

การออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ค่า พี ไอ ดี ที่เหมาะสมในกระบวนการควบคุม

ธานี อะโศก

งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

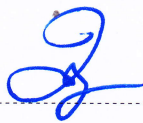
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ธันวาคม 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์
ได้พิจารณางานนิพนธ์ของ ธานี อะโสศ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

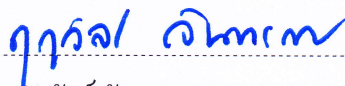
(ดร. ปัญชา อริยะจรรยา)

คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์



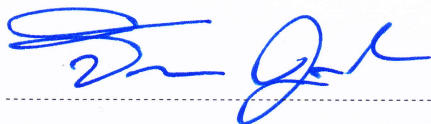
..... ประธาน

(ดร. ปัญชา อริยะจรรยา)



..... กรรมการ

(ดร. ฤทธิชัย จันทรส)



..... กรรมการ

(ดร. จักรवाल คุณะดิลก)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ของมหาวิทยาลัยบูรพา



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ ๒๙ เดือน ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๕๙

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความอนุเคราะห์ข้อมูลจากท่านผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ คือ ดร. บัญชา อริยะจรรยา ซึ่งรับหน้าที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและให้คำแนะนำเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิชาการและด้านจริยธรรม ตลอดจนแนวคิดต่าง ๆ อันก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการศึกษา ค้นคว้า และเป็นแนวทางในการจัดทำงานวิจัยนี้จนประสบความสำเร็จ

ขอขอบคุณบุคลากรและเพื่อนทั้งนิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ได้ร่วมทำกิจกรรมต่าง ๆ จนบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณบิดา มารดา พี่น้องในครอบครัว รวมถึงผู้มีอุปการคุณ และเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจอันมีค่ายิ่งและให้ความช่วยเหลือในทุกด้านแก่ผู้จัดทำงานวิจัยเสมอมาจนเสร็จสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์ของงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตเวทิตาแด่ บพภารี บุรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

ธานี อะโสต

56920610: สาขาวิชา: วิศวกรรมอุตสาหการ; วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ)

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลอง/ ระบบควบคุม/ พื้นที่ได้ส่วนโค้ง

ธานี อะโศต: การออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ค่า พี ไอ ดี ที่เหมาะสมในกระบวนการควบคุม (DESIGN OF EXPERIMENTS FOR OPTIMAL PID TUNING IN PROCESS CONTROL.) คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์: บัญชา อริยะจรรยา, Ph.D., 208 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตั้งค่าระบบควบคุมอัตโนมัติของการควบคุมระดับและปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อควบคุมระดับน้ำในถังตามสเปค โดยมีกำหนดสเปค คือ ค่าที่วัดได้ $\pm 0.125\%$ ของค่าเป้าหมาย ในขั้นต้นค่าที่วัดได้จะมากกว่าสเปคที่กำหนดไว้ ทำให้คุณภาพของเม็ดพลาสติกไม่ได้ตามสเปคที่ลูกค้าต้องการและทำให้อายุการใช้งานของวาล์วควบคุมจะน้อยลง ดังนั้น การออกแบบการทดลอง 2^k Factorial design of experiments (DOE) และ response surface methods (RSM) ถูกนำมาใช้เพื่อระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระบบควบคุมอัตโนมัติ และกำหนดการตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัจจัยเหล่านั้นเพื่อเพิ่มคุณภาพของระบบการควบคุมอัตโนมัติ มี 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) ค่าสัดส่วนมาจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน (พี-Proportional) 2) ค่าปริพันธ์ เป็นผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา (ไอ-Integral) 3) ค่าอนุพันธ์ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด (ดี-Derivative)

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติชี้ให้เห็นว่า พี-Proportional 3.94949 ไอ-Integral 143.202 วินาที และดี-Derivative 0.0086023 วินาที ในกระบวนการควบคุมที่ระดับของปัจจัยดังกล่าว จะส่งผลให้กระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังเข้าใกล้กับค่าเป้าหมายและต่ำกว่าสเปคที่กำหนดไว้ ซึ่งสามารถลดพื้นที่ได้ส่วนโค้งหรือลดการกระเพื่อมของระดับน้ำในถังที่ควบคุม โดยก่อนทำการปรับปรุณมีค่าเฉลี่ยพื้นที่ได้ส่วนโค้ง 0.429 ตารางหน่วยต่ออนาที หลังจากปรับปรุณกระบวนการมีค่าเฉลี่ยพื้นที่ได้ส่วนโค้ง 0.0346 ตารางหน่วยต่ออนาที สามารถลดค่าความผิดพลาดไปจากค่าเป้าหมายจาก 0.429% เป็น 0.0346% ทำให้คุณภาพของกระบวนการควบคุมดีขึ้นและส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตดีขึ้น

56920610: MAJOR: INDUSTRIAL ENGINEERING; M.Eng.
(INDUSTRIAL ENGINEERING)

KEYWORD: DESIGN OF EXPERIMENT/ CONTROL SYSTEM/ PROPORTIONAL-
INTEGRAL-DERIVAH

TANEE ASOTE: DESIGN OF EXPERIMENTS FOR OPTIMAL PID TUNING IN
PROCESS CONTROL. ADVISORY COMMITTEE: BANCHA ARIYAJANYA, Ph.D., 208 P.
2016.

The purpose of this study is to determine the influence factors and the optimal factor settings to improve quality of an automatic control system of level measured by percent deviation from the set point level. The desired quality of the level control process should be within $\pm 0.125\%$ deviation. Initially, the level process variable was fluctuated higher than the desired limit that affects quality of product and lifetime of control valve. Therefore, the 2^k factorial Design of Experiments (DOE) and Response Surface Methods (RSM) have been applied to identify the factors that influence the automatic control system of the level and determine the optimal settings for those factors to increase quality of the level control system. There are three main factors in the level control system including (i) Proportional, (ii) Integral, and (iii) Derivative.

The result from the statistical analysis indicated that 3.94949 of Proportional, 143.202 second of Integral and 0.0086023 second of Derivative were the optimal set point that can reduce percent deviation of the level from 0.429% to 0.0346%.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	7
ข้อจำกัดในการวิจัย	8
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	8
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
ระบบ DCS	9
ระบบควบคุม	15
ระบบควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรมการผลิต	21
การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ	22
ระบบควบคุมพีไอดี	24
ทฤษฎีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ	29
ทฤษฎีการทดสอบสมมติฐาน	31
ทฤษฎีการวิเคราะห์ความแปรปรวน	33
การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล	36
การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการทดลอง	44
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	46
3 วิธีดำเนินการวิจัย	50
วิเคราะห์ปัญหาเพื่อนำมาออกแบบการทดลอง	55
หาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและหาระดับของปัจจัย	64
วิธีดำเนินการทดลอง	68

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการดำเนินการวิจัย.....	74
การทดลองโดยวิธีออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k (First order model).....	74
การทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง.....	93
การทดสอบเพื่อยืนยันผล.....	121
สรุปผลการทดลอง.....	126
5 อภิปรายและสรุปผลงานวิจัย.....	128
ข้อดีและข้อเสียในการดำเนินงานแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง.....	130
ปัญหาและอุปสรรคในงานวิจัย.....	131
ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้.....	131
บรรณานุกรม.....	132
ภาคผนวก.....	133
ภาคผนวก ก.....	134
ภาคผนวก ข.....	152
ภาคผนวก ค.....	183
ภาคผนวก ง.....	189
ภาคผนวก จ.....	205
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	207

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 ข้อมูลระบบควบคุมทั้งหมดเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558.....	4
1-2 เกณฑ์การประเมินคุณภาพของระบบควบคุมในฐานข้อมูลของ Matrikon.....	5
1-3 ข้อมูลระบบควบคุมระดับน้ำในถังของ 238L19301 เดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558..	6
2-1 ประเภทของความผิดพลาดจากการทดสอบสมมติฐาน.....	32
2-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีจำแนกทางเดียว.....	35
2-3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีจำแนกสองทาง.....	36
2-4 รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย.....	38
2-5 การวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย.....	39
2-6 การวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย.....	40
2-7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียล.....	42
3-1 ข้อมูลระบบควบคุมทั้งหมดในเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558.....	51
3-2 คุณภาพของระบบควบคุมในเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558.....	52
3-3 สรุปข้อมูลพื้นที่ได้ส่วนโค้งจากการเก็บข้อมูลของระบบควบคุมระดับ.....	58
3-4 คุณภาพของกระบวนการควบคุมระดับจากฐานข้อมูลของมาทริกอน.....	65
3-5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการควบคุมระดับ.....	66
3-6 การออกแบบการทดลอง.....	69
4-1 พื้นที่ได้ส่วนโค้งคำนวณจากการทดลอง.....	75
4-2 บันทึกผลการทดลอง.....	80
4-3 ระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษา.....	93
4-4 ผลการออกแบบ CCD 3 ปัจจัย.....	94
4-5 พื้นที่ได้ส่วนโค้งคำนวณจากการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง.....	100
4-6 ผลการทดลองจากการออกแบบ CCD 3 ปัจจัย.....	101
4-7 ข้อมูลของการตั้งค่า PID ของระบบควบคุม.....	121
4-8 ข้อมูลของประสิทธิภาพการทดสอบที่ได้จากสภาวะปัจจุบันเปรียบเทียบกับสภาวะ ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง.....	122
4-9 ข้อมูลระบบควบคุมระดับน้ำในถังของ 238L19301 เดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558 . ก่อนการตั้งค่า PID ที่เหมาะสมจากการทดลอง.....	125

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-10 ข้อมูลระบบควบคุมระดับน้ำในถังของ 238L19301 เดือนพฤศจิกายน 2559	
หลังการตั้งค่า PID ที่เหมาะสมจากการทดลอง.....	126

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบควบคุม.....	1
1-2 ระบบควบคุมระดับในถัง.....	2
1-3 กราฟแสดงประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้งหมดเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558.....	4
1-4 ระบบควบคุมระดับน้ำในถังที่ไม่มีประสิทธิภาพ.....	6
1-5 แผนภูมิกรอบแนวคิด.....	7
2-1 Redundancy server.....	11
2-2 Display monitor.....	11
2-3 คีย์บอร์ด (Standard PC keyboard).....	12
2-4 Pointing device.....	12
2-5 DCS Graphic.....	13
2-6 DCS Faceplate.....	13
2-7 DCS Detail.....	14
2-8 DCS Trend.....	14
2-9 DCS Events.....	15
2-10 ระบบควบคุมแบบเปิด.....	16
2-11 การควบคุมระดับน้ำในถัง.....	16
2-12 องค์ประกอบของการควบคุมระดับน้ำในถังแบบเปิดที่มา.....	17
2-13 องค์ประกอบของการควบคุมแบบป้อนกลับ.....	17
2-14 ระบบควบคุมแบบปิดหรือแบบป้อนกลับ.....	18
2-15 องค์ประกอบของการควบคุมระดับน้ำในถังแบบปิดหรือแบบป้อนกลับ.....	18
2-16 ส่วนที่เป็นตัวควบคุมและส่วนประกอบต่าง ๆ.....	20
2-17 สัญญาณเข้าและออกของส่วนที่เป็นต้นกำลัง.....	20
2-18 การควบคุมแบบป้อนกลับ.....	21
2-19 แผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบพีไอดี.....	25
2-20 กราฟ PV ต่อเวลา K_p กำหนดเป็น 3 ค่า (K_i และ K_d คงที่).....	26
2-21 กราฟ PV ต่อเวลา K_i กำหนดเป็นสามค่า (K_p และ K_d คงที่).....	27
2-22 กราฟ PV ต่อเวลา สำหรับ K_d 3 ค่า (K_p และ K_i คงที่).....	28

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-23 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ.....	30
2-24 การไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย.....	37
2-25 การมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย.....	37
2-26 การทดลองร่วมปัจจัยของการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^2	43
2-27 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ.....	44
2-28 กราฟแสดงความเป็นอิสระของข้อมูล.....	45
2-29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแปรปรวนคงที่.....	46
2-30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแปรปรวนไม่คงที่.....	46
3-1 ข้อมูลระบบควบคุมทั้งหมดในเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558.....	51
3-2 แผนภูมิข้อเรียกร้องของฝ่ายผลิต.....	53
3-3 ระบบควบคุมระดับที่ไม่มีคุณภาพ.....	55
3-4 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลจากระบบฐานข้อมูล โอเอสไอ.....	56
3-5 ภาพที่สามเหลี่ยมจากค่าที่วัดได้ เป็นทั้งค่าบวกและค่าลบ.....	56
3-6 รูปสี่เหลี่ยมจากค่าที่วัดได้เป็นค่าบวกทั้งคู่เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย.....	57
3-7 วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง I-MR Chart.....	61
3-8 วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังก่อนการปรับปรุง โดยใช้ Program minitab.....	62
3-9 วิเคราะห์ความสามารถของระบบควบคุมระดับโดยใช้ Program minitab.....	62
3-10 การหาจำนวนการทดลองของการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล.....	67
3-11 Power curve for 2-level factorial design จุดกึ่งกลาง 10 จุด ที่การทดลองซ้ำ 2 ถึง 10 ครั้ง.....	68
4-1 ผลการวิเคราะห์การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k โดยใช้ Minitab.....	85
4-2 การแจกแจงแบบปกติของค่าส่วนตกค้างโดยใช้ Minitab.....	86
4-3 แผนการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลองโดยใช้ Minitab.....	87
4-4 แผนการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted value โดยใช้ Minitab.....	88
4-5 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ Bartlett's Test.....	89
4-6 ตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง.....	90

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-7 ผลการตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังโดย Program minitab.....	91
4-8 ผลการวิเคราะห์การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k หลังตัดปัจจัยโดยใช้ Minitab....	92
4-9 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองจากการออกแบบ CCD โดยใช้ Minitab.....	107
4-10 กราฟเพื่อการวิเคราะห์ค่า Residual ของการทดลอง.....	108
4-11 กราฟแสดงผลการทดสอบความเป็นปกติของการแจกแจง.....	109
4-12 ตัดปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องของการทดลองจากการออกแบบ CCD ออก.....	110
4-13 อิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง.....	110
4-14 อิทธิพลร่วมแต่ละคู่ของปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง.....	111
4-15 จำนวนการทดลองของการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล.....	112
4-16 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองจากการออกแบบ CCD หลังตัดปัจจัยโดยใช้ Minitab.....	112
4-17 กราฟการวิเคราะห์ค่า Residual ของการทดลองของข้อมูลโดยใช้ Minitab หลังการตัดปัจจัยจากการวิเคราะห์ RSM.....	113
4-18 แผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติโดยใช้ Minitab หลังการตัดปัจจัยจากการวิเคราะห์ RSM.....	114
4-19 แผนการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลองโดยใช้ Minitab หลังการตัดปัจจัยจากการวิเคราะห์ RSM.....	115
4-20 แผนการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted value โดยใช้ Minitab หลังการตัดปัจจัยจากการวิเคราะห์ RSM.....	116
4-21 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ Bartlett's test.....	117
4-22 Contour plot Y.....	118
4-23 Surface plot Y.....	118
4-24 Contour plot Y เมื่อ D เท่ากับ Minimum.....	119
4-25 Contour plot Y เมื่อ D เท่ากับ Maximum.....	119
4-26 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบที่เหมาะสม.....	120
4-27 ผลการวิเคราะห์หาค่า PID ที่เหมาะสมในการควบคุมระดับน้ำในถังโดยใช้ Minitab..	120

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-28 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ประชากร.....	123
4-29 One-way ANOVA for PID-default, PID-tuning, PID-DOE power report.....	124
4-30 One-way ANOVA for PID-default, PID-tuning, PID-DOE summary report.....	124
4-31 One-way ANOVA for PID-default, PID-tuning, PID-DOE diagnostic report.....	125
4-32 กราฟการควบคุมระดับน้ำในถังจากค่า PID-default.....	126
4-33 กราฟการควบคุมระดับน้ำในถังจากค่า PID-tuning.....	127
4-34 กราฟการควบคุมระดับน้ำในถังจากค่า PID-DOE.....	127
5-1 กราฟแสดงประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้งหมดเดือนมกราคม-กันยายน 2559.....	129

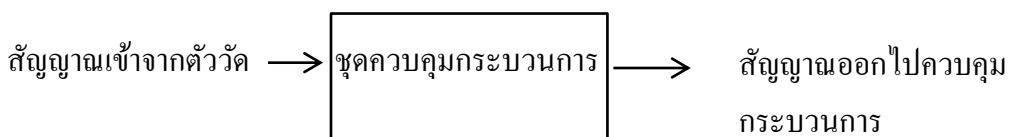
บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

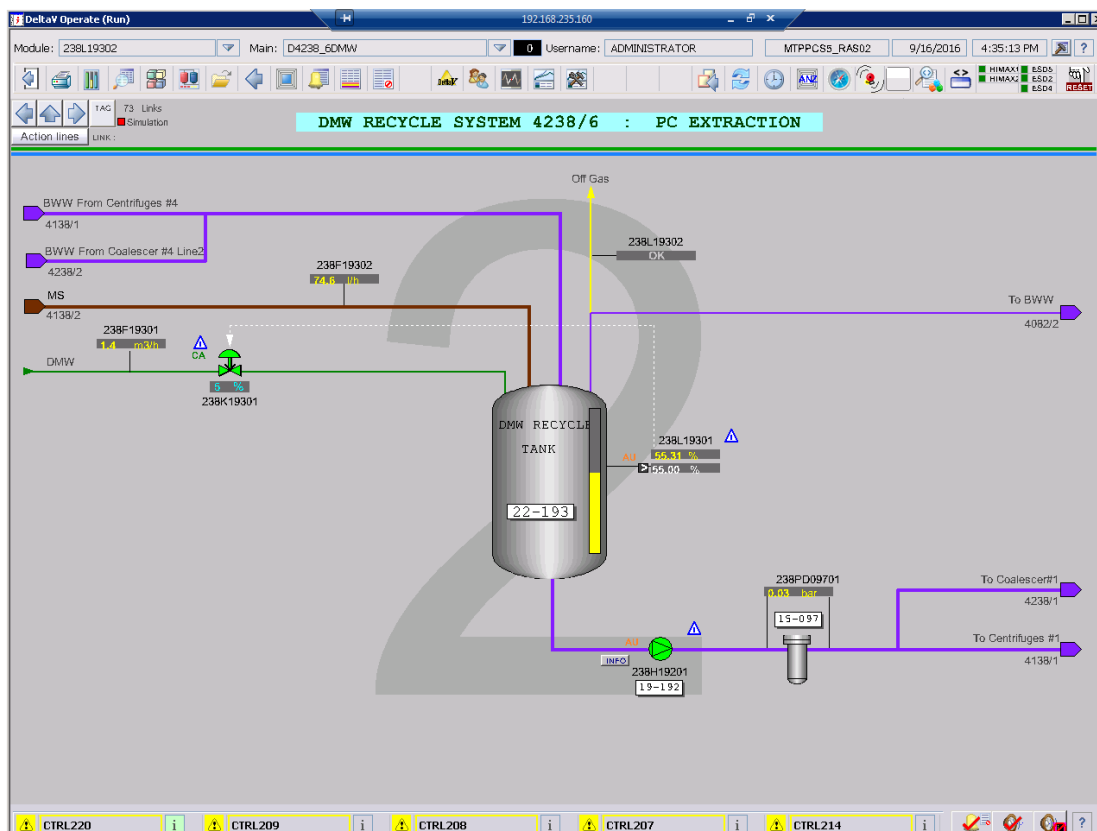
ในปัจจุบันนี้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีมากมายตัวอย่าง ได้แก่ ระบบควบคุมในเครื่องปรับอากาศซึ่งจะคอยควบคุมอุณหภูมิภายในห้องให้คงที่ในอุตสาหกรรมก็ได้มีการนำระบบควบคุมอัตโนมัติ “ระบบการควบคุมแบบกระจายส่วน (Distributed control systems)” หรือ DCS ไปใช้ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรที่มีความซับซ้อนของระบบควบคุม และอื่น ๆ อีกมากมาย เพื่อเพิ่มปริมาณการผลิต คุณภาพผลิตภัณฑ์ และการแข่งขันทางการตลาด ซึ่งระบบการควบคุมแบบกระจายส่วนสามารถตอบสนองปัจจัยดังกล่าวได้อย่างดีที่สุดในและเป็นระบบควบคุมที่ใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับระบบควบคุมทั้งหมดและใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น โรงกลั่นน้ำมัน แท่นขุดเจาะน้ำมันและก๊าซ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และเคมีคอลทั้งหลาย และระบบการควบคุมแบบกระจายส่วนนั้น ยังมีความเสถียรและแม่นยำค่อนข้างสูงมาก จึงเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรม

โครงสร้างพื้นฐานของระบบการควบคุมแบบกระจายส่วนจะมีอยู่ 3 องค์ประกอบด้วยกัน คือ สัญญาณเข้าจะมาจากเครื่องมือวัดต่าง ๆ เช่น เครื่องมือวัดระดับ เครื่องมือวัดอุณหภูมิ และเครื่องมือวัดอัตราการไหล เป็นต้น ซึ่งสัญญาณที่ป้อนเข้าจะเป็นสัญญาณมาตรฐานของระบบควบคุม คือ สัญญาณ 4-20 มิลลิแอมป์ หรือ 1-5 โวลต์ ชุดควบคุมเป็นระบบประมวลผลจากสัญญาณเข้าเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมไปควบคุมกระบวนการและสัญญาณออก เป็นสัญญาณที่ผ่านการคำนวณจะได้ค่าที่เหมาะสมจากชุดควบคุมเพื่อไปควบคุมการทำงานของวาล์ว หรือมอเตอร์ ซึ่งทั้ง 3 องค์ประกอบจะแสดงดังภาพที่ 1-1



ภาพที่ 1-1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบควบคุม

ภาพที่ 1-2 เป็นตัวอย่างการควบคุมระดับในถัง จะมีเครื่องมือวัดระดับ (Tag no. 238L19301) แล้วส่งสัญญาณกระแส 4-20 มิลลิแอมป์ ให้กับชุดควบคุม (DCS) แล้วชุดควบคุมทำการประมวลผลสัญญาณออกไปควบคุมการทำงานของวาล์ว (Tag no. 238K19301)



ภาพที่ 1-2 ระบบควบคุมระดับในถัง

คุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติที่ดีจะต้องประกอบด้วย

1. ความแม่นยำ (Accuracy)
2. ความรวดเร็ว (Speed)
3. ความเสถียร (Stability)

ระบบควบคุมที่ขาดความแม่นยำย่อมนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้และถือว่าเป็นระบบการควบคุมที่สร้างขึ้นหรือทำขึ้นโดยวัตถุประสงค์ของการควบคุมความเร็วในการตอบสนองก็เช่นกัน ระบบที่มีการตอบสนองที่แม่นยำไม่มีความคลาดเคลื่อนเลยแต่ใช้เวลานานมากก็ย่อมเป็นระบบควบคุมที่นำไปใช้งานไม่ได้ ความเสถียรของการตอบสนองของระบบควบคุมอัตโนมัติก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะชี้ให้เห็นถึงคุณภาพของระบบควบคุมนั้น ๆ ระบบควบคุมที่มีความเร็วและแม่นยำ

ในการตอบสนองแต่ในบางขณะหรือกับบางลักษณะของอินพุทไม่สามารถให้การตอบสนองที่เสถียรระบบการควบคุมนั้นก็จะใช้งานไม่ได้ จะเห็นว่า ความแม่นยำ ความรวดเร็วและความเสถียรนอกจากจะเป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงคุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติแล้วยังเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติทุกระบบจะขาดข้อใดไม่ได้ในระบบควบคุมอัตโนมัติผู้สร้างระบบควบคุมต้องคำนึงถึงทั้ง 3 องค์ประกอบ คือ พยายามให้ได้ระบบควบคุมที่ทำงานหรือให้การตอบสนองที่แม่นยำที่สุด รวดเร็วที่สุด และที่เสถียรที่สุดซึ่งในทางปฏิบัติทำได้ลำบาก

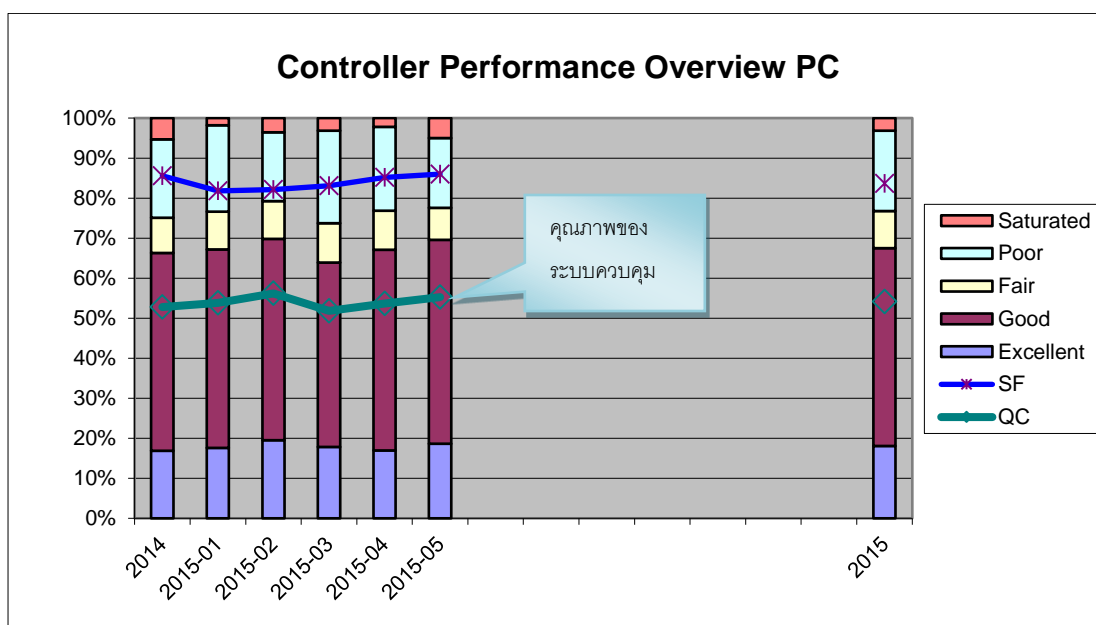
ผลกระทบของระบบควบคุมที่ไม่มีประสิทธิภาพ คือ จะมีปริมาณ การใช้พลังงาน ใช้น้ำร้อน ลม ไนโตรเจน ไฟฟ้า ที่มากเกินไปความต้องการและที่สำคัญ คือ อาจจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

หลังจากติดตั้งระบบควบคุมการกำหนดค่าของตัวควบคุมก็ต้องปรับจนสมรรถภาพของระบบควบคุมเป็นที่ยอมรับได้ ก็คือ การจูนตัวควบคุมเพราะการจูนตัวควบคุมนั้นกระทำโดยการทดลองวิธีต่าง ๆ และขจัดวิธีที่ผิดออกไป จึงต้องใช้เวลาและทำให้เสียเวลาด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องประมาณค่าเบื้องต้นที่ดีที่ยอมรับได้ในการจูนตัวควบคุม วิธีแรกที่ดี คือ ความเป็นไปได้จากประสบการณ์ในการควบคุมวงรอบที่มีลักษณะคล้ายกัน สำหรับวิธีอื่น ถ้าสามารถหาโมเดลของกระบวนการหรือข้อมูลผลตอบสนองความถี่ การออกแบบก็สามารถคำนวณค่ากำหนดของตัวควบคุม แต่อย่างไรก็ตามการจูนก็ยังต้องการเพื่อความละเอียด ถ้าข้อมูลต่าง ๆ ของกระบวนการไม่สมบูรณ์และไม่ละเอียดพอ

ปัญหาของระบบควบคุมที่ไม่มีประสิทธิภาพ ได้เกิดขึ้นกับโรงงานผลิตเม็ดพลาสติกแห่งหนึ่งในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ซึ่งระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพในเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558 เฉลี่ยอยู่ที่ 54.1% ดังตารางที่ 1-1 และภาพที่ 1-3 คำน้อยกว่าดัชนีชี้วัดผลงานหรือความสำเร็จของงาน (Key performance indicator) ทางหน่วยงานที่รับผิดชอบตั้งไว้จะต้องมากกว่า 75%

ตารางที่ 1-1 ข้อมูลระบบควบคุมทั้งหมดเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558

Date	Excellent	Good	Fair	Poor	No Comment					Sum	SF	QC
					Total	Saturated	Manual	Not Required	Others			
2015-01	88	248	47	108	131	9	51	60	11	622	81.8%	53.8%
2015-02	93	240	45	82	162	17	56	70	19	622	82.1%	56.2%
2015-03	91	235	50	118	128	16	49	60	3	622	83.1%	51.8%
2015-04	85	251	49	105	132	11	47	72	2	622	85.2%	53.6%
2015-05	93	255	40	87	147	25	46	72	4	622	86.0%	55.3%
2015	90	246	46	100	140	16	50	67	8	622	83.6%	54.1%



ภาพที่ 1-3 กราฟแสดงประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้งหมดเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558

ตารางที่ 1-2 เกณฑ์การประเมินคุณภาพของระบบควบคุมในฐานข้อมูลของ Matrikon

Controller category	$0.4 \leq RPI \leq 2.5$	$OSI < 0.4$	$Err.StDev < 0.02 * PVMean$
Excellent	TRUE	TRUE	TRUE
Good	FALSE	TRUE	TRUE
Good	TRUE	TRUE	FALSE
Fair	TRUE	FALSE	TRUE
Fair	FALSE	FALSE	TRUE
Fair	TRUE	FALSE	FALSE
Poor	FALSE	TRUE	FALSE
Poor	FALSE	FALSE	FALSE

จากตารางที่ 1-2 แต่ละระบบควบคุมอยู่ในอันดับจากแย จนถึงดีมากที่ได้จากการวิเคราะห์จากระบบฐานข้อมูลของ Matrikon ขึ้นอยู่กับ

1. ร้อยละค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนของค่าที่วัดได้เทียบกับค่าเป้าหมาย

2. ดัชนีประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ (RPI)

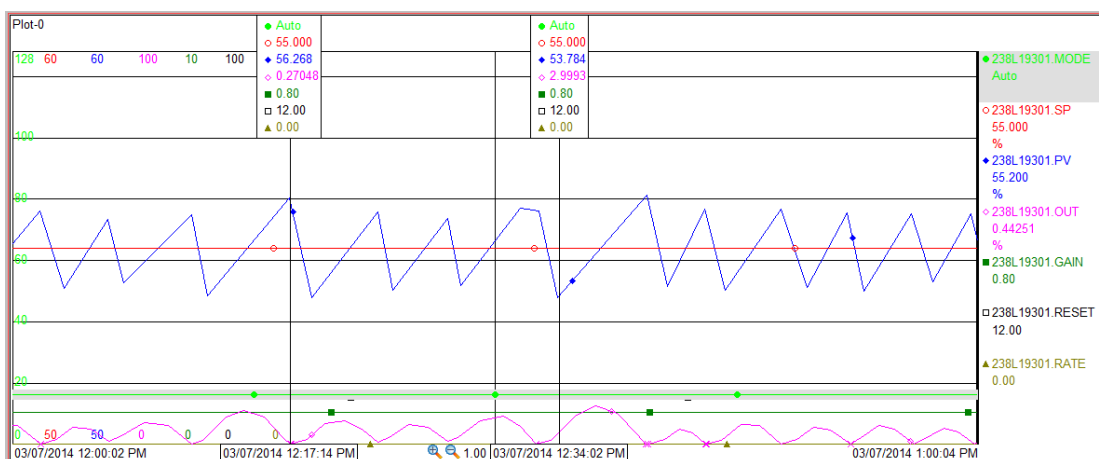
3. ดัชนีความผันผวน (OSI)

จากตารางที่ 1-1 และภาพที่ 1-3 จะเห็นว่าระบบควบคุมที่ไม่มีประสิทธิภาพมีทั้งหมด 146 ระบบควบคุม โดยมี Fair เท่ากับ 46 ระบบควบคุม และ Poor เท่ากับ 100 ระบบควบคุม โครงการนี้ได้เลือกระบบควบคุมระดับน้ำในถังของ 238L19301 มาทำการวิจัย ซึ่งอยู่ในกลุ่มของระบบควบคุม Fair ที่ได้มาจากรายงานประสิทธิภาพของระบบควบคุมประจำเดือน ตามตารางที่ 1-3 จากระบบฐานข้อมูลของ Matrikon ที่ทางบริษัทติดตั้งไว้

ตารางที่ 1-3 ข้อมูลระบบควบคุมระดับน้ำในถังของ 238L19301 เดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558

Date	Service factor	Diag_RPI	Diag_Osc	Diag_Std Dev	Diagnose_QC
2015-01	86.60	TRUE	FALSE	FALSE	Fair
2015-02	87.53	TRUE	FALSE	FALSE	Fair
2015-03	92.17	TRUE	FALSE	FALSE	Fair
2015-04	90.43	TRUE	FALSE	FALSE	Fair
2015-05	99.96	TRUE	FALSE	FALSE	Fair

และในภาพที่ 1-4 จะเห็นว่าค่าที่วัดได้ (238L19301.PV) มีค่าแกว่งขึ้นและลงอยู่ที่ +1.268% และ -1.216% เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย (238L19301.SP) ซึ่งเป็นระบบควบคุมระดับที่ไม่มีประสิทธิภาพจากการวิเคราะห์โดยระบบฐานข้อมูล Matrikon ในตารางที่ 1-3 จึงต้องได้รับการจูน



ภาพที่ 1-4 ระบบควบคุมระดับน้ำในถังที่ไม่มีประสิทธิภาพ

กรอบแนวคิดในการแก้ปัญหาของระบบควบคุมที่ไม่มีประสิทธิภาพ ของโรงงานผลิตเม็ดพลาสติกแห่งหนึ่งในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ดังภาพที่ 1-5 คือ เอาข้อมูลการวัดระดับ ในกระบวนการควบคุมที่ส่งผลต่อการทำงานของวาล์วผ่านขั้นตอนของทฤษฎี

การพยากรณ์ จะได้รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับค่า พี-ไอ-ดี (PID) ของระบบควบคุมระดับน้ำในกระบวนการ ซึ่งการใช้และการปรับแต่งระบบควบคุมแบบ PID ที่อยู่ในรูปแบบ Software component สำเร็จรูปภายใต้การทำงานของ DCS มีสองส่วน คือ ระบบควบคุมและ PID

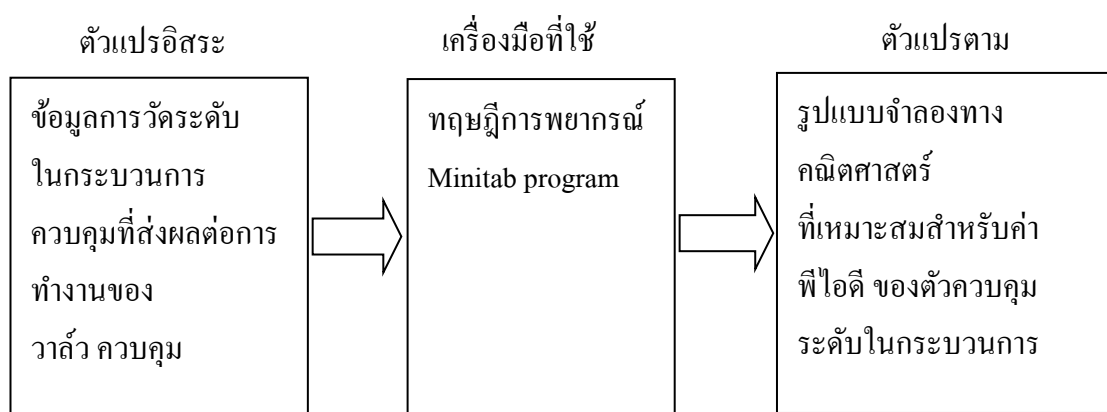
1. ระบบควบคุม ก็คือ อุปกรณ์ในการควบคุมระบบตามที่ต้องการ โดยจะมีการตั้งค่า SP (Set point: ค่าที่ต้องการ) ไว้ และนำมาเปรียบเทียบกับค่า PV (Process variable: ตัวแปรกระบวนการหรือค่าจริงที่เกิดจากผลการทำงานของระบบ) เพื่อให้ได้ค่า Error แล้วระบบควบคุมจะนำค่า Error นั้นมาทำการปรับแต่งค่าเอาต์พุตหรือ MV (Manipulated variable: ตัวแปรในการคอนโทรล) เพื่อลดค่า Error ให้ได้ต่ำที่สุด

2. PID ย่อมาจาก Proportional-Integral-Derivative โดยที่

พี (P) Proportional หมายถึง ค่าสัดส่วน มาจาก ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน

ไอ (I) Integral (อินทิกรัล) หมายถึง ค่าปริพันธ์ เป็นผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา

ดี (D) Derivative หมายถึง ค่าอนุพันธ์ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด



ภาพที่ 1-5 แผนภูมิกรอบแนวคิด

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ค่า พี-ไอ-ดี ที่เหมาะสม ในกระบวนการควบคุม
2. สามารถนำการออกแบบการทดลองที่ได้ไปใช้ในกระบวนการควบคุม ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย
 - 2.1 ลดค่าการตอบสนองสูงสุดของระบบควบคุมให้น้อยที่สุด
 - 2.2 ลดค่าช่วงเวลาที่สู่สมดุลให้สั้นที่สุด
 - 2.3 ลดค่าความคลาดเคลื่อนรวมในการควบคุมให้มีค่าน้อยที่สุด

3. เพื่อนำค่าจากการทดลองไปใช้กับระบบควบคุมอื่น ๆ ที่คล้ายกันได้
4. เพื่อเพิ่มคุณภาพของระบบควบคุมให้ได้ตามดัชนีชี้วัดผลงานหรือความสำเร็จของงานที่ทางโรงงานตั้งไว้

ข้อจำกัดในการวิจัย

1. ค่าที่ได้จากการออกแบบการทดลองใช้สำหรับตั้งค่า พี-ไอ-ดี ของกระบวนการควบคุม เฉพาะกระบวนการควบคุมระดับ เท่านั้น
2. ใช้ข้อมูลการควบคุมระดับของอุตสาหกรรมผลิตเม็ดพลาสติกในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด โดยใช้การเก็บข้อมูลย้อนหลังจาก PI System

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถนำค่า พี-ไอ-ดี ที่เหมาะสมจากการทดลองไปใช้กับกระบวนการควบคุมอื่น ๆ ที่คล้ายกันได้โดยไม่เสียเวลากับการหาค่า พี-ไอ-ดี ที่เหมาะสมใหม่
2. สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาศึกษา ออกแบบการทดลองที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอื่น ๆ ต่อไป
3. สามารถลดปริมาณของเสียที่เกิดจากระบบควบคุมที่ไม่มีประสิทธิภาพ เช่น ลดการใช้พลังงานไอน้ำร้อน ลม ในโตรเจน และ ไฟฟ้า
4. สามารถลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงวาล์วควบคุมอันเนื่องมาจากความถี่ในการเปิดและปิดที่มากเกินไป
5. สามารถเพิ่มคุณภาพของระบบควบคุมให้ได้ตามดัชนีชี้วัดผลงานหรือความสำเร็จของงานที่ทางหน่วยงานที่รับผิดชอบตั้งไว้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากที่ได้กล่าวในบทที่ 1 แล้วว่าการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง พร้อมทั้งหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการควบคุมโดยมีสเปคค่าที่วัดได้ $\pm 0.125\%$ ของค่าเป้าหมาย เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนรวมในการควบคุมให้มีความน้อยที่สุด ที่เกิดจากปัจจัยที่ไม่เหมาะสมเป็นผลทำให้ค่าที่วัดได้เกินสเปคที่กำหนดไว้ โดยผู้วิจัยได้มีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้หลักของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design of experiment) ดังนั้น ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับหลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้ด้วย ซึ่งรายละเอียดมี ดังต่อไปนี้

การประยุกต์ใช้งานแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมในการตั้งค่าของ PID Controller ได้ศึกษาเอกสารทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้นำเสนอตามหัวข้อ ดังต่อไปนี้

ระบบ DCS (Distributed control system)

ระบบ DCS (Distributed control system) คือ ระบบควบคุม (Control) และเฝ้าดู (Monitor) ที่ใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับระบบควบคุมทั้งหมดและใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น โรงกลั่นน้ำมัน แท่นขุดเจาะน้ำมันและก๊าซอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และเคมีคอลทั้งหลาย ทั้งนี้ ระบบ DCS ยังมีให้เลือกใช้หลายยี่ห้อด้วยกัน เช่น Honeywell yokogawa siemens emerson ABB เป็นต้น และระบบ DCS นั้น ยังมีความเสถียรและแม่นยำค่อนข้างสูงมาก จึงเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมที่มีความเสี่ยงสูง เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นต้น ดังนั้น ไม่ต้องสงสัยเลยว่าทำไมระบบ DCS นั้นถึงมีราคาค่อนข้างแพง

ข้อดีของระบบ DCS (Distributed control system)

1. สามารถควบคุมกระบวนการผลิตต่าง ๆ ได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้ลดเวลา และมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้แรงงานคนหลายเท่าตัว
2. สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์การวัดและควบคุม เช่น เครื่องวัดอุณหภูมิ (Temp transmitter) เครื่องวัดแรงดัน (Pressure transmitter) เครื่องวัดระดับของเหลว (Level transmitter) เครื่องวัด ระดับการไหล (Flow transmitter) คอนโทรลวาล์ว ปัมป์ หรือมอเตอร์ เป็นต้น

3. สามารถมีการเชื่อมต่อกับระบบอื่น ๆ เช่น PLC FSC เป็นต้น และยังสามารถควบคุม หรือ Monitor ระยะเวลา (SCADA) ผ่าน Network ชนิดต่าง ๆ เช่น Wireless หรือดาวเทียมได้อีกด้วย

4. สามารถแจ้งเตือนทั้งบนหน้าจอคอมพิวเตอร์และสัญญาณเสียงเมื่อมีความผิดปกติ ของกระบวนการผลิตเกิดขึ้น

5. ระบบ DCS ยังมีฟังก์ชันเก็บข้อมูล (History) เพื่อให้สามารถย้อนกลับไปดูข้อมูล (Trend) ต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตในอดีตที่มาจากและนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตในอนาคตได้
ชื่อเสียของระบบ DCS (Distributed control system)

1. ระบบ DCS เป็นระบบที่ค่อนข้างใหญ่และมีความซับซ้อนจึงจำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญ เท่านั้นในการตรวจสอบเมื่อระบบเกิดปัญหา

2. อะไหล่ (Part) ของ DCS Controller ต้องนำเข้าจากต่างประเทศเท่านั้นจึงอาจใช้เวลา ในการสั่งซื้อ แต่ผู้ใช้ส่วนใหญ่จะสั่งซื้อมาเก็บไว้เป็น Spare ไว้ล่วงหน้า

3. ระบบ DCS มีราคาค่อนข้างแพง

ส่วนประกอบหลักของระบบ DCS (Distributed control system) มีอยู่ 4 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. CS Servers
2. DCS Stations
3. Networks/ LAN (Fault tolerant ethernet)
4. Controllers

DCS Server

Server ในระบบ DCS นั้น สามารถเป็นได้ทั้งแบบเดี่ยว (Single server) และแบบคู่ (Redundancy server) ดังภาพที่ 2-1 ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแบบหลังเพราะถ้ามี Server ตัวใดตัวหนึ่งเสีย หรือหยุดการทำงาน Server อีกตัวก็จะขึ้นมาทำงานแทนในทันทีและจะทำให้กระบวนการผลิตนั้น ไม่หยุดชะงักหรือสร้างความเสียหายให้กับกระบวนการผลิตได้ ซึ่งหน้าที่หลักของ Server จะมี ดังต่อไปนี้

Server เป็นศูนย์กลางการเชื่อมต่อระหว่าง Controller กับ Station

Server เป็นตัวเก็บฐานข้อมูล (Database) และข้อมูลย้อนหลัง (History)

Server เป็นศูนย์กลางการออกแบบกระบวนการผลิต (Engineering) ก่อนที่จะส่งต่อ (Download) ไปยัง Controller

Server ยังเป็นศูนย์กลางการเชื่อมต่อระหว่าง DCS กับระบบอื่น ๆ เช่น ระบบ SCADA หรือ OPC เป็นต้น



ภาพที่ 2-1 Redundancy server

DCS Controller

Controller ถือเป็นส่วนสำคัญที่สุดของระบบ DCS เพราะเป็นตัวที่เชื่อมต่อโดยตรงกับเครื่องวัดหรืออุปกรณ์ (Device) ในกระบวนการผลิตนอกจากนี้ Controller ยังถือเป็นสมองของระบบ DCS เลยก็ว่าได้เพราะมี CPU Processor ที่ทำหน้าที่ Running programming ที่รับมาจาก Server นั้นเอง Controller นั้นมีมากมายหลายรุ่นและหลายยี่ห้อ การเลือกใช้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน

DCS Stations

DCS Station คือ เครื่องคอมพิวเตอร์ (PC) ที่รับข้อมูลจาก Server ให้ผู้ควบคุมดูแลการผลิต (Operator) นั้นใช้ในการเฝ้าดู (Monitoring) และควบคุม (Control) กระบวนการผลิตทั้งหมด ทั้งนี้ DCS Station สามารถมีได้มากกว่า 1 เครื่อง ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม DCS Station มี Accessories ดังนี้

1. Display monitor มีได้ถึง 1-4 Display



ภาพที่ 2-2 Display monitor

2. คีย์บอร์ด



ภาพที่ 2-3 คีย์บอร์ด (Standard PC keyboard)

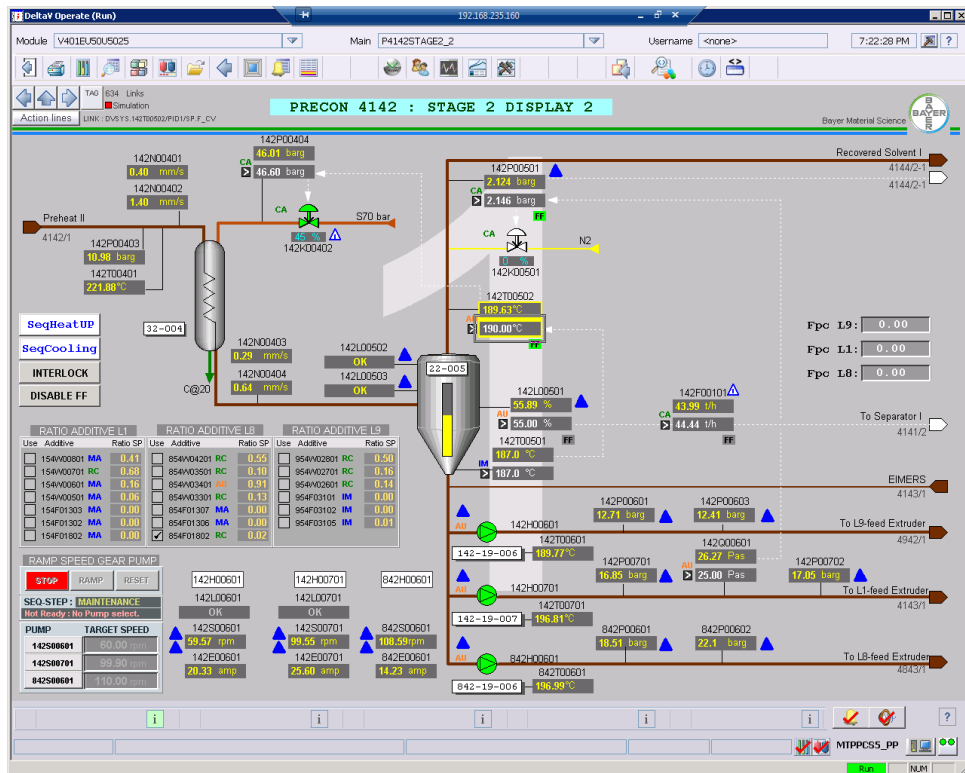
3. Pointing device



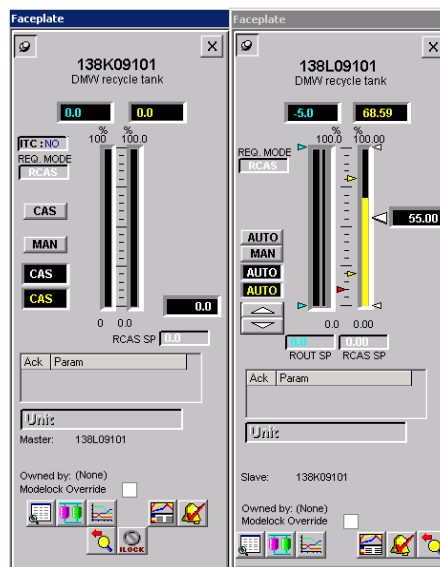
ภาพที่ 2-4 Pointing device

DCS Graphic

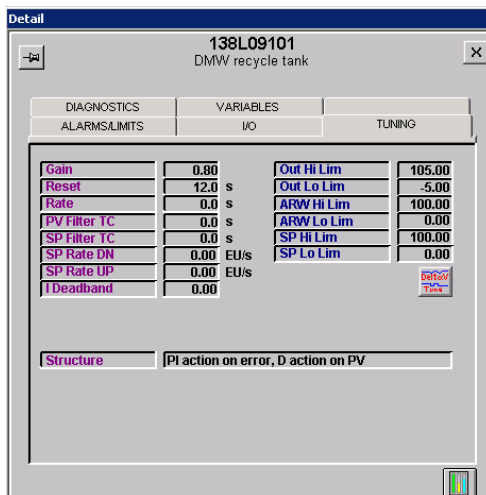
DCS Graphic เป็น Software บน DCS Station สำหรับช่วยให้ผู้ควบคุมการผลิต (Operator) สามารถควบคุมระบบการผลิตได้ง่ายยิ่งขึ้นเพราะ Graphic เป็น โปรแกรมที่จำลองรูปแบบกระบวนการผลิตออกมาเป็นรูปภาพเสมือนจริงซึ่งมีตัวอย่าง ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2-5 DCS Graphic



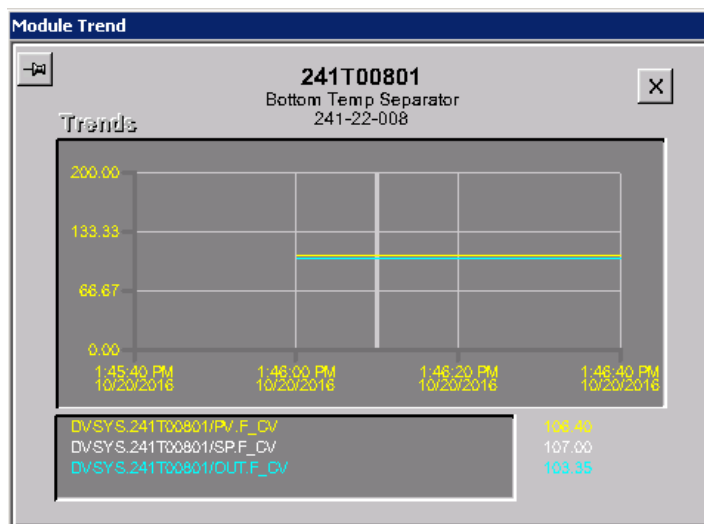
ภาพที่ 2-6 DCS Faceplate



ภาพที่ 2-7 DCS Detail

DCS Trend

DCS Trend คือ Software program ที่ติดตั้งอยู่บน Server และ Station ใช้สำหรับเรียกดูค่าการวัดและควบคุมออกมาในลักษณะ Process line หรือ Trend ซึ่งทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ระบบการผลิตเพื่อพัฒนาระบบการผลิตหรือวิเคราะห์หาสาเหตุเมื่อเกิดปัญหา



ภาพที่ 2-8 DCS Trend

DCS Events

DCS Event คือ Software program ที่ติดตั้งอยู่บน Server และ Station ใช้สำหรับบันทึกเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับระบบ (System) และกระบวนการผลิต (Process) ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์หาสาเหตุเมื่อระบบเกิดขัดข้องหรือมีปัญหาและยังสามารถเก็บข้อมูล ได้หลายปีขึ้นอยู่กับขนาดของ Memory

Date/Time	Event Type	Category	Area	Mode	Unit	Module	Module Description	Parameter	State	Level	Desc1	Desc2
10/20/2016 1:47:43.314 PM	CHANGE	USER	SIL0_BA	MPPPCS		S302B04	SIL0.262-18-002	OPR_CDM	INACTIA		OPERATOR	NEW VALUE = 0
10/20/2016 1:47:48.150 PM	EVENT	PROCESS	SIL0_BA	CTRL215		262H002	Truck Load Local Switch	DISC_ALM	INACTIA		CFN	Change From Normal Value 1
10/20/2016 1:47:45.076 PM	ALARM	PROCESS	PC_PAT	CTRL.PA	A0009	0009A09	021 Q.00708 O2 in ATM	LO_LO_ALM	INACTIA	14-BMS	LOLO	Low Low Alarm Value 20.0176 Limit 1
10/20/2016 1:47:45.075 PM	ALARM	PROCESS	PC_PAT	CTRL.PA	A0009	0009A09	021 Q.00708 O2 in ATM	LO_ALM	INACTIA	10-BMS	LOW	Low Alarm Value 20.0176 Limit 19.5
10/20/2016 1:47:44.076 PM	ALARM	PROCESS	PC_PAT	CTRL.PA	A0009	0009A09	021 Q.00708 O2 in ATM	LO_LO_ALM	ACTIACK	14-BMS	LOLO	Low Low Alarm Value 17.54 Limit 19
10/20/2016 1:47:44.076 PM	ALARM	PROCESS	PC_PAT	CTRL.PA	A0009	0009A09	021 Q.00708 O2 in ATM	LO_ALM	ACTIACK	10-BMS	LOW	Low Alarm Value 17.54 Limit 19.5
10/20/2016 1:47:32.032 PM	CHANGE	USER	LINE1	MPPCS		V501H45	LINE 1 - PRODUCT CON. OPR. FILL				OPERATOR	NEW VALUE = 1
10/20/2016 1:47:28.076 PM	ALARM	PROCESS	PC_PAT	CTRL.PA	A0009	0009A09	021 Q.00708 O2 in ATM	LO_LO_ALM	INACTIA	14-BMS	LOLO	Low Low Alarm Value 19.7735 Limit 1
10/20/2016 1:47:28.075 PM	ALARM	PROCESS	PC_PAT	CTRL.PA	A0009	0009A09	021 Q.00708 O2 in ATM	LO_ALM	INACTIA	10-BMS	LOW	Low Alarm Value 19.7735 Limit 19.5
10/20/2016 1:47:21.008 PM	EVENT	PROCESS	LINE1	CTRL207		V501H46	LINE 1 - DW (BATCH SE		ACTIVE	4-INFO	V501H457U	Outputs Transfer Failure
10/20/2016 1:47:21.008 PM	EVENT	PROCESS	LINE1	CTRL207		V501H46	LINE 1 - DW (BATCH SE		ACTIVE	4-INFO	V501H457U	Outputs Transfer Failure
10/20/2016 1:47:21.008 PM	EVENT	PROCESS	LINE1	CTRL207		V501H46	LINE 1 - DW (BATCH SE		ACTIVE	4-INFO	V501H457U	Outputs Transfer Failure
10/20/2016 1:47:19.208 PM	EVENT	PROCESS	A4856	CTRL220		856P019	Hydraulic pressure	DISC_ALM	INACTIA		CFN	Change From Normal Value 0
10/20/2016 1:47:13.314 PM	EVENT	PROCESS	LINE9	CTRL209		157P014	PA3 to Intermediate Silo	SIL_ALM	ACTIACK		Switch Low	Switch Low Alarm Value 0.692636 Li
10/20/2016 1:47:11.314 PM	EVENT	PROCESS	LINE9	CTRL209		157P014	PA3 to Intermediate Silo	SIL_ALM	INACTIA		Switch Low	Switch Low Alarm Value 0.70822 Limit 1
10/20/2016 1:47:04.862 PM	ALARM	PROCESS	UTILITY	CTRL207		097P001	NG lines of die cleaning	AH_ALM	INACTIA	11-WAR	HIGH	High Alarm Value 0.489875 Limit 0.5
10/20/2016 1:47:00.695 PM	CHANGE	USER	UTILITY	MPPPCS		083F103	WnuStripper	PID1/SP.CV			OPERATOR	NEW VALUE = 180
10/20/2016 1:46:59.313 PM	EVENT	PROCESS	LINE9	CTRL209		157P014	PA3 to Intermediate Silo	SIL_ALM	ACTIACK		Switch Low	Switch Low Alarm Value 0.698468 Li
10/20/2016 1:46:56.208 PM	EVENT	PROCESS	A4856	CTRL220		856P019	Hydraulic pressure	DISC_ALM	ACTIACK		CFN	Change From Normal Value 1
10/20/2016 1:46:53.075 PM	ALARM	PROCESS	PC_PAT	CTRL.PA	A0009	0009A09	021 Q.00708 O2 in ATM	LO_LO_ALM	ACTIACK	14-BMS	LOLO	Low Low Alarm Value 18.2996 Limit 1
10/20/2016 1:46:53.075 PM	ALARM	PROCESS	PC_PAT	CTRL.PA	A0009	0009A09	021 Q.00708 O2 in ATM	LO_ALM	ACTIACK	10-BMS	LOW	Low Alarm Value 18.2996 Limit 19.5
10/20/2016 1:46:40.313 PM	EVENT	PROCESS	LINE9	CTRL209		157P014	PA3 to Intermediate Silo	SIL_ALM	INACTIA		Switch Low	Switch Low Alarm Value 0.70357 Limit 1
10/20/2016 1:46:37.313 PM	EVENT	PROCESS	LINE9	CTRL209		157P014	PA3 to Intermediate Silo	SIL_ALM	ACTIACK		Switch Low	Switch Low Alarm Value 0.699714 Li
10/20/2016 1:46:36.688 PM	EVENT	SYSTEM	AREA.A	MPPCS				COLD_RES_DOWNL	4-INFO			Cold restart on CTRL221 started
10/20/2016 1:46:34.868 PM	EVENT	SYSTEM	AREA.A	CTRL221				REDU		00-22-ES-1		Standby is now Available
10/20/2016 1:46:32.482 PM	ALARM	PROCESS	UTILITY	CTRL207		097P001	NG lines of die cleaning	AH_ALM	ACTIACK	11-WAR	HIGH	High Alarm Value 0.501928 Limit 0.5
10/20/2016 1:46:32.472 PM	CHANGE	USER	UTILITY	MPPPCS		097P001	NG lines of die cleaning	AH_ALMNA			OPERATOR	NEW VALUE = 0
10/20/2016 1:46:28.420 PM	EVENT	SYSTEM	AREA.A	MPPCS				COLD_RES_DOWNL	4-INFO			Cold restart on CTRL221 started
10/20/2016 1:46:28.420 PM	DOWNLOAD	USER	AREA.A	CTRL221				CTRL221	UPDATE		ADMINISTR	End of download - 0
10/20/2016 1:46:28.221 PM	DOWNLOAD	USER	A4856	CTRL221		086T141	Temp-Knockblack Cond		UPDATE		ADMINISTR	Partial Download of Module
10/20/2016 1:46:28.223 PM	EVENT	SYSTEM	AREA.A	CTRL221				REDU		00-22-ES-1		Standby is now Unavailable
10/20/2016 1:46:27.740 PM	DOWNLOAD	USER	AREA.A	CTRL221				CTRL221	UPDATE		ADMINISTR	Start of Download - 0

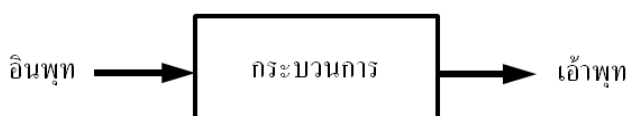
ภาพที่ 2-9 DCS Events

ระบบควบคุม (Control system)

ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบง่าย ๆ ที่รู้จักกันดี ได้แก่ เบรกเกอร์ไฟฟ้าในบ้านเรา ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าโดยปริมาณกระแสไฟฟ้าอาจจะเพิ่มหรือลดได้ทุกขณะเพื่อควบคุมไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าบ้านเกินขนาด เรากำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าโดยใช้กักการทนกระแสของเบรกเกอร์ไว้ส่วนนี้ เรียกว่า เครื่องกำหนดเกณฑ์ควบคุมกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไม่เกินขนาดที่กำหนดไว้กระแสที่ผ่านเบรกเกอร์ไปเป็นผลลัพธ์ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายต่อเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านแต่ถ้ากระแสมากเกินไปเครื่องกำหนดเกณฑ์ควบคุมกักการทนกระแสของเบรกเกอร์ก็จะเป็นสัญญาณกระตุ้นทำให้เบรกเกอร์ตัดวงจรไฟฟ้า เรียกว่า หน่วยไดนามิกส์ในกรณีนี้ผลลัพธ์ ก็คือ ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปเป็นอันตรายต่อเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน

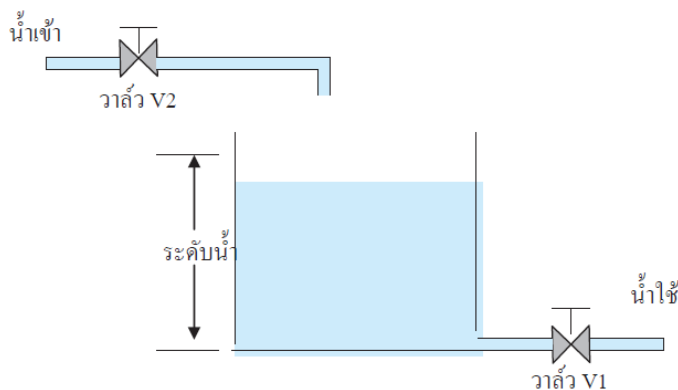
ระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

1. ระบบควบคุมแบบเปิด คือ ระบบควบคุมที่มีการควบคุมในลักษณะที่สั่งงานไปยังเครื่องควบคุมอย่างเดียวไม่มีการอ่านค่าผลลัพธ์ของระบบป้อนกลับเป็นระบบที่ง่ายที่สุดและมีอุปกรณ์ภายในที่ไม่ยุ่งยากค่าเอาต์พุตที่ได้จะไม่ส่งผลต่อการควบคุมกระบวนการของระบบ คือ จะไม่มีการนำเอาต์พุตที่ได้กลับมาเปรียบเทียบกับค่าอินพุตที่ป้อนให้กับระบบ



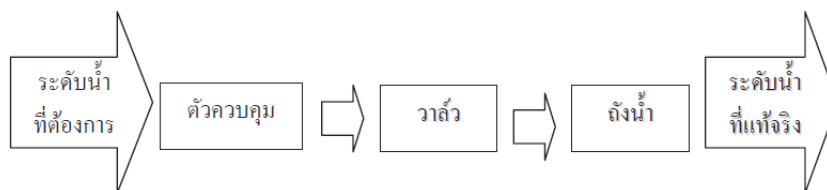
ภาพที่ 2-10 ระบบควบคุมแบบเปิด

ตัวอย่างของระบบควบคุมแบบเปิดที่เราเห็นกันในชีวิตประจำวัน เช่น การควบคุมระดับของน้ำภายในถัง โดยการเปิดและปิดวาล์วให้น้ำเข้าถังน้ำและเมื่อมีการใช้น้ำในถังก็จะเปิดและปิดวาล์วให้น้ำเข้าถังน้ำอีกมาโดยที่ไม่มีการตรวจสอบและตรวจวัดค่าใด ๆ เพื่อรักษาระดับน้ำไว้ในระดับที่ต้องการ



ภาพที่ 2-11 การควบคุมระดับน้ำในถัง

เมื่อเขียนแทนด้วยลูกศรจะได้องค์ประกอบดังภาพ



ภาพที่ 2-12 องค์ประกอบของการควบคุมระดับน้ำในถังแบบเปิดที่มา

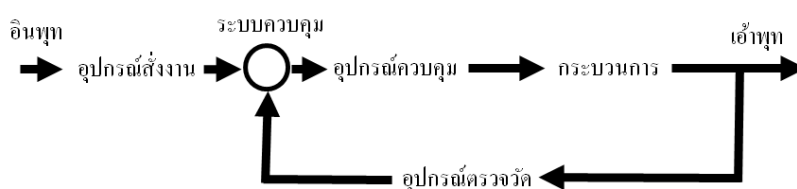
จากระบบการควบคุมระดับน้ำในถังน้ำวัตถุประสงคในการควบคุม (Input) คือ น้ำไหลเข้าถังในปริมาณที่มีระดับของน้ำในถังตามที่ต้องการ โดยมีกระบวนการ ขั้นตอน หลักที่ใช้ในการควบคุม (Process) โดยผู้ควบคุม คือ ผู้ควบคุมจะดูที่ถึงว่าน้ำมีระดับสูงถึงที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่ทำการเปิดวาล์ว V2 และหากระดับน้ำมีระดับสูงกว่าที่ต้องการผู้ควบคุมจะเปิดวาล์ว V1 เพื่อให้ น้ำไหลออกจากถังระดับน้ำในถังก็จะลดระดับลงมาตามที่ต้องการค่าที่ได้รับจริง (Output) คือ ระดับน้ำในถังมีระดับตามที่ต้องการจากการปฏิบัติ ขั้นตอนหลักที่ใช้ในการควบคุม (Process) คือ การเปิดวาล์ว V1 และ V2 เพื่อให้ น้ำไหลเข้าและออกจากถังของผู้ควบคุม (Controller) หน้าที่ของผู้ควบคุมจากการกระทำข้างต้น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การรวบรวมข้อมูลที่ต้องใช้ในการควบคุม

ขั้นตอนที่ 2 ผู้ควบคุมพิจารณาตัดสินใจจากข้อมูลในข้อที่ 1

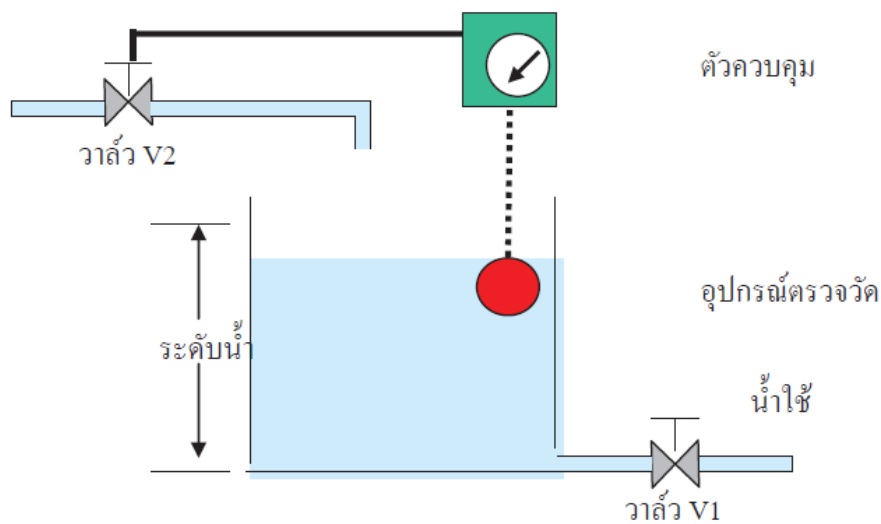
ขั้นตอนที่ 3 ผู้ควบคุมตัดสินใจในการเปิดปิดวาล์ว V1 และ V2

2. ระบบควบคุมแบบปิดหรือแบบป้อนกลับ คือ ระบบควบคุมที่มีการควบคุม ในลักษณะที่มีการสั่งงานไปยังเครื่องควบคุมแล้วมีการอ่านค่าผลลัพธ์ของระบบป้อนกลับมา เพื่อเปรียบเทียบและสั่งงานควบคุมไปใหม่เพื่อให้ผลลัพธ์ของระบบเป็นตามเป้าหมายที่ต้องการ



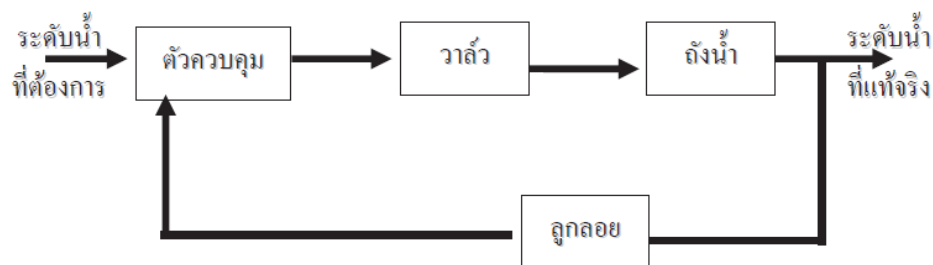
ภาพที่ 2-13 องค์ประกอบของการควบคุมแบบป้อนกลับ

ตัวอย่างของระบบควบคุมแบบปิดหรือแบบป้อนกลับที่เราเห็นกันในชีวิตประจำวัน เช่น เครื่องปรับอากาศและตู้เย็นจะมีการตรวจสอบว่าอุณหภูมิของห้องและตัวตู้เย็นเป็นเท่าใด เพื่อที่จะตรวจสอบว่าระบบปรับอากาศและตู้เย็นควรจะทำงานหรือไม่ หรือการควบคุมระดับของน้ำภายในถังแบบอัตโนมัติ



ภาพที่ 2-14 ระบบควบคุมแบบปิดหรือแบบป้อนกลับ

เมื่อเขียนแทนด้วยลูกศรจะได้องค์ประกอบดังภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 องค์ประกอบของการควบคุมระดับน้ำในถังแบบปิดหรือแบบป้อนกลับ

จากระบบการควบคุมระดับน้ำในถังน้ำวัตถุดิบประสงค์ในการควบคุม (Input) คือ น้ำไหลเข้าถังในปริมาณที่มีระดับของน้ำในถังตามที่ต้องการ โดยมีกระบวนการ ขั้นตอน หลักที่ใช้ในการควบคุม (Process) โดยตัวควบคุม คือ ตัวควบคุมจะตรวจที่ถังว่าน้ำมีระดับสูงถึงที่ต้องการหรือไม่ถ้าไม่ทำการเปิดวาล์ว V2 และหากระดับน้ำมีระดับสูงกว่าที่ต้องการตัวควบคุมจะเปิดวาล์ว V1 เพื่อให้ น้ำไหลออกจากถังระดับน้ำในถังก็จะลดระดับลงมาตามที่ต้องการค่าที่ได้รับจริง (Output) คือ ระดับน้ำในถังมีระดับตามที่ต้องการ

หน้าที่ของตัวควบคุมจากการกระทำข้างต้น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การรวบรวมข้อมูลที่ต้องใช้ในการควบคุมจากอุปกรณ์ตรวจวัด (ลูกลอย)

ขั้นตอนที่ 2 ตัวควบคุมตรวจจากข้อมูลในข้อที่ 1

ขั้นตอนที่ 3 การส่งผลการกระทำไปยังวาล์ว V1, V2

คุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติ

ในการเปรียบเทียบคุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติที่เหมือนกัน 2 ระบบ ว่าระบบไหนดีกว่ากันต้องดูที่การตอบสนองของแต่ละระบบแล้วมาเปรียบเทียบกันการเปรียบเทียบโดยดูจากองค์ประกอบ ดังนี้

1. ความแม่นยำ (Accuracy)

2. ความรวดเร็ว (Speed)

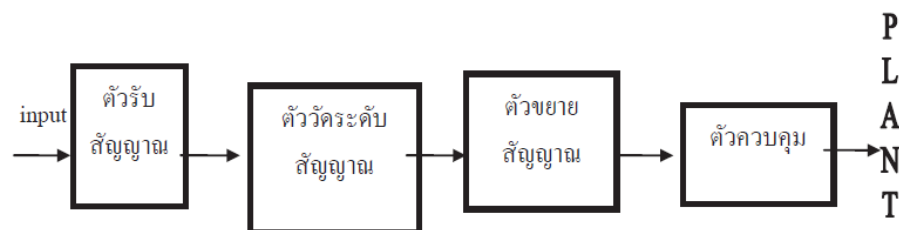
3. ความเสถียร (Stability)

ระบบควบคุมที่ขาดความแม่นยำย่อมนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้และถือว่าเป็นระบบการควบคุมที่สร้างขึ้นหรือทำขึ้นโดยวัตถุประสงค์ของการควบคุมความรวดเร็วในการตอบสนองก็เช่นกันระบบที่มีการตอบสนองที่แม่นยำไม่มีความคลาดเคลื่อนเลยแต่ใช้เวลานานมากก็ย่อมเป็นระบบควบคุมที่นำไปใช้งานไม่ได้ ความเสถียรของการตอบสนองของระบบควบคุมอัตโนมัติก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะชี้ให้เห็นถึงคุณภาพของระบบควบคุมนั้น ๆ ระบบควบคุมที่มีความเร็วและแม่นยำในการตอบสนองแต่ในบางขณะหรือกับบางลักษณะของอินพุตไม่สามารถให้การตอบสนองที่เสถียรระบบการควบคุมนั้นก็ใช้งานไม่ได้และชำรุดไปจะเห็นว่า ความแม่นยำ ความรวดเร็ว และความเสถียรนอกจากจะเป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงคุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติแล้วยังเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติทุกระบบจะขาดข้อใดไม่ได้ในระบบควบคุมอัตโนมัติ ผู้สร้างระบบควบคุมต้องคำนึงถึงทั้ง 3 องค์ประกอบ คือ พยายามให้ได้ระบบควบคุมที่ทำงานหรือให้การตอบสนองที่แม่นยำที่สุด รวดเร็วที่สุด และที่เสถียรที่สุดซึ่งในทางปฏิบัติทำได้ลำบาก

ส่วนประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติ

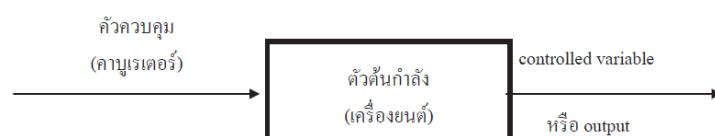
ระบบควบคุมอัตโนมัติประกอบด้วยระบบย่อยหรือส่วนประกอบใหญ่ ๆ 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็นตัวควบคุม (Control) ได้แก่ ส่วนซึ่งทำหน้าที่แปรสัญญาณจากภายนอกที่ส่งเข้ามาสู่ระบบหรือ Input ให้เป็นสัญญาณที่เหมาะสมและมีกำลังพอเพื่อไปบังคับให้ส่วนที่เป็นต้นกำลังทำงานเพื่อให้ระบบควบคุมทั้งระบบทำงาน เช่น ในระบบควบคุมความเร็วของรถยนต์ ส่วนที่เป็นตัวควบคุมจะเริ่มต้นจากคันเร่งน้ำมันทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณจากภายนอกและวัดระดับสัญญาณ ไปในตัวด้วยแล้วส่งสัญญาณนั้น ไปยังคาบูเรเตอร์หรือหัวฉีดโดยอาศัยสายคันเร่งต่าง ๆ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณคาบูเรเตอร์หรือหัวฉีดก็จะทำงานโดยเปิดลิ้นให้ส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศไหลลงสู่ห้องเผาไหม้หรือในกรณีหัวฉีดก็ฉีดน้ำมันเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้นคาบูเรเตอร์หรือหัวฉีดจึงทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม กล่าวได้โดยทั่วไปส่วนที่เป็นตัวควบคุมประกอบด้วยตัวรับสัญญาณ ตัววัดระดับสัญญาณ ตัวขยายสัญญาณและตัวควบคุม



ภาพที่ 2-16 ส่วนที่เป็นตัวควบคุมและส่วนประกอบต่าง ๆ

2. ส่วนที่เป็นต้นกำลัง (Plant) ได้แก่ ส่วนของระบบควบคุมอัตโนมัติที่ได้รับสัญญาณจากส่วนที่เป็นตัวควบคุมแล้วทำงานให้ Output หรือ Controlled variable ในระบบเพิ่มความเร็วยานยนต์ส่วนที่เป็นต้นกำลัง ได้แก่ เครื่องยนต์ซึ่งเมื่อรับส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศจากคาบูเรเตอร์แล้วทำงานให้ได้ความเร็วของรถยนต์โดยส่วนที่เป็นต้นกำลัง ได้แก่ เครื่องยนต์

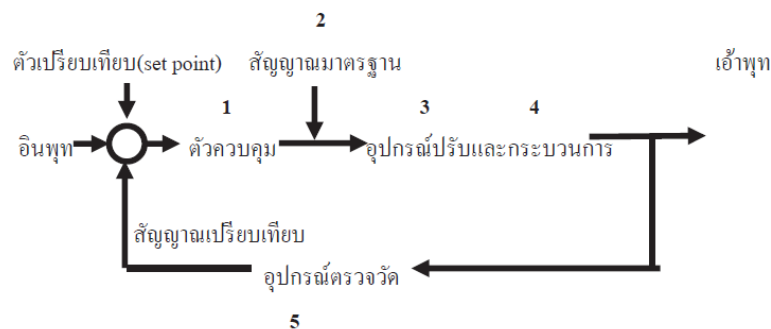


ภาพที่ 2-17 สัญญาณเข้าและออกของส่วนที่เป็นต้นกำลัง

ข้อแตกต่างของส่วนที่เป็นตัวควบคุมกับส่วนที่เป็นต้นกำลัง ก็คือ ส่วนที่เป็นตัวควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของทั้งระบบให้เป็นไปตามเป้าหมายของระบบควบคุมแต่ Output ของส่วนนี้ไม่สามารถทำงานให้ระบบได้จึงต้องอาศัยส่วนที่เป็นต้นกำลังสำหรับส่วนที่เป็นต้นกำลังทำหน้าที่ผลิตกำลังให้เป็นไปตามระดับความแรงจากส่วนที่เป็นตัวควบคุมเพื่อให้ Output ของระบบหรือ Controlled variable กล่าวคือ ส่วนที่เป็นต้นกำลังจะทำงานในลักษณะแปรรูปหรือส่งผ่านพลังงานกล คือ รอบเครื่องยนต์และแรงบิดตัวเปรียบเทียบค่าจะพบเสมอในระบบควบคุมประเภทวงจรปิดที่เรียกว่าระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทที่มีการป้อนกลับ (Feedback control system)

ระบบควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรมการผลิต

ระบบควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรมการผลิตซึ่งมีวิวัฒนาการและการพัฒนาการจนถึงปัจจุบันทางด้านทฤษฎีระบบควบคุมและระบบของเครื่องมือวัดและควบคุมอุตสาหกรรมโดยทั่ว ๆ ไปมีบล็อกไดอะแกรมของทฤษฎีการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control system) ดังนี้



ภาพที่ 2-18 การควบคุมแบบป้อนกลับ

จากบล็อกไดอะแกรม เราสามารถแยกแยะองค์ประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติตามระบบเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรมได้มี 5 องค์ประกอบ คือ

1. ตัวควบคุม (Controller) หมายถึง เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณที่ต้องการควบคุมให้ได้ผลตอบสนองตามต้องการ เช่น ตัวควบคุมอาจเป็นแบบ On, Off หรือ PID
2. สัญญาณมาตรฐาน (Standard signal) ในการที่ต้องการเชื่อมอุปกรณ์ในระบบควบคุมอัตโนมัติให้ทำงานได้ตามความต้องการนั้น จำเป็นต้องมีมาตรฐานรองรับ ซึ่งวิวัฒนาการตั้งแต่เริ่มมี

ระบบควบคุมอัตโนมัติมานั้นก็มีการเปลี่ยนแปลงระบบตัวอุปกรณ์เครื่องมือวัดมาตั้งแต่ยุคลมไฟฟ้า และปัจจุบันมีการใช้สัญญาณดิจิทัล

3. อุปกรณ์ปรับ (Final control element) เป็นอุปกรณ์ที่จะต้องทำหน้าที่ปรับสภาวะของกระบวนการด้วยการเปลี่ยนแปลงตามค่าสัญญาณควบคุม (Manipulated variable) ของกฎการควบคุม อุปกรณ์พวกนี้ ได้แก่ วาล์วควบคุม (Control valve), Inverter, Actuator ต่าง ๆ เป็นต้น

4. กระบวนการ (Process) หมายถึง กระบวนการทางฟิสิกส์ที่เราต้องการควบคุมให้มีสภาวะตามต้องการขณะที่สภาวะการทำงานหรือสภาพแวดล้อมอาจเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา กระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล ระดับความเป็นกรดด่าง (pH) และกระบวนการในถังทำปฏิกิริยา เป็นต้น

5. อุปกรณ์ตรวจวัด (Measuring instruments) หมายถึง อุปกรณ์ ได้แก่ Sensor, Transducer หรืออุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Converter) หรือวัดสัญญาณอื่น ๆ ที่มีเอาต์พุตตามสัญญาณมาตรฐาน

การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ

การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ต้องหาจุดปฏิบัติงานในการที่จะออกแบบกระบวนการสำหรับควบคุมอัตโนมัติและต้องศึกษาถึงคุณลักษณะของระบบควบคุมที่ความเหมาะสมของระบบรวมทั้งข้อดีข้อเสียของระบบควบคุม ซึ่งระบบควบคุมอัตโนมัติที่นิยมในปัจจุบันมีอยู่ 2 ระบบ คือ

1. ระบบการควบคุมแบบเปิด
2. ระบบควบคุมแบบปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบเปิด (Open control loop)

ระบบควบคุมแบบเปิด ไม่สามารถควบคุมระบบให้เกิดความแม่นยำในการควบคุมได้ ส่งผลให้เกิดการรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกระบบควบคุมทำให้เสถียรภาพของกระบวนการการผลิตขาดประสิทธิภาพจึงมีการพิจารณาที่จะนำเอาสัญญาณเอาต์พุต (Output) ซึ่งมีผลโดยตรงกับระบบควบคุมส่งสัญญาณมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบ ผลต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองที่นำมาเปรียบเทียบนั้นเป็นสัญญาณค่าผิดพลาด (Error) เพื่อที่จะใช้เป็นสัญญาณป้อนเข้าตัวควบคุม (Controller) ให้ตัวควบคุมนำไปสร้างสัญญาณควบคุมใหม่เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทำให้เอาต์พุตของระบบเข้าสู่ค่าต้องการซึ่งเรียกการควบคุมระบบนี้ว่าระบบการควบคุมแบบปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม

ระบบควบคุมแบบปิดหรือแบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับจะอาศัยหลักการของการป้อนกลับของสัญญาณ โดยจะใช้ Sensor เป็นอุปกรณ์วัดสัญญาณที่บอกชื่อ สภาพหรือคุณสมบัติหรือระดับพลังงานที่เราต้องการควบคุมที่เรียกว่า Controlled variable แล้วส่งสัญญาณไปที่อุปกรณ์ควบคุมที่เรียกว่า Controller ซึ่ง Controller จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายหรือเรียกว่า Set point ทำให้เกิดเป็นค่าความแตกต่างระหว่าง Controlled variable กับ Set point ขึ้น เรียกว่า Error signal หรือ Deviation โดยที่ Controller จะนำเอาค่า Error signal ไปเป็นตัวกำหนดขนาดและทิศทางการเปลี่ยนแปลงของ Final control element เช่น วาล์ว Damper เป็นต้น เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ทำให้ Controlled variable เกิดการเปลี่ยนแปลง เพื่อรักษาค่า Controlled variable ให้ได้ตามค่ากำหนดอยู่ตลอดเวลา

องค์ประกอบของระบบควบคุมแบบปิดหรือแบบป้อนกลับ

ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับเป็นประเภทหนึ่งของระบบควบคุมความมุ่งหมายของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ คือ เพื่อผลการควบคุมเป็นไปตามความมุ่งหมายทั้งคุณภาพและปริมาณส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการควบคุมแบบป้อนกลับอยู่ 4 องค์ประกอบ คือ

1. Process หมายถึง กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงรูปของพลังงานซึ่งผลที่ออกกระบวนการจะมีคุณลักษณะหรือตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความดัน อุณหภูมิ ระดับ อัตราการไหล เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการควบคุมจะมีการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการควบคุมให้เป็นไปตามที่ได้กำหนด

2. Sensor และ Transmitter หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าของ Controlled variable ซึ่ง Sensor เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัด เช่น อุณหภูมิ แรงดัน อัตราการไหล ฯลฯ ซึ่งสัญญาณที่วัดได้นั้นยังไม่เป็นสัญญาณมาตรฐานจึงต้องมีการส่งสัญญาณไปที่ Transmitter เพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณมาตรฐานเพื่อส่งให้ตัวควบคุมเครื่องบันทึกสัญญาณ หรืออุปกรณ์แสดงค่าการวัดต่อไป

3. Controller เป็นส่วนประกอบที่ใช้ในการควบคุม Controlled variable โดยการนำเอา มาเปรียบเทียบกับ Set point แล้วนำ Error ไปกำหนดเป็นสัญญาณ Controller output controller มีโหมดการทำงานอยู่หลายลักษณะการควบคุม คือ On-off control, proportional control, proportional pulse integral control, proportional pulse integral pulse derivative control

4. Final control element เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานตามคำสั่งของสัญญาณ Control output ซึ่งจะเป็นตัวที่ใช้ในการปรับปริมาณของ Manipulated variable เช่น Valve, Pump, Damper ฯลฯ เป็นต้นส่งผลทำให้ Controlled variable เข้าหาค่า Set point

สิ่งที่ควรพิจารณาในการออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับ คือ

1. กระบวนการอุตสาหกรรมที่ต้องการจะควบคุมควรใช้เครื่องควบคุมแบบใด
2. เครื่องควบคุมที่ใช้ควบคุมระบบใด ๆ นั้น ควรปรับตัวแปรควบคุมอะไร
3. เลือกเครื่องควบคุมและปรับเครื่องควบคุมใช้เกณฑ์ในการเลือกและตัดสินใจอย่างไร

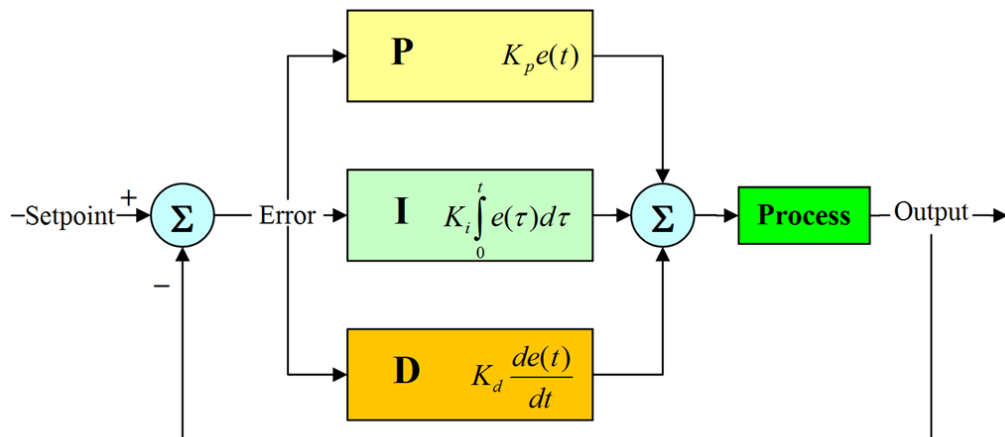
วัตถุประสงค์ในการควบคุมและวัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบควบคุม

1. ลดค่าการตอบสนองสูงสุดของระบบควบคุมให้น้อยที่สุด
2. ลดค่าช่วงเวลาที่ผู้สมมูลให้สั้นที่สุด
3. ลดค่าความคลาดเคลื่อนรวมในการควบคุมให้มีค่าน้อยที่สุด

ระบบควบคุมอัตโนมัติซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่อำนวยความสะดวกต่อมนุษย์เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเทคโนโลยีการผลิตงานที่ต้องทำซ้ำ ๆ ในแต่ละขั้นตอนได้ถูกออกแบบให้ทำงานโดยระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งจะช่วยลดแรงงาน ลดขั้นตอน และลดเวลาลงได้อย่างมาก ปัจจุบันเทคโนโลยีสมัยใหม่มีการนำเอาระบบอัตโนมัติและระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์มาใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ผลิตภัณฑ์เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่พบเห็นในชีวิตประจำวันหรือในงานอาชีพมีขั้นตอนต่าง ๆ มากมายในการทำงานเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ชิ้นมาหนึ่งชนิดซึ่งอาจใช้การทำงานด้วยแรงงานคนหรือใช้เครื่องจักรในการผลิตผลิตภัณฑ์ ดังนั้น กระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นมาควบคู่กับการดำรงชีวิตของมนุษย์มาโดยตลอด ตัวอย่างเช่น การผลิตเครื่องมือ (ตีมีด) ของคนไทยสมัยโบราณเพื่อใช้เป็นอาวุธในการต่อสู้ในสงครามก็นับได้ว่าเป็นกระบวนการผลิตอย่างหนึ่ง

ระบบควบคุมพีไอดี

ระบบควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัล (อังกฤษ: PID Controller) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ



ภาพที่ 2-19 แผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบพีไอดี

วิธีคำนวณของ PID ขึ้นอยู่กับสามตัวแปร คือ ค่าสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ทิ้งผ่านไป และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการ โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุม จนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) วิธี PID ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอนการประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ พีไอดีบางครั้งจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับใช้รูปแบบใดบ้าง

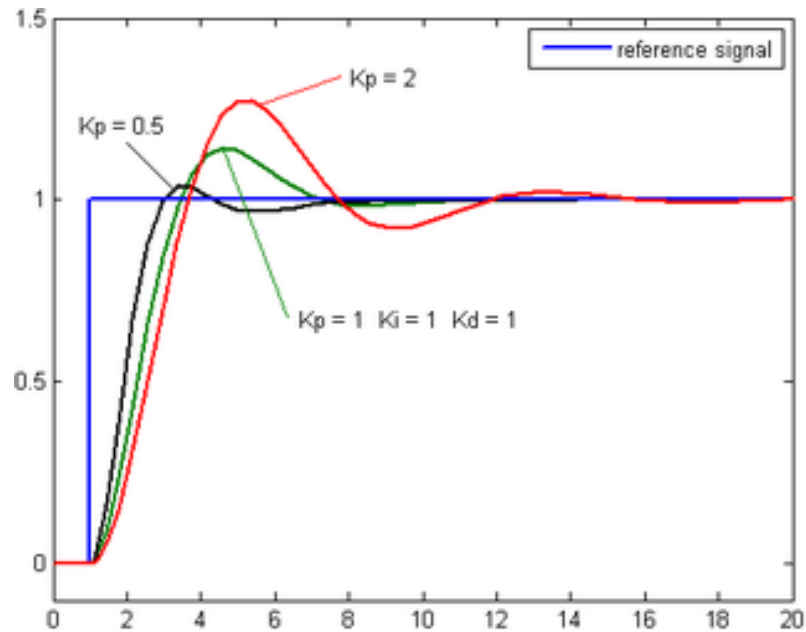
การควบคุมแบบ PID ได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามตามสมการ

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out}$$

เมื่อ

P_{out} , I_{out} , และ D_{out} เป็นผลของสัญญาณขาออกจากระบบควบคุม PID จากแต่ละเทอม

ซึ่งนิยามตามรายละเอียดด้านล่าง



ภาพที่ 2-20 กราฟ PV ต่อเวลา K_p กำหนดเป็น 3 ค่า (K_p และ K_d คงที่)

เทอมของสัดส่วน (บางครั้งเรียก อัตราขยาย) จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วน

เทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการ

$$P_{out} = K_p e(t)$$

เมื่อ

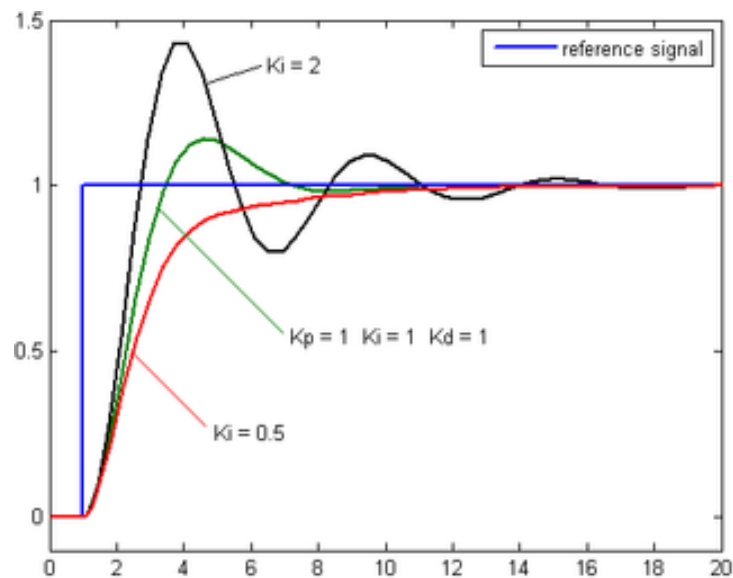
P_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน

K_p : อัตราขยายสัดส่วน ตัวแปรปรับค่าได้

e : ค่าความผิดพลาด = SP - PV

t : เวลา

ผลอัตราขยายสัดส่วนที่สูงค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน แต่ถ้าสูงเกินไประบบจะไม่เสถียรได้ ในทางตรงกันข้ามผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำ ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองต่อกระบวนการน้อยตามไปด้วย



ภาพที่ 2-21 กราฟ PV ต่อเวลา K_i กำหนดเป็นสามค่า (K_p และ K_d คงที่)

ผลจากเทอมปริพันธ์ (บางครั้งเรียก Reset) เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณ โดยอัตราขยายปริพันธ์ ปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์ K_i .

เทอมปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการ

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

เมื่อ

I_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์

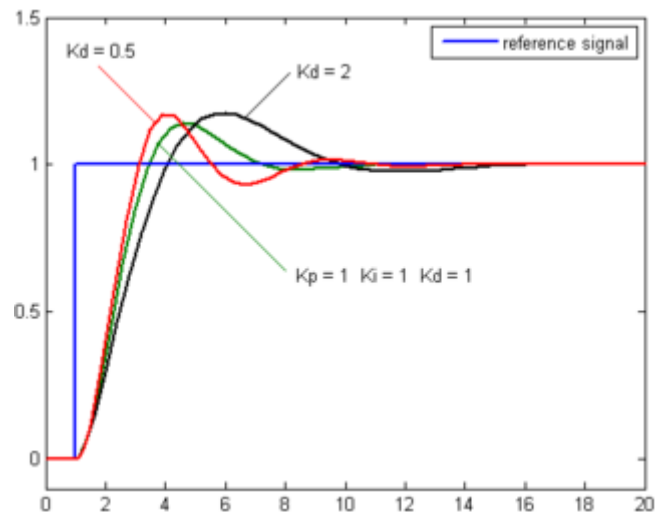
K_i : อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

e : ความผิดพลาด = SP - PV

t : เวลา

τ : ตัวแปรปริพันธ์หุ่น

เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม เทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ (ข้ามจุดที่ต้องการและเกิดการหันเหไปทางทิศทางอื่น)



ภาพที่ 2-22 กราฟ PV ต่อเวลา สำหรับ K_d 3 ค่า (K_p และ K_i คงที่)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้นคำนวณหาจากความชันของความผิดพลาดทุก ๆ เวลา (นั่น คือ เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ K_d ขนาดของผลของเทอมอนุพันธ์ (บางครั้งเรียก อัตรา) ขึ้นกับอัตราขยายอนุพันธ์ K_d

เทอมอนุพันธ์เป็นไปตามสมการ

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

เมื่อ

D_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์

K_d : อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

e : ความผิดพลาด = SP - PV

t : เวลา

เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุมและด้วยผลนี้จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้น เทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจากเทอมปริพันธ์และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาดและสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ เทอมสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ จะนำมารวมกันเป็น

สัญญาณขาออกของการควบคุมแบบ PID กำหนดให้ $u(t)$ เป็นสัญญาณขาออก สมการสุดท้ายของวิธี PID คือ

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

การปรับจูนด้วยมือ

ถ้าระบบยังคงทำงาน ชั้นแรกให้ตั้งค่า K_i และ K_d เป็นศูนย์ เพิ่มค่า K_p จนกระทั่งสัญญาณขาออกเกิดการแกว่ง (Oscillate) แล้วตั้งค่า K_p ให้เหลือครึ่งหนึ่งของค่าที่ทำให้เกิดการแกว่งสำหรับการตอบสนองชนิด “Quarter amplitude decay” แล้วเพิ่ม K_i จนกระทั่งออฟเซตถูกต้อง ในเวลาที่พอเพียงของกระบวนการ แต่ถ้า K_i มากไปจะทำให้ไม่เสถียร สุดท้ายถ้าต้องการให้เพิ่มค่า K_d จนกระทั่งลูปอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่ถ้า K_d มากเกินไปจะเป็นเหตุให้การตอบสนองและโอเวอร์ชูตเกินยอมรับได้ ปกติการปรับจูน PID ถ้าเกิดโอเวอร์ชูตเล็กน้อยจะช่วยให้เข้าสู่จุดที่ต้องการเร็วขึ้น แต่ในบางระบบไม่สามารถยอมให้เกิดโอเวอร์ชูตได้และถ้าค่า K_p น้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดการแกว่ง

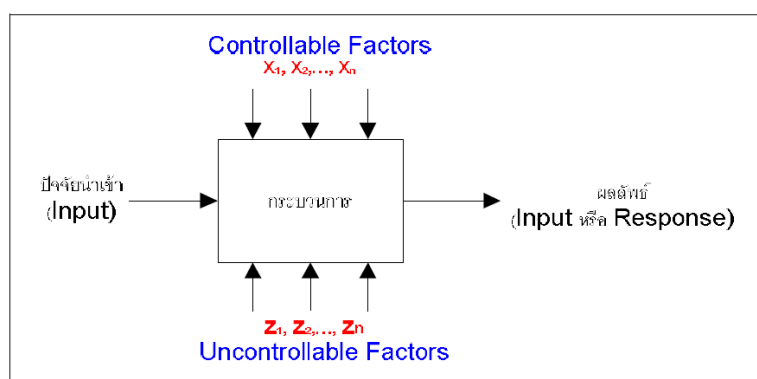
ทฤษฎีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ

การออกแบบการทดลอง คือ การทดสอบเพื่อจะให้เราทราบว่า ปัจจัย (Factor) หรือตัวแปร (Input variable) ใดที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของสิ่งที่เราสนใจ (Output response) โดยถ้าต้องการให้การทดลองนั้นเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ได้ผลที่สูงที่สุด เราจึงต้องนำวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติเข้ามาช่วยในการออกแบบการทดลอง

1. การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical design of experiment) หมายถึง กระบวนการที่ใช้ในการวางแผนการทดลอง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำและเหมาะสมที่สามารถนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ เพื่อให้เกิดข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้โดยที่วิธีการทางสถิตินั้นเป็นวิธีการเพียงแบบเดียวที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังนั้น สิ่งสำคัญ 2 ประการ สำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับด้านการทดลอง คือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ผลข้อมูลทางสถิติ โดยการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งสามารถแทนได้ดังภาพที่ 2-14 โดยที่เรามองว่ากระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่น ๆ เข้าด้วยกันเพื่อที่จะเปลี่ยนตัวแปรเข้า (Input) ไปสู่สิ่งที่เราสนใจ (Output) ที่มีผลออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่าซึ่งเราสามารถเห็นได้ โดยปัจจัยของกระบวนการบางชนิด x_1, x_2, \dots, x_p จะเป็นปัจจัยที่เราสามารถควบคุมได้ ในขณะที่

ปัจจัยบางตัว z_1, z_2, \dots, z_p เป็นปัจจัยที่เราไม่สามารถควบคุมได้โดยปัจจัย (Factor) ในการผลิตนั้น จะสามารถแบ่งได้เป็น ปัจจัยที่เราสามารถควบคุมได้ (Controllable factors) หมายถึง ปัจจัยที่เรานั้นสามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต และปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable factors) หมายถึง ปัจจัยที่เราไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิตได้ เนื่องจากต้องใช้เทคโนโลยี และต้นทุนในการควบคุมที่สูงมาก



ภาพที่ 2-23 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ

2. หลักการออกแบบการทดลองขั้นพื้นฐาน

ในการออกแบบการทดลองนั้นจะเป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่เรากำหนด ซึ่งปกติวิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูก หรือเป็นการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-factor-at-a-time) เพื่อที่จะหาจุดที่ดีที่สุดของกระบวนการ โดยการออกแบบการทดลองแบบการปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่านั้นใช้เวลานานถึงจะได้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่เราต้องการและยังสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บข้อมูลเป็นจำนวนมากและไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีผลของความสัมพันธ์ร่วม (Interaction effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยตนเอง

ในการออกแบบการทดลองขั้นพื้นฐานต่าง ๆ นั้นจะประกอบไปด้วยหลักการขั้นพื้นฐานที่สำคัญ 3 ประการ ดังนี้

1. การทำการทดลองซ้ำ (Replication) หมายถึง ในการทดลองใด ๆ ก็ตามนั้นจะต้องมีการทดลองมากกว่าหนึ่งซ้ำเสมอ เพื่อกำจัดเอาผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ออก โดยการทดลอง

ทำซ้ำนี้มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ หากค่าประมาณของความผิดพลาดของการทดลองและสามารถหา ค่าประมาณที่แม่นยำยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้อ

2. การทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีลำดับขั้นของการทดลองและการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลองแบบสุ่ม โดยการทดลองแบบสุ่มนั้นมีคุณสมบัติ ที่สำคัญ คือ ทำให้ทุกการทดลองมีโอกาสถูกเลือกเท่า ๆ กันและยังสามารถลดผลที่อาจเกิดจาก ปัจจัยภายนอกได้

3. การทำการทดลองแบบบล็อก (Blocking) หมายถึง การทดลองโดยทำการศึกษาถึง ผลกระทบที่อาจจะเกิดจากปัจจัยภายนอก (Nuisance factor) ที่เราไม่สามารถที่จะควบคุมได้โดย จะทำการจัดกลุ่มของข้อมูลและทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วง ๆ เพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงให้กับ การทดลองนั้น ๆ

ทฤษฎีการทดสอบสมมติฐาน

1. การทดสอบสมมติฐาน

ในการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลโดยที่ไม่มีหลักการทดสอบทางสถิติที่ชัดเจน สำหรับสนับสนุนการสรุปผล จะส่งผลให้การวิเคราะห์ผลจากข้อมูลดังกล่าวทำได้แค่เพียง การประมาณค่าแบบจุด (Point estimation) เท่านั้น ส่วนค่าทางสถิติที่ประมาณได้จะเป็นตัวแปรสุ่ม และมีค่าที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มได้ ดังนั้น การทดสอบสมมติฐานนั้นจึงเป็นอีก ทางเลือกหนึ่งในการสรุปข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางคุณภาพของระบบ (Quality characteristic) หรือค่าพารามิเตอร์ของประชากรที่สนใจ

การทดสอบสมมติฐาน คือ การทดสอบว่าสมมติฐานหลักที่เราสนใจนั้นมีความจริง หรือไม่ ซึ่งในการทดสอบสมมติฐานนั้น ๆ จะอาศัยกลุ่มตัวอย่างที่สนใจทั้งหมดทำการเก็บสถิติ ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อทำการตัดสินใจว่าสมมติฐานหลักที่เราสนใจนั้นมีความจริง หรือไม่ โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว จะเป็นตัวทดสอบว่าจะยอมรับสมมติฐานหลักหรือปฏิเสธสมมติฐานหลักหรือไม่การทดสอบ สมมติฐานจะประกอบด้วย

1.1 สมมติฐานหลัก (Null hypothesis) นั้นเป็นข้อสงสัยเกี่ยวกับลักษณะต่าง ๆ ในกลุ่มประชากรที่ผู้วิจัยต้องการพิสูจน์ว่าเป็นจริงหรือไม่ ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ H_0

1.2 สมมติฐานที่ขัดแย้ง (Alternative hypothesis) จะแทนด้วยสัญลักษณ์ H_1 เป็น ข้อความที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ที่ผู้วิจัยในการทดลอง โดยทั่วไปแล้ว H_0 และ H_1 จะมีความหมาย

ตรงข้ามกันเสมอ เครื่องหมายในสมมติฐานขัดแย้งจะปรากฏใน H_1 เป็นได้เพียง 3 กรณีเท่านั้น คือ \neq เพื่อบอกความแตกต่างกัน < หรือ > เพื่อบอกว่ามากกว่าหรือน้อยกว่าขึ้นกับคุณภาพที่ผู้วิจัยสนใจ

2. ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน จากการศึกษาสมมติฐานข้างต้นนั้น

ผู้ทดสอบจะมีโอกาสตัดสินใจอยู่ 2 ลักษณะ คือ ปฏิเสธและยอมรับสมมติฐานหลักซึ่งการตัดสินใจต้องเสี่ยงต่อความคลาดเคลื่อนกับสภาพความจริง ซึ่งได้ให้ความหมายของความผิดพลาดจากการตั้งสมมติฐาน ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ประเภทของความผิดพลาดจากการทดสอบสมมติฐาน

	การตัดสินใจ	การยอมรับ H_0	ปฏิเสธ H_1
ความจริง			
H_0 ถูกต้อง		ตัดสินใจถูกต้อง	ตัดสินใจผิดพลาด (Type I error)
H_1 ผิด		ตัดสินใจผิดพลาด (Type II error)	ตัดสินใจถูกต้อง

จากตารางที่ 2-1 แสดงประเภทของความผิดพลาดจากการทดสอบสมมติฐาน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I error) และความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II error) สามารถอธิบายได้ ดังนี้

2.1 ความผิดพลาดประเภทที่ 1 หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “ระดับนัยสำคัญ (Significant level) หรือระดับการทดสอบ (Level of test)” ความผิดพลาดประเภทนี้จะแทนด้วยสัญลักษณ์ α หมายถึง ความน่าจะเป็นที่ผู้วิจัยจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ทั้งที่สมมติฐานหลักเป็นจริง

2.2 ความผิดพลาดประเภทที่ 2 นั้นจะเป็นความผิดพลาดเนื่องจากไม่ทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ทั้งที่เป็นเท็จ ความผิดพลาดประเภทนี้จะแทนด้วยสัญลักษณ์ β ค่าของ $1-\beta$ ซึ่งบางครั้งถูกเรียกว่า อำนาจของการทดสอบ (Power of test) ซึ่งความน่าจะเป็นในการที่จะ ปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 เมื่อสมมติฐานอื่นเป็นจริง

3. ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานมี ดังนี้

3.1 ตั้งสมมติฐานที่ต้องการทดสอบเกี่ยวกับกระบวนการหรือประชากรโดยทั่วไปแล้วจะกำหนดสมมติฐานรอง H_1 ขึ้นมาก่อน แล้วจึงกำหนดสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งเป็นส่วนกลับของสมมติฐานรอง

3.2 กำหนดระดับนัยสำคัญ (Significance level) ที่ใช้ในการทดสอบนั้นโดยส่วนใหญ่จะกำหนด α อยู่ระหว่าง 0.01-0.1

3.3 ระบุตัวทดสอบทางสถิติ (Test statistic) และจะทำการคำนวณโดยอาศัยข้อมูล ตัวอย่างนั้น ๆ

3.4 กำหนดบริเวณพื้นที่วิกฤตหรือพื้นที่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก

3.5 สรุปผลการทดสอบ ซึ่งจะสามารถทำได้ 2 วิธี วิธีแรกจะเป็นการพิจารณาค่าสถิติ ที่คำนวณได้ว่าอยู่ในบริเวณปฏิเสธสมมติฐานหลักหรือไม่หากค่าที่ได้อยู่ในบริเวณดังกล่าวผู้วิจัย จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก วิธีที่สองจะเป็นการพิจารณาค่า P-value เทียบกับพื้นที่บริเวณปฏิเสธ สมมติฐานหลัก ผู้วิจัยจะปฏิเสธสมมติฐานหลักก็ต่อเมื่อค่า P-value < α เท่านั้น

ทฤษฎีการวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากหัวข้อที่แล้วจะเห็นว่า การทดสอบสมมติฐานที่ผู้วิจัยสนใจจะถูกจำกัดอยู่เพียงหนึ่ง กลุ่มประชากรหรือสองกลุ่มประชากรเท่านั้นแต่ในกรณีที่ผู้วิจัยสนใจจะศึกษาเปรียบเทียบมากกว่า สองกลุ่มประชากรขึ้นไป จะทำการทดสอบเพียงครั้งเดียวแบบทีละคู่

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะอาศัยหลักการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งมีประสิทธิภาพ มากกว่าการทดสอบทีละคู่ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นวิธีพื้นฐานทางสถิติที่ใช้ใน การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน ของค่าผลตอบสนอง (Response) โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถแยกสาเหตุและ ความแตกต่างออกได้ 2 ประการ ดังนี้

ประการที่ 1 ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (Explained variation) คือ มีความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัย (Factor) หรือวิธีทางการปฏิบัติ (Treatment) ที่ใช้ในการ ออกแบบการทดลองบางครั้งเรียกว่า ความแตกต่างระหว่างกลุ่ม (Between groups variation)

ประการที่ 2 ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถอธิบายได้ บางครั้งอาจเกิดจากกรณีที่ผู้วิจัยทราบถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง (Noise factors) ซึ่งใน การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะกล่าวถึงความแตกต่างส่วนนี้ ในรูปของค่าความผิดพลาดหรือส่วน ที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Error or residuals) โดยความแตกต่างจากสาเหตุหลักทั้งสองส่วนนั้น สามารถแสดงได้ดังสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าผลตอบสนอง ปัจจัย และค่าความผิดพลาดตาม รูปแบบการทดลอง ดังต่อไปนี้

$$y_{ij\dots} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2-1)$$

$$= \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (2-2)$$

$$= \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2-3)$$

$$= \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (2-4)$$

โดยที่

μ = ค่าเฉลี่ยรวม = $\Sigma\Sigma y_{ij} \dots$; N = จำนวนครั้งที่ทดลอง

τ_i = ผลกระทบจากปัจจัยที่ 1 ที่รับ i ; $i = 1, 2, \dots, a$

β_j = ผลกระทบจากปัจจัยที่ 2 ที่รับ j ; $j = 1, 2, \dots, b$

γ_k = ผลกระทบจากปัจจัยที่ 3 ที่รับ k ; $k = 1, 2, \dots, c$

$(\tau\beta)_{ij}$ = อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัยระหว่างปัจจัยที่ 1 ที่ระดับ i ปัจจัยที่ 2 ที่ระดับ j

$(\tau\gamma)_{ik}$ = อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัยระหว่างปัจจัยที่ 1 ที่ระดับ i ปัจจัยที่ 3 ที่ระดับ k

$(\beta\gamma)_{jk}$ = อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัยระหว่างปัจจัยที่ 2 ที่ระดับ j ปัจจัยที่ 3 ที่ระดับ k

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ = อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัยระหว่างปัจจัยที่ 2 ที่ระดับ j ปัจจัยที่ 3 ที่ระดับ k

ε_{ijk} = ค่าความผิดพลาดจากการทดลอง

จากสมการที่ (2-1) คือ สมการต้นแบบที่ใช้ในการออกแบบการทดลองในกรณีที่ผู้วิจัย

ทราบว่ามีเพียงหนึ่งปัจจัย ศึกษา a ระดับ เรียกว่า การออกแบบการทดลองแบบจำแนก

ทางเดียว (One way ANOVA) จากสมการที่ (2-2) คือ สมการต้นแบบที่ใช้ในการออกแบบ

การทดลองในกรณีที่ผู้วิจัยทราบว่ามีสองปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยวิธีในการปฏิบัติ (Treatment) และ

ปัจจัยของกลุ่ม (Block) เรียกว่า การออกแบบการทดลองแบบจำแนกสองทาง (Two way ANOVA)

จากสมการที่ (2-3) และ (2-4) คือ สมการต้นแบบที่ใช้ในการออกแบบการทดลองในกรณีที่ผู้วิจัย

ศึกษามากกว่าสองปัจจัยขึ้นไปและสนใจศึกษาอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัย โดยทั่วไป

จะเรียกการออกแบบการทดลองนี้ว่า การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial design)

1. การออกแบบการทดลองแบบจำแนกทางเดียว

ผู้วิจัยทำการศึกษาเพียงปัจจัยเดียว (Main factor) โดยระดับของปัจจัยนี้เท่ากับ a ระดับ เพื่อสังเกตว่าระดับที่แตกต่างกันของปัจจัยนั้น ๆ ว่าส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ดังนั้น สามารถทำการสรุปรูปแบบการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีจำแนกทางเดียวได้ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีจำแนกทางเดียว

Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F ₀
Treatment	SS _A	a-1	MS _A = $\frac{SS_A}{a-1}$	F ₀ = $\frac{MS_A}{MS_E}$
Error	SS _E	N-a	MS _E = $\frac{SS_E}{N-a}$	
Total	SS _T	N-1		

จากตารางที่ 2-2 สามารถหาค่า SS_T, SS_A และ SS_E โดยที่

$$SS_T = SS_A + SS_E$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y^2}{n} \quad (2-5)$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y^2}{n} \quad (2-6)$$

$$SS_E = SS_T - SS_A \quad (2-7)$$

SS_T = ผลบวกกำลังสองของจำนวนทั้งหมด

SS_A = ผลบวกกำลังสองของปัจจัยที่น่าสนใจ

SS_E = ผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาด

2. การออกแบบการทดลองแบบจำแนกสองทาง

ผู้วิจัยทำการศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยทั้งสองปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองที่ระดับแตกต่างกัน โดยเรียกปัจจัยหนึ่งว่า วิธีปฏิบัติ และปัจจัยที่สองว่า ปัจจัยกลุ่ม ซึ่งการออกแบบการทดลองด้วยวิธีนี้นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพราะเป็นการออกแบบการทดลองว่า กลุ่มของประชากรเดียวกันจะมีความเหมือนกันมากที่สุดและต่างกลุ่มกันมีความแตกต่างกันมากที่สุดของทั้งสองปัจจัยว่ามีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ เช่น รอบของวัตถุบิด หรือระยะเวลา จึงนำมาจัดเป็นปัจจัยแบบกลุ่มเพราะอาจเป็นผลที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความแปรปรวนในการทดลอง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสรุปรูปแบบการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีจำแนกสองทางได้ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีจำแนกสองทาง

Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F ₀
Treatment	SS _A	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
Block	SS _B	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Error	SS _E	(a-1)(b-a)	$MS_E = \frac{SS_E}{(a-1)(b-1)}$	
Total	SS _T	N-1		

จากตารางที่ 2-3 สามารถหาค่า SS_T, SS_A, SS_B และ SS_E โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{N} \quad (2-8)$$

$$SS_A = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y^2}{N} \quad (2-9)$$

$$SS_B = \frac{1}{a} \sum_{j=1}^b y_j^2 - \frac{y^2}{N} \quad (2-10)$$

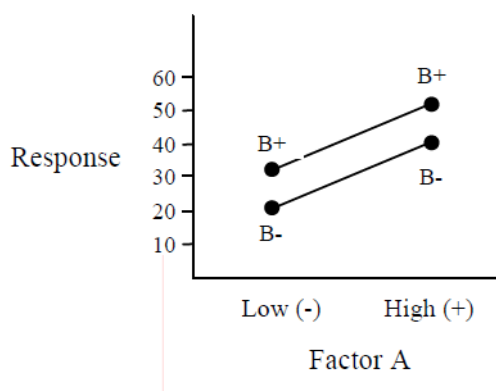
SS_B = ผลบวกกำลังสองของปัจจัยที่จัดแบบกลุ่ม

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

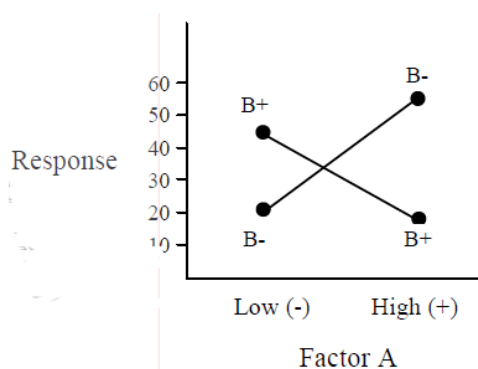
การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลนั้นจะเป็นการทดลองเพื่อศึกษาหาผลกระทบของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยในกรณีนี้เป็นการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล (Factorial design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับพิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น เช่น ปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 ครั้ง ซึ่งจะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล เราจะกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

“ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง” หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนองที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้น ๆ เรียกว่า อิทธิพลหลักเนื่องจากจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง ในบางกรณีพบได้ว่า

ความแตกต่างของผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งจะเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอิทธิพลร่วมต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถอธิบายได้ด้วยกราฟ ดังแสดงในภาพที่ 2-9 แสดงกราฟระหว่างผลตอบสนองของปัจจัย A ที่ระดับทั้งสองของปัจจัย B คือ ระดับ “ต่ำ” และระดับ “สูง” จะเห็นได้ว่าเส้นของ B- ซึ่งหมายถึงระดับต่ำของปัจจัย B และเส้น B+ ซึ่งหมายถึง ระดับสูงของปัจจัย B จะขนานกัน ลักษณะดังกล่าวแสดงถึงการไม่มีอิทธิพลร่วมต่อกันระหว่างปัจจัยทั้งสอง ในทำนองเดียวกันถ้าเส้นของ B- และ B+ ไม่ขนานกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-10 ลักษณะดังกล่าวแสดงถึงการมีอิทธิพลร่วมต่อกันระหว่างปัจจัยทั้งสอง ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล ผู้วิจัยจะให้ความสำคัญเฉพาะอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยเท่านั้น เนื่องจากอิทธิพลร่วมตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป โดยปกติแล้วจะมีค่าน้อยมาก จึงไม่เป็นที่นิยมสำหรับการนำมาพิจารณา



ภาพที่ 2-24 การไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย



ภาพที่ 2-25 การมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

จากที่ได้กล่าวข้างต้น การทดลองแบบแฟคทอเรียลจะสามารถทำให้วิเคราะห์ข้อมูลอย่างครบถ้วนทั้งปัจจัยหลักและการมีอันตรกิริยาในครั้งเดียว แต่ถ้าเกิดการทดลองมีปัจจัยจำนวนมาก จะทำให้จำนวนการทดลองเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น จึงมีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลซึ่งสามารถแบ่งได้ ดังนี้

1. การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ง่ายที่สุดจะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย คือ A และ B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดจะถูกจัดให้อยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล นั่นคือ ในแต่ละซ้ำของการทดลองนั้นประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด ab การทดลอง และโดยปกติแล้วจะมีจำนวนซ้ำทั้งหมด n ครั้งที่ทำให้จำนวนของการสังเกตเท่ากับ abn ข้อมูล โดยกำหนดให้ y_{ijk} คือ ผลตอบสนองที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A นั้นอยู่ที่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) และปัจจัย B นั้นอยู่ที่ระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) และจะมีการทำซ้ำ k ($k = 1, 2, \dots, n$) ซึ่งรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย นั้นจะแสดงได้ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย

		Factor B				
		n	1	2	3
Factor A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$	$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$	
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$	$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$	
	⋮	⋮	⋮	⋮	
	A	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$	$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$	

ในการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย ต้องทำการทดสอบสมมติฐานความสำคัญเท่ากันระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B ดังนี้ การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของปัจจัย A คือ

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \text{มีอย่างน้อย 1 ค่าที่ } \tau_i \neq 0 \text{ โดย } i = 1, 2, 3, \dots, a$$

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของปัจจัย B คือ

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1: \text{มีอย่างน้อย 1 ค่าที่ } \beta_j \neq 0 \text{ โดย } j = 1, 2, 3, \dots, b$$

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B คือ

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ สำหรับทุก } i, j$$

$$H_1: \text{มีอย่างน้อย 1 ค่าที่ } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ โดย } i = 1, 2, 3, \dots, a \text{ และ } j = 1, 2, 3, \dots, b$$

การทดสอบสมมติฐานดังกล่าวจะทำการวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย แสดงได้ดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 การวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀
A	SS _A	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS _B	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
AB	SS _{AB}	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS _T	ab(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	SS _T	ab(n-1)		

จากตารางที่ 2-5 สามารถหาค่า SS_T, SS_A, SS_B, SS_{AB} และ SS_E

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (2-11)$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (2-12)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_j^2 - \frac{y^2}{N} \quad (2-13)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{an} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad (2-14)$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (2-15)$$

2. การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย คือ การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลโดยทำการใช้พิจารณาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย โดยทั่วไปแล้วปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a ระดับ B มีจำนวนระดับเท่ากับ b ระดับ และปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ระดับ มีการทำซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง เพื่อที่จะหาค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of square) ที่เกิดจากความผิดพลาดกรณีที่อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยทั้งหมดถูกนำไปพิจารณาในแบบจำลองได้ทำให้จำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ $abcn$ ข้อมูล การทดสอบสมมติฐานสำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย จะใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย แสดงได้ดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 การวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย

Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean Square	F_0
A	SS_A	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	c-1	$MS_C = \frac{SS_C}{c-1}$	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	(a-1)(c-1)	$MS_{AC} = \frac{SS_{AC}}{(a-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	(b-1)(c-1)	$MS_{BC} = \frac{SS_{BC}}{(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	$MS_{ABC} = \frac{SS_{ABC}}{(b-1)(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS_E	abc(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{abc(n-1)}$	
Total	SS_T	abc(n-1)		

จากตารางที่ 2-6 สามารถหาค่า $SS_T, SS_A, SS_B, SS_C, SS_{AB}, SS_{AC}, SS_{BC}, SS_{ABC}$ และ SS_E โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y^2}{abcn} \quad (2-16)$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y^2}{abcn} \quad (2-17)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_j^2 - \frac{y^2}{abcn} \quad (2-18)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_k^2 - \frac{y^2}{abcn} \quad (2-19)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_B \quad (2-20)$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{ik}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_C \quad (2-21)$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{jk}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_B - SS_C \quad (2-22)$$

$$SS_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (2-23)$$

$$SS_B = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} - SS_{ABC} \quad (2-24)$$

3. การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ

ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2k factorial) จะใช้

กับการทดลองหลายปัจจัยที่จะกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับ เท่านั้นระดับเหล่านี้ อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร และใน 2 ระดับ ที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับนั้น เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการเริ่มต้น การทดลอง ซึ่งมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ โดยการออกแบบเช่นนี้ทำให้เกิด การทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้น การออกแบบการทดลองชนิดนี้ จะทำให้สามารถรองรับปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลงได้ ตัวอย่างเช่น กรณีที่มีปัจจัยทั้งหมด 2 ปัจจัย คือ ปัจจัย A และปัจจัย B ในแต่ละปัจจัยจะมีสองระดับ คือ ระดับต่ำ และระดับสูง จึงทำให้เกิดการทดลองทั้งสิ้น 4 การทดลอง โดยสัญลักษณ์มาตรฐานนั้นจะใช้กรณีที่วิธีการปฏิบัติกำหนดปัจจัยใด ๆ ให้อยู่ในระดับสูงจะแทนด้วยตัวอักษรเล็กของปัจจัยนั้น เช่น ปัจจัย A แทนด้วย a และเมื่อกำหนดปัจจัยใด ๆ ให้อยู่ในระดับต่ำ จะไม่มีการแสดงเป็นตัวอักษรแต่จะอยู่ในรูปของตัวเลขแทน เช่น (1) ซึ่งในการทดลองจะเกิดอิทธิพลหลัก และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย ซึ่งอิทธิพลหลัก คือ ปัจจัย A และปัจจัย B และอันตรกิริยาร่วม คือ ปัจจัย AB อิทธิพลหลักของปัจจัย A คือ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของผลตอบสนองของปัจจัย A เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัย A จากต่ำไปสูงอิทธิพลหลักของปัจจัย B คือ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของผลตอบสนองของปัจจัย A เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัย B จากต่ำไปสูง

อันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B คือ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของผลตอบสนองของปัจจัย A เมื่อปัจจัย B อยู่ในระดับสูงและค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของผลตอบสนองของปัจจัย A เมื่อปัจจัย B อยู่ในระดับต่ำโดยถ้าค่าจากอิทธิพลหลักเป็นบวกจะแสดงว่าการเพิ่มระดับจากต่ำไปสูงจะส่งผลตอบสนองที่เพิ่มขึ้นแต่ถ้าค่าจากอิทธิพลหลักเป็นลบจะแสดงว่าการส่งผลตอบสนองจะลดลงด้วยซึ่งในการทดสอบการมีนัยสำคัญของปัจจัยหลักและอันตรกิริยานั้น จะใช้ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2-7

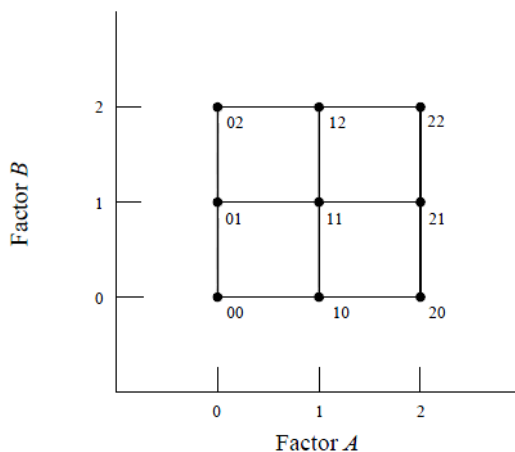
ตารางที่ 2-7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F_0
A	SS_A	1	$MS_A = \frac{SS_A}{DF_A}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	1	$MS_B = \frac{SS_B}{DF_B}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	1	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{DF_{AB}}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$4(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{4(n-1)}$	
Total	SS_T	$4(n-1)$		

4. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรม การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ (3^k Factorial design) เป็นการทดลองกรณีที่มีปัจจัยแต่ละปัจจัยประกอบไปด้วย 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ระดับปานกลาง และระดับสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามอาจใช้ตัวเลข 0 แทนระดับต่ำ 1 แทนระดับปานกลาง และ 2 แทนระดับสูง โดยในการทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^k จะแทนด้วยตัวเลขทั้งหมด k ตัว ตัวเลขตัวแรกแทนระดับของปัจจัย A ตัวเลขตัวที่สองแทนระดับของปัจจัย B และตัวเลขตัวที่ k แทนระดับของปัจจัย k ตัวอย่างเช่น ภาพที่ 2-11 แสดงการทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ

3^2 โดยตัวเลข 00 จะแสดงถึงการทดลองร่วมปัจจัยที่ทั้งปัจจัย A และปัจจัย B อยู่ที่ระดับต่ำ ตัวเลข 01 จะแสดงถึงการทดลองร่วมปัจจัยที่ปัจจัย A อยู่ที่ระดับต่ำ และปัจจัย B อยู่ที่ระดับปานกลาง



ภาพที่ 2-26 การทดลองร่วมปัจจัยของการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^2

ในกรณีที่ปัจจัยมีลักษณะเชิงปริมาณ ผู้วิจัยจะแทนระดับของปัจจัยเหล่านี้ด้วยสัญลักษณ์ $-1, 0$ และ 1 ตามลำดับ การใช้สัญลักษณ์เช่นนี้จะทำให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนองที่เกิดจากแต่ละระดับของปัจจัยตัวอย่าง เช่น กรณีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^k โดยมีปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด 2 ปัจจัย คือ ปัจจัย A และปัจจัย B ผู้วิจัยสามารถเขียนแบบจำลองการถดถอยได้ดังสมการที่ (2-25)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \epsilon \quad (2-25)$$

กำหนดให้ปัจจัย A แทนด้วย x_1 และปัจจัย B แทนด้วย x_2 จากแบบจำลองการถดถอยของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ สังเกตได้ว่ามีเทอมกำลังสองของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ทำให้ผู้วิจัยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับปัจจัยที่สนใจศึกษาในลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติก (Quadratic) ได้ การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับจะมีความเหมาะสมในกรณีที่ผู้วิจัยสนใจผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง ตัวอย่างของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^k คือ กรณีที่ผู้วิจัยมีปัจจัยที่สนใจศึกษาทั้งหมด 2 ปัจจัย ประกอบไปด้วย ปัจจัย A และปัจจัย B ในแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ โดยค่าผลรวมกำลังสองของปัจจัยหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีการเดียวกับการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ แต่ค่าผลรวมกำลังสองของปัจจัยหลักจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนเชิงเส้น และส่วนควอดราติกในส่วนของ

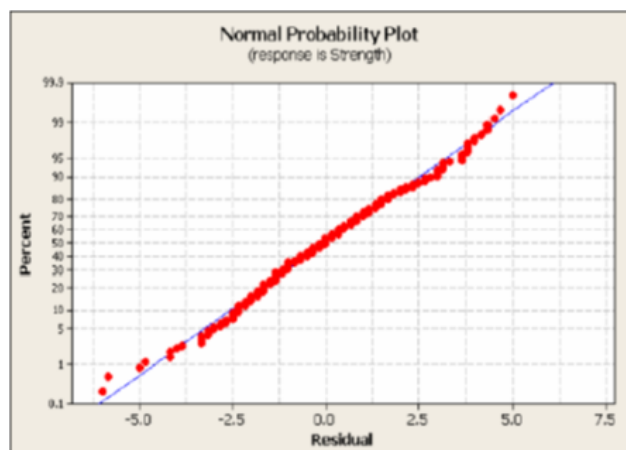
ค่าผลรวมกำลังสองของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ อิทธิพลร่วมระหว่างผลเชิงเส้นของปัจจัย A กับผลเชิงเส้นของปัจจัย B (ABLXL) อิทธิพลร่วมระหว่างผลเชิงเส้นของปัจจัย A กับผลเชิงควอดราติกของปัจจัย B (ABLXQ) อิทธิพลร่วมระหว่างผลเชิงควอดราติกของปัจจัย A กับผลเชิงเส้นของปัจจัย B (ABLXQ) และอิทธิพลร่วมระหว่างผลเชิงควอดราติกของปัจจัย A กับผลเชิงควอดราติกของปัจจัย B (ABQXQ) ในทางปฏิบัติการแยกค่าผลรวมกำลังสองของอิทธิพลร่วมเช่นนี้จะไม่มีประโยชน์แต่ประการใด

การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการทดลอง

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองกรณีหลายปัจจัยนั้น ผู้วิจัยต้องพิจารณาค่าความผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อน (Residual) ต้องมีการกระจายตัวแบบปกติ ข้อมูลที่เก็บมาต้องมีความเป็นอิสระต่อกัน และค่าความแปรปรวนต้องคงที่ ถูกต้องตามสมมติฐานผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะสามารถนำไปใช้ได้แต่เนื่องจากสมมติฐานการทดลองอาจเกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้น จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ผู้วิจัยจะต้องทำการทดสอบความถูกต้องของข้อสมมติฐานดังกล่าว โดยวิธีการตรวจสอบมี ดังนี้

1. การตรวจสอบการแจกแจงปกติ (Normal distributed)

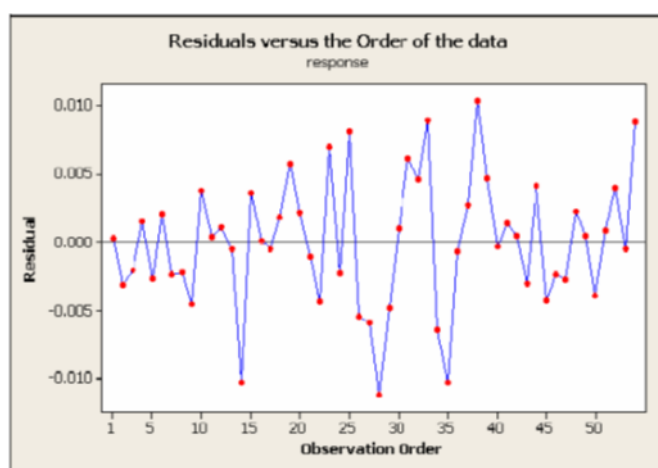
การตรวจสอบสมมติฐานทางด้านการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถกระทำได้โดยใช้วิธีการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal probability plot) ของค่าความผิดพลาด โดยข้อสมมติฐานมีความถูกต้องของการนำเสนอข้อมูลกราฟดังกล่าวควรมีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 2-27



ภาพที่ 2-27 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independently distributed)

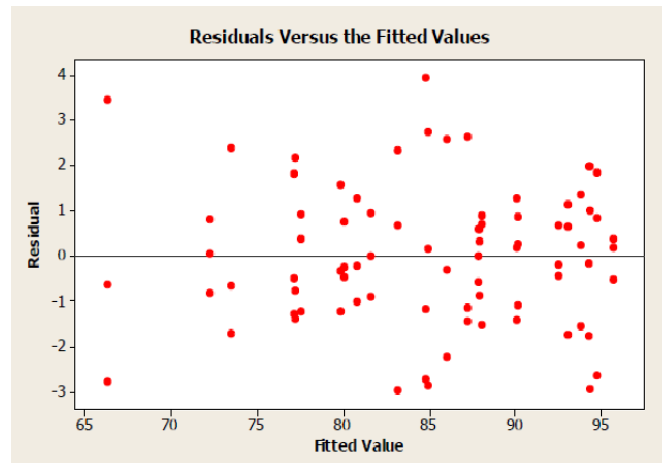
การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นจะใช้วิธีการทำการพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาด (Residual) กับลำดับการทดลอง (Observation order) โดยทั่วไปนั้น เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลนั้น จะพบว่าเกิดการกระจายตัวในส่วนของค่าความผิดพลาด (Residual) จะต้องมัลักษณะเป็นรูปแบบความเป็นอิสระซึ่งกันและกันเท่านั้นจึงจะวิเคราะห์ได้ว่าค่าความผิดพลาด (Residual) นั้นมีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน โดยแสดงได้ดังภาพที่ 2-28



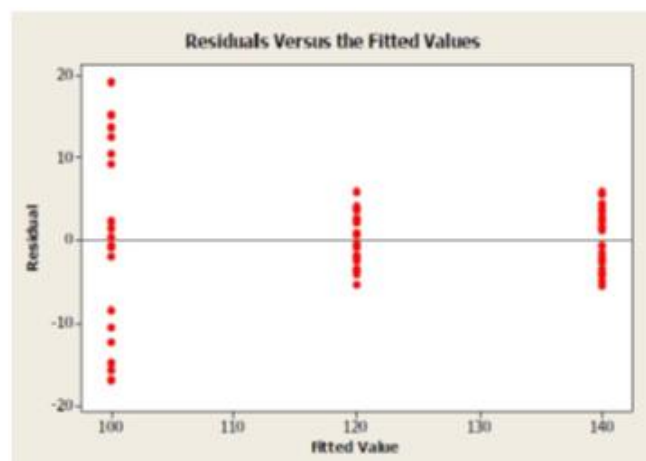
ภาพที่ 2-28 กราฟแสดงความเป็นอิสระของข้อมูล

3. การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Constant variance)

การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่นั้นจะเป็นการทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาด (Residual) กับค่าประมาณของการทดลองที่ระดับ i ใด ๆ โดยที่ค่าความผิดพลาดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นแนวโน้มที่มีการกระจายแบบสุ่ม คือ ไม่ควรที่จะมีลักษณะเป็นรูปแบบหรือโครงสร้างใด ๆ ทั้งสิ้น จึงถือได้ว่าค่าความแปรปรวนที่ได้จากการทดลองนั้นมีเสถียรภาพซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 2-29



ภาพที่ 2-29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแปรปรวนคงที่



ภาพที่ 3-30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแปรปรวนไม่คงที่

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้ทางผู้วิจัยจะทำการศึกษางานวิจัยที่ได้นำวิธีการออกแบบการทดลองมาทำการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตพลาสติก โดยได้ทำการศึกษางานวิจัยทั้งหมด 7 งานวิจัย ซึ่งจะมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

นิคม นครเรียบ (2542) ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของการยึดเกาะระหว่างวัสดุโพลีเอทิลีน (Polyethylene; PE) กับเหล็กโดยใช้กาวนิโอพรีนเป็นตัวประสาน โดยได้ทำการศึกษาดังต่อไปนี้ถึงปัจจัยคุณลักษณะโพลีเอทิลีนและปัจจัยของสภาวะการเตรียมชิ้นงานการยึดเกาะ โดยปัจจัยทางคุณลักษณะจะใช้การวัดค่าความต้านทานการดึงลอก ซึ่งพบว่าที่ระดับความหนาแน่น 223 และ 258

kg/m³ จะให้ค่าแรงดึงตอกสูงที่สุด ส่วนปัจจัยทางสภาวะการเตรียมชิ้นงานนั้นมีสภาวะที่เหมาะสมในการอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 40 นาที

ชยันต์ เลาสุทแสน (2548) ทำการศึกษาถึงกระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อชิ้นส่วนฝาครอบส่วนระบายอากาศที่ติดตั้งด้านนอกอาคารที่ผลิตขึ้น โดยการฉีดพลาสติกจากการศึกษาสภาพปัญหาเบื้องต้นในการฉีดพลาสติกพบว่าปัญหาที่สำคัญ คือ ชิ้นส่วนพลาสติกเกิดการฉีดไม่เต็ม โดยใช้แผนการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ พบว่าความดันในการฉีดพลาสติก ความเร็วในการฉีดพลาสติก ความเร็วของสกรู ความเร็วในการหลอมพลาสติก และอุณหภูมิภายในกระบอบกึ่งกลาง เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการฉีดไม่เต็ม ชิ้นงานของฝาครอบส่วนระบายอากาศที่ติดตั้งนอกอาคารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หลังจากคัดเลือกปัจจัยได้แล้วจึงทำการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยด้วยแผนการทดลอง เช่น ทรัลคอมโพสิตและการวิเคราะห์คาโนนิกอล ผลการวิเคราะห์ปัญหาการฉีดไม่เต็มชิ้นงาน มีรูปแบบเป็นจุดอานม้าเมื่อทำการพิจารณาหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม คือ ความดันในการฉีดพลาสติกที่ 42.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความเร็วในการฉีดพลาสติกที่ 47.00 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วของสกรูที่ 91.50 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการหลอมพลาสติกที่ 7.67 มิลลิเมตรต่อวินาที และอุณหภูมิภายในกระบอบกึ่งกลางที่ 225.00 องศาเซลเซียส

ณัฐรา ดวงพัตรา (2552) ทำการศึกษาผลของเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ผสมอนุภาคนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2⁵ Factorial design เพื่อทำการหาอิทธิพลของปัจจัยการฉีดขึ้นรูปที่มีต่อคุณสมบัติทางกลและการกระจายตัวของท่อานาโนคาร์บอนซึ่งปัจจัยมี 5 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อานาโนคาร์บอน อุณหภูมิกระบอบฉีดความเร็วฉีด ความเร็วรอบสกรู ความดันอัด จากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นพบว่าค่ามอดูลัสของยังและความแข็งแรงดึงมีค่าสูงขึ้น โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกล คือ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อานาโนคาร์บอน อุณหภูมิกระบอบฉีดความเร็วฉีด ความเร็วรอบสกรู

ประเสริฐ ชุมปัญญา (2552) ได้ศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อนระบบสูญญากาศ โดยการทดสอบหาค่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เหมาะสมที่จะทำให้ความหนาของวัตถุบิดลงได้ไม่เกิน 15% วัสดุที่ใช้ทดลองเป็นพลาสติกชนิด PP ที่ระดับความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3² ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าอุณหภูมิ และระยะเวลาการให้ความร้อน 29 วินาที จะมีผลทำให้ความหนาของชิ้นงานนั้นมีความแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 250

องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 29 วินาที จะให้ค่าความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานอยู่ที่ 0.421 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็นความหนาเฉลี่ยที่ลดลงจากความหนาเริ่มต้นเพียง 12.29%

ธนวรรธก์ จันทสุวรรณ (2539) ทำการศึกษากระบวนการผลิตโฟมชนิดโพลีสไตรีน (Polystyrene; PS) เพื่อลดปริมาณของเสียจากกระบวนการผลิต จากผลการทดลองพบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดของเสียมียู่ 3 สาเหตุ คือ ชิ้นงาน โฟมแตกซึ่งเกิดจากการเกาะตัวหลังกระบวนการฉีด โฟมที่ไม่ดี ชิ้นงานไม่สุกเกิดจากการให้ปริมาณไอน้ำไม่สัมพันธ์กับปริมาณเม็ด โฟม และฉีดชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์เกิดจากการอุดตันของปืนฉีดโฟมและระยะเวลาการฉีดที่น้อยเกินไป จากสาเหตุข้างต้นทำให้ผู้วิจัยได้นำหลักการวิเคราะห์ทางสถิติเข้ามาช่วยเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 3 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณการให้ไอน้ำ ระยะเวลาการฉีด ความดันภายในแม่พิมพ์ โดยมาทำการวิเคราะห์หากราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร ซึ่งจะทำให้ช่วยลดปริมาณของเสียได้ถึง 83%

สถาพร พิมสาร (2547) ทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการพันเคลือบผง โพลีเอสเตอร์บนแนวเชื่อมกระป๋อง โดยได้ประยุกต์ใช้หลักการการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^4 จากการทดลองพบว่า แรงดันลมจ่ายผง โพลีเอสเตอร์ กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แรงดันลมชะลอการไหลผงโพลีเอสเตอร์ และแรงดันลมดูดกลับผงโพลีเอสเตอร์ จะมีอิทธิพลต่อปัจจัยความหนาผิวเคลือบโพลีเอสเตอร์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยได้คำตอบของสภาวะเหมาะสมที่ทำให้ความหนาผิวเคลือบโพลีเอสเตอร์บนแนวเชื่อมกระป๋องอยู่ที่ 95 μm โดยปรับแรงดันลมจ่ายผงโพลีเอสเตอร์ที่ 0.95 บาร์ กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 91% แรงดันลมชะลอการไหลผงโพลีเอสเตอร์ที่ 5 บาร์ และแรงดันลมดูดกลับผงโพลีเอสเตอร์ที่ 1 บาร์

วีรเทพ เฉลิมสมิทธิชัย (2550) ปัญหาที่พบในงานวิจัยนี้ คือ เหล็กคืบที่ใช้ในการผลิตเหล็กถวมีความบกพร่อง ความบกพร่องที่ค้นพบ ได้แก่ การเกิดรอยแผล รูพรุน บริเวณผิวหน้า และหน้าตัดของเหล็กคืบ จากการศึกษาพบว่า ปริมาณธาตุที่ผสมอยู่ในน้ำเหล็กก่อนการผลิตเหล็กคืบไม่คงที่จึงทำให้เหล็กคืบที่ได้นั้นเกิดความบกพร่อง ทำให้ค่าความแข็งแรงเหล็กถวที่ผลิตจากเหล็กคืบนี้ลดลงไปงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปริมาณธาตุที่เป็นส่วนผสมทางเคมีของน้ำเหล็กที่ใช้ในการผลิตแท่งเหล็กคืบ โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาปริมาณธาตุที่จะทำให้เกิดความบกพร่องของเหล็กคืบให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งส่งผลให้เหล็กถวที่ผลิตจากเหล็กคืบนี้มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด จากผลการทดลองเบื้องต้น โดยการใช้ Factorial design (2^5) ในการออกแบบการทดลองซึ่งมีปัจจัย 5 ปัจจัย พบว่าปริมาณคาร์บอน ปริมาณแมงกานีส ปริมาณกำมะถัน และปริมาณซิลิกอน มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กถวอย่างมีระดับนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสไม่มีระดับนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของ

เหล็กกล้าเมื่อนำปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้ามาทำการออกแบบการทดลองอีกครั้งโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง แบบ Box-behnken design จะได้สมการถดถอยของปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรง คือ $Y = 50.64 + 1.25A + 0.75B + 0.13C + 0.15D$ โดยได้คำตอบของสถานะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดค่าความแข็งแรง (Y) มากที่สุด คือ ปริมาณคาร์บอน (A) ที่ 0.20%/ kg ปริมาณแมงกานีส (B) ที่ 0.60%/ kg ปริมาณกำมะถัน (C) ที่ 0.05%/ kg และปริมาณซิลิกอน (D) ที่ 0.50%/ kg เมื่อนำผลจากการวิจัยมาใช้ในกระบวนการทำงานจริงพบว่า ไม่พบความบกพร่องที่เกิดขึ้นบนเหล็กดิบ และเมื่อนำเหล็กดิบไปผลิตเป็นเหล็กกล้า พบว่าค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของเหล็กกล้าที่ได้จะมีค่าระหว่าง 52.34-55.08 kg/ mm² ซึ่งผลวิจัยนี้สามารถลดความบกพร่องของเหล็กดิบได้ 100%

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ควบคุม ระบบควบคุมระดับ โดยมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาและเลือกปัญหาที่จะทำการปรับปรุง

ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์ปัญหา เพื่อนำมาออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนที่ 3 หาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และหาระดับของปัจจัย

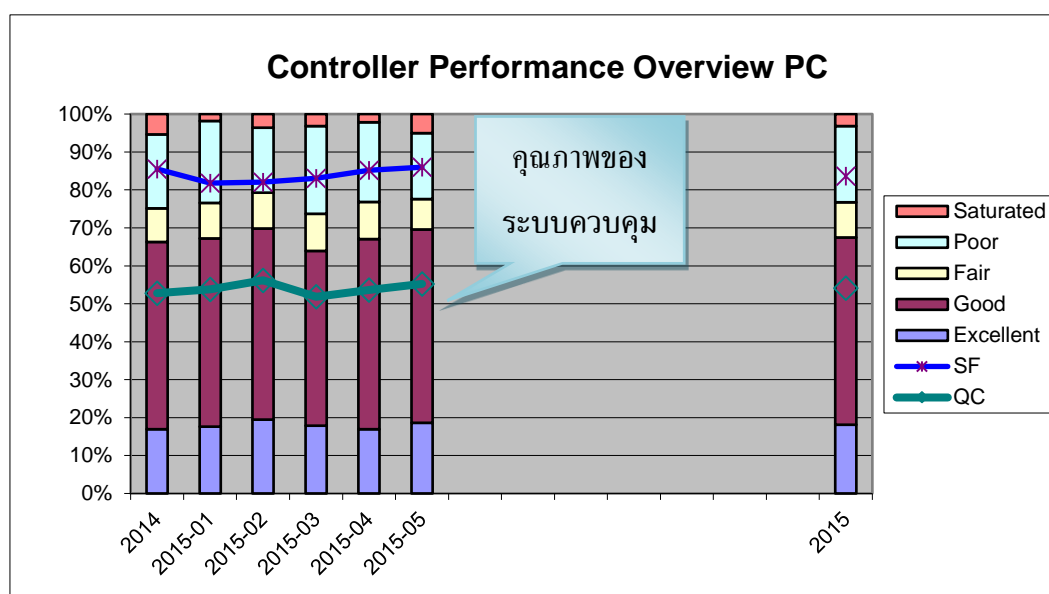
ขั้นตอนที่ 4 วิธีดำเนินการทดลอง

1. ศึกษาและเลือกปัญหาที่จะทำการปรับปรุง

เนื่องจากปัจจุบันนี้คุณภาพของระบบควบคุมในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก ได้แก่ ระบบควบคุมระดับ ระบบควบคุมอัตราการไหล ระบบควบคุมอุณหภูมิ และระบบควบคุมแรงดัน ในเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558 เฉลี่ยอยู่ที่ 54.1% ตามข้อมูลในตารางที่ 3-1 และภาพที่ 3-1 มาจากรายงานการควบคุมการตรวจสอบประสิทธิภาพ (Control performance monitor) ในระบบฐานข้อมูลของ มาทริกอน (Matrikon) ที่หน่วยงานที่รับผิดชอบได้ติดตั้งไว้ ซึ่งต่ำกว่าดัชนีชี้วัดผลงานหรือความสำเร็จของงาน (Key performance indicator) ที่ทางหน่วยงานที่รับผิดชอบตั้งไว้คือ จะต้องมากกว่า 75%

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลระบบควบคุมทั้งหมดในเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558

Date	Excellent	Good	Fair	Poor	No Comment					Sum	SF	QC
					Total	Saturated	Manual	Not Required	Others			
2015-01	88	248	47	108	131	9	51	60	11	622	81.8%	53.8%
2015-02	93	240	45	82	162	17	56	70	19	622	82.1%	56.2%
2015-03	91	235	50	118	128	16	49	60	3	622	83.1%	51.8%
2015-04	85	251	49	105	132	11	47	72	2	622	85.2%	53.6%
2015-05	93	255	40	87	147	25	46	72	4	622	86.0%	55.3%
2015-06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	90	246	46	100	140	16	50	67	8	622	83.6%	54.1%



ภาพที่ 3-1 ข้อมูลระบบควบคุมทั้งหมดในเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558

จากรายงานการควบคุมการตรวจสอบประสิทธิภาพในระบบฐานข้อมูลของ มาทริกอน จะเห็นว่าคุณภาพของระบบควบคุมเฉลี่ยอยู่ที่ 54.1% ซึ่งจะต้องปรับปรุงระบบควบคุมที่มีคุณภาพไม่ดีก่อน หลังจากนั้นจึงปรับปรุงระบบควบคุมที่มีคุณภาพปานกลาง ดังข้อมูลในตารางที่ 3-2 คุณภาพของระบบควบคุมในเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558 เพื่อให้คุณภาพของระบบควบคุมมากกว่า 75%

ตารางที่ 3-2 คุณภาพของระบบควบคุมในเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558

เดือน/ 2558	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	ไม่ดี	คุณภาพ
มกราคม	86	250	45	99	53.8%
กุมภาพันธ์	88	248	47	108	56.2%
มีนาคม	93	240	45	82	51.8%
เมษายน	91	235	50	118	53.6%
พฤษภาคม	85	251	49	105	55.3%

จากสาเหตุของระบบควบคุมที่ไม่มีคุณภาพ ทำให้ยากต่อการควบคุมกระบวนการในการผลิตเม็ดพลาสติก ฝ่ายผลิตต้องคอยเฝ้าติดตามและเฝ้าระวังไม่ให้ระบบควบคุมออกนอกการควบคุม และบ่อยครั้งที่ระบบควบคุมที่ไม่มีคุณภาพออกนอกการควบคุมจึงต้องเปลี่ยนการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยระบบควบคุมมาเป็นการควบคุมโดยพนักงานที่รับผิดชอบแทน ทำให้เสียเวลาและยากต่อการควบคุม ดังนั้น หน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้มีการประชุมหาแนวทางแก้ไข ดังภาพที่ 3-2 และกำหนดดัชนีชี้วัดผลงานหรือความสำเร็จของงานของระบบควบคุม จะต้องมากกว่า 75% โดยมีรายละเอียดดังนี้ คือ

1. ฝ่ายผลิตต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ และคุณภาพของระบบควบคุมในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก
2. ปัจจัยของระบบควบคุมที่มีคุณภาพ
 - 2.1 ปรับค่า พีไอดี ที่ดีที่สุด
 - 2.2 กระบวนการไม่แกว่ง
3. เปอร์เซ็นต์คุณภาพของระบบควบคุม คำนวณได้โดยใช้ข้อมูลจากรายงานการควบคุมการตรวจสอบประสิทธิภาพในระบบฐานข้อมูลของมาทริกอนจากสูตร

คุณภาพของระบบควบคุม (QC) = จำนวนระบบควบคุมที่ดีที่สุด + 2/3 ของจำนวนระบบควบคุมที่ดี + 1/3 ของจำนวนระบบควบคุมที่ปานกลาง

4. ฝ่ายผลิตต้องการให้คุณภาพของระบบควบคุมมากกว่า 75%

ชื่อเรียกของฝ่ายผลิต	ปัจจัยของระบบควบคุมที่มีคุณภาพ	คุณภาพของระบบควบคุม	ความต้องการของฝ่ายผลิต
ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของระบบควบคุมในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก	1. ปรับค่า พีไอดี ที่ดีที่สุด 2. กระบวนการไม่แกว่ง	คุณภาพของระบบควบคุม (QC) = จำนวนระบบควบคุมที่ดีที่สุด + 2/3 ของจำนวนระบบควบคุมที่ดี + 1/3 ของจำนวนระบบควบคุมที่ปานกลาง	คุณภาพของระบบควบคุมต้องมากกว่า 75%

ภาพที่ 3-2 แผนภูมิชื่อเรียกของฝ่ายผลิต

ในกรณีศึกษานี้จะเป็นการหาค่า พีไอดี ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของระบบควบคุมระดับ ซึ่งเป็นระบบควบคุมที่ไม่ซับซ้อนและไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการและระบบควบคุมระดับที่เลือกมาทำการทดลองนี้ ได้มีการระดมสมองกับผู้ที่มีความรู้ความชำนาญทั้งฝ่ายผลิตและฝ่ายซ่อมบำรุงที่ดูแลรับผิดชอบในระบบควบคุมของโรงงาน โดยมี 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1

ใช้วิธีถามคำถาม 5 ครั้ง (5 W method) หรือมากกว่าจนได้รับคำตอบที่ถูกต้อง เกี่ยวกับปัญหาที่ต้องแก้ไข

1. คำถาม: ทำไมคุณภาพของระบบควบคุมระดับต่ำ?

คำตอบ: มีระบบควบคุมระดับเป็นจำนวนมากที่มีคุณภาพปานกลางและไม่ดี

2. คำถาม: ทำไมระบบควบคุมเป็นจำนวนมากที่มีคุณภาพปานกลางและไม่ดี?

คำตอบ: ระบบควบคุมระดับ ทำงาน ไม่ถูกต้อง

3. คำถาม: ทำไมระบบควบคุมระดับทำงานไม่ถูกต้อง?

คำตอบ: ค่าพีไอดีของระบบควบคุมระดับไม่ถูกต้อง

4. คำถาม: ทำไมค่าพีไอดีของระบบควบคุมระดับไม่ถูกต้อง?

คำตอบ: ค่าพีไอดีของระบบควบคุมระดับ ไม่เหมาะสมกับกระบวนการ

5. คำถาม: ทำไมค่าพีไอดีของระบบควบคุมระดับไม่เหมาะสมกับกระบวนการ?

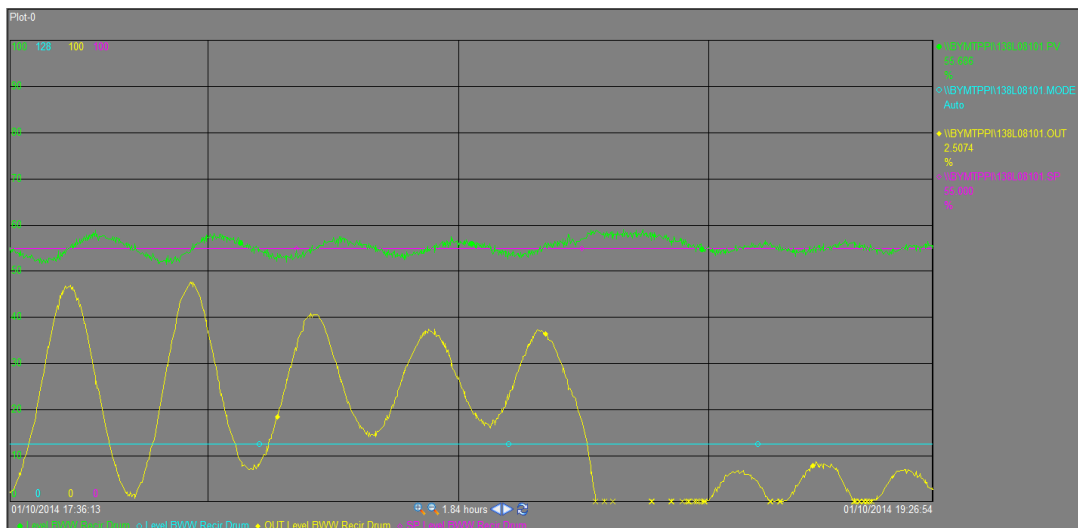
คำตอบ: ปรับค่าพีไอดีไม่เหมาะสมกับกระบวนการควบคุมหรือไม่มีการปรับค่าพีไอดี

หลังจากที่มีการเปลี่ยนแล้ว หรือมีการติดตั้งระบบควบคุมระดับใหม่

ขั้นตอนที่ 2

ใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลจากกราฟของระบบควบคุมระดับกรณีศึกษา ซึ่งมาจากระบบฐานข้อมูล โอเอสไอ (OSI Software) ที่หน่วยงานที่รับผิดชอบได้ติดตั้งไว้ ดังภาพที่ 3-3 โดยตรวจสอบความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้ (PV) กับค่าเป้าหมาย (SP) ระบบควบคุมที่ติดตั้ง ค่าที่วัดได้ กับค่าเป้าหมายจะต้องใกล้เคียงกันมากจนเกือบจะเป็นค่าเดียวกัน และค่าที่วัดได้จะแกว่งเล็กน้อยในขณะที่มีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายใหม่เท่านั้น

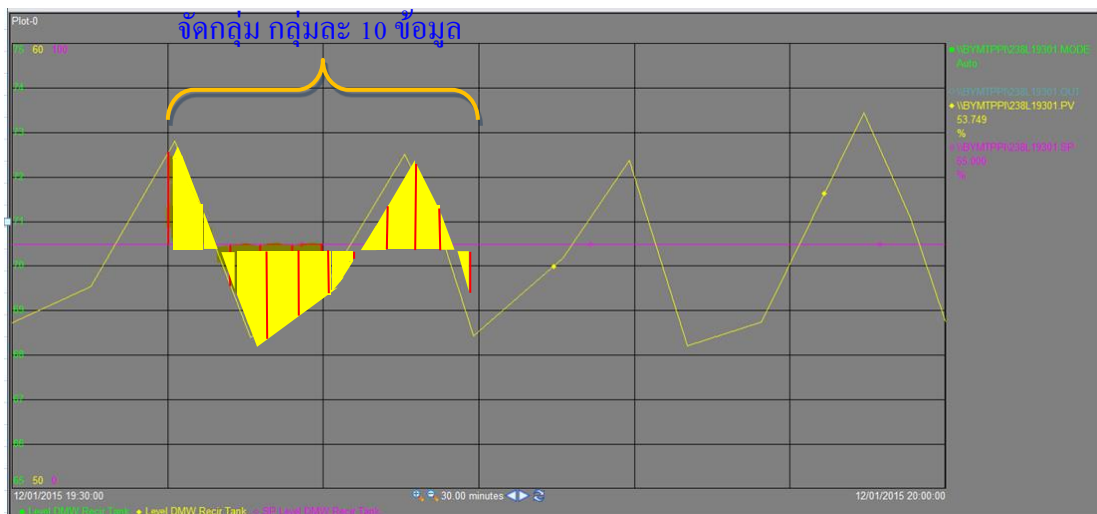
ค่ามาตรฐานที่ทางฝ่ายผลิตกำหนดไว้ คือ ค่าที่วัดได้จะต้องแกว่งได้ไม่เกิน 0.25% ของค่าเป้าหมายและจะยอมให้เกินค่าค่ามาตรฐานได้ ในช่วงแรกของการเปลี่ยนค่าเป้าหมายใหม่ ยกเว้นกรณีที่กระบวนการไม่เสถียรสาเหตุของอิทธิพลจากปัจจัยอื่น ๆ



ภาพที่ 3-3 ระบบควบคุมระดับที่ไม่มีคุณภาพ

วิเคราะห์ปัญหาเพื่อนำมาออกแบบการทดลอง

จากการเก็บข้อมูลค่าที่วัดได้ในกรณีศึกษาระบบควบคุมระดับที่ไม่มีคุณภาพจากระบบฐานข้อมูล โอเอสไอ ข้อมูลที่วัดได้จะเป็นข้อมูลที่ถูกต้องไม่เปลี่ยนแปลงและสามารถดูข้อมูลย้อนหลังตั้งแต่เริ่มติดตั้งระบบ เริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 05.45: 00 นาฬิกา ถึง 08.04: 30 นาฬิกา ของวันที่ 6 มกราคม 2558 โดยเก็บทุก ๆ 30 วินาที ข้อมูลตัวเลขที่ได้จะเอาไปคำนวณหาพื้นที่ใต้ส่วนโค้ง ซึ่งเป็นค่าของตัวแปร การตอบสนอง (Response variable) ของระบบควบคุมดังภาพที่ 3-4 โดยใช้สูตรคำนวณที่ 1 และสูตรคำนวณที่ 2 และข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจะใส่ในตารางพื้นที่ใต้ส่วนโค้งจากการเก็บข้อมูลของระบบควบคุมระดับ ดังภาพที่ 3-7

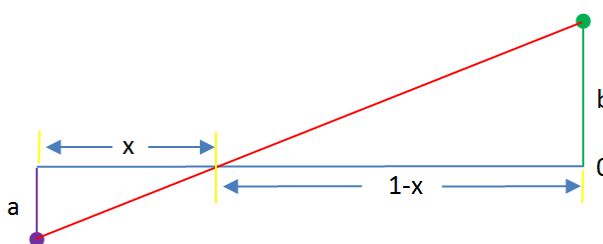


ภาพที่ 3-4 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลจากระบบฐานข้อมูลโอเอสไอ

หาพื้นที่ในกรณีที่ค่าที่วัดได้ (PV) เป็นทั้งค่าบวก และค่าลบ เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย

(SP)

$$\text{สูตรที่ 1: พื้นที่สามเหลี่ยม} = \frac{1}{2} \cdot a \cdot x + \frac{1}{2} \cdot b \cdot (1 - x)$$

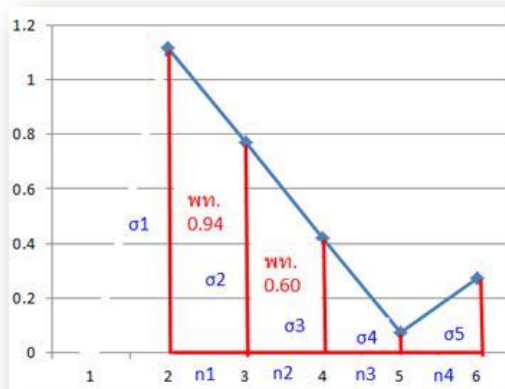


ภาพที่ 3-5 ภาพที่สามเหลี่ยมจากค่าที่วัดได้ เป็นทั้งค่าบวกและค่าลบ

หาพื้นที่ในกรณีที่ค่าที่วัดได้ (PV) เป็นค่าบวกหรือค่าลบ ทั้งคู่เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย

(SP)

$$\text{สูตรที่ 2: พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู} = \frac{1}{2} \times \text{ผลบวกของด้านคู่ขนาน} \times \text{สูง}$$



ภาพที่ 3-6 รูปสี่เหลี่ยมจากค่าที่วัดได้เป็นค่าบวกทั้งคู่เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย

นำข้อมูลพื้นที่ใต้ส่วนโค้งที่คำนวณได้จากภาคผนวก ก จัดเป็นกลุ่ม ๆ ละ 10 ข้อมูล ได้ทั้งหมด 50 กลุ่มข้อมูล หาค่า ค่าเฉลี่ย และค่าพิสัย ของกลุ่มข้อมูลแต่ละกลุ่มได้จากสูตรคำนวณ ดังนี้ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลแต่ละกลุ่ม = $X_1 + X_2 + \dots + X_n$

กลุ่มข้อมูลที่ 1

$$\begin{aligned} \text{ค่าเฉลี่ย} &= (0.086+0.325+0.498+0.281+0.165+0.594+0.638+0.277+0.120+0.474)/ 10 \\ &= 0.346 \end{aligned}$$

กลุ่มข้อมูลที่ 2

$$\begin{aligned} \text{ค่าเฉลี่ย} &= (0.599+0.349+0.096+0.401+0.446+0.126+0.319+0.453+0.161+0.333)/ 10 \\ &= 0.328 \end{aligned}$$

จำนวนเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบทั้ง 50 กลุ่ม

ค่าพิสัยของข้อมูลแต่ละกลุ่ม (R) = $X_L - X_S$

โดยที่ X_L = ข้อมูลที่มีค่ามากที่สุดในกลุ่ม

X_S = ข้อมูลที่มีค่าน้อยที่สุดในกลุ่ม

$$\text{กลุ่มข้อมูลที่ 1: ค่าพิสัย} = 0.638 - 0.086 = 0.552$$

$$\text{กลุ่มข้อมูลที่ 2: ค่าพิสัย} = 0.599 - 0.096 = 0.503$$

จำนวนเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบทั้ง 50 กลุ่ม ซึ่งจะได้ข้อมูลใหม่ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 สรุปข้อมูลพื้นที่ได้ส่วนโค้งจากการเก็บข้อมูลของระบบควบคุมระดับ

กลุ่มที่	วันที่	เวลา	พื้นที่ได้ส่วนโค้ง (X) ต่อ 30 วินาที											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
1	06 Jan 2015	6:25 AM	0.086	0.325	0.498	0.281	0.165	0.594	0.638	0.277	0.120	0.474	0.346	0.552
2	06 Jan 2015	6:30 AM	0.599	0.349	0.096	0.401	0.446	0.126	0.319	0.453	0.161	0.333	0.328	0.503
3	06 Jan 2015	6:35 AM	0.584	0.322	0.236	0.787	0.832	0.349	0.171	0.581	0.491	0.140	0.449	0.691
4	06 Jan 2015	6:40 AM	0.564	0.647	0.330	0.08	0.306	0.484	0.330	0.290	0.454	0.432	0.372	0.568
5	06 Jan 2015	6:45 AM	0.340	0.463	0.515	0.155	0.226	0.589	0.515	0.125	0.477	0.553	0.373	0.475
6	06 Jan 2015	6:50 AM	0.181	0.224	0.427	0.200	0.262	0.558	0.446	0.310	0.268	0.552	0.323	0.447
7	06 Jan 2015	6:55 AM	0.34	0.212	0.657	0.713	0.283	0.171	0.609	0.760	0.471	0.112	0.433	0.649
8	06 Jan 2015	7:00 AM	0.401	0.577	0.345	0.104	0.437	0.499	0.152	0.388	0.558	0.343	0.380	0.473
9	06 Jan 2015	7:05 AM	0.090	0.173	0.228	0.100	0.038	0.123	0.094	0.036	0.147	0.110	0.114	0.192
10	06 Jan 2015	7:02 AM	0.122	0.375	0.369	0.121	0.128	0.292	0.145	0.251	0.414	0.223	0.244	0.293
11	06 Jan 2015	7:15 AM	0.110	0.419	0.389	0.108	0.448	0.493	0.134	0.453	0.630	0.404	0.359	0.521
12	06 Jan 2015	7:20 AM	0.151	0.40	0.648	0.452	0.095	0.433	0.805	0.720	0.269	0.185	0.417	0.709
13	06 Jan 2015	7:25 AM	0.573	0.528	0.152	0.412	0.581	0.431	0.103	0.309	0.526	0.408	0.402	0.478
14	06 Jan 2015	7:30 AM	0.097	0.351	0.454	0.167	0.587	0.712	0.370	0.088	0.313	0.655	0.379	0.624
15	06 Jan 2015	7:35 AM	0.626	0.201	0.253	0.540	0.372	0.130	0.542	0.661	0.357	0.099	0.378	0.561
16	06 Jan 2015	7:40 AM	0.370	0.498	0.267	0.155	0.485	0.491	0.185	0.630	0.739	0.386	0.421	0.583
17	06 Jan 2015	7:45 AM	0.109	0.461	0.712	0.497	0.128	0.526	0.664	0.316	0.162	0.609	0.418	0.603
18	06 Jan 2015	7:50 AM	0.672	0.277	0.186	0.605	0.522	0.141	0.479	0.443	0.100	0.320	0.374	0.568
19	06 Jan 2015	7:55 AM	0.382	0.232	0.082	0.071	0.215	0.355	0.181	0.373	0.595	0.385	0.287	0.524
20	06 Jan 2015	8:00 AM	0.091	0.174	0.283	0.154	0.237	0.413	0.272	0.064	0.218	0.262	0.217	0.348
21	06 Jan 2015	8:05 AM	0.079	0.270	0.301	0.076	0.179	0.325	0.182	0.253	0.196	0.279	0.214	0.249
22	06 Jan 2015	8:02 AM	0.124	0.265	0.430	0.156	0.255	0.561	0.382	0.094	0.170	0.252	0.267	0.467
23	06 Jan 2015	8:15 AM	0.269	0.320	0.485	0.274	0.071	0.15	0.207	0.147	0.115	0.484	0.252	0.414
24	06 Jan 2015	8:20 AM	0.636	0.394	0.094	0.304	0.512	0.497	0.173	0.164	0.359	0.445	0.358	0.542

ตารางที่ 3-3 (ต่อ)

กลุ่มที่	วันที่	เวลา	พื้นที่ดำเนินการ (Y) ต่อ 30 วัน										ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
25	06 Jan 2015	8:25 AM	0.183	0.231	0.644	0.354	0.174	0.698	0.836	0.503	0.167	0.165	0.395	0.671
26	06 Jan 2015	8:30 AM	0.498	0.774	0.622	0.149	0.276	0.494	0.473	0.149	0.288	0.560	0.428	0.626
27	06 Jan 2015	8:35 AM	0.273	0.462	0.735	0.274	0.159	0.072	0.305	0.578	0.298	0.193	0.335	0.663
28	06 Jan 2015	8:40 AM	0.527	0.569	0.491	0.204	0.329	0.401	0.305	0.172	0.712	0.837	0.455	0.664
29	06 Jan 2015	8:45 AM	0.451	0.108	0.220	0.352	0.332	0.143	0.279	0.705	0.646	0.246	0.348	0.597
30	06 Jan 2015	8:50 AM	0.158	0.511	0.668	0.307	0.427	0.837	0.733	0.433	0.130	0.177	0.438	0.707
31	06 Jan 2015	8:55 AM	0.427	0.630	0.171	0.117	0.207	0.269	0.114	0.183	0.445	0.543	0.294	0.429
32	06 Jan 2015	9:00 AM	0.249	0.346	0.755	0.564	0.300	0.154	0.142	0.262	0.295	0.154	0.321	0.613
33	06 Jan 2015	9:05 AM	0.476	0.646	0.396	0.098	0.272	0.662	0.838	0.361	0.357	0.729	0.483	0.740
34	06 Jan 2015	9:10 AM	0.559	0.292	0.087	0.096	0.213	0.184	0.324	0.739	0.586	0.297	0.338	0.652
35	06 Jan 2015	9:15 AM	0.080	0.240	0.484	0.429	0.121	0.579	0.823	0.525	0.208	0.116	0.361	0.743
36	06 Jan 2015	9:20 AM	0.375	0.533	0.313	0.222	0.783	0.919	0.580	0.277	0.113	0.439	0.455	0.806
37	06 Jan 2015	9:25 AM	0.779	0.845	0.478	0.135	0.322	0.303	0.203	0.130	0.537	0.732	0.446	0.715
38	06 Jan 2015	9:30 AM	0.459	0.126	0.433	0.417	0.149	0.203	0.693	0.766	0.371	0.122	0.374	0.644
39	06 Jan 2015	9:35 AM	0.436	0.516	0.295	0.114	0.429	0.447	0.130	0.426	0.644	0.428	0.387	0.529
40	06 Jan 2015	9:40 AM	0.110	0.191	0.476	0.511	0.238	0.181	0.637	0.631	0.196	0.242	0.341	0.527
41	06 Jan 2015	9:45 AM	0.647	0.576	0.134	0.283	0.402	0.344	0.116	0.271	0.513	0.467	0.375	0.531
42	06 Jan 2015	9:50 AM	0.134	0.368	0.576	0.448	0.112	0.449	0.757	0.537	0.159	0.675	0.421	0.664
43	06 Jan 2015	9:55 AM	0.870	0.552	0.146	0.194	0.415	0.443	0.190	0.160	0.548	0.599	0.412	0.724
44	06 Jan 2015	10:00 AM	0.271	0.092	0.276	0.226	0.202	0.482	0.380	0.189	0.048	0.192	0.240	0.434
45	06 Jan 2015	10:05 AM	0.283	0.120	0.200	0.282	0.313	0.118	0.136	0.329	0.196	0.536	0.250	0.418
46	06 Jan 2015	10:10 AM	0.710	0.410	0.209	0.118	0.076	0.268	0.342	0.131	0.290	0.603	0.316	0.634
47	06 Jan 2015	10:15 AM	0.733	0.703	0.653	0.583	0.488	0.399	0.312	0.323	0.344	0.334	0.488	0.501
48	06 Jan 2015	10:20 AM	0.404	0.394	0.3100	0.306	0.370	0.387	0.404	0.320	0.184	0.150	0.323	0.254
49	06 Jan 2015	10:25 AM	0.220	0.386	0.503	0.443	0.255	0.164	0.122	0.038	0.159	0.300	0.259	0.465
50	06 Jan 2015	10:30 AM	0.376	0.517	0.671	0.485	0.218	0.110	0.059	0.215	0.373	0.229	0.325	0.612
													0.354	0.552

จากข้อมูลทั้ง 50 กลุ่มข้อมูลของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง ในตารางที่ 3-3 สามารถสรุปได้ ดังนี้

ค่าต่ำสุด (Min) 0.34

ค่าสูงสุด (Max) 0.448

ค่าเฉลี่ย (Mean) 0.354

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0759

จากข้อมูลข้างต้นกระบวนการควบคุมระดับมีการผันแปรค่อนข้างสูง จึงมีแนวคิดใช้การออกแบบการทดลองมาช่วยในการปรับปรุงกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังให้ได้ตามเป้าหมาย โดยตั้งเป้าหมายไว้ที่ 0-0.25 ตารางหน่วยต่อหนึ่งคาบเวลา ความสามารถของกระบวนการคำนวณได้ตามสูตรคำนวณ ดังนี้

$$\text{จาก } C_{pu} = \min\left[\frac{USL - \mu}{3\sigma}\right]$$

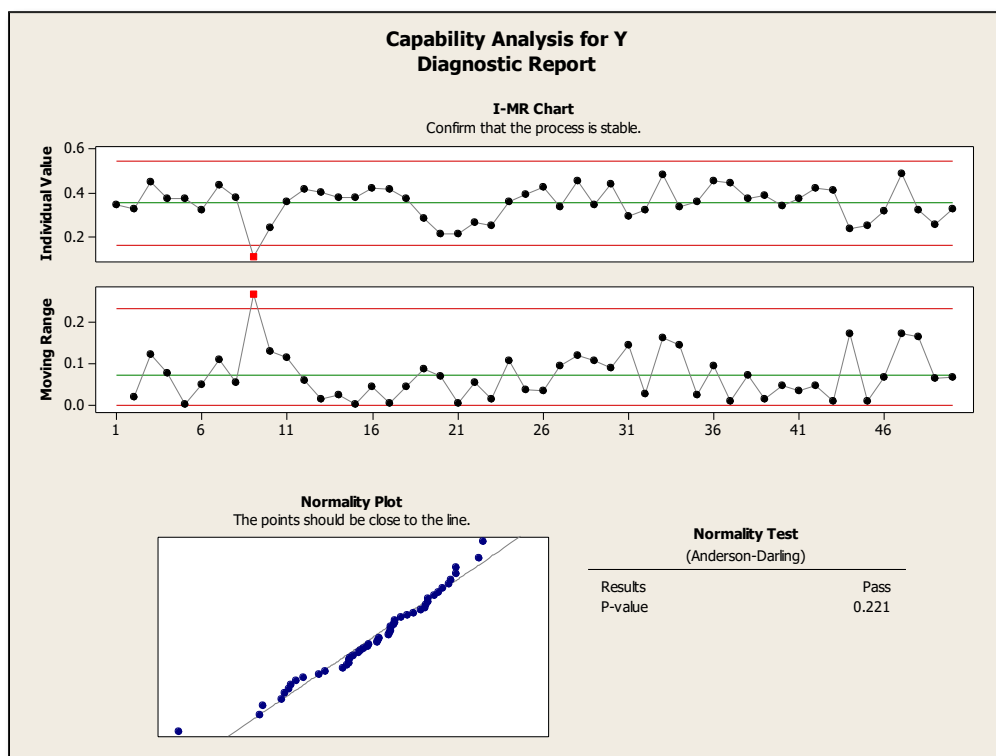
ดังนั้น ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุง

$$C_{pu} = \min\left[\frac{0.25 - 0.3543}{3 * 0.07759}\right]$$

$$C_{pu} = \min[-0.448]$$

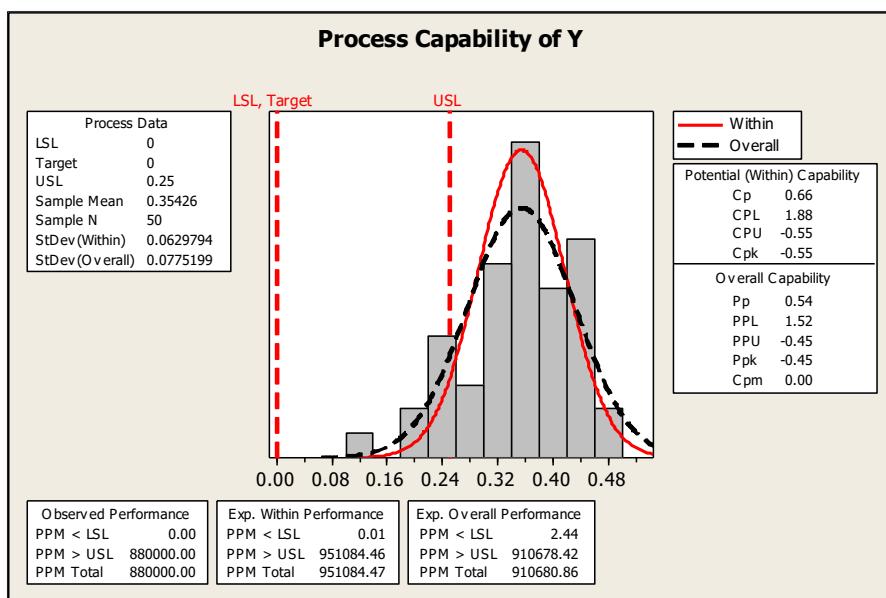
$$= -0.448$$

จากข้อมูลข้างต้นกระบวนการควบคุมระดับมีการผันแปรค่อนข้างสูง จึงมีแนวคิดใช้การออกแบบการทดลองมาช่วยในการปรับปรุงกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังให้ได้ตามเป้าหมาย โดยตั้งเป้าหมายไว้ที่ 0-0.25 ตารางหน่วยต่อหนึ่งคาบเวลา ใช้ Program minitab วิเคราะห์ข้อมูลซึ่งเมื่อพิจารณาความสามารถกระบวนการ (Process capability: Cpk) คุณภาพของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง ในช่วงเริ่มต้นการศึกษาปัญหาซึ่งมีค่าต่ำตามที่แสดงในภาพที่ 3-7 วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง

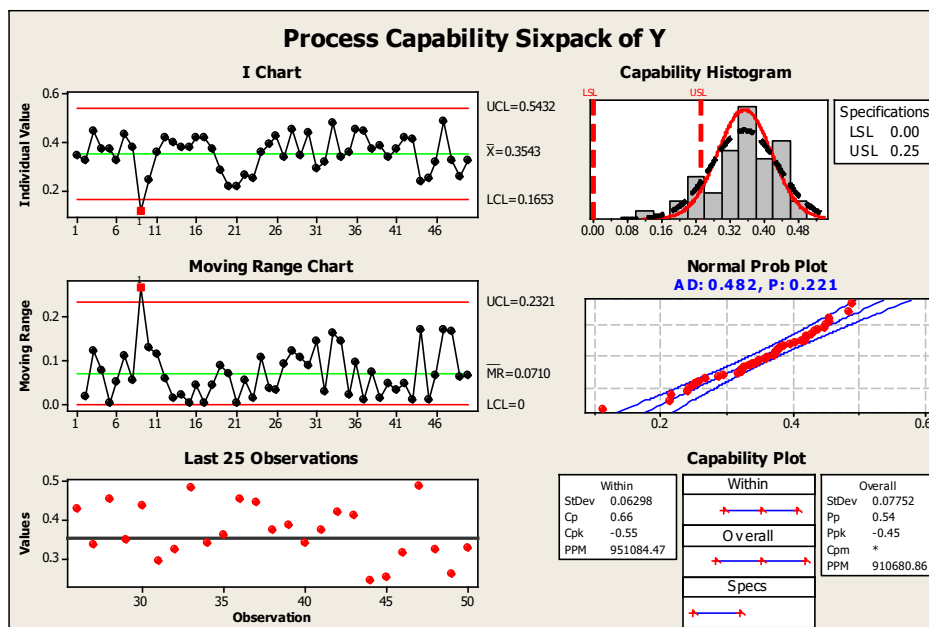


ภาพที่ 3-7 วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง I-MR Chart

นำข้อมูลของตัวแปรการตอบสนอง (Response variable) หาความสามารถกระบวนการ (Process capability: Cpk) โดยใช้ Minitab ผลที่ได้ดังภาพที่ 3-8 และภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-8 วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังก่อนการปรับปรุงโดยใช้ Program minitab



ภาพที่ 3-9 วิเคราะห์ความสามารถของระบบควบคุมระดับโดยใช้ Program minitab

Test Results for I Chart of Y

TEST 1. One point more than 3.00 standard deviations from center line.

Test Failed at points: 9

Test Results for MR Chart of Y

TEST 1. One point more than 3.00 standard deviations from center line.

Test Failed at points: 9

จากผลการทดสอบความสามารถของระบบควบคุมระดับมีจุดที่ 9 ที่ออกนอกเส้นควบคุม ด้านต่ำแต่ไม่ได้ตัดออกเนื่องจากเป็นช่วงควบคุมที่ดี คือ ค่าที่วัดได้ใกล้กับค่าเป้าหมาย และจุดอื่น ๆ จะอยู่ในเส้นควบคุม แสดงว่าระบบควบคุมระดับอยู่ในสภาพปกติและอยู่ในการควบคุม ได้ค่าเฉลี่ย (Mean) คือ 0.3543 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ 0.07759

จากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab เริ่มต้นโดยการทดสอบข้อมูลว่าข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์ว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่โดยมีการตั้งสมมติฐาน ดังนี้

H_0 = ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 = ข้อมูลไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

โดยมีกำหนดยอมรับความผิดพลาดที่ 5% ($\alpha = 0.05$) เมื่อ $P\text{-value} > \alpha$ เราจึงยอมรับสมมติฐาน H_0 แต่ถ้า $P\text{-value} < \alpha$ เราจึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 จากข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าค่า $P\text{-value} = 0.221$ ซึ่งมากกว่า $\alpha = 0.05$ เราจึงยอมรับสมมติฐาน H_0 ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ดังแสดงในภาพที่ 3-8

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Minitab ในภาพที่ 3-10 ข้อมูลมีค่าเฉลี่ย (Sample mean) เป็น 0.354 ความผันแปรระยะสั้น (StDev (Within)) มีค่า 0.063 และความผันแปรระยะยาว (StDev (Overall)) มีค่า 0.077 จากการประเมินพบว่าค่า $C_p = 0.66$ แสดงว่ากระบวนการดังกล่าวมีการออกแบบที่ไม่ดีในขณะที่ค่า $C_{pk} = -0.55$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า C_p มากแสดงว่าความสามารถของกระบวนการยังทำได้ไม่เหมือนกับที่ออกแบบไว้ ซึ่งค่า C_{pk} และ C_p ที่ดีควรมีค่ามากกว่า 1.33 หรืออย่างน้อยที่สุดก็ต้องมากกว่า 1.00 กระบวนการถึงจะพอใช้แต่จากค่าที่ได้พบว่าค่า C_{pk} และ C_p มีค่าต่ำกว่า 1.00 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการมีความสามารถที่ไม่ดี เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของกระบวนการ คือ 0.3543 จะพบว่ามีความสูงกว่าสเปกซึ่งมีค่าเป็น 0 ดังนั้น หากต้องการปรับปรุงค่า C_{pk} สามารถทำได้โดยการปรับตั้งกระบวนการขึ้นไปอีก สำหรับความสามารถระยะยาวจะพิจารณาจาก Overall capability ซึ่งมีค่า $P_p = 0.54$ และ $P_{pk} = -0.45$ แสดงว่าการควบคุมกระบวนการระยะยาวยังทำได้ไม่ดี Center ของข้อมูลอยู่นอก Specification

นอกจากนี้ Minitab ยังได้ทำการสรุปค่าสัดส่วนของเสียต่อล้านหน่วย (PPM) ไว้ในส่วนล่างของผลลัพธ์ โดยจะแบ่งเป็น 3 กรณี คือ

1. สัดส่วนของเสียจากตัวอย่าง (Observed performance) ได้จากการนับจำนวนข้อมูลตัวอย่างที่ออกนอกพิสัยควบคุมและแปลงให้เป็นต่อล้านชิ้น

2. สัดส่วนของเสียจากการคาดการณ์ด้วยความผันแปรภายในกลุ่มย่อย (Exp. Within performance) ได้จากการประมาณค่าสัดส่วนของเสียในกระบวนการด้วยการแจกแจงแบบปกติ โดยใช้ความผันแปรภายในกลุ่มย่อย

3. สัดส่วนของเสียจากการคาดการณ์ด้วยความผันแปรโดยรวม (Exp. Overall performance) ได้จากการประมาณค่าสัดส่วนของเสียในกระบวนการด้วยการแจกแจงแบบปกติ โดยใช้ความผันแปร

โดยรวมจากภาพที่ 3-9 พบว่าจากการคาดการณ์สัดส่วนของเสียระยะสั้นจะได้ 951084.47 PPM คิดเป็น 95.108% และระยะยาวจะได้ 910680.86 PPM คิดเป็น 91.068% โดยสัดส่วนของเสียจากการคาดการณ์นี้เป็นของเสียที่เกิดขึ้น เป็นลักษณะที่สูงกว่าสเปคด้านบน

หาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและหาระดับของปัจจัย

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการควบคุมระดับ โดยแบ่งตัวแปรการทดสอบออกเป็น 2 ตัวแปร คือ ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งอธิบายรายละเอียดได้ ดังนี้

1. ตัวแปรอิสระ

ในการกำหนดตัวแปรอิสระโดยอ้างอิงจากผู้เชี่ยวชาญจากหน่วยงานที่รับผิดชอบ และข้อมูลจากระบบฐานข้อมูลของมาทริกอน (Matrikon) โดยพิจารณาที่คุณภาพของกระบวนการควบคุมระดับที่เป็น Good และ Excellent จำนวน 24 กระบวนการควบคุม ดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 คุณภาพของกระบวนการควบคุมระดับจากฐานข้อมูลของมาทริกอน (Matrikon)

Item	Tag no.	P	I	D	Quality of control
1	004L00101	1	120	0.1	Good
2	012L00401	1	3	0	Good
3	081L00201	1.8	100	0	Excellent
4	083L00801	2.5	50	0	Excellent
5	083L10801	2.5	50	0	Excellent
6	084L01001	1	30	0	Excellent
7	086L10602	5	120	0	Excellent
8	086L13801	2	180	0	Good
9	131L00501	1	120	0	Excellent
10	132L01301	4	45	1	Excellent
11	138L04401	1	120	0	Excellent
12	138L06501	1.5	120	0	Excellent
13	138L06601	1.5	120	0	Excellent
14	138L06701	1.5	120	0	Excellent
15	138L06801	1.5	120	0	Good
16	152L00101	1	30	0	Excellent
17	231L00501	1	350	0	Excellent
18	238L00201	1	90	0	Excellent
19	238L01201	1	90	0	Good
20	238L02201	1	90	0	Excellent
21	238L03201	1	90	0	Good
22	238L04201	2.4	180	0	Excellent
23	872L00101	1	60	0	Good
24	874L00101	1.75	120	0	Good
	Min	1	3	0	
	Max	5	350	1	

จากข้อมูลในตารางที่ 3-4 สามารถแบ่งปัจจัยและระดับปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมระดับ ซึ่งการกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยต่าง ๆ ในการทดลองสามารถแบ่งออกเป็นปัจจัยหลัก ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการควบคุมระดับ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		
	ต่ำ	กลาง	สูง
P ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน	1	3	5
I ผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา (วินาที)	3	176.5	350
D อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด (วินาที)	0	0.5	1

2. ตัวแปรตาม

การออกแบบการทดลองกำหนดจำนวนการทดลองซ้ำหลังจากกำหนดระดับปัจจัยต่าง ๆ และทราบรูปแบบการทดลองแล้ว จำนวนการทำซ้ำที่เหมาะสมในการออกแบบการทดลองจะทำให้ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดประเภทที่ 2 (สรุปว่าปัจจัยไม่มีอิทธิพลต่อค่าตัวแปรตอบสนองทั้งที่ในความจริงแล้วปัจจัยมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง) มีค่าไม่เกินกำหนด ภายใต้ความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยตัวแปรตอบสนองต่ำที่สุดที่ต้องการสรุปว่าปัจจัยมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองโดยทั่วไปแล้วการทดลองจะต้องทำให้จำนวนการทดลองซ้ำ (n) ในสภาวะการทดลองหนึ่ง ๆ มีค่าต่ำที่สุดเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลอง และต้องการให้ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจผิดพลาดประเภทที่ 2 (β) มีค่าน้อยที่สุด (น้อยกว่า 0.1) หรือกำลังทดสอบมีค่าสูงสุด ($1-\beta \geq 0.9$) และค่าอิทธิพลของตัวแปรตอบสนอง (E) ที่ต้องการตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยมีค่าไม่เกินที่กำหนดไว้

จำนวนการทดลองซ้ำ (n) กำลังการทดสอบ ($1-\beta$) และค่าอิทธิพล (E) จะมีความสัมพันธ์กันเชิงสถิติ การออกแบบการทดลองหนึ่ง ๆ ผู้ออกแบบกำหนดตัวแปร 3 ตัว เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหลือ เช่น กำหนดค่ากำลังการทดสอบและค่าอิทธิพลที่ต้องการ เพื่อจำนวนการทดลองซ้ำ การดำเนินการนี้ทำได้โดยใช้โปรแกรม Minitab แสดงการหาจำนวนการทดลองของการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล ซึ่งกำหนดให้มีการทดลองซ้ำ 2 ถึง 10 ครั้ง โดยมีจุดกึ่งกลาง 10 จุด และมี Power เท่ากับ 0.9 จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

Power and Sample Size

2-Level Factorial Design

$\alpha = 0.05$ Assumed standard deviation = 0.07759

Factors: 3 Base Design: 3, 8

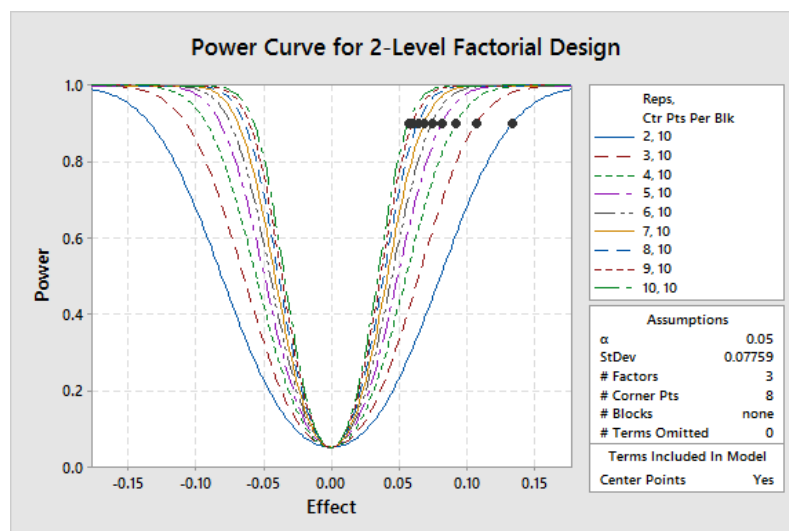
Blocks: none

Including a term for center points in model.

Center Points	Reps	Total Runs	Power	Effect
10	2	26	0.9	0.133512
10	3	34	0.9	0.106864
10	4	42	0.9	0.091629
10	5	50	0.9	0.081466
10	6	58	0.9	0.074071
10	7	66	0.9	0.068381
10	8	74	0.9	0.063828
10	9	82	0.9	0.060077
10	10	90	0.9	0.056918

ภาพที่ 3-10 การหาจำนวนการทดลองของการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล

ตัวแปรตามที่กำหนดในกรณีศึกษา นี้ คือ พื้นที่ใต้ส่วนโค้งของกระบวนการควบคุมระดับ โดยจะใช้วิธีออกแบบการทดลอง 2^k แฟคทอเรียล แบบ 2 ระดับ จุดกึ่งกลาง 10 จุด เพื่อศึกษา อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของปัจจัยต่าง ๆ โดยการจัดการทดลองแบบสุ่มจากผลของการวิเคราะห์และภาพที่ 3-10 โดย Program minitab ที่การทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จะได้การทดลองรวมทั้งสิ้น 26 การทดลอง และได้ Effect 0.133512 ที่ Power เท่ากับ 0.9 ตามที่กำหนดไว้



ภาพที่ 3-11 Power curve for 2-level factorial design จุดกึ่งกลาง 10 จุด ที่การทดลองซ้ำ 2 ถึง 10 ครั้ง

จากภาพที่ 3-11 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า Effect ลดลง เมื่อเพิ่มจำนวนการทดลองซ้ำ สำหรับงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ Center point เท่ากับ 10 การทดลอง และ Replication เท่ากับ 10 ครั้ง โดยการจัดการทดลองแบบสุ่ม เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการทำงานวิจัยในครั้งนี้จะทดลองรวมทั้งสิ้น 90 การทดลอง และที่ Power เท่ากับ 0.9 จะได้ค่า Effect เท่ากับ 0.056918 ซึ่งน้อยกว่าที่กำหนดในงานวิจัยนี้มากและเป็นที่น่าเชื่อถือในการทำงานวิจัยนี้เป็นอย่างยิ่ง

วิธีดำเนินการทดลอง

เมื่อทราบแนวทางในการพิจารณาระดับปัจจัย ซึ่งจะนำมาใช้ในการออกแบบการทดลอง ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการกำหนดวิธีการทดลองซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษานี้มีปัจจัยหลักที่ใช้ในการศึกษา 3 ปัจจัย โดยการลำดับการทดลองตามลำดับแบบสุ่มที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ MINITAB ดังแสดงในตารางที่ 3-6 โดยกำหนดให้ Center point เท่ากับ 10 การทดลอง และ Replication เท่ากับ 10 ครั้ง

Full Factorial Design

Factors: 3 Base design: 3, 8

Runs: 90 Replicates: 10

Blocks: 1 Center pts (total): 10

ตารางที่ 3-6 การออกแบบการทดลอง

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน		ผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด		พื้นที่ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
1	77	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
2	19	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
3	54	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
4	23	1	1	1	5	1	350	-1	0	
5	34	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
6	14	1	1	1	5	-1	3	1	1	
7	17	1	1	-1	1	1	350	1	1	
8	88	1	1	1	5	1	350	1	1	
9	75	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
10	26	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
11	89	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
12	20	1	1	1	5	1	350	-1	0	
13	11	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
14	44	1	1	1	5	-1	3	1	1	
15	68	1	1	-1	1	1	350	1	1	
16	40	1	1	1	5	1	350	1	1	
17	37	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
18	10	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
19	9	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
20	69	1	1	1	5	1	350	-1	0	

ตารางที่ 3-6 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
21	73	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
22	42	1	1	1	5	-1	3	1	1	
23	87	1	1	-1	1	1	350	1	1	
24	49	1	1	1	5	1	350	1	1	
25	52	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
26	72	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
27	46	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
28	85	1	1	1	5	1	350	-1	0	
29	59	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
30	35	1	1	1	5	-1	3	1	1	
31	56	1	1	-1	1	1	350	1	1	
32	76	1	1	1	5	1	350	1	1	
33	50	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
34	43	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
35	81	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
36	74	1	1	1	5	1	350	-1	0	
37	80	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
38	55	1	1	1	5	-1	3	1	1	
39	4	1	1	-1	1	1	350	1	1	
40	38	1	1	1	5	1	350	1	1	

ตารางที่ 3-6 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
41	66	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
42	31	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
43	7	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
44	53	1	1	1	5	1	350	-1	0	
45	83	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
46	15	1	1	1	5	-1	3	1	1	
47	41	1	1	-1	1	1	350	1	1	
48	58	1	1	1	5	1	350	1	1	
49	33	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
50	90	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
51	13	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
52	86	1	1	1	5	1	350	-1	0	
53	12	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
54	51	1	1	1	5	-1	3	1	1	
55	39	1	1	-1	1	1	350	1	1	
56	21	1	1	1	5	1	350	1	1	
57	18	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
58	3	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
59	16	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
60	8	1	1	1	5	1	350	-1	0	

ตารางที่ 3-6 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
61	48	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
62	47	1	1	1	5	-1	3	1	1	
63	25	1	1	-1	1	1	350	1	1	
64	22	1	1	1	5	1	350	1	1	
65	84	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
66	6	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
67	71	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
68	65	1	1	1	5	1	350	-1	0	
69	57	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
70	60	1	1	1	5	-1	3	1	1	
71	78	1	1	-1	1	1	350	1	1	
72	45	1	1	1	5	1	350	1	1	
73	67	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
74	70	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
75	36	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
76	1	1	1	1	5	1	350	-1	0	
77	63	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
78	61	1	1	1	5	-1	3	1	1	
79	29	1	1	-1	1	1	350	1	1	
80	28	1	1	1	5	1	350	1	1	

ตารางที่ 3-6 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน		ผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด		พื้นที่ใต้ส่วนโค้ง Y
				P	I	D				
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
81	24	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
82	2	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
83	32	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
84	5	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
85	30	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
86	82	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
87	27	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
88	79	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
89	62	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
90	64	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	

2. นำรูปแบบการทดลองที่ได้ไปทำการทดลองตามแผนการทดลอง และบันทึกผล
 ลงตาราง คือ พื้นที่ใต้ส่วนโค้ง มีหน่วยเป็นตารางหน่วยต่อนาที

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

จากการกำหนดขั้นตอนการดำเนินการวิจัย รวมไปถึงการกำหนดรูปแบบของการทดลอง ในบทที่ 3 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่าง ๆ ในบทนี้จะกล่าวถึงการดำเนินการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ ตามที่ได้ออกแบบการทดลองและนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ โดยมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k (First order model)
 - 1.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง
 - 1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง
 - 1.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง
2. การทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM)
 - 2.1 การออกแบบการทดลอง
 - 2.2 ตารางบันทึกผลการทดลอง
 - 2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง
 - 2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองโดยวิธีออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k (First order model)

1. ตารางบันทึกผลการทดลอง

การทดลองครั้งนี้ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลอง 2^3 แฟคทอเรียล ทดลองซ้ำ 10 ครั้ง Center point จำนวน 10 การทดลอง เพื่อเพิ่มความเชื่อถือของข้อมูลให้กับการทดลองจะทดลองรวมทั้งสิ้น 90 การทดลอง นำข้อมูลพื้นที่ได้ส่วนโค้งที่คำนวณได้จากภาคผนวก ข จัดเป็นกลุ่ม ๆ ละ 10 ข้อมูล บันทึกในตารางที่ 4-1 โดยค่าที่ถูกบันทึกในตารางดังกล่าวจะเป็นพื้นที่ได้ส่วนโค้ง มีหน่วยเป็นตารางหน่วยต่อนาที

ตารางที่ 4-1 พื้นที่ใต้ส่วนโค้งคำนวณจากการทดลอง

Run order	วันที่	เวลา	พื้นที่ใต้ส่วนโค้ง (Y) ต่อหน้าที่										ค่าเฉลี่ย (Y)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	17-Dec-15	9:36:00 AM	0.058	0.091	0.067	0.043	0.016	0.014	0.046	0.077	0.108	0.140	0.066
2	24-Dec-15	1:11:00 PM	0.038	0.048	0.075	0.076	0.038	0.042	0.027	0.019	0.086	0.053	0.050
3	24-Dec-15	1:33:00 PM	0.144	0.136	0.283	0.433	0.088	0.231	0.331	0.141	0.213	0.121	0.212
4	24-Dec-15	1:55:00 PM	0.104	0.105	0.109	0.104	0.176	0.315	0.106	0.097	0.118	0.105	0.134
5	24-Dec-15	3:05:00 PM	0.063	0.015	0.014	0.030	0.014	0.034	0.029	0.052	0.093	0.042	0.038
6	5-Jan-16	8:14:00 AM	0.119	0.342	0.269	0.208	0.126	0.148	0.150	0.258	0.258	0.247	0.213
7	6-Jan-16	1:30:00 PM	0.152	0.077	0.050	0.109	0.128	0.046	0.061	0.046	0.138	0.076	0.088
8	6-Jan-16	2:09:00 PM	0.030	0.052	0.100	0.152	0.163	0.137	0.188	0.243	0.112	0.047	0.122
9	6-Jan-16	2:29:00 PM	0.101	0.091	0.053	0.230	0.343	0.257	0.067	0.104	0.160	0.118	0.152
10	6-Jan-16	2:54:00 PM	0.379	0.206	0.111	0.159	0.258	0.299	0.224	0.347	0.305	0.283	0.257
11	6-Jan-16	3:14:00 PM	0.353	0.381	0.096	0.430	0.386	0.127	0.465	0.327	0.252	0.531	0.335
12	6-Jan-16	3:34:00 PM	0.682	0.259	0.268	0.425	0.248	0.457	0.641	0.234	0.408	0.592	0.421
13	6-Jan-16	3:55:00 PM	0.579	0.494	0.427	0.436	0.314	0.161	0.226	0.216	0.095	0.174	0.312
14	6-Jan-16	4:14:00 PM	0.281	0.434	0.575	0.306	0.230	0.246	0.242	0.387	0.535	0.131	0.337
15	18-Dec-15	3:25:00 PM	0.235	0.233	0.262	0.133	0.058	0.174	0.293	0.314	0.250	0.077	0.203
16	18-Dec-15	3:50:00 PM	0.140	0.135	0.283	0.275	0.268	0.261	0.253	0.246	0.238	0.231	0.233
17	18-Dec-15	4:23:00 PM	0.238	0.239	0.239	0.240	0.208	0.133	0.047	0.039	0.125	0.210	0.172
18	18-Dec-15	4:45:00 PM	0.509	0.123	0.357	0.475	0.107	0.255	0.318	0.198	0.513	0.465	0.332
19	18-Dec-15	5:09:00 PM	0.177	0.345	0.414	0.267	0.143	0.260	0.349	0.226	0.344	0.418	0.294
20	6-Jan-16	4:35:00 PM	0.038	0.085	0.080	0.047	0.062	0.168	0.194	0.136	0.088	0.068	0.097

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

Run order	วันที่	เวลา	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y) ต่อพื้นที่										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ค่าเฉลี่ย (Y)
21	18-Dec-15	1:53:00 PM	0.239	0.203	0.167	0.130	0.093	0.048	0.014	0.058	0.110	0.163	0.122
22	18-Dec-15	2:03:00 PM	0.164	0.184	0.203	0.222	0.242	0.261	0.280	0.299	0.319	0.338	0.251
23	18-Dec-15	2:13:00 PM	0.050	0.018	0.013	0.044	0.076	0.107	0.138	0.170	0.201	0.233	0.105
24	18-Dec-15	2:23:00 PM	0.050	0.071	0.092	0.114	0.135	0.157	0.178	0.199	0.221	0.242	0.146
25	18-Dec-15	2:33:00 PM	0.209	0.176	0.137	0.091	0.052	0.014	0.027	0.066	0.106	0.145	0.102
26	18-Dec-15	2:43:00 PM	0.225	0.251	0.223	0.282	0.256	0.221	0.272	0.247	0.273	0.233	0.248
27	18-Dec-15	2:53:00 PM	0.143	0.103	0.063	0.023	0.018	0.058	0.098	0.138	0.178	0.218	0.104
28	18-Dec-15	3:03:00 PM	0.128	0.145	0.163	0.180	0.198	0.215	0.232	0.250	0.267	0.285	0.206
29	18-Dec-15	3:13:00 PM	0.167	0.099	0.032	0.036	0.104	0.171	0.239	0.307	0.374	0.442	0.197
30	18-Dec-15	3:23:00 PM	0.049	0.077	0.105	0.133	0.161	0.189	0.217	0.245	0.273	0.301	0.175
31	18-Dec-15	3:33:00 PM	0.277	0.240	0.216	0.150	0.206	0.247	0.278	0.209	0.202	0.166	0.219
32	18-Dec-15	3:43:00 PM	0.057	0.051	0.045	0.039	0.033	0.028	0.032	0.037	0.033	0.029	0.038
33	6-Jan-16	4:59:00 PM	0.062	0.362	0.508	0.191	0.385	0.444	0.053	0.432	0.392	0.031	0.286
34	6-Jan-16	5:18:00 PM	0.376	0.313	0.219	0.459	0.221	0.365	0.514	0.174	0.340	0.534	0.352
35	21-Dec-15	10:43:00 AM	0.487	0.306	0.450	0.359	0.327	0.360	0.375	0.346	0.197	0.469	0.368
36	6-Jan-16	5:38:00 PM	0.335	0.244	0.219	0.154	0.102	0.092	0.086	0.057	0.109	0.052	0.145
37	6-Jan-16	6:00:00 PM	0.396	0.730	0.258	0.282	0.632	0.269	0.274	0.512	0.235	0.390	0.398
38	21-Dec-15	11:13:00 AM	0.168	0.133	0.085	0.026	0.101	0.205	0.309	0.413	0.477	0.367	0.228
39	6-Jan-16	6:18:00 PM	0.113	0.206	0.208	0.217	0.189	0.078	0.096	0.017	0.026	0.056	0.121
40	6-Jan-16	6:38:00 PM	0.015	0.031	0.078	0.074	0.038	0.037	0.030	0.014	0.008	0.007	0.033

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

Run order	วันที่	เวลา	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y) ต่อพื้นที่										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
41	21-Dec-15	11:43:00 AM	0.511	0.409	0.308	0.206	0.099	0.033	0.141	0.264	0.387	0.510	0.287
42	21-Dec-15	11:53:00 AM	0.337	0.062	0.554	0.406	0.195	0.261	0.296	0.295	0.412	0.488	0.330
43	24-Dec-15	12:03:00 PM	0.286	0.261	0.524	0.714	0.870	0.254	0.240	0.263	0.328	0.059	0.380
44	21-Dec-15	12:13:00 PM	0.249	0.248	0.056	0.241	0.144	0.369	0.352	0.291	0.298	0.312	0.256
45	21-Dec-15	12:23:00 PM	0.254	0.750	0.785	0.084	0.043	0.051	0.021	0.048	0.096	0.102	0.223
46	21-Dec-15	12:33:00 PM	0.322	0.196	0.090	0.211	0.156	0.080	0.167	0.121	0.087	0.300	0.173
47	21-Dec-15	12:43:00 PM	0.317	0.167	0.343	0.138	0.211	0.194	0.374	0.378	0.474	0.477	0.307
48	6-Jan-16	6:59:00 PM	0.197	0.374	0.633	0.203	0.409	0.870	0.568	0.160	0.098	0.412	0.393
49	21-Dec-15	1:03:00 PM	0.078	0.080	0.069	0.105	0.290	0.402	0.361	0.141	0.027	0.446	0.200
50	21-Dec-15	1:13:00 PM	0.303	0.558	0.442	0.306	0.551	0.501	0.140	0.391	0.393	0.333	0.392
51	21-Dec-15	1:24:30 PM	0.344	0.344	0.284	0.305	0.304	0.307	0.031	0.205	0.163	0.140	0.243
52	21-Dec-15	1:33:00 PM	0.415	0.616	0.292	0.937	0.677	0.215	0.363	0.738	0.372	0.465	0.509
53	21-Dec-15	1:43:00 PM	0.395	0.346	0.367	0.324	0.236	0.194	0.144	0.189	0.192	0.171	0.256
54	21-Dec-15	1:53:00 PM	0.230	0.224	0.056	0.163	0.200	0.069	0.038	0.069	0.157	0.114	0.132
55	21-Dec-15	2:03:00 PM	0.314	0.190	0.160	0.300	0.314	0.183	0.246	0.244	0.174	0.206	0.233
56	21-Dec-15	2:13:00 PM	0.137	0.049	0.121	0.137	0.033	0.095	0.187	0.103	0.155	0.054	0.107
57	21-Dec-15	2:23:00 PM	0.196	0.305	0.296	0.206	0.541	0.279	0.345	0.508	0.189	0.432	0.330
58	21-Dec-15	2:33:00 PM	0.185	0.195	0.111	0.016	0.037	0.022	0.054	0.074	0.050	0.034	0.078
59	21-Dec-15	2:43:00 PM	0.766	0.279	0.418	0.659	0.211	0.402	0.416	0.106	0.306	0.289	0.385
60	21-Dec-15	2:53:00 PM	0.477	0.444	0.426	0.216	0.334	0.094	0.176	0.159	0.470	0.455	0.325

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

Run order	วันที่	เวลา	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y) ต่อหน้าที่										ค่าเฉลี่ย (Y)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
61	21-Dec-15	3:03:00 PM	0.151	0.387	0.397	0.538	0.537	0.532	0.531	0.274	0.231	0.067	0.364
62	22-Dec-15	3:13:00 PM	0.055	0.022	0.017	0.039	0.017	0.012	0.023	0.023	0.012	0.019	0.024
63	22-Dec-15	3:23:00 PM	0.442	0.295	0.298	0.844	0.539	0.234	0.436	0.420	0.395	0.556	0.446
64	22-Dec-15	3:33:00 PM	0.047	0.022	0.027	0.048	0.133	0.069	0.033	0.021	0.404	0.713	0.152
65	22-Dec-15	2:13:00 PM	0.367	0.229	0.063	0.040	0.029	0.007	0.010	0.016	0.033	0.020	0.081
66	22-Dec-15	2:23:00 PM	0.744	0.491	0.314	0.390	0.383	0.578	0.343	0.867	0.487	0.428	0.502
67	22-Dec-15	2:33:00 PM	0.769	0.601	0.360	0.290	0.620	0.424	0.517	0.591	0.763	0.311	0.525
68	22-Dec-15	2:43:00 PM	0.720	0.682	0.393	0.180	0.044	0.071	0.265	0.214	0.080	0.245	0.289
69	22-Dec-15	2:53:00 PM	0.051	0.063	0.035	0.071	0.025	0.029	0.022	0.036	0.039	0.057	0.043
70	22-Dec-15	3:03:00 PM	0.138	0.134	0.151	0.185	0.148	0.119	0.118	0.177	0.136	0.160	0.147
71	22-Dec-15	3:13:00 PM	0.015	0.098	0.128	0.050	0.118	0.383	0.497	0.336	0.083	0.109	0.182
72	22-Dec-15	3:23:00 PM	0.250	0.197	0.215	0.259	0.243	0.403	0.384	0.428	0.428	0.363	0.317
73	22-Dec-15	3:33:00 PM	0.270	0.260	0.512	0.359	0.362	0.731	0.542	0.584	0.314	0.972	0.491
74	22-Dec-15	3:43:00 PM	0.211	0.117	0.015	0.075	0.183	0.102	0.023	0.059	0.065	0.189	0.104
75	6-Jan-16	7:20:00 PM	0.026	0.487	0.704	0.198	0.249	0.562	0.220	0.133	0.470	0.259	0.331
76	24-Dec-15	4:03:00 PM	0.063	0.049	0.051	0.049	0.076	0.083	0.047	0.021	0.053	0.046	0.054
77	24-Dec-15	10:43:00 AM	0.125	0.377	0.792	0.489	0.143	0.303	0.559	0.173	0.114	0.434	0.351
78	24-Dec-15	10:53:00 AM	0.166	0.159	0.122	0.088	0.063	0.104	0.140	0.083	0.132	0.067	0.112
79	24-Dec-15	11:03:00 AM	0.102	0.044	0.047	0.142	0.103	0.024	0.096	0.119	0.087	0.102	0.086
80	6-Jan-16	7:39:00 PM	0.113	0.371	0.586	0.123	0.244	0.417	0.175	0.359	0.586	0.139	0.311

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

Run order	วันที่	เวลา	พื้นที่สำรวจโค้ง (Y) ต่อมาที่										ค่าเฉลี่ย (Y)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
81	6-Jan-16	7:58:00 PM	0.164	0.099	0.224	0.184	0.176	0.144	0.145	0.157	0.072	0.074	0.144
82	24-Dec-15	11:33:00 AM	0.133	0.065	0.034	0.040	0.059	0.048	0.133	0.069	0.033	0.021	0.064
83	24-Dec-15	11:43:00 AM	0.713	0.495	0.367	0.243	0.064	0.124	0.553	0.649	0.433	0.237	0.388
84	24-Dec-15	11:53:00 AM	0.311	0.612	0.322	0.100	0.05	0.194	0.658	0.792	0.691	0.513	0.424
85	24-Dec-15	12:03:00 PM	0.065	0.116	0.197	0.048	0.025	0.046	0.130	0.115	0.014	0.048	0.080
86	24-Dec-15	12:13:00 PM	0.017	0.034	0.031	0.052	0.073	0.042	0.085	0.091	0.056	0.108	0.059
87	24-Dec-15	12:23:00 PM	0.041	0.041	0.022	0.053	0.058	0.068	0.012	0.047	0.042	0.051	0.044
88	24-Dec-15	12:33:00 PM	0.063	0.083	0.118	0.100	0.054	0.026	0.044	0.066	0.374	0.320	0.125
89	24-Dec-15	12:43:00 PM	0.106	0.066	0.046	0.039	0.036	0.113	0.103	0.052	0.052	0.096	0.071
90	24-Dec-15	4:23:00 PM	0.288	0.184	0.213	0.212	0.176	0.171	0.301	0.434	0.218	0.335	0.253
			0.222										
			Max										0.525
			Min										0.024

นำผลที่ได้จากการคำนวณหาพื้นที่ในตารางที่ 4-1 บันทึกในตารางที่ 4-2 โดยการ
จัดลำดับการทดลองตามลำดับที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ MINITAB

ตารางที่ 4-2 บันทึกผลการทดลอง

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ใต้ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
1	77	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.351
2	19	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.294
3	54	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.132
4	23	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.105
5	34	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.352
6	14	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.337
7	17	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.172
8	88	1	1	1	5	1	350	1	1	0.125
9	75	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.331
10	26	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.248
11	89	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.071
12	20	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.097
13	11	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.335
14	44	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.256
15	68	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.289
16	40	1	1	1	5	1	350	1	1	0.033
17	37	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.398

ตารางที่ 4-2 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
18	10	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.257
19	9	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.152
20	69	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.043
21	73	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.491
22	42	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.330
23	87	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.044
24	49	1	1	1	5	1	350	1	1	0.200
25	52	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.509
26	72	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.317
27	46	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.173
28	85	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.080
29	59	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.385
30	35	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.368
31	56	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.107
32	76	1	1	1	5	1	350	1	1	0.054
33	50	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.392
34	43	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.380
35	81	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.144
36	74	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.104
37	80	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.311

ตารางที่ 4-2 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
38	55	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.233
39	4	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.134
40	38	1	1	1	5	1	350	1	1	0.228
41	66	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.502
42	31	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.219
43	7	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.088
44	53	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.256
45	83	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.388
46	15	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.203
47	41	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.287
48	58	1	1	1	5	1	350	1	1	0.078
49	33	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.286
50	90	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.253
51	13	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.312
52	86	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.059
53	12	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.421
54	51	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.243
55	39	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.121
56	21	1	1	1	5	1	350	1	1	0.122
57	18	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.332

ตารางที่ 4-2 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
58	3	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.212
59	16	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.233
60	8	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.122
61	48	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.393
62	47	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.307
63	25	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.102
64	22	1	1	1	5	1	350	1	1	0.251
65	84	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.424
66	6	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.213
67	71	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.182
68	65	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.081
69	57	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.330
70	60	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.325
71	78	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.112
72	45	1	1	1	5	1	350	1	1	0.223
73	67	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.525
74	70	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.147
75	36	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.145
76	1	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.066
77	63	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.446

ตารางที่ 4-2 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน		ผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด		พื้นที่ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
78	61	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.364
79	29	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.197
80	28	1	1	1	5	1	350	1	1	0.206
81	24	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.146
82	2	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.050
83	32	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.038
84	5	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.038
85	30	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.175
86	82	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.064
87	27	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.104
88	79	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.086
89	62	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.024
90	64	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.152

2. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากผลการทดลองตามตารางที่ 4-2 ได้ผล ดังนี้

Full Factorial Design

Factors: 3 Base Design: 3, 8
 Runs: 90 Replicates: 10
 Blocks: 1 Center pts (total): 10

All terms are free from aliasing.

Factorial Fit: Y versus P, I, D

Estimated Effects and Coefficients for Y (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.2392	0.007624	31.38	0.000
P	-0.0764	-0.0382	0.007624	-5.01	0.000
I	-0.1919	-0.0960	0.007624	-12.58	0.000
D	0.0167	0.0083	0.007624	1.09	0.277
P*I	0.0433	0.0216	0.007624	2.84	0.006
P*D	0.0300	0.0150	0.007624	1.97	0.052
I*D	0.0054	0.0027	0.007624	0.35	0.726
P*I*D	-0.0012	-0.0006	0.007624	-0.08	0.937
Ct Pt		-0.1515	0.022873	-6.62	0.000

S = 0.0681948 PRESS = 0.694897
 R-Sq = 74.82% R-Sq(pred) = 53.54% R-Sq(adj) = 72.33%

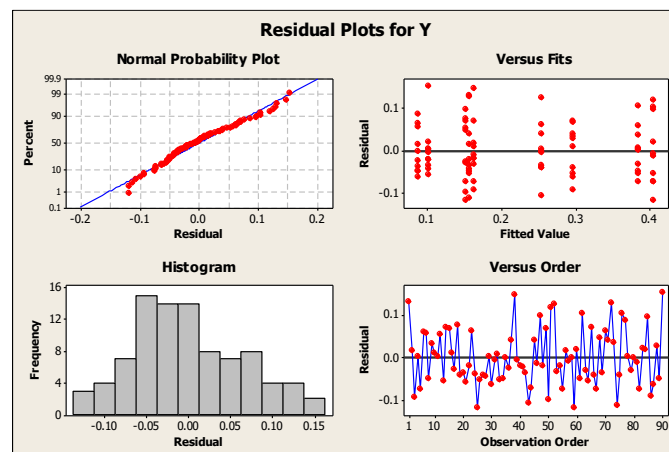
Analysis of Variance for Y (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.85893	0.858930	0.286310	61.56	0.000
P	1	0.11684	0.116837	0.116837	25.12	0.000
I	1	0.73652	0.736518	0.736518	158.37	0.000
D	1	0.00558	0.005575	0.005575	1.20	0.277
2-Way Interactions	3	0.05606	0.056062	0.018687	4.02	0.010
P*I	1	0.03747	0.037470	0.037470	8.06	0.006
P*D	1	0.01802	0.018018	0.018018	3.87	0.052
I*D	1	0.00057	0.000575	0.000575	0.12	0.726
3-Way Interactions	1	0.00003	0.000029	0.000029	0.01	0.937
P*I*D	1	0.00003	0.000029	0.000029	0.01	0.937
Curvature	1	0.20399	0.203993	0.203993	43.86	0.000
Residual Error	81	0.37669	0.376694	0.004651		
Pure Error	81	0.37669	0.376694	0.004651		
Total	89	1.49571				

Unusual Observations for Y

Obs	StdOrder	Y	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	15	0.289416	0.156464	0.021565	0.132952	2.06R
38	51	0.312295	0.163218	0.021565	0.149077	2.30R
72	47	0.286700	0.156464	0.021565	0.130236	2.01R
90	44	0.255842	0.101259	0.021565	0.154583	2.39R

R denotes an observation with a large standardized residual.

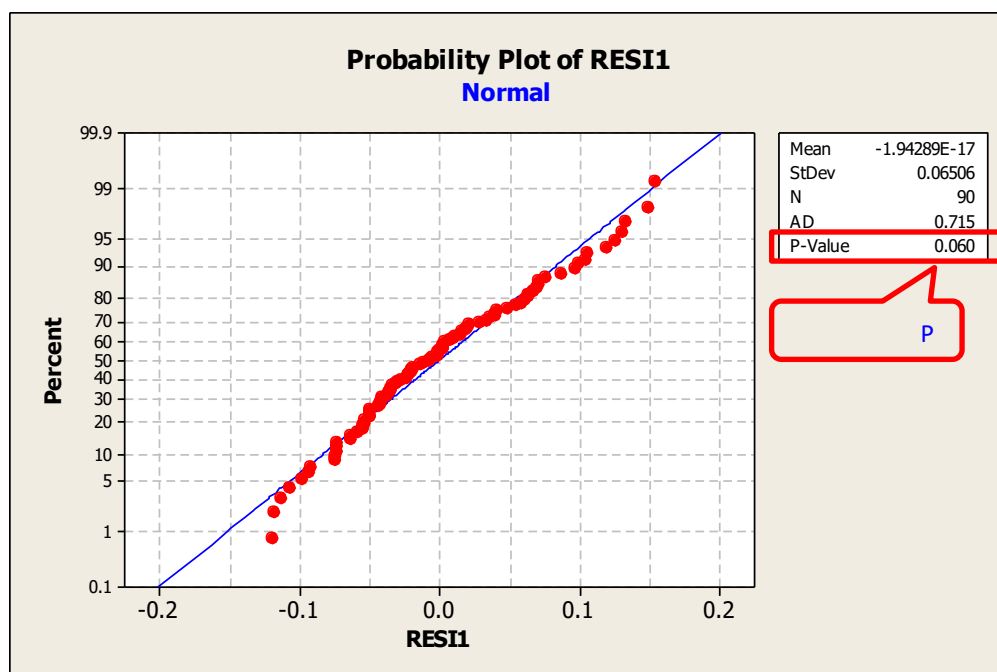


ภาพที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k โดยใช้ Minitab

จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ทำให้ทราบว่าก่อนที่จะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาวิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลจะต้องเป็นไปตามสมมติฐาน ทั้ง 3 ข้อ คือ ข้อมูลต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distributed) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independently distributed) และมีค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ (Constant variable) ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจึงจะถือได้ว่าเป็นความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังนั้น จึงมีการนำข้อมูลจากผลการบันทึกการทดลองตารางที่ 4-2 มาทำการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง โดยการตรวจสอบจะประกอบไปด้วยขั้นตอน ดังนี้

การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล (Normal distributed)

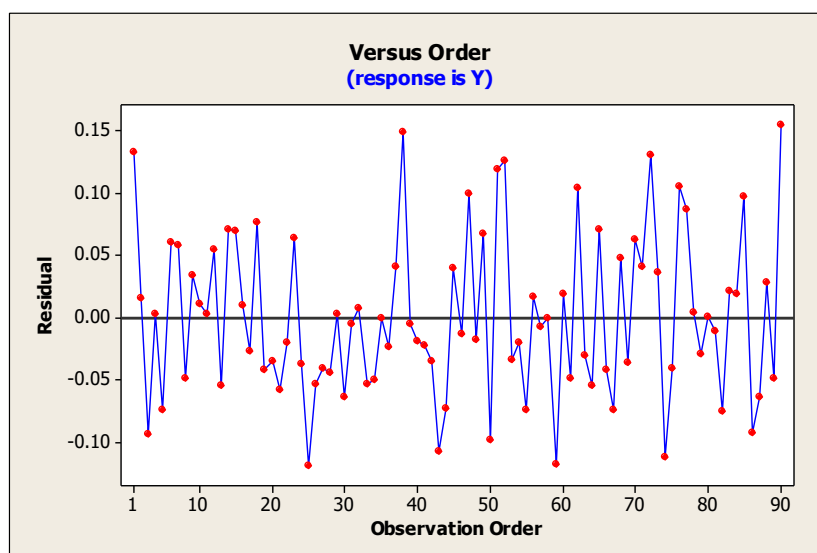
จากการพิจารณาการกระจายตัวของส่วนตกค้าง เพื่อทำการตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล พบว่าค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 4-2 และมีค่า P-value เท่ากับ 0.060 ซึ่งมีค่ามากกว่านัยสำคัญ (Alpha = 0.05) จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 4-2 การแจกแจงแบบปกติของค่าส่วนตกค้างโดยใช้ Minitab

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

จากการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลเทียบกับลำดับการทดลอง เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่าค่าส่วนตกค้างนั้นมีลักษณะการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในภาพที่ 4-3 เนื่องจากการกระจายตัวนั้นไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบที่แน่นอน จึงสรุปว่าค่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 4-3 แผนการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลองโดยใช้ Minitab

เพื่อการยืนยันข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระของข้อมูล ไม่มีลักษณะเป็นจุดต่อเนื่อง (Run) แนวโน้ม (Trend) และวัฏจักร (Cycle) จึงมีการทดสอบข้อมูล (Runs test) เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

Runs test: Residual

Runs test for residual

Runs above and below $K = -7.09309E-18$

The observed number of runs = 48

The expected number of runs = 45.8

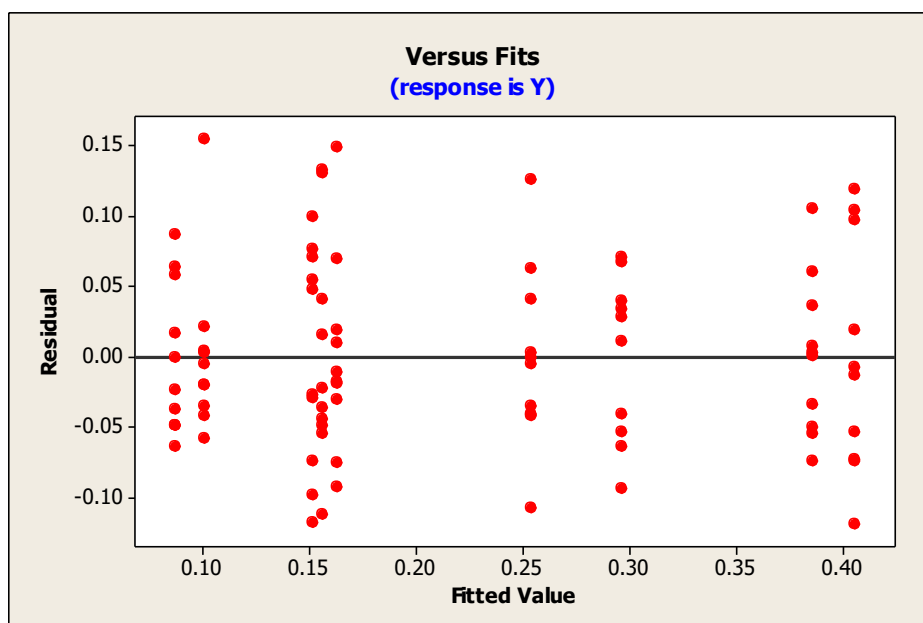
42 observations above K , 48 below

P-value = 0.639

จากผลการทดสอบข้อมูล (Runs test) เมื่อพิจารณา P-value เปรียบเทียบกับค่า Alpha ที่ 0.05 ได้ค่า P-value เท่ากับ 0.639 พบว่าไม่มีหลักฐานเพียงพอที่มาสันนิษฐานสมมติฐานได้ว่าไม่มีความเป็นอิสระของข้อมูล

การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

จากการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลกับค่าตัวแปรตอบสนอง ที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย (Fitted value) เพื่อตรวจสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน พบว่าค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ดังแสดงในภาพที่ 4-4 เนื่องจากมีลักษณะการกระจายตัวเท่า ๆ กัน จึงสรุปว่าค่าส่วนตกค้างนั้นมีความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



ภาพที่ 4-4 แผนการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted value โดยใช้ Minitab

ส่วนความเป็นอิสระของข้อมูลพบว่า ไม่ปรากฏหลักฐานว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือแนวโน้มใด ๆ และความแปรปรวนคงที่ของข้อมูลพบว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอและเป็นอิสระต่อกัน แต่เพื่อการยืนยันข้อมูลจึงมีการนำข้อมูลไปวิเคราะห์การเท่ากันของความแปรปรวน (Test for equal variances) เพื่อให้มีความมั่นใจยิ่งขึ้น จากการทดสอบสมมติฐานการเท่ากันของความแปรปรวน ดังผลการวิเคราะห์จาก Minitab สมมติฐานในการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของข้อมูล คือ

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \dots = \sigma_9^2$ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 9 รูปแบบ
มีค่าเท่ากัน

$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2 \neq \dots \neq \sigma_9^2$ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 9 รูปแบบ
มีค่าไม่เท่ากันอย่างน้อย 1 คู่ เมื่อ $i \neq j$ ($i, j = 1, 2, \dots, k$)

Test for Equal Variances: Residual versus P, I, D

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

P	I	D	N	Lower	StDev	Upper
1	3	0	10	0.0500534	0.0837231	0.205784
1	3	1	10	0.0335927	0.0561898	0.138110
1	350	0	10	0.0415241	0.0694563	0.170718
1	350	1	10	0.0481134	0.0804781	0.197808
3	176.5	0.5	10	0.0346644	0.0579822	0.142515
5	3	0	10	0.0386473	0.0646443	0.158890
5	3	1	10	0.0348773	0.0583385	0.143391
5	350	0	10	0.0354811	0.0593484	0.145873
5	350	1	10	0.0474558	0.0793781	0.195105

Bartlett's Test (Normal Distribution)
Test statistic = 3.53, p-value = 0.897

ภาพที่ 4-5 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูล โดยใช้ Bartlett's test

จาก Bartlett's test ค่า P-value = 0.897 ซึ่งจะมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับค่า Alpha = 0.05 แสดงว่าความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 9 รูปแบบการทดลองมีค่าเท่ากัน เราจึงสรุปได้ว่าค่าความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าเท่ากันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จึงยอมรับ H_0 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบเพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้น ปรากฏว่าข้อมูลเป็นไปตามหลักการของการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบทุกประการ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองชุดนี้มีความถูกต้อง

3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองมีความถูกต้องนั้นสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความน่าเชื่อถือ และในหัวข้อนี้จะเข้าสู่การวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยอาศัย MINITAB มาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยจะพิจารณาความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองจากข้อมูลที่เก็บมานั้นสามารถอธิบายได้จากความผันแปรของปัจจัยที่ทำการทดสอบมากน้อยเพียงใด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) ซึ่งถ้าหากมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงแสดงว่าข้อมูลที่เก็บมานั้นส่วนใหญ่สามารถอธิบายการวิเคราะห์ได้ แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์มีค่าต่ำนั้นหมายความว่าข้อมูลที่เก็บมานั้นมีสิ่งที่ไม่สามารถอธิบายได้เป็นจำนวนมาก จึงมีความจำเป็นต้องมีการทบทวนและวิเคราะห์ความรู้ในเชิงวิศวกรรม

ใหม่ จากผลการทดลองที่ได้มาพบว่า $R-Sq = 74.82\%$ หมายความว่า ถ้าหากค่าผันแปรทั้งหมดมีค่า 100 หน่วย สามารถอธิบายความผันแปรจากทริทเมนต์ได้ถึง 74.82 หน่วย ส่วนที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสาเหตุด้านรีพีทอะบิลิตี และค่า $R-Sq (adj) = 72.33\%$ จึงถือว่าการทดลองนี้มีสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ

ต่อมาเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง คือ กระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังพบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) คือ P, I และปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย (2 Way interaction) P*I มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นมีผลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังอย่างมีนัยสำคัญ < 0.05 ส่วนปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย (2 Way interaction) P*D มีค่า P-value 0.052 มากกว่า 0.05 เล็กน้อย จึงเก็บไว้ซึ่งทำให้ต้องเก็บปัจจัยหลัก (Main effect) D ไว้ และปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย (2 Way interaction) I*D ปัจจัยร่วม 3 ปัจจัย (3 Way interaction) P*I*D ไม่มีผลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังอย่างมีนัยสำคัญ > 0.05 จึงควรตัดออกไม่นำมาวิเคราะห์ โดยที่

P คือ ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน

I คือ ผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา (Sec)

D คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด (Sec)

ทำการตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง

Analysis of Variance for Y (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.85893	0.858930	0.286310	61.56	0.000
P	1	0.11684	0.116837	0.116837	25.12	0.000
I	1	0.73652	0.736518	0.736518	158.37	0.000
D	1	0.00558	0.005575	0.005575	1.20	0.277
2-Way Interactions	3	0.05606	0.056062	0.018687	4.02	0.010
P*I	1	0.03747	0.037470	0.037470	8.06	0.006
P*D	1	0.01802	0.018018	0.018018	3.87	0.052
I*D	1	0.00057	0.000575	0.000575	0.12	0.726
3-Way Interactions	1	0.00003	0.000029	0.000029	0.01	0.937
P*I*D	1	0.00003	0.000029	0.000029	0.01	0.937
Curvature	1	0.20399	0.203993	0.203993	43.86	0.000
Residual Error	81	0.37669	0.376694	0.004651		
Pure Error	81	0.37669	0.376694	0.004651		
Total	89	1.49571				

ภาพที่ 4-6 ตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง

ผลของการตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง โดย Program minitab ได้ ดังนี้

Factorial Fit: y versus P, I, D

Estimated Effects and Coefficients for y (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.2392	0.007534	31.75	0.000
P	-0.0765	-0.0383	0.007534	-5.08	0.000
I	-0.1920	-0.0960	0.007534	-12.74	0.000
D	0.0167	0.0084	0.007534	1.11	0.271
P*I	0.0433	0.0216	0.007534	2.87	0.005
P*D	0.0299	0.0150	0.007534	1.99	0.050
Ct Pt		-0.1515	0.022601	-6.70	0.000

S = 0.0673827 PRESS = 0.672110

R-Sq = 74.81% R-Sq(pred) = 55.07% R-Sq(adj) = 72.99%

Analysis of Variance for y (coded units)

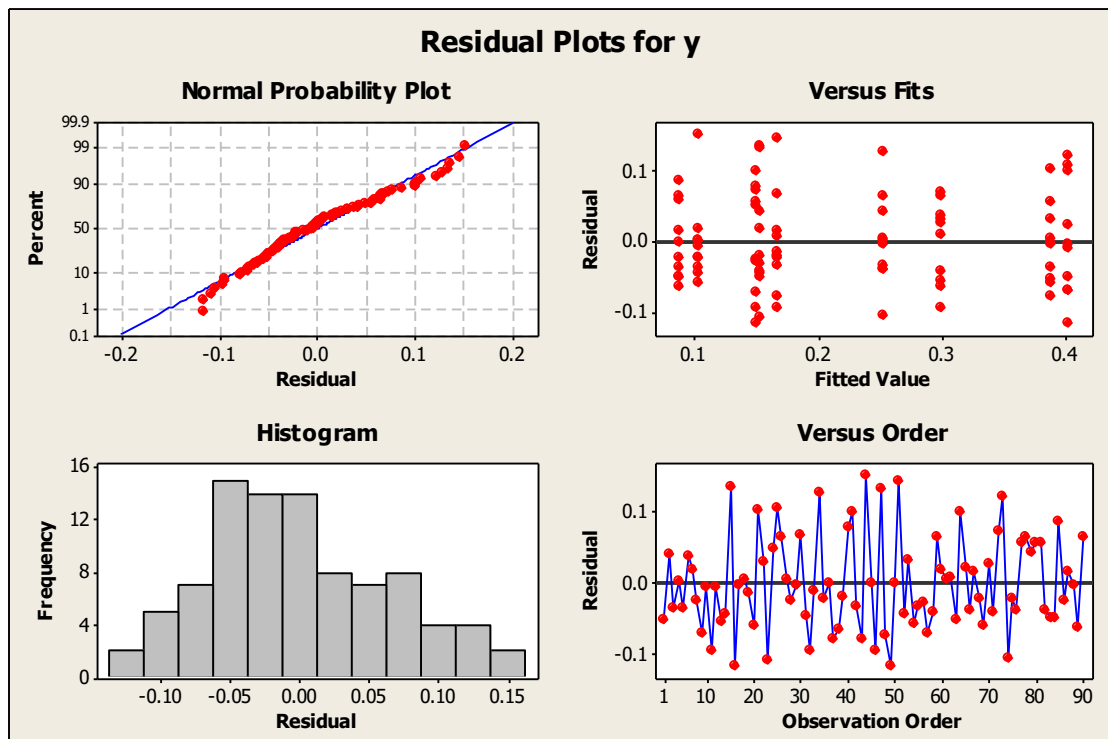
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.85952	0.859519	0.286506	63.10	0.000
P	1	0.11705	0.117045	0.117045	25.78	0.000
I	1	0.73690	0.736896	0.736896	162.30	0.000
D	1	0.00558	0.005578	0.005578	1.23	0.271
2-Way Interactions	2	0.05544	0.055438	0.027719	6.10	0.003
P*I	1	0.03750	0.037498	0.037498	8.26	0.005
P*D	1	0.01794	0.017940	0.017940	3.95	0.050
Curvature	1	0.20409	0.204087	0.204087	44.95	0.000
Residual Error	83	0.37686	0.376855	0.004540		
Lack of Fit	2	0.00059	0.000593	0.000297	0.06	0.938
Pure Error	81	0.37626	0.376262	0.004645		
Total	89	1.49590				

ภาพที่ 4-7 ผลการตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง โดย Program minitab

พิจารณาการกระจายตัวของส่วนตกค้างจากผลการวิเคราะห์ โดยใช้ Minitab และในภาพที่ 4-8 เพื่อทำการตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลพบว่าค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ดังแสดงในกราฟ Normal probability plot

พิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลเทียบกับลำดับการทดลอง เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่าค่าส่วนตกค้างนั้นมีลักษณะการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากการกระจายตัวนั้นไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบที่แน่นอน จึงสรุปว่าค่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในกราฟ Versus order

พิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย (Fitted value) เพื่อตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน พบว่าค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพอยู่ในระดับที่น่าพอใจ เนื่องจากมีลักษณะการกระจายตัวเท่า ๆ กัน จึงสรุปว่าค่าส่วนตกค้างนั้นมีเสถียรภาพของความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังแสดงในกราฟ Versus fits



ภาพที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k หลังตัดปัจจัยโดยใช้ Minitab

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับผลของตัวแปรตอบสนอง คือ ค่ากระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังว่ามีสัมพันธ์แบบเส้นตรงหรือไม่ โดยอ่านที่ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Curvature) พบว่าค่า P-value ของความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Curvature) มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าอัลฟา (Alpha = 0.05) แสดงว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Curvature) มีความสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นคือ ความแตกต่างระหว่างจุดกึ่งกลางของระนาบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งทำให้สรุปได้ว่าการสร้าง First order model ของกระบวนการนั้นไม่เหมาะสม จึงต้องทำการวิเคราะห์รูปแบบทางคณิตศาสตร์วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) ต่อไป

การทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM)

1. การออกแบบการทดลอง

การทดลองก่อนหน้าทำให้ทราบว่าความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ เป็นแบบ Second order model จึงเลือกการทดลองแบบ Central composite design (CCD) โดยการทดลองแบบ CCD จะประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่

1.1 ส่วนแรกเป็นชุดการทดลองแบบ Factorial design โดยใช้การทดลองแบบ 2^3 Factorial design มี 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราขยายสัดส่วน อัตราขยายปริพันธ์ และอัตราขยายอนุพันธ์

1.2 ส่วนที่สอง คือ ส่วนของจุดกึ่งกลาง

1.3 ส่วนที่สาม คือ ส่วนการทดลองที่ออกแบบให้เกิดคุณสมบัติการหมุน โดยกำหนดค่า Alpha เท่ากับ Face centered หรือ $\text{Alpha} = \pm 1$ (Code) เนื่องจากระดับปัจจัยค่าต่ำไม่สามารถใส่ค่าน้อยกว่า 0 ได้ โดยกำหนดระดับปัจจัยของการทดลอง ดังตารางที่ 4-3 และผลการออกแบบ CCD 3 ปัจจัย โดยกำหนด Factorial run = 80 การทดลอง Alpha run = 12 การทดลอง และ Center point = 12 การทดลอง ดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-3 ระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษา

ปัจจัย		ระดับปัจจัย		
		ต่ำ	กลาง	สูง
P	ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน	1	3	5
I	ผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา (วินาที)	3	176.5	350
D	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด (วินาที)	0	0.5	1

ตารางที่ 4-4 ผลการออกแบบ CCD 3 ปัจจัย

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน		ผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด		พื้นที่ได้ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
1	77	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	Factorial run
2	19	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
3	54	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
4	23	1	1	1	5	1	350	-1	0	
5	34	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
6	14	1	1	1	5	-1	3	1	1	
7	17	1	1	-1	1	1	350	1	1	
8	88	1	1	1	5	1	350	1	1	
9	75	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
10	26	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
11	89	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
12	20	1	1	1	5	1	350	-1	0	
13	11	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
14	44	1	1	1	5	-1	3	1	1	
15	68	1	1	-1	1	1	350	1	1	
16	40	1	1	1	5	1	350	1	1	
17	37	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
18	10	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
19	9	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
20	69	1	1	1	5	1	350	-1	0	

ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ใต้เส้นโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
21	73	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
22	42	1	1	1	5	-1	3	1	1	
23	87	1	1	-1	1	1	350	1	1	
24	49	1	1	1	5	1	350	1	1	
25	52	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
26	72	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
27	46	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
28	85	1	1	1	5	1	350	-1	0	
29	59	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
30	35	1	1	1	5	-1	3	1	1	
31	56	1	1	-1	1	1	350	1	1	
32	76	1	1	1	5	1	350	1	1	
33	50	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
34	43	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
35	81	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
36	74	1	1	1	5	1	350	-1	0	
37	80	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
38	55	1	1	1	5	-1	3	1	1	
39	4	1	1	-1	1	1	350	1	1	
40	38	1	1	1	5	1	350	1	1	

ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ใต้เส้นโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
41	66	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
42	31	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
43	7	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
44	53	1	1	1	5	1	350	-1	0	
45	83	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
46	15	1	1	1	5	-1	3	1	1	
47	41	1	1	-1	1	1	350	1	1	
48	58	1	1	1	5	1	350	1	1	
49	33	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
50	90	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
51	13	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
52	86	1	1	1	5	1	350	-1	0	
53	12	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
54	51	1	1	1	5	-1	3	1	1	
55	39	1	1	-1	1	1	350	1	1	
56	21	1	1	1	5	1	350	1	1	
57	18	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
58	3	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
59	16	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
60	8	1	1	1	5	1	350	-1	0	

ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ใต้เส้นโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
61	48	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
62	47	1	1	1	5	-1	3	1	1	
63	25	1	1	-1	1	1	350	1	1	
64	22	1	1	1	5	1	350	1	1	
65	84	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
66	6	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
67	71	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
68	65	1	1	1	5	1	350	-1	0	
69	57	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
70	60	1	1	1	5	-1	3	1	1	
71	78	1	1	-1	1	1	350	1	1	
72	45	1	1	1	5	1	350	1	1	
73	67	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	
74	70	1	1	1	5	-1	3	-1	0	
75	36	1	1	-1	1	1	350	-1	0	
76	1	1	1	1	5	1	350	-1	0	
77	63	1	1	-1	1	-1	3	1	1	
78	61	1	1	1	5	-1	3	1	1	
79	29	1	1	-1	1	1	350	1	1	
80	28	1	1	1	5	1	350	1	1	

ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน		ผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตรา การเปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด	พื้นที่ส่วนโค้ง Y	
				P		I				D
				Code	Unicode	Code	Unicode			Code
81	91	-1	1	-1	1	0	176.5	0	0.5	
82	92	-1	1	1	5	0	176.5	0	0.5	
83	93	-1	1	0	3	-1	3.0	0	0.5	
84	94	-1	1	0	3	1	350.0	0	0.5	
85	95	-1	1	0	3	0	176.5	-1	0	
86	96	-1	1	0	3	0	176.5	1	1	
87	97	-1	1	-1	1	0	176.5	0	0.5	
88	98	-1	1	1	5	0	176.5	0	0.5	
89	99	-1	1	0	3	-1	3.0	0	0.5	
90	100	-1	1	0	3	1	350.0	0	0.5	
91	101	-1	1	0	3	0	176.5	-1	0	
92	102	-1	1	0	3	0	176.5	1	1	
93	24	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
94	2	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
95	32	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
96	5	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
97	30	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
98	82	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
99	27	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
100	62	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	

Alpha run

Center point

ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน		ผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด		พื้นที่ใต้ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
101	64	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	Center point
102	79	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
103	103	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	
104	104	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	

2. ตารางบันทึกผลการทดลอง

ใช้ข้อมูลจากการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k (First order model) และทำการทดลองเพิ่ม คือ Alpha run = 12 การทดลอง Center point = 2 การทดลอง และทำการทดลองใหม่ของ Center point = 1 การทดลอง เนื่องจากผลที่ได้แตกต่างกันมาก นำข้อมูลพื้นที่ใต้ส่วนโค้งที่คำนวณได้จากตารางภาคผนวก ค จัดเป็นกลุ่ม ๆ ละ 10 ข้อมูล บันทึกในตารางที่ 4-5 โดยค่าที่ถูกบันทึกในตารางดังกล่าวจะเป็นพื้นที่ใต้ส่วนโค้งมีหน่วยเป็นตารางหน่วยต่อนาที

ตารางที่ 4-5 พื้นที่ใต้สวน ไม้กิ่งคำนวณจากการทดลองวิธีการฟื้นผิวยอดบนอง

Run order	วันที่	เวลา	พื้นที่ใต้สวน ไม้กิ่ง (Y) ต่อหน้าที่										ค่าเฉลี่ย (Y)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	3-Oct-16	9:25:00 AM	0.045	0.094	0.070	0.007	0.056	0.094	0.058	0.055	0.073	0.039	0.059
2	3-Oct-16	11:59:00 AM	0.101	0.134	0.090	0.080	0.046	0.121	0.103	0.037	0.122	0.104	0.094
3	19-Sep-16	3:32:00 PM	0.346	0.349	0.378	0.347	0.195	0.031	0.031	0.027	0.024	0.047	0.178
4	20-Sep-16	11:20:00 AM	0.168	0.078	0.079	0.085	0.131	0.187	0.191	0.164	0.056	0.150	0.129
5	19-Sep-16	8:58:00 AM	0.247	0.125	0.040	0.076	0.064	0.043	0.140	0.134	0.140	0.094	0.110
6	20-Sep-16	9:07:00 AM	0.631	0.544	0.862	0.774	0.490	0.953	0.597	0.591	0.745	0.406	0.659
7	20-Sep-16	9:37:00 AM	0.302	0.172	0.112	0.046	0.181	0.331	0.464	0.593	0.730	0.815	0.375
8	20-Sep-16	10:10:00 AM	0.195	0.047	0.067	0.118	0.108	0.062	0.021	0.002	0.006	0.044	0.067
9	20-Sep-16	5:26:00 PM	0.102	0.146	0.254	0.228	0.087	0.012	0.088	0.093	0.049	0.065	0.112
10	3-Oct-16	12:34:00 PM	0.068	0.123	0.105	0.214	0.019	0.164	0.154	0.192	0.083	0.064	0.086
11	4-Oct-16	10:13:00 AM	0.120	0.032	0.088	0.106	0.074	0.033	0.085	0.090	0.079	0.115	0.082
12	20-Sep-16	1:15:00 PM	0.955	0.634	0.609	0.823	0.417	0.706	0.729	0.459	0.823	0.818	0.697
13	20-Sep-16	2:27:00 PM	0.087	0.283	0.244	0.100	0.323	0.416	0.250	0.160	0.585	0.949	0.340
14	20-Sep-16	3:21:00 PM	0.049	0.071	0.107	0.144	0.115	0.028	0.037	0.091	0.163	0.105	0.091
15	4-Oct-16	8:01:00 AM	0.057	0.043	0.034	0.039	0.090	0.065	0.151	0.063	0.067	0.039	0.065

นำผลที่ได้จากการคำนวณหาพื้นที่ในตารางที่ 4-1 และตารางที่ 4-5 บันทึกในตารางที่ 4-6 โดยการจัดลำดับการทดลองตามลำดับที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ MINITAB

ตารางที่ 4-6 ผลการทดลองจากการออกแบบ CCD 3 ปัจจัย

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด	พื้นที่ส่วนโค้ง Y		
				P		I				D	
				Code	Unicode	Code	Unicode			Code	Unicode
1	77	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.351	Factorial run
2	19	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.294	
3	54	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.132	
4	23	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.105	
5	34	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.352	
6	14	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.337	
7	17	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.172	
8	88	1	1	1	5	1	350	1	1	0.125	
9	75	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.331	
10	26	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.248	
11	89	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.071	
12	20	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.097	
13	11	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.335	
14	44	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.256	
15	68	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.289	
16	40	1	1	1	5	1	350	1	1	0.033	
17	37	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.398	

ตารางที่ 4-6 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ใต้เส้นโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
18	10	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.257
19	9	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.152
20	69	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.043
21	73	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.491
22	42	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.330
23	87	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.044
24	49	1	1	1	5	1	350	1	1	0.200
25	52	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.509
26	72	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.317
27	46	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.173
28	85	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.080
29	59	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.385
30	35	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.368
31	56	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.107
32	76	1	1	1	5	1	350	1	1	0.054
33	50	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.392
34	43	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.380
35	81	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.144
36	74	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.104
37	80	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.311

ตารางที่ 4-6 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ใต้เส้นโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
38	55	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.233
39	4	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.134
40	38	1	1	1	5	1	350	1	1	0.228
41	66	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.502
42	31	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.219
43	7	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.088
44	53	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.256
45	83	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.388
46	15	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.203
47	41	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.287
48	58	1	1	1	5	1	350	1	1	0.078
49	33	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.286
50	90	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.253
51	13	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.312
52	86	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.059
53	12	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.421
54	51	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.243
55	39	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.121
56	21	1	1	1	5	1	350	1	1	0.122
57	18	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.332

ตารางที่ 4-6 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ใต้เส้นโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
58	3	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.212
59	16	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.233
60	8	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.122
61	48	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.393
62	47	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.307
63	25	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.102
64	22	1	1	1	5	1	350	1	1	0.251
65	84	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.424
66	6	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.213
67	71	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.182
68	65	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.081
69	57	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.330
70	60	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.325
71	78	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.112
72	45	1	1	1	5	1	350	1	1	0.223
73	67	1	1	-1	1	-1	3	-1	0	0.525
74	70	1	1	1	5	-1	3	-1	0	0.147
75	36	1	1	-1	1	1	350	-1	0	0.145
76	1	1	1	1	5	1	350	-1	0	0.066
77	63	1	1	-1	1	-1	3	1	1	0.446

ตารางที่ 4-6 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความ ผิดพลาดใน ปัจจุบัน		ผลรวมของความ ผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการ เปลี่ยนแปลงของ ความผิดพลาด		พื้นที่ใต้ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
78	61	1	1	1	5	-1	3	1	1	0.364
79	29	1	1	-1	1	1	350	1	1	0.197
80	28	1	1	1	5	1	350	1	1	0.206
81	91	-1	1	-1	1	0	176.5	0	0.5	0.129
82	92	-1	1	1	5	0	176.5	0	0.5	0.110
83	93	-1	1	0	3	-1	3.0	0	0.5	0.659
84	94	-1	1	0	3	1	350.0	0	0.5	0.375
85	95	-1	1	0	3	0	176.5	-1	0	0.067
86	96	-1	1	0	3	0	176.5	1	1	0.112
87	97	-1	1	-1	1	0	176.5	0	0.5	0.086
88	98	-1	1	1	5	0	176.5	0	0.5	0.082
89	99	-1	1	0	3	-1	3.0	0	0.5	0.697
90	100	-1	1	0	3	1	350.0	0	0.5	0.340
91	101	-1	1	0	3	0	176.5	-1	0	0.091
92	102	-1	1	0	3	0	176.5	1	1	0.065
93	24	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.146
94	2	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.050
95	32	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.038
96	5	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.038
97	30	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.175

Alpha run

Center point

ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

Std order	Run order	Center Pt	Blocks	ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน		ผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา		อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด		พื้นที่ใต้ส่วนโค้ง Y
				P		I		D		
				Code	Unicode	Code	Unicode	Code	Unicode	
98	82	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.064
99	27	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.104
100	62	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.059
101	64	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.152
102	79	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.086
103	103	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.094
104	104	0	1	0	3	0	176.5	0	0.5	0.178

Center point

3. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

นำผลที่ได้จากการทดลองไปทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab ได้ผลการวิเคราะห์ ดังนี้

Response Surface Regression: Y versus P, I, D

The analysis was done using uncoded units.
Estimated Regression Coefficients for Y

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.338188	0.045559	7.423	0.000
P	0.110188	0.045014	2.448	0.016
I	-0.004504	0.000360	-12.504	0.000
D	0.429323	0.123046	3.489	0.001
P*P	-0.024559	0.007415	-3.312	0.001
I*I	0.000011	0.000001	10.714	0.000
D*D	-0.464951	0.118637	-3.919	0.000
P*I	0.000063	0.000023	2.758	0.007
P*D	0.015220	0.007929	1.920	0.058
I*D	0.000033	0.000091	0.366	0.715

S = 0.0709186 PRESS = 0.587895
R-Sq = 77.52% R-Sq(pred) = 72.04% R-Sq(adj) = 75.37%

Analysis of Variance for Y

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	1.63018	1.63018	0.181131	36.01	0.000
Linear	3	0.94653	0.90499	0.301664	59.98	0.000
P	1	0.11421	0.03014	0.030137	5.99	0.016
I	1	0.82699	0.78635	0.786346	156.35	0.000
D	1	0.00533	0.06123	0.061228	12.17	0.001
Square	3	0.62620	0.62620	0.208733	41.50	0.000
P*P	1	0.04604	0.05518	0.055177	10.97	0.001
I*I	1	0.50291	0.57730	0.577301	114.78	0.000
D*D	1	0.07725	0.07725	0.077249	15.36	0.000
Interaction	3	0.05745	0.05745	0.019151	3.81	0.013
P*I	1	0.03825	0.03825	0.038246	7.60	0.007
P*D	1	0.01853	0.01853	0.018533	3.68	0.058
I*D	1	0.00067	0.00067	0.000673	0.13	0.715
Residual Error	94	0.47277	0.47277	0.005029		
Lack-of-Fit	5	0.08462	0.08462	0.016924	3.88	0.003
Pure Error	89	0.38815	0.38815	0.004361		
Total	103	2.10295				

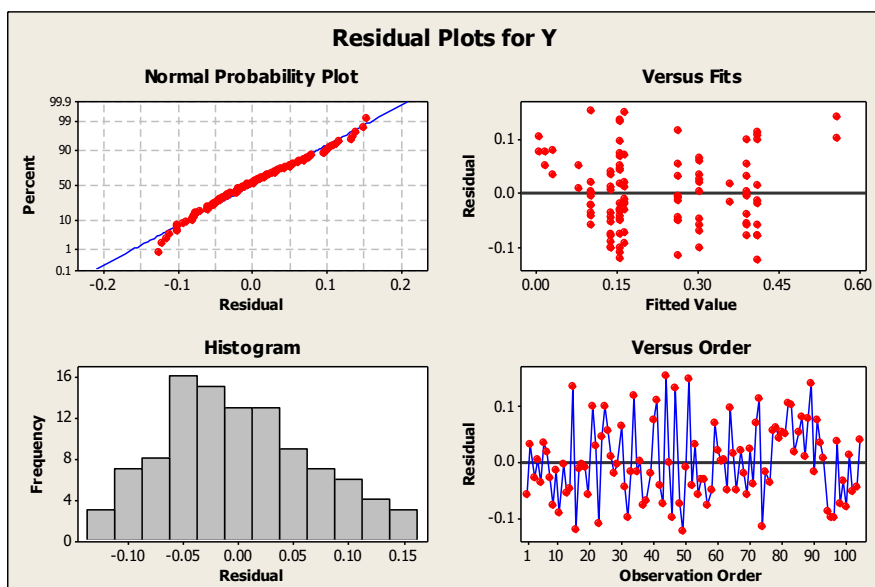
Unusual Observations for Y

Obs	StdOrder	Y	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
44	44	0.256	0.102	0.021	0.154	2.27 R
51	51	0.312	0.163	0.021	0.150	2.21 R
89	89	0.697	0.556	0.032	0.141	2.23 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

ภาพที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองจากการออกแบบ CCD โดยใช้ Minitab

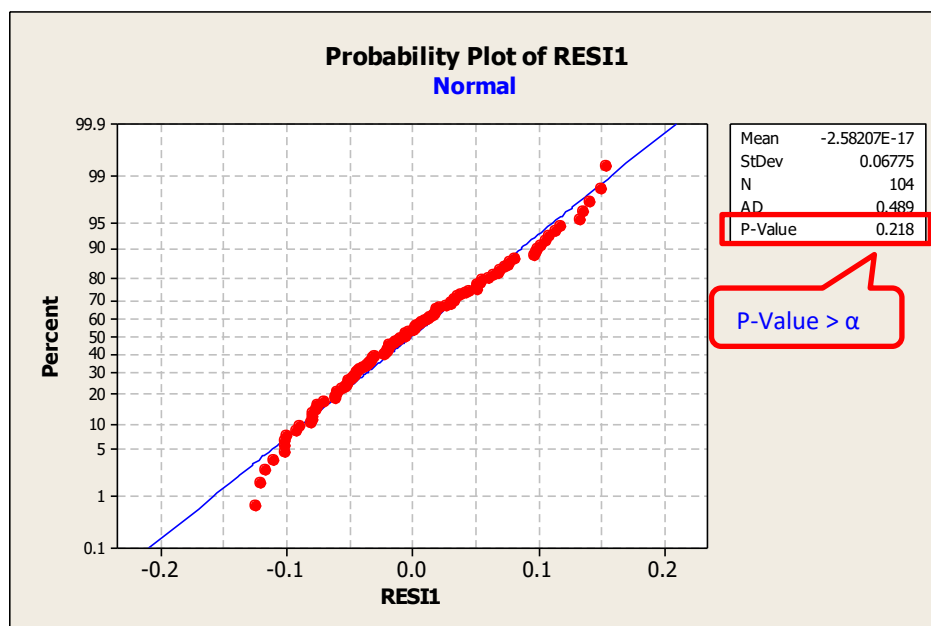
จากการพิจารณาความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลเทียบกับลำดับการทดลอง เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่าค่าส่วนตกค้างนั้นมีลักษณะการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในกราฟ Versus order ของภาพที่ 4-10 เนื่องจากการกระจายตัวนั้นไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบที่แน่นอน จึงสรุปว่าค่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 4-10 กราฟเพื่อการวิเคราะห์ค่า Residual ของการทดลอง

จากการพิจารณาการกระจายตัวของส่วนตกค้าง เพื่อทำการตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล พบว่าค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง เมื่อนำค่า Residual มาทำการทดสอบความเป็นปกติของการแจกแจง และ Plot กราฟได้ดังภาพที่ 4-10 จะเห็นได้ว่ามีบางจุดบนกราฟมีแนวโน้มออกห่างจากค่าเฉลี่ยอยู่บ้างแต่ยังไม่ถึงกับแสดงว่ากราฟมีความผิดปกติแต่อย่างใด อีกทั้งค่า P-value = 0.218 ซึ่งไม่สามารถปฏิเสธได้ว่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งมีค่ามากกว่านัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

จากการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย เพื่อตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน พบว่าค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพอยู่ในระดับที่น่าพอใจดังแสดงในกราฟ Versus fits ของภาพที่ 4-11 เนื่องจากมีลักษณะการกระจายตัวเท่า ๆ กัน จึงสรุปว่าค่าส่วนตกค้างนั้นมีเสถียรภาพของความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



ภาพที่ 4-11 กราฟแสดงผลการทดสอบความเป็นปกติของการแจกแจง

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง คือ กระบวนการควบคุมระดับน้ำ ในถึงพบว่าปัจจัยหลัก (Linear) คือ P, I, D และปัจจัยร่วม (Square) P*P, I*I, D*D และปัจจัยร่วม (Interaction) P*I, มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นมีผลต่อ กระบวนการควบคุมระดับน้ำในถึงอย่างมีนัยสำคัญ < 0.05 ส่วนปัจจัยร่วม (Interaction) P*D, I*D ไม่มีผลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถึงอย่างมีนัยสำคัญ > 0.05 และตัดออกไม่ควรนำมา วิเคราะห์ แต่เนื่องจากปัจจัยร่วม (Interaction) P*D มีค่า P-value มากกว่า 0.05 เล็กน้อยจึงเก็บไว้ โดยที่

P คือ ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน

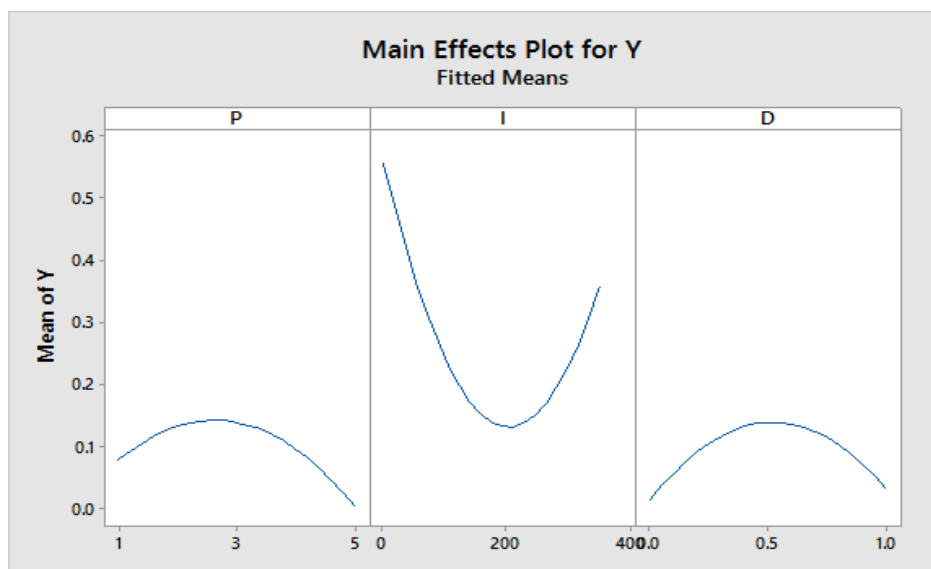
I คือ ผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา (Sec)

D คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด (Sec)

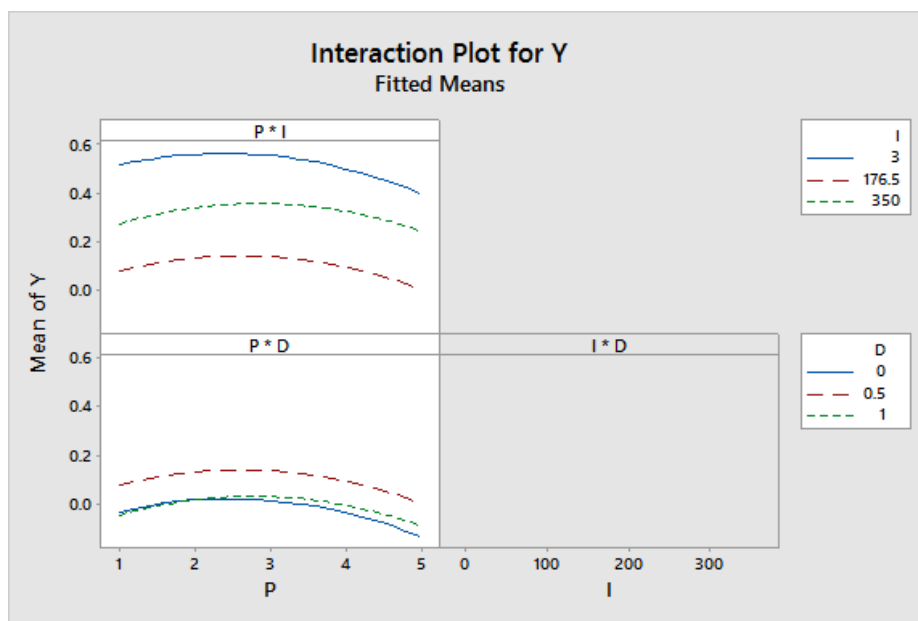
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	1.63018	1.63018	0.181131	36.01	0.000
Linear	3	0.94653	0.90499	0.301664	59.98	0.000
P	1	0.11421	0.03014	0.030137	5.99	0.016
I	1	0.82699	0.78635	0.786346	156.35	0.000
D	1	0.00533	0.06123	0.061228	12.17	0.001
Square	3	0.62620	0.62620	0.208733	41.50	0.000
P*P	1	0.04604	0.05518	0.055177	10.97	0.001
I*I	1	0.50291	0.57730	0.577301	114.78	0.000
D*D	1	0.07725	0.07725	0.077249	15.36	0.000
Interaction	3	0.05745	0.05745	0.019151	3.81	0.013
P*I	1	0.03825	0.03825	0.038246	7.60	0.007
P*D	1	0.01853	0.01853	0.018533	3.68	0.058
I*D	1	0.00067	0.00067	0.000673	0.13	0.715
Residual Error	94	0.47277	0.47277	0.005029		
Lack-of-Fit	5	0.08462	0.08462	0.016924	3.88	0.003
Pure Error	89	0.38815	0.38815	0.004361		
Total	103	2.10295				

ภาพที่ 4-12 คัดปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องของการทดลองจากการออกแบบ CCD ออก

ทำการคัดปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องออกแต่ยังเก็บ Interaction P*D ไว้เนื่องจาก P-value = 0.058 ซึ่งเกินกว่าค่า Alpha เล็กน้อย และเมื่อพิจารณาภาพที่ 4-13 ปัจจัยหลัก P พบว่าลักษณะเส้นกราฟลาดชันลดลงเข้าใกล้กับค่า Effect เมื่อ P มีค่ามากขึ้น และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลัก D พบว่าลักษณะเส้นกราฟค่าต่ำและค่าสูงจะเข้าใกล้กับค่า Effect



ภาพที่ 4-13 อิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง



ภาพที่ 4-14 อิทธิพลร่วมแต่ละคู่ของปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง

จากภาพที่ 4-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลร่วม 2 ระดับ (Interaction) ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อระบบการควบคุมระดับน้ำในถัง จากการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมของ P*D ซึ่งได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่ไม่ขนานกันและความชันลดลง เมื่อเพิ่มค่า P มากขึ้นมีผลทำให้ค่า Effect น้อยลง และค่าเมื่อเปลี่ยนค่า D ในช่วงค่าต่ำและค่าสูงทำให้ค่า Effect เปลี่ยนแปลงประมาณ 0.12 ตามที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 คือ Center point เท่ากับ 10 การทดลอง และ Replication เท่ากับ 10 ครั้ง โดยการจัดการทดลองแบบสุ่ม ทดลองรวมทั้งสิ้น 90 การทดลองที่ Power เท่ากับ 0.9 จะได้ค่า Effect 0.056918 ตามผลของการหา Power and sample size จากโปรแกรม Minitab ด้านล่าง แสดงว่าอิทธิพลร่วม 2 ระดับของปัจจัย P*D มีผลต่อระบบการควบคุมระดับน้ำในถัง อย่างมีนัยสำคัญจึงทำการต้องเก็บ Interaction P*D ไว้

Power and Sample Size

2-Level Factorial Design
 $\alpha = 0.05$ Assumed standard deviation = 0.07759
 Factors: 3 Base Design: 3, 8
 Blocks: none
 Including a term for center points in model.

Center Points	Reps	Total Runs	Power	Effect
10	2	26	0.9	0.133512
10	3	34	0.9	0.106864
10	4	42	0.9	0.091629
10	5	50	0.9	0.081466
10	6	58	0.9	0.074071
10	7	66	0.9	0.068381
10	8	74	0.9	0.063828
10	9	82	0.9	0.060077
10	10	90	0.9	0.056918

ภาพที่ 4-15 จำนวนการทดลองของการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลหลังการตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อระบบควบคุมออกด้วยโปรแกรม Minitab ได้ผลการวิเคราะห์ ดังนี้

Response Surface Regression: Y versus P, I, D

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for Y

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.335237	0.044635	7.511	0.000
P	0.110188	0.044808	2.459	0.016
I	-0.004487	0.000356	-12.617	0.000
D	0.435226	0.121427	3.584	0.001
P*P	-0.024559	0.007381	-3.327	0.001
I*I	0.000011	0.000001	10.763	0.000
D*D	-0.464951	0.118095	-3.937	0.000
P*I	0.000063	0.000023	2.770	0.007
P*D	0.015220	0.007893	1.928	0.057

S = 0.0705946 PRESS = 0.577276

R-Sq = 77.49% R-Sq(pred) = 72.55% R-Sq(adj) = 75.59%

Analysis of Variance for Y

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	1.62951	1.62951	0.203688	40.87	0.000
Linear	3	0.94653	0.94161	0.313871	62.98	0.000
P	1	0.11421	0.03014	0.030137	6.05	0.016
I	1	0.82699	0.79329	0.793288	159.18	0.000
D	1	0.00533	0.06402	0.064024	12.85	0.001
Square	3	0.62620	0.62620	0.208733	41.88	0.000
P*P	1	0.04604	0.05518	0.055177	11.07	0.001
I*I	1	0.50291	0.57730	0.577301	115.84	0.000
D*D	1	0.07725	0.07725	0.077249	15.50	0.000
Interaction	2	0.05678	0.05678	0.028389	5.70	0.005
P*I	1	0.03825	0.03825	0.038246	7.67	0.007
P*D	1	0.01853	0.01853	0.018533	3.72	0.057
Residual Error	95	0.47344	0.47344	0.004984		
Lack-of-Fit	6	0.08529	0.08529	0.014216	3.26	0.006
Pure Error	89	0.38815	0.38815	0.004361		
Total	103	2.10295				

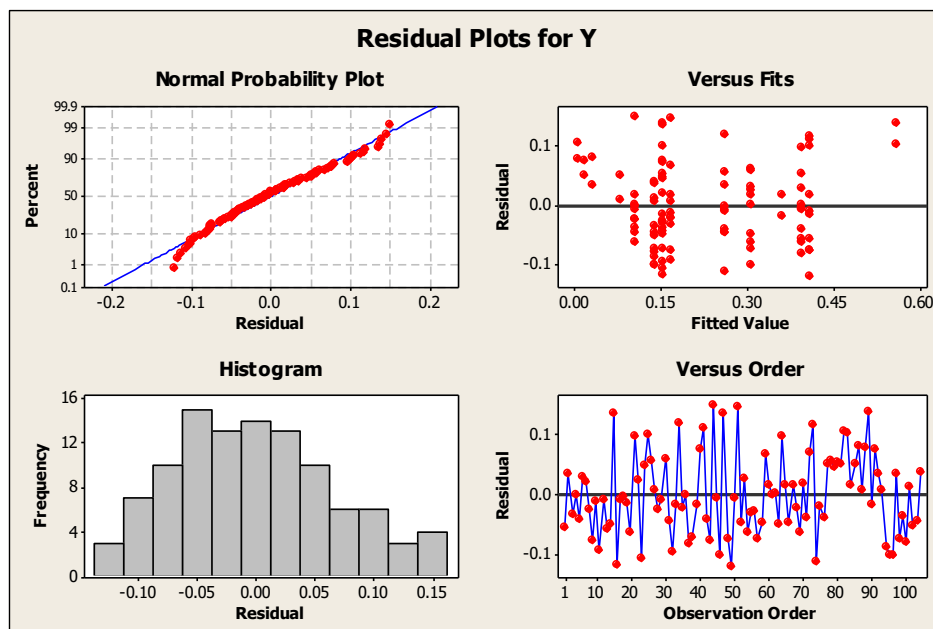
Unusual Observations for Y

Obs	StdOrder	Y	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
15	15	0.289	0.151	0.019	0.138	2.04 R
44	44	0.256	0.105	0.019	0.151	2.22 R
51	51	0.312	0.166	0.019	0.147	2.16 R
89	89	0.697	0.556	0.032	0.141	2.24 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

ภาพที่ 4-16 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองจากการออกแบบ CCD หลังตัดปัจจัยโดยใช้ Minitab

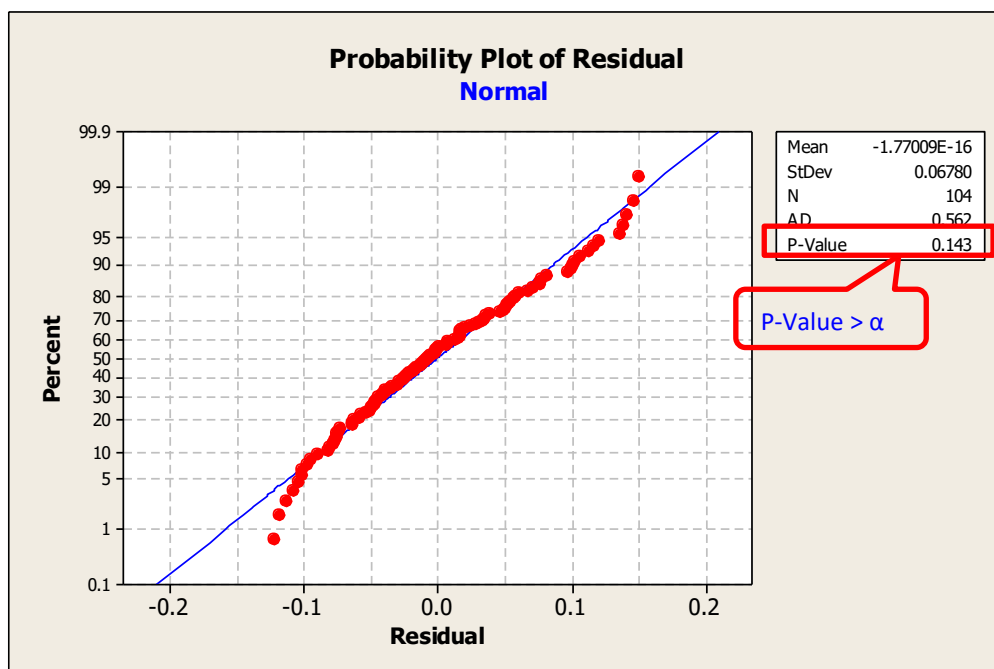
หลังการตัดปัจจัยจากการวิเคราะห์ RSM ซึ่งสามารถแสดงผลจากการตรวจสอบดังภาพที่ 4-17 ได้แก่ ความเป็นปกติของข้อมูล (Normality data) ความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence data) และความแปรปรวนคงที่ของข้อมูล (Constant variance data)



ภาพที่ 4-17 กราฟการวิเคราะห์ค่า Residual ของการทดลองของข้อมูลโดยใช้ Minitab หลังการตัดปัจจัยจากการวิเคราะห์ RSM

การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality data)

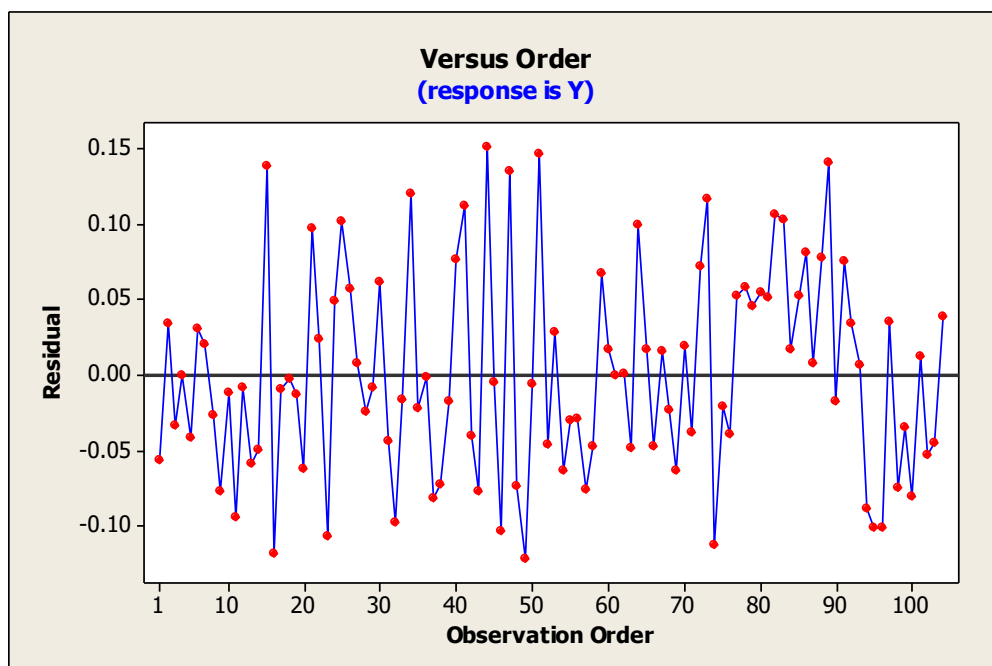
จากการตรวจสอบสมมติฐานของความเป็นปกติของข้อมูล พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวบริเวณรอบเส้นตรง ทำให้แน่ใจได้ว่าข้อมูลมีความเป็นปกติแต่เพื่อเป็นการยืนยันข้อมูลให้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงมีการนำข้อมูลไปวิเคราะห์การกระจายตัวแบบปกติอีกครั้ง จากการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal probability) ดังแสดงในภาพที่ 4-18 เมื่อพิจารณา P-value เปรียบเทียบกับค่า Alpha ที่ 0.05 ผลการวิเคราะห์จากกราฟการกระจายตัวแบบปกติได้ค่า P-value เท่ากับ 0.143 พบว่าไม่มีหลักฐานเพียงพอที่มาสันนิษฐานสมมติฐานได้ว่าข้อมูลไม่มีการกระจายตัวแบบปกติ



ภาพที่ 4-18 แผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติโดยใช้ Minitab
หลังการตัดปัจจัยจากการวิเคราะห์ RSM

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence data)

จากการพิจารณาความเสถียรภาพของความแปรปรวน การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลเทียบกับลำดับการทดลอง เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่าค่าส่วนตกค้างนั้นมีลักษณะการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในกราฟ Versus order ของภาพที่ 4-19 เนื่องจากการกระจายตัวนั้นไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบที่แน่นอน จึงสรุปว่าค่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 4-19 แผนการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลองโดยใช้ Minitab
หลังการตัดปัจจัยจากการวิเคราะห์ RSM

เพื่อยืนยันข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระของข้อมูล ไม่มีลักษณะเป็นจุดต่อเนื่อง (Run) แนวโน้ม (Trend) และวัฏจักร (Cycle) จึงมีการทดสอบข้อมูล (Runs test) เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

Runs test: Residual

Runs test for residual

Runs above and below $K = -1.77009E-16$

The observed number of runs = 46

The expected number of runs = 52.3077

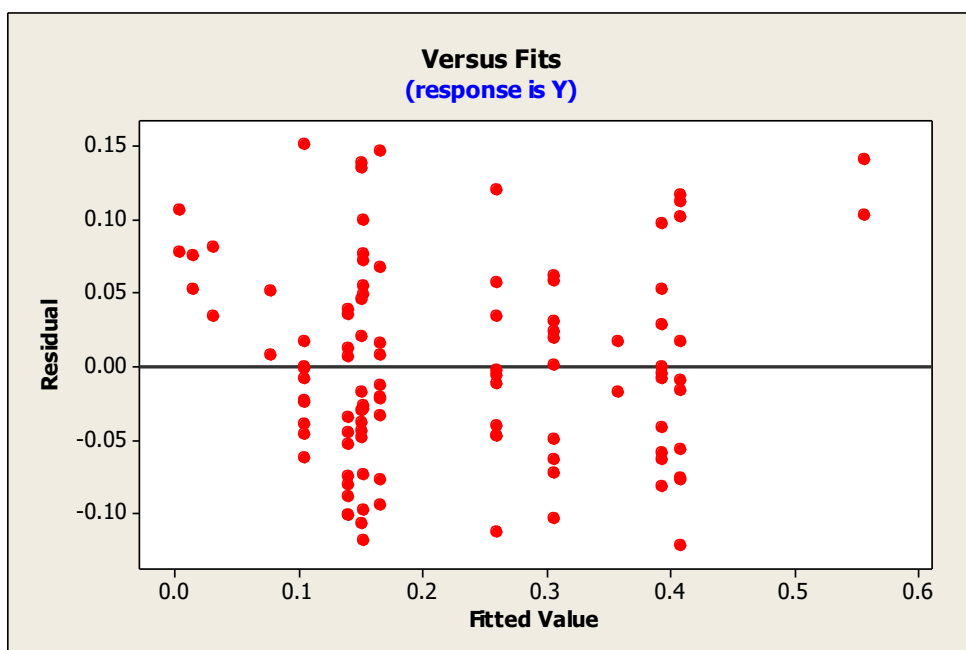
46 observations above K , 58 below

P-value = 0.208

จากผลการทดสอบข้อมูล (Runs test) โดย Program minitab เมื่อพิจารณา P-value เปรียบเทียบกับค่า Alpha ที่ 0.05 ได้ค่า P-value เท่ากับ 0.208 พบว่าไม่มีหลักฐานเพียงพอที่มาสันนิษฐานสมมติฐานได้ว่าไม่มีความเป็นอิสระของข้อมูล

การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ของข้อมูล (Constant variance data)

จากการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลกับค่าตัวแปรตอบสนอง ที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย เพื่อตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน พบว่าค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพอยู่ในระดับที่น่าพอใจดังแสดงในกราฟ Versus fits ของภาพที่ 4-20 เนื่องจากมีลักษณะการกระจายตัวเท่า ๆ กัน จึงสรุปว่าค่าส่วนตกค้างนั้นมีความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



ภาพที่ 4-20 แผนการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted value โดยใช้ Minitab หลังการตัดปัจจัยจากการวิเคราะห์ RSM

ส่วนความเป็นอิสระของข้อมูลพบว่าไม่ปรากฏหลักฐานว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือแนวโน้มใด ๆ และความแปรปรวนคงที่ของข้อมูลพบว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอและเป็นอิสระต่อกัน แต่เพื่อการยืนยันข้อมูลจึงมีการนำข้อมูลไปวิเคราะห์การเท่ากันของความแปรปรวน (Test for equal variances) เพื่อให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น จากการทดสอบสมมติฐานการเท่ากันของความแปรปรวน ดังผลการวิเคราะห์จาก Minitab สมมติฐานในการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของข้อมูล คือ

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \dots = \sigma_{15}^2$ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 15 รูปแบบมีค่าเท่ากัน

$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2 \neq \dots \neq \sigma_{15}^2$ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 15 รูปแบบมีค่าไม่เท่ากันอย่างน้อย 1 คู่ เมื่อ $i \neq j$ ($i, j = 1, 2, \dots, k$)

Test for Equal Variances: Residual versus P, I, D

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

รูปแบบการทดลอง	P	I	D	N	Lower	StDev	Upper
1	1	3	0	10	0.0501892	0.0861846	0.2260
2	1	3	1	10	0.0327069	0.0561640	0.1473
3	1	176.5	0.5	2	0.0096711	0.0304056	14.5561
4	1	350	0	10	0.0405031	0.0695517	0.1824
5	1	350	1	10	0.0469067	0.0805479	0.2112
6	3	3	0.5	2	0.0085465	0.0268701	12.8635
7	3	176.5	0	2	0.0053978	0.0169706	8.1243
8	3	176.5	0.5	12	0.0316541	0.0521531	0.1210
9	3	176.5	1	2	0.0105707	0.0332340	15.9101
10	3	350	0.5	2	0.0078718	0.0247487	11.8480
11	5	3	0	10	0.0377184	0.0647699	0.1699
12	5	3	1	10	0.0339908	0.0583688	0.1531
13	5	176.5	0.5	2	0.0062974	0.0197990	9.4784
14	5	350	0	10	0.0345835	0.0593866	0.1557
15	5	350	1	10	0.0462861	0.0794822	0.2084

Bartlett's Test (Normal Distribution)

Test statistic = 10.10, p-value = 0.755

ภาพที่ 4-21 ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ Bartlett's test

จาก Bartlett's test ค่า P-value = 0.755 ซึ่งจะมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับค่า Alpha = 0.05 แสดงว่าความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 15 รูปแบบการทดลองมีค่าเท่ากัน เราจึงสรุปได้ว่าค่าความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าเท่ากันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จึงยอมรับ H_0 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบเพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นปรากฏว่าข้อมูลเป็นไปตามหลักการของการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบทุกประการ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองชุดนี้มีความถูกต้อง

จากผลการทดลองการหาค่า PID โดยใช้วิธีการ CCD สามารถเขียนสมการในรูปของ Uncoded unit ได้ ดังนี้

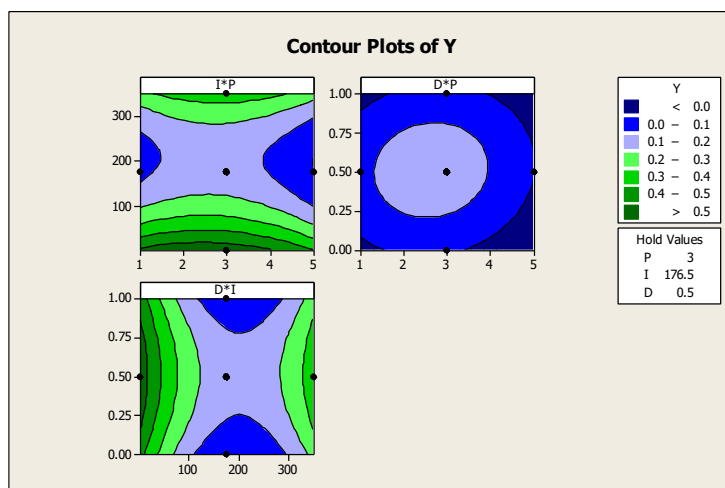
$$Y = 0.335237 + 0.110188 X_1 - 0.004487 X_2 + 0.435226 X_3 - 0.024559 X_1^2 + 0.000011 X_2^2 - 0.464951 X_3^2 + 0.000063 X_1 X_2 + 0.015220 X_1 X_3$$

เมื่อ X_1 คือ P: ผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน

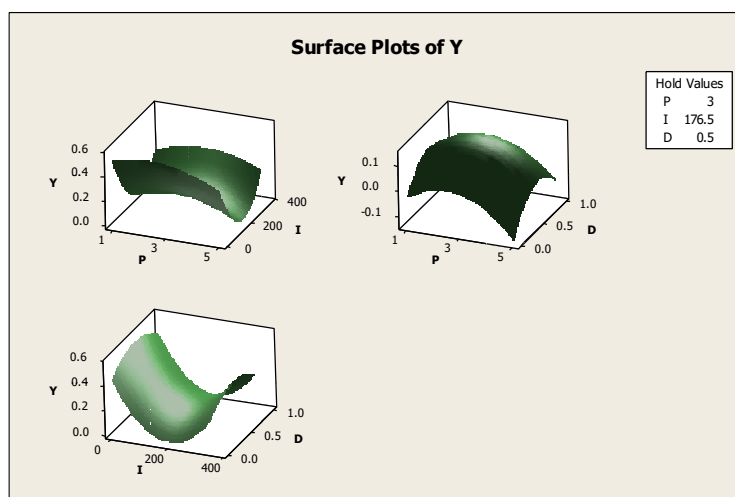
X_2 คือ I: ผลรวมของความผิดพลาดที่ผ่านมา (Sec.)

X_3 คือ D: อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด (Sec.)

จากการศึกษาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ โดยใช้ฟังก์ชัน Respond optimization ในโปรแกรม Minitab ได้ผลตามภาพที่ 4-22 และภาพที่ 4-23

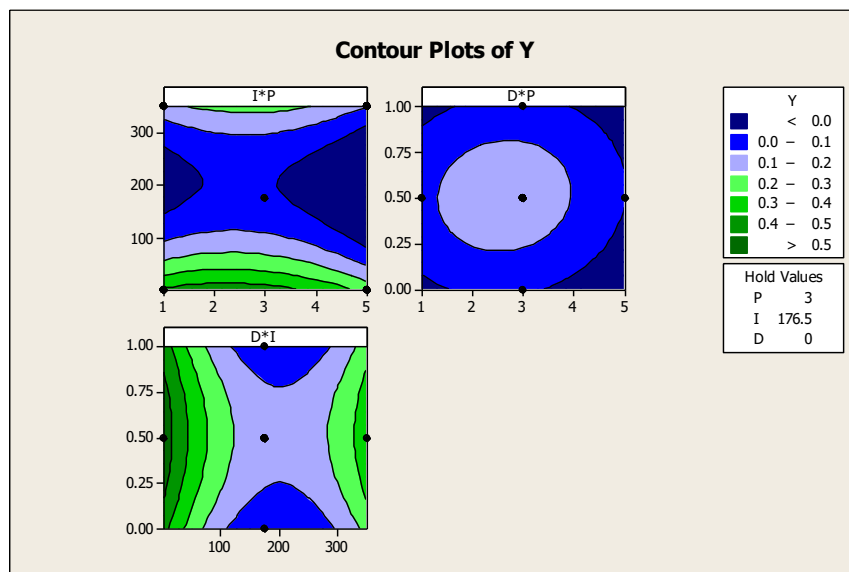


ภาพที่ 4-22 Contour plot Y

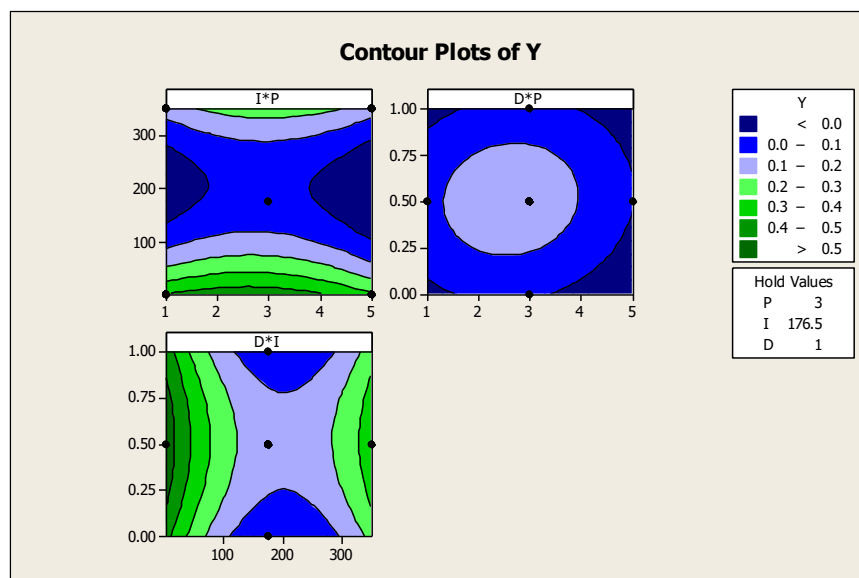


ภาพที่ 4-23 Surface plot Y

เปรียบเทียบ Contour plot Y เมื่อกำหนดค่า D เท่ากับ Minimum และ Maximum

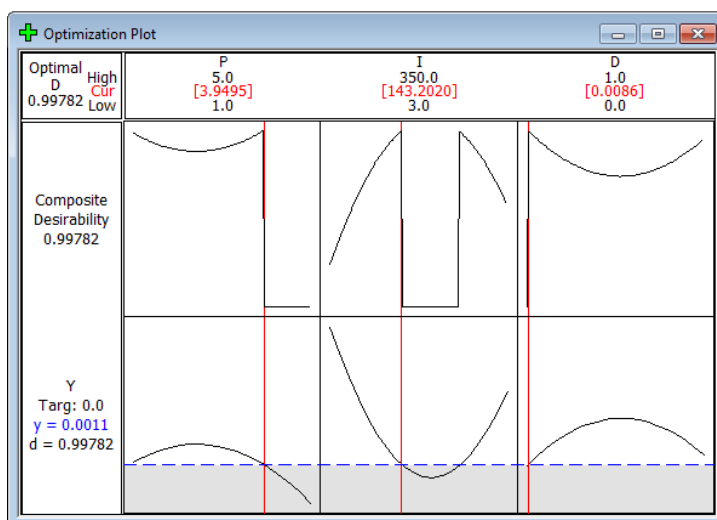


ภาพที่ 4-24 Contour plot Y เมื่อ D เท่ากับ Minimum



ภาพที่ 4-25 Contour plot Y เมื่อ D เท่ากับ Maximum

ผลการวิเคราะห์โดยวิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response surface methodology; RSM.) และทำการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสมจากผลการทดลองตามแผนการทดลองแบบ Central composite designs; CCD. เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยวิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response surface Methodology; RSM.) แล้วทำการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response optimization) ของปัจจัยที่ทำให้ค่า Y มีค่าต่ำที่สุดที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ Alpha เท่ากับ 0.05 ผลที่ได้ดังภาพที่ 4-26



ภาพที่ 4-26 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบที่เหมาะสม

การแสดงรูปพื้นผิวตอบสนองทำให้เห็นภาพความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองกับค่าระดับปัจจัยแสดงดังภาพที่ 4-25 และเมื่อนำมาทำเป็นภาพ 2 มิติ หรือที่เรียกว่า Contour plot แสดงดังภาพที่ 4-21

Response Optimization

Parameters

Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Y Target	-0.0000000	0	0.5	1	1

Starting Point

Global Solution

P = 1	P = 3.94949
I = 3	I = 143.202
D = 0	D = 0.0086023

Predicted Responses

Y = 0.0010916 , desirability = 0.997817

Composite Desirability = 0.997817

ภาพที่ 4-27 ผลการวิเคราะห์หาค่า PID ที่เหมาะสมในการควบคุมระดับน้ำในถัง โดยใช้ Minitab

ค่า PID ที่เหมาะสมในการควบคุมระดับน้ำในถัง คือ

P ที่เหมาะสม คือ 3.94949

I ที่เหมาะสม คือ 143.202 sec.

D ที่เหมาะสม คือ 0.0086023 sec.

การทดสอบเพื่อยืนยันผล

1. ข้อมูลที่ได้จาก PID ของการทดลองเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จาก PID ที่ตั้งไว้ครั้งแรกและ PID ที่ปรับโดยพนักงานที่รับผิดชอบการตั้งค่า PID ของทั้ง 3 มีค่าที่แตกต่างกันตามตารางที่ 4-7 โดยที่

PID-default คือ ค่าที่ตั้งไว้ครั้งแรก

PID-tuning คือ ค่าที่ปรับ โดยพนักงานที่รับผิดชอบ

PID-dOE คือ ค่าจากการทดลอง

ตารางที่ 4-7 ข้อมูลของการตั้งค่า PID ของระบบควบคุม

ข้อมูลการตั้งค่าของ ระบบควบคุม	P	I	D
PID-default	0.80000	12.000	0.0000
PID-tuning	3.00000	150.000	0.0000
PID-dOE	3.94949	143.202	0.0086

เพื่อยืนยันผลผู้วิจัยได้ใช้การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของประชากรปกติที่มีความแปรปรวนเท่ากันในการทดลองเพื่อยืนยันผล โดยใช้จำนวนตัวอย่างก่อนและหลังการปรับปรุงจำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงได้ดังตารางที่ 4-8 ที่ได้จากการคำนวณในภาคผนวก

ภาพภาคผนวก ง-1 ผลการคำนวณพื้นที่ใต้ส่วนโค้งจาก PID ที่ตั้งไว้ครั้งแรก

ภาพภาคผนวก ง-2 ผลการคำนวณพื้นที่ใต้ส่วนโค้งจาก PID ที่ได้จากการปรับโดยพนักงานที่รับผิดชอบ

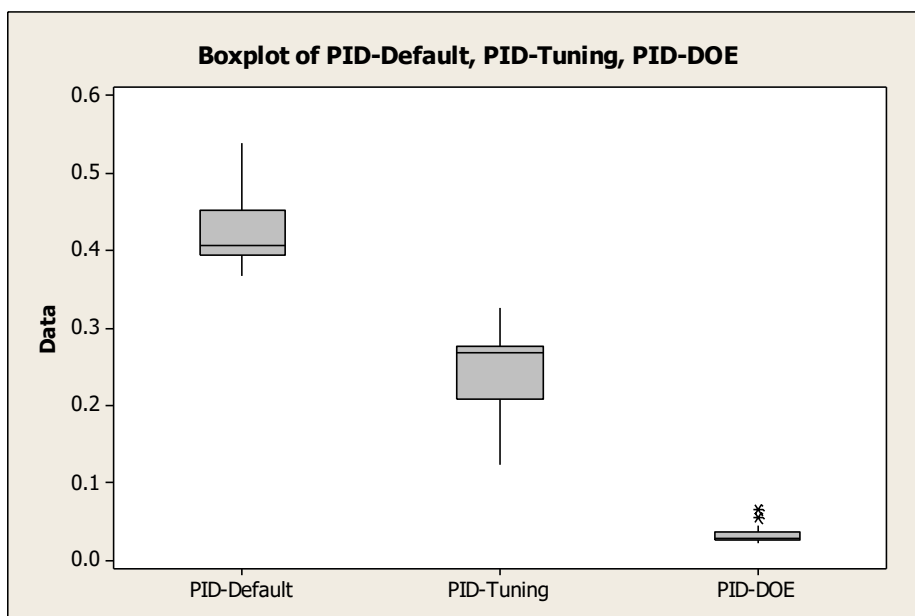
ภาพภาคผนวก ง-3 ผลการคำนวณพื้นที่ใต้ส่วนโค้งจาก PID ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4-8 ข้อมูลของประสิทธิภาพการทดสอบที่ได้จากสภาวะปัจจุบันเปรียบเทียบกับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง

ข้อมูลพื้นที่ได้ส่วน โคล้ง (ตารางหน่วยต่อนาที)			
จำนวน	PID-Default	PID-Tuning	PID-DOE
1	0.408	0.241	0.027
2	0.369	0.270	0.030
3	0.382	0.307	0.026
4	0.397	0.125	0.032
5	0.443	0.269	0.022
6	0.447	0.309	0.045
7	0.536	0.169	0.025
8	0.453	0.278	0.029
9	0.395	0.276	0.032
10	0.539	0.275	0.028
11	0.396	0.208	0.027
12	0.427	0.239	0.038
13	0.399	0.130	0.036
14	0.393	0.234	0.066
15	0.453	0.327	0.056
ค่าเฉลี่ย	0.429	0.244	0.0346

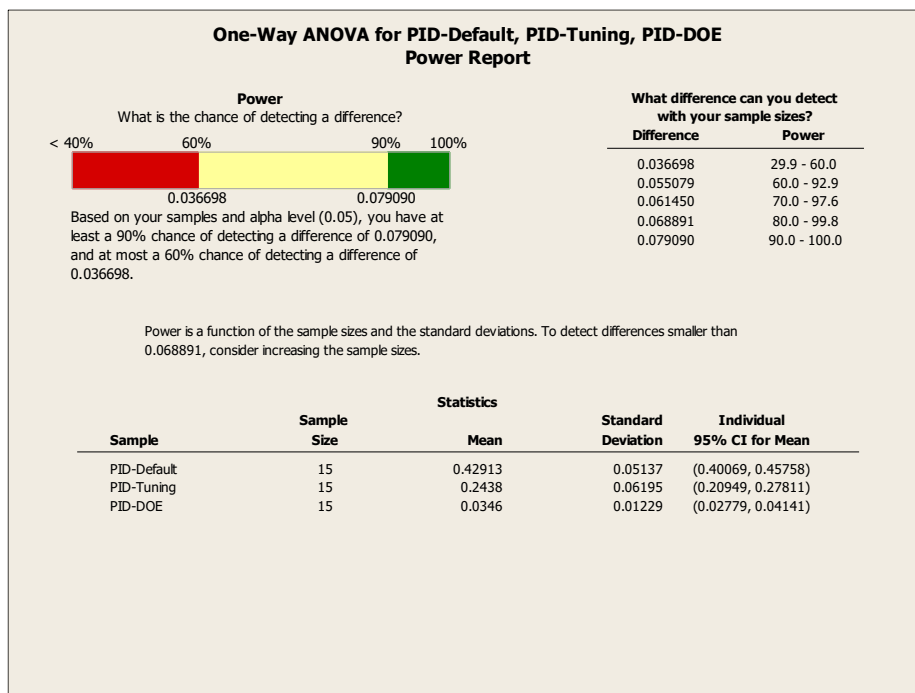
2. การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลองเพื่อยืนยันผล

จากการทดสอบเปรียบเทียบทั้ง 3 ประชากร คือ ประชากร ที่ได้จากค่า PID ที่ตั้งไว้ครั้งแรก ประชากรที่ได้จากค่า PID ค่าที่ปรับโดยพนักงานที่รับผิดชอบ และประชากรที่ได้จากค่า PID จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของประชากรที่ได้จากค่า PID จากการทดลองมีค่าที่ต่ำและอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับ ดังภาพที่ 4-28

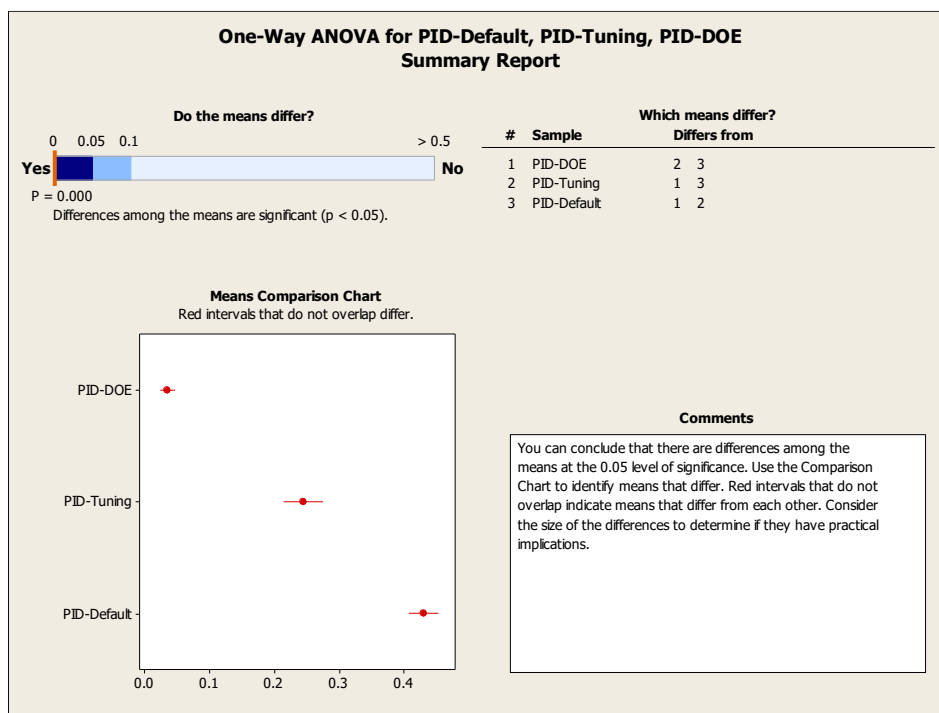


ภาพที่ 4-28 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ประชากร

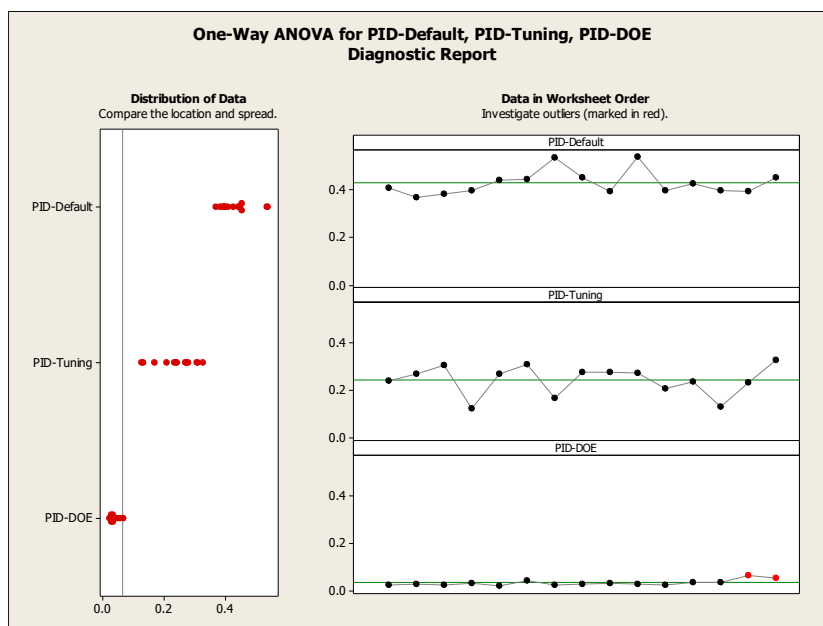
การทดสอบระหว่างประชากรที่ได้จากค่า PID ที่ตั้งไว้ครั้งแรก ประชากรที่ได้จากค่า PID จากการปรับจูนโดยพนักงานที่รับผิดชอบ และประชากรที่ได้จากค่า PID จากการทดลองความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของประชากรปกติและความแปรปรวนเท่ากันผลการทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรมสถิติ ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าวิกฤติคือ 0.05 พบว่าค่า P-value มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติ จึงสรุปได้ว่าสถานะปัจจุบันมีค่าประสิทธิภาพของควบคุมระดับน้ำในถังน้อยกว่าสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองดังภาพที่ 4-29 ภาพที่ 4-30 และภาพที่ 4-31



ภาพที่ 4-29 One-way ANOVA for PID-default, PID-tuning, PID-DOE power report



ภาพที่ 4-30 One-way ANOVA for PID-default, PID-tuning, PID-DOE summary report



ภาพที่ 4-31 One-way ANOVA for PID-default, PID-tuning, PID-DOE diagnostic report

คุณภาพของระบบควบคุมระดับน้ำในถัง จากการวิเคราะห์ของระบบฐานข้อมูลของ Matrikon ในตารางที่ 4-10 ในเดือนพฤศจิกายน 2559 หลังการตั้งค่า PID ที่เหมาะสมจากการทดลอง จะพบว่ามีคุณภาพของการควบคุมที่ดีเยี่ยม (Diagnose_QC = Excellent) เมื่อเทียบกับการควบคุม ก่อนการตั้งค่า PID ที่เหมาะสมจากการทดลองในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ข้อมูลระบบควบคุมระดับน้ำในถังของ 238L19301 เดือนมกราคม-พฤษภาคม 2558 ก่อนการตั้งค่า PID ที่เหมาะสมจากการทดลอง

Date	Service factor	Diag_RPI	Diag_Osc	Diag_Std Dev	Diagnose_QC
2015-01	86.60	TRUE	FALSE	FALSE	Fair
2015-02	87.53	TRUE	FALSE	FALSE	Fair
2015-03	92.17	TRUE	FALSE	FALSE	Fair
2015-04	90.43	TRUE	FALSE	FALSE	Fair
2015-05	99.96	TRUE	FALSE	FALSE	Fair

ตารางที่ 4-10 ข้อมูลระบบควบคุมระดับน้ำในถังของ 238L19301 เดือนพฤศจิกายน 2559
หลังการตั้งค่า PID ที่เหมาะสมจากการทดลอง

Date	Service factor	Diag_RPI	Diag_Osc	Diag_Std Dev	Diagnose_QC
2016-11	99.97	TRUE	TRUE	TRUE	Excellent

สรุปผลการทดลอง

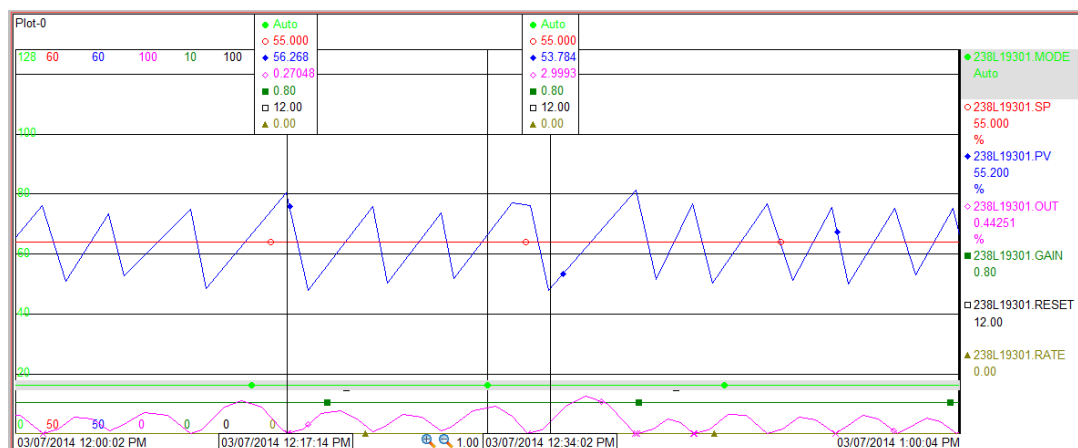
จากการดำเนินการทดลองพร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อมูล โดยอาศัย โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติและเปรียบเทียบค่า PID ที่เหมาะสมในการควบคุมระดับน้ำในถังปัจจุบันและค่าที่เหมาะสมใหม่ได้ข้อมูล ดังนี้

P ที่เหมาะสม คือ 3.94949

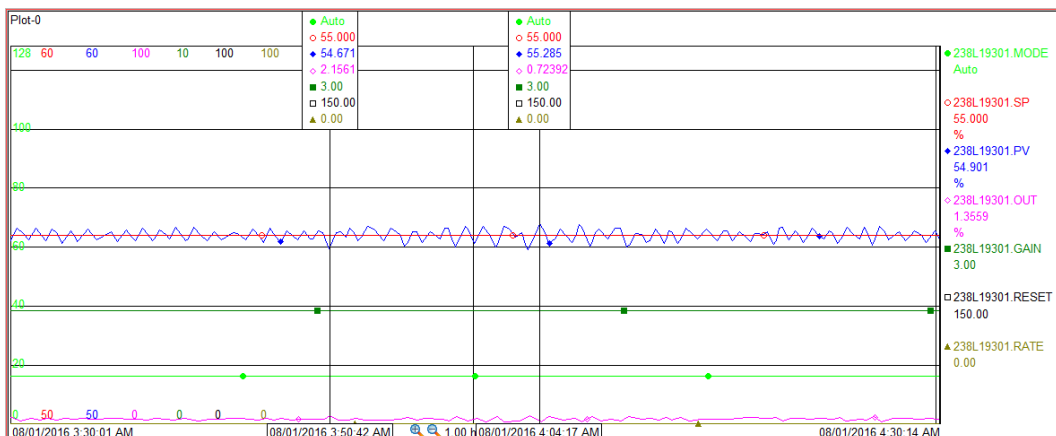
I ที่เหมาะสม คือ 143.202 sec.

D ที่เหมาะสม คือ 0.0086023 sec.

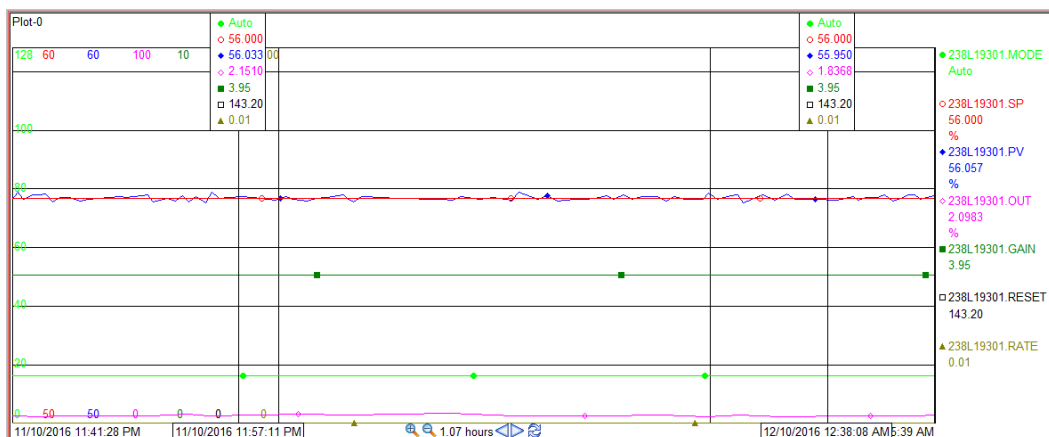
เมื่อเปรียบเทียบผลของการตั้งค่า PID ทั้ง 3 อย่าง คือ PID-default คือ ค่าที่ตั้งไว้ครั้งแรก PID-tuning คือ ค่าที่ปรับโดยพนักงานที่รับผิดชอบและ PID-DOE คือ ค่าที่จากการทดลองจากระบบ PI Process book ดังภาพที่ 4-32 ภาพที่ 4-33 และภาพที่ 4-34 จะเห็นได้ว่ากราฟที่ได้จากการตั้งค่า PID ที่ได้จากการทดลองจะดีที่สุด คือ ระดับน้ำจะเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด



ภาพที่ 4-32 กราฟการควบคุมระดับน้ำในถังจากค่า PID-default



ภาพที่ 4-33 กราฟการควบคุมระดับน้ำในถังจากค่า PID-tuning



ภาพที่ 4-34 กราฟการควบคุมระดับน้ำในถังจากค่า PID-DOE

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผลงานวิจัย

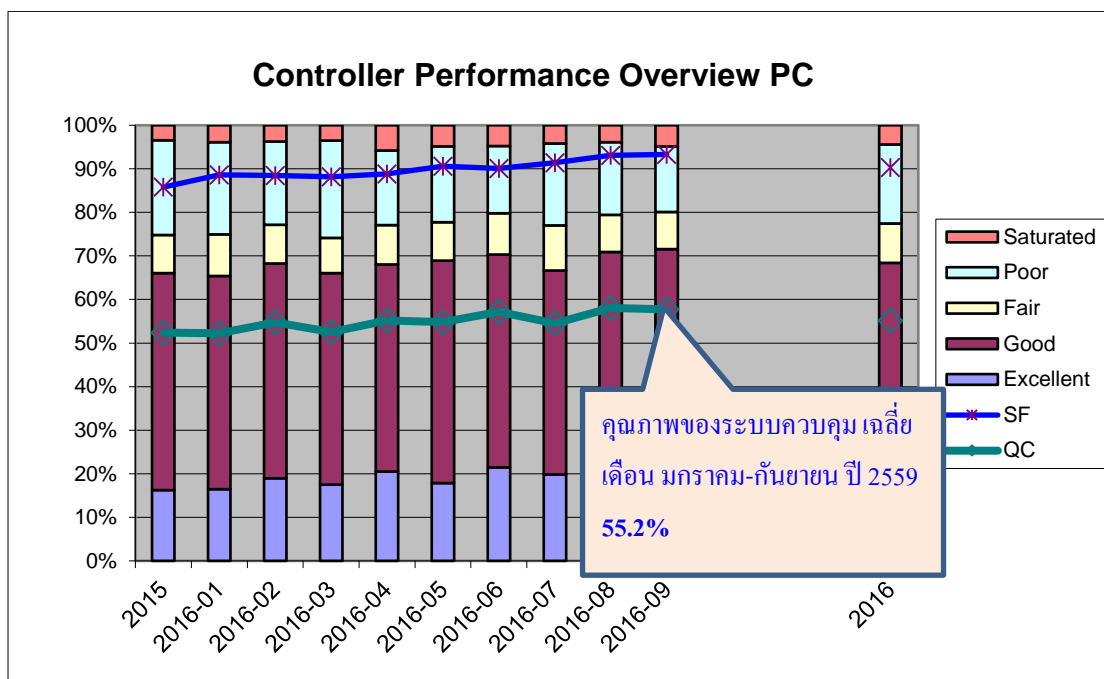
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ วิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการควบคุมระดับน้ำในถัง พร้อมทั้งหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้สามารถควบคุมระดับน้ำในถังไม่ให้เกิดเคลื่อน จากค่าเป้าหมายมากเกินไปที่ยอมรับ ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต และลดปริมาณการทำงานของวาล์วควบคุม (Control valve) ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานของวาล์วควบคุมนานขึ้น โดยการประยุกต์ใช้หลักการของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and analysis of experiment) ในการศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถัง ซึ่งผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่าการปรับเปลี่ยนระดับปัจจัย จะมีผลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังแตกต่างกัน ซึ่งหากมีการศึกษาและควบคุมระดับปัจจัยให้ได้ในระดับที่เหมาะสม จะทำให้กระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังอยู่ในค่าที่เหมาะสม คือ 0-0.25 ตารางหน่วยต่อนาที หรือ $\pm 0.125\%$ ของค่าเป้าหมาย

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบการทดลองแล้วทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเชิงสถิติ ซึ่งการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเชิงสถิติสามารถแสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังได้อย่างแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือ

การทดลองนี้สามารถลดพื้นที่ได้ส่วนโค้งหรือลดการกระเพื่อมของระดับน้ำในถังที่ควบคุมนั่นเอง โดยก่อนทำการปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยพื้นที่ได้ส่วนโค้ง 0.429 ตารางหน่วยต่อนาที หลังจากปรับปรุงกระบวนการมีค่าเฉลี่ยพื้นที่ได้ส่วนโค้ง 0.0346 ตารางหน่วยต่อนาที จากกลุ่มของประชากร 15 กลุ่ม กลุ่มละ 10 ตัวอย่าง โดยพื้นที่ได้ส่วนโค้งตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ คือ 0-0.25 ตารางหน่วยต่อนาที หลังจากปรับปรุงกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังแล้ว

1. ลดการทำงานของวาล์วควบคุมทำให้อายุการใช้งานให้ยาวนานและลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง
2. ระดับน้ำอยู่ภายใต้การควบคุมสามารถลดค่าความผิดพลาดไปจากค่าเป้าหมายจาก 0.429% เป็น 0.0346% ทำให้คุณภาพของกระบวนการควบคุมดีขึ้นและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตดีขึ้นด้วย
3. เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ ดัชนีชี้วัดผลงานหรือความสำเร็จของงาน (Key performance indicator) เพิ่มขึ้นจาก 54.1% ของข้อมูลเฉลี่ยก่อนทำการวิจัย เดือนมกราคมถึงเดือนพฤษภาคม

ในปี 2558 เป็น 55.2% ของข้อมูลเฉลี่ยในเดือนมกราคมถึงเดือนกันยายน ปี 2559 ดังภาพที่ 5-1



ภาพที่ 5-1 กราฟแสดงประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้งหมดเดือนมกราคม-กันยายน 2559

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังโดยการประยุกต์เครื่องมือทางสถิติ การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบและใช้การออกแบบการทดลอง 2 แบบ คือ

เครื่องมือทางสถิติ การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบและใช้การออกแบบการทดลอง

1. แบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k (First order model) ผลรายงานได้ ดังนี้ การวิเคราะห์สาเหตุเบื้องต้นของปัญหา เพื่อศึกษาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของปัจจัยต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นอัตราขยายสัดส่วน (P) อัตราขยายปริพันธ์ (I) และอัตราขยายอนุพันธ์ (D) โดยการจัดการทดลองแบบสุ่มโดยกำหนดแต่ละปัจจัยเป็น 2 ระดับ จึงเลือกการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k สามารถออกแบบการทดลองได้เป็นการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 แฟคทอเรียล กำหนดให้มีการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง จุดกึ่งกลาง จำนวน 10 การทดลอง รวมทั้งสิ้น 90 การทดลอง

2. แบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) การทดลองก่อนหน้าทำให้ทราบว่าความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ เป็นแบบ Second order model จึงเลือกการทดลองแบบ Central composite design (CCD) โดยการทดลองแบบ CCD จะประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่

2.1 ส่วนแรกเป็นชุดการทดลองแบบ Factorial design โดยใช้การทดลองแบบ 2^2 Factorial design มี 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราขยายสัดส่วน อัตราขยายปริพันธ์ และอัตราขยายอนุพันธ์

2.2 ส่วนที่สอง คือ ส่วนของจุดกึ่งกลาง

2.3 ส่วนที่สาม คือ ส่วนการทดลองที่ออกแบบให้เกิดคุณสมบัติการหมุน โดยกำหนดค่า Alpha เท่ากับ Face centered หรือ $\text{Alpha} = \pm 1$ (Code) เนื่องจากระดับปัจจัยค่าต่ำไม่สามารถใส่ค่าน้อยกว่า 0 ได้

Second order model:

$$Y = 0.335237 + 0.110188 X_1 - 0.004487 X_2 + 0.435226 X_3 - 0.024559 X_1^2 + 0.000011 X_2^2 - 0.464951 X_3^2 + 0.000063 X_1 X_2 + 0.015220 X_1 X_3$$

ค่า Optimal ที่ได้จากการ Second order model

P ที่เหมาะสม คือ 3.94949

I ที่เหมาะสม คือ 143.202 sec.

D ที่เหมาะสม คือ 0.0086023 sec.

ข้อดีและข้อเสียในการดำเนินงานแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง

ข้อดี

1. การออกแบบการทดลองเป็นการหาข้อสรุปของปัญหาอย่างสมเหตุสมผล
2. การออกแบบการทดลองให้ผลของความแม่นยำ และความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ
3. การออกแบบการทดลอง สามารถที่จะประมาณอิทธิพลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของหลายปัจจัยพร้อมกันได้
4. การออกแบบการทดลอง สามารถที่จะนำผลที่ได้ไปใช้กับกระบวนการควบคุมระดับน้ำถึงอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างคล้ายกันได้

ข้อเสีย

1. เนื่องจากการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง จำเป็นต้องใช้หลักการทางสถิติ ดังนั้น ในการนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้จึงเหมาะสำหรับองค์กรที่บุคลากรมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทางสถิติเบื้องต้น เพื่อที่จะสามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด
2. เนื่องจากการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง ใช้เวลาในการทดลองมากกว่า การแก้ไขปัญหแบบเดิม
3. เนื่องจากการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง จำเป็นต้องใส่ค่า PID ตามที่ได้ออกแบบไว้จึงมีผลกระทบต่อกระบวนการควบคุม

ปัญหาและอุปสรรคในงานวิจัย

1. ในการทดลองมีผลกระทบจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ในกระบวนการผลิตจึงทำให้ต้องทดลองซ้ำ
2. เนื่องจากพนักงานปฏิบัติงานมีการะงานที่ค่อนข้างมากอยู่แล้ว เมื่อต้องทำการทดลองจึงต้องใช้ระยะเวลาในการทดลองค่อนข้างมาก

ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้

ระบบควบคุมที่ได้รับอนุญาตให้ทำการวิจัยเป็นระบบที่มีผลกับกระบวนการผลิตน้อย แต่มีผลกระทบจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ในขณะที่ทำการทดลองจึงทำให้ต้องเสียเวลาในการทดลองซ้ำ

การกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลอง จะกำหนดเพียง 2 ระดับ ในการเริ่มต้นวิจัย เนื่องจากหากมีการกำหนดระดับปัจจัยหลาย ๆ ระดับในการทดลองจะเกิดความยุ่งยากเพราะในการเปลี่ยนระดับปัจจัยในการทดลองแต่ละครั้งต้องเสียเวลาและอาจมีผลกระทบต่อกระบวนการอื่น ๆ ของโรงงานกรณีศึกษา

บรรณานุกรม

- ชยันต์ เลาสุทแสน. (2548). การออกแบบแผนการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการฉีดพลาสติก กรณีศึกษา โรงงานฉีดพลาสติก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ณัฐภา ดวงพัตรา. (2552). การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโพลีโพรพิลีนผสมท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น โดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธนวรรธก์ จันทรสวรรณ. (2539). การลดปริมาณของเสียในการผลิตโฟม. ปรียญานิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต, ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- นิคม นครเรียบ. (2542). การศึกษาสมบัติการยึดเกาะระหว่างโฟมโพลีเอทิลีนกับวัสดุหลักสำหรับระบบฉนวนความร้อน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปารเมศ ชูติมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: ท้อป.
- ประเสริฐ ชุมปัญญา. (2552). การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อน. สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- วีรเทพ เฉลิมสมิทธิชัย. (2550). การศึกษาปริมาณธาตุที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กคืบ โดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สถาพร พิมสาร. (2547). การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการพ่นเคลือบผงโพลีเอสเตอร์บนแนวเชื่อมกระป๋อง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการคำนวณพื้นที่ได้ส่วนโค้งของกระบวนการควบคุมระดับจาก PID

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
1	06 Jan 15 6:25:00 AM	55	54.812	0.188	0.086	0.346	0.8	12	0
1	06 Jan 15 6:25:30 AM	55	55.154	0.154	0.325		0.8	12	0
1	06 Jan 15 6:26:00 AM	55	55.496	0.496	0.498		0.8	12	0
1	06 Jan 15 6:26:30 AM	55	55.500	0.500	0.281		0.8	12	0
1	06 Jan 15 6:27:00 AM	55	55.062	0.062	0.165		0.8	12	0
1	06 Jan 15 6:27:30 AM	55	54.625	0.375	0.594		0.8	12	0
1	06 Jan 15 6:28:00 AM	55	54.187	0.813	0.638		0.8	12	0
1	06 Jan 15 6:28:30 AM	55	54.536	0.464	0.277		0.8	12	0
1	06 Jan 15 6:29:00 AM	55	54.911	0.089	0.120		0.8	12	0
1	06 Jan 15 6:29:30 AM	55	55.286	0.286	0.474		0.8	12	0
2	06 Jan 15 6:30:00 AM	55	55.662	0.662	0.599	0.328	0.8	12	0
2	06 Jan 15 6:30:30 AM	55	55.537	0.537	0.349		0.8	12	0
2	06 Jan 15 6:31:00 AM	55	55.162	0.162	0.096		0.8	12	0
2	06 Jan 15 6:31:30 AM	55	54.787	0.213	0.401		0.8	12	0
2	06 Jan 15 6:32:00 AM	55	54.412	0.588	0.446		0.8	12	0
2	06 Jan 15 6:32:30 AM	55	54.696	0.304	0.126		0.8	12	0
2	06 Jan 15 6:33:00 AM	55	55.112	0.112	0.319		0.8	12	0
2	06 Jan 15 6:33:30 AM	55	55.527	0.527	0.453		0.8	12	0
2	06 Jan 15 6:34:00 AM	55	55.379	0.379	0.161		0.8	12	0
2	06 Jan 15 6:34:30 AM	55	54.904	0.096	0.333		0.8	12	0
3	06 Jan 15 6:35:00 AM	55	54.430	0.570	0.584	0.449	0.8	12	0
3	06 Jan 15 6:35:30 AM	55	54.401	0.599	0.322		0.8	12	0
3	06 Jan 15 6:36:00 AM	55	54.955	0.045	0.236		0.8	12	0
3	06 Jan 15 6:36:30 AM	55	55.520	0.520	0.787		0.8	12	0
3	06 Jan 15 6:37:00 AM	55	56.064	1.064	0.832		0.8	12	0
3	06 Jan 15 6:37:30 AM	55	55.599	0.599	0.349		0.8	12	0
3	06 Jan 15 6:38:00 AM	55	55.099	0.099	0.171		0.8	12	0
3	06 Jan 15 6:38:30 AM	55	54.599	0.401	0.581		0.8	12	0
3	06 Jan 15 6:39:00 AM	55	54.238	0.762	0.491		0.8	12	0
3	06 Jan 15 6:39:30 AM	55	54.780	0.220	0.140		0.8	12	0

ภาพภาคผนวก ก-1 ข้อมูลพื้นที่ใต้ส่วนโค้งของกระบวนการควบคุมระดับจาก PID ค่าตั้งต้น

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
4	06 Jan 15 6:40:00 AM	55	55.322	0.322	0.564	0.372	0.8	12	0
4	06 Jan 15 6:40:30 AM	55	55.806	0.806	0.647		0.8	12	0
4	06 Jan 15 6:41:00 AM	55	55.489	0.489	0.330		0.8	12	0
4	06 Jan 15 6:41:30 AM	55	55.171	0.171	0.080		0.8	12	0
4	06 Jan 15 6:42:00 AM	55	54.853	0.147	0.306		0.8	12	0
4	06 Jan 15 6:42:30 AM	55	54.535	0.465	0.484		0.8	12	0
4	06 Jan 15 6:43:00 AM	55	54.498	0.502	0.330		0.8	12	0
4	06 Jan 15 6:43:30 AM	55	54.880	0.120	0.290		0.8	12	0
4	06 Jan 15 6:44:00 AM	55	55.263	0.263	0.454		0.8	12	0
4	06 Jan 15 6:44:30 AM	55	55.645	0.645	0.432		0.8	12	0
5	06 Jan 15 6:45:00 AM	55	55.219	0.219	0.340	0.373	0.8	12	0
5	06 Jan 15 6:45:30 AM	55	54.764	0.236	0.463		0.8	12	0
5	06 Jan 15 6:46:00 AM	55	54.320	0.690	0.515		0.8	12	0
5	06 Jan 15 6:46:30 AM	55	54.660	0.340	0.155		0.8	12	0
5	06 Jan 15 6:47:00 AM	55	55.037	0.037	0.226		0.8	12	0
5	06 Jan 15 6:47:30 AM	55	55.415	0.415	0.589		0.8	12	0
5	06 Jan 15 6:48:00 AM	55	55.763	0.763	0.515		0.8	12	0
5	06 Jan 15 6:48:30 AM	55	55.267	0.267	0.125		0.8	12	0
5	06 Jan 15 6:49:00 AM	55	54.771	0.229	0.477		0.8	12	0
5	06 Jan 15 6:49:30 AM	55	54.275	0.725	0.553		0.8	12	0
6	06 Jan 15 6:50:00 AM	55	54.619	0.381	0.181	0.323	0.8	12	0
6	06 Jan 15 6:50:30 AM	55	55.023	0.023	0.224		0.8	12	0
6	06 Jan 15 6:51:00 AM	55	55.426	0.426	0.427		0.8	12	0
6	06 Jan 15 6:51:30 AM	55	55.427	0.427	0.200		0.8	12	0
6	06 Jan 15 6:52:00 AM	55	54.968	0.032	0.262		0.8	12	0
6	06 Jan 15 6:52:30 AM	55	54.508	0.492	0.558		0.8	12	0
6	06 Jan 15 6:53:00 AM	55	54.375	0.625	0.446		0.8	12	0
6	06 Jan 15 6:53:30 AM	55	54.732	0.268	0.310		0.8	12	0
6	06 Jan 15 6:54:00 AM	55	55.089	0.089	0.268		0.8	12	0
6	06 Jan 15 6:54:30 AM	55	55.447	0.447	0.552		0.8	12	0

ภาพภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
7	06/01/2015 6:55 AM	55	55.228	0.228	0.34	0.433	0.8	12	0
7	06/01/2015 6:55 AM	55	55.452	0.452	0.212		0.8	12	0
7	06/01/2015 6:56 AM	55	54.606	0.394	0.657		0.8	12	0
7	06/01/2015 6:56 AM	55	54.081	0.919	0.713		0.8	12	0
7	06/01/2015 6:57 AM	55	54.494	0.506	0.283		0.8	12	0
7	06/01/2015 6:57 AM	55	54.940	0.060	0.171		0.8	12	0
7	06/01/2015 6:58 AM	55	55.386	0.386	0.609		0.8	12	0
7	06/01/2015 6:58 AM	55	55.832	0.832	0.760		0.8	12	0
7	06/01/2015 6:59 AM	55	55.689	0.689	0.471		0.8	12	0
7	06/01/2015 6:59 AM	55	55.253	0.253	0.112		0.8	12	0
8	06/01/2015 7:00 AM	55	54.817	0.183	0.401	0.38	0.8	12	0
8	06/01/2015 7:00 AM	55	54.381	0.619	0.577		0.8	12	0
8	06/01/2015 7:01 AM	55	54.465	0.534	0.345		0.8	12	0
8	06/01/2015 7:01 AM	55	54.845	0.155	0.104		0.8	12	0
8	06/01/2015 7:02 AM	55	55.243	0.243	0.437		0.8	12	0
8	06/01/2015 7:02 AM	55	55.631	0.631	0.499		0.8	12	0
8	06/01/2015 7:03 AM	55	55.366	0.366	0.152		0.8	12	0
8	06/01/2015 7:03 AM	55	54.864	0.136	0.388		0.8	12	0
8	06/01/2015 7:04 AM	55	54.361	0.639	0.558		0.8	12	0
8	06/01/2015 7:04 AM	55	54.524	0.476	0.343		0.8	12	0
9	06/01/2015 7:05 AM	55	54.789	0.230	0.090	0.114	0.8	12	0
9	06/01/2015 7:05 AM	55	55.053	0.053	0.173		0.8	12	0
9	06/01/2015 7:06 AM	55	55.292	0.292	0.228		0.8	12	0
9	06/01/2015 7:06 AM	55	55.164	0.164	0.100		0.8	12	0
9	06/01/2015 7:07 AM	55	55.036	0.036	0.038		0.8	12	0
9	06/01/2015 7:07 AM	55	54.908	0.092	0.123		0.8	12	0
9	06/01/2015 7:08 AM	55	54.846	0.154	0.094		0.8	12	0
9	06/01/2015 7:08 AM	55	54.967	0.033	0.036		0.8	12	0
9	06/01/2015 7:09 AM	55	55.087	0.087	0.147		0.8	12	0
9	06/01/2015 7:09 AM	55	55.207	0.207	0.110		0.8	12	0

ภาพภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
10	06/01/2015 7:10 AM	55	55.014	0.014	0.122	0.244	0.8	12	0
10	06/01/2015 7:10 AM	55	54.743	0.257	0.375		0.8	12	0
10	06/01/2015 7:11 AM	55	54.507	0.493	0.369		0.8	12	0
10	06/01/2015 7:11 AM	55	54.755	0.245	0.121		0.8	12	0
10	06/01/2015 7:12 AM	55	55.003	0.003	0.128		0.8	12	0
10	06/01/2015 7:12 AM	55	55.252	0.252	0.291		0.8	12	0
10	06/01/2015 7:13 AM	55	55.331	0.331	0.145		0.8	12	0
10	06/01/2015 7:13 AM	55	54.943	0.057	0.250		0.8	12	0
10	06/01/2015 7:14 AM	55	54.556	0.444	0.414		0.8	12	0
10	06/01/2015 7:14 AM	55	54.617	0.383	0.223		0.8	12	0
11	06/01/2015 7:15 AM	55	54.938	0.062	0.110	0.377	0.8	12	0
11	06/01/2015 7:15 AM	55	55.259	0.259	0.419		0.8	12	0
11	06/01/2015 7:16 AM	55	55.580	0.580	0.389		0.8	12	0
11	06/01/2015 7:16 AM	55	55.198	0.198	0.290		0.8	12	0
11	06/01/2015 7:17 AM	55	54.767	0.233	0.449		0.8	12	0
11	06/01/2015 7:17 AM	55	54.336	0.664	0.493		0.8	12	0
11	06/01/2015 7:18 AM	55	54.679	0.321	0.134		0.8	12	0
11	06/01/2015 7:18 AM	55	55.105	0.105	0.453		0.8	12	0
11	06/01/2015 7:19 AM	55	55.801	0.801	0.630		0.8	12	0
11	06/01/2015 7:19 AM	55	55.458	0.458	0.404		0.8	12	0
12	06/01/2015 7:20 AM	55	55.350	0.350	0.151	0.42	0.8	12	0
12	06/01/2015 7:20 AM	55	54.772	0.228	0.400		0.8	12	0
12	06/01/2015 7:21 AM	55	54.429	0.571	0.649		0.8	12	0
12	06/01/2015 7:21 AM	55	54.274	0.726	0.494		0.8	12	0
12	06/01/2015 7:22 AM	55	54.822	0.178	0.095		0.8	12	0
12	06/01/2015 7:22 AM	55	55.201	0.201	0.432		0.8	12	0
12	06/01/2015 7:23 AM	55	55.664	0.664	0.805		0.8	12	0
12	06/01/2015 7:23 AM	55	55.945	0.945	0.720		0.8	12	0
12	06/01/2015 7:24 AM	55	55.495	0.495	0.269		0.8	12	0
12	06/01/2015 7:24 AM	55	55.044	0.044	0.185		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
13	06/01/2015 7:25 AM	55	54.594	0.406	0.573	0.402	0.8	12	0
13	06/01/2015 7:25 AM	55	54.260	0.740	0.528		0.8	12	0
13	06/01/2015 7:26 AM	55	54.684	0.316	0.152		0.8	12	0
13	06/01/2015 7:26 AM	55	55.290	0.290	0.412		0.8	12	0
13	06/01/2015 7:27 AM	55	55.533	0.533	0.581		0.8	12	0
13	06/01/2015 7:27 AM	55	55.628	0.628	0.431		0.8	12	0
13	06/01/2015 7:28 AM	55	55.234	0.234	0.103		0.8	12	0
13	06/01/2015 7:28 AM	55	54.834	0.166	0.309		0.8	12	0
13	06/01/2015 7:29 AM	55	54.547	0.553	0.526		0.8	12	0
13	06/01/2015 7:29 AM	55	54.402	0.598	0.408		0.8	12	0
14	06/01/2015 7:30 AM	55	54.782	0.218	0.097	0.379	0.8	12	0
14	06/01/2015 7:30 AM	55	55.161	0.161	0.351		0.8	12	0
14	06/01/2015 7:31 AM	55	55.541	0.541	0.454		0.8	12	0
14	06/01/2015 7:31 AM	55	55.367	0.367	0.167		0.8	12	0
14	06/01/2015 7:32 AM	55	54.709	0.291	0.587		0.8	12	0
14	06/01/2015 7:32 AM	55	54.117	0.883	0.712		0.8	12	0
14	06/01/2015 7:33 AM	55	54.459	0.541	0.370		0.8	12	0
14	06/01/2015 7:33 AM	55	54.801	0.199	0.088		0.8	12	0
14	06/01/2015 7:34 AM	55	55.142	0.142	0.313		0.8	12	0
14	06/01/2015 7:34 AM	55	55.484	0.484	0.655		0.8	12	0
15	06/01/2015 7:35 AM	55	55.826	0.826	0.626	0.378	0.8	12	0
15	06/01/2015 7:35 AM	55	55.426	0.426	0.201		0.8	12	0
15	06/01/2015 7:36 AM	55	54.973	0.027	0.253		0.8	12	0
15	06/01/2015 7:36 AM	55	54.520	0.480	0.540		0.8	12	0
15	06/01/2015 7:37 AM	55	54.400	0.600	0.372		0.8	12	0
15	06/01/2015 7:37 AM	55	54.856	0.144	0.13		0.8	12	0
15	06/01/2015 7:38 AM	55	55.313	0.313	0.542		0.8	12	0
15	06/01/2015 7:38 AM	55	55.770	0.770	0.661		0.8	12	0
15	06/01/2015 7:39 AM	55	55.551	0.551	0.357		0.8	12	0
15	06/01/2015 7:39 AM	55	55.163	0.163	0.099		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
16	06/01/2015 7:40 AM	55	54.775	0.225	0.370	0.421	0.8	12	0
16	06/01/2015 7:40 AM	55	54.486	0.514	0.498		0.8	12	0
16	06/01/2015 7:41 AM	55	54.517	0.483	0.267		0.8	12	0
16	06/01/2015 7:41 AM	55	54.948	0.052	0.155		0.8	12	0
16	06/01/2015 7:42 AM	55	55.349	0.349	0.485		0.8	12	0
16	06/01/2015 7:42 AM	55	55.621	0.621	0.491		0.8	12	0
16	06/01/2015 7:43 AM	55	55.360	0.360	0.185		0.8	12	0
16	06/01/2015 7:43 AM	55	54.620	0.390	0.630		0.8	12	0
16	06/01/2015 7:44 AM	55	54.120	0.896	0.739		0.8	12	0
16	06/01/2015 7:44 AM	55	54.403	0.597	0.386		0.8	12	0
17	06/01/2015 7:45 AM	55	54.826	0.174	0.109	0.418	0.8	12	0
17	06/01/2015 7:45 AM	55	55.249	0.249	0.46		0.8	12	0
17	06/01/2015 7:46 AM	55	55.672	0.672	0.712		0.8	12	0
17	06/01/2015 7:46 AM	55	55.752	0.752	0.496		0.8	12	0
17	06/01/2015 7:47 AM	55	55.241	0.241	0.128		0.8	12	0
17	06/01/2015 7:47 AM	55	54.730	0.270	0.526		0.8	12	0
17	06/01/2015 7:48 AM	55	54.218	0.782	0.664		0.8	12	0
17	06/01/2015 7:48 AM	55	54.453	0.547	0.316		0.8	12	0
17	06/01/2015 7:49 AM	55	54.915	0.085	0.162		0.8	12	0
17	06/01/2015 7:49 AM	55	55.378	0.378	0.609		0.8	12	0
18	06/01/2015 7:50 AM	55	55.840	0.840	0.673	0.374	0.8	12	0
18	06/01/2015 7:50 AM	55	55.505	0.505	0.277		0.8	12	0
18	06/01/2015 7:51 AM	55	55.048	0.048	0.186		0.8	12	0
18	06/01/2015 7:51 AM	55	54.590	0.410	0.605		0.8	12	0
18	06/01/2015 7:52 AM	55	54.200	0.800	0.522		0.8	12	0
18	06/01/2015 7:52 AM	55	54.757	0.243	0.141		0.8	12	0
18	06/01/2015 7:53 AM	55	55.313	0.313	0.479		0.8	12	0
18	06/01/2015 7:53 AM	55	55.645	0.645	0.443		0.8	12	0
18	06/01/2015 7:54 AM	55	55.241	0.241	0.105		0.8	12	0
18	06/01/2015 7:54 AM	55	54.837	0.163	0.310		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
19	06/01/2015 7:55 AM	55	54.544	0.456	0.382	0.287	0.8	12	0
19	06/01/2015 7:55 AM	55	54.693	0.307	0.232		0.8	12	0
19	06/01/2015 7:56 AM	55	54.843	0.157	0.082		0.8	12	0
19	06/01/2015 7:56 AM	55	54.993	0.007	0.071		0.8	12	0
19	06/01/2015 7:57 AM	55	55.148	0.148	0.215		0.8	12	0
19	06/01/2015 7:57 AM	55	55.282	0.282	0.355		0.8	12	0
19	06/01/2015 7:58 AM	55	55.43	0.430	0.181		0.8	12	0
19	06/01/2015 7:58 AM	55	54.888	0.320	0.373		0.8	12	0
19	06/01/2015 7:59 AM	55	54.365	0.635	0.595		0.8	12	0
19	06/01/2015 7:59 AM	55	54.445	0.555	0.385		0.8	12	0
20	06/01/2015 8:00 AM	55	54.784	0.216	0.091		0.217	0.8	12
20	06/01/2015 8:00 AM	55	55.122	0.122	0.174	0.8		12	0
20	06/01/2015 8:01 AM	55	55.225	0.225	0.283	0.8		12	0
20	06/01/2015 8:01 AM	55	55.341	0.341	0.154	0.8		12	0
20	06/01/2015 8:02 AM	55	54.956	0.044	0.237	0.8		12	0
20	06/01/2015 8:02 AM	55	54.571	0.429	0.413	0.8		12	0
20	06/01/2015 8:03 AM	55	54.606	0.394	0.272	0.8		12	0
20	06/01/2015 8:03 AM	55	54.850	0.150	0.064	0.8		12	0
20	06/01/2015 8:04 AM	55	55.095	0.095	0.218	0.8		12	0
20	06/01/2015 8:04 AM	55	55.340	0.340	0.262	0.8		12	0
21	06/01/2015 8:05 AM	55	55.184	0.184	0.079	0.214		0.8	12
21	06/01/2015 8:05 AM	55	54.881	0.119	0.270		0.8	12	0
21	06/01/2015 8:06 AM	55	54.578	0.422	0.301		0.8	12	0
21	06/01/2015 8:06 AM	55	54.819	0.181	0.076		0.8	12	0
21	06/01/2015 8:07 AM	55	55.059	0.059	0.179		0.8	12	0
21	06/01/2015 8:07 AM	55	55.299	0.299	0.325		0.8	12	0
21	06/01/2015 8:08 AM	55	55.351	0.351	0.182		0.8	12	0
21	06/01/2015 8:08 AM	55	54.962	0.378	0.253		0.8	12	0
21	06/01/2015 8:09 AM	55	54.572	0.196	0.196		0.8	12	0
21	06/01/2015 8:09 AM	55	54.735	0.265	0.279		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
22	06/01/2015 8:10 AM	55	54.707	0.293	0.124	0.257	0.8	12	0
22	06/01/2015 8:10 AM	55	55.079	0.079	0.170		0.8	12	0
22	06/01/2015 8:11 AM	55	55.261	0.261	0.315		0.8	12	0
22	06/01/2015 8:11 AM	55	55.370	0.370	0.156		0.8	12	0
22	06/01/2015 8:12 AM	55	54.893	0.107	0.346		0.8	12	0
22	06/01/2015 8:12 AM	55	54.415	0.585	0.561		0.8	12	0
22	06/01/2015 8:13 AM	55	54.463	0.537	0.382		0.8	12	0
22	06/01/2015 8:13 AM	55	54.773	0.227	0.094		0.8	12	0
22	06/01/2015 8:14 AM	55	55.084	0.084	0.139		0.8	12	0
22	06/01/2015 8:14 AM	55	55.194	0.194	0.287		0.8	12	0
23	06/01/2015 8:15 AM	55	55.579	0.579	0.269	0.252	0.8	12	0
23	06/01/2015 8:15 AM	55	54.952	0.048	0.320		0.8	12	0
23	06/01/2015 8:16 AM	55	54.409	0.591	0.485		0.8	12	0
23	06/01/2015 8:16 AM	55	54.620	0.380	0.274		0.8	12	0
23	06/01/2015 8:17 AM	55	54.832	0.168	0.071		0.8	12	0
23	06/01/2015 8:17 AM	55	55.044	0.044	0.150		0.8	12	0
23	06/01/2015 8:18 AM	55	55.256	0.256	0.207		0.8	12	0
23	06/01/2015 8:18 AM	55	55.157	0.157	0.147		0.8	12	0
23	06/01/2015 8:19 AM	55	55.137	0.137	0.115		0.8	12	0
23	06/01/2015 8:19 AM	55	54.723	0.277	0.484		0.8	12	0
24	06/01/2015 8:20 AM	55	54.309	0.691	0.636	0.358	0.8	12	0
24	06/01/2015 8:20 AM	55	54.420	0.580	0.394		0.8	12	0
24	06/01/2015 8:21 AM	55	54.793	0.207	0.094		0.8	12	0
24	06/01/2015 8:21 AM	55	55.167	0.167	0.304		0.8	12	0
24	06/01/2015 8:22 AM	55	55.440	0.440	0.512		0.8	12	0
24	06/01/2015 8:22 AM	55	55.585	0.585	0.497		0.8	12	0
24	06/01/2015 8:23 AM	55	55.410	0.410	0.173		0.8	12	0
24	06/01/2015 8:23 AM	55	54.890	0.110	0.164		0.8	12	0
24	06/01/2015 8:24 AM	55	54.782	0.218	0.36		0.8	12	0
24	06/01/2015 8:24 AM	55	54.498	0.502	0.445		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
25	06/01/2015 8:25 AM	55	54.612	0.388	0.183	0.396	0.8	12	0
25	06/01/2015 8:25 AM	55	55.025	0.025	0.231		0.8	12	0
25	06/01/2015 8:26 AM	55	55.380	0.380	0.644		0.8	12	0
25	06/01/2015 8:26 AM	55	55.726	0.726	0.354		0.8	12	0
25	06/01/2015 8:27 AM	55	55.283	0.283	0.174		0.8	12	0
25	06/01/2015 8:27 AM	55	54.606	0.394	0.698		0.8	12	0
25	06/01/2015 8:28 AM	55	53.997	1.003	0.836		0.8	12	0
25	06/01/2015 8:28 AM	55	54.331	0.669	0.503		0.8	12	0
25	06/01/2015 8:29 AM	55	54.664	0.336	0.167		0.8	12	0
25	06/01/2015 8:29 AM	55	54.998	0.002	0.165		0.8	12	0
26	06/01/2015 8:30 AM	55	55.331	0.331	0.498	0.428	0.8	12	0
26	06/01/2015 8:30 AM	55	55.665	0.665	0.774		0.8	12	0
26	06/01/2015 8:31 AM	55	55.884	0.884	0.622		0.8	12	0
26	06/01/2015 8:31 AM	55	55.360	0.360	0.149		0.8	12	0
26	06/01/2015 8:32 AM	55	54.836	0.164	0.276		0.8	12	0
26	06/01/2015 8:32 AM	55	54.312	0.388	0.494		0.8	12	0
26	06/01/2015 8:33 AM	55	54.230	0.559	0.473		0.8	12	0
26	06/01/2015 8:33 AM	55	54.653	0.347	0.149		0.8	12	0
26	06/01/2015 8:34 AM	55	55.077	0.077	0.288		0.8	12	0
26	06/01/2015 8:34 AM	55	55.500	0.500	0.560		0.8	12	0
27	06/01/2015 8:35 AM	55	55.619	0.619	0.273	0.335	0.8	12	0
27	06/01/2015 8:35 AM	55	54.78	0.220	0.462		0.8	12	0
27	06/01/2015 8:36 AM	55	54.178	0.822	0.735		0.8	12	0
27	06/01/2015 8:36 AM	55	54.351	0.649	0.274		0.8	12	0
27	06/01/2015 8:37 AM	55	54.624	0.376	0.159		0.8	12	0
27	06/01/2015 8:37 AM	55	54.76	0.240	0.072		0.8	12	0
27	06/01/2015 8:38 AM	55	55.169	0.169	0.305		0.8	12	0
27	06/01/2015 8:38 AM	55	55.441	0.441	0.578		0.8	12	0
27	06/01/2015 8:39 AM	55	55.714	0.714	0.298		0.8	12	0
27	06/01/2015 8:39 AM	55	55.361	0.361	0.193		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
28	06/01/2015 8:40 AM	55	54.592	0.408	0.528	0.455	0.8	12	0
28	06/01/2015 8:40 AM	55	54.353	0.647	0.569		0.8	12	0
28	06/01/2015 8:41 AM	55	54.510	0.490	0.491		0.8	12	0
28	06/01/2015 8:41 AM	55	54.507	0.493	0.204		0.8	12	0
28	06/01/2015 8:42 AM	55	55.195	0.195	0.329		0.8	12	0
28	06/01/2015 8:42 AM	55	55.464	0.464	0.401		0.8	12	0
28	06/01/2015 8:43 AM	55	55.339	0.339	0.305		0.8	12	0
28	06/01/2015 8:43 AM	55	55.271	0.271	0.172		0.8	12	0
28	06/01/2015 8:44 AM	55	54.605	0.395	0.712		0.8	12	0
28	06/01/2015 8:44 AM	55	53.971	1.029	0.837		0.8	12	0
29	06/01/2015 8:45 AM	55	54.356	0.644	0.451	0.348	0.8	12	0
29	06/01/2015 8:45 AM	55	54.741	0.259	0.108		0.8	12	0
29	06/01/2015 8:46 AM	55	55.120	0.120	0.220		0.8	12	0
29	06/01/2015 8:46 AM	55	55.320	0.320	0.352		0.8	12	0
29	06/01/2015 8:47 AM	55	55.384	0.384	0.332		0.8	12	0
29	06/01/2015 8:47 AM	55	55.280	0.280	0.143		0.8	12	0
29	06/01/2015 8:48 AM	55	55.007	0.007	0.279		0.8	12	0
29	06/01/2015 8:48 AM	55	54.435	0.565	0.705		0.8	12	0
29	06/01/2015 8:49 AM	55	54.154	0.846	0.646		0.8	12	0
29	06/01/2015 8:49 AM	55	54.554	0.446	0.246		0.8	12	0
30	06/01/2015 8:50 AM	55	54.953	0.047	0.158	0.438	0.8	12	0
30	06/01/2015 8:50 AM	55	55.352	0.352	0.511		0.8	12	0
30	06/01/2015 8:51 AM	55	55.671	0.671	0.668		0.8	12	0
30	06/01/2015 8:51 AM	55	55.664	0.664	0.307		0.8	12	0
30	06/01/2015 8:52 AM	55	54.940	0.060	0.427		0.8	12	0
30	06/01/2015 8:52 AM	55	54.207	0.793	0.837		0.8	12	0
30	06/01/2015 8:53 AM	55	54.12	0.880	0.733		0.8	12	0
30	06/01/2015 8:53 AM	55	54.415	0.585	0.433		0.8	12	0
30	06/01/2015 8:54 AM	55	54.720	0.280	0.130		0.8	12	0
30	06/01/2015 8:54 AM	55	55.025	0.025	0.177		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
31	06/01/2015 8:55 AM	55	55.33	0.330	0.427	0.294	0.8	12	0
31	06/01/2015 8:55 AM	55	55.524	0.524	0.463		0.8	12	0
31	06/01/2015 8:56 AM	55	55.401	0.401	0.171		0.8	12	0
31	06/01/2015 8:56 AM	55	54.905	0.095	0.117		0.8	12	0
31	06/01/2015 8:57 AM	55	54.862	0.138	0.207		0.8	12	0
31	06/01/2015 8:57 AM	55	54.725	0.275	0.269		0.8	12	0
31	06/01/2015 8:58 AM	55	54.737	0.263	0.114		0.8	12	0
31	06/01/2015 8:58 AM	55	55.051	0.051	0.183		0.8	12	0
31	06/01/2015 8:59 AM	55	55.314	0.314	0.445		0.8	12	0
31	06/01/2015 8:59 AM	55	55.577	0.577	0.543		0.8	12	0
32	06/01/2015 9:00 AM	55	55.509	0.509	0.249	0.322	0.8	12	0
32	06/01/2015 9:00 AM	55	54.989	0.011	0.346		0.8	12	0
32	06/01/2015 9:01 AM	55	54.320	0.680	0.755		0.8	12	0
32	06/01/2015 9:01 AM	55	54.170	0.830	0.564		0.8	12	0
32	06/01/2015 9:02 AM	55	54.702	0.298	0.300		0.8	12	0
32	06/01/2015 9:02 AM	55	54.698	0.302	0.154		0.8	12	0
32	06/01/2015 9:03 AM	55	54.994	0.006	0.142		0.8	12	0
32	06/01/2015 9:03 AM	55	55.289	0.289	0.262		0.8	12	0
32	06/01/2015 9:04 AM	55	55.235	0.235	0.295		0.8	12	0
32	06/01/2015 9:04 AM	55	55.354	0.354	0.154		0.8	12	0
33	06/01/2015 9:05 AM	55	54.762	0.238	0.475	0.483	0.8	12	0
33	06/01/2015 9:05 AM	55	54.289	0.711	0.646		0.8	12	0
33	06/01/2015 9:06 AM	55	54.4199	0.580	0.396		0.8	12	0
33	06/01/2015 9:06 AM	55	54.788	0.212	0.098		0.8	12	0
33	06/01/2015 9:07 AM	55	55.178	0.178	0.272		0.8	12	0
33	06/01/2015 9:07 AM	55	55.367	0.367	0.662		0.8	12	0
33	06/01/2015 9:08 AM	55	55.957	0.957	0.838		0.8	12	0
33	06/01/2015 9:08 AM	55	55.719	0.719	0.361		0.8	12	0
33	06/01/2015 9:09 AM	55	55.002	0.002	0.357		0.8	12	0
33	06/01/2015 9:09 AM	55	54.285	0.715	0.729		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
34	06/01/2015 9:10 AM	55	54.257	0.743	0.559	0.338	0.8	12	0
34	06/01/2015 9:10 AM	55	54.625	0.375	0.292		0.8	12	0
34	06/01/2015 9:11 AM	55	54.792	0.208	0.087		0.8	12	0
34	06/01/2015 9:11 AM	55	55.060	0.060	0.096		0.8	12	0
34	06/01/2015 9:12 AM	55	55.1327	0.133	0.213		0.8	12	0
34	06/01/2015 9:12 AM	55	55.294	0.294	0.184		0.8	12	0
34	06/01/2015 9:13 AM	55	55.073	0.073	0.324		0.8	12	0
34	06/01/2015 9:13 AM	55	54.292	0.708	0.739		0.8	12	0
34	06/01/2015 9:14 AM	55	54.230	0.770	0.586		0.8	12	0
34	06/01/2015 9:14 AM	55	54.598	0.402	0.297		0.8	12	0
35	06/01/2015 9:15 AM	55	54.807	0.193	0.080	0.361	0.8	12	0
35	06/01/2015 9:15 AM	55	55.096	0.096	0.240		0.8	12	0
35	06/01/2015 9:16 AM	55	55.385	0.385	0.484		0.8	12	0
35	06/01/2015 9:16 AM	55	55.584	0.584	0.429		0.8	12	0
35	06/01/2015 9:17 AM	55	55.274	0.274	0.121		0.8	12	0
35	06/01/2015 9:17 AM	55	54.805	0.195	0.579		0.8	12	0
35	06/01/2015 9:18 AM	55	54.036	0.964	0.823		0.8	12	0
35	06/01/2015 9:18 AM	55	54.317	0.683	0.525		0.8	12	0
35	06/01/2015 9:19 AM	55	54.633	0.3670	0.208		0.8	12	0
35	06/01/2015 9:19 AM	55	54.950	0.050	0.116		0.8	12	0
36	06/01/2015 9:20 AM	55	55.267	0.267	0.375	0.455	0.8	12	0
36	06/01/2015 9:20 AM	55	55.483	0.483	0.533		0.8	12	0
36	06/01/2015 9:21 AM	55	55.584	0.584	0.313		0.8	12	0
36	06/01/2015 9:21 AM	55	55.042	0.042	0.222		0.8	12	0
36	06/01/2015 9:22 AM	55	54.521	0.479	0.783		0.8	12	0
36	06/01/2015 9:22 AM	55	53.913	1.087	0.919		0.8	12	0
36	06/01/2015 9:23 AM	55	54.250	0.750	0.580		0.8	12	0
36	06/01/2015 9:23 AM	55	54.590	0.410	0.277		0.8	12	0
36	06/01/2015 9:24 AM	55	54.855	0.145	0.113		0.8	12	0
36	06/01/2015 9:24 AM	55	55.269	0.269	0.439		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
37	06/01/2015 9:25 AM	55	55.609	0.609	0.779	0.446	0.8	12	0
37	06/01/2015 9:25 AM	55	55.949	0.949	0.845		0.8	12	0
37	06/01/2015 9:26 AM	55	55.741	0.741	0.479		0.8	12	0
37	06/01/2015 9:26 AM	55	55.216	0.216	0.135		0.8	12	0
37	06/01/2015 9:27 AM	55	54.691	0.309	0.322		0.8	12	0
37	06/01/2015 9:27 AM	55	54.666	0.334	0.303		0.8	12	0
37	06/01/2015 9:28 AM	55	54.728	0.272	0.203		0.8	12	0
37	06/01/2015 9:28 AM	55	54.867	0.133	0.130		0.8	12	0
37	06/01/2015 9:29 AM	55	55.313	0.313	0.537		0.8	12	0
37	06/01/2015 9:29 AM	55	55.760	0.760	0.732		0.8	12	0
38	06/01/2015 9:30 AM	55	55.705	0.705	0.459	0.374	0.8	12	0
38	06/01/2015 9:30 AM	55	55.212	0.212	0.126		0.8	12	0
38	06/01/2015 9:31 AM	55	54.719	0.281	0.433		0.8	12	0
38	06/01/2015 9:31 AM	55	54.416	0.584	0.417		0.8	12	0
38	06/01/2015 9:32 AM	55	54.751	0.249	0.149		0.8	12	0
38	06/01/2015 9:32 AM	55	54.950	0.050	0.203		0.8	12	0
38	06/01/2015 9:33 AM	55	55.446	0.446	0.693		0.8	12	0
38	06/01/2015 9:33 AM	55	55.940	0.940	0.766		0.8	12	0
38	06/01/2015 9:34 AM	55	55.592	0.592	0.371		0.8	12	0
38	06/01/2015 9:34 AM	55	55.149	0.149	0.122		0.8	12	0
39	06/01/2015 9:35 AM	55	54.707	0.293	0.436	0.387	0.8	12	0
39	06/01/2015 9:35 AM	55	54.420	0.580	0.516		0.8	12	0
39	06/01/2015 9:36 AM	55	54.549	0.451	0.295		0.8	12	0
39	06/01/2015 9:36 AM	55	54.861	0.139	0.114		0.8	12	0
39	06/01/2015 9:37 AM	55	55.274	0.274	0.429		0.8	12	0
39	06/01/2015 9:37 AM	55	55.583	0.583	0.447		0.8	12	0
39	06/01/2015 9:38 AM	55	55.312	0.312	0.130		0.8	12	0
39	06/01/2015 9:38 AM	55	54.841	0.159	0.426		0.8	12	0
39	06/01/2015 9:39 AM	55	54.307	0.693	0.644		0.8	12	0
39	06/01/2015 9:39 AM	55	54.405	0.595	0.428		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
40	06/01/2015 9:40 AM	55	54.739	0.261	0.110	0.341	0.8	12	0
40	06/01/2015 9:40 AM	55	55.074	0.074	0.191		0.8	12	0
40	06/01/2015 9:41 AM	55	55.308	0.308	0.476		0.8	12	0
40	06/01/2015 9:41 AM	55	55.643	0.643	0.511		0.8	12	0
40	06/01/2015 9:42 AM	55	55.378	0.378	0.238		0.8	12	0
40	06/01/2015 9:42 AM	55	55.098	0.098	0.181		0.8	12	0
40	06/01/2015 9:43 AM	55	54.576	0.424	0.637		0.8	12	0
40	06/01/2015 9:43 AM	55	54.150	0.850	0.631		0.8	12	0
40	06/01/2015 9:44 AM	55	54.587	0.413	0.196		0.8	12	0
40	06/01/2015 9:44 AM	55	55.023	0.023	0.242		0.8	12	0
41	06/01/2015 9:45 AM	55	55.460	0.460	0.647	0.375	0.8	12	0
41	06/01/2015 9:45 AM	55	55.834	0.834	0.576		0.8	12	0
41	06/01/2015 9:46 AM	55	55.318	0.318	0.134		0.8	12	0
41	06/01/2015 9:46 AM	55	54.821	0.179	0.283		0.8	12	0
41	06/01/2015 9:47 AM	55	54.614	0.386	0.402		0.8	12	0
41	06/01/2015 9:47 AM	55	54.583	0.417	0.344		0.8	12	0
41	06/01/2015 9:48 AM	55	54.730	0.270	0.116		0.8	12	0
41	06/01/2015 9:48 AM	55	55.173	0.173	0.271		0.8	12	0
41	06/01/2015 9:49 AM	55	54.630	0.370	0.513		0.8	12	0
41	06/01/2015 9:49 AM	55	54.343	0.657	0.467		0.8	12	0
42	06/01/2015 9:50 AM	55	55.278	0.278	0.134	0.421	0.8	12	0
42	06/01/2015 9:50 AM	55	54.745	0.255	0.368		0.8	12	0
42	06/01/2015 9:51 AM	55	54.520	0.480	0.576		0.8	12	0
42	06/01/2015 9:51 AM	55	54.328	0.672	0.448		0.8	12	0
42	06/01/2015 9:52 AM	55	54.776	0.224	0.112		0.8	12	0
42	06/01/2015 9:52 AM	55	55.225	0.225	0.449		0.8	12	0
42	06/01/2015 9:53 AM	55	55.673	0.673	0.757		0.8	12	0
42	06/01/2015 9:53 AM	55	55.840	0.840	0.537		0.8	12	0
42	06/01/2015 9:54 AM	55	55.234	0.234	0.159		0.8	12	0
42	06/01/2015 9:54 AM	55	54.628	0.372	0.675		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
43	06/01/2015 9:55 AM	55	54.022	0.978	0.870	0.412	0.8	12	0
43	06/01/2015 9:55 AM	55	54.238	0.762	0.552		0.8	12	0
43	06/01/2015 9:56 AM	55	54.658	0.342	0.146		0.8	12	0
43	06/01/2015 9:56 AM	55	55.079	0.079	0.194		0.8	12	0
43	06/01/2015 9:57 AM	55	55.309	0.309	0.415		0.8	12	0
43	06/01/2015 9:57 AM	55	55.520	0.520	0.443		0.8	12	0
43	06/01/2015 9:58 AM	55	55.365	0.365	0.190		0.8	12	0
43	06/01/2015 9:58 AM	55	55.015	0.015	0.160		0.8	12	0
43	06/01/2015 9:59 AM	55	54.666	0.334	0.548		0.8	12	0
43	06/01/2015 9:59 AM	55	54.238	0.762	0.599		0.8	12	0
44	06/01/2015 10:00 AM	55	54.565	0.435	0.271	0.241	0.8	12	0
44	06/01/2015 10:00 AM	55	54.893	0.107	0.092		0.8	12	0
44	06/01/2015 10:01 AM	55	55.220	0.220	0.276		0.8	12	0
44	06/01/2015 10:01 AM	55	55.331	0.331	0.276		0.8	12	0
44	06/01/2015 10:02 AM	55	55.220	0.220	0.202		0.8	12	0
44	06/01/2015 10:02 AM	55	54.512	0.488	0.482		0.8	12	0
44	06/01/2015 10:03 AM	55	54.524	0.476	0.380		0.8	12	0
44	06/01/2015 10:03 AM	55	54.715	0.285	0.189		0.8	12	0
44	06/01/2015 10:04 AM	55	54.906	0.094	0.048		0.8	12	0
44	06/01/2015 10:04 AM	55	55.097	0.097	0.192		0.8	12	0
45	06/01/2015 10:05 AM	55	55.288	0.288	0.283	0.251	0.8	12	0
45	06/01/2015 10:05 AM	55	55.278	0.278	0.120		0.8	12	0
45	06/01/2015 10:06 AM	55	54.820	0.180	0.200		0.8	12	0
45	06/01/2015 10:06 AM	55	54.781	0.219	0.282		0.8	12	0
45	06/01/2015 10:07 AM	55	54.654	0.346	0.313		0.8	12	0
45	06/01/2015 10:07 AM	55	54.720	0.280	0.118		0.8	12	0
45	06/01/2015 10:08 AM	55	55.080	0.080	0.136		0.8	12	0
45	06/01/2015 10:08 AM	55	55.193	0.193	0.329		0.8	12	0
45	06/01/2015 10:09 AM	55	55.464	0.464	0.196		0.8	12	0
45	06/01/2015 10:09 AM	55	54.736	0.264	0.536		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
46	06/01/2015 10:10 AM	55	54.192	0.808	0.710	0.316	0.8	12	0
46	06/01/2015 10:10 AM	55	54.388	0.612	0.410		0.8	12	0
46	06/01/2015 10:11 AM	55	54.793	0.207	0.209		0.8	12	0
46	06/01/2015 10:11 AM	55	54.789	0.211	0.118		0.8	12	0
46	06/01/2015 10:12 AM	55	54.975	0.025	0.076		0.8	12	0
46	06/01/2015 10:12 AM	55	55.17	0.170	0.268		0.8	12	0
46	06/01/2015 10:13 AM	55	55.366	0.366	0.342		0.8	12	0
46	06/01/2015 10:13 AM	55	55.317	0.317	0.131		0.8	12	0
46	06/01/2015 10:14 AM	55	54.879	0.121	0.290		0.8	12	0
46	06/01/2015 10:14 AM	55	54.541	0.459	0.603		0.8	12	0
47	06/01/2015 10:15 AM	55	54.252	0.748	0.733	0.488	0.8	12	0
47	06/01/2015 10:15 AM	55	54.282	0.718	0.703		0.8	12	0
47	06/01/2015 10:16 AM	55	54.312	0.688	0.653		0.8	12	0
47	06/01/2015 10:16 AM	55	54.382	0.618	0.583		0.8	12	0
47	06/01/2015 10:17 AM	55	54.452	0.548	0.488		0.8	12	0
47	06/01/2015 10:17 AM	55	54.571	0.429	0.399		0.8	12	0
47	06/01/2015 10:18 AM	55	54.631	0.369	0.312		0.8	12	0
47	06/01/2015 10:18 AM	55	54.745	0.255	0.232		0.8	12	0
47	06/01/2015 10:19 AM	55	54.791	0.209	0.344		0.8	12	0
47	06/01/2015 10:19 AM	55	54.521	0.479	0.434		0.8	12	0
48	06/01/2015 10:20 AM	55	54.61	0.390	0.404	0.323	0.8	12	0
48	06/01/2015 10:20 AM	55	54.581	0.419	0.394		0.8	12	0
48	06/01/2015 10:21 AM	55	54.63	0.370	0.310		0.8	12	0
48	06/01/2015 10:21 AM	55	54.751	0.249	0.306		0.8	12	0
48	06/01/2015 10:22 AM	55	54.638	0.362	0.370		0.8	12	0
48	06/01/2015 10:22 AM	55	54.622	0.378	0.387		0.8	12	0
48	06/01/2015 10:23 AM	55	54.605	0.395	0.404		0.8	12	0
48	06/01/2015 10:23 AM	55	54.588	0.412	0.320		0.8	12	0
48	06/01/2015 10:24 AM	55	54.772	0.228	0.184		0.8	12	0
48	06/01/2015 10:24 AM	55	54.86059	0.139	0.150		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
49	06/01/2015 10:25 AM	55	54.839	0.161	0.220	0.259	0.8	12	0
49	06/01/2015 10:25 AM	55	54.722	0.278	0.386		0.8	12	0
49	06/01/2015 10:26 AM	55	54.506	0.494	0.503		0.8	12	0
49	06/01/2015 10:26 AM	55	54.489	0.511	0.443		0.8	12	0
49	06/01/2015 10:27 AM	55	54.625	0.375	0.255		0.8	12	0
49	06/01/2015 10:27 AM	55	54.866	0.134	0.164		0.8	12	0
49	06/01/2015 10:28 AM	55	54.807	0.193	0.122		0.8	12	0
49	06/01/2015 10:28 AM	55	54.948	0.052	0.038		0.8	12	0
49	06/01/2015 10:29 AM	55	55.089	0.089	0.159		0.8	12	0
49	06/01/2015 10:29 AM	55	55.23	0.230	0.300		0.8	12	0
50	06/01/2015 10:30 AM	55	55.371	0.371	0.376	0.325	0.8	12	0
50	06/01/2015 10:30 AM	55	55.381	0.381	0.517		0.8	12	0
50	06/01/2015 10:31 AM	55	55.653	0.653	0.671		0.8	12	0
50	06/01/2015 10:31 AM	55	55.689	0.689	0.485		0.8	12	0
50	06/01/2015 10:32 AM	55	55.281	0.281	0.218		0.8	12	0
50	06/01/2015 10:32 AM	55	55.154	0.154	0.110		0.8	12	0
50	06/01/2015 10:33 AM	55	55.066	0.066	0.059		0.8	12	0
50	06/01/2015 10:33 AM	55	54.859	0.141	0.215		0.8	12	0
50	06/01/2015 10:34 AM	55	54.710	0.290	0.373		0.8	12	0
50	06/01/2015 10:34 AM	55	54.543	0.457	0.229		0.8	12	0

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

ภาคผนวก ข

ผลการคำนวณพื้นที่ใต้ส่วนโค้งจากการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
1	17/12/2015 9:36 AM	54	53.873	0.127	0.058	0.066	5	350	0
1	17/12/2015 9:37 AM	54	53.897	0.103	0.091		5	350	0
1	17/12/2015 9:38 AM	54	53.921	0.079	0.067		5	350	0
1	17/12/2015 9:39 AM	54	53.945	0.055	0.043		5	350	0
1	17/12/2015 9:40 AM	54	53.969	0.031	0.016		5	350	0
1	17/12/2015 9:41 AM	54	53.999	0.001	0.014		5	350	0
1	17/12/2015 9:42 AM	54	54.030	0.030	0.046		5	350	0
1	17/12/2015 9:43 AM	54	54.061	0.061	0.077		5	350	0
1	17/12/2015 9:44 AM	54	54.093	0.093	0.108		5	350	0
1	17/12/2015 9:45 AM	54	54.124	0.124	0.140		5	350	0
1	17/12/2015 9:46 AM	54	54.156	0.156			5	350	0
2	24/12/2015 1:11 PM	56	56.090	0.090	0.038	0.050	3	177	0.5
2	24/12/2015 1:12 PM	56	55.971	0.029	0.048		3	177	0.5
2	24/12/2015 1:13 PM	56	55.932	0.068	0.075		3	177	0.5
2	24/12/2015 1:14 PM	56	56.182	0.182	0.076		3	177	0.5
2	24/12/2015 1:15 PM	56	55.911	0.089	0.038		3	177	0.5
2	24/12/2015 1:16 PM	56	56.055	0.055	0.042		3	177	0.5
2	24/12/2015 1:17 PM	56	56.029	0.029	0.027		3	177	0.5
2	24/12/2015 1:18 PM	56	56.024	0.024	0.019		3	177	0.5
2	24/12/2015 1:19 PM	56	55.956	0.044	0.086		3	177	0.5
2	24/12/2015 1:20 PM	56	55.873	0.127	0.053		3	177	0.5
2	24/12/2015 1:21 PM	56	56.065	0.065			3	177	0.5
3	24/12/2015 1:33 PM	54	53.941	0.059	0.144	0.212	5	3	0
3	24/12/2015 1:34 PM	54	54.329	0.329	0.136		5	3	0
3	24/12/2015 1:35 PM	54	53.867	0.133	0.283		5	3	0
3	24/12/2015 1:36 PM	54	54.654	0.654	0.433		5	3	0
3	24/12/2015 1:37 PM	54	54.212	0.212	0.088		5	3	0
3	24/12/2015 1:38 PM	54	53.921	0.079	0.231		5	3	0
3	24/12/2015 1:39 PM	54	54.519	0.519	0.331		5	3	0
3	24/12/2015 1:40 PM	54	54.143	0.143	0.141		5	3	0
3	24/12/2015 1:41 PM	54	54.139	0.139	0.213		5	3	0
3	24/12/2015 1:42 PM	54	54.288	0.288	0.121		5	3	0
3	24/12/2015 1:43 PM	54	53.915	0.085			5	3	0

ภาพภาคผนวก ข-1 ผลการคำนวณพื้นที่ใต้ส่วนโค้งจากการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
4	24/12/2015 1:55 PM	56	55.813	0.187	0.104	0.134	1	350	1
4	24/12/2015 1:56 PM	56	56.227	0.227	0.105		1	350	1
4	24/12/2015 1:57 PM	56	55.979	0.021	0.109		1	350	1
4	24/12/2015 1:58 PM	56	56.234	0.234	0.104		1	350	1
4	24/12/2015 1:59 PM	56	55.964	0.036	0.176		1	350	1
4	24/12/2015 2:00 PM	56	56.381	0.381	0.315		1	350	1
4	24/12/2015 2:01 PM	56	56.248	0.248	0.106		1	350	1
4	24/12/2015 2:02 PM	56	55.850	0.150	0.097		1	350	1
4	24/12/2015 2:03 PM	56	56.224	0.224	0.118		1	350	1
4	24/12/2015 2:04 PM	56	55.752	0.248	0.105		1	350	1
4	24/12/2015 2:05 PM	56	56.146	0.146			1	350	1
5	24/12/2015 3:05 PM	54	54.100	0.100	0.063		0.038	3	177
5	24/12/2015 3:06 PM	54	54.027	0.027	0.015	3		177	0.5
5	24/12/2015 3:07 PM	54	54.002	0.002	0.014	3		177	0.5
5	24/12/2015 3:08 PM	54	54.027	0.027	0.030	3		177	0.5
5	24/12/2015 3:09 PM	54	54.034	0.034	0.014	3		177	0.5
5	24/12/2015 3:10 PM	54	53.986	0.014	0.034	3		177	0.5
5	24/12/2015 3:11 PM	54	53.946	0.054	0.029	3		177	0.5
5	24/12/2015 3:12 PM	54	53.997	0.003	0.052	3		177	0.5
5	24/12/2015 3:13 PM	54	54.107	0.107	0.093	3		177	0.5
5	24/12/2015 3:14 PM	54	54.079	0.079	0.042	3		177	0.5
5	24/12/2015 3:15 PM	54	53.913	0.087		3		177	0.5
6	5/1/2016 8:14 AM	54	53.797	0.203	0.119	0.213		5	3
6	5/1/2016 8:15 AM	54	54.265	0.265	0.342		5	3	0
6	5/1/2016 8:16 AM	54	54.420	0.420	0.269		5	3	0
6	5/1/2016 8:17 AM	54	54.118	0.118	0.208		5	3	0
6	5/1/2016 8:18 AM	54	54.298	0.298	0.126		5	3	0
6	5/1/2016 8:19 AM	54	53.923	0.077	0.148		5	3	0
6	5/1/2016 8:20 AM	54	54.345	0.345	0.150		5	3	0
6	5/1/2016 8:21 AM	54	53.765	0.235	0.258		5	3	0
6	5/1/2016 8:22 AM	54	54.622	0.622	0.258		5	3	0
6	5/1/2016 8:23 AM	54	53.721	0.279	0.247		5	3	0
6	5/1/2016 8:24 AM	54	54.596	0.596			5	3	0

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
7	6/1/2016 1:30 PM	55	54.750	0.250	0.152	0.088	1	350	0
7	6/1/2016 1:31 PM	55	54.947	0.053	0.077		1	350	0
7	6/1/2016 1:32 PM	55	54.898	0.102	0.050		1	350	0
7	6/1/2016 1:33 PM	55	55.003	0.003	0.109		1	350	0
7	6/1/2016 1:34 PM	55	55.214	0.214	0.128		1	350	0
7	6/1/2016 1:35 PM	55	55.042	0.042	0.046		1	350	0
7	6/1/2016 1:36 PM	55	54.889	0.111	0.061		1	350	0
7	6/1/2016 1:37 PM	55	54.988	0.012	0.046		1	350	0
7	6/1/2016 1:38 PM	55	55.101	0.101	0.138		1	350	0
7	6/1/2016 1:39 PM	55	55.175	0.175	0.076		1	350	0
7	6/1/2016 1:40 PM	55	54.885	0.115			1	350	0
8	6/1/2016 2:09 PM	54	54.015	0.015	0.030	0.122	5	350	0
8	6/1/2016 2:10 PM	54	53.931	0.069	0.052		5	350	0
8	6/1/2016 2:11 PM	54	53.965	0.035	0.100		5	350	0
8	6/1/2016 2:12 PM	54	53.835	0.165	0.152		5	350	0
8	6/1/2016 2:13 PM	54	53.862	0.138	0.163		5	350	0
8	6/1/2016 2:14 PM	54	53.813	0.187	0.137		5	350	0
8	6/1/2016 2:15 PM	54	53.914	0.086	0.188		5	350	0
8	6/1/2016 2:16 PM	54	53.710	0.290	0.243		5	350	0
8	6/1/2016 2:17 PM	54	53.805	0.195	0.112		5	350	0
8	6/1/2016 2:18 PM	54	53.971	0.029	0.047		5	350	0
8	6/1/2016 2:19 PM	54	53.936	0.064			5	350	0
9	6/1/2016 2:29 PM	56	56.072	0.072	0.101	0.152	1	350	0
9	6/1/2016 2:30 PM	56	56.129	0.129	0.091		1	350	0
9	6/1/2016 2:31 PM	56	56.052	0.052	0.053		1	350	0
9	6/1/2016 2:32 PM	56	55.872	0.128	0.230		1	350	0
9	6/1/2016 2:33 PM	56	55.668	0.332	0.343		1	350	0
9	6/1/2016 2:34 PM	56	55.646	0.354	0.257		1	350	0
9	6/1/2016 2:35 PM	56	55.840	0.160	0.067		1	350	0
9	6/1/2016 2:36 PM	56	56.052	0.052	0.104		1	350	0
9	6/1/2016 2:37 PM	56	56.156	0.156	0.160		1	350	0
9	6/1/2016 2:38 PM	56	56.164	0.164	0.118		1	350	0
9	6/1/2016 2:39 PM	56	56.072	0.072			1	350	0

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
10	6/1/2016 2:54 PM	54	54.488	0.488	0.379	0.257	5	3	0
10	6/1/2016 2:55 PM	54	54.270	0.270	0.206		5	3	0
10	6/1/2016 2:56 PM	54	54.142	0.142	0.111		5	3	0
10	6/1/2016 2:57 PM	54	54.080	0.080	0.159		5	3	0
10	6/1/2016 2:58 PM	54	54.237	0.237	0.258		5	3	0
10	6/1/2016 2:59 PM	54	54.279	0.279	0.299		5	3	0
10	6/1/2016 3:00 PM	54	54.320	0.320	0.224		5	3	0
10	6/1/2016 3:01 PM	54	54.129	0.129	0.347		5	3	0
10	6/1/2016 3:02 PM	54	54.565	0.565	0.305		5	3	0
10	6/1/2016 3:03 PM	54	54.044	0.044	0.283		5	3	0
10	6/1/2016 3:04 PM	54	54.522	0.522		5	3	0	
11	6/1/2016 3:14 PM	56	55.586	0.414	0.353	0.335	1	3	1
11	6/1/2016 3:15 PM	56	56.849	0.849	0.381		1	3	1
11	6/1/2016 3:16 PM	56	55.887	0.113	0.096		1	3	1
11	6/1/2016 3:17 PM	56	55.921	0.079	0.430		1	3	1
11	6/1/2016 3:18 PM	56	56.925	0.925	0.386		1	3	1
11	6/1/2016 3:19 PM	56	55.698	0.302	0.127		1	3	1
11	6/1/2016 3:20 PM	56	56.174	0.174	0.465		1	3	1
11	6/1/2016 3:21 PM	56	56.756	0.756	0.327		1	3	1
11	6/1/2016 3:22 PM	56	55.498	0.502	0.252		1	3	1
11	6/1/2016 3:23 PM	56	56.507	0.507	0.531		1	3	1
11	6/1/2016 3:24 PM	56	56.554	0.554		1	3	1	
12	6/1/2016 3:34 PM	54	54.772	0.772	0.682	0.421	1	3	1
12	6/1/2016 3:35 PM	54	54.592	0.592	0.259		1	3	1
12	6/1/2016 3:36 PM	54	53.588	0.412	0.268		1	3	1
12	6/1/2016 3:37 PM	54	54.620	0.620	0.425		1	3	1
12	6/1/2016 3:38 PM	54	54.229	0.229	0.248		1	3	1
12	6/1/2016 3:39 PM	54	53.402	0.598	0.457		1	3	1
12	6/1/2016 3:40 PM	54	55.087	1.087	0.641		1	3	1
12	6/1/2016 3:41 PM	54	54.194	0.194	0.234		1	3	1
12	6/1/2016 3:42 PM	54	53.438	0.562	0.408		1	3	1
12	6/1/2016 3:43 PM	54	54.964	0.964	0.592		1	3	1
12	6/1/2016 3:44 PM	54	54.221	0.221		1	3	1	

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
13	6/1/2016 3:55 PM	56	56.693	0.693	0.579	0.312	1	350	0
13	6/1/2016 3:56 PM	56	56.465	0.465	0.494		1	350	0
13	6/1/2016 3:57 PM	56	56.523	0.523	0.427		1	350	0
13	6/1/2016 3:58 PM	56	56.331	0.331	0.436		1	350	0
13	6/1/2016 3:59 PM	56	56.541	0.541	0.314		1	350	0
13	6/1/2016 4:00 PM	56	56.086	0.086	0.161		1	350	0
13	6/1/2016 4:01 PM	56	56.236	0.236	0.226		1	350	0
13	6/1/2016 4:02 PM	56	56.216	0.216	0.216		1	350	0
13	6/1/2016 4:03 PM	56	56.216	0.216	0.095		1	350	0
13	6/1/2016 4:04 PM	56	55.844	0.156	0.174		1	350	0
13	6/1/2016 4:05 PM	56	55.808	0.192			1	350	0
14	6/1/2016 4:14 PM	54	54.655	0.655	0.281		0.337	5	3
14	6/1/2016 4:15 PM	54	53.588	0.412	0.434	5		3	1
14	6/1/2016 4:16 PM	54	55.047	1.047	0.575	5		3	1
14	6/1/2016 4:17 PM	54	54.104	0.104	0.306	5		3	1
14	6/1/2016 4:18 PM	54	54.508	0.508	0.230	5		3	1
14	6/1/2016 4:19 PM	54	53.940	0.060	0.246	5		3	1
14	6/1/2016 4:20 PM	54	54.539	0.539	0.242	5		3	1
14	6/1/2016 4:21 PM	54	53.587	0.413	0.387	5		3	1
14	6/1/2016 4:22 PM	54	54.935	0.935	0.535	5		3	1
14	6/1/2016 4:23 PM	54	54.136	0.136	0.131	5		3	1
14	6/1/2016 4:24 PM	54	54.126	0.126		5		3	1
15	18/12/2015 3:25 PM	56	56.302	0.302	0.235	0.203		5	3
15	18/12/2015 3:26 PM	56	56.169	0.169	0.233		5	3	1
15	18/12/2015 3:27 PM	56	56.298	0.298	0.262		5	3	1
15	18/12/2015 3:28 PM	56	56.226	0.226	0.133		5	3	1
15	18/12/2015 3:29 PM	56	56.041	0.041	0.058		5	3	1
15	18/12/2015 3:30 PM	56	56.075	0.075	0.174		5	3	1
15	18/12/2015 3:31 PM	56	56.273	0.273	0.293		5	3	1
15	18/12/2015 3:32 PM	56	56.314	0.314	0.314		5	3	1
15	18/12/2015 3:33 PM	56	56.314	0.314	0.250		5	3	1
15	18/12/2015 3:34 PM	56	56.186	0.186	0.077		5	3	1
15	18/12/2015 3:35 PM	56	55.929	0.071			5	3	1

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
16	18/12/2015 3:50 PM	54	54.301	0.301	0.140	0.233	1	350	0
16	18/12/2015 3:51 PM	54	54.294	0.253	0.135		1	350	0
16	18/12/2015 3:52 PM	54	54.286	0.286	0.283		1	350	0
16	18/12/2015 3:53 PM	54	54.279	0.279	0.275		1	350	0
16	18/12/2015 3:54 PM	54	54.272	0.272	0.268		1	350	0
16	18/12/2015 3:55 PM	54	54.264	0.264	0.261		1	350	0
16	18/12/2015 3:56 PM	54	54.257	0.257	0.253		1	350	0
16	18/12/2015 3:57 PM	54	54.250	0.250	0.246		1	350	0
16	18/12/2015 3:58 PM	54	54.242	0.242	0.238		1	350	0
16	18/12/2015 3:59 PM	54	54.235	0.235	0.231		1	350	0
16	18/12/2015 4:00 PM	54	54.227	0.227		1	350	0	
17	18/12/2015 4:23 PM	56	56.238	0.238	0.238	0.172	1	350	1
17	18/12/2015 4:24 PM	56	56.239	0.239	0.239		1	350	1
17	18/12/2015 4:25 PM	56	56.239	0.239	0.239		1	350	1
17	18/12/2015 4:26 PM	56	56.239	0.239	0.240		1	350	1
17	18/12/2015 4:27 PM	56	56.240	0.240	0.208		1	350	1
17	18/12/2015 4:28 PM	56	56.176	0.176	0.133		1	350	1
17	18/12/2015 4:29 PM	56	56.090	0.090	0.047		1	350	1
17	18/12/2015 4:30 PM	56	56.004	0.004	0.039		1	350	1
17	18/12/2015 4:31 PM	56	55.918	0.082	0.125		1	350	1
17	18/12/2015 4:32 PM	56	55.833	0.167	0.210		1	350	1
17	18/12/2015 4:33 PM	56	55.747	0.253		1	350	1	
18	18/12/2015 4:45 PM	54	54.788	0.788	0.509	0.332	1	3	0
18	18/12/2015 4:46 PM	54	54.230	0.230	0.123		1	3	0
18	18/12/2015 4:47 PM	54	54.016	0.016	0.357		1	3	0
18	18/12/2015 4:48 PM	54	54.697	0.697	0.475		1	3	0
18	18/12/2015 4:49 PM	54	54.253	0.253	0.107		1	3	0
18	18/12/2015 4:50 PM	54	53.935	0.065	0.255		1	3	0
18	18/12/2015 4:51 PM	54	54.560	0.560	0.318		1	3	0
18	18/12/2015 4:52 PM	54	54.076	0.076	0.198		1	3	0
18	18/12/2015 4:53 PM	54	54.320	0.320	0.513		1	3	0
18	18/12/2015 4:54 PM	54	54.706	0.706	0.465		1	3	0
18	18/12/2015 4:55 PM	54	54.225	0.225		1	3	0	

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
19	18/12/2015 5:09 PM	56	56.135	0.135	0.177	0.294	5	3	0
19	18/12/2015 5:10 PM	56	56.219	0.219	0.345		5	3	0
19	18/12/2015 5:11 PM	56	56.471	0.471	0.414		5	3	0
19	18/12/2015 5:12 PM	56	56.358	0.358	0.267		5	3	0
19	18/12/2015 5:13 PM	56	56.175	0.175	0.143		5	3	0
19	18/12/2015 5:14 PM	56	56.111	0.111	0.260		5	3	0
19	18/12/2015 5:15 PM	56	56.409	0.409	0.349		5	3	0
19	18/12/2015 5:16 PM	56	56.289	0.289	0.226		5	3	0
19	18/12/2015 5:17 PM	56	56.163	0.163	0.344		5	3	0
19	18/12/2015 5:18 PM	56	56.526	0.526	0.418		5	3	0
19	18/12/2015 5:19 PM	56	56.310	0.310			5	3	0
20	6/1/2015 4:35 PM	56	55.938	0.062	0.038	0.097	5	350	0
20	6/1/2015 4:36 PM	56	56.086	0.086	0.085		5	350	0
20	6/1/2015 4:37 PM	56	56.085	0.085	0.080		5	350	0
20	6/1/2015 4:38 PM	56	56.075	0.075	0.047		5	350	0
20	6/1/2015 4:39 PM	56	55.894	0.106	0.062		5	350	0
20	6/1/2015 4:40 PM	56	56.138	0.138	0.168		5	350	0
20	6/1/2015 4:41 PM	56	56.198	0.198	0.194		5	350	0
20	6/1/2015 4:42 PM	56	56.190	0.190	0.136		5	350	0
20	6/1/2015 4:43 PM	56	56.082	0.082	0.088		5	350	0
20	6/1/2015 4:44 PM	56	56.094	0.094	0.068		5	350	0
20	6/1/2015 4:45 PM	56	56.041	0.041			5	350	0
21	18/12/2015 5:49 PM	56	56.258	0.258	0.239	0.122	5	350	1
21	18/12/2015 5:50 PM	56	56.221	0.221	0.203		5	350	1
21	18/12/2015 5:51 PM	56	56.185	0.185	0.167		5	350	1
21	18/12/2015 5:52 PM	56	56.148	0.148	0.130		5	350	1
21	18/12/2015 5:53 PM	56	56.112	0.112	0.093		5	350	1
21	18/12/2015 5:54 PM	56	56.074	0.074	0.048		5	350	1
21	18/12/2015 5:55 PM	56	56.022	0.022	0.014		5	350	1
21	18/12/2015 5:56 PM	56	55.969	0.031	0.058		5	350	1
21	18/12/2015 5:57 PM	56	55.916	0.084	0.110		5	350	1
21	18/12/2015 5:58 PM	56	55.863	0.137	0.163		5	350	1
21	18/12/2015 5:59 PM	56	55.811	0.189			5	350	1

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
22	18/12/2015 6:09 PM	54	54.155	0.155	0.164	0.251	5	350	1
22	18/12/2015 6:10 PM	54	54.174	0.174	0.184		5	350	1
22	18/12/2015 6:11 PM	54	54.193	0.193	0.203		5	350	1
22	18/12/2015 6:12 PM	54	54.213	0.213	0.222		5	350	1
22	18/12/2015 6:13 PM	54	54.232	0.232	0.242		5	350	1
22	18/12/2015 6:14 PM	54	54.251	0.251	0.261		5	350	1
22	18/12/2015 6:15 PM	54	54.270	0.270	0.280		5	350	1
22	18/12/2015 6:16 PM	54	54.290	0.290	0.299		5	350	1
22	18/12/2015 6:17 PM	54	54.309	0.309	0.319		5	350	1
22	18/12/2015 6:18 PM	54	54.328	0.328	0.338		5	350	1
22	18/12/2015 6:19 PM	54	54.348	0.348		5	350	1	
23	18/12/2015 6:29 PM	56	56.065	0.065	0.050	0.105	5	350	0
23	18/12/2015 6:30 PM	56	56.034	0.034	0.018		5	350	0
23	18/12/2015 6:31 PM	56	56.003	0.003	0.013		5	350	0
23	18/12/2015 6:32 PM	56	55.971	0.029	0.044		5	350	0
23	18/12/2015 6:33 PM	56	55.940	0.060	0.076		5	350	0
23	18/12/2015 6:34 PM	56	55.909	0.091	0.107		5	350	0
23	18/12/2015 6:35 PM	56	55.877	0.123	0.138		5	350	0
23	18/12/2015 6:36 PM	56	55.846	0.154	0.170		5	350	0
23	18/12/2015 6:37 PM	56	55.814	0.186	0.201		5	350	0
23	18/12/2015 6:38 PM	56	55.783	0.217	0.233		5	350	0
23	18/12/2015 6:39 PM	56	55.752	0.248		5	350	0	
24	18/12/2015 6:49 PM	54	54.039	0.039	0.050	0.146	3	177	0.5
24	18/12/2015 6:50 PM	54	54.060	0.060	0.071		3	177	0.5
24	18/12/2015 6:51 PM	54	54.082	0.082	0.092		3	177	0.5
24	18/12/2015 6:52 PM	54	54.103	0.103	0.114		3	177	0.5
24	18/12/2015 6:53 PM	54	54.125	0.125	0.135		3	177	0.5
24	18/12/2015 6:54 PM	54	54.146	0.146	0.157		3	177	0.5
24	18/12/2015 6:55 PM	54	54.167	0.167	0.178		3	177	0.5
24	18/12/2015 6:56 PM	54	54.189	0.189	0.199		3	177	0.5
24	18/12/2015 6:57 PM	54	54.210	0.210	0.221		3	177	0.5
24	18/12/2015 6:58 PM	54	54.231	0.231	0.242		3	177	0.5
24	18/12/2015 6:59 PM	54	54.253	0.253		3	177	0.5	

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
25	18/12/2015 7:09 PM	56	56.229	0.229	0.209	0.102	1	350	1
25	18/12/2015 7:10 PM	56	56.189	0.189	0.176		1	350	1
25	18/12/2015 7:11 PM	56	56.150	0.163	0.137		1	350	1
25	18/12/2015 7:12 PM	56	56.111	0.111	0.091		1	350	1
25	18/12/2015 7:13 PM	56	56.071	0.071	0.052		1	350	1
25	18/12/2015 7:14 PM	56	56.032	0.032	0.014		1	350	1
25	18/12/2015 7:15 PM	56	55.993	0.007	0.027		1	350	1
25	18/12/2015 7:16 PM	56	55.953	0.047	0.066		1	350	1
25	18/12/2015 7:17 PM	56	55.914	0.086	0.106		1	350	1
25	18/12/2015 7:18 PM	56	55.875	0.125	0.145		1	350	1
25	18/12/2015 7:19 PM	56	55.835	0.165			1	350	1
26	18/12/2015 7:29 PM	54	54.152	0.152	0.225		0.248	5	3
26	18/12/2015 7:30 PM	54	54.298	0.298	0.251	5		3	0
26	18/12/2015 7:31 PM	54	54.205	0.205	0.223	5		3	0
26	18/12/2015 7:32 PM	54	54.240	0.240	0.282	5		3	0
26	18/12/2015 7:33 PM	54	54.324	0.324	0.256	5		3	0
26	18/12/2015 7:34 PM	54	54.188	0.188	0.221	5		3	0
26	18/12/2015 7:35 PM	54	54.254	0.254	0.272	5		3	0
26	18/12/2015 7:36 PM	54	54.290	0.290	0.247	5		3	0
26	18/12/2015 7:37 PM	54	54.205	0.205	0.273	5		3	0
26	18/12/2015 7:38 PM	54	54.342	0.342	0.233	5		3	0
26	18/12/2015 7:39 PM	54	54.124	0.124		5		3	0
27	18/12/2015 7:49 PM	56	56.163	0.163	0.143	0.104		3	177
27	18/12/2015 7:50 PM	56	56.123	0.123	0.103		3	177	0.5
27	18/12/2015 7:51 PM	56	56.083	0.083	0.063		3	177	0.5
27	18/12/2015 7:52 PM	56	56.043	0.043	0.023		3	177	0.5
27	18/12/2015 7:53 PM	56	56.003	0.003	0.018		3	177	0.5
27	18/12/2015 7:54 PM	56	55.962	0.038	0.058		3	177	0.5
27	18/12/2015 7:55 PM	56	55.922	0.078	0.098		3	177	0.5
27	18/12/2015 7:56 PM	56	55.882	0.118	0.138		3	177	0.5
27	18/12/2015 7:57 PM	56	55.842	0.158	0.178		3	177	0.5
27	18/12/2015 7:58 PM	56	55.802	0.198	0.218		3	177	0.5
27	18/12/2015 7:59 PM	56	55.762	0.238			3	177	0.5

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
28	18/12/2015 8:10 PM	54	54.119	0.119	0.128	0.206	5	350	1
28	18/12/2015 8:11 PM	54	54.136	0.136	0.145		5	350	1
28	18/12/2015 8:12 PM	54	54.154	0.154	0.163		5	350	1
28	18/12/2015 8:13 PM	54	54.171	0.171	0.180		5	350	1
28	18/12/2015 8:14 PM	54	54.189	0.189	0.198		5	350	1
28	18/12/2015 8:15 PM	54	54.206	0.206	0.215		5	350	1
28	18/12/2015 8:16 PM	54	54.224	0.224	0.232		5	350	1
28	18/12/2015 8:17 PM	54	54.241	0.241	0.250		5	350	1
28	18/12/2015 8:18 PM	54	54.259	0.259	0.267		5	350	1
28	18/12/2015 8:19 PM	54	54.276	0.276	0.285		5	350	1
28	18/12/2015 8:20 PM	54	54.294	0.294		5	350	1	
29	18/12/2015 8:29 PM	56	56.201	0.201	0.167	0.197	1	350	1
29	18/12/2015 8:30 PM	56	56.133	0.133	0.099		1	350	1
29	18/12/2015 8:31 PM	56	56.065	0.065	0.032		1	350	1
29	18/12/2015 8:32 PM	56	55.998	0.002	0.036		1	350	1
29	18/12/2015 8:33 PM	56	55.930	0.070	0.104		1	350	1
29	18/12/2015 8:34 PM	56	55.863	0.137	0.171		1	350	1
29	18/12/2015 8:35 PM	56	55.795	0.205	0.239		1	350	1
29	18/12/2015 8:36 PM	56	55.727	0.273	0.307		1	350	1
29	18/12/2015 8:37 PM	56	55.660	0.340	0.374		1	350	1
29	18/12/2015 8:38 PM	56	55.592	0.408	0.442		1	350	1
29	18/12/2015 8:39 PM	56	55.524	0.476		1	350	1	
30	18/12/2015 8:49 PM	54	54.035	0.035	0.049	0.175	3	177	0.5
30	18/12/2015 8:50 PM	54	54.063	0.063	0.077		3	177	0.5
30	18/12/2015 8:51 PM	54	54.091	0.091	0.105		3	177	0.5
30	18/12/2015 8:52 PM	54	54.119	0.119	0.133		3	177	0.5
30	18/12/2015 8:53 PM	54	54.147	0.147	0.161		3	177	0.5
30	18/12/2015 8:54 PM	54	54.175	0.175	0.189		3	177	0.5
30	18/12/2015 8:55 PM	54	54.203	0.203	0.217		3	177	0.5
30	18/12/2015 8:56 PM	54	54.231	0.231	0.245		3	177	0.5
30	18/12/2015 8:57 PM	54	54.259	0.259	0.273		3	177	0.5
30	18/12/2015 8:58 PM	54	54.287	0.287	0.301		3	177	0.5
30	18/12/2015 8:59 PM	54	54.315	0.315		3	177	0.5	

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
31	18/12/2015 9:09 PM	56	56.527	0.527	0.277	0.219	5	3	0
31	18/12/2015 9:10 PM	56	56.027	0.027	0.240		5	3	0
31	18/12/2015 9:11 PM	56	56.452	0.452	0.216		5	3	0
31	18/12/2015 9:12 PM	56	55.978	0.022	0.150		5	3	0
31	18/12/2015 9:13 PM	56	56.319	0.319	0.206		5	3	0
31	18/12/2015 9:14 PM	56	56.093	0.093	0.247		5	3	0
31	18/12/2015 9:15 PM	56	56.402	0.402	0.278		5	3	0
31	18/12/2015 9:16 PM	56	56.154	0.154	0.209		5	3	0
31	18/12/2015 9:17 PM	56	56.264	0.264	0.202		5	3	0
31	18/12/2015 9:18 PM	56	56.140	0.140	0.166		5	3	0
31	18/12/2015 9:19 PM	56	56.192	0.192			5	3	0
32	18/12/2015 9:30 PM	54	53.940	0.060	0.057	0.038	3	177	0.5
32	18/12/2015 9:31 PM	54	53.946	0.054	0.051		3	177	0.5
32	18/12/2015 9:32 PM	54	53.952	0.048	0.045		3	177	0.5
32	18/12/2015 9:33 PM	54	53.958	0.042	0.039		3	177	0.5
32	18/12/2015 9:34 PM	54	53.964	0.036	0.033		3	177	0.5
32	18/12/2015 9:35 PM	54	53.970	0.030	0.028		3	177	0.5
32	18/12/2015 9:36 PM	54	53.975	0.025	0.032		3	177	0.5
32	18/12/2015 9:37 PM	54	53.960	0.040	0.037		3	177	0.5
32	18/12/2015 9:38 PM	54	53.965	0.035	0.033		3	177	0.5
32	18/12/2015 9:39 PM	54	53.969	0.031	0.029		3	177	0.5
32	18/12/2015 9:40 PM	54	53.974	0.026			3	177	0.5
33	6/1/2015 4:59 PM	54	54.123	0.123	0.062	0.286	1	3	0
33	6/1/2015 5:00 PM	54	53.874	0.126	0.362		1	3	0
33	6/1/2015 5:01 PM	54	54.816	0.816	0.508		1	3	0
33	6/1/2015 5:02 PM	54	54.200	0.200	0.191		1	3	0
33	6/1/2015 5:03 PM	54	53.540	0.460	0.385		1	3	0
33	6/1/2015 5:04 PM	54	54.925	0.925	0.444		1	3	0
33	6/1/2015 5:05 PM	54	53.959	0.041	0.053		1	3	0
33	6/1/2015 5:06 PM	54	54.127	0.127	0.432		1	3	0
33	6/1/2015 5:07 PM	54	54.737	0.737	0.392		1	3	0
33	6/1/2015 5:08 PM	54	54.048	0.048	0.031		1	3	0
33	6/1/2015 5:09 PM	54	53.929	0.071			1	3	0

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
34	6/1/2015 5:18 PM	56	56.020	0.020	0.376	0.352	1	3	1
34	6/1/2015 5:19 PM	56	56.731	0.731	0.313		1	3	1
34	6/1/2015 5:20 PM	56	55.833	0.167	0.219		1	3	1
34	6/1/2015 5:21 PM	56	56.525	0.525	0.459		1	3	1
34	6/1/2015 5:22 PM	56	56.393	0.393	0.221		1	3	1
34	6/1/2015 5:23 PM	56	55.517	0.483	0.365		1	3	1
34	6/1/2015 5:24 PM	56	56.867	0.867	0.514		1	3	1
34	6/1/2015 5:25 PM	56	56.160	0.160	0.174		1	3	1
34	6/1/2015 5:26 PM	56	55.580	0.420	0.340		1	3	1
34	6/1/2015 5:27 PM	56	56.815	0.815	0.534		1	3	1
34	6/1/2015 5:28 PM	56	56.253	0.253			1	3	1
35	21/12/2015 10:50 AM	56	56.395	0.395	0.487		0.368	5	3
35	21/12/2015 10:51 AM	56	56.579	0.579	0.306	5		3	1
35	21/12/2015 10:52 AM	56	56.033	0.033	0.450	5		3	1
35	21/12/2015 10:53 AM	56	56.866	0.866	0.359	5		3	1
35	21/12/2015 10:54 AM	56	55.638	0.362	0.327	5		3	1
35	21/12/2015 10:55 AM	56	56.787	0.787	0.360	5		3	1
35	21/12/2015 10:56 AM	56	55.362	0.638	0.375	5		3	1
35	21/12/2015 10:57 AM	56	56.835	0.835	0.346	5		3	1
35	21/12/2015 10:58 AM	56	55.658	0.342	0.197	5		3	1
35	21/12/2015 10:59 AM	56	56.435	0.435	0.469	5		3	1
35	21/12/2015 11:00 AM	56	56.504	0.504		5		3	1
36	6/1/2015 5:38 PM	54	53.471	0.529	0.335	0.145		1	350
36	6/1/2015 5:39 PM	54	53.860	0.140	0.244		1	350	0
36	6/1/2015 5:40 PM	54	53.653	0.347	0.219		1	350	0
36	6/1/2015 5:41 PM	54	53.910	0.090	0.154		1	350	0
36	6/1/2015 5:42 PM	54	53.783	0.217	0.102		1	350	0
36	6/1/2015 5:43 PM	54	54.016	0.016	0.092		1	350	0
36	6/1/2015 5:44 PM	54	53.803	0.197	0.086		1	350	0
36	6/1/2015 5:45 PM	54	54.037	0.037	0.057		1	350	0
36	6/1/2015 5:46 PM	54	53.864	0.136	0.109		1	350	0
36	6/1/2015 5:47 PM	54	53.918	0.082	0.052		1	350	0
36	6/1/2015 5:48 PM	54	54.120	0.120			1	350	0

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
37	6/1/2015 6:00 PM	56	55.407	0.593	0.396	0.398	1	3	0
37	6/1/2015 6:01 PM	56	56.921	0.921	0.730		1	3	0
37	6/1/2015 6:02 PM	56	56.539	0.539	0.258		1	3	0
37	6/1/2015 6:03 PM	56	55.509	0.491	0.282		1	3	0
37	6/1/2015 6:04 PM	56	56.620	0.620	0.632		1	3	0
37	6/1/2015 6:05 PM	56	56.643	0.643	0.269		1	3	0
37	6/1/2015 6:06 PM	56	55.658	0.342	0.274		1	3	0
37	6/1/2015 6:07 PM	56	56.656	0.656	0.512		1	3	0
37	6/1/2015 6:08 PM	56	56.369	0.369	0.235		1	3	0
37	6/1/2015 6:09 PM	56	55.461	0.539	0.390		1	3	0
37	6/1/2015 6:10 PM	56	56.921	0.921			1	3	0
38	21/12/2015 11:53 AM	54	54.186	0.186	0.168	0.228	5	350	1
38	21/12/2015 11:54 AM	54	54.150	0.150	0.133		5	350	1
38	21/12/2015 11:55 AM	54	54.115	0.115	0.085		5	350	1
38	21/12/2015 11:56 AM	54	54.055	0.055	0.026		5	350	1
38	21/12/2015 11:57 AM	54	53.951	0.049	0.101		5	350	1
38	21/12/2015 11:58 AM	54	53.847	0.153	0.205		5	350	1
38	21/12/2015 11:59 AM	54	53.743	0.257	0.309		5	350	1
38	21/12/2015 12:00 PM	54	53.639	0.361	0.413		5	350	1
38	21/12/2015 12:01 PM	54	53.535	0.465	0.477		5	350	1
38	21/12/2015 12:02 PM	54	53.512	0.488	0.367		5	350	1
38	21/12/2015 12:03 PM	54	53.755	0.245			5	350	1
39	6/1/2015 6:18 PM	54	53.794	0.206	0.113	0.121	1	350	1
39	6/1/2015 6:19 PM	54	53.980	0.020	0.206		1	350	1
39	6/1/2015 6:20 PM	54	53.608	0.392	0.208		1	350	1
39	6/1/2015 6:21 PM	54	53.975	0.025	0.217		1	350	1
39	6/1/2015 6:22 PM	54	53.591	0.409	0.189		1	350	1
39	6/1/2015 6:23 PM	54	54.038	0.038	0.078		1	350	1
39	6/1/2015 6:24 PM	54	53.818	0.182	0.096		1	350	1
39	6/1/2015 6:25 PM	54	53.989	0.011	0.017		1	350	1
39	6/1/2015 6:26 PM	54	54.041	0.041	0.026		1	350	1
39	6/1/2015 6:27 PM	54	53.942	0.058	0.056		1	350	1
39	6/1/2015 6:28 PM	54	54.135	0.135			1	350	1

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
40	6/1/2015 6:38 PM	56	55.989	0.011	0.015	0.033	5	350	1
40	6/1/2015 6:39 PM	56	55.981	0.019	0.031		5	350	1
40	6/1/2015 6:40 PM	56	55.958	0.042	0.078		5	350	1
40	6/1/2015 6:41 PM	56	55.886	0.114	0.074		5	350	1
40	6/1/2015 6:42 PM	56	55.966	0.034	0.038		5	350	1
40	6/1/2015 6:43 PM	56	55.958	0.042	0.037		5	350	1
40	6/1/2015 6:44 PM	56	55.967	0.033	0.030		5	350	1
40	6/1/2015 6:45 PM	56	55.972	0.028	0.014		5	350	1
40	6/1/2015 6:46 PM	56	55.999	0.001	0.008		5	350	1
40	6/1/2015 6:47 PM	56	56.017	0.017	0.007		5	350	1
40	6/1/2015 6:48 PM	56	55.997	0.003			5	350	1
41	21/12/2015 1:03 PM	56	55.438	0.562	0.511		0.287	1	350
41	21/12/2015 1:04 PM	56	55.540	0.460	0.409	1		350	1
41	21/12/2015 1:05 PM	56	55.642	0.358	0.308	1		350	1
41	21/12/2015 1:06 PM	56	55.743	0.257	0.206	1		350	1
41	21/12/2015 1:07 PM	56	55.845	0.155	0.099	1		350	1
41	21/12/2015 1:08 PM	56	55.956	0.044	0.033	1		350	1
41	21/12/2015 1:09 PM	56	56.079	0.079	0.141	1		350	1
41	21/12/2015 1:10 PM	56	56.202	0.202	0.264	1		350	1
41	21/12/2015 1:11 PM	56	56.325	0.325	0.387	1		350	1
41	21/12/2015 1:12 PM	56	56.448	0.448	0.510	1		350	1
41	21/12/2015 1:13 PM	56	56.571	0.571		1		350	1
42	21/12/2015 1:33 PM	54	54.750	0.750	0.337	0.330		5	3
42	21/12/2015 1:34 PM	54	53.901	0.099	0.062		5	3	1
42	21/12/2015 1:35 PM	54	54.142	0.142	0.554		5	3	1
42	21/12/2015 1:36 PM	54	54.966	0.966	0.406		5	3	1
42	21/12/2015 1:37 PM	54	53.722	0.278	0.195		5	3	1
42	21/12/2015 1:38 PM	54	54.457	0.457	0.261		5	3	1
42	21/12/2015 1:39 PM	54	53.428	0.572	0.296		5	3	1
42	21/12/2015 1:40 PM	54	54.612	0.612	0.295		5	3	1
42	21/12/2015 1:41 PM	54	53.434	0.566	0.412		5	3	1
42	21/12/2015 1:42 PM	54	54.973	0.973	0.488		5	3	1
42	21/12/2015 1:43 PM	54	54.002	0.002			5	3	1

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
43	24/12/2015 3:33 PM	56	56.509	0.509	0.286	0.380	5	3	0
43	24/12/2015 3:34 PM	56	56.064	0.064	0.261		5	3	0
43	24/12/2015 3:35 PM	56	56.458	0.458	0.524		5	3	0
43	24/12/2015 3:36 PM	56	56.591	0.591	0.714		5	3	0
43	24/12/2015 3:37 PM	56	56.326	1.716	0.870		5	3	0
43	24/12/2015 3:38 PM	56	55.975	0.025	0.254		5	3	0
43	24/12/2015 3:39 PM	56	56.530	0.530	0.240		5	3	0
43	24/12/2015 3:40 PM	56	55.938	0.062	0.263		5	3	0
43	24/12/2015 3:41 PM	56	56.575	0.575	0.328		5	3	0
43	24/12/2015 3:42 PM	56	56.081	0.081	0.059		5	3	0
43	24/12/2015 3:43 PM	56	56.036	0.036			5	3	0
44	21/12/2015 2:06 PM	54	53.549	0.451	0.249		0.256	5	3
44	21/12/2015 2:07 PM	54	54.536	0.536	0.248	5		3	1
44	21/12/2015 2:08 PM	54	53.951	0.049	0.056	5		3	1
44	21/12/2015 2:09 PM	54	54.134	0.134	0.241	5		3	1
44	21/12/2015 2:10 PM	54	54.348	0.348	0.144	5		3	1
44	21/12/2015 2:11 PM	54	53.837	0.163	0.369	5		3	1
44	21/12/2015 2:12 PM	54	54.848	0.848	0.352	5		3	1
44	21/12/2015 2:13 PM	54	53.686	0.314	0.291	5		3	1
44	21/12/2015 2:14 PM	54	54.701	0.701	0.298	5		3	1
44	21/12/2015 2:15 PM	54	53.580	0.420	0.312	5		3	1
44	21/12/2015 2:16 PM	54	54.740	0.740		5		3	1
45	21/12/2015 2:26 PM	56	56.195	0.195	0.254	0.223		5	350
45	21/12/2015 2:27 PM	56	56.313	0.313	0.750		5	350	1
45	21/12/2015 2:28 PM	56	54.284	1.716	0.785		5	350	1
45	21/12/2015 2:29 PM	56	56.180	0.180	0.084		5	350	1
45	21/12/2015 2:30 PM	56	55.985	0.015	0.043		5	350	1
45	21/12/2015 2:31 PM	56	56.096	0.096	0.051		5	350	1
45	21/12/2015 2:32 PM	56	56.006	0.006	0.021		5	350	1
45	21/12/2015 2:33 PM	56	56.036	0.036	0.048		5	350	1
45	21/12/2015 2:34 PM	56	56.059	0.059	0.096		5	350	1
45	21/12/2015 2:35 PM	56	56.133	0.133	0.102		5	350	1
45	21/12/2015 2:36 PM	56	55.757	0.243			5	350	1

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
46	21/12/2015 2:47 PM	54	54.361	0.361	0.322	0.173	1	350	0
46	21/12/2015 2:48 PM	54	54.284	0.284	0.196		1	350	0
46	21/12/2015 2:49 PM	54	54.107	0.107	0.090		1	350	0
46	21/12/2015 2:50 PM	54	53.783	0.217	0.211		1	350	0
46	21/12/2015 2:51 PM	54	53.794	0.206	0.156		1	350	0
46	21/12/2015 2:52 PM	54	53.894	0.106	0.080		1	350	0
46	21/12/2015 2:53 PM	54	54.190	0.190	0.167		1	350	0
46	21/12/2015 2:54 PM	54	54.144	0.144	0.121		1	350	0
46	21/12/2015 2:55 PM	54	54.098	0.098	0.087		1	350	0
46	21/12/2015 2:56 PM	54	53.790	0.210	0.300		1	350	0
46	21/12/2015 2:57 PM	54	53.609	0.391			1	350	0
47	21/12/2015 3:04 PM	56	56.765	0.765	0.317		0.307	5	3
47	21/12/2015 3:05 PM	56	55.711	0.289	0.167	5		3	1
47	21/12/2015 3:06 PM	56	56.369	0.369	0.343	5		3	1
47	21/12/2015 3:07 PM	56	56.316	0.316	0.138	5		3	1
47	21/12/2015 3:08 PM	56	55.941	0.059	0.211	5		3	1
47	21/12/2015 3:09 PM	56	56.467	0.467	0.194	5		3	1
47	21/12/2015 3:10 PM	56	55.772	0.228	0.374	5		3	1
47	21/12/2015 3:11 PM	56	56.883	0.883	0.378	5		3	1
47	21/12/2015 3:12 PM	56	55.450	0.550	0.474	5		3	1
47	21/12/2015 3:13 PM	56	57.139	1.139	0.477	5		3	1
47	21/12/2015 3:14 PM	56	55.387	0.613		5		3	1
48	6/1/2015 6:59 PM	54	54.405	0.405	0.197	0.393		1	3
48	6/1/2015 7:00 PM	54	53.616	0.384	0.374		1	3	1
48	6/1/2015 7:01 PM	54	54.902	0.902	0.633		1	3	1
48	6/1/2015 7:02 PM	54	54.364	0.364	0.203		1	3	1
48	6/1/2015 7:03 PM	54	53.560	0.440	0.409		1	3	1
48	6/1/2015 7:04 PM	54	54.987	0.987	0.870		1	3	1
48	6/1/2015 7:05 PM	54	54.753	0.753	0.568		1	3	1
48	6/1/2015 7:06 PM	54	54.383	0.383	0.160		1	3	1
48	6/1/2015 7:07 PM	54	53.878	0.122	0.098		1	3	1
48	6/1/2015 7:08 PM	54	54.234	0.234	0.412		1	3	1
48	6/1/2015 7:09 PM	54	54.590	0.590			1	3	1

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
49	21/12/2015 3:58 PM	56	55.817	0.183	0.078	0.200	5	350	1
49	21/12/2015 3:59 PM	56	56.043	0.043	0.080		5	350	1
49	21/12/2015 4:00 PM	56	56.118	0.118	0.069		5	350	1
49	21/12/2015 4:01 PM	56	56.020	0.020	0.105		5	350	1
49	21/12/2015 4:02 PM	56	55.773	0.227	0.290		5	350	1
49	21/12/2015 4:03 PM	56	55.646	0.354	0.402		5	350	1
49	21/12/2015 4:04 PM	56	55.550	0.450	0.361		5	350	1
49	21/12/2015 4:05 PM	56	55.727	0.273	0.141		5	350	1
49	21/12/2015 4:06 PM	56	55.990	0.010	0.027		5	350	1
49	21/12/2015 4:07 PM	56	56.061	0.061	0.446		5	350	1
49	21/12/2015 4:08 PM	56	55.054	0.946			5	350	1
50	21/12/2015 4:26 PM	54	53.343	0.657	0.303	0.392	1	3	1
50	21/12/2015 4:27 PM	54	54.062	0.062	0.558		1	3	0
50	21/12/2015 4:28 PM	54	55.054	1.054	0.442		1	3	0
50	21/12/2015 4:29 PM	54	53.435	0.565	0.306		1	3	0
50	21/12/2015 4:30 PM	54	53.953	0.047	0.551		1	3	0
50	21/12/2015 4:31 PM	54	55.145	1.145	0.501		1	3	0
50	21/12/2015 4:32 PM	54	53.794	0.206	0.140		1	3	0
50	21/12/2015 4:33 PM	54	53.925	0.075	0.391		1	3	0
50	21/12/2015 4:34 PM	54	54.844	0.844	0.393		1	3	0
50	21/12/2015 4:35 PM	54	53.283	0.717	0.333		1	3	0
50	21/12/2015 4:36 PM	54	54.059	0.059			1	3	0
51	21/12/2015 4:46 PM	56	55.506	0.494	0.344	0.243	5	3	1
51	21/12/2015 4:47 PM	56	56.808	0.808	0.344		5	3	1
51	21/12/2015 4:48 PM	56	55.510	0.490	0.284		5	3	1
51	21/12/2015 4:49 PM	56	56.630	0.630	0.305		5	3	1
51	21/12/2015 4:50 PM	56	55.411	0.589	0.304		5	3	1
51	21/12/2015 4:51 PM	56	56.625	0.625	0.307		5	3	1
51	21/12/2015 4:52 PM	56	55.990	0.010	0.031		5	3	1
51	21/12/2015 4:53 PM	56	56.069	0.069	0.205		5	3	1
51	21/12/2015 4:54 PM	56	56.342	0.342	0.163		5	3	1
51	21/12/2015 4:55 PM	56	55.982	0.018	0.140		5	3	1
51	21/12/2015 4:56 PM	56	56.296	0.296			5	3	1

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
52	21/12/2015 5:06 PM	54	54.962	0.962	0.415	0.294	1	3	0
52	21/12/2015 5:07 PM	54	53.369	0.631	0.616		1	3	0
52	21/12/2015 5:08 PM	54	53.400	0.600	0.292		1	3	0
52	21/12/2015 5:09 PM	54	54.565	0.565	0.937		1	3	0
52	21/12/2015 5:10 PM	54	55.310	1.310	0.677		1	3	0
52	21/12/2015 5:11 PM	54	53.164	0.044	0.215		1	3	0
52	21/12/2015 5:12 PM	54	53.533	0.467	0.363		1	3	0
52	21/12/2015 5:13 PM	54	54.866	0.866	0.738		1	3	0
52	21/12/2015 5:14 PM	54	54.610	0.610	0.372		1	3	0
52	21/12/2015 5:15 PM	54	53.158	0.842	0.465		1	3	0
52	21/12/2015 5:16 PM	54	53.913	0.087		1	3	0	
53	21/12/2015 5:30 PM	56	56.403	0.403	0.395	0.256	5	350	0
53	21/12/2015 5:31 PM	56	56.387	0.387	0.346		5	350	0
53	21/12/2015 5:32 PM	56	56.305	0.305	0.367		5	350	0
53	21/12/2015 5:33 PM	56	56.428	0.428	0.324		5	350	0
53	21/12/2015 5:34 PM	56	56.219	0.219	0.236		5	350	0
53	21/12/2015 5:35 PM	56	56.252	0.252	0.194		5	350	0
53	21/12/2015 5:36 PM	56	56.135	0.135	0.144		5	350	0
53	21/12/2015 5:37 PM	56	56.153	0.153	0.189		5	350	0
53	21/12/2015 5:38 PM	56	56.225	0.225	0.192		5	350	0
53	21/12/2015 5:39 PM	56	56.160	0.160	0.171		5	350	0
53	21/12/2015 5:40 PM	56	56.183	0.183		5	350	0	
54	21/12/2015 5:50 PM	54	53.854	0.146	0.230	0.132	1	350	0
54	21/12/2015 5:51 PM	54	53.686	0.314	0.224		1	350	0
54	21/12/2015 5:52 PM	54	53.866	0.134	0.056		1	350	0
54	21/12/2015 5:53 PM	54	54.044	0.044	0.163		1	350	0
54	21/12/2015 5:54 PM	54	54.283	0.283	0.200		1	350	0
54	21/12/2015 5:55 PM	54	54.118	0.118	0.069		1	350	0
54	21/12/2015 5:56 PM	54	54.020	0.020	0.038		1	350	0
54	21/12/2015 5:57 PM	54	53.912	0.088	0.069		1	350	0
54	21/12/2015 5:58 PM	54	54.166	0.166	0.157		1	350	0
54	21/12/2015 5:59 PM	54	54.148	0.148	0.114		1	350	0
54	21/12/2015 6:00 PM	54	54.081	0.081		1	350	0	

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
55	21/12/2015 6:09 PM	56	56.169	0.169	0.314	0.233	5	3	1
55	21/12/2015 6:10 PM	56	56.458	0.458	0.190		5	3	1
55	21/12/2015 6:11 PM	56	55.791	0.209	0.160		5	3	1
55	21/12/2015 6:12 PM	56	56.381	0.381	0.300		5	3	1
55	21/12/2015 6:13 PM	56	56.220	0.220	0.314		5	3	1
55	21/12/2015 6:14 PM	56	56.408	0.408	0.183		5	3	1
55	21/12/2015 6:15 PM	56	55.686	0.314	0.246		5	3	1
55	21/12/2015 6:16 PM	56	56.587	0.587	0.244		5	3	1
55	21/12/2015 6:17 PM	56	55.791	0.209	0.174		5	3	1
55	21/12/2015 6:18 PM	56	56.419	0.419	0.206		5	3	1
55	21/12/2015 6:19 PM	56	55.992	0.008		5	3	1	
56	21/12/2015 6:29 PM	54	54.164	0.164	0.137	0.107	1	350	1
56	21/12/2015 6:30 PM	54	54.109	0.109	0.049		1	350	1
56	21/12/2015 6:31 PM	54	53.983	0.017	0.121		1	350	1
56	21/12/2015 6:32 PM	54	53.775	0.225	0.137		1	350	1
56	21/12/2015 6:33 PM	54	53.951	0.049	0.033		1	350	1
56	21/12/2015 6:34 PM	54	54.077	0.077	0.095		1	350	1
56	21/12/2015 6:35 PM	54	53.772	0.228	0.187		1	350	1
56	21/12/2015 6:36 PM	54	53.853	0.147	0.103		1	350	1
56	21/12/2015 6:37 PM	54	54.241	0.241	0.155		1	350	1
56	21/12/2015 6:38 PM	54	54.069	0.069	0.054		1	350	1
56	21/12/2015 6:39 PM	54	54.039	0.039		1	350	1	
57	21/12/2015 6:51 PM	56	56.287	0.287	0.196	0.330	1	3	1
57	21/12/2015 6:52 PM	56	55.541	0.459	0.305		1	3	1
57	21/12/2015 6:53 PM	56	56.707	0.707	0.296		1	3	1
57	21/12/2015 6:54 PM	56	55.618	0.382	0.206		1	3	1
57	21/12/2015 6:55 PM	56	56.438	0.438	0.541		1	3	1
57	21/12/2015 6:56 PM	56	56.643	0.643	0.279		1	3	1
57	21/12/2015 6:57 PM	56	55.566	0.434	0.345		1	3	1
57	21/12/2015 6:58 PM	56	56.826	0.826	0.508		1	3	1
57	21/12/2015 6:59 PM	56	56.190	0.190	0.189		1	3	1
57	21/12/2015 7:00 PM	56	55.543	0.457	0.432		1	3	1
57	21/12/2015 7:01 PM	56	57.043	1.043		1	3	1	

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
58	21/12/2015 7:11 PM	54	54.163	0.163	0.185	0.078	5	350	1
58	21/12/2015 7:12 PM	54	54.207	0.207	0.195		5	350	1
58	21/12/2015 7:13 PM	54	54.184	0.184	0.111		5	350	1
58	21/12/2015 7:14 PM	54	54.038	0.038	0.016		5	350	1
58	21/12/2015 7:15 PM	54	53.977	0.023	0.037		5	350	1
58	21/12/2015 7:16 PM	54	53.949	0.051	0.022		5	350	1
58	21/12/2015 7:17 PM	54	54.032	0.032	0.054		5	350	1
58	21/12/2015 7:18 PM	54	54.077	0.077	0.074		5	350	1
58	21/12/2015 7:19 PM	54	54.071	0.071	0.050		5	350	1
58	21/12/2015 7:20 PM	54	54.028	0.028	0.034		5	350	1
58	21/12/2015 7:21 PM	54	54.039	0.039			5	350	1
59	21/12/2015 7:31 PM	56	57.095	1.095	0.766	0.385	1	3	1
59	21/12/2015 7:32 PM	56	56.436	0.436	0.279		1	3	1
59	21/12/2015 7:33 PM	56	55.358	0.642	0.418		1	3	1
59	21/12/2015 7:34 PM	56	56.964	0.964	0.659		1	3	1
59	21/12/2015 7:35 PM	56	56.354	0.354	0.211		1	3	1
59	21/12/2015 7:36 PM	56	55.527	0.473	0.402		1	3	1
59	21/12/2015 7:37 PM	56	56.967	0.967	0.416		1	3	1
59	21/12/2015 7:38 PM	56	55.789	0.211	0.106		1	3	1
59	21/12/2015 7:39 PM	56	56.211	0.211	0.306		1	3	1
59	21/12/2015 7:40 PM	56	56.400	0.400	0.289		1	3	1
59	21/12/2015 7:41 PM	56	55.316	0.684			1	3	1
60	21/12/2015 7:52 PM	54	55.120	1.120	0.477	0.325	5	3	1
60	21/12/2015 7:52 PM	54	53.325	0.675	0.444		5	3	1
60	21/12/2015 7:52 PM	54	55.027	1.027	0.426		5	3	1
60	21/12/2015 7:52 PM	54	53.618	0.382	0.216		5	3	1
60	21/12/2015 7:52 PM	54	54.472	0.472	0.334		5	3	1
60	21/12/2015 7:52 PM	54	54.196	0.196	0.094		5	3	1
60	21/12/2015 7:52 PM	54	53.990	0.010	0.176		5	3	1
60	21/12/2015 7:52 PM	54	54.361	0.361	0.159		5	3	1
60	21/12/2015 7:52 PM	54	53.745	0.255	0.470		5	3	1
60	21/12/2015 7:52 PM	54	55.099	1.099	0.455		5	3	1
60	21/12/2015 7:52 PM	54	53.546	0.454			5	3	1

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
61	21/12/2015 8:11 PM	56	56.349	0.349	0.151	0.364	5	3	1
61	21/12/2015 8:12 PM	56	55.768	0.232	0.387		5	3	1
61	21/12/2015 8:13 PM	56	56.912	0.912	0.397		5	3	1
61	21/12/2015 8:14 PM	56	55.380	0.620	0.538		5	3	1
61	21/12/2015 8:15 PM	56	57.294	1.294	0.537		5	3	1
61	21/12/2015 8:16 PM	56	55.402	0.598	0.532		5	3	1
61	21/12/2015 8:17 PM	56	56.697	1.281	0.531		5	3	1
61	21/12/2015 8:18 PM	56	55.435	0.565	0.274		5	3	1
61	21/12/2015 8:19 PM	56	56.528	0.528	0.231		5	3	1
61	21/12/2015 8:20 PM	56	55.903	0.097	0.067		5	3	1
61	21/12/2015 8:21 PM	56	56.157	0.157			5	3	1
62	22/12/2015 8:25 AM	54	53.903	0.097	0.055	0.024	3	177	0.5
62	22/12/2015 8:26 AM	54	53.987	0.013	0.022		3	177	0.5
62	22/12/2015 8:27 AM	54	53.969	0.031	0.017		3	177	0.5
62	22/12/2015 8:28 AM	54	54.037	0.037	0.039		3	177	0.5
62	22/12/2015 8:29 AM	54	54.042	0.042	0.017		3	177	0.5
62	22/12/2015 8:30 AM	54	53.987	0.013	0.012		3	177	0.5
62	22/12/2015 8:31 AM	54	54.029	0.029	0.023		3	177	0.5
62	22/12/2015 8:32 AM	54	53.946	0.054	0.023		3	177	0.5
62	22/12/2015 8:33 AM	54	54.017	0.017	0.012		3	177	0.5
62	22/12/2015 8:34 AM	54	53.971	0.029	0.019		3	177	0.5
62	22/12/2015 8:35 AM	54	54.044	0.044			3	177	0.5
63	22/12/2015 8:44 AM	56	56.513	0.513	0.442	0.446	1	3	1
63	22/12/2015 8:45 AM	56	56.372	0.372	0.295		1	3	1
63	22/12/2015 8:46 AM	56	55.295	0.705	0.298		1	3	1
63	22/12/2015 8:47 AM	56	56.406	0.406	0.844		1	3	1
63	22/12/2015 8:48 AM	56	57.281	1.281	0.539		1	3	1
63	22/12/2015 8:49 AM	56	55.638	0.362	0.234		1	3	1
63	22/12/2015 8:50 AM	56	55.893	0.107	0.436		1	3	1
63	22/12/2015 8:51 AM	56	56.957	0.957	0.420		1	3	1
63	22/12/2015 8:52 AM	56	55.329	0.671	0.395		1	3	1
63	22/12/2015 8:53 AM	56	55.880	0.120	0.556		1	3	1
63	22/12/2015 8:54 AM	56	57.210	1.210			1	3	1

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
64	22/12/2015 9:04 AM	54	54.114	0.114	0.047	0.152	3	177	0.5
64	22/12/2015 9:05 AM	54	53.948	0.052	0.022		3	177	0.5
64	22/12/2015 9:06 AM	54	54.022	0.022	0.027		3	177	0.5
64	22/12/2015 9:07 AM	54	54.175	0.031	0.048		3	177	0.5
64	22/12/2015 9:08 AM	54	53.920	0.113	0.133		3	177	0.5
64	22/12/2015 9:09 AM	54	54.023	0.152	0.069		3	177	0.5
64	22/12/2015 9:10 AM	54	53.840	0.017	0.033		3	177	0.5
64	22/12/2015 9:11 AM	54	54.195	0.049	0.021		3	177	0.5
64	22/12/2015 9:12 AM	54	53.921	0.015	0.404		3	177	0.5
64	22/12/2015 9:13 AM	54	53.976	0.822	0.713		3	177	0.5
64	22/12/2015 9:14 AM	54	53.976	0.603		3	177	0.5	
65	22/12/2015 9:25 AM	56	56.002	0.387	0.367	0.008	5	350	0
65	22/12/2015 9:26 AM	56	56.036	0.348	0.229		5	350	0
65	22/12/2015 9:27 AM	56	56.110	0.110	0.063		5	350	0
65	22/12/2015 9:28 AM	56	56.015	0.015	0.040		5	350	0
65	22/12/2015 9:29 AM	56	56.066	0.066	0.029		5	350	0
65	22/12/2015 9:30 AM	56	55.987	0.013	0.007		5	350	0
65	22/12/2015 9:31 AM	56	56.014	0.014	0.010		5	350	0
65	22/12/2015 9:32 AM	56	55.977	0.023	0.016		5	350	0
65	22/12/2015 9:33 AM	56	56.036	0.036	0.033		5	350	0
65	22/12/2015 9:34 AM	56	56.030	0.030	0.020		5	350	0
65	22/12/2015 9:35 AM	56	56.009	0.009		5	350	0	
66	22/12/2015 9:45 AM	54	54.302	0.302	0.744	0.502	1	3	0
66	22/12/2015 9:46 AM	54	55.186	1.186	0.491		1	3	0
66	22/12/2015 9:47 AM	54	53.479	0.521	0.314		1	3	0
66	22/12/2015 9:48 AM	54	53.894	0.106	0.390		1	3	0
66	22/12/2015 9:49 AM	54	54.863	0.863	0.383		1	3	0
66	22/12/2015 9:50 AM	54	53.369	0.631	0.578		1	3	0
66	22/12/2015 9:51 AM	54	53.475	0.525	0.343		1	3	0
66	22/12/2015 9:52 AM	54	54.791	0.791	0.867		1	3	0
66	22/12/2015 9:53 AM	54	54.943	0.943	0.487		1	3	0
66	22/12/2015 9:54 AM	54	52.997	1.003	0.428		1	3	0
66	22/12/2015 9:55 AM	54	54.622	0.622		1	3	0	

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
67	22/12/2015 10:04 AM	56	56.222	0.222	0.769	0.525	1	3	0
67	22/12/2015 10:05 AM	56	57.316	1.316	0.601		1	3	0
67	22/12/2015 10:06 AM	56	55.859	0.141	0.360		1	3	0
67	22/12/2015 10:07 AM	56	55.420	0.580	0.290		1	3	0
67	22/12/2015 10:08 AM	56	56.581	0.581	0.620		1	3	0
67	22/12/2015 10:09 AM	56	56.659	0.659	0.424		1	3	0
67	22/12/2015 10:10 AM	56	55.024	0.976	0.517		1	3	0
67	22/12/2015 10:11 AM	56	55.942	0.058	0.591		1	3	0
67	22/12/2015 10:12 AM	56	57.235	1.235	0.763		1	3	0
67	22/12/2015 10:13 AM	56	56.291	0.291	0.311		1	3	0
67	22/12/2015 10:14 AM	56	55.250	0.750			1	3	0
68	22/12/2015 10:24 AM	54	54.545	0.545	0.720	0.289	1	350	1
68	22/12/2015 10:25 AM	54	54.896	0.896	0.682		1	350	1
68	22/12/2015 10:26 AM	54	54.469	0.469	0.393		1	350	1
68	22/12/2015 10:27 AM	54	54.316	0.316	0.180		1	350	1
68	22/12/2015 10:28 AM	54	54.044	0.044	0.044		1	350	1
68	22/12/2015 10:29 AM	54	53.894	0.106	0.071		1	350	1
68	22/12/2015 10:30 AM	54	54.164	0.164	0.265		1	350	1
68	22/12/2015 10:31 AM	54	54.365	0.365	0.214		1	350	1
68	22/12/2015 10:32 AM	54	54.062	0.062	0.080		1	350	1
68	22/12/2015 10:33 AM	54	54.099	0.099	0.245		1	350	1
68	22/12/2015 10:34 AM	54	54.391	0.391			1	350	1
69	22/12/2015 10:42 AM	56	56.032	0.032	0.051	0.043	5	350	0
69	22/12/2015 10:43 AM	56	56.069	0.069	0.063		5	350	0
69	22/12/2015 10:44 AM	56	56.056	0.056	0.035		5	350	0
69	22/12/2015 10:45 AM	56	55.919	0.081	0.071		5	350	0
69	22/12/2015 10:46 AM	56	55.940	0.060	0.025		5	350	0
69	22/12/2015 10:47 AM	56	56.024	0.024	0.029		5	350	0
69	22/12/2015 10:48 AM	56	56.033	0.033	0.022		5	350	0
69	22/12/2015 10:49 AM	56	56.011	0.011	0.036		5	350	0
69	22/12/2015 10:50 AM	56	55.920	0.080	0.039		5	350	0
69	22/12/2015 10:51 AM	56	56.002	0.002	0.057		5	350	0
69	22/12/2015 10:52 AM	56	55.885	0.115			5	350	0

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
70	22/12/2015 11:04 AM	54	53.926	0.074	0.138	0.147	5	3	0
70	22/12/2015 11:05 AM	54	54.322	0.322	0.134		5	3	0
70	22/12/2015 11:06 AM	54	53.894	0.106	0.151		5	3	0
70	22/12/2015 11:07 AM	54	54.360	0.360	0.185		5	3	0
70	22/12/2015 11:08 AM	54	54.010	0.010	0.148		5	3	0
70	22/12/2015 11:09 AM	54	54.287	0.287	0.119		5	3	0
70	22/12/2015 11:10 AM	54	53.866	0.134	0.118		5	3	0
70	22/12/2015 11:11 AM	54	54.382	0.103	0.177		5	3	0
70	22/12/2015 11:12 AM	54	53.749	0.251	0.136		5	3	0
70	22/12/2015 11:13 AM	54	54.289	0.289	0.160		5	3	0
70	22/12/2015 11:14 AM	54	54.031	0.031			5	3	0
71	22/12/2015 11:22 AM	56	56.001	0.001	0.015	0.182	1	350	0
71	22/12/2015 11:23 AM	56	55.970	0.030	0.098		1	350	0
71	22/12/2015 11:24 AM	56	55.833	0.167	0.128		1	350	0
71	22/12/2015 11:25 AM	56	55.911	0.089	0.050		1	350	0
71	22/12/2015 11:26 AM	56	55.989	0.011	0.118		1	350	0
71	22/12/2015 11:27 AM	56	56.245	0.245	0.383		1	350	0
71	22/12/2015 11:28 AM	56	56.521	0.521	0.497		1	350	0
71	22/12/2015 11:29 AM	56	56.473	0.473	0.336		1	350	0
71	22/12/2015 11:30 AM	56	56.199	0.199	0.083		1	350	0
71	22/12/2015 11:31 AM	56	55.896	0.104	0.109		1	350	0
71	22/12/2015 11:32 AM	56	55.887	0.113			1	350	0
72	22/12/2015 11:45 AM	54	54.604	0.604	0.250	0.317	5	3	0
72	22/12/2015 11:46 AM	54	53.735	0.265	0.197		5	3	0
72	22/12/2015 11:47 AM	54	54.468	0.468	0.215		5	3	0
72	22/12/2015 11:48 AM	54	53.955	0.045	0.259		5	3	0
72	22/12/2015 11:49 AM	54	54.557	0.557	0.243		5	3	0
72	22/12/2015 11:50 AM	54	53.897	0.103	0.403		5	3	0
72	22/12/2015 11:51 AM	54	54.888	0.888	0.384		5	3	0
72	22/12/2015 11:52 AM	54	53.416	0.584	0.428		5	3	0
72	22/12/2015 11:53 AM	54	55.012	1.012	0.428		5	3	0
72	22/12/2015 11:54 AM	54	53.412	0.588	0.363		5	3	0
72	22/12/2015 11:55 AM	54	54.824	0.824			5	3	0

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D	
73	22/12/2015 12:04 PM	56	56.011	0.011	0.270	0.491	1	3	1	
73	22/12/2015 12:05 PM	56	55.450	0.550	0.260		1	3	1	
73	22/12/2015 12:06 PM	56	56.484	0.484	0.512		1	3	1	
73	22/12/2015 12:07 PM	56	56.540	0.540	0.359		1	3	1	
73	22/12/2015 12:08 PM	56	55.168	0.832	0.362		1	3	1	
73	22/12/2015 12:09 PM	56	56.158	0.158	0.731		1	3	1	
73	22/12/2015 12:10 PM	56	57.304	1.304	0.542		1	3	1	
73	22/12/2015 12:11 PM	56	55.530	0.470	0.584		1	3	1	
73	22/12/2015 12:12 PM	56	55.301	0.699	0.314		1	3	1	
73	22/12/2015 12:13 PM	56	56.537	0.537	0.972		1	3	1	
73	22/12/2015 12:14 PM	56	57.407	1.407			1	3	1	
74	22/12/2015 12:50 PM	54	54.189	0.189	0.211		0.104	5	350	0
74	22/12/2015 12:51 PM	54	54.233	0.233	0.117			5	350	0
74	22/12/2015 12:52 PM	54	54.000	0.000	0.015	5		350	0	
74	22/12/2015 12:53 PM	54	54.029	0.029	0.075	5		350	0	
74	22/12/2015 12:54 PM	54	53.830	0.170	0.183	5		350	0	
74	22/12/2015 12:55 PM	54	53.805	0.195	0.102	5		350	0	
74	22/12/2015 12:56 PM	54	53.991	0.009	0.023	5		350	0	
74	22/12/2015 12:57 PM	54	53.962	0.038	0.059	5		350	0	
74	22/12/2015 12:58 PM	54	53.920	0.080	0.065	5		350	0	
74	22/12/2015 12:59 PM	54	54.156	0.156	0.189	5		350	0	
74	22/12/2015 1:00 PM	54	54.222	0.222		5		350	0	
75	6/1/2016 7:20 PM	56	55.941	0.059	0.026	0.331		1	3	0
75	6/1/2016 7:21 PM	56	56.043	0.043	0.487			1	3	0
75	6/1/2016 7:22 PM	56	56.932	0.932	0.704		1	3	0	
75	6/1/2016 7:23 PM	56	56.477	0.477	0.198		1	3	0	
75	6/1/2016 7:24 PM	56	55.821	0.179	0.249		1	3	0	
75	6/1/2016 7:25 PM	56	56.595	0.595	0.562		1	3	0	
75	6/1/2016 7:26 PM	56	56.529	0.529	0.220		1	3	0	
75	6/1/2016 7:27 PM	56	55.821	0.179	0.133		1	3	0	
75	6/1/2016 7:28 PM	56	56.316	0.316	0.470		1	3	0	
75	6/1/2016 7:29 PM	56	56.624	0.624	0.259		1	3	0	
75	6/1/2016 7:30 PM	56	55.753	0.247			1	3	0	

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
76	24/12/2015 4:01 PM	54	54.040	0.040	0.063	0.054	5	350	1
76	24/12/2015 4:02 PM	54	54.086	0.086	0.049		5	350	1
76	24/12/2015 4:03 PM	54	53.893	0.107	0.051		5	350	1
76	24/12/2015 4:04 PM	54	54.095	0.095	0.049		5	350	1
76	24/12/2015 4:05 PM	54	53.899	0.101	0.076		5	350	1
76	24/12/2015 4:06 PM	54	53.949	0.051	0.083		5	350	1
76	24/12/2015 4:07 PM	54	53.886	0.114	0.047		5	350	1
76	24/12/2015 4:08 PM	54	54.045	0.045	0.021		5	350	1
76	24/12/2015 4:09 PM	54	53.998	0.002	0.053		5	350	1
76	24/12/2015 4:10 PM	54	54.107	0.107	0.046		5	350	1
76	24/12/2015 4:11 PM	54	53.934	0.066			5	350	1
77	24/12/2015 4:25 PM	56	56.161	0.161	0.125	0.351	1	3	0
77	24/12/2015 4:26 PM	56	55.701	0.299	0.377		1	3	0
77	24/12/2015 4:27 PM	56	56.904	0.904	0.792		1	3	0
77	24/12/2015 4:28 PM	56	56.680	0.680	0.489		1	3	0
77	24/12/2015 4:29 PM	56	56.298	0.298	0.143		1	3	0
77	24/12/2015 4:30 PM	56	55.726	0.274	0.303		1	3	0
77	24/12/2015 4:31 PM	56	56.732	0.732	0.559		1	3	0
77	24/12/2015 4:32 PM	56	56.386	0.386	0.173		1	3	0
77	24/12/2015 4:33 PM	56	55.947	0.053	0.114		1	3	0
77	24/12/2015 4:34 PM	56	56.264	0.264	0.434		1	3	0
77	24/12/2015 4:35 PM	56	56.604	0.604			1	3	0
78	24/12/2015 4:48 PM	54	53.772	0.228	0.166	0.112	1	350	1
78	24/12/2015 4:49 PM	54	53.896	0.104	0.159		1	350	1
78	24/12/2015 4:50 PM	54	53.785	0.215	0.122		1	350	1
78	24/12/2015 4:51 PM	54	53.971	0.029	0.088		1	350	1
78	24/12/2015 4:52 PM	54	53.854	0.146	0.063		1	350	1
78	24/12/2015 4:53 PM	54	54.030	0.030	0.104		1	350	1
78	24/12/2015 4:54 PM	54	53.768	0.232	0.140		1	350	1
78	24/12/2015 4:55 PM	54	53.953	0.047	0.083		1	350	1
78	24/12/2015 4:56 PM	54	53.881	0.119	0.132		1	350	1
78	24/12/2015 4:57 PM	54	53.854	0.146	0.067		1	350	1
78	24/12/2015 4:58 PM	54	54.120	0.120			1	350	1

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
79	24/12/2015 5:15 PM	56	55.842	0.158	0.102	0.086	3	177	0.5
79	24/12/2015 5:16 PM	56	55.954	0.046	0.044		3	177	0.5
79	24/12/2015 5:17 PM	56	56.105	0.105	0.047		3	177	0.5
79	24/12/2015 5:18 PM	56	55.923	0.077	0.142		3	177	0.5
79	24/12/2015 5:19 PM	56	55.793	0.207	0.103		3	177	0.5
79	24/12/2015 5:20 PM	56	56.002	0.002	0.024		3	177	0.5
79	24/12/2015 5:21 PM	56	56.046	0.046	0.096		3	177	0.5
79	24/12/2015 5:22 PM	56	56.146	0.146	0.119		3	177	0.5
79	24/12/2015 5:23 PM	56	55.909	0.091	0.087		3	177	0.5
79	24/12/2015 5:24 PM	56	56.083	0.083	0.102		3	177	0.5
79	24/12/2015 5:25 PM	56	56.121	0.121			3	177	0.5
80	22/12/2016 7:39 PM	54	54.062	0.062	0.113		0.311	1	3
80	22/12/2016 7:40 PM	54	53.737	0.263	0.371	1		3	1
80	22/12/2016 7:41 PM	54	54.885	0.885	0.586	1		3	1
80	22/12/2016 7:42 PM	54	54.286	0.286	0.123	1		3	1
80	22/12/2016 7:43 PM	54	53.816	0.184	0.244	1		3	1
80	22/12/2016 7:44 PM	54	54.583	0.583	0.417	1		3	1
80	22/12/2016 7:45 PM	54	54.251	0.251	0.175	1		3	1
80	22/12/2016 7:46 PM	54	53.589	0.411	0.359	1		3	1
80	22/12/2016 7:47 PM	54	54.864	0.864	0.586	1		3	1
80	22/12/2016 7:48 PM	54	54.307	0.307	0.139	1		3	1
80	22/12/2016 7:49 PM	54	53.760	0.240		1		3	1
81	22/12/2016 7:58 PM	56	55.783	0.217	0.164	0.144		1	350
81	22/12/2016 7:59 PM	56	55.890	0.110	0.099		1	350	0
81	22/12/2016 8:00 PM	56	55.913	0.087	0.224		1	350	0
81	22/12/2016 8:01 PM	56	55.639	0.361	0.184		1	350	0
81	22/12/2016 8:02 PM	56	55.992	0.008	0.176		1	350	0
81	22/12/2016 8:03 PM	56	55.656	0.344	0.144		1	350	0
81	22/12/2016 8:04 PM	56	56.101	0.101	0.145		1	350	0
81	22/12/2016 8:05 PM	56	55.654	0.346	0.157		1	350	0
81	22/12/2016 8:06 PM	56	56.042	0.042	0.072		1	350	0
81	22/12/2016 8:07 PM	56	55.830	0.170	0.074		1	350	0
81	22/12/2016 8:08 PM	56	56.117	0.117			1	350	0

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
82	24/12/2015 8:18 AM	54	53.891	0.109	0.133	0.064	3	177	0.5
82	24/12/2015 8:19 AM	54	53.843	0.157	0.065		3	177	0.5
82	24/12/2015 8:20 AM	54	54.064	0.064	0.034		3	177	0.5
82	24/12/2015 8:21 AM	54	53.927	0.073	0.040		3	177	0.5
82	24/12/2015 8:22 AM	54	54.086	0.086	0.059		3	177	0.5
82	24/12/2015 8:23 AM	54	54.031	0.031	0.048		3	177	0.5
82	24/12/2015 8:24 AM	54	53.887	0.113	0.133		3	177	0.5
82	24/12/2015 8:25 AM	54	53.848	0.152	0.069		3	177	0.5
82	24/12/2015 8:26 AM	54	54.017	0.017	0.033		3	177	0.5
82	24/12/2015 8:27 AM	54	54.049	0.049	0.021		3	177	0.5
82	24/12/2015 8:28 AM	54	53.985	0.015			3	177	0.5
83	24/12/2015 8:43 AM	56	56.822	0.822	0.713	0.388	1	3	1
83	24/12/2015 8:44 AM	56	56.603	0.603	0.495		1	3	1
83	24/12/2015 8:45 AM	56	56.387	0.387	0.367		1	3	1
83	24/12/2015 8:46 AM	56	56.348	0.348	0.243		1	3	1
83	24/12/2015 8:47 AM	56	56.138	0.138	0.064		1	3	1
83	24/12/2015 8:48 AM	56	55.884	0.116	0.124		1	3	1
83	24/12/2015 8:49 AM	56	56.299	0.299	0.553		1	3	1
83	24/12/2015 8:50 AM	56	56.807	0.807	0.649		1	3	1
83	24/12/2015 8:51 AM	56	56.491	0.491	0.433		1	3	1
83	24/12/2015 8:52 AM	56	56.375	0.375	0.237		1	3	1
83	24/12/2015 8:53 AM	56	56.099	0.099			1	3	1
84	24/12/2015 9:03 AM	54	53.793	0.207	0.311	0.424	1	3	0
84	24/12/2015 9:04 AM	54	54.738	0.738	0.612		1	3	0
84	24/12/2015 9:05 AM	54	54.485	0.485	0.322		1	3	0
84	24/12/2015 9:06 AM	54	54.158	0.158	0.100		1	3	0
84	24/12/2015 9:07 AM	54	54.042	0.042	0.050		1	3	0
84	24/12/2015 9:08 AM	54	53.881	0.119	0.194		1	3	0
84	24/12/2015 9:09 AM	54	54.458	0.458	0.658		1	3	0
84	24/12/2015 9:10 AM	54	54.858	0.858	0.792		1	3	0
84	24/12/2015 9:11 AM	54	54.727	0.727	0.691		1	3	0
84	24/12/2015 9:12 AM	54	54.655	0.655	0.513		1	3	0
84	24/12/2015 9:13 AM	54	54.372	0.372			1	3	0

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
85	24/12/2015 9:27 AM	56	56.117	0.117	0.065	0.080	5	350	0
85	24/12/2015 9:28 AM	56	55.859	0.141	0.116		5	350	0
85	24/12/2015 9:29 AM	56	56.278	0.278	0.197		5	350	0
85	24/12/2015 9:30 AM	56	56.116	0.116	0.048		5	350	0
85	24/12/2015 9:31 AM	56	55.944	0.056	0.025		5	350	0
85	24/12/2015 9:32 AM	56	56.041	0.041	0.046		5	350	0
85	24/12/2015 9:33 AM	56	56.052	0.052	0.130		5	350	0
85	24/12/2015 9:34 AM	56	56.208	0.208	0.115		5	350	0
85	24/12/2015 9:35 AM	56	56.021	0.021	0.014		5	350	0
85	24/12/2015 9:36 AM	56	55.967	0.033	0.048		5	350	0
85	24/12/2015 9:37 AM	56	55.936	0.064		5	350	0	
86	24/12/2015 9:51 AM	54	53.959	0.041	0.017	0.059	5	350	0
86	24/12/2015 9:52 AM	54	54.019	0.019	0.034		5	350	0
86	24/12/2015 9:53 AM	54	54.049	0.049	0.031		5	350	0
86	24/12/2015 9:54 AM	54	54.012	0.012	0.052		5	350	0
86	24/12/2015 9:55 AM	55	55.091	0.091	0.073		5	350	0
86	24/12/2015 9:56 AM	55	55.054	0.054	0.042		5	350	0
86	24/12/2015 9:57 AM	55	54.900	0.100	0.085		5	350	0
86	24/12/2015 9:58 AM	55	54.930	0.070	0.091		5	350	0
86	24/12/2015 9:59 AM	55	54.888	0.112	0.056		5	350	0
86	24/12/2015 10:00 AM	55	55.112	0.112	0.108		5	350	0
86	24/12/2015 10:01 AM	55	55.104	0.104		5	350	0	
87	24/12/2015 10:28 AM	56	56.044	0.044	0.041	0.044	1	350	1
87	24/12/2015 10:29 AM	56	55.901	0.099	0.041		1	350	1
87	24/12/2015 10:30 AM	56	56.049	0.049	0.022		1	350	1
87	24/12/2015 10:31 AM	56	55.965	0.035	0.053		1	350	1
87	24/12/2015 10:32 AM	56	55.929	0.071	0.058		1	350	1
87	24/12/2015 10:33 AM	56	56.139	0.139	0.068		1	350	1
87	24/12/2015 10:34 AM	56	55.996	0.004	0.012		1	350	1
87	24/12/2015 10:35 AM	56	55.980	0.020	0.047		1	350	1
87	24/12/2015 10:36 AM	56	55.925	0.075	0.042		1	350	1
87	24/12/2015 10:37 AM	56	56.093	0.093	0.051		1	350	1
87	24/12/2015 10:38 AM	56	55.889	0.111		1	350	1	

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
88	24/12/2015 10:54 AM	54	54.062	0.062	0.063	0.394	5	350	1
88	24/12/2015 10:55 AM	54	54.064	0.064	0.083		5	350	1
88	24/12/2015 10:56 AM	54	54.102	0.102	0.118		5	350	1
88	24/12/2015 10:57 AM	54	54.135	0.135	0.100		5	350	1
88	24/12/2015 10:58 AM	54	54.066	0.066	0.054		5	350	1
88	24/12/2015 10:59 AM	54	54.043	0.043	0.026		5	350	1
88	24/12/2015 11:00 AM	54	54.008	0.008	0.044		5	350	1
88	24/12/2015 11:01 AM	54	54.079	0.079	0.066		5	350	1
88	24/12/2015 11:02 AM	54	54.053	0.053	0.374		5	350	1
88	24/12/2015 11:03 AM	54	53.921	0.695	0.320		5	350	1
88	24/12/2015 11:04 AM	54	53.934	0.066		5	350	1	
89	24/12/2015 11:40 AM	56	56.056	0.056	0.106	0.071	1	350	1
89	24/12/2015 11:41 AM	56	56.155	0.155	0.066		1	350	1
89	24/12/2015 11:42 AM	56	55.906	0.094	0.046		1	350	1
89	24/12/2015 11:43 AM	56	56.091	0.091	0.039		1	350	1
89	24/12/2015 11:44 AM	56	55.942	0.058	0.036		1	350	1
89	24/12/2015 11:45 AM	56	55.987	0.013	0.113		1	350	1
89	24/12/2015 11:46 AM	56	56.238	0.238	0.103		1	350	1
89	24/12/2015 11:47 AM	56	55.953	0.047	0.052		1	350	1
89	24/12/2015 11:48 AM	56	56.124	0.124	0.052		1	350	1
89	24/12/2015 11:49 AM	56	55.948	0.052	0.096		1	350	1
89	24/12/2015 11:50 AM	56	55.860	0.140			1	350	1
90	24/12/2015 12:01 PM	54	54.149	0.149	0.288	0.253	5	3	1
90	24/12/2015 12:02 PM	54	54.427	0.427	0.184		5	3	1
90	24/12/2015 12:03 PM	54	53.907	0.093	0.213		5	3	1
90	24/12/2015 12:04 PM	54	54.489	0.489	0.212		5	3	1
90	24/12/2015 12:05 PM	54	53.904	0.096	0.176		5	3	1
90	24/12/2015 12:06 PM	54	54.412	0.412	0.171		5	3	1
90	24/12/2015 12:07 PM	54	53.861	0.139	0.301		5	3	1
90	24/12/2015 12:08 PM	54	54.695	0.695	0.434		5	3	1
90	24/12/2015 12:09 PM	54	54.173	0.173	0.218		5	3	1
90	24/12/2015 12:10 PM	54	54.264	0.264	0.335		5	3	1
90	24/12/2015 12:11 PM	54	54.407	0.407		5	3	1	

ภาพภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

ภาคผนวก ค

ผลการคำนวณพื้นที่ได้ส่วนโค้งเพิ่มการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
1	3/10/2016 9:25 AM	56	56.044	0.044	0.045	0.059	3	177	0.5
1	3/10/2016 9:26 AM	56	56.046	0.046	0.094		3	177	0.5
1	3/10/2016 9:27 AM	56	56.143	0.143	0.070		3	177	0.5
1	3/10/2016 9:28 AM	56	55.998	0.002	0.007		3	177	0.5
1	3/10/2016 9:29 AM	56	55.988	0.012	0.056		3	177	0.5
1	3/10/2016 9:30 AM	56	55.900	0.100	0.094		3	177	0.5
1	3/10/2016 9:31 AM	56	55.913	0.087	0.058		3	177	0.5
1	3/10/2016 9:32 AM	56	55.972	0.028	0.055		3	177	0.5
1	3/10/2016 9:33 AM	56	55.918	0.082	0.073		3	177	0.5
1	3/10/2016 9:34 AM	56	55.936	0.064	0.039		3	177	0.5
1	3/10/2016 9:35 AM	56	55.987	0.013	0.006				
2	3/10/2016 11:59 AM	56	56.037	0.037	0.101	0.094	3	177	0.5
2	3/10/2016 12:00 PM	56	55.772	0.228	0.134		3	177	0.5
2	3/10/2016 12:01 PM	56	55.961	0.039	0.090		3	177	0.5
2	3/10/2016 12:02 PM	56	55.859	0.141	0.080		3	177	0.5
2	3/10/2016 12:03 PM	56	55.981	0.019	0.046		3	177	0.5
2	3/10/2016 12:04 PM	56	56.106	0.106	0.121		3	177	0.5
2	3/10/2016 12:05 PM	56	56.137	0.137	0.103		3	177	0.5
2	3/10/2016 12:06 PM	56	56.069	0.069	0.037		3	177	0.5
2	3/10/2016 12:07 PM	56	56.005	0.005	0.122		3	177	0.5
2	3/10/2016 12:08 PM	56	55.751	0.249	0.104		3	177	0.5
2	3/10/2016 12:09 PM	56	56.074	0.074	0.037				
3	19/9/2016 3:32 PM	55	55.385	0.385	0.346	0.178	3	177	0.5
3	19/9/2016 3:33 PM	55	55.308	0.308	0.349		3	177	0.5
3	19/9/2016 3:34 PM	55	55.389	0.389	0.378		3	177	0.5
3	19/9/2016 3:35 PM	55	55.366	0.366	0.347		3	177	0.5
3	19/9/2016 3:36 PM	55	55.328	0.328	0.195		3	177	0.5
3	19/9/2016 3:37 PM	55	55.062	0.062	0.031		3	177	0.5
3	19/9/2016 3:38 PM	55	55.000	0.000	0.031		3	177	0.5
3	19/9/2016 3:39 PM	55	54.937	0.063	0.027		3	177	0.5
3	19/9/2016 3:40 PM	55	55.041	0.041	0.024		3	177	0.5
3	19/9/2016 3:41 PM	55	54.947	0.053	0.047		3	177	0.5
3	19/9/2016 3:42 PM	55	54.959	0.041	0.060				

ภาพภาคผนวก ค-1 ผลการคำนวณพื้นที่ใต้ส่วนโค้งเพิ่มการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง
(RSM)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
4	20/9/2016 11:20 AM	55	54.756	0.244	0.168	0.129	1	177	0.5
4	20/9/2016 11:21 AM	55	54.909	0.091	0.078		1	177	0.5
4	20/9/2016 11:22 AM	55	54.935	0.065	0.079		1	177	0.5
4	20/9/2016 11:23 AM	55	54.906	0.094	0.085		1	177	0.5
4	20/9/2016 11:24 AM	55	54.923	0.077	0.131		1	177	0.5
4	20/9/2016 11:25 AM	55	54.816	0.184	0.187		1	177	0.5
4	20/9/2016 11:26 AM	55	54.810	0.190	0.191		1	177	0.5
4	20/9/2016 11:27 AM	55	54.809	0.191	0.164		1	177	0.5
4	20/9/2016 11:28 AM	55	54.864	0.136	0.056		1	177	0.5
4	20/9/2016 11:29 AM	55	55.058	0.058	0.150		1	177	0.5
4	20/9/2016 11:30 AM	55	55.242	0.242	0.102				
5	19/9/2016 8:58 AM	56	56.338	0.338	0.247	0.110	5	177	0.5
5	19/9/2016 8:59 AM	56	56.157	0.157	0.125		5	177	0.5
5	19/9/2016 9:00 AM	56	56.094	0.094	0.040		5	177	0.5
5	19/9/2016 9:01 AM	56	55.942	0.058	0.076		5	177	0.5
5	19/9/2016 9:02 AM	56	55.907	0.093	0.064		5	177	0.5
5	19/9/2016 9:03 AM	56	55.965	0.035	0.043		5	177	0.5
5	19/9/2016 9:04 AM	56	56.104	0.104	0.140		5	177	0.5
5	19/9/2016 9:05 AM	56	56.176	0.176	0.134		5	177	0.5
5	19/9/2016 9:06 AM	56	56.092	0.092	0.140		5	177	0.5
5	19/9/2016 9:07 AM	56	56.189	0.189	0.094		5	177	0.5
5	19/9/2016 9:08 AM	56	55.998	0.002	0.112				
6	20/9/2016 9:07 AM	55	56.443	1.443	0.631	0.659	3	3	0.5
6	20/9/2016 9:08 AM	55	53.996	1.004	0.544		3	3	0.5
6	20/9/2016 9:09 AM	55	54.916	0.084	0.862		3	3	0.5
6	20/9/2016 9:10 AM	55	56.800	1.800	0.774		3	3	0.5
6	20/9/2016 9:11 AM	55	53.842	1.158	0.490		3	3	0.5
6	20/9/2016 9:12 AM	55	55.673	0.673	0.953		3	3	0.5
6	20/9/2016 9:13 AM	55	56.234	1.234	0.597		3	3	0.5
6	20/9/2016 9:14 AM	55	53.849	1.151	0.591		3	3	0.5
6	20/9/2016 9:15 AM	55	56.212	1.212	0.745		3	3	0.5
6	20/9/2016 9:16 AM	55	55.278	0.278	0.406		3	3	0.5
6	20/9/2016 9:17 AM	55	54.035	0.965	0.684				

ภาพภาคผนวก ค-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
7	20/9/2016 9:37 AM	56	55.598	0.402	0.302	0.375	3	350	0.5
7	20/9/2016 9:38 AM	56	55.798	0.202	0.172		3	350	0.5
7	20/9/2016 9:39 AM	56	55.858	0.142	0.112		3	350	0.5
7	20/9/2016 9:40 AM	56	55.918	0.082	0.046		3	350	0.5
7	20/9/2016 9:41 AM	56	56.100	0.100	0.181		3	350	0.5
7	20/9/2016 9:42 AM	56	56.262	0.262	0.331		3	350	0.5
7	20/9/2016 9:43 AM	56	56.399	0.399	0.464		3	350	0.5
7	20/9/2016 9:44 AM	56	56.528	0.528	0.593		3	350	0.5
7	20/9/2016 9:45 AM	56	56.658	0.658	0.730		3	350	0.5
7	20/9/2016 9:46 AM	56	56.802	0.802	0.815		3	350	0.5
7	20/9/2016 9:47 AM	56	56.829	0.829	0.345				
8	20/9/2016 10:10 AM	55	54.722	0.278	0.195	0.067	3	177	0
8	20/9/2016 10:11 AM	55	54.888	0.112	0.047		3	177	0
8	20/9/2016 10:12 AM	55	55.030	0.030	0.067		3	177	0
8	20/9/2016 10:13 AM	55	55.104	0.104	0.118		3	177	0
8	20/9/2016 10:14 AM	55	55.131	0.131	0.108		3	177	0
8	20/9/2016 10:15 AM	55	55.085	0.085	0.062		3	177	0
8	20/9/2016 10:16 AM	55	55.039	0.039	0.021		3	177	0
8	20/9/2016 10:17 AM	55	55.003	0.003	0.002		3	177	0
8	20/9/2016 10:18 AM	55	54.996	0.004	0.006		3	177	0
8	20/9/2016 10:19 AM	55	55.014	0.014	0.044		3	177	0
8	20/9/2016 10:20 AM	55	55.074	0.074	0.031				
9	20/9/2016 5:26 PM	55	55.110	0.110	0.102	0.112	3	177	1
9	20/9/2016 5:27 PM	55	55.095	0.095	0.146		3	177	1
9	20/9/2016 5:28 PM	55	55.197	0.197	0.254		3	177	1
9	20/9/2016 5:29 PM	55	55.311	0.311	0.228		3	177	1
9	20/9/2016 5:30 PM	55	55.145	0.145	0.087		3	177	1
9	20/9/2016 5:31 PM	55	55.029	0.029	0.012		3	177	1
9	20/9/2016 5:32 PM	55	54.987	0.013	0.088		3	177	1
9	20/9/2016 5:33 PM	55	54.837	0.163	0.093		3	177	1
9	20/9/2016 5:34 PM	55	54.976	0.024	0.049		3	177	1
9	20/9/2016 5:35 PM	55	54.926	0.074	0.065		3	177	1
9	20/9/2016 5:36 PM	55	54.944	0.056	0.049				

ภาพภาคผนวก ค-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
10	3/10/2016 12:34 PM	55	54.932	3037.000	0.068	0.086	3	177	1
10	3/10/2016 12:35 PM	55	54.877	3038.000	0.123		3	177	1
10	3/10/2016 12:36 PM	55	54.895	3039.000	0.105		3	177	1
10	3/10/2016 12:37 PM	55	55.214	3040.000	0.214		3	177	1
10	3/10/2016 12:38 PM	55	55.019	3041.000	0.019		3	177	1
10	3/10/2016 12:39 PM	55	55.164	3042.000	0.164		3	177	1
10	3/10/2016 12:40 PM	55	54.846	3043.000	0.154		3	177	1
10	3/10/2016 12:41 PM	55	55.192	3044.000	0.192		3	177	1
10	3/10/2016 12:42 PM	55	54.917	3045.000	0.083		3	177	1
10	3/10/2016 12:43 PM	55	55.064	3046.000	0.064		3	177	1
10	3/10/2016 12:44 PM	55	55.067	3047.000	0.067				
11	4/10/2016 10:13 AM	56	55.816	0.184	0.120	0.082	5	177	0.5
11	4/10/2016 10:14 AM	56	55.943	0.057	0.032		5	177	0.5
11	4/10/2016 10:15 AM	56	56.071	0.071	0.088		5	177	0.5
11	4/10/2016 10:16 AM	56	56.105	0.105	0.106		5	177	0.5
11	4/10/2016 10:17 AM	56	56.107	0.107	0.074		5	177	0.5
11	4/10/2016 10:18 AM	56	56.041	0.041	0.033		5	177	0.5
11	4/10/2016 10:19 AM	56	55.922	0.078	0.085		5	177	0.5
11	4/10/2016 10:20 AM	56	55.908	0.092	0.090		5	177	0.5
11	4/10/2016 10:21 AM	56	55.911	0.089	0.079		5	177	0.5
11	4/10/2016 10:22 AM	56	55.931	0.069	0.115		5	177	0.5
11	4/10/2016 10:23 AM	56	55.838	0.162	0.081				
12	20/9/2016 1:15 PM	55	55.589	0.589	0.955	0.697	3	3	0.5
12	20/9/2016 1:16 PM	55	56.321	1.321	0.634		3	3	0.5
12	20/9/2016 1:17 PM	55	53.792	1.208	0.609		3	3	0.5
12	20/9/2016 1:18 PM	55	56.228	1.228	0.823		3	3	0.5
12	20/9/2016 1:19 PM	55	55.419	0.419	0.417		3	3	0.5
12	20/9/2016 1:20 PM	55	53.992	1.008	0.706		3	3	0.5
12	20/9/2016 1:21 PM	55	56.657	1.657	0.729		3	3	0.5
12	20/9/2016 1:22 PM	55	54.720	0.280	0.459		3	3	0.5
12	20/9/2016 1:23 PM	55	54.362	0.638	0.823		3	3	0.5
12	20/9/2016 1:24 PM	55	56.972	1.972	0.818		3	3	0.5
12	20/9/2016 1:25 PM	55	54.085	0.915	0.529				

ภาพภาคผนวก ค-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
13	20/9/2016 2:27 PM	56	55.858	0.142	0.087	0.340	3	350	0.5
13	20/9/2016 2:28 PM	56	56.198	0.198	0.283		3	350	0.5
13	20/9/2016 2:29 PM	56	56.368	0.368	0.244		3	350	0.5
13	20/9/2016 2:30 PM	56	56.119	0.119	0.100		3	350	0.5
13	20/9/2016 2:31 PM	56	55.759	0.241	0.323		3	350	0.5
13	20/9/2016 2:32 PM	56	55.594	0.406	0.416		3	350	0.5
13	20/9/2016 2:33 PM	56	55.575	0.425	0.250		3	350	0.5
13	20/9/2016 2:34 PM	56	55.925	0.075	0.160		3	350	0.5
13	20/9/2016 2:35 PM	56	56.368	0.368	0.585		3	350	0.5
13	20/9/2016 2:36 PM	56	56.801	0.801	0.949		3	350	0.5
13	20/9/2016 2:37 PM	56	57.098	1.098	0.501				
14	20/9/2016 3:21 PM	55	54.881	0.119	0.049	0.091	3	177	0
14	20/9/2016 3:22 PM	55	55.054	0.054	0.071		3	177	0
14	20/9/2016 3:23 PM	55	55.089	0.089	0.107		3	177	0
14	20/9/2016 3:24 PM	55	55.124	0.124	0.144		3	177	0
14	20/9/2016 3:25 PM	55	55.163	0.163	0.115		3	177	0
14	20/9/2016 3:26 PM	55	55.067	0.067	0.028		3	177	0
14	20/9/2016 3:27 PM	55	54.966	0.034	0.037		3	177	0
14	20/9/2016 3:28 PM	55	54.961	0.039	0.091		3	177	0
14	20/9/2016 3:29 PM	55	54.856	0.144	0.163		3	177	0
14	20/9/2016 3:30 PM	55	54.818	0.182	0.105		3	177	0
14	20/9/2016 3:31 PM	55	54.972	0.028	0.046				
15	4/10/2016 8:01 AM	55	54.875	0.125	0.057	0.065	3	177	1
15	4/10/2016 8:02 AM	55	55.100	0.100	0.043		3	177	1
15	4/10/2016 8:03 AM	55	54.935	0.065	0.034		3	177	1
15	4/10/2016 8:04 AM	55	55.069	0.069	0.039		3	177	1
15	4/10/2016 8:05 AM	55	54.914	0.086	0.090		3	177	1
15	4/10/2016 8:06 AM	55	54.907	0.093	0.065		3	177	1
15	4/10/2016 8:07 AM	55	55.153	0.153	0.151		3	177	1
15	4/10/2016 8:08 AM	55	55.148	0.148	0.063		3	177	1
15	4/10/2016 8:09 AM	55	54.959	0.041	0.067		3	177	1
15	4/10/2016 8:10 AM	55	54.907	0.093	0.039		3	177	1
15	4/10/2016 8:11 AM	55	55.046	0.046	0.023				

ภาพภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

ภาคผนวก ง
ผลการคำนวณพื้นที่ใต้ส่วนโค้งจาก PID

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
1	3/7/2014 11:22 AM	55	54.175	0.825	0.564	0.408	0.8	12	0
1	3/7/2014 11:23 AM	55	54.697	0.303	0.134		0.8	12	0
1	3/7/2014 11:24 AM	55	55.218	0.218	0.479		0.8	12	0
1	3/7/2014 11:25 AM	55	55.740	0.740	0.327		0.8	12	0
1	3/7/2014 11:26 AM	55	54.465	0.535	0.520		0.8	12	0
1	3/7/2014 11:27 AM	55	54.496	0.504	0.209		0.8	12	0
1	3/7/2014 11:28 AM	55	55.223	0.223	0.587		0.8	12	0
1	3/7/2014 11:29 AM	55	55.950	0.950	0.414		0.8	12	0
1	3/7/2014 11:30 AM	55	54.819	0.181	0.446		0.8	12	0
1	3/7/2014 11:31 AM	55	54.289	0.711	0.399		0.8	12	0
1	3/7/2014 11:32 AM	55	54.914	0.086	0.238				
2	3/7/2014 11:33 AM	55	55.538	0.538	0.251	0.369	0.8	12	0
2	3/7/2014 11:34 AM	55	54.540	0.460	0.428		0.8	12	0
2	3/7/2014 11:35 AM	55	54.603	0.397	0.199		0.8	12	0
2	3/7/2014 11:36 AM	55	55.398	0.398	0.557		0.8	12	0
2	3/7/2014 11:37 AM	55	55.716	0.716	0.301		0.8	12	0
2	3/7/2014 11:38 AM	55	54.602	0.398	0.445		0.8	12	0
2	3/7/2014 11:39 AM	55	54.508	0.492	0.205		0.8	12	0
2	3/7/2014 11:40 AM	55	55.248	0.248	0.228		0.8	12	0
2	3/7/2014 11:41 AM	55	55.208	0.208	0.417		0.8	12	0
2	3/7/2014 11:42 AM	55	54.031	0.969	0.658		0.8	12	0
2	3/7/2014 11:43 AM	55	54.652	0.348	0.157				
3	3/7/2014 11:44 AM	55	55.272	0.272	0.582	0.382	0.8	12	0
3	3/7/2014 11:45 AM	55	55.892	0.892	0.661		0.8	12	0
3	3/7/2014 11:46 AM	55	55.430	0.430	0.318		0.8	12	0
3	3/7/2014 11:47 AM	55	54.247	0.753	0.536		0.8	12	0
3	3/7/2014 11:48 AM	55	54.680	0.320	0.171		0.8	12	0
3	3/7/2014 11:49 AM	55	55.362	0.362	0.163		0.8	12	0
3	3/7/2014 11:50 AM	55	54.953	0.047	0.368		0.8	12	0
3	3/7/2014 11:51 AM	55	54.311	0.689	0.337		0.8	12	0
3	3/7/2014 11:52 AM	55	55.015	0.015	0.367		0.8	12	0
3	3/7/2014 11:53 AM	55	55.719	0.719	0.322		0.8	12	0
3	3/7/2014 11:54 AM	55	54.900	0.100	0.380				

ภาพภาคผนวก ง-1 ผลการคำนวณพื้นที่ใต้ส่วนโค้งจาก PID ค่าตั้งต้น

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
4	3/7/2014 11:55 AM	55	54.341	0.659	0.348	0.397	0.8	12	0
4	3/7/2014 11:56 AM	55	54.963	0.037	0.276		0.8	12	0
4	3/7/2014 11:57 AM	55	55.585	0.585	0.392		0.8	12	0
4	3/7/2014 11:58 AM	55	54.090	0.910	0.659		0.8	12	0
4	3/7/2014 11:59 AM	55	54.593	0.407	0.173		0.8	12	0
4	3/7/2014 12:00 PM	55	55.097	0.097	0.349		0.8	12	0
4	3/7/2014 12:01 PM	55	55.601	0.601	0.582		0.8	12	0
4	3/7/2014 12:02 PM	55	55.562	0.562	0.333		0.8	12	0
4	3/7/2014 12:03 PM	55	54.256	0.744	0.633		0.8	12	0
4	3/7/2014 12:04 PM	55	54.478	0.522	0.223		0.8	12	0
4	3/7/2014 12:05 PM	55	55.124	0.124	0.390				
5	3/7/2014 12:06 PM	55	55.656	0.656	0.386	0.443	0.8	12	0
5	3/7/2014 12:07 PM	55	54.139	0.861	0.653		0.8	12	0
5	3/7/2014 12:08 PM	55	54.555	0.445	0.236		0.8	12	0
5	3/7/2014 12:09 PM	55	54.972	0.028	0.182		0.8	12	0
5	3/7/2014 12:10 PM	55	55.389	0.389	0.597		0.8	12	0
5	3/7/2014 12:11 PM	55	55.805	0.805	0.422		0.8	12	0
5	3/7/2014 12:12 PM	55	54.119	0.881	0.844		0.8	12	0
5	3/7/2014 12:13 PM	55	54.193	0.807	0.562		0.8	12	0
5	3/7/2014 12:14 PM	55	54.683	0.317	0.133		0.8	12	0
5	3/7/2014 12:15 PM	55	55.173	0.173	0.418		0.8	12	0
5	3/7/2014 12:16 PM	55	55.663	0.663	0.908				
6	3/7/2014 12:17 PM	55	56.153	1.153	0.542	0.447	0.8	12	0
6	3/7/2014 12:18 PM	55	54.921	0.079	0.573		0.8	12	0
6	3/7/2014 12:19 PM	55	53.933	1.067	0.799		0.8	12	0
6	3/7/2014 12:20 PM	55	54.469	0.531	0.264		0.8	12	0
6	3/7/2014 12:21 PM	55	55.004	0.004	0.272		0.8	12	0
6	3/7/2014 12:22 PM	55	55.539	0.539	0.435		0.8	12	0
6	3/7/2014 12:23 PM	55	55.330	0.330	0.368		0.8	12	0
6	3/7/2014 12:24 PM	55	54.113	0.887	0.618		0.8	12	0
6	3/7/2014 12:25 PM	55	54.651	0.349	0.146		0.8	12	0
6	3/7/2014 12:26 PM	55	55.188	0.188	0.456		0.8	12	0
6	3/7/2014 12:27 PM	55	55.725	0.725	0.411				

ภาพภาคผนวก ง-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
7	3/7/2014 12:28 PM	55	54.099	0.901	0.638	0.536	0.8	12	0
7	3/7/2014 12:29 PM	55	54.626	0.374	0.155		0.8	12	0
7	3/7/2014 12:30 PM	55	55.154	0.154	0.418		0.8	12	0
7	3/7/2014 12:31 PM	55	55.682	0.682	0.836		0.8	12	0
7	3/7/2014 12:32 PM	55	55.991	0.991	0.741		0.8	12	0
7	3/7/2014 12:33 PM	55	55.491	0.491	0.510		0.8	12	0
7	3/7/2014 12:34 PM	55	53.769	1.231	0.997		0.8	12	0
7	3/7/2014 12:35 PM	55	54.238	0.762	0.527		0.8	12	0
7	3/7/2014 12:36 PM	55	54.708	0.292	0.124		0.8	12	0
7	3/7/2014 12:37 PM	55	55.178	0.178	0.413		0.8	12	0
7	3/7/2014 12:38 PM	55	55.648	0.648	0.883				
8	3/7/2014 12:39 PM	55	56.118	1.118	0.761	0.453	0.8	12	0
8	3/7/2014 12:40 PM	55	55.404	0.404	0.329		0.8	12	0
8	3/7/2014 12:41 PM	55	54.211	0.789	0.363		0.8	12	0
8	3/7/2014 12:42 PM	55	55.077	0.077	0.510		0.8	12	0
8	3/7/2014 12:43 PM	55	55.944	0.944	0.397		0.8	12	0
8	3/7/2014 12:44 PM	55	54.475	0.525	0.602		0.8	12	0
8	3/7/2014 12:45 PM	55	54.321	0.679	0.385		0.8	12	0
8	3/7/2014 12:46 PM	55	54.908	0.092	0.216		0.8	12	0
8	3/7/2014 12:47 PM	55	55.496	0.496	0.636		0.8	12	0
8	3/7/2014 12:48 PM	55	55.776	0.776	0.331		0.8	12	0
8	3/7/2014 12:49 PM	55	54.523	0.477	0.518				
9	3/7/2014 12:50 PM	55	54.441	0.559	0.232	0.395	0.8	12	0
9	3/7/2014 12:51 PM	55	55.196	0.196	0.465		0.8	12	0
9	3/7/2014 12:52 PM	55	55.734	0.734	0.479		0.8	12	0
9	3/7/2014 12:53 PM	55	53.894	1.106	0.768		0.8	12	0
9	3/7/2014 12:54 PM	55	54.571	0.429	0.181		0.8	12	0
9	3/7/2014 12:55 PM	55	55.248	0.248	0.520		0.8	12	0
9	3/7/2014 12:56 PM	55	55.792	0.792	0.343		0.8	12	0
9	3/7/2014 12:57 PM	55	54.476	0.524	0.431		0.8	12	0
9	3/7/2014 12:58 PM	55	54.661	0.339	0.184		0.8	12	0
9	3/7/2014 12:59 PM	55	55.393	0.393	0.350		0.8	12	0
9	3/7/2014 1:00 PM	55	55.307	0.307	0.535				

ภาพภาคผนวก ง-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
10	3/7/2014 1:01 PM	55	53.743	1.257	0.924	0.539	0.8	12	0
10	3/7/2014 1:02 PM	55	54.410	0.590	0.266		0.8	12	0
10	3/7/2014 1:03 PM	55	55.076	0.076	0.410		0.8	12	0
10	3/7/2014 1:04 PM	55	55.743	0.743	1.038		0.8	12	0
10	3/7/2014 1:05 PM	55	56.333	1.333	0.569		0.8	12	0
10	3/7/2014 1:06 PM	55	54.682	0.318	0.494		0.8	12	0
10	3/7/2014 1:07 PM	55	54.331	0.669	0.316		0.8	12	0
10	3/7/2014 1:08 PM	55	55.042	0.042	0.398		0.8	12	0
10	3/7/2014 1:09 PM	55	55.754	0.754	0.344		0.8	12	0
10	3/7/2014 1:10 PM	55	54.395	0.605	0.634		0.8	12	0
10	3/7/2014 1:11 PM	55	54.338	0.662	0.370				
11	3/7/2014 1:12 PM	55	54.923	0.077	0.226	0.396	0.8	12	0
11	3/7/2014 1:13 PM	55	55.509	0.509	0.499		0.8	12	0
11	3/7/2014 1:14 PM	55	55.490	0.490	0.352		0.8	12	0
11	3/7/2014 1:15 PM	55	54.170	0.830	0.565		0.8	12	0
11	3/7/2014 1:16 PM	55	54.701	0.299	0.218		0.8	12	0
11	3/7/2014 1:17 PM	55	55.516	0.516	0.214		0.8	12	0
11	3/7/2014 1:18 PM	55	54.761	0.239	0.535		0.8	12	0
11	3/7/2014 1:19 PM	55	54.170	0.830	0.524		0.8	12	0
11	3/7/2014 1:20 PM	55	54.782	0.218	0.166		0.8	12	0
11	3/7/2014 1:21 PM	55	55.395	0.395	0.664		0.8	12	0
11	3/7/2014 1:22 PM	55	55.934	0.934	0.411				
12	3/7/2014 1:23 PM	55	54.333	0.667	0.549	0.427	0.8	12	0
12	3/7/2014 1:24 PM	55	54.569	0.431	0.180		0.8	12	0
12	3/7/2014 1:25 PM	55	55.216	0.216	0.230		0.8	12	0
12	3/7/2014 1:26 PM	55	55.243	0.243	0.481		0.8	12	0
12	3/7/2014 1:27 PM	55	53.881	1.119	0.755		0.8	12	0
12	3/7/2014 1:28 PM	55	54.608	0.392	0.183		0.8	12	0
12	3/7/2014 1:29 PM	55	55.336	0.336	0.699		0.8	12	0
12	3/7/2014 1:30 PM	55	56.063	1.063	0.529		0.8	12	0
12	3/7/2014 1:31 PM	55	54.995	0.005	0.322		0.8	12	0
12	3/7/2014 1:32 PM	55	54.360	0.640	0.337		0.8	12	0
12	3/7/2014 1:33 PM	55	54.966	0.034	0.271				

ภาพภาคผนวก ง-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
13	3/7/2014 1:34 PM	55	55.573	0.573	0.292	0.399	0.8	12	0
13	3/7/2014 1:35 PM	55	54.403	0.597	0.425		0.8	12	0
13	3/7/2014 1:36 PM	55	54.747	0.253	0.165		0.8	12	0
13	3/7/2014 1:37 PM	55	55.381	0.381	0.570		0.8	12	0
13	3/7/2014 1:38 PM	55	55.759	0.759	0.332		0.8	12	0
13	3/7/2014 1:39 PM	55	54.474	0.526	0.512		0.8	12	0
13	3/7/2014 1:40 PM	55	54.502	0.498	0.218		0.8	12	0
13	3/7/2014 1:41 PM	55	55.346	0.346	0.356		0.8	12	0
13	3/7/2014 1:42 PM	55	55.366	0.366	0.405		0.8	12	0
13	3/7/2014 1:43 PM	55	54.024	0.976	0.713		0.8	12	0
13	3/7/2014 1:44 PM	55	54.550	0.450	0.198	0.393	0.8	12	0
14	3/7/2014 1:45 PM	55	55.076	0.076	0.339		0.8	12	0
14	3/7/2014 1:46 PM	55	55.602	0.602	0.325		0.8	12	0
14	3/7/2014 1:47 PM	55	55.048	0.048	0.364		0.8	12	0
14	3/7/2014 1:48 PM	55	54.230	0.770	0.397		0.8	12	0
14	3/7/2014 1:49 PM	55	54.976	0.024	0.350		0.8	12	0
14	3/7/2014 1:50 PM	55	55.722	0.722	0.359		0.8	12	0
14	3/7/2014 1:51 PM	55	54.287	0.713	0.619		0.8	12	0
14	3/7/2014 1:52 PM	55	54.474	0.526	0.225		0.8	12	0
14	3/7/2014 1:53 PM	55	55.121	0.121	0.445		0.8	12	0
14	3/7/2014 1:54 PM	55	55.768	0.768	0.507	0.8	12	0	
14	3/7/2014 1:55 PM	55	55.246	0.246	0.393	0.453	0.8	12	0
15	3/7/2014 1:56 PM	55	54.072	0.928	0.445		0.8	12	0
15	3/7/2014 1:57 PM	55	55.041	0.041	0.487		0.8	12	0
15	3/7/2014 1:58 PM	55	55.932	0.932	0.387		0.8	12	0
15	3/7/2014 1:59 PM	55	54.576	0.424	0.629		0.8	12	0
15	3/7/2014 2:00 PM	55	54.167	0.833	0.458		0.8	12	0
15	3/7/2014 2:01 PM	55	54.917	0.083	0.301		0.8	12	0
15	3/7/2014 2:02 PM	55	55.666	0.666	0.769		0.8	12	0
15	3/7/2014 2:03 PM	55	55.872	0.872	0.362		0.8	12	0
15	3/7/2014 2:04 PM	55	54.580	0.420	0.453		0.8	12	0
15	3/7/2014 2:05 PM	55	54.515	0.485	0.235	0.8	12	0	
15	3/7/2014 2:06 PM	55	55.453	0.453	0.188				

ภาพภาคผนวก ง-1 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
1	9/1/2016 6:00 AM	55	54.667	0.333	0.318	0.241	3	150	0
1	9/1/2016 6:01 AM	55	54.698	0.302	0.270		3	150	0
1	9/1/2016 6:02 AM	55	54.761	0.239	0.200		3	150	0
1	9/1/2016 6:03 AM	55	54.840	0.160	0.066		3	150	0
1	9/1/2016 6:04 AM	55	55.067	0.067	0.183		3	150	0
1	9/1/2016 6:05 AM	55	55.300	0.300	0.368		3	150	0
1	9/1/2016 6:06 AM	55	55.436	0.436	0.388		3	150	0
1	9/1/2016 6:07 AM	55	55.341	0.341	0.296		3	150	0
1	9/1/2016 6:08 AM	55	55.252	0.252	0.210		3	150	0
1	9/1/2016 6:09 AM	55	55.169	0.169	0.105		3	150	0
	9/1/2016 6:10 AM	55	55.041	0.041	0.021		3	150	0
2	9/1/2016 6:11 AM	55	54.665	0.335	0.425	0.270	3	150	0
2	9/1/2016 6:12 AM	55	54.485	0.515	0.435		3	150	0
2	9/1/2016 6:13 AM	55	54.645	0.355	0.291		3	150	0
2	9/1/2016 6:14 AM	55	54.773	0.227	0.198		3	150	0
2	9/1/2016 6:15 AM	55	54.831	0.169	0.237		3	150	0
2	9/1/2016 6:16 AM	55	54.695	0.305	0.153		3	150	0
2	9/1/2016 6:17 AM	55	54.998	0.002	0.193		3	150	0
2	9/1/2016 6:18 AM	55	55.387	0.387	0.335		3	150	0
2	9/1/2016 6:19 AM	55	55.284	0.284	0.238		3	150	0
2	9/1/2016 6:20 AM	55	55.193	0.193	0.197		3	150	0
	9/1/2016 6:21 AM	55	55.201	0.201	0.101		3	150	0
3	9/1/2016 6:22 AM	55	55.116	0.116	0.069	0.307	3	150	0
3	9/1/2016 6:23 AM	55	54.846	0.154	0.345		3	150	0
3	9/1/2016 6:24 AM	55	54.464	0.536	0.404		3	150	0
3	9/1/2016 6:25 AM	55	54.728	0.272	0.257		3	150	0
3	9/1/2016 6:26 AM	55	54.757	0.243	0.145		3	150	0
3	9/1/2016 6:27 AM	55	54.953	0.047	0.142		3	150	0
3	9/1/2016 6:28 AM	55	55.319	0.319	0.402		3	150	0
3	9/1/2016 6:29 AM	55	55.485	0.485	0.416		3	150	0
3	9/1/2016 6:30 AM	55	55.347	0.347	0.451		3	150	0
3	9/1/2016 6:31 AM	55	55.554	0.554	0.443		3	150	0
	9/1/2016 6:32 AM	55	55.331	0.331	0.166		3	150	0

ภาพภาคผนวก ง-2 ผลการคำนวณพื้นที่ใต้ส่วนโค้งจาก PID ที่ได้จากการปรับโดยพนักงาน
ที่รับผิดชอบ

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
4	9/1/2016 6:33 AM	55	55.119	0.119	0.145	0.125	3	150	0
4	9/1/2016 6:34 AM	55	55.172	0.172	0.156		3	150	0
4	9/1/2016 6:35 AM	55	55.140	0.140	0.135		3	150	0
4	9/1/2016 6:36 AM	55	55.129	0.129	0.097		3	150	0
4	9/1/2016 6:37 AM	55	55.065	0.065	0.052		3	150	0
4	9/1/2016 6:38 AM	55	55.038	0.038	0.077		3	150	0
4	9/1/2016 6:39 AM	55	55.115	0.115	0.116		3	150	0
4	9/1/2016 6:40 AM	55	55.117	0.117	0.160		3	150	0
4	9/1/2016 6:41 AM	55	55.203	0.203	0.134		3	150	0
4	9/1/2016 6:42 AM	55	55.066	0.066	0.176		3	150	0
	9/1/2016 6:43 AM	55	55.286	0.286	0.143	3	150	0	
5	9/1/2016 6:44 AM	55	54.937	0.063	0.092	0.269	3	150	0
5	9/1/2016 6:45 AM	55	54.879	0.121	0.256		3	150	0
5	9/1/2016 6:46 AM	55	54.609	0.391	0.363		3	150	0
5	9/1/2016 6:47 AM	55	54.664	0.336	0.317		3	150	0
5	9/1/2016 6:48 AM	55	54.703	0.297	0.204		3	150	0
5	9/1/2016 6:49 AM	55	54.889	0.111	0.052		3	150	0
5	9/1/2016 6:50 AM	55	55.009	0.009	0.216		3	150	0
5	9/1/2016 6:51 AM	55	55.423	0.423	0.454		3	150	0
5	9/1/2016 6:52 AM	55	55.485	0.485	0.437		3	150	0
5	9/1/2016 6:53 AM	55	55.388	0.388	0.302		3	150	0
	9/1/2016 6:54 AM	55	55.216	0.216	0.108	3	150	0	
6	9/1/2016 7:06 AM	55	55.263	0.263	0.266	0.309	3	150	0
6	9/1/2016 7:07 AM	55	55.269	0.269	0.218		3	150	0
6	9/1/2016 7:08 AM	55	55.166	0.166	0.232		3	150	0
6	9/1/2016 7:09 AM	55	54.446	0.554	0.549		3	150	0
6	9/1/2016 7:10 AM	55	54.455	0.545	0.459		3	150	0
6	9/1/2016 7:11 AM	55	54.627	0.373	0.298		3	150	0
6	9/1/2016 7:12 AM	55	54.778	0.222	0.198		3	150	0
6	9/1/2016 7:13 AM	55	54.826	0.174	0.120		3	150	0
6	9/1/2016 7:14 AM	55	55.282	0.282	0.339		3	150	0
6	9/1/2016 7:15 AM	55	55.396	0.396	0.408		3	150	0
	9/1/2016 7:16 AM	55	55.420	0.420	0.210	3	150	0	

ภาพภาคผนวก ง-2 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
7	9/1/2016 7:17 AM	55	55.276	0.276	0.148	0.169	3	150	0
7	9/1/2016 7:18 AM	55	55.020	0.020	0.157		3	150	0
7	9/1/2016 7:19 AM	55	54.669	0.331	0.266		3	150	0
7	9/1/2016 7:20 AM	55	54.798	0.202	0.105		3	150	0
7	9/1/2016 7:21 AM	55	54.992	0.008	0.004		3	150	0
7	9/1/2016 7:22 AM	55	55.006	0.006	0.103		3	150	0
7	9/1/2016 7:23 AM	55	54.789	0.211	0.202		3	150	0
7	9/1/2016 7:24 AM	55	54.808	0.192	0.158		3	150	0
7	9/1/2016 7:25 AM	55	54.877	0.123	0.093		3	150	0
7	9/1/2016 7:26 AM	55	55.220	0.220	0.460		3	150	0
	9/1/2016 7:27 AM	55	55.700	0.700	0.350	3	150	0	
8	9/1/2016 7:28 AM	55	55.736	0.736	0.522	0.278	3	150	0
8	9/1/2016 7:29 AM	55	55.308	0.308	0.128		3	150	0
8	9/1/2016 7:30 AM	55	54.898	0.102	0.280		3	150	0
8	9/1/2016 7:31 AM	55	54.542	0.458	0.410		3	150	0
8	9/1/2016 7:32 AM	55	54.639	0.361	0.300		3	150	0
8	9/1/2016 7:33 AM	55	54.760	0.240	0.154		3	150	0
8	9/1/2016 7:34 AM	55	54.932	0.068	0.121		3	150	0
8	9/1/2016 7:35 AM	55	54.825	0.175	0.214		3	150	0
8	9/1/2016 7:36 AM	55	54.746	0.254	0.132		3	150	0
8	9/1/2016 7:37 AM	55	55.275	0.275	0.522		3	150	0
	9/1/2016 7:38 AM	55	55.768	0.768	0.384	3	150	0	
9	9/1/2016 7:39 AM	55	55.546	0.546	0.400	0.276	3	150	0
9	9/1/2016 7:40 AM	55	55.253	0.253	0.135		3	150	0
9	9/1/2016 7:41 AM	55	54.713	0.287	0.447		3	150	0
9	9/1/2016 7:42 AM	55	54.394	0.606	0.539		3	150	0
9	9/1/2016 7:43 AM	55	54.529	0.471	0.312		3	150	0
9	9/1/2016 7:44 AM	55	54.847	0.153	0.099		3	150	0
9	9/1/2016 7:45 AM	55	54.955	0.045	0.143		3	150	0
9	9/1/2016 7:46 AM	55	55.319	0.319	0.326		3	150	0
9	9/1/2016 7:47 AM	55	55.333	0.333	0.247		3	150	0
9	9/1/2016 7:48 AM	55	55.162	0.162	0.117		3	150	0
	9/1/2016 7:49 AM	55	55.073	0.073	0.036	3	150	0	

ภาพภาคผนวก ง-2 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
10	9/1/2016 7:50 AM	55	55.052	0.052	0.099	0.275	3	150	0
10	9/1/2016 7:51 AM	55	55.146	0.146	0.099		3	150	0
10	9/1/2016 7:52 AM	55	55.052	0.052	0.021		3	150	0
10	9/1/2016 7:53 AM	55	54.977	0.023	0.254		3	150	0
10	9/1/2016 7:54 AM	55	54.515	0.485	0.493		3	150	0
10	9/1/2016 7:55 AM	55	54.499	0.501	0.390		3	150	0
10	9/1/2016 7:56 AM	55	54.720	0.280	0.240		3	150	0
10	9/1/2016 7:57 AM	55	54.800	0.200	0.083		3	150	0
10	9/1/2016 7:58 AM	55	55.080	0.080	0.390		3	150	0
10	9/1/2016 7:59 AM	55	55.700	0.700	0.681		3	150	0
	9/1/2016 8:00 AM	55	55.662	0.662	0.331	3	150	0	
11	9/1/2016 8:01 AM	55	55.194	0.194	0.134	0.208	3	150	0
11	9/1/2016 8:02 AM	55	55.073	0.073	0.082		3	150	0
11	9/1/2016 8:03 AM	55	55.090	0.090	0.070		3	150	0
11	9/1/2016 8:04 AM	55	54.833	0.167	0.294		3	150	0
11	9/1/2016 8:05 AM	55	54.580	0.420	0.422		3	150	0
11	9/1/2016 8:06 AM	55	54.576	0.424	0.296		3	150	0
11	9/1/2016 8:07 AM	55	54.832	0.168	0.228		3	150	0
11	9/1/2016 8:08 AM	55	54.712	0.288	0.192		3	150	0
11	9/1/2016 8:09 AM	55	54.903	0.097	0.040		3	150	0
11	9/1/2016 8:10 AM	55	55.039	0.039	0.318		3	150	0
	9/1/2016 8:11 AM	55	55.597	0.597	0.299	3	150	0	
12	9/1/2016 8:12 AM	55	55.560	0.560	0.560	0.239	3	150	0
12	9/1/2016 8:13 AM	55	55.560	0.560	0.240		3	150	0
12	9/1/2016 8:14 AM	55	54.876	0.124	0.345		3	150	0
12	9/1/2016 8:15 AM	55	54.435	0.565	0.465		3	150	0
12	9/1/2016 8:16 AM	55	54.635	0.365	0.247		3	150	0
12	9/1/2016 8:17 AM	55	54.871	0.129	0.082		3	150	0
12	9/1/2016 8:18 AM	55	54.964	0.036	0.058		3	150	0
12	9/1/2016 8:19 AM	55	54.920	0.080	0.109		3	150	0
12	9/1/2016 8:20 AM	55	54.861	0.139	0.154		3	150	0
12	9/1/2016 8:21 AM	55	54.830	0.170	0.129		3	150	0
	9/1/2016 8:22 AM	55	54.912	0.088	0.044	3	150	0	

ภาพภาคผนวก ง-2 (ต่อ)

Run order	วันที่/เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
13	9/1/2016 9:18 AM	55	55.154	0.154	0.064	0.130	3	150	0
13	9/1/2016 9:19 AM	55	54.951	0.049	0.042		3	150	0
13	9/1/2016 9:20 AM	55	54.966	0.034	0.072		3	150	0
13	9/1/2016 9:21 AM	55	54.889	0.111	0.051		3	150	0
13	9/1/2016 9:22 AM	55	55.010	0.010	0.017		3	150	0
13	9/1/2016 9:23 AM	55	54.959	0.041	0.146		3	150	0
13	9/1/2016 9:24 AM	55	54.750	0.250	0.281		3	150	0
13	9/1/2016 9:25 AM	55	54.688	0.312	0.238		3	150	0
13	9/1/2016 9:26 AM	55	54.835	0.165	0.204		3	150	0
13	9/1/2016 9:27 AM	55	54.756	0.244	0.185		3	150	0
	9/1/2016 9:28 AM	55	54.875	0.125	0.063	3	150	0	
14	9/1/2016 9:29 AM	55	55.092	0.092	0.227	0.234	3	150	0
14	9/1/2016 9:30 AM	55	55.362	0.362	0.344		3	150	0
14	9/1/2016 9:31 AM	55	55.326	0.326	0.245		3	150	0
14	9/1/2016 9:32 AM	55	55.163	0.163	0.129		3	150	0
14	9/1/2016 9:33 AM	55	55.095	0.095	0.163		3	150	0
14	9/1/2016 9:34 AM	55	54.616	0.384	0.368		3	150	0
14	9/1/2016 9:35 AM	55	54.648	0.352	0.320		3	150	0
14	9/1/2016 9:36 AM	55	54.713	0.287	0.280		3	150	0
14	9/1/2016 9:37 AM	55	54.728	0.272	0.204		3	150	0
14	9/1/2016 9:38 AM	55	54.863	0.137	0.062		3	150	0
	9/1/2016 9:39 AM	55	55.106	0.106	0.053	3	150	0	
15	9/1/2016 9:40 AM	55	55.455	0.455	0.480	0.327	3	150	0
15	9/1/2016 9:41 AM	55	55.506	0.506	0.408		3	150	0
15	9/1/2016 9:42 AM	55	55.310	0.310	0.284		3	150	0
15	9/1/2016 9:43 AM	55	55.258	0.258	0.116		3	150	0
15	9/1/2016 9:44 AM	55	54.801	0.199	0.334		3	150	0
15	9/1/2016 9:45 AM	55	54.531	0.469	0.482		3	150	0
15	9/1/2016 9:46 AM	55	54.505	0.495	0.376		3	150	0
15	9/1/2016 9:47 AM	55	54.743	0.257	0.114		3	150	0
15	9/1/2016 9:48 AM	55	55.039	0.039	0.233		3	150	0
15	9/1/2016 9:49 AM	55	55.426	0.426	0.447		3	150	0
	9/1/2016 9:50 AM	55	55.467	0.467	0.234	3	150	0	

ภาพภาคผนวก ง-2 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
1	12/10/2016 1:08 AM	56	55.976	0.024	0.021	0.027	3.94	143	0.01
1	12/10/2016 1:09 AM	56	55.981	0.019	0.008		3.94	143	0.01
1	12/10/2016 1:10 AM	56	56.004	0.004	0.009		3.94	143	0.01
1	12/10/2016 1:11 AM	56	56.013	0.013	0.025		3.94	143	0.01
1	12/10/2016 1:12 AM	56	56.036	0.036	0.032		3.94	143	0.01
1	12/10/2016 1:13 AM	56	56.028	0.028	0.019		3.94	143	0.01
1	12/10/2016 1:14 AM	56	56.009	0.009	0.021		3.94	143	0.01
1	12/10/2016 1:15 AM	56	56.033	0.033	0.027		3.94	143	0.01
1	12/10/2016 1:16 AM	56	55.935	0.065	0.076		3.94	143	0.01
1	12/10/2016 1:17 AM	56	55.913	0.087	0.036		3.94	143	0.01
	12/10/2016 1:18 AM	56	56.025	0.025	0.012				
2	12/10/2016 1:19 AM	56	55.975	0.025	0.032	0.030	3.94	143	0.01
2	12/10/2016 1:20 AM	56	55.961	0.039	0.021		3.94	143	0.01
2	12/10/2016 1:21 AM	56	56.044	0.044	0.053		3.94	143	0.01
2	12/10/2016 1:22 AM	56	56.062	0.062	0.027		3.94	143	0.01
2	12/10/2016 1:23 AM	56	55.956	0.044	0.019		3.94	143	0.01
2	12/10/2016 1:24 AM	56	56.010	0.010	0.024		3.94	143	0.01
2	12/10/2016 1:25 AM	56	56.038	0.038	0.040		3.94	143	0.01
2	12/10/2016 1:26 AM	56	56.041	0.041	0.019		3.94	143	0.01
2	12/10/2016 1:27 AM	56	55.968	0.032	0.032		3.94	143	0.01
2	12/10/2016 1:28 AM	56	55.968	0.032	0.028		3.94	143	0.01
	12/10/2016 1:29 AM	56	55.975	0.025	0.012				
3	12/10/2016 1:30 AM	56	55.948	0.052	0.060	0.026	3.94	143	0.01
3	12/10/2016 1:31 AM	56	55.931	0.069	0.031		3.94	143	0.01
3	12/10/2016 1:32 AM	56	56.055	0.055	0.035		3.94	143	0.01
3	12/10/2016 1:33 AM	56	56.015	0.015	0.012		3.94	143	0.01
3	12/10/2016 1:34 AM	56	55.971	0.029	0.045		3.94	143	0.01
3	12/10/2016 1:35 AM	56	55.939	0.061	0.025		3.94	143	0.01
3	12/10/2016 1:36 AM	56	56.025	0.025	0.019		3.94	143	0.01
3	12/10/2016 1:37 AM	56	56.012	0.012	0.017		3.94	143	0.01
3	12/10/2016 1:38 AM	56	56.023	0.023	0.011		3.94	143	0.01
3	12/10/2016 1:39 AM	56	55.998	0.002	0.002		3.94	143	0.01
	12/10/2016 1:40 AM	56	56.004	0.004	0.002			3.94	143

ภาพภาคผนวก ง-3 ผลการคำนวณพื้นที่ใต้ส่วนโค้งจาก PID ที่ได้จากการทดลอง

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
4	12/10/2016 1:41 AM	56	55.948	0.052	0.048	0.032	3.94	143	0.01
4	12/10/2016 1:42 AM	56	55.955	0.045	0.032		3.94	143	0.01
4	12/10/2016 1:43 AM	56	55.981	0.019	0.020		3.94	143	0.01
4	12/10/2016 1:44 AM	56	55.979	0.021	0.064		3.94	143	0.01
4	12/10/2016 1:45 AM	56	56.144	0.144	0.064		3.94	143	0.01
4	12/10/2016 1:46 AM	56	55.979	0.021	0.009		3.94	143	0.01
4	12/10/2016 1:47 AM	56	56.012	0.012	0.013		3.94	143	0.01
4	12/10/2016 1:48 AM	56	56.014	0.014	0.017		3.94	143	0.01
4	12/10/2016 1:49 AM	56	56.020	0.020	0.019		3.94	143	0.01
4	12/10/2016 1:50 AM	56	56.018	0.018	0.034		3.94	143	0.01
	12/10/2016 1:51 AM	56	56.050	0.050	0.025	3.94	143	0.01	
5	12/10/2016 1:52 AM	56	56.008	0.008	0.008	0.022	3.94	143	0.01
5	12/10/2016 1:53 AM	56	56.008	0.008	0.014		3.94	143	0.01
5	12/10/2016 1:54 AM	56	55.967	0.033	0.034		3.94	143	0.01
5	12/10/2016 1:55 AM	56	55.964	0.036	0.027		3.94	143	0.01
5	12/10/2016 1:56 AM	56	55.982	0.018	0.008		3.94	143	0.01
5	12/10/2016 1:57 AM	56	56.004	0.004	0.005		3.94	143	0.01
5	12/10/2016 1:58 AM	56	55.987	0.013	0.017		3.94	143	0.01
5	12/10/2016 1:59 AM	56	56.042	0.042	0.027		3.94	143	0.01
5	12/10/2016 2:00 AM	56	56.013	0.013	0.022		3.94	143	0.01
5	12/10/2016 2:01 AM	56	56.030	0.030	0.057		3.94	143	0.01
	12/10/2016 2:02 AM	56	56.083	0.083	0.041	3.94	143	0.01	
6	12/10/2016 2:03 AM	56	56.019	0.019	0.045	0.045	3.94	143	0.01
6	12/10/2016 2:04 AM	56	56.070	0.070	0.032		3.94	143	0.01
6	12/10/2016 2:05 AM	56	55.943	0.057	0.067		3.94	143	0.01
6	12/10/2016 2:06 AM	56	55.923	0.077	0.059		3.94	143	0.01
6	12/10/2016 2:07 AM	56	55.958	0.042	0.033		3.94	143	0.01
6	12/10/2016 2:08 AM	56	55.975	0.025	0.025		3.94	143	0.01
6	12/10/2016 2:09 AM	56	56.061	0.061	0.079		3.94	143	0.01
6	12/10/2016 2:10 AM	56	56.098	0.098	0.072		3.94	143	0.01
6	12/10/2016 2:11 AM	56	56.046	0.046	0.020		3.94	143	0.01
6	12/10/2016 2:12 AM	56	55.994	0.006	0.016		3.94	143	0.01
	12/10/2016 2:13 AM	56	55.975	0.025	0.013	3.94	143	0.01	

ภาพภาคผนวก ง-3 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
7	12/10/2016 2:14 AM	56	56.052	0.052	0.026	0.025	3.94	143	0.01
7	12/10/2016 2:15 AM	56	56.001	0.001	0.028		3.94	143	0.01
7	12/10/2016 2:16 AM	56	55.942	0.058	0.032		3.94	143	0.01
7	12/10/2016 2:17 AM	56	55.994	0.006	0.022		3.94	143	0.01
7	12/10/2016 2:18 AM	56	56.049	0.049	0.020		3.94	143	0.01
7	12/10/2016 2:19 AM	56	55.981	0.019	0.036		3.94	143	0.01
7	12/10/2016 2:20 AM	56	56.084	0.084	0.035		3.94	143	0.01
7	12/10/2016 2:21 AM	56	55.957	0.043	0.018		3.94	143	0.01
7	12/10/2016 2:22 AM	56	56.010	0.010	0.018		3.94	143	0.01
7	12/10/2016 2:23 AM	56	55.958	0.042	0.017		3.94	143	0.01
	12/10/2016 2:24 AM	56	56.015	0.015	0.008	3.94	143	0.01	
8	12/10/2016 2:25 AM	56	56.022	0.022	0.024	0.029	3.94	143	0.01
8	12/10/2016 2:26 AM	56	55.942	0.058	0.026		3.94	143	0.01
8	12/10/2016 2:27 AM	56	56.007	0.007	0.016		3.94	143	0.01
8	12/10/2016 2:28 AM	56	56.025	0.025	0.035		3.94	143	0.01
8	12/10/2016 2:29 AM	56	55.916	0.084	0.046		3.94	143	0.01
8	12/10/2016 2:30 AM	56	55.992	0.008	0.006		3.94	143	0.01
8	12/10/2016 2:31 AM	56	55.995	0.005	0.029		3.94	143	0.01
8	12/10/2016 2:32 AM	56	56.062	0.062	0.032		3.94	143	0.01
8	12/10/2016 2:33 AM	56	56.003	0.003	0.021		3.94	143	0.01
8	12/10/2016 2:34 AM	56	56.039	0.039	0.054		3.94	143	0.01
	12/10/2016 2:35 AM	56	56.070	0.070	0.035	3.94	143	0.01	
9	12/10/2016 2:36 AM	56	56.115	0.115	0.049	0.032	3.94	143	0.01
9	12/10/2016 2:37 AM	56	55.933	0.067	0.028		3.94	143	0.01
9	12/10/2016 2:38 AM	56	56.029	0.029	0.023		3.94	143	0.01
9	12/10/2016 2:39 AM	56	55.946	0.054	0.044		3.94	143	0.01
9	12/10/2016 2:40 AM	56	55.967	0.033	0.022		3.94	143	0.01
9	12/10/2016 2:41 AM	56	55.989	0.011	0.005		3.94	143	0.01
9	12/10/2016 2:42 AM	56	56.004	0.004	0.021		3.94	143	0.01
9	12/10/2016 2:43 AM	56	55.955	0.045	0.019		3.94	143	0.01
9	12/10/2016 2:44 AM	56	56.027	0.027	0.054		3.94	143	0.01
9	12/10/2016 2:45 AM	56	56.082	0.082	0.055		3.94	143	0.01
	12/10/2016 2:46 AM	56	56.028	0.028	0.014	3.94	143	0.01	

ภาพภาคผนวก ง-3 (ต่อ)

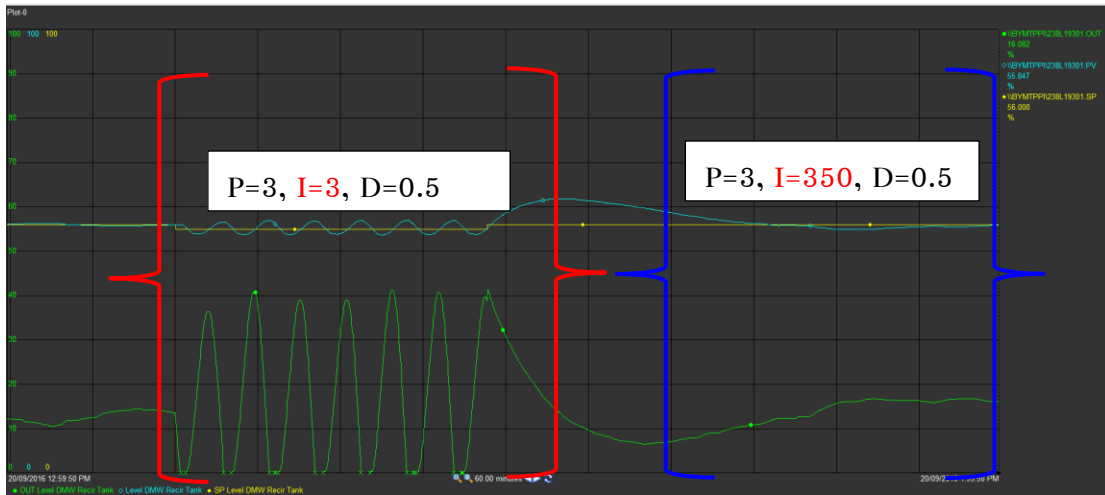
Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
10	12/10/2016 2:47 AM	56	56.011	0.011	0.005	0.028	3.94	143	0.01
10	12/10/2016 2:48 AM	56	55.995	0.005	0.035		3.94	143	0.01
10	12/10/2016 2:49 AM	56	55.935	0.065	0.036		3.94	143	0.01
10	12/10/2016 2:50 AM	56	55.993	0.007	0.030		3.94	143	0.01
10	12/10/2016 2:51 AM	56	55.947	0.053	0.022		3.94	143	0.01
10	12/10/2016 2:52 AM	56	56.013	0.013	0.014		3.94	143	0.01
10	12/10/2016 2:53 AM	56	55.965	0.035	0.043		3.94	143	0.01
10	12/10/2016 2:54 AM	56	55.949	0.051	0.041		3.94	143	0.01
10	12/10/2016 2:55 AM	56	56.098	0.098	0.046		3.94	143	0.01
10	12/10/2016 2:56 AM	56	55.993	0.007	0.004		3.94	143	0.01
	12/10/2016 2:57 AM	56	55.998	0.002	0.001		3.94	143	0.01
11	12/10/2016 2:58 AM	56	55.970	0.030	0.019	0.027	3.94	143	0.01
11	12/10/2016 2:59 AM	56	56.043	0.043	0.022		3.94	143	0.01
11	12/10/2016 3:00 AM	56	56.001	0.001	0.036		3.94	143	0.01
11	12/10/2016 3:01 AM	56	55.927	0.073	0.074		3.94	143	0.01
11	12/10/2016 3:02 AM	56	55.926	0.074	0.031		3.94	143	0.01
11	12/10/2016 3:03 AM	56	56.034	0.034	0.015		3.94	143	0.01
11	12/10/2016 3:04 AM	56	55.994	0.006	0.028		3.94	143	0.01
11	12/10/2016 3:05 AM	56	56.061	0.061	0.026		3.94	143	0.01
11	12/10/2016 3:06 AM	56	55.984	0.016	0.009		3.94	143	0.01
11	12/10/2016 3:07 AM	56	56.020	0.020	0.009		3.94	143	0.01
	12/10/2016 3:08 AM	56	55.984	0.016	0.008		3.94	143	0.01
12	12/10/2016 3:09 AM	56	55.991	0.009	0.016	0.038	3.94	143	0.01
12	12/10/2016 3:10 AM	56	56.037	0.037	0.039		3.94	143	0.01
12	12/10/2016 3:11 AM	56	56.041	0.041	0.019		3.94	143	0.01
12	12/10/2016 3:12 AM	56	55.996	0.004	0.043		3.94	143	0.01
12	12/10/2016 3:13 AM	56	56.089	0.089	0.037		3.94	143	0.01
12	12/10/2016 3:14 AM	56	55.962	0.038	0.024		3.94	143	0.01
12	12/10/2016 3:15 AM	56	56.056	0.056	0.067		3.94	143	0.01
12	12/10/2016 3:16 AM	56	55.840	0.160	0.100		3.94	143	0.01
12	12/10/2016 3:17 AM	56	55.961	0.039	0.021		3.94	143	0.01
12	12/10/2016 3:18 AM	56	55.998	0.002	0.013		3.94	143	0.01
	12/10/2016 3:19 AM	56	55.975	0.025	0.012		3.94	143	0.01

ภาพภาคผนวก ง-3 (ต่อ)

Run order	วันที่/ เวลา	ค่าเป้าหมาย (SP)	ค่าวัดได้ (PV)	σ	พื้นที่ส่วนโค้ง (Y)	\bar{Y}	P	I	D
13	12/10/2016 3:20 AM	56	55.996	0.004	0.048	0.036	3.94	143	0.01
13	12/10/2016 3:21 AM	56	56.098	0.098	0.079		3.94	143	0.01
13	12/10/2016 3:22 AM	56	56.061	0.061	0.025		3.94	143	0.01
13	12/10/2016 3:23 AM	56	55.972	0.028	0.020		3.94	143	0.01
13	12/10/2016 3:24 AM	56	55.988	0.012	0.020		3.94	143	0.01
13	12/10/2016 3:25 AM	56	56.047	0.047	0.045		3.94	143	0.01
13	12/10/2016 3:26 AM	56	56.043	0.043	0.033		3.94	143	0.01
13	12/10/2016 3:27 AM	56	55.921	0.079	0.059		3.94	143	0.01
13	12/10/2016 3:28 AM	56	55.961	0.039	0.016		3.94	143	0.01
13	12/10/2016 3:29 AM	56	56.022	0.022	0.012		3.94	143	0.01
	12/10/2016 3:30 AM	56	56.003	0.003	0.002	3.94	143	0.01	
14	12/10/2016 3:31 AM	56	56.037	0.037	0.068	0.066	3.94	143	0.01
14	12/10/2016 3:32 AM	56	56.099	0.099	0.042		3.94	143	0.01
14	12/10/2016 3:33 AM	56	55.945	0.055	0.130		3.94	143	0.01
14	12/10/2016 3:34 AM	56	55.795	0.205	0.148		3.94	143	0.01
14	12/10/2016 3:35 AM	56	55.909	0.091	0.042		3.94	143	0.01
14	12/10/2016 3:36 AM	56	56.010	0.010	0.042		3.94	143	0.01
14	12/10/2016 3:37 AM	56	56.074	0.074	0.053		3.94	143	0.01
14	12/10/2016 3:38 AM	56	56.032	0.032	0.058		3.94	143	0.01
14	12/10/2016 3:39 AM	56	56.084	0.084	0.036		3.94	143	0.01
14	12/10/2016 3:40 AM	56	55.950	0.050	0.039		3.94	143	0.01
	12/10/2016 3:41 AM	56	55.972	0.028	0.014	3.94	143	0.01	
15	12/10/2016 3:42 AM	56	55.897	0.103	0.120	0.056	3.94	143	0.01
15	12/10/2016 3:43 AM	56	55.864	0.136	0.063		3.94	143	0.01
15	12/10/2016 3:44 AM	56	56.013	0.013	0.006		3.94	143	0.01
15	12/10/2016 3:45 AM	56	55.987	0.013	0.016		3.94	143	0.01
15	12/10/2016 3:46 AM	56	55.980	0.020	0.008		3.94	143	0.01
15	12/10/2016 3:47 AM	56	56.012	0.012	0.005		3.94	143	0.01
15	12/10/2016 3:48 AM	56	55.997	0.003	0.049		3.94	143	0.01
15	12/10/2016 3:49 AM	56	56.102	0.102	0.043		3.94	143	0.01
15	12/10/2016 3:50 AM	56	55.947	0.053	0.114		3.94	143	0.01
15	12/10/2016 3:51 AM	56	55.826	0.174	0.132		3.94	143	0.01
	12/10/2016 3:52 AM	56	55.911	0.089	0.045	3.94	143	0.01	

ภาพภาคผนวก ง-3 (ต่อ)

ภาคผนวก จ
เปรียบเทียบลักษณะของกราฟ



ภาพภาคผนวก จ-1 เปรียบเทียบลักษณะของกราฟที่ค่า I ต่ำสุดกับสูงสุด