



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>**การจัดกลุ่มสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเพื่อลดต้นทุนการผลิต****Grouping eucalyptus species in kraft pulp process for cost reduction**

อภิวรรณ พิชญเดชะ* อังศุมาลิน เสนจันทร์ฉิไชย

Apiwan Pichayadecha* and Angsumalin Senjuntichai

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok Thailand, 10330.

Received September 2013

Accepted April 2014

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุด เบื้องต้นได้ทำการหาปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิต จากการระดมสมองของผู้เชี่ยวชาญและผู้มีประสบการณ์ ตามหลักการ 4M 1E ของแผนผังสาเหตุและผล ปัจจัยที่มีคะแนนรวมในกลุ่ม 80 เปอร์เซนต์แรกของพาราโดถูกนำมาทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์แสดงให้เห็นว่า ปริมาณ Effective Alkali ในน้ำยาต้มเยื่อและตัวเลขค่าปามีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่งานวิจัยในอดีตบ่งชี้ว่า สายพันธุ์ของไม้ยูคาลิปตัสแบ่งตามความสามารถในการต้มง่าย-ยาก มีผลต่อต้นทุนการผลิต ดังนั้น ปัจจัยที่นำมาออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุด คือ สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ Effective Alkali ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขค่าปา โดยใช้ทฤษฎีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ โดยระดับของแต่ละปัจจัยอ้างอิงตามความสามารถของเครื่องจักรและกระบวนการ พบว่า ระดับของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตรวมต่ำที่สุด คือ สัดส่วนของไม้ยูคาลิปตัสที่ต้มง่าย 75 เปอร์เซนต์ ปริมาณ Effective Alkali ในน้ำยาต้มเยื่อ 112 กรัมต่อลิตร และตัวเลขค่าปา 13.5 หลังจากการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อต่ำที่สุด เมื่อปรับระดับปัจจัยนำเข้าให้เหมาะสม พบว่า ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษเฉลี่ยลดลงจาก 15,517.06 บาท ต่อตัน เป็น 13,393.91 บาท ต่อตัน หรือสามารถลดต้นทุนการผลิตลง 13.68 เปอร์เซนต์

คำสำคัญ : ยูคาลิปตัส ตัวเลขค่าปา EA ในน้ำยาต้มเยื่อ เยื่อกระดาษ

* Corresponding author.

Email address: immibbai@gmail.com

Abstract

The objective of this research is to study the level of the important factors that can decrease total cost of pulp production. First of all, experts and experienced users identify the factors that affect the total production cost by applying the principle of 4M 1E cause and effect diagram. Then the primary factors were chosen based on 80% of their significance and tested by hypothesis for two population means. It was found that at the 95% confidence level the significant factors that have effects on the total production cost are amount of Effective alkali in white liquor and Kappa number. However, the proportion of easy delignification according to Eucalyptus species is considered as a significant factor based on various studies. Box-Behnken experiment is designed with respect to 3 mentioned factors and 3 levels of each factor. The response surface method (RSM) is employed to determine the non-linear relation between the total cost as the response and the proportion of easy delignification, amount of Effective alkali in white liquor and Kappa number. To minimize the total cost, the optimal values of each factor are 75% of easy delignification, 112 grams per liter of Effective alkali in white liquor and 13.5 of kappa number. Under this optimal condition, the average total cost per ton of Eucalyptus is 13,393.91 Baht which is significantly less than the total cost of 15,517.06 Baht per ton before improvement.

Keywords : Eucalyptus, Kappa number, EA in white liquor and kraft pulp and paper

1. บทนำ

อุตสาหกรรมกระดาษในประเทศไทยมีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ในปี 2554 ความต้องการเยื่อกระดาษเคมีฟอกขาวทั่วโลกเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 3 เมื่อเทียบกับปี 2553 ปัจจัยหลักมาจากการปรับตัวในทิศทางที่ดีขึ้นของภาวะเศรษฐกิจ อุตสาหกรรมต่อเนื่องที่ต้องใช้กระดาษเป็นวัตถุดิบ โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์ การขนส่งสินค้า และสิ่งพิมพ์ นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยหนุนจากกระแสรักสิ่งแวดล้อมที่ทำให้บรรจุภัณฑ์กระดาษเป็นที่นิยม รวมถึงนโยบายที่เกี่ยวข้อง เช่น ยูเนสโกได้ประกาศให้กรุงเทพฯ เป็นเมืองหนังสือโลกประจำปี 2556 เป็นต้น

ปัจจัยเสี่ยงต่อการขยายตัวของอุตสาหกรรมกระดาษ คือ แนวโน้มต้นทุนการผลิตที่เพิ่ม เนื่องจากราคาวัตถุดิบในการผลิตกระดาษมีการปรับตัวสูงขึ้นตามตลาดโลก ราคาพลังงานที่สูงขึ้น และต้นทุนการลดมลพิษจากการผลิตที่เพิ่มขึ้น ทำให้ราคาขายกระดาษสูงขึ้น แนวทางสำหรับผู้ประกอบการในการปรับตัวเพื่อลดต้นทุนผลิตคือ ปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเพื่อลดการใช้พลังงานและลดการเกิดมลพิษ

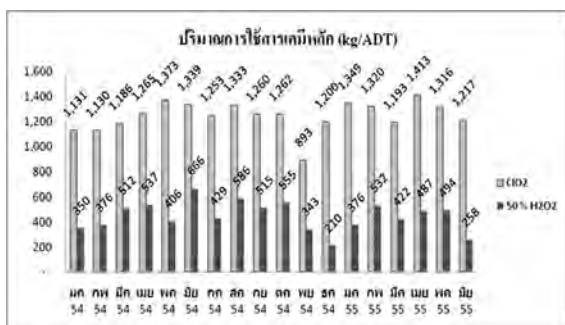
ปัจจุบัน โรงงานผลิตกระดาษกรณีศึกษามีต้นทุนการผลิตรวมเฉลี่ยเท่ากับ 15,517.06 บาทต่อตัน

โดยกระบวนการผลิตในปัจจุบัน ไม่มีการคัดแยกสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่เข้าสู่กระบวนการผลิต รวมทั้งการปรับค่าปัจจัยของกระบวนการ เช่น การปรับปริมาณไอน้ำที่แรงดันต่างๆ ปริมาณสารเคมีในการฟอกขาว เป็นต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับความเชี่ยวชาญส่วนบุคคล โดยมีการกำหนดค่ามาตรฐานเป็นช่วงตามความสามารถของเครื่องจักรและกระบวนการ

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ สายพันธุ์ของไม้ยูคาลิปตัสเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการควบคุมกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ เนื่องจากคุณสมบัติของไม้ยูคาลิปตัสแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกัน ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ ความหนาแน่นของไม้ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อสภาวะการผลิตเยื่อกระดาษที่แตกต่างกัน เมื่อนำไม้ยูคาลิปตัสหลากหลายสายพันธุ์เข้าสู่กระบวนการผลิตโดยไม่มีการจัดกลุ่มสายพันธุ์และไม่มีการจัดการสภาวะการต้มที่เหมาะสม ทำให้เกิดการสูญเสียเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (Cellulose and Hemicellulose) ส่งผลให้คุณภาพเยื่อกระดาษไม่สม่ำเสมอและอาจเกิดเป็นชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุก และมีผลให้ใช้สารเคมีและไอน้ำในการผลิตเยื่อกระดาษสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1-3 ตามลำดับ

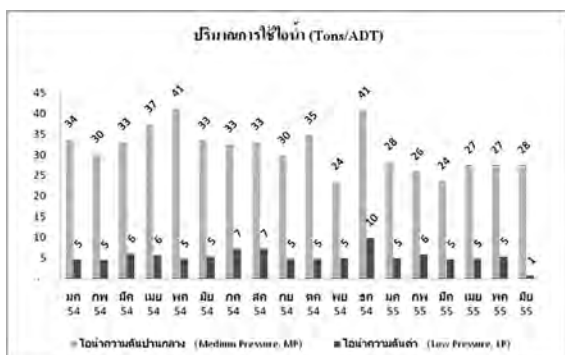


รูปที่ 1 ปริมาณชิ้นไม้ดิบที่ต้มไม่สุกต่อตันผลิตเยื่อแห้ง



รูปที่ 2 ปริมาณสารเคมีหลักที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษ

จากรูปที่ 1-3 จะพบว่าปริมาณชิ้นไม้ดิบต้มไม่สุก ปริมาณสารเคมีหลักที่ใช้ในการฟอกเยื่อทั้งคลอรีน ไดออกไซด์ (ClO_2) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และปริมาณไอน้ำต่อการผลิตเยื่อกระดาษแห้ง (Air Dry Ton, ADT) ในแต่ละเดือนมีปริมาณแตกต่างกันค่อนข้างมาก ตัวอย่างเช่น ปริมาณคลอรีนไดออกไซด์ที่ใช้



รูปที่ 3 ปริมาณไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

ในเดือนที่ใช้มากที่สุดมากกว่าปริมาณที่ใช้ในเดือนที่ใช้ น้อยที่สุดเท่ากับ 520 kg คิดเป็นเงินเท่ากับ 26,520 บาทต่อการผลิตเยื่อแห้ง และเท่ากับ 17 ตัน

ของไอน้ำแรงดันปานกลาง คิดเป็นเงินเท่ากับ 15,300 บาท ต่อตันการผลิตเยื่อแห้ง ซึ่งมีผลทำให้ต้นทุนการผลิตต่อการผลิตเยื่อแห้งค่อนข้างสูงและแตกต่างกันค่อนข้างมากในแต่ละเดือนจากสภาวะการทำงานและวัตถุดิบที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การลดต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษด้วยการกำหนดสภาวะการทำงานที่เหมาะสมเพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานในการทำงานต่อไป

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลอง โดยใช้แผนผังก้างปลา เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ คัดเลือกปัจจัยเบื้องต้นโดยการหาความสัมพันธ์สาเหตุและผล คัดเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญโดยการทดสอบสมมติฐานจากข้อมูลในอดีต และนำปัจจัยเหล่านั้นมาใช้ในการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน รวมถึงทำการทดลองเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติ การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ระดับปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนการผลิตรวมให้ต่ำที่สุดได้

2.1 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง (Response variables)

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ สารเคมีและไอน้ำ จากการนำวัตถุดิบหลักคือไม้ยูคาลิปตัสหลายสายพันธุ์เข้าสู่กระบวนการผลิต และต้องมีการควบคุมตัวแปรตอบสนองที่สำคัญในกระบวนการผลิต คือ ต้นทุนการผลิตให้มีค่าต่ำที่สุด โดยมีการควบคุมคุณภาพเยื่อกระดาษให้มีความขาวสว่างตามความต้องการของลูกค้า ในงานวิจัยนี้เลือกกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมาทำการทดลอง เพราะเป็นกระบวนการที่สำคัญของอุตสาหกรรมผลิตกระดาษที่มีค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและไอน้ำในกระบวนการผลิตมากและไม่คงที่ ดังนั้น ในการทำวิจัยครั้งนี้จึงกำหนดตัวแปรตอบสนองที่สนใจ คือ ต้นทุนการผลิตรวม ซึ่งประกอบไปด้วย ต้นทุนของชิ้นไม้ดิบ ต้นทุนของไอน้ำที่ระดับแรงดันปานกลางและต่ำ ต้นทุนของสารเคมี ได้แก่ ออกซิเจน คลอรีน ไดออกไซด์ ฯ และต้นทุน

ของปริมาณชิ้นไม้ดิบต้มไม่สุก (Uncooked) ดังแสดงในตารางที่ 1 มีผลให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษแห้งของโรงงานกรณีศึกษา ก่อนการปรับปรุงเท่ากับ 15,517.06 บาทต่อตันการผลิตเยื่อแห้ง

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

ผู้วิจัยได้จัดประชุมเพื่อระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญและผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ผู้จัดการโรงงาน ผู้จัดการหน่วยงาน วิศวกร พนักงานควบคุมคุณภาพ พนักงานควบคุมเครื่อง และพนักงานภาคสนาม ในการจัดทำ

ตารางที่ 1 รายละเอียดของต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่อหนึ่งตันเยื่อ

ชิ้นไม้ดิบ	MP	LP	WL	O2	ClO2	NaOH	H2SO4	H2O2	Uncooked
3.666	0.871	0.180	3.014	19.220	0.043	0.018	0.019	0.013	0.097
ตัน	ตัน	ตัน	ลบ.ม.	ลบ.ม.	ตัน	ตัน	ตัน	ตัน	ตัน
9,531.04	784.21	153.20	904.07	94.18	2,207.15	951.53	49.03	161.02	681.63
บาท	บาท	บาท	บาท	บาท	บาท	บาท	บาท	บาท	บาท

นำปัจจัยมาเรียงลำดับคะแนนจากมากไปหาน้อยดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่ามีปัจจัยจำนวน 12 ปัจจัยที่มีคะแนนสะสมใน 80 เปอร์เซนต์แรกของคะแนนทั้งหมด โดยปัจจัยทั้ง 12 ปัจจัยนี้ ได้แก่ ไม่มีการคัดแยกสายพันธุ์ของชิ้นไม้ดิบ ปริมาณ Effective Alkali (EA) ไม่เหมาะสม ตัวเลขคัปปาในการควบคุมเครื่องไม่เหมาะสม ความแห้งของชิ้นไม้ดิบสูง ฯลฯ โดยปัจจัยส่วนใหญ่เกิดจากวัตถุดิบและวิธีการ เนื่องจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษในปัจจุบันไม่มีการคัดแยกสายพันธุ์ของชิ้นไม้ดิบที่เข้าสู่กระบวนการผลิต รวมทั้งไม่มีการกำหนดพารามิเตอร์ของสารเคมีที่ใช้ต้มเยื่อและสภาวะการควบคุมเครื่องที่เหมาะสมอย่างชัดเจน ส่งผลให้การควบคุมการผลิตมีการปรับอยู่ตลอดเวลา เช่น การปรับปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการฟอกขาว การปรับปริมาณไอน้ำ การปรับตัวเลขคัปปาในระหว่างการผลิต

ในการพิจารณาปัจจัยนำเข้าสำหรับการออกแบบการทดลอง พบว่ามีปัจจัยเบื้องต้นจำนวน 6 ปัจจัยที่ไม่สามารถนำมารวมในการออกแบบการทดลองได้ ดังนี้

1. ขนาดของชิ้นไม้ดิบ 2. ของแข็งแขวนลอย (Solid State, SS) ในน้ำยาต้มเยื่อ 3. สิ่งปลอมปนในชิ้นไม้ดิบ และ 4. อายุของชิ้นไม้ดิบ เพราะเป็นปัจจัยที่อยู่ใน

แผนผังก้างปลาหรือแผนผังสาเหตุและผล โดยพิจารณาเฉพาะปัจจัยหลัก 5 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่เกิดจากคน จากเครื่องจักร จากวัตถุดิบ จากวิธีการและสิ่งแวดล้อม พบว่ามีปัจจัยจำนวน 20 ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ ดังแสดงในรูปที่ 4 และจากนั้นได้นำปัจจัยทั้งหมด 20 ปัจจัยมาคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น โดยการให้คะแนนตามความสัมพันธ์ของปัจจัยนำเข้ากับตัวแปรตอบสนอง โดยมีคะแนน 0, 1, 3, 5, 8 และ 10 สำหรับปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์, มีน้อยมาก, มีน้อย, มีปานกลาง, มีมาก และมีมากที่สุดต่อตัวแปรตอบสนองตามลำดับ

ความรับผิดชอบของแผนกอื่น ทำให้ไม่สามารถปรับค่าได้ 5.% Sulfidity เพราะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของอากาศที่ออกจากปล่องระบาย 6. H-Factor ที่ใช้เดินเครื่อง เพราะไม่สามารถปรับเปลี่ยนและควบคุมค่าในระหว่างการผลิตได้ทันที

ดังนั้นปัจจัยที่เหลืออยู่ได้แก่ 1. ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ [1] 2. ตัวเลขคัปปา [2] 3. ความแห้งของชิ้นไม้ดิบ 4. ปริมาณ Causticity Efficiency (CE) ในน้ำยาต้มเยื่อ และ 5. ปริมาณ Total Alkali (TA) ในน้ำยาต้มเยื่อ [1] จะนำมาทดสอบสมมติฐานสำหรับค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่มที่มีจำนวนตัวอย่างมากกว่า 30 ตัวอย่าง [3] โดยอาศัยข้อมูลในอดีต มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) สมมติฐาน

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

โดย μ_1 และ μ_2 คือค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตเมื่อน้ำยาต้มเยื่อมีปริมาณ EA สูงที่สุด เท่ากับ 119 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณ EA ต่ำที่สุด เท่ากับ 109 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

- 2) ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ Z
- 3) กำหนดความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นระดับนัยสำคัญหรือ α เท่ากับ 0.05
- 4) ผลการทดสอบสมมติฐานโดยโปรแกรม Excel แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบสมมติฐานสำหรับค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม

	EA=119	EA=109
Mean	15352.692	14722.05867
Known Variance	139279.8	157069.5
Observations	30	30
Hypothesized Mean	0	
Difference		
z	6.345	
P(Z<=z) two-tail	0.000	

- 5) สรุปผลการทดสอบสมมติฐาน จากตารางที่ 2 พบว่าค่า P (Z<=z) two-tail หรือค่า P-value มีค่าน้อยกว่า α จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก นั่นคือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อมีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบสมมติฐาน Two-sample z-test สำหรับปัจจัยทั้ง 5 จะเห็นได้ว่านอกเหนือจากปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อแล้ว ตัวเลขคัปปาเป็นปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขคัปปามีค่าเปลี่ยนไป มีส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่าความแห้งของชิ้นไม้สับ ปริมาณ CE และปริมาณ TA ในน้ำยาต้มเยื่อมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปัจจัย ดังกล่าวมีค่าเปลี่ยนไป จะไม่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ

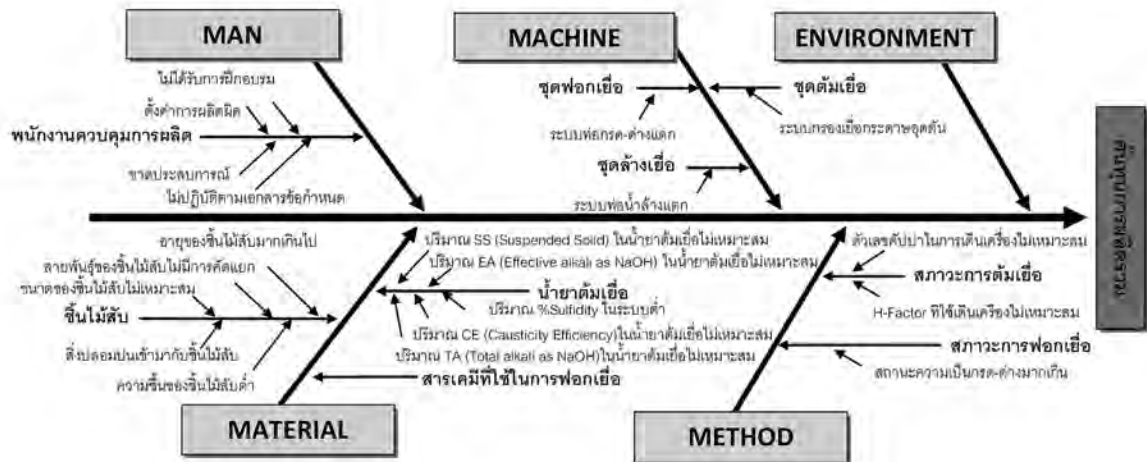
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมมติฐานปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตเฉลี่ย

ปัจจัย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	Test statistic (z)	P-value
1. ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ	119	109	6.345	0.000
2. ตัวเลขคัปปา	15	11	59.017	<0.001
3. ความแห้งของชิ้นไม้สับ	55	47	-0.726	0.468
4. ปริมาณ CE ในน้ำยาต้มเยื่อ	85	76	-0.030	0.976
5. ปริมาณ TA ในน้ำยาต้มเยื่อ	162	152	-0.030	0.976

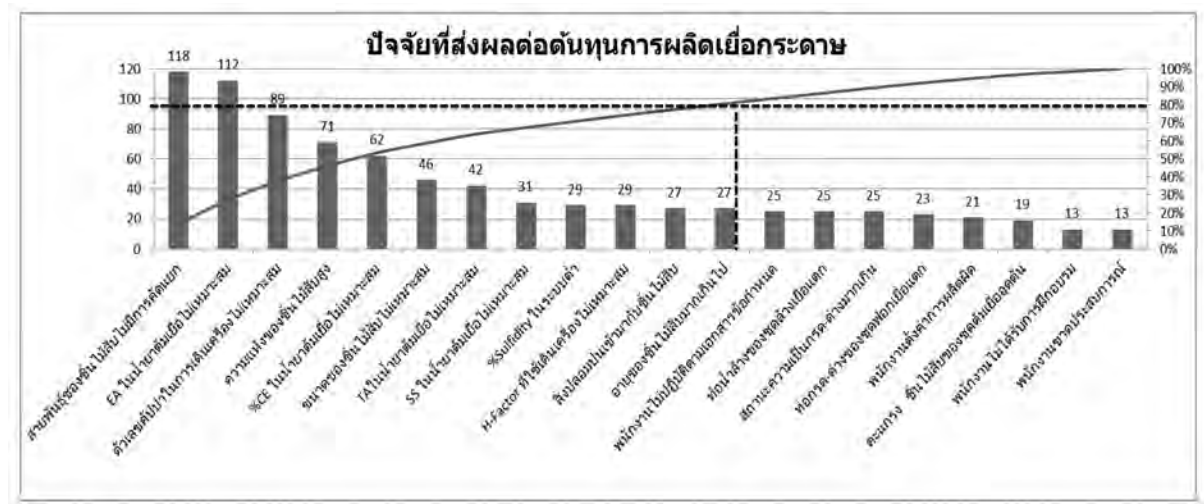
สำหรับสายพันธุ์ของชิ้นไม้สับที่นำเข้าสู่กระบวนการผลิตในแต่ละวันพบว่ามีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4-8] ที่ได้กล่าวถึงสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสว่ามีผลต่อกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญ 3 ปัจจัย ได้แก่ สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขคัปปา จะถูกนำไปออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด

2.3 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน [9] ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ และใช้จำนวนการทดลองน้อย ทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทำการทดลอง ซึ่งเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยรายละเอียดของแต่ละปัจจัยแสดงในตารางที่ 4 และมีการควบคุมปัจจัยอื่นๆ ในการทดลองให้คงที่ ดังแสดงในตารางที่ 5



รูปที่ 4 แผนผังก้างปลาเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวม



รูปที่ 5 คะแนนของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิต

ตารางที่ 4 สัญลักษณ์และระดับของปัจจัยสำหรับการทดลองแบบ Box-Behnken

ปัจจัย	หน่วย	ระดับของปัจจัย		
		ต่ำ	กลาง	สูง
1. สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส (A)	% สายพันธุ์ต้มง่าย	25	50	75
2. EA ในน้ำยาดมเชื้อ (B)	g/l	112	116	120
3. ตัวเลขคีย์ค่า (C)	-	12.5	14.0	15.5

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

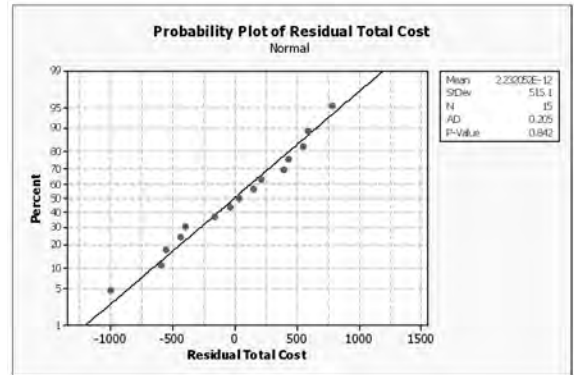
3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองนี้ประกอบไปด้วยการทดลองจำนวน 15 การทดลอง ซึ่งมีผลการทดลองแสดงตามลำดับที่เป็นแบบสุ่ม (Random Order) ในตารางที่ 6

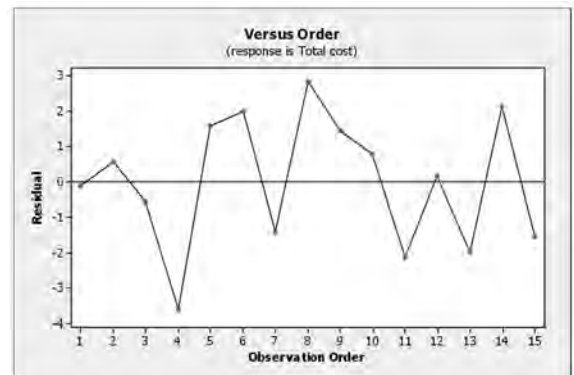
ตารางที่ 5 ค่าควบคุมของปัจจัยควบคุมในการทดลอง

ปัจจัย	หน่วย	ค่าควบคุม
ความแห้งของชิ้นไม้สับ	%	≤ 56
ขนาดชิ้นไม้สับ		
- Bulk density	kg/m ³	330-350
- Over size (OS)	%	< 1.0
- Over thick (OT)	%	< 10.0
- Accept 1	%	> 65.0
- Accept 2	%	< 20
Sulfidity	%	30-35
Wet Brightness	%	85-89
Viscosity	mg/l	> 600

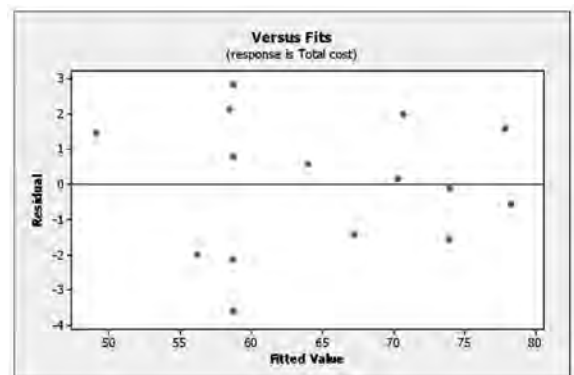
จากการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองตามสมมติฐาน $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ [9] พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเหมาะสมและตรงตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อที่กำหนดไว้ได้แก่ 1. การทดสอบการแจกแจงปกติของส่วนตกค้าง (Normal Plot of Residuals) 2. การทดสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual) 3. การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนของต้นทุนการผลิตรวม (Variance Stability) ดังรูปที่ 6-8 ตามลำดับ ดังนั้น สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method) [3] ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สำหรับการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรต้นหรือปัจจัยในรูปของสมการถดถอย เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่ามากที่สุดหรือน้อยที่สุด ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา [10-11] ที่นำวิธีการนี้มาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตที่ก่อให้เกิดของเสียน้อยที่สุด สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับสายพันธุ์ยูคาลิปตัส ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเชื้อ และตัวเลขคัปปาที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุด



รูปที่ 6 Normality plot ของส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวม



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างตามลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าที่ถุกฟิตของต้นทุนการผลิตรวม

ตารางที่ 6 ผลการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด

Std Order	RunOrder	A	B	C	Total cost Baht/Batch
10	1	50	120	12.5	73.86
9	2	50	112	12.5	64.55
12	3	50	120	15.5	77.68
14	4	50	116	14	55.18
5	5	25	116	12.5	79.42
7	6	25	116	15.5	72.71
3	7	25	120	14	65.83
15	8	50	116	14	61.61
2	9	75	112	14	50.52
13	10	50	116	14	59.56
1	11	25	112	14	56.58
11	12	50	112	15.5	70.42
6	13	75	116	12.5	54.27
4	14	75	120	14	60.62
8	15	75	116	15.5	72.39

การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง แสดงในรูปที่ 9 นำเสนอสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนการผลิตกับปัจจัยจำนวน 3 ปัจจัย ในรูปของพจน์กำลังหนึ่ง พจน์กำลังสองและพจน์ของอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนอง เนื่องจากมีพจน์บางพจน์ เช่น A, B, A^2 , B^2 , AB และ BC มีค่า P-Value มากกว่า 0.05 หรือระดับนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าพจน์ดังกล่าวไม่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญ

3.2 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสม [11-13]

จากการเลือกตัวแปรต้นด้วยวิธี Stepwise Regression แบบ Backward Elimination [8] แสดงผลในรูปที่ 10 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 พบว่ามีเพียง 5 พจน์ที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ A, C, B^2 , C^2 และ AC โดยมีสมการถดถอยแสดงใน

สมการที่ 1

$$Y = 1149 - 2.50A - 157C + 0.00484B^2 + 5.38C^2 + 0.165AC \quad (1)$$

Y คือ ต้นทุนการผลิตรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

A คือ ร้อยละของสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่ต้มง่าย

B คือ ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ

C คือ ตัวเลขคี่ปาที่ใช้ในการควบคุมเครื่อง

Response Surface Regression: Total cost versus A, B, C						
The analysis was done using uncoded units.						
Estimated Regression Coefficients for Total cost						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	1594.90	1441.57	1.106	0.319		
A	-2.56	1.91	-1.342	0.237		
B	-8.90	23.71	-0.376	0.723		
C	-146.92	36.17	-4.062	0.010		
A*A	-0.00	0.00	-0.720	0.504		
B*B	0.05	0.10	0.475	0.655		
C*C	5.37	0.72	7.480	0.001		
A*B	0.00	0.02	0.137	0.896		
A*C	0.17	0.04	4.000	0.010		
B*C	-0.09	0.26	-0.330	0.755		
S = 3.10269 PRESS = 473.364						
R-Sq = 95.79% R-Sq(pred) = 58.62% R-Sq(adj) = 88.22%						
Analysis of Variance for Total cost						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	1095.79	1095.79	121.755	12.65	0.006
Linear	3	385.69	175.10	58.368	6.06	0.040
A	1	168.77	17.33	17.331	1.80	0.237
B	1	161.26	1.36	1.358	0.14	0.723
C	1	55.65	158.85	158.847	16.50	0.010
Square	3	554.84	554.84	184.948	19.21	0.004
A*A	1	16.15	4.99	4.991	0.52	0.504
B*B	1	0.10	2.17	2.170	0.23	0.655
C*C	1	538.59	538.59	538.592	55.95	0.001
Interaction	3	155.26	155.26	51.753	5.38	0.051
A*B	1	0.18	0.18	0.180	0.02	0.896
A*C	1	154.03	154.03	154.031	16.00	0.010
B*C	1	1.05	1.05	1.048	0.11	0.755
Residual Error	5	48.13	48.13	9.627		
Lack-of-Fit	3	26.55	26.55	8.850	0.62	0.590
Pure Error	2	21.58	21.58	10.792		
Total	14	1149.92				

รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

โดยสมการถดถอยนี้มีค่า R-Sq เท่ากับ 95.79 เปอร์เซนต์ สามารถสรุปได้ว่า สมการถดถอยที่ได้จากการทดลองนี้มีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการพิจารณาผลของปัจจัยหลักที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ

Stepwise Regression: Total cost versus A, B, C, AA, BB, CC, AB, AC, BC

Backward elimination. Alpha-to-Remove: 0.05

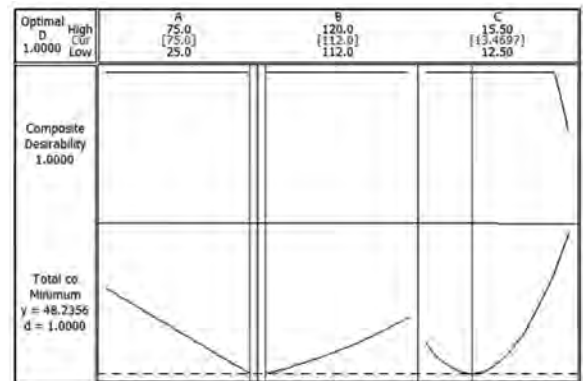
Response is Total cost on 9 predictors, with N = 15

Step	1	2	3	4	5
Constant	1595	1583	1721	1137	1149
A	-2.56	-2.31	-2.31	-2.31	-2.50
T-Value	-1.34	-3.98	-4.25	-4.45	-5.33
P-Value	0.237	0.007	0.004	0.002	0.000
B		-9	-10		
T-Value		-0.38	-0.41		
P-Value		0.725	0.699		
C			-147	-157	-157
T-Value			-4.06	-4.44	-4.45
P-Value			0.010	0.004	0.000
AA				-0.0019	
T-Value				-0.72	
P-Value				0.504	
BB				0.04791	0.00484
T-Value				0.47	0.52
P-Value				0.655	0.622
CC					5.37
T-Value					7.48
P-Value					0.001
AB					0.002
T-Value					0.14
P-Value					0.896
AC					0.165
T-Value					4.00
P-Value					0.010
BC					-0.09
T-Value					-0.33
P-Value					0.755
S	3.10	2.84	2.66	2.53	2.51
R-Sq	95.79	95.79	95.66	95.52	95.05
R-Sq(adj)	88.22	90.15	91.37	92.18	92.30
Mallows Cp	10.0	8.0	6.1	4.3	2.9

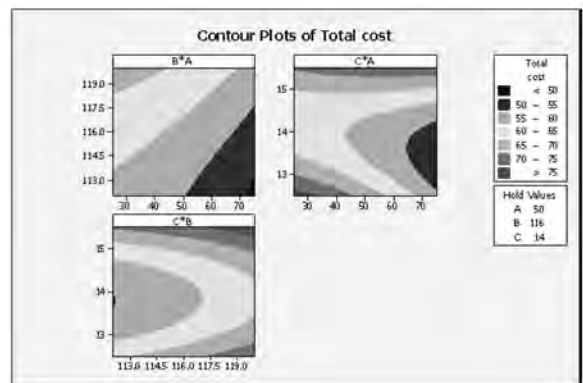
รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์ด้วย Stepwise regression

ต่ำที่สุดด้วยวิธี Response Optimization ในโปรแกรม Minitab ดังแสดงในรูปที่ 11 ได้ผลการทำนายต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 48.24 บาท ต่อตัน การทดลอง ที่ระดับความพึงพอใจโดยรวม (Composite desirability, d) เท่ากับ 100 เปอร์เซนต์ เมื่อระดับการปรับตั้งปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสม คือ เปอร์เซนต์สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่ต้มง่ายเท่ากับ 75 ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อเท่ากับ 112 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวเลขคัปปาเท่ากับ 13.47

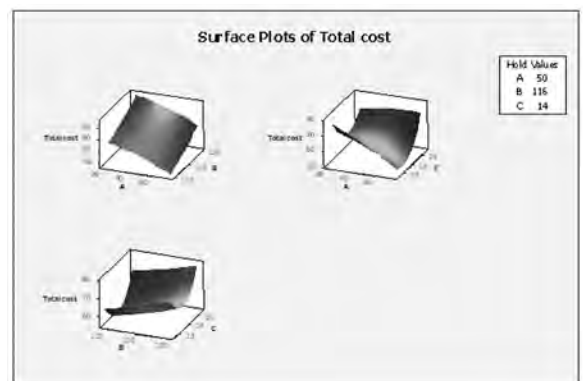
จากรูปที่ 12 และ 13 พบว่าเมื่อปัจจัย A มีค่ามาก จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตรวมต่ำ ในทางตรงกันข้ามเมื่อปัจจัย B มีค่าต่ำจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตรวมต่ำ ในขณะที่ปัจจัย C มีค่าที่เหมาะสมที่ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่ำอยู่ในช่วง 13 ถึง 14



รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์ด้วย Response optimization



รูปที่ 12 Contour plot ของต้นทุนการผลิตรวม



รูปที่ 13 Surface plot ของต้นทุนการผลิตรวม

4. สรุป

จากการนำปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญทั้ง 3 ปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพหุคูณตอบสนองมาทดสอบยืนยันผลในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดสอบซ้ำ 4 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่าค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษมีค่าเท่ากับ 48.22 บาทต่อการทดลองซึ่งต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายในรูปที่ 11 ที่ 48.24 บาทเล็กน้อย ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษเฉลี่ยต่อตันเท่ากับ 13,393.91 บาท เมื่อนำมาทดสอบสมมติฐานเทียบกับต้นทุนการผลิตเฉลี่ยในปัจจุบันพบว่า ต้นทุนการผลิตเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าต้นทุนการผลิตเฉลี่ยในปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าสถิติที่ใช้คือ T [8] มีค่าเท่ากับ -8.56 ให้ค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 (a) ดังแสดงในรูปที่ 14 แสดงว่าการกำหนดสภาวะการผลิตที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าวมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริง โดยการกำหนดสภาวะของปัจจัยที่มีนัยสำคัญทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับ 75 เปอร์เซ็นต์ของสายพันธุ์ที่ต้มง่าย ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อที่ระดับ 112 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวเลขคัปปาที่ระดับ 13.5 มีผลให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ 13,393.91 บาทต่อตัน หรือสามารถลดต้นทุนการผลิตลง 13.68 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 7 ต้นทุนการผลิตในห้องปฏิบัติการ

การทดลองที่	ต้นทุนการผลิตรวมที่ได้จากการทดลอง	
	บาทต่อการทดลอง	บาทต่อตันเยื่อแห้ง
TC1	47.52	13,200.97
TC2	47.98	13,326.42
TC3	49.09	13,636.36
TC4	48.28	13,411.89

Two-Sample T-Test and CI

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
1	4	13394	183	92
2	30	15479	1236	226

Difference = $\mu(1) - \mu(2)$

Estimate for difference: -2085

95% upper bound for difference: -1672

T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = -8.56

P-Value = 0.000 DF = 31

รูปที่ 14 ผลการทดสอบสมมติฐานระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากร

ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้ ได้แก่

1. เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องกำลังการผลิต การทดลองทั้งหมดเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมโดยผู้วิจัยเท่านั้น ไม่สามารถทำการทดลองในกระบวนการผลิตจริงได้
2. ผลการวิจัยที่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาในการกำหนดเป็นมาตรฐานในการดำเนินงาน
3. การทดลองเพื่อยืนยันผลในขั้นตอนสุดท้ายทำซ้ำได้เพียง 4 ครั้งเท่านั้น เนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่องค่าใช้จ่ายของเครื่องจักรและเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบริษัทกรณีศึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้โอกาสผู้วิจัยได้เข้าไปทำการศึกษาวิจัย ให้ความร่วมมือในการเก็บข้อมูลและทำการทดลองเป็นอย่างดี และทีมงานที่ช่วยกันระดมสมอง ให้คำแนะนำ ความรู้ และความช่วยเหลือต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gullichsen J, Carl JF. Chemical pulping. Papermaking Science and Technology 2000: 41-2.
- [2] International Organization for Standardization (ISO). ISO302 version 2004. Pulps Determination of Kappa number 2013;1-10.
- [3] Montgomery, DC, Runger, GC. Applied Statistics and Probability for Engineers. 5th ed. Wiley; 2011.
- [4] Forest Products Laboratory, Forest Service U.S. Department of Agriculture. Pulp yield for various processes and wood species. U.S. Forest Service Research Note 1980: FPL-031.
- [5] Ndukwe NA, Jenmi FO, Okiei WO, Alo BI. Comparative study of percentage yield of pulp from various Nigerian wood species using the kraft process. African Journal of Environmental Science and Technology 2009;3:21-5.
- [6] MacLeod M. The top ten factors in kraft pulp yield. Paperi ja Puu-Paper and Timber 2007; 89:1-7.
- [7] Scchimleck LR, Kube PD, Raymond CA. Genetic improvement of kraft pulp yield in Eucalyptus nitens using cellulose content determined by near infrared spectroscopy. Canadian Journal of Forest Research 2004;34: 2363-70.
- [8] Anapanurak W, Boonpradit R, Janhom T, Permpanya S, Janchanuan S. Organosolv pulp properties of eucalyptus wood from various provenances to be planted in Srakaew. In: Proceedings of 43rd Kasetsart University Annual Conference; 2005 Feb 1-4; Kasetsart University. Bangkok; 2005. p. 518-26. (In Thai).
- [9] Chutima P. Design of experiment. Bangkok: Chulalongkorn University Press; 2002. (In Thai).
- [10] Senjuntichai A. Process setting through general linear model and response surface method. IEANG Transactions on Engineering Technologies 2010;5:237-48.
- [11] Pongtrairat A, Senjuntichai A. Spiral defect reduction of hard disk drive media. Applied Mechanics and Materials 2013;421:93-8.