

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากลึบของเม็ดพลาสติก โพลีเอทิลีนเทอเลฟทาเลท
โดยการออกแบบการทดลอง

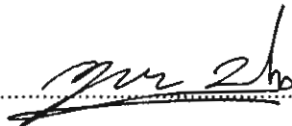
ชัยวิชิต แสนน้อย

31 ส.ค. 2559
365494 TH0024519

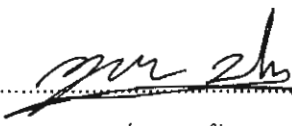
งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
มิถุนายน 2555
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

อาจารย์ผู้ควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์ ได้พิจารณา
งานนิพนธ์ของ ชัยวิชิต เสนน้อย ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

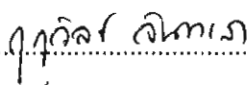
อาจารย์ผู้ควบคุมงานนิพนธ์


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

คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์


..... ประธาน
(ดร. กฤษดา ประสพชัยชนะ)


..... กรรมการ
(ดร. จักรวาล คุณะดิลก)


..... กรรมการ
(ดร. ญูวิทย์ จันทรสา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ของมหาวิทยาลัยบูรพา


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 20 เดือน สิงหาคม พ.ศ 2555

ประกาศคุณูปการ

งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งจาก ดร. กฤษดา ประสพชัยชนะ อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ผู้ควบคุมงานนิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ มาโดยตลอดระยะเวลาของการศึกษาวิจัย รวมถึงยังได้สละเวลาในการตรวจทาน แก้ไขงานนิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ รวมถึงคณะกรรมการสอบงานนิพนธ์ทุกท่านอันประกอบไปด้วย ดร. จักรวาล คุณะดิลก และ ดร. ฤกษ์วิทย์ จันทรสาทา ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์แก่การศึกษาค้นคว้าในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณจิตตะเสน จรุงวัฒน์เลาหะ ผู้จัดการส่วนคุณภาพและเทคโนโลยี, คุณกนกพร สิทธิศักดิ์ ผู้จัดการส่วนควบคุมคุณภาพ, คุณศุภิต ศิริธร ผู้จัดการส่วนผลิต และพี่ ๆ ฝ่ายผลิตทุกท่าน ของ บริษัท บางกอกโพลีเอสเตอร์ จำกัด ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดียิ่งในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย ทำให้งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

คุณค่าและคุณประโยชน์ของงานนิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่ บพการี บุรพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

ชัยวิชิต เสนน้อย

53920836: สาขาวิชา: วิศวกรรมอุตสาหกรรม; วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลอง/ อุณหภูมิการตกผลึกจากกลับ/ โพลีเอททิลีนเทอเลฟทาเลท

ชัยวิชิต เสนน้อย: การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก

โพลีเอททิลีนเทอเลฟทาเลทโดยการออกแบบการทดลอง (A STUDY OF FACTORS

AFFECTING THE COLD CRYSTALLIZATION TEMPERATURE OF POLYETHYLENE

TEREPHTHALATE BY DESIGN OF EXPERIMENT) อาจารย์ผู้ควบคุมงานนิพนธ์: ดร. กฤษดา

ประสพชัยชนะ, 139 หน้า. ปี พ.ศ. 2555.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติกโพลีเอททิลีนเทอเลฟทาเลท และกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสม สำหรับการควบคุมค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับให้อยู่ในช่วงข้อกำหนดของลูกค้า 156-164 °C ขั้นตอนการศึกษาได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วม โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (2^4) ทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง และออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ Central Composite Design ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ ความเข้มข้นของ DEG ความเข้มข้นของ IPA อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer และค่าความหนืดของ A-chips เป็นปัจจัยครบถ้วน

ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยหลักคือ ความเข้มข้นของ DEG ความเข้มข้นของ IPA อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer และค่าความหนืดของ A-chips อิทธิพลร่วมคือปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ DEG กับอุณหภูมิของ Rotary Crystallizer และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิของ Rotary Crystallizer กับค่าความหนืดของ A-chips มีผลต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ โดยระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับมีค่าอยู่ในช่วงข้อกำหนดของลูกค้า คือ ความเข้มข้นของ DEG เท่ากับ 1.35% ความเข้มข้นของ IPA เท่ากับ 1.85% และอุณหภูมิของ Rotary Crystallizer เท่ากับ 215 °C เปรียบเทียบผลการวิจัยพบว่าความสามารถของกระบวนการมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.68 ซึ่งมีค่ามากกว่าก่อนการดำเนินงาน

53920836: MAJOR: MASTER OF INDUSTRIAL ENGINEERING; M.Eng.
(INDUSTRIAL ENGINEERING)

KEYWORDS: DESIGN OF EXPERIMENT/ COLD CRYSTALLIZATION TEMPERATURE/
POLYETHYLENE TEREPHTHALATE

CHAIWICHIT SENNOI: A STUDY OF FACTORS AFFECTING THE COLD
CRYSTALLIZATION TEMPERATURE OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE BY
DESIGN OF EXPERIMENT. ADVISOR: KRITSADA PASOPCHAICHANA, Ph.D., 139 P.
2012.

The objective of this research is to study the factors and determine the optimum level of factors for the desired cold crystallization temperature of polyethylene terephthalate. The experiment was started with four replicates of 2^4 full factorial design. Four factors, namely DEG concentration, IPA concentration, temperature of rotary crystallizer and intrinsic viscosity of A-chips were selected. The optimum level of factors was determined by central composite design of response surface methodology with two replicates.

The experimental results indicated that the significant factors were DEG concentration, IPA concentration, temperature of rotary crystallizer and intrinsic viscosity of A-chips. There also were two significant two-factor interactions, namely interaction between DEG concentration and temperature of rotary crystallizer and interaction between temperature of rotary crystallizer and intrinsic viscosity of A-chips. The desired cold crystallization temperature was determined by the optimum level of factors which are DEG concentration of 1.35%, IPA concentration of 1.85% and rotary crystallizer temperature of 215 °C. After the optimum levels of factors were set up in process, the process capability is increased to 1.68.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัยการออกแบบทดลอง	3
ขอบเขตของการวิจัยการออกแบบการทดลอง	3
ข้อจำกัดของการทดลอง	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	4
แผนการดำเนินงาน	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกโพลีเอททิลีนเทอเลฟทาเลท (Polyethylene terephthalate: PET)	6
คำอธิบายกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก PET	10
ทฤษฎีการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง	22
รูปแบบของการออกแบบการทดลอง	30
การออกแบบพารามิเตอร์แบบมั่นคง (Robust parameter design: RPD)	41
วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการ	44
การทดสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square)	52
การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)	52
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	55
3 วิธีการดำเนินการวิจัย	57
ศึกษากระบวนการผลิต	59
ศึกษาปัญหาในกระบวนการผลิตและเก็บรวบรวมข้อมูล	60

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET	62
การวิเคราะห์คัดเลือกปัจจัยและทดลองเพื่อยืนยันปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET	65
ออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นส่วนโค้งและผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย.....	75
ออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ CCD (Central Composit Desing) เพื่อนำไปทำการทดลอง	77
ประเมินผลโดยเปรียบเทียบผลการดำเนินงานก่อนและหลังการทดลอง	81
สรุปผลการทดลอง	82
4 ผลการทดลอง	83
ผลการทดลองเพื่อยืนยันปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET.....	83
ผลการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นส่วนโค้งและผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย.....	95
ออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ CCD (Central Composite Design) เพื่อนำไปทำการทดลอง	105
ประเมินผลโดยเปรียบเทียบผลการดำเนินงานก่อนและหลังการทดลอง.....	119
5 อภิปรายและสรุปผล	123
สรุปผลการศึกษา.....	123
ปัญหาและอุปสรรคจากการวิจัย.....	125
ข้อเสนอแนะ.....	125
บรรณานุกรม	127
ภาคผนวก	129
ประวัติย่อของผู้วิจัย	138

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 แผนการดำเนินการวิจัย.....	5
2-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย 2 ปัจจัย (Anova table).....	36
2-2 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบ 2^k	37
2-3 แสดงเครื่องหมายทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรในสมการคอนทราสต์ สำหรับการทดลองแบบ 2^4	38
3-1 สาเหตุที่อาจส่งผลให้เกิดปัญหาค่าอุณหภูมิการดกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET	65
3-2 แสดงผลการวิเคราะห์เพื่อคัดกรองปัจจัยทั้ง 2 วิธี	69
3-3 แสดงการกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองสำหรับการทดลองยืนยันปัจจัย	70
3-4 ตารางบันทึกผลการทดลองสำหรับการทดลองยืนยันปัจจัย	73
3-5 แสดงการกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองสำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง	75
3-6 ตารางบันทึกผลการทดลองสำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง	77
3-7 แสดงการกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองสำหรับหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม	78
3-8 ตารางบันทึกผลการทดลองสำหรับหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม	81
3-9 การทดลองเพื่อยืนยันผล	82
3-10 สรุปผลสถานะของแต่ละปัจจัย	82
4-1 ตารางผลการทดลองสำหรับยืนยันปัจจัย	84
4-2 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็บสำหรับยืนยันปัจจัย	86
4-3 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็บสำหรับยืนยันปัจจัย หลังจากตัด ปัจจัยที่ไม่มีผลต่อผลตอบสนอง	88
4-4 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นส่วนโค้งและผลของอิทธิพล ร่วมระหว่างปัจจัย	95
4-5 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็บสำหรับทดสอบความเป็น ส่วนโค้งและผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย	96
4-6 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็บสำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง และผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อผลตอบสนอง	98

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-7	บันทึกผลการทดลองสำหรับการกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม 105
4-8	แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็ปสำหรับการกำหนดระดับ ของปัจจัยที่เหมาะสม 106
4-9	แสดงผลจากการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็ปสำหรับการกำหนดระดับของ ปัจจัยที่เหมาะสม หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อผลตอบสนอง 108
4-10	ค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET ที่ได้จากการทดสอบสถานะ ที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับค่าคาดหวัง 119
4-11	แสดงผลการทดสอบสมมติฐานแบบ T-test ของค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิการตกผลึก จากกลับของเม็ดพลาสติก PET 121
5-1	สรุปผลสถานะของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสม 124

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 แสดงความผิดปกติของค่าอุณหภูมิการตกผลึกขากลับ.....	2
1-2 แสดงความสามารถของกระบวนการของค่าอุณหภูมิการตกผลึกขากลับ.....	2
2-1 ผังกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก PET.....	6
2-2 กระบวนการผลิตโพลีเมอร์แบบต่อเนื่อง	7
2-3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ CP	8
2-4 กระบวนการเพิ่มความหนืดของเม็ดพลาสติก PET ในสถานะของแข็ง.....	9
2-5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ SSP.....	10
2-6 แสดงโครงสร้างการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	13
2-7 แสดงโครงสร้างการเกิดปฏิกิริยาแบบควบแน่น	14
2-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิการตกผลึกกับความเข้มข้น ของโคโมโนเมอร์	16
2-9 แสดงการทำปฏิกิริยาระหว่าง PTA กับ IPA.....	17
2-10 แสดงตัวอย่างกราฟ DSC ของพลาสติก PET.....	20
2-11 เครื่องคิดเฟอเรนเซียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของโรงงานกรณีศึกษา.....	21
2-12 กราฟ DSC ที่วิเคราะห์จากเครื่องของโรงงานกรณีศึกษา.....	21
2-13 แสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ.....	23
2-14 แสดงอิทธิพลที่มีผลและอิทธิพลที่ไม่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์.....	24
2-15 แสดงปัจจัยและตัวแปรของกระบวนการ.....	31
2-16 แสดงอิทธิพลของปัจจัย A ไม่มีผลและอิทธิพลของปัจจัย A ที่มีผลต่อ ตัวแปรตาม.....	32
2-17 แสดงรูปแบบการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย.....	33
2-18 แสดงกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ Normal probability plot of residual ของปัจจัย.....	40
2-19 แสดงเป้าหมายของ RPD	42
2-20 บทบาทของอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยรบกวนใน Robust design.....	43
2-21 แสดงภาพพื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ.....	45
2-22 แสดงกราฟเส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง.....	45
2-23 แสดงวิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง.....	47

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-24 แสดงจุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง (จุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด).....	48
2-25 แสดงจุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง (จุดที่มีค่าผลตอบสนองต่ำสุด).....	49
2-26 แสดงจุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง ที่เรียกว่าจุดอานม้า (Saddle point).....	50
2-27 แสดงรูปแบบกราฟ Residual plot.....	54
3-1 แสดงขั้นตอนการดำเนินการ.....	58
3-2 ภาพรวมกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก PET.....	59
3-3 แสดงค่า Tcc ออกนอกข้อกำหนด 156-164 °C เดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554.....	61
3-4 แสดงค่า Tcc ออกนอกข้อกำหนด 156-164 °C เดือนมิถุนายน-สิงหาคม พ.ศ. 2554.....	61
3-5 แสดงความสามารถของกระบวนการของค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับ.....	62
3-6 แผนภาพแสดงเหตุและผลที่ทำให้ค่า Tcc ออกนอกข้อกำหนด.....	64
3-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tcc และอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการตัดเม็ด.....	66
3-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tcc และค่าความหนืดของเม็ด PET.....	67
3-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tcc และอุณหภูมิของ Rotary crys.....	67
3-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของ Rotary crys. กับ ค่าความหนืดของเม็ด Amorphous-chip.....	68
3-11 แสดงการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการทดลองยืนยันปัจจัย.....	72
3-12 แสดงการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม.....	80
4-1 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึกของเม็ดพลาสติก PET.....	89
4-2 แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ DEG กับอุณหภูมิของ Rotary crys.....	90
4-3 แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิของ Rotary crys กับ ค่าความหนืดของ A-chip.....	90
4-4 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ.....	91

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-5 แสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal probability plot: NOPP) ของ Residuals	91
4-6 แสดงการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน Fitted value	92
4-7 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับความเข้มข้น DEG	93
4-8 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับความเข้มข้น IPA	93
4-9 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับอุณหภูมิ Rotary crys.	94
4-10 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าความหนืดของ A-chip	94
4-11 แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ DEG กับ อุณหภูมิของ Rotary crys.	100
4-12 แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิของ Rotary crys กับ ค่าความหนืดของ A-chip	100
4-13 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ	101
4-14 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของ Residuals	101
4-15 แสดงการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน Fitted value สำหรับทดสอบความเป็น ส่วน โค้ัง	102
4-16 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับความเข้มข้น DEG สำหรับ ทดสอบความเป็นส่วน โค้ัง	103
4-17 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับความเข้มข้น IPA สำหรับ ทดสอบความเป็นส่วน โค้ัง	103
4-18 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับอุณหภูมิ Rotary crys. สำหรับ ทดสอบความเป็นส่วน โค้ัง	104
4-19 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าความหนืดของ A-chip สำหรับทดสอบความเป็นส่วน โค้ัง	104
4-20 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ	112
4-21 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ ของ Residuals	113

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-22 แสดงการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน Fitted value สำหรับกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม	113
4-23 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับความเข้มข้น DEG สำหรับกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม.....	114
4-24 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับความเข้มข้น IPA สำหรับกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม.....	114
4-25 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับอุณหภูมิ Rotary Crys. สำหรับกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม.....	115
4-26 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าความหนืดของ A-chip สำหรับกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม.....	115
4-27 แสดงระดับที่เหมาะสมของ 3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET	116
4-28 แสดงผลการวิเคราะห์ความเป็นปกติของข้อมูลการสุ่มค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET จากการทดสอบ.....	120
4-29 แสดงค่าความสามารถของกระบวนการของค่า T_{cc} หลังการทดลอง.....	122
4-30 แผนผังควบคุมพิสัยเคลื่อนที่ I-MR Chart อุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET จากการทดสอบเพื่อยืนยันสถานะที่เหมาะสม.....	122

บทที่ 1

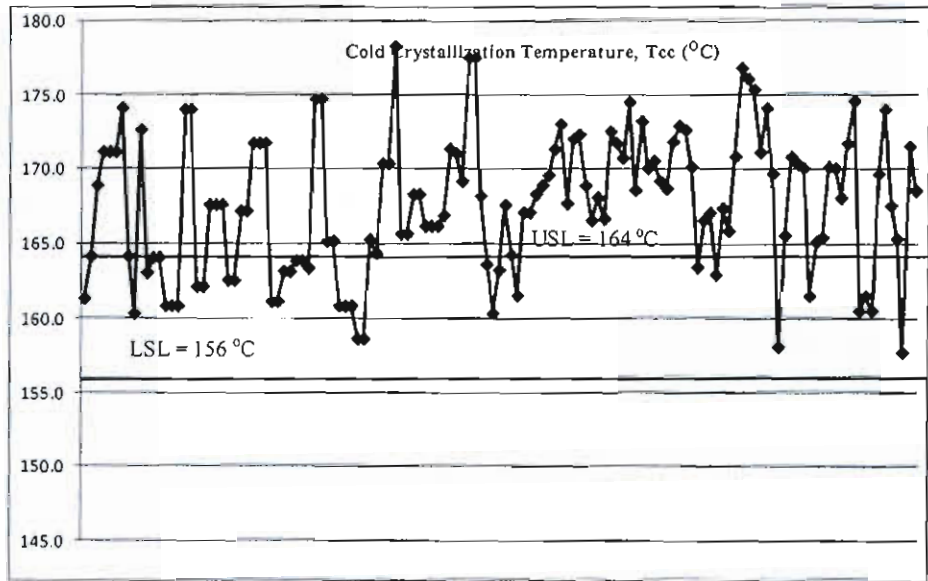
บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

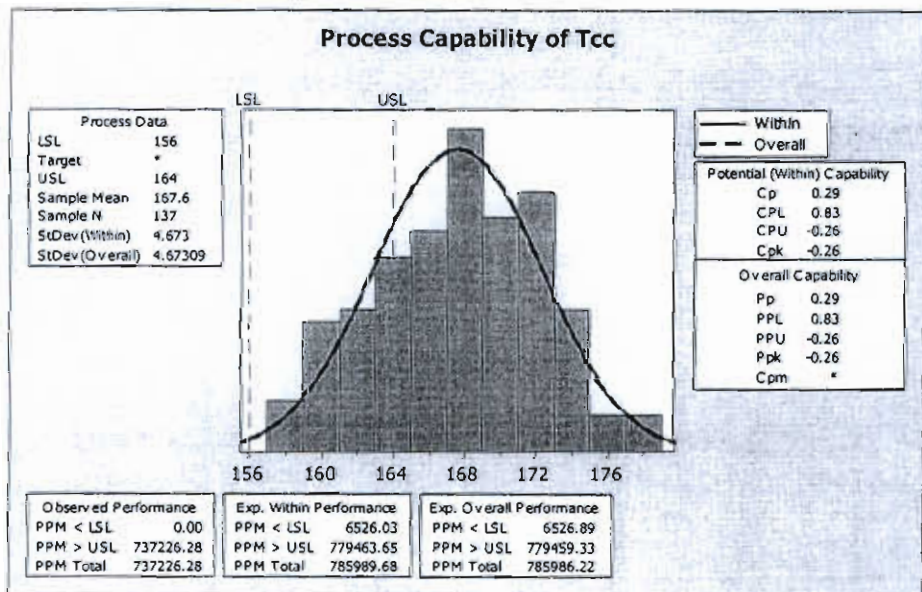
ในปัจจุบันมีการแข่งขันทางธุรกิจสูง ทั้งในเรื่องของการสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้า การตอบสนองความต้องการของลูกค้า คุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามข้อกำหนดของลูกค้า เป็นต้น หากผู้ผลิตสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ตามข้อกำหนดของลูกค้า จะเป็นการสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้า และยังสามารถสร้างโอกาสทางการค้าในการขยายตลาดไปสู่ลูกค้ารายอื่น ๆ ได้ทั้งภายในและภายนอกประเทศ

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตเม็ดพลาสติก เพื่อใช้ในการทำขวดน้ำอัดลม ขวดน้ำดื่ม ขวดใส่น้ำมันพืช และอื่น ๆ ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะส่งออกไปยังต่างประเทศประมาณ 90% โดยลูกค้าจากประเทศญี่ปุ่น และออสเตรเลีย จะเป็นลูกค้าหลัก ปัจจุบันทางโรงงานกำลังประสบปัญหาค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับ (Cold Crystallization Temperature: Tcc) ของเม็ดพลาสติก โพลีเอททิลีนเทอเลฟทาเลท (Polyethylene Terephthalate: PET) ไม่ได้ตามข้อกำหนดของลูกค้า โดยลูกค้ากำหนดอุณหภูมิไว้เท่ากับ 156-164 องศาเซลเซียส ข้อกำหนดนี้เป็นข้อตกลงที่ทำร่วมกันเฉพาะของลูกค้า Hokkai ส่วนลูกค้ารายอื่นจะมีข้อกำหนดที่ต่างกันออกไป เนื่องจากค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับที่ไม่ได้ตามข้อกำหนดของลูกค้าจะส่งผลกระทบต่อความขุ่นของขวดพลาสติกที่นำไปฉีดขึ้นรูป โดยลูกค้า Hokkai จะมีความต้องการสินค้าประมาณ 1,000 ตันต่อเดือน หากไม่สามารถผลิตสินค้าให้ได้คุณภาพตามข้อกำหนดที่ตกลงไว้ในเดือนนั้น ๆ จะต้องทำการผลิตทดแทนในเดือนถัดไป ซึ่งจะทำให้กระทบแผนการผลิตสินค้าลูกค้ารายอื่น ๆ จากปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้ไม่สามารถส่งสินค้าล็อตนี้ไปยังลูกค้า Hokkai ทำให้ต้องสูญเสียโอกาสในการส่งสินค้าออกไปขายต่างประเทศ ต้องนำสินค้าที่มีปัญหามาขายในประเทศซึ่งสูญเสียรายได้ไปประมาณ 1,800,000 บาท และส่งผลกระทบต่อความพึงพอใจของลูกค้า

ทางโรงงานกรณีศึกษาได้เริ่มผลิตสินค้าให้แก่ลูกค้า Hokkai ตั้งแต่เดือนกันยายน พ.ศ. 2553 เป็นต้นมา ซึ่งมีสินค้าที่ไม่สามารถจัดส่งให้แก่ลูกค้าจากปัญหาที่เกิดขึ้นตั้งแต่เดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ และเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2554 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1-1



ภาพที่ 1-1 แสดงความผิดปกติของค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับ



ภาพที่ 1-2 แสดงความสามารถของกระบวนการของค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับ

ภาพที่ 1-2 พบว่า เดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ และเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2554 ค่าอุณหภูมิการตกผลึกไม่ได้ตามข้อกำหนดของลูกค้าที่ต้องการคิดเป็น 78.60 เปอร์เซ็นต์ และความสามารถของกระบวนการ ในช่วงเดือนดังกล่าวมีค่าเท่ากับ -0.26 ซึ่งต่ำกว่า 1.33

ค่าความสามารถของกระบวนการต่ำสุดที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงควรมีการวิเคราะห์หาสาเหตุ และดำเนินการแก้ไข เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้คุณภาพได้ตามข้อกำหนดของลูกค้า

โครงการการออกแบบทดลองนี้จะทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึก จากกลับของเม็ดพลาสติก PET และกำหนดระดับปัจจัย ซึ่งปัญหานี้ต้องประยุกต์ใช้หลักการตัดกรอง เพื่อคัดเลือกปัจจัยและหลักการออกแบบการทดลองมาใช้ เพื่อศึกษาระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเช่น คู่มือกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก PET เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด และการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมมินิแท็บ มาเป็นแนวทางในการทำโครงการการออกแบบทดลองนี้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET
2. กำหนดระดับปัจจัยและสภาวะการผลิตที่เหมาะสมเพื่อสร้างมาตรฐานในการผลิตเม็ดพลาสติก PET เพื่อให้ค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับ มีค่าอยู่ในช่วงข้อกำหนดของลูกค้า Hokkai

ขอบเขตของการวิจัย

1. การทดลองครั้งนี้อ้างอิงที่กำกับการผลิต 300 ตันต่อวัน หากเป็นกำกับการผลิตอื่น ๆ ต้องมีการหาระดับของปัจจัยที่สภาวะที่เหมาะสมใหม่
2. การทดลองครั้งนี้ใช้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งตามบริษัทผู้ออกแบบหรือข้อมูลการผลิตในอดีต

ข้อจำกัดของการทดลอง

1. กระบวนการผลิตมี 2 กระบวนการต้องอาศัยเวลาในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ ดังนั้นเวลาในการผลิตจากเริ่มต้นจนได้เป็นเม็ดพลาสติกจะใช้เวลาประมาณ 1 วัน
2. ในการวัดค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับจากห้องปฏิบัติการจะทำการตรวจวัด 1 ครั้งต่อวัน เวลา 13.00 น.ของทุกวัน ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter: DSC) ซึ่งใช้เวลาในการวิเคราะห์ผลประมาณ 1 ชั่วโมง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทำให้สามารถผลิตสินค้าที่ได้คุณภาพตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า
2. ทำให้มีมาตรฐานในการผลิตสำหรับลูกค้า Hokkai และสามารถนำวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตได้
3. สร้างความพึงพอใจให้แก่ลูกค้า Hokkai และทำให้ความน่าเชื่อถือของโรงงานกลับคืนมา
4. มีความคาดหวังว่าลูกค้าจะมียอดการสั่งซื้อเม็ดพลาสติกที่เพิ่มขึ้นจากปัจจุบัน

แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานวิจัยแสดงดัง ตารางที่ 1-1

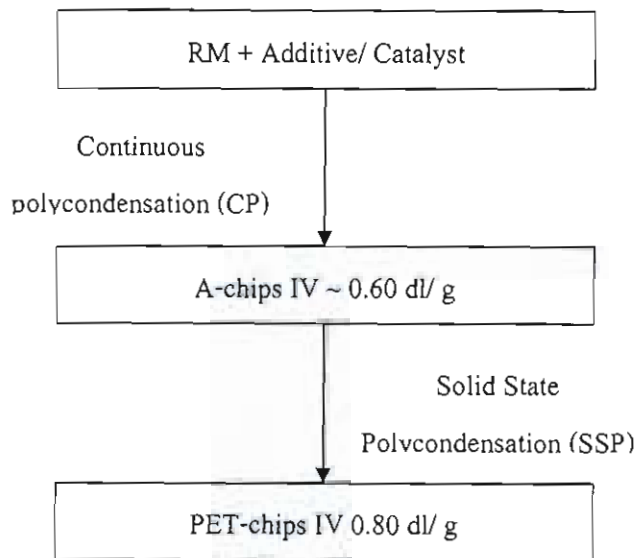
ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ลำดับที่	ขั้นตอนดำเนินงาน	กันยายน 2011				ตุลาคม 2011				พฤศจิกายน 2011				ธันวาคม 2011				มกราคม 2012				กุมภาพันธ์ 2012				มีนาคม 2012				เมษายน 2012			
		Week 1	Week 2	Week 3	Week 4	Week 5	Week 6	Week 7	Week 8	Week 9	Week 10	Week 11	Week 12	Week 13	Week 14	Week 15	Week 16	Week 17	Week 18	Week 19	Week 20	Week 21	Week 22	Week 23	Week 24	Week 25	Week 26	Week 27	Week 28				
1	ศึกษากระบวนการผลิต																																
2	ศึกษาปัญหากระบวนการผลิต																																
3	ศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อ TCC																																
4	การวิเคราะห์สัดส่วนปัจจัยและทดลองเพื่อ ยืนยันปัจจัย																																
5	ออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบความเป็น ส่วนโค้งและผลของอิทธิพลระหว่าง																																
6	ออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดระดับของ ปัจจัยที่เหมาะสมต่อวิธีที่นิเวศของ เพื่อนำไปทำการทดลอง																																
7	ทดลองยืนยันผลและเปรียบเทียบผลการ ดำเนินงาน																																
8	สรุปผลการทดลอง																																

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนเทอเลฟทาเลท (Polyethylene terephthalate: PET)



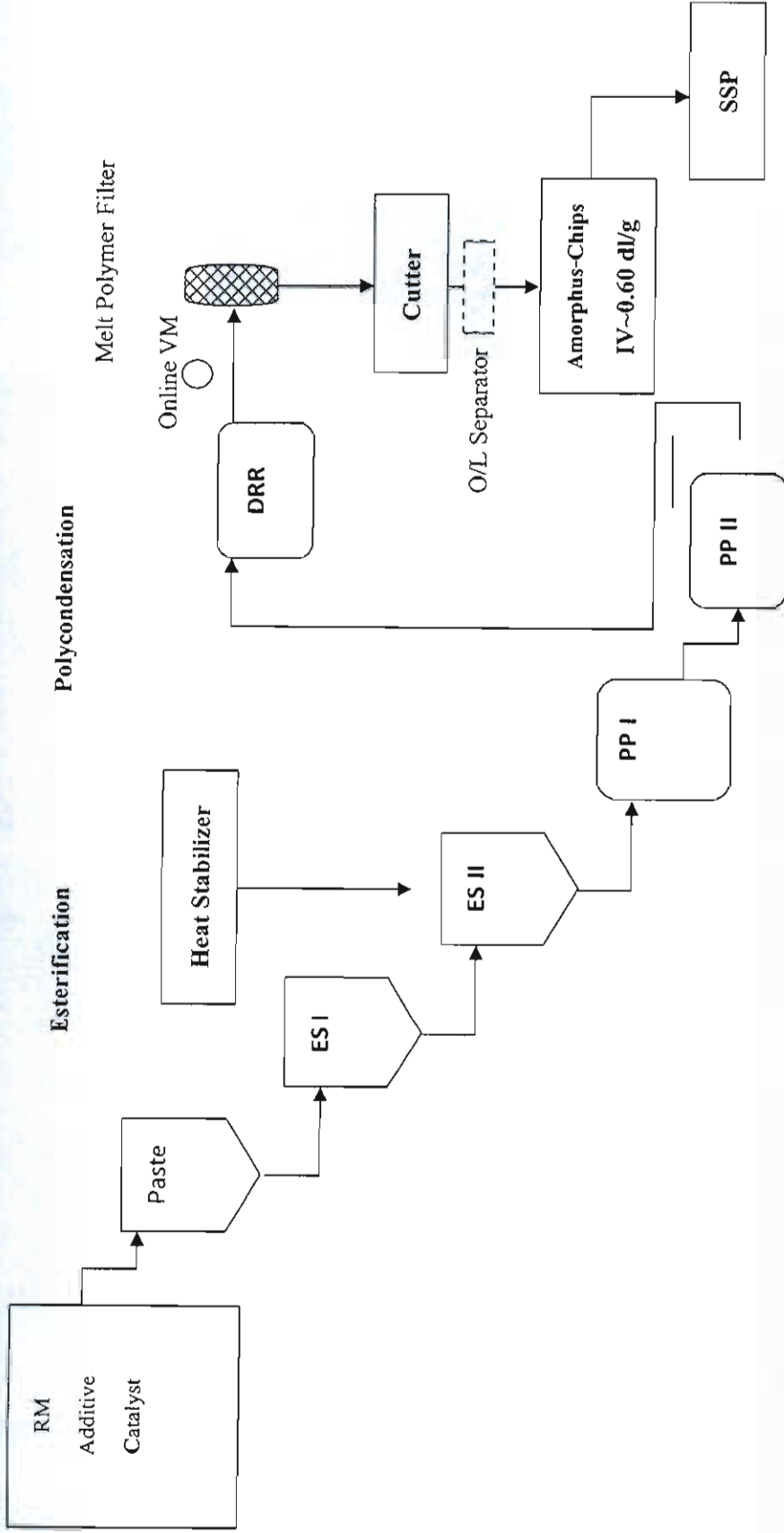
Raw material:
Pure terephthalic acid (PTA)
Monoethylene glycol (MEG)

Additive:
Isophthalic acid (IPA)
Diethylene glycol (DEG)

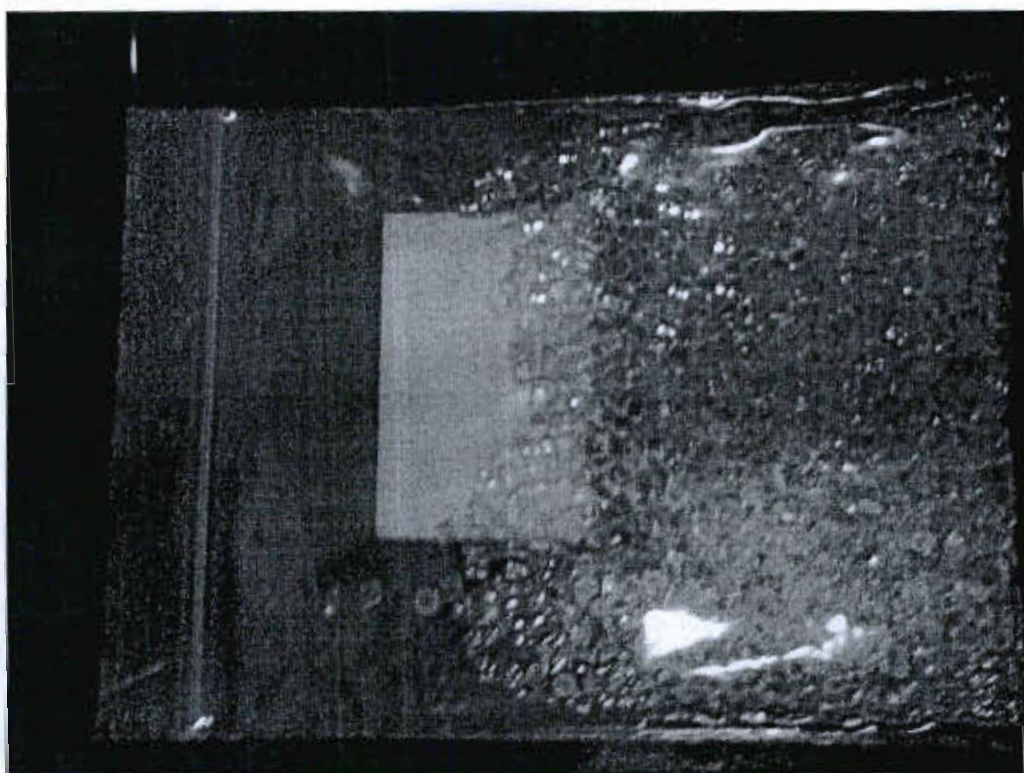
Catalyst
Antimony triacetate

ภาพที่ 2-1 ฟังกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก PET

Continuous Polycondensation (CP) Process

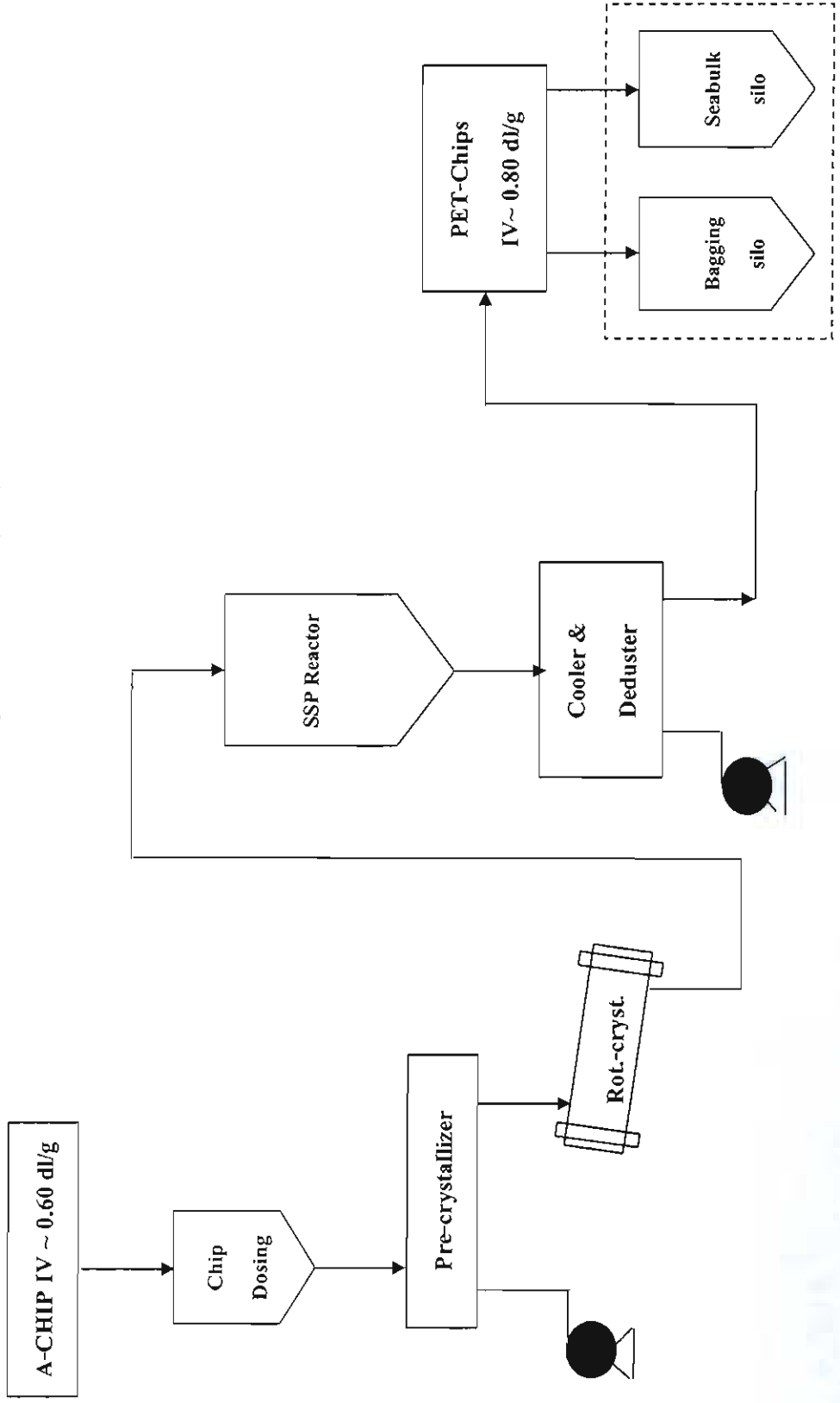


ภาพที่ 2-2 กระบวนการผลิต โพลีเมอร์แบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 2-3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบวนการ CP

Solid State Polycondensation (SSP) Process



ภาพที่ 2-4 กระบวนการเพิ่มความหนืดของเม็ดพลาสติก PET ในสถานะของแข็ง



ภาพที่ 2-5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ SSP

คำอธิบายกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก PET

1. สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก PET (เกรดผลิตขวด)

Pure terephthalic acid (PTA)- $\text{HOOC-C}_6\text{H}_4\text{-COOH}$

Ethylene glycol (EG)- $\text{HO-C}_2\text{H}_4\text{-OH}$

Pure isophthalic acid (IPA)- $\text{HOOC-C}_6\text{H}_4\text{-COOH}$

Antimony triacetat (Catalyst)- $\text{Sb (CH}_3\text{COO)}_3$

Diethylene glycol (DEG)- $\text{HO-C}_2\text{H}_4\text{-O-C}_2\text{H}_4\text{-OH}$

Cobalt acetate (Colour additive)- $\text{Co (CH}_3\text{COO)}_2$

Phosphoric acid (Heat tabilizer) - H_3PO_4

กระบวนการผลิตจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ กระบวนการผลิต โพลีเมอร์แบบต่อเนื่องและ กระบวนการเพิ่มความหนืดของเม็ดพลาสติก PET ในสถานะของแข็ง ดังภาพที่ 2-1 โดยมีรายละเอียดของแต่ละกระบวนการดังข้อ 2

2. กระบวนการผลิตโพลีเมอร์แบบต่อเนื่อง (Continuous polycondensation process: CP)

โดยเริ่มจากการลำเลียงวัตถุดิบเข้ามาทำปฏิกิริยาทางเคมี ในกระบวนการผลิตนี้ จนกระทั่งได้ผลผลิตออกมาเป็นเม็ดพลาสติกที่มีรูปร่างออสันฐาน (Amorphous chips) ที่มีค่าความหนืด (Intrinsic viscosity: IV) ประมาณ 0.60 เดซิลิตรต่อกรัม (dl/g) ซึ่งยังไม่เหมาะสมทำเป็นขวดได้ จะต้องนำเม็ดพลาสติกที่มีรูปร่างออสันฐาน ไปผ่านกระบวนการเพิ่มความหนืดที่ SSP Process เพื่อให้ได้ค่าความหนืด เท่ากับ 0.80 เดซิลิตรต่อกรัม ซึ่งเหมาะสมทำเป็นขวดต่อไป

ในกระบวนการผลิต CP Process สามารถแบ่งขั้นตอนการผลิตออกได้เป็น 4 ขั้นตอนคือ

2.1 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารเติมแต่ง (Raw material Handling, Catalyst and Additive)

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตมี 2 ตัว คือ PTA และ MEG มีสารประกอบการผลิต คือ Catalyst ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี คือ Antimony triacetate และมีสารเติมแต่ง (Additive) คือ IPA, DEG และ Heat Stabilizer (Phosphoric acid) เพื่อให้ PET เรซิน มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับนำไปทำขวด

PTA (Pure Teraphthalic acid) เป็นผงสีขาว มีสภาพเป็นกรดถ้าเป็นสารละลาย เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต การขนส่งเข้าโรงงานจะส่งเป็น รถ Bulk car คันละประมาณ 28 ตัน เข้ามาภายในโรงงานจากนั้นจะลำเลียง PTA เข้าสู่ PTA ไชโล หลังจากนั้นจะมีการลำเลียงออกจาก PTA ไชโลแบบต่อเนื่อง เพื่อส่งเข้าไปใน PTA ไชโล (Day silo tank) และถังผสมวัตถุดิบ (Paste preparation tank) ต่อไป

MEG (Mono ethylene glycol) เป็นของเหลวใสไม่มีสี เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต การขนส่งเข้าสู่โรงงานจะขนส่งมาเป็นแบบคันรถ ๆ ละประมาณ 20-40 ตัน และจะขนถ่าย MEG เข้าสู่ถังเก็บ MEG จากนั้นจะลำเลียงเข้าสู่ถังผสมวัตถุดิบ (Paste preparation tank) อย่างต่อเนื่อง Catalyst (Antimony triacetate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลักษณะเป็นผงสีขาว โดยจะต้องเตรียมความเข้มข้นให้เหมาะสมที่ถังเตรียมความเข้มข้น จากนั้นจึงลำเลียงเข้าสู่ถังป้อน (Feeding tank) และจะป้อนแบบต่อเนื่องเข้าสู่ถังเตรียมวัตถุดิบ

Additive คือสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปในกระบวนการผลิตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านกายภาพของ PET Resin เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมแก่การทำขวด สารเติมแต่งที่ใช้ในกระบวนการผลิต คือ

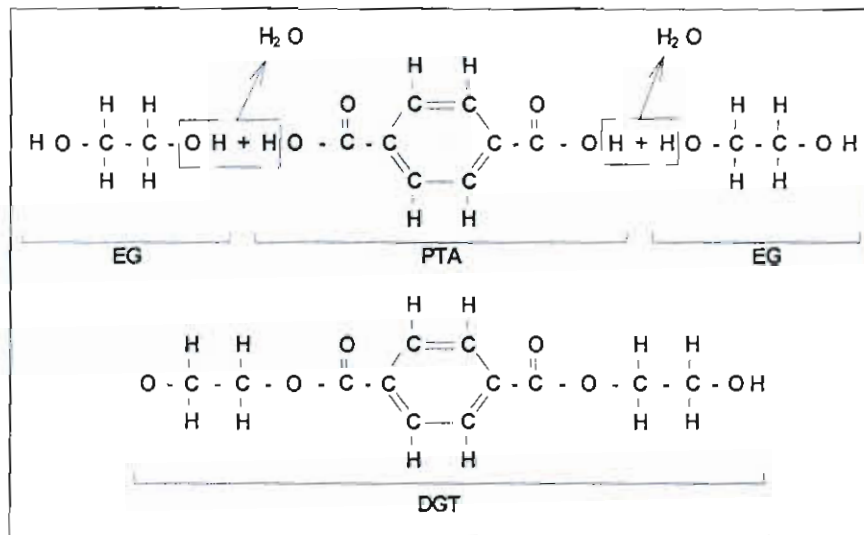
- IPA (Iso phthalic acid) เป็นผงสีขาวเหมือนกับ PTA เป็น Co-Polymer ของ PTA เพื่อช่วยในการปรับปรุงความใสและความเป็นผลึกของ PET Resin

- Heat Stabilizer เป็นสารละลายของ กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid 85%) โดยจะต้องมีการเตรียมความเข้มข้นก่อนที่จะป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องที่ ESII เพื่อควบคุมการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (Side reaction)

- Blue toner เป็นตัวปรับสีของ PET Resin โดยจะต้องมีการเตรียมความเข้มข้นก่อนที่จะป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องที่ถังเตรียมวัตถุดิบ

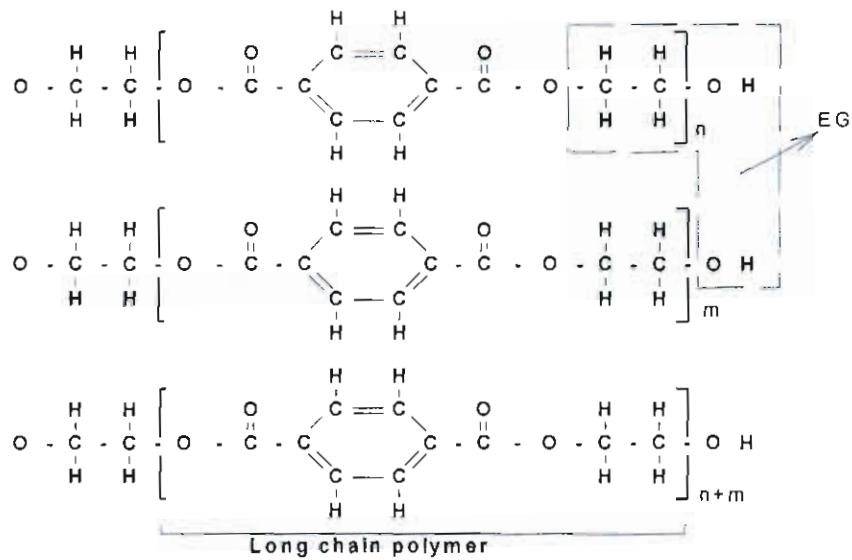
- DEG เพื่อช่วยในการปรับปรุงความใสเป็นตัวปรับความเป็นผลึก (Crystallization point) ของ PET Resin

2.2 กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอ์ (Esterification process) ปฏิกิริยาในกระบวนการนี้ คือ ปฏิกิริยาเอสเตอ์ฟิเคชัน (Esterification reaction) เป็นการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างกรด (Acid) และ แอลกอฮอล์ (Alcohols) ได้ผลเป็น เอสเทอร์ (Ester) และ น้ำ (Water) ในกระบวนการผลิตจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ ถังปฏิกรณ์ 2 ตัว (ESI และ ESII) และหอกถั่น (Process column) ในการผลิตที่ถังปฏิกรณ์ตัวที่ 1 จะรับวัตถุดิบที่ถูกผสมกันระหว่าง PTA, MEG, IPA, DEG และ Catalyst ในถังผสมวัตถุดิบ โดยของผสมจะถูกส่งมาที่ ESII ตามท่อผ่านปั๊ม (Paste pump) และจะเกิดปฏิกิริยาเอสเตอ์ฟิเคชัน (Esterification) ซึ่งจะต้องใช้ความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิของผสมเพิ่มขึ้น โดยความร้อนจะมาจาก Hot oil ซึ่งภายในถังปฏิกรณ์จะมีคอยล์ (Coil) แลกเปลี่ยนความร้อนอยู่และมีใบพัดกวนอยู่ตลอดเวลา ของผสมจะทำปฏิกิริยาระหว่าง PTA กับ MEG และ IPA กับ MEG ทำให้เกิดเป็น (Diethylene glycol Terephthalate) DGT ที่เป็น Monomer form และ Co-Monomer form ซึ่งจะเกิดน้ำเป็น By Product ออกมาจากกระบวนการผลิตผ่านหอกถั่นและส่งไปยังหน่วยบำบัดน้ำเสียต่อไป ส่วน DGT จะถูกส่งเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ตัวที่ 2 โดยผ่านปั๊ม (Centrifugal pump) อย่างต่อเนื่องซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเอสเตอ์ฟิเคชันแบบเดียวกันกับถังปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ผลของปฏิกิริยาจะทำให้ DGT จับตัวกันเป็น Oligomers และ ไดน้ำเป็น By Product และถูกกำจัดออกทางหอกถั่น ส่วน Oligomers จะถูกส่งไปยังกระบวนการผลิตโพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ต่อไป การควบคุมการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตนั้น สามารถทำได้โดยการรักษา ความดัน อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาและระดับของเหลวในถังปฏิกิริยา การเติมสารเติมแต่งในกระบวนการผลิตนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสามารถปรับได้ตามความต้องการของลูกค้า



ภาพที่ 2-6 แสดงโครงสร้างการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

2.3 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation process) ในกระบวนการผลิตนี้จะประกอบด้วยถึงปฏิกิริยา 3 ตัวคือ Pre-Polycondensation 2 ตัว (PPI และ PPII) และ Final polycondensation 1 ตัวซึ่งเป็น Disc ring reactor (DRR) การทำปฏิกิริยาในส่วนนี้เป็นการทำปฏิกิริยาแบบควบแน่น (Polycondensation) โดยรับ Oligomers มาจาก ESII เข้าสู่ถึงปฏิกิริยาดังที่ 1 (PPI) ซึ่งจะมีการให้ความร้อนที่สูงขึ้นและลดความดันให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ (Vacuum) จะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นเป็น Pre-Polymer จากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังถึงปฏิกิริยาดังที่ 2 (PPII) เพื่อทำปฏิกิริยาควบแน่นที่อุณหภูมิสูงขึ้น ภายใต้สูญญากาศ (Vacuum) ที่สูงขึ้นกว่าเดิม ทำให้มีการเรียงตัวของโมเลกุลที่ยาวขึ้น มีผลทำให้มีความหนืดมากขึ้น จากนั้นจะส่งต่อไปถึงปฏิกิริยาดังที่ 3 (DRR) ผ่านปั๊ม (Gear pump) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเหมือนกับ Pre-Polycondensation แต่อุณหภูมิจะสูงกว่าและความดันจะต่ำมากขึ้นมีผลทำให้ความหนืดของ Polymer ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งมีค่า IV ประมาณ 0.60-0.61 เดซิลิตรต่อกรัม จากนั้นจะถูกส่งผ่านไปยัง Gear pump เข้าสู่ Die Head และระบบตัดเม็ด (Chips) ต่อไป ที่ถึงปฏิกิริยาดังสุดท้ายจะมีระบบควบคุมความหนืดของโพลีเมอร์ โดยจะมีเครื่องวัดความหนืด (Viscosity meter) ส่งสัญญาณเข้าตัวควบคุมเพื่อปรับและรักษาความหนืดให้ได้ค่าที่ต้องการและเป็นมาตรฐานที่กำหนดในกระบวนการนี้จะมี EG เป็น By Product ซึ่งจะถูกกำจัดออกมาเก็บในถังพัก ก่อนที่จะป้อนกลับเข้าไปใหม่ที่ถังผสมวัตถุดิบ หรือส่งไปที่หอกลั่นเพื่อกลั่นให้บริสุทธิ์ต่อไป



ภาพที่ 2-7 แสดงโครงสร้างการเกิดปฏิกิริยาแบบควบแน่น

2.4 กระบวนการทำให้เป็นเม็ด (Chips) ในขั้นตอนนี้ โพลีเมอร์เหลวที่มีอุณหภูมิสูง จะถูก Gear pump อัดผ่าน Die Head ซึ่งเป็นตัวแยกโพลีเมอร์ออกเป็นเส้นย่อย จากนั้นจะผ่านเข้าตัวตัด (Chips granulator) เพื่อตัดเป็นเม็ดให้ได้ขนาดตามที่ต้องการชุด Chips granulator จะประกอบด้วยน้ำ Demineral ที่เย็นทำให้ Polymer เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ส่วนการตัดเม็ดจะมีชุดใบมีดตัดได้น้ำ จากนั้นเม็ดจะถูกลำเลียงเข้าสู่เครื่องอบแห้ง (Dryer) เพื่อทำให้เม็ดแห้งและจะถูกลำเลียงไปเก็บที่ไซโล เม็ดที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ของ CP Process เราจะเรียกว่า Amorphous chips ซึ่งจะเป็นวัตถุดิบของ SSP Process ต่อไป

3. กระบวนการเพิ่มความหนืดของเม็ดพลาสติก PET ในสถานะของแข็ง (Solid state polycondensation process: SSP)

Amorphous chips ที่ได้จากการตัดของกระบวนการผลิต CP และเก็บไว้ในไซโล จะถูกลำเลียงเข้าสู่กระบวนการผลิต SSP ซึ่งเป็นกระบวนการทำปฏิกิริยาจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในตัวเม็ด (Chips) เพื่อให้ได้ความหนืดที่สูงขึ้นตามต้องการ คือ I.V. (Intrinsic viscosity) = 0.80 เดซิลิตรต่อกรัม สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับทำขวดได้ เรียกว่า Bottle grade PET chips กระบวนการผลิตแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

3.1 Pre-Crystallization กระบวนการนี้จะลำเลียง Amorphous chips มาปรับสภาพเพื่อเตรียมก่อนเข้าสู่กระบวนการการเกิดผลึก (Crystallization) โดยการไล่อากาศและความชื้นที่ปน

มากับ Amorphous chips ออกด้วยไนโตรเจนที่ถูกทำให้ร้อนด้วย Hot oil จาก HTM ในขั้นตอนนี้ จะต้องควบคุมอัตราการลำเลียง Amorphous chips อุณหภูมิ และอัตราการไหลของไนโตรเจน ที่ผ่านเข้าไป และควบคุมการลำเลียง Chips ออกจากขั้นตอนนี้ให้คงที่

3.2 Crystallization chips ที่ออกจาก Pre-crystallizer จะถูกส่งผ่านท่อลำเลียงเข้าสู่ Rotary crystallizer ที่มีลักษณะเป็นถังในแนวนอน และในถังนี้จะมีการให้ความร้อนเพิ่มกับ เม็ด (Chips) เพื่อให้เกิดเป็นผลึกอย่างทั่วถึงภายในเม็ด ขั้นตอนนี้อาจทำให้เม็ด Chips จับตัว หรือ รวมตัวกันเป็นก้อนหลังจากที่ให้ความร้อน ดังนั้นระบบการเกิดผลึก (Crystallization) นี้จะต้อง ออกแบบเป็นพิเศษ คือ ถัง Rotary crystallization ลักษณะเป็นถัง 2 ชั้นและมีใบพัดกวนแบบพิเศษ ภายในกอลวงเพื่อให้ถังนี้ได้รับความร้อนจาก HTM และสามารถกระจายความร้อนผ่านผิวโลหะ ให้กับ Chips ที่ผ่านเข้ามาได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ กระบวนการเกิดผลึกนี้จะทำภายใน ไนโตรเจนที่ไหลเข้ามาตลอดเวลา ผ่าน Chips และไนโตรเจนจะเป็นตัวพา Acetal aldehyde น้ำ และก๊าซอื่น ๆ ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาออกไปกับไนโตรเจนที่ปล่อยออกจาก Rotary crystallizer และจะไปผ่านระบบที่ทำให้ไนโตรเจนนั้นบริสุทธิ์ หน่วยการผลิตที่มีความสำคัญต่อการเกิดผลึก ของเม็ดพลาสติกและมีหน้าที่เพิ่มความหนืดให้เม็ดพลาสติก คือ Rotary crystallizer (R/C)

3.3 Solid Stage polycondensation reactor (SSP Reactor) หลังจากเม็ด Chips ที่ผ่าน กระบวนการเกิดผลึกแล้วเม็ดเหล่านี้จะถูกลำเลียงเข้าไปใน SSP Reactor ซึ่งมีลักษณะถังในแนวตั้ง ยาวคล้ายหอกกลับ หลักการของกระบวนการนี้คือ ให้ความร้อนกับเม็ดเพื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น โดยต้อง ไม่มีออกซิเจน และความชื้นปนอยู่เลยภายในเวลาที่เพียงพอเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาภายในเม็ด จนได้ เป็นเม็ดที่มีความหนืดสูงขึ้นตามที่ต้องการ ไอที่ระเหยออกจากผิวของเม็ดในกระบวนการขั้นตอนนี้ คือ Acetal aldehyde จะถูกพาออกไปกับไนโตรเจนที่ไหลผ่านเม็ด ไนโตรเจนในกระบวนการนี้ ถูกใช้เพื่อนำพาความร้อนจากน้ำมันร้อน (Hot oil) และก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ออกไป ซึ่ง ไนโตรเจนร้อนจะถูกเป่าจากด้านล่างสู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ แต่ทิศทางไหลของเม็ด จะสวนทาง กัน คือเม็ดจะไหลจากด้านบนสู่ด้านล่างในขั้นตอนนี้ สิ่งที่ต้องระมัดระวังและควบคุมให้ดีคือ

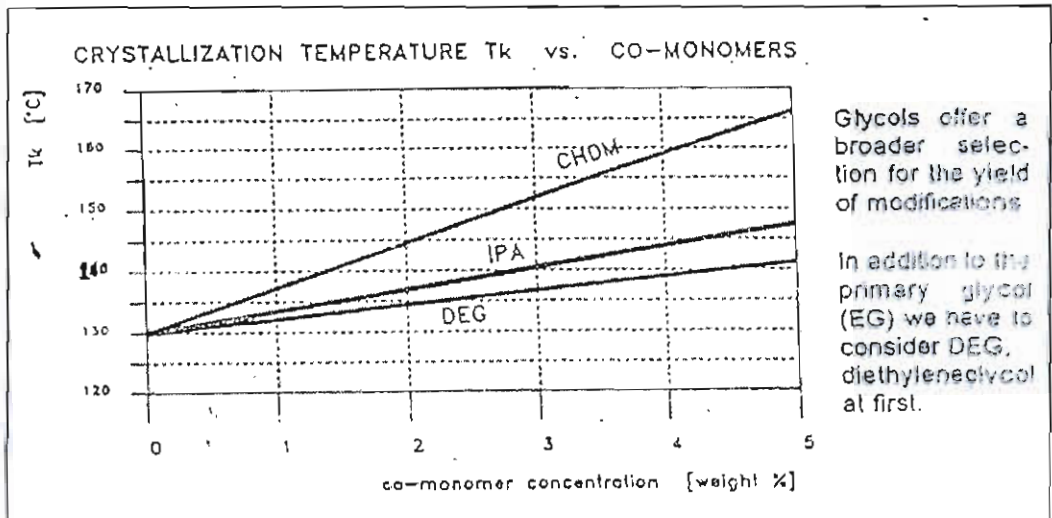
- การไหลของเม็ดจะต้องสม่ำเสมอ
- การจัดรูปแบบและ การกระจายตัวของไนโตรเจน

หลังจากผ่าน SSP Reactor แล้วเม็ดที่ร้อนจะถูกลำเลียงเข้าสู่ขั้นตอนการทำเม็ด ให้เย็นต่อไป

3.4 Chips cooling and dedusting ขั้นตอนการทำเม็ดให้เย็นและการกำจัดฝุ่นที่ปนมา กับเม็ด เม็ดที่ผ่านขั้นตอน SSP แล้ว จะเป็นเม็ดที่พร้อมจะนำไปทำขวดได้ แต่อุณหภูมิยังสูงอยู่

ไม่สามารถบรรจุลงในถุง Big bag หรือ Seabulk ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการทำให้เย็นโดยใช้ลมเป่าผ่าน Air Blower และแยกผงออกมาผ่าน Air cyclone เม็ดที่ผ่านขั้นตอนนี้จะถูกส่งเข้า Chips ไซโลและเข้าสู่กรรมวิธีการบรรจุเพื่อส่งให้ลูกค้าต่อไป

4. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิการตกผลึก (Crystallization temperature: T_c) กับความเข้มข้นของ co-monomer (IPA, DEG)



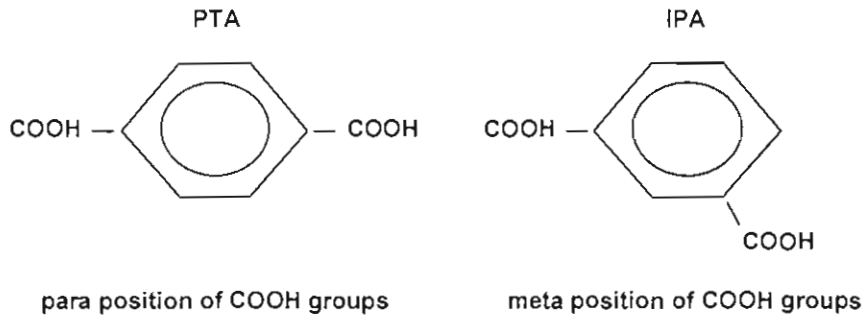
ที่มา: จากข้อมูลการผลิตของผู้ออกแบบกระบวนการผลิต PET Resin (Zimmer)

ภาพที่ 2-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิการตกผลึกกับความเข้มข้นของโคโมโนเมอร์

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิการตกผลึกกับความเข้มข้นของ Co-Monomer พบว่าการเติม IPA และ DEG ทำให้เพิ่ม Crystallization point ให้สูงขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ DEG ในเม็ด PET (DEG Content) จะมีผลกระทบต่อคุณภาพของ PET ระดับในการเติมจะต้องให้ถูกต้องแม่นยำ การเติมมากเกินไปไม่ควรปฏิบัติ สำหรับการใส่โพลิเมอร์ผลิตขวดเพราะว่า คุณสมบัติหลายอย่างที่เราต้องการจะสูญเสียไป

Isophthalic Acid (IPA)

Isophthalic acid เหมือนกับ PTA ก็เป็นวงแหวน Benzene ที่มีหมู่ Carboxyl 2 หมู่ (Dicarboxylic acid) แต่ IPA และ PTA ต่างกันตรงที่ ตำแหน่งของหมู่ Carboxyl ที่เกาะวงแหวน Benzene (Position of the two COOH groups at the benzene ring)



ภาพที่ 2-9 แสดงการทำปฏิกิริยาระหว่าง PTA กับ IPA

ถ้าโมเลกุล PTA ถูกแทนที่ (Substituted) ด้วยโมเลกุล IPA ซึ่งมีมุม (Angle) มากกว่า จะทำให้โครงสร้าง (Structure) สายโพลิเมอร์ (PET Chain) เปลี่ยนไป ทำให้มีผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ คือทำให้จุดหลอมเหลว (Melting point) ต่ำลง อุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature) ต่ำลง แต่ Crystallisation point สูงขึ้น นอกจากนี้ IPA ยังช่วยปรับปรุงความใส (clearness) และความเป็นผลึก (Crystallisation) ของผลิตภัณฑ์

IPA มีผลทำให้ความหนืด Dynamic viscosity ของโพลิเมอร์เหลว (Polymer melt) ต่ำลง ในขณะที่ความยาว (Chain length) ของสายโพลิเมอร์ และ ความหนืด (I.V.) ยังคงที่ ปริมาณ IPA ที่เติมลงในถัง Paste (Paste preparation vessel) มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 3% โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย (Final product) ซึ่งปริมาณ IPA ที่เติมลงไปเพื่อแทนที่ PTA ในจำนวนที่เท่ากันเพื่อให้ Mole ratio ของ Paste ยังคงที่

Diethylene glycol (DEG)

ผลของ DEG ที่มีต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ คือ ทำให้จุดหลอมเหลว (Melting point: Tm) ต่ำลง อุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature: Tg) ต่ำลง แต่อุณหภูมิที่ทำให้เกิดผลึก (Crystallisation point: Tc) สูงขึ้น นอกจากนี้ DEG ยังช่วยปรับปรุงให้ความใส (Clearness) และการเป็นผลึก (Crystallisation) ของผลิตภัณฑ์ดีขึ้นอีกด้วย เช่นเดียวกับผลของ IPA และ DEG ซึ่งมีผลทำให้ความหนืด Dynamic viscosity ของโพลิเมอร์เหลว (Polymer melt) ต่ำลง ในขณะที่ความยาวสาย

โพลีเมอร์ (Chain length) ยังคงที่อยู่ จึงทำให้ค่าความหนืดคงที่ด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาถึงภาพที่ 2-4 ทำให้ทราบ: ในเบื้องต้นว่า เเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ DEG และ IPA มีผลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึก (Crystallisation temperature) ของเม็ดพลาสติก PET

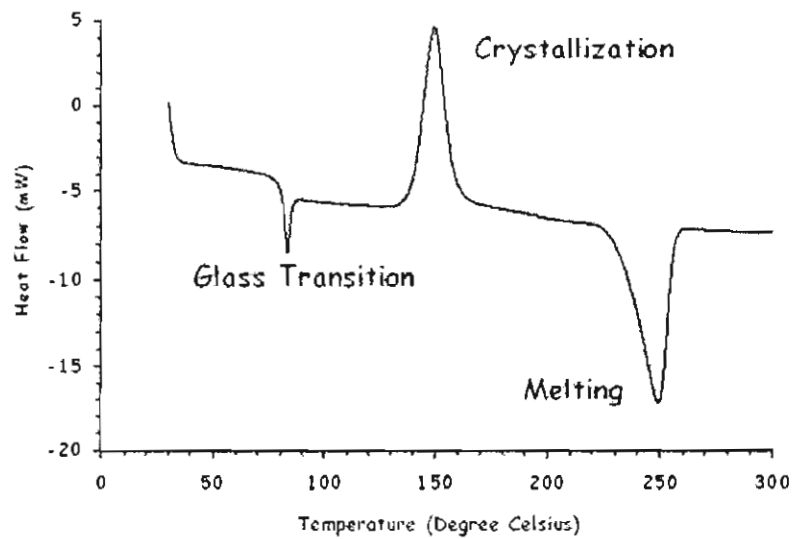
5. หลักการทำงานของเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter: DSC)

ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ หรือที่เรียกกันย่อ ๆ ว่าเครื่อง DSC เป็นเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal transition) ของสารตัวอย่าง เช่น พอลิเมอร์ ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน การดูดหรือคายพลังงาน ของสารตัวอย่าง เมื่อถูกเพิ่ม หรือลดอุณหภูมิในบรรยากาศที่ถูกควบคุม

หลักพื้นฐานของ DSC ก็คือ นำถาด 2 ถาด ถาดแรกเป็นถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample pan) ถาดที่สองเป็นถาดอ้างอิง (Reference Pan) ซึ่งเป็นถาดเปล่า ไปวางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน (Furnace) ชนิดเดียวกัน ซึ่งวางอยู่ข้าง ๆ กัน เมื่อเริ่มการทดลอง Furnace จะเริ่มให้ความร้อนแก่ถาดทั้งสอง โดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ เช่น 10 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที แต่ที่สำคัญที่สุดก็คือ เครื่อง DSC จะควบคุมให้ Furnace ทั้งสอง (Furnace ของ Sample Pan และของ Reference pan) เพิ่มอุณหภูมิถาดทั้งสองที่วางแยกกัน ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากัน ตลอดทั้งการทดลอง สาเหตุที่ความร้อนของถาดทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากันก็คือ ถาดทั้งสองมีความแตกต่างกัน นั่นคือ Sample pan มีตัวอย่างพอลิเมอร์อยู่ข้างใน แต่ Reference pan ไม่มี การมีสารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ Sample pan มีสสารในปริมาณที่มากกว่า Reference Pan นั้นหมายความว่า Furnace ต้องให้ความร้อน Sample pan มากกว่าที่ให้ Reference pan เพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากัน ดังนั้น Furnace ที่อยู่ใต้ Sample pan จะต้องทำงานหนักกว่า Furnace ที่อยู่ใต้ Reference pan คือมันต้องให้ความร้อนมากกว่า และการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจาก Furnace ทั้งสองนี้ ก็คือหน้าที่หลักของเครื่อง DSC และเพื่อให้เห็นภาพได้ง่าย เราจะสร้างกราฟ โดยมีแกน X เป็นค่าของอุณหภูมิ และแกน Y เป็นค่าของความแตกต่างของปริมาณความร้อนของ Furnace ทั้งสอง ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งโดยปกติแล้ว การทดสอบสารตัวอย่างทำโดยการเพิ่ม (หรือลด) อุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ เช่น 10°C ต่อ 1 นาที โดยเริ่มต้นที่ 25°C และสิ้นสุดการทดลองที่ 300°C หรือการรักษาอุณหภูมิสารตัวอย่างไว้คงที่ (Isothermal) เป็นระยะเวลาหนึ่ง และสำหรับการทดลองส่วนใหญ่แล้ว บรรยากาศก็มีบทบาทสำคัญต่อผลการทดลองเช่นเดียวกับอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่บรรยากาศที่ใช้ในการทดลองมีสองแบบคือ บรรยากาศเฉื่อย (Inert Atmosphere) เช่น

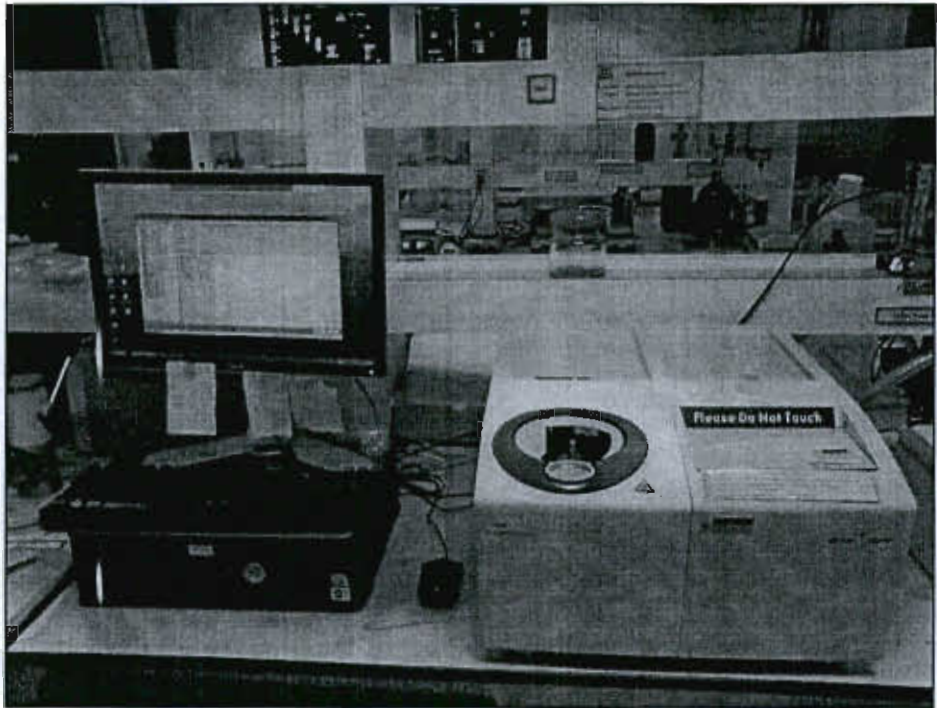
แก๊สไนโตรเจน และบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจน (Oxidizing atmosphere) เช่น แก๊สออกซิเจน ข หรืออากาศ ความร้อนที่ไหลสารตัวอย่าง (Heat flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ไหลสารตัวอย่าง และถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (Milliwatts: mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือ ปริมาณพลังงานที่ถูกแสดงในหน่วย มิลลิวัตต์วินาที (mW.s) หรือ มิลลิจูลล์ (mJ) พลังงานที่ไหลสารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy) ของสารตัวอย่าง

เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงาน เราเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Endothermic และ เมื่อสารตัวอย่างคายพลังงาน เราเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Exothermic เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว (Melting) Furnace ต้องให้ความร้อน Sample Pan มากกว่าที่ให้ Reference pan เพื่อที่จะคุมอุณหภูมิของ Sample Pan และ Reference Pan ให้เท่ากัน ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยัง Sample Pan มากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยัง Reference Pan นั้น ขึ้นอยู่กับว่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ Exothermic หรือแบบ Endothermic DSC เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ในอุตสาหกรรมเคมี พลาสติก อิเล็กทรอนิกส์ ขยายยนต์ อากาศยาน ไปจนถึงอาหารและยา โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้ ทั้งสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ และสำหรับงานวิจัย ตัวอย่างของข้อมูลที่สามารถวัดได้ จากการใช้เครื่อง DSC เช่น จุดหลอมเหลว (Melting point: T_m) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature: T_g) ความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation stability) จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา (Reaction kinetics) หรือ ความบริสุทธิ์ (Purity) ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิด จะมีข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้เป็นค่าเฉพาะตัว เช่น Low density polyethylene (LDPE) มี Melting point อยู่ที่ประมาณ 110°C และเกิดการตกผลึก (Crystallization) ที่ประมาณ 293°C ในขณะที่ Polyethylene terephthalate (PET) มี T_g ที่ประมาณ 69°C และมี Melting point อยู่ที่ประมาณ 256°C และเกิด Crystallization ที่ประมาณ 140°C ภาพด้านล่างแสดงตัวอย่างกราฟ DSC (DSC Thermogram) ของ PET ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตขวดน้ำอัดลม (เรียกกันว่าขวดเพด) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนถึง 3 ลักษณะ โดยที่ Glass transition และ Melting เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบดูดพลังงาน (Endothermic) ในขณะที่ Crystallization เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบคายพลังงาน (Exothermic)



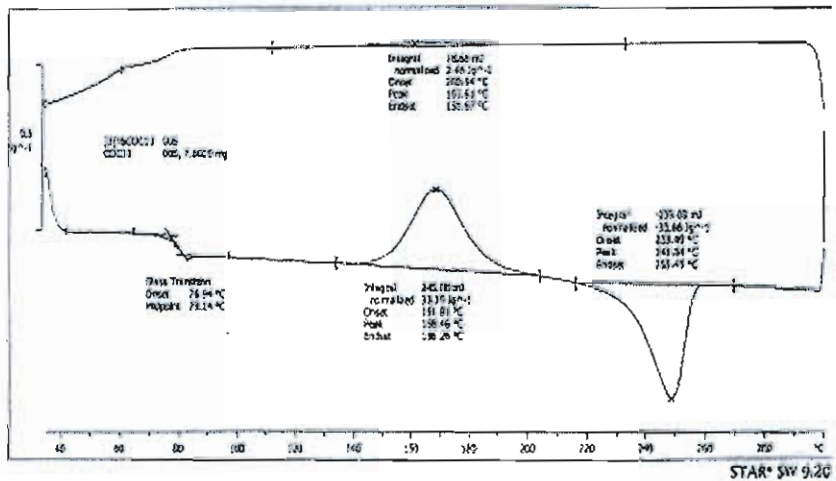
ภาพที่ 2-10 แสดงตัวอย่างกราฟ DSC ของพลาสติก PET

โดยเครื่องดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ของโรงงานกรณีศึกษาเป็นเครื่องของบริษัท Mettler DSC 20 ซึ่งอุณหภูมิสารตัวอย่างเพิ่มด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ คือ 10°C ต่อ 1 นาที โดยเริ่มต้นที่ 35°C และสิ้นสุดการทดลองที่ 300°C และอัตราการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตราอุณหภูมิตั้งที่ 10°C ต่อ 1 นาที เพื่อวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิกการตกผลึกจากกลับ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดอุณหภูมิกคือ Cooling device แสดงได้ดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-11 เครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของโรงงานการศึกษา

ตัวอย่างกราฟ DSC ของเม็ดพลาสติก PET ที่วิเคราะห์จากเครื่องของโรงงานการศึกษา



ภาพที่ 2-12 กราฟ DSC ที่วิเคราะห์จากเครื่องของโรงงานการศึกษา

ทฤษฎีการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

Montgomery and C. Douglass. (2005) ได้กล่าวไว้ว่าหากต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด จะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง คำว่า “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ” หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็นถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่และถ้าปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความคิดพลาดในการทดลอง วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญสองประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลอง คือการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้ การออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment: DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่เราต้องการซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด ระหว่างวิธีการ โดยทั่วไป กับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-At-a-Time) เช่น ถ้าเราสงสัยว่าเราควรที่จะต้องปรับตั้งค่าของอุณหภูมิในการอบชิ้นงาน ความเร็วของรางเลื่อนที่ใช้ในการอบ และน้ำหนักเคมีของพรมเท่าไรดี จึงจะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพสูงสุดไม่เป็นของเสีย ดังนั้นแนวทางที่เรามักใช้กัน โดยทั่ว ๆ ไป ก็คือเรามักจะลองปรับตั้งในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบก่อนเมื่อทดลองจนได้ค่าของอุณหภูมิที่เราต้องการแล้วจึงค่อยไปปรับตั้งเรื่องของความเร็วของรางเลื่อนและน้ำหนักเคมี เราอาจทำซ้ำไปเรื่อย ๆ เพื่อที่จะหาจุดที่ดีที่สุดของกระบวนการ ซึ่งลักษณะนี้เรียกว่าการทดลองแบบ One Factor At a Time นั่นเอง โดยทั่วไปแล้วการออกแบบการทดลองแบบ One Factor At a Time จะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่เราต้องการได้ช้ามากและสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์ รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมากและยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีผลของความสัมพันธ์ร่วม (Interaction effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยนั่นเอง

ข้อดีของการออกแบบการทดลองคือให้ผลของความแม่นยำ และความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการ นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วในการดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหา โดยทั่วไปแล้วถ้าหากเรามีปัจจัยในการทดสอบอยู่ประมาณ 3 ปัจจัย

ซึ่งในการดำเนินการทดสอบคว่า ปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลจริงต่อกระบวนการด้วยวิธีแบบ One factor at a time จะใช้เวลานานถึง 1 ปี ในการตรวจสอบได้ครบทุกปัจจัย แต่ด้วยวิธีการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองจะใช้เวลาเพียงแค่ 1-3 อาทิตย์ เท่านั้น ในการตรวจสอบปัจจัยดังกล่าว การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องจะต้องมีความเข้าใจล่วงหน้าว่าเรากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร

คำจำกัดความของคำศัพท์ที่ใช้ในหัวข้อมีดังนี้

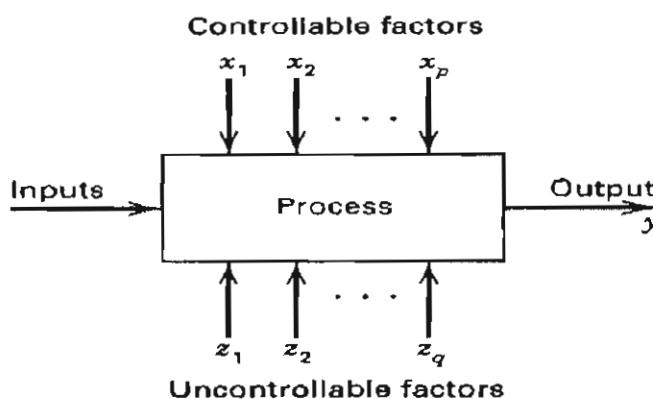
อิทธิพลหรือผล (Effect) หมายถึงผลของตัวแปรอิสระ (ปัจจัยที่ทราบค่าสามารถกำหนดและเปลี่ยนแปลงได้) ที่มีต่อตัวแปรตาม (คุณลักษณะที่สามารถทราบได้หลังจากการทดลองในแต่ละครั้งหรือค่าที่ต้องการวัด)

ปัจจัย (Factor) หมายถึงคุณสมบัติใด ๆ ที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อผลการทดลองของคุณลักษณะในตัวผลิตภัณฑ์

ระดับของปัจจัย (Level of Factor) หมายถึงสภาวะต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่ง ๆ ที่ทำการกำหนดในการทดลอง

ปัจจัยรบกวน (Noise Factor) หมายถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบเล็กน้อยในการทดลองและไม่สามารถควบคุมได้

การออกแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบว่าปัจจัย (Factor) ใดหรือตัวแปร (Input variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งที่ไม่สำคัญในผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output response)

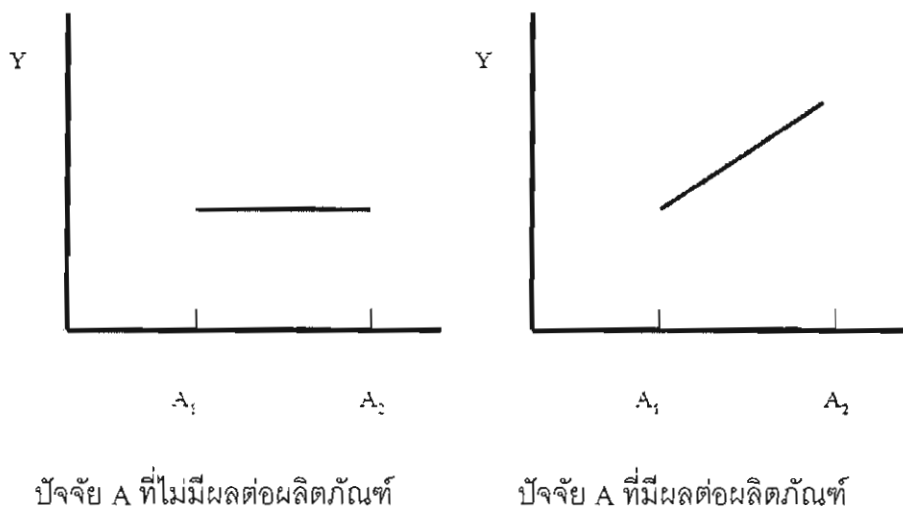


ภาพที่ 2-13 แสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ

ปัจจัยในระบบการใด ๆ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factors) หมายถึงปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต เช่น การตั้งอุณหภูมิตู้อบความร้อน
2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factors) หมายถึงปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นไม่ได้ในการผลิต เช่น ไฟฟ้าดับปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้สามารถแบ่งดังนี้
 - ตัวแปรบกวน (Noise variable) หมายถึงตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองในการทดลองแต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เราสนใจศึกษา ส่วนใหญ่มักเป็นเวลาหรือเครื่องมืออุปกรณ์
 - ตัวแปรตอบสนอง (Response variable) คือตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง ในการทดลองหนึ่งอาจมีการวัดตัวแปรตามมากกว่า 1 ค่าได้การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจกแจงตัวแปรนั้นและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่าค่าที่สังเกตได้จากทริทเมนต์หนึ่งควรมีการแจกแจงแบบปกติโดยประมาณซึ่งข้อสมมุติในเรื่องความเป็นปกติ (Normality) นี้เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลองซึ่งอาจใช้การแปลงข้อมูลค่าสังเกตที่มีการแจกแจงที่ไม่เป็นปกติให้เป็นปกติได้

วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง เพื่อทำการวิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยใดมีผลต่อผลิตภัณฑ์หรือไม่มีผลนั้นต้องทำการเปลี่ยนแปลงอย่างน้อย 2 ระดับแล้วทำการทดลอง จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น ให้ Y หมายถึงค่าความขุ่นและ A หมายถึงค่าความเข้มของสี ซึ่งสรุปผลเมื่อได้กราฟดังแสดงในภาพที่ 2-9



ปัจจัย A ที่ไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์

ปัจจัย A ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์

ภาพที่ 2-14 แสดงอิทธิพลที่มีผลและอิทธิพลที่ไม่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

จากภาพที่ 2-9 ด้านซ้ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัย A ค่า Y ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแสดงว่าปัจจัย A ไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ ส่วนด้านขวามือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัย A ค่า Y มีการเปลี่ยนแปลงตามดังนั้นปัจจัย A มีผลต่อผลิตภัณฑ์

1. ขั้นตอนการออกแบบการทดลองทำได้ดังต่อไปนี้

1.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา ในขั้นตอนนี้เราอาจจะต้องพยายามพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลองและบ่อยครั้งที่เราจะต้องหาข้อมูลสำหรับป้อนเข้าจากบุคคลหรือหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนกวิศวกรรม แผนกประกันคุณภาพ แผนกผลิต แผนกการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้า และแผนกบุคคล ความชัดเจนจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์ และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้น ๆ ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรจะมีการทำงานเป็นทีม การใช้ประสบการณ์คาดคะเนว่า ปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อปัญหาที่เราสนใจ ซึ่งถ้าหากเราไม่มีในส่วนของประสบการณ์องค์กรเข้ามาเกี่ยวข้อง (เช่น ทีมงานเป็นพนักงานใหม่ทั้งหมด) การออกแบบการทดลองก็ยังคงดำเนินต่อไป แต่จะใช้เวลานานขึ้น เพราะต้องเสียเวลาในการตรวจสอบทุก ๆ ปัจจัยที่มีอยู่ทั้งหมด

1.2 เลือกตัวแปรตอบสนอง ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรตอบสนอง เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจมีตัวแปรตอบสนองหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรตอบสนองและจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

1.3 เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต ในการทดลองที่เหมาะสมผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงและกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลองจะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดได้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมาก ซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบดูว่าปัจจัยที่กำหนดขึ้นมานี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Factor screening) เราควรที่จะกำหนดให้ระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อย ๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมาก ๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้าง ๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและที่ระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเราอาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้ ซึ่งใน

การเลือกรูปแบบและลักษณะการทดลองนั้นควรพิจารณาถึงเวลาในการวิเคราะห์และงบประมาณในการทดลองด้วย

1.4 เเลือกรูปแบบของการทดลองที่เหมาะสม ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้ถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับ การพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (Replicate) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการ เก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของ การทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมากเราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อค่าตอบสนองที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิด ความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

1.5 ทำการทดลองและเก็บข้อมูล เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามกระบวนการ ทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาด เกิดขึ้นเกี่ยวกับการทดลองในขั้นตอนนี้จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนใน ตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

1.6 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เราควรจะใช้วิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลอง ได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะ นำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติคือ ทำให้ผู้มีอำนาจในการ ตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพและถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้อ ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการและสามัญสำนึกจะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้น มีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

1.7 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้อง หาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้เราจะนำเอา วิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานให้ผู้ฟัง นอกจากนี้ แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบ ความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2. หลักพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ เรพลีเคชัน (Replication) แรนดอมไมเซชัน (Randomization) และ บล็อกกิง (Blocking) ในที่นี้เรากำหนดให้

2.1 เรพลีเคชัน หมายถึงการทำการทดลองซ้ำ เรพลีเคชันมีคุณสมบัติ 2 ประการคือ ประการแรกเรพลีเคชันทำให้การทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้

ตัดประมาณค่าความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่าความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สอง ถ้าค่าเฉลี่ย (ตัวอย่าง \bar{y}) ถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง

2.2 แรนดอมไมเซชัน เป็นพื้นฐานหลักสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง แรนดอมไมเซชันหมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง การที่เราแรนดอมไมเซชันการทดลอง ทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

2.3 บล็อกกิ้ง เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกกิ้งหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นหนึ่งเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

หลักการพื้นฐานทั้งสามที่กล่าวมานี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการทดลองทุก ๆ ชนิด ดังนั้นเราอาจจะต้องกล่าวถึงหลักการทั้งสามนี้บ่อยครั้ง เพื่อเป็นการแสดงและเน้นให้เห็นถึงประโยชน์ของหลักการดังกล่าว

3. หลักการพื้นฐานทางสถิติ

เราอาจจะเรียกค่าที่ได้จากการสังเกต (Observation) แต่ละค่าในการทดลองเรียกว่า “รัน (Run)” ซึ่งแต่ละรันจะมีความแตกต่างกันเนื่องจากการแกว่งหรือสิ่งรบกวน (Noise) เกิดขึ้นกับผลการทดลอง เราเรียกสิ่งรบกวนในกระบวนการในการทดลองว่า “ความผิดพลาดในการทดลอง” (Experimental Error)” ซึ่งเป็นความผิดพลาดทางสถิติที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ การปรากฏของความผิดหรือสิ่งรบกวนนี้ บอกให้เราทราบอย่างเป็นนัยว่า ตัวแปรตอบสนอง (ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค) เป็นตัวแปรสุ่ม (Random Variable) ซึ่งตัวแปรสุ่มอาจจะเป็นได้ทั้งแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) หรือแบบต่อเนื่อง (Continuous) ถ้าหากชุดของค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของตัวแปรสุ่มมีค่าจำกัดหรือสามารถนับได้แบบไม่จำกัดแล้วตัวแปรสุ่มแบบนี้จะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง แต่ถ้าชุดของค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของตัวแปรสุ่มมีค่าเป็นช่วง ตัวแปรสุ่มแบบนี้จะเป็นแบบต่อเนื่อง

4. การอธิบายความแปรผันด้วยกราฟ

เรานิยมใช้กราฟในการช่วยอธิบายและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แผนภาพแบบจุดเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มาก (สำหรับการทดลองข้อมูลน้อย ประมาณ 20 ข้อมูล)

แผนภาพแบบจุดทำให้ผู้ทดลองเห็นถึงตำแหน่งของข้อมูลและแนวโน้มของมัธยิมของข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งการกระจายของข้อมูลอีกด้วย ถ้าหากข้อมูลในการทดลองมีมากฮิสโทแกรมจะแสดงแนวโน้มของมัธยิม การกระจาย และรูปร่างของการกระจายของข้อมูล สังเกตว่าฮิสโทแกรมนั้นสร้างมาจากการแบ่งค่าในแกนออกมาเป็นช่วง ๆ ซึ่งตามปกติจะมีความกว้างของช่วงเท่ากัน และวาดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเหนือช่วงที่ j ด้วยขนาดของพื้นที่ให้เป็นสัดส่วนกับ n_j (จำนวนของค่าซึ่งได้จากการสังเกตที่อยู่ในช่วงนั้น) (ปรเมศ ชูติมา, 2545)

5. การทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานคือการทดสอบ เพื่อสรุปหรือพิสูจน์ข้อความซึ่งเป็นข้อสมมติเกี่ยวกับกระบวนการที่สนใจศึกษาว่าเป็นไปตามที่คาดคะเนหรือไม่ (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551) สมมติฐานทางสถิติที่เขียนไว้ในเชิงปริมาณการเท่ากันของค่าสถิติ เราเรียกว่า สมมติฐานที่ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ภาษานักวิจัยเรียกกันว่า โนล ไฮโปธีสิส (Null Hypothesis) หรือ สมมติฐานหลักแทนด้วยสัญลักษณ์ H_0 ส่วนสมมติฐานที่มีความแตกต่างกัน เรียกว่า อัลเทอเนทิฟไฮโปธีสิส (Alternative Hypothesis) หรือสมมติฐานรอง แทนด้วยสัญลักษณ์ H_1

การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว

เป็นการตั้ง H_0 โดยกำหนด $H_0 : \mu_1 = \mu_0$

และกำหนด H_1 ดังนี้คือ $H_1 : \mu_1 < \mu_0$ หรือ $H_1 : \mu_1 > \mu_0$

โดยที่

μ_1 คือ ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ

μ_0 คือ ค่าเฉลี่ยอ้างอิง

การทดสอบสมมติฐานแบบสองทาง

เป็นการตั้ง H_0 โดยกำหนด $H_0 : \mu_1 = \mu_0$

และกำหนด H_1 ดังนี้คือ $H_1 : \mu_1 \neq \mu_0$

โดยที่

μ_1 คือ ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ

μ_0 คือ ค่าเฉลี่ยอ้างอิง

หรือ

เป็นการตั้ง H_0 โดยกำหนด $H_0 : \mu_0 = \mu_1 = \dots = \mu_a$

และกำหนด H_1 ดังนี้คือ $H_1 : \mu_1 \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่ (i, j)

โดยที่

μ คือ ค่าพารามิเตอร์ หรือค่าเฉลี่ยของประชากรที่สนใจ

i, j คือ $1, 2, \dots, a$

ในการทดสอบสมมติฐานจะเกิดลักษณะของความผิดพลาดในการยอมรับ หรือปฏิเสธ สมมติฐาน ซึ่งความผิดพลาดทั้ง 2 ประเภทนี้ สามารถเกิดขึ้นได้ขณะทดสอบสมมติฐาน ถ้าหากค่า H_0 ถูกปฏิเสธทั้ง ๆ ที่ H_0 ถูกต้องจะเกิดความผิดพลาดประเภทที่ 1 ขึ้น แต่ถ้า H_0 ไม่ถูกปฏิเสธ ทั้ง ๆ ที่ H_0 นั้นไม่ถูกต้องความผิดพลาดประเภทที่ 2 ก็จะเกิดขึ้น ความน่าจะเป็นของความผิดพลาด ทั้ง 2 ประเภท ก่อให้เกิดสัญลักษณ์พิเศษคือ α และ β

$$\alpha = P(\text{Type I Error}) = P(\text{Reject } H_0 / H_0 \text{ is True})$$

$$\beta = P(\text{Type II Error}) = P(\text{Fail to Reject } H_0 / H_0 \text{ is False})$$

โดยที่

α หมายถึง ความเสี่ยงในการปฏิเสธสมมติฐานหลักทั้งที่สมมติฐานหลักเป็นจริง

β หมายถึง ความเสี่ยงในการยอมรับสมมติฐานหลักทั้งที่สมมติฐานหลักไม่เป็นจริง

และจากความเสี่ยงของทั้งสองแบบนี้เอง จึงต้องมีการกำหนดจำนวนซ้ำของการทดลองไว้ เพื่อให้ มีความเชื่อมั่นหรือมีความเสี่ยงในการยอมรับข้อมูลตามที่กำหนดไว้ และในการวิเคราะห์ ก็มักจะ กำหนดให้ค่าของ α มีค่าคงที่และค่าของ β ให้มีค่าน้อยที่สุด

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน แบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

5.1 การตั้งสมมติฐาน คือ การระบุข้อความที่ต้องการพิสูจน์เกี่ยวกับระบบหรือ ประชากร โดยทั่วไปจะกำหนด H_1 ก่อน และส่วนกลับของข้อความใน H_1 จะระบุไว้ใน H_0 (H_1 คือ ข้อความที่ต้องการพิสูจน์ว่าจริง H_0 คือ ข้อความที่เป็นบทกลับของ H_1)

5.2 กำหนดระดับทดสอบหรือระดับนัยสำคัญ (Significance Level: α) โดยทั่วไป ค่าที่นิยมใช้คือ 5% หรือ $\alpha = 0.05$ แต่ความเป็นจริงแล้วค่า α ที่ใช้สามารถใช้ได้ในช่วง 1% ถึง 10% หรือมีระดับความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่า 90%

5.3 ระบุค่าทดสอบทางสถิติ หรือการแจกแจงทางสถิติที่ใช้ทดสอบ และคำนวณค่า โดยอาศัยข้อมูลจากตัวอย่าง ค่าทดสอบทางสถิติที่ใช้สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ขึ้นอยู่กับ พารามิเตอร์ที่สนใจเกี่ยวกับระบบ คือสนใจทดสอบเกี่ยวกับค่าเฉลี่ย กับสนใจทดสอบเกี่ยวกับ ความแปรปรวน

5.4 กำหนดบริเวณวิกฤตหรือบริเวณปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ซึ่งมีพื้นที่ขนาด เท่ากันและตำแหน่งของบริเวณวิกฤตจะถูกกำหนดตามเครื่องหมายใน H_1 ค่าที่เป็นตัวแบ่งบริเวณ ปฏิเสธ H_0 และบริเวณที่ปฏิเสธ H_0 ไม่ได้ คือค่าวิกฤต (Critical Value) ซึ่งได้จากการเปิดตารางของ

ตัวทดสอบนั้น ๆ ในปัจจุบันถ้าใช้โปรแกรมสำเร็จรูปจะใช้ค่า P-Value เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจ แทนค่า P-Value คือระดับนัยสำคัญที่น้อยที่สุด หรือโอกาสที่น้อยที่สุดที่จะสามารถปฏิเสธ สมมติฐานหลักได้ในการทดสอบสมมติฐาน เมื่อสมมติฐานหลักนั้นถูกต้องและ $1-(P\text{-Value})$ คือ ระดับความเชื่อมั่นที่แท้จริงของการทดสอบสมมติฐานนั้น ๆ นั่นเอง ดังนั้นการใช้ P-Value ในการ ทดสอบสมมติฐาน จะทำให้ทราบความเชื่อมั่นที่แท้จริง

5.5 สรุปผลการทดลอง ในปัจจุบันการสรุปผลทำได้ 2 ลักษณะ คือ

- ก) พิจารณาค่าสถิติที่คำนวณได้ว่าอยู่ในบริเวณปฏิเสธ H_0 หรือไม่ จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ ค่าที่คำนวณได้ตกอยู่ในบริเวณปฏิเสธ H_0
- ข) พิจารณาเทียบพื้นที่โดยใช้ค่า P-Value เทียบกับพื้นที่ของบริเวณปฏิเสธ H_0 (α) แทนจะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่า P-Value $< \alpha$ เท่านั้น

รูปแบบของการออกแบบการทดลอง

1. การออกแบบการทดลองเมื่อมีปัจจัยเดียว (Single factor experiment) ในการ ออกแบบการทดลองแบบนี้ จะเป็นการเปรียบเทียบผลของตัวแปรที่สนใจ เมื่อมีเพียงปัจจัยเดียวที่ สนใจ และระดับของปัจจัยมีมากกว่า 2 ระดับ สามารถอธิบายการทดลองนี้โดยใช้สมการทางสถิติ เชิงเส้นตรงได้ดังนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2-15

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} + \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2-1)$$

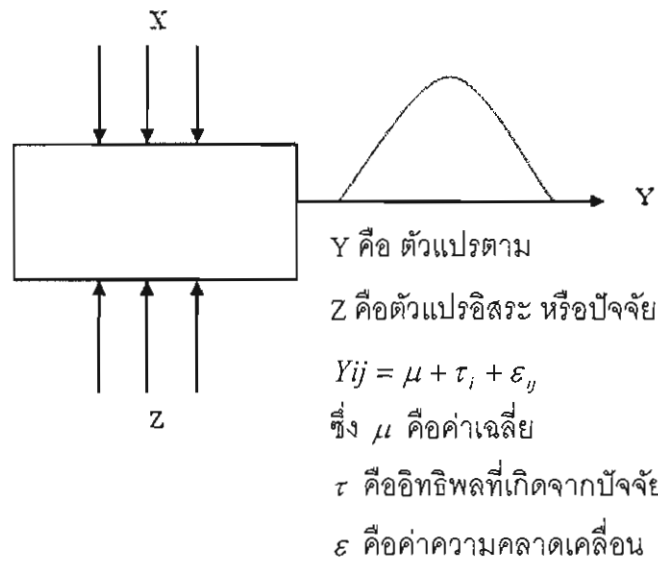
โดยที่ Y_{ij} เป็นค่าสังเกตที่ ij

μ คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับ เป็นค่าเฉลี่ยของประชากร

τ_i คือ ค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่ i หรือผลกระทบจากระดับที่ i

ε_{ij} คือ องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random error)

มีจุดประสงค์เพื่อทำการทดสอบสมมติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกระทบของระดับต่าง ๆ และทำการประมาณค่าสำหรับการทดสอบสมมติฐาน ความผิดพลาดของแบบจำลองถูกสมมติให้ เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน



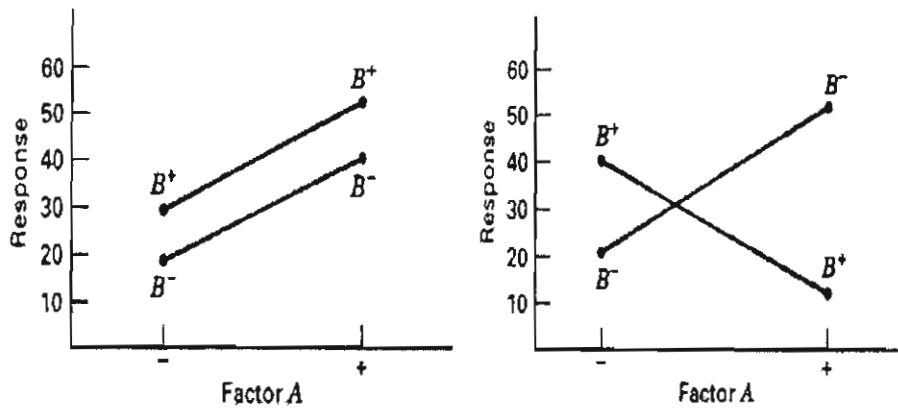
ภาพที่ 2-15 แสดงปัจจัยและตัวแปรของกระบวนการ

2. การออกแบบการทดลองหลายปัจจัยแบบแฟกทอเรียล (Factorial design experiment)

เป็นการทดลองที่มุ่งศึกษาผลของปัจจัยมากกว่าหนึ่งปัจจัยพร้อมกัน การวิเคราะห์จะให้ความสนใจที่อิทธิพลร่วมของปัจจัยซึ่งมีอิทธิพลและส่งผลต่อตัวแปรตาม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอาจกล่าวได้ว่า การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล เป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยหลายปัจจัยพร้อมกัน คำว่าแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่สมบูรณ์ในแต่ละครั้ง กล่าวคือมีการใช้ระดับของปัจจัยต่าง ๆ ร่วมกันจึงสามารถตรวจสอบอิทธิพลต่าง ๆ ในการทดลองแต่ละครั้งได้พร้อมกัน เช่น ถ้าปัจจัย A มี a ระดับปัจจัย B มี b ระดับ โดยมีปัจจัยร่วม ab ซึ่งอิทธิพลต่าง ๆ ในการทดลองแบ่งได้เป็น 2 ระดับคือ

2.1 อิทธิพลหลัก (Main effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตามเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

2.2 อิทธิพลร่วม (Interaction effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนไป ทำให้อิทธิพลของอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนตามไปด้วย ดังแสดงที่เกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม แสดงภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-16 แสดงอิทธิพลของปัจจัย A ไม่มีผลและอิทธิพลของปัจจัย A ที่มีผลต่อตัวแปรตาม

จากภาพที่ 2-16 ภาพด้านซ้ายเมื่อปัจจัย A มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าต่ำเป็นค่าสูง และ ปัจจัย B มีค่าคงที่ทำให้ตัวแปรตาม (Response) มีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าต่ำเป็นค่าสูง เช่นเดียวกัน แสดงถึงปัจจัย A และ B ไม่มีอิทธิพลต่อกัน ส่วนภาพด้านขวาเมื่อปัจจัย A มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าต่ำเป็นค่าสูงและปัจจัย B มีค่าคงที่ทำให้ตัวแปรตามมีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าสูงเป็นค่าต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของปัจจัย A แสดงถึง ปัจจัย A และ B มีอิทธิพลร่วมกัน การทดลองแบบแฟคตอเรียลนั้นเป็นการประกอบกันของ ทริทเมนต์ไม่ใช้ชนิดของแผนการทดลอง การประกอบกันของทริทเมนต์นั้นอาจใช้ในแผนการ ทดลองแบบใด ๆ ก็ได้โดยมีข้อดีข้อเสียดังนี้

ข้อดี

1. เป็นการใช้น้อยทดลองทั้งหมดเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของทริทเมนต์หลาย ๆ ทริทเมนต์พร้อมกันได้ จึงเป็นการประหยัดและเสียเวลาน้อยกว่าการทดสอบครั้งละ 1 ปัจจัย
2. ทำให้สามารถตรวจสอบอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยได้ จึงช่วยในการสรุปผลได้ กว้างขวางกว่าการทดลองครั้งละ 1 ปัจจัย

ข้อเสีย

1. เนื่องจากมีปัจจัยร่วมจึงต้องใช้หน่วยทดลองมากขึ้น ซึ่งอาจมีข้อจำกัดเกี่ยวกับ จำนวนหน่วยทดลอง
2. ถ้าจำนวนปัจจัยมีมาก ขนาดของการทดลองจะใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นการเสียค่าใช้จ่ายสูง และการหาวัตถุทดลองที่มีความสม่ำเสมอจำนวนมากเป็นไปได้ยาก

3. การออกแบบการทดลองแบบสองปัจจัยแบบแฟกทอเรียล (Two factor factorial design of experiment)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ชนิดที่ง่ายที่สุดจะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับและปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของการออกแบบการทดลองนั้นคือในแต่ละเรพลิเคต (Replicate) ของการทดลองจะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด ab การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนเรพลิเคตทั้งหมด n ครั้ง กำหนดให้ Y_{ijk} คือ ผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) และปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) สำหรับเรพลิเคตที่ k ($k = 1, 2, \dots, n$) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย สามารถแสดงได้ในภาพที่ 2-17 เนื่องจากลำดับของการสังเกต ทั้ง abn ครั้งถูกเลือกมาอย่างสุ่ม ดังนั้นการออกแบบเช่นนี้เรียกว่า การออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely randomized design) (เบญจวรรณ รัตนมาลี, 2553)

		Factor B			
		1	2	...	b
Factor A	1	y_{111}, y_{112} ... y_{11n}	y_{121}, y_{122} ... y_{12n}	...	y_{1b1}, y_{1b2} ... y_{1bn}
	2	y_{211}, y_{212} ... y_{21n}	y_{221}, y_{222} ... y_{22n}	...	y_{2b1}, y_{2b2} ... y_{2bn}
	⋮				
	a	y_{a11}, y_{a12} ... y_{a1n}	y_{a21}, y_{a22} ... y_{a2n}	...	y_{ab1}, y_{ab2} ... y_{abn}

ภาพที่ 2-17 แสดงรูปแบบการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

ข้อมูลจากการทดลองสามารถเขียนในรูปของแบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) คือ

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2-2)$$

โดยที่

μ หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด

τ_i หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของแถว (Row) ของปัจจัย A

β_j หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ j

ε_{ijk} หมายถึง องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม สมมติว่าปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว

(Fixed) และจากผลการทดลอง (Treatment effect) หมายถึง ส่วนที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมด ดังนั้น $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ ในทำนองเดียวกันสมมติว่าผลที่เกิดจากอิทธิพลร่วมมีค่าตายตัว และกำหนดว่า $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$ เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้มีจำนวนเรปลิเคต n ครั้ง ดังนั้นจำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ abn ในการทดลองเชิงแฟคตอเรียล 2 ปัจจัย ทั้งปัจจัยที่เกิดจาก A (แถว) และ B (คอลัมน์) มีความสำคัญเท่ากัน ดังนั้นเราต้องการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย A หรือกล่าวได้ว่า

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a$$

$$H_1 : \text{Least at one } \tau_i \neq 0$$

สมมติฐานของผลที่เกิดจากปัจจัย B

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b$$

$$H_1 : \text{Least at one } \beta_j \neq 0$$

นอกจากนั้นแล้ว อิทธิพลร่วมที่เกิดระหว่างปัจจัย A และ B มีนัยสำคัญหรือไม่ หรือกล่าวได้ว่า

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$$

$$H_1 : \text{Least at one } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

กำหนดให้ y_i เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่ i ของ

ปัจจัย A

กำหนดให้ y_j เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่ j ของ

ปัจจัย B

กำหนดให้ y_{ij} เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ข้อมูลตำแหน่งที่ ij

กำหนดให้ $y_{..}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดที่ได้

$\bar{y}_i, \bar{y}_{.j}, \bar{y}_{ij}$ และ \bar{y} เป็นค่าเฉลี่ยของแถว, คอลัมน์, เซลล์ และผลรวมทั้งหมด

ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y_i = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_i = y_i / bn \quad i = 1, 2, \dots, a$$

$$y_j = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{.j} = y_{.j} / an \quad j = 1, 2, \dots, b$$

$$\begin{aligned}
 y_{ij} &= \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{ij} &= y_{ij} / n & i &= 1, 2, \dots, a \\
 & & & & j &= 1, 2, \dots, b \\
 y_{...} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{..} &= y_{..} / abn & i &= 1, 2, \dots, a \\
 & & & & j &= 1, 2, \dots, b \\
 & & & & k &= 1, 2, \dots, n
 \end{aligned}$$

ค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองเป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - y_{...})^2 &= \left[\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) + (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..}) + \right. \\
 &\quad \left. (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{..}) + (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij}) \right]^2 \\
 &= bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{...})^2 + an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{...})^2 \\
 &\quad + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{...})^2 \\
 &\quad + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij})^2 \quad (2-3)
 \end{aligned}$$

สังเกตได้ว่า ค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองจะถูกแบ่งออกเป็นดังนี้

1. ผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากแถว (ปัจจัย A: SS_A)
2. ผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากคอลัมน์ (ปัจจัย B: SS_B)
3. ผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และ B (SS_{AB})
4. ผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาด (SS_E)

จากพจน์สุดท้ายของสมการ 2-3 จะเห็นได้ว่าต้องมีอย่างน้อย 2 เรพลิเคต เพื่อที่จะทำให้เราสามารถคำนวณค่าของผลรวมกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ดังนั้นปรับสมการ 2-3 เป็น

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \quad (2-4)$$

จำนวนของระดับชั้นความเสรีสำหรับผลรวมของกำลังสองแต่ละค่าคือ

ปัจจัย	ระดับชั้นความอิสระ (Degree of Freedom)
A	a-1
B	b-1
AB interaction	(a-1)(b-1)
Error	ab(n-1)
Total	abn-1

ตารางที่ 2-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย 2 ปัจจัย (Anova table)

แหล่ง	ผลรวมกำลังสอง	ชั้นของ ความอิสระ (df)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MS)	ตัวทดสอบ (F_0)
A	$\sum_{i=1}^a y_i^2 / n - y^2 / abn$	a-1	$MS_A = SS_A / a - 1$	MS_A / MS_E
B	$\sum_{j=1}^b y_j^2 / an - y^2 / abn$	b-1	$MS_B = SS_B / b - 1$	MS_B / MS_E
AB Interaction	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 / n - y^2 / abn - SS_A - SS_B$	(a-1) (b-1)	$MS_{AB} = SS_{AB} / (a-1)(b-1)$	MS_{AB} / MS_E
Error	$SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$	ab(n-1)	$MS_E = SS_E / ab(n-1)$	
Total	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - y^2 / abn$	abn-1		

ความหมายของสัญลักษณ์ในตารางที่ 2-1 ได้แก่

y คือ ค่าของตัวแปรตาม

a คือ จำนวนระดับของปัจจัย A

b คือ จำนวนระดับของปัจจัย B

n คือ จำนวนการทดลองซ้ำ

A คือ ปัจจัย A

B คือ ปัจจัย B

AB คือ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และ B

MS_A, MS_B, MS_{AB} คือ กำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย A, B และ AB ตามลำดับ

MS_E คือ กำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน

SS_A, SS_B, SS_{AB} คือ ผลรวมกำลังสองของ A, B และ AB ตามลำดับ

SS_E คือ ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

โดยทั่วไปการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะใช้การทดสอบค่า F-test เป็นเครื่องมือสำคัญ ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถที่จะรู้ผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยร่วมระหว่างตัวแปร และความคลาดเคลื่อน ในการทดลองด้วย (เบญจวรรณ รัตนมาลี, 2553)

4. การออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล 2^k

การออกแบบ 2^k มีรูปแบบที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบไปด้วยจำนวนผลการทดลอง $2^k - 1$ ชนิด ยกตัวอย่าง การทดลองแบบ 2^k ประกอบไปด้วยการทดลองที่มีลำดับมาตรฐานคือ (1), a, b, ab, c, ac, bc, abc, d, ad, bd, abd, cd, acd, bcd และ abcd ดังนั้นจำนวนผลการทดลอง $2^4 - 1$ เท่ากับ 15 ชนิดวิธีการในการวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ 2 แสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบ 2^k

ขั้นตอนการวิเคราะห์
1. การประมาณค่าที่เกิดจากแต่ละปัจจัย
2. แบบจำลองเริ่มต้น
2.1 ในกรณีที่มีการทดลองซ้ำ ให้ใส่ค่าอิทธิพลหลักและค่าอิทธิพลรวมทุกปัจจัยในสมการ
2.2 ในกรณีไม่มีการทดลองซ้ำ ให้พลอตกราฟความน่าจะเป็นของทุกปัจจัย
3. การทดสอบทางสถิติ
4. ทบทวนแบบจำลอง
5. การวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน (Residuals)
6. อภิปรายผลแบบจำลอง

จากตารางที่ 2-2 ขั้นตอนแรกให้ประมาณผลที่เกิดจากแต่ละปัจจัย และตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลที่จะเกิดขึ้นทำให้ผู้ทดลองทราบ โดยเบื้องต้นว่าปัจจัยใดที่มีความสำคัญ ขั้นตอนที่สองการกำหนดรูปแบบจำลองที่มีปัจจัยหลักและปัจจัยรวม ขั้นตอนที่สามดำเนินการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อให้ทราบว่าปัจจัยใดเป็นปัจจัยหลักและปัจจัยรวมใดที่มีความสำคัญ ละทิ้งไม่ได้ ขั้นตอนที่ยี่ ทบทวนแบบจำลองให้ตัดปัจจัยที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเริ่มต้น ขั้นตอนที่ยี่ห้า การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อทดสอบ

$$\text{สมการคอนทราสต์ } \text{Contrast}_{AB...K} = (a \pm 1)(b \pm 1) \dots \dots (k \pm 1) \quad (2-5)$$

สมการหาค่าประมาณของผลจากปัจจัยต่าง ๆ

$$AB...K = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB...K}) \quad (2-6)$$

สมการผลรวมกำลังสองของผลจากปัจจัย

$$SS_{AB...K} = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB...K})^2 \quad (2-7)$$

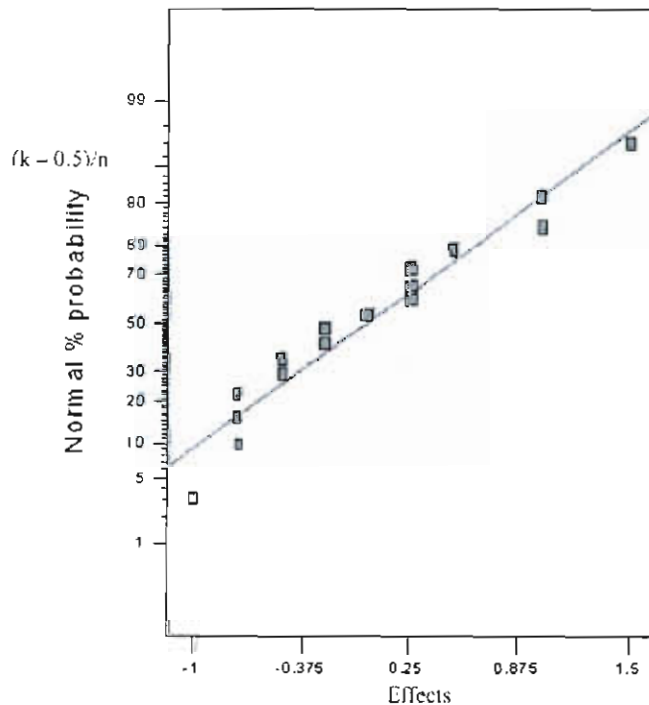
โดยที่ n แทนจำนวนซ้ำ (Replicate)

การคำนวณค่าคอนทราสต์ แทนค่าเครื่องหมายในสมการที่ 2-5 โดยให้ปัจจัยที่เหมือนกันเป็นลบ ปัจจัยต่างกันเป็นบวก แล้วคูณสมการในวงเล็บตามหลักพีชคณิต หรือ ใช้วิธีการนำเครื่องหมาย \pm ในสมการ โดยสมการคอนทราสต์ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมของการทดลองแบบ 2^k มีดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Contrast}_A &= (a-1)(b+1)(c+1)(d+1) \\ &= a+ab+ac+abc+ad+abd+acd+abcd-(1)-b-c-bc-d-bd-cd-bcd \\ \text{Contrast}_B &= (a+1)(b-1)(c+1)(d+1) \\ &= b+ab+bc+abc+bd+abd+bcd+abcd-(1)-a-c-ac-d-ad-cd-acd \\ \text{Contrast}_{AB} &= (a-1)(b-1)(c+1)(d+1) \\ &= (1)+ab+c+c+abc+d+abd+cd+abcd-a-b-ac-bc-ad-bd-acd-bcd \\ \text{Contrast}_{AC} &= (a-1)(b+1)(c-1)(d+1) \\ &= (1)+b+ac+abc+d+bd+acd+abcd-a-ab-c-bc-ad-abd-cd-bcd \\ \text{Contrast}_{BC} &= (a+1)(b-1)(c-1)(d+1) \\ &= (1)+a+bc+abc+d+bd+bcd+abcd-b-ab-c-ac-bd-abd-cd-acd \\ \text{Contrast}_{ABC} &= (a-1)(b-1)(c-1)(d+1) \\ &= a+b+c+abc+ad+bd+abd+cd+ab-(1)-ab-ac-bc-d-abd-acd-bcd \\ \text{Contrast}_D &= (a+1)(b+1)(c+1)(d-1) \\ &= d+ad+bd+abd+cd+acd+bcd+abcd-(1)-a-b-ab-c-ac-bc-abc \\ \text{Contrast}_{AD} &= (a-1)(b+1)(c+1)(d-1) \\ &= (1)+b+c+bc+ad+abd+acd+abcd-(1)-a-ab-ac-abc-d-bd-cd-bcd \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Contrast}_{BD} &= (a+1)(b-1)(c+1)(d-1) \\
 &= (1)+a+c+ac+bd+abd+bcd+abcd-b-ab-bc-abc-d-ad-cd-acd \\
 \text{Contrast}_{ABD} &= (a-1)(b-1)(c+1)(d-1) \\
 &= a+b+ac+bc+d+abd+cd+abcd-(1)-ab-c-abc-ad-bd-acd-bcd \\
 \text{Contrast}_{CD} &= (a+1)(b+1)(c-1)(d-1) \\
 &= (1)+a+b+ab+cd+acd+bcd+abcd-c-ac-bc-abc-d-ad-bd-abd \\
 \text{Contrast}_{ACD} &= (a-1)(b+1)(c-1)(d-1) \\
 &= a+ab+c+bc+d+bd+acd+abcd-(1)-b-ac-abc-ad-abd-cd-bcd \\
 \text{Contrast}_{BCD} &= (a+1)(b-1)(c-1)(d-1) \\
 &= b+ab+c+ac+d+ad+bcd+abcd-(1)-a-bc-abc-bd-abd-cd-acd \\
 \text{Contrast}_{ABCD} &= (a-1)(b-1)(c-1)(d-1) \\
 &= (1)+ab+ac+bc+ad+bd+cd+abcd-a-b-c-abc-d-abd-acd-bcd
 \end{aligned}$$

ค่าประมาณการของปัจจัยสามารถแทนค่าคอนทราสต์ในสมการที่ 2-6 ผลรวมกำลังสองของแต่ละปัจจัยสามารถแทนค่าคอนทราสต์ในสมการที่ 2-7 จากนั้นคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญโดยการพลอตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติดังตัวอย่างในภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 แสดงกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal probability plot of residual) ของปัจจัย

จากภาพที่ 2-18 เรียงผลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมจากค่าน้อยไปหาค่ามากแล้วพลอตบนแกน x คู่กับค่า $(k-0.5)/n$ อยู่บนแกน y กำหนดลำดับจากค่าน้อยไปหาค่ามาก (k) จำนวนข้อมูล (n) ถ้ามีจุดบนกราฟที่อยู่นอกแนวเส้นตรง แสดงว่าค่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นปัจจัยที่มีอิทธิพลทั้งหมดให้นำไปทดสอบเปรียบเทียบความสำคัญต่อไป

การออกแบบพารามิเตอร์แบบมั่นคง (Robust parameter design: RPD)

การออกแบบพารามิเตอร์แบบมั่นคงคือ การออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่ควบคุมได้ที่เหมาะสมซึ่งทำให้มั่นใจว่าค่าเฉลี่ยของผลตอบสนอง (Response) เป็นไปตามค่าเป้าหมาย (Target) และความผันแปรรอบค่าเป้าหมายนี้มีค่าต่ำที่สุด RPD ถูกพัฒนาขึ้นโดย Dr. Genichi Taguchi วิศวกรชาวญี่ปุ่น ในปี ค.ศ. 1980 Taguchi เสนอแนวทางในการแก้ปัญหา RPD โดยใช้การออกแบบการทดลอง ปรัชญาของ Robust design และเทคนิคการออกแบบการทดลองของ Taguchi ได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์รายใหญ่ของโลกในช่วงเวลานั้น เทคนิคการออกแบบการทดลองของ Taguchi ถูกนำมาวิเคราะห์กันอย่างกว้างขวางในเชิงวิชาการด้านวิศวกรรมและสถิติ

รูปแบบของการออกแบบการทดลองแบบทาคุชิ ประกอบด้วย

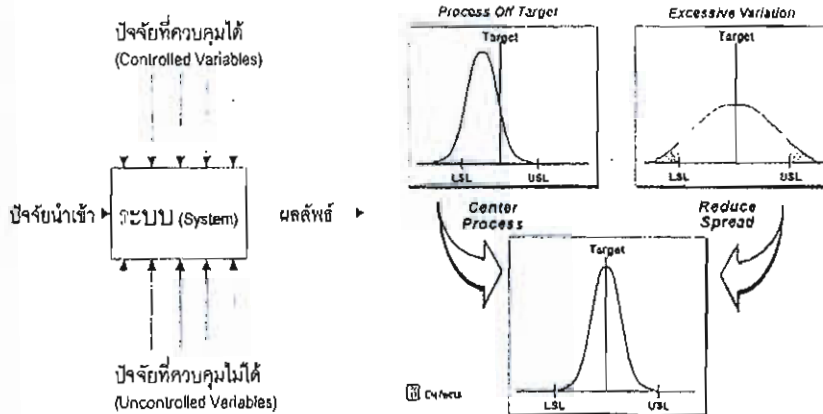
1. การออกแบบการทดลองของระบบ (System design) เพื่อหาค่าผลตอบที่ต้องการ
2. การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัย (Parameter design) ที่ทำให้ค่าผลตอบที่ได้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด ลดความผันแปรของกระบวนการ ซึ่งเป็นการออกแบบในงานวิจัยนี้
3. การออกแบบการทดลองเพื่อหาช่วงของค่าปัจจัยหลัก (Tolerance design) ที่ทำให้ผลตอบมีค่าที่กระบวนการมีความผันแปรที่ยอมรับได้

ซึ่งสรุปว่าเทคนิคนี้ไม่มีประสิทธิภาพและบางครั้งที่ไม่มีประสิทธิภาพ (Montgomery, 2009) ทำให้เกิดการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการออกแบบการทดลองใหม่เพื่อลดข้อด้อยของเทคนิคการออกแบบการทดลองของ Taguchi วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) สำหรับปัญหา RPD จึงถูกพัฒนาขึ้น ทำให้เราสามารถแก้ปัญหา RPD ได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลมากยิ่งขึ้น

RPD ถูกนำไปใช้ในสถานการณ์ต่าง ๆ ต่อไปนี้

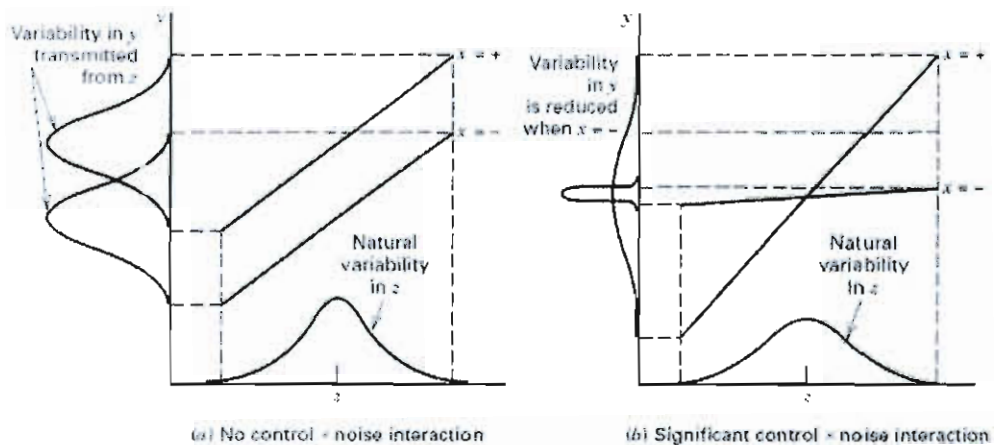
1. การออกแบบระบบที่ทำให้ปัจจัยรบกวน (Noise factors) หรือปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factors) ส่งผลกระทบต่อความผันแปรของระบบน้อยที่สุด
2. การออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ทำให้ความผันแปรของส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบที่ใช้ร่วมกับผลิตภัณฑ์ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด

3. การออกแบบกระบวนการผลิตและสภาวะในการผลิตที่เหมาะสมที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตมีความผันแปรรอบค่าเป้าหมายของข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์นั้นน้อยที่สุด ถึงแม้ว่าปัจจัยในการผลิตบางปัจจัยเป็นปัจจัยที่ยากต่อการควบคุมเช่น อุณหภูมิ หรือคุณภาพของวัตถุดิบ เป็นต้น



ภาพที่ 2-19 แสดงเป้าหมายของ RPD

อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ควบคุมได้กับปัจจัยรบกวนเป็นสิ่งสำคัญในการแก้ปัญหา RPD ตัวอย่างเช่น อิทธิพลร่วมสองปัจจัยตามภาพที่ 2-20 เป็นปัจจัยที่ควบคุมได้และ z เป็นปัจจัยรบกวน ภาพที่ 2-15 (a) แสดงการไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่าง x และ z ซึ่งหมายความว่า การเปลี่ยนระดับของ x ไม่ทำให้ความผันแปรของตัวแปรตอบสนอง y มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ส่วนภาพที่ 2-20 (b) แสดงการมีอิทธิพลร่วมระหว่าง x และ z ซึ่งหมายความว่า การเปลี่ยนระดับของ x ส่งผลต่อความผันแปรของตัวแปรตอบสนอง y ดังนั้นผลการศึกษา RPD จึงสามารถเลือกระดับของ x ที่ทำให้ y มีความผันแปรน้อยที่สุด จากตัวอย่างนี้ทำให้สรุปได้ว่าปัญหา RPD จะสามารถแก้ได้ก็ต่อเมื่อมีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ควบคุมได้กับปัจจัยรบกวนเท่านั้น



ภาพที่ 2-20 บทบาทของอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยรบกวนใน Robust design

1. การใช้แนวทางของ RSM หาระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับปัญหา RPD

การใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างพื้นผิวตอบสนองของค่าคาดหมายและความผันแปรของตัวแปรตอบสนองที่รวมผลจากปัจจัยควบคุมได้ ปัจจัยรบกวน อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยต่าง ๆ เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการแก้ปัญหา RPD ตัวอย่างเช่น ปัญหา RPD ที่มีปัจจัยควบคุมได้ 2 ปัจจัย คือ x_1 และ x_2 และปัจจัยรบกวน 1 ปัจจัย คือ z กำหนดให้ทุกระดับปัจจัยเป็นตัวแปรแบบ Coded (ระดับสูง กลาง และต่ำคือ +1, 0 และ -1 ตามลำดับ)

รูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัจจัยควบคุมได้แบบ First order model คือ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \gamma_1 z_1 + \delta_{11} x_1 z_1 + \delta_{21} x_2 z_1 + \varepsilon \quad (2-8)$$

หากอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยควบคุมได้และปัจจัยรบกวนเกิดขึ้น ทำให้ปัญหานี้เป็นปัญหาแบบ RPD นั่นคือ δ_{11} หรือ δ_{21} ต้องมีค่าไม่เท่ากับศูนย์

รูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับค่าคาดหมายของตัวแปรตอบสนอง y คือ

$$E_z(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2-9)$$

รูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนอง y คือ

$$V_z(y) = \sigma_z^2 (\gamma_1 + \delta_{11} x_1 + \delta_{21} x_2)^2 + \sigma^2 \quad (2-10)$$

โดยที่

σ_z^2 = ค่าความแปรปรวนของปัจจัยรบกวน

σ^2 = ค่าความแปรปรวนของผลตอบสนอง y

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการ

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ ตัว และต้องการที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลการตอบสนองเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น สมมติว่ามีวิศวกรเคมีคนหนึ่ง มีความต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ (x_1) และความดัน (x_2) ที่จะส่งผลให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน กล่าวคือ

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2-11)$$

โดยที่

ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดให้ $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ดังนี้

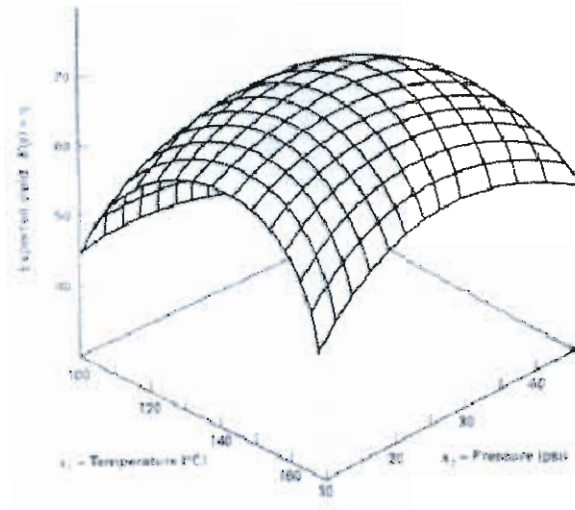
$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2-12)$$

ซึ่งเรียกว่า พื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface) โดยมากแล้ว จะทำการแสดงพื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ (ภาพที่ 2-20) โดยที่ η จะถูก Plot กับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้เรามองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ส่วนใหญ่แล้วจะทำการพล็อต (Plot) เป็นเส้นโครงร่าง (Contour plot) ของพื้นผิวผลตอบสนอง (ภาพที่ 2-21) ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ และ ซึ่งเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบสนองที่เท่ากันอยู่ค่าหนึ่ง ในปัญหาต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนอง ส่วนมากจะไม่ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง และตัวแปรอิสระ ดังนั้น ขั้นตอนแรกก็คือ จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง Y และ ของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่กำลังต่ำ ๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ คือ แบบจำลองกำลังหนึ่ง

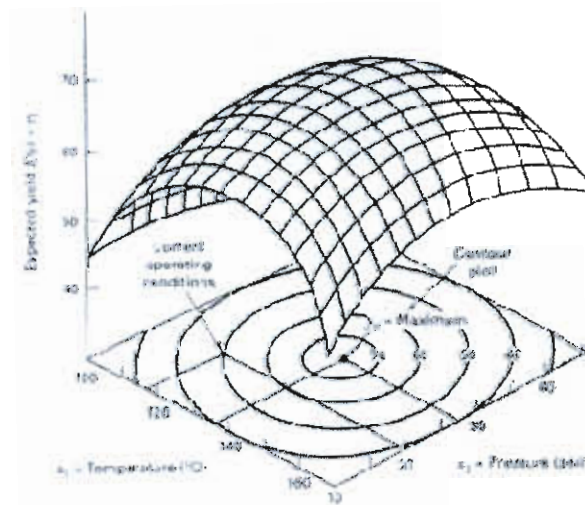
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2-13)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องกับระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_i \quad (2-14)$$



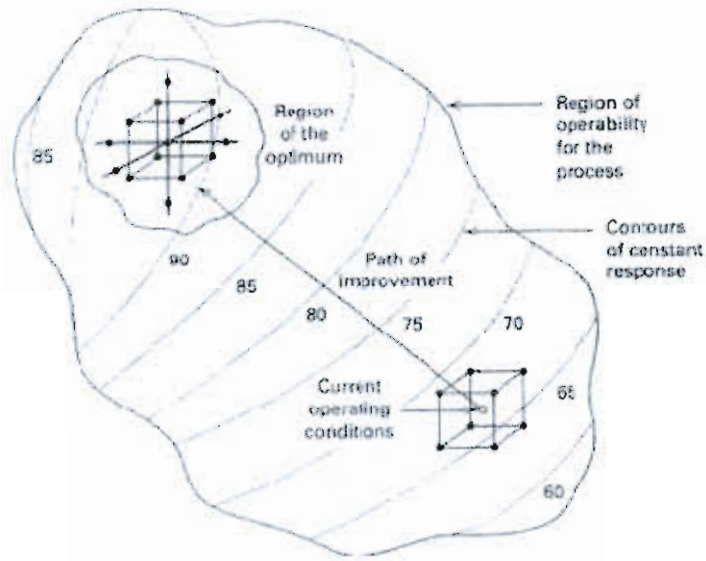
ภาพที่ 2-21 แสดงภาพพื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ



ภาพที่ 2-22 แสดงกราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนอง ส่วนใหญ่จะใช้แบบจำลอง 1 ใน 2 แบบที่กล่าวมาข้างต้นแน่นอนว่าแบบจำลองพหุนามดังกล่าวเหล่านี้ จะไม่สามารถใช้ประมาณค่าความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่ทว่าถ้าพื้นผิวที่สนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้วแบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) ดังกล่าวไว้ในทฤษฎีของการสร้างแบบจำลองการถดถอย (Fitting Regression Models) แล้ว จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบสนองได้เป็นอย่างดีเพียงพอ ดังนั้น การวิเคราะห์พื้นผิวที่สร้างขึ้นมานี้ จะสามารถประมาณค่าได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองสามารถที่จะถูกประมาณค่าได้เป็นอย่างดี ถ้าเราทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design) การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่เราอยู่ที่จุดบนพื้นผิวผลตอบสนองที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น ณ เวลานี้การทำงานปัจจุบัน (ภาพที่ 2-18) ซึ่งจะพบว่าผลตอบสนองของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้ง และแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ว วัตถุประสงค์ คือ การนำการทดลองไปใช้เป็นแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุด และอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อที่จะเป็นการค้นพบกับจุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุดและเมื่อค้นพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว จะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น แบบจำลองกำลังสอง เป็นต้น เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะให้สามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้จากภาพที่ 2-23 จะพบว่า การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองเปรียบเสมือนการปีนภูเขา ซึ่งยอดของมันจะเป็นจุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด หรือกรณีถ้าค่าที่ดีที่สุดคือค่าต่ำที่สุดในที่นี้ จะคิดเสมือนการเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขา วัตถุประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง คือ การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจที่สุด



ภาพที่ 2-23 แสดงวิธีการอย่างมีลำดับขั้นคอนของการวิเคราะห์พื้นผิวดตอบสนอง

1. การวิเคราะห์พื้นผิวดตอบสนองกำลังสอง

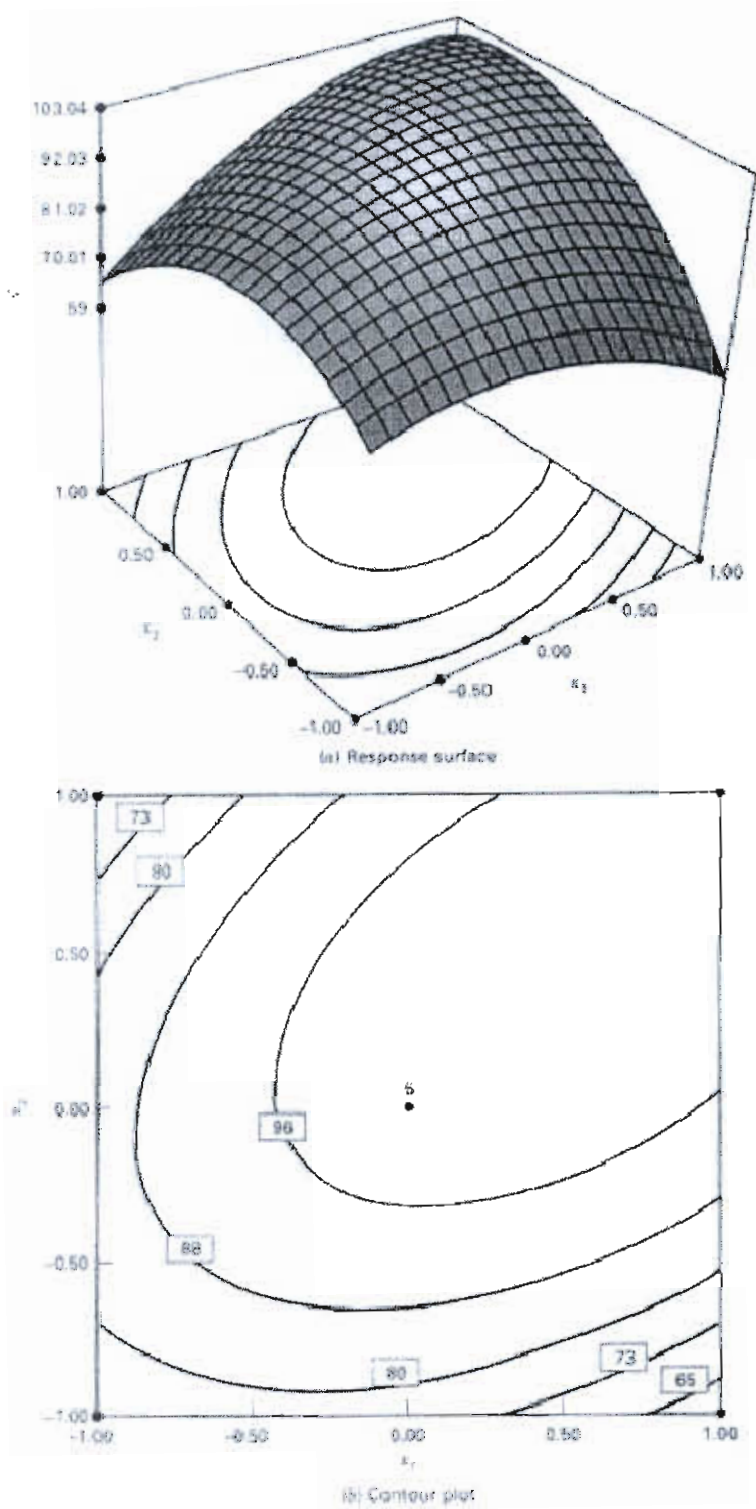
เมื่อผู้ทำการทดลองอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุดแล้ว แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งจะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าของผลตอบสนอง ส่วนใหญ่แบบจำลองกำลังสองจะมีรูปแบบดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_j x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon_i \tag{2-15}$$

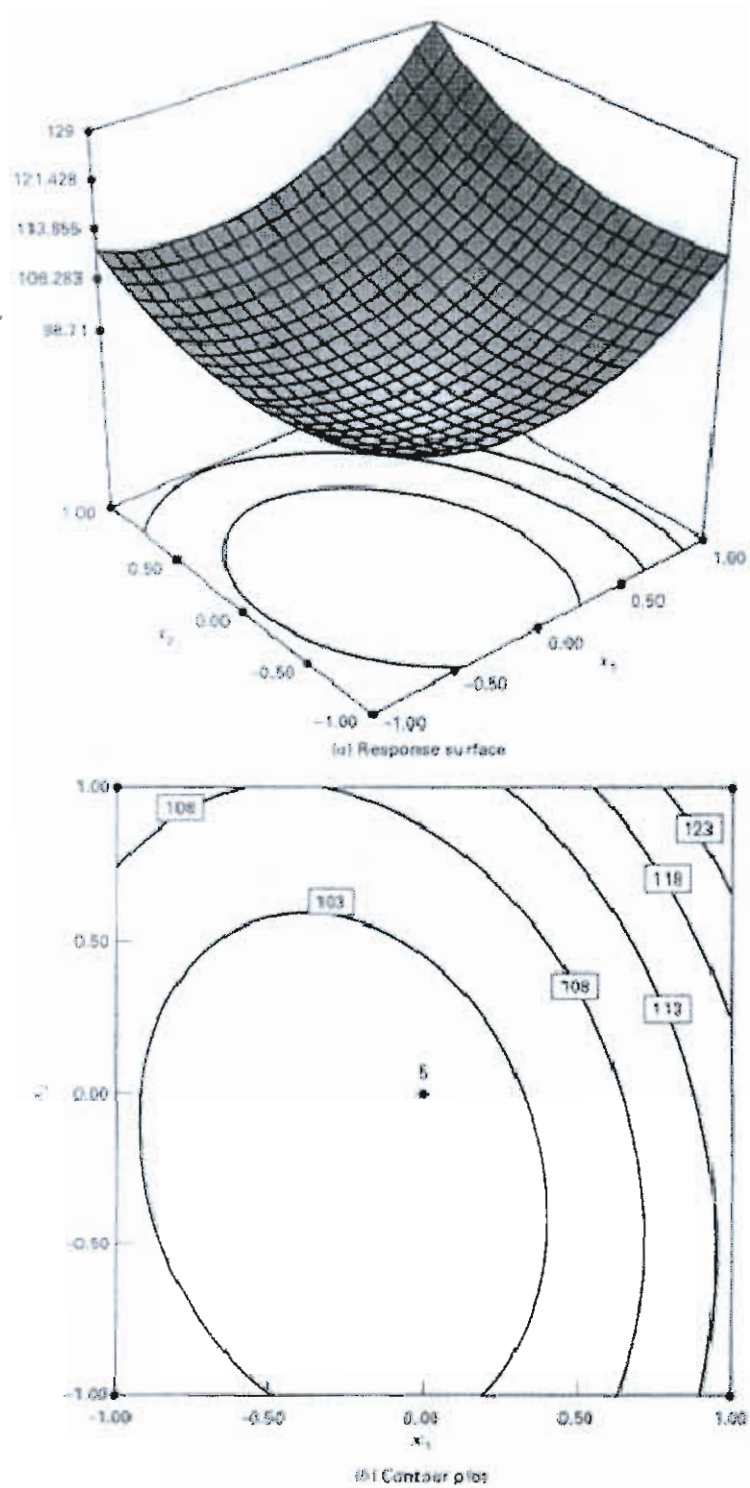
ซึ่งแบบจำลองนี้จะมีค่าความพอเพียง ในส่วนต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นถึงการสร้างแบบจำลองกำลังสอง เพื่อที่จะนำไปสู่การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดต่อไป

2. ตำแหน่งของจุดหยุดนิ่ง

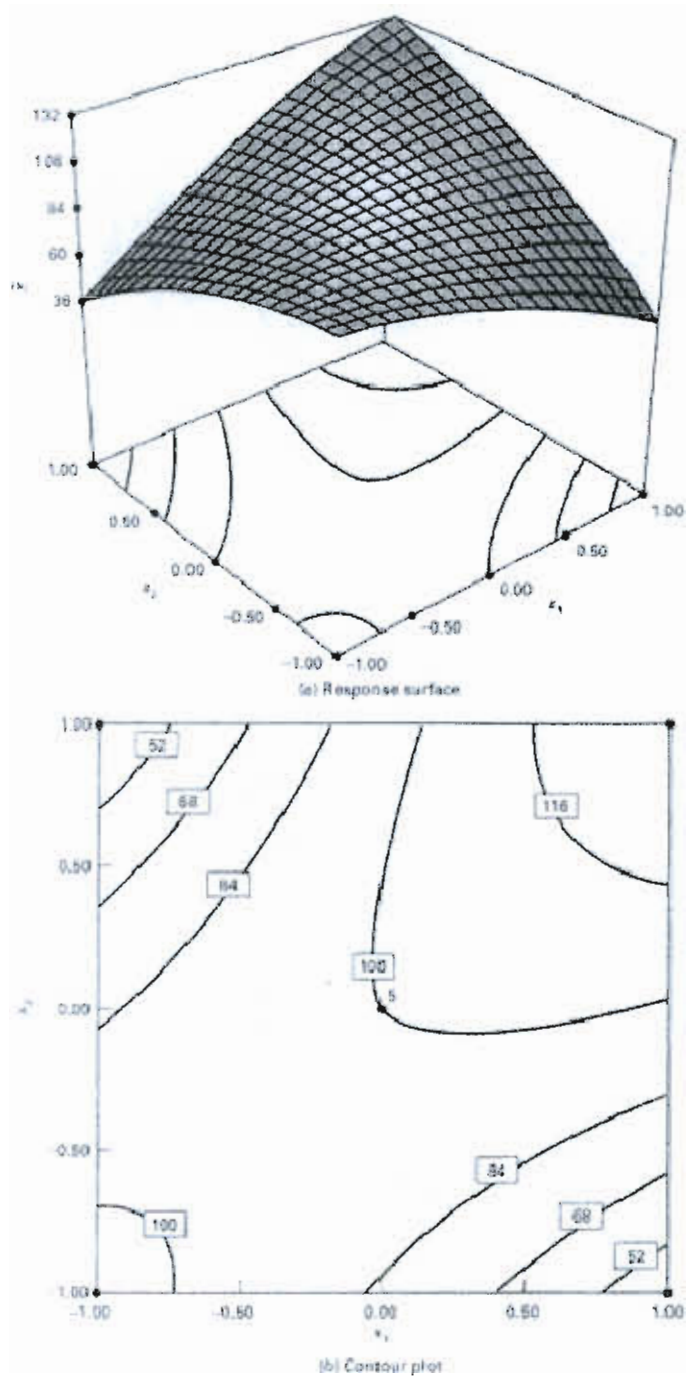
สมมติว่าต้องการที่จะหาระดับของ x_1, x_2, \dots, x_k ที่จะทำให้ผลตอบสนองมีค่าที่ดีที่สุด จุดนี้ถ้าหากมีอยู่จริงจะหมายถึง เงื่อนไขของจุด x_1, x_2, \dots, x_k ที่มีค่าของอนุพันธ์แบบบางส่วน (Partial Derivative) $\partial \hat{y} / \partial x_1 = \partial \hat{y} / \partial x_2 = \dots = \partial \hat{y} / \partial x_k = 0$ และจะเรียกตำแหน่งของจุด $x_{1,s}, x_{2,s}, \dots, x_{k,s}$ เหล่านี้ว่า จุดหยุดนิ่ง (Stationary point) จุดหยุดนิ่งนี้สามารถใช้ในการแทน (1) จุดที่มีค่าผลตอบสนองสูงสุด, (2) จุดที่มีค่าผลตอบสนองต่ำสุด หรือ (3) จุดอานม้า (Saddle point) ซึ่งทั้ง 3 ทางที่มีความเป็นไปได้แสดงในภาพที่ 2-24 ถึงภาพที่ 2-25



ภาพที่ 2-24 แสดงจุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง (จุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด)



ภาพที่ 2-25 แสดงจุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง (จุดที่มีค่าผลตอบสนองต่ำสุด)



ภาพที่ 2-26 แสดงจุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบแทนกำลังสองที่เรียกว่าจุดอานม้า (Saddle point)

กราฟโครงร่าง (Contour plot) มีความสำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง การใช้ Software สำหรับสร้างกราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองขึ้นมา จะทำให้ทราบถึงรูปร่าง

ของพื้นผิว และตำแหน่งของจุดที่ดีที่สุดได้ค่อนข้างแม่นยำบางครั้งอาจจะสามารถหาคำตอบทั่วไปทางคณิตศาสตร์ สำหรับตำแหน่งของจุดหยุดนิ่ง (Stationary Point) ได้ โดยการเขียนแบบจำลองกำลังสองในรูปแบบเมทริก (Matrix) ได้ คือ

$$\hat{y} = \beta_0 + x'b + x' Bx \quad (2-15)$$

โดยที่

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad B = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 & \dots & \hat{\beta}_{1k}/2 \\ & \hat{\beta}_{22} & \dots & \hat{\beta}_{2k}/2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \text{sym.} & & & \hat{\beta}_{kk} \end{bmatrix}$$

ซึ่ง b คือเวกเตอร์ขนาด $(k \times 1)$ ของสัมประสิทธิ์การถดถอยกำลังหนึ่ง และ B คือ Matrix แบบสมมาตรขนาด $(k \times k)$ ซึ่งมีส่วนประกอบในแนวเส้นทแยงมุมหลักเป็นสัมประสิทธิ์ของกำลังสองบริสุทธิ์ ($\hat{\beta}_{ii}$) และส่วนประกอบที่ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นทแยงมุมเป็นครึ่งหนึ่งของสัมประสิทธิ์กำลังสองผสม ($\hat{\beta}_{ij}, i \neq j$) ค่าอนุพันธ์ของ \hat{y} เทียบกับส่วนประกอบของเวกเตอร์ x มีค่าเท่ากับ ศูนย์ คือ

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x} = b + 2Bx = 0 \quad (2-16)$$

จุดหยุดนิ่ง คือ

$$x_s = -\frac{1}{2} B^{-1} b \quad (2-17)$$

และเมื่อแทนค่าสมการที่ 2-3 ในสมการที่ 2-1 จะพบคำตอบตอบสนองที่คาดหมาย ณ จุดหยุดนิ่ง

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \frac{1}{2} x'_s b \quad (2-18)$$

การทดสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square)

เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบที่ได้มีความเหมาะสมเพียงใด ซึ่งในการทดลองทุกครั้งจะต้องมีความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ (Unexplained Variable) หรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ การออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องทำให้เกิดความผันแปรที่อธิบายได้น้อยที่สุด

$$\text{สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square)} = SS_{\text{Model}} / SS_{\text{Total}} \quad (2-19)$$

$$SS_{\text{Model}} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC} \quad (2-20)$$

ในกรณีที่มีการเพิ่มปัจจัยเข้าในสมการถดถอย แม้ว่าปัจจัยนั้นจะไม่มีผลต่อตัวแปรตาม จึงต้องปรับสมการดังนี้

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_E / df_E}{SS_{Total} / df_{Total}} \quad (2-21)$$

df_E = จำนวนชั้นความอิสระของปัจจัยความคลาดเคลื่อน

df_{total} = จำนวนชั้นความอิสระของผลรวมผลของปัจจัยทั้งหมด

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าต่ำสามารถแก้ไขโดย

1. เพิ่มจำนวนการทดลอง
2. ตรวจสอบหาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องแล้วออกแบบการทดลองใหม่
3. ถ้าทำการเพิ่มปัจจัยอื่นแล้วค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจยังต่ำอยู่ แสดงว่าผลจาก

การรบกวน (Noise factor) มีมากต้องทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดปัจจัยรบกวน (เบญจวรรณ รัตนมาลี, 2553)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

$$\text{จากสมการ } y_j = \mu + \tau_i + \varepsilon_j \quad (2-22)$$

μ คือค่าเฉลี่ย

τ_i คืออิทธิพลที่เกิดจากปัจจัยที่ i

ε_j คือความคลาดเคลื่อน

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่ มักตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์จากการที่ตัวแปรตามมีการแจกแจงปกติ (Normal distribution) ดังนั้น y จะมีการกระจายแบบนี้ต้องให้ ε มีการ

กระจายแบบปกติด้วย ต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ และต้องมีความเสถียร สำหรับความแปรปรวน (Variance Stability) การทดสอบ ε_{ij} มี 3 ขั้นตอนคือ

1. การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่โดยใช้

- การทดสอบแบบไคร้สแควร์ (χ^2 -Goodness of fit test)
- การทดสอบแบบโคโมโกรอฟ-สเมอ์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov test)
- การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ (NOPP)

ข้อมูลมีกระจายตัวปกติ หมายความว่าข้อมูลแต่ละตัวที่เป็นตัวแปรสุ่มจะต้องมีแนวโน้มที่ค่าจะเข้าหาค่าหนึ่งที่ตั้งที่ แล้วมีการกระจายรอบค่าดังกล่าวในลักษณะสมมาตร ทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลไม่ได้มีรูปแบบปกติแล้วก็จะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ ดังนั้นถ้าหากข้อมูลไม่ได้เป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติแล้วแสดงว่าข้อมูลที่ได้มาจากกระบวนการที่ไม่ได้กำหนดมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อแก้ไขก่อนการวิเคราะห์

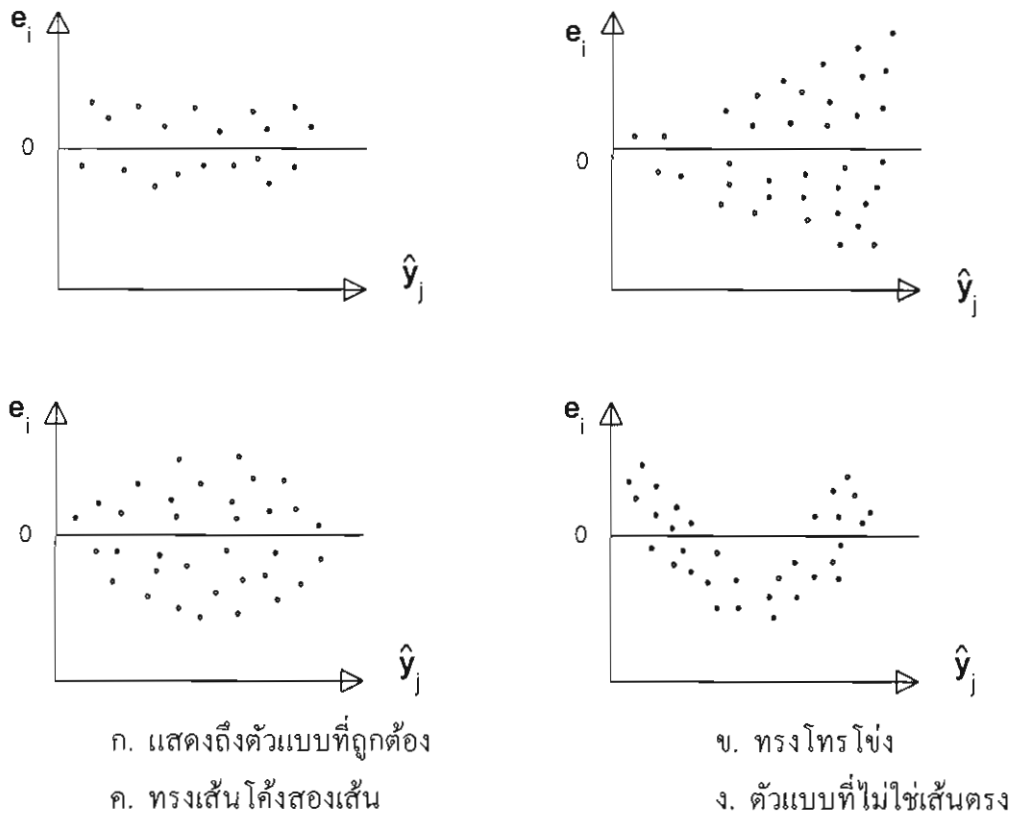
2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent)

โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter plot) แล้วดูลักษณะการกระจายของจุดที่แทนที่ข้อมูลบนแผนภูมิว่าเป็นอิสระหรือไม่ ข้อมูลมีความอิสระหมายความว่า ข้อมูลแต่ละตัวที่ใช้ในการสร้างแบบถดถอยจะต้องเป็นอิสระต่อกันอันเนื่องมาจากการสุ่ม ทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลไม่มีการสุ่มแล้ว จะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ โดยเฉพาะการหาค่าเฉลี่ย หรือค่าความคาดหมายของตัวแปรตาม ดังนั้นถ้าหากข้อมูลไม่มีการสุ่ม แสดงว่าข้อมูลมีความลำเอียง (Bias) จึงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์

3. การตรวจสอบความเสถียรความแปรปรวน (Variance stability)

โดยใช้แผนภูมิการกระจาย ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual plot) ในแต่ละระดับของปัจจัยถ้ารูปร่างการกระจายของข้อมูลที่ออกมา ไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

ความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) หมายความว่า ข้อมูลจะต้องได้รับการเก็บมาจากกระบวนการที่ได้จัดทำเป็นมาตรฐานแล้ว จึงทำให้ความแตกต่างของข้อมูลมีค่าความแปรปรวนที่ไม่มีเสถียรภาพแล้ว แสดงว่าข้อมูลเกิดขึ้นจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้ แต่ไม่ได้รับการควบคุม (Assignable Cause) จึงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อแก้ไขก่อนการวิเคราะห์ต่อไปดังแสดงในภาพที่ 2-27



ภาพที่ 2-27 แสดงรูปแบบกราฟ Residual plot

ในการทดสอบความเป็นอิสระข้อมูล และการทดสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนนั้น ปกติมักจะทดสอบผ่านแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าใดค่าหนึ่งใน 3 ค่านี้

1. ลำดับต่อเนื่องในการเก็บข้อมูล
2. ค่าประมาณการของค่าควรจะเป็นของตัวแปรตาม (y)
3. ค่าตัวแปรทดลอง (x)

โดยรูปแบบการกระจายจะมีตัวแบบดังภาพที่ 2-27 ซึ่งจะได้ผลว่า ถ้าหากเป็นไปตามภาพ ก. แสดงว่าข้อมูลมีความอิสระ และมีความผันแปรคงที่ ในภาพของความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน แต่ถ้าหากเป็นไปตามภาพแบบ ข. ค. ง. แล้ว แสดงว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้น มีความจำเป็นที่ต้องได้รับการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์ต่อไป โดยภาพ ข. และ ค. จะแสดงถึงภาวะที่ไม่มีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ในขณะที่ภาพ ง. แสดงว่าตัวแบบไม่มีความเหมาะสม (เบญจวรรณ รัตนมาลี, 2553)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เบญจวรรณ รัตนมาลี (2553) การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพความหนืดกาว กรณีศึกษาอุตสาหกรรมการผลิตกาว มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยและกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าความหนืดกาวของโรงงานกรณีศึกษาแห่งหนึ่ง โดยใช้แผนผังเหตุและผล วิเคราะห์เพื่อระบุปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบ ประเมินลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัย ด้วยการวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากลักษณะข้อบกพร่อง (Failure mode and effect analysis: FMEA) วิเคราะห์ผลกระทบทำการทดลองแบบ Full factorial design กำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมและทดสอบด้วยการผลิตจริง ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนืดของกาวชนิดที่เลือกศึกษาได้แก่ปริมาณสารซิลิกา (A) ปริมาณสาร Acrylic monomer (B) และความเร็วรอบในการผสม (C) มีความสัมพันธ์ดังสมการ ความหนืด (Y) = $78.2296 + 0.7444A - 1.3083B - 0.8000C$ และสามารถกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม A, B, C เท่ากับ 6.20% wt, 94.5% wt และ 19 rpm ตามลำดับ ซึ่งจากการผลิตจริงพบว่าทำให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ดีในรอบแรกเพิ่มจาก 92.67% เป็น 100% ความสามารถของกระบวนการ Cpk เพิ่มจาก 0.30 เป็น 0.85 ส่งผลให้มีของเสียลดลงจาก 219,336 ppm เป็น 6,125 ppm และพบว่ากระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมเชิงสถิติอย่างต่อเนื่อง

วรุฒม์ บุญภักดี (2550) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ SOLVENT RECOVERY โดยวิธีการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and analysis of experiment) เพื่อศึกษาอิทธิพลหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design (2^4) จำนวน 32 การทดลอง (Replicate n = 2) ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพจำนวน 4 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณไอน้ำ อุณหภูมิไอเฮกเซน อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของระบบควบแน่น และอัตราการไหลของไอเฮกเซน ผลการศึกษาพบว่าอิทธิพลหลักคือปัจจัยอัตราการไหลของไอเฮกเซนและปัจจัยปริมาณไอน้ำ อิทธิพลร่วมคือ ปัจจัยอัตราการไหลของไอเฮกเซนร่วมกับปัจจัยปริมาณไอน้ำ และปัจจัยปริมาณไอน้ำร่วมกับอุณหภูมิไอเฮกเซน มีผลต่อประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ โดยมีระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ระบบ Solvent recovery มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 94.2 คือปริมาณไอน้ำ 1,560 กิโลกรัม/ ชั่วโมง อุณหภูมิไอเฮกเซน 52°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 43°C อัตราการไหลของไอเฮกเซน 396 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง การเปรียบเทียบผลการวิจัยพบว่า การเดินเครื่องที่มีระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการวิจัยมีค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพร้อยละ 91.36 สูงกว่าการเดินเครื่องที่มีระดับปัจจัยที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพร้อยละ 82.07

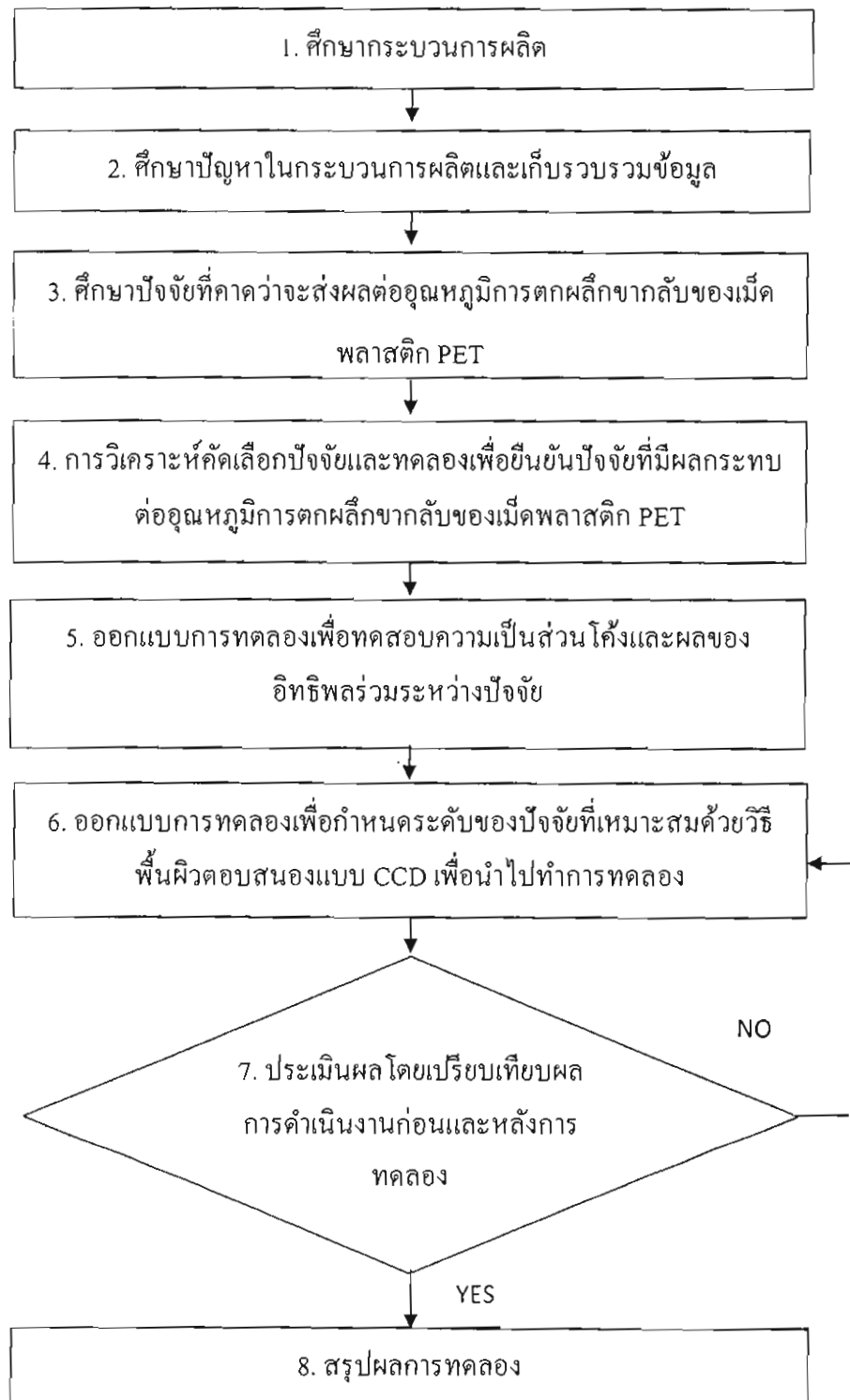
มะลิ แซ่อึ้ง (2544) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาผิวเคลือบและเงื่อนใยที่เหมาะสมในกระบวนการเคลือบดินุกด้วยไฟฟ้า ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นน้ำยาดีบุกกาลีแล็คโตรไลต์ ความสูงของแผ่นกั้น เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า การออกแบบการทดลองแบบทากูชินำมาใช้ในการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยความเข้มข้นน้ำยาดีบุกกาลีแล็คโตรไลต์ เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลพบว่าเงื่อนใยที่เหมาะสมในการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า คือ เวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ 55 นาที และความหนาแน่นของกระแส 30 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร

เขาวภา เลหาทวีโชค (2544) วิจัยเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาผิว Al_2O_3 เพื่อหาความเหมาะสมในกระบวนการทำอะโนไดซ์ วิเคราะห์หาสาเหตุและปัจจัยที่มีผลต่อความไม่สม่ำเสมอของผิว Al_2O_3 ปัจจัยที่นำมาพิจารณา ได้แก่ ความแตกต่างของวัสดุ และลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน รวมถึงการศึกษาความไม่สม่ำเสมอของผิว Al_2O_3 และศึกษาปัจจัยที่จำเป็นต้องควบคุมในกระบวนการทำอะโนไดซ์ จากผลการทดลองพบว่าวัสดุและลักษณะรูปร่างชิ้นงานไม่ส่งผลต่อความหนาผิว Al_2O_3 ของชิ้นงานแต่ละเส้นไม่เท่ากัน สาเหตุส่วนหนึ่งมาจากทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยเปลี่ยนทิศทางการยึดชิ้นงานให้อยู่ในแนวตั้งสำหรับการทดสอบปัจจัย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึก
จากแก้ว (Cold crystallization temperature: T_{cc}) ของเม็ดพลาสติก โพลีเอททิลีนเทอเลฟทาเลท
(Polyethylene terephthalate: PET) และกำหนดระดับปัจจัย สำหรับกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก
PET ในที่นี้ได้นำเอาความรู้ที่ได้มาจากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการ
ทดลองมาประยุกต์ใช้ซึ่งขั้นตอนของวิธีการดำเนินการศึกษาเป็นดังนี้

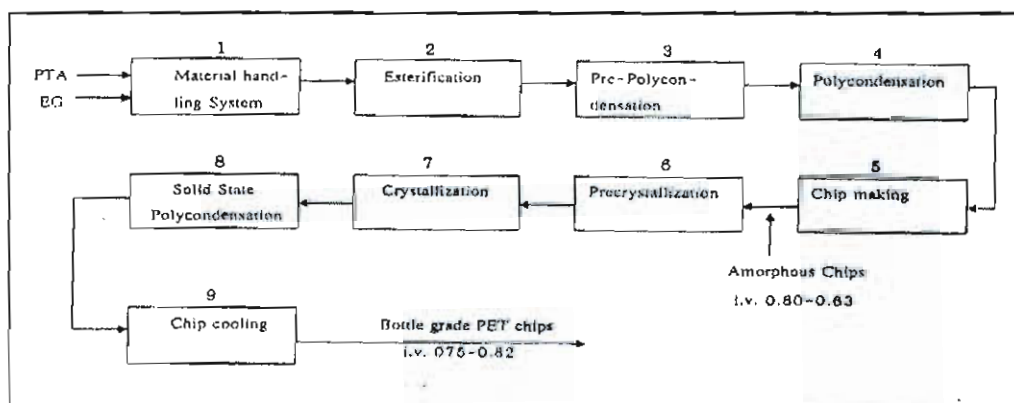


ภาพที่ 3-1 แสดงขั้นตอนการดำเนินการ

ศึกษากระบวนการผลิต

โรงงานกรณีศึกษา คือ บริษัท บางกอกโพลีเอสเตอร์ จำกัด (มหาชน) เป็นโรงงานผลิตเม็ดพลาสติก Bottle grade PET resins หรือเม็ดพลาสติก PET สำหรับใช้ในการผลิตขวดน้ำดื่ม โดยมีกำลังการผลิตประมาณ 300 ตันต่อวัน ผลิตภัณฑ์ที่จัดส่งให้กับลูกค้า Hokkai ประเทศญี่ปุ่น เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืด 0.80 เดซิลิตรต่อกรัม

รายละเอียดของการผลิตเม็ดพลาสติก PET กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก PET ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ เรียกว่า Continuous polycondensation plant (CP) เป็นกระบวนการผลิตโพลีเมอร์อย่างต่อเนื่อง และ Solid State polycondensation plant (SSP) เป็นกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มความหนืดของเม็ดพลาสติก PET ในสถานะของแข็ง ให้ผลิตภัณฑ์ได้ความหนืดตามที่ลูกค้าต้องการ กระบวนการผลิตสามารถอธิบายเป็นภาพรวมได้ดังนี้



ภาพที่ 3-2 ภาพรวมกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก PET

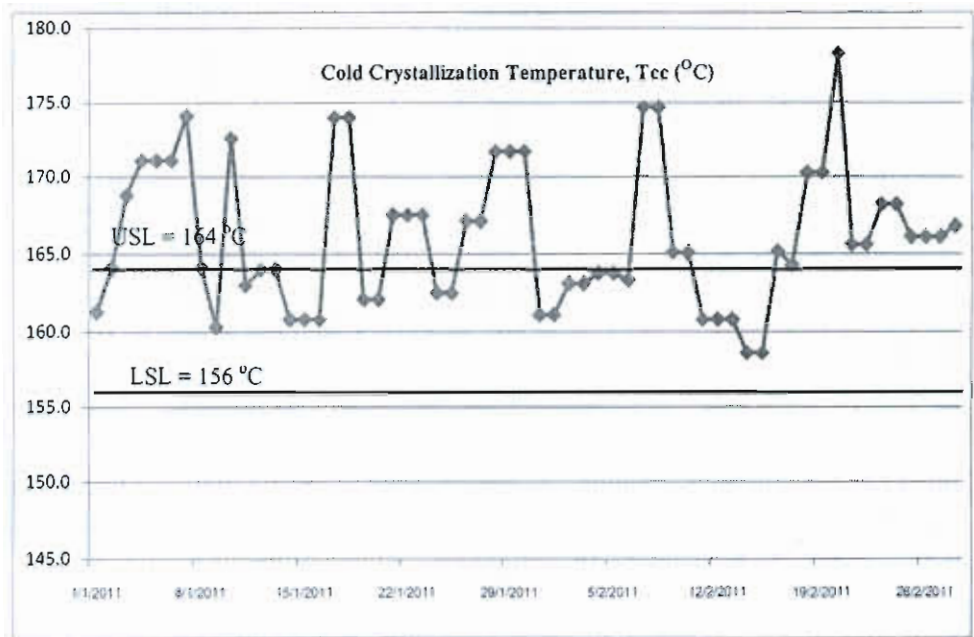
ภาพรวมกระบวนการผลิตพบว่า หน่วยการผลิตที่ 1 จะมีวัตถุดิบหลัก 2 ตัว คือ PTA และ MEG ทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นเอสเทอร์กับน้ำ และมีการเติมสารเติมแต่ง คือ IPA และ DEG เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเม็ดพลาสติกให้ได้ตามข้อกำหนดของลูกค้า เช่น อุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Melting point temperature) และ อุณหภูมิค้ำยแก้ว (Glass transition temperature) โดยคาดว่าสารเติมแต่งทั้งสองจะส่งผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกขากลับ กระบวนการนี้จะมี 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน (หน่วยการผลิตที่ 2) และปฏิกิริยาการควบแน่น (หน่วยการผลิตที่ 3 และ 4) เป็นการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นของผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ หรือที่เรียกว่า โมโนเมอร์ (Monomer) ซึ่งจะควบแน่นกันเป็นโมเลกุลที่มีสายยาว หลังจากนั้นจะถูกส่งเข้าสู่หน่วยการผลิตที่ 5 เพื่อทำการตัดเม็ดให้ได้ตามขนาดที่ลูกค้าต้องการ โดยจะเรียกเม็ดพลาสติกที่ถูกตัดเม็ด

ว่า Amorphous chips (A-chips) มีความหนืดอยู่ที่ 0.60 เดซิลิตรต่อกรัม กระบวนการการตัดเม็ดนั้น จะใช้น้ำหล่อเย็นเพื่อทำการเปลี่ยนสถานะของโพลีเมอร์จากของเหลวเป็นของแข็ง ซึ่งคาดว่า อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการตัดเม็ดจะส่งผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับ หลังจากนั้นเม็ด A-chips จะถูกทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้นตามความต้องการของลูกค้าโดยการเพิ่ม อุณหภูมิ ด้วยกระบวนการเพิ่มความหนืด PET ในสถานะของแข็ง ซึ่งคาดว่าหน่วยการผลิตที่ 7 Rotary Crystallizer (R/C) จะส่งผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับ และจากการประชุม คาดว่าค่าความหนืดของ PET chips จะส่งผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับด้วย ดังนั้น ทำให้ทราบในเบื้องต้นว่าทั้งสองกระบวนการผลิตนี้มีปัจจัยที่อาจส่งผลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึก จากกลับของเม็ดพลาสติก PET สามารถแสดงเป็นปฏิกิริยารวมได้ดังนี้

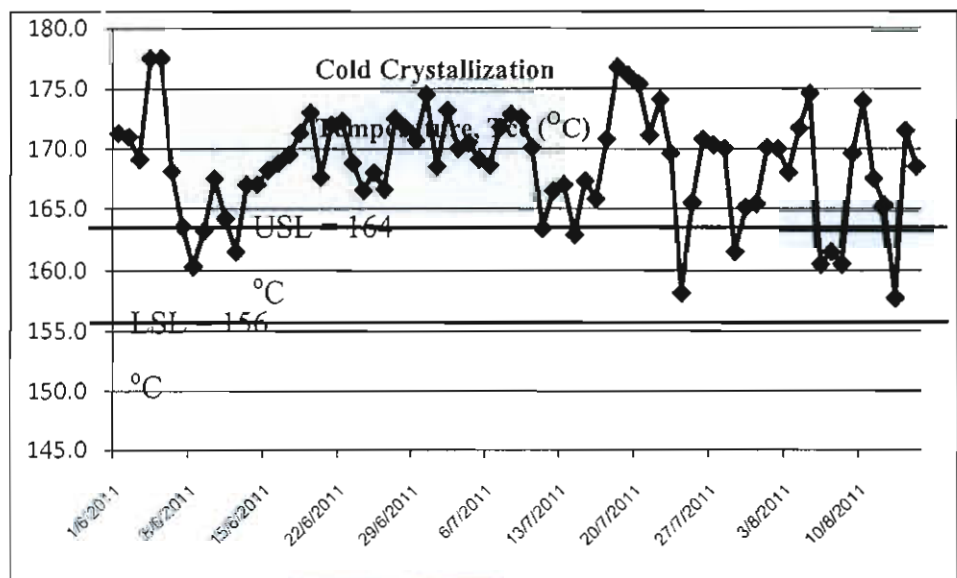


ศึกษาปัญหาในกระบวนการผลิตและเก็บรวบรวมข้อมูล

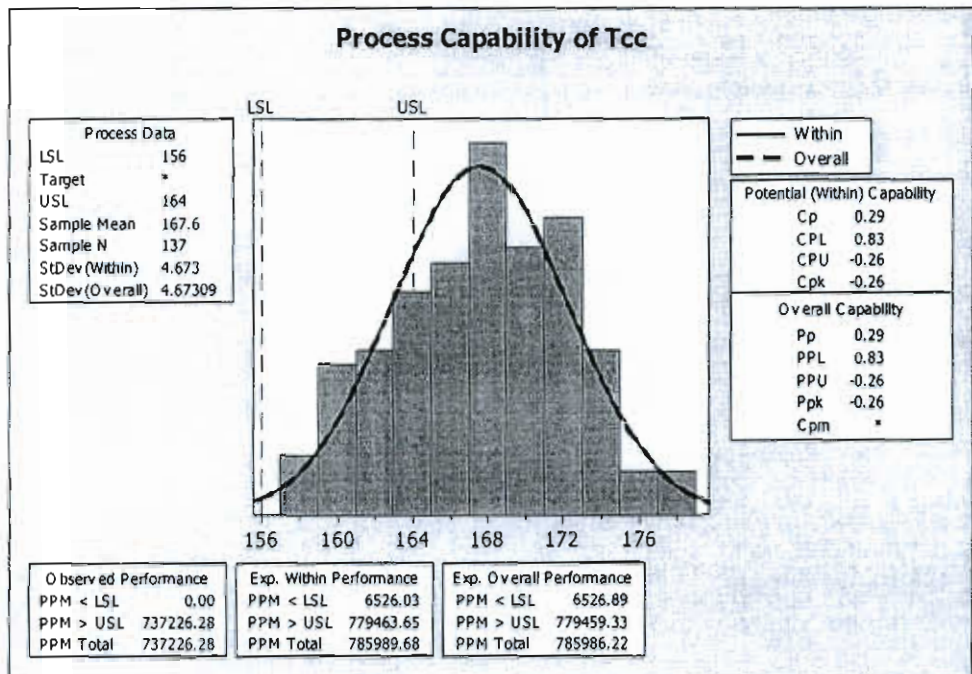
ทางโรงงานกรณีศึกษาได้เริ่มผลิตสินค้าให้แก่ลูกค้า Hokkai ตั้งแต่เดือนกันยายน พ.ศ. 2553 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งลูกค้า Hokkai ได้ทำข้อตกลงกับทางโรงงานสำหรับคุณภาพของสินค้า โดยมีข้อตกลงว่าให้ค่า อุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET อยู่ระหว่าง 156-164 °C ตั้งแต่ตกลงทำสัญญาซื้อขายสินค้าก็ส่งสินค้าให้แก่ลูกค้า Hokkai เรื่อยมาจนกระทั่งสินค้าเกิดปัญหา ทางด้านคุณภาพไม่ได้ตามข้อกำหนดจนทำให้ลูกค้าร้องเรียนเกี่ยวกับปริมาณสินค้าไม่ได้ตามที่สั่ง เนื่องจากคุณภาพสินค้าไม่ได้ตามข้อกำหนดทางโรงงานจึงไม่สามารถจัดส่งสินค้าล็อตนั้นให้แก่ Hokkai ได้ ซึ่งสินค้าที่ไม่สามารถจัดส่งให้แก่ลูกค้าจากปัญหาที่เกิดขึ้นตั้งแต่เดือนมกราคมถึง กุมภาพันธ์ และเดือนมิถุนายนถึงสิงหาคม พ.ศ. 2554 สามารถแสดงดังภาพที่ 3-3 และภาพที่ 3-4 ดังนี้



ภาพที่ 3-3 แสดงค่า Tcc ออกนอกข้อกำหนด 156-164 °C เดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554



ภาพที่ 3-4 แสดงค่า Tcc ออกนอกข้อกำหนด 156-164 °C เดือนมิถุนายน-สิงหาคม พ.ศ. 2554



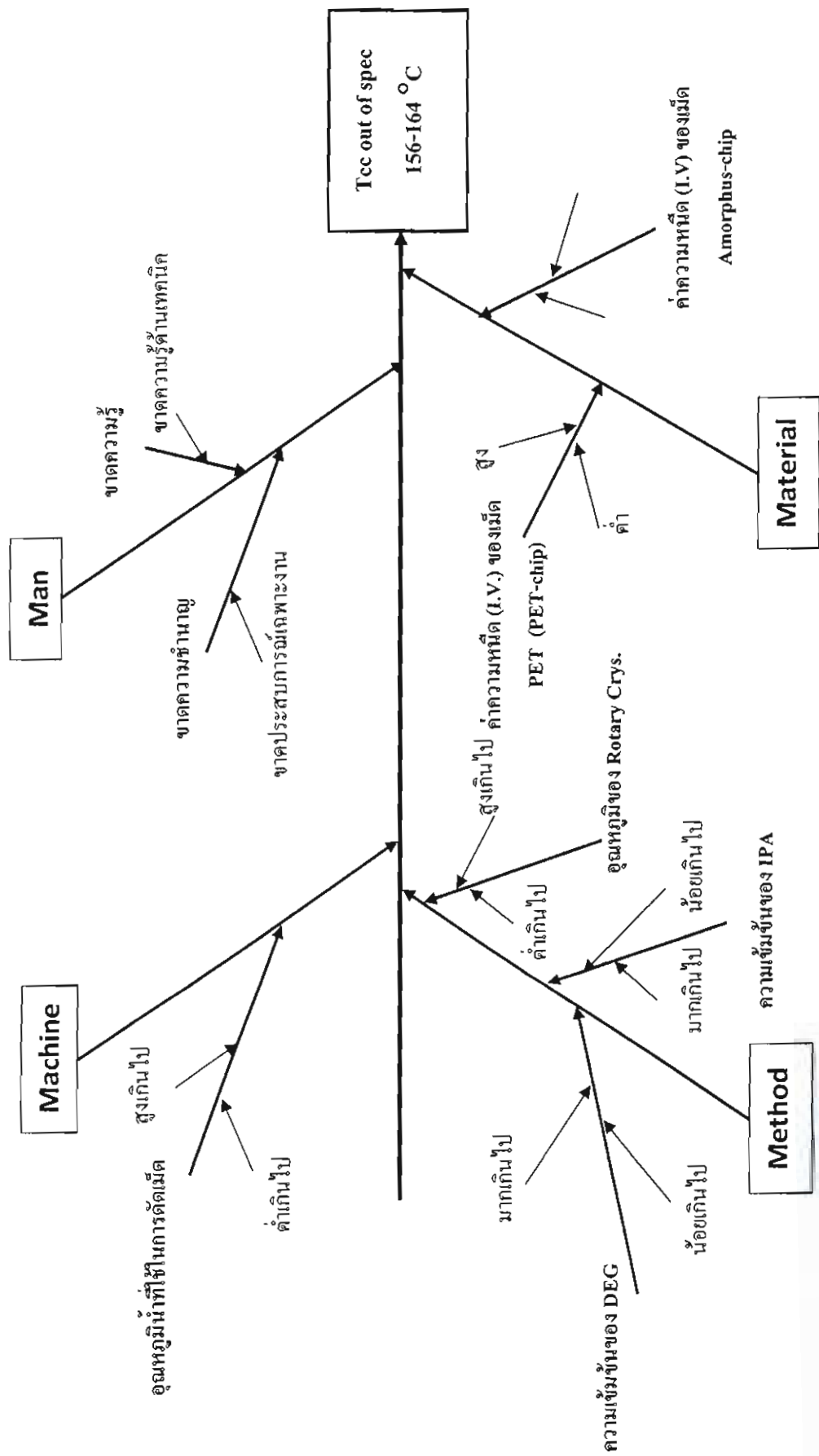
ภาพที่ 3-5 แสดงความสามารถของกระบวนการของค่าอุณหภูมิการตกผลึกขากลับ

จากภาพที่ 3-5 พบว่า เดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ และเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2554 ค่าอุณหภูมิการตกผลึกขากลับของเม็ดพลาสติก PET ไม่ได้ตามข้อกำหนดของลูกค้าที่ต้องการคิดเป็น 78.60 เปอร์เซ็นต์ และความสามารถของกระบวนการ ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2554 มีค่าเท่ากับ -0.26 ซึ่งต่ำกว่า 1.33 ค่าความสามารถของกระบวนการต่ำสุดที่ยอมรับได้ ทำให้ในเดือนดังกล่าวนี้ไม่สามารถส่งสินค้าให้แก่ลูกค้ารายนี้ได้ และพบว่า เปอร์เซ็นต์ของอุณหภูมิการตกผลึกขากลับของเม็ดพลาสติก PET ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้าเริ่มมีแนวโน้มสูงขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการวิเคราะห์หาสาเหตุ และดำเนินการแก้ไข เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้คุณภาพได้ตามข้อกำหนดของลูกค้า ดังนั้นตัวแปรตอบสนองที่เราสนใจคือ ค่าอุณหภูมิการตกผลึกขากลับ ของเม็ดพลาสติก PET

ศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่ออุณหภูมิการตกผลึกขากลับของเม็ดพลาสติก PET

การศึกษากระบวนการผลิตตามคู่มือของผู้ออกแบบการผลิตเม็ดพลาสติก PET และ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้ระบุว่าปัจจัยที่จะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกขากลับของเม็ดพลาสติก คือ ความเข้มข้นของ DEG ความเข้มข้นของ IPA ปัจจัยบางส่วนนั้นได้มาจากข้อมูลในอดีต และจากการประชุมซึ่งคาดว่าจะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกขากลับของเม็ดพลาสติก ซึ่งสาเหตุ

จะมาจากทั้งกระบวนการ Continuous polycondensation process และ Solid stage polycondensation process สามารถนำมาสร้างแผนภาพแสดงเหตุและผลเป็นเครื่องมือในการระบุสาเหตุของปัญหาได้ดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 แผนภาพแสดงเหตุและผลที่ทำให้ค่า Tcc ออกนอกข้อกำหนด

ผลการศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET พบว่า จากการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพแสดงเหตุและผลดังภาพที่ 3-6 พบว่ามีสาเหตุที่อาจส่งผลให้เกิดปัญหาค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า 8 สาเหตุ

โดยสาเหตุที่เกิดจากพนักงานคือ ขาดความรู้และความชำนาญในงาน ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ เนื่องจากเป็นสาเหตุที่ควบคุมไม่ได้ ดังนั้นจึงสรุปสาเหตุที่อาจส่งผลให้เกิดปัญหา ค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้าได้ 6 สาเหตุ ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สาเหตุที่อาจส่งผลให้เกิดปัญหาค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET

สาเหตุ	ปัญหาที่เกิด
สาเหตุที่เกิดจากวิธีการ	1. ความเข้มข้นของ DEG ไม่เหมาะสม 2. ความเข้มข้นของ IPA ไม่เหมาะสม 3. อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer ไม่เหมาะสม
สาเหตุที่เกิดจากเครื่องจักรและอุปกรณ์	4. อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการตัดเม็ดไม่เหมาะสม
สาเหตุที่เกิดจากวัตถุดิบ	5. ค่าความหนืดของเม็ด PET ไม่เหมาะสม 6. ค่าความหนืดของเม็ด Amorphous-chip ไม่เหมาะสม

การวิเคราะห์คัดเลือกปัจจัยและทดลองเพื่อยืนยันปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET

1. การวิเคราะห์คัดเลือกปัจจัย

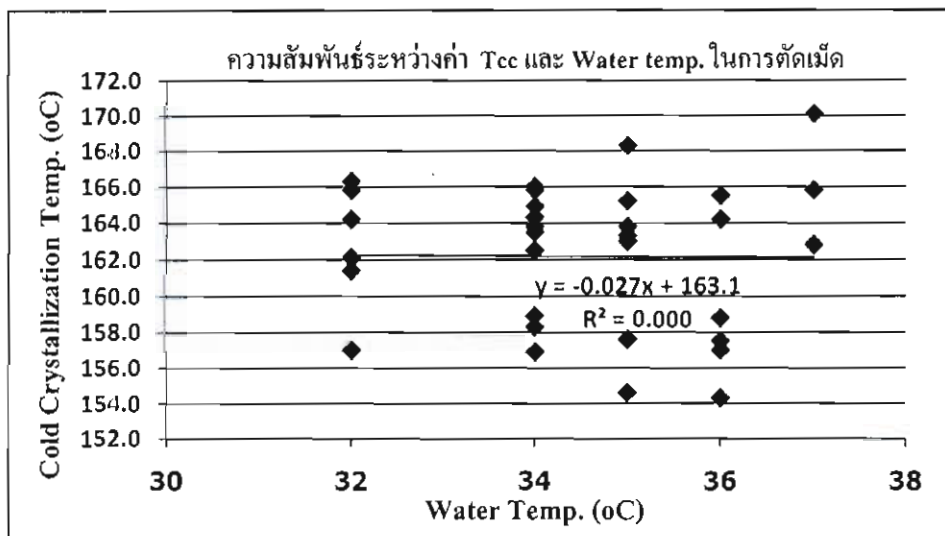
จากการสรุปสาเหตุจากแผนภาพแสดงเหตุและผลที่อาจส่งผลให้เกิดปัญหาค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า 6 สาเหตุ นำมาวิเคราะห์คัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

- คัดกรองปัจจัย โดยการวิเคราะห์ด้วยคู่มือของผู้ออกแบบการผลิตเม็ดพลาสติก PET

ผลการศึกษาพบว่า เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ DEG และความเข้มข้นของ IPA เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิการตกผลึก (Crystallization temperature: Tc) ของเม็ดพลาสติก PET

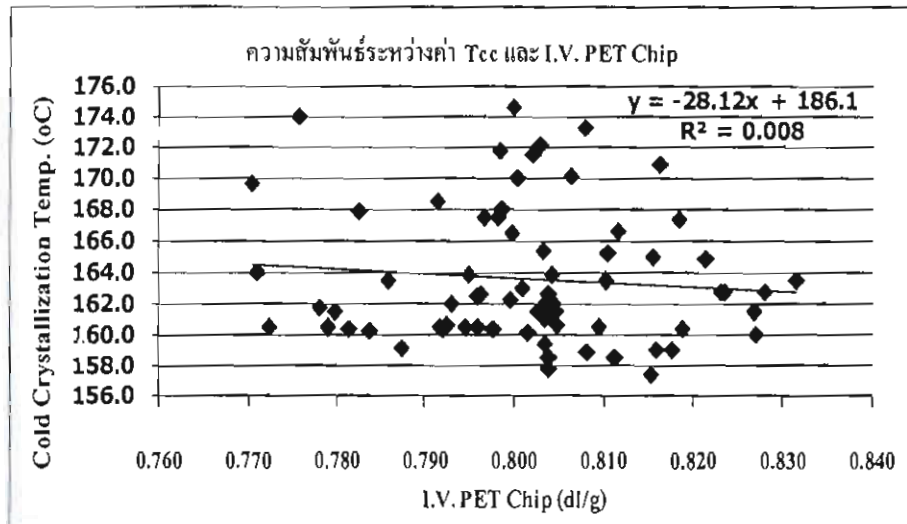
- กัดกรองปัจจัย โดยการวิเคราะห์จากข้อมูลในอดีต

ผลการศึกษา พบว่าอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการตัดเม็ดและ ค่าความหนืด ของเม็ด PET ไม่มีความสัมพันธ์ต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากถังของเม็ดพลาสติก PET ดังภาพที่ 3-7 และภาพที่ 3-8 แต่อุณหภูมิของ Rotary crystallizer มีความสัมพันธ์ต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากถังของเม็ดพลาสติก PET ดังภาพที่ 3-9 และพบว่าอุณหภูมิของ Rotary crystallizer มีความสัมพันธ์กับค่าความหนืดของเม็ด Amorphous-chip ซึ่งแสดงว่าค่าความหนืดของเม็ด Amorphous-chip มีผลทำให้ อุณหภูมิของ Rotary crystallizer เปลี่ยนแปลง



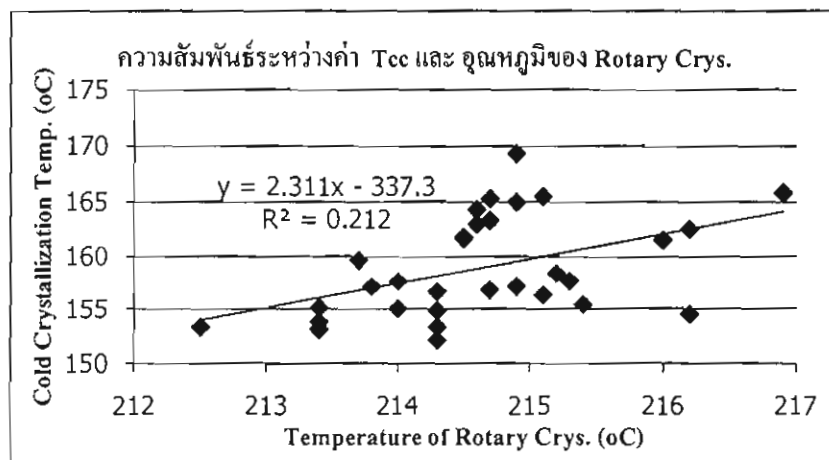
ภาพที่ 3-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tcc และอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการตัดเม็ด

ที่มาของข้อมูลอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการตัดเม็ดมีการจดบันทึกทุก ๆ 2 ชั่วโมงและเลือกช่วงเวลาโดยตรงกับค่า Tcc ที่วิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการของทุกวันเวลา 13:00 น. มีการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 1 เดือน



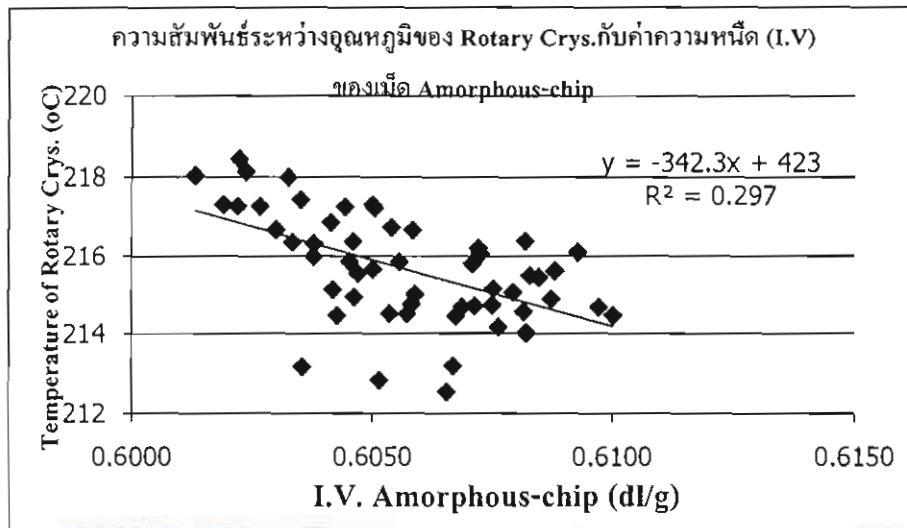
ภาพที่ 3-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tcc และค่าความหนืดของเม็ด PET

ที่มาของข้อมูลค่าความหนืดของเม็ด PET ได้จากการวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการของทุกวันมีการวิเคราะห์ทุก ๆ 2 ชั่วโมงและเลือกช่วงเวลาที่ตรงกับค่า Tcc ที่วิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการของทุกวันเวลา 13:00 น.



ภาพที่ 3-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tcc และอุณหภูมิของ Rotary Crys.

ที่มาของข้อมูลอุณหภูมิของ Rotary crys. ได้จากโปรแกรมของห้องควบคุมการผลิต (DCS) และการจดบันทึกของ Borad man ของทุกวันทุก ๆ 2 ชั่วโมงและเลือกช่วงเวลาที่ตรงกับค่า Tcc ที่วิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการของทุกวันเวลา 13:00 น.



ภาพที่ 3-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของ Rotary crys. กับค่าความหนืดของเม็ด Amorphous-chip

ที่มาของข้อมูลค่าความหนืดของเม็ด Amorphous-chip ได้จากโปรแกรมของห้องควบคุมการผลิต (DCS) และการจดบันทึกของ Borad man ของทุกวันทุก ๆ 2 ชั่วโมง การวิเคราะห์เพื่อคัดกรองปัจจัยทั้ง 2 วิธี ได้ผลการวิเคราะห์ในเบื้องต้น ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 แสดงผลการวิเคราะห์เพื่อคัดกรองปัจจัยทั้ง 2 วิธี

ปัจจัย	วิธีคัดกรอง	ผลจากการวิเคราะห์
1. ความเข้มข้นของ DEG ไม่เหมาะสม	การวิเคราะห์โดยคู่มือของผู้ออกแบบการผลิต	มีผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากถ้ำของเม็ดพลาสติก
2. ความเข้มข้นของ IPA ไม่เหมาะสม		
3. อุณหภูมิของ Rotary crystallizer ไม่เหมาะสม	การวิเคราะห์โดยใช้แผนภูมิเส้นในการศึกษาความสัมพันธ์จากข้อมูลในอดีต	มีผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากถ้ำของเม็ดพลาสติก
4. ค่าความหนืดของเม็ด Amorphous-chip ไม่เหมาะสม		
5. อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการตัดเม็ดไม่เหมาะสม		ไม่มีผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากถ้ำของเม็ดพลาสติก
6. ค่าความหนืดของเม็ดพลาสติก PET ไม่เหมาะสม		

2. ทดลองเพื่อยืนยันปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากถ้ำของ

เม็ดพลาสติก PET

เมื่อทำการสรุปปัจจัยจากการคัดเลือกปัจจัยได้ 3 ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ และอีก 1 ปัจจัยรบกวนที่อาจมีผลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกของเม็ดพลาสติกคือ

1. ความเข้มข้นของ DEG
2. ความเข้มข้นของ IPA
3. อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer

4. ค่าความหนืดของเม็ด Amorphous-chip จึงนำปัจจัยเหล่านี้มาทำการออกแบบการทดลองและทำการทดลอง เพื่อยืนยันปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากถ้ำของเม็ดพลาสติก PET และกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยกำหนดรูปแบบการทดลอง ดังนี้

ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^k และกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 3-3 โดยที่กำหนดให้

ตารางที่ 3-3 แสดงการกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองสำหรับการทดลองยืนยันปัจจัย

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		หน่วย	สัญลักษณ์
	Low (-)	Hi (+)		
ความเข้มข้นของ DEG	1.3	1.4	%	X_1
ความเข้มข้นของ IPA	1.8	1.9	%	X_2
อุณหภูมิของ Rotary Crys.	214	216	$^{\circ}\text{C}$	X_3
I.V. ของเม็ด A-chip	0.605	0.610	dl/g	Z

โดยที่

x_1 = ระดับปัจจัยของความเข้มข้นของ DEG

x_2 = ระดับปัจจัยของความเข้มข้นของ IPA

x_3 = ระดับปัจจัยของอุณหภูมิของ Rotary Crys.

Z = I.V. ของเม็ด A-chip

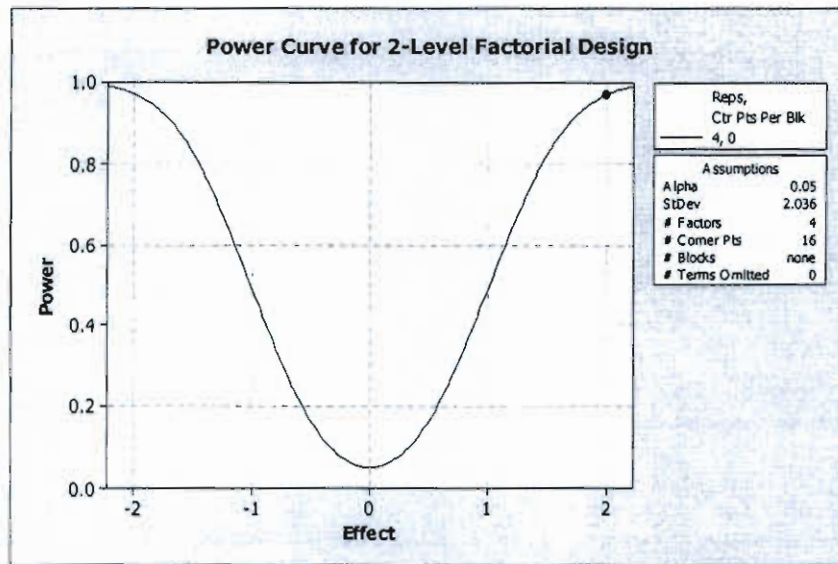
ที่มาของระดับปัจจัยของแต่ละปัจจัย เป็นดังนี้

1. ความเข้มข้นของ DEG และ IPA (%โดยน้ำหนัก) กำหนดตามข้อกำหนดของบริษัทที่กำลังการผลิต (CP) 300 ตันต่อวัน การปรับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ DEG และ IPA เพิ่มขึ้นหรือลดลงจะพิจารณาจากค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Melting point temperature) ของเม็ดพลาสติก PET ซึ่งลูกค้าทุกรายกำหนดช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลว เท่ากับ $249 \pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยขึ้นกับกำลังการผลิต โดยปกติการผลิตเม็ดพลาสติก PET ที่ไม่ได้เติม DEG และ IPA จะมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลว เท่ากับ 253°C ซึ่งอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ต่ำจะทำให้ใช้พลังงานในการหลอมเม็ดพลาสติกเพื่อขึ้นรูปนั้นลดลง ดังนั้นจึงเลือกระดับความเข้มข้นของ DEG เท่ากับ 1.3% และ 1.4% ความเข้มข้นของ IPA เท่ากับ 1.8% และ 1.9%

2. อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer กำหนดตามข้อมูลในอดีตที่กำลังการผลิต (SSP) 150 ตันต่อวัน ดังภาพที่ 3-9 ที่ทำให้ค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET อยู่ใน

ข้อกำหนดของลูกค้า และที่อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer เท่ากับ $214 - 216^{\circ}\text{C}$ จะทำให้ได้ค่าความหนืดของเม็ด PET ตรงตามค่าความหนืดที่ลูกค้ารายนี้ต้องการคือ 0.80 ± 0.02 เดซิลิตรต่อกรัม

3. ค่าความหนืดของเม็ด Amorphous-chip กำหนดให้เป็นปัจจัยรบกวน เนื่องจากความผันแปรของความหนืดของเม็ด Amorphous-chip จะส่งผลให้ต้องใช้อุณหภูมิของ Rotary crystallizer ที่กระบวนการ SSP Plant ไม่คงที่ด้วย ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อการแกว่งตัวของผลตอบสนอง โดยระดับปัจจัยกำหนดตามข้อมูลในอดีต ดังภาพที่ 3-10 ที่กำลังการผลิต (CP) 300 ดันต่อวัน เป็นช่วงที่สามารถกำหนดอุณหภูมิของ Rotary crystallizer เท่ากับ $214-216^{\circ}\text{C}$ ได้ และทำให้ได้ค่าความหนืดของเม็ด PET ตรงตามค่าความหนืดที่ลูกค้ารายนี้ต้องการคือ 0.80 ± 0.02 เดซิลิตรต่อกรัม การปรับระดับปัจจัยของความหนืดของเม็ด Amorphous-chip นั้นมีตัวแปรที่ใช้ในการปรับ 3 ตัวแปร แต่ในการทดลองครั้งนี้ใช้ความเร็วรอบของใบกวนเป็นตัวปรับค่าความหนืด โดยที่ความเร็วรอบของใบกวน เท่ากับ 4.5 รอบต่อนาทีจะทำให้มีค่าความหนืด เท่ากับ 0.605 เดซิลิตรต่อกรัม และที่ความเร็วรอบของใบกวน เท่ากับ 4.8 รอบต่อนาทีจะทำให้มีค่าความหนืด เท่ากับ 0.610 เดซิลิตรต่อกรัม ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.0004 เดซิลิตรต่อกรัม (อ้างอิงจากข้อมูลในอดีตที่เก็บมาของค่าความหนืดเท่ากับ 0.605 เดซิลิตรต่อกรัม) ส่วนตัวแปรค่าอุณหภูมิของ Hot oil ที่ให้ความร้อนกับโพลิเมอร์มีค่าคงที่ที่ 275 องศาเซลเซียส และค่าความดันของถังปฏิกรณ์ มีค่าคงที่ที่ 1 มิลลิบาร์ เพื่อให้ความผันแปรของความหนืดของเม็ด Amorphous-chip มีค่าน้อย กำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 4 ปัจจัย จึงเลือกการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^4 มี 4 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ กำหนดขนาดตัวอย่าง (Replicates) เท่ากับ 4 จึงต้องทำการทดลองทั้งหมด เท่ากับ 4×16 เท่ากับ 64 การทดลอง การกำหนดขนาดตัวอย่างอ้างอิงจากโปรแกรมมินิแท็บ แสดงดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 แสดงการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการทดลองยืนยันปัจจัย

จากภาพที่ 3-11 พบว่าโอกาสในการตรวจจับค่าเฉลี่ยของระดับปัจจัยมีความแตกต่างกัน
 ทั้ง ๆ ที่ค่าเฉลี่ยของระดับปัจจัยมีความแตกต่างกันจริงที่ 2σ อย่างถูกต้องที่ 97% เมื่อใช้ขนาด
 ตัวอย่างเท่ากับ 4 ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 2.036 มาจากข้อมูลในอดีต
 ดังนั้นในการทดลองนี้ได้มีการกำหนดขนาดตัวอย่างเท่ากับ 4 ซึ่งเพียงพอต่อความน่าเชื่อถือของ
 ข้อมูล

ตารางที่ 3-4 ตารางบันทึกผลการทดลองสำหรับการทดลองขึ้นชั้นปัจจัย

StdOrder	Coded Variables				Uncoded Variables				Tcc
	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	
					%	%	°C	d/g	°C
1	-1	-1	-1	-1	1.3	1.8	214	0.605	
2	1	-1	-1	-1	1.4	1.8	214	0.605	
3	-1	1	-1	-1	1.3	1.9	214	0.605	
4	1	1	-1	-1	1.4	1.9	214	0.605	
5	-1	-1	1	-1	1.3	1.8	216	0.605	
6	1	-1	1	-1	1.4	1.8	216	0.605	
7	-1	1	1	-1	1.3	1.9	216	0.605	
8	1	1	1	-1	1.4	1.9	216	0.605	
9	-1	-1	-1	1	1.3	1.8	214	0.610	
10	1	-1	-1	1	1.4	1.8	214	0.610	
11	-1	1	-1	1	1.3	1.9	214	0.610	
12	1	1	-1	1	1.4	1.9	214	0.610	
13	-1	-1	1	1	1.3	1.8	216	0.610	
14	1	-1	1	1	1.4	1.8	216	0.610	
15	-1	1	1	1	1.3	1.9	216	0.610	
16	1	1	1	1	1.4	1.9	216	0.610	
17	-1	-1	-1	-1	1.3	1.8	214	0.605	
18	1	-1	-1	-1	1.4	1.8	214	0.605	
19	-1	1	-1	-1	1.3	1.9	214	0.605	
20	1	1	-1	-1	1.4	1.9	214	0.605	
21	-1	-1	1	-1	1.3	1.8	216	0.605	
22	1	-1	1	-1	1.4	1.8	216	0.605	
23	-1	1	1	-1	1.3	1.9	216	0.605	
24	1	1	1	-1	1.4	1.9	216	0.605	
25	-1	-1	-1	1	1.3	1.8	214	0.610	
26	1	-1	-1	1	1.4	1.8	214	0.610	
27	-1	1	-1	1	1.3	1.9	214	0.610	
28	1	1	-1	1	1.4	1.9	214	0.610	
29	-1	-1	1	1	1.3	1.8	216	0.610	
30	1	-1	1	1	1.4	1.8	216	0.610	

ตารางที่ 3-4 ตารางบันทึกผลการทดลองสำหรับการทดลองยืนยันปัจจัย (ต่อ)

StdOrder	Coded Variables				Uncoded Variables				Tcc
	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	
					%	%	°C	dl/g	°C
31	-1	1	1	1	1.3	1.9	216	0.610	
32	1	1	1	1	1.4	1.9	216	0.610	
33	-1	-1	-1	-1	1.3	1.8	214	0.605	
34	1	-1	-1	-1	1.4	1.8	214	0.605	
35	-1	1	-1	-1	1.3	1.9	214	0.605	
36	1	1	-1	-1	1.4	1.9	214	0.605	
37	-1	-1	1	-1	1.3	1.8	216	0.605	
38	1	-1	1	-1	1.4	1.8	216	0.605	
39	-1	1	1	-1	1.3	1.9	216	0.605	
40	1	1	1	-1	1.4	1.9	216	0.605	
41	-1	-1	-1	1	1.3	1.8	214	0.610	
42	1	-1	-1	1	1.4	1.8	214	0.610	
43	-1	1	-1	1	1.3	1.9	214	0.610	
44	1	1	-1	1	1.4	1.9	214	0.610	
45	-1	-1	1	1	1.3	1.8	216	0.610	
46	1	-1	1	1	1.4	1.8	216	0.610	
47	-1	1	1	1	1.3	1.9	216	0.610	
48	1	1	1	1	1.4	1.9	216	0.610	
49	-1	-1	-1	-1	1.3	1.8	214	0.605	
50	1	-1	-1	-1	1.4	1.8	214	0.605	
51	-1	1	-1	-1	1.3	1.9	214	0.605	
52	1	1	-1	-1	1.4	1.9	214	0.605	
53	-1	-1	1	-1	1.3	1.8	216	0.605	
54	1	-1	1	-1	1.4	1.8	216	0.605	
55	-1	1	1	-1	1.3	1.9	216	0.605	
56	1	1	1	-1	1.4	1.9	216	0.605	
57	-1	-1	-1	1	1.3	1.8	214	0.610	
58	1	-1	-1	1	1.4	1.8	214	0.610	
59	-1	1	-1	1	1.3	1.9	214	0.610	
60	1	1	-1	1	1.4	1.9	214	0.610	
61	-1	-1	1	1	1.3	1.8	216	0.610	
62	1	-1	1	1	1.4	1.8	216	0.610	
63	-1	1	1	1	1.3	1.9	216	0.610	
64	1	1	1	1	1.4	1.9	216	0.610	

ออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นส่วนโค้งและผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย

การออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นส่วนโค้งและผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยสามารถออกแบบการทดลองโดยเพิ่มระดับของปัจจัยในส่วนของคุณดิ่งกลาง (Center point) ของระดับปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยเพื่อเป็นแนวทางในการหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม โดยทำการทดลองค่อนจากการทดลองเพื่อยืนยันปัจจัย กำหนดระดับปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 3-5 โดยที่กำหนดให้

ตารางที่ 3-5 แสดงการกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองสำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย	หน่วย	สัญลักษณ์
ความเข้มข้นของ DEG	1.35	%	X_1
ความเข้มข้นของ IPA	1.85	%	X_2
อุณหภูมิของ Rotary crys.	215	$^{\circ}\text{C}$	X_3
I.V. ของเม็ด A-chip	0.608	dI/g	Z

โดยการแปลงระดับปัจจัยของทั้ง 4 ปัจจัย จาก Coded Variable เป็น Uncoded Variable เป็นดังนี้

$$1. \text{ ความเข้มข้นของ DEG (\%)} \text{ Coded } (x_1) = 0$$

จากสมการ

$$x_1 = \frac{\text{Conc. DEG} - (\text{Conc. DEG}_{\text{low}} + \text{Conc. DEG}_{\text{high}}) / 2}{(\text{Conc. DEG}_{\text{high}} - \text{Conc. DEG}_{\text{low}}) / 2} \quad (3-2)$$

เมื่อ

$$\text{Conc. DEG}_{\text{low}} = 1.3\%$$

$$\text{Conc. DEG}_{\text{high}} = 1.4\%$$

แทนค่าลงในสมการ ได้เป็นสมการสำเร็จรูปดังนี้

$$0 = \frac{\text{Conc. DEG} - 1.35}{0.05} \quad (3-3)$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของ DEG เท่ากับ 1.35%

2. ความเข้มข้นของ IPA (%) Coded (x_2) = 0

จากสมการ

$$x_2 = \frac{\text{Conc. IPA} - (\text{Conc. IPA}_{low} + \text{Conc. IPA}_{high})/2}{(\text{Conc. IPA}_{high} - \text{Conc. IPA}_{low})/2} \quad (3-4)$$

เมื่อ

$$\text{Conc. IPA}_{low} = 1.8\%$$

$$\text{Conc. IPA}_{high} = 1.9\%$$

แทนค่าลงในสมการ ได้เป็นสมการสำเร็จรูปดังนี้

$$0 = \frac{\text{Conc. IPA} - 1.85}{0.05} \quad (3-5)$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของ IPA เท่ากับ 1.85%

3. อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer ($^{\circ}\text{C}$) Coded (x_3) = 0

จากสมการ

$$x_3 = \frac{\text{Temp. R/C} - (\text{Temp. R/C}_{low} + \text{Temp. R/C}_{high})/2}{(\text{Temp. R/C}_{high} - \text{Temp. R/C}_{low})/2} \quad (3-6)$$

เมื่อ

$$\text{Temp. R/C}_{low} = 214 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Temp. R/C}_{high} = 216 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

แทนค่าลงในสมการ ได้เป็นสมการสำเร็จรูปดังนี้

$$0 = \frac{\text{Temp. R/C} - 215}{1} \quad (3-7)$$

ดังนั้น อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer เท่ากับ 215 $^{\circ}\text{C}$

4. ค่าความหนืดของ Amorphus chip (dl/g) Coded (x_4) = 0

จากสมการ

$$x_4 = \frac{\text{I.V. A}_{chip} - (\text{I.V. A}_{chip}_{low} + \text{I.V. A}_{chip}_{high})/2}{(\text{I.V. A}_{chip}_{high} - \text{I.V. A}_{chip}_{low})/2} \quad (3-8)$$

เมื่อ

$$I.V. A- chip_{low} = 0.605 \text{ dl/g}$$

$$I.V. A- chip_{high} = 0.610 \text{ dl/g}$$

แทนค่าลงในสมการ ได้เป็นสมการสำเร็จรูปดังนี้

$$0 = \frac{I.V. A_chip - 0.6075}{0.0025} \quad (3-9)$$

ดังนั้น ค่าความหนืดของ Amorphus chip เท่ากับ 0.608 dl/g (ใช้ความเร็วรอบของใบกวน เท่ากับ 4.7 รอบต่อนาที)

กำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 4 ปัจจัย เลือกรูปแบบการทดลองแบบ แฟคทอเรียล 2^4 มี 4 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยทดลอง 1 ระดับ กำหนดจุดกึ่งกลาง เท่ากับ 5 จุด ดังนั้น ต้องทำการทดลองเพิ่ม เท่ากับ 5 การทดลอง ดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 ตารางบันทึกผลการทดลองสำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง

StdOrder	Coded Variables				Uncoded Variables				Tcc
	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	
					%	%	°C	dl/g	
65	0	0	0	0	1.35	1.85	215	0.608	
66	0	0	0	0	1.35	1.85	215	0.608	
67	0	0	0	0	1.35	1.85	215	0.608	
68	0	0	0	0	1.35	1.85	215	0.608	
69	0	0	0	0	1.35	1.85	215	0.608	

ออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง แบบ CCD (Central Composite Design) เพื่อนำไปทำการทดลอง

เมื่อทำการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นส่วนโค้งและผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย แล้ว หากพบว่า ระดับปัจจัยไม่มีความสัมพันธ์ลักษณะเป็นเชิงเส้น โค้ง แสดงว่ารูปแบบทางคณิตศาสตร์เป็นสมการแบบ First order model สามารถหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีการของ Steepest Ascent หรือวิธีพื้นผิวตอบสนอง แต่หากระดับปัจจัยมีความสัมพันธ์ลักษณะเป็น

เชิงเส้นโค้ง แสดงว่ารูปแบบทางคณิตศาสตร์เป็นสมการแบบ Second order model สามารถออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ CCD (Central Composite Design) ได้ การทดลองแบบ CCD ประกอบด้วยชุดการทดลอง 3 ส่วน ส่วนแรกคือชุดการทดลองแบบ Fractional factorial ส่วนที่สอง คือ ส่วนของจุดกึ่งกลาง และส่วนที่สาม คือ ส่วนที่เป็นชุดการทดลองที่ออกแบบให้เกิดคุณสมบัติการหมุนหรือจุดแกนของปัจจัยต่าง ๆ กำหนดรูปแบบการทดลอง ดังนี้

ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^k และกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 3-7 โดยที่กำหนดให้

ตารางที่ 3-7 แสดงการกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองสำหรับหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		หน่วย	สัญลักษณ์
	Low (-)	Hi (+)		
ความเข้มข้นของ DEG	1.25	1.45	%	X_1
ความเข้มข้นของ IPA	1.75	1.95	%	X_2
อุณหภูมิของ Rotary crys.	213	217	$^{\circ}\text{C}$	X_3
I.V. ของเม็ด A-chip	0.608		dl/g	Z

โดยการแปลงระดับปัจจัยของทั้ง 3 ปัจจัย จาก Coded Variable เป็น Uncoded variable เป็นดังนี้

1. ความเข้มข้นของ DEG (%) Coded (x_1) ระดับสูง เท่ากับ 2 จากสมการสำเร็จรูป

$$2 = \frac{\text{Conc. DEG} - 1.35}{0.05} \quad (3-10)$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของ DEG ระดับสูงเท่ากับ 1.45%

2. ความเข้มข้นของ DEG (%) Coded (x_1) ระดับต่ำ เท่ากับ -2 จากสมการสำเร็จรูป

$$-2 = \frac{\text{Conc. DEG} - 1.35}{0.05} \quad (3-11)$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของ DEG ระดับสูงเท่ากับ 1.2%

3. ความเข้มข้นของ IPA (%) Coded (x_2) ระดับสูง เท่ากับ 2
จากสมการสำเร็จรูป

$$2 = \frac{\text{Conc. IPA} - 1.85}{0.05} \quad (3-12)$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของ IPA ระดับสูงเท่ากับ 1.95%

4. ความเข้มข้นของ IPA (%) Coded (x_2) ระดับต่ำ เท่ากับ -2
จากสมการสำเร็จรูป

$$-2 = \frac{\text{Conc. IPA} - 1.85}{0.05} \quad (3-13)$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของ IPA ระดับต่ำเท่ากับ 1.75%

5. อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer ($^{\circ}\text{C}$) Coded (x_3) ระดับสูง เท่ากับ 2
จากสมการสำเร็จรูป

$$2 = \frac{\text{Temp. R/C} - 215}{1} \quad (3-14)$$

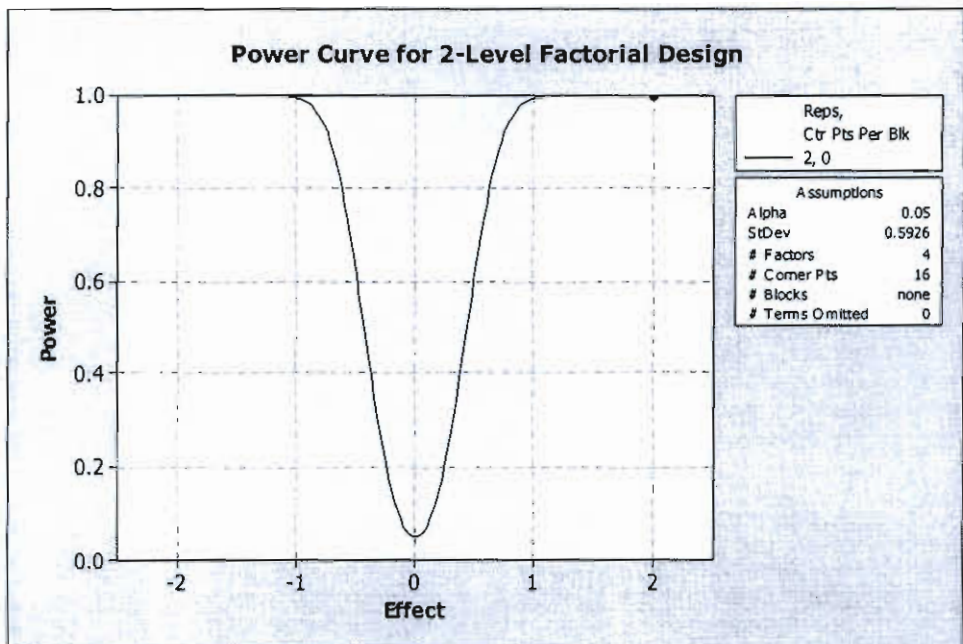
ดังนั้น อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer ระดับสูง เท่ากับ 217°C

6. อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer ($^{\circ}\text{C}$) Coded (x_3) ระดับต่ำ เท่ากับ -2
จากสมการสำเร็จรูป

$$-2 = \frac{\text{Temp. R/C} - 215}{1} \quad (3-15)$$

ดังนั้น อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer ระดับต่ำ เท่ากับ 213°C

กำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 4 ปัจจัย จึงเลือกการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4 มี 4 ปัจจัย ปัจจัยที่ควบคุมได้ 3 ปัจจัย ออกแบบการทดลองบนจุดแกน 3 ปัจจัย ส่วนปัจจัยรอบวง 1 ปัจจัยไม่ทำการทดลองบนจุดแกน จุดการทดลองสำหรับ 4 ปัจจัย ค่า α คือค่าระยะห่างจากจุดกึ่งกลางไปยังแกนตั้งและแกนนอน ดังนั้น ค่า α มีค่าเท่ากับ $\sqrt{4}$ จุดแกนแต่ละปัจจัยจึงมีค่าเท่ากับ -2 ถึง 2 แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ กำหนดขนาดตัวอย่าง (Replicates) เท่ากับ 2 จึงต้องทำการทดลองเพิ่ม เท่ากับ 12 การทดลอง การกำหนดขนาดตัวอย่างอ้างอิงจากโปรแกรมมินิแท็บ แสดงดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 แสดงการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

จากภาพที่ 3-12 พบว่าโอกาสในการตรวจจับค่าเฉลี่ยของระดับปัจจัยมีความแตกต่างกัน
 ทั้ง ๆ ที่ค่าเฉลี่ยของระดับปัจจัยมีความแตกต่างกันจริงที่ 2 σ อย่างถูกต้องที่ 100% เมื่อใช้ขนาด
 ตัวอย่างเท่ากับ 2 ดังนั้นในการทดลองนี้ได้มีการกำหนดขนาดตัวอย่างเท่ากับ 2 ซึ่งเพียงพอต่อ
 ความน่าเชื่อถือของข้อมูล (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอ้างอิงจากผลการทดลองยืนยันผลของปัจจัย)

ตารางที่ 3-8 ตารางบันทึกผลการทดลองสำหรับหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

StdOrder	Coded Variables				Uncoded Variables				Tcc
	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	
					%	%	°C	dl/g	°C
70	-2	0	0	0	1.25	1.85	215	0.608	
71	2	0	0	0	1.45	1.85	215	0.608	
72	0	-2	0	0	1.35	1.75	215	0.608	
73	0	2	0	0	1.35	1.95	215	0.608	
74	0	0	-2	0	1.35	1.85	213	0.608	
75	0	0	2	0	1.35	1.85	217	0.608	
76	-2	0	0	0	1.25	1.85	215	0.608	
77	2	0	0	0	1.45	1.85	215	0.608	
78	0	-2	0	0	1.35	1.75	215	0.608	
79	0	2	0	0	1.35	1.95	215	0.608	
80	0	0	-2	0	1.35	1.85	213	0.608	
81	0	0	2	0	1.35	1.85	217	0.608	

1. สร้างสมการตัวแบบคณิตศาสตร์

หลังจากคำนวณและวิเคราะห์ผลโปรแกรมมินิแท็บได้แปลงค่าเพื่อนำมาใช้ในการสร้างสมการสัมประสิทธิ์ สำหรับการทำนายค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับ (Tcc) ของเม็ดพลาสติก PET

2. การวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมของปัจจัย

ในการคำนวณหาระดับปัจจัยใดที่ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer จากโปรแกรมมินิแท็บเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยโดยกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ประเมินผลโดยเปรียบเทียบผลการดำเนินงานก่อนและหลังการทดลอง

ทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยเพื่อยืนยันผล

ทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย จากการปรับค่าให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงแล้วนำไปทดลองอีก 15 ครั้ง โดยเปลี่ยนแปลงปัจจัยนำเข้าไปตามค่าที่เหมาะสม นำค่าที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 3-9 ไปเปรียบเทียบว่าใกล้เคียงค่าที่คำนวณได้ในสมการ หากมี

ค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการออกแบบการทดลองที่ได้เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

ตารางที่ 3-9 การทดลองเพื่อยืนยันผล

ลำดับการทดลอง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ ...	ครั้งที่ 15
ค่า T_{cc} ($^{\circ}\text{C}$)					

สรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 3-10 สรุปผลสถานะของแต่ละปัจจัย

สถานะการเดินเครื่องจักรที่เหมาะสม	
ความเข้มข้นของ DEG (%)	
ความเข้มข้นของ IPA (%)	
อุณหภูมิของ Rotary Crys. ($^{\circ}\text{C}$)	
I.V. ของเม็ด Amorphus-chip (dl/g)	

บทที่ 4

ผลการทดลอง

แผนขั้นตอนการดำเนินงานในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับปรุงจจัย 4 ตัว ตามแผนการ ออกแบบการทดลองและเก็บข้อมูล ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล การทดลองที่ได้จากการเก็บข้อมูล ซึ่งผลการทดลองจะแสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิ การตกผลึกจากลึบ (Cold crystallization temperature: T_{cc}) ของเม็ดพลาสติก โพลีเอทิลีนเทอเลฟ- ทาลเทท (Polyethylene terephthalate: PET) ได้ผลดังนี้

ผลการทดลองเพื่อยืนยันปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากลึบของ เม็ดพลาสติก PET

ตารางที่ 4-1 ตารางผลการทดลองสำหรับยีนยับยั้ง

StdOrder	Coded Variables				Uncoded Variables				Tcc
	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	
					%	%	°C	dl/g	°C
1	-1	-1	-1	-1	1.3	1.8	214	0.605	154.1
2	1	-1	-1	-1	1.4	1.8	214	0.605	158.5
3	-1	1	-1	-1	1.3	1.9	214	0.605	158.7
4	1	1	-1	-1	1.4	1.9	214	0.605	161.2
5	-1	-1	1	-1	1.3	1.8	216	0.605	157.6
6	1	-1	1	-1	1.4	1.8	216	0.605	160.5
7	-1	1	1	-1	1.3	1.9	216	0.605	160.7
8	1	1	1	-1	1.4	1.9	216	0.605	161.8
9	-1	-1	-1	1	1.3	1.8	214	0.610	156.5
10	1	-1	-1	1	1.4	1.8	214	0.610	159.2
11	-1	1	-1	1	1.3	1.9	214	0.610	158.4
12	1	1	-1	1	1.4	1.9	214	0.610	161.5
13	-1	-1	1	1	1.3	1.8	216	0.610	159.5
14	1	-1	1	1	1.4	1.8	216	0.610	158.6
15	-1	1	1	1	1.3	1.9	216	0.610	161.4
16	1	1	1	1	1.4	1.9	216	0.610	162.6
17	-1	-1	-1	-1	1.3	1.8	214	0.605	155.1
18	1	-1	-1	-1	1.4	1.8	214	0.605	157.1
19	-1	1	-1	-1	1.3	1.9	214	0.605	157.2
20	1	1	-1	-1	1.4	1.9	214	0.605	159.6
21	-1	-1	1	-1	1.3	1.8	216	0.605	158.4
22	1	-1	1	-1	1.4	1.8	216	0.605	159.3
23	-1	1	1	-1	1.3	1.9	216	0.605	160.5
24	1	1	1	-1	1.4	1.9	216	0.605	162.5
25	-1	-1	-1	1	1.3	1.8	214	0.610	156.8
26	1	-1	-1	1	1.4	1.8	214	0.610	159.0
27	-1	1	-1	1	1.3	1.9	214	0.610	157.9
28	1	1	-1	1	1.4	1.9	214	0.610	161.3
29	-1	-1	1	1	1.3	1.8	216	0.610	159.1
30	1	-1	1	1	1.4	1.8	216	0.610	158.3
31	-1	1	1	1	1.3	1.9	216	0.610	160.3
32	1	1	1	1	1.4	1.9	216	0.610	161.2

ตารางที่ 4-1 ตารางผลการทดลองสำหรับยืนยันปัจจัย (ต่อ)

StdOrder	Coded Variables				Uncoded Variables				Tcc
	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	°C
					%	%	°C	dl/g	
33	-1	-1	-1	-1	1.3	1.8	214	0.605	156.2
34	1	-1	-1	-1	1.4	1.8	214	0.605	157.6
35	-1	1	-1	-1	1.3	1.9	214	0.605	158.2
36	1	1	-1	-1	1.4	1.9	214	0.605	160.5
37	-1	-1	1	-1	1.3	1.8	216	0.605	159.6
38	1	-1	1	-1	1.4	1.8	216	0.605	158.3
39	-1	1	1	-1	1.3	1.9	216	0.605	162.3
40	1	1	1	-1	1.4	1.9	216	0.605	162.0
41	-1	-1	-1	1	1.3	1.8	214	0.610	156.3
42	1	-1	-1	1	1.4	1.8	214	0.610	160.3
43	-1	1	-1	1	1.3	1.9	214	0.610	158.2
44	1	1	-1	1	1.4	1.9	214	0.610	161.1
45	-1	-1	1	1	1.3	1.8	216	0.610	159.2
46	1	-1	1	1	1.4	1.8	216	0.610	157.9
47	-1	1	1	1	1.3	1.9	216	0.610	160.0
48	1	1	1	1	1.4	1.9	216	0.610	161.0
49	-1	-1	-1	-1	1.3	1.8	214	0.605	155.0
50	1	-1	-1	-1	1.4	1.8	214	0.605	156.8
51	-1	1	-1	-1	1.3	1.9	214	0.605	156.3
52	1	1	-1	-1	1.4	1.9	214	0.605	161.6
53	-1	-1	1	-1	1.3	1.8	216	0.605	160.4
54	1	-1	1	-1	1.4	1.8	216	0.605	159.2
55	-1	1	1	-1	1.3	1.9	216	0.605	161.3
56	1	1	1	-1	1.4	1.9	216	0.605	161.9
57	-1	-1	-1	1	1.3	1.8	214	0.610	156.2
58	1	-1	-1	1	1.4	1.8	214	0.610	160.2
59	-1	1	-1	1	1.3	1.9	214	0.610	158.0
60	1	1	-1	1	1.4	1.9	214	0.610	161.6
61	-1	-1	1	1	1.3	1.8	216	0.610	158.9
62	1	-1	1	1	1.4	1.8	216	0.610	159.0
63	-1	1	1	1	1.3	1.9	216	0.610	162.1
64	1	1	1	1	1.4	1.9	216	0.610	162.4

1. วิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับยืนยันปัจจัย การวิเคราะห์ข้อมูลความแปรปรวนของ ปัจจัย

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็บสำหรับยืนยันปัจจัย

Term	Effect	Coef	Se Coef	T	P
Constant		159.281	0.09285	1715.44	0.000
DEG	1.662	0.831	0.09285	8.95	0.000
IPA	2.394	1.197	0.09285	12.89	0.000
Temp. R/C	1.925	0.963	0.09285	10.37	0.000
I.V.	-0.438	0.219	0.09285	2.36	0.023
DEG*IPA	0.356	0.178	0.09285	1.92	0.061
DEG*Temp. R/C	-1.337	-0.669	0.09285	-7.20	0.000
DEG*I.V.	-0.013	-0.006	0.09285	-0.07	0.947
IPA*Temp. R/C	0.119	0.059	0.09285	0.64	0.526
IPA*I.V.	-0.269	-0.134	0.09285	-1.45	0.154
Temp. R/C*I.V.	-0.738	-0.369	0.09285	-3.97	0.000
DEG*IPA*Temp. R/C	0.169	0.084	0.09285	0.91	0.368
DEG*IPA*I.V.	0.044	0.022	0.09285	0.24	0.815
DEG*Temp. R/C*I.V.	-0.250	-0.125	0.09285	-1.35	0.185
IPA*Temp. R/C*I.V.	0.319	0.159	0.09285	1.72	0.093
DEG*IPA*Temp. R/C*I.V.	0.219	0.109	0.09285	1.18	0.245

S = 0.742813 PRESS = 47.0844

R-Sq = 90.17% R-Sq(pred) = 82.52% R-Sq(adj) = 87.09%

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก โปรแกรมมินิแท็ปสำหรับชิ้นงานปัจจัย (ต่อ)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	198.256	198.256	49.5639	89.83	0.000
DEG	1	44.222	44.222	44.2225	80.15	0.000
IPA	1	91.681	91.681	91.6806	166.16	0.000
Temp. R/C	1	59.290	59.290	59.2900	107.45	0.000
I.V.	1	3.063	3.063	3.0625	5.55	0.023
2-Way Interactions	6	40.739	40.739	6.7899	12.31	0.000
DEG*IPA	1	2.031	2.031	2.0306	3.68	0.061
DEG*Temp. R/C	1	28.622	28.622	28.6225	51.87	0.000
DEG*I.V.	1	0.003	0.003	0.0025	0.00	0.947
IPA*Temp. R/C	1	0.226	0.226	0.2256	0.41	0.526
IPA*I.V.	1	1.156	1.156	1.1556	2.09	0.154
Temp. R/C*I.V.	1	8.703	8.703	8.7025	15.77	0.000
3-Way Interactions	4	3.112	3.112	0.7780	1.41	0.245
DEG*IPA*Temp. R/C	1	0.456	0.456	0.4556	0.83	0.368
DEG*IPA*I.V.	1	0.031	0.031	0.0306	0.06	0.815
DEG*Temp. R/C*I.V.	1	1.000	1.000	1.0000	1.81	0.185
IPA*Temp. R/C*I.V.	1	1.626	1.626	1.6256	2.95	0.093
4-Way Interactions	1	0.766	0.766	0.7656	1.39	0.245
DEG*IPA*Temp. R/C*I.V.	1	0.766	0.766	0.7656	1.39	0.245
Residual Error	48	26.485	26.485	0.5518		
Pure Error	48	26.485	26.485	0.5518		
Total	63	269.358				

เมื่อทำการนำปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกของเม็ดพลาสติก ไปรวมเป็นค่า Error เพื่อให้แน่ใจว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET นั้นมีอิทธิพลจริงและตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไปทำให้ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4-3 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็ปสำหรับยืนยันปัจจัย หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อผลตอบสนอง

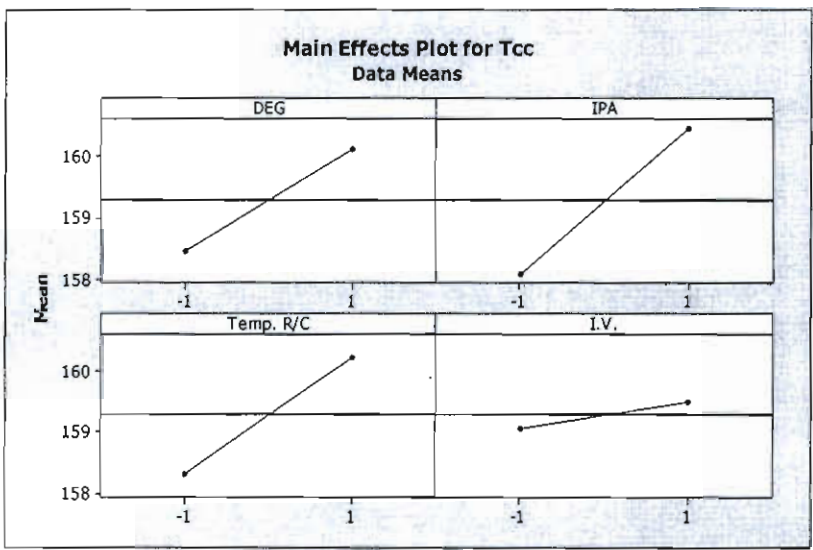
Term	Effect	Coef	Se Coef	T	P
Constant		159.281	0.09622	1655.32	0.000
DEG	1.662	0.831	0.09622	8.64	0.000
IPA	2.394	1.197	0.09622	12.44	0.000
Temp. R/C	1.925	0.963	0.09622	10.00	0.000
I.V.	0.438	0.219	0.09622	2.27	0.027
DEG*Temp. R/C	-1.337	-0.669	0.09622	-6.95	0.000
Temp. R/C*I.V.	-0.738	-0.369	0.09622	-3.830	0.000
S = 0.769790 PRESS = 42.5824					
R-Sq = 87.468 R-Sq (pred) = 84.19% R-Sq (adj) = 86.14%					

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	198.256	198.256	49.5639	83.64	0.000
DEG	1	44.222	44.222	44.2225	74.63	0.000
IPA	1	91.681	91.681	91.6806	154.72	0.000
Temp. R/C	1	59.290	59.290	59.2900	100.05	0.000
I.V.	1	3.063	3.063	3.0625	5.17	0.027
2-Way Interactions	2	37.325	37.325	18.6625	31.49	0.000
DEG*Temp. R/C	1	28.622	28.622	28.6225	48.30	0.000
Temp. R/C*I.V.	1	8.703	8.703	8.7025	14.69	0.000
Residual Error	57	33.777	33.777	0.5926		
Lack of Fit	9	7.292	7.292	0.8102	1.47	0.187
Pure Error	48	26.485	26.485	0.5518		
Total	63	269.358				
3-Way Interactions	4	3.112	3.112	0.7780	1.41	0.245
DEG*IPA*Temp. R/C	1	0.456	0.456	0.4556	0.83	0.368

1.1 พิจารณาผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง

ผลการทดลองจากตารางที่ 4-3 หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อผลตอบสนองทำให้ทราบว่ามีอิทธิพลหลักคือ ความเข้มข้นของ DEG ความเข้มข้นของ IPA อุณหภูมิของ

Rotary crys. และค่าความหนืดของ A-chip ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยหลักเหล่านี้มีอิทธิพลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$



ภาพที่ 4-1 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET

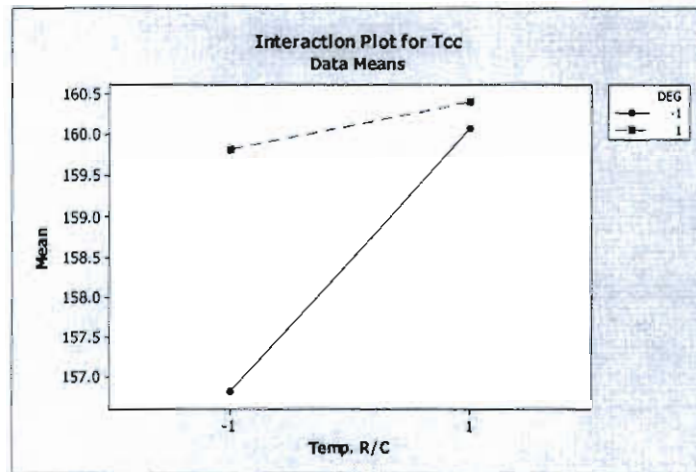
พิจารณาภาพที่ 4-1 พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง มีดังนี้

1. ความเข้มข้นของ DEG ที่ระดับสูงจะส่งผลให้อุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET มีค่าสูงขึ้น
2. ความเข้มข้นของ IPA ที่ระดับสูงจะส่งผลให้อุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET มีค่าสูงขึ้น
3. อุณหภูมิของ Rotary crys. ที่ระดับสูงจะส่งผลให้อุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET มีค่าสูงขึ้น
4. ค่าความหนืดของ A-chip ที่ระดับสูงจะส่งผลให้อุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย

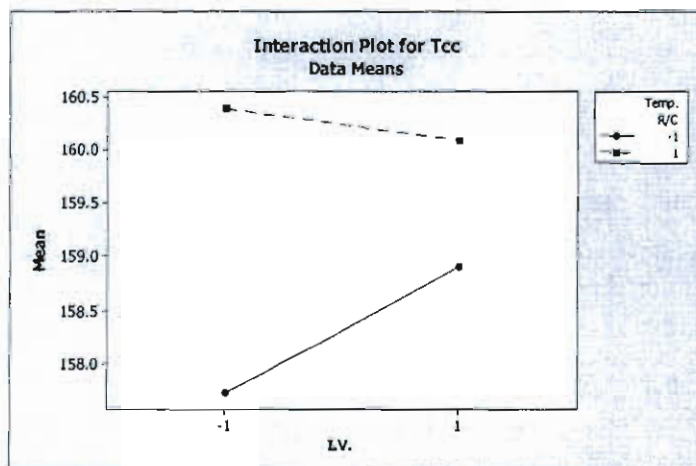
1.2 พิจารณาผลกระทบของปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง

พิจารณาผลกระทบของปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ดังภาพที่ 4-2 และภาพที่ 4-3 พบว่าผลของปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ DEG กับอุณหภูมิของ Rotary crys. และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิของ Rotary crys. กับค่าความหนืดของ A-chip มีค่า P-Value

น้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$



ภาพที่ 4-2 แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ DEG กับอุณหภูมิของ Rotary crys.

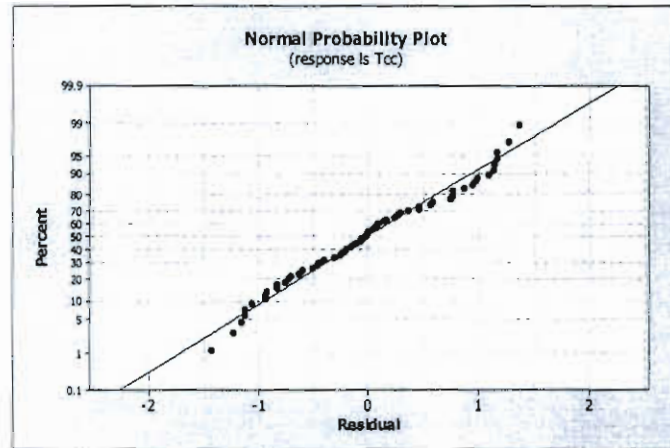


ภาพที่ 4-3 แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิของ Rotary crys กับค่าความหนืดของ A-chip

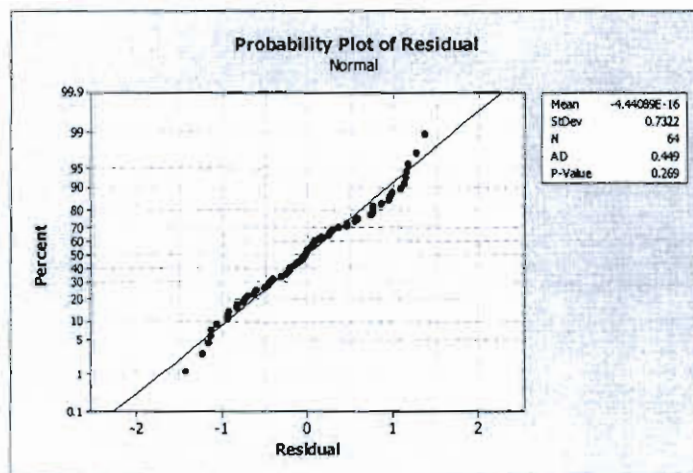
2. การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทดลอง

2.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของ Residuals เพื่อวิเคราะห์ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติและมีความเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ จากการพิจารณา

การกระจายของค่า Residual ได้ผลดังภาพที่ 4-4 ซึ่งพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และค่า P-value = 0.269 บ่งชี้ได้ว่าไม่สามารถปฏิเสธได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ดังภาพที่ 4-5



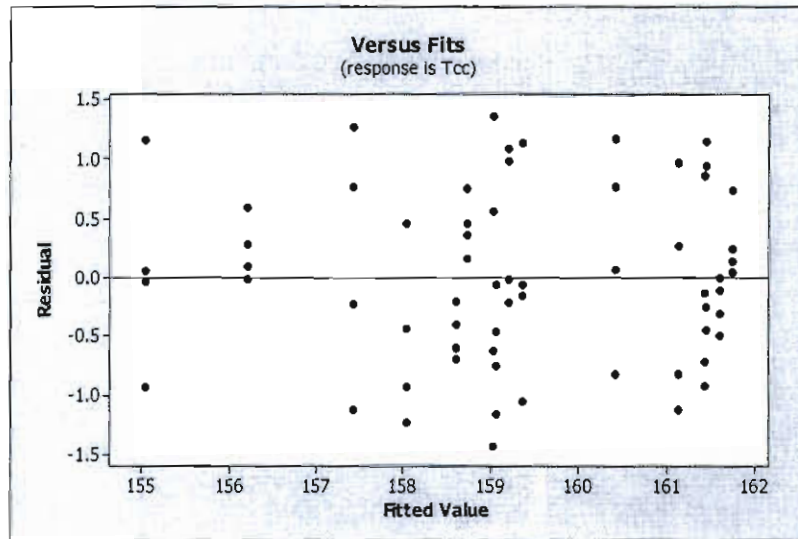
ภาพที่ 4-4 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 4-5 แสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal probability plot: NOPP) ของ Residuals

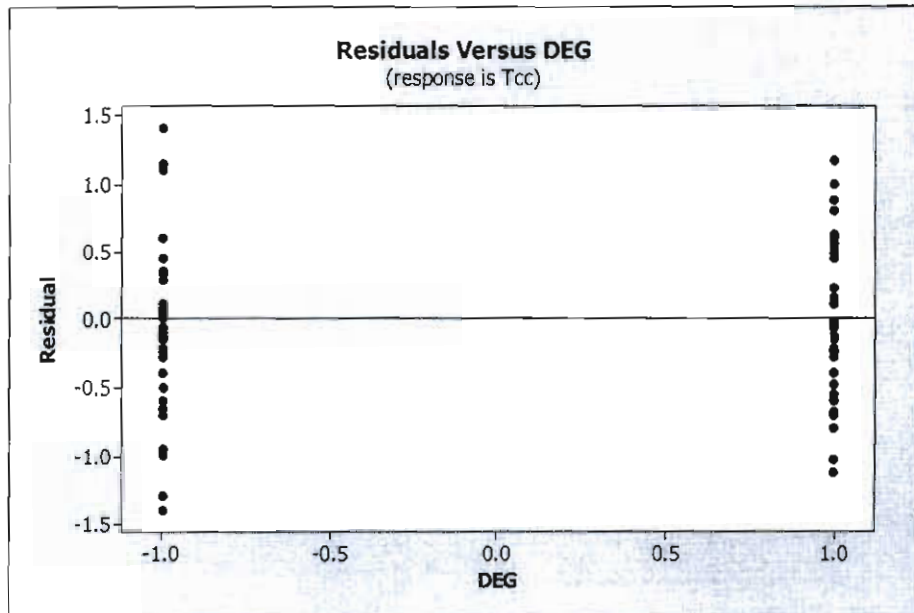
2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independence) ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนดังภาพที่ 4-6 พบว่าการกระจายตัว

ของความคลาดเคลื่อน (Residuals) กระจายตัวในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน มีรูปแบบที่เป็นอิสระไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independence) จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน

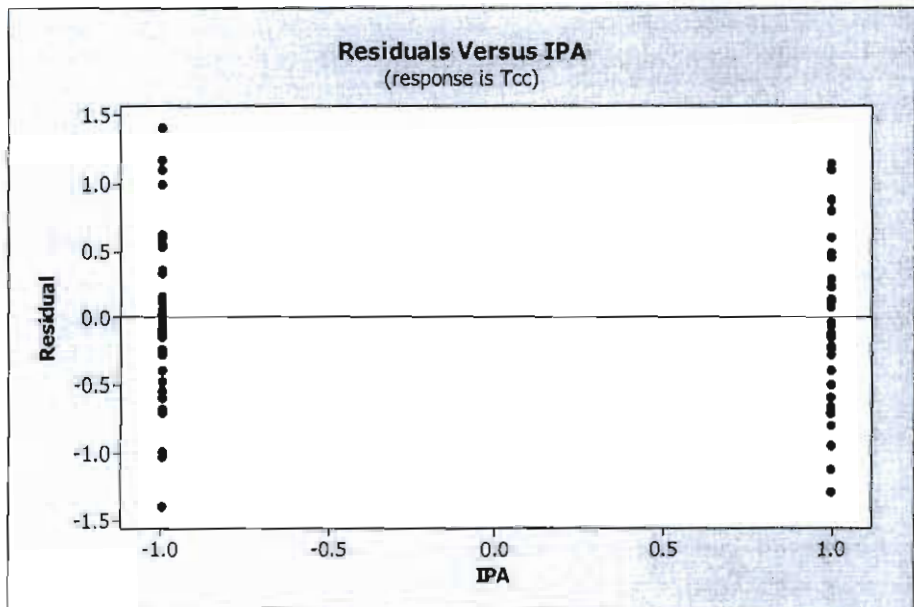


ภาพที่ 4-6 แสดงการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน Fitted value

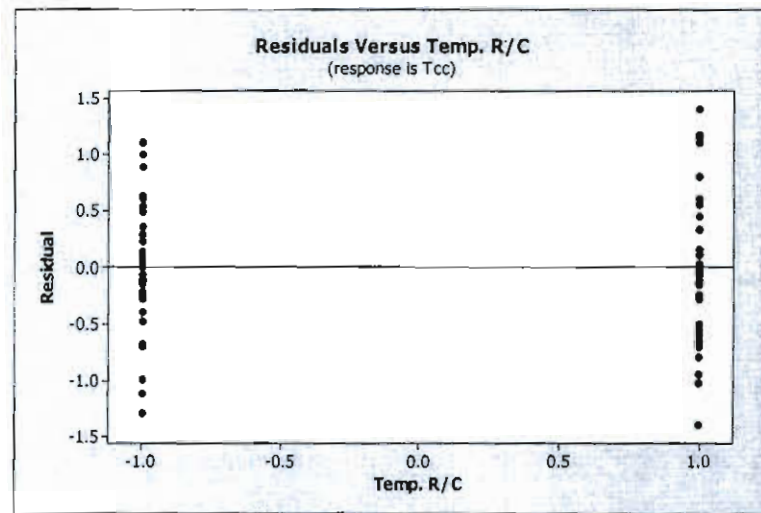
2.3 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ Residuals โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจาย จากภาพที่ 4-7 ถึงภาพที่ 4-10 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) เทียบกับระดับของปัจจัยทุกตัว ซึ่งพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนมีค่าใกล้เคียงกัน



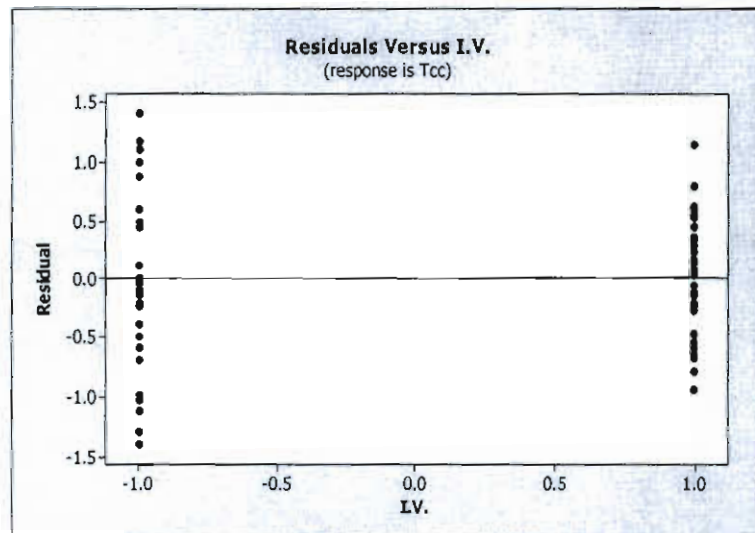
ภาพที่ 4-7 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับความเข้มข้น DEG



ภาพที่ 4-8 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับความเข้มข้น IPA



ภาพที่ 4-9 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับอุณหภูมิ Rotary crys.



ภาพที่ 4-10 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าความหนืดของ A-chip

2.4 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability, σ^2) โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายจากภาพที่ 4-6 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ Fitted Value พบว่าความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนมีความเสถียรอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และไม่พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเข้าข่ายลักษณะแบบกรวยปลายเปิด หรือรูปแบบลำโพง (Outward-opening funnel or Megaphone) แต่อย่างใด

จากภาพที่ 4-7 ถึงภาพที่ 4-10 พบว่ารูปแบบของค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการ $\epsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ทุกประการ ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือได้

ผลการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นส่วนโค้งและผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย

ตารางที่ 4-4 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นส่วนโค้งและผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย

SidOrder	Coded Variables				Uncoded Variables				Tcc
	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	
					%	%	°C	d/g	°C
65	0	0	0	0	1.35	1.85	215	0.608	160.6
66	0	0	0	0	1.35	1.85	215	0.608	159.8
67	0	0	0	0	1.35	1.85	215	0.608	160.6
68	0	0	0	0	1.35	1.85	215	0.608	160.2
69	0	0	0	0	1.35	1.85	215	0.608	160.8

1. วิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้งและผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย

ตารางที่ 4-5 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็ปสำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง
และผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย

Term	Effect	Coef	Se Coef	T	P
Constant		159.281	0.09028	1764.30	0.000
DEG	1.662	0.831	0.09028	9.21	0.000
IPA	2.394	1.197	0.09028	13.26	0.000
Temp. R/C	1.925	0.963	0.09028	10.66	0.000
I.V.	0.438	0.219	0.09028	2.42	0.019
DEG*IPA	0.356	0.178	0.09028	1.97	0.054
DEG*Temp. R/C	-1.337	-0.669	0.09028	-7.41	0.000
DEG*I.V.	-0.013	-0.006	0.09028	-0.07	0.945
IPA*Temp. R/C	0.119	0.059	0.09028	0.66	0.514
IPA*I.V.	-0.269	-0.134	0.09028	-1.49	0.143
Temp. R/C*I.V.	-0.738	-0.369	0.09028	-4.08	0.000
DEG*IPA*Temp. R/C	0.169	0.084	0.09028	0.93	0.354
DEG*IPA*I.V.	0.044	0.022	0.09028	0.24	0.810
DEG*Temp. R/C*I.V.	-0.250	-0.125	0.09028	-1.38	0.172
IPA*Temp. R/C*I.V.	0.319	0.159	0.09028	1.77	0.083
DEG*IPA*Temp. R/C*I.V.	0.219	0.109	0.09028	1.21	0.231
Ct pt		1.119	0.33538	3.34	0.002

S = 0.722243 PRESS = 54.2032

R-Sq = 90.17% R-Sq (pred) = 80.35% R-Sq (adj) = 87.14%

ตารางที่ 4-5 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็ปสำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง และผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (ต่อ)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	198.256	198.256	49.5639	95.02	0.000
DEG	1	44.222	44.222	44.2225	84.78	0.000
IPA	1	91.681	91.681	91.6806	175.76	0.000
Temp. R/C	1	59.290	59.290	59.2900	113.66	0.000
I.V.	1	3.063	3.063	3.0625	5.87	0.019
2-Way Interactions	6	40.739	40.739	6.7899	13.02	0.000
DEG*IPA	1	2.031	2.031	2.0306	3.89	0.054
DEG*Temp. R/C	1	28.622	28.622	28.6225	54.87	0.000
DEG*I.V.	1	0.003	0.003	0.0025	0.00	0.945
IPA*Temp. R/C	1	0.226	0.226	0.2256	0.43	0.514
IPA*I.V.	1	1.156	1.156	1.1556	2.22	0.143
Temp. R/C*I.V.	1	8.703	8.703	8.7025	16.68	0.000
3-Way Interactions	4	3.112	3.112	0.7780	1.49	0.218
DEG*IPA*Temp. R/C	1	0.456	0.456	0.4556	0.87	0.354
DEG*IPA*I.V.	1	0.031	0.031	0.0306	0.06	0.810
DEG*Temp. R/C*I.V.	1	1.000	1.000	1.0000	1.92	0.172
IPA*Temp. R/C*I.V.	1	1.626	1.626	1.6256	3.12	0.083
4-Way Interactions	1	0.766	0.766	0.7656	1.47	0.231
DEG*IPA*Temp. R/C*I.V.	1	0.766	0.766	0.7656	1.47	0.231
Curvature	1	5.805	5.805	5.8045	11.13	0.002
Residual Error	52	27.125	27.125	0.5216		
Pure Error	52	27.125	27.125	0.5216		
Total	68	275.802				

เมื่อทำการนำปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกของเม็ดพลาสติก ไปรวมเป็นค่า Error เพื่อให้แน่ใจว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากถังของเม็ดพลาสติก PET นั้นมีอิทธิพลจริงและตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไปทำให้ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4-6 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็ปสำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง และผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อผลตอบสนอง

Term	Effect	Coef	Se Coef	T	P
Constant		159.281	0.09389	1696.42	0.000
DEG	1.662	0.831	0.09389	8.85	0.000
IPA	2.394	1.197	0.09389	12.75	0.000
Temp. R/C	1.925	0.963	0.09389	10.25	0.000
I.V.	0.438	0.219	0.09389	2.3	0.023
DEG*Temp. R/C	-1.337	-0.669	0.09389	-7.12	0.000
Temp. R/C*I.V.	-0.738	-0.369	0.09389	-3.93	0.000
Ct pt	1.119		0.34880	3.21	0.002

S = 0.751140 PRESS = 49.7011

R-Sq = 87.52% R-Sq (pred) = 81.98% R-Sq (adj) = 86.09%

ตารางที่ 4-6 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็ปสำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง และผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อผลตอบสนอง (ต่อ)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	198.256	198.256	49.5639	87.85	0.000
DEG	1	44.222	44.222	44.2225	78.38	0.000
IPA	1	91.681	91.681	91.6806	162.49	0.000
Temp. R/C	1	59.290	59.290	59.2900	105.08	0.000
I.V.	1	3.063	3.063	3.0625	5.43	0.023
2-Way Interactions	2	37.325	37.325	18.6625	33.08	0.000
DEG*Temp. R/C	1	28.622	28.622	28.6225	50.73	0.000
Temp. R/C*I.V.	1	8.703	8.703	8.7025	15.42	0.000
Curvature	1	5.805	5.805	5.8045	10.29	0.002
Residual Error	61	34.417	34.417	0.5642		
Lack of Fit	9	7.292	7.292	0.8102	1.55	1.154
Pure Error	52	27.125	27.125	0.5216		
Total	68	275.802				

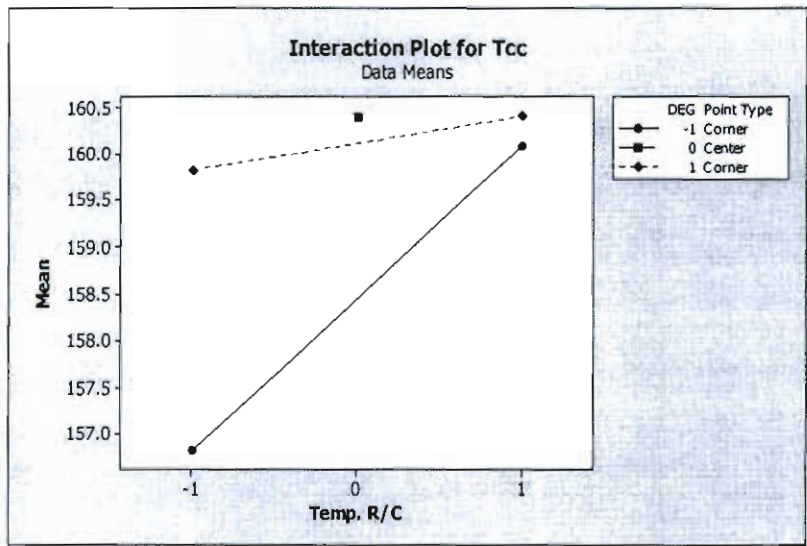
1.1 พิจารณาผลทดสอบความเป็นส่วนโค้งของปัจจัย

ผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Curvature) มีค่า P-value เท่ากับ 0.002 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าความสัมพันธ์ของปัจจัยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$

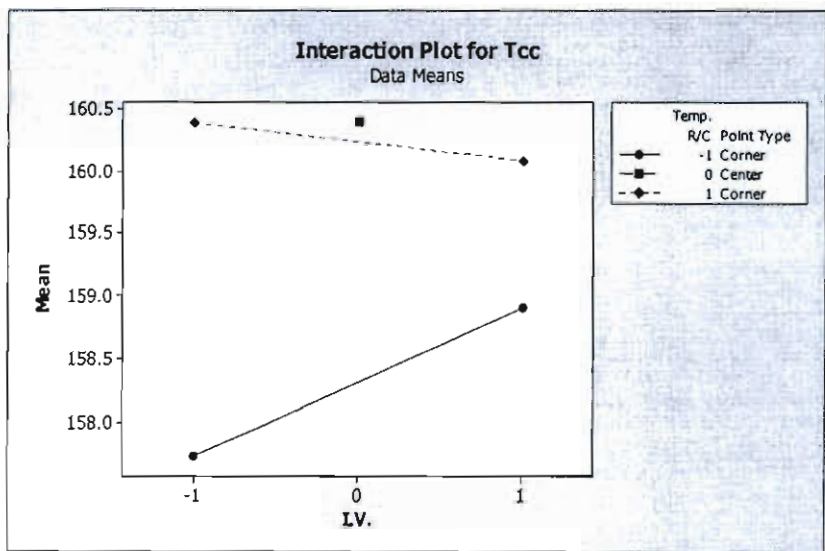
1.2 พิจารณาผลกระทบของปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง

พิจารณาผลกระทบของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย ดังภาพที่ 4-14 และภาพที่ 4-15 พบว่าผลของปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ DEG กับอุณหภูมิของ Rotary Crys. และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิของ Rotary Crys. (ปัจจัยที่ควบคุมได้) กับค่าความหนืดของ A-chip (ปัจจัยรบกวน) มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมีผลต่ออุณหภูมิ

การดกผลึกจากกลับ ของเม็ดพลาสติก PET อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ เมื่อพบว่าระดับปัจจัย มีความสัมพันธ์ลักษณะเป็นเส้น โค้งและผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมีผลต่อผลตอบสนอง ผู้ดำเนินการวิจัยจึงเลือกวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ CCD เพื่อกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสม



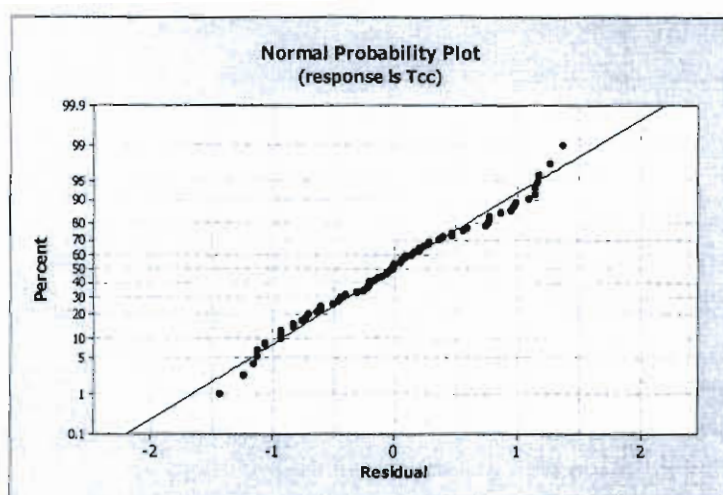
ภาพที่ 4-11 แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ DEG กับอุณหภูมิของ Rotary crys.



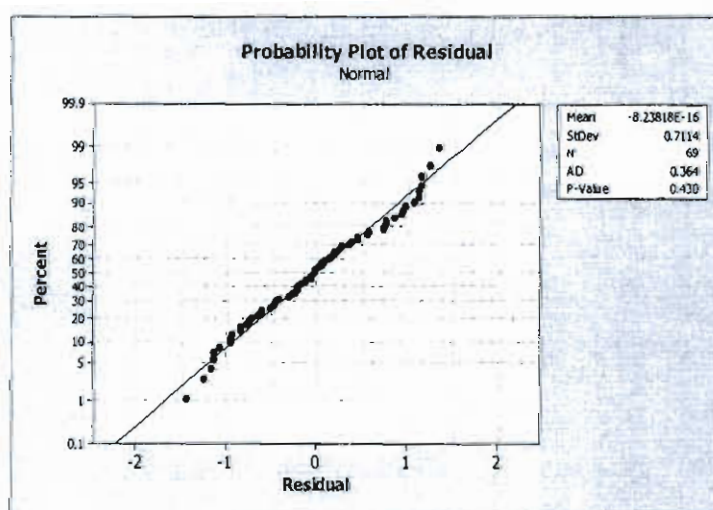
ภาพที่ 4-12 แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิของ Rotary crys กับค่าความหนืดของ A-chip

2. การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทดลอง

2.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ของ Residuals เพื่อวิเคราะห์ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติและมีความเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ จากการพิจารณาการกระจายของค่า Residual ได้ผลดังภาพที่ 4-13 ซึ่งพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และค่า P-value = 0.430 บ่งชี้ได้ว่าไม่สามารถปฏิเสธได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ดังภาพที่ 4-14

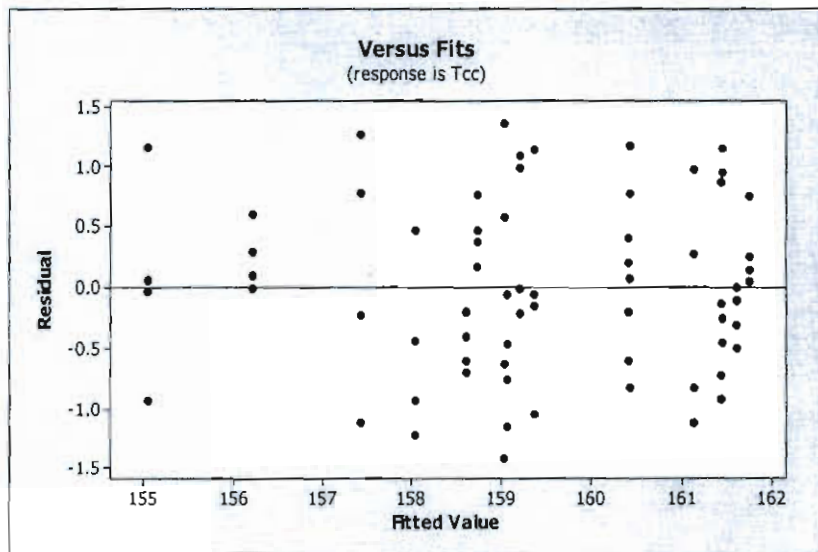


ภาพที่ 4-13 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



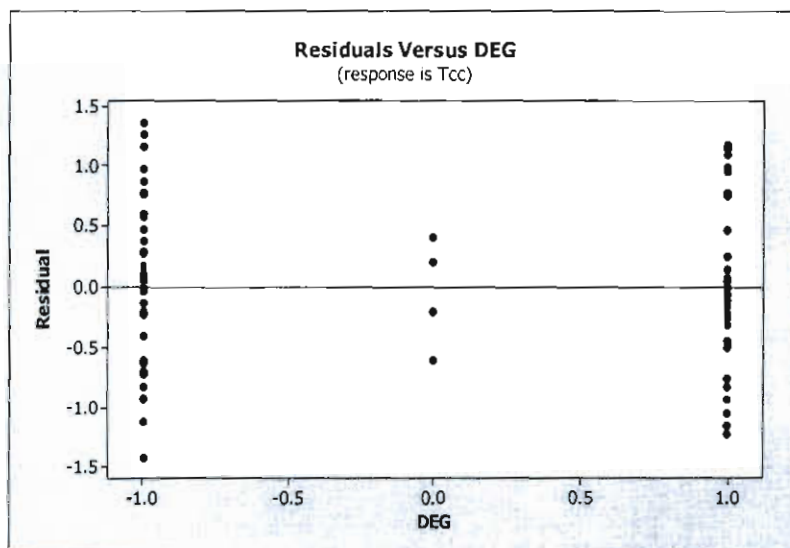
ภาพที่ 4-14 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของ Residuals

2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนดังภาพที่ 4-15 พบว่าการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนกระจายตัวในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน มีรูปแบบที่เป็นอิสระไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน

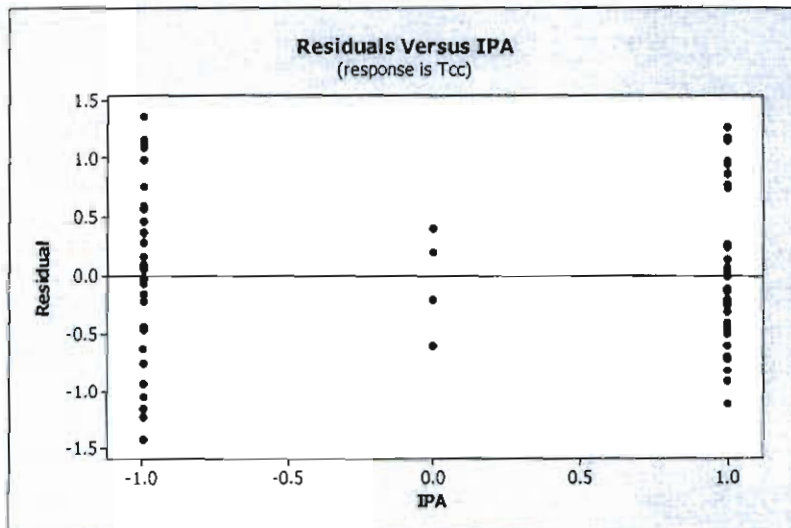


ภาพที่ 4-15 แสดงการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน Fitted value สำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง

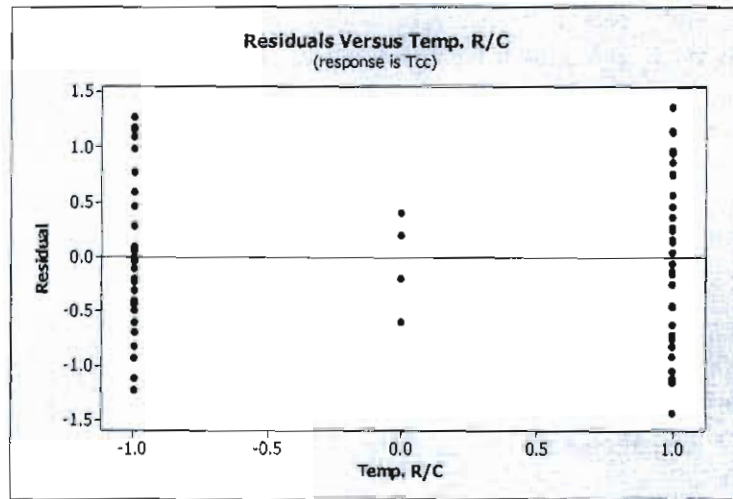
2.3 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ Residuals โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายจากภาพที่ 4-16 ถึงภาพที่ 4-19 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับระดับของปัจจัยทุกตัว ซึ่งพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนมีค่าใกล้เคียงกัน



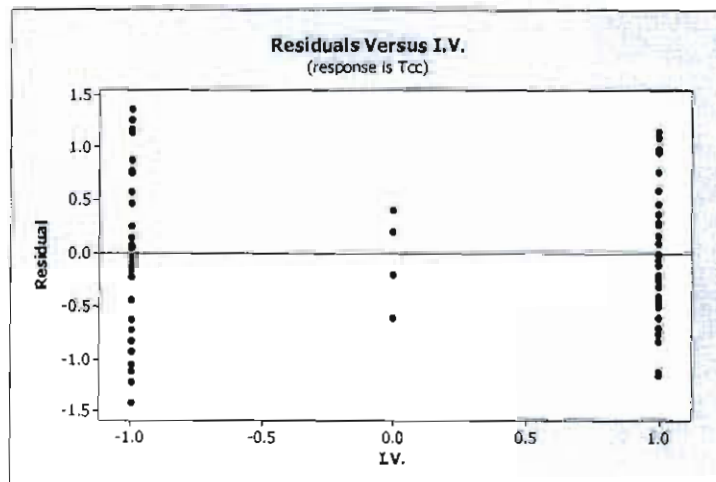
ภาพที่ 4-16 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับความเข้มข้น DEG สำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง



ภาพที่ 4-17 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับความเข้มข้น IPA สำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง



ภาพที่ 4-18 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับอุณหภูมิ Rotary crys.
สำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง



ภาพที่ 4-19 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าความหนืดของ A-chip
สำหรับทดสอบความเป็นส่วนโค้ง

2.4 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance stability, σ^2) โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายจากภาพที่ 4-18 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ Fitted value พบว่าความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนมีความเสถียรอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และไม่พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเข้าข่ายลักษณะแบบกรวยปลายเปิด หรือรูปแบบลำโพงแต่อย่างใด

จากภาพที่ 4-16 ถึงภาพที่ 4-19 พบว่ารูปแบบของค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการ $\epsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ทุกประการ ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือได้

ออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ CCD (Central Composite Design) เพื่อนำไปทำการทดลอง

ตารางที่ 4-7 บันทึกผลการทดลองสำหรับการกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

StdOrder	Coded Variables				Uncoded Variables				Tcc
	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	
					%	%	°C	dl/g	°C
70	-2	0	0	0	1.25	1.85	215	0.608	154.3
71	2	0	0	0	1.45	1.85	215	0.608	158.5
72	0	-2	0	0	1.35	1.75	215	0.608	157.1
73	0	2	0	0	1.35	1.95	215	0.608	162.4
74	0	0	-2	0	1.35	1.85	213	0.608	159.9
75	0	0	2	0	1.35	1.85	217	0.608	163.2
76	-2	0	0	0	1.25	1.85	215	0.608	154.8
77	2	0	0	0	1.45	1.85	215	0.608	158.2
78	0	-2	0	0	1.35	1.75	215	0.608	156.9
79	0	2	0	0	1.35	1.95	215	0.608	163.0
80	0	0	-2	0	1.35	1.85	213	0.608	159.4
81	0	0	2	0	1.35	1.85	217	0.608	164.9

1. วิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับการกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม
การวิเคราะห์ข้อมูลความแปรปรวนของปัจจัย

ตารางที่ 4-8 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็ปสำหรับการกำหนดระดับของปัจจัย
ที่เหมาะสม

Term	Coef	Se Coef	T	P
Constant	160.400	0.32113	499.486	0.000
DEG	0.855	0.08028	10.650	0.000
IPA	1.242	0.08028	15.477	0.000
Temp. R/C	0.990	0.08028	12.331	0.000
I.V.	0.219	0.08976	2.437	0.018
DEG*DEG	-0.987	0.12042	-8.200	0.000
IPA*IPA	-0.137	0.12042	-1.142	0.258
Temp. R/C* Temp. R/C	-0.363	0.12042	3.010	0.004
I.V.*I.V.	-0.356	0.19665	-1.812	0.075
DEG*IPA	-0.178	0.08976	1.984	0.051
DEG*Temp. R/C	0.669	0.08976	-7.451	0.000
DEG*I.V.	0.006	0.08976	-0.070	0.945
IPA*Temp. R/C	0.059	0.08976	0.661	0.511
IPA*I.V.	-0.134	0.08976	-1.497	0.139
Temp. R/C*I.V.	-0.369	0.08976	-4.108	0.000

S = 0.718069 PRESS = 50.3350

R-Sq = 91.57% R-Sq (pred) = 87.53% R-Sq (adj) = 89.78%

ตารางที่ 4-8 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็ปสำหรับการกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม (ต่อ)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	369.632	369.632	26.4023	51.20	0.000
Linear	4	263.457	263.457	65.8643	127.74	0.000
Square	4	65.436	65.436	16.3589	31.73	0.000
Interaction	6	40.739	40.739	6.7899	13.17	0.000
Residual Error	66	34.031	34.031	0.5156		
Lack-of-fit	8	4.966	4.966	0.6208	1.24	0.294
Pure Error	58	29.065	29.065	0.5011		
Total	80	403.663				

Estimated Regression Coefficients for Tcc using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	160.400
DEG	0.855000
IPA	1.24250
Temp. R/C	0.990000
I.V.	0.218750
DEG*DEG	-0.987500
IPA*IPA	-0.137500
Temp. R/C*Temp. R/C	0.362500
I.V.*I.V.	-0.356250
DEG*IPA	0.178125
DEG*Temp. R/C	-0.668750
DEG*I.V.	-0.00625000
IPA*Temp. R/C	0.0593750
IPA*I.V.	-0.134375
Temp. R/C*I.V.	-0.368750

เมื่อทำการนำปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกของเม็ดพลาสติก ไปรวมเป็นค่า Error เพื่อให้แน่ใจว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET นั้นมีอิทธิพลจริงและตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไปทำให้ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4-9 แสดงผลจากการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็ปสำหรับการกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อผลตอบสนอง

Term	Coef	Se Coef	T	P
Constant	159.879	0.19679	812.423	0.000
DEG	0.855	0.08330	10.264	0.000
IPA	1.242	0.08330	14.916	0.000
Temp. R/C	0.990	0.08330	11.885	0.000
I.V.	0.219	0.09313	2.349	0.022
DEG*DEG	-0.935	0.11183	-8.361	0.000
Temp. R/C* Temp. R/C	-0.415	0.11183	3.711	0.000
DEG*Temp. R/C	0.669	0.09313	-7.181	0.000
Temp. R/C*I.V.	-0.369	0.09313	-3.959	0.000

S = 0.745046 PRESS = 50.4364

R-Sq = 90.10% R-Sq (pred) = 87.51% R-Sq (adj) = 89.00%

ตารางที่ 4-9 แสดงผลจากการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็ปสำหรับการกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อผลตอบสนอง (ต่อ)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	369.632	369.632	26.4023	51.20	0.000
Linear	4	263.457	263.457	65.8643	127.74	0.000
Square	4	65.436	65.436	16.3589	31.73	0.000
Interaction	6	40.739	40.739	6.7899	13.17	0.000
Residual Error	66	34.031	34.031	0.5156		
Lack-of-fit	8	4.966	4.966	0.6208	1.24	0.294
Pure Error	58	29.065	29.065	0.5011		
Total	80	403.663				

Estimated Regression Coefficients for Tcc using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	159.879
DEG	0.855000
IPA	1.24250
Temp. R/C	0.990000
I.V.	0.218750
DEG*DEG	-0.935029
Temp. R/C*Temp. R/C	0.414971
DEG*Temp. R/C	-0.668750
Temp. R/C*I.V.	-0.368750

เมื่อพิจารณาค่า P-value จากตารางที่ 4-8 พบว่าปัจจัยที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ สรุปปัจจัยที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET ภายใต้ระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ เป็นดังนี้

1. ปัจจัยหลัก (Main effects) คือ

1.1 ความเข้มข้นของ DEG

1.2 ความเข้มข้นของ IPA

1.3 อุณหภูมิของ Rotary crystallizer

1.4 ค่าความหนืดของ Amorphus chip

2. ปัจจัยร่วม (Interaction effect) ที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากถ้ำของเม็ดพลาสติก PET คือ

2.1 ปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ DEG กับอุณหภูมิของ Rotary crystallizer

2.2 ปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิของ Rotary crystallizer กับค่าความหนืดของ

Amorphus chip

เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิของ Rotary Crystallizer (ปัจจัยที่ควบคุมได้) กับ ค่าความหนืดของ Amorphus chip (ปัจจัยรบกวน) พบว่าผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยรบกวนมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

สร้างสมการตัวแทนคณิตศาสตร์

พิจารณาสมการถดถอยที่สร้างอยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์เป็นสมการแบบ Second order model ซึ่งจะทำให้ได้ Regression Model แบบ RPD ดังนี้

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 - \hat{\beta}_1 x_1^2 + \hat{\beta}_3 x_3^2 - \hat{\beta}_{13} x_1 x_3 + \hat{\gamma}_1 z - \hat{\delta}_{31} x_3 z \quad (4-1)$$

แทนค่าสมการที่ (4-1) ด้วยค่า Coefficient จากตารางที่ 4-7 ได้ดังนี้

$$\hat{y} = 159.9 + 0.86x_1 + 1.24x_2 + 0.99x_3 - 0.94x_1^2 + 0.42x_3^2 - 0.67x_1x_3 + 0.22z - 0.37x_3z \quad (4-2)$$

เมื่อ

x_1 = ความเข้มข้นของ DEG (เปอร์เซ็นต์)

x_2 = ความเข้มข้นของ IPA (เปอร์เซ็นต์)

x_3 = อุณหภูมิของ Rotary Crys. (องศาเซลเซียส)

z = I.V. ของเม็ด A-chip (เดซิลิตรต่อกรัม)

1. สร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับค่าคาดหมายของตัวแปรตอบสนอง y ที่ตัดผลของปัจจัยรบกวน คือ

$$E_z[y(x, z)] = 159.9 + 0.86x_1 + 1.24x_2 + 0.99x_3 - 0.94x_1^2 + 0.42x_3^2 - 0.67x_1x_3 \quad (4-3)$$

2. สร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนอง y คือ

$$V_z[y(x, z)] = \sigma_z^2(0.22 - 0.37x_3)^2 + \sigma^2 \quad (4-4)$$

เมื่อ

$$\sigma^2 = 0.5551 \text{ (ค่า Mean square ของ Residual error ที่ได้จากโปรแกรมมินิแท็บ)}$$

$\sigma_z^2 = 0$ (จากข้อมูลในอดีต ค่าความหนืดของ A-chip มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.0022 เดซิเมตรต่อกรัม ความแปรปรวนจึงประมาณเท่ากับ 0)

จากนั้นแทนค่าลงในสมการ 4-4 จะได้

$$V_z[y(x, z)] = 0.5551 \quad (4-5)$$

ทำการแก้สมการหาค่าตัวแปร x_1, x_2, x_3 ด้วย Premium solver แสดงผลดังหัวข้อ 4

2. วิเคราะห์ค่าความมีนัยสำคัญของการถดถอยของสมการ (Regression)

การวิเคราะห์จะพิจารณาจากการทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบ ในที่นี้คือค่าอุณหภูมิการคกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET กับเซตย่อยของตัวแปรถดถอยหรือไม่ สมมติฐานที่เหมาะสมคือ

$$H_0: \beta_1 = \beta_2$$

$$H_1: \beta_i \neq 0 \text{ for at least one } i$$

$$\text{กำหนดให้ค่า } \alpha = 0.05$$

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้ายอมรับสมมติฐานหลัก (P-Value > α) และสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้น สมการทางคณิตศาสตร์ที่กำลังพิจารณาอยู่ก็ไม่ควรจะถูกนำมาพิจารณาอีกต่อไป และหากมีการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (P-Value < α) จะบอกให้ทราบว่าอย่างน้อยที่สุดตัวแปรในสมการถดถอยหนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ ผลการวิเคราะห์จาก ANOVA โดยอาศัยผลจากโปรแกรมมินิแท็บ พบว่าค่า P-value < 0.05 แสดงว่า ตัวแปรในสมการถดถอยมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์

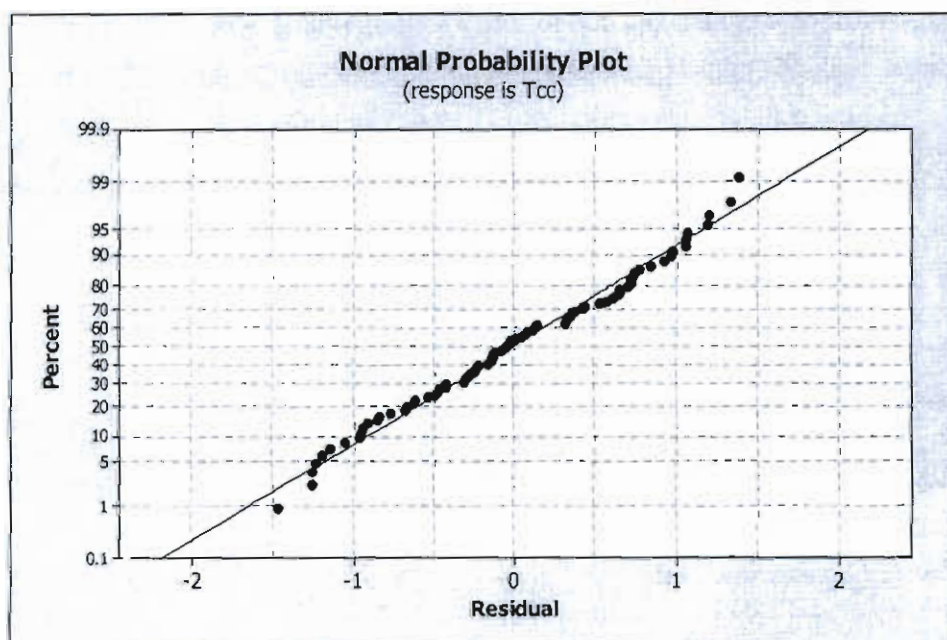
ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนองหรือตัวแปรตาม (y) ได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้นค่า R^2 ยิ่งมากสมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2 Adj) ตามปกติแล้วมักจะไม่ใช่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของตัวแปรเพิ่มขึ้นในแบบจำลอง แต่ในความเป็นจริงถ้าเพิ่มตัวแปรที่ไม่จำเป็นลงไปในการค่าของ R^2 Adj จะมีค่าลดลงเสมอ

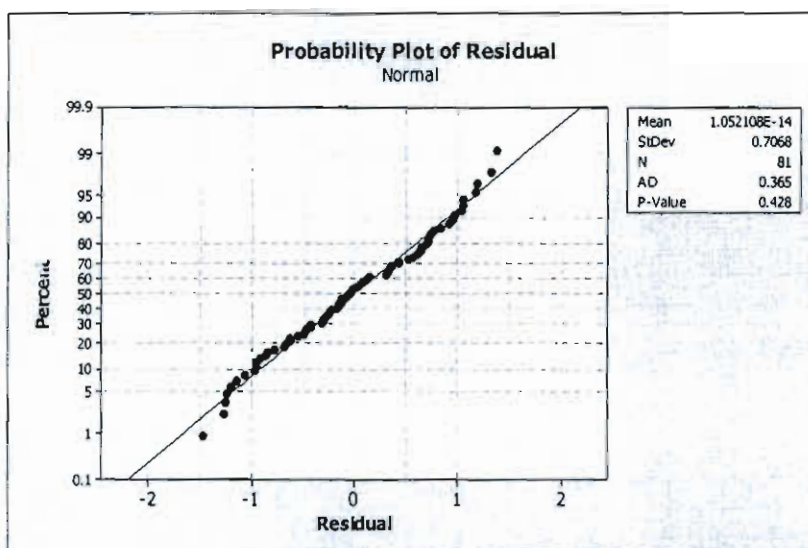
จากข้อมูลที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมมินิแท็บดังตารางที่ 4-25 พบว่าค่า $R^2 = 90.10\%$ และค่า R^2 Adj = 89.00% ดังนั้นจึงยอมรับว่าสมการถดถอยที่สร้างอยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์เป็นสมการแบบ Second order model สามารถนำไปใช้ได้

3. การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทดลอง

3.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ของ Residuals เพื่อวิเคราะห์ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติและมีความเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ จากการพิจารณาการกระจายของค่า Residual ได้ผลดังภาพที่ 4-20 ซึ่งพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และค่า P-value = 0.428 บ่งชี้ได้ว่าไม่สามารถปฏิเสธได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ดังภาพที่ 4-21

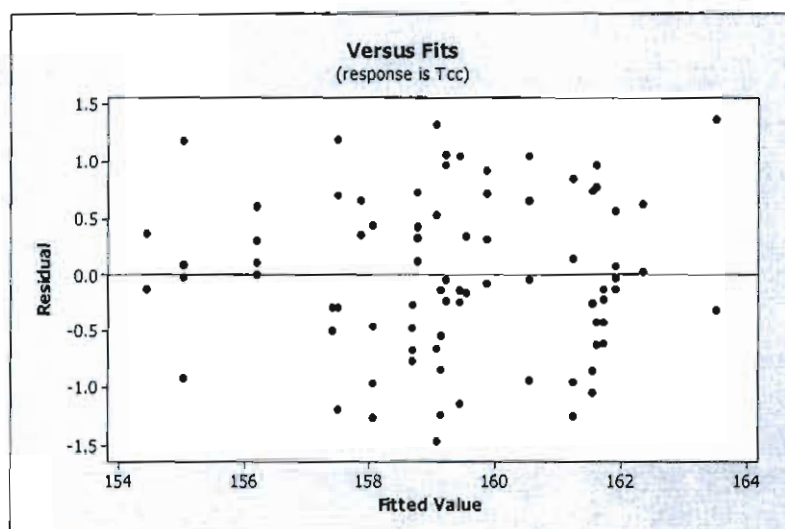


ภาพที่ 4-20 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



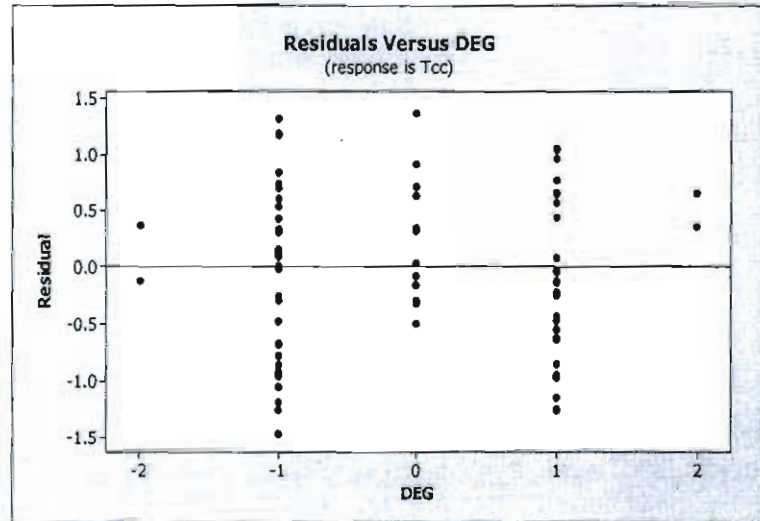
ภาพที่ 4-21 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ ของ Residuals

3.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อพิจารณาการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนดังภาพที่ 4-22 พบว่าการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนกระจายตัวในค่านับและด้านลบมีความสมดุลกัน มีรูปแบบที่เป็นอิสระไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน

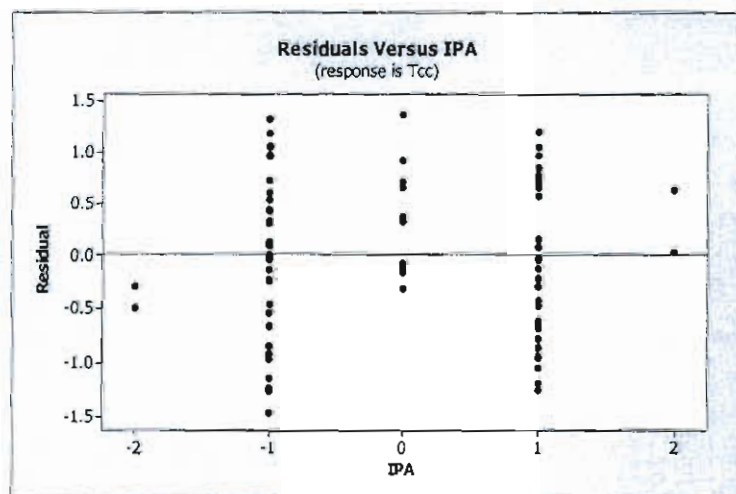


ภาพที่ 4-22 แสดงการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน Fitted value สำหรับกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

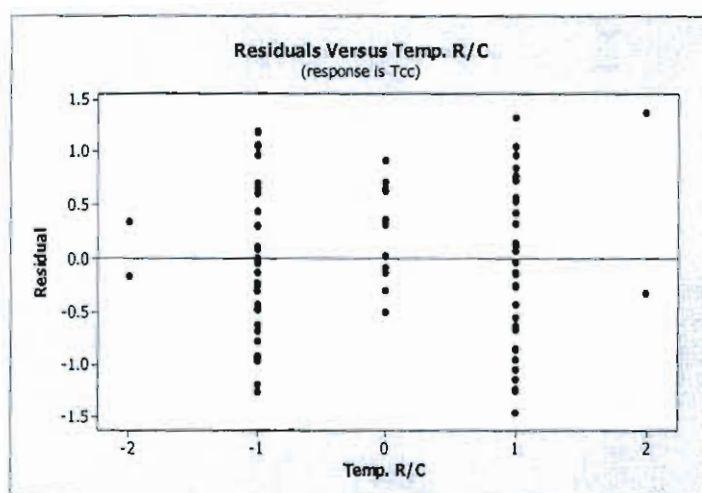
3.3 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ Residuals โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายจาก ภาพที่ 4-23 ถึงภาพที่ 4-26 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับระดับของ ปัจจัยทุกตัว ซึ่งพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่กระจายในด้านบวก และด้านลบมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าคุณค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนมีค่าใกล้เคียงกัน



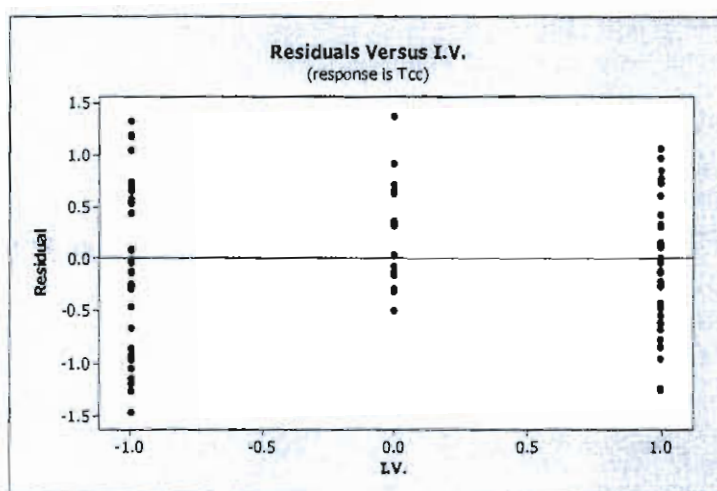
ภาพที่ 4-23 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับความเข้มข้น DEG สำหรับกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม



ภาพที่ 4-24 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับความเข้มข้น IPA สำหรับกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม



ภาพที่ 4-25 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับอุณหภูมิ Rotary crys. สำหรับกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม



ภาพที่ 4-26 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าความหนืดของ A-chip สำหรับกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

3.4 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability, σ^2) โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายจากภาพที่ 4-22 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ Fitted Value พบว่าความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนมีความเสถียรอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และไม่พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเข้าข่ายลักษณะแบบกรวยปลายเปิด หรือรูปแบบลำโพงแต่อย่างใด

จากภาพที่ 4-23 ถึงภาพที่ 4-26 พบว่ารูปแบบของค่าความคลาดเคลื่อน ที่ได้จากข้อมูล ในการทดลองเป็นไปตามหลักการ $\epsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ ทุกประการ ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลการทดลอง ชุดนี้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือได้

4. การวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมของปัจจัย

การวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยควบคุมได้ 3 ปัจจัย โดยการสร้าง Nonlinear programming model ด้วย Premium solver เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของ

เม็ดพลาสติก PET อยู่ระหว่าง 156-164 °C เนื่องจากเป็นข้อกำหนดของลูกค้า ซึ่งสามารถ เขียนเป็นสมการเพื่อหาคำตอบได้ดังนี้

สมการเป้าหมาย

$$\text{Min Variance} = 0.5551 - 0X_3^2 \quad (4-6)$$

ขอบข่าย

$$156 \leq 159.9 + 0.86x_1 + 1.24x_2 + 0.99x_3 - 0.94x_1^2 + 0.42x_3^2 - 0.67x_1x_3 \leq 164 \quad (4-7)$$

$$-1 \leq x_1 \leq 1 \quad (4-8)$$

$$-1 \leq x_2 \leq 1 \quad (4-9)$$

$$-1 \leq x_3 \leq 1 \quad (4-10)$$

ได้ผลดังภาพที่ 4-28

	Constant	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_3^2	$x_1 \cdot x_3$				
	1	0.00	0.00	0.00	0	0	0				
$V_i(y)$	0.5551	0	0	0	0	0	0				
S.T.	$E_i(y)$	159.9	0.86	1.24	0.99	-0.94	0.42	-0.67	159.9	<=	164
		159.9	0.86	1.24	0.99	-0.94	0.42	-0.67	159.9	>=	156
		1							0	>=	-1
			1						0	>=	-1
				1					0	>=	-1
		1							0	<=	1
			1						0	<=	1
				1					0	<=	1

Min V(y) = 0.5551

ภาพที่ 4-27 แสดงระดับที่เหมาะสมของ 3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของ เม็ดพลาสติก PET

แปลงระดับปัจจัยที่เหมาะสมของทั้ง 4 ปัจจัย จาก Coded Variable เป็น Uncoded

Variable

1. ความเข้มข้นของ DEG (%) Coded (x_1) = 0

จากสมการ

$$x_1 = \frac{\text{Conc.}DEG - (\text{Conc.}DEG_{low} + \text{Conc.}DEG_{high})/2}{(\text{Conc.}DEG_{high} - \text{Conc.}DEG_{low})/2} \quad (4-11)$$

เมื่อ

$$\text{Conc.}DEG_{low} = 1.3\%$$

$$\text{Conc.}DEG_{high} = 1.4\%$$

แทนค่าลงในสมการ (4-5) ได้เป็นสมการสำเร็จรูปดังนี้

$$0 = \frac{\text{Conc.}DEG - 1.35}{0.05} \quad (4-12)$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของ DEG เท่ากับ 1.35%

2. ความเข้มข้นของ IPA (%) Coded (x_2) = 0

จากสมการ

$$x_2 = \frac{\text{Conc.}IPA - (\text{Conc.}IPA_{low} + \text{Conc.}IPA_{high})/2}{(\text{Conc.}IPA_{high} - \text{Conc.}IPA_{low})/2} \quad (4-13)$$

เมื่อ

$$\text{Conc.}IPA_{low} = 1.8\%$$

$$\text{Conc.}IPA_{high} = 1.9\%$$

แทนค่าลงในสมการ (4-7) ได้เป็นสมการสำเร็จรูปดังนี้

$$0 = \frac{\text{Conc.}IPA - 1.85}{0.05} \quad (4-14)$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของ IPA เท่ากับ 1.85 %

3. อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer ($^{\circ}C$) Coded (x_3) = 0

จากสมการ

$$x_3 = \frac{\text{Temp.}R/C - (\text{Temp.}R/C_{low} + \text{Temp.}R/C_{high})/2}{(\text{Temp.}R/C_{high} - \text{Temp.}R/C_{low})/2} \quad (4-15)$$

เมื่อ

$$\text{Temp. } R/C_{\text{low}} = 214 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Temp. } R/C_{\text{high}} = 216 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

แทนค่าลงในสมการ (4-9) ได้เป็นสมการสำเร็จรูปดังนี้

$$0 = \frac{\text{Temp. } R/C - 215}{1} \quad (4-16)$$

ดังนั้น อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer เท่ากับ $215 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ระดับปัจจัยของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมจากการแปลง Coded Variable เป็น Uncoded Variable สรุปได้ดังนี้

1. ความเข้มข้นของ DEG เท่ากับ 1.35%
2. ความเข้มข้นของ IPA เท่ากับ 1.85%
3. อุณหภูมิของ Rotary Crystallizer เท่ากับ $215 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ซึ่งจะทำให้ได้ค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET เท่ากับ $159.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 ดังนั้นจึงนำระดับปัจจัยเหล่านี้ไปทดสอบเพื่อยืนยันผลของระดับปัจจัยอีกครั้ง

ประเมินผลโดยเปรียบเทียบผลการดำเนินงานก่อนและหลังการทดลอง

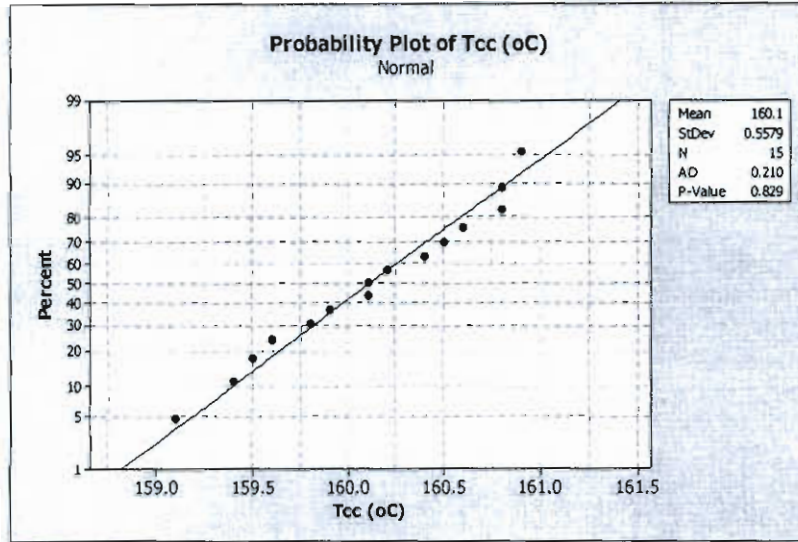
1. ผลการทดลองบนค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเพื่อยืนยันผล

ตารางที่ 4-10 ค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากลึบของเม็ดพลาสติก PET ที่ได้จากการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับค่าคาดหวัง

ลำดับการทดลอง	ค่า Tcc (°C) ที่คาดหวัง	ค่า Tcc (°C) จากการทดสอบ
1	159.9	160.1
2		159.1
3		160.8
4		159.4
5		160.9
6		160.4
7		159.8
8		160.5
9		160.6
10		159.5
11		160.2
12		159.9
13		160.8
14		159.6
15		160.1
ค่าเฉลี่ย	159.9	160.1

จากตารางที่ 4-7 นำข้อมูลมาทำการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากลึบของเม็ดพลาสติก PET พบว่าอุณหภูมิการตกผลึกจากลึบของ

เม็ดพลาสติก PET มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงเส้นตรง ซึ่งจากการทดสอบสมมติฐาน ค่าอุณหภูมิการตกผลึกกลับของเม็ดพลาสติก PET มีการแจกแจงแบบปกติด้วยค่า P-value = 0.829 ที่ $\alpha = 0.05$ อย่างมีนัยสำคัญแสดงดังภาพที่ 4-28



ภาพที่ 4-28 แสดงผลการวิเคราะห์ความเป็นปกติของข้อมูลการสุ่มค่าอุณหภูมิการตกผลึกกลับของเม็ดพลาสติก PET จากการทดสอบ

2. ผลการทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันสถานะที่เหมาะสม

$$H_0: \mu_1 = 159.9$$

$$H_1: \mu_1 \neq 159.9$$

เมื่อ

μ_1 = ค่าเฉลี่ยของค่าอุณหภูมิการตกผลึกกลับของเม็ดพลาสติก PET ที่คาดหวัง เท่ากับ 159.9°C

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทั้งสองสถานะ

คำนวณเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทั้งสองสถานะด้วยโปรแกรมมินิแท็บดังในตารางที่ 4-8

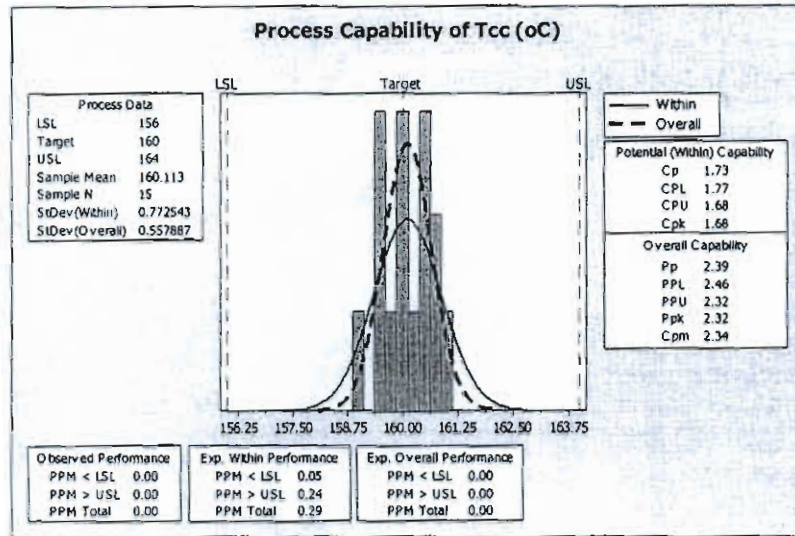
ตารางที่ 4-11 แสดงผลการทดสอบสมมติฐานแบบ T-test ของค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิการตกผลึก
ขากลับของเม็ดพลาสติก PET

One-Sample T: Tcc (°C)							
Test of mu = 159.9 vs not = 159.9							
Variable	N15	Mean	St Dev	SE Mean	95% CI	T	P
Tcc (°C)		160.113	0.558	0.144	159.804, 160.422	1.48	0.161

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าอุณหภูมิการตกผลึกขากลับของเม็ดพลาสติก PET ที่ได้จากการทดสอบพบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.161 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ แสดงว่าอุณหภูมิการตกผลึกขากลับของเม็ดพลาสติก PET มีค่าใกล้เคียงกับค่าคาดหวังเท่ากับ 159.9 °C อย่างมีนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ และเมื่อพิจารณาจากความแปรปรวน (σ^2) ของอุณหภูมิการตกผลึกขากลับของเม็ดพลาสติก PET ที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.31 (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.56 °C) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความแปรปรวนที่ได้จากการแก้สมการด้วยโปรแกรม Premium solver ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.56

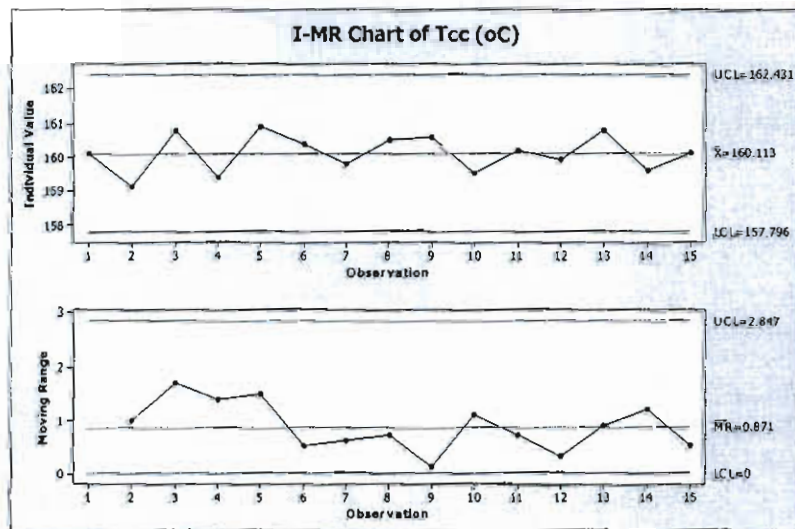
3. เปรียบเทียบผลการดำเนินงานก่อนและหลังการทดลอง

หลังจากได้ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมจากโปรแกรมมินิแท็บแล้วนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ พบว่าค่าอุณหภูมิการตกผลึกขากลับ ของเม็ดพลาสติก PET มีค่าใกล้เคียงกับค่าคาดหวัง ซึ่งสามารถควบคุมให้อยู่ในช่วงข้อกำหนดของลูกค้าได้ เมื่อพิจารณาถึงความสามารถของกระบวนการก่อนดำเนินการทดลองพบว่า มีค่าเท่ากับ -0.26 ซึ่งน้อยกว่า 1.33 หลังจากมีการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิการตกผลึกขากลับของเม็ดพลาสติก PET ทำการทดลองเพื่อยืนยัน พบว่าความสามารถของกระบวนการหลังการดำเนินงานมีค่าเท่ากับ 1.68 ซึ่งมากกว่า 1.33 ดังภาพที่ 4-30 แสดงว่าความสามารถของกระบวนการอยู่ในระดับที่ยอมรับได้



ภาพที่ 4-29 แสดงค่าความสามารถของกระบวนการของค่า Tcc หลังการทดลอง

และเมื่อตรวจติดตามความผันแปรของกระบวนการด้วย I-MR Chart โดยนำข้อมูลจากการทดสอบเพื่อยืนยันสถานะที่เหมาะสมมาพล็อตลงใน I-MR Chart พบว่ากระบวนการมีความผันแปรคงที่และอยู่ภายใต้กระบวนการควบคุมทางสถิติดังภาพที่ 4-30



ภาพที่ 4-30 แผนผังควบคุมพิสัยเคลื่อนที่ I-MR Chart อุณหภูมิการตกผลึกจากถัของเม็ดพลาสติก PET จากการทดสอบเพื่อยืนยันสถานะที่เหมาะสม

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผล

สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับ (Cold crystallization temperature: Tcc) ของเม็ดพลาสติก โพลีเอททาลีน เทอเลฟทาเลท (Polyethylene terephthalate: PET) และสภาวะการผลิตที่เหมาะสมของปัจจัยเพื่อสร้างมาตรฐานในการผลิตเม็ดพลาสติก PET เพื่อให้ค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับมีค่าอยู่ในช่วงข้อกำหนดของลูกค้า Hokkai ด้วยการนำหลักวิชาการเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ทางสถิติมาประยุกต์ใช้งาน โดยใช้โปรแกรมมินิแท็บช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้ผลสรุปตามวัตถุประสงค์การวิจัยดังนี้

1. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET

จากการวิเคราะห์ผลการวิจัยที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ มีดังนี้

1.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลหลัก คือ

- 1) ความเข้มข้นของ DEG (เปอร์เซ็นต์)
- 2) ความเข้มข้นของ IPA (เปอร์เซ็นต์)

3) อุณหภูมิของ Rotary crystallizer (องศาเซลเซียส) ซึ่ง 3 ปัจจัยหลักนี้เป็นปัจจัยที่ควบคุมได้

4) ค่าความหนืดของ A-chip (เดซิลิตรต่อกรัม) ซึ่งเป็นปัจจัยรบกวน

1.2 ปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากกลับของเม็ดพลาสติก PET คือ

1) ปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ DEG กับอุณหภูมิของ Rotary Crys.

2) ปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิของ Rotary Crys. กับค่าความหนืดของ A-chip ซึ่งมี

ผลกระทบร่วมกันระหว่างปัจจัยที่ควบคุมได้กับปัจจัยรบกวน

2. ระดับปัจจัยและสภาวะการผลิตที่เหมาะสม

เพื่อสร้างมาตรฐานในการผลิตเม็ดพลาสติก PET เพื่อให้ค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับมีค่าอยู่ในช่วงข้อกำหนดของลูกค้า Hokkai คือ 156-164 °C และมีค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากกลับตามค่าคาดหวังคือ 159.9 °C โดยนำเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ เทคนิคการออกแบบพารามิเตอร์แบบมั่นคง (Robust Parameter Design) และเทคนิคการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีผลตอบสนองแบบ CCD ทำให้ได้สมการถดถอยของปัจจัยที่มี

ความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากถ้ำ โดยมีแบบจำลองสมการถดถอยที่สร้างอยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์เป็นสมการแบบ Second order model ซึ่งจะทำให้ได้ Regression Model แบบ RPD ในรูป coded variable ดังนี้

2.1 รูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับค่าคาดหมายของตัวแปรตอบสนอง y ที่ตัดผลของปัจจัยรบกวน คือ

$$E_z[y(x, z)] = 159.9 + 0.86x_1 + 1.24x_2 + 0.99x_3 - 0.94x_1^2 + 0.42x_3^2 - 0.67x_1x_3 \quad (5-1)$$

2.2 รูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนอง y คือ

$$V_z[y(x, z)] = \sigma_z^2(0.22 - 0.37x_3)^2 + \sigma^2 \quad (5-2)$$

เมื่อ

x_1 = ความเข้มข้นของ DEG (เปอร์เซ็นต์)

x_2 = ความเข้มข้นของ IPA (เปอร์เซ็นต์)

x_3 = อุณหภูมิของ Rotary Crys. (องศาเซลเซียส)

z = I.V. ของเม็ด A-chip (เดซิลิตรต่อกรัม)

ทำการแก้สมการด้วยโปรแกรม Premium solver และแปลงระดับปัจจัยที่เหมาะสมของทั้ง 3 ปัจจัย จาก Coded Variable เป็น Uncoded Variable ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิการตกผลึกจากถ้ำของเม็ดพลาสติก PET ที่ค่าคาดหวังมีค่าอยู่ประมาณ 159.9°C แสดงดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 สรุปผลสถานะของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสม

สถานะการเดินเครื่องจักรที่เหมาะสม	
ความเข้มข้นของ DEG (%)	1.35
ความเข้มข้นของ IPA (%)	1.85
อุณหภูมิของ Rotary Crys. ($^\circ\text{C}$)	215

การทดสอบสมมติฐานเพื่อที่จะยืนยันผลว่าจุดที่เหมาะสมที่ได้จากผลการวิจัยเป็นสถานะที่เหมาะสมพบว่าค่า P-value > 0.05 จึงยอมรับสมมติฐานหลัก สรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่า

อุณหภูมิการตกผลึกจากแก้วของเม็ดพลาสติก PET ที่ได้จากการทดลองจากสภาวะที่เหมาะสม ในงานวิจัยมีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากแก้วที่คาดหวังที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

เมื่อนำผลการวิจัยที่ได้นี้ไปใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันสมมติฐานพบว่าค่าอุณหภูมิการตกผลึกจากแก้วยังคงอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่กำหนดไว้คือ 156-164 °C เมื่อพิจารณาความสามารถของกระบวนการหลังการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนอง มีค่าเท่ากับ 1.68 ซึ่งมีค่ามากกว่าก่อนการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนอง และมีค่ามากกว่า 1.33 แสดงว่าความสามารถของกระบวนการอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และเมื่อตรวจติดตามความผันแปรของกระบวนการด้วยข้อมูลจากการทดสอบเพื่อยืนยันสภาวะที่เหมาะสม พบว่ากระบวนการมีความผันแปรคงที่และอยู่ภายใต้กระบวนการควบคุมทางสถิติ

ปัญหาและอุปสรรคจากการวิจัย

ในการดำเนินการออกแบบการทดลองนี้ได้นำปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษาซึ่งเป็นอุตสาหกรรมประเภทอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งต้องอาศัยเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์เมื่อมีการปรับค่าเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต และเวลาในการทำปฏิกิริยาจากจุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการจะใช้เวลาประมาณ 1 วัน จึงจะได้เป็นผลิตภัณฑ์ออกมาแล้วจึงนำมาทำการตรวจวัดค่าที่ต้องการตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ตามที่ลูกค้าต้องการ ดังนั้นจะต้องมีการติดตามผลอย่างต่อเนื่องโดยใช้แผนภูมิควบคุม ($\bar{X} - R$ Chart) ควบคุมไม่ให้ออกนอกค่าที่ลูกค้ากำหนดคือ 156-164 °C เพื่อเป็นการเฝ้าระวังความผิดปกติของกระบวนการ

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากในการศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาในกระบวนการผลิตจริง และมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึกจากแก้วของเม็ดพลาสติก PET และสภาวะการผลิตที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับการใช้งาน โดยไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขหรือพารามิเตอร์อื่นๆ ในกระบวนการผลิตดังนั้น ผลการศึกษานี้จึงใช้ได้ภายใต้เงื่อนไขการควบคุมกระบวนการผลิตที่กำกับการผลิต 300 ตันต่อวัน และเป็นไปตามข้อกำหนดของเจ้าของเทคโนโลยีที่ได้รับการถ่ายทอดจาก บริษัท Zimmer ประเทศเยอรมัน เท่านั้น หากมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการควบคุมกระบวนการผลิต เช่น เปลี่ยนแปลงความดัน เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเติมแต่งอาจให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างไปจากผลการศึกษาครั้งนี้ ดังนั้นก่อนการนำข้อมูลผลการศึกษาไปใช้งานจริงควรต้องมีการตรวจสอบเงื่อนไขในการควบคุมกระบวนการผลิตให้ครบถ้วน

ในการดำเนินการออกแบบการทดลองครั้งนี้ทำให้ทราบสาเหตุและวิธีแก้ไขที่ชัดเจน
ดังนั้นโรงงานกรณีศึกษาสามารถนำวิธีการเช่นนี้ไปใช้กับการแก้ไขปัญหาอื่นที่เกิดขึ้นกับ
กระบวนการผลิตได้ และยังสามารถนำจุดแข็งในด้านนี้มาเสนอให้แก่ลูกค้ารายอื่น ๆ เพื่อวิเคราะห์
หาสาเหตุหาแนวทางการแก้ไขได้อีกด้วย

บรรณานุกรม

- จักรพันธ์ ต้นศรี วงษ์. (2553). การศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนสำหรับเครื่องขึ้นรูปแบบสูญญากาศโดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- เบญจวรรณ รัตนมาลี. (2553). การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพความเหนียว กรณีศึกษาอุตสาหกรรมการผลิตกาว. งานนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.
- มะลิ แซ่อึ้ง. (2544). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของผิวเคลือบในกระบวนการเคลือบผิวไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เยาวภา เลหาทวีโชค. (2544). การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการชุบอลูมิเนียม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- วรุตม์ บุญภักดี. (2550). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ SOLVENT RECOVERY โดยวิธีการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม กรณีศึกษา บริษัท ยูเนี่ยนไทย-นิปปัน จำกัด. สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Antoniadis G., Paraskevopoulos K.M., Bikiaris D. and Chrissafis K.. (2009). *Kinetics study of cold-crystallization of poly (ethylene terephthalate) nanocomposites with multi-walled carbon nanotubes*. Thermochemica Acta 493, 68–75.
- Jun Zhao, Juan Yang, Rui Song, Xin Linghu and Qingrong Fan. (2002). *The effect of annealing on the subsequent cold crystallization of amorphous poly (ethylene terephthalate)*. European Polymer Journal 38, 645–648.
- Montgomery and C. Douglass. (2005). *Design and Analysis of Experiment*. 6th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc..

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Panagiotis G. Karagiannidis, Anagnostis C. Stergiou and George P. Karayannidis. (2008). *Study of crystallinity and thermomechanical analysis of annealed poly (ethylene terephthalate) films*. European Polymer Journal 44, 1475–1486.
- Radhakrishnan J and Kaito A. (2001). *Structure formation during the isothermal crystallization of oriented amorphous poly (ethylene terephthalate) films*. Polymer 42:3859–66.
- X. Lu and J.N. Hay. (2000). *The effect of physical aging on the rates of cold crystallization of poly (ethylene terephthalate)*. Polymer 41, 7427–7436.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงข้อมูลในอดีตของค่าความหนืดเม็ด Amorphous-Chip

ตารางภาคผนวก ก-1 แสดงข้อมูลในอดีตของค่าความหนืดเม็ด Amorphous-Chip

No.	IV A-Chip (dl/g)	No.	IV A-Chip (dl/g)	No.	IV A-Chip (dl/g)
1	0.61	19	0.6057	37	0.6041
2	0.6082	20	0.6053	38	0.6054
3	0.6065	21	0.6046	39	0.6029
4	0.6051	22	0.6055	40	0.6019
5	0.6035	23	0.6075	41	0.6035
6	0.6066	24	0.6079	42	0.6032
7	0.6087	25	0.6058	43	0.6022
8	0.6075	26	0.6076	44	0.6023
9	0.6072	27	0.6042	45	0.6044
10	0.605	28	0.6067	46	0.6041
11	0.6071	29	0.6082	47	0.605
12	0.6088	30	0.6092	48	0.605
13	0.6071	31	0.6081	49	0.6033
14	0.6082	32	0.6026	50	0.6037
15	0.6084	33	0.6021	51	0.6045
16	0.6068	34	0.6013	52	0.6045
17	0.6097	35	0.6058	53	0.6037
18	0.6058	36	0.6046	54	0.6072

ค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.6056 เดซิลิตรต่อกรัม และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0022 เดซิลิตร

ต่อกรัม

ตารางภาคผนวก ก-2 แสดงข้อมูลในอดีตของค่าความหนืดเม็ด Amorphous-Chip เท่ากับ 0.605
 เดซิลิตรต่อกรัม ที่ความเร็วรอบของใบกวน เท่ากับ 4.5 รอบต่อนาที อุณหภูมิ
 คงที่เท่ากับ 275 องศาเซลเซียส และค่าความดันของถังปฏิกรณ์กึ่งที่ที่ 1
 มิลลิบาร์

No.	IV A-Chip (dl/g)	No.	IV A-Chip (dl/g)	No.	IV A-Chip (dl/g)
1	0.605	14	0.6052	27	0.6041
2	0.6055	15	0.6056	28	0.6049
3	0.6049	16	0.6048	29	0.6055
4	0.6053	17	0.6046	30	0.6052
5	0.6055	18	0.6053	31	0.6049
6	0.6049	19	0.6047	32	0.6048
7	0.6051	20	0.6045	33	0.6054
8	0.6046	21	0.605	34	0.6054
9	0.6052	22	0.6052	35	0.6047
10	0.6051	23	0.6046	36	0.6043
11	0.6045	24	0.6047	37	0.6045
12	0.6049	25	0.6051	38	0.6045
13	0.6046	26	0.605	39	0.6051
				40	0.6055

ค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.6050 เดซิลิตรต่อกรัม และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0004 เดซิลิตร
 ต่อกรัม

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองแบบสุ่มสำหรับชิ้นงานปัจจัย

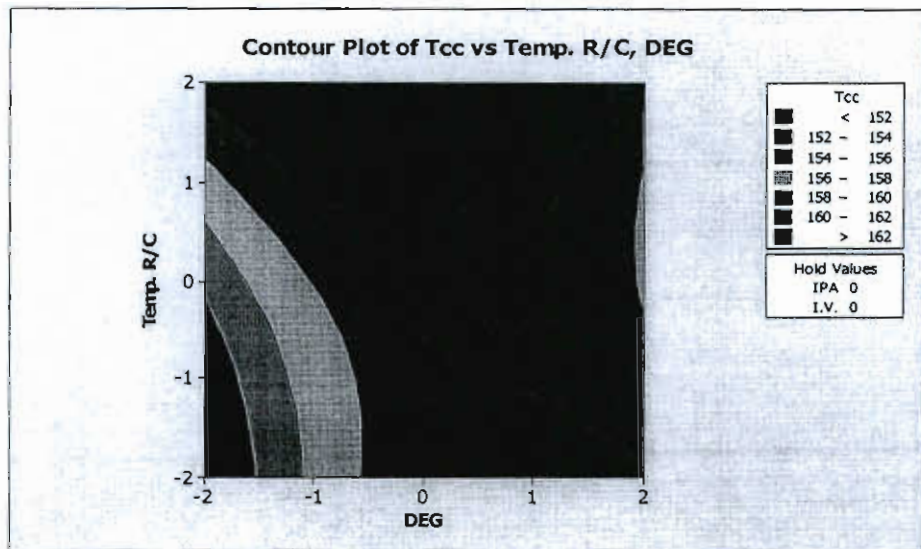
ตารางภาคผนวก ข-1 ตารางผลการทดลองแบบสุ่มสำหรับยืนยันปัจจัย

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	Tcc
55	1	1	1	1.3	1.9	216	0.605	161.3
25	2	1	1	1.3	1.8	214	0.610	156.8
53	3	1	1	1.3	1.8	216	0.605	160.4
38	4	1	1	1.4	1.8	216	0.605	158.3
24	5	1	1	1.4	1.9	216	0.605	162.5
48	6	1	1	1.4	1.9	216	0.610	161
52	7	1	1	1.4	1.9	214	0.605	161.6
10	8	1	1	1.4	1.8	214	0.610	159.2
57	9	1	1	1.3	1.8	214	0.610	156.2
2	10	1	1	1.4	1.8	214	0.605	158.5
61	11	1	1	1.3	1.8	216	0.610	158.9
16	12	1	1	1.4	1.9	216	0.610	162.6
34	13	1	1	1.4	1.8	214	0.605	157.6
39	14	1	1	1.3	1.9	216	0.605	162.3
1	15	1	1	1.3	1.8	214	0.605	154.1
15	16	1	1	1.3	1.9	216	0.610	161.4
42	17	1	1	1.4	1.8	214	0.610	160.3
23	18	1	1	1.3	1.9	216	0.605	160.5
49	19	1	1	1.3	1.8	214	0.605	155
29	20	1	1	1.3	1.8	216	0.610	159.1
12	21	1	1	1.4	1.9	214	0.610	161.5
54	22	1	1	1.4	1.8	216	0.605	159.2
33	23	1	1	1.3	1.8	214	0.605	156.2
11	24	1	1	1.3	1.9	214	0.610	158.4
26	25	1	1	1.4	1.8	214	0.610	159
44	26	1	1	1.4	1.9	214	0.610	161.1
63	27	1	1	1.3	1.9	216	0.610	162.1
21	28	1	1	1.3	1.8	216	0.605	158.4
56	29	1	1	1.4	1.9	216	0.605	161.9
64	30	1	1	1.4	1.9	216	0.610	162.4

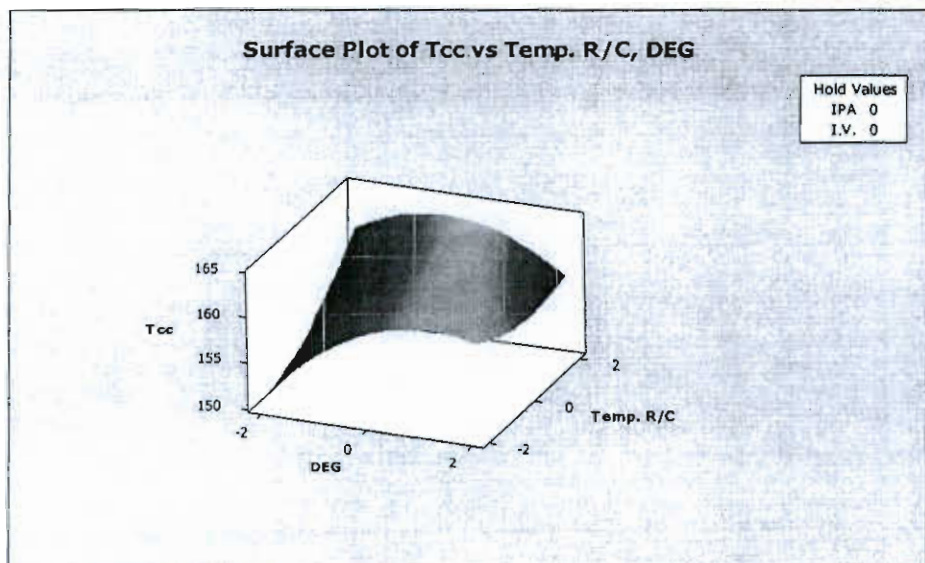
ตารางภาคผนวก ข-1 ตารางผลการทดลองแบบสุ่มสำหรับยืนยันปัจจัย (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	DEG	IPA	Temp. R/C	I.V.	Tcc
47	31	1	1	1.3	1.9	216	0.610	160
50	32	1	1	1.4	1.8	214	0.605	156.8
58	33	1	1	1.4	1.8	214	0.610	160.2
6	34	1	1	1.4	1.8	216	0.605	160.5
32	35	1	1	1.4	1.9	216	0.610	161.2
27	36	1	1	1.3	1.9	214	0.610	157.9
13	37	1	1	1.3	1.8	216	0.610	159.5
46	38	1	1	1.4	1.8	216	0.610	157.9
62	39	1	1	1.4	1.8	216	0.610	159
51	40	1	1	1.3	1.9	214	0.605	156.3
18	41	1	1	1.4	1.8	214	0.605	157.1
35	42	1	1	1.3	1.9	214	0.605	158.2
9	43	1	1	1.3	1.8	214	0.610	156.5
59	44	1	1	1.3	1.9	214	0.610	158
17	45	1	1	1.3	1.8	214	0.605	155.1
20	46	1	1	1.4	1.9	214	0.605	159.6
31	47	1	1	1.3	1.9	216	0.610	160.3
30	48	1	1	1.4	1.8	216	0.610	158.3
3	49	1	1	1.3	1.9	214	0.605	158.7
28	50	1	1	1.4	1.9	214	0.610	161.3
37	51	1	1	1.3	1.8	216	0.605	159.6
4	52	1	1	1.4	1.9	214	0.605	161.2
41	53	1	1	1.3	1.8	214	0.610	156.3
5	54	1	1	1.3	1.8	216	0.605	157.6
8	55	1	1	1.4	1.9	216	0.605	161.8
45	56	1	1	1.3	1.8	216	0.610	159.2
19	57	1	1	1.3	1.9	214	0.605	157.2
14	58	1	1	1.4	1.8	216	0.610	158.6
36	59	1	1	1.4	1.9	214	0.605	160.5
43	60	1	1	1.3	1.9	214	0.610	158.2
60	61	1	1	1.4	1.9	214	0.610	161.6
40	62	1	1	1.4	1.9	216	0.605	162
7	63	1	1	1.3	1.9	216	0.605	160.7
22	64	1	1	1.4	1.8	216	0.605	159.3

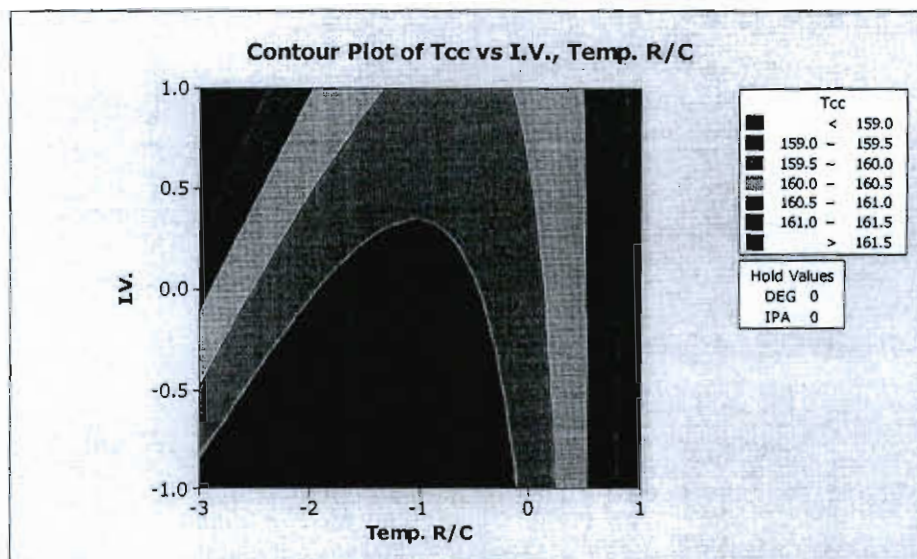
ภาคผนวก ก
ภาพพื้นผิวตอบสนอง



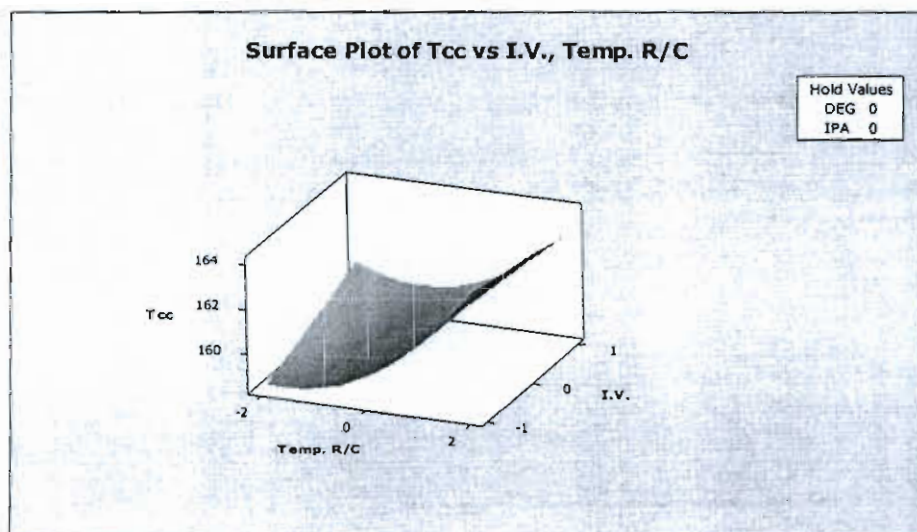
ภาพภาคผนวก ค-1 แสดงภาพพื้นผิวตอบสนอง 2 มิติ (Contour plot) ระหว่างอุณหภูมิของ Rotary crys. กับ ความเข้มข้นของ DEG



ภาพภาคผนวก ค-2 แสดงภาพพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ (Surface plot) ระหว่างอุณหภูมิของ Rotary crys. กับ ความเข้มข้นของ DEG



ภาพภาคผนวก ค-3 แสดงภาพพื้นผิวตอบสนอง 2 มิติ (Contour plot) ระหว่างอุณหภูมิของ Rotary crys. กับค่าความหนืดของเม็ด Amorphous-chip



ภาพภาคผนวก ค-4 แสดงภาพพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ (Surface Plot) ระหว่างอุณหภูมิของ Rotary crys. กับ ค่าความหนืดของเม็ด Amorphous-chip