การกำหนดสูตรผสมในการผลิตเม็ดสีเอบีเอสคอมปาวด์ด้วยการออกแบบการทดลอง

กรรณิกา สิทธยางกูร

งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ธันวาคม 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์ได้พิจารณางานนิพนธ์ของ กรรณิกา สิทธยางกูร ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา ประสพชัยชนะ)

คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์

.....ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา ประสพชัยชนะ)

.....กรรมการ
(ดร. จักรวาล คุณะดิลก)

.....กรรมการ
(ดร. ปัญชา อริยะจรรยา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)
วันที่ 30 เดือน กันยายน พ.ศ. 2559

กิตติกรรมประกาศ

งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา ประสพชัยชนะ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษางานนิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ทำให้งานนิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทกรณีศึกษาที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยและเพื่อนร่วมงานที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยทำให้งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยเสมอมา จนทำให้นิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่ บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทาให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

กรรณิกา สิทธยางกูร

57920718: สาขาวิชา: วิศวกรรมอุตสาหการ; วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ)
คำสำคัญ: การคอมปาวด์/ การออกแบบการทดลอง/ ค่าสี

กรรณิกา สิทธยางกูร: การกำหนดสูตรผสมในการผลิตเม็ดสีเอบีเอสคอมปาวด์ด้วยการออกแบบการทดลอง (ABS COLOUR COMPOUND FORMULATION BY DESIGN OF EXPERIMENT.) คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์: กฤษดา ประสพชัยชนะ, Ph.D., 116 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการทำสูตรสีน้ำตาลดำของเม็ดเอบีเอส เพื่อให้ได้ค่าเฉดสีตรงตามความต้องการของลูกค้าเมื่อเทียบกับแผ่นสีมาตรฐาน โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง การศึกษาเริ่มต้นจากการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลางเพื่อคัดกรองปัจจัย โดยทำการศึกษา 4 ปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็ค สีย้อมสีแดง สีย้อมสีเหลือง และแมกนีเซียมสเตียเรท ผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อเฉดสีน้ำตาลดำอย่างมีนัยสำคัญ คือ คาร์บอนแบล็ค สีย้อมสีแดง และสีย้อมสีเหลือง โดยปัจจัยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง หลังจากนั้นออกแบบการทดลองแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เพื่อวิเคราะห์หาผลตอบที่ดีที่สุด ซึ่งรูปแบบของสมการถดถอยสามารถกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมของปริมาณคาร์บอนแบล็คที่ 0.38 กรัม ปริมาณสีย้อมสีแดงที่ 0.13 กรัม และปริมาณสีย้อมสีเหลืองที่ 0.08 กรัม ซึ่งทำให้ได้ค่าเฉดสีใกล้เคียงกับแผ่นสีมาตรฐานมากที่สุด และจากการผลิตจริงทำให้ได้ค่าดัชนีบ่งชี้ความสามารถของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 1.18

57920718: MAJOR: INDUSTRIAL ENGINEERING; M.Eng.
(INDUSTRIAL ENGINEERING)
KEYWORD: COMPOUND FORMULATION/ COLOUR SHADE/ DESIGN OF EXPERIMENT
KANNIKA SITTAYANGKOON: ABS COLOUR COMPOUND FORMULATION BY DESIGN OF EXPERIMENT. ADVISORY COMMITTEE: KRITSADA PROSOPSUKCHAICHANA, Ph.D., 116 P. 2016.

The objective of this research is to study the optimal factors for the desired colour shade of ABS compound by design of experiment. The experiment was started with 2^4 factorial design. Four factors, namely carbon black, red solvent dyes, yellow solvent dyes and magnesium stearate, were selected in the experimental design. The experimental results indicated that the significant factors were carbon black, red solvent dyes and yellow solvent dyes. Then the experiment was repeatedly designed by Box-Behnken design to determine the regression model for optimization. The regression models could be used to select the desired colour shade of ABS compound with carbon black of 0.38 gram, red solvent dyes of 0.13 gram and yellow solvent dyes of 0.08 gram. Therefore, the process capability (C_{pk}) has increased to 1.18.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ซ

สารบัญภาพ ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4

สมมติฐานของการวิจัย 4

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 4

ขอบเขตของการวิจัย 5

แผนการดำเนินงาน 5

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเมอร์ 6

การคอมปาวด์ 10

สารเติมแต่ง 11

การตรวจสอบค่าความแตกต่างของสี 16

การออกแบบการทดลอง 18

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 22

วิธีพื้นผิวตอบสนอง 27

การวิเคราะห์การถดถอย 29

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 34

3 วิธีดำเนินการวิจัย 37

วิธีการดำเนินการวิจัย 37

ศึกษาสภาพปัจจุบัน กำหนดหัวข้อปัญหา 37

การกำหนดปัจจัย ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 40

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	ค่าตอบสนองที่ใช้	43
	การออกแบบการทดลอง	44
	ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	52
	ทดสอบและยืนยันผล	53
	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	53
4	ผลการวิจัย	54
	ผลการวิเคราะห์แผนการทดลองเบื้องต้น	54
	ดำเนินการทดลองโดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง	76
	การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	93
	ยืนยันผลและวิเคราะห์ข้อมูล	95
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	101
	สรุปผลการทดลอง	101
	ข้อเสนอแนะ	103
บรรณานุกรม		104
ภาคผนวก		106
	ภาคผนวก ก	107
	ภาคผนวก ข	112
ประวัติย่อของผู้วิจัย		116

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	ปริมาณของเสียจากกระบวนการผลิต	3
1-2	ขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาการดำเนินการวิจัย	5
2-1	คุณสมบัติโดยทั่วไปของเอบีเอส	9
2-2	สารเติมแต่งที่ใช้ในการผลิตพลาสติก	12
2-3	ขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบ 2^k	24
2-4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^k	24
2-5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอยพหุคูณ	31
2-6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอย	33
3-1	ประเภทของผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา	38
3-2	ระดับปัจจัยที่ใช้ศึกษา	42
3-3	การออกแบบการทดลอง	45
4-1	ข้อมูลการออกแบบการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลาง (ทำซ้ำ 2 รอบ)	54
4-2	ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองเบื้องต้น	56
4-3	ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน	76
4-4	ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (ทำซ้ำ 2 รอบ)	77
4-5	ข้อมูลยืนยันผลการวิเคราะห์จากแผนการทดลองแบบบ็อกเบห์นเคน	96
5-1	ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำสูตรสีน้ำตาลดำ	102

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์	6
2-2	สูตรโครงสร้างของเอบีเอส	8
2-3	กระบวนการผลิตพลาสติกคอมปาวด์	11
2-4	ลักษณะของเฉดสีแบบ CIE L*, a, b	17
2-5	แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ	18
2-6	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล	22
2-7	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล	23
2-8	การออกแบบ 2^2 ที่มีจุดศูนย์กลาง	26
2-9	ลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ	28
2-10	การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับสามตัวแปร	28
3-1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	37
3-2	กระบวนผลิตคอมปาวด์ของโรงงานกรณีศึกษา	39
3-3	ค่าสีที่วัดได้จากแผ่นสีตัวอย่างด้วยเครื่องวัดสี	40
3-4	เครื่องวัดเฉดสี (Color eye spectrophotometer รุ่น CE 7000A)	44
3-5	ลำดับขั้นตอนในการทดลอง	48
3-6	การเตรียมสารเคมี สีผง และเม็ดเอบีเอสที่ใช้ในการทำสูตร	49
3-7	การชั่งสารเคมี	49
3-8	ผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกัน	50
3-9	การปรับตั้งค่าเครื่องฉีดพลาสติก	50
3-10	แผ่นสีตัวอย่างที่ฉีดได้	51
3-11	การวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดเฉดสี	51
4-1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น DL	57
4-2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น DL (ตัดปัจจัยที่ไม่มีผลออก)	58
4-3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น Da	59
4-4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น Da (ตัดปัจจัยที่ไม่มีผลออก)	60
4-5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น Db	61
4-6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น Db (ตัดปัจจัยที่ไม่มีผลออก)	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-7 กราฟ Normal plot แสดงผลกระทบที่มีต่อค่าความสว่าง (DL) ในการทดลองเบื้องต้น 63

4-8 กราฟ Normal plot แสดงผลกระทบที่มีต่อค่า Da ในการทดลองเบื้องต้น 64

4-9 กราฟ Normal plot แสดงผลกระทบที่มีต่อค่า Db ในการทดลองเบื้องต้น 64

4-10 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (DL) 65

4-11 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Da) 66

4-12 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Db) 66

4-13 กราฟของค่าเคลื่อนที่กับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (DL) 67

4-14 กราฟของค่าเคลื่อนที่กับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Da) 68

4-15 กราฟของค่าเคลื่อนที่กับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Db) 68

4-16 ทดสอบ Runs test ของข้อมูล (DL, Da และ Db) สำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น 69

4-17 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (DL) 70

4-18 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Da) 70

4-19 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Db) 71

4-20 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (DL) 71

4-21 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Da) 72

4-22 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Db) 72

4-23 ผลการหาค่า Power and sample size (DL, Da และ Db) 73

4-24 ผลการหาค่า Power and sample size (DL) 74

4-25 ผลการหาค่า Power and sample size (Da) 75

4-26 ผลการหาค่า Power and sample size (Db) 75

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-27 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการออกแบบบ็อก-เบห์นเคน (DL) 78

4-28 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการออกแบบบ็อก-เบห์นเคน (Da) 79

4-29 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการออกแบบบ็อก-เบห์นเคน (Db) 80

4-30 การวิเคราะห์ถดถอยสำหรับตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่า DL 81

4-31 การวิเคราะห์ถดถอยสำหรับตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่า Da 82

4-32 การวิเคราะห์ถดถอยสำหรับตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่า Db 83

4-33 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (DL) 85

4-34 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da) 85

4-35 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Db) 86

4-36 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (DL) 87

4-37 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da) 87

4-38 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Db) 88

4-39 ทดสอบ Runs test ของข้อมูล (DL, Da และ Db) สำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน 88

4-40 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (DL) 89

4-41 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da) 90

4-42 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Db) 90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-43 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (DL) 91

4-44 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da) 91

4-45 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da) 92

4-46 Overlaid contour plot สำหรับ Response DL, Da และ Db 94

4-47 Optimization plot สำหรับ Multiple responses DL, Da และ Db 94

4-48 ข้อมูลวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization) 95

4-49 การคำนวณจำนวนตัวอย่างจากค่า DL 96

4-50 การคำนวณจำนวนตัวอย่างจากค่า Da 97

4-51 การคำนวณจำนวนตัวอย่างจากค่า Db 97

4-52 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่า DL 98

4-53 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่า Da 98

4-54 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่า Db 99

4-55 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต (DE) 100

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ซ

สารบัญภาพ ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4

สมมติฐานของการวิจัย 4

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 4

ขอบเขตของการวิจัย 5

แผนการดำเนินงาน 5

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเมอร์ 6

การคอมปาวด์ 10

สารเติมแต่ง 11

การตรวจสอบค่าความแตกต่างของสี 16

การออกแบบการทดลอง 18

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 22

วิธีพื้นผิวตอบสนอง 27

การวิเคราะห์การถดถอย 29

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 34

3 วิธีดำเนินการวิจัย 37

วิธีการดำเนินการวิจัย 37

ศึกษาสภาพปัจจุบัน กำหนดหัวข้อปัญหา 37

การกำหนดปัจจัย ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 40

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	ค่าตอบสนองที่ใช้	43
	การออกแบบการทดลอง	44
	ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	52
	ทดสอบและยืนยันผล	53
	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	53
4	ผลการวิจัย	54
	ผลการวิเคราะห์แผนการทดลองเบื้องต้น	54
	ดำเนินการทดลองโดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง	76
	การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	93
	ยืนยันผลและวิเคราะห์ข้อมูล	95
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	101
	สรุปผลการทดลอง	101
	ข้อเสนอแนะ	103
บรรณานุกรม		104
ภาคผนวก		106
	ภาคผนวก ก	107
	ภาคผนวก ข	112
ประวัติย่อของผู้วิจัย		116

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	ปริมาณของเสียจากกระบวนการผลิต	3
1-2	ขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาการดำเนินการวิจัย	5
2-1	คุณสมบัติโดยทั่วไปของเอบีเอส	9
2-2	สารเติมแต่งที่ใช้ในการผลิตพลาสติก	12
2-3	ขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบ 2^k	24
2-4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^k	24
2-5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอยพหุคูณ	31
2-6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอย	33
3-1	ประเภทของผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา	38
3-2	ระดับปัจจัยที่ใช้ศึกษา	42
3-3	การออกแบบการทดลอง	45
4-1	ข้อมูลการออกแบบการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลาง (ทำซ้ำ 2 รอบ)	54
4-2	ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองเบื้องต้น	56
4-3	ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน	76
4-4	ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (ทำซ้ำ 2 รอบ)	77
4-5	ข้อมูลยืนยันผลการวิเคราะห์จากแผนการทดลองแบบบ็อกเบห์นเคน	96
5-1	ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำสูตรสีน้ำตาลดำ	102

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์	6
2-2	สูตรโครงสร้างของเอบีเอส	8
2-3	กระบวนการผลิตพลาสติกคอมปาวด์	11
2-4	ลักษณะของเฉดสีแบบ CIE L*, a, b	17
2-5	แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ	18
2-6	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล	22
2-7	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล	23
2-8	การออกแบบ 2^2 ที่มีจุดศูนย์กลาง	26
2-9	ลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ	28
2-10	การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับสามตัวแปร	28
3-1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	37
3-2	กระบวนผลิตคอมปาวด์ของโรงงานกรณีศึกษา	39
3-3	ค่าสีที่วัดได้จากแผ่นสีตัวอย่างด้วยเครื่องวัดสี	40
3-4	เครื่องวัดเฉดสี (Color eye spectrophotometer รุ่น CE 7000A)	44
3-5	ลำดับขั้นตอนในการทดลอง	48
3-6	การเตรียมสารเคมี สีผง และเม็ดเอบีเอสที่ใช้ในการทำสูตร	49
3-7	การชั่งสารเคมี	49
3-8	ผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกัน	50
3-9	การปรับตั้งค่าเครื่องฉีดพลาสติก	50
3-10	แผ่นสีตัวอย่างที่ฉีดได้	51
3-11	การวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดเฉดสี	51
4-1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น DL	57
4-2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น DL (ตัดปัจจัยที่ไม่มีผลออก)	58
4-3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น Da	59
4-4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น Da (ตัดปัจจัยที่ไม่มีผลออก)	60
4-5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น Db	61
4-6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น Db (ตัดปัจจัยที่ไม่มีผลออก)	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-7 กราฟ Normal plot แสดงผลกระทบที่มีต่อค่าความสว่าง (DL) ในการทดลองเบื้องต้น 63

4-8 กราฟ Normal plot แสดงผลกระทบที่มีต่อค่า Da ในการทดลองเบื้องต้น 64

4-9 กราฟ Normal plot แสดงผลกระทบที่มีต่อค่า Db ในการทดลองเบื้องต้น 64

4-10 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (DL) 65

4-11 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Da) 66

4-12 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Db) 66

4-13 กราฟของค่าเคลื่อนที่กับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (DL) 67

4-14 กราฟของค่าเคลื่อนที่กับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Da) 68

4-15 กราฟของค่าเคลื่อนที่กับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Db) 68

4-16 ทดสอบ Runs test ของข้อมูล (DL, Da และ Db) สำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น 69

4-17 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (DL) 70

4-18 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Da) 70

4-19 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Db) 71

4-20 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (DL) 71

4-21 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Da) 72

4-22 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Db) 72

4-23 ผลการหาค่า Power and sample size (DL, Da และ Db) 73

4-24 ผลการหาค่า Power and sample size (DL) 74

4-25 ผลการหาค่า Power and sample size (Da) 75

4-26 ผลการหาค่า Power and sample size (Db) 75

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-27 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการออกแบบบ็อก-เบห์นเคน (DL) 78

4-28 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการออกแบบบ็อก-เบห์นเคน (Da) 79

4-29 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการออกแบบบ็อก-เบห์นเคน (Db) 80

4-30 การวิเคราะห์ถดถอยสำหรับตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่า DL 81

4-31 การวิเคราะห์ถดถอยสำหรับตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่า Da 82

4-32 การวิเคราะห์ถดถอยสำหรับตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่า Db 83

4-33 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (DL) 85

4-34 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da) 85

4-35 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Db) 86

4-36 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (DL) 87

4-37 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da) 87

4-38 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Db) 88

4-39 ทดสอบ Runs test ของข้อมูล (DL, Da และ Db) สำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน 88

4-40 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (DL) 89

4-41 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da) 90

4-42 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Db) 90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-43 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (DL) 91

4-44 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da) 91

4-45 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da) 92

4-46 Overlaid contour plot สำหรับ Response DL, Da และ Db 94

4-47 Optimization plot สำหรับ Multiple responses DL, Da และ Db 94

4-48 ข้อมูลวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization) 95

4-49 การคำนวณจำนวนตัวอย่างจากค่า DL 96

4-50 การคำนวณจำนวนตัวอย่างจากค่า Da 97

4-51 การคำนวณจำนวนตัวอย่างจากค่า Db 97

4-52 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่า DL 98

4-53 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่า Da 98

4-54 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่า Db 99

4-55 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต (DE) 100

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศไทยจัดเป็นอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่ และมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมเชื่อมต่อระหว่างอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมต่อเนื่องมากมาย อาทิ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเลคทรอนิกส์ ยานยนต์และชิ้นส่วน เครื่องแต่งกาย เฟอร์นิเจอร์ วัสดุก่อสร้าง เป็นต้น ปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกนั้นได้เติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งหลังการเปิดเขตการค้าเสรี (FTA) ส่งผลให้เกิดการแข่งขันที่สูงขึ้น ซึ่งจากสภาวะดังกล่าวนี้ ผู้ผลิตจำเป็นต้องเร่งปรับตัวทั้งการพัฒนาผลิตภัณฑ์และคุณภาพสินค้าเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน และสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้า

พลาสติกคอมปาวด์ (Plastics compound) จัดได้ว่าเป็นนวัตกรรมพลาสติกอีกประเภทหนึ่งที่มีความต้องการใช้ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งกระบวนการคอมปาวด์ (Compounding) หรือการทำพลาสติกคอมปาวด์นั้นเป็นการหลอมเหลวเม็ดพลาสติกด้วยความร้อน จากนั้นจึงเติมสารเติมแต่ง (Additives) และสารเสริมสภาพพลาสติกหรือพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) หรือพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ เข้าไปในสัดส่วนที่เหมาะสมแล้วผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อให้สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย และยังเป็นการพัฒนาหรือปรับปรุงเม็ดพลาสติกที่ใช้กันอยู่เดิมนั้นให้มีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ดีขึ้น เช่น สี ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ความใส การทนแรงกระแทก การทนความร้อน และอื่น ๆ ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานและเพื่อตอบสนองความต้องการของภาคอุตสาหกรรมปลายทางต่าง ๆ ที่มีแนวโน้มเติบโตมากขึ้นในอนาคต

ในกระบวนการผลิตคอมปาวด์ของโรงงานกรณีศึกษานั้นต้องมีการออกสูตรผสมเพื่อกำหนดชนิดและปริมาณของสารเคมีต่าง ๆ ที่เติมลงไปในพลาสติก เพื่อปรับเปลี่ยนหรือปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติกให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ ซึ่งในกระบวนการผลิตคอมปาวด์นี้การออกสูตรผสมวัตถุดิบเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุด เพราะเป็นกระบวนการแรกที่จะทำให้เกิดการสั่งผลิตในกระบวนการนี้มีพารามิเตอร์ของสารเคมีต่าง ๆ ที่ต้องทำการควบคุมอยู่หลายชนิด และในการปรับค่าของสารเคมีต่าง ๆ นั้นจะมีอิทธิพลต่อค่าเฉดสีและคุณสมบัติของพลาสติกด้วย

ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงได้เสนอวิธีการออกแบบการทดลอง นำไปปรับใช้ในการทำสูตรผสมคอมปาวด์ครั้งนี้ของโรงงานกรณีศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาระดับสัดส่วนของสูตรผสมที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าเฉดสีตรงตามความต้องการของลูกค้าและนำมากำหนดเป็นสูตรมาตรฐานในการผลิตเม็ดสีต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการของโรงงานกรณีศึกษาที่ต้องการนำผลจากการวิจัยนี้ไปเป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาปริมาณสูตรผสมสำหรับการผลิตสูตรสีคอมปาวด์ชนิดอื่น ๆ เพื่อนำไปปรับปรุงและลดปัญหาปริมาณของเสียจากกระบวนการผลิตที่เกิดจากปัญหาค่าสีไม่ได้ตามข้อกำหนด ซึ่งจากข้อมูลปริมาณของเสียจากกระบวนการผลิตของทางโรงงานกรณีศึกษา พบว่า ตั้งแต่เดือนมกราคม-ธันวาคม 2558 สามารถจำแนกปัญหาของเสียจากกระบวนการผลิตออกเป็น 6 ชนิด และจำนวนปริมาณของเสียได้ดังตารางที่ 1-1 ซึ่งพบว่าปัญหาสีเป็นปัญหาที่มีปริมาณของเสียสูงสุด

ตารางที่ 1-1 ปริมาณของเสียจากกระบวนการผลิต

ชนิดของปัญหา	ปริมาณของเสีย (กก.)												รวม	% ของเสีย
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	ม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.		
ปัญหาสิ่งแปลกปลอม	1,000	1,000	6,000	1,000	1,600	800	2,100	1,000	1,681		600		16,781	20.94
ปัญหาจุดดำ	500		6,200					1,200	2,400			500	10,800	13.48
ปัญหาสี	3,125	1,415	9,486	1,800		1,000		3,700	11,300	2,000	2,725	2,345	38,896	48.54
ปัญหาเม็ดสั้น-ยาว		1,700	650										2,350	2.93
ปัญหาอื่น ๆ				400						10,900			11,300	14.10

ปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตที่เกิดจากปัญหาสีคิดเป็นมูลค่าเงินที่สูญเสีย จำนวน 3,019,145 บาท ของเสียที่เกิดขึ้นจากปัญหาสีนี้จะนำมาทำการปรับปรุงแก้ไขสูตรผสมใหม่อีกครั้ง ซึ่งปัญหาสีเป็นปัญหาที่ต้องใช้เวลาในการปรับปรุงนานที่สุด และมีต้นทุนในการปรับปรุงสูงเนื่องจากต้องมีการออกสูตรผสมในการผลิตใหม่

ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงได้นำหลักการของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of experiment) มาประยุกต์ใช้ในการศึกษา เพื่อหาระดับสัดส่วนที่เหมาะสมในการออกสูตรผสมสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตดังกล่าว เพื่อให้ได้เฉดค่าสีและคุณสมบัติทางเทคนิคตรงตามความต้องการของลูกค้า และทำการปรับปรุงและพัฒนาสูตรผสมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของสูตรผสมในกระบวนการผลิตเม็ดสีเอบีเอสคอมปาวด์สูตรสีน้ำตาลดำ (Brown black)

สมมติฐานของการวิจัย

ระดับปริมาณสัดส่วนของสูตรผสมจะมีอิทธิพลต่อค่าสีสำหรับการทำคอมปาวด์ หากมีการศึกษาและควบคุมระดับสัดส่วนของสูตรผสมที่เหมาะสมแล้วจะทำให้ได้ค่าสีและคุณสมบัติทางเทคนิคตามที่ต้องการและทำให้ลดปริมาณของเสียจากการผลิตที่เกิดจากปัญหาค่าสีลงได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบถึงปัจจัยและระดับสัดส่วนที่เหมาะสมของสูตรผสมในกระบวนการผลิตเอบีเอสคอมปาวด์สูตรสีน้ำตาลดำ
2. ได้ค่าเฉดสีและคุณสมบัติทางเทคนิคตามความต้องการของลูกค้า
3. สามารถนำมากำหนดเป็นสูตรมาตรฐานในกระบวนการการผลิตเอบีเอสคอมปาวด์สูตรสีน้ำตาลดำ
4. เป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาปริมาณสูตรผสมสำหรับการผลิตสูตรสีคอมปาวด์อื่น ๆ

ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษางานวิจัยจะดำเนินตามขอบเขตการศึกษา ดังนี้

1. เป็นการทดลองในกระบวนการผลิตพลาสติกคอมปาวด์ของโรงงานกรณีศึกษา โดยทดลองเฉพาะกระบวนการผลิตเอบีเอสคอมปาวด์สูตรสีน้ำตาลดำที่ใช้สำหรับการผลิตอุปกรณ์อิเลคทรอนิกส์เท่านั้น นำหลักการของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and analysis of experiment) มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาเพื่อหาระดับสัดส่วนที่เหมาะสมในการกำหนดสูตรผสมสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต โดยการกำหนดค่าความสว่าง (DL) จะต้องมีค่าไม่เกิน 1 ค่า Da และ Db จะต้องมีค่าไม่เกิน ±0.5 เมื่อเทียบกับแผ่นสีมาตรฐานจากลูกค้าที่วัดได้จากเครื่องวัดเฉดสี (Color eye spectrophotometer รุ่น CE 7000A)

2. สารเคมีที่ใช้ในการศึกษามี 4 ชนิด ได้แก่

   2.1 คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)

   2.2 สีย้อมสีแดง (Solvent dyes red)

   2.3 สีย้อมสีเหลือง (Solvent dyes yellow)

   2.4 แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate)

แผนการดำเนินงาน

รายละเอียดของแผนการดำเนินงานวิจัยแสดงไว้ดังตารางที่ 1-2

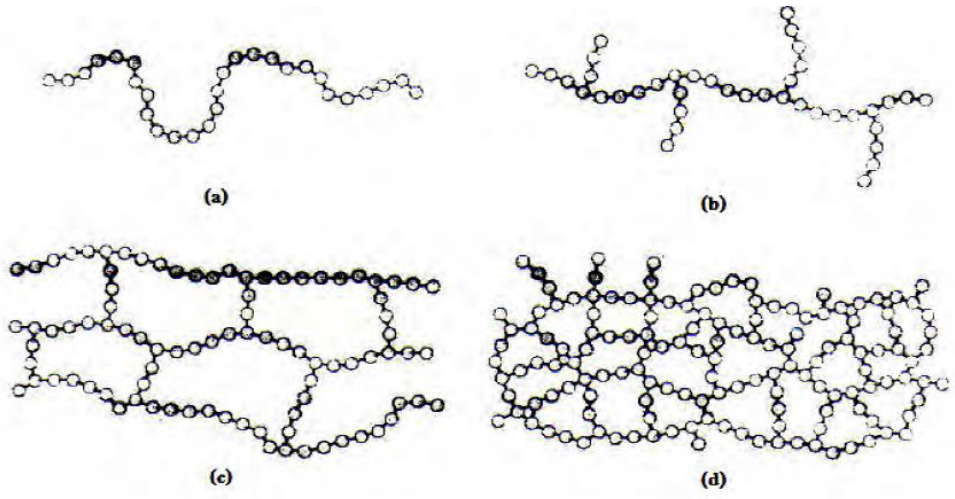
ตารางที่ 1-2 ขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินงาน	ปี 2559					
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1. ศึกษาสภาพปัจจุบันและกำหนดหัวข้อปัญหา						
2. กำหนดปัจจัยระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง						
3. ออกแบบการทดลอง						
4. ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง						
5. ทดสอบและยืนยันผล						
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ						

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเมอร์

พลาสติกหรือพอลิเมอร์ คือ วัสดุที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบโดยมีหน่วยซ้ำ ๆ กัน (Repeating unit) ประกอบกันขึ้นเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว โดยส่วนใหญ่แล้วสายโซ่หลักจะประกอบด้วย (Carbon backbone) โดยมีโครงสร้างแขนง (Side group) ที่ต่อออกจากสายโซ่หลักเป็นธาตุหรือหมู่ฟังก์ชันอื่น ซึ่งโครงสร้างจะมีหลายลักษณะ คือ Branched polymer chain ที่พบในเทอร์โมพลาสติกหรือเป็น Loosely cross-linking polymer chain ที่พบในอิลาสโตเมอร์ หรือมีโครงสร้างแบบร่างแห Cross-linking หรือ Network polymer chain ที่พบในเทอร์โมเซต ดังแสดงในภาพที่ 2-1



(a) Linear polymer dhain (b) Branched polymer chain

(c) Loosely cross-linking polymer chain (d) Cross-linking หรือ Network polymer chain

ภาพที่ 2-1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์

1. ชนิดของพอลิเมอร์

ในวงการศึกษาและอุตสาหกรรมพอลิเมอร์มักจะแบ่งกลุ่มพอลิเมอร์ออกเป็นชนิดต่าง ๆ แต่ค่อนข้างมีความสับสนในการจัดกลุ่มเนื่องจากมีการใช้หลักเกณฑ์ที่แตกต่างกันซึ่งในที่นี้จะยกมา

แค่หลักเกณฑ์การแบ่งชนิดของพอลิเมอร์ตามลักษณะการประยุกต์ใช้งานเท่านั้น โดยแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1.1 พอลิเมอร์ที่ใช้งานในปริมาณสูง (Commodity polymers)

เป็นกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานในปริมาณสูงมากใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต่อชีวิตประจำวันในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ถุงใส่ของ กล่องและฟิล์มสำหรับบรรจุอาหาร ของเล่นเด็ก ท่อ และขวดชนิดต่าง ๆ ซึ่งพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ไม่ต้องการคุณสมบัติเชิงกลที่สูงมากนัก ตัวอย่างพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น พอลิเอททีลีน (Polyethylene, PE) พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) และพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ปริมาณการใช้พลาสติกในกลุ่มนี้จะสูงมากประมาณ 65-70% ของปริมาณการใช้พลาสติกทั้งหมด

1.2 พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิศวกรรม (Engineering polymers)

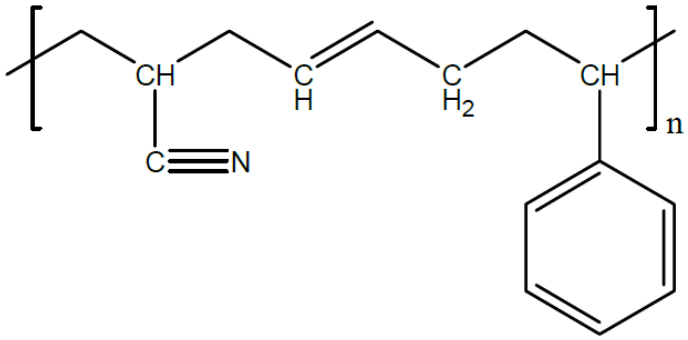
เป็นกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเชิงกลดีและมีความทนทานที่อุณหภูมิสูง มักนำมาใช้แทนชิ้นส่วนโลหะชนิดต่าง ๆ เช่น เฟือง เกียร์ ตัวรองรับเพลา (Bearing) และชิ้นส่วนภายนอกของเครื่องยนต์ เป็นต้น ตัวอย่างพลาสติกที่ใช้งานในงานวิศวกรรม เช่น พอลิเอไมด์ (Polyamide, PA) พอลิคาร์บอเนต (PC) พอลิอะซีตัล (Polyacetal, POM) พอลิบิวทีลีนเทอเรพทาเลท (Polybutylene terephthalate, PBT) เป็นต้น พลาสติกในกลุ่มนี้มีราคาสูงกว่าพลาสติกในกลุ่มแรกประมาณ 2-10 เท่า แต่มีปริมาณการใช้งานค่อนข้างน้อย กล่าวคือ ประมาณ 15-20% ของปริมาณการใช้งานพลาสติกทั้งหมด

1.3 พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานสมรรถนะสูง (High performance polymers)

เป็นกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงและมีความทนทานต่อความร้อนสูงมาก ใช้กับงานที่ต้องการคุณสมบัติเชิงกลดีเยี่ยม พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้จะมีราคาแพงมากและใช้งานในปริมาณน้อยเท่านั้น ตัวอย่างพอลิเมอร์ เช่น พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyetherether ketone, PEEK) พอลิอีเทอร์อิไมด์ (Polyetherether imide, PEI) พอลิพาราฟีนิลีน (Polyparaphenylene, PPP) และพอลิเมอร์ผลึกเหลว (Liquid crystal polymer, LCP) เป็นต้น

2. พลาสติกเอบีเอส (Acrylonitrile butadiene styrene, ABS)

พลาสติกเอบีเอส ย่อมาจาก อะคริโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน ซึ่งรู้จักกันในชื่อทั่วไปว่า เอบีเอส โดยเอบีเอสถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในช่วงปี ค.ศ. 1940 ซึ่งสูตรโครงสร้างของเอบีเอสดังแสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 สูตรโครงสร้างของเอบีเอส

เอบีเอสเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ของโมโนเมอร์ 3 ชนิด คือ สไตรีน (Styrene) อะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และโพลิบิวทาไดอีน (Polybutadiene) ซึ่งโพลิเมอร์ที่ได้จากโมโนเมอร์ 3 ชนิด เรียกว่า เทอร์โพลิเมอร์ (Terpolymer) โมโนเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบสังเคราะห์เอบีเอสขึ้นมานั้น ล้วนมีผลต่อคุณสมบัติของพลาสติกทั้งสิ้น อะคริโลไนไตรล์มีผลต่อคุณสมบัติการทนความร้อนและสารเคมี บิวทาไดอีนมีผลต่อคุณสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) และสไตรีนมีผลทำให้พลาสติกมีพื้นผิวเป็นมันเงา ตัดแต่งวัสดุได้ง่ายและช่วยลดต้นทุน เนื่องจากเอบีเอสเป็นพลาสติกที่ได้จากการนำโมโนเมอร์ 3 ชนิดมาผลิต ดังนั้น ผู้ผลิตเอบีเอสจึงสามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนของโมโนเมอร์ทั้งสามชนิดเพื่อให้ได้คุณสมบัติอย่างที่ต้องการซึ่งเอบีเอสที่จำหน่ายในท้องตลาดจะประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ประมาณ 15-30% โพลิบิวทาไดอีน ประมาณ 5-30% และสไตรีนประมาณ 45-75%

3. คุณสมบัติทั่วไปของเอบีเอส

โดยทั่วไปพลาสติกที่มีความแข็งจะมีลักษณะแข็งแต่เปราะหรือหากมีสมบัติแข็งเหนียวก็จะมีลักษณะอ่อนนิ่มร่วมด้วย แต่เอบีเอสแตกต่างจากพลาสติกทั่วไป เพราะเป็นพลาสติกที่มีความสมดุลทั้งในเรื่องความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Toughness) ทำให้พลาสติกมีคุณสมบัติทนแรงกระแทก (Impact resistance) ดี นอกจากนี้เอบีเอสยังมีคุณสมบัติเด่นอีกหลายเรื่อง เช่น ทนต่อแรงเสียดสี (Abrasion) คงสภาพรูปร่างได้ดี (Dimension stability) ทนความร้อน ทนสารเคมี มีช่วงอุณหภูมิใช้งานกว้างตั้งแต่ -20^{o}C -80^{o}C และสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายวิธีซึ่งค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของเอบีเอสดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของเอบีเอส

Properties		Nominal value	Unit	Test method
Physical	Apparent density	0.25 to 0.36	g/ cm^3	ASTM D1895
	Melt mass-flow rate (MFR), 220°C/ 10.0 kg	1.0 to 36	g/ 10 min	ASTM D1238
	Molding shrinkage flow: 73°F	4.5E-3 to 7.4E-3	in/ in	ASTM D955
	Water absorption, 73°F, 24 hr	0.20 to 0.31	%	ASTM D570
Mechanical	Tensile modulus, 73°F	246000 to 410000	psi	ASTM D638
	Tensile strength, 73°F	4660 to 7750	psi	ASTM D638
	Tensile elongation			
	Yield, 73°F	2.0 to 12	%	ASTM D638
	Break, 73°F	1.0 to 57	%	ASTM D638
Impact	Notched izod impact, 73°F	1.7 to 7.7	ft·lb/in	ASTM D256
Hardness	Rockwell hardness, 73°F	97 to 115		ASTM D785
Thermal	Vicat softening temperature	182 to 240	°F	ASTM D1525
Flammability	Burning rate	1.4 to 2.7	in/min	ISO 3795
Optical	Gloss	30 to 100		ASTM D2457
Injection	Processing (Melt) temp	407 to 501	°F	
	Mold temperature	120 to 160	°F	
Extrusion	Melt temperature	385 to 475	°F	
	Die temperature	418 to 439	°F	

4. การนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

4.1 ในอุตสาหกรรมรถยนต์

พลาสติกที่จะนำมาใช้ในรถยนต์มักถูกกำหนดเกณฑ์เรื่องคุณภาพไว้ค่อนข้างสูง โดยพลาสติกต้องมีสภาพหรือรูปร่างดีไม่โก่งงอหรือบิดตัวในสภาวะที่มีความเค้น (Stress) หรือสภาพที่ต้องเผชิญการเปลี่ยนอุณหภูมิช่วงกว้างซึ่งเอบีเอสมีคุณสมบัติต่าง ๆ สูงจึงรองรับสภาพการใช้งานในรถยนต์ได้ดี

4.2 อุตสาหกรรมผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

สำหรับอุตสาหกรรมผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความต้องการเรื่องวัสดุจะแตกต่างจากอุตสาหกรรมรถยนต์ วัสดุที่ใช้เป็นโครงภายนอกของเครื่องใช้ไฟฟ้านอกจากจะต้องมีความแข็งแรงทนต่อการขีดข่วน (Scratch) และการเสียดสี (Wear) ดีแล้วยังต้องมีความสวยงาม เช็ดทำความสะอาดง่าย และไม่เกิดไฟฟ้าสถิตซึ่งเอบีเอสสามารถตอบสนองความต้องการเหล่านี้ได้

4.3 อุตสาหกรรมอื่น ๆ

การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น เช่น เครื่องใช้สำนักงาน สำหรับอุปกรณ์สำนักงานต้องการแบบที่ดูดีและมีสีสันสวยงาม ซึ่งเอบีเอสสามารถตอบสนองได้ดีเนื่องจากผสมสีสันได้หลากหลาย และบางเกรดก็สามารถนำมาชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าเพื่อให้ได้ผิวแวววาวเหมือนโลหะอีกทั้งสามารถเลือกใช้กระบวนการขึ้นรูปเพื่อให้ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์มีพื้นผิวเป็นมันเงาหรือเรียบด้านแล้วแต่ความต้องการและอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น ใช้ผลิตอุปกรณ์กีฬา ท่อส่งก๊าซ หมวกกันน็อก โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น

การคอมปาวด์ (Compound)

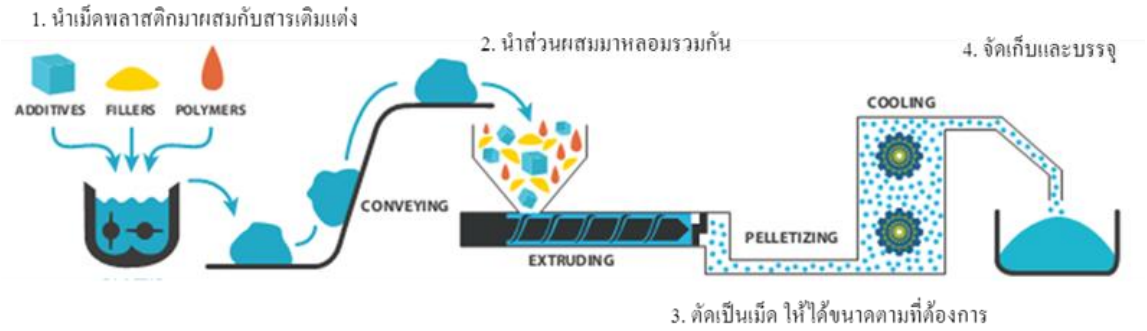
พลาสติกที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปจะต้องมีการผสมสารเคมีที่เรียกว่าสารเติมแต่ง (Additives) หลายชนิดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของชิ้นงานพลาสติกที่ได้และปรับปรุงความสามารถในการแปรรูปพลาสติกเพื่อให้แปรรูปได้ง่ายขึ้นเรียกเทคนิคการผสมสารเคมีเข้ากับพลาสติกว่าการผสมหรือการคอมปาวด์พลาสติก (Mixing หรือ Compounding)

การคอมปาวด์เป็นการทำให้อนุภาคของวัสดุชนิดต่าง ๆ กระจายตัวเข้ากันเป็นเนื้อเดียว การผสมแบบนี้จะอาศัยแรงเฉือนในการบดผสมองค์ประกอบชนิดต่าง ๆ เข้าด้วยกัน โดยกระทำขณะที่พลาสติกอยู่ในสภาวะหลอม ดังนั้น วัสดุที่เกี่ยวข้องมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์และมีการผสมในระดับที่ละเอียดกว่าการผสมธรรมดา ในกระบวนการการแปรรูปพลาสติกจะใช้วิธีคอมปาวด์ก็ต่อเมื่อ

1. ต้องการผสมสารเคมี เช่น สารตัวเติม พลาสติกไซเซอร์ และพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ผสมพลาสติกในปริมาณสูง

2. หลังการใช้ผสมแบบธรรมดาแล้วแต่หลังจากการแปรรูป การกระจายตัวของสารเคมีในชิ้นงานพลาสติกไม่ดีพอ

กระบวนการคอมปาวด์หรือการทำพลาสติกคอมปาวด์นั้นเป็นการหลอมเม็ดพลาสติกด้วยความร้อน จากนั้นจึงเติมสารเติมแต่งและสารเสริมสภาพพลาสติกหรือพลาสติกไซเซอร์หรือพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ เข้าไปในสัดส่วนที่เหมาะสมแล้วผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เทคนิคการคอมปาวด์สามารถแบ่งออกเป็น 2 เทคนิค การคอมปาวด์แบบแบท (Batch compounding) และการคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous compounding) ดังแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 กระบวนการผลิตพลาสติกคอมปาวด์

สารเติมแต่ง (Additives)

สารเติมแต่ง (Additives) เป็นสารที่เติมลงไปในพอลิเมอร์เพื่อปรับเปลี่ยนหรือปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการหรือเป็นการลดคุณสมบัติที่ไม่ต้องการให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน

1. สารเติมแต่งที่ใช้ในพลาสติกสามารถแบ่งออกได้เป็น

1.1 สารเติมแต่งตามหน้าที่ (Functional additives: stabilizers, antistatic agents, flame retardants, plasticizers, lubricants, slip agents, curing agents, foaming agents, biocides, etc.) เช่น ช่วยในการป้องกันการเสื่อมสภาพ ปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพ ช่วยปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของผิวหน้า ช่วยในกระบวนการผลิตหรือในการแปรรูป ช่วยปรับเปลี่ยนคุณสมบัติเชิงกล

1.2 สารให้สี (Colorants) เป็นสารเติมแต่งที่ผสมในพลาสติกเพื่อให้ความสวยงามและช่วยดึงดูดความสนใจ โดยอาจให้สี ความทึบ ความโปร่งแสง การเรืองแสง สารสีจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ได้แก่ ผงสี (Pigment) และสีย้อม (Dye)

1.3 สารตัวเติม (Fillers: mica, talc, kaolin, clay, calcium carbonate, barium sulphate) ใส่เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางอย่าง เช่น เพิ่มโมดูลัส เพิ่มความแข็งทำให้พื้นมีสีขาวเพื่อการใส่สีต่อไป ปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า ลดต้นทุนการผลิต เป็นต้น

1.4 สารเสริมแรง (Reinforcements: e.g. glass fibres, carbon fibres) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลให้กับพลาสติก เช่น ความทนแรงดึง และความทนแรงดัดโค้งประเภทของสารเติมแต่งและปริมาณที่ใช้ในการผลิตพลาสติก และพบมากที่สุดในการใช้งาน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 สารเติมแต่งที่ใช้ในการผลิตพลาสติก

Type of additive	Typical amount in % w/ w	Comments	Substances
Functional additives			
Plasticizers	10-70	Around 80% used in PVC and the remaining 20% in cellulose plastic	Short and medium chain chlorinated paraffins (SCCP-MCCP); Diisoheptylphthalat (DIHP); DHNUP; Benzyl butyl phthalate (BBP); Bis (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP): (2-methoxyethyl) phthalate (DMEP): Dibutyl phthalate (DBP); Diisobutyl phthalate (DiBP); Tris (2-chloroethyl) phosphate (TCEP);
Flame retardants	12-18 (for brominated)	Three groups: organic non-reactive, reactive; inorganics	Short and medium chain chlorinated paraffins (SCCP-MCCP); Boric acid; Brominated flame retardants; Tris (2-chloroethyl) phospate (TCEP)

ตารางที่ 2-2 (ต่อ)

Type of additive	Typical amount in % w/ w	Comments	Substances
Stabilizers, Antioxidants and UV stabilizers	0.05-3	Amount depends on chemical structure of additive and of plastic polymer. Phenolic antioxidants are used in low amounts and phosphites in high. Lowest amounts in polyolefins (LLDPE, HDPE), higher in HIPS and ABS	Bisphenol A (BPA); Cadmium compounds; Lead compounds; Nonylphenol compounds; Octylphenol; 1,3,5-Tris (oxiran-2-ylmethyl)-1,3,5-triazinane-2,4,6-trione (TGIC)/1,3,5-tris[(2S and 2R)-2,3,-epoxypropyl]-1,3,5,-triazine-2,4,6,-(1H,3H,5H)-trione (β-TGIC)
Heat stabilizers	0.5-3	Used in PVC. Based on lead, tin, barium, cadmium and zinc compounds. Lead is most efficient and used in the lower amounts.	Cadmium compounds; Lead compounds; Nonylphenol (barium and calcium salts);
Slip agents	0.1-3	Amounts depend on chemical structure of slip agent and plastic polymer type	
Lubricants (internal and external)	0.1-3		
Antistatics	0.1-1	Most types are hydrophilic and can migrate to water	

ตารางที่ 2-2 (ต่อ)

Type of additive	Typical amount in % w/ w	Comments	Substances
Curing agents	0.1-2	Peroxides and other crosslinkers. Catalysts, accelerators	4,4'-Diaminodiphenylmethane (MDA); 2,2'-dichloro-4,4'-methylenedianiline (MOCA); Formaldehyde-reaction products with aniline; Hydrazine; 1,3,5-Tris (oxiran-2-ylmethyl)-1,3,5-triazinane-2,4,6-trione (TGIC)/1,3,5-tris[(2S and 2R)-2,3-epoxypropy1]-1,3,5- triazine-2,4,6-(1H,3H,5H)-trione (β-TGIC)
Blowing agents	Depends on the density of the foam and the potential gas production of the agent	Azodicarbonamide, benzene di-sulphonyl hydrazide (BSH), pentane, CO_2	Blowing agents
Biocides	0.001-1	Soft PVC and foamed polyurethanes are the major consumers of biocidea. They are of different chemical structures and include chorinated nitrogen sulphur heterocycles and compounds based on tin, mercury, arsenic, copper and antimony, e.g. tributyltin and 10,10'-oxybisphenoarsine	Arsenic compounds; Organic tin compounds; Triclosan

ตารางที่ 2-2 (ต่อ)

Type of additive	Typical amount in % w/ w	Comments	Substances
Colorants			
Soluble (eg.azocolorants)	0.25-5	Migrates easily. Used in highly transparent plastics. They are expensive, have limitted light- and heat resistancese. They are used in PS, PMMA and cellulose plastics to give a bright transparent colour.	Soluble (eg.azocolorants)
Organic pigments	0.001-2.5	Insoluble low migration tendency	Cobalt (II) diacetate
Inorganic pigments	0.01-10	E.g. zinc sulphide, zinc oxide, iron oxide, cadmium-mangane based, chromium based, ultramarine and titanium dioxide	Cadmium compounds; Chromium compounds; Lead compounds
Special effect	Varies with the effect and substance in question	Aluminium and copper powder, lead carbonate or bismuthoxichloride and substances with fluorescence. Substances with fluorescence might migrate, the former not	
Fillers	Up to 50	Calcium carbonate, talk. Clay, zinc oxide, glimmer, metal powder, woog powder, asbest, barium sulphate, glass microspheres, silicious earth	

ตารางที่ 2-2 (ต่อ)

Type of additive	Typical amount in % w/ w	Comments	Substances
Reinforcements	Glass (15-30%)	Glass fibers, carbon fibers, aramide fibers. 15-30% is for glass only due to the high density of glass.	

ปัจจัยทางเทคนิคที่ควรพิจารณาในการเลือกสารเติมแต่งเมื่อทำการออกสูตรใหม่ เช่น การช่วยในการขึ้นรูป ลักษณะภายนอกของชิ้นงาน การประยุกต์ใช้งานในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ในการพิจารณาสารเติมแต่ง ราคาก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณานอกเหนือจากคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการ

การตรวจสอบค่าความแตกต่างของสี (DE)

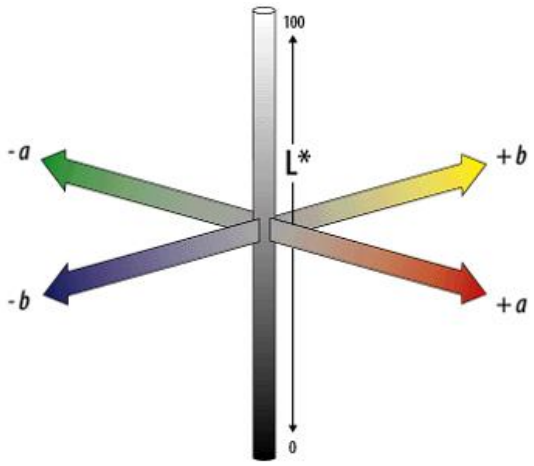
ส่วนใหญ่แล้วการนำเม็ดพลาสติกไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ นั้น นอกจากจะเป็นการเพิ่มสีสันความสวยงามให้กับผลิตภัณฑ์เพื่อดึงดูดความสนใจของผู้ใช้และผู้พบเห็นแล้ว ในบางครั้งการผสมสีลงในพลาสติกยังมีประโยชน์ในการแยกชนิดของผลิตภัณฑ์นั้น เช่น ที่เราพบในชีวิตประจำวัน คือ การเติมสีลงในปลอกหุ้มสายไฟพลาสติกหรือเติมสีลงในปลอกของปากกาลูกลื่นเพื่อที่จะแยกว่าเป็น ปากกาสีดำ สีแดง สีน้ำเงิน เป็นต้น

ดังนั้น เมื่อการใช้งานพลาสติกจะต้องมีการผสมสีลงไปด้วยนั้น การที่จะควบคุมคุณภาพของสีในชิ้นงานแต่ละรอบการผลิต นอกจากจะวัดด้วยสายตาแล้วจะต้องมีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ มาช่วยกำหนดมาตรฐานในการวัดสีหรือที่เรียกว่า เครื่องวัดสี (Color meter) ซึ่งจะรายงานเป็นค่าความแตกต่างของสี (DE) เนื่องจากประสิทธิภาพในการรับรู้ของตามนุษย์ไม่เท่ากันและยังชินกับปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) ซึ่งนอกจากจะหมายถึงแหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ เช่น

ค่า C คือ อุณหภูมิในช่วง 6740 K เป็นแสงมาตรฐานในตอนกลางวันที่ปราศจากยูวี

ค่า CWF คือ แสงขาวเย็นของฟลูออเรสเซน อุณหภูมิอยู่ในช่วง 4200 K เป็นแสงในห้องทำงานทั่วไป

ค่า D65 คือ อุณหภูมิในช่วง 6500 K เป็นค่าเฉลี่ยของแสงอาทิตย์ ตั้งแต่พระอาทิตย์ขึ้นจนถึงตกดินใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานแต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะแสงอาทิตย์เท่านั้น จึงมีผู้กำหนดระบบการจัดสีอ้างอิงถึงแกนสามมิติ คือ ประกอบด้วยแกน L เป็นแกนยืนและแกน a, b เป็นแกนในแนวระนาบ ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 ลักษณะของเฉดสีแบบ CIE L*, a, b

โดยที่ แกน L แสดงค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าตั้งแต่ 0 (ดำ) จนถึง 100 (ขาว)

ส่วนแกน a แสดงค่าความเป็นสีแดงและสีเขียว

ค่า a เป็นบวก สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง

ค่า a เป็นลบ สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว

ส่วนแกน b แสดงค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน

ค่า b เป็นบวก สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง

ค่า b เป็นลบ สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน

และในการหาค่าความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลขนั้นเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2-4 จะพบว่าจุด ๆ หนึ่งใน Space นั้นเป็น L_1^*, a_1^*, b_1^* และเมื่อสีมีการเปลี่ยนเฉดสีไปจะได้อีกจุดใน Space เป็น L_2^*, a_2^*, b_2^* ซึ่ง 2 จุดนี้จะมีระยะห่างกันใน Space เท่าไร ก็จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความแตกต่างของสี ดังสมการ

$$DE = \sqrt{(DL)^2 + (Da)^2 + (Db)^2}$$

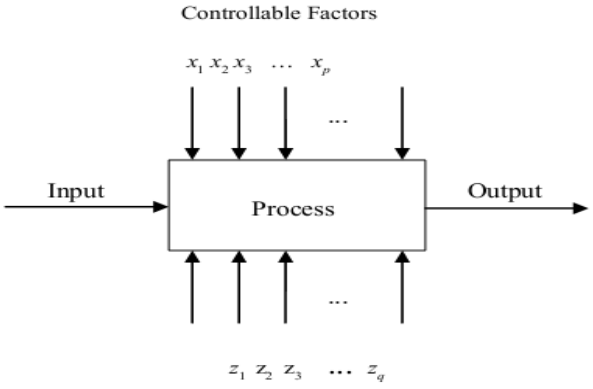
โดยที่ DE คือ ค่าความแตกต่างของสี ($DL = L_1^* - L_2^*$, $Da = a_1^* - a_2^*$, $Db = b_1^* - b_2^*$)

การวัดสีด้วยเครื่องวัดสีทำให้สามารถวัดค่าความแตกต่างของสีที่มีเฉดสีต่างออกไปเพียงเล็กน้อยได้ ซึ่งใช้ในการกำหนดให้ค่าความแตกต่างของสีเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

การออกแบบการทดลอง (Design of experiment)

การทดลอง (Experiment) คือ การจำลองสภาพความเป็นจริงให้มาอยู่ในสภาพที่เราสามารถควบคุมได้ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อเท็จจริงอันเป็นผลจากการปฏิบัติในการศึกษาทดลอง โดยการทดลองจะแบ่งเป็นการทดลองเบื้องต้น คือ การทดลองเพื่อให้ทราบผลอย่างกว้าง ๆ ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป และการทดลองขั้นตัดสินใจ เป็นขั้นตอนการนำสิ่งที่คัดเลือกได้จากการทดลองเบื้องต้นมาทำการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบหรือหาสิ่งที่ดีที่สุดในกลุ่ม โดยจะมีการใช้แผนการทดลองแบบต่าง ๆ

ตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนได้ด้วยแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ

จากภาพที่ 2-5 สามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการและทรัพยากรอื่น ๆ เข้าด้วยกันเพื่อเปลี่ยนอินพุตไปสู่เอาส์พุตที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่า โดยตัวแปรกระบวนการบางชนิด $x_1, x_2, \ldots x_p$ เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ ในขณะที่ตัวตัวแปรบางตัว $z_1, z_2, \ldots z_q$ เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้น ในการออกแบบทดลองจึงมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. หาตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อผลตอบ y

2. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อทำให้ผลตอบ y มีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด

3. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อทำให้ค่าความแปรปรวนของ y มีค่าต่ำที่สุด

4. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อทำให้ผลกระทบของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ $z_1, z_2, \ldots z_q$ มีค่าน้อยที่สุด

หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

1. การทำซ้ำ (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ประการแรกเรพลิเคชันทำให้สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ซึ่งเป็นหน่วยวัดขั้นพื้นฐาน สำหรับพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลองเรพลิเคชันทำให้สามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบ

2. การสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายเป็นแบบอิสระ การแรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริงและสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3. บล็อกกิง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลองบล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซ็ตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดจากการบล็อกกิง

ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลอง

1. ทรีทเมนต์ (Treatment) คือ สิ่งหรือวิธีปฏิบัติต่อสิ่งทดลอง เพื่อวัดผลเปรียบเทียบตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. หน่วยทดลอง (Experiment unit) เป็นมาตรฐานหรือหน่วยที่ใช้วัดอิทธิพลของทรีทเมนต์ ซึ่งโดยคำจัดความ หมายถึง สิ่งหนึ่งหรือกลุ่มหนึ่งของการทดลอง ซึ่งได้รับจากทรีทเมนต์เดียวกันในการกระทำครั้งใดครั้งหนึ่ง หน่วยทดลองมีขนาดไม่จำกัดอาจผันแปรได้จากการทดลองหนึ่งไปสู่อีกการทดลองหนึ่ง ถึงแม้จะใช้สิ่งทดลองเหมือนกันก็ตามในการทดลองแต่ละครั้งจึงต้องให้คำจำกัดความของหน่วยทดลองให้ชัดเจน

3. ปัจจัย (Factor) ได้แก่ กลุ่มของทรีตเมนต์ทั้งหลายที่มีความเกี่ยวข้องกัน (A particular class of related treatment) อาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระก็ได้ ปัจจัยนั้นอาจเป็นไปได้ทั้งข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ปัจจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น

3.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการดำเนินการทดลอง

3.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ อาจเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุน ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แบ่งออกเป็น

3.2.1 ตัวแปรรบกวน (Noise variable) หรือ Background variable เป็นตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสอบ (Response variable) ในการทดลองแต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เรากำลังทำการศึกษา ส่วนใหญ่มักเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม ในธรรมชาติ เช่น ลม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก เวลาและอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เป็นต้น

3.2.2 Nuisance variable คือ ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองแต่เราไม่ทราบมาก่อน เราสามารถกำจัดอิทธิพลของ Nuisance variable ได้โดยการสุ่ม

4. ตัวแปรตอบสนอง (Response variable) คือ ตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง เรียกอีกอย่างว่า ตัวแปร ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระในการทดลองหนึ่ง ๆ อาจวัดค่าตัวแปรตามมากกว่า 1 ก็ได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจกแจงของตัวแปรและความเป็นไปได้ทั้งปฏิบัติ ส่วนการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่าค่าสังเกตที่ได้รับจากทรีทเมนต์หนึ่ง ๆ ควรมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสมมติฐานความปกติ (Normality) เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลอง อาจจะใช้การแปลงข้อมูล (Transformation) ค่าสังเกตที่มีการแจกแจงไม่ปกติเป็นแบบปกติ

ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

เป็นการใช้วิธีเชิงสถิติในการออกแบบวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจว่าเรากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร จะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหาในขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลองบ่อยครั้งที่ต้องหาข้อมูลดิบจากบุคคลหรือหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง แผนกวิศวกรรม แผนกประกันคุณภาพ แผนกผลิต แผนกการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้า และแผนกบุคคล ความชัดเจนของปัญหาจึงมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้น ๆ

2. เลือกปัจจัย ระดับและขอบเขต ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงและกำหนดระดับที่จะเกิดขึ้นในการทดลองจะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดได้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้น ในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมาก ซึ่งความรู้นี้จำเป็นต้องได้มาจากประสบการณ์หรือความรู้จากทฤษฎี มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบด้วยว่าปัจจัยที่กำหนดมาทั้งหมดมีความสำคัญหรือไม่ เมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ กรองปัจจัยในการทดลองเพื่อการกรองปัจจัยที่มีประสิทธิภาพจึงควรจะกำหนดให้ระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อย ๆ และควรเลือกขอบเขตที่มีความกว้างมากพอ และเมื่อทราบว่าตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งอาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้

3. เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่และเป็นไปได้ว่าการทดลองหนึ่งอาจมีตัวแปรที่ใช้ในการปรับปรุงหลายตัวจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ซึ่งอาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้

4. เลือกการออกแบบการทดลอง ถ้ากิจกรรมการวางแผนการทดลองทำได้อย่างถูกต้อง การเลือกลำดับที่เหมาะสมกับการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลและการตัดสินใจว่าจะใช้วิธีอย่างไรในการเก็บข้อมูลจะทำให้แผนการทดลองดำเนินไปอย่างถูกต้อง แต่จำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา

5. ดำเนินการทดลองขณะดำเนินการทดลองจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างใกล้ชิด เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้จะทำให้การทดลองที่ทำไปนั้นไม่สามารถนำไปใช้ได้ ดังนั้นการวางแผนในขั้นตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ในขั้นตอนนี้ควรนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์. ข้อมูล เพื่อผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะได้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี วิธีการทางสถิติที่นำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน และข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติ คือ ทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ

7. สรุปและข้อเสนอแนะ หลังจากที่มีการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว ผู้ทดลองต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้จะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการนำเสนอผลงานให้ผู้อื่นรับทราบ นอกจากนี้แล้วการทำ

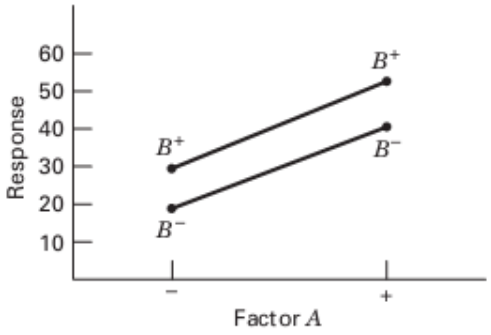
การทดลองเพื่อยืนยันผลควรจะทำขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่จะเกิดขึ้นอีกด้วย

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial designs)

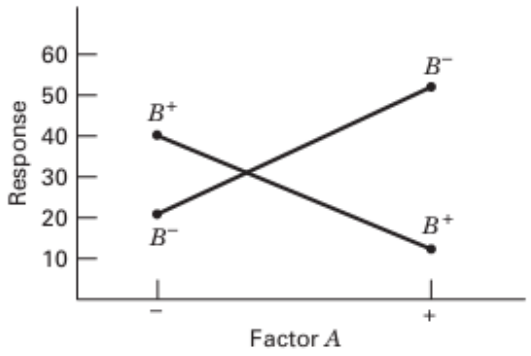
การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งเราต้องการศึกษาถึงผลร่วมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลหมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เรียกว่า ทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment combination) ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ซึ่งเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัย (Multiple factor experiment) และเนื่องจากมีปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้น นอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ได้ด้วย

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลมีประโยชน์หลายประการและเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัยยิ่งกว่านั้น การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลยังเป็นสิ่งจำเป็นเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้นอกจากนั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่นได้ ทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

อิทธิพลของปัจจัยร่วม คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพล (Effect) ของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม ซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 2-6 และเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 2-7 โดย A และ B คือ ปัจจัย 2 ปัจจัย



ภาพที่ 2-6 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล



ภาพที่ 2-7 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลจะมีรูปแบบทั่ว ๆ ไป คือ ในกรณีที่ปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ต่อไปเช่นนี้ เรื่อย ๆ และทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในลักษณะของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล ซึ่งจะมีจำนวนข้อมูลที่ได้ทั้งหมดในการทดลองเท่ากับ abc,…n และจะต้องมีเรพลิเคตอย่างน้อย 2 เรพลิเคต ($n > 2$) เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ถ้าอันตรกิริยาที่เป็นไปได้ทั้งหมดถูกนำเข้าไปพิจารณาในแบบจำลอง

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k จะใช้กับการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้น ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยเหล่านั้น ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \ldots \times 2 = 2^k$

วิธีการทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ 2^k ดังสรุปไว้ในตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-3 ขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบ 2^k

1	Estimate factor effects
2	Form initial model
3	Perform statistical testing
4	Refine model
5	Analyze residual
6	Interpret results

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k นั้นมีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้ จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้น การออกแบบการทดลองชนิดนี้จะทำให้สามารถกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลงได้ ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^k ดังแสดงในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^k

แหล่งความแปรผัน	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)
k main effects		
A	SS_A	1
B	SS_B	1
⋮	⋮	⋮
K	SS_K	1
$\binom{k}{2}$ two-factor interactions		
AB	SS_{AB}	1
AC	SS_{AC}	1
⋮	⋮	⋮
JK		1

ตารางที่ 2-4 (ต่อ)

แหล่งความแปรผัน	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)
$\binom{k}{3}$ tree-factor interactions		
ABC	SS_{ABC}	1
ABD	SS_{ABD}	1
⋮	⋮	⋮
IJK	SS_{IJK}	1
⋮	⋮	⋮
$\binom{k}{k}$ k-factor interactions		
ABC…K	$SS_{ABC...K}$	1
Error	SS_E	$2^k(n-1)$
Total	SS_T	2^k-1

การทดลองแบบสองกำลังเคเชิงแฟคทอเรียลกับจุดศูนย์กลาง (The 2^k factorial with center point)

ณัชชา พลศิลป์ (2553) กล่าวว่า การทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียลโดยมีสมมติฐานว่าอิทธิพลของปัจจัยที่จะทำการศึกษาว่ามีลักษณะเชิงเส้นตรงบริเวณพื้นที่ ๆ ศึกษาหรือไม่ และสามารถเขียนตัวแบบทางคณิตศาสตร์ซึ่งประกอบด้วยอิทธิพลของปัจจัยหลัก และอิทธิพลร่วมของปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งเป็นตัวแบบกำลังหนึ่ง (First-order model) ดังสมการต่อไปนี้

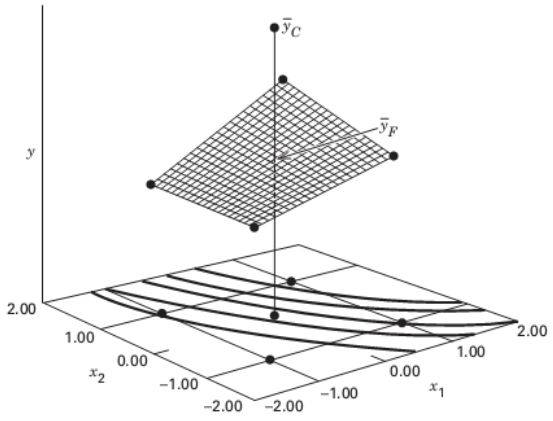
$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j + \sum_{i<j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

ในการทดสอบสมมติฐานว่าอิทธิพลของปัจจัยที่ทำการศึกษาอยู่มีลักษณะเชิงเส้นตรงบริเวณที่ที่ทำการศึกษาอยู่หรือไม่ การทดสอบนี้จะใช้ลักษณะการเป็นพื้นที่ผิวเส้นโค้ง (Curvature) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ตอบสนอง (Response function) ว่าปัจจุบันค่าปรับตั้งของกระบวนการมีลักษณะเชิงเส้นตรงหรือไม่ ดังนั้น สมการที่ผ่านมาแสดงถึงการเป็นกำลังหนึ่งซึ่งไม่เพียงพอต่อการอธิบายความสัมพันธ์เชิงพื้นผิวได้ ดังนั้น ต้องใช้สมการพื้นที่ผิวตอบสนองกำลังสอง (Second-order response surface model) ในการอธิบายการเป็นพื้นที่ผิวโค้งที่กล่าวไว้นั้น โดยที่แสดงไว้ที่สมการต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j + \sum_{i<j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^{k} \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon$$

โดยที่ β_{jj} จะแสดงถึงผลขั้นที่สอง (Second-order effect) หรือผลแบบควอดราติก (Quadratic effect) และสมการนี้เรียกว่าแบบจำลองพื้นผิวของผลตอบขั้นที่สอง (Second-order response surface model) การหาว่าบริเวณที่ศึกษาจะมีลักษณะการเป็นพื้นที่ผิวโค้งหรือไม่นั้น ทำได้โดยการทำการทดลองซ้ำ (Replicate) ในบริเวณตรงกลางของระนาบ (Plane) ที่เกิดจากการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล เรียกการเติมการทดลองลงไปในบริเวณตรงกลางนี้ว่าการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียลกับจุดศูนย์กลาง (The 2^k factorial with center point)

เพื่อแสดงวิธีการดังกล่าว พิจารณาการออกแบบ 2^2 ที่มีข้อมูล 1 ตัวที่แต่ละจุดของแฟคทอเรียล (-,-), (+,-), (-,+), (+,+) และ n_c คือ ข้อมูลที่จุดศูนย์กลาง (0, 0) ดังแสดงในภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 การออกแบบ 2^2 ที่มีจุดศูนย์กลาง

ทำการหาค่าเฉลี่ยที่มุม ($\bar{y}_F$) ทั้งสี่มุมและให้ทำการเฉลี่ยที่จุดศูนย์กลาง ($\bar{y}_C$) หาก ($\bar{y}_F - \bar{y}_C$) มีค่าน้อยแสดงว่าจุดศูนย์กลางนี้จะอยู่บนหรือใกล้กับระนาบที่ผ่านจุดของแฟคทอเรียลและไม่มีลักษณะของส่วนโค้งแบบควอดราติก ซึ่งการทดสอบความเป็นส่วนโค้งแบบบริสุทธิ์เมื่อมีการเติมจุดเข้าไปที่จุดศูนย์กลางของการออกแบบ 2^k คือ การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ

$$H_0 : \sum_{j=1}^{k} \beta_{jj} = 0$$

$$H_0 : \sum_{j=1}^{k} \beta_{jj} = 0$$

วิธีพื้นผิวตอบสนอง

ณัชชา พลศิลป์ (2553) กล่าวว่า จากการวิเคราะห์ผลการทดลองถึงแม้ว่าค่า R^2 และ R^2 Adjusted ที่ได้จะสูงแต่ไม่สามารถนำผลการทดลองไปใช้ต่อได้เนื่องจากค่าของ Curvature มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้กราฟที่ได้มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรงทำให้ไม่สามารถหาค่า Optimization ได้จากสมการ First order จึงต้องเปลี่ยนการทดลองจาก 2^k แฟคทอเรียลที่มีจุดศูนย์กลางมาเป็นแผนการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology; RSM) เป็นการรวมกันของวิธีการทางด้านคณิตศาสตร์ และทางด้านสถิติเข้าด้วยกัน เพื่อใช้เป็นแบบจำลองของการวิเคราะห์ปัญหามีจุดประสงค์เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับกลุ่มของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองนั้น ๆ และเพื่อหาเงื่อนไขของปัจจัยต่าง ๆ ในระบบที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด วิธีการนี้ได้มีการเสนอแนะครั้งแรกโดย Box และ Wilson ปี 1951 หลังจากนั้นจึงมีการพัฒนากันต่อ ๆ มา วิธีการดังกล่าวนี้ใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) มาประยุกต์ในการหารูปแบบความสัมพันธ์ที่เรียกว่าโพลิโนเมียล (Polynomial model) โดยทั่วไปถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรของพื้นผิวตอบสนองนั้นจะพิจารณารูปแบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 1

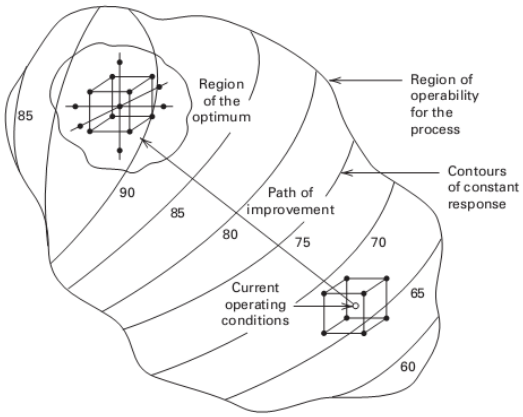
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

หรือถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบจะพิจารณารูปแบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 2

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

ส่วนการประมาณค่าพารามิเตอร์หรือสัมประสิทธิการถดถอยในรูปแบบดังกล่าวจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชั่นผลตอบได้อย่างดีเพียงพอ ดังนั้น การวิเคราะห์พื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นมานี้จะสามารถประมาณค่าได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริง พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองสามารถที่จะถูกประมาณได้เป็นอย่างดี ถ้าทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสมการออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวผลตอบสนองเรียกว่า การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface design)

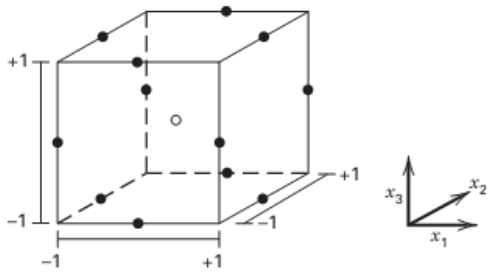
การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอนเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยที่ก่อให้เกิดการทำงานอย่างน่าพอใจ ดังแสดงในภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 ลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-behnken design)

เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับฟิตพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟคทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย



ภาพที่ 2-10 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับสามตัวแปร

เนื่องจากการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ และไม่ได้รวมเอาจุดใด ๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ ดังภาพที่ 2-10 ซึ่งการกระทำ เช่นนี้ มีประโยชน์มากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์เป็นการรวมเอาปัจจัยระดับ (Factor-level combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปไม่ได้ที่จะทำการทดลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านกายภาพของกระบวนการ

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัวหนึ่ง เรียกว่า ตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนอง (Dependent or response variable) นิยมเขียนแทนด้วย Y และตัวแปรอื่นหนึ่งตัว เรียกว่า ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรพยากรณ์ (Independent or predictor variable) นิยมเขียนแทนด้วย X มีวัตถุประสงค์ที่จะประมาณหรือพยากรณ์ค่าตัวแปรตามที่เป็นตัวแปรสุ่มจากตัวแปรอิสระที่ทราบค่าหรือค่าคงที่ (Known or fixed values) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอยมี ดังนี้

สร้างแบบจำลองการถดถอย

ฉัชชา พลศิลป์ (2553) กล่าวว่า ในกรณีที่ต้องศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพียงสองตัวจะใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression) แต่เมื่อต้องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่สามตัวขึ้นไปจะใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเพียง 1 ตัวกับตัวแปรตาม 1 ตัว โดยกำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ตัวแปรจากกราฟแผนภาพการกระจาย (Scatter plot) ตัวอย่างความสัมพันธ์อาจกำหนดได้ในรูปแบบ ต่อไปนี้

สมการเส้นตรงเต็มรูป $Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$

สมการเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด $Y = \beta_1 x + \varepsilon$

สมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง $Y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon$

สมการโพลิโนเมียลดีกรีสาม $Y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \varepsilon$

2. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ

คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปกับตัวแปรตาม 1 ตัว การกำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ กำหนดแผนภาพจากการกระจาย (Scatter plot) หรือแผนภาพเมตริกซ์ (Matrix plot) ซึ่ง ก็คือ การพล็อตแผนภาพการกระจายหลายรูปไว้ในรูปเดียวกัน ตัวอย่างความสัมพันธ์อาจกำหนดได้ ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_1 x_1^2 + \beta_2 x_2^2 + \varepsilon$$

ประมาณค่าพารามิเตอร์ (Estimate parameters)

จากข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์การถดถอย สามารถกำหนดรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย และการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณโดยใช้รูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย (Simple linear regression equation) และสมการถดถอยเชิงเส้นตรงพหุคูณ (Multiple linear regression equation) ตามลำดับ ซึ่งเป็นการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย β_j โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ได้ค่าประมาณเป็นค่า b_j ซึ่งจะมีค่าความแปรปรวนต่ำที่สุด รูปแบบที่ได้ ดังนี้

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1 x_{1i} + \cdots + b_k x_{ki}$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA)

เมื่อมีตัวแปรอิสระหลายตัวในการวิเคราะห์การถดถอย สามารถทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ของการถดถอยพหุคูณ หรือความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบ (Y) และเซตของตัวแปรอิสระ $(x_1, x_2, \cdots, x_k)$ ซึ่งการทดสอบจะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 2-5 เป็นการแบ่งความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับตัวแปรออก ตามสาเหตุของความผันแปร คือ ความผันแปรของ Y เนื่องมาจากความไม่แน่นอนของข้อมูลรอบเส้นถดถอย โดยตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \cdots = \beta_k = 0$$

$$H_1: \text{มีอย่างน้อยหนึ่ง } \beta_j \neq 0 \text{ โดยที่ } j = 1,2,\ldots,k$$

สถิติสำหรับทดสอบ คือ

$$F = \frac{MSR}{MSE}$$

จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $F > F_{\alpha,k,n-k-1}$ โดย k คือ จำนวนพารามิเตอร์

ถ้ายอมรับ H_0 หมายความว่า ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม แต่ถ้าปฏิเสธ H_0 หมายความว่า มีตัวแปรอิสระ X_j อย่างน้อยหนึ่งตัวที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณได้มีประโยชน์ต่อการพยากรณ์หรืออธิบายตัวแปรตาม

ตารางที่ 2-5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอยพหุคูณ

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (df)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F
Regression	SS_R	k	$MS_R = SS_R/k$	$F= MS_R/MS_E$
Error	SS_E	n-k-1	$MS_E = SS_E/ (n-k-1)$	
Total	SS_T	n-1		

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (The coefficient of determination; R^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองได้ในสัดส่วนเท่าใด คำนวณได้จาก

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T}$$

การเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองจะทำให้ R^2 มีค่าเพิ่มขึ้นไม่ว่าตัวแปรที่เติมเข้าไปนั้นจะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ เพื่อขจัดปัญหานี้จึงมีการปรับค่า R^2 เรียกว่า R^2 ที่ปรับแล้ว (Adjusted R^2) คำนวณได้จาก

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{MS_E}{MS_T} = 1 - [\frac{SS_E/(n-k-1)}{SS_T/(n-1)}]$$

สมการถดถอยที่ประมาณได้จะมีความเหมาะสมกับข้อมูล R^2_{adj} = 64% หรือมีค่ามากกว่า 0.64

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การถดถอย

ณัชชา พลศิลป์ (2553) การทดสอบสัมประสิทธิ์ β_j ของตัวแปรอิสระ X_j เป็นการทดสอบที่ช่วยตรวจสอบคุณค่าของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่อยู่ในรูปแบบการถดถอย โดยการทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม Y

การทดสอบ $\beta_j, j = 1,2, \dots, k$ เป็นการทดสอบว่าตัวแปรอิสระ X_j แต่ละตัวมีความสัมพันธ์ Y หรือไม่ โดยกำหนดให้ตัวแปรอิสระอื่น ๆ ที่เหลือมีค่าคงที่ หรือเป็นการยืนยันว่าการเพิ่มตัวแปรอิสระ X_j จะช่วยเพิ่มอำนาจให้กับสมการถดถอยหรือไม่ขณะที่มีตัวแปรอิสระอื่น ๆ อยู่ในสมการถดถอยแล้วโดยตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0$$

สถิติสำหรับการทดสอบ คือ

$$t = \frac{b_j}{S_{b_j}} = \frac{b_j}{\sqrt{MS_E * C_{jj}}}$$

เมื่อ C_{jj} คือ สมาชิกที่ j บนเส้นทแยงมุมของเมตริกซ์ $(X'X)^{-1}$ โดยที่

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} & \cdots & C_{0k} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1k} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{k0} & C_{k1} & C_{k2} & \cdots & C_{kk} \end{bmatrix}$$

จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $t > t_{\alpha/2,n-k-1}$ ถ้าปฏิเสธ H_0 แสดงว่า X_j มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม หรือการเปลี่ยนแปลงของ X_j มีอิทธิพลต่อค่าตัวแปรตาม สมควรที่ X_j จะอยู่ในสมการถดถอย

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model adequacy checking)

เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีสมมติฐานว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองต้องเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้

1. ตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ

ตรวจสอบได้ด้วยการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal probability plot) ของค่าความผิดพลาด (Residuals) ถ้าข้อสมมติฐานมีความถูกต้อง การนำเสนอข้อมูลด้วยกราฟดังกล่าวควรมีลักษณะเป็นเส้นตรง

2. ตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน

ตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูลลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ต้องไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับของการเก็บข้อมูล

3. ตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

ตรวจสอบได้จากแผนภูมิกระจาย (Residual plot) ซึ่งเป็นการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ ลักษณะกราฟที่ได้จากการพล็อตนี้ควรมีแนวโน้มที่มีการกระจายแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ) หากเกิดแนวโน้มของรูปทรง เช่น ลักษณะลำโพง แสดงว่าขัดแย้งกับข้อสมมติฐานดังกล่าว คือ ความแปรปรวนไม่คงที่

4. การทดสอบ Lack of fit

การทดสอบ Lack of fit เป็นการทดสอบทางสถิติอย่างหนึ่ง เพื่อทดสอบว่าสมการมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยการทดสอบจะแบ่งผลรวมของกำลังสองตกค้าง SS_E ไปเป็นสองส่วน คือ

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF}$$

โดยที่ SS_{PE} คือ ผลรวมของกำลังสองที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดโดยตรง และ SS_{LOF} คือ ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Lack of fit สำหรับสถิติที่ใช้ในการทดสอบ Lack of fit คือ

$$F_0 = \frac{SS_{LOF}/(m-p)}{SS_{PE}/(n-m)} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}}$$

หาก $F_0 > F_{\alpha,m-p,n-m}$ แล้วสรุปว่ารูปแบบการถดถอยไม่เหมาะสมกับข้อมูล ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอยดังแสดงในตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอย

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (df)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F
Regression	SS_R	p-1	MS_R	$F_{Model}= MS_R/MS_E$
Residual error	SS_E	n-p	MS_E	
Lack of fit	SS_{LOF}	m-p	MS_{LOF}	$F_{LOF}= MS_{LOF}/MS_{PE}$
Pure error	SS_{PE}	n-m	MS_{PE}	
Total	SS_T	n-1		

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วีรเทพ เฉลิมสมิทธิ์ (2550) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาปริมาณธาตุที่เป็นส่วนผสมทางเคมีของน้ำเหล็กที่ใช้ในการผลิตแท่งเหล็กดิบที่ทำให้เกิดความบกพร่องของเหล็กดิบน้อยที่สุด ซึ่งส่งผลให้เหล็กลวดที่ผลิตจากเหล็กดิบมีค่าความแข็งแรงมากที่สุด โดยประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียลในการทดลองเบื้องต้น และนำปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กลวดมาทำการทดลองอีกครั้ง โดยใช้การออกแบบการทดลองพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อก-เบห์นเคน จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดค่าความแข็งแรงมากที่สุด คือ ปริมาณคาร์บอน (A) ที่ 0.20 %/ kg ปริมาณแมงกานีส (B) ที่ 0.60%/ kg ปริมาณกำมะถัน (C) ที่ 0.05 %/ kg และปริมาณซิลิกอน (D) ที่ 0.50 %/ kg เมื่อนำผลจากการวิจัยมาใช้ในกระบวนการทำงานจริงพบว่า ไม่พบความบกพร่องที่เกิดขึ้นบนเหล็กดิบ และเมื่อนำเหล็กดิบไปผลิตเป็นเหล็กลวด พบว่า ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของเหล็กลวดที่ได้จะมีค่าระหว่าง 52.43-55.08 kg/ mm^2 ซึ่งผลวิจัยนี้สามารถลดความบกพร่องของเหล็กดิบได้ 100%

ณัชชา พลศิลป์ (2553) ทำการออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการพ่นสีรถยนต์ จากการศึกษาพบว่าระดับที่เหมาะสมในการพ่นสีรถยนต์ คือ ความหนืดที่ 17 วินาที อัตราการไหลของสีที่ 350 ลบ.ซม./ นาที ความดันลมที่ 3.5 บาร์ และระยะห่างในการพ่นที่ 37.5 เซนติเมตร จะทำให้ค่าความสว่างของเฉดสีบรอนซ์เงินมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากขึ้น และค่าดัชนีบ่งชี้ความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนปรับปรุง

อนุวิทย์ สนศิริ (2553) ได้ประยุกต์หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสมสำหรับแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยความร้อนของพลาสติกแผ่น ด้วยวิธีการออกแบบส่วนผสมและกระบวนการ โดยมีปัจจัยในการศึกษา 5 ปัจจัย คือ เรซิน อลูมิเนียม ทัลคัม อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเซ็ตตัว โดยได้สูตรในการทดลองทั้งหมด 46 สูตร หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์จากค่าผลตอบ พบว่าส่วนผสมที่เหมาะสม คือ เรซิน 53.02 กรัม อลูมิเนียม 24.00 กรัม ทัลคัม 22.98 กรัม อุณหภูมิ 80.71 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการเซ็ตตัว 7 ชั่วโมง เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมวัสดุผสมที่เหมาะสมในการผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยความร้อนของพลาสติกแผ่น ซึ่งให้ค่าความแข็งมากที่สุด คือ 86.6 ชอร์ดี

คุณวุฒิ เครือศรี (2554) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของวาล์วไอดีในกระบวนการอบคืนตัว โดยประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียลในการทดลองเบื้องต้นเพื่อกรองปัจจัยทั้ง 4 และนำปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของวาล์วไอดีมาออกแบบการทดลองอีกครั้ง เพื่อวิเคราะห์หาผลที่ดีที่สุด พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของวาล์วไอดี คือ อุณหภูมิเตา (A) เท่ากับ 650 องศาเซลเซียล และเวลาในการอบชุบ (B) ที่ 40 นาที

ซึ่งได้ค่าความแข็งที่ 37.5 HRC เมื่อนำมาผลิตจริงพบว่าสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อเครื่องมือตัดได้ 16,000 บาทต่อเดือน และเพิ่มเวลาในการอบคืนตัวได้อีก 33.33%

อดุลย์ จิตรอารี (2555) ได้ออกแบบการทดลองเพื่อการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปในการจำลองกระบวนการฉีดชิ้นส่วนพลาสติกเอบีเอส โดยนำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Moldex3D จากการจำลองกระบวนการฉีดโดยทดลองตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4} พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพล คือ อัตราการฉีด เวลาย้ำ อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก และเวลาหล่อเย็น เมื่อนำปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย มาวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมด้วยแผนการทดลองแบบบางส่วน พบว่า ได้ค่าระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าการเสียรูปของชิ้นส่วยต่ำที่สุดเท่ากับ 3.97 มิลลิเมตร เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราการฉีดที่ 58% เวลาย้ำที่ 6 วินาที อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติกที่ 221 องศาเซลเซียส และเวลาหล่อเย็นที่ 55 วินาที

ศิริลักษณ์ พานโคกสูง (2552) ศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมแป้งข้าว/ แกลบข้าว/ พอลิเอทิลีน โดยประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2^5 แฟคทอเรียล พบว่า ปัจจัยและค่าที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าว/ LDPE คือ ความเร็วในการฉีด 80% ความดันฉีดสูงสุด 40 บาร์ ความดันย้ำ 60 บาร์ และอุณหภูมิในการฉีด 175 องศาเซลเซียล โดยให้ค่าความแข็งแรงดึง 15.62 เมกกะปาสคาล และพอลิเมอร์ผสมระหว่างแกลบข้าว/ LDPE คือ ความเร็วในการฉีด 45% ความดันฉีดสูงสุด 85 บาร์ ความดันย้ำ 75 บาร์ และอุณหภูมิในการฉีด 175 องศาเซลเซียล โดยให้ค่าความแข็งแรงดึง 13.95 เมกกะปาสคาล

สริตา สุวรรณธีระกิจ (2549) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่า Color strength ของแม่สีและเสนอสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล จากการศึกษา พบว่า แม่สีสีน้ำเงินมีปริมาณน้ำ 35 กก. อัตราไหล 500 กก./ ชม. ความเร็วรอบมอเตอร์ 820 รอบ/ นาที, แม่สีสีเหลืองมีปริมาณน้ำ 50 กก. อัตราการไหล 250 กก./ ชม. ความเร็วรอบมอเตอร์ 820 รอบ/ นาที, แม่สีสีแดงมีปริมาณน้ำ 35 กก. อัตราการไหล 250 กก./ ชม. ความเร็วรอบมอเตอร์ 820 รอบ/ นาที และแม่สีสีเขียวมีปริมาณน้ำ 35 กก. อัตราการไหล 300 กก./ ชม. ความเร็วรอบมอเตอร์ 820 รอบ/ นาที จะทำให้ค่า Color strength ของแม่สีเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการปรับปรุง

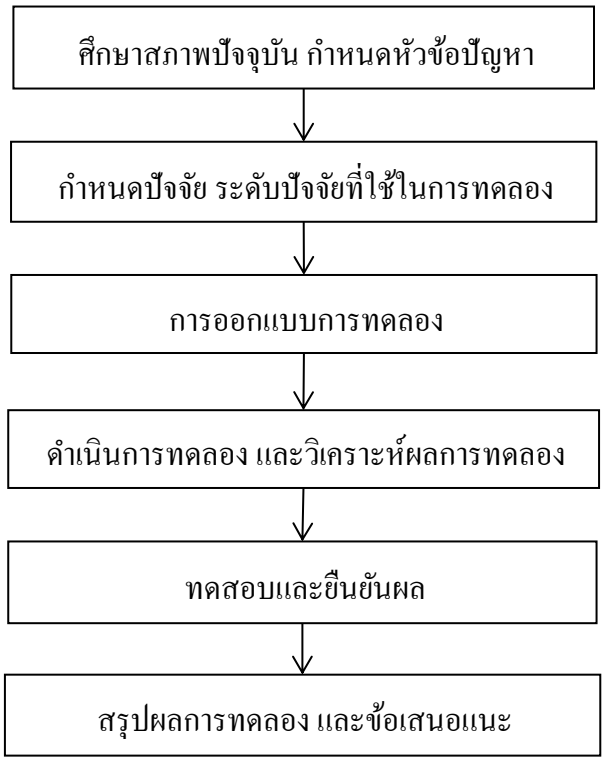
ณัฐพนธ์ ภัททกุล (2545) ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองทางสถิติเพื่อกำหนดสูตรผสมน้ำมันหล่อเย็นล้วน โดยศึกษาสารปรุงแต่ง 4 ประเภท คือ สารรับแรงกดสูง สารต้าน

การกัดกร่อน สารต้านการเกิดออกซิเดชั่น สารต้านการเกิดฟอง นำมาผสมกันแล้วทำการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันตัดล้วน 4 ประการ คือ การรับแรงกดสูง การต้านทานการกัดกร่อน การต้านทานออกซิเดชั่น และการต้านทานการเกิดฟอง โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติดังกล่าวกับน้ำมันหล่อเย็นล้วนอุตสาหกรรม เพื่อหาเปอร์เซ็นของสารปรุงแต่งที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นน้ำมันตัดล้วน จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าสารรับแรงกดสูงสามารถรับแรงกดสูงได้เทียบเท่ากับน้ำมันหล่อเย็นอุตสาหกรรม และยังสามารถต้านทานการเกิดฟอง ส่วนสารต้านทานการเกิดฟองสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้ แต่สารต้านทานการเกิดออกซิเดชั่น เมื่อผสมรวมกับสารต้านทานการเกิดฟอง พบว่า ไม่สามารถทำหน้าที่ต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้ สำหรับสูตรผสมน้ำมันหล่อเย็นล้วนที่ได้จากการวิจัยนี้ สารรับแรงกดสูง 3% และสารต้านทานการเกิดฟอง 0.01% โดยมีคุณสมบัติในการต้านทานการสึกหรอ และการต้านทานการเกิดฟองได้เทียบเท่ากับน้ำมันหล่อเย็นล้วนอุตสาหกรรม และระดับของการกัดกร่อนอยู่ในระดับที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM D-130

อัจฉรียา วังวิเศษ (2553) ทำการศึกษาเพื่อลดสัดส่วนข้อบกพร่องในกระบวนการผสมสี โดยเริ่มต้นจากการหาสาเหตุของข้อบกพร่องในกระบวนการผสมสีโดยใช้การวิเคราะห์แขนงความบกพร่อง (Fault tree analysis: FTA) และการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure mode and effect analysis: FMEA) จากนั้นทำการประเมินค่าความเสี่ยงชี้นำ (Risk priority number, RPN) ของแต่ละสาเหตุเพื่อนำมากำหนดเป็นมาตรการแก้ไข ได้แก่ 1) การออกแบบการทดลอง 2) การกำหนดวิธีการทำงานที่ถูกต้อง 3) การปรับปรุงวิธีการทำความสะอาดเครื่องจักร 4) การปรับปรุงแบบฟอร์มการทำงาน 5) การกำหนดการบำรุงรักษาเครื่องจักร 6) การกำหนดเกณฑ์การควบคุมคุณภาพวัตถุดิบ 7) การปรับปรุงระบบการวัดความหนาของฟิล์มสี 8) การพัฒนาระบบการฝึกอบรมพนักงาน ซึ่งผลที่ได้รับ พบว่า สัดส่วนข้อบกพร่องของกระบวนการผสมสีด้วยเครื่องทดลอง ลดลงจาก 82.9% เป็น 40.6% และกระบวนการผสมสีด้วยเครื่องจักรในการผลิตลดลงจาก 97.6% เป็น 62.5% ซึ่งส่งผลให้เวลาที่ใช้ในกระบวนการผสมสีต่อใบสั่งผลิตลดลงจาก 555 นาที เป็น 303 นาที

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยในกระบวนการผลิตคอมปาวด์ของโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยมี ดังนี้



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ศึกษาสภาพปัจจุบัน กำหนดหัวข้อปัญหา

ข้อมูลทั่วไปโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานกรณีศึกษาก่อตั้งขึ้นเมื่อปี 2536 โดยเป็นโรงงานผู้ผลิตในด้านการย้อมสีเม็ดพลาสติก (Coloring) การผสมสีเม็ดพลาสติก (Compound) แม่สีพลาสติก (Master batch) ของพลาสติกประเภทต่าง ๆ เพื่อส่งมอบให้กับลูกค้าในกลุ่ม เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์สำนักงาน รถยนต์ เป็นต้น โดยมีกำลังการผลิตสำหรับ Color compound 5,000 ตันต่อเดือน และ Master batch 600 ตันต่อเดือน และมีสูตรในการผลิตกว่า 1,000 สูตร การผลิตของโรงงานกรณีศึกษานั้น

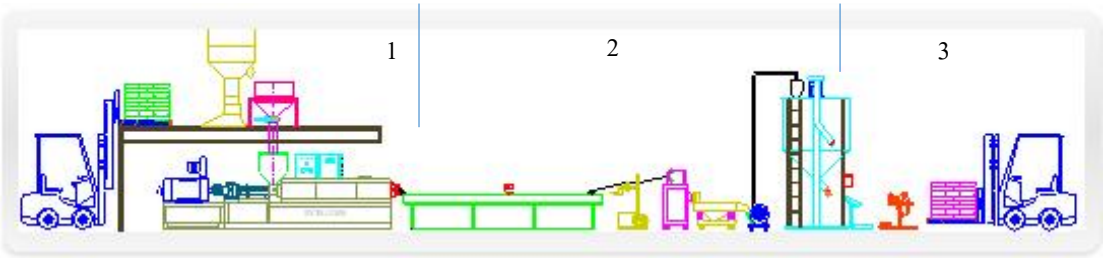
เป็นการผลิตตามคำสั่งซื้อของลูกค้า (Made to order) สำหรับงานที่ต้องการคุณสมบัติเฉพาะตัว เช่น สี คุณลักษณะและคุณสมบัติต่าง ๆ

ตารางที่ 3-1 ประเภทของผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา

Thermoplastic & Elastomer	Engineering plastic
HIPS HB/ V0	PC+ABS
PP HB/ VO	PC+FR
PMMA (Acrylic)	PC+GF 2
Thermoplastic Rubber	PC+GF 3
ABS HB/ V0/ Transparent	PC+GF 4
	PC+GF 5
	PC+GF 6
	PC+GF
	PP+TALC 1
	PP+TALC 2
	PP+TALC 3
	PP+TALC 4
	PP+TALC 5
	PP+TALC 6
	PP+TALC 7
	PP+TALC 8

กระบวนผลิตคอมปาวด์ของโรงงานกรณีศึกษา

กระบวนผลิตคอมปาวด์ของโรงงานกรณีศึกษา มีขั้นตอนดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 กระบวนผลิตคอมปาวด์ของโรงงานกรณีศึกษา

กระบวนการผลิตคอมปาวด์ของโรงงานกรณีศึกษา ประกอบด้วยกระบวนหลัก 3 กระบวนการ ได้แก่

1. กระบวนการผสมวัตถุดิบ โดยจัดเตรียมวัตถุดิบตามสูตรผสมที่ต้องการ ซึ่งประกอบด้วยวัตถุดิบหลัก คือ เม็ดพลาสติก (Base resins) สี (Colorant) สารเติมแต่ง (Additive) ฟิลเล่อร์ (Filler) และส่วนผสมอื่น ๆ ที่ผ่านการวิเคราะห์และคำนวณสัดส่วนที่เหมาะสมแล้ว

2. กระบวนการผสมเพื่อคลุกเคล้าส่วนผสมต่าง ๆ และหลอมด้วยความร้อนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นส่วนผสมต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในสภาพสารเหลวเข้มข้นจะถูกฉีดเป็นเส้นด้วยเครื่องเอ็กทรูเดอร์ (Extruder) เข้าสู่กระบวนการอัดและตัดให้เป็นเม็ดขนาดเท่า ๆ กัน

3. กระบวนการคัดแยกเม็ดพลาสติกที่ได้ขนาดเพื่อบรรจุหีบห่อ และจัดเก็บเข้าคลังสินค้าเพื่อรอส่งมอบให้ลูกค้าต่อไป

สำรวจสภาพปัจจุบัน กำหนดหัวข้อปัญหา

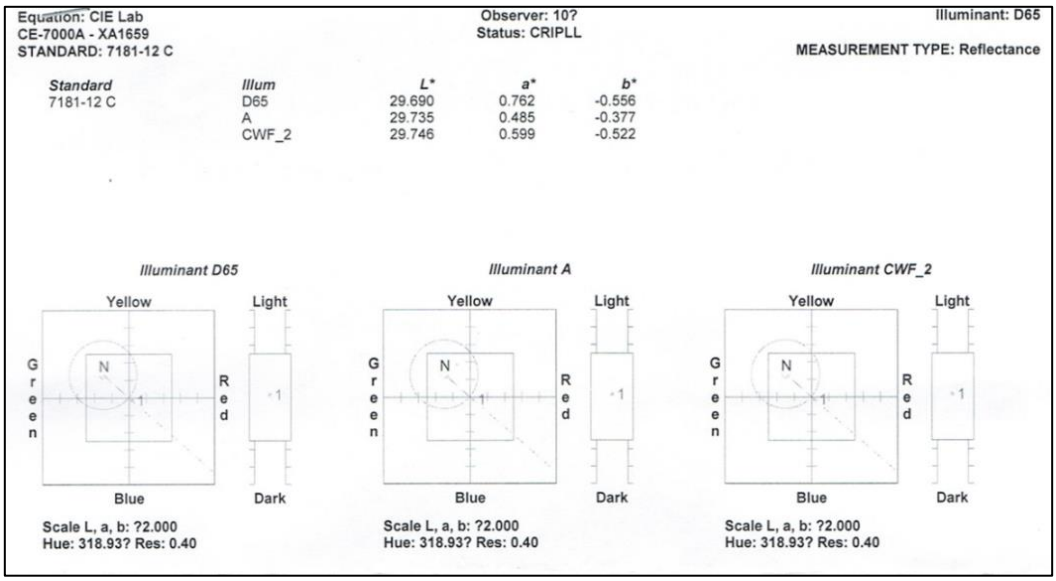
จากการศึกษากระบวนการทำงานของโรงงานกรณีศึกษา พบว่า ในกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาก่อนที่จะมีคำสั่งผลิตคอมปาวด์นั้น ทุกโค้ดสีที่ผลิตจะต้องผ่านการยอมรับจากลูกค้ามาแล้วซึ่งแต่ละโค้ดจะมีสูตรที่แตกต่างกันออกไปตามชนิดเม็ดและสี ซึ่งในกระบวนการทำสูตรนี้เป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดเพราะเป็นกระบวนการแรกที่จะทำให้เกิดการสั่งผลิต แต่ในกระบวนการนี้ต้องทำการทดลองอยู่หลายครั้งเพื่อหาสูตรผสมที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าเฉดสีใกล้เคียงกับชิ้นงานตัวอย่างมากที่สุด นั้นคือ ค่า DE = 0 ทางโรงงานกรณีศึกษาจะใช้วิธีการอิงประสบการณ์ในการปรับค่าสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งระยะเวลาในการทำสูตรแต่ละครั้งนั้นจะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ทำการทดลอง และความยากง่ายของสีแต่ละตัวบางครั้งก็ไม่สามารถทำสูตรสีตัวนั้นได้จนทำให้สูญเสียลูกค้าบางรายไป ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงได้เสนอวิธีการออกแบบ

การทดลองนำไปปรับใช้ในการทำสูตรสีครั้งนี้ของโรงงานกรณีศึกษา เพราะในกระบวนการนี้มีพารามิเตอร์ของสารเคมีต่าง ๆ ที่ต้องทำการควบคุมอยู่หลายชนิด และในการปรับค่าของสารเคมีต่าง ๆ นั้นจะมีอิทธิพลต่อค่าเฉดสีและคุณสมบัติของพลาสติกด้วย ดังนั้น ต้องอาศัยศาสตร์ความรู้ความเข้าใจในคุณสมบัติ หน้าที่ และปริมาณที่เหมาะสมของเม็ดพลาสติกและสารเคมีต่าง ๆ เป็นอย่างดีแล้ว การเลือกวิธีการทดลองที่เหมาะสมก็เป็นสิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่จะทำให้ได้สูตรผสมของเฉดสีตรงตามที่ลูกค้าต้องการ ภายใต้ต้นทุนที่เหมาะสม และการส่งมอบที่ทันเวลา

จากเหตุการณ์ดังกล่าวที่เกิดขึ้นทำให้ผู้วิจัยได้เลือกหัวข้อนี้และเข้าไปศึกษาในขั้นตอนการทำสูตรคอมปาวด์โดยเลือกการทำสูตรสีน้ำตาลดำ (Brown black) จากเม็ดเอบีเอส ที่จะนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิคส์ซึ่งจะมียอดการสั่งผลิตที่สูง ดังนั้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการทำสูตรสีเพื่อให้ได้ค่าเฉดสีใกล้เคียงกับแผ่นสีมาตรฐานจากลูกค้ามากที่สุด เพื่อนำไปกำหนดเป็นสูตรสีมาตรฐานในการผลิตจริงสำหรับสีน้ำตาลดำต่อไป โดยการกำหนดค่าสีในการทดสอบของแผ่นสีน้ำตาลดำที่ผลิตได้ต้องมีค่า (DL $\leq$ 1.0 และ Da, Db $\pm$ 0.5) เมื่อเทียบกับแผ่นสีมาตรฐานจากลูกค้า

การกำหนดปัจจัย ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดปัจจัยของส่วนผสมในสูตรการผลิต ได้มาจากค่าเฉดสีของแผ่นสีมาตรฐาน (Master plate) ที่วัดได้ดังแสดงในภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 ค่าสีที่วัดได้จากแผ่นสีตัวอย่างด้วยเครื่องวัดสี

โดย L a b เรียกว่าค่า STANDARD

L หมายถึง ความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (ดำ) จนถึง 100 (ขาว)

a หมายถึง แดง ถ้าติดลบ แสดงว่า แดงน้อย (เขียว)

b หมายถึง เหลือง ถ้าติดลบ แสดงว่า เหลืองน้อย (น้ำเงิน)

ในการพิจารณาการทำสูตรสีเม็ดพลาสติกในแต่ละครั้งจะพิจารณาจากค่า L, a และ b โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า L คือ สารที่ให้สีดำและขาว ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า a คือ สารที่ให้สีแดง ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า b คือ สารที่ให้สีเหลือง และผลของปัจจัยของสารที่ช่วยในกระบวนการผลิต

ซึ่งส่วนผสมในสูตรการผลิตครั้งนี้ประกอบด้วย คาร์บอนแบล็ค ไททาเนียมไดออกไซด์ สีย้อมสีแดง สีย้อมสีเหลือง แมกนีเซียมสเตียเรท White oil และเม็ดพลาสติกเอบีเอส แต่ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการทดลองครั้งนี้มีแค่ 4 ปัจจัยเท่านั้น คือ

1. คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)
2. สีย้อมสีแดง (Solvent dyes red)
3. สีย้อมสีเหลือง (Solvent dyes yellow)
4. แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate)

ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ที่เหลือจะกำหนดให้ใช้ในปริมาณคงที่ เนื่องจากเป็นสูตรทางเทคนิคของทางบริษัทและเพื่อควบคุมต้นทุนในการผลิต จึงมีการกำหนดให้ใช้สารเหล่านี้ในปริมาณที่คงที่ต่อสูตรการผลิต

ปัจจัยที่ใช้

สำหรับปัจจัยที่นำมาใช้ในสูตรการผลิตเอบีเอสคอมปาวด์สีน้ำตาลดำครั้งนี้ คือ

1. คาร์บอนแบล็ค (Carbon black) สูตรทางเคมี C มีลักษณะเป็นผงสีดำ ใช้เป็นสีดำสำหรับงานพลาสติกทั่วไป มีคุณสมบัติเป็น UV Absorber และช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

Surface area N2SA 198 m^2/ g

DBP absorption 55 cc/ 100g

pH 8

2. สีย้อมสีแดง (Solvent dyes red) สูตรทางเคมี $C_{20}H_{19}NO_2$ มีลักษณะเป็นผงสีแดง ใช้เป็นสีแดงสำหรับงานพลาสติกทั่วไป เป็นสารสีประเภทอินทรีย์ให้ความสดใส เข้ม และโปร่งแสง โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

Density 0.25 g/ cm^3

Melting point 147°C

Heat stability 300°C

3. สีย้อมสีเหลือง (Solvent dyes yellow) สูตรทางเคมี (Ti Sb Cr)O_2 มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ใช้เป็นสีเหลืองสำหรับงานพลาสติกทั่วไป เป็นสารสีประเภทอินทรีย์ให้ความสดใส เข้ม และโปร่งแสง โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

Density 0.20 g/ ml

Melting point 230°C

Heat Stability 280°C

4. แมกนีเซียม สเตียเรท (Magnesium stearate) สูตรทางเคมี $C_{36}H_{70}MgO_4$ มีลักษณะเป็นผงสีขาว เป็นสารหล่อลื่น สารเชื่อมที่เติมลงไปเพื่อช่วยในการขึ้นรูปและปรับปรุงคุณสมบัติการไหล และช่วยลดปัญหาการติดของพอลิเมอร์หลอมกับชิ้นส่วนของเครื่องจักร

Melting point 105-125°C

Specific gravity 1.028

Moisture (%) 5.0 max

ระดับปัจจัยที่ใช้

ในส่วนของระดับปัจจัยที่นำมาใช้ในสูตรการผลิตเอบีเอสคอมปาวด์สีน้ำตาลดำครั้งนี้ อ้างอิงมาจากการเทียบค่าสีกับข้อมูลสูตรการผลิตที่ผ่านมาของทางโรงงาน โดยเลือกสีที่มีค่าสีใกล้เคียงและอยู่ในโทนเดียวกันกับแผ่นสีตัวอย่าง

ตารางที่ 3-2 ระดับปัจจัยที่ใช้ศึกษา

ตัวแปร	ปัจจัย	ระดับปัจจัย (กรัม)		
		ต่ำ (-1)	จุดศูนย์กลาง (0)	สูง (+1)
A	คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)	0.3	0.35	0.4
B	สีย้อมสีแดง (Solvent dyes red)	0.1	0.15	0.2
C	สีย้อมสีเหลือง (Solvent dyes yellow)	0.05	0.075	0.1
D	แมกนีเซียม (Magnesium stearate)	0.3	0.4	0.5

จากตารางที่ 3-2 เป็นตารางแสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่าสี (DL, Da และ Db) ของเฉดสีน้ำตาลดำ แบ่งออกเป็น 4 ปัจจัยหลัก ดังต่อไปนี้

1. ปริมาณคาร์บอนแบล็คกำหนดไว้ 2 ระดับ คือ ต่ำ-สูง ในช่วง 0.3-0.4 และจุดศูนย์กลาง 0.35 (กรัม)

2. ปริมาณสีย้อมสีแดงกำหนดไว้ 2 ระดับ คือ ต่ำ-สูง ในช่วง 0.1-0.2 และจุดศูนย์กลาง 0.15 (กรัม)

3. ปริมาณสีย้อมสีเหลืองกำหนดไว้ 2 ระดับ คือ ต่ำ-สูง ในช่วง 0.05-0.1 และจุดศูนย์กลาง 0.075 (กรัม)

4. ปริมาณสีผงสีเหลืองกำหนดไว้ 2 ระดับ คือ ต่ำ-สูง ในช่วง 0.3-0.5 และจุดศูนย์กลาง 0.4 (กรัม)

ค่าตอบสนองที่ใช้

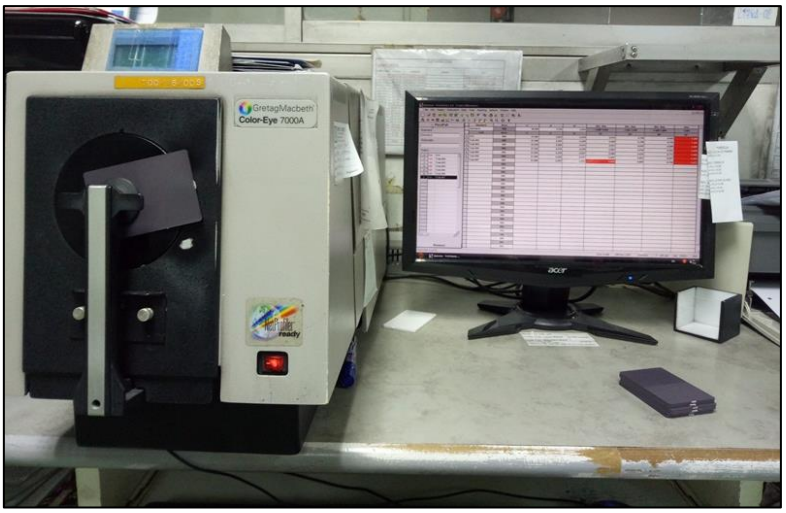
ตัวแปรตอบผลตอบสนอง (Response variable) คือ ตัวแปรที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามค่าปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้ตัวแปรตอบสนอง คือ ค่าสี (DL, Da และ Db) เขียนแทนด้วย Y โดยค่าตัวแปรตอบสนอง Y จะต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่ลูกค้ากำหนด ซึ่งอ้างอิงเทียบกับแผ่นสีมาตรฐาน (Master plate) คือ DL $\leq$ 1.0 และ Da, Db $\pm$ 0.5

DL คือ ค่าที่แสดงถึงความสว่างและความมืดของสี ซึ่งค่า L มีค่าเป็นบวกจะแสดงว่าชิ้นงานที่ทำการวัดมีความสว่างมากกว่าชิ้นงานที่ใช้อ้างอิง ในทางกลับกันถ้าค่า L มีค่าเป็นลบจะแสดงว่าชิ้นงานที่ทำการวัดมีความมืดมากกว่าชิ้นงานที่ใช้อ้างอิง

Da คือ ในกรณีถ้าค่า a มีค่าเป็นบวกจะแสดงว่าชิ้นงานที่ทำการวัดมีสีไปในทางสีแดง และถ้าในกรณีถ้าค่า a มีค่าเป็นลบจะแสดงว่าชิ้นงานที่ทำการวัดมีสีไปในทางสีเขียว

Db คือ ในกรณีถ้าค่า b มีค่าเป็นบวกจะแสดงว่าชิ้นงานที่ทำการวัดมีสีไปในทางสีเหลือง และถ้าในกรณีถ้าค่า b มีค่าเป็นลบจะแสดงว่าชิ้นงานที่ทำการวัดมีสีไปในทางสีน้ำเงิน

ส่วนของการวัดค่าสีจะใช้เครื่องวัดเฉดสี (Color meter) ดังแสดงในภาพที่ 3-4 เป็นการวัดค่าสีของแผ่นสีตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างกับแผ่นสีมาตรฐาน ซึ่งใช้หลักการทำงานโดยวัดค่าสีของวัตถุออกมาเป็นตัวเลขซึ่งสามารถนำไปคำนวณและทำนายสูตรผสมสำหรับการปรับค่าสีได้



ภาพ 3-4 เครื่องวัดเฉดสี (Color eye spectrophotometer รุ่น CE 7000A)

การออกแบบการทดลอง

การเลือกแบบการทดลอง

การออกแบบแผนการทดลองเบื้องต้นเพื่อทำการกรองปัจจัย (Screening) ที่ไม่น่าจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนองออกไป โดยนำหลักการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคทรอเรียล มีปัจจัยทั้งสิ้น 4 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟคทรอเทียล โดยกำหนดให้มีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และมีจุดศูนย์กลาง 4 จุด จะมีจำนวนครั้งของการทดลองรวมทั้งสิ้น 36 การทดลอง และจัดให้ลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่มเพื่อลดอคติจากตารางที่ 3-3 แสดงการออกแบบตารางการทดลองเบื้องต้น

ตารางที่ 3-3 การออกแบบการทดลอง

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A (Carbon black)	B (Solvent dyes red)	C (Solvent dyes yellow)	D (Magnesium stearate)	Y (DL)	Y (Da)	Y (Db)
16	1	1	1	1	1	1	1			
35	2	0	1	0	0	0	0			
3	3	1	1	-1	1	-1	-1			
2	4	1	1	1	-1	-1	-1			
5	5	1	1	-1	-1	1	-1			
26	6	1	1	1	-1	-1	1			
9	7	1	1	-1	-1	-1	1			
31	8	1	1	-1	1	1	1			
28	9	1	1	1	1	-1	1			
34	10	0	1	0	0	0	0			
17	11	1	1	-1	-1	-1	-1			
14	12	1	1	1	-1	1	1			
21	13	1	1	-1	-1	1	-1			
19	14	1	1	-1	1	-1	-1			
32	15	1	1	1	1	1	1			
30	16	1	1	1	-1	1	1			
11	17	1	1	-1	1	-1	1			
8	18	1	1	1	1	1	-1			
18	19	1	1	1	-1	-1	-1			
6	20	1	1	1	-1	1	-1			
20	21	1	1	1	1	-1	-1			
13	22	1	1	-1	-1	1	1			
1	23	1	1	-1	-1	-1	-1			

ตารางที่ 3-3 (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A (Carbon black)	B (Solvent dyes red)	C (Solvent dyes yellow)	D (Magnesium stearate)	Y (DL)	Y (Da)	Y (Db)
33	24	0	1	0	0	0	0			
4	25	1	1	1	1	-1	-1			
36	26	0	1	0	0	0	0			
10	27	1	1	1	-1	-1	1			
29	28	1	1	-1	-1	1	1			
23	29	1	1	-1	1	1	-1			
25	30	1	1	-1	-1	-1	1			
7	31	1	1	-1	1	1	-1			
22	32	1	1	1	-1	1	-1			
15	33	1	1	-1	1	1	1			
12	34	1	1	1	1	-1	1			
27	35	1	1	-1	1	-1	1			
24	36	1	1	1	1	1	-1			

การเตรียมการทดลอง

1. อุปกรณ์

1.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1.1.1 ABS resin

1.1.2 Carbon black

1.1.3 Solvent dyes red

1.1.4 Solvent dyes yellow

1.1.5 Magnesium stearate

1.1.6 Titanium dioxide

1.1.7 White oil

1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก AND (รุ่น GF200)

1.2.2 เครื่องฉีดพลาสติก BL 60 EK (รุ่น C160)

1.2.3 ถาดรอง

1.2.4 ช้อนตวงสาร

1.2.5 ถุงพลาสติก

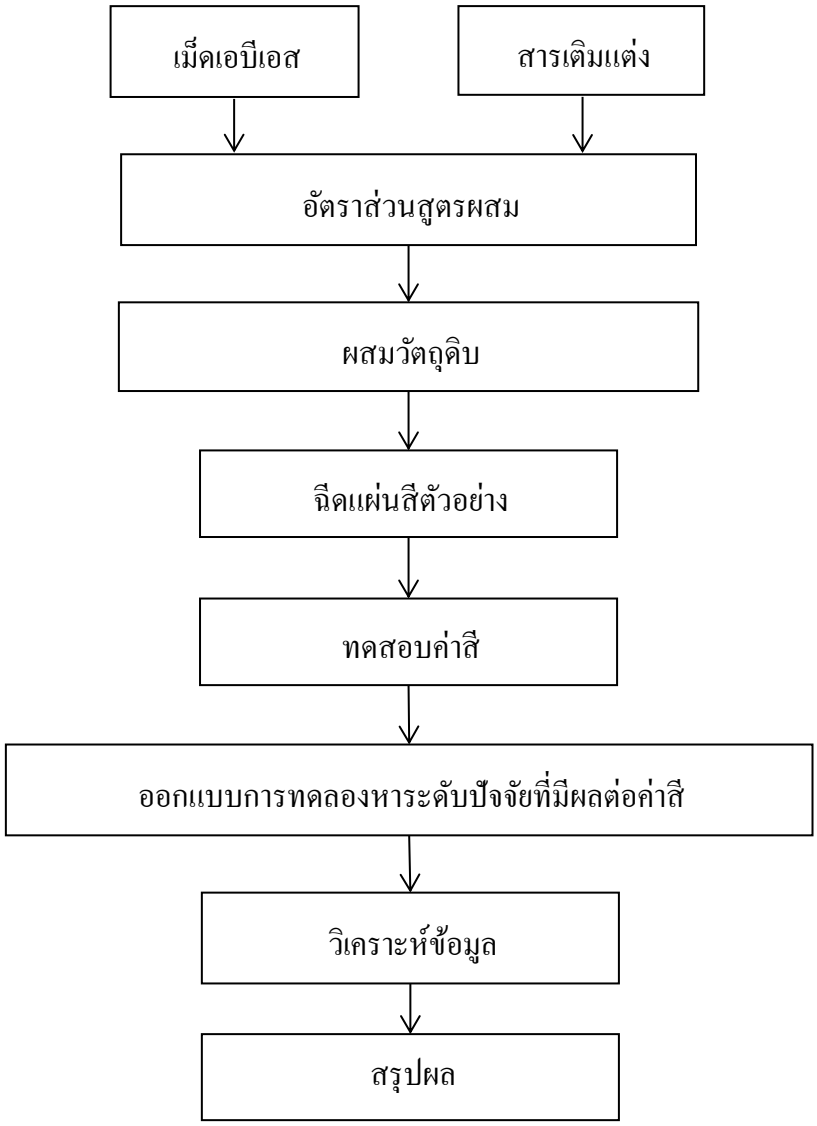
1.2.6 กรรไกร

1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1.3.1 เครื่องวัดเฉดสี (รุ่น CE7000A)

1.3.2 โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (Minitab V.17)

2. ขั้นตอนในการทดลอง



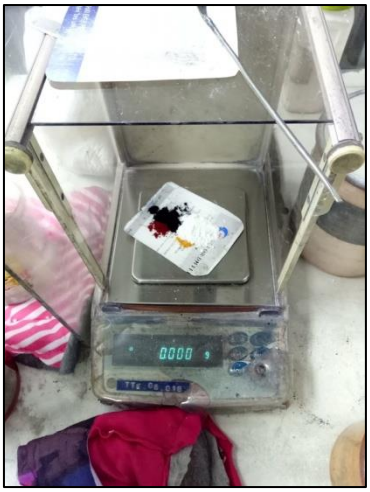
ภาพที่ 3-5 ลำดับขั้นตอนในการทดลอง

3. วิธีการ

3.1 เตรียมสารเคมี สีผง และเม็ดเอบีเอสที่ใช้ในการทำสูตรผสม

ภาพที่ 3-6 การเตรียมสารเคมี สีผง และเม็ดเอบีเอสที่ใช้ในการทำสูตร

3.2 ชั่งสารเคมีตามอัตราส่วนของแต่ละสูตรผสมที่ได้ออกแบบการทดลองไว้



ภาพที่ 3-7 การชั่งสารเคมี

3.3 ทำการผสมสารเคมีและเม็ดพลาสติกเข้าด้วยกัน

ภาพที่ 3-8 ผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกัน

3.4 ปรับตั้งค่าเครื่องฉีดพลาสติกสำหรับฉีดแผ่นสี

ภาพที่ 3-9 การปรับตั้งค่าเครื่องฉีดพลาสติก

ภาพที่ 3-10 แผ่นสีตัวอย่างที่ฉีดได้

3.5 ทดสอบค่าสีที่ได้จากการทดลอง

ภาพที่ 3-11 การวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดเฉดสี

ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองจากออกแบบ 2^4 แฟคทรอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลาง

2. ศึกษาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าเฉดสี DL, Da และ Db โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

3. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อเป็นการยืนยันว่าข้อมูลที่เก็บมาได้นั้นมีความถูกต้องน่าเชื่อถือและสามารถนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ได้จริง

4. ออกแบบแผนการทดลองเพื่อหาระดับของปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าของตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด หากพบว่าผลการทดสอบเบื้องต้นไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง ดังนั้นแบบการทดลองขั้นที่ 1 เป็นแบบการทดลองที่เหมาะสมแล้ว และทำการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรตอบสนองต่อไปเพื่อให้ได้ค่าผลตอบสนองที่ต้องการเข้าสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีการ Steepest ascent และหากพบว่าผลการทดสอบมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองขั้นที่ 1 นั้นไม่เหมาะสมจำเป็นต้องใช้แผนการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งวิธีการดังกล่าวนั้นได้แก่ Central composite design (CCD), Box-behnken design (BBD), D-optimal design (D-optimal), Expected mean square error optimal design (EMSE-optimal) เป็นต้น แต่ในการทดลองครั้งนี้จะเลือกแผนการทดลองแบบ Box-behnken มาใช้ เนื่องจากมีจำนวนครั้งการทดลองที่ไม่มากจนเกินไป และไม่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยที่ศึกษาออกนอกขอบเขตที่กำหนด ดังนั้นการทดลองแบบ Box-behnken จึงเป็นการทดลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการหาพื้นผิวตอบสนอง

การออกแบบแผนการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

1. นำปัจจัยที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทดลองแบบ 2^4 แฟคทรอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลางมาดำเนินการทดลองต่อ ซึ่งได้กำหนดระดับของปัจจัยในทดลองเป็น 3 ระดับ โดยการเพิ่มค่ากลางของระดับปัจจัยที่ใช้ศึกษาในแผนการทดลองเบื้องต้น โดยเตรียมการทดลองเช่นเดียวกับแผนการทดลองเบื้องต้น

2. ทำการศึกษาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าเฉดสี DL, Da และ Db และนำปัจจัยที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนองจากการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน มาทำการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อสร้างสมการถดถอยประมาณค่าสี

3. ตรวจความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อเป็นการยืนยันว่าข้อมูลที่เก็บมาได้นั้นมีความถูกต้องน่าเชื่อถือและสามารถนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ได้จริง

4. ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับทดสอบ Lack of fit เพื่อเป็นการยืนยันว่าสมการถดถอยที่สร้างได้มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือและสามารถนำสมการถดถอยไปใช้ได้จริง

5. หาระดับของปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้ค่าสีมีค่าใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐานมากที่สุด

ทดสอบและยืนยันผล

ทำการทดลองโดยการปรับค่าระดับของปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และคำนวณค่าสถิติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

นำผลที่ได้จากการทดลองไปใช้ในการผลิตจริงและตั้งเป็นสูตรมาตรฐานสำหรับกระบวนการผลิตเอบีเอสคอมปาวด์สีน้ำตาลดำต่อไป

บทที่ 4
ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์แผนการทดลองเบื้องต้น

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยใช้การออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลาง ซึ่งการเพิ่มจุดศูนย์กลางให้กับการทดลองเพราะว่าต้องการทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ภายใต้ขอบเขตที่ศึกษา เพื่อใช้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษาและค่าตอบสนอง โดยผลจากการวิเคราะห์การทดลองจะทำให้ทราบว่าตัวแปรที่ทำการศึกษานั้นมีความสัมพันธ์กับค่าตอบสนองเป็นแบบเส้นตรงหรือไม่

ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4-1 โดยระดับของปัจจัยต่าง ๆ สำหรับแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลาง แสดงดังในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลการออกแบบการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลาง (ทำซ้ำ 2 รอบ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	A	B	C	D	DL	Da	Db
16	1	1	1	0.4	0.2	0.1	0.5	0.09	0.50	-0.03
35	2	0	1	0.35	0.15	0.075	0.4	1.12	0.46	-0.08
3	3	1	1	0.3	0.2	0.05	0.3	1.76	1.36	-0.42
2	4	1	1	0.4	0.1	0.05	0.3	-0.03	0.05	0.01
5	5	1	1	0.3	0.1	0.1	0.3	2.17	0.75	-0.16
26	6	1	1	0.4	0.1	0.05	0.5	0.25	-0.07	-0.01
9	7	1	1	0.3	0.1	0.05	0.5	2.31	0.90	-0.38
31	8	1	1	0.3	0.2	0.1	0.5	1.96	1.58	-0.32
28	9	1	1	0.4	0.2	0.05	0.5	-0.24	0.53	-0.15
34	10	0	1	0.35	0.15	0.075	0.4	0.91	0.42	-0.09
17	11	1	1	0.3	0.1	0.05	0.3	2.53	0.98	-0.39
14	12	1	1	0.4	0.1	0.1	0.5	0.16	0.06	0.08
21	13	1	1	0.3	0.1	0.1	0.3	2.30	0.82	-0.16
19	14	1	1	0.3	0.2	0.05	0.3	1.69	1.38	-0.40

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	A	B	C	D	DL	Da	Db
32	15	1	1	0.4	0.2	0.1	0.5	-0.11	0.57	-0.07
30	16	1	1	0.4	0.1	0.1	0.5	0.16	0.03	0.10
11	17	1	1	0.3	0.2	0.05	0.5	1.67	1.35	-0.43
8	18	1	1	0.4	0.2	0.1	0.3	0.06	0.62	-0.06
18	19	1	1	0.4	0.1	0.05	0.3	0.09	0.02	-0.02
6	20	1	1	0.4	0.1	0.1	0.3	0.13	0.01	0.06
20	21	1	1	0.4	0.2	0.05	0.3	-0.10	0.68	-0.20
13	22	1	1	0.3	0.1	0.1	0.5	2.27	0.73	-0.13
1	23	1	1	0.3	0.1	0.05	0.3	2.38	0.83	-0.37
33	24	0	1	0.35	0.15	0.075	0.4	0.90	0.48	-0.13
4	25	1	1	0.4	0.2	0.05	0.3	-0.17	0.67	-0.17
36	26	0	1	0.35	0.15	0.075	0.4	0.76	0.55	-0.16
10	27	1	1	0.4	0.1	0.05	0.5	-0.16	0.06	-0.04
29	28	1	1	0.3	0.1	0.1	0.5	2.09	0.75	-0.14
23	29	1	1	0.3	0.2	0.1	0.3	2.07	1.47	-0.30
25	30	1	1	0.3	0.1	0.05	0.5	2.44	0.84	-0.36
7	31	1	1	0.3	0.2	0.1	0.3	2.20	1.55	-0.33
22	32	1	1	0.4	0.1	0.1	0.3	0.24	0.14	0.07
15	33	1	1	0.3	0.2	0.1	0.5	2.11	1.57	-0.32
12	34	1	1	0.4	0.2	0.05	0.5	-0.14	0.55	-0.14
27	35	1	1	0.3	0.2	0.05	0.5	1.72	1.40	-0.38
24	36	1	1	0.4	0.2	0.1	0.3	0.20	0.60	-0.13

ตารางที่ 4-2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองเบื้องต้น

ตัวแปร	ปัจจัย	ระดับปัจจัย (กรัม)		
		ต่ำ (-1)	จุดศูนย์กลาง (0)	สูง (+1)
A	คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)	0.3	0.35	0.4
B	สีย้อมสีแดง (Solvent dyes red)	0.1	0.15	0.2
C	สีย้อมสีเหลือง (Solvent dyes yellow)	0.05	0.075	0.1
D	แมกนีเซียม (Magnesium stearate)	0.3	0.4	0.5

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลจากการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ที่มีจุดศูนย์กลางมีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

1. การกำหนดรูปแบบจำลองขั้นแรก (First-order model)

$$Y_{ijklm} = \mu + \tau_i + \beta_i + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \delta_l + (\tau\delta)_{il} + (\beta\delta)_{jl} + (\tau\beta\delta)_{ijl} + (\gamma\delta)_{kl} + (\tau\gamma\delta)_{ijk} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl} + \varepsilon_{ijklm}$$

2. ตั้งสมมติฐานการทดสอบ

2.1 การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

H_0: ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าสีของเฉดสีน้ำตาลดำในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์

H_1: ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าสีของเฉดสีน้ำตาลดำในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์

2.2 การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยอันตรกิริยา

H_0: ปัจจัยอันตรกิริยาไม่มีผลต่อค่าสีของสีเฉดสีน้ำตาลดำในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์

H_1: ปัจจัยอันตรกิริยามีผลต่อค่าสีของเฉดสีน้ำตาลดำในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์

2.3 การทดสอบสมมติฐานความเป็นส่วนโค้งแบบควอดราติก

H_0: แบบจำลองไม่มีผลจากพจน์ควอดราติก

H_1: แบบจำลองมีผลจากพจน์ควอดราติก

ทดสอบสมมติฐานที่ความเชื่อมั่น 95% หรือที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจะปฏิเสธสมมติฐานหลักเมื่อค่า P-value ที่คำนวณได้น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ

Factorial Regression: DL versus A, B, C, D, CenterPt

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	35.3433	35.3433	8.8358	625.54	0.000
A	1	34.5280	34.5280	34.5280	2444.46	0.000
B	1	0.6498	0.6498	0.6498	46.00	0.000
C	1	0.1378	0.1378	0.1378	9.76	0.006
D	1	0.0276	0.0276	0.0276	1.95	0.178
2-Way Interactions	6	0.3832	0.3832	0.0639	4.52	0.005
A*B	1	0.1326	0.1326	0.1326	9.39	0.006
A*C	1	0.0180	0.0180	0.0180	1.28	0.272
A*D	1	0.0005	0.0004	0.0004	0.03	0.860
B*C	1	0.2245	0.2245	0.2245	15.89	0.001
B*D	1	0.0041	0.0041	0.0041	0.29	0.599
C*D	1	0.0036	0.0036	0.0036	0.26	0.619
3-Way Interactions	4	0.1303	0.1303	0.0326	2.31	0.096
A*B*C	1	0.1225	0.1225	0.1225	8.67	0.008
A*B*D	1	0.0045	0.0045	0.0045	0.32	0.579
A*C*D	1	0.0008	0.0008	0.0008	0.06	0.814
B*C*D	1	0.0025	0.0025	0.0025	0.17	0.682
4-Way Interactions	1	0.0003	0.0003	0.0003	0.02	0.883
A*B*C*D	1	0.0003	0.0003	0.0003	0.02	0.883
Curvature	1	0.0728	0.0728	0.0728	5.16	0.035
Residual Error	19	0.2684	0.2684	0.0141		
Pure Error	19	0.2684	0.2684	0.0141		
Total	35	36.1983				

Model Summary

S = 0.118849 PRESS = 0.966917
R-Sq = 99.26% R-Sq(pred) = 97.33% R-Sq(adj) = 98.63%

ภาพที่ 4-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น DL

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในภาพที่ 4-1 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสว่าง (DL) ของสีน้ำตาลดำ ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แบ่งออกเป็นอิทธิพลหลัก คือ คาร์บอนแบล็ค (A) สีย้อมสีแดง (B) และสีย้อมสีเหลือง (C) อันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็คและสีย้อมสีแดง (A*B) สีย้อมสีแดงและสีย้อมสีเหลือง (B*C) ส่วนอันตรกิริยาระหว่างสามปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็ค สีย้อมสีแดง และสีย้อมสีเหลือง (A*B*C) ส่วนปัจจัยที่มีค่า P-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จะไม่มีผลต่อค่าความสว่างของเฉดสี (DL) จึงควรตัดออกและไม่ควรนำมาพิจารณา และเมื่อตัดปัจจัยที่ไม่มีผลออกจะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 4-2

Factorial Fit: DL versus A, B, C

Estimated Effects and Coefficients for DL (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		1.066	0.01920	55.51	0.000
A	-2.077	-1.039	0.01920	-54.11	0.000
B	-0.285	-0.142	0.01920	-7.42	0.000
C	0.131	0.066	0.01920	3.42	0.002
A*B	0.129	0.064	0.01920	3.35	0.002
B*C	0.168	0.084	0.01920	4.36	0.000
A*B*C	-0.124	-0.062	0.01920	-3.22	0.003
Ct Pt		-0.143	0.05759	-2.49	0.019

S = 0.118599 PRESS = 0.590501
R-Sq = 99.09% R-Sq(pred) = 98.37% R-Sq(adj) = 98.86%

Analysis of Variance for DL (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	35.3157	35.3157	11.7719	998.15	0.000
A	1	34.5280	34.5280	34.5280	2927.66	0.000
B	1	0.6498	0.6498	0.6498	55.10	0.000
C	1	0.1378	0.1378	0.1378	11.69	0.002
2-Way Interactions	2	0.3571	0.3571	0.1785	15.14	0.000
A*B	1	0.1326	0.1326	0.1326	11.24	0.002
B*C	1	0.2245	0.2245	0.2245	19.03	0.000
3-Way Interactions	1	0.1225	0.1225	0.1225	10.39	0.003
A*B*C	1	0.1225	0.1225	0.1225	10.39	0.003
Curvature	1	0.0728	0.0728	0.0728	6.18	0.019
Residual Error	28	0.3302	0.3302	0.0118		
Lack of Fit	1	0.0181	0.0181	0.0181	1.56	0.222
Pure Error	27	0.3122	0.3122	0.0116		
Total	35	36.1983				

ภาพที่ 4-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น DL (ตัดปัจจัยที่ไม่มีผลออก)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในภาพที่ 4-2 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสว่าง (DL) ของสีน้ำตาลดำ ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แบ่งออกเป็นอิทธิพลหลัก คือ คาร์บอนแบล็ค (A) สีย้อมสีแดง (B) และสีย้อมสีเหลือง (C) อันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็คและสีย้อมสีแดง (A*B) สีย้อมสีแดงและสีย้อมสีเหลือง (B*C) ส่วนอันตรกิริยาระหว่างสามปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็ค สีย้อมสีแดง และสีย้อมสีเหลือง (A*B*C)

โดยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-Sq(adj) เท่ากับ 98.86% หมายความว่า ในความผันแปรของค่าความสว่างของสีน้ำตาลดำทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 98.92% จึงเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ

Factorial Regression: Da versus A, B, C, D, CenterPt

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	8.29852	8.29852	2.07463	788.75	0.000
A	1	5.47805	5.47805	5.47805	2082.70	0.000
B	1	2.80845	2.80845	2.80845	1067.74	0.000
C	1	0.00151	0.00151	0.00151	0.58	0.458
D	1	0.01051	0.01051	0.01051	4.00	0.060
2-Way Interactions	6	0.04745	0.04745	0.00791	3.01	0.031
A*B	1	0.01280	0.01280	0.01280	4.87	0.040
A*C	1	0.00061	0.00061	0.00061	0.23	0.635
A*D	1	0.00911	0.00911	0.00911	3.46	0.078
B*C	1	0.02311	0.02311	0.02311	8.79	0.008
B*D	1	0.00001	0.00001	0.00001	0.00	0.946
C*D	1	0.00180	0.00180	0.00180	0.68	0.418
3-Way Interactions	4	0.08267	0.08267	0.02067	7.86	0.001
A*B*C	1	0.07031	0.07031	0.07031	26.73	0.000
A*B*D	1	0.01051	0.01051	0.01051	4.00	0.060
A*C*D	1	0.00005	0.00005	0.00005	0.02	0.892
B*C*D	1	0.00180	0.00180	0.00180	0.68	0.418
4-Way Interactions	1	0.00005	0.00005	0.00005	0.02	0.892
A*B*C*D	1	0.00005	0.00005	0.00005	0.02	0.892
Curvature	1	0.22222	0.22222	0.22222	84.49	0.000
Residual Error	19	0.04997	0.04997	0.00263		
Pure Error	19	0.04997	0.04997	0.00263		
Total	35	8.70090				

Model Summary

S = 0.0512861 PRESS = 0.440246
R-Sq = 99.43% R-Sq(pred) = 94.94% R-Sq(adj) = 98.94%

ภาพที่ 4-3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น Da

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในภาพที่ 4-3 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า Da ของสีน้ำตาลดำ ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แบ่งออกเป็นอิทธิพลหลัก คือ คาร์บอนแบล็ค (A) และสีย้อมสีแดง (B) อันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็คและสีย้อมสีแดง (A*B) สีย้อมสีแดงและสีย้อมสีเหลือง (B*C) ส่วนอันตรกิริยาระหว่างสามปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็ค สีย้อมสีแดง และสีย้อมสีเหลือง (A*B*C) ส่วนปัจจัยที่มีค่า P-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จะไม่มีผลต่อค่าสี Da จึงควรตัดออกและไม่ควรนำมาพิจารณา และเมื่อตัดปัจจัยที่ไม่มีผลออกจะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 4-4

Factorial Fit: Da versus A, B, C, D

Estimated Effects and Coefficients for Da (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.7275	0.009250	78.65	0.000
A	-0.8275	-0.4137	0.009250	-44.73	0.000
B	0.5925	0.2962	0.009250	32.03	0.000
C	0.0138	0.0069	0.009250	0.74	0.464
D	-0.0362	-0.0181	0.009250	-1.96	0.060
A*B	-0.0400	-0.0200	0.009250	-2.16	0.040
B*C	0.0538	0.0269	0.009250	2.91	0.007
A*B*C	-0.0938	-0.0469	0.009250	-5.07	0.000
Ct Pt		-0.2500	0.027750	-9.01	0.000

S = 0.0523255 PRESS = 0.391490
R-Sq = 99.15% R-Sq(pred) = 95.50% R-Sq(adj) = 98.90%

Analysis of Variance for Da (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	8.29852	8.29852	2.07463	757.73	0.000
A	1	5.47805	5.47805	5.47805	2000.78	0.000
B	1	2.80845	2.80845	2.80845	1025.74	0.000
C	1	0.00151	0.00151	0.00151	0.55	0.464
D	1	0.01051	0.01051	0.01051	3.84	0.060
2-Way Interactions	2	0.03591	0.03591	0.01796	6.56	0.005
A*B	1	0.01280	0.01280	0.01280	4.68	0.040
B*C	1	0.02311	0.02311	0.02311	8.44	0.007
3-Way Interactions	1	0.07031	0.07031	0.07031	25.68	0.000
A*B*C	1	0.07031	0.07031	0.07031	25.68	0.000
Curvature	1	0.22222	0.22222	0.22222	81.16	0.000
Residual Error	27	0.07392	0.07392	0.00274		
Lack of Fit	8	0.02395	0.02395	0.00299	1.14	0.383
Pure Error	19	0.04997	0.04997	0.00263		
Total	35	8.70090				

ภาพที่ 4-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น Da (ตัดปัจจัยที่ไม่มีผลออก)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในภาพที่ 4-4 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า Da ของสีน้ำตาลดำ ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แบ่งออกเป็นอิทธิพลหลัก คือ คาร์บอนแบล็ค (A) และสีย้อมสีแดง (B) อันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็คและสีย้อมสีแดง (A*B) สีย้อมสีแดงและสีย้อมสีเหลือง (B*C) ส่วนอันตรกิริยาระหว่างสามปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็ค สีย้อมสีแดง และสีย้อมสีเหลือง (A*B*C)

โดยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-Sq(adj) เท่ากับ 98.90% หมายความว่า ในความผันแปรของค่าความสว่างของสีน้ำตาลดำทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 98.90% จึงเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ

Factorial Regression: Db versus A, B, C, D, CenterPt

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	0.829587	0.829587	0.207397	347.18	0.000
A	1	0.575128	0.575128	0.575128	962.77	0.000
B	1	0.126253	0.126253	0.126253	211.35	0.000
C	1	0.126253	0.126253	0.126253	211.35	0.000
D	1	0.001953	0.001953	0.001953	3.27	0.086
2-Way Interactions	6	0.023994	0.023994	0.003999	6.69	0.001
A*B	1	0.004753	0.004753	0.004753	7.96	0.011
A*C	1	0.008778	0.008778	0.008778	14.69	0.001
A*D	1	0.000378	0.000378	0.000378	0.63	0.436
B*C	1	0.009453	0.009453	0.009453	15.82	0.001
B*D	1	0.000253	0.000253	0.000253	0.42	0.523
C*D	1	0.000378	0.000378	0.000378	0.63	0.436
3-Way Interactions	4	0.011887	0.011887	0.002972	4.97	0.006
A*B*C	1	0.009453	0.009453	0.009453	15.82	0.001
A*B*D	1	0.001653	0.001653	0.001653	2.77	0.113
A*C*D	1	0.000253	0.000253	0.000253	0.42	0.523
B*C*D	1	0.000528	0.000528	0.000528	0.88	0.359
4-Way Interactions	1	0.000028	0.000028	0.000028	0.05	0.831
A*B*C*D	1	0.000028	0.000028	0.000028	0.05	0.831
Curvature	1	0.014028	0.014028	0.014028	23.48	0.000
Residual Error	19	0.011350	0.011350	0.000597		
Pure Error	19	0.011350	0.011350	0.000597		
Total	35	0.890875				

Model Summary

S = 0.0244411 PRESS = 0.0501850
R-Sq = 98.73% R-Sq(pred) = 94.37% R-Sq(adj) = 97.65%

ภาพที่ 4-5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น Db

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในภาพที่ 4-5 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า Db ของสีน้ำตาลดำ ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แบ่งออกเป็นอิทธิพลหลัก คือ คาร์บอนแบล็ค (A) สีย้อมสีแดง (B) และสีย้อมสีเหลือง (C) อันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็คและสีย้อมสีแดง (A*B) คาร์บอนแบล็คและสีย้อมสีเหลือง (A*C) สีย้อมสีแดงและสีย้อมสีเหลือง (B*C) ส่วนอันตรกิริยาระหว่างสามปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็ค สีย้อมสีแดง และสีย้อมสีเหลือง (A*B*C) ส่วนปัจจัยที่มีค่า P-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จะไม่มีผลต่อค่าสี Da จึงควรตัดออกและไม่ควรนำมาพิจารณา และเมื่อตัดปัจจัยที่ไม่มีผลออกจะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 4-6

Factorial Fit: Db versus A, B, C, D

Estimated Effects and Coefficients for Db (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		-0.1778	0.004221	-42.13	0.000
A	0.2681	0.1341	0.004221	31.76	0.000
B	-0.1256	-0.0628	0.004221	-14.88	0.000
C	0.1256	0.0628	0.004221	14.88	0.000
D	0.0156	0.0078	0.004221	1.85	0.076
A*B	-0.0244	-0.0122	0.004221	-2.89	0.008
A*C	-0.0331	-0.0166	0.004221	-3.92	0.001
B*C	-0.0344	-0.0172	0.004221	-4.07	0.000
A*B*C	0.0344	0.0172	0.004221	4.07	0.000
Ct Pt		0.0628	0.012662	4.96	0.000

S = 0.0238762 PRESS = 0.0419396
R-Sq = 98.34% R-Sq(pred) = 95.29% R-Sq(adj) = 97.76%

Analysis of Variance for Db (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	0.829587	0.829587	0.207397	363.81	0.000
A	1	0.575128	0.575128	0.575128	1008.87	0.000
B	1	0.126253	0.126253	0.126253	221.47	0.000
C	1	0.126253	0.126253	0.126253	221.47	0.000
D	1	0.001953	0.001953	0.001953	3.43	0.076
2-Way Interactions	3	0.022984	0.022984	0.007661	13.44	0.000
A*B	1	0.004753	0.004753	0.004753	8.34	0.008
A*C	1	0.008778	0.008778	0.008778	15.40	0.001
B*C	1	0.009453	0.009453	0.009453	16.58	0.000
3-Way Interactions	1	0.009453	0.009453	0.009453	16.58	0.000
A*B*C	1	0.009453	0.009453	0.009453	16.58	0.000
Curvature	1	0.014028	0.014028	0.014028	24.61	0.000
Residual Error	26	0.014822	0.014822	0.000570		
Lack of Fit	7	0.003472	0.003472	0.000496	0.83	0.575
Pure Error	19	0.011350	0.011350	0.000597		
Total	35	0.890875				

ภาพที่ 4-6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น Db (ตัดปัจจัยที่ไม่มีผลออก)

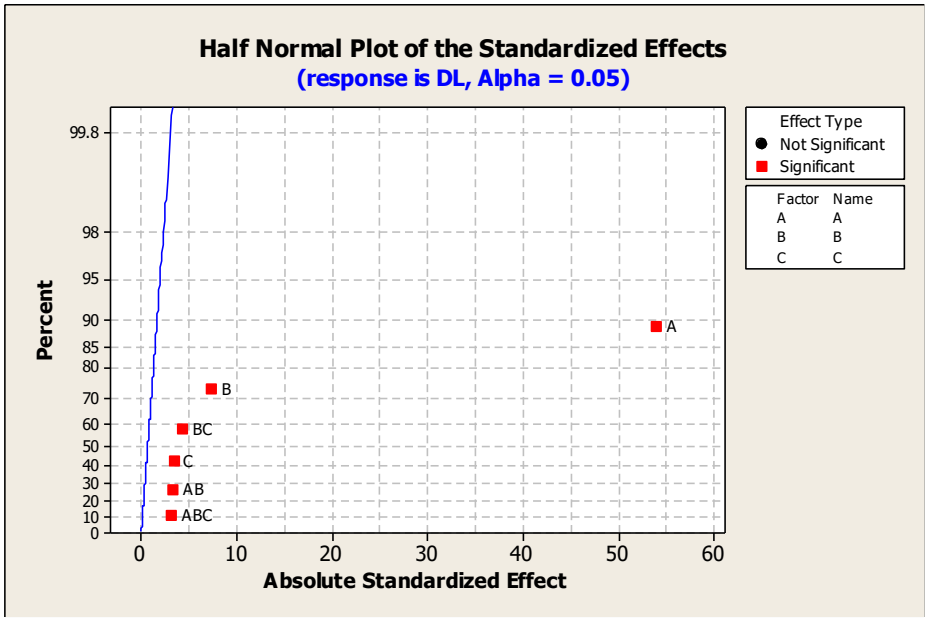
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในภาพที่ 4-6 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า Db ของสีน้ำตาลดำ ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แบ่งออกเป็นอิทธิพลหลัก คือ คาร์บอนแบล็ค (A) สีย้อมสีแดง (B) และสีย้อมสีเหลือง (C) อันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็คและสีย้อมสีแดง (A*B) คาร์บอนแบล็คและสีย้อมสีเหลือง (A*C) สีย้อมสีแดงและสีย้อมสีเหลือง (B*C) ส่วนอันตรกิริยาระหว่างสามปัจจัย คือ คาร์บอนแบล็ค สีย้อมสีแดง และสีย้อมสีเหลือง (A*B*C)

โดยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-Sq(adj) เท่ากับ 97.76% หมายความว่า ในความผันแปรของค่าความสว่างของสีน้ำตาลดำทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 98.90% จึงเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ

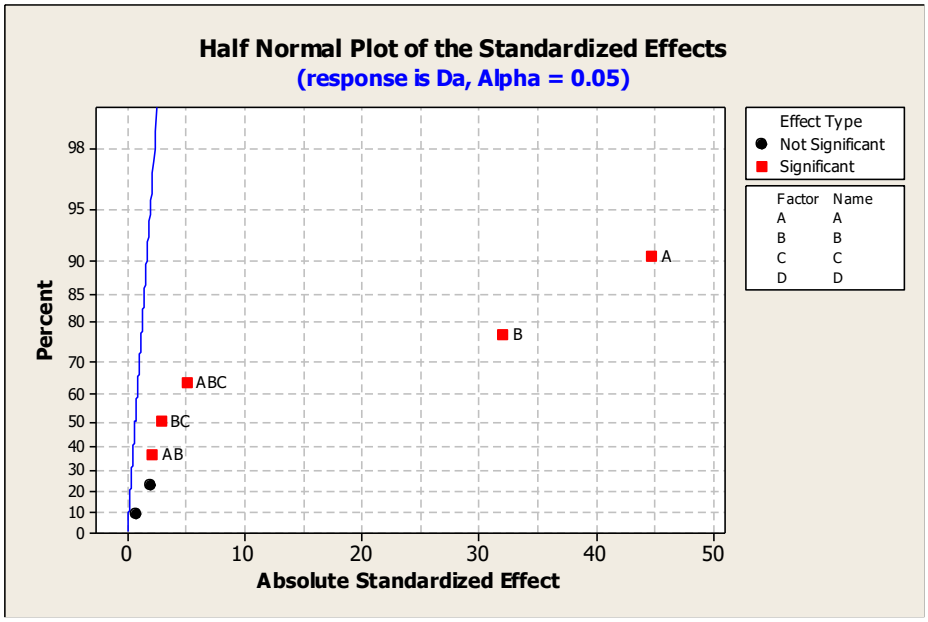
อีกทั้งผลการวิเคราะห์การถดถอยจากภาพที่ 4-2 ภาพที่ 4-4 และภาพที่ 4-6 ของค่า DL, Da และ Db พบว่าผลกระทบของจุดศูนย์กลาง (Curvature effect) มีค่า P-value < α ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ค่าสถิติทดสอบ F มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต หมายความว่า ค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่จุดศูนย์กลางและข้อมูลที่มุมมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นคือ มีผลของส่วนโค้งขั้นที่สองในผลตอบเกิดขึ้นภายใต้ขอบเขตที่กำลังศึกษา หรือกล่าวได้ว่า แบบจำลองมีผลจากพจน์ควอดราติก

จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองขั้นแรกเป็นแบบจำลองที่ไม่เหมาะสมและต้องใช้แบบจำลองขั้นที่สองแทน ได้แก่

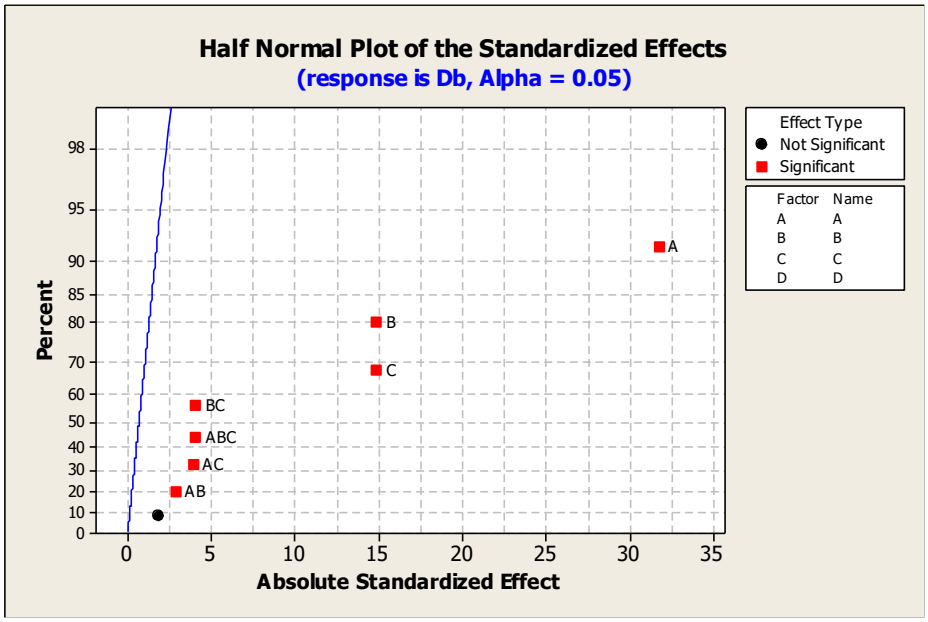
$$Y_{ijklm} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \delta_l + (\tau\delta)_{il} + (\beta\delta)_{jl} + (\tau\beta\delta)_{ijl} + (\gamma\delta)_{kl} + (\tau\gamma\delta)_{ijk} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl} + \tau_i^2 + \beta_j^2 + \gamma_k^2 + \delta_l^2 + \varepsilon_{ijklm}$$



ภาพที่ 4-7 กราฟ Normal plot แสดงผลกระทบที่มีต่อค่าความสว่าง (DL) ในการทดลองเบื้องต้น



ภาพที่ 4-8 กราฟ Normal plot แสดงผลกระทบที่มีต่อค่า Da ในการทดลองเบื้องต้น



ภาพที่ 4-9 กราฟ Normal plot แสดงผลกระทบที่มีต่อค่า Db ในการทดลองเบื้องต้น

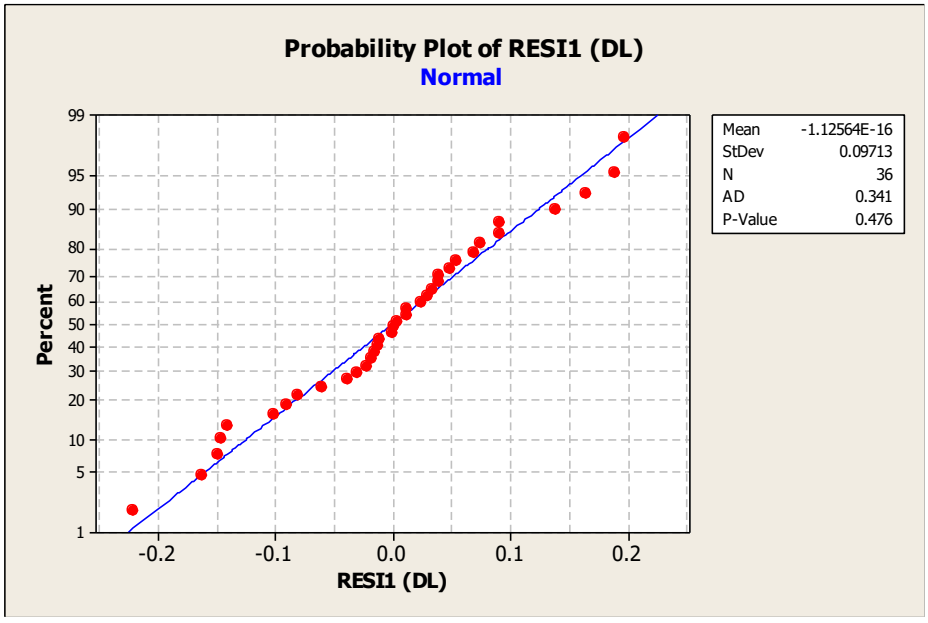
จากภาพที่ 4-7 ถึงภาพที่ 4-9 พบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) คือ คาร์บอนแบล็ค สีย้อมสีแดง และสีย้อมสีเหลืองมีอิทธิพลทำให้ค่าสี DL, Da และ Db ของเฉดสีน้ำตาลดำมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ส่วนแมกนีเซียมสเตียเรทไม่มีอิทธิพลทำให้ค่าสี DL, Da และ

Db ของเฉดสีน้ำตาลดำแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ และเกิดอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัย ดังนั้น จึงไม่สามารถละเลยปัจจัยร่วมทั้งหมดได้

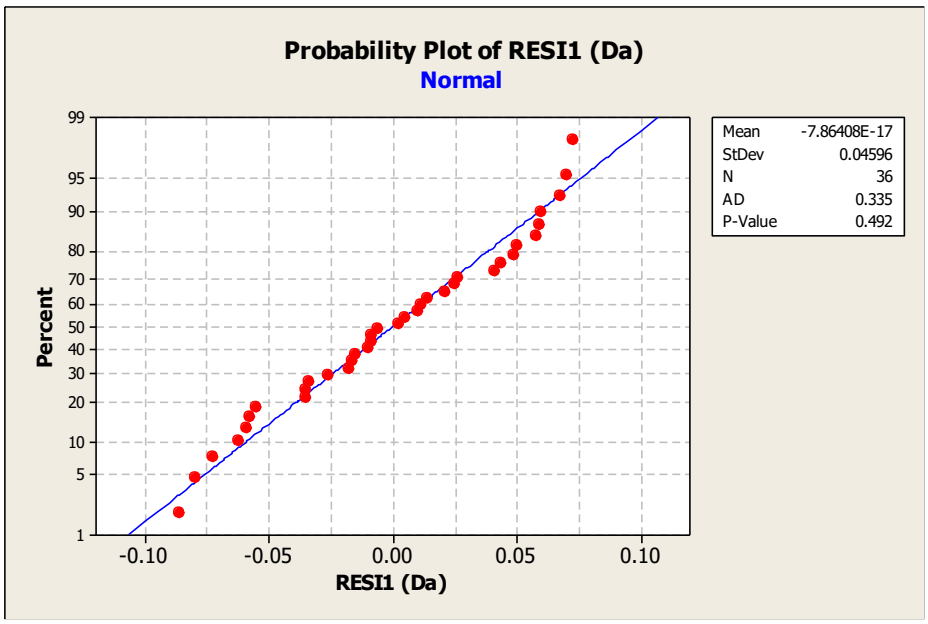
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลและความถูกต้องในการวิเคราะห์ ซึ่งหมายความว่ารูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ โดยอาศัยค่า Residual ในการวิเคราะห์ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยการตรวจสอบมี 3 ขั้นตอน คือ

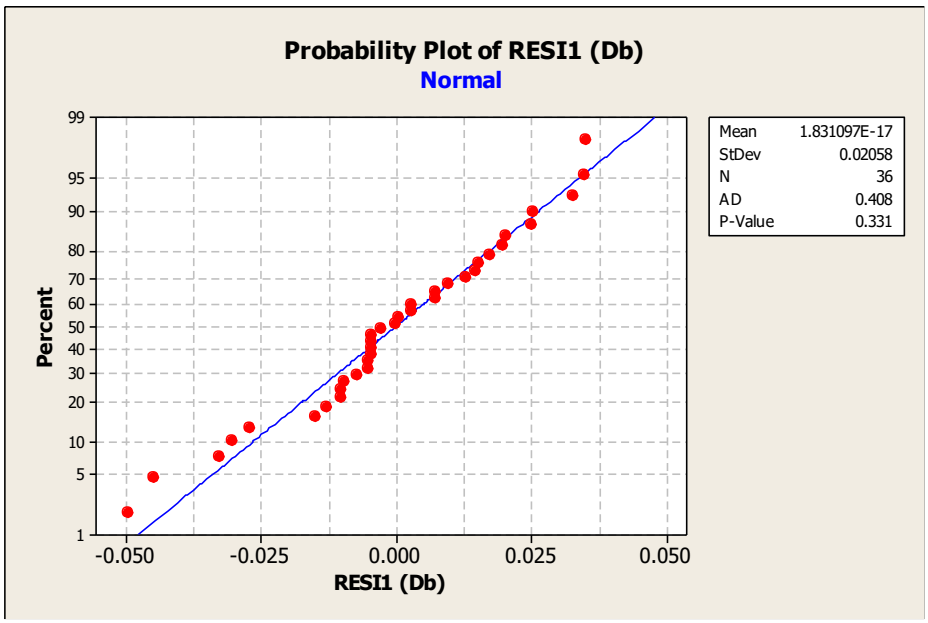
1. ตรวจสอบการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อนว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) หรือไม่ โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อน (Residual)



ภาพที่ 4-10 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (DL)



ภาพที่ 4-11 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Da)



ภาพที่ 4-12 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Db)

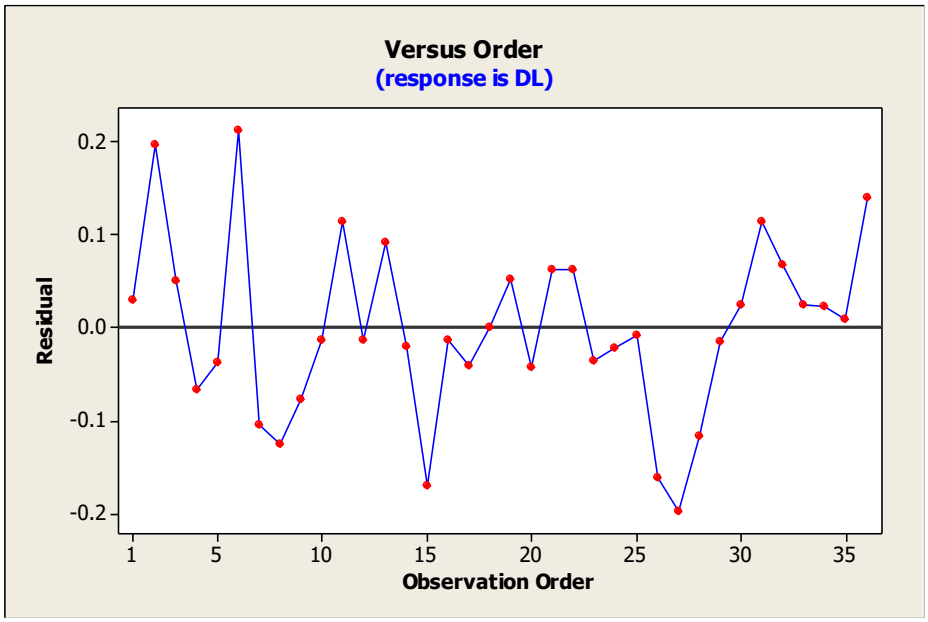
จากการทดสอบ Normality test ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสมมติฐาน คือ

H_0: ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

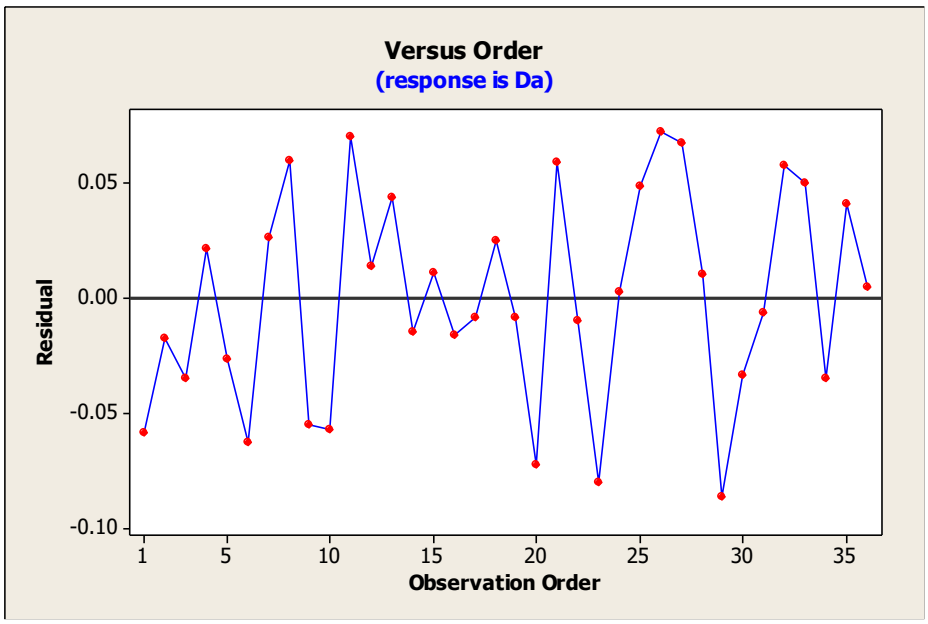
H_1: ค่าคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เมื่อพิจารณาค่า P-value จากภาพที่ 4-10 ถึงภาพที่ 4-12 พบว่าค่า P-value = 0.476, 0.492 และ 0.331 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ จึงสรุปได้ว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องเชื่อถือได้

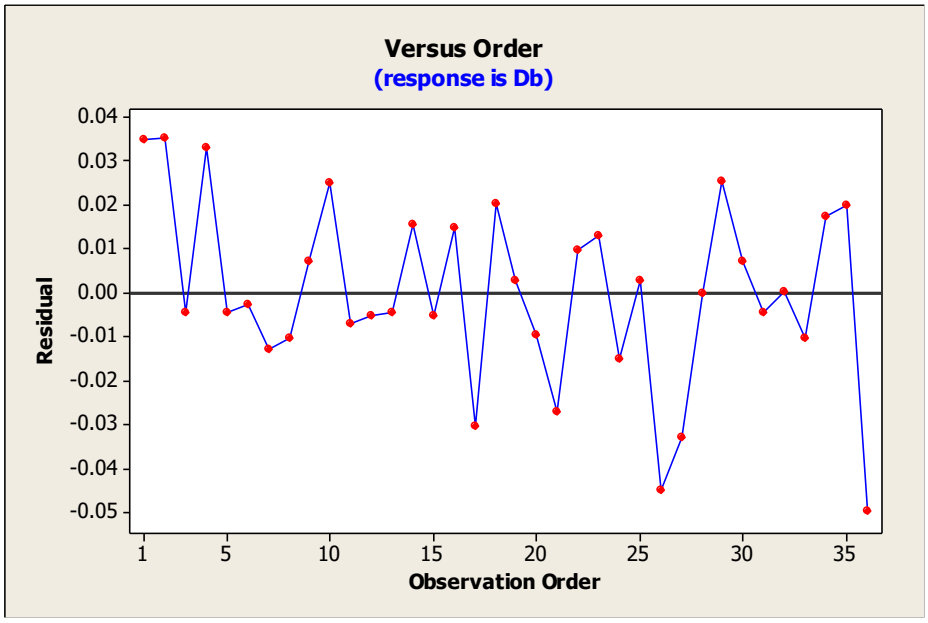
2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent) ของค่าคลาดเคลื่อน เป็นการตรวจสอบค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล



ภาพที่ 4-13 กราฟของค่าเคลื่อนที่กับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (DL)



ภาพที่ 4-14 กราฟของค่าเคลื่อนที่กับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Da)



ภาพที่ 4-15 กราฟของค่าเคลื่อนที่กับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Db)

Runs Test: RESI1 (DL), RESI1 (Da), RESI1 (Db)

```
Runs test for RESI1 (DL)

Runs above and below K = -1.12564E-16

The observed number of runs = 15
The expected number of runs = 18.9444
19 observations above K, 17 below
P-value = 0.181

Runs test for RESI1 (Da)

Runs above and below K = -7.86408E-17

The observed number of runs = 18
The expected number of runs = 19
18 observations above K, 18 below
P-value = 0.735

Runs test for RESI1 (Db)

Runs above and below K = 1.831097E-17

The observed number of runs = 22
The expected number of runs = 18.9444
17 observations above K, 19 below
P-value = 0.300
```

ภาพที่ 4-16 ทดสอบ Runs test ของข้อมูล (DL, Da และ Db) สำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น

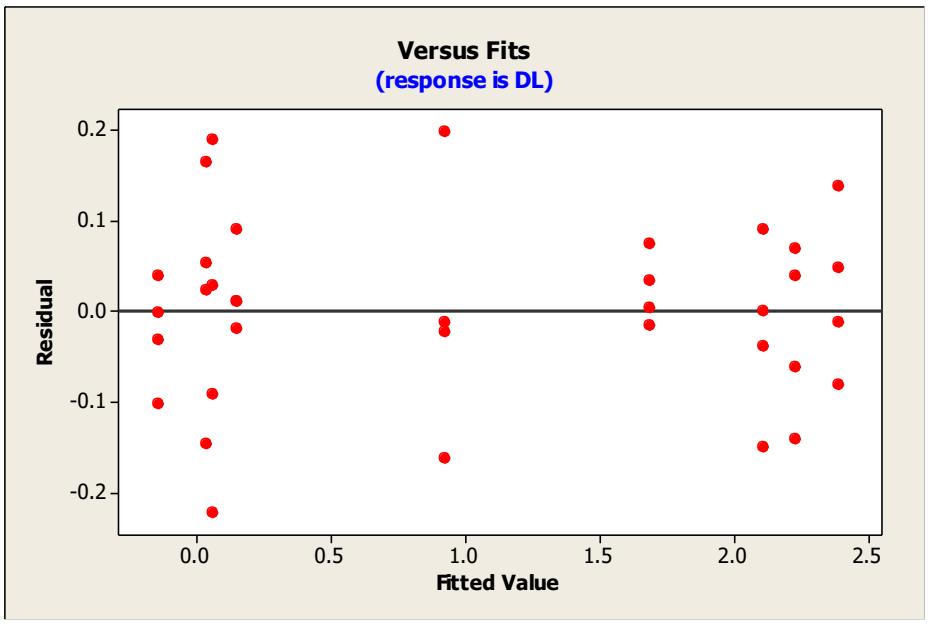
จากการทดสอบ Runs test ของข้อมูลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสมมติฐานในการทดสอบ คือ

H_0: ข้อมูลตัวอย่างเป็นไปอย่างสุ่ม

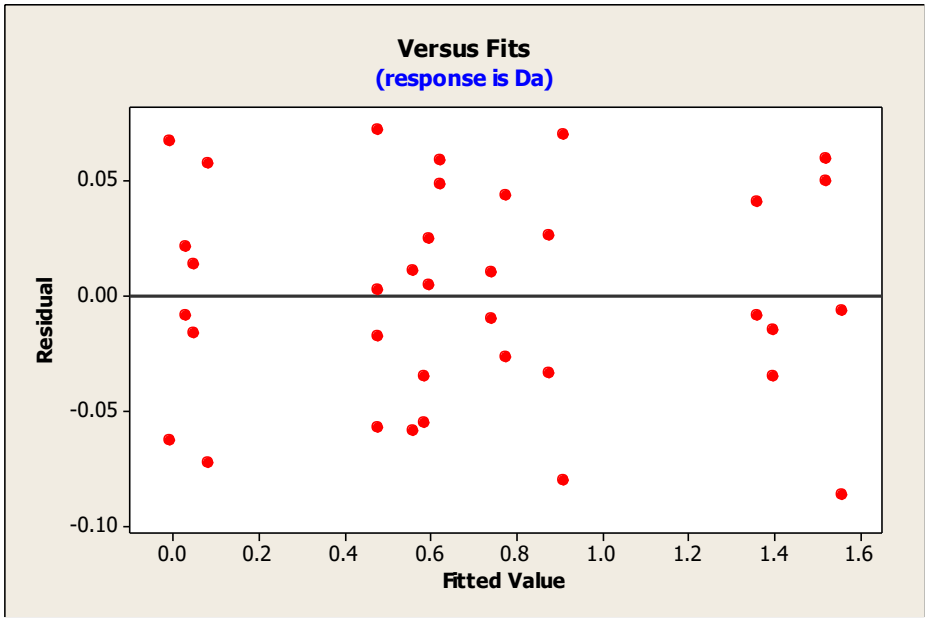
H_1: ข้อมูลตัวอย่างไม่เป็นไปอย่างสุม

เมื่อพิจารณาค่า P-value ของค่า DL, Da และ Db จากภาพที่ 4-16 พบว่าค่า P-value = 0.181, 0.735 และ 0.300 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลตัวอย่างเป็นไปอย่างสุ่มและเป็นอิสระต่อกัน

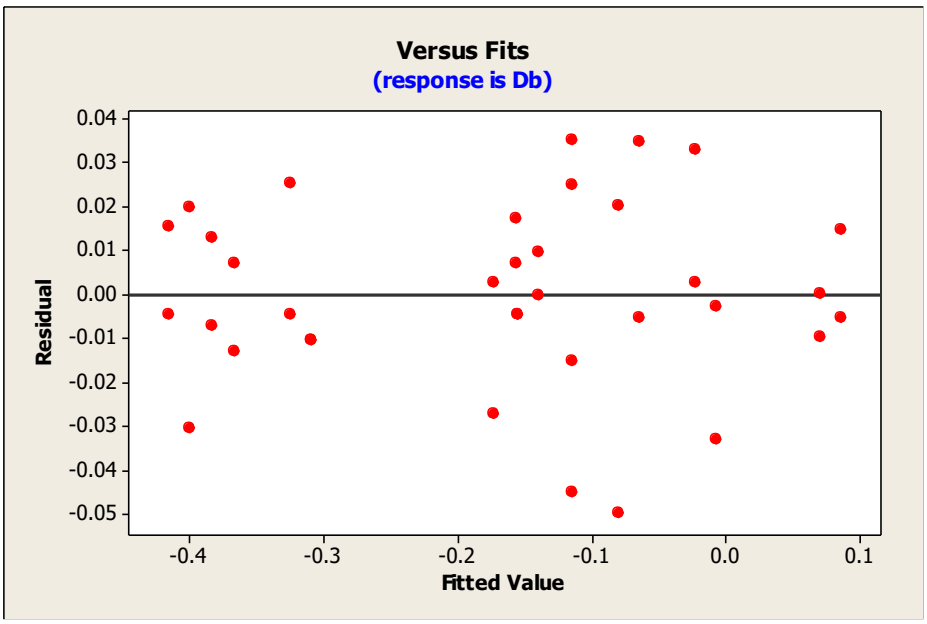
3. ตรวจสอบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนคงที่ (Variance stability) หรือไม่



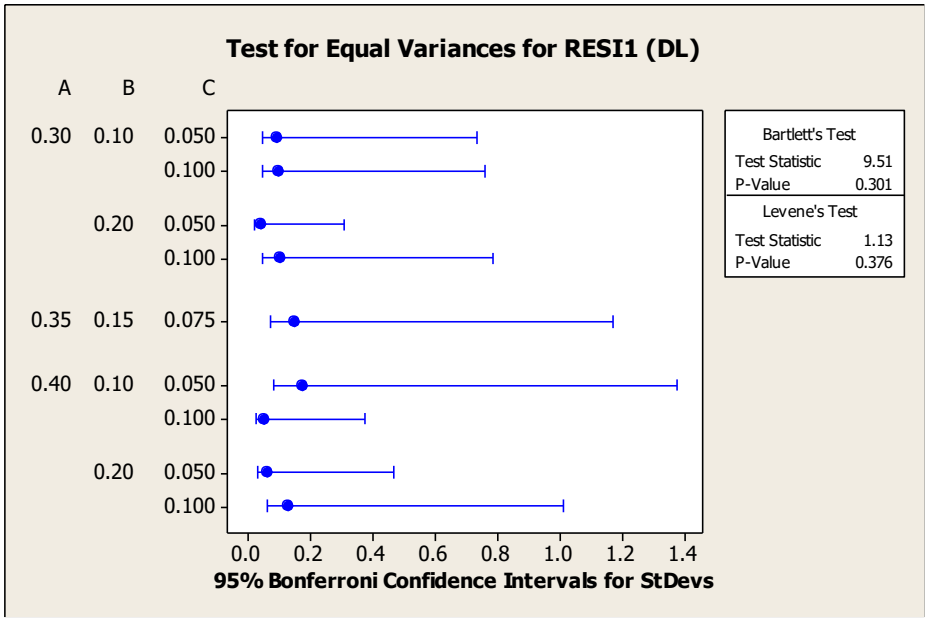
ภาพที่ 4-17 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (DL)



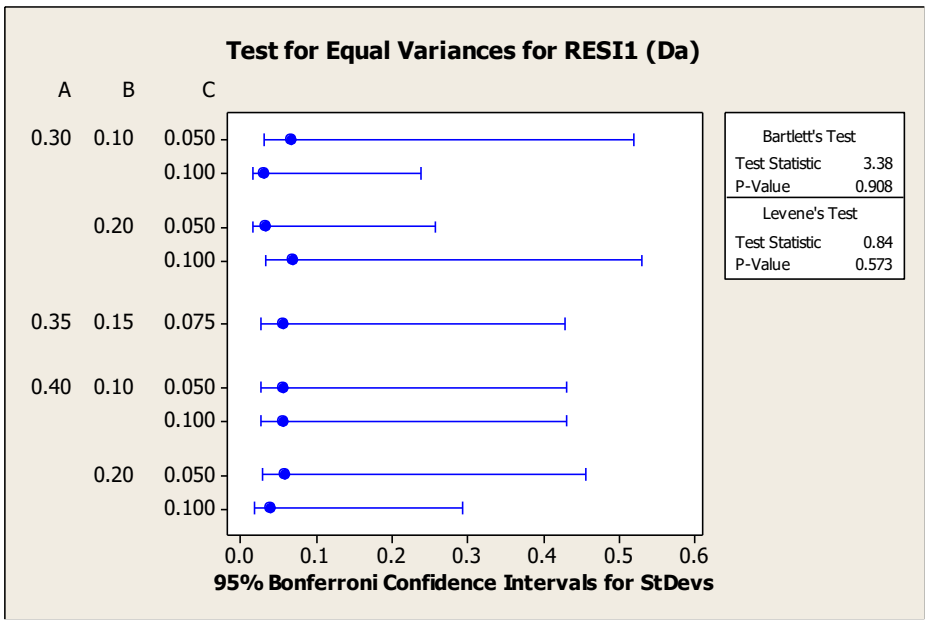
ภาพที่ 4-18 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Da)



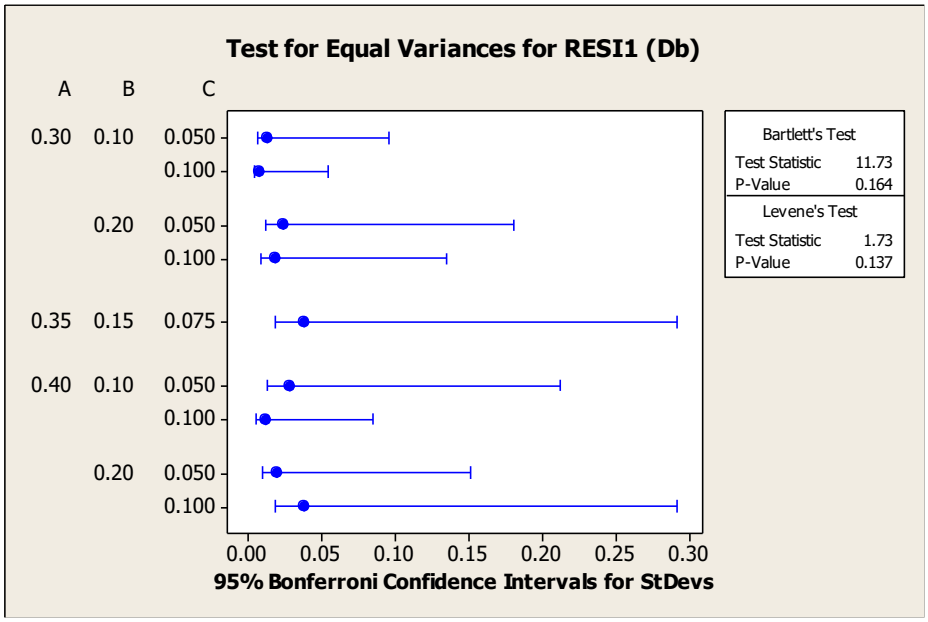
ภาพที่ 4-19 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Db)



ภาพที่ 4-20 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (DL)



ภาพที่ 4-21 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Da)



ภาพที่ 4-22 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น (Db)

จากการทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสมมติฐานในการทดสอบ คือ

H_0: ค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่

H_1: ค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าไม่คงที่

เมื่อพิจารณาค่า P-value ของค่า DL, Da และ Db จากภาพที่ 4-20 ถึง 4-22 พบว่าค่า P-value ของ Bartlett's test (Normal distribution) = 0.301, 0.908 และ 0.164 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ แสดงว่าค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่

และจากภาพที่ 4-10 ถึงภาพที่ 4-22 พบว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง เป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ทุกประการ ดังนั้น สรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือได้

Power and Sample Size (DL)

```
2-Level Factorial Design

Alpha = 0.05  Assumed standard deviation = 0.12

Factors:    4   Base Design: 4, 16
Blocks:  none

Number of terms omitted from model: 9
Including a term for center points in model.


Center                Total
Points  Effect  Reps   Runs     Power
     4    0.25     2     36  0.999901
```

Power and Sample Size (Da)

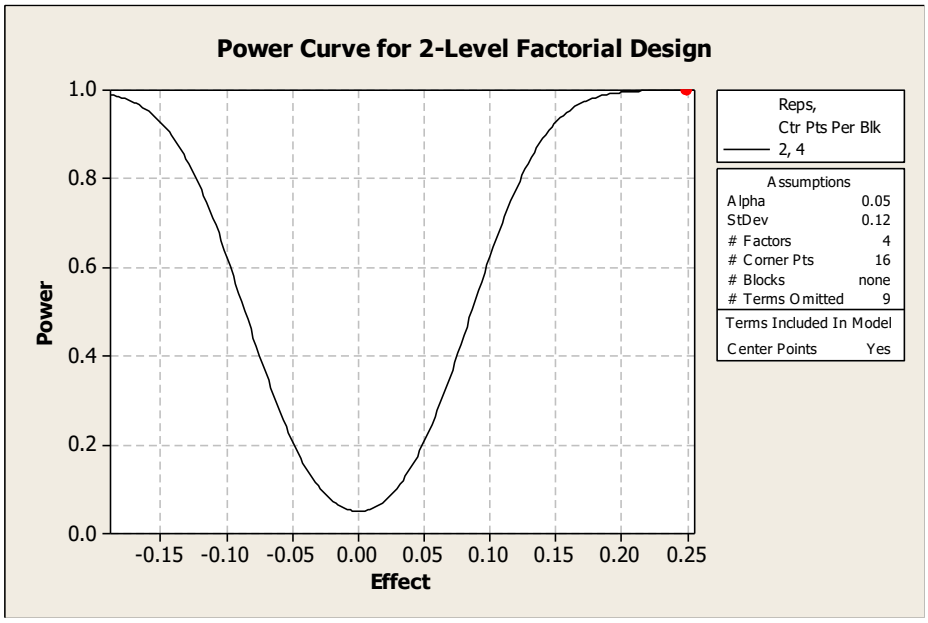
```
2-Level Factorial Design

Alpha = 0.05  Assumed standard deviation = 0.05

Factors:    4   Base Design: 4, 16
Blocks:  none

Number of terms omitted from model: 8
Including a term for center points in model.

Center                Total
Points  Effect  Reps   Runs    Power
     4    0.15     2     36  1.00000
```

ภาพที่ 4-23 ผลการหาค่า Power and sample size (DL, Da และ Db)

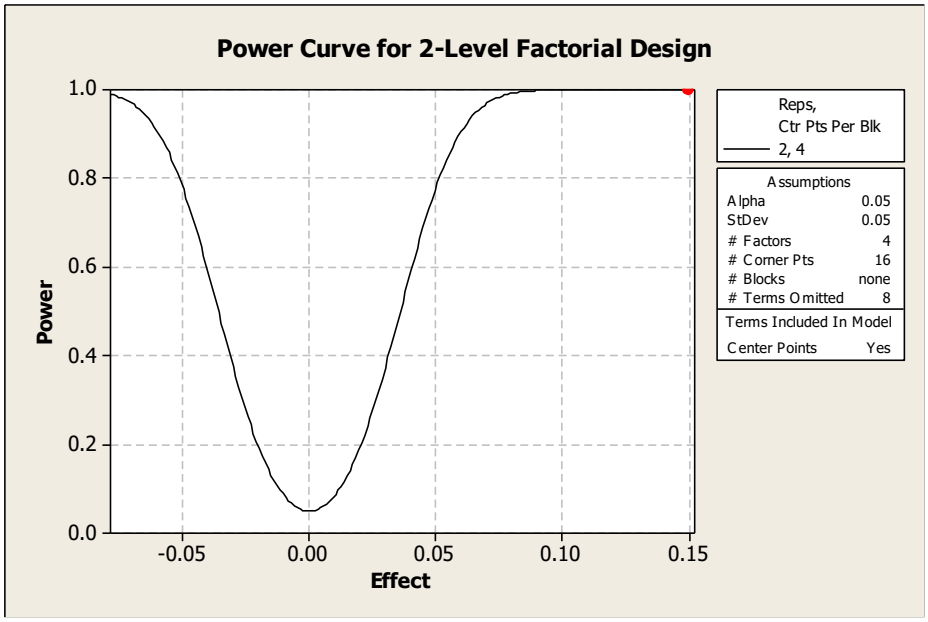
Power and Sample Size (Db)

```
2-Level Factorial Design

Alpha = 0.05  Assumed standard deviation = 0.02

Factors:    4   Base Design: 4, 16
Blocks:  none

Number of terms omitted from model: 7
Including a term for center points in model.


Center                 Total
Points  Effect  Reps    Runs  Power
     4    0.15     2      36      1
```

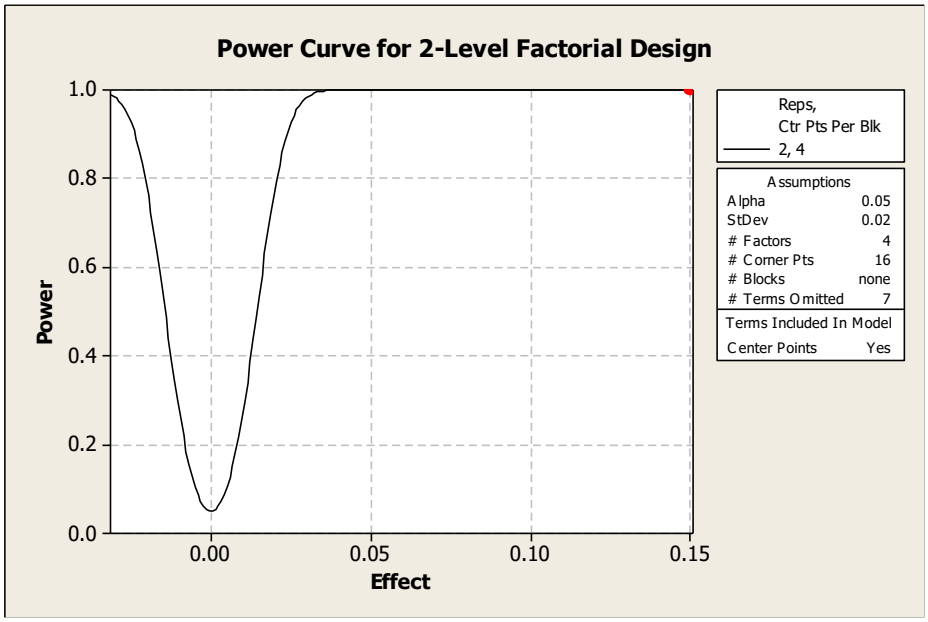
ภาพที่ 4-23 (ต่อ)



ภาพที่ 4-24 ผลการหาค่า Power and sample size (DL)



ภาพที่ 4-25 ผลการหาค่า Power and sample size (Da)



ภาพที่ 4-26 ผลการหาค่า Power and sample size (Db)

จากภาพที่ 4-23 ถึงภาพที่ 4-26 ในการหาค่า Power ของการทดลองจากการกำหนดจำนวนทำซ้ำ 2 รอบ จากผลการคำนวณพบว่าให้ค่า Power อย่างน้อยถึง 0.99 จึงถือว่าข้อมูลการทดลองชุดนี้มีความเพียงพอ

ดำเนินการทดลองโดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology)

จากการทดลองเบื้องต้น (Full factorial) ทำให้ได้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ คาร์บอนแบล็ค สีย้อมสีแดง และสีย้อมสีเหลือง ส่วนปัจจัยที่เหลือ คือ แมกนีเซียมสเตียเรท ไม่มีอิทธิพลต่อค่าตัวแปรตอบสนองจึงสามารถละเลยได้และกำหนดให้ใช้ในปริมาณที่คงที่ คือ 0.4 กรัม และจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าค่าตัวแปรตอบสนองมีการกระจายตัวแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear effect) จึงจำเป็นต้องใช้แผนการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมในการทำสูตรสีน้ำตาลดำในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์ โดยการเลือกแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนมาใช้ แทนวิธีการแบบ CCD ซึ่งจะใช้การทดลองที่น้อยกว่าการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน แต่เนื่องจากมีการเปลี่ยนชุดของวัตถุดิบ การทดลองจึงไม่สามารถทำต่อเนื่องจาก Full factorial ได้ ดังนั้น การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจึงเป็นการทดลองที่เหมาะสมที่สุด

ดังนั้น หลังจากขั้นตอนของการสกรีนนิ่งแฟคเตอร์ เพื่อกรองปัจจัยและเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองได้แล้ว ผู้วิจัยจึงได้นำปัจจัยสำคัญทั้ง 3 มาออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน โดยการกำหนด Center point เท่ากับ 3 เพื่อวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรกับค่าตอบสนองและหาระดับที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย โดยกำหนดจำนวนซ้ำในการทดลอง 2 ครั้ง ดังนั้น หน่วยทดลองจึงเท่ากับ 30 หน่วย

ตารางที่ 4-3 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ตัวแปร	ปัจจัย	ระดับปัจจัย (กรัม)		
		ต่ำ (-1)	จุดศูนย์กลาง (0)	สูง (+1)
A	คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)	0.3	0.35	0.4
B	สีย้อมสีแดง (Solvent dyes red)	0.1	0.15	0.2
C	สีย้อมสีเหลือง (Solvent dyes yellow)	0.05	0.075	0.1

ตารางที่ 4-4 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (ทำซ้ำ 2 รอบ)

Std order	Run order	Pt type	Blocks	A	B	C	DL	Da	Db
11	1	2	1	0.35	0.1	0.1	1.31	0.26	-0.44
20	2	2	1	0.3	0.15	0.05	2.47	1.04	-0.78
5	3	2	1	0.3	0.15	0.05	2.31	1.05	-0.78
23	4	2	1	0.4	0.15	0.1	0.35	0.34	-0.45
17	5	2	1	0.4	0.1	0.075	0.44	0.22	-0.61
18	6	2	1	0.3	0.2	0.075	1.92	1.30	-0.76
9	7	2	1	0.35	0.1	0.05	1.69	0.42	-0.58
21	8	2	1	0.4	0.15	0.05	0.74	0.34	-0.54
29	9	0	1	0.35	0.15	0.075	0.91	0.42	-0.09
30	10	0	1	0.35	0.15	0.075	1.32	0.58	-0.26
10	11	2	1	0.35	0.2	0.05	0.90	0.79	-0.70
14	12	0	1	0.35	0.15	0.075	0.68	0.25	-0.13
27	13	2	1	0.35	0.2	0.1	0.84	0.93	-0.63
28	14	0	1	0.35	0.15	0.075	1.12	0.46	-0.08
24	15	2	1	0.35	0.1	0.05	1.83	0.49	-0.64
26	16	2	1	0.35	0.1	0.1	1.45	0.32	-0.47
4	17	2	1	0.4	0.2	0.075	0.39	0.71	-0.64
3	18	2	1	0.3	0.2	0.075	2.17	1.52	-0.88
25	19	2	1	0.35	0.2	0.05	1.02	0.80	-0.71
2	20	2	1	0.4	0.1	0.075	0.56	0.15	-0.59
1	21	2	1	0.3	0.1	0.075	2.62	0.79	-0.66
19	22	2	1	0.4	0.2	0.075	0.48	0.83	-0.68
22	23	2	1	0.3	0.15	0.1	2.43	1.09	-0.67
7	24	2	1	0.3	0.15	0.1	2.50	1.15	-0.68
6	25	2	1	0.4	0.15	0.05	1.18	0.57	-0.62
16	26	2	1	0.3	0.1	0.075	2.50	0.74	-0.65

ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

Std order	Run order	Pt type	Blocks	A	B	C	DL	Da	Db
12	27	2	1	0.35	0.2	0.1	0.98	0.91	-0.59
8	28	2	1	0.4	0.15	0.1	0.53	0.37	-0.45
13	29	0	1	0.35	0.15	0.075	0.76	0.55	-0.23
15	30	0	1	0.35	0.15	0.075	0.90	0.48	-0.13

หลังจากออกแบบการทดลองและทำการทดลองได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-3 และตารางที่ 4-4 ขั้นต่อไป คือ การนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีการวิเคราะห์การถดถอยและตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง ดังนี้

1. การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการออกแบบบ็อก-เบห์นเคน

```
Response Surface Regression: DL versus A, B, C

Analysis of Variance

Source               DF   Adj SS   Adj MS  F-Value  P-Value
Model                 9  15.4425   1.7158    54.99    0.000
  Linear              3  13.7384   4.5795   146.76    0.000
    A                 1  12.6914  12.6914   406.73    0.000
    B                 1   0.8556   0.8556    27.42    0.000
    C                 1   0.1914   0.1914     6.13    0.022
  Square              3   1.3714   0.4571    14.65    0.000
    A*A               1   1.0327   1.0327    33.10    0.000
    B*B               1   0.0290   0.0290     0.93    0.346
    C*C               1   0.4305   0.4305    13.80    0.001
  2-Way Interaction   3   0.3327   0.1109     3.55    0.033
    A*B               1   0.1013   0.1013     3.24    0.087
    A*C               1   0.1770   0.1770     5.67    0.027
    B*C               1   0.0545   0.0545     1.74    0.201
Error                20   0.6241   0.0312
  Lack-of-Fit         3   0.1306   0.0435     1.50    0.250
  Pure Error         17   0.4934   0.0290
Total                29  16.0666


Model Summary

       S    R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
0.176645  96.12%     94.37%      92.00%
```

ภาพที่ 4-27 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการออกแบบบ็อก-เบห์นเคน (DL)

จากการวิเคราะห์การถดถอยในภาพที่ 4-27 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า DL ของสีน้ำตาลดำในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์ ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ คาร์บอนแบล็ค (A) สีย้อมสีแดง (B) และสีย้อมสีเหลือง (C) พจน์กำลังสองของคาร์บอนแบล็ค (A*A) สีย้อมสีเหลือง (C*C) อันตรกิริยาระหว่างคาร์บอนแบล็คและสีย้อมสีเหลือง (A*C)

Response Surface Regression: Da versus A, B, C

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	3.36814	0.37424	47.25	0.000
Linear	3	2.86871	0.95624	120.74	0.000
A	1	1.65766	1.65766	209.31	0.000
B	1	1.21000	1.21000	152.78	0.000
C	1	0.00106	0.00106	0.13	0.719
Square	3	0.44027	0.14676	18.53	0.000
A*A	1	0.38150	0.38150	48.17	0.000
B*B	1	0.07171	0.07171	9.05	0.007
C*C	1	0.02640	0.02640	3.33	0.083
2-Way Interaction	3	0.05916	0.01972	2.49	0.090
A*B	1	0.00180	0.00180	0.23	0.639
A*C	1	0.01531	0.01531	1.93	0.180
B*C	1	0.04205	0.04205	5.31	0.032
Error	20	0.15840	0.00792		
Lack-of-Fit	3	0.02151	0.00717	0.89	0.466
Pure Error	17	0.13688	0.00805		
Total	29	3.52654			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0889932	95.51%	93.49%	90.68%

ภาพที่ 4-28 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการออกแบบบ็อก-เบห์นเคน (Da)

จากการวิเคราะห์การถดถอยในภาพที่ 4-28 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า Da ของสีน้ำตาลดำในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์ ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ คาร์บอนแบล็ค (A) และสีย้อมสีแดง (B) พจน์กำลังสองของคาร์บอนแบล็ค (A*A) สีย้อมสีแดง (B*B) อันตรกิริยาระหว่างสีย้อมสีแดงและสีย้อมสีเหลือง (B*C)

Response Surface Regression: Db versus A, B, C

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	1.36442	0.151602	56.60	0.000
Linear	3	0.21761	0.072538	27.08	0.000
A	1	0.10240	0.102400	38.23	0.000
B	1	0.05641	0.056406	21.06	0.000
C	1	0.05881	0.058806	21.95	0.000
Square	3	1.13918	0.379726	141.77	0.000
A*A	1	0.57208	0.572082	213.58	0.000
B*B	1	0.46926	0.469263	175.19	0.000
C*C	1	0.26542	0.265417	99.09	0.000
2-Way Interaction	3	0.00762	0.002542	0.95	0.436
A*B	1	0.00551	0.005512	2.06	0.167
A*C	1	0.00031	0.000313	0.12	0.736
B*C	1	0.00180	0.001800	0.67	0.422
Error	20	0.05357	0.002679		
Lack-of-Fit	3	0.01124	0.003746	1.50	0.249
Pure Error	17	0.04233	0.002490		
Total	29	1.41799			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0517546	96.22%	94.52%	92.52%

ภาพที่ 4-29 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการออกแบบบ็อก-เบห์นเคน (Db)

จากการวิเคราะห์การถดถอยในภาพที่ 4-29 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า Db ของสีน้ำตาลดำในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์ ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ คาร์บอนแบล็ค (A) สีย้อมสีแดง (B) และสีย้อมสีเหลือง (C) พจน์กำลังสองของคาร์บอนแบล็ค (A*A) สีย้อมสีแดง (B*B) และสีย้อมสีเหลือง (C*C)

2. ผลการวิเคราะห์การถดถอย

นำปัจจัยที่มีผลต่อค่า DL, Da, Db ของสีน้ำตาลดำจากการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน มาทำการวิเคราะห์การถดถอยต่อเพื่อสร้างสมการถดถอยประมาณค่า DL, Da, Db ของสีน้ำตาลดำ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ โดยทำการลดรูปในส่วนของปัจจัยที่ไม่มีผลต่อการทดลองได้ผล ดังนี้

Response Surface Regression: DL versus A, B, C

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	15.2578	2.5430	72.31	0.000
Linear	3	13.7384	4.5795	130.23	0.000
A	1	12.6914	12.6914	360.90	0.000
B	1	0.8556	0.8556	24.33	0.000
C	1	0.1914	0.1914	5.44	0.029
Square	2	1.3423	0.6712	19.09	0.000
A*A	1	1.0122	1.0122	28.78	0.000
C*C	1	0.4160	0.4160	11.83	0.002
2-Way Interaction	1	0.1770	0.1770	5.03	0.035
A*C	1	0.1770	0.1770	5.03	0.035
Error	23	0.8088	0.0352		
Lack-of-Fit	6	0.3154	0.0526	1.81	0.157
Pure Error	17	0.4934	0.0290		
Total	29	16.0666			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.187525	94.97%	93.65%	91.76%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0.9869	0.0637	15.49	0.000	
A	-1.7813	-0.8906	0.0469	-19.00	0.000	1.00
B	-0.4625	-0.2313	0.0469	-4.93	0.000	1.00
C	-0.2187	-0.1094	0.0469	-2.33	0.029	1.00
A*A	0.7383	0.3691	0.0688	5.37	0.000	1.01
C*C	0.4733	0.2366	0.0688	3.44	0.002	1.01
A*C	-0.2975	-0.1488	0.0663	-2.24	0.035	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

DL = 25.34 - 112.2 A - 4.625 B - 19.5 C + 147.7 A*A + 379 C*C - 119.0 A*C

ภาพที่ 4-30 การวิเคราะห์ถดถอยสำหรับตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่า DL

จากข้อมูลการวิเคราะห์การถดถอยในภาพที่ 4-30 เมื่อพิจารณาค่า P-value พบว่าค่า P-value ของปัจจัยหลักทุกตัวมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยหลักทุกตัว ได้แก่ คาร์บอนแบล็ค (A) สีย้อมสีแดง (B) และสีย้อมสีเหลือง (C) มีผลต่อค่าความสว่าง (DL) ของเฉดสีน้ำตาลดำอย่างมีนัยสำคัญ

ซึ่งนอกจากปัจจัยหลักดังกล่าวแล้วยังพบว่า พจน์กำลังสองของคาร์บอนแบล็ค (A*A) และสีย้อมสีเหลือง (C*C) และอันตรกิริยาระหว่างคาร์บอนแบล็คและสีย้อมสีเหลือง (A*C) ซึ่งเป็น

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสว่างของเฉดสีน้ำตาลดำในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่างของเฉดสีน้ำตาลดำ และปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อค่าความสว่างของเฉดสีน้ำตาลดำอย่างมีนัยสำคัญได้ตามสมการนี้

$$Y_{DL^*} = 25.34 - 112.2\ A - 4.625\ B - 19.5\ C + 147.7\ A^*A + 379\ C^*C - 119.0\ A^*C$$

โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-Sq(adj) เท่ากับ 93.65% หมายความว่า ในความผันแปรของค่า DL* ของสีน้ำตาลดำทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 93.66% จึงเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ

จากตารางค่า P-value ของ Lack of fit เท่ากับ 0.157 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ แสดงว่า รูปแบบการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมแล้ว

Response Surface Regression: Da versus A, B, C

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	3.32463	0.55410	63.12	0.000
Linear	3	2.86871	0.95624	108.93	0.000
A	1	1.65766	1.65766	188.83	0.000
B	1	1.21000	1.21000	137.83	0.000
C	1	0.00106	0.00106	0.12	0.732
Square	2	0.41387	0.20693	23.57	0.000
A*A	1	0.36840	0.36840	41.97	0.000
B*B	1	0.06556	0.06556	7.47	0.012
2-Way Interaction	1	0.04205	0.04205	4.79	0.039
B*C	1	0.04205	0.04205	4.79	0.039
Error	23	0.20191	0.00878		
Lack-of-Fit	6	0.06503	0.01084	1.35	0.291
Pure Error	17	0.13688	0.00805		
Total	29	3.52654			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0936944	94.27%	92.78%	90.99%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0.4935	0.0318	15.50	0.000	
A	-0.6438	-0.3219	0.0234	-13.74	0.000	1.00
B	0.5500	0.2750	0.0234	11.74	0.000	1.00
C	-0.0162	-0.0081	0.0234	-0.35	0.732	1.00
A*A	0.4454	0.2227	0.0344	6.48	0.000	1.01
B*B	0.1879	0.0939	0.0344	2.73	0.012	1.01
B*C	0.1450	0.0725	0.0331	2.19	0.039	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

Da = 14.36 - 68.79 A - 10.12 B - 9.02 C + 89.1 A*A + 37.6 B*B + 58.0 B*C

ภาพที่ 4-31 การวิเคราะห์ถดถอยสำหรับตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่า Da

จากข้อมูลการวิเคราะห์การถดถอยในภาพที่ 4-31 เมื่อพิจารณาค่า P-value พบว่าค่า P-value ของปัจจัยหลักที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 คือ คาร์บอนแบล็ค (A) และสีย้อมสีแดง (B) ที่มีผลต่อค่า Da ของเฉดสีน้ำตาลดำอย่างมีนัยสำคัญ

ซึ่งนอกจากปัจจัยหลักดังกล่าวแล้วยังพบว่า พจน์กำลังสองของคาร์บอนแบล็ค (A*A) และสีย้อมสีแดง (B*B) และอันตรกิริยาระหว่างสีย้อมสีแดงและสีย้อมสีเหลือง (B*C) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า Da* ของเฉดสีน้ำตาลดำในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Da* ของเฉดสีน้ำตาลดำ และปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อค่า Da ของเฉดสีน้ำตาลดำอย่างมีนัยสำคัญได้ตามสมการนี้

$$Y_{Da^*} = 14.36 - 68.79\ A - 10.12\ B - 9.02\ C + 89.1\ A^*A + 37.6\ B^*B + 58.0\ B^*C$$

โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-Sq(adj) เท่ากับ 92.78% หมายความว่าในความผันแปรของค่า Da* ของสีน้ำตาลดำทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 92.78% จึงเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ

จากตารางค่า P-value ของ Lack of fit เท่ากับ 0.291 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ แสดงว่า รูปแบบการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมแล้ว

Response Surface Regression: Db versus A, B, C

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	1.35679	0.226132	84.99	0.000
Linear	3	0.21761	0.072537	27.26	0.000
A	1	0.10240	0.102400	38.49	0.000
B	1	0.05641	0.056406	21.20	0.000
C	1	0.05881	0.058806	22.10	0.000
Square	3	1.13918	0.379726	142.72	0.000
A*A	1	0.57208	0.572082	215.01	0.000
B*B	1	0.46926	0.469263	176.37	0.000
C*C	1	0.26542	0.265417	99.75	0.000
Error	23	0.06120	0.002661		
Lack-of-Fit	6	0.01886	0.003144	1.26	0.325
Pure Error	17	0.04233	0.002490		
Total	29	1.41799			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0515819	95.68%	94.56%	92.99%

ภาพที่ 4-32 การวิเคราะห์ถดถอยสำหรับตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่า Db

```
Coded Coefficients

Term       Effect     Coef  SE Coef  T-Value  P-Value   VIF
Constant           -0.1533   0.0211    -7.28    0.000
A          0.1600   0.0800   0.0129     6.20    0.000  1.00
B         -0.1188  -0.0594   0.0129    -4.60    0.000  1.00
C          0.1213   0.0606   0.0129     4.70    0.000  1.00
A*A       -0.5567  -0.2783   0.0190   -14.66    0.000  1.01
B*B       -0.5042  -0.2521   0.0190   -13.28    0.000  1.01
C*C       -0.3792  -0.1896   0.0190    -9.99    0.000  1.01


Regression Equation in Uncoded Units

Db = -18.330 + 79.53 A + 29.06 B + 47.93 C - 111.33 A*A - 100.83 B*B
- 303.3 C*C
```

ภาพที่ 4-32 (ต่อ)

จากข้อมูลการวิเคราะห์การถดถอยในภาพที่ 4-32 เมื่อพิจารณาค่า P-value พบว่าค่า P-value ของปัจจัยหลักทุกตัวมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยหลักทุกตัว ได้แก่ คาร์บอนแบล็ค (A) สีย้อมสีแดง (B) และสีย้อมสีเหลือง (C) มีผลต่อค่า Db ของเฉดสีน้ำตาลดำอย่างมีนัยสำคัญ

ซึ่งนอกจากปัจจัยหลักดังกล่าวแล้วยังพบว่า พจน์กำลังสองของ คาร์บอนแบล็ค (A*A) สีย้อมสีแดง (B*B) และสีย้อมสีเหลือง (C*C) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า Db ของเฉดสีน้ำตาลดำ ในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Db* ของเฉดสีน้ำตาลดำ และปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อค่า Db* ของเฉดสีน้ำตาลดำอย่างมีนัยสำคัญได้ตามสมการนี้

$$Y_{Db^*} = -18.330 + 79.53\ A + 29.06\ B + 47.93\ C - 111.33\ A^*A - 100.83\ B^*B - 303.3\ C^*C$$

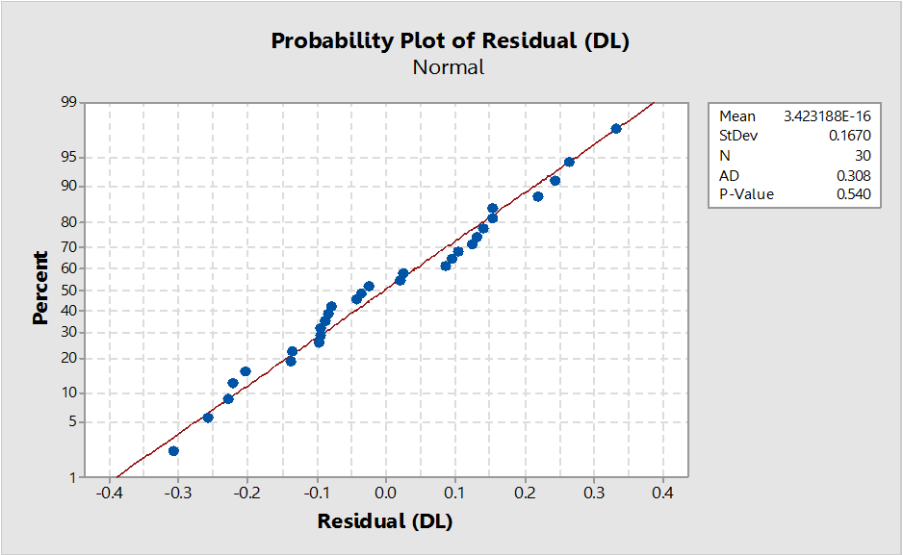
โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-Sq(adj) เท่ากับ 94.56% หมายความว่า ในความผันแปรของค่า Db* ของสีน้ำตาลดำทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 94.56% จึงเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ

จากตารางค่า P-value ของ Lack of fit เท่ากับ 0.325 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ แสดงว่า รูปแบบการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมแล้ว

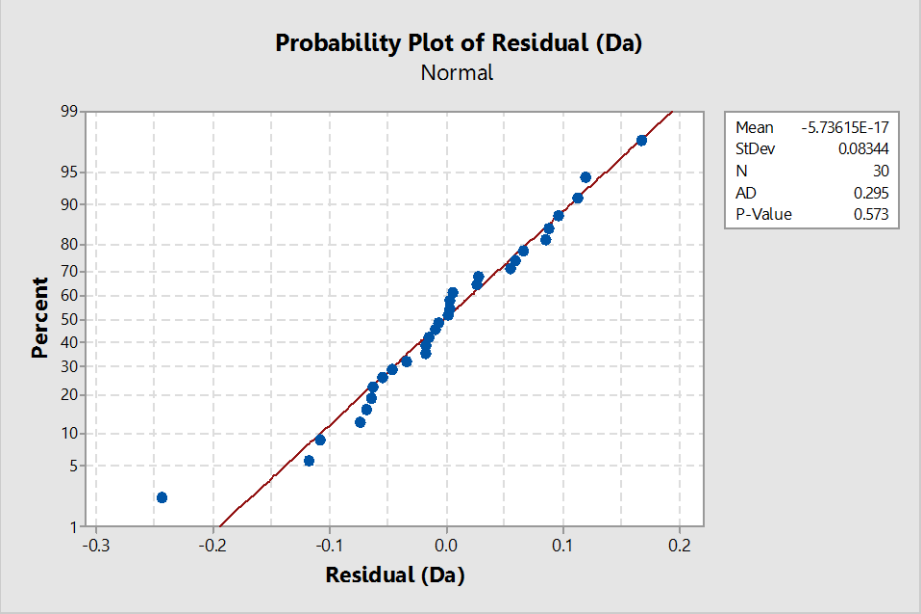
3. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยการตรวจสอบว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ มีความอิสระต่อกันตรงตามข้อสมมติฐานเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็น ดังนี้

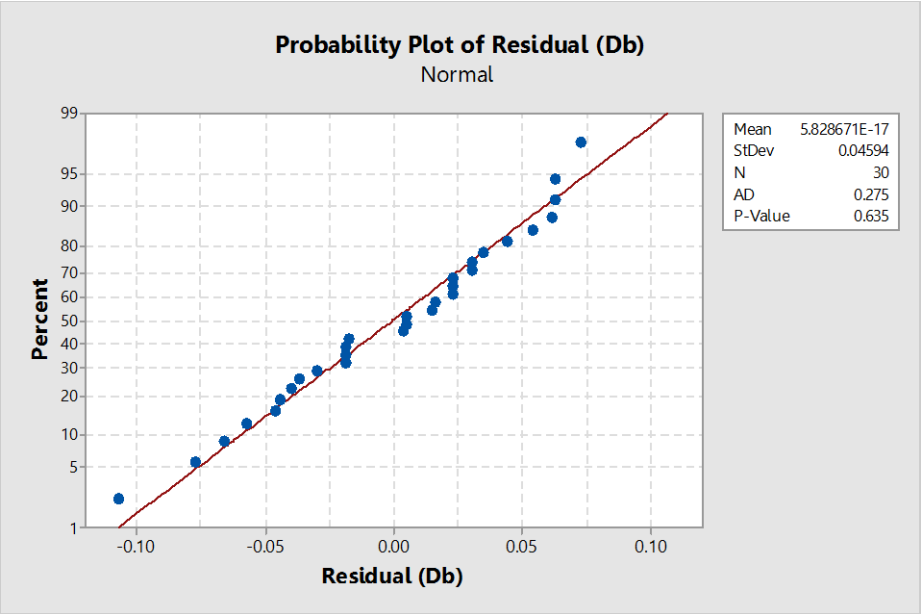
3.1 ตรวจสอบการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อนว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) หรือไม่ ดังแสดงในภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4-33 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (DL)



ภาพที่ 4-34 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da)



ภาพที่ 4-35 กราฟ Normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Db)

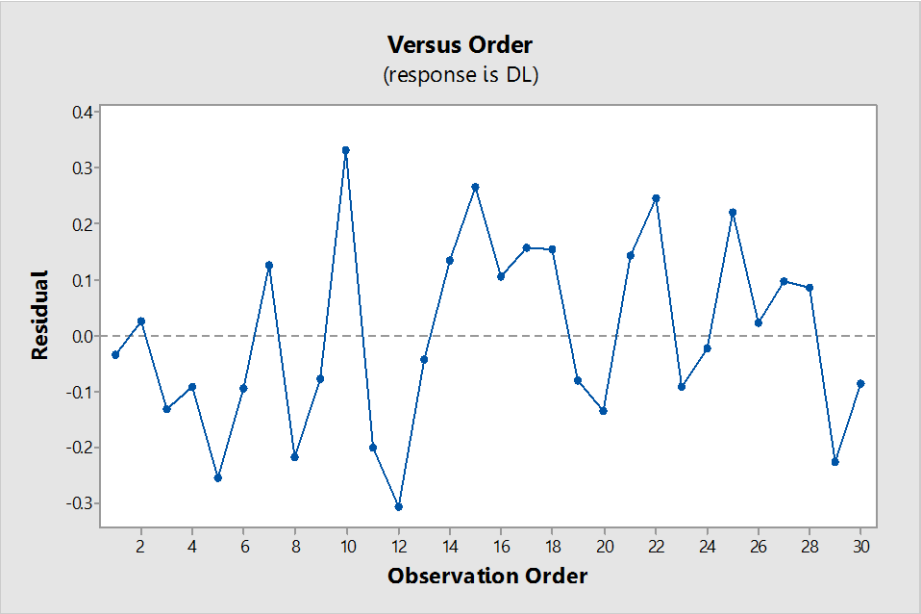
จากการทดสอบ Normality test ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสมมติฐาน คือ

H_0: ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

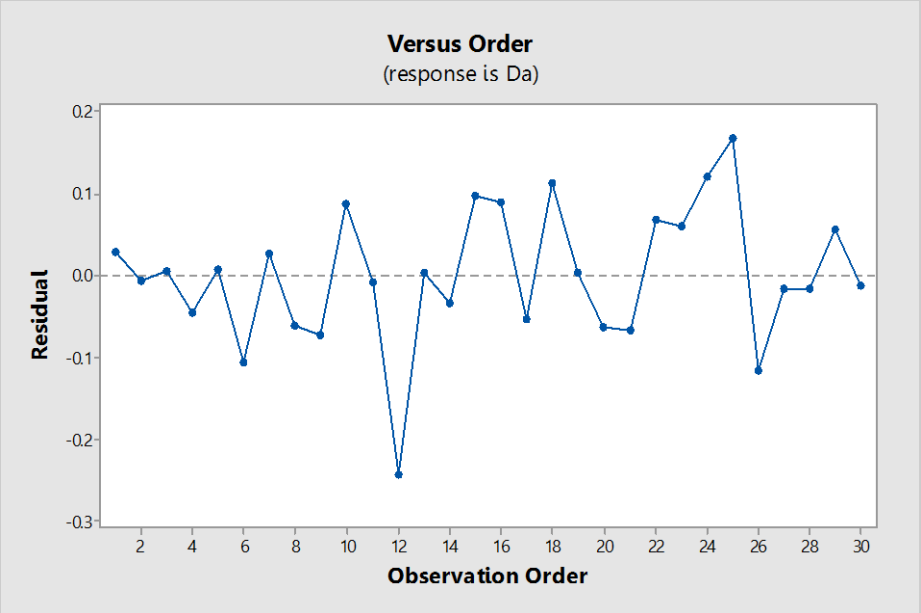
H_1: ค่าคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

เมื่อพิจารณาค่า P-Value จากภาพที่ 4-33 ถึงภาพที่ 4-35 พบว่าค่า P-value = 0.540, 0.573 และ 0.635 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ จึงสรุปได้ว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องเชื่อถือได้

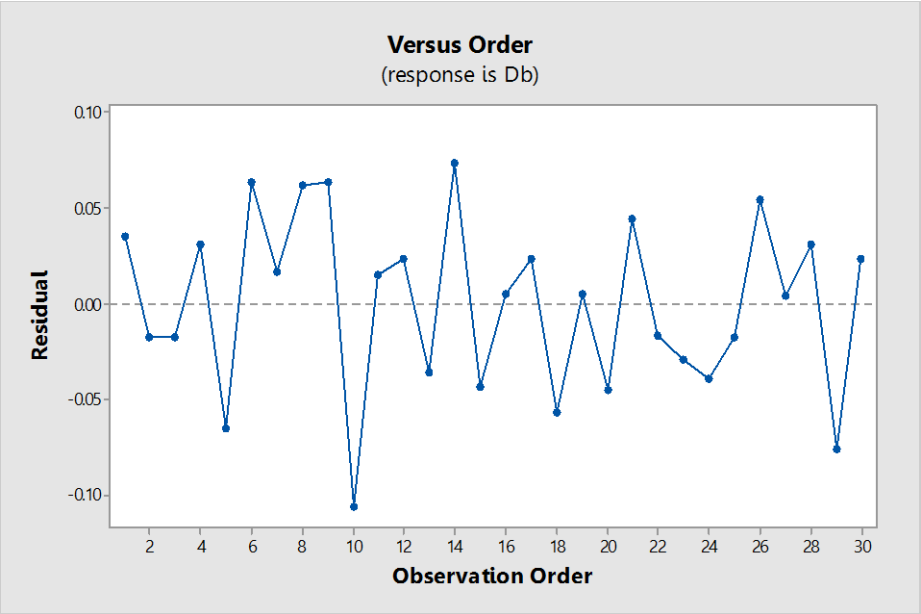
3.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent) ของค่าคลาดเคลื่อน เป็นการตรวจสอบค่าความผิดพลาดกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล



ภาพที่ 4-36 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (DL)



ภาพที่ 4-37 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da)



ภาพที่ 4-38 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Db)

Runs Test: RESI1 (DL), RESI1 (Da), RESI1 (Db)

```
Runs test for RESI1 (DL)

Runs above and below K = 1.865637E-15

The observed number of runs = 13
The expected number of runs = 15.9333
14 observations above K, 16 below
P-value = 0.273

Runs test for RESI1 (Da)

Runs above and below K = -6.55379E-16

The observed number of runs = 20
The expected number of runs = 16
15 observations above K, 15 below
P-value = 0.137

Runs test for RESI1 (Db)

Runs above and below K = -4.04272E-15

The observed number of runs = 19
The expected number of runs = 15.7333
17 observations above K, 13 below
P-value = 0.216
```

ภาพที่ 4-39 ทดสอบ Runs test ของข้อมูล (DL, Da และ Db) สำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

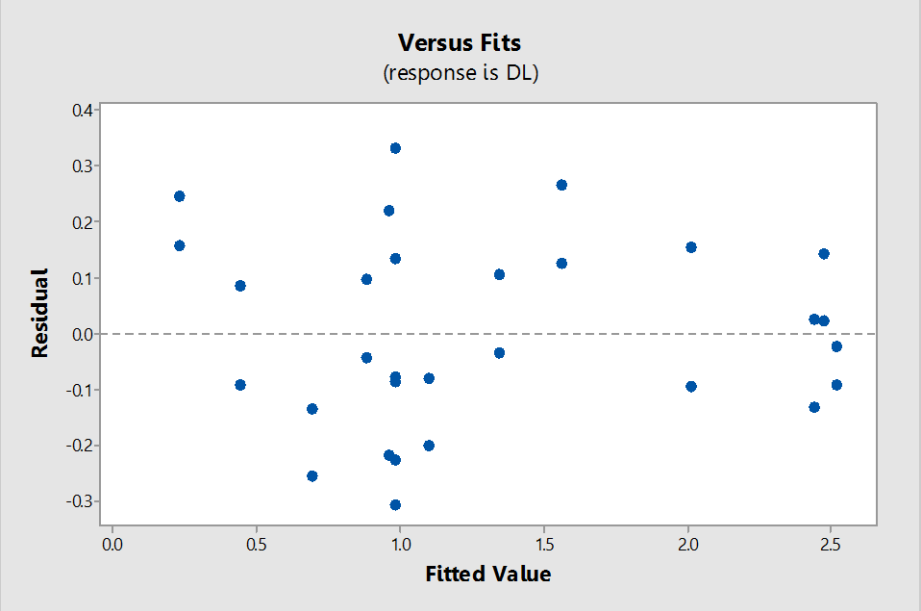
จากการทดสอบ Runs test ของข้อมูลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสมมติฐานในการทดสอบ คือ

H_0: ข้อมูลตัวอย่างเป็นไปอย่างสุ่ม

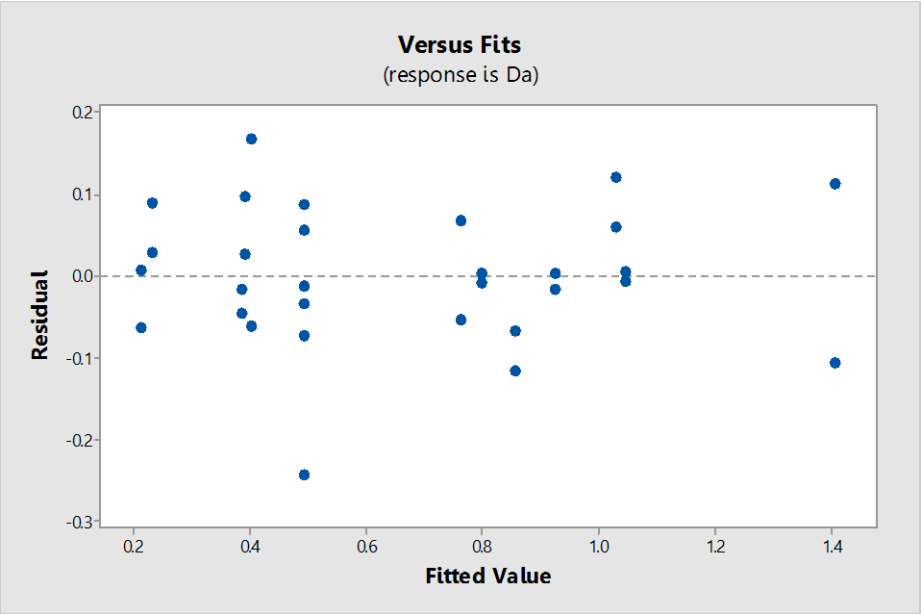
H_1: ข้อมูลตัวอย่างไม่เป็นไปอย่างสุม

เมื่อพิจารณาค่า P-value ของค่า DL, Da และ Db จากภาพที่ 4-39 พบว่าค่า P-value = 0.273, 0.137 และ 0.216 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลตัวอย่างเป็นไปอย่างสุ่มและเป็นอิสระต่อกัน

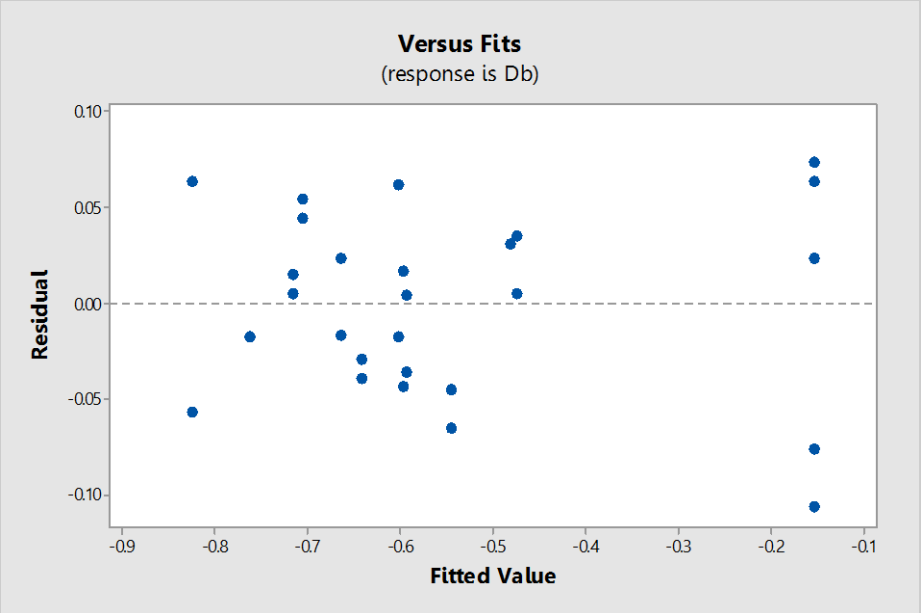
3.3 ตรวจสอบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนคงที่ (Variance stability) หรือไม่



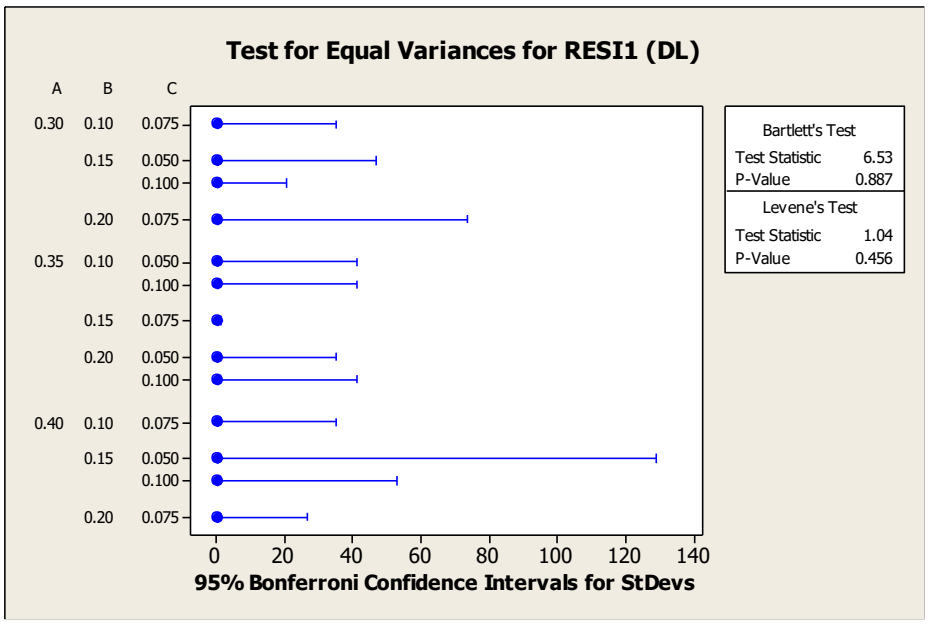
ภาพที่ 4-40 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (DL)



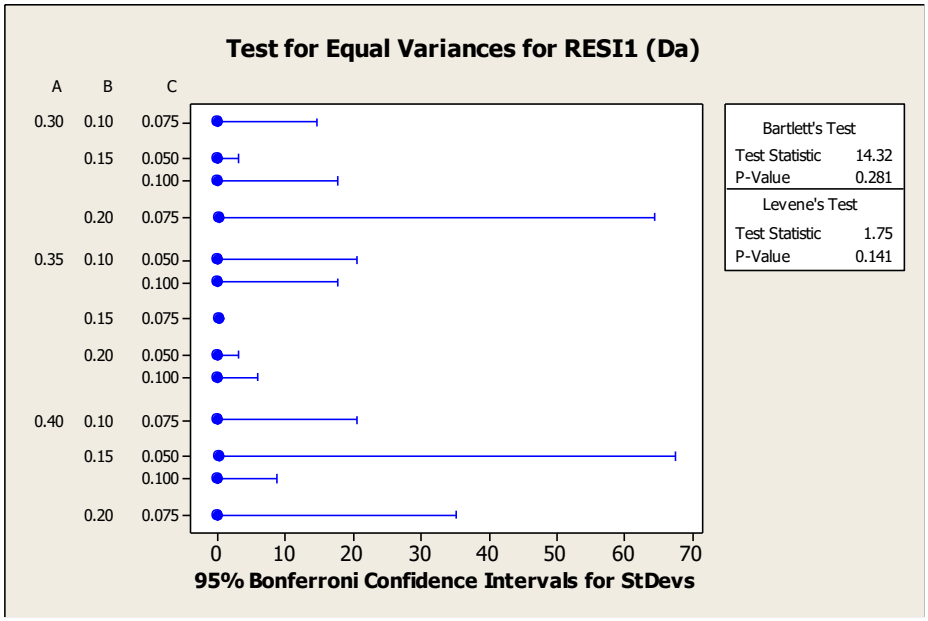
ภาพที่ 4-41 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da)



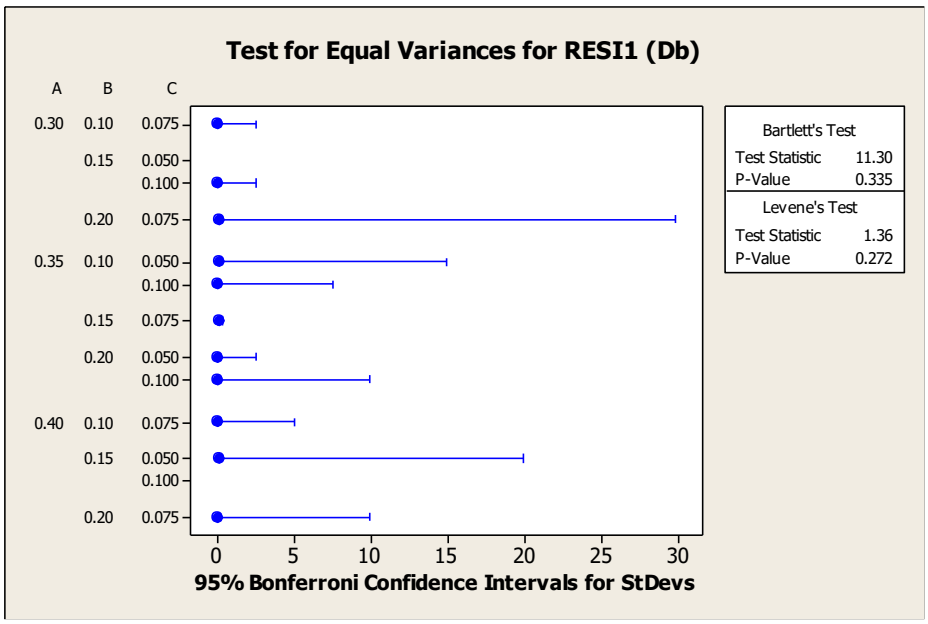
ภาพที่ 4-42 กราฟของค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตอบสนองสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Db)



ภาพที่ 4-43 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (DL)



ภาพที่ 4-44 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da)



ภาพที่ 4-45 ทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Da)

จากการทดสอบค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสมมติฐานในการทดสอบ คือ

H_0: ค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่

H_1: ค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าไม่คงที่

เมื่อพิจารณาค่า P-value ของค่า DL, Da และ Db จากภาพที่ 4-43 ถึงภาพที่ 4-45 พบว่าค่า P-value ของ Bartlett's test (Normal distribution) = 0.887, 0.281 และ 0.335 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ แสดงว่า ค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่

จากภาพที่ 4-33 ถึงภาพที่ 4-45 พบว่า รูปแบบส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ทุกประการ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือได้

การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป (Minitab version) ในการวิเคราะห์เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของสูตรผสมในกระบวนการผลิตเม็ดสีเอบีเอสคอมปาวด์ของปัจจัยหลักทั้ง 3 ชนิด ที่จะทำให้เกิดค่าความแตกต่างของแผ่นสีตัวอย่างกับแผ่นสีมาตรฐานน้อยที่สุด โดยมีแบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ในรูป Uncoded units

$Y_{DL^*} = 25.34 - 112.2\ A - 4.625\ B - 19.5\ C + 147.7\ A^*A + 379\ C^*C - 119.0\ A^*C$

$Y_{Da^*} = 14.36 - 68.79\ A - 10.12\ B - 9.02\ C + 89.1\ A^*A + 37.6\ B^*B + 58.0\ B^*C$

$Y_{Db^*} = -18.330 + 79.53\ A + 29.06\ B + 47.93\ C - 111.33\ A^*A - 100.83\ B^*B - 303.3\ C^*C$

โดยมีข้อจำกัด $0.3 \leq A \leq 0.4$, $0.10 \leq B \leq 0.2$, $0.05 \leq C \leq 0.1$ และ $A, B, C > 0$

Y_{DL} = ค่าความสว่างของเฉดสี (DL)

Y_{Da} = ค่าความเป็นสีแดงและสีเขียวของเฉดสี (Da)

Y_{Db} = ค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงินของเฉดสี (Db)

A = คาร์บอนแบล็ค

B = สีย้อมสีเหลือง

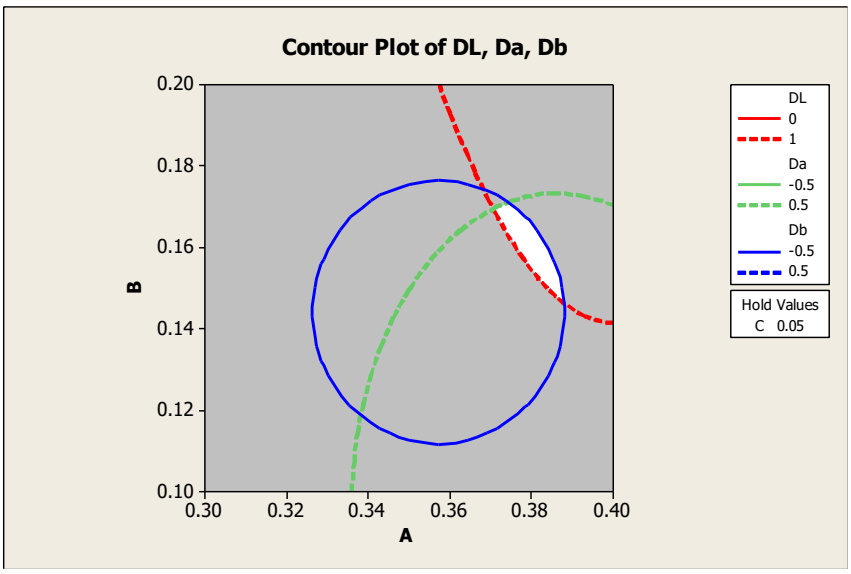
C = สีย้อมสีผงสีแดง

สำหรับค่าเป้าหมาย (DL, Da และ Db) ในการทดลองครั้งนี้เป็นไปตามเกณฑ์ที่ลูกค้ากำหนด โดยอ้างอิงเทียบจากแผ่นสีมาตรฐาน (Master plate) ในการทำสูตรเริ่มต้น โดยกำหนดให้

ค่าความสว่าง (DL) จะต้องมีค่าไม่เกิน 1

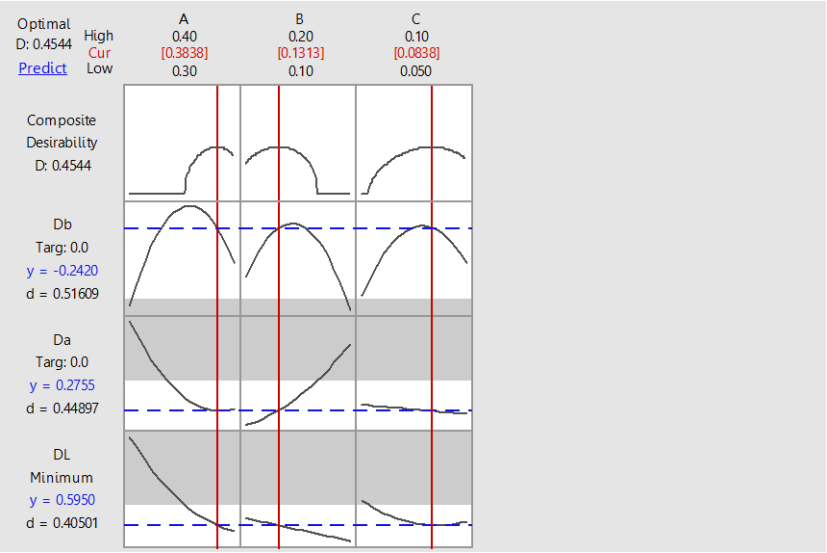
ค่า Da และ Db จะต้องมีค่าเท่ากับ 0 ± 0.5

เมื่อนำค่าเป้าหมายที่ต้องการมาทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม Minitab จะได้กราฟจุดตัดที่ทำให้มีค่าสีใกล้เคียงชิ้นงานมาตรฐานมากที่สุด ดังแสดงภาพที่ 4-47 และการแสดงรูปพื้นผิวตอบสนองดังภาพที่ 4-46



ภาพที่ 4-46 Overlaid contour plot สำหรับ Response DL, Da และ Db

จากภาพที่ 4-46 การทดสอบ Overlaid contour plot สำหรับค่าตอบสนอง DL, Da และ Db โดยการกำหนดค่าปัจจัย A, B และ C ไว้ที่ระดับต่ำ คือ 0.3, 0.1 และ 0.05 ตามลำดับแกน X และแกน Y บ่งบอกช่วงของปริมาณคาร์บอนแบล็ค (A) และสีย้อมสีแดง (B) และกำหนดค่า DL = 0, 1 ส่วน Da และ Db = -0.5, 0.5 ดังนั้น หากต้องการค่าสีในช่วงใดช่วงหนึ่งที่สนใจ ก็จะสามารถประมาณค่าสีได้จากกราฟนี้



ภาพที่ 4-47 Optimization plot สำหรับ Multiple responses DL, Da และ Db

Response Optimization: Db, Da, DL

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Db	Target	-0.5	0	0.5	1	1
Da	Target	-0.5	0	0.5	1	1
DL	Minimum		0	1.0	1	1

Solution

				Db	Da	DL	Composite
Solution	A	B	C	Fit	Fit	Fit	Desirability
1	0.383838	0.131313	0.0838384	-0.241955	0.275515	0.594991	0.454432

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
A	0.383838
B	0.131313
C	0.0838384

ภาพที่ 4-48 ข้อมูลวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization)

ระดับสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยดังภาพที่ 4-48 ดังนั้น จากการดำเนินการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของสูตรผสม ในกระบวนการผลิตเม็ดสีเอบีเอสคอมปาวด์สีน้ำตาลดำ โดยการใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จากผลการทดลองพบว่าระดับสภาวะที่เหมาะสมในการปรับค่าปริมาณของสารเคมีของแต่ละปัจจัย คือ

1. ปรับค่าปริมาณของคาร์บอนแบล็คที่ 0.38 กรัม
2. ปรับค่าปริมาณสีย้อมสีแดงที่ 0.13 กรัม
3. ปรับค่าปริมาณสีย้อมสีเหลืองที่ 0.08 กรัม

ยืนยันผลและวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อนำปัจจัยและระดับที่เหมาะสมดังกล่าวไปทดลองปรับใช้ในการทำสูตรสีน้ำตาลดำ เพื่อยืนยันว่าข้อมูลดังกล่าวจะทำให้เกิดค่าความแตกต่างของแผ่นสีตัวอย่างกับแผ่นสีมาตรฐานน้อยที่สุด และอยู่ในค่าเป้าหมายตามที่ต้องการหรือไม่ เพื่อที่จะสามารถนำสูตรที่ได้นี้มากำหนดเป็นสูตรมาตรฐานในกระบวนการการผลิตเอบีเอสคอมปาวด์สีน้ำตาลดำต่อไป โดยทำการทดลองและเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 12 การทดลองซึ่งได้ค่าสีผลดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ข้อมูลยืนยันผลการวิเคราะห์จากแผนการทดลองแบบบ็อกเบห์นเคน

ลำดับการทดลองที่	ค่าสีที่วัดได้		
	DL	Da	Db
1	0.65	0.25	-0.39
2	0.86	0.29	-0.29
3	0.56	0.31	-0.20
4	0.79	0.34	-0.28
5	0.77	0.26	-0.35
6	0.52	0.21	-0.28
7	0.82	0.36	-0.23
8	0.66	0.32	-0.22
9	0.76	0.36	-0.24
10	0.51	0.27	-0.34
11	0.50	0.34	-0.20
12	0.59	0.25	-0.30

1. คำนวณความพอเพียงของจำนวนตัวอย่าง

จากข้อมูลการทดลองกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ทำการคำนวณความพอเพียงของจำนวนตัวอย่างได้จากโปรแกรม Minitab ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

Power and Sample Size

```
1-Sample t Test

Testing mean = null (versus not = null)
Calculating power for mean = null + difference
Alpha = 0.05  Assumed standard deviation = 0.18


            Sample  Target
Difference    Size   Power  Actual Power
      0.25       9    0.95      0.952594
```

ภาพที่ 4-49 การคำนวณจำนวนตัวอย่างจากค่า DL

Power and Sample Size

```
1-Sample t Test

Testing mean = null (versus not = null)
Calculating power for mean = null + difference
Alpha = 0.05  Assumed standard deviation = 0.09


            Sample  Target
Difference    Size   Power  Actual Power
      0.15       7    0.95      0.953439
```

ภาพที่ 4-50 การคำนวณจำนวนตัวอย่างจากค่า Da

Power and Sample Size

```
1-Sample t Test

Testing mean = null (versus not = null)
Calculating power for mean = null + difference
Alpha = 0.05  Assumed standard deviation = 0.05


            Sample  Target
Difference    Size   Power  Actual Power
      0.15       4    0.95      0.967001
```

ภาพที่ 4-51 การคำนวณจำนวนตัวอย่างจากค่า Db

จากภาพที่ 4-49 ถึงภาพที่ 4-51 สรุปได้ว่า จำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของกระบวนการผลิตเอบีเอสคอมปาวด์สูตรสีน้ำตาลดำที่เหมาะสมที่สุด คือ 9 การทดลองเป็นอย่างน้อย ซึ่งในที่นี้ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 12 การทดลองจึงถือว่าพอเพียง

2. สมมติฐานทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากร

2.1 ทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของค่า DL ที่วัดได้จากการยืนยันผลการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.60 หรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

สามารถเขียนเป็นสมมติฐานเชิงสถิติได้ว่า

$H_0 : \mu = 0.60$

$H_1 : \mu \neq 0.60$

One-Sample T: DL

```
Test of mu = 0.6 vs not = 0.6

Variable   N    Mean   StDev  SE Mean       95% CI          T      P
DL        12  0.6658  0.1303   0.0376  (0.5830, 0.7487)  1.75  0.108
```

ภาพที่ 4-52 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่า DL

จากผลการทดสอบค่าเฉลี่ยพบว่า ค่า P-value > α จึงไม่ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่า DL ที่วัดได้จากการยืนยันผลการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.60

2.2 ทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของค่า Da ที่วัดได้จากการยืนยันผลการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.28 หรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ (α = 0.05)

สามารถเขียนเป็นสมมติฐานเชิงสถิติได้ว่า

$H_0 : \mu = 0.28$

$H_1 : \mu \neq 0.28$

One-Sample T: Da

```
Test of mu = 0.28 vs not = 0.28

Variable   N    Mean   StDev  SE Mean       95% CI          T      P
Da        12  0.2967  0.0491   0.0142  (0.2655, 0.3278)  1.18  0.264
```

ภาพที่ 4-53 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่า Da

จากผลการทดสอบค่าเฉลี่ยพบว่า ค่า P-value > α จึงไม่ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่า Da ที่วัดได้จากการยืนยันผลการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.28

2.3 ทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของค่า Db ที่วัดได้จากการยืนยันผลการทดลองมีค่าเท่ากับ -0.24 หรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ (α = 0.05)

สามารถเขียนเป็นสมมติฐานเชิงสถิติได้ว่า

$H_0 : \mu = 0.24$

$H_1 : \mu \neq 0.24$

One-Sample T: Db

```
Test of mu = -0.24 vs not = -0.24

Variable   N     Mean   StDev  SE Mean         95% CI            T      P
Db        12  -0.2767  0.0614   0.0177  (-0.3157, -0.2377)  -2.07  0.063
```

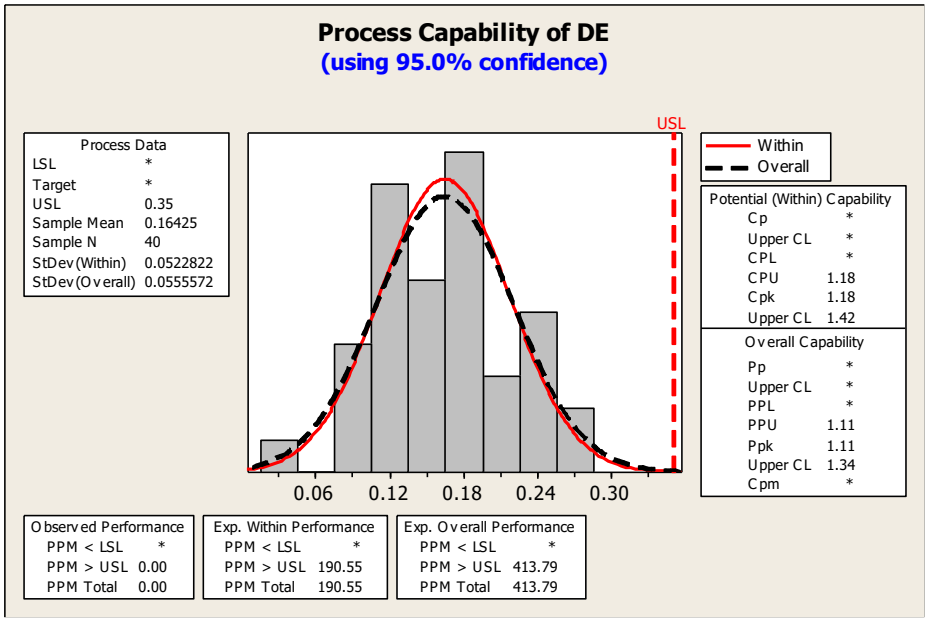
ภาพที่ 4-54 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่า Db

จากผลการทดสอบค่าเฉลี่ยพบว่า ค่า P-value > α จึงไม่ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่า Db ที่วัดได้จากการยืนยันผลการทดลองมีค่าเท่ากับ -0.24

3. วิเคราะห์สมรรถภาพของกระบวนการ

หลังจากทำการยืนยันผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสภาวะที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นทำการวิเคราะห์สมรรถภาพของกระบวนการเพื่อดูว่ากระบวนการที่ทำการศึกษามีความสามารถด้านสมรรถนะหรือไม่ โดยการใช้ค่า C_{pk} วัดความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการที่แท้จริง โดยนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้ในการผลิตจริง และทำการเก็บข้อมูลค่าความแตกต่างของสี DE (ที่มาจากสมการ $DE = \sqrt{(DL)^2 + (Da)^2 + (Db)^2}$) ที่ได้จากกระบวนการผลิตเป็นจำนวน 4 ล็อตการผลิต ล็อตละ 10 ตัวอย่าง จากวันที่ 7-15 พฤศจิกายน 2559 ดังแสดงในตารางภาคผนวก ข-1

กระบวนการที่ใช้ศึกษาในการผลิตจริงมีการกำหนดขอบเขตค่า $DE \leq 0.35$ เมื่อเทียบกับค่าแผ่นสีของสูตรมาตรฐานซึ่งเป็นค่าที่ทางลูกค้ากำหนดไว้ จากตารางภาคผนวก ข-1 ทำการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ ดังแสดงในภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4-55 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต (DE)

จากผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต (DE) พบว่ามีค่า $C_{pk} > 1$ เนื่องจากกระบวนการผลิตเป็นกระบวนการที่อาศัยงานแรงงานเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น แสดงว่ากระบวนการผลิตนี้มีขีดความสามารถที่ค่อนข้างดีแล้ว

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

การวิจัยเรื่อง การกำหนดสูตรผสมในการผลิตเม็ดสีเอบีเอสคอมปาวด์ ด้วยการออกแบบการทดลอง เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการทำสูตรสีน้ำตาลดำของเม็ดเอบีเอส เพื่อให้ได้ค่าเฉดสีและคุณสมบัติทางเทคนิคตรงตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งตัวแปรตอบสนองที่สนใจในการศึกษาครั้งนี้ คือ ค่าสี (DL, Da และ Db) ของเฉดสีน้ำตาลดำ โดยค่าตัวแปรตอบสนองจะเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่ลูกค้ากำหนดอ้างอิงเทียบจากแผ่นสีมาตรฐาน (Master plate) หลังจากที่ได้สรุปผลร่วมกับผู้เชี่ยวชาญในการทำสูตรสีแล้วพบว่ามีปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย ที่น่าจะมีอิทธิพลต่อค่าสีของเฉดสีน้ำตาลดำ ซึ่งได้แก่ คาร์บอนแบล็ค สีย้อมสีแดง สีย้อมสีเหลือง และแมกนีเซียมสเตียเรท

จากนั้นทำการทดลองพิจารณาปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าสี (DL, Da และ Db) ของเฉดสีน้ำตาลดำในเบื้องต้นโดยใช้การออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียลแบบมีจุดศูนย์กลางมาดำเนินการทดลอง จากผลการทดลองสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและปัจจัยที่ทำการทดลองนั้นมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง และยังพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าตัวแปรตอบสนองนั้นมีแค่ 3 ปัจจัยเท่านั้น คือ คาร์บอนแบล็ค สีย้อมสีแดง และสีย้อมสีเหลือง ส่วนปัจจัยที่เหลือ คือ แมกนีเซียมสเตียเรทไม่มีอิทธิพลต่อค่าตัวแปรตอบสนองจึงสามารถละเลยได้ และเมื่อนำปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ปัจจัยที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นมาดำเนินการทดลองต่อเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยในการทำสูตรสีน้ำตาลดำในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์ เพื่อที่จะหาค่าสูตรที่ดีที่สุดของปัจจัยที่ทำให้เกิดค่าความแตกต่างของแผ่นสีที่ผลิตเทียบกับแผ่นสีมาตรฐานน้อยที่สุด โดยใช้แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

การวิเคราะห์เพื่อหาสมการถดถอยที่เหมาะสมในการทำสูตรสีน้ำตาลดำในกระบวนการทำสูตรเม็ดเอบีเอสคอมปาวด์ได้ ดังนี้

$$Y_{DL^*} = 25.34 - 112.2\ A - 4.625\ B - 19.5\ C + 147.7\ A^*A + 379\ C^*C - 119.0\ A^*C$$

$$Y_{Da^*} = 14.36 - 68.79\ A - 10.12\ B - 9.02\ C + 89.1\ A^*A + 37.6\ B^*B + 58.0\ B^*C$$

$$Y_{Db^*} = -18.330 + 79.53\ A + 29.06\ B + 47.93\ C - 111.33\ A^*A - 100.83\ B^*B - 303.3\ C^*C$$

โดยมีข้อจำกัด $0.3 \leq A \leq 0.4$, $0.10 \leq B \leq 0.2$, $0.05 \leq C \leq 0.1$ และ $A, B, C > 0$

Y_{DL} = ค่าความสว่างของเฉดสี (DL*)

Y_{Da} = ค่าความเป็นสีแดงและสีเขียวของเฉดสี (Da*)

Y_{Db} = ค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงินของเฉดสี (Db*)

A = คาร์บอนแบล็ค

B = สีย้อมสีเหลือง

C = สีย้อมสีผงสีแดง

จากการวิเคราะห์ Response optimizer ด้วยโปรแกรม Minitab ได้ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำสูตรสีน้ำตาลดำ ดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำสูตรสีน้ำตาลดำ

ปัจจัย	จุดที่เหมาะสม	หน่วย
1. คาร์บอนแบล็ค	0.38	กรัม
2. สีย้อมสีแดง	0.13	กรัม
3. สีย้อมสีเหลือง	0.08	กรัม

เมื่อกำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ ด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 5-1 และยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติต่าง ๆ โดยทำการทดลองและเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 12 การทดลอง จากนั้นคำนวณความเพียงพอของจำนวนตัวอย่างของค่า DL, Da และ Db พบว่าจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่เหมาะสมที่สุด คือ 9 การทดลองเป็นอย่างน้อย ซึ่งในที่นี้ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 12 การทดลองจึงถือว่ามีความพอเพียง

การทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของประชากร โดยการทดสอบด้วยโปรแกรม Minitab และพิจารณาค่า P-value พบว่าค่าสีที่วัดได้จากการยืนยันผลการทดลองมีค่า DL = 0.60, Da = 0.28 และ Db = -0.24 ซึ่งอยู่ในค่าเป้าหมายตามที่ลูกค้ากำหนดทุกประการ

เมื่อนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้ในการผลิตจริงและทำการเก็บค่าสีที่ได้จากกระบวนการผลิตเป็นจำนวน 4 ล็อตการผลิต ล็อตละ 10 ตัวอย่าง จากวันที่ 7-15 พฤศจิกายน 2559 และทำการวิเคราะห์สมรรถภาพของกระบวนการโดยการใช้ค่า C_{pk} วัดความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการ

ที่แท้จริง จากผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต (DE) พบว่ามีค่า C_{pk} = 1.18 ดังนั้น แสดงว่ากระบวนการผลิตนี้มีขีดความสามารถที่ค่อนข้างดีแล้ว นอกจากนี้ยังพบว่าไม่เกิดปัญหาข้อบกพร่องจากค่าสีไม่ได้มาตรฐานจากกระบวนการผลิตเลย จึงสามารถลดปัญหาข้อบกพร่องจากค่าสีไม่ได้มาตรฐานในกระบวนการผลิตได้ 100% และจากการที่ไม่ต้องแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องจากค่าสีไม่ได้มาตรฐาน ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนดังกล่าวลดลงและเป็นการช่วยให้ต้นทุนในการผลิตลดลงด้วย เนื่องจากปริมาณการใช้สีผงและสารเคมีในการแก้ไขงานลดน้อยลง

ข้อเสนอแนะ

1. หลังจากทำการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป แล้วพบว่าค่าตัวแปรตอบสนองมีการกระจายตัวแบบไม่เป็นเส้นตรงจึงต้องใช้แผนการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้เลือกแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนมาใช้ แทนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (โดยปกติการทดลองแบบส่วนผสมกลางสามารถใช้ผลการทดลองร่วมกับการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป ส่งผลให้มีการทดลองเพิ่มเติมน้อยกว่าการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน) เนื่องจากมีการเปลี่ยนชุดของวัตถุดิบ การทดลองไม่สามารถทำต่อเนื่องจากการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มรูปได้ จึงจำเป็นต้องทำการทดลองใหม่เพื่อเก็บข้อมูลชุดใหม่ ดังนั้น การทดลองแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจึงเป็นการทดลองที่เหมาะสมที่สุด

2. จากการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิตในภาพรวมเมื่อพิจารณาจากค่า C_{pk} ของ DE พบว่าให้ค่า $C_{pk} > 1$ ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีแรงงานผสมจึงถือว่าเป็นกระบวนการที่มีขีดความสามารถค่อนข้างดีแล้ว แต่เมื่อพิจารณาลงไปที่ค่า DL, Da และ Db (สมการ $DE = \sqrt{(DL)^2 + (Da)^2 + (Db)^2}$) จากการวิเคราะห์ผลความสามารถของกระบวนการผลิตดังภาพภาคผนวก ข-1 ถึงภาพภาคผนวก ข-3 พบว่า Da, Db ให้ค่า $C_{pk} > 1$ ส่วน DL ให้ค่า $C_{pk} < 1$ ซึ่งจากผลการวิจัยในครั้งนี้ทำให้ทราบว่าถ้าต้องการที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตจะต้องทำการปรับปรุงที่ค่า DL

3. การทดลองนี้เป็นการศึกษาเฉพาะในส่วนของการทำสูตรสีน้ำตาลดำเท่านั้น เนื่องจากเป็นสูตรใหม่และมียอดการสั่งผลิตที่สูง เพราะฉะนั้นในการทดลองต่อ ๆ ไปจึงควรทำการศึกษาในส่วนของสูตรสีอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย เพื่อสามารถใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานในการอ้างอิงและเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานจริงต่อไป และการทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาเฉพาะปัจจัยที่เป็นสารเคมีในการนำมาทำสูตรสีเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วอาจมีปัจจัยอื่น ๆ ที่สามารถส่งผลต่อค่าสีด้วย เช่น อุณหภูมิ เวลา ความดัน ฯลฯ ดังนั้น จึงควรมีการพิจารณาปัจจัยเหล่านี้ด้วยในการออกแบบทดลอง

บรรณานุกรม

กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. (2542). *การวิเคราะห์ระบบวัด*. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

คุณวุฒิ เครือศรี. (2554). *การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของวาล์วไอดีในกระบวนการอบคืนตัว,* งานนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

ณัชชา พลศิลป์. (2553). *การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพในการบวนการพ่นสีรถยนต์: กรณีศึกษาโรงงานประกอบรถยนต์.* วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณัฐพนธ์ ภัททกุล. (2545). *การออกแบบการทดลองทางสถิติเพื่อกำหนดสูตรผสมน้ำมันหล่อเย็นล้วน*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

บรรหาญ ลิลา. (2553). *เอกสารประกอบการเรียนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น*. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา. (2551). *การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง*. กรุงเทพฯ: ท้อป.

ปารเมศ ชุติมา. (2545). *การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วีรเทพ เฉลิมสมิทธิ์. (2550). *การศึกษาปริมาณธาตุที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กดิบโดยวิธีการออกแบบการทดลอง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ศิวพงษ์ แก้วหล้า. (2558). *การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการพ่นสีผลิตภัณฑ์ตัวถังเครื่องซักผ้าโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง*. งานนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

ศิริลักษณ์ พานโคกสูง. (2552). *การกำหนดสภาวะกระบวนการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมแป้งข้าว/ แกลบข้าว/ พอลิเอทิลีน โดยการออกแบบการทดลอง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สริตา สุวรรณธีระกิจ. (2549). *การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตแม่สีโดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อดุลย์ จิตรอารี. (2555). *การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปในการจำลองกระบวนการฉีดชิ้นส่วนพลาสติก เอบีเอส*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

อัจฉรียา วังวิเศษ. (2553). *การปรับปรุงคุณภาพกระบวนการผสมสีในกนการผลิตสีผง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

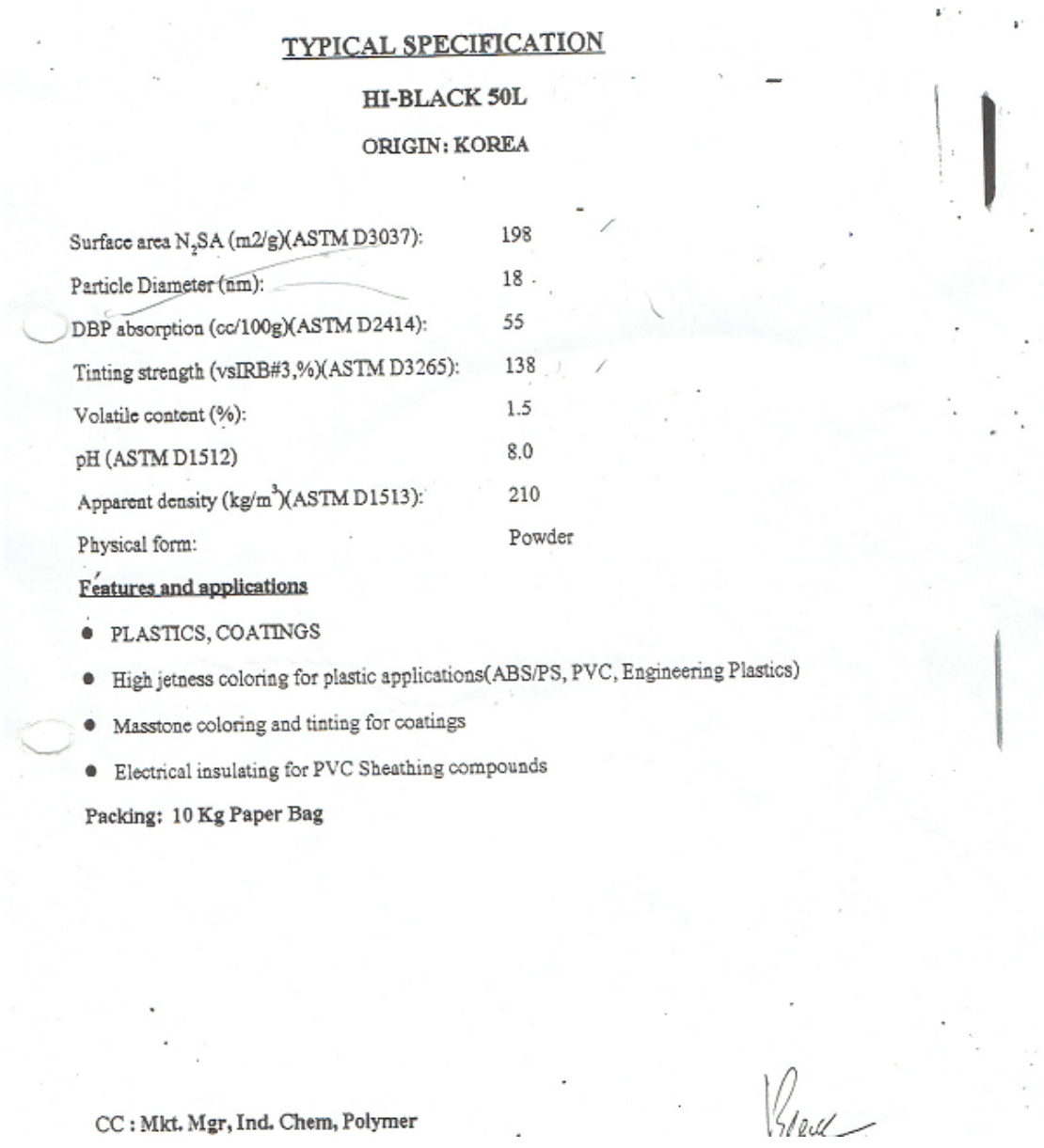
อนุวิทย์ สนศิริ. (2553). *ส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสมสำหรับแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยความร้อนของพลาสติกแผ่น*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Erik Hansen. (2013). *Hazardous substances in plastic materials*. Danish Technological Institute. Denmark.

Montgomery D.C. (2005). *Design and Analysis of Experiments*. 6th ed. New York: John Wiley and Son, Inc.,

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก



TYPICAL SPECIFICATION

HI-BLACK 50L

ORIGIN: KOREA

Surface area N_2SA (m2/g)(ASTM D3037):	198
Particle Diameter (nm):	18
DBP absorption (cc/100g)(ASTM D2414):	55
Tinting strength (vsIRB#3,%)(ASTM D3265):	138
Volatile content (%):	1.5
pH (ASTM D1512)	8.0
Apparent density (kg/m^3)(ASTM D1513):	210
Physical form:	Powder

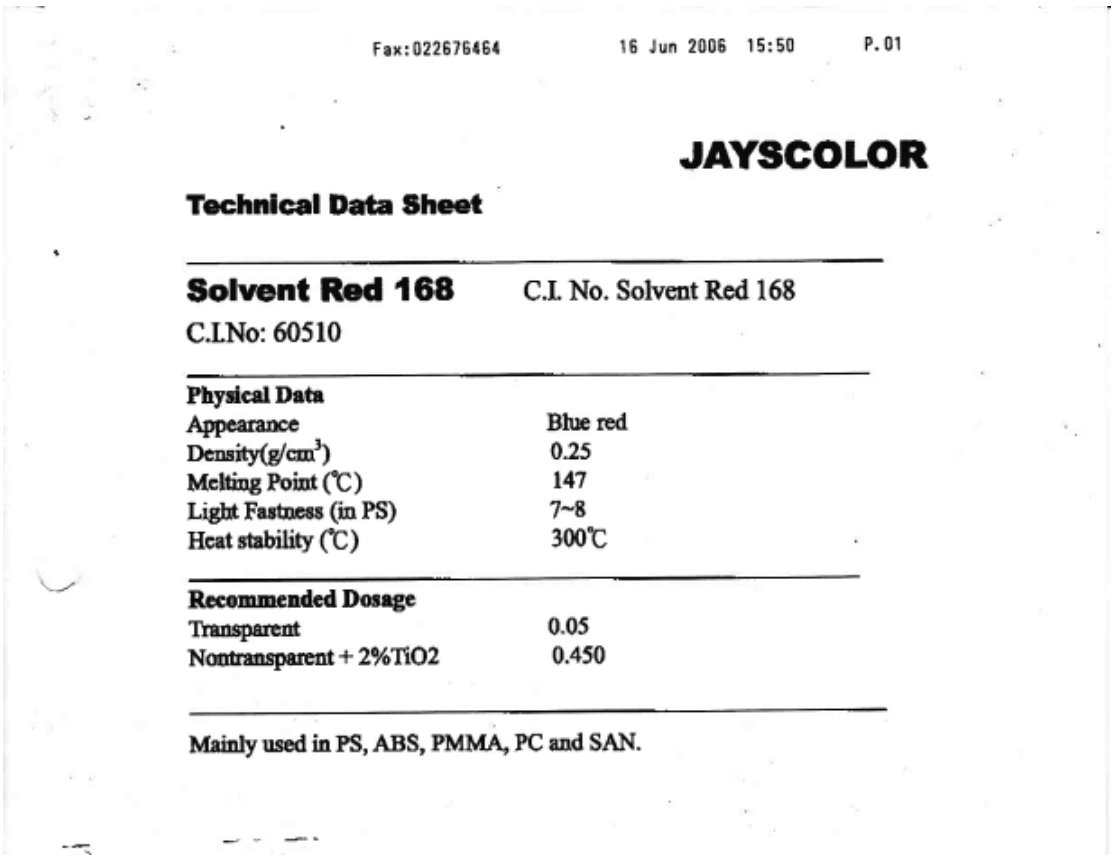
Features and applications

- PLASTICS, COATINGS
- High jetness coloring for plastic applications(ABS/PS, PVC, Engineering Plastics)
- Masstone coloring and tinting for coatings
- Electrical insulating for PVC Sheathing compounds

Packing: 10 Kg Paper Bag

CC : Mkt. Mgr, Ind. Chem, Polymer

ภาพภาคผนวก ก-1 ข้อมูลทางเทคนิคของคาร์บอนแบล็ค



Fax:022676464 16 Jun 2006 15:50 P.01

JAYSCOLOR

Technical Data Sheet

Solvent Red 168 C.I. No. Solvent Red 168

C.I.No: 60510

Physical Data	
Appearance	Blue red
Density(g/cm^3)	0.25
Melting Point (℃)	147
Light Fastness (in PS)	7~8
Heat stability (℃)	300℃

Recommended Dosage	
Transparent	0.05
Nontransparent + 2%TiO2	0.450

Mainly used in PS, ABS, PMMA, PC and SAN.

ภาพภาคผนวก ก-2 ข้อมูลทางเทคนิคของสีย้อมสีแดง

Technical Data Sheet

Solvent Yellow 33

C.I. No. Solvent Yellow 33 CAS. No. 8003-22-3

Physical Data	
Appearance	Greenish Yellow
Density (g/ml)	0.20
Melting Point (℃)	230
Light Fastness (in PS)	6~7
Heat stability (℃)	280℃

Recommended Dosage	
Transparent	0.05
Nontransparent	0.470

It is mainly used in PS, ABS, PMMA, PET, PC, SAN

ภาพภาคผนวก ก-3 ข้อมูลทางเทคนิคของสีย้อมสีเหลือง

Technical Specification

MAGNESIUM STEARATE

DESCRIPTION	Magnesium Stearate	
PROPERTY	Physical state	: White Powder
	Specific gravity	: 1.028
	Fineness,% through 325 Mesh	: 99 min
	Melting point , °C	: 105 -125
	Free fatty acid	: 2.0 max
	Mg content (%)	: 4.0 min.
	Moisture (%)	: 5.0 max
INSOLUBILITY	Insoluble in water, lower alcohols, esters, chlorinated solvents, mineral spirits, mineral oils and waxes. Also insoluble in benzol, toluol, and xylol.	
APPLICATIONS	Cosmetics: Improves adhesion to the skin of powders, ointments, and facial creams.	
	Greases and motor oil: Thickener for lubricating greases and pour point depressor for waxy motor oils	
	Paints, inks, varnishes, and lacquers: Flatting agent, particularly for products subjected to high temperatures during manufacture or use. Thickening agent for drying oils. 5-10% may be cooked at a temperature of at least 200 °F. Emulsifying agent for water-oil emulsions.	
PACKING	15 /20 kilograms in 2 ply paper bag with PE lining	

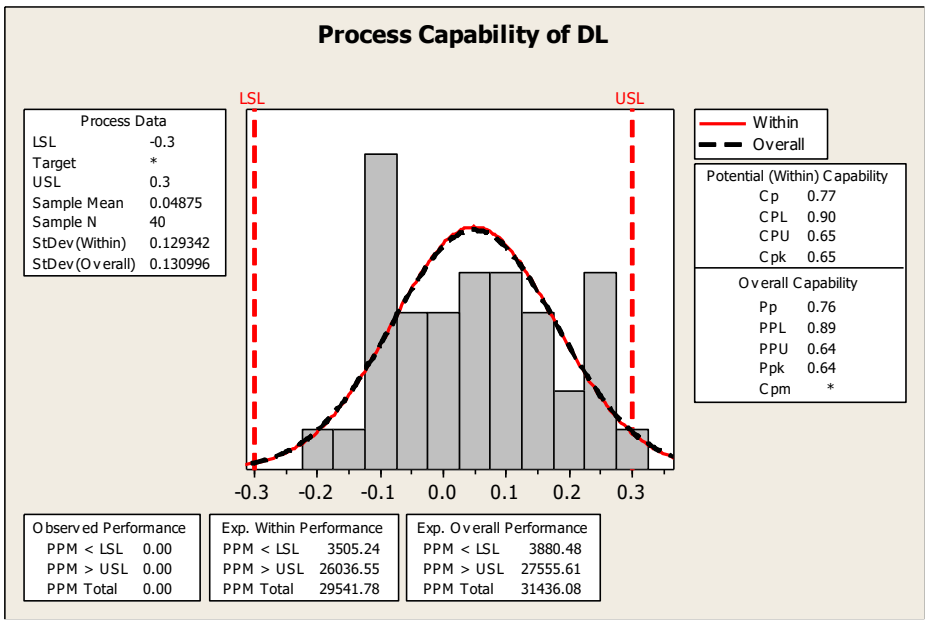
Doc. #SD-RD-12-09-4

ภาพภาคผนวก ก-4 ข้อมูลทางเทคนิคของแมกนีเซียมสเตียเรท

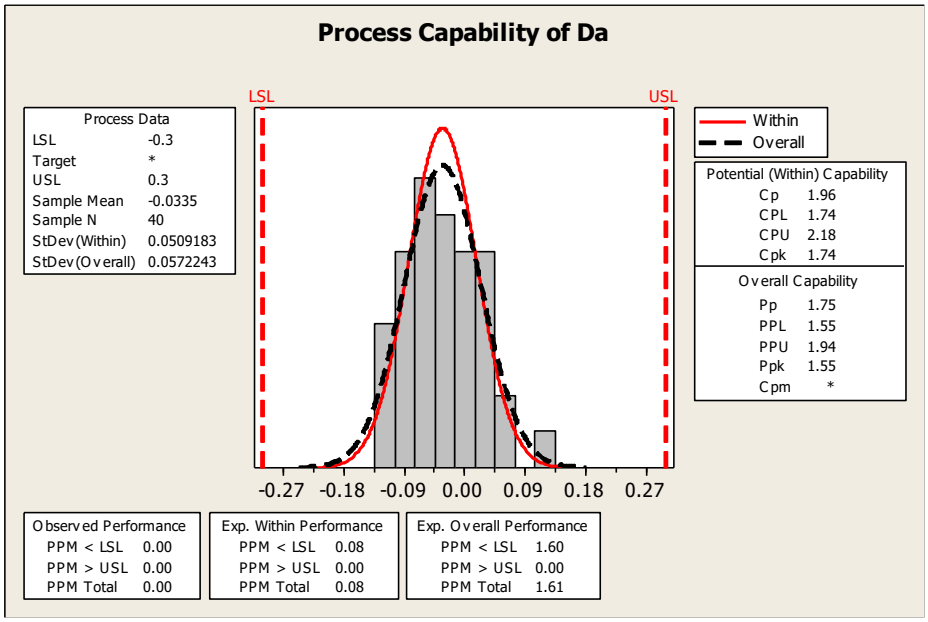
ภาคผนวก ข

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าสีที่ได้จากกระบวนการผลิต

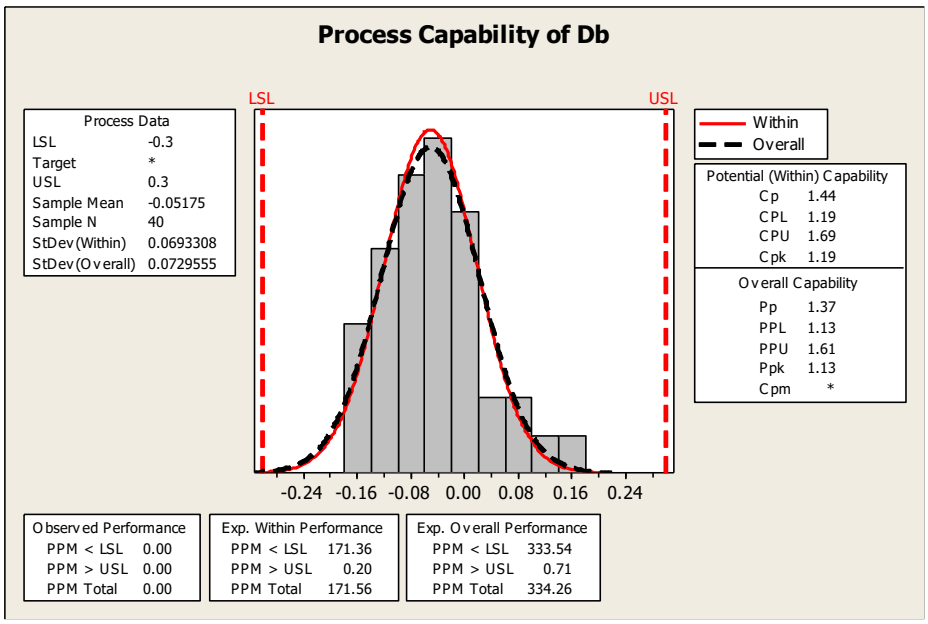
No.	Data Color				No.	Data Color			
	DL	Da	Db	DE		DL	Da	Db	DE
1	-0.12	0.02	-0.14	0.18	21	0.08	-0.04	-0.04	0.09
2	0.06	0.00	-0.12	0.13	22	-0.09	-0.10	-0.15	0.20
3	-0.08	0.03	-0.04	0.09	23	0.16	-0.03	-0.06	0.17
4	0.25	0.04	0.00	0.25	24	-0.11	-0.06	0.00	0.12
5	0.28	0.03	-0.04	0.28	25	0.25	0.04	0.00	0.25
6	0.16	-0.03	-0.06	0.17	26	0.09	-0.06	-0.06	0.12
7	-0.09	-0.10	-0.15	0.20	27	0.02	-0.03	-0.01	0.03
8	-0.12	-0.01	-0.10	0.15	28	0.06	0.00	0.15	0.16
9	0.05	-0.06	-0.05	0.09	29	-0.19	0.00	-0.06	0.19
10	-0.15	-0.04	0.07	0.17	30	0.24	0.02	0.03	0.24
11	-0.10	-0.06	-0.15	0.19	31	0.11	0.12	0.10	0.19
12	0.01	-0.10	-0.10	0.14	32	0.01	-0.11	-0.07	0.13
13	-0.09	-0.07	-0.02	0.11	33	0.14	-0.11	-0.08	0.19
14	0.05	-0.05	-0.15	0.16	34	0.03	-0.12	-0.06	0.13
15	0.16	0.06	0.00	0.17	35	-0.03	-0.09	-0.07	0.11
16	-0.04	0.00	-0.12	0.12	36	0.00	-0.02	0.09	0.09
17	-0.07	-0.06	-0.12	0.15	37	0.10	-0.10	-0.08	0.16
18	0.10	-0.09	-0.14	0.19	38	0.20	0.06	-0.02	0.20
19	0.20	-0.04	-0.13	0.24	39	0.25	-0.07	-0.07	0.26
20	-0.06	-0.11	0.02	0.12	40	0.23	0.00	-0.07	0.24



ภาพภาคผนวก ข-1 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต (DL)



ภาพภาคผนวก ข-2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต (Da)



ภาพภาคผนวก ข-3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิต (Db)