



การลดปริมาณของเสียในกระบวนการกลั่นสารอัลลิลคลอไรด์ โดยใช้การทดลอง พื้นผิวตอบสนอง

ภูมินทร์ รักษากิจ

นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ธีรเดช วุฒิพรพันธ์* และ กุศล พินาพันธุ์ศรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 8141 อีเมล: teeradejw@kmutnb.ac.th

รับเมื่อ 8 มกราคม 2558 ตอบรับเมื่อ 21 เมษายน 2558 เผยแพร่ออนไลน์ 22 มิถุนายน 2558

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.04.006 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

กระบวนการกลั่นสารอัลลิลคลอไรด์ในโรงงานกรณีศึกษาที่มีของเสียเกิดขึ้น 2 ชนิด ได้แก่ กากตะกอนจากการกลั่นซึ่งเกิดขึ้นเฉลี่ยชั่วโมงละ 280 กิโลกรัม และการสูญเสียสารอัลลิลคลอไรด์เฉลี่ยอยู่ที่ 1.3% โดยน้ำหนัก จากการศึกษากระบวนการกลั่นพบว่า มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องและควบคุมได้อยู่ 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของสารผสมก่อนเข้าหอกกลั่น ปริมาณไอน้ำที่ให้ความร้อนหอกกลั่น และอัตราการป้อนสารอัลลิลคลอไรด์กลับเข้าหอกกลั่น ปัจจุบันทางโรงงานฯ ได้ปรับตั้งปัจจัยเหล่านี้เพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ของสารอัลลิลคลอไรด์ไม่ต่ำกว่า 98% โดยไม่ได้คำนึงถึงของเสียที่เกิดขึ้น จึงทำให้มีของเสียเกิดขึ้นมากเกินความจำเป็น ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนอง ในการหาการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อลดปริมาณของเสียและยังคงได้ความบริสุทธิ์ของสารอัลลิลคลอไรด์ไม่ต่ำกว่าที่กำหนด จากการทดลองใช้จำนวนค่าปัจจัยที่ได้ พบว่าสามารถลดกากตะกอนเหลือเพียงชั่วโมงละ 168.41 กิโลกรัม ซึ่งทำให้โรงงานสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนลงได้ประมาณเดือนละ 401,760 บาท และยังสามารถลดอัตราการสูญเสียสารอัลลิลคลอไรด์ที่ด้านล่างของหอกกลั่นเหลือเพียง 0.0092% โดยยังคงได้ความบริสุทธิ์ของสารอัลลิลคลอไรด์ไม่ต่ำกว่า 98% ตามที่โรงงานกำหนด

คำสำคัญ: กระบวนการกลั่น สารอัลลิลคลอไรด์ การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง การทดลองแบบ CCD

การอ้างอิงบทความ: ภูมินทร์ รักษากิจ, ธีรเดช วุฒิพรพันธ์ และ กุศล พินาพันธุ์ศรี, “การลดปริมาณของเสียในกระบวนการกลั่นสารอัลลิลคลอไรด์ โดยใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนอง,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 25, ฉบับที่ 3, หน้า 393-403, ก.ย.-ธ.ค. 2558. <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2015.04.006>



Wastes Reduction in Allyl Chloride Distillation Process Using Response Surface Experiment

Phumin Raksakit

Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Teeradej Wuttiornpun* and Kusol Pimapunsri

Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 8141, E-mail: teeradejw@kmutnb.ac.th

Received 8 January 2015; Accepted 21 April 2015; Published online: 22 June 2015

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.04.006 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The Allyl Chloride distillation process in a selected factory generates plenty of sediments at 280 kg/hr and loses 1.3% of Allyl Chloride by weight. In distillation process, there are three main factors: inlet temperature, steam flow rate and feedback flow rate of Allyl Chloride. These three factors are currently set in order to obtain the purity of at least 98% Allyl Chloride without waste concern. The response surface experiment is applied to set an optimal factor in order to reduce the wastes and maintain the desired purity of Allyl Chloride. According to the setting of optimal factors, the sediments are greatly reduced to 168.41 kg/hr which reduces the cost of getting rid of wastes at about 401,760 baht/month. In addition, the loss of Allyl Chloride is dramatically reduced to 0.0092% with the purity of not less than 98% Allyl Chloride as expected.

Keywords: Distillation Process, Allyl Chloride, Response Surface Analysis, CCD Experiment

Please cite this article as: P. Raksakit, T. Wuttiornpun and K. Pimapunsri, "Wastes Reduction in Allyl Chloride Distillation Process Using Response Surface Experiment," *J. KMUTNB*, Vol. 25, No. 3, pp. 393–403, Sep.–Dec. 2015 (in Thai). <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2015.04.006>

1. บทนำ

สารอัลลิลคลอไรด์ (Allyl Chloride) เป็นวัตถุอันตรายที่สำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกาวประเภทต่างๆ ซึ่งมีสูตรทางเคมีคือ C_3H_5Cl สารนี้จะประกอบด้วยสารตั้งต้นที่สำคัญ 2 ชนิด ได้แก่ ก๊าซโพรพิลีน (C_3H_6) กับก๊าซคลอรีน (Cl_2) ทำปฏิกิริยากันที่สัดส่วนโมล 5 : 1 ผลที่ได้คือ สารอัลลิลคลอไรด์ และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ดังแสดงในสมการ (1)



ถ้าต้องการสารอัลลิลคลอไรด์ที่บริสุทธิ์โดยปราศจากกรดไฮโดรคลอริกและสารผสมอื่นๆ จะต้องใช้กระบวนการกลั่น (Distillation Process) ขั้นตอนการกลั่นสารนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1 แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

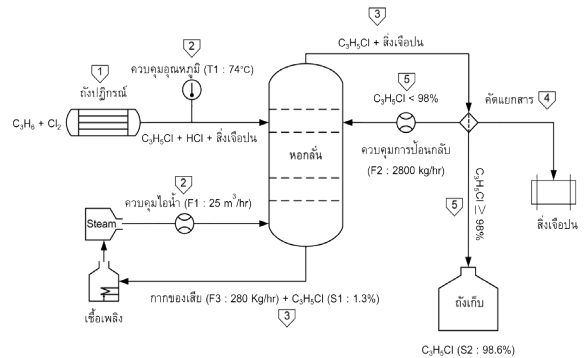
1) นำก๊าซโพรพิลีนและก๊าซคลอรีนมาทำปฏิกิริยากันที่ถังปฏิกรณ์หลังจากการทำปฏิกิริยาจะได้สารอัลลิลคลอไรด์ กรดไฮโดรคลอริก และสิ่งเจือปนซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์

2) ปล่อยสารผสมที่ได้จากข้อที่ 1 เข้าหอกกลั่น โดยต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ (T1) และควบคุมปริมาณไอน้ำ (F1) ที่ใช้ในการกลั่นให้เหมาะสม

3) สารอัลลิลคลอไรด์จะถูกกลั่นแยกออกจากสารอื่นๆ โดยที่ส่วนบนของหอกกลั่นจะได้สารอัลลิลคลอไรด์ และสิ่งเจือปน ส่วนด้านล่างของหอกกลั่นจะได้กากตะกอนของเสีย (F3) ซึ่งกากของเสียที่ด้านล่างของหอกกลั่นนี้จะมีสารอัลลิลคลอไรด์ (S1) ผสมอยู่บ้างบางส่วน ซึ่งทั้งหมดจะถูกนำไปกำจัดทิ้ง

4) สารที่ได้จากส่วนบนของหอกกลั่นจะถูกนำมาเข้าตัวคัดแยก ซึ่งมีหน้าที่คัดแยกสิ่งเจือปนออกเพื่อให้ได้สารอัลลิลคลอไรด์ที่บริสุทธิ์มากขึ้น

5) หลังจากผ่านตัวคัดแยก สารอัลลิลคลอไรด์ที่มีความบริสุทธิ์ต่ำกว่าที่กำหนดจะถูกป้อนกลับไปในหอกกลั่น (F2) ส่วนสารอัลลิลคลอไรด์ที่มีความบริสุทธิ์อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดจะถูกนำไปจัดเก็บ



รูปที่ 1 กระบวนการกลั่นสารอัลลิลคลอไรด์

เมื่อศึกษากระบวนการกลั่นสารอัลลิลคลอไรด์ของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน พบว่าในปัจจุบันทางโรงงานควบคุมปัจจัยในกระบวนการกลั่นซึ่งได้แก่ T1, F1 และ F2 ไว้ที่ค่า $74^{\circ}C$, $25 m^3/hr$ และ $2,800 kg/hr$ ตามลำดับ ซึ่งจะได้ความบริสุทธิ์ของสารอัลลิลคลอไรด์ (S2) เฉลี่ยที่ 98.6% โดยมีกากของเสีย (F3) เกิดขึ้นเฉลี่ย $280 kg/hr$ อีกทั้งยังมีสารอัลลิลคลอไรด์ที่เสียไปที่ด้านล่างของหอกกลั่น (S1) เฉลี่ย 1.3% โดยน้ำหนัก จากผลดังกล่าวทำให้ทางโรงงานต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนประมาณเดือนละ 1,008,000 บาท และยังสูญเสียสารอัลลิลคลอไรด์ไปเป็นเชื้อเพลิงโดยเปล่าประโยชน์

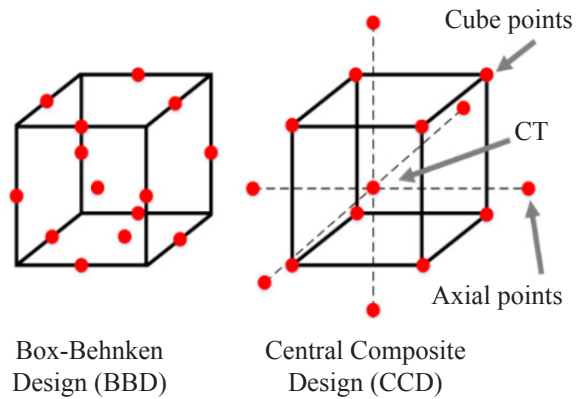
จากการศึกษาร่วมกับวิศวกรของทางโรงงาน พบว่าสาเหตุหลักเกิดจากการปรับตั้งค่าปัจจัย T1, F1 และ F2 ยังไม่เหมาะสม ในปัจจุบันทางโรงงานปรับค่าปัจจัยเหล่านี้เพื่อให้ได้ค่าความบริสุทธิ์ของสารอัลลิลคลอไรด์ (S2) ไม่ต่ำกว่าที่กำหนดไว้โดยไม่ได้คำนึงถึงค่า S1 และ F3 มากนัก อีกทั้งค่าความบริสุทธิ์ของสารอัลลิลคลอไรด์ที่ได้ในปัจจุบันนั้นก็ยังมีค่าสูงเกินความจำเป็นเนื่องจากทางโรงงานต้องการให้มีค่าไม่ต่ำกว่า 98% เท่านั้น

ผู้วิจัยจึงเสนอให้ทางโรงงานปรับตั้งค่าปัจจัยดังกล่าวใหม่โดยพิจารณาค่า S1, S2 และ F3 พร้อมๆกัน โดยได้นำเสนอวิธีการหาค่าของปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Experiment) โดยมีขั้นตอนการทดลอง 2 ขั้นตอน

ขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบว่าบริเวณการตั้งค่าปัจจัยในปัจจุบันเป็นบริเวณที่สามารถให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดหรือไม่ โดยใช้การทดลองแฟกทอเรียลแบบมีจุดกึ่งกลาง (Factorial with Center Points) ถ้าบริเวณปัจจุบันไม่สามารถให้ค่าที่ดีที่สุดได้ จะทำการหาบริเวณใหม่โดยใช้วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent) ขั้นตอนที่สองเป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้การทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Experiment) เมื่อพบว่าบริเวณที่ทดสอบสามารถให้ค่าที่ดีที่สุดได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีสำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 เรื่อง ได้แก่ การทดลองแฟกทอเรียล การทดลองแฟกทอเรียลที่มีจุดกึ่งกลาง วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด และการทดลองพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งจะถูกใช้ร่วมกันโดยใช้หลักการดังนี้ การทดลองแฟกทอเรียล (Factorial Experiment) ใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม (Main and Interaction Effects) ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง (Response) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อหาค่าของปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าตอบสนองที่ต้องการ อย่างไรก็ตามค่าตอบสนองที่ได้จากปัจจัยที่เหมาะสมนี้อาจจะไม่ใช่ว่าดีที่สุด วิธีการตรวจสอบว่าบริเวณของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแฟกทอเรียลเป็นบริเวณที่สามารถให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดหรือไม่ โดยทั่วไปจะใช้การทดลองแฟกทอเรียลแบบมีจุดกึ่งกลาง (Factorial Experiment with Center Points) ถ้าพบว่าค่าปัจจัยที่จุดกึ่งกลางมีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนอง จะแสดงว่าค่าตอบสนองที่ดีที่สุดจะอยู่ในบริเวณที่ทดลอง แต่ถ้าพบว่าค่าปัจจัยที่จุดกึ่งกลางไม่มีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนอง จะแสดงว่าบริเวณที่ทดลองยังไม่สามารถให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดได้ ซึ่งจะต้องหาบริเวณในการทดลองใหม่โดยใช้วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด จนกระทั่งพบบริเวณที่ค่าจุดกึ่งกลางของปัจจัยมีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนอง หลังจากพบบริเวณดังกล่าวแล้ว ให้ทำการออกแบบทดลองและการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองในการหาค่าที่ดีที่สุดต่อไป [1]



รูปที่ 2 ลักษณะของการทดลองแบบ BBD และ CCD

การทดลองพื้นผิวตอบสนองที่นิยมใช้มี 2 แบบ ได้แก่ การทดลองแบบ CCD (Central Composite Design) และการทดลองแบบ BBD (Box-Behnken Design) ดังแสดงในรูปที่ 2

การทดลองแบบ CCD จะประกอบไปด้วยการทดลอง 2 ชนิด ได้แก่ การทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบมีจุดกึ่งกลาง (Cube Points and CT) และการทดลองนอกบริเวณของการทดลองแฟกทอเรียล (Axial Points) ซึ่งทั้งสองการทดลองจะถูกใช้ในงานวิจัยนี้ ในขณะที่การทดลองแบบ BBD จะเป็นการตั้งค่าปัจจัยระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแต่ละปัจจัยเท่านั้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้การทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองมีดังต่อไปนี้ ในปี 2535 สุนีย์ [2] ได้ประยุกต์ใช้การทดลองพื้นผิวตอบสนองในอุตสาหกรรมการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า จากการใช้การทดลองแบบ CCD พบว่าควรใช้แรงดันในการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ที่ 400 psi เวลาฉีด 3 sec และอุณหภูมิพลาสติกที่ 184°F จึงจะทำให้สัดส่วนการขาดและล้มของเส้นลวดเหลือเพียง 33.57 ppm ในปี 2551 ธนภูมิ [3] ได้ศึกษาผลของการปรับค่า PH และอัตราการให้อากาศต่อการผลิตกรดแลกติกของเชื้อราชนิด KPS 106 ในถังหมักแบบลอยตัวขนาด 3 ลิตร โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ CCD พบว่าการใช้ค่า pH และอัตราการให้อากาศเท่ากับ 5.85 และ 0.72 ปริมาตร

อากาศต่อปริมาตรอาหารต่อหน้าที่ ตามลำดับ จะได้กรดแลกติกสูงถึง 89.37 กรัมต่อลิตร ภายหลังจากหมักเป็นเวลา 96 ชั่วโมง และในปีเดียวกัน จรรย์ [4] ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเอนไซม์ ในการหมักแบบแห้งที่ใช้ฟางข้าวเป็นวัสดุหมักด้วยการทดลองพื้นผิวตอบสนอง พบว่าจากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่ได้จากการทดลองจะสามารถทำให้ผลิตเอนไซม์ได้สูงกว่าเดิม 3.08 เท่า ในปี 2553 วิไลวัลย์ [5] ได้พัฒนาสูตรคูกี้สอดไส้แยมผลไม้เพื่อลดต้นทุนด้วยการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง โดยการวางแผนการทดลองแบบ CCD เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งของคูกี้ พบว่าอัตราส่วนของเนยขาวที่ 44% และน้ำตาลที่ 9% จะมีค่าความแตกต่างของความแข็งจากสูตรปัจจุบัน 8 ไมโครนิวตัน หากเปรียบเทียบคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสด้านความชอบระหว่างคูกี้สูตรที่พัฒนาและสูตรปัจจุบัน ทางด้านกลิ่นหอมเนย ความแข็งรสชาติ และความชอบ ถือว่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเลือกสูตรที่พัฒนาขึ้นเพื่อปรับลดต้นทุน ซึ่งสามารถลดต้นทุนของเนยลงได้ถึง 1,914,105 บาทต่อปี ในปี 2554 รัจรงค์ [6] ได้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตกระป๋องบรรจุอาหารที่มีลอนด้วยการทดลองพื้นผิวตอบสนอง พบว่าความลึกของลอนบนกระป๋อง รัศมีของลอน และระยะห่างระหว่างลอน เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ การรับแรงในแนวแกนของกระป๋อง เมื่อนำฟังก์ชันพหุนามลำดับที่สองมาออกแบบรูปแบบลอน สามารถทำให้ลดปริมาณวัสดุดิบในการผลิตกระป๋องลงไปถึง 12% โดยมีประสิทธิภาพการรับแรงตามที่ต้องการ และสุดท้ายในปี 2555 วันชัย [7] ได้ศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตแผ่นไม้จากยางพาราที่มีการผสมเศษยางรถยนต์ที่เหลือจากอุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์ จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม และการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง พบว่าการใช้ปริมาณเศษยางรถยนต์ 5% ผสมกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ 13% โดยใช้เวลาในการอัด 5 นาที และความหนาแน่นมากกว่า 870 kg/m³ สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นไม้ให้สอดคล้องตามมาตรฐาน รวมทั้งส่งผลให้เกิดการนำเศษยางรถยนต์

ที่เหลือนำเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล (Recycle) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาในงานวิจัยนี้ได้ ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอวิธีการนี้ให้กับทางโรงงาน โดยการหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อที่จะทำให้ค่าตอบสนองทั้ง 3 ค่า เป็นไปตามที่ทางโรงงานต้องการ ให้โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานดังแสดงในหัวข้อถัดไป

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

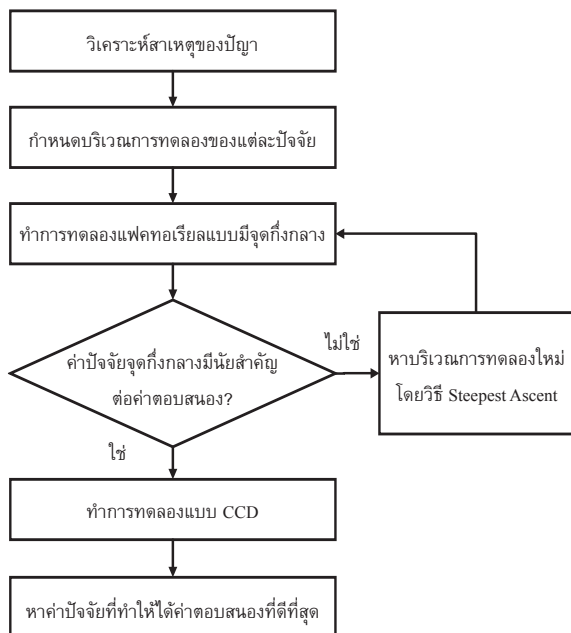
วิธีการดำเนินงานเพื่อแก้ปัญหาของงานวิจัยนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยจะเริ่มตั้งแต่การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา การกำหนดค่าของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง และการทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึง 2 ขั้นตอนแรก ส่วนขั้นตอนที่เหลือจะแสดงในหัวข้อถัดไป

3.1 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากการวิเคราะห์ร่วมกับวิศวกรและผู้เชี่ยวชาญของโรงงานกรณีศึกษา พบว่าการปรับตั้งค่าปัจจัย T1, F1 และ F2 ในปัจจุบันนั้นยังไม่เหมาะสม เพราะปรับตั้งโดยมุ่งเน้นให้ได้ค่าความบริสุทธิ์ของสารอัลลิลคลอไรด์ (S2) ไม่ต่ำกว่า 98% โดยไม่พิจารณาปริมาณกากตะกอนของเสียที่เกิดขึ้น (F3) และปริมาณของสารอัลลิลคลอไรด์ที่หลุดออกมาจากหอกลิ้นด้านล่าง (S1) ดังนั้นปัจจัยดังกล่าวจึงเป็นปัจจัยหลักที่จะใช้ในการทดลองนี้

3.2 กำหนดบริเวณการทดลองของแต่ละปัจจัย

การกำหนดบริเวณการทดลองของแต่ละปัจจัย จะทำโดยใช้ค่าที่ใช้จริงในปัจจุบันเป็นจุดกึ่งกลาง จากนั้นจะสร้างช่วงของปัจจัยทั้งทางด้านลบและด้านบวก การกำหนดช่วงดังกล่าวนี้จะทำร่วมกับวิศวกรที่โรงงานโดยต้องพิจารณาค่าที่สามารถปรับตั้งได้จริง โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบ ค่าที่กำหนดขึ้นนี้แสดงได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	จุดกึ่งกลาง (ค่าที่ใช้ในปัจจุบัน)	ระดับต่ำ-สูง (Level)
T1	74 °C	72 °C
		76 °C
F1	25 m ³ /hr	23 m ³ /hr
		27 m ³ /hr
F2	2,800 kg/hr	2,700 kg/hr
		2,900 kg/hr

4. การทดสอบความมีนัยสำคัญของจุดกึ่งกลาง

จากค่าระดับของปัจจัยต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 1 ในขั้นตอนนี้จะใช้การทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2³ ทำซ้ำ 3 ครั้ง และทดสอบที่จุดกึ่งกลางจำนวน 5 ครั้ง เพื่อเพิ่มความแม่นยำ และใช้ค่าตอบสนองเป็น S1, S2 และ F3 รวมเป็นการทดลองทั้งสิ้น 29 การทดลอง ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแต่ละค่าตอบสนองแสดงดังรูปที่ 4 ถึง 6 ตามลำดับ

Factorial Fit: S1(%wt) versus T1, F1, F2

Estimated Effects and Coefficients for S1(%wt)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		1.2283	0.009951	123.43	0.000
T1	-0.7233	-0.3617	0.009951	-36.34	0.000
F1	-1.6498	-0.8249	0.009951	-82.90	0.000
F2	1.2495	0.6248	0.009951	62.78	0.000
T1*F1	0.4360	0.2180	0.009951	21.91	0.000
T1*F2	0.1527	0.0763	0.009951	7.67	0.000
F1*F2	-0.6065	-0.3032	0.009951	-30.47	0.000
T1*F1*F2	-0.2857	-0.1428	0.009951	-14.35	0.000
Ct Pt		0.1138	0.023966	4.75	0.000

รูปที่ 4 ค่านัยสำคัญของจุดกึ่งกลางต่อค่า S1

Factorial Fit: S2(%wt) versus T1, F1, F2

Estimated Effects and Coefficients for S2(%wt)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		98.5305	0.002981	33048.65	0.000
T1	-0.1590	-0.0795	0.002981	-26.67	0.000
F1	-0.5558	-0.2779	0.002981	-93.22	0.000
F2	0.3690	0.1845	0.002981	61.88	0.000
T1*F1	0.0168	0.0084	0.002981	2.82	0.011
T1*F2	0.0823	0.0412	0.002981	13.81	0.000
F1*F2	0.1025	0.0513	0.002981	17.19	0.000
T1*F1*F2	0.1612	0.0806	0.002981	27.03	0.000
Ct Pt		0.0891	0.007180	12.41	0.000

รูปที่ 5 ค่านัยสำคัญของจุดกึ่งกลางต่อค่า S2

Factorial Fit: F3(Kg/hr) versus T1, F1, F2

Estimated Effects and Coefficients for F3(Kg/hr)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		258.98	1.344	192.67	0.000
T1	-47.88	-23.94	1.344	-17.81	0.000
F1	-90.48	-45.24	1.344	-33.66	0.000
F2	85.55	42.77	1.344	31.82	0.000
T1*F1	22.15	11.07	1.344	8.24	0.000
T1*F2	15.08	7.54	1.344	5.61	0.000
F1*F2	-5.18	-2.59	1.344	-1.93	0.068
T1*F1*F2	-18.18	-9.09	1.344	-6.76	0.000
Ct Pt		20.42	3.237	6.31	0.000

รูปที่ 6 ค่านัยสำคัญของจุดกึ่งกลางต่อค่า F3

จากรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 6 พบว่าค่า *P-Value* ของปัจจัยที่จุดกึ่งกลาง (Ct Pt) ของค่าตอบสนองทั้ง 3 ค่า มีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าค่าปัจจัยที่จุดกึ่งกลางมีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนอง นั่นแสดงว่าค่าตอบสนองที่ดีที่สุดจะอยู่ในบริเวณที่ทดลอง จึงไม่จำเป็นต้องใช้วิธีการป็นขั้นด้วยทางที่ชันที่สุดเพื่อหาบริเวณการ



ทดลองใหม่ จากนั้นผู้วิจัยจึงสามารถนำบริเวณที่ทดลองนี้ไปทำการทดลองพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาค่าตอบสนองที่ดีที่สุดต่อไป

5. การวิเคราะห์ผลการทดลองพื้นผิวตอบสนอง

จากข้อมูลในหัวข้อที่ 4 มีการทดลองที่ Cube Points จำนวน 24 การทดลอง และมีการทดลองที่จุดกึ่งกลางจำนวน 5 การทดลอง เนื่องจากการทดลอง CCD แบบ 3 ปัจจัย ต้องการข้อมูลที่จุดกึ่งกลาง และข้อมูลที่ Axial Points อย่างละ 6 การทดลอง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการทดลองเพิ่มที่จุด Axial Points จำนวน 6 การทดลอง และที่จุดกึ่งกลางอีก 1 การทดลอง จึงมีการทดลองรวมทั้งสิ้น 36 การทดลอง จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ การเลือกโมเดลที่เหมาะสมของการทดลอง (Final Model) การตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลการทดลอง (Model Adequacy Checking) การหาสมการในการทำนายค่าตอบสนอง (Regression) และการหาบริเวณการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมรวมถึงการหาค่าตอบสนองที่ดีที่สุด (Overlaid Contour and Response Optimization) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การเลือกโมเดลที่เหมาะสม (Final Model)

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการให้ได้สมการที่สามารถทำนายความผันแปรได้สูงที่สุด (R^2 -adjusted สูงที่สุด) ดังนั้นการเลือกโมเดลที่เหมาะสม จะอนุญาตให้หน้าปัจจัยที่มีค่า P -value ใกล้เคียงกับค่า 0.05 บางปัจจัยเข้ามารวมอยู่ด้วย จากเหตุผลดังกล่าว ปัจจัย $F1 * F1$ และ $T1 * F2$ สำหรับค่าตอบสนอง S1 ซึ่งมีค่า P -value ใกล้เคียงกับค่า 0.05 จึงถูกเลือกเข้ามาอยู่ในโมเดลที่แสดงอยู่ในรูปที่ 7 และทำให้ได้ค่า R^2 -adjusted สูงถึง 95.44% ซึ่งแสดงว่าโมเดลที่เลือกนี้สามารถทำนายความผันแปรได้ดีมากในกรณีนี้ที่ตัดปัจจัยเหล่านี้ออกจะทำให้ได้ค่า R^2 -adjusted ต่ำกว่า 85% ซึ่งจะทำให้ได้สมการที่เหมาะสมน้อยลงด้วยหลักการเดียวกัน โมเดลที่เหมาะสมของค่าตอบสนอง S2 และ F3 จะแสดงดังรูปที่ 8 และ 9

Response Surface Regression: S1(%wt)

Coded units.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.3629	0.06140	22.198	0.000
T1	-0.6543	0.07097	-9.218	0.000
F1	-1.3190	0.07097	-18.584	0.000
F2	1.1017	0.07097	15.522	0.000
F1*F1	-0.2252	0.16474	-1.367	0.182
T1*F1	0.6166	0.13269	4.647	0.000
T1*F2	0.2159	0.13269	1.627	0.115
F1*F2	-0.8577	0.13269	-6.464	0.000

S = 0.229822 PRESS = 2.69448
R-Sq = 96.35% R-Sq(pred) = 93.35% R-Sq(adj) = 95.44%

Regression Coefficients for S1(%wt) in uncoded units

Term	Coef
Constant	68.5462
T1	-2.62568
F1	0.815657
F2	0.0162136
F1*F1	-0.0199059
T1*F1	0.0545000
T1*F2	0.000381667
F1*F2	-0.00151625

รูปที่ 7 โมเดลที่เหมาะสมสำหรับค่าตอบสนอง S1

Response Surface Regression: S2(%wt)

Coded units.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	98.6135	0.03060	3222.444	0.000
T1	-0.1468	0.03538	-4.150	0.000
F1	-0.4083	0.03538	-11.541	0.000
F2	0.3112	0.03538	8.797	0.000
F2*F2	-0.1691	0.08211	-2.060	0.048
T1*F2	0.1164	0.06614	1.761	0.089
F1*F2	0.1450	0.06614	2.192	0.037

S = 0.114551 PRESS = 0.607006
R-Sq = 89.22% R-Sq(pred) = 82.80% R-Sq(adj) = 86.99%

Regression Coefficients for S2(%wt) in uncoded units

Term	Coef
Constant	113.399
T1	-0.619985
F1	-0.838884
F2	0.0137014
F2*F2	-5.98018E-06
T1*F2	0.000205833
F1*F2	0.000256250

รูปที่ 8 โมเดลที่เหมาะสมสำหรับค่าตอบสนอง S2

Response Surface Regression: F3(Kg/hr)

Coded units.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	280.80	4.807	58.417	0.000
T1	-38.66	4.332	-8.925	0.000
F1	-71.57	4.332	-16.522	0.000
F2	73.92	4.332	17.066	0.000
F1*F1	-19.41	10.059	-1.930	0.064
F2*F2	-34.46	10.059	-3.426	0.002
T1*F1	31.32	8.098	3.868	0.001
T1*F2	21.33	8.098	2.634	0.014

S = 14.0266 PRESS = 10805.2
R-Sq = 96.05% R-Sq(pred) = 92.25% R-Sq(adj) = 95.06%

Regression Coefficients for F3(Kg/hr) in uncoded units

Term	Coef
Constant	2743.31
T1	-186.296
F1	-140.378
F2	4.47215
F1*F1	-1.71574
F2*F2	-0.00121839
T1*F1	2.76875
T1*F2	0.0377083

รูปที่ 9 โมเดลที่เหมาะสมสำหรับค่าตอบสนอง F3

5.2 การตรวจสอบความถูกต้องของโมเดล (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลจะตรวจสอบโดยใช้การวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ได้จากโมเดลที่เลือกในข้อ 5.1 โดยค่าส่วนตกค้างจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distributed) ค่าความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างของปัจจัยต่างๆ จะต้องมีความคงที่ (Constant Variance) และค่าส่วนตกค้างต้องมีการกระจายตัวแบบสุ่ม (Randomization) จากค่า *P-value* ที่ระบุอยู่ในรูปที่ 10, 11 และ 12 พบว่าโมเดลการทดลองของทุกค่าตอบสนองไม่มีความผิดปกติแต่อย่างใด

5.3 การหาสมการในการทำนายค่าตอบสนอง

จากโมเดลที่เหมาะสมในรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 9 เราสามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์มาเขียนสมการในการทำนายค่าตอบสนองได้ตั้งสมการ (2) ถึง (4) และพบว่าสมการเหล่านี้สามารถอธิบายความผันแปรได้ตั้งแต่ 86% ถึง 95%

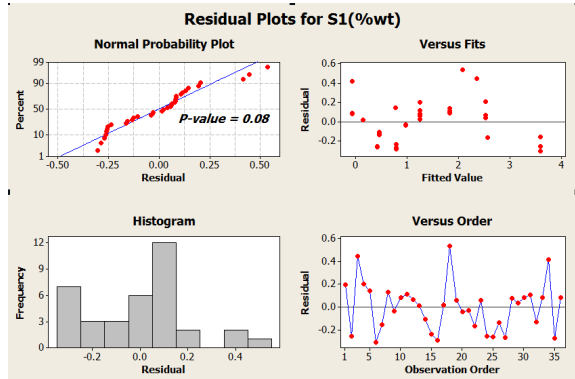
$$\begin{aligned}
 S1 = & 68.5462 - 2.6256(T1) + 0.8156(F1) \\
 & + 0.0162(F2) - 0.0199(F1)^2 \\
 & + 0.0545(T1)(F1) + 0.0004(T1)(F2) \\
 & - 0.0015(F1)(F2) \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S2 = & 113.399 - 0.6199(T1) - 0.8388(F1) \\
 & + 0.0137(F2) - 0.000005(F2)^2 \\
 & + 0.0002(T1)(F2) + 0.0002(F1)(F2) \quad (3)
 \end{aligned}$$

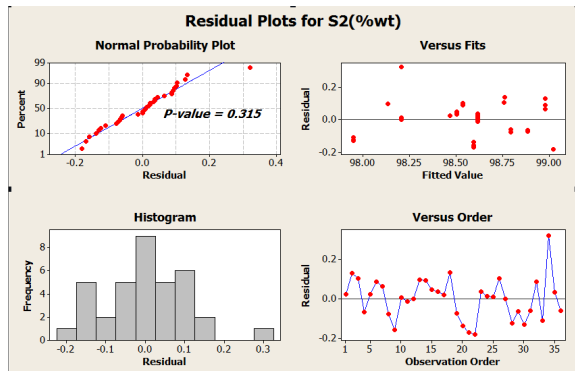
$$\begin{aligned}
 F3 = & 2743.31 - 186.269(T1) - 140.378(F1) \\
 & + 4.4721(F2) - 1.7157(F1)^2 \\
 & - 0.0012(F2)^2 + 2.7687(T1)(F1) \\
 & + 0.0377(T1)(F2) \quad (4)
 \end{aligned}$$

5.4 การหาบริเวณการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมและการหาค่าที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัย

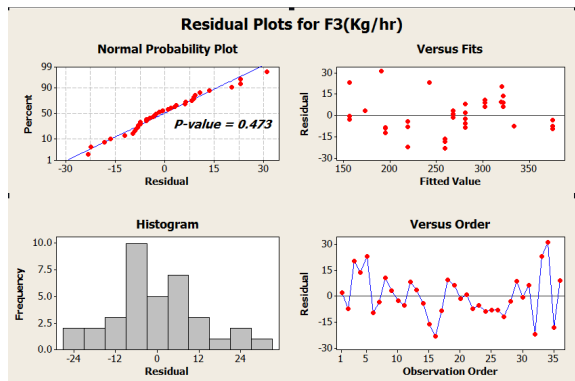
ผู้วิจัยได้ใช้หลักการซ้อนทับกันของค่าตอบสนองทุกตัว (Overlaid Contour Plot of Responses) เพื่อเป็นการศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาของปัจจัยที่มีต่อค่าตอบสนองทั้ง 3 ค่าพร้อมๆ กัน รวมไปถึงการหาบริเวณ



รูปที่ 10 การตรวจสอบโมเดลสำหรับค่าตอบสนอง S1



รูปที่ 11 การตรวจสอบโมเดลสำหรับค่าตอบสนอง S2



รูปที่ 12 การตรวจสอบโมเดลสำหรับค่าตอบสนอง F3

การปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้ โดยกำหนดช่วงของค่าตอบสนองตามที่ทางโรงงานต้องการ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ช่วงของค่าตอบสนองที่ต้องการ

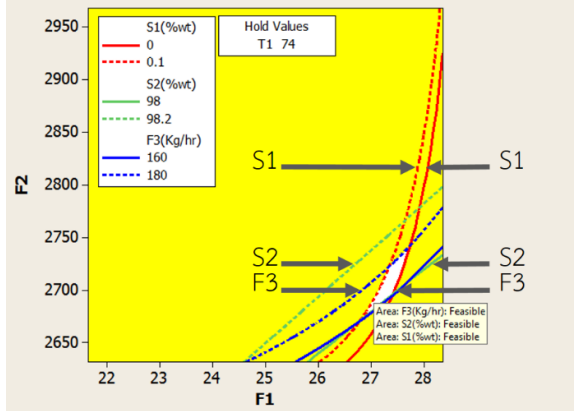
ค่าตอบสนอง (Response)	ค่าต่ำสุด (Lower)	ค่ากลาง (Target)	ค่าสูงสุด (Upper)	ปัจจุบัน (Current)
S1 (%)	0.005	0.01	0.1	1.3
S2 (%)	98	98.1	98.2	98.6
F3 (kg/hr)	160	170	180	280

ช่วงของค่าตอบสนองในตารางที่ 2 ผู้วิจัยและทางโรงงานได้ร่วมกันกำหนด โดยพิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองประกอบกับเป้าหมายที่ทางโรงงานต้องการ ถ้ากำหนดช่วงของค่าตอบสนองที่เป็นไปไม่ได้ก็จะไม่สามารถหาค่าของปัจจัยที่ต้องปรับตั้งได้ เช่น ปัจจุบันค่า F3 มีค่าอยู่ที่ประมาณ 280 kg/hr แต่จากการทดลองพบว่าไม่สามารถทำให้ค่า F3 ลดลงเหลือศูนย์ได้ จึงไม่ควรตั้งค่านี้เป็นศูนย์ ถึงแม้ว่าทางโรงงานจะต้องการให้เป็นศูนย์ก็ตาม ส่วนการกำหนดช่วงให้กับค่า S1 และ S2 ก็จะใช้วิธีการเดียวกัน เนื่องจากการแสดงผลของ Overlaid Contour Plot จะแสดงได้ครั้งละ 2 ปัจจัย จากโมเดลที่เลือกในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองสูงสุดสองปัจจัยแรกคือ F1 และ F2 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกแสดงผลโดยใช้ปัจจัยเหล่านี้ ส่วนปัจจัยด้านอุณหภูมิ (T1) ก็จะถูกกำหนดไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งถ้ากำหนดค่า T1 ไม่เหมาะสมก็อาจจะไม่พบบริเวณที่ต้องการเช่นกัน จากการกำหนดค่า T1 ที่ 74°C จะได้บริเวณที่ให้ค่าตอบสนองตามต้องการดังแสดงในรูปที่ 13 (พื้นที่สีขาว)

จากรูปที่ 13 ทุกจุดในพื้นที่สีขาวจะแสดงถึงบริเวณที่จะให้ค่าตอบสนองทั้ง 3 ค่า อยู่ในช่วงที่ต้องการ ซึ่งจะเห็นว่าเราสามารถเลือกการปรับตั้งปัจจัยได้หลายแบบในงานวิจัยนี้เราจะใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab 16 ในการเลือกการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมที่สามารถให้ค่าตอบสนองทุกค่าเป็นไปตามที่ระบุในตารางที่ 2

เนื่องจากโรงงานให้ความสำคัญกับค่าตอบสนอง S2 มากที่สุดเพราะเกี่ยวกับข้อกำหนดของลูกค้า ในขณะที่ให้ความสำคัญกับค่าตอบสนอง S1 และ F3 เท่ากัน ผู้วิจัยจึง

Overlaid Contour Plot of S1(%wt), S2(%wt), F3(Kg/hr)



รูปที่ 13 Overlaid Contour Plot ของค่าตอบสนอง S1, S2 และ F3 โดยกำหนด T1 เท่ากับ 74°C

Optimal D	T1	F1	F2
0.98059	77.3636	28.3636	2968.1793
High	[71.970]	[27.890]	[2707.730]
Low	70.6364	21.6364	2631.8207

Composite Desirability 0.98059			
S1(%wt) Targ: 0.010 y = 0.0099 d = 0.97012			
S2(%wt) Targ: 98.10 y = 98.0999 d = 0.99932			
F3(Kg/hr) Targ: 170.0 y = 168.2031 d = 0.82031			

รูปที่ 14 ผลลัพธ์จากการใช้ Response Optimizer

กำหนดค่าความสำคัญ (Important) ของค่าตอบสนอง S2, S1, F3 เป็น 10, 1, 1 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 14

จากรูปที่ 14 พบว่าควรตั้งปัจจัย T1, F1 และ F2 เท่ากับ 71.97°C, 27.89 m³/hr และ 2,707.73 kg/hr ตามลำดับ จึงจะได้ค่าตอบสนอง S1, S2 และ F3 อยู่ที่ 0.0099%, 98.099% และ 168.20 kg/hr

**One-Sample T: Confirm run S1**

Test of mu = 0.0099 vs > 0.0099

Variable	N	Mean	T	P
Confirm run S1	10	0.009200	-2.41	0.980

One-Sample T: Confirm run S2

Test of mu = 98.099 vs < 98.099

Variable	N	Mean	T	P
Confirm run S2	10	98.0973	-0.14	0.444

One-Sample T: Confirm run F3

Test of mu = 168.203 vs > 168.203

Variable	N	Mean	T	P
Confirm run F3	10	168.411	0.68	0.257

รูปที่ 15 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผลโดยใช้ t-test

6. การทดสอบเพื่อยืนยันผล (Confirm Runs)

เพื่อเป็นการยืนยันว่าผลที่ได้จากการใช้งานจริงจะไม่แย่ไปกว่าผลที่ได้จากการทดลอง ผู้วิจัยได้นำค่าการปรับตั้งปัจจัยที่ได้จากหัวข้อที่ผ่านมาไปทดลองใช้งานจริง โดยได้เก็บตัวอย่างค่าตอบสนองมาทั้งหมด 10 ชุด แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่า S1, S2 และ F3 จากการใช้งานจริง

ชุดที่	S1 (%wt)	S2 (%wt.)	F3 (kg/hr)
1	0.009	98.01	169.12
2	0.010	98.10	169.35
3	0.009	98.06	170.05
4	0.008	98.12	167.22
5	0.010	98.11	167.52
6	0.009	98.09	168.15
7	0.011	98.10	167.95
8	0.009	98.09	168.35
9	0.009	98.15	169.15
10	0.008	98.13	167.25
ค่าเฉลี่ย	0.0092	98.09	168.41

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 ผู้วิจัยได้ใช้สถิติ t-test โดยทดสอบแบบข้างเดียว (One-tail Test) ทางด้านซ้ายสำหรับค่า S2 และทางด้านขวาสำหรับค่า S1 และ F3 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 15 จากค่า P-value ของทุกค่าตอบสนองในรูปที่ 15 พบว่ามีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าค่าตอบสนองที่ได้จากการใช้งานจริงมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง

7. สรุป

งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง เพื่อหาค่าการปรับตั้งปัจจัยที่ให้ค่าตอบสนองทั้ง 3 อยู่ในช่วงที่ต้องการ ซึ่งพบว่าควรตั้งปัจจัย T1, F1 และ F2 เท่ากับ 71.97 °C, 27.89 m³/hr และ 2,707.73 kg/hr ตามลำดับ จากการทดสอบการใช้งานจริงพบว่า อัตราการสูญเสียสารอัลลิลคลอไรด์ (S1) มีค่าลดลงจาก 1.3% เหลือเพียง 0.0092% ซึ่งหมายความว่าโรงงานสามารถลดความสูญเสียในส่วนนี้ลงได้ประมาณ 140 เท่า ส่วนค่าน้ำหนักกากตะกอน (F3) ลดลงจาก 280 kg/hr เหลือเพียง 168.41 kg/hr ซึ่งทำให้โรงงานสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนลงได้ถึงชั่วโมงละ 558 บาท หรือคิดเป็น 401,760 บาทต่อเดือน (ค่ากำจัดกิโลกรัมละ 5 บาท ทำงาน 24 ชั่วโมงต่อวัน 30 วันต่อเดือน) และจากการปรับตั้งปัจจัยที่ค่าใหม่ยังคงได้ค่าความบริสุทธิ์ของสารอัลลิลคลอไรด์ (S2) ไม่น้อยกว่า 98% ตามที่โรงงานกำหนดไว้

งานวิจัยนี้ควรทำการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าตอบสนอง เช่น ความชื้นของเกลือสินเธาว์ซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้น และระดับความร้อนจากไอน้ำ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ไม่สามารถควบคุมได้แต่สามารถตรวจวัดได้ในการทดลอง โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (Analysis of Covariance: ANCOVA) ซึ่งอาจจะทำให้ได้ผลที่ดีขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาที่กรุณาให้การสนับสนุนและการช่วยเหลือด้านการเตรียมตัวอย่างและการเก็บรวบรวมข้อมูล รวมทั้งคุณสำเนา เกมกลาง วิศวกรของโรงงานที่ให้คำแนะนำต่างๆ และขอขอบคุณภาคีวิศวกรอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้โปรแกรม Minitab 16 สำหรับวิเคราะห์ข้อมูล และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้



เอกสารอ้างอิง

- [1] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 7th ed., The United States of America: Johnson Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [2] S. Chaiyuthanaporn, "An Application of Response Surface Methodology in Integrated Circuit Industry," M.S. Thesis, Department of Statistics, Kasetsart University, 1992 (in Thai).
- [3] T. Maneeboon, "Optimization of Lactic Acid Fermentation by *Rhizopus Oryzae* KPS 106 in 3-I Airlift Bioreactor using Response Surface Methodology," M.S. Thesis, Kasetsart University, 2008 (in Thai).
- [4] J. Prajanban, "Optimization of β -glucanase Production by *Aspergillus terreus* ASKU10 in Solid State Fermentation using Response Surface Methodology," M.S. Thesis, Kasetsart University, 2008 (in Thai).
- [5] W. Chaichaom, "Cookie Formulation to Reduce Manufacturing Costs using Response Surface Methodology," M.S. Thesis, Kasetsart University, 2010 (in Thai).
- [6] R. Rotbunsongsri, "Optimization of Food Cans Corrugation by using Response Surface Methodology," M.Eng. Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2011 (in Thai).
- [7] V. Laemlaksakul, "Optimization of Processing Factors for Wood Composite Panel Manufacturing from Waste Tire Rubber Crumbs and Wood Particle by Response Surface Methodology," Research Report, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2011 (in Thai).