดีโดยขั้วเหล็ก

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า: X_A	เวลา: X_B	ความเข้มข้นสีย้อม: X_C	ผลจากสมการ	%การลดค่าซีโอดี			%เฉลี่ยจากการทดลอง
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
+1	+1	-1	73.46	66.67	68.75	69.50	68.31

$$\%error = \frac{(73.46 - 68.31)}{73.46} x100$$

$= 7.01\%$

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างกับผลที่ได้จากสมการอย่างมาก

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสีทั้งการใช้ขั้วอะลูมิเนียม หรือการใช้ขั้วเหล็กสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการ แต่พบว่าในการลดค่าซีโอดียังให้ผลที่มีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากสมการ เนื่องจากการรบกวนของสารรีดิวซิงเอเจนท์ ในการทดลองนี้สารรีดิวซิงเอเจนท์ที่พบ คือ ซัลเฟต (SO_4^{2-}) และ เฟอรัส (Fe^{2+}) ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ใช้ขั้วเหล็กในการบำบัดประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีนั้นค่าที่ได้จากการทดลองจะมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากสมการอย่างเห็นได้ชัดเจน