การศึกษาการปรับปรุงกระบวนการสกัดน้ำอ้อยของชุดลูกหีบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลของโรงงานผลิตน้ำตาล

โดย

นางสาวจุฑาทิพย์ ชาติชูศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม แผน ก แบบ ก 2 ปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาการปรับปรุงกระบวนการสกัดน้ำอ้อยของชุดลูกหีบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลของโรงงานผลิตน้ำตาล

โดย
นางสาวจุฑาทิพย์ ชาติชูศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม แผน ก แบบ ก 2 ปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

A STUDY TO IMPROVE OF MILLING PROCESS TO INCREASING EXTRACTION EFFICIENCY OF SUGARCANE MILL

By

MISS Jutathip CHARTCHUSAK

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Engineering (ENGINEERING MANAGEMENT)

Department of INDUSTRIAL ENGINEERING AND MANAGEMENT

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การศึกษาการปรับปรุงกระบวนการสกัดน้ำอ้อยของชุดลูกหีบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลของโรงงานผลิตน้ำตาล
โดย	จุฑาทิพย์ ชาติชูศักดิ์
สาขาวิชา	การจัดการงานวิศวกรรม แผน ก แบบ ก 2 ปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูศักดิ์ พรสิงห์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองแท่ง ทองลิ่ม)

59405313 : การจัดการงานวิศวกรรม แผน ก แบบ ก 2 ปริญญามหาบัณฑิต
คำสำคัญ : อ้อย, น้ำตาล, ชุดลูกหีบ, กำลังการหีบอ้อย, แรงกดบนลูกหีบ, ประสิทธิภาพการหีบสกัด

นางสาว จุฑาทิพย์ ชาติชูศักดิ์: การศึกษาการปรับปรุงกระบวนการสกัดน้ำอ้อยของชุดลูกหีบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลของโรงงานผลิตน้ำตาล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูศักดิ์ พรสิงห์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการปรับปรุงกระบวนการสกัดน้ำอ้อยของชุดลูกหีบสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลของโรงงานน้ำตาล ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการวิจัยในเชิงการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ทราบถึงลักษณะของข้อมูล ซึ่งตัวทดสอบสถิติที่ศึกษามี 3 ตัวทดสอบ ได้แก่ ตัวทดสอบสถิติ Kolmogorov-Smirnov ตัวทดสอบสถิติ Kruskal–Wallis Test และตัวทดสอบสถิติ Mann-Whitney U เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบความสามารถในการดำเนินการผลิตของแต่ละโรงงานในกลุ่มที่มีประสิทธิภาพในการดำเนินงานมากที่สุดในกลุ่มในแง่ประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อย และใช้การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยที่ดีที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

โดยเก็บรวบรวมข้อมูลทั้ง 4 โรงงาน เป็นระยะเวลา 2 ฤดูหีบการผลิต และสุ่มค่าสังเกตฤดูกาลละ 20 ข้อมูล เพื่อนำมาวิเคราะห์ตั้งแต่ปัจจัยนำเข้าที่ควบคุมได้ ได้แก่ จำนวนลูกหีบ ความเร็วรอบของชุดลูกหีบ แรงดันไฮดรอลิกที่ลูกหีบบน และอุณหภูมิน้ำพรม ปัจจัยนำเข้าที่ควบคุมไม่ได้ ได้แก่ ค่าร้อยละของเส้นใย ค่าร้อยละของสิ่งปนเปื้อนในอ้อย ค่าร้อยละของอ้อยที่ไฟไหม้ คุณภาพความหวานของอ้อย ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการหีบสกัด

จากผลการวิจัยพบว่าโรงงานที่มีประสิทธิภาพหีบสกัดอ้อยที่ดีที่สุด คือ โรงงาน ค โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอย ทีละปัจจัยจนพบ 3 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญในทางสถิติ คือ ค่าร้อยละของเส้นใย ค่าร้อยละของสิ่งปนเปื้อนในอ้อย ค่าร้อยละของอ้อยที่ไฟไหม้ และใช้การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงถดถอยอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 และมีค่า R-Sq (adj) = 33.8% ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการหีบสกัด ดังนี้ ค่าร้อยละของเส้นใยไม่เกิน 12.00 ค่าร้อยละของสิ่งปนเปื้อนในอ้อยไม่เกิน 5.20 และค่าร้อยละของอ้อยที่ไฟไหม้ไม่เกิน 41.50 ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการหีบสกัดอ้อยสูงถึง 95.28 จากเป้าหมายที่ต้องการ 95.00

59405313 : Major (ENGINEERING MANAGEMENT)
Keyword : Sugarcane, Sugar, Milling roller, Presure feeder, Extraction efficiency

MISS JUTATHIP CHARTCHUSAK : A STUDY TO IMPROVE OF MILLING PROCESS TO INCREASING EXTRACTION EFFICIENCY OF SUGARCANE MILL THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR CHOOSAK PORNSING, Ph.D.

The objective of this research is study to improvement the milling process to increasing extraction efficiency of sugarcane mill. Therefore, the researcher has designed a research data analysis by using descriptive statistics as a hypothesis test to know the nature of the data.The statistical tester studied has 3 tests, Kolmogorov-Smirnov Test, Kruskal–Wallis Test and Mann-Whitney U Test. To compare efficiency in the group in terms of extraction efficiency and regression analysis was used to determine the factors affecting the best pol extraction efficiency statistically.

By collecting data from all 4 factories for a period of 3 production seasons to analyzed from the controllable input factors such as the number of sugar mill rollers, the speed of sugar mill rollers, hydraulic pressure on the upper sugar mill rollers and Imbibition water temperature. The uncontrollable import factor was the percentage of fiber, percentage of trash and percentage of burned cane. That affect the extraction process.

From the research results, it was found that the best plant with the best pol extraction was Plant C using regression analysis until found 3 factors that are statistically significant is the percentage of fiber, percentage of trash in sugarcane and the percentage of burned cane and using multiple regression analysis.It was found that there was a significant regression correlation of 0.05 and R-Sq (adj) = 33.8 appropriate parameters were as follows: percentage of fiber not more than 12.00, percentage of contamination in sugarcane not more than 5.20 and percentage of cane fire not more than 41.50. Sugar cane extractor reached 95.28 from desired target 95.00

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อคิด ข้อแนะนำ และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ผู้ทรงคุณวุฒิอีกสองท่าน คือ รศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิต ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการตรวจงานวิจัย และ ผศ.ดร.ทองแท่ง ทองลิ่ม ให้เกียรติเป็นกรรมการตรวจงานวิจัย ท่านทั้งสองให้ความรู้ คำแนะนำ เพื่อให้งานวิจัยสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณทศพร อุ่นปลี หัวหน้าแผนกลูกหีบ โรงงานอุตสาหกรมอู่ทอง ที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย และขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกคนที่อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป ส่วนความผิดพลาดและข้อบกพร่องใด ๆ ผู้ศึกษากราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ และขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

จุฑาทิพย์ ชาติชูศักดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูปภาพ ..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 4
1.6 นิยามศัพท์ 4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำตาล 6
2.1.1 สมบัติทางเคมี 8
2.1.2 ชนิดของน้ำตาล 9
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกระบวนการผลิตน้ำตาล 11
2.2.1 การสกัดน้ำอ้อยจากอ้อย (Extraction of cane) 11
2.2.2 การทำใสของน้ำอ้อย (Clarification of juice) 12
2.2.3 การต้มและการเคี่ยวให้น้ำตาลตกผลึก (Evaporation and crystallization) 13

2.2.4 การปั่นแยกผลึกและทำให้แห้ง (Centrifuging and drying).....13
2.3 กระบวนการหีบสกัดน้ำอ้อย.....17
2.3.1 การเตรียมอ้อย.....17
2.3.2 ลูกกลิ้งป้อนอ้อย (Pressure feeder).....18
2.3.3 ชุดลูกหีบ (Milling).....19
2.4 ประสิทธิภาพของการหีบสกัด (Efficiency of Milling).....21
2.4.1 กำลังการหีบอ้อย (Milling capacity).....21
2.4.2 ประสิทธิภาพของลูกหีบ.....22
2.5 การประเมินประสิทธิภาพของการหีบสกัดน้ำอ้อย.....25
2.5.1 สารต่าง ๆ ในอ้อยที่ได้จากลูกหีบ.....25
2.5.2 โครงสร้างของต้นอ้อยต่อการหีบสกัด.....25
2.5.3 การทำความสะอาดลูกหีบและการสูญเสียน้ำตาลในบริเวณโรงหีบ (Mill Sanitation and Sugar Losses Around Mills).....29
2.6 สถิติวิศวกรรม.....29
2.6.1 การทดสอบแบบ Kolmogorov-Smirnov.....29
2.6.2 การทดสอบ Kruskal-Wallis.....30
2.6.3 การทดสอบ Mann-Whitney.....32
2.6.4 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรง.....33
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....35
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....37
3.1 ประชากรที่ใช้ในการวิจัย.....37
3.2 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.....39
3.3 วิธีการวิจัยและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....41
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....41

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล 44
4.1 การวิเคราะห์การกระจายของข้อมูล 44
4.2 การทดสอบ Kruskal-Wallis Test 48
4.3 การทดสอบ Mann-Whitney U Test 50
4.4 การวิเคราะห์การถดถอยของโรงงาน ค ในฤดูที่ 2 59
4.5 การปรับปรุงและผลการปรับปรุงโรงงานตัวอย่าง 69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 72
5.1 สรุปผล 72
5.2 ข้อเสนอแนะ 73
รายการอ้างอิง 74
ภาคผนวก 80
ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา 80
ประวัติผู้เขียน 83

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ประเภทน้ำตาลในอุตสาหกรรม 9
ตารางที่ 2 ประเภทน้ำเชื่อมในอุตสาหกรรม 11
ตารางที่ 3 หน้าที่ของชุดลูกหีบในกระบวนการสกัดน้ำอ้อย (Extraction of cane) 12
ตารางที่ 4 ค่าร้อยละของบริกซ์ โพล และความบริสุทธิ์ของน้ำอ้อยจากลูกหีบแต่ละชุด 25
ตารางที่ 5 ผังควบคุมประสิทธิภาพการหีบสกัดอ้อย 26
ตารางที่ 6 การวิเคราะห์น้ำอ้อยและกากอ้อยจากลูกหีบแต่ละชุด 27
ตารางที่ 7 กำลังการผลิตและข้อมูลทางเทคนิคของโรงงานในฤดูกาลที่ 1 37
ตารางที่ 8 กำลังการผลิตและข้อมูลทางเทคนิคของโรงงานในฤดูกาลที่ 2 38
ตารางที่ 9 การเรียงลำดับค่ามัธยฐานของข้อมูลในฤดูที่ 1 54
ตารางที่ 10 การเรียงลำดับค่ามัธยฐานของข้อมูลในฤดูที่ 2 58
ตารางที่ 11 ข้อมูลทางเทคนิคชุดลูกหีบของกลุ่มโรงงาน 59
ตารางที่ 12 ข้อมูลที่แปลงค่าด้วยวิธี Box-Cox Method 61
ตารางที่ 13 ผลการดำเนินการปรับปรุงของโรงงานตัวอย่าง 70
ตารางที่ 14 ก.1 ข้อมูลฤดูที่ 1 81
ตารางที่ 15 ก.2 ข้อมูลฤดูที่ 2 82

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย 3

รูปที่ 2 น้ำตาลทรายชนิดต่าง ๆ 7

รูปที่ 3 โครงสร้างน้ำตาลซูโครส 8

รูปที่ 4 ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำตาลซูโครส 8

รูปที่ 5 กระบวนการผลิตน้ำตาล 14

รูปที่ 6 การผลิตน้ำตาลทรายดิบ น้ำตาลทรายขาว และน้ำตาลขาวบริสุทธิ์ 15

รูปที่ 7 แผนผังประสิทธิภาพการหีบสกัดน้ำอ้อยและประสิทธิภาพการต้มเคี่ยว 16

รูปที่ 8 มีดสับอ้อย 18

รูปที่ 9 เครื่องย่อยอ้อย 18

รูปที่ 10 ชุดลูกหีบ 20

รูปที่ 11 ตำแหน่งของชุดลูกหีบ 20

รูปที่ 12 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังการหีบอ้อยในกระบวนการผลิต 21

รูปที่ 13 ปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงกดลูกหีบในกระบวนการสกัดน้ำอ้อย 22

รูปที่ 14 การพรมน้ำอ้อยและพรมน้ำร้อน 24

รูปที่ 15 รูปแบบของกระบวนการหีบสกัด 28

รูปที่ 16 ตำแหน่งที่ตั้งของกลุ่มโรงงาน 38

รูปที่ 17 ขั้นตอนการทำวิจัย 43

รูปที่ 18 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ก ในฤดูที่ 1 45

รูปที่ 19 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ข ในฤดูที่ 1 45

รูปที่ 20 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ค ในฤดูที่ 1 45

รูปที่ 21 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ง ในฤดูที่ 1 46

รูปที่ 22 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ก ในฤดูที่ 2 47

รูปที่ 23 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ข ในฤดูที่ 2 47
รูปที่ 24 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ค ในฤดูที่ 2 47
รูปที่ 25 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ง ในฤดูที่ 2 48
รูปที่ 26 ผลการทดสอบ Kruskal-Willis Test ฤดูที่ 1 49
รูปที่ 27 ผลการทดสอบ Kruskal-Willis Test ฤดูที่ 2 50
รูปที่ 28 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ก และ ข ฤดูที่ 1 51
รูปที่ 29 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ก และ ค ฤดูที่ 1 52
รูปที่ 30 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ก และ ง ฤดูที่ 1 52
รูปที่ 31 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ข และ ค ฤดูที่ 1 53
รูปที่ 32 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ข และ ง ฤดูที่ 1 53
รูปที่ 33 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ค และ ง ฤดูที่ 1 54
รูปที่ 34 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ก และ ข ฤดูที่ 2 55
รูปที่ 35 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ก และ ค ฤดูที่ 2 55
รูปที่ 36 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ก และ ง ฤดูที่ 2 56
รูปที่ 37 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ข และ ค ฤดูที่ 2 56
รูปที่ 38 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ข และ ง ฤดูที่ 2 57
รูปที่ 39 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ค และ ง ฤดูที่ 2 57
รูปที่ 40 แผนภูมิแท่งของข้อมูลโรงงาน ค ในฤดูที่ 2 60
รูปที่ 41 แผนภูมิแท่งของข้อมูลที่แปลงโดยวิธีการ Box-Cox Method 60
รูปที่ 42 ผลการทดสอบ KS ข้อมูลแปลงของโรงงาน ค ในฤดูที่ 2 61
รูปที่ 43 แผนภูมิการกระจายระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ Fiber % cane 62
รูปที่ 44 แผนภูมิการกระจายระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ Pol % cane 62
รูปที่ 45 แผนภูมิการกระจายระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ C.C.S. 63
รูปที่ 46 แผนภูมิการกระจายระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ Trash % cane 63

รูปที่ 47 แผนภูมิการกระจายระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ % Burned cane 64
รูปที่ 48 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ Fiber % cane 64
รูปที่ 49 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ Pol % cane.....65
รูปที่ 50 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ C.C.S.....65
รูปที่ 51 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ Trash % cane....66
รูปที่ 52 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ % Burned cane 66
รูปที่ 53 ลักษณะของข้อมูล Transformed Pol Extraction 67
รูปที่ 54 การกระจายของ Transformed Pol Extraction กับสามตัวแปรต้น.....67
รูปที่ 55 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง Transformed Pol Extraction กับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ.68
รูปที่ 56 Probability Plot ของค่า Residuals.....69
รูปที่ 57 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง.....71

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายของไทย เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ ของประเทศ โดยเป็นแหล่งสร้างงานแก่เกษตรกรชาวไร่อ้อย แรงงานเก็บเกี่ยวอ้อย โรงงานน้ำตาล และธุรกิจที่เกี่ยวเนื่องในชนบทมากกว่า 800,000 คน สามารถสร้างรายได้จากการจำหน่ายน้ำตาลทั้งในประเทศและส่งออก ตลอดจนอุตสาหกรรมต่อเนื่องมูลค่ามากกว่าปีละ 120,000 ล้านบาท โดยในส่วนนั้นเป็นมูลค่าอ้อยประมาณ 70,000 ล้านบาท ทั้งนี้ปริมาณผลผลิตอ้อยและน้ำตาลทรายในฤดูกาลผลิตปี 2545/46 - 2559/60 ของไทยมีปริมาณไม่ แน่นอน เนื่องจากสภาพภูมิอากาศไม่แน่นอนเกิดสภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง ประกอบกับราคาอ้อยและน้ำตาลในตลาดโลกตกต่ำส่งผลให้ราคาอ้อยที่ชาวไร่อ้อยได้รับมีความผันผวนมากบางช่วงอยู่ในระดับที่ไม่คุ้มทุน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การเพาะปลูกอ้อยในบางปีที่มีรายได้ตกต่ำ ทั้งนี้สาเหตุที่สำคัญของปัญหา ดังกล่าว คือการขาดการนำผลงานวิจัยและพัฒนาด้านอ้อยมาใช้เพิ่มผลผลิตโดยเกษตรกรและขาดการส่งเสริม การพัฒนาองค์ความรู้ทั้งด้านพื้นฐานและประยุกต์เพื่อให้ประสิทธิภาพการผลิตอ้อยของไทยเป็นไปตามที่ ระเบียบวาระอ้อยแห่งชาติได้กำหนดไว้คือ ผลผลิต 95 ล้านตัน ผลผลิตเฉลี่ย 15 ตัน/ไร่ และคุณภาพความหวาน 13 ซี.ซี.เอส. โดยวัตถุดิบที่ป้อนโรงงาน คือ อ้อย ซึ่งพันธุ์อ้อยที่เป็นพื้นเมืองและอ้อยลูกผสม ซึ่งประเทศไทยนั้นมีพื้นที่เหมาะแก่การปลูกอ้อยอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศ

ความสำคัญของอ้อยในการเป็นวัตถุดิบผลิตน้ำตาล คือ 1) อ้อยเป็นพืชสามารถปลูกได้ง่ายกว่าพืชชนิดอื่น ๆ ระยะเวลาในการปลูกจนกระทั่งเก็บเกี่ยวประมาณ 8-10 เดือน แต่อ้อยบางพันธุ์ต้องใช้ระยะเวลาในการปลูกจนกระทั่งเก็บเกี่ยวถึง 12 เดือน เป็นพืชที่ทนแล้งได้ดี มีการลงทุนที่น้อยกว่าพืชชนิดอื่น ๆ มีการบำรุงรักษาที่น้อยกว่าพืชชนิดอื่นมาก และส่งผลให้ได้รับค่าตอบแทนสูงกว่า 2) มีโรงงานอุตสาหกรรมที่รองรับที่แน่นอน คือ โรงงานน้ำตาล และได้ราคาที่เป็นธรรม 3) อ้อยที่ปลูกครั้งแรก สามารถทิ้งตอไว้ได้อีก 2-3 ปี โดยไม่ได้ปลูกซ้ำ 4) มีโรงงานน้ำตาลที่ช่วยเหลือด้านการเงินบำรุงไร่ แก่หัวหน้าโควตาและชาวไร่อ้อย เพื่อเป็นค่าใช้จ่ายในการปลูกและบำรุงรักษา โดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการปลูกจนถึงการเก็บเกี่ยว

สำหรับสถานการณ์การผลิตน้ำตาลทรายในฤดูการผลิตปี 2562/2563 มีโรงงานน้ำตาลเปิดดำเนินการทั้งสิ้นจำนวน 55 โรงงาน โดยแบ่งตามภูมิภาคของประเทศไทย ได้แก่ โรงงานน้ำตาลในเขตภาคเหนือ จำนวน 10 โรงงาน เขตภาคกลาง จำนวน 20 โรงงาน เขตภาคตะวันออก จำนวน

5 โรงงาน และเขตในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จำนวน 20 โรงงาน ปริมาณการผลิตอ้อยและน้ำตาลทรายในฤดูการผลิตปี 2562/63 มีดังนี้ ปริมาณอ้อยเข้าหีบ 74,844,477.195 ตัน ปริมาณการผลิตน้ำตาลทราย 50,350,611.991 ตัน น้ำตาลทรายขาว 20,153,932.02 ตัน โดยแบ่งเป็น น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ 11,586,362 ตัน น้ำตาลทรายขาวธรรมดา 8,567,569.92 ตัน นอกจากมียังมีน้ำตายทรายดิบ 4,339,933.184 ตัน โดยเฉลี่ยแล้วผลผลิตน้ำตาลต่ออ้อย 1 ไร่ ได้ 110.46 กก. มีค่า ซี.ซี.เอส. เฉลี่ยอยู่ที่ 12.68 ซี.ซี.เอส

ซึ่งถ้าพิจารณาปริมาณการผลิตอ้อยและน้ำตาลทรายในฤดูการผลิตปี 2562/63 จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลของโรงงานจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ 1) อ้อยที่เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตน้ำตาล ว่ามีคุณภาพที่เหมาะสมหรือไม่ 2) กรรมวิธีการผลิตว่ามีประสิทธิภาพเพียงใด ตั้งแต่ประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลจากอ้อย และประสิทธิภาพของการต้มเคี่ยวตกผลึกของน้ำตาล ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยนี้ทำให้เกิดการสูญเสียต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เช่น สูญเสียน้ำตาลในกากอ้อย สูญเสียน้ำตาลในโมลาส สูญเสียน้ำตาลในกากตะกรันหม้อกรอง สูญเสียน้ำตาลที่ไม่สามารถระบุแหล่งได้ คุณภาพอ้อยที่เข้าชุดลูกหีบ ขนาดและประสิทธิภาพการทำงานของชุดลูกหีบ การพรมน้ำ เป็นต้น ถ้าพิจารณาแล้ว จะเห็นว่าต้องสูญเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการปลูกอ้อย ซื้อปุ๋ยและย่าฆ่าแมลงจากต่างประเทศ สูญเสียค่าเก็บเกี่ยว และการขนส่ง

ประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลจากอ้อย จำนวนร้อยละของน้ำตาลในอ้อยที่สามารถหีบสกัดออกมาได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ตั้งแต่การเตรียมอ้อย จนถึงการหีบสกัดเอาน้ำอ้อยออกไปผลิตน้ำตาล สำหรับฤดูกาลผลิตปี 2559/60 โรงงานน้ำตาลทั่วประเทศ 55 โรงงาน พบว่า มีโรงงานที่มีค่าประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลจากอ้อย ต่ำกว่าร้อยละ 95 อยู่ 16 โรงงาน ซึ่งถ้าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยของโรงงานดังกล่าว ให้มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วนั้น เมื่อคำนวณประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลจากอ้อยที่ร้อยละ 97 จะทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลเพิ่มขึ้นถึง 10,236.86 ตัน ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้มีขึ้นเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลจากอ้อยและสูญเสียน้ำตาลในขั้นตอนการสกัดน้ำอ้อย เพื่อหาแนวทางที่จะช่วยลดการสูญเสียน้ำตาลไปกับกากอ้อย อันจะช่วยทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลต่อตันอ้อยมากขึ้น โดยการวิจัยครั้งนี้สนใจที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลจากอ้อย เป็น 6 จุด ดังนี้ จุดที่ 1 จุดรับอ้อย ตรวจคุณภาพอ้อย และชนิดของพันธุ์อ้อย จุดที่ 2 การเตรียมชิ้นอ้อย ตรวจคุณภาพชิ้นอ้อย จุดที่ 3 ลูกหีบ วัดแรงกดของลูกหีบ จุดที่ 4 จุดรวมน้ำอ้อย ตรวจคุณภาพของน้ำอ้อย จุดที่ 5 กากอ้อย ตรวจคุณภาพของกากอ้อย และจุดที่ 6 เส้นใย (Fiber) และกากอ้อย (Bagasse % Cane)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลจากอ้อยของโรงงานน้ำตาล

1.2.2 เพื่อลดการสูญเสียน้ำตาลในกระบวนการสกัดและเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลมากกว่าร้อยละ 95

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยเป็นข้อมูลย้อนหลังไป 2 ฤดูกาลก่อนหน้า

1.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวัดผลอยู่บนสมมติฐานว่ามีการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO อยู่เป็นระยะแล้ว

1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย

รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของโรงงานตัวอย่าง

1.5.2 เพื่อเป็นแนวทางลดการสูญเสียน้ำตาลในขั้นตอนการสกัดน้ำอ้อยจากอ้อยสำหรับโรงงานอื่น ๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

1.6 นิยามศัพท์

1.6.1 กากน้ำตาล หรือ โมลาส (Molasses) คือ ผลพลอยได้สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายลักษณะเป็นของเหลวเหนียวข้น สีน้ำตาลเข้ม ส่วนประกอบของโมลาสจะผันแปรขึ้นอยู่กับพันธุ์อ้อยและกรรมวิธีการผลิตน้ำตาล โมลาสส่วนใหญ่จะประกอบด้วย น้ำตาลซูโครส น้ำตาลอินเวอร์ทและน้ำ ซึ่งไม่สามารถจะตกผลึกน้ำตาลได้อีก

1.6.2 การหีบอ้อย คือ การสกัดน้ำอ้อยจากต้นอ้อย โดยการนำอ้อยเข้าไปในชุดลูกหีบ ซึ่งชุดลูกหีบจะมีด้วยกัน 4-5 ชุด จากนั้นก็จะนำกากอ้อยที่ออกจากลูกหีบชุดสุดท้ายออกไปรวมกันที่กองกากอ้อย และนำกากอ้อยไปเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ในเตาหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำและผลิตไฟฟ้าออกมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล

1.6.3 กากอ้อย คือ ผลิตผลพลอยได้ที่ได้จากกระบวนการหีบอ้อย กากอ้อยเป็นชีวมวลประเภทหนึ่งที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ คือ ให้ค่าความร้อนค่อนข้างสูง (เช่นเดียวกับแกลบ) และไม่มีส่วนผสมของโลหะอัลคาไลน์ (เช่น โซเดียม โปแตสเซียม เป็นต้น) ในปริมาณที่ก่อให้เกิดปัญหาเถ้าหลอมและตะกรันในระหว่างการเผาไหม้ ด้วยเหตุนี้ กากอ้อยที่เกิดขึ้นทั้งหมดจึงถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยผ่านกระบวนการเผาไหม้ในหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) เพื่อผลิตไอน้ำและนำไอน้ำบางส่วนไปหมุนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า

1.6.4 ค่าบริกซ์ (Brix) คือ หน่วยที่ใช้บอกความเข้มข้น ของของแข็งที่ละลายอยู่ในสารละลายเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อน้ำหนัก

1.6.5 ค่าโพล (Pol หรือ Polarization) เป็นค่าร้อยละโดยน้ำหนักโดยประมาณ แต่ใกล้เคียงของน้ำตาลซูโครสที่วัดด้วยโพลาริมิเตอร์ (Polarimeter)

1.6.6 ค่า C.C.S (Commercial Cane Sugar) เป็นระบบการคิดคุณภาพของอ้อย ซึ่งได้นำแบบอย่างมาจากระบบการซื้อขายอ้อยของประเทศออสเตรเลีย หมายถึง ปริมาณของน้ำตาลที่มีอยู่ในอ้อย ซึ่งสามารถหีบสกัดออกมาได้เป็นน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ ซึ่งตามมาตรฐาน C.C.S. กำหนดวิธีคิดว่า ในระหว่างผ่านกรรมวิธีการผลิต ถ้ามีสิ่งที่ไม่บริสุทธิ์ที่ละลายอยู่ในน้ำอ้อย 1 ส่วน จะทำให้สูญเสียน้ำตาลไป 50% ของจำนวนสิ่งที่ไม่บริสุทธิ์

1.6.7 เส้นใยอ้อย หรือเรียกอีกแบบว่า ชานอ้อย (Bagasse) คือ เศษเหลือของลำต้นอ้อย มีลักษณะเป็นเส้นใยที่หีบเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกจากท่อนอ้อยแล้วเป็นวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล

1.6.8 Bagasses % cane คือ ค่าร้อยละกากอ้อยในอ้อย ถ้ากากอ้อยเยอะ นั่นคือค่าประสิทธิภาพการหีบสกัดอ้อย (Pol Extraction) ไม่ดี

1.6.9 Brix % bagasse คือ ค่าร้อยละความหวานของกากอ้อย

1.6.10 % Burned Cane คือ ค่าร้อยละของอ้อยที่ถูกไหม้ ถ้า % สูงจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียค่าความหวานในอ้อย

1.6.11 Fiber % Bagasse คือ อัตราส่วนร้อยละของเส้นใย หาได้จาก 100- moisture % bagasse- Brix % bagasse

1.6.12 Fiber % Cane คือ ค่าร้อยละของเส้นใยหรือชานอ้อยในอ้อย

1.6.13 Imbition % Cane คืออัตราส่วนน้ำพรมในอ้อย

1.6.14 Imbition % Fiber คืออัตราส่วนน้ำพรมในเส้นใยหรือกากอ้อย

1.6.15 Milling Loss คือ อัตราส่วนร้อยละของโพล (Pol) ต่อเส้นใยกากอ้อย (Fiber) เป็นค่าที่บอกการสูญเสียของลูกหีบ หาได้จาก Pol % bagasse x 100 / Fiber% bagasse

1.6.16 Mix Juice % Cane คือ ค่าร้อยละของน้ำอ้อยรวมจากลูกหีบชุดที่ 1 ถึง ชุดสุดท้าย

1.6.17 Moisture % Bagasse คือ ค่าร้อยละความชื้นของกากอ้อย (ถ้าค่า Moisture % Bagasse สูง ค่า Pol Extraction จะเพิ่มขึ้น)

1.6.18 Pol % Bagasse คือ ค่าร้อยละโพลของกากอ้อย (ถ้าค่า Pol % Bagasse น้อย ค่า moisture % bagasse จะสูงขึ้น)

1.6.19 Pol % Cane คือ ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำตาลซูโครสในน้ำอ้อย

1.6.20 Trash % Cane คือ ค่าร้อยละของสิ่งปนเปื้อนในน้ำอ้อย (ถ้าค่า Trash % Cane มาก จะส่งผลให้น้ำหนักอ้อยรวมน้อยลง)

1.6.21 Pol Extraction คือ ประสิทธิภาพการหีบสกัดอ้อย หาได้จาก Tons Pol in Mixed Juice x 100 / Tons Pol in Cane

1.6.22 Reduce Extraction คา Pol Extraction ที่คำนวณที่ปริมาณ fiber มาตรฐานเท่ากับ 12.5% เป็นค่า extraction ที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างโรงงานหรือระหว่างปีที่มี Fiber ไม่เท่ากัน หาได้จาก 100 – (100 – extraction) x (100 - fiber) / 7 x fiber

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล รวมไปถึงเทคโนโลยีและนวัตกรรมการสกัดอ้อยและผลิตน้ำตาล เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยจากกระบวนการผลิต รวมถึงทฤษฎีสถิติวิศวกรรมที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะได้สรุปเป็นประเด็นที่น่าสนใจต่องานวิจัย รายละเอียดของหัวข้อต่างแสดงไว้ดังนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำตาล

น้ำตาล (สำนักงานอาหารและยา, 2558) ถูกจัดให้เป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งที่เป็นแหล่งพลังงานของร่างกาย โดยน้ำตาล 1 กรัมให้พลังงาน 4 กิโลแคลอรี โดยน้ำตาลแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ได้แก่ กลูโคส ฟรุกโทส และกาแล็คโทส และน้ำตาลโมเลกุลคู่ ได้แก่ ซูโครส (กลูโคส + ฟรุกโทส) มอลโทส (กลูโคส + กลูโคส) และแลคโทส

น้ำตาลเป็นชื่อเรียกทั่วไปของคาร์โบไฮเดรตชนิดละลายน้ำ โซ่สั้น และมีรสหวาน ส่วนใหญ่ใช้ประกอบอาหาร น้ำตาลเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน มีน้ำตาลหลายชนิดเกิดมาจากที่มาหลายแหล่ง น้ำตาลอย่างง่ายเรียกว่าโมโนแซ็กคาไรด์และหมายรวมถึงกลูโคส (หรือ เด็กซ์โตรส) ฟรุกโตส และกาแลกโตส น้ำตาลโต๊ะหรือน้ำตาลเม็ดที่ใช้เป็นอาหารคือซูโครส เป็นไดแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่ง (ในร่างกาย ซูโครสจะรวมตัวกับน้ำแล้วกลายเป็นฟรุกโตสและกลูโคส) ไดแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นยังรวมถึงมอลโตส และแลกโตสด้วย โซ่ของน้ำตาลที่ยาวกว่าเรียกว่าโอลิโกแซ็กคาไรด์ สารอื่น ๆ ที่แตกต่างกันเชิงเคมีอาจมีรสหวาน แต่ไม่ได้จัดว่าเป็นน้ำตาล บางชนิดถูกใช้เป็นสารทดแทนน้ำตาลที่มีแคลอรีต่ำมาก เรียกว่าเป็น วัตถุให้ความหวานทดแทนน้ำตาล (Artificial Sweeteners)

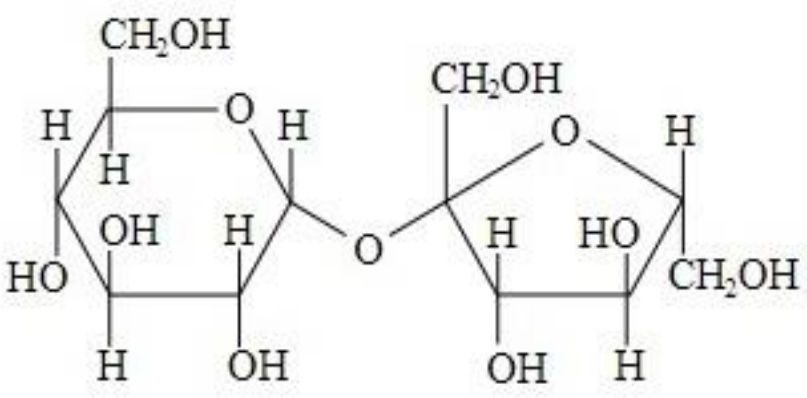
น้ำตาลพบได้ทั่วไปในเนื้อเยื่อของพืช แต่มีเพียงอ้อย และชูการ์บีตเท่านั้นที่พบน้ำตาลในปริมาณความเข้มข้นเพียงพอที่จะสกัดออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ อ้อยหมายรวมถึงหญ้ายักษ์หลายสายพันธุ์ในสกุล Saccharum ที่ปลูกกันในเขตร้อนอย่างเอเชียใต้ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งในปัจจุบันมีการผลิตน้ำตาลทั่วโลกประมาณ 168 ล้านตันในปี พ.ศ. 2554 โดยเฉลี่ยคนบริโภคน้ำตาล 24 กิโลกรัมต่อปี (33.1 กก. ในประเทศอุตสาหกรรม) เทียบเท่ากับอาหารปริมาณมากกว่า 260 แคลอรีต่อวัน

รูปที่ 2 น้ำตาลทรายชนิดต่าง ๆ
ที่มา: Medthai (2557)

ชื่อทางวิทยาศาสตร์ของน้ำตาลหมายถึงจำนวนคาร์โบไฮเดรต เช่น โมโนแซ็กคาไรด์ ไดแซ็กคาไรด์ หรือโอลิโกแซ็กคาไรด์โมโนแซ็กคาไรด์เรียกอีกอย่างว่า "น้ำตาลอย่างง่าย" ที่สำคัญที่สุด คือ กลูโคส น้ำตาลเกือบทุกชนิดมีสูตร $C_nH_{2n}O_n$ (n มีค่าระหว่าง 3 และ 7) กลูโคสมีสูตรเคมีว่า $C_6H_{12}O_6$ ชื่อของน้ำตาลลงท้ายด้วยเสียง -โอส (ose) อย่างใน "กลูโคส" และ "ฟรุกโตส" บางครั้งคำเหล่านี้อาจหมายถึงชนิดใด ๆ ของคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ในน้ำ โมโนแซ็กคาไรด์และไดแซ็กคาไรด์แบบอะไซคลิก (Acyclic) จะบรรจุหมู่แอลดีไฮด์หรือหมู่คีโตน มีศูนย์กลางปฏิกิริยาเป็นพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน แซ็กคาไรด์ทุกชนิดที่มีวงแหวนในโครงสร้างมากกว่าหนึ่งวงจากเป็นผลจากโมโนแซ็กคาไรด์สองชนิดหรือมากกว่ามาเชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก โดยสูญเสียน้ำหนึ่งโมเลกุลต่อหนึ่งพันธะ

โมโนแซ็กคาไรด์ในรูปโซ่ปิดสามารถสร้างพันธะไกลโคซิดิกด้วยโมโนแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นโดยสร้าง ไดแซ็กคาไรด์ (เช่น ซูโครส) และโพลีแซ็กคาไรด์ (เช่น แป้ง) เอนไซม์จะต้องละลายน้ำหรือแตกพันธะไกลโคซิดิกเหล่านี้ก่อนที่สารดังกล่าวจะถูกสันดาป (Metabolized) หลังจากย่อยและดูดซึมสารอาหาร

โมโนแซ็กคาไรด์จะอยู่ในเลือดและเนื้อเยื่อภายในจะมีกลูโคส ฟรุกโตส และกาแลกโตส เพนโทสและเฮกโซสจำนวนมากสามารถสร้างโครงสร้างวงแหวนได้ ในรูปแบบโซปิดนี้ ปฏิกิริยาหลายอย่างที่มักเกิดขึ้นต่อหมู่แอลดีไฮด์และคีโตนจะเกิดขึ้นมิได้ กลูโคสในสารละลายจะคงอยู่ในรูปวงแหวนที่สมดุลเคมี โดยมีโมเลกุลในรูปโซ่เปิดน้อยกว่า 0.1%

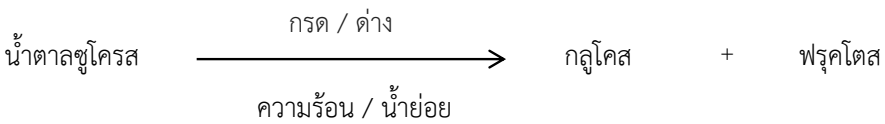


Disaccharide glucose Fructose

รูปที่ 3 โครงสร้างน้ำตาลซูโครส
ที่มา : ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร (2553)

2.1.1 สมบัติทางเคมี

น้ำตาลซูโครสมีสมบัติเฉพาะทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตน้ำที่จะผลิตได้ของโรงงานน้ำตาลหลายประการ โดยเฉพาะปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำตาลซูโครสที่จะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำตาลในขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ ของโรงงาน การแตกตัวของน้ำตาลเป็นปฏิกิริยาเริ่มแรก ส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อน้ำตาลซูโครสแตกตัวมาเป็นน้ำตาลฟรุคโตส และกลูโคส



รูปที่ 4 ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำตาลซูโครส

2.1.2 ชนิดของน้ำตาล

น้ำตาลที่แบ่งตามลักษณะการผลิตมีอยู่ 2 ชนิด คือ น้ำตาลที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรม และน้ำตาลที่ผลิตในระดับครัวเรือน ในที่นี่จะกล่าวถึงน้ำตาลที่ผลิตในอุตสาหกรรมชนิดของน้ำตาลแบ่งได้ทั้งหมดเป็น 2 ประเภท (ห้องปฏิบัติการค่าทางน้ำตาล และสารอนุพันธ์, 2562) แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประเภทน้ำตาลในอุตสาหกรรม

ประเภทน้ำตาล	ลักษณะของน้ำตาล
น้ำตาลทรายดิบ (Raw sugar)	เป็นน้ำตาลซูโครสที่อยู่ในรูปผลึกที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ มีลักษณะเป็นผลึกสีน้ำตาลอ่อนหรือน้ำตาลเข้ม มีความชื้นปานกลาง มีกากน้ำตาลมาก เกล็ดน้ำตาลจับตัวกันแน่น ไม่ร่วน สามารถผลิตได้จากน้ำอ้อย ประกอบด้วยการหีบอ้อย การแยกสิ่งสกปรกด้วยการตกตะกอน การฟอกสีด้วยปูนขาว น้ำตาลชนิดนี้ไม่ใช่น้ำตาลบริโภค แต่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์
น้ำตาลทรายขาว (Plantation or mill white sugar)	เป็นน้ำตาลซูโครสที่อยู่ในรูปผลึก มีสีขาวถึงเหลืองอ่อน มีกากน้ำตาล และความชื้นน้อย เกล็ดน้ำตาลจับตัวไม่แน่น มีความร่วนกว่าน้ำตาลทรายดิบ ใช้การฟอกสีน้ำอ้อยด้วยก๊าซ SO2 หรือก๊าซ CO2 น้ำตาลชนิดนี้นิยมใช้สำหรับอุตสาหกรรมอาหาร น้ำอัดลม รวมถึงจำหน่ายสำหรับใช้ในครัวเรือน
น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ (Refined sugar)	เป็นน้ำตาลซูโครสที่อยู่ในรูปผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวใส มีความสะอาดสูง ไม่มีกากน้ำตาล และมีความชื้นน้อยมากหรือไม่มีความชื้นเลย เป็นน้ำตาลทรายขาวที่วางจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป นิยมใช้ทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและในครัวเรือน
น้ำตาลทรายสีรำ (Brown sugar)	เป็นน้ำตาลทรายขาวชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นเกล็ดใส สีน้ำตาลอ่อน มีเกล็ดขนาดเล็ก และมีความชื้นน้อยกว่าน้ำตาลทรายดิบ
น้ำตาลทรายแดง (Soft brown sugar)	เป็นน้ำตาลที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีน้ำตาลอ่อนถึงสีน้ำตาลแดง มีกลิ่นน้ำตาลไหม้ เป็นน้ำตาลที่มีความชื้นสูงทำให้ไม่จับตัวเป็นก้อน ขนาดผลึกขึ้นอยู่กับปริมาณกากน้ำตาล หากมีกากน้ำตาลมาก สีจะเข้ม ผลึกจะใหญ่ และเกาะกันแน่น ให้รส และกลิ่นแรง บางครั้ง เรียกว่า น้ำตาลดิบ เพราะเป็นน้ำตาลที่ไม่ได้ทำให้บริสุทธิ์ มีการผลิตทั้งในระดับครัวเรือน และระดับ

ตารางที่ 1 ประเภทน้ำตาลในอุตสาหกรรม (ต่อ)

ประเภทน้ำตาล	ลักษณะของน้ำตาล
	อุตสาหกรรม น้ำตาลชนิดนี้ นิยมใช้แทนน้ำตาลทรายขาว เช่น ใช้แทนน้ำตาลทรายอื่นที่มีราคาสูงในการผลิตซีอิ๊ว และใช้ผสมอาหาร
น้ำตาลไอซิ่ง (Icing sugar)	เป็นน้ำตาลที่ได้จากการนำน้ำตาลทรายขาวมาบดจนละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงตามขนาดที่ต้องการ พร้อมเติมสารป้องกันการเกาะตัวเป็นก้อน (Anti-caking agent) เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า และซิลิกอนไดออกไซด์ น้ำตาลชนิดนี้ นิยมใช้ทำขนม แต่งหน้าขนม และทำไส้ครีม
น้ำตาลป่นละเอียด (Caster sugar)	เป็นน้ำตาลที่ทำมาจากการป่นน้ำตาลทรายขาวให้ละเอียด จนได้เม็ดน้ำตาลที่คล้ายกับน้ำตาลไอซิ่ง แต่ไม่มีการเติมสารป้องกันการเกาะตัวเท่านั้น มีคุณสมบัติละลายได้ง่าย จึงนิยมใช้ปรุงอาหาร หรือใช้เป็นส่วนผสมในการทำขนม
น้ำตาลปอนด์ (Cube sugar)	ผลิตได้จากการนำน้ำตาลทรายขาวมาบีบอัดให้ได้รูปทรงสี่เหลี่ยม และเป่าด้วยลมเย็นเพื่อให้แข็งตัว มีความชื้นประมาณ 0.5-1.0% เป็นน้ำตาลที่นิยมใช้ผสมน้ำชา กาแฟ
น้ำตาลกรวด (Crystalline sugar)	เป็นน้ำตาลที่ผลิตจากน้ำเชื่อมของอ้อยหรือน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์นำมาละลายน้ำ และทำให้ตกผลึกอย่างช้า ๆ ไม่ฟอกสี มีลักษณะเป็นก้อนคล้ายสารส้ม มีสีขาวใส น้ำตาลชนิดนี้มีรสหวานนิยมใช้ผสมอาหารที่ต้องการความพิถีพิถัน เช่น ตุ๋นรังนก ตุ๋นยา และทำขนมชนิดต่าง ๆ
น้ำผึ้ง (Honey)	เป็นน้ำตาลที่อยู่ในรูปสารละลายที่มาจากน้ำหวานของเกสรดอกไม้ องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลฟรุกโทสมากกว่ากลูโคส มีความชื้นประมาณ 18–20%
น้ำเชื่อม (Syrup)	เป็นน้ำตาลที่อยู่ในรูปของเหลว สามารถเตรียมได้จากการนำน้ำตาลทรายขาวหรือน้ำตาลชนิดต่าง ๆ มาละลายน้ำ และเคี่ยวจนได้สารละลายน้ำตาลเข้มข้น ซึ่งลักษณะสีจะแตกต่างกันตามชนิดของน้ำตาลที่ใช้ สำหรับการใช้น้ำตาลทรายดิบหรือน้ำตาลทราบที่มีสี แต่ต้องการให้ได้น้ำเชื่อมที่ใสขึ้นนั้น จะต้องใช้เปลือกไข่เติมลงในหม้อเคี่ยวด้วย

ส่วนการผลิตน้ำเชื่อมในอุตสาหกรรมจะใช้วิธีการย่อยแป้งด้วยกรดหรือเอนไซม์จนได้สารละลายของน้ำตาลกลูโคสหรือน้ำตาลชนิดต่าง ๆ จากแป้งที่ใช้ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ประเภทน้ำเชื่อมในอุตสาหกรรม

ประเภทน้ำเชื่อม	ลักษณะของน้ำเชื่อม
น้ำเชื่อมกลูโคส (Glucose syrup)	หรือเรียกว่า กลูโคสซีรัป เป็นน้ำเชื่อมที่ได้จากการย่อยแป้งหรือน้ำตาล ซูโครสจนได้น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโทส และแยกน้ำตาลฟรุกโทสออกเหลือเฉพาะน้ำตาลกลูโคส เป็นน้ำตาลที่มีลักษณะเหนียว มีความหวานปานกลาง นิยมใช้ทำขนมหวาน ลูกกวาด หมากฝรั่ง เป็นต้น
น้ำเชื่อมฟรุกโทส (Fructose syrup)	เป็นน้ำเชื่อมที่ได้จากการย่อยแป้งหรือน้ำตาลซูโครส จนเหลือเฉพาะน้ำตาลฟรุกโทส เป็นน้ำตาลที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม และอุตสาหกรรมอาหาร
น้ำเชื่อมเมเปิ้ล (Maple syrup)	เป็นน้ำเชื่อมที่ได้จากการเคี่ยวยางของต้นเมเปิ้ล มีความชื้นไม่เกินประมาณ 35% ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสเป็นส่วนใหญ่ เป็นชนิดน้ำเชื่อมที่มีความจำเพาะ ไม่เหมือนกับน้ำตาลชนิดอื่น เพราะมีองค์ประกอบของแคลเซียม และเหล็ก น้ำเชื่อมชนิดนี้ นิยมใช้ราดหน้าไอศกรีม ใช้เป็นส่วนผสมในขนมปัง เป็นต้น
น้ำเชื่อมผลไม้เทียม	เป็นน้ำเชื่อมที่ได้จากการนำน้ำตาลมาละลายน้ำแล้วเติมสารสกัดผลไม้เพื่อให้มีกลิ่นผลไม้ มีลักษณะเหนียว สีน้ำตาล มีรสหวานอมขม นิยมใช้ผสมในขนม ใช้หมักแอลกอฮอล์ ผลิตผงชูรสหรือซีอิ๊วดำ เป็นต้น

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกระบวนการผลิตน้ำตาล

กระบวนการผลิตของโรงงานน้ำตาลทราย ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนที่สำคัญ คือการเตรียมชิ้นออยการหีบสกัดน้ำอ้อย การทำน้ำอ้อยให้บริสุทธิ์ การต้มระเหยน้ำอ้อย การเคี่ยวน้ำตาลปนแยกเม็ดน้ำตาล และการบรรจุน้ำตาล ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะอธิบายกระบวนการผลิตน้ำตาลดังนี้

2.2.1 การสกัดน้ำอ้อยจากอ้อย (Extraction of cane)

การสกัดน้ำอ้อยจากอ้อยนั้นเริ่มจากอ้อยจะถูกลำเลียงเข้าสู่เครื่องย่อยอ้อยเพื่อให้เกิดกดบดย่อยจนเกิดเป็นชิ้นเล็กฝอย เพื่อเข้าไปสู่ชุดลูกหีบเพื่อให้ทำการสกัดตัวน้ำอ้อยออกมาจากชุดลูกหีบชุดสุดท้าย ซึ่งชุดลูกหีบการสกัดจะประกอบไปด้วยลูกหีบ 4-6 ชุด ซึ่งมีกระบวนการทำงานของลูกหีบ (เทคนิคสิ่งแวดล้อมไทย, 2561) แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 หน้าที่ของชุดลูกหีบในกระบวนการสกัดน้ำอ้อย (Extraction of cane)

ชุดลูกหีบ	หน้าที่
ลูกหีบชุดที่ 1	บีบหรือคั้นอ้อยออกมาให้ได้มากที่สุด จากนั้นกากอ้อยที่ออกจากลูกหีบชุดที่ 1 จะส่งไปยังลูกหีบชุดที่ 2
ลูกหีบชุดที่ 2	กากอ้อยจากลูกหีบชุดที่ 1 จะถูกพรมด้วยน้ำอ้อยเจือจาง โดยน้ำอ้อยที่สกัดได้จากลูกหีบชุดที่ 2 จะถูกแยกทำความสะอาดโดยไม่รวมกับน้ำอ้อยหีบแรก
ลูกหีบชุดที่ 3	กากอ้อยจากลูกหีบชุดที่ 2 จะถูกพรมด้วยน้ำอ้อยเจือจางที่ได้จากลูกหีบชุดที่ 4
ลูกหีบชุดที่ 4	กากอ้อยจากลูกหีบชุดที่ 3 จะถูกพรมด้วยน้ำอ้อยเจือจางที่ได้จากลูกหีบชุดที่ 5
ลูกหีบชุดที่ 5	กากอ้อยจากลูกหีบชุดที่ 4 จะถูกพรมด้วยน้ำร้อน อุณหภูมิประมาณ 90-95 องศาเซลเซียส

เพื่อประสิทธิภาพการสกัดที่ดีขึ้นจึงมีการพรมน้ำอ้อยและพรมน้ำลงไปในกากอ้อยที่ออกมาจากชุดลูกหีบแต่ละชุดโดยทั่วไปเรียกว่า “Dry crushing” และ “Imbibition water” ซึ่งการใช้พรมน้ำนี้จะช่วยให้สามารถ **สกัดน้ำตาล (Pol extraction)** ออกมาจากอ้อยได้มากกว่าร้อยละ 95

2.2.2 การทำใสของน้ำอ้อย (Clarification of juice)

ในกระบวนการนี้เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำอ้อยที่ได้จากลูกหีบยังไม่บริสุทธิ์เพียงพอเนื่องจากมีสารปนเปื้อนแฝงอยู่ เช่น สารแขวนลอย สารที่ไม่ละลายตัว และสารที่ละลายตัวอยู่ในน้ำอ้อย ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้กรรมวิธีแบบ Defecation Method ในการแยกสิ่งที่ไม่บริสุทธิ์ออกด้วยการทำให้ตกตะกอนด้วยปูนขาวเพื่อปรับสภาพน้ำอ้อยให้เป็นกลาง และจับกับสารละลายต่าง ๆ ปล่อยให้ตกตะกอนแล้วนำส่วนที่ใสไปทำการต้มเคี่ยวเป็นผลึกน้ำตาลต่อไป ส่วนตะกอนอื่น ๆ เช่น ดิน โคลน แว๊กซ์ จะผ่านตกไปอยู่ที่เครื่องกรองสุญญากาศ (Rotary drum vacuum filters) เพื่อแยกเอาส่วนน้ำอ้อยซึ่งมีความหวานกับเข้ามาใช้ในขบวนการผลิตอีกครั้งหนึ่ง

2.2.3 การต้มและการเคี่ยวให้น้ำตาลตกผลึก (Evaporation and crystallization)

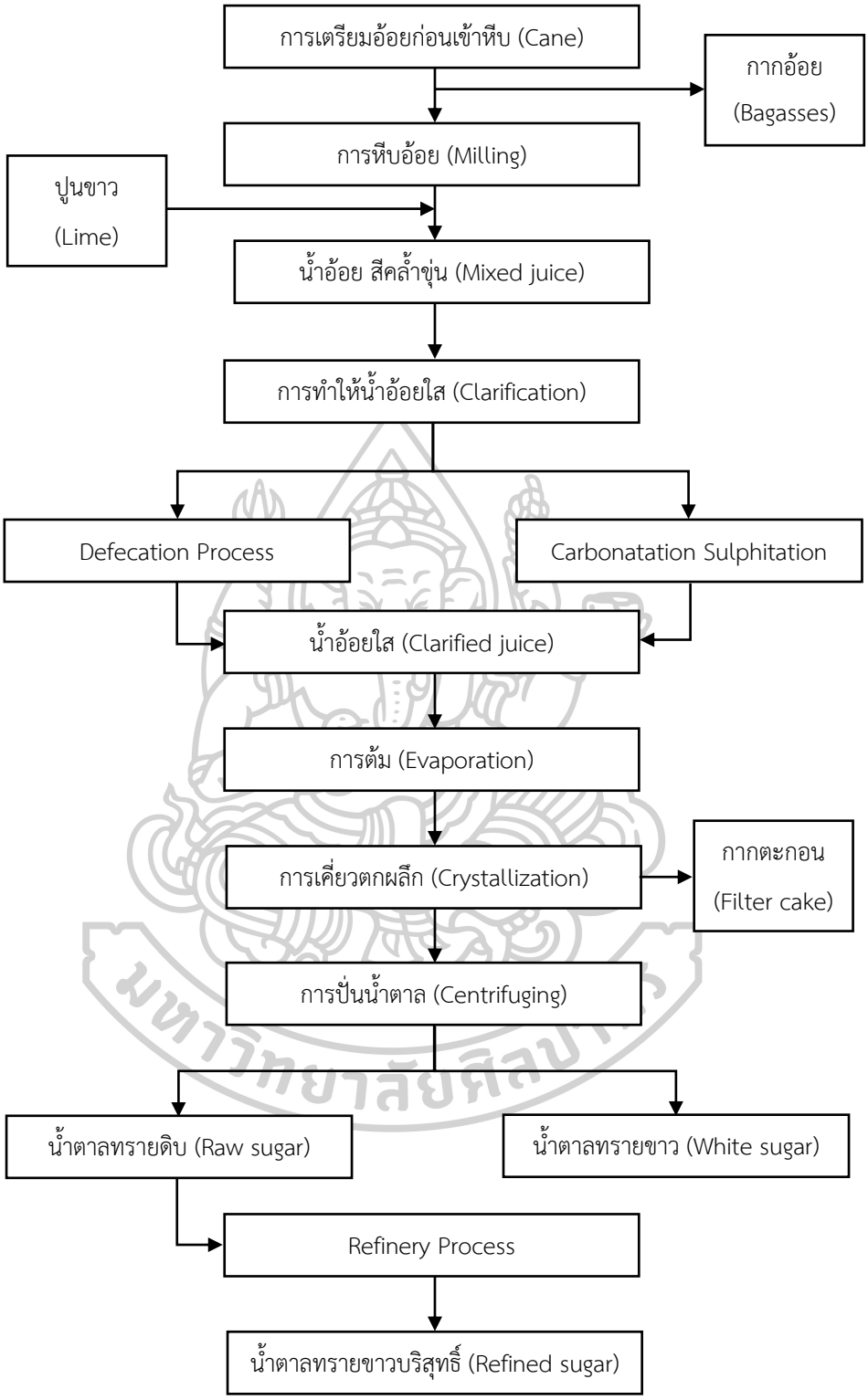
ในขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการเปลี่ยนสภาพน้ำอ้อยใสที่ได้จากการสกัดมาทำให้กลายเป็นน้ำเชื่อม (Syrup) โดยทำการต้มน้ำาอ้อยใสในหม้อระเหย (Evaporator) โดยจะต้มให้ได้น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นประมาณ 65-70 บริกซ์ (เทคนิคสิ่งแวดล้อมไทย, 2561) หรือที่เราเรียกในอุตสาหกรรมว่า “น้ำเชื่อมดิบ (Raw Syrup)” โดยจะถูกเก็บไว้ที่ถังพักน้ำเชื่อม (Syrup Tank) ก่อนจะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการเคี่ยวและปั่นน้ำตาลดิบต่อไป

2.2.4 การปั่นแยกผลึกและทำให้แห้ง (Centrifuging and drying)

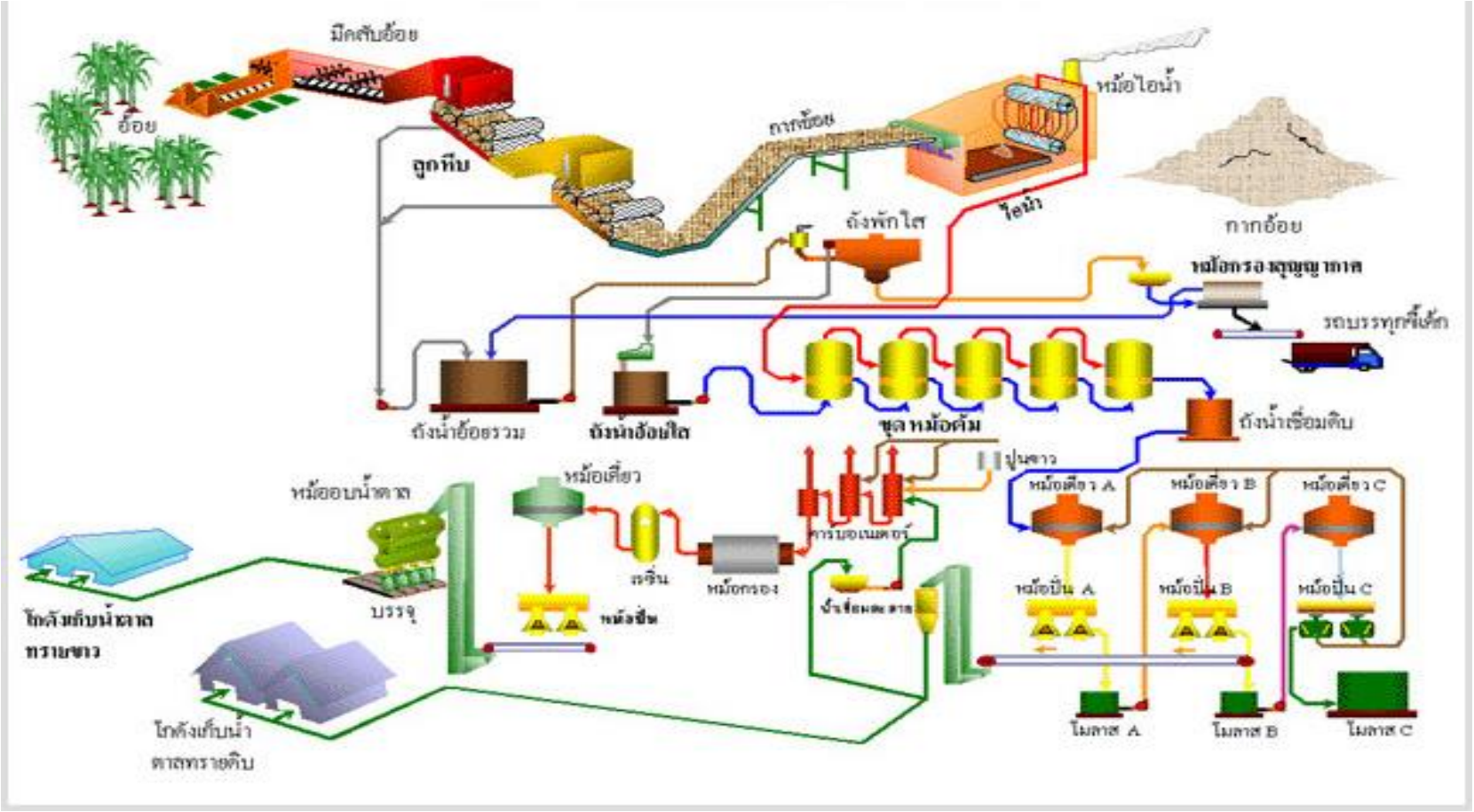
ขั้นตอนนี้เป็นการเคี่ยวน้ำตาลจากถังพักน้ำเชื่อม (Syrup Tank) โดยน้ำเชื่อมจะถูกนำมาเคี่ยวจนมีความเข้มข้นมากขึ้นจนกระทั่งเกิดผลึก เมื่อน้ำเชื่อมอยู่ในลักษณะที่เต็มไปด้วยผลึกน้ำตาล เรียกว่า “แมสควิท (Massecuite)” ซึ่งจะมีน้ำเหลืออยู่ประมาณ 5-6 % โดยโมเลกุลของน้ำตาลเกิดการเกาะตัวที่ผลึกได้มากขึ้น จนมีขนาดน้ำตาลตามที่ต้องการ จากนั้นจึงส่งไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออกจากน้ำเลียงผลึกที่หม้อปั่น (Centrifugal) เพื่อจะแยกกากน้ำตาลหรือที่เรียกว่าโมลาส (Molasses) ออกไปส่วนเม็ดน้ำตาลทรายจะนำไปผ่านการอบให้แห้ง

โดยกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายที่ได้ทำการอธิบายข้างต้นสามารถเขียนเป็นแผนผังกระบวนการผลิตได้ดังรูปที่ 2.4 และแสดงแผนภูมิการผลิตน้ำตาลทรายดิบ น้ำตาลทรายขาว และน้ำตาลขาวบริสุทธิ์ รูปที่ 5

มหาวิทยาลัยศิลปากร

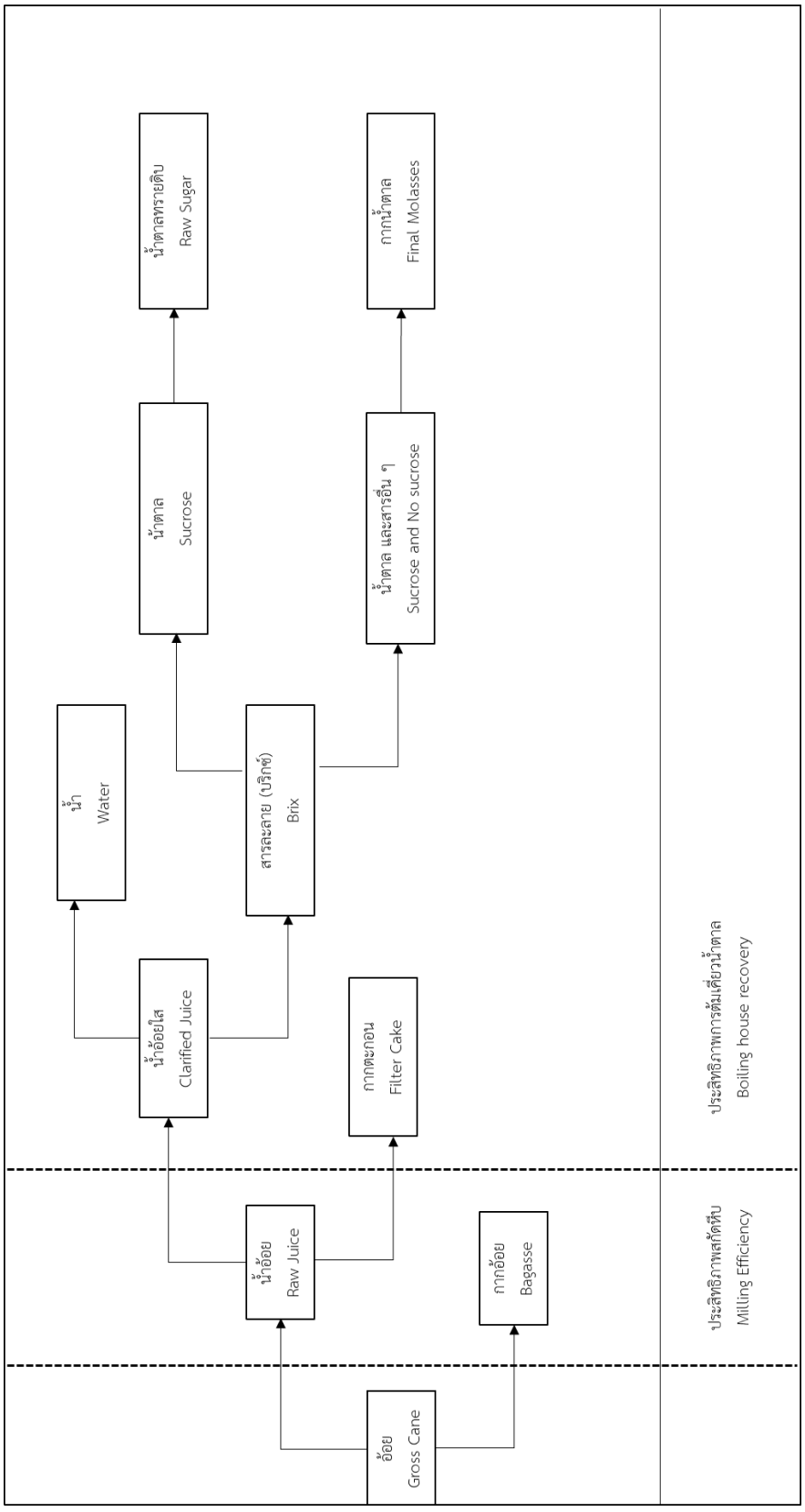


รูปที่ 5 กระบวนการผลิตน้ำตาล



รูปที่ 6 การผลิตน้ำตาลทรายดิบ น้ำตาลทรายขาว และน้ำตาลขาวบริสุทธิ์

ที่มา: ไทยชูการ์มิลเลอร์ (ม.ป.ป)



รูปที่ 7 แผนผังประสิทธิภาพการหีบสกัดน้ำอ้อยและประสิทธิภาพการต้มเคี่ยว

ที่มา: สมบัติ ขอทวีวัฒนา และคณะ (ม.ป.ป)

2.3 กระบวนการหีบสกัดน้ำอ้อย

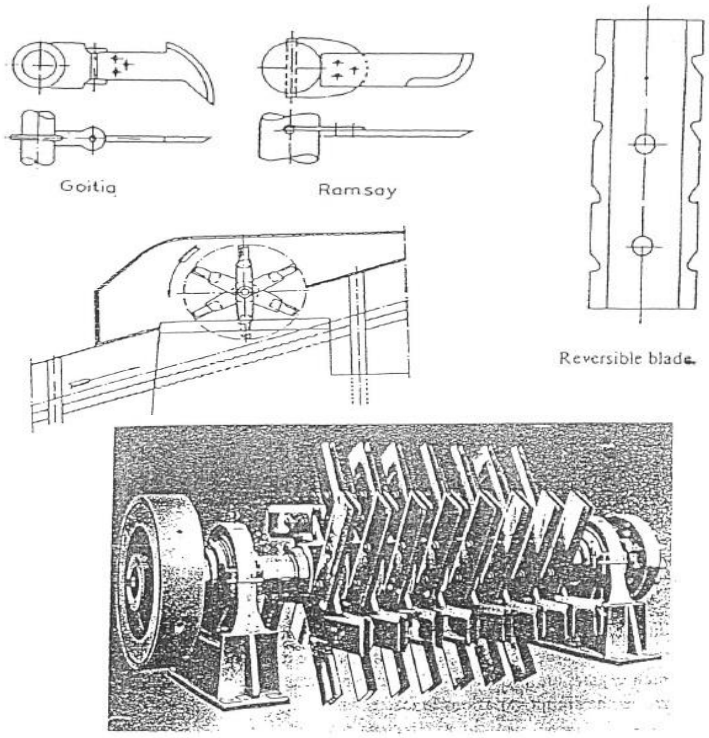
กระบวนการหับสกัดน้ำอ้อยเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนประกอบไปด้วยกระบวนการย่อยหลายขั้นตอน และแต่ละกระบวนการย่อยก็มีเทคโนโลยีให้เลือกแตกต่างกันไป อนึ่งสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบกระบวนการหีบอ้อยคือ ประสิทธิภาพของกระบวนการหีบสกัด ที่ประกอบไปด้วยปัจจัยและพารามิเตอร์อีกมากมายที่ต้องที่มีปรับตั้งเพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะและเกิดประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุด ในหัวข้อนี้จะนำเสนอขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการหีบสกัดอ้อย รวมทั้งพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละกระบวนการย่อย ดังต่อไปนี้

2.3.1 การเตรียมอ้อย

อ้อยจะถูกขนส่งจากไร่อ้อยเข้าสู่พื้นที่โดยรถบรรทุก หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักวัดปริมาณอ้อย เพื่อให้ทราบถึงน้ำหนักอ้อยสุทธิก่อนเข้ากระบวนการผลิต จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการเตรียมชิ้นส่วนอ้อย โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้น คือ

ขั้นตอนที่ 1: ขั้นตอนนี้ทำหน้าที่ในการทอนอ้อยให้เป็นท่อนขนาดเล็กลง ด้วยการใช้มีดสับอ้อย (Revolving cane knives) ทำหน้าที่สับต้นอ้อยออกเป็นท่อนเล็ก ๆ โดยทั่วไปจะใช้มีด 2-4 ชุด ความเร็วรอบในการหมุนของใบมีด 450-600 รอบต่อนาที กำลังที่ใช้ในการทำงานของใบมีดแต่ละชุด ประมาณ 1-2 กำลังม้าต่อตันอ้อยต่อชั่วโมง ซึ่งประสิทธิภาพของการสกัดน้ำตาลจากอ้อยขึ้นอยู่กับความแข็งและคมของใบมีดหรือความสามารถในการสับตัดชิ้นอ้อยให้ขาดจากกันเป็นชิ้นเล็กก่อนที่จะนำเข้าเครื่องย่อยอ้อย (Shredder)

ขั้นตอนที่ 2: ขั้นตอนนี้เป็นการสับท่อนของอ้อยที่มีขนาดเล็กลงให้กลายเป็นชิ้นละเอียดผ่านเครื่องย่อยอ้อย (Shredders) โดยจะทำหน้าที่ตีฉีกชิ้นอ้อยออกเป็นฝอยเพื่อสะดวกในการสกัดน้ำอ้อย ซึ่งความเร็วรอบโดยทั่วไปของเครื่องย่อยอ้อยประมาณ 1000 รอบต่อนาที ใช้กำลังประมาณ 3.75 แรงม้าต่อตันอ้อยต่อชั่วโมง เครื่องฉีกอ้อยจะติดอยู่หลังจากผ่านมีดชุดสุดท้าย ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องย่อยอ้อยในระดับที่ดี ควรจะต้องตีอ้อยให้แตกออกได้ประมาณร้อยละ 80-90 จึงจะช่วยให้การสกัดน้ำอ้อยของชุดลูกหีบได้ผลดีที่สุด เมื่อผ่านเครื่องย่อยอ้อยแล้วจะมีลักษณะฟู มีปริมาณเพิ่มขึ้นอีกประมาณร้อยละ 40 ของปริมาณชิ้นอ้อย



รูปที่ 8 มีดสับอ้อย
ที่มา: สมบัติ ขอทวีวัฒนา และคณะ (ม.ป.ป)

รูปที่ 9 เครื่องย่อยอ้อย
ที่มา: บริษัท เอนเนอจี 789 จำกัด (ม.ป.ป.)

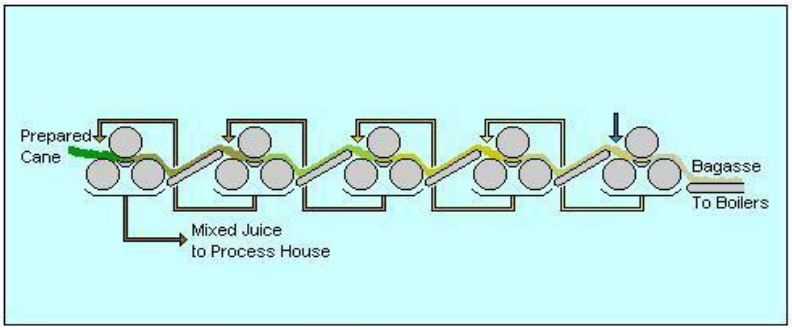
2.3.2 ลูกกลิ้งป้อนอ้อย (Pressure feeder)

เมื่อได้อ้อยที่ผ่านการสับจนเป็นอ้อยละเอียดแล้วจะเกิดการลำเลียงอ้อยเข้าสู่ชุดลูกหีบ (Mill tandem) ชุดที่ 1 และชุดที่ต่าง ๆ ตามลำดับการทำงานแบบอนุกรมทั้งหมด 4 ชุด ซึ่งโดย

ในระหว่างลูกหีบแต่ละชุดจะมีสายพานลำเลียงอ้อย ในลูกหีบแต่ละชุดจะประกอบด้วย ลูกกลิ้ง 5 ลูก โดยแบ่งเป็น “ลูกป้อนอ้อยลูกบน และลูกล่าง” รวม 2 ลูก และลูกหีบ 3 ลูก วางอยู่ในตำแหน่งรูปสามเหลี่ยม ลูกหน้าเรียก “ลูกกลิ้งป้อนอ้อย” ส่วนลูกหลังเรียก “ลูกกลิ้งคายอ้อย” ซึ่งทั่วไปแล้วลูกกลิ้งป้อนอ้อย มี 2 ชนิด คือ มีแรงกดที่ลูกกลิ้งบนและไม่มีแรงกดโดยใช้น้ำหนักของลูกกลิ้งขับเคลื่อนด้วยโซ่ลูกกลิ้งป้อนอ้อยประกอบด้วยลูกกลิ้งขนาดใหญ่ที่มีร่องบนลูกกลิ้ง 2 ลูกกลิ้งทำหน้าที่บีบอัดชิ้นอ้อย เพื่อเตรียมอ้อยให้เรียบสม่ำเสมอก่อนส่งไปยังชุดลูกหีบ ซึ่งลูกกลิ้งป้อนอ้อยนี้จะช่วยหีบน้ำอ้อยออกมาได้ประมาณร้อยละ 25-30 และทำหน้าที่บังคับการป้อนอ้อยเข้าสู่ลูกหีบได้สะดวก

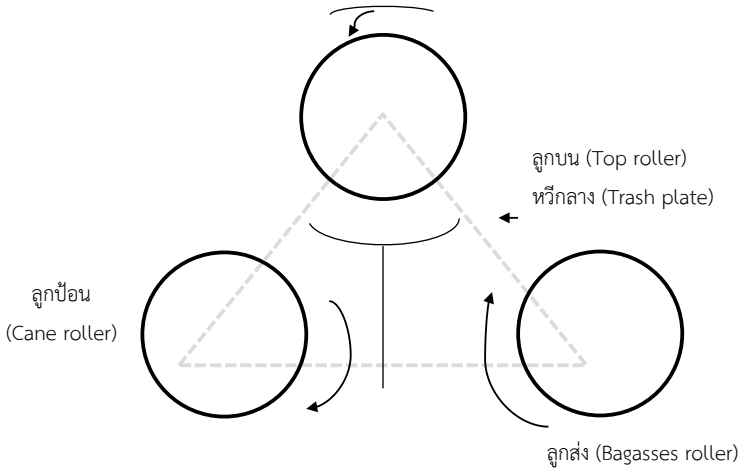
2.3.3 ชุดลูกหีบ (Milling)

เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้สกัดน้ำอ้อยโดยในแถวหนึ่งประกอบด้วยชุดลูกหีบ 4-6 ชุด ชุดหนึ่งประกอบด้วยลูกกลิ้งจำนวน 3 ลูกกลิ้งวางไว้ในตำแหน่งรูปสามเหลี่ยม มี 2 ลูกเรียงด้านฐานลูกหน้าเรียกลูกกลิ้งป้อนอ้อย ลูกหลังเรียกลูกกลิ้งคายกากอ้อย ส่วนลูกบนระหว่าง 2 ลูก เรียกลูกกลิ้งบน จะมีแรงกดลงบนลูกหีบถูกควบคุมให้ขึ้น - ลง โดยใช้ไฮดรอลิค เพื่อปรับช่องว่างระหว่างการหีบสกัดให้เหมาะสมกับปริมาณอ้อยที่ป้อนเข้าลูกหีบลูกกลิ้ง 2 ลูกล่างหมุนตัวไปในทิศทางเดียวกันตามทิศทางเคลื่อนตัวของอ้อยแต่อยู่ในระดับคงที่ ส่วนลูกกลิ้งลูกบนหมุนตัวสวนทางกับลูกกลิ้ง 2 ลูกล่าง และสามารถขยับตัวเปลี่ยนแนวระดับขึ้นลงได้ โดยทั่ว ๆ ไป ลูกกลิ้งแต่ละชุดจะถูกขับด้วยเทอร์ไบน์ ในการป้อนอ้อยเข้าลูกหีบต้องป้อนอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ โดยลักษณะของชุดลูกหีบแสดงดังรูปที่ 10 และทิศทางการทำงานของชุดลูกหีบแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ชุดลูกหีบ

ที่มา: ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร (2553)



รูปที่ 11 ตำแหน่งของชุดลูกหีบ

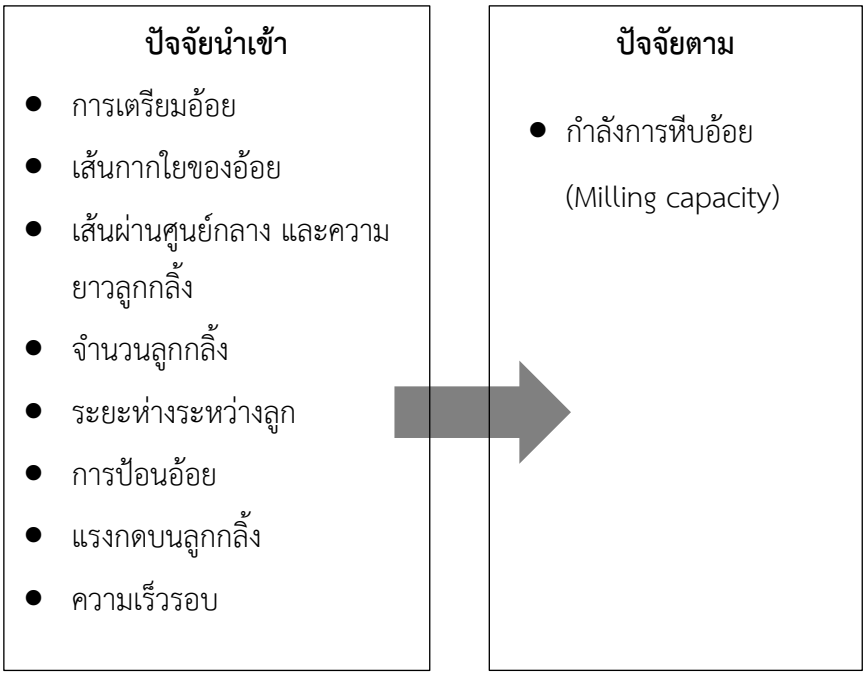
ที่มา: สมบัติ ขอทวีวัฒนา และคณะ (ม.ป.ป)

2.4 ประสิทธิภาพของการหีบสกัด (Efficiency of Milling)

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการหีบสกัดน้ำตาลจากอ้อยของโรงงานน้ำตาล สามารถทำได้ด้วยการแบ่งตามกำลังการหีบอ้อย กล่าวคือ โรงงานขนาดใหญ่ที่มีกำลังการหีบมากกว่า 20,000 ตันต่อวันขึ้นไปจะมีการกำหนดประสิทธิภาพการหีบสกัดน้ำอ้อยที่วัดในรูปของค่า POL EXTRACTION และการตั้งเป้าหมายค่า **POL EXTRACTION** ต้องมากกว่า 96% (ตฤษฐพร แก้วสุก, 2554) ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.4.1 กำลังการหีบอ้อย (Milling capacity)

วิธีการวางแผนกำลังหีบอ้อย (นาถวุฒิ และพัลทมาส, 2561) เป็นหน่วยที่ใช้คำนวณกำลังการผลิตอ้อย ซึ่งมีมาตรวัด 2 แบบ คือ หน่วยตันอ้อยต่อชั่วโมง (Ton Cane per Hour: TCH) และ การอ้อยต่อวัน (Ton Cane per Day: TCD) โดยกำลังผลิตแบบแรกจะเป็นการหีบจากปริมาณต้นอ้อยที่แท้จริง ส่วนการอ้อยต่อวันเป็นกำลังการหีบรวมซึ่งเวลาในกิจกรรมการหีบจะมีการรวมเวลาที่หยุดเดินเครื่องจักรไปด้วยการคิดคำนวณกำลังการหีบจะมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังการหีบอ้อยในกระบวนการผลิต

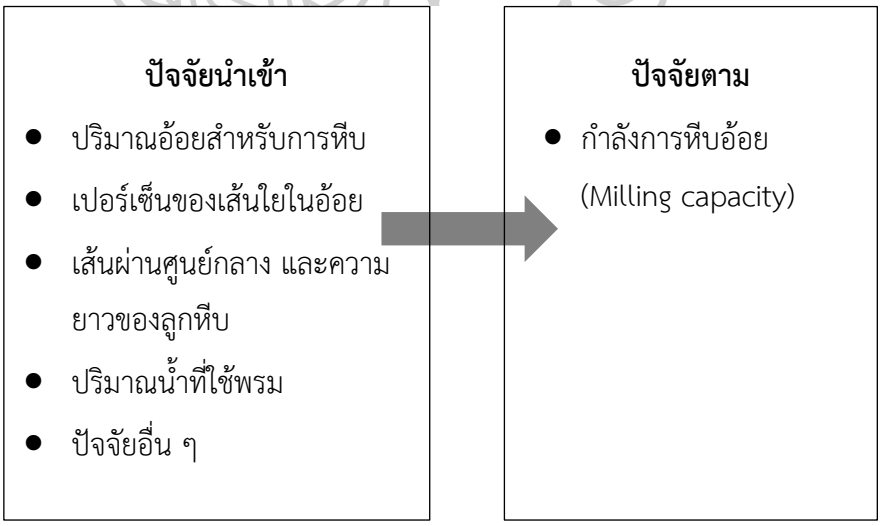
นอกจากนี้ยังมีปัจจัยด้านอื่นอีก 2 ปัจจัย (ประเทือง โชคประเสริฐ, 2542) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการหีบสกัดน้ำตาลจากอ้อยด้วยชุดลูกหีบของโรงงานน้ำตาล คือ คุณภาพอ้อยและการเตรียมชิ้นอ้อยก่อนเข้าหีบซึ่งรวมถึงการจัดการด้านปริมาณอ้อยเข้าหีบด้วย และประสิทธิภาพการทำงานของลูกหีบ

2.4.2 ประสิทธิภาพของลูกหีบ

ประสิทธิภาพการทำงานของลูกหีบขึ้นอยู่กับว่าชุดลูกหีบสามารถหีบสกัดน้ำตาลออกมาจากอ้อยให้เหลือน้ำตาลที่ติดไปกับกากอ้อยให้น้อยที่สุดได้เพียงใด โดยมีรายละเอียดดังนี้ (สมบัติ ขอทวีวัฒนา, 2546)

1) แรงกดบนลูกหีบ (Pressure on Rollers)

แรงกดเป็นลูกหีบสามารถที่จะปรับเปลี่ยนได้โดยไฮดรอลิค เพื่อปรับช่องว่างระหว่างการหีบสกัดให้เหมาะสมกับปริมาณอ้อยที่ป้อนเข้าลูกหีบ ปัจจุบันนี้หลายโรงงานได้ใช้มอเตอร์เกียร์ควบคุมระดับอ้อยที่เข้าลูกหีบเพื่อป้อนอ้อยให้สม่ำเสมอ ไม่มากหรือน้อยเกินไป ถ้ามีอ้อยน้อยก็จะถูกสะสมไว้รอให้ได้ปริมาณพอเหมาะกราบช่องว่างของลูกหีบที่ได้กำหนดไว้จึงค่อยป้อนเข้าลูกหีบ แต่ถ้ามีปริมาณอ้อยเข้ามามากเกินไปก็จะมีระบบเตือนเพื่อให้ชะลอการป้อนโดยอัตโนมัติ แรงกดที่ลูกหีบจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงกดลูกหีบในกระบวนการสกัดน้ำอ้อย

2) การตั้งลูกหีบและความเร็ว (Mill Settings and Speeds)

การตั้งช่องห่างระหว่างลูกหีบบนและลูกหีบล่างนั้นจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ สภาวะการทำงานของลูกหีบ คุณภาพของอ้อย อัตราการสับย่อยอ้อย การทำร่องฟันลูกหีบ แรงกดที่ลูกหีบ และความเร็วรอบของลูกหีบ หลักการพิจารณาง่าย ๆ ในการตั้งลูกหีบ คือ

- ลูกหีบอ้อยอ้อยนั้นควรจะตั้งให้มีระยะกว้างกว่าลูกหีบคายกากอ้อยประมาณมากกว่า 2 เท่าในชุดลูกหีบแรก
- ในลูกหีบชุดต่อ ๆ มาให้ตั้งระยะห่างน้อยลงกว่าชุดลูกหีบก่อน
- ระยะห่างของลูกกลิ้งป้อนอ้อยและลูกกลิ้งคายกากอ้อย ให้มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นมากกว่าลูกหีบชุดก่อน

ความเร็วรอบของลูกหีบอาจจะกำหนดโดยความเร็วของลูกกลิ้งเป็นระยะทางฟุตต่อนาที เช่น 50 ฟุตต่อนาที หรือประมาณ 5-7 รอบต่อนาที ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดความเร็วของลูกหีบคือ ความสัมพันธ์ของปริมาณกากอ้อยที่หีบ ซึ่งบางโรงงานอาจตั้งความเร็วของลูกหีบชุดแรกเร็วที่สุด และช้าลงในชุดสุดท้าย บางโรงงานอาจตั้งความเร็วของลูกหีบชุดแรกช้ากว่าชุดอื่น โดยให้ชุดถัดไปมีความเร็วเพิ่มขึ้นร้อยละ 10-15 หรือบางโรงงานอาจตั้งความเร็วของชุดลูกหีบเท่ากันตลอดทุกชุดก็ได้

3) สะพานลำเลียงกากอ้อย (Bagasse Carriers)

สายพานนี้จะทำหน้าที่ลำเลียงกากอ้อยที่ผ่านการหีบแล้วจากชุดลูกหีบก่อนหน้านี้เพื่อส่งไปยังชุดลูกหีบถัดไปให้สม่ำเสมอ สถานที่ดีควรโปร่ง ฉีดล้างทำความสะอาดง่าย ไม่มีซอกมุมเป็นที่หมักหมม ของกากอ้อยอันเป็นเหตุให้เกิดการความเสื่อมเสียจากเชื้อจุลินทรีย์

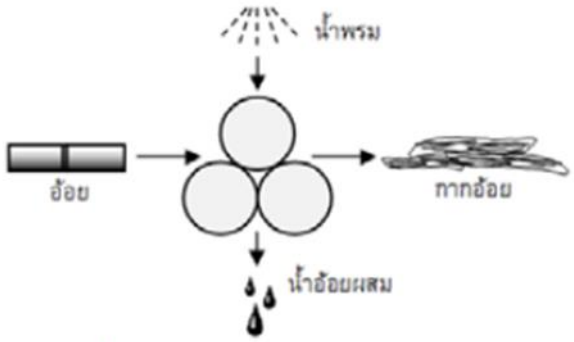
4) การหีบสกัด (Milling Process)

เป็นกระบวนการที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีกรรมวิธีการหีบสกัดจะใช้เครื่องมือต่าง ๆ เพิ่มเติมเช่นการพรมน้ำ (Imbibition Water) เพื่อที่จะดึงน้ำอ้อยออกจากอ้อยประมาณร้อยละ 70-80 ของน้ำหนักอ้อย โดยการผ่านลูกกลิ้งป้อนอ้อยและลูกหีบชุดต่าง ๆ ในระหว่างการฉีดสกัดอ้อยเพื่อให้การสกัดน้ำอ้อยออกมาได้มากที่สุด

5) การพรมน้ำ (Maceration หรือ Imbibition Water)

การพรมน้ำลงบนกากอ้อยจนน้ำท่วมอ้อยถูกใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดน้ำอ้อยโดยจะถูกผสมลงไปบนกากอ้อยเพื่อเพิ่มการสกัดน้ำอ้อยจากลูกหีบชุดต่อไป และเป็นการช่วยการสกัดให้ดีขึ้น โดยทั่วไปจะใช้น้ำพรมที่ร้อนพรมกากอ้อยที่หน้าลูกหีบชุดสุดท้าย และน้ำที่ได้จากลูกหีบชุดสุดท้ายจะนำไปพรมลงบนหน้าลูกหีบชุดถาดมา น้ำที่ได้จากลูกหีบชุดถัดมาก็จะนำไปพรมลงหน้าลูกหีบชุดถัดมา น้ำที่ได้จากลูกหีบชุดถัดมาก็จะนำมาปรุงลงที่หน้าลูกหีบชุดถัดมาอีก เป็นลำดับ

ยกเว้นที่หน้าลูกหีบชุดที่ 1 จะไม่มีการพรมน้ำ ทั้งนี้เป็นเพราะชุดที่มีการสกัดดีอยู่แล้ว และน้ำอ้อยที่สกัดจากลูกหีบชุดที่ 1 จะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าโพล และค่าบริกซ์ แล้วนำไปคำนวณหาค่า ซี.ซี.เอส.



รูปที่ 14 การพรมน้ำอ้อยและพรมน้ำร้อน
ที่มา: อัจฉริยา บัวทอง และคณะ (2557)

ซึ่งปริมาณน้ำที่ใช้ในการพรมแต่ละโรงงานจะแปรผันกับลักษณะของอ้อยที่เข้าสู่การหีบ หากปริมาณเส้นใยในอ้อย และความชื้น จะส่งผลต่อต้นทุนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการระเหยน้ำกับปริมาณน้ำตาลที่ผลิตได้ ซึ่งโดยทั่วไปโรงงานจะพรมน้ำประมาณร้อยละ 25-30 ของน้ำหนักอ้อย และมีอุณหภูมิของน้ำที่ใช้พรมมักจะใช้น้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดน้ำตาลและประสิทธิภาพของลูกหีบ สามารถสกัดน้ำอ้อยได้ดี จะทำให้ชิ้นอ้อยจะไม่ลื่นหรือเกิดการอุดตัน ถ้าน้ำพรมมีอุณหภูมิสูงเกินไปจะสกัดกัม (Gum) ไข (Wax) และสิ่งสกปรกในอ้อยละลายออกมามากจะทำให้ลูกหีบลื่นและการ ป้อนอ้อย เข้าลูกหีบไม่สะดวก โดยปริมาณน้ำพรมที่เหมาะสมคือ ปริมาณน้ำที่ให้ค่าบริกซ์ในน้ำอ้อยจากลูกหีบชุดสุดท้าย มีค่าเป็นร้อยละ 15 ของค่าบริกซ์ ในน้ำอ้อยจากลูกหีบชุดแรก เช่น น้ำอ้อยจากลูกหีบชุดแรกมีค่าบริกซ์เท่ากับ 20 ดังนั้น น้ำอ้อยจากลูกหีบชุดสุดท้ายควรมีค่าบริกซ์เท่ากับ 3

2.5 การประเมินประสิทธิภาพของการหีบสกัดน้ำอ้อย

การประเมินประสิทธิภาพของการหีบสกัดน้ำอ้อยจะถูกประเมินมาจากหลายปัจจัย เช่น ค่าบริกซ์ของน้ำอ้อยในหีบ ค่าเปอร์เซ็นโพลในกากอ้อย น้ำตาลที่สูญเสียระหว่างการสกัด ประสิทธิภาพลูกหีบชุดสุดท้าย ระยะลูกหีบชุดสุดท้าย เป็นต้น โดยรายละเอียดมีดังนี้

2.5.1 สารต่าง ๆ ในอ้อยที่ได้จากลูกหีบ

สารประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากลูกหีบแต่ละชุดจะมีส่วนประกอบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแรงกดที่ลูกหีบและการพรมน้ำหรือน้ำอ้อยที่ลูกหีบ โดยทั่วไปน้ำอ้อยที่หีบได้จากลูกหีบชุดแรกจะมีความบริสุทธิ์ (Purity) สูงที่สุดและความบริสุทธิ์จะต่ำลงในลูกหีบชุดถัดไป ดังแสดงในตารางที่ 4 (สมบัติ ขอทวีวัฒนา และคณะ, ม.ป.ป)

ตารางที่ 4 ค่าร้อยละของบริกซ์ โพล และความบริสุทธิ์ของน้ำอ้อยจากลูกหีบแต่ละชุด

ลูกหีบชุดที่	ค่าบริกซ์ (Brix)	ค่าโพล (Pol)	ความบริสุทธิ์ (Purity)
1	17.12	13.65	79.73
2	13.09	9.94	75.93
3	7.45	5.56	74.63
4	4.83	3.35	69.36
5	3.45	2.20	63.77
6	2.13	1.29	60.56

2.5.2 โครงสร้างของต้นอ้อยต่อการหีบสกัด

โครงสร้างของอ้อย เช่น กากใยต่าง ๆ จะมีอิทธิพลต่อการหีบสกัด โดยทั่วไปการหีบสกัดอ้อยที่ดีนั้นกากอ้อยสุดท้ายควรเป็นเส้นใยที่ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 45 และมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 52 หากกากใยสูงมากไปจะทำให้การหับสกัดน้ำอ้อยได้น้อยลง ซึ่งในอุตสาหกรรมสามารถคำนวณประสิทธิภาพของการหีบสกัดน้ำอ้อยได้จากจำนวนเส้นใยร้อยละของน้ำตาลซูโครสในอ้อยที่สามารถหีบสกัดออกมาเป็นน้ำอ้อยดังสมการที่ 2.1

$$Pol\ Extraction\ \% = \left(\frac{Pol\ in\ mixed\ juice\%\ cane}{Pol\ in\ cane}\ x\ 100\right) \qquad (2.1)$$

ในด้านการวัดประสิทธิภาพการหีบสกัดเบื้องต้นสามารถทำได้จากการมวลการคำนวณโดยอาศัยสมดุลของมวล (Mass Balance) ดังสมการที่ 2.2

$$Cane + Imbibition\ Water = Molasses + Fiber \quad (2.2)$$

นอกจากนี้ผังควบคุมประสิทธิภาพการหีบสกัดอย่างง่าย อาจดูจากค่าบริกซ์น้ำอ้อยจากลูกหีบชุดสุดท้าย หรือค่าโพลกากอ้อยจากลูกหีบชุดสุดท้าย ก็พอจะบอกถึงประสิทธิภาพการหีบสกัดเบื้องต้นได้ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผังควบคุมประสิทธิภาพการหีบสกัดอ้อย

บริกซ์น้ำอ้อยลูกหีบชุดสุดท้าย (Last juice brix) (ร้อยละ)	โพลกากอ้อยลูกหีบชุดสุดท้าย (Bagasses pol) (ร้อยละ)	น้ำตาลที่สูญเสียในกากอ้อย (Bagasses loss) (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อย (Pol extraction) (ร้อยละ)
1.0	0.50	1.22	98.8
1.5	0.75	1.83	98.2
2.0	1.00	2.44	97.6
2.5	1.25	3.05	97.0
3.0	1.50	3.66	96.3
3.5	1.65	4.24	95.7
4.0	2.00	4.88	95.1
4.5	2.25	5.49	94.5
5.0	2.50	6.10	93.9
5.5	2.70	6.71	93.3
6.0	3.00	7.31	92.7
6.5	3.25	7.93	92.1
7.0	3.50	8.54	91.5
7.5	3.75	9.15	90.9
8.0	4.00	9.75	90.2

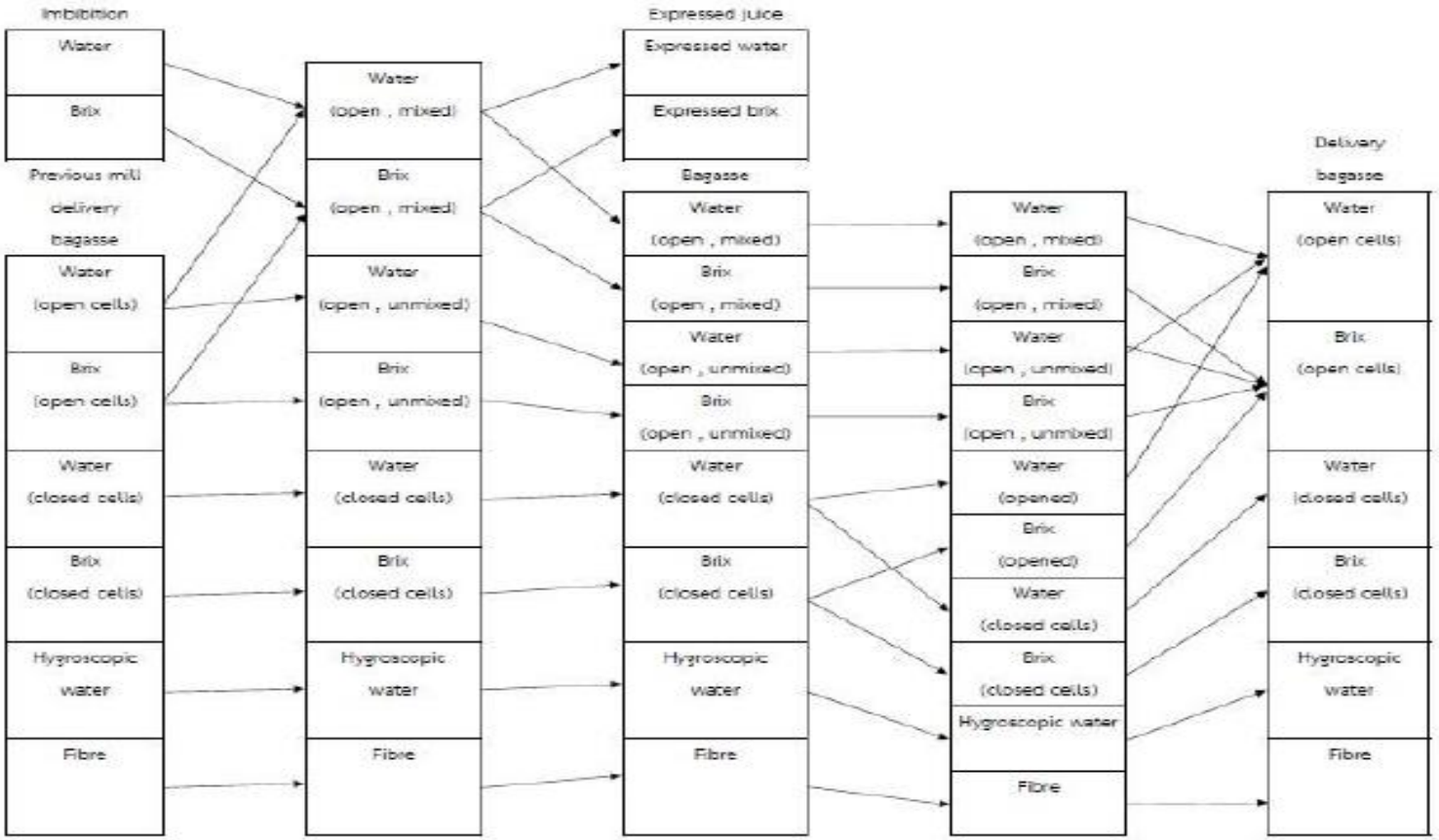
การที่อ้อยมีเส้นใย (Fiber) สูง จะมีผลกระทบต่อการหีบสกัด (Pol extraction) ดังที่กล่าวมาแล้ว จึงได้มีการใช้ค่าของเส้นใยที่ร้อยละ 12.5 (ค่ามาตรฐานของออสเตรเลีย) ในการคำนวณเปรียบเทียบ ซึ่งเรียกว่า (Reduced extraction) เพื่อขจัดอิทธิพลของการแปรปรวนของเส้นใยในกากอ้อย

บางโรงงานอาจมีการเก็บตัวอย่างกากอ้อยเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความชื้นของอ้อย, เปอร์เซ็นโพล และเปอร์เซ็นต์เส้นใยในอ้อยด้วย ซึ่งสามารถนำค่าดังกล่าวมาคำนวณประสิทธิภาพในการหีบสกัดน้ำอ้อย (Extraction) ได้ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์น้ำอ้อยและกากอ้อยจากลูกหีบแต่ละชุด

ลูกหีบชุดที่	ความบริสุทธิ์ของน้ำอ้อย (ร้อยละ)	กากอ้อย (Bagasse) (ร้อยละ)			ประสิทธิภาพการหีบสกัดน้ำอ้อย (Extraction) (ร้อยละ)	
		ความชื้น	โพล	เส้นใย	แต่ละชุด	รวม
1	79.85	59.67	7.93	30.40	71.63	71.63
2	78.32	54.26	6.21	37.81	36.95	82.11
3	76.23	53.16	4.96	40.33	25.19	86.62
4	75.38	52.70	3.30	42.93	37.51	91.64
5	72.64	52.49	2.20	44.49	35.77	94.63
6	69.52	52.18	1.65	45.45	26.66	96.06
CANE	****	72.47	11.59	12.61	****	****
Mixed Juice	80.47	****	11.51	****	****	****

ที่มา: กลุ่มโรงงานน้ำตาลในเครือของโรงงานตัวอย่าง



รูปที่ 15 รูปแบบของกระบวนการหีบสกัด

ที่มา: สมบัติ ขอทวีวัฒนา และคณะ (ม.ป.ป).

2.5.3 การทำความสะอาดลูกหีบและการสูญเสียน้ำตาลในบริเวณโรงหีบ (Mill Sanitation and Sugar Losses Around Mills)

การสูญเสียน้ำตาลนอกจากกระบวนการหีบสกัดแล้ว ยังสามารถเกิดได้บริเวณรอบนอกโรงหีบ เนื่องมาจากการออกแบบเครื่องจักรที่ไม่เหมาะสม เกิดมุมอับที่มีน้ำอ้อย เศษอ้อย ไหลผ่านแต่ทำความสะอาดไม่ถูกต้อง และการดูแลบำรุงรักษาที่ไม่เหมาะสมจะเกิดการสูญเสียที่ไม่ทราบสาเหตุ ดังนั้นควรมีการใช้น้ำร้อนแรงดันสูง (High-pressure hot-water) เพื่อทำความสะอาดคราบที่เกาะติดตามซอกมุมของลูกหีบ เครื่องกรอง สะพานกากอ้อย หรือจุดอื่น ๆ ที่มีปัญหาเกิดจากการสะสมของสิ่งสกปรกและจุลินทรีย์ ก็สามารถกำจัดปัญหาของจุลินทรีย์ไปได้ส่วนหนึ่ง

2.6 สถิติวิศวกรรม

ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกสถิติที่สอดคล้องกับปัญหาที่พบในการงานวิจัย โดยเริ่มจากสถิติเชิงพรรณนาเพื่อให้ทราบลักษณะของข้อมูล จากนั้นจะมีการทดสอบการกระจายของข้อมูลว่าเป็นการกระจายแบบปกติหรือไม่ จากนั้นจะเลือกสถิติแบบไม่ใช้พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบความสามารถในการดำเนินการผลิตของแต่ละโรงงานในกลุ่ม เพื่อหาโรงงานที่มีประสิทธิภาพในการดำเนินงานมากที่สุดในกลุ่มในแง่ประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อย จากนั้นจะใช้การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยที่ดีที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในหัวข้อนี้จะทบทวนเฉพาะทฤษฎีทางสถิติที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

2.6.1 การทดสอบแบบ Kolmogorov-Smirnov

ในการทดสอบการกระจายว่าเป็นการกระจายแบบปกติหรือไม่ มีวิธีการได้หลากหลายขึ้นอยู่กับทฤษฎีพื้นฐานที่เลือกใช้ ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกทฤษฎีการทดสอบแบบ Kolmogrove-Smirn ove ที่มีตารางการกระจาย Kolmogorove Distribution ในการหาค่าวิกฤต อย่างไรก็ตามเนื่องจากฟังก์ชั่นการทดสอบแบบ Kolmogorove-Smirnove ได้ถูกบรรจุอยู่ในโปรแกรมสำเร็จรูปแล้ว ผู้วิจัยจึงขอกล่าวทฤษฎีพื้นฐานไว้คร่าว ๆ ดังนี้ (สายชล สินสมบูรณ์ทอง, 2547)

H_0: ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

H_1: ข้อมูลไม่ได้มีการกระจายแบบปกติ

นิยาม 1: กำหนดให้ $x_1, \dots, x_n$ เป็นข้อมูลที่มีการเรียงลำดับตามเงื่อนไข $x_1 \leq \cdots \leq x_n$ และกำหนดให้ $S_n(x)$ มีนิยามดังนี้

$$S_n(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1 \\ k/n, & x_k \leq x < x_{k+1} \\ 1, & x \geq x_n \end{cases}$$

ซึ่งสมมติว่าข้อมูลตัวอย่างมาจะประชากรที่มีฟังก์ชั่นการกระจายสะสม $F(x)$ และกำหนดให้ D_n คำนวณได้จาก

$$D_n = \max_x |F(x) - S_n(x)|$$

จากข้อมูลตัวอย่างสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า D_n ไม่ขึ้นอยู่กับ F เมื่อ $S_n(x)$ ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่เลือกมา D_n เป็นตัวแปรสุ่ม วัตถุประสงค์ของเราคือใช้ D_n ในการประมาณค่า $F(x)$

การกระจายของ D_n สามารถคำนวณได้ (จากตาราง Kolmogorov distribution) แต่ในการวิเคราะห์ครั้งนี้เรามุ่งสนใจไปที่การคำนวณหาค่าวิกฤต ซึ่งสามารถดูได้จากตาราง Komogorov table ซึ่งการติดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลักยังคงใช้ค่านัยสำคัญ α เช่นเดียวกันกับการทดสอบสมมติฐานทั่วไป นั่นคือถ้า $D_{n,a}$ มีค่าวิกฤตที่ได้จากตาราง $P(D_n \leq D_{n,a}) = 1 - \alpha$ ค่า D_n สามารถใช้ทดสอบสมมติฐานว่าตัวแปรสุ่มที่ได้มาเป็นข้อมูลที่มาจาก $F(x)$ ถ้า

$$\max_x |F(x) - S_n(x)| \leq D_{n,a}$$

ดังนั้นข้อมูลมีสภาวะสารูปสนิทดีกับ $F(x)$

เช่นเดียวกันกับนิยามของ D_n ที่ได้ให้ไว้ ทำให้เกิด

$$1 - \alpha = P(D_n \leq D_{n,a}) = P\left(\max_x |F(x) - S_n(x)| \leq D_{n,a}\right)$$

$$= P(S_n(x) - D_{n,a} \leq F(x) \leq S_n(x) + D_{n,a}\ \forall x)$$

$$= P(|F(x) - S_n(x)| \leq D_{n,a}\ \forall x)$$

ดังนั้น $S_n(x) \pm D_{n,a}$ ให้ค่าช่วงความเชื่อมั่นของ $F(x)$

2.6.2 การทดสอบ Kruskal-Wallis

เมื่อข้อมูลที่ได้มิได้มีการแจกแจงแบบปกติ จึงจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์แบบไม่ใช้พารามิเตอร์ ขั้นแรกจะนำเสนอการทดสอบ Kruskal-Wallis ที่ใช้สำหรับการทดสอบความแตกต่างของกลุ่มข้อมูลที่มากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งข้อมูลตัวแทนของกลุ่มที่นิยมใช้ในการทดสอบ คือ ค่ามัธยฐานนั่นเอง สำหรับค่ามัธยฐานนั้นเป็นตัวสถิติสำหรับวัดค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลาง โดยการพิจารณาจากค่าควอไทล์ที่ 2 ซึ่งแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน เท่า ๆ กัน หรือการพิจารณาค่าที่มีตำแหน่งอยู่กึ่งกลางของข้อมูลทั้งหมดเมื่อเรียงลำกับข้อมูลจากน้อยไปหามากหรือจากมากไปหาน้อย (ศุภชัย นาทะพันธ์, 2547)

นิยาม 2: ค่ามัธยฐานสำหรับข้อมูลแบบไม่แจกแจงความถี่สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta = \begin{cases} x_{[(n+1)/2]}, & n \text{ เป็นจำนวนคี่} \\ \dfrac{x_{n/2} + x_{[(n/2)+1]}}{2}, & n \text{ เป็นจำนวนคู่} \end{cases}$$

เมื่อ n คือจำนวนของข้อมูล

การทดสอบ Kruskal-Wallis เปรียบได้กับ Completely random design ของการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยให้ n_i แทนจำนวนของข้อมูลในตัวอย่างกลุ่มที่ i โดยที่ $i = 1,2,..,k$ ขั้นแรกทำการรวมตัวอย่างทั้งหมด k กลุ่ม เข้าด้วยกันโดยถือว่าเป็นกลุ่มเดียวกัน แล้วจัดค่าข้อมูล $n = n_1 + n_2 + .. + n_k$ ค่า โดยเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก แทนลำดับที่จาก 1, 2, ..., n สำหรับข้อมูลแต่ละค่า

จากนั้นหาผลรวมของลำดับที่ที่สอดคล้องกับค่าสังเกต n_i ในตัวอย่างที่ i เขียนแทนด้วย R_i ถ้าแต่ละตัวอย่างประกอบด้วยค่าข้อมูลอย่างน้อย 5 ค่า ตัวสถิติ

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^{k} \frac{R_i^2}{n_i} - 3(n+1)$$

ถ้า H_0 เป็นจริง H จะประมาณค่าได้ด้วยการแจกแจงแบบไคสแควร์ ด้วยองศาความเป็นอิสระ $k-1$ หรือ $H \sim \chi^2_{\alpha;k-1}$

ดังนั้นในการทดสอบสมมติฐานหลัก H_0 ที่ว่าตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน k กลุ่ม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ คำนวณได้โดย

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^{k} \frac{R_i^2}{n_i} - 3(n+1)$$

ถ้า H ตกอยู่ในขอบเขตวิกฤต กล่าวคือ $H > \chi^2_{\alpha;k-1}$ จะปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ระดับนัยสำคัญ α ทั้งนี้การทดสอบ Kolmogorov-Smirnov ได้ถูกบรรจุอยู่ในโปรแกรม Minitab แล้ว

2.6.3 การทดสอบ Mann-Whitney

ในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประชากรสองกลุ่มที่อยู่ภายใต้การทดสอบข้อมูลอิสระ ได้มีผู้คิดค้นวิธีการคือ Frank Wilcoxon ที่อาศัยผลรวมของอันดับจอง Wilcoxon Rank-sum test ต่อมา H. B. Mann และ D. R. Whitney ได้ทำการพัฒนาต่อให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยใช้ตัวสถิติทดสอบ U และเรียกการทดสอบแบบนี้ว่า Mann-Whitney U Test (กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2542)

ทั้งนี้ Frank มีวิธีการทดสอบโดยจะนำข้อมูลจากทั้งสองแหล่งประชากรมาจัดเรียงกันตามค่าของข้อมูลจากน้อยไปหามากโดยไม่ได้แบ่งแยกว่าจะเป็ยข้อมูลมาจากแหล่งใด ในกรณีที่มีข้อมูลที่มีค่าเท่ากันจะกำหนดให้ข้อมูลดังกล่าวมีอันดับเดียวกันด้วยการใช้อันดับโดยเฉลี่ยจากอันดับที่ควรจะเป็นของข้อมูล กำหนดให้

R_1 = ผลรวมของอันดับของข้อมูลชุดที่มีจำนวนน้อยกว่า

R_2 = ผลรวมของอันดับของข้อมูลชุดที่มีจำนวนมากกว่า

ในกรณีประชากรทั้ง 2 ชุดมีจำนวนของสิ่งตัวอย่างเท่ากันแล้ว จะให้ชุดใดเป็น 1 หรือ 2 ก็ได้ แต่ถ้าจำนวนข้อมูลไม่เท่ากันจะต้องกำหนดให้ $n_1 \leq n_2$ เสมอ ดังนี้นค่าของ R_1 และ R_2 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_1 + R_2 = \frac{(n_1 + n_2)(n_1 + n_2 + 1)}{2}$$

$$R_2 = n_1(n_1 + n_2 + 1) - R_1$$

ค่า R จะหาได้จากตารางค่าวิกฤตของผลรวมของอันดับ (ในตำราทางสถิติ) โดยจะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ($H_0: \mu_1 = \mu_2$) เมื่อทั้งค่า R_1 และ R_2 มีค่าไม่เกินค่าวิกฤตของ R และสำหรับกรณีที่มีการทดสอบสมมติฐานแบบด้านเดียว จะมีการปฏิเสธสมมติฐาน $H_1: \mu_1 < \mu_2$ เมื่อ R_1 มีค่าไม่เกินค่าวิกฤตของ R และจะปฏิเสธสมมติฐาน $H_1: \mu_1 > \mu_2$ เมื่อ R_2 มีค่าไม่เกินวิกฤตของ R

Mann และ Whitney ได้ปรับปรุงโดยใช้ค่า U โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$U_1 = R_1 - \frac{n_1(n_1 + 1)}{2}$$

$$U_2 = R_2 - \frac{n_2(n_2 + 1)}{2}$$

เกณฑ์การตัดสินใจสำหรับตัวสถิติที่นำเสนอนี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขนาดของข้อมูลในกลุ่มที่ 2 ที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยแบ่งเกณฑ์การพิจารณาออกเป็น 3 เกณฑ์ดังนี้

กรณี $n_2 \leq 8$ จะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลักเมื่อทดสอบแบบสองด้าน เมื่อ

$$2P(U \leq u|H_0 \text{ is true}) \leq \alpha$$

และจะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลักเมื่อทดสอบบแบบด้านเดียว เมื่อ

$$P(U \leq u|H_0 \text{ is true}) \leq \alpha$$

โดยค่า $P(U \leq u|H_0 \text{ is true})$ สามารถดูได้จากตารางสำหรับการทดสอบ Mann-Whitney U test ในตำราสถิติทั่วไป

1) กรณี $9 \leq n_2 \leq 20$ จะทำการปฏิเสธสมมติฐาน เมื่อ

$$U \leq U_0$$

เมื่อ U_0 คือค่าวิกฤตของ U ในตารางค่าวิกฤติสำหรับการทดสอล Mann-Whitney U test ในตำราสถิติ

2) กรณี $n_2 > 20$ จะทำการประมาณการแจกแจงของ U ด้วยการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนเท่ากับ

$$E(U) = \frac{n_1 n_2}{2}$$

$$Var(U) = \frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}$$

จากนั้นจะสามารถทำการทดสอบโดยอาศัยวิธีการ t-test แทนได้

อย่างไรก็ตามดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในการทดสอบทางสถิติก่อนหน้า การทดสอบ Mann-Whitney ก็ได้ถูกบรรจุอยู่ในโปรแกรม Minitab แล้วเช่นเดียวกัน

2.6.4 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรง

ในศาสตร์ของการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) นั้นแบ่งออกไปได้หลากหลายตามลักษณะของข้อมูล การกระจายของข้อมูล และสมมติฐานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ในการศึกษาครั้งนี้จะเลือกการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear Regression Analysis) ซึ่งสามารถกล่าวโดยสรุปในทฤษฎีการถดถอยเชิงเส้นตรงได้ดังนี้

กำหนดให้สมการเชิงเส้นตรงแสดงได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

เมื่อ β_0 คือจุดตัดแกนศูนย์ของเส้นตรงถดถอย β_1 คือความชันของเส้นตรงถดถอย x คือปัจจัยตั้งต้น ε คือค่าความผิดพลาดอย่างสุ่ม และ y คือตัวแปรตามที่เป็นตัวแปรเชิงสุ่ม (Montgomery et al., 2006)

ซึ่งข้อมูลที่นำมาสร้างเส้นถดถอยจะเป็นข้อมูลเชิงการทดลอง (Experimental Data) ที่ได้จากการปรับค่าปัจจัยตั้งต้นที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้ค่าคาดหมายและค่าความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มซึ่งเป็นผลมาจากค่าความผิดพลาดอย่างสุ่มสามารถหาได้จาก

$$E(y|x) = \beta_0 + \beta_1 x$$
$$\mathrm{Var}(y|x) = \mathrm{Var}(\beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon) = \sigma^2$$

ในทางทฤษฎีแล้ว β_0 และ β_1 เป็นพารามิเตอร์ของการวิเคราะห์การถดถอยโดยมีชื่อว่า สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficients) ที่ต้องมีหลักทางสถิติในการประมาณค่าที่ดีที่สุด ซึ่งหลักการที่เป็นที่ยอมรับกันคือ การประมาณกำลังสองสมบูรณ์ (Least-squares Estimation Method) ทั้งนี้ผู้วิจัยไม่ขอกล่าวในรายละเอียด ผู้สนใจสามารถศึกษาได้จากตำราทางสถิติเชิงอนุมานทั่วไป แต่จะขอกล่าวถึงสมมติฐานหลักของข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรง ซึ่งประกอบไปด้วย 4 สมมติฐานหลักดังนี้

1) Linearity คือ ตัวแปรต้นและตัวแปรตามต้องอธิบายความสัมพันธ์กันได้ด้วยสมการเชิงเส้นตรง

2) Homoscedasticity คือ ความแปรปรวนของค่าผิดพลาด (Error) ซึ่งแสดงด้วยค่า ε ต้องคงที่เสมอแม้ค่าของตัวแปรต้น x จะเปลี่ยนแปลงไป

3) Independence คือ ข้อมูลที่ได้จากค่าสักเกตต้องเป็นไปอย่างสุ่มและเป็นอิสระต่อกัน

4) Normality คือ เมื่อกำหนดตัวแปรต้น x แล้วตัวแปรตาม y ต้องเป็นไปอย่างสุ่มและสามารถอธิบายได้ด้วยการกระจายแบบปกติ

ทั้งนี้งานวิจัยนี้สนใจประเด็นสมมติฐานข้อที่ 4) ซึ่งมาสาเหตุได้มากมายที่อาจทำให้ข้อมูลตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยการกระจายแบบปกติ เช่น ข้อมูลมีจำนวนน้อยเกินไป การกระจากของข้อมูลมีความเบ้มากเกินไปซึ่งเป็นไปได้ทั้งเบ้ซ้ายและเบ้ขวา หรือเกิดข้อมูลนอกขอบเขต (Outlier) ที่ทำให้กลุ่มข้อมูลห่างออกจากการกระจายแบบปกติ ซึ่งการทดสอบการกระจายแบบปกติได้อธิบายไปในหัวข้อที่ผ่านมา

ผู้วิจัยสนใจว่าหากตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยการกระจายแบบปกติแล้วจะมีทฤษฎีที่มารองรับกับปัญหานี้หรือไม่ จากการทำการศึกษาทฤษฎีแล้วพบว่าสามารถทำการแปลงข้อมูล (Data Transformation) ทั้งนี้หากทดสอบแล้วพบว่าตัวแปรตาม y ไม่สามารถกระจายได้ด้วยการแจกแจงแบบปกติ วิธีการแปลงข้อมูลที่เป็นที่นิยมคือ การแปลงแบบยกกำลัง $y^{(\lambda)}$ (Power Transformation) โดยที่ λ คือ พารามิเตอร์ที่ต้องมีการวิเคราะห์ว่าเท่าใดจึงจะเหมาะสม ซึ่งสมการของการแปลงแสดงดังสมการด้านล่างนี้

$$y^{(\lambda)} = \begin{cases} \dfrac{y^{\lambda} - 1}{\lambda \dot{y}^{\lambda-1}}, & \lambda \neq 0 \\ \dot{y} \ln y, & \lambda = 0 \end{cases}$$

เมื่อ $\dot{y} = \ln^{-1}[1/n \sum_{i=1}^{n} \ln y_i]$ คือ ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของข้อมูล และการแปลงข้อมูลนี้จะเข้ากับตัวแบบถดถอยเชิงเส้นตรงได้ดังนี้

$$y^{(\lambda)} = \times\beta + \varepsilon$$

ทั้งนี้ในการศึกษาครั้งนี้สามารถใช้ฟังก์ชั่นใน Box-Cox Transformation ใน Minitab ได้ และหากเป็น Minitab 16 จะใช้คำสั่ง Stat > Control Charts > Box-Cox Transformation ได้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตฤษฐพร แก้วสุก (2554) ได้ศึกษากรรมวิธีการเพื่อการสกัดหีบอ้อยด้วยการควบคุมประสิทธิภาพการหีบอ้อย จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดน้ำอ้อยที่สำคัญ คือ การทำงานของชุดลูกหีบ, เส้นใยในอ้อย, ปริมาณกากอ้อย, ปริมาณน้ำที่ใช้พรม และประสิทธิภาพของเครื่องจักรต่าง ๆ ซึ่งประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลจากอ้อยนั้นจะต้องคำนึงถึงสัดส่วนระหว่างปริมาณน้ำที่ใช้พรมและปริมาณเส้นใยในอ้อย โดยจะต้องควบคุมให้สัมพันธ์กับความหวานในอ้อยที่เข้าหีบและมีการควบคุมการสูญเสียน้ำตาลซูโครสระหว่างการหีบสกัด ผลจากการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่ใช้พรมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดน้ำตาล และประสิทธิภาพของลูกหีบสามารถสกัดน้ำอ้อยได้ดีจริง โดยปริมาณน้ำพรมที่ทำให้ประสิทธิภาพของการหีบสกัดดี กล่าวคือ % Extraction สูงกว่า 96% อยู่ในระดับ 26% ขึ้นไป

ดำรง อินทรเสนา และ ศุภชัย ปทุมนากุล (2554) ได้ทำการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตน้ำตาล เนื่องมาจากผลผลิตลดลง และส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น โดยเริ่มจากการคัดเลือกปัญหาโดยนำเครื่องมือพื้นฐานทางสถิติมาวิเคราะห์ปัญหา ได้แก่ แผนภูมิพาเรโต แผนภาพต้นไม้ และเมตริกซ์ความสัมพันธ์ พบว่าปัญหาที่สร้างความสูญเสียที่สุดคือ การสูญเสียปริมาณน้ำตาลในขั้นตอนสุดท้าย จากนั้นได้ดำเนินการปรับปรุงแก้ไขและสร้างมาตรฐานการปฏิบัติงานโดยใช้วงจรคุณภาพ (PDCA) ผลลัพธ์จากดำเนินงานวิจัยพบว่าการสูญเสียน้ำตาลในกากน้ำตาลสุดท้ายลดต่ำลง

โดยค่าประสิทธิภาพการเคี่ยวและการปั่นเท่ากับ 81.87 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพิ่มขึ้น 0.43 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลผลิตน้ำตาลเพิ่มขึ้นเท่ากับ 110.6 กิโลกรัมต่อตันอ้อย เพิ่มขึ้นจากเดิม 3.01 กิโลกรัมต่อตันอ้อย คิดเป็นปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นทั้งปีประมาณ 9,925.61 ตัน เมื่อเปรียบเทียบกับปีการผลิต 2552/2553 ส่งผลให้ บริษัทสามารถลดต้นทุนการผลิตน้ำตาลได้ 1,616.86 บาทต่อตัน

สุทิน พลบูรณ์ และคณะ (2560) ได้ศึกษาปัจจัยความเร็วรอบของชุดหีบอ้อยที่มีต่อปริมาณน้ำอ้อยที่ได้จากเครื่องหีบอ้อย โดยเครื่องหีบอ้อยประกอบด้วยมอเตอร์ขนาด 373 วัตต์ ความเร็วรอบ 1450 pm ความเร็วรอบของเพลาชุดหีบอ้อยที่ใช้ในการทดลองมี 3 ค่า ประกอบด้วย 35.96, 43.12 และ 57.54 rpm เพื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำอ้อยที่ได้ จากการทดลองพบว่า ความเร็วรอบของชุดหีบอ้อย 43.12, 35.96 และ 57.54 rpm ได้ปริมาณน้ำอ้อยเท่ากับ 305.00, 304.33 และ 297.67 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วรอบชุดหีบอ้อย 57.54 และ35.96 rpm ใช้เวลาในการหีบอ้อยน้อยที่สุดและมากที่สุด

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

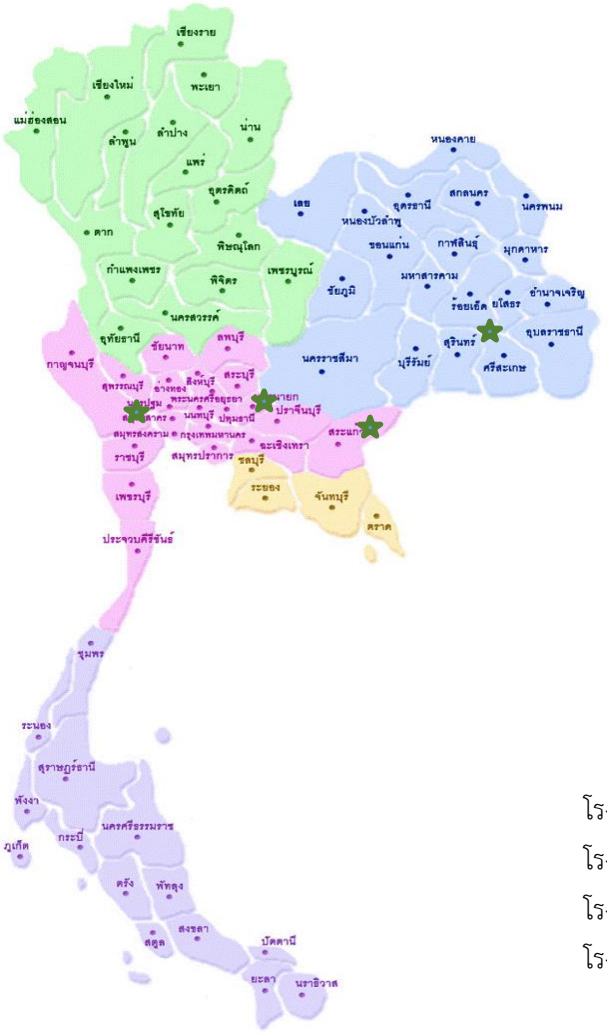
การศึกษาการปรับปรุงกระบวนการสกัดน้ำอ้อยของชุดลูกหีบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลของโรงงานผลิตน้ำตาลครั้งนี้ใช้การเก็บข้อมูลลักษณะของกระบวนการสกัดน้ำอ้อย ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการสำคัญที่ใช้ในการผลิตน้ำตาลทราย หากกระบวนการสกัดน้ำอ้อยเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพแล้วจะส่งผลถึงปริมาณและคุณภาพของน้ำตาลทรายที่ผลิตได้ โรงงานน้ำตาลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีที่ตั้งอยู่ที่จังหวัดสุพรรณบุรีที่ประสบปัญหาประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยที่เรียกว่า % Pol Extraction ต่ำกว่า 95% ซึ่งเป็นเป้าหมายของโรงงานที่ได้ตั้งไว้ ทั้งนี้มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมายทั้งที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ การวิจัยครั้งนี้จึงต้องการวิเคราะห์ทีละปัจจัยอย่างละเอียดด้วยเครื่องทางสถิติวิศวกรรม และบ่งชี้ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อย จากนั้นจึงนำค่าหรือลักษณะปัจจัยดังกล่าวไปปรับปรุงใช้กับโรงงานตัวอย่าง

3.1 ประชากรที่ใช้ในการวิจัย

โรงงานตัวอย่างตั้งอยู่ในจังหวัดสุพรรณบุรี (จากนี้จะเรียกว่า โรงงาน ก) โดยมีโรงงานในกลุ่มที่กระจายตามจังหวัดต่าง ๆ ซึ่งจะเรียกว่า โรงงาน ข โรงงาน ค และ โรงงาน ง ดังแสดงในรูปที่ 16 ทั้งนี้ข้อมูลสภาพทั่วไปทางด้านเทคนิคของโรงงานทั้งสี่ ของฤดูกาลผลิต 2 ฤดูกาลก่อนการดำเนินการวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 กำลังการผลิตและข้อมูลทางเทคนิคของโรงงานในฤดูกาลที่ 1

ชื่อโรงงาน	กำลังการหีบ ตันอ้อย/วัน			ขนาดลูกหีบ Pressure Feeder (P.F.) Line Feeder (L.F.)	จำนวน (ชุด)	จำนวน ลูกกลิ้ง
	ปกติ	เฉลี่ย	สูงสุด			
โรงงาน ก	17,731	8,896.98	16,350	Ø 50”x 100”	6	18
โรงงาน ข	18,000	9,960.60	17,734	Ø 45”x 90”	5	15
โรงงาน ค	36,000	20,044.89	31,973	Ø 51-3/6”x 100-3/8”	4	12
โรงงาน ง	15,453	7,894.77	13,215	Ø 50”x 100”	5	15



รูปที่ 16 ตำแหน่งที่ตั้งของกลุ่มโรงงาน

ตารางที่ 8 กำลังการผลิตและข้อมูลทางเทคนิคของโรงงานในฤดูกาลที่ 2

ชื่อโรงงาน	กำลังการหีบ ตันอ้อย/วัน			ขนาดลูกหีบ Pressure Feeder (P.F.) Line Feeder (L.F.)	จำนวน (ชุด)	จำนวน ลูกกลิ้ง
	ปกติ	เฉลี่ย	สูงสุด			
โรงงาน ก	17,731	7,348.40	18,211	Ø 50”x 100”	6	18
โรงงาน ข	18,000	11,030.11	17,234	Ø 45”x 90”	5	15
โรงงาน ค	36,000	20,868.38	34,583	Ø 51-3/6”x 100-3/8”	4	12
โรงงาน ง	15,453	7,198.61	12,964	Ø 50”x 100”	5	15

จากตารางที่ 7 โรงงานตัวอย่าง ซึ่งเป็นโรงงาน ก มีกำลังการผลิตอยู่ประมาณ 17,000 ตันอ้อย/วัน ซึ่งมีกำลังการผลิตน้อยสุดเป็นอันดับสอง (มากกว่าโรงงาน ง ซึ่งมีกำลังการผลิตประมาณ 15,000 ตันอ้อย/วัน) ในขณะที่โรงงาน ค มีกำลังการผลิตสูงสุด อยู่ที่ 36,000 ตันอ้อย/วัน อย่างไรก็ตาม ในการดำเนินการซึ่งมีปัจจัยเรื่องวัตถุดิบที่นำส่งโรงงานที่จำกัด ทำให้โรงงาน ก มีกำลังผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 8,896.98 ตันอ้อย/วัน ซึ่งคิดเป็น 50.18% ของความสามารถในการผลิตเท่านั้น

ในส่วนตารางที่ 8 มีลักษณะไปในทางเดียวกันกับฤดูกาลที่ 1 คือ โรงงาน ก ใช้กำลังการผลิตเฉลี่ย 41.44% ซึ่งตกลงจากฤดูกาลที่ 1 เล็กน้อย แต่มีในบางขณะโรงงาน ก ต้องเร่งการผลิตจนสูงเกินกว่ากำลังการผลิตที่มี คือ (18,211 ÷ 17,731) × 100 = 102.70% ในขณะที่โรงงานอื่น ๆ ไม่ได้มีการผลิตเกินกำลังการผลิตเลย

3.2 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้จะมีการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตอย่างสุ่ม จำนวนฤดูกาลละ 20 ข้อมูล เพื่อนำมาวิเคราะห์ ตั้งแต่ปัจจัยนำเข้าที่ควบคุมได้ ปัจจัยนำเข้าที่ควบคุมไม่ได้ และปัจจัยนำออก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 แรงดันไฮดรอลิกที่ลูกหีบบน

แรงดันไฮดรอลิกที่ลูกหีบถือเป็นปัจจัยนำเข้าที่ควบคุมได้ โดยแต่ละโรงงานก็มีการตั้งค่าแรงดันที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับข้อมูลในอดีต ข้อมูลปัจจุบันของวัตถุดิบที่นำเข้า และการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมของวิศวกรโรงงานแต่ละโรง

3.2.2 ความเร็วรอบของลูกหีบ

ความเร็วรอบของลูกหีบส่งผลโดยตรงถึงอัตราการผลิตที่มากขึ้นหรือน้อยลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแผนการผลิตของแต่ละโรงงานรวมถึงแผนการซ่อมบำรุงที่อาจจะมีขึ้น ทั้งนี้เพราะในทางวิศวกรรมแล้วความเร็วของลูกหีบก็จะส่งผลถึงความสึกหรอและการเสียหายของเครื่องจักร

3.2.3 อุณหภูมิน้ำพรม

อุณหภูมิของน้ำที่ใช้พรมเป็นพารามิเตอร์หนึ่งของกระบวนการสกัดน้ำอ้อย เทคนิคและวิธีการพรมก็เป็นประเด็นสำคัญในทางทฤษฎีของการสกัดน้ำอ้อย ในการศึกษาครั้งนี้เราจะมุ่งประเด็นเฉพาะอุณหภูมิที่พรมลงไป เพราะโรงงานทั้งสี่โรงงานใช้เทคนิคการพรมแบบเดียวกันจึงมีสมมติฐานว่าเทคนิคการพรมน้ำจึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพการสกัดอ้อยแตกต่างกัน

3.2.4 Fiber % cane

ในทางทฤษฎีแล้ว Fiber % cane จะเป็นผลมาจากคุณภาพของอ้อยที่ใส่เข้าไปในกระบวนการ แต่เนื่องจากเป็นตัวแปรที่น่าสนใจในการเปรียบเทียบความสามารถในการสกัดน้ำอ้อยของทั้งสี่โรงงาน Fiber % cane จึงอาจแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติได้

3.2.5 Pol % cane

เช่นเดียวกันกับ Fiber % cane ข้อมูลนี้เป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของอ้อยที่ป้อนเข้าสู่โรงงานว่ามีคุณภาพ อันหมายถึงปริมาณน้ำตาลซูโครสมากน้อยเพียงใด แต่เพื่อให้เกิดความชัดเจน ผู้วิจัยจึงไม่ตัดปัจจัยนี้ออกจากการวิเคราะห์ครั้งนี้

3.2.6 C.C.S.

ค่า C.C.S. จะบ่งบอกถึงคุณภาพของวัตถุดิบอ้อยอย่างตรงไปตรงมาและใช้บ่งบอกถึงความสามารถของวัตถุดิบที่นำเข้าสู่กระบวนการสกัดในการเปลี่ยนอ้อยเป็นน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงยังให้ความสนใจในปัจจัยนี้

3.2.7 Trash % cane

ค่า Trash % cane มิได้แสดงถึงคุณภาพของอ้อยที่ใส่เข้าไปในกระบวนการผลิต แต่แสดงถึงคุณภาพของการเก็บเกี่ยวและการขนส่งอ้อยเข้าสู่โรงงาน ปัจจัยนี้จึงไม่ควรตัดออกจากการศึกษาในครั้งนี้ เพื่อให้เป็นที่ชัดเจนและมีหลักฐานทางสถิติว่า Trash % cane จะมีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยของโรงงานหรือไม่

3.2.8 % Burned cane

ปัจจัยด้าน % Burned cane เป็นปัจจัยที่เกิดขึ้นจนอาจเรียกได้ว่าเป็นค่าปกติของการผลิตเลยก็ว่าได้ เนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วไม่มีทางเป็นไปได้เลยที่จะไม่มีอ้อยที่ถูกไฟไหม้ส่งเข้าโรงงานในแต่ละฤดูหีบอ้อย และเป็นที่น่าสังเกตว่าในแต่ละปีจะมี % Burned cane สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนอาจเรียกได้ว่าสูงกว่าครึ่งของอ้อยที่ส่งเข้าสู่โรงงานจนเป็นเรื่องปกติ ผู้วิจัยมีความสนใจว่า % Burned cane ที่เพิ่มขึ้นมานี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยของโรงงานหรือไม่

3.2.9 Pol Extraction

ค่า Pol Extraction เป็นค่าบ่งบอกประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยที่ผู้วิจัยสนใจในการศึกษาครั้งนี้ สามารถคำนวณได้จาก

$$\% \text{ Pol Extraction} = \frac{\text{Tons Pol in Mixed Juice}}{\text{Tons Pol in Cane}} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ Tons Pol in Mixed Juice คือจำนวนตันของน้ำอ้อย และ Tons Pol in Cane คือจำนวนตันของอ้อย

3.3 วิธีการวิจัยและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยได้วางแผนในการสุ่มค่าตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2 ฤดูกาลละ 20 ค่า จำนวน 2 ฤดูกาล ก่อนการปรับปรุง สำหรับเครื่องมือในการเก็บข้อมูลนั้นเป็นเครื่องมือที่มีใช้ในการหาปริมาณและคำนวณค่าต่าง ๆ ในโรงงานเป็นปกติอยู่แล้ว จึงไม่มีความจำเป็นต้องออกแบบเครื่องมือวัดหรือเครื่องมือเก็บข้อมูลใหม่แต่อย่างใด เมื่อได้ข้อมูลแล้วจะนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยเลือกใช้สถิติแบบไม่ใช้พารามิเตอร์ ทั้งนี้เพราะข้อมูลที่เก็บได้ทั้งหมดไม่สามารถอนุมานได้ว่ามีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งเป็นข้อจำกัดข้อหนึ่งของสถิติแบบใช้พารามิเตอร์ ซึ่งสถิติแบบไม่ใช้พารามิเตอร์ที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้จะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

เมื่อผู้วิจัยได้ข้อสรุปทั้งปัจจัยที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยจากการทดสอบทางสถิติแล้ว ผู้วิจัยจะนำมาปรับค่าปัจจัยและกำหนดปัจจัยนำเข้าของโรงงาน ก ซึ่งเป็นโรงงานตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้ จากนั้นจะเก็บผลการทดลองอีก 20 ค่า เพื่อพิสูจน์ผลจากการปรับค่าปัจจัยว่าสามารถทำให้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 ดำเนินการทดสอบ Normality Test สำหรับข้อมูล Pol Extraction ของและโรงงาน โดยแยกฤดูกาลออกเป็น ฤดูกาลที่ 1 และฤดูกาลที่ 2 โดยในที่นี้จะเลือก Normality Test แบบ Kolmogorov-Smirnov หรือ KS Test ซึ่งสามารถเรียกฟังก์ชั่นนี้ได้บน Minitab นอกจากนั้นจะมีการสังเกต Probability Plot และ Histogram ของข้อมูล Pol Extraction ทั้งสี่โรงงาน สมมติฐานหลักและสมมติฐานรองของการทดสอบได้กำหนดไว้ดังนี้

H_0: ข้อมูล Pol Extraction มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ข้อมูล Pol Extraction ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

ซึ่งการทดสอบครั้งนี้ได้กำหนด α = 0.05 ดังนั้นหาก p-value ของการทดสอบมากกว่า 0.05 แล้ว ผลของการทดสอบจะสรุปได้ว่าไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก แต่หาก p-value ของการทดสอบน้อยกว่า 0.05 แล้ว เราจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก

3.4.2 เมื่อทดสอบได้แล้วว่าข้อมูลประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยของโรงงานไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ จึงจำเป็นต้องใช้สถิติแบบไม่ใช้พารามิเตอร์เข้ามาทำการวิเคราะห์ โดยการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกการทดสอบของครัสคาลและวอลลิส (The Krushal-Wallis Test) เพื่อทดสอบความเท่ากันของมัธยฐาน (η) ของข้อมูล Pol Extraction ของทั้งสี่โรงงาน โดยแยกทำการทดสอบระหว่างฤดูกาลที่ 1 และฤดูกาลที่ 2 สมมติฐานหลักและสมมติฐานรองของการทดสอบกำหนดไว้ดังนี้

H_0: $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = \eta_4$

H_1: $\eta_i \neq \eta_j$ อย่างน้อย 1 คู่ ของ i, j ที่ $i \neq j$

ซึ่งการทดสอบครั้งนี้ได้กำหนด α = 0.05 ดังนั้นหาก p-value ของการทดสอบมากกว่า 0.05 แล้ว ผลของการทดสอบจะสรุปได้ว่าไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก แต่หาก p-value ของการทดสอบน้อยกว่า 0.05 แล้ว เราจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก

ทั้งนี้หากการทดสอบเป็นการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ผู้วิจัยจะทำการจับคู่โรงงานเพิ่มแต่ละคู่เพื่อทำการเปรียบเทียบโดยใช้การทดสอบ Mann-Whitney U Test โดยตั้งสมมติฐานหลักและสมมติฐานรองดังนี้

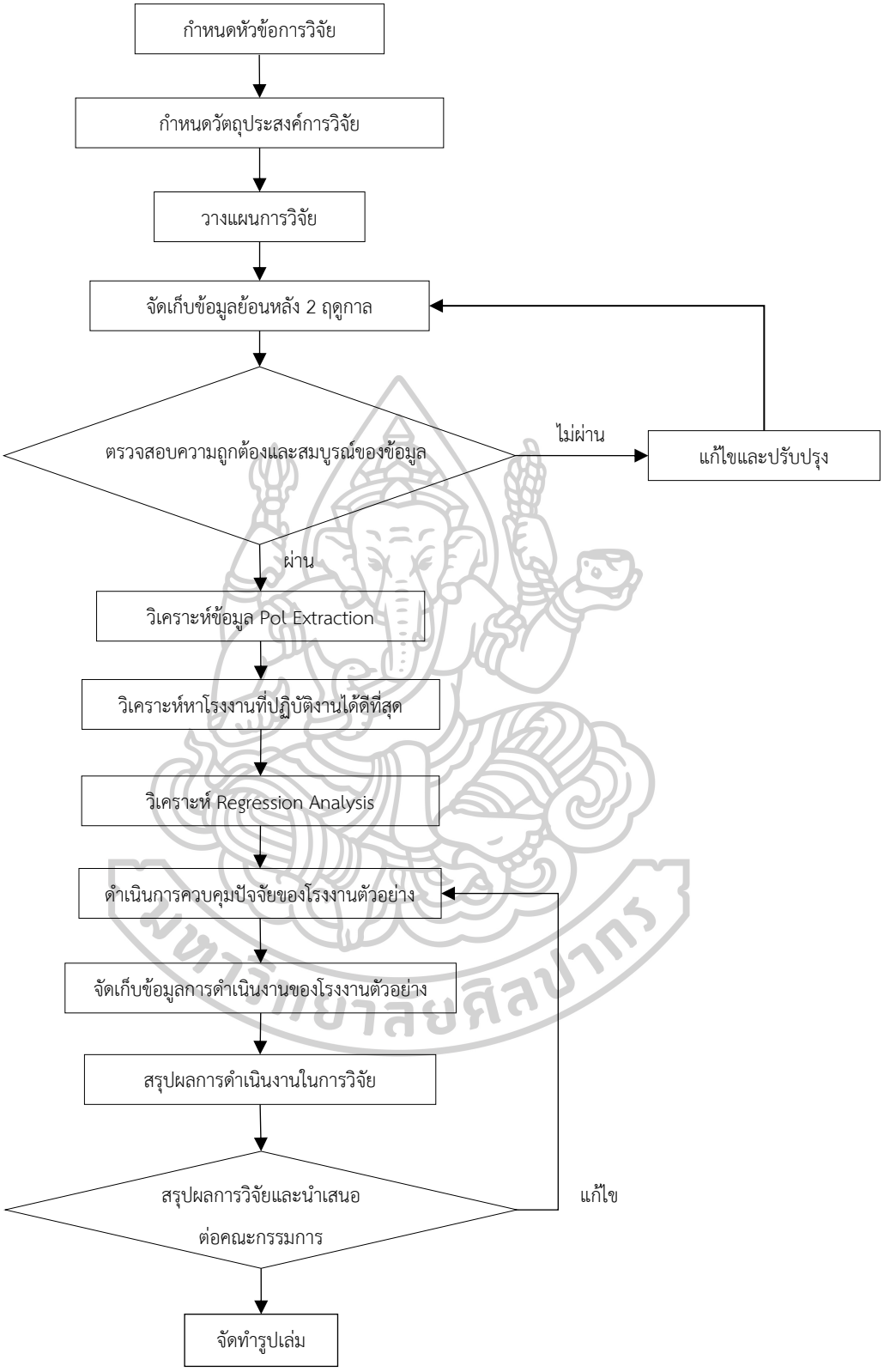
H_0: $\eta_1 = \eta_2$

H_1: $\eta_1 \neq \eta_2$

ซึ่งการทดสอบครั้งนี้ได้กำหนด α = 0.05 ดังนั้นหาก p-value ของการทดสอบมากกว่า 0.05 แล้ว ผลของการทดสอบจะสรุปได้ว่าไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก แต่หาก p-value ของการทดสอบน้อยกว่า 0.05 แล้ว เราจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก ทั้งนี้จะทำการทดสอบจะทำทีละคู่เพื่อเปรียบเทียบและหาโรงงานที่ดีที่สุดในกลุ่ม (Best Practice) ในมิติของประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อย โดยใช้ดัชนีชี้วัดจาก Pol Extraction

3.4.3 เมื่อทราบโรงงานที่ดีที่สุดในกลุ่มแล้ว ข้อมูลของโรงงานดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าทั้งที่ควบคุมได้และควบคุม โดยใช้ Regression Analysis อย่างไรก็ดีต้องมีการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปที่ตรงตามสมมติฐานของการวิเคราะห์การถดถอย นั่นคือตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตามต้องมีการกระจายแบบปกติ ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้เทคนิคการแปลงแบบ Box-Cox Method การวิเคราะห์ดังกล่าวจะช่วยให้สามารถทำนายตัวแปรตอบสนอง ซึ่งในที่นี้ก็คือประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยที่เราต้องการว่าหากต้องการ Pol Extraction ที่มากกว่า 95% แล้วโรงงานตัวอย่าง (โรงงาน ก) ต้องปรับตั้งกระบวนการอย่างไรบ้างสำหรับตัวแปรที่ควบคุมได้ ในส่วนตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ควรมีการเฝ้าระมัดระวังอย่างไรบ้างเพื่อให้ได้ค่าควบคุมที่ใกล้เคียงกับค่าได้ตั้งเป้าไว้จากการวิเคราะห์ครั้งนี้

ทั้งนี้กระบวนการวิจัยในครั้งนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 ขั้นตอนการทำวิจัย

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

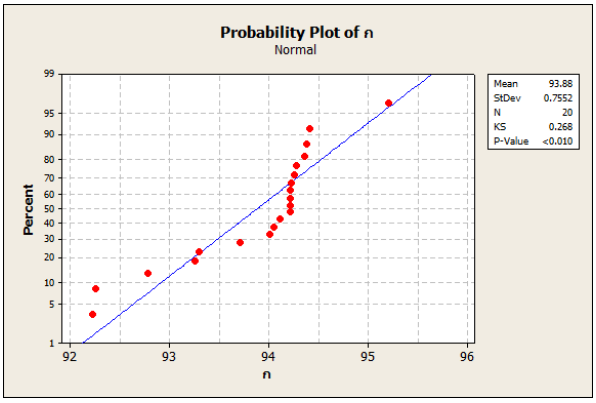
การศึกษาการปรับปรุงกระบวนการสกัดน้ำอ้อยของชุดลูกหีบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลของโรงงานน้ำตาลครั้งนี้มีความยุ่งยากในการเก็บข้อมูลเชิงลึกอีกทั้งการทำวิจัยในเชิงการทดลองกระบวนการในฤดูการผลิตนั้นเป็นไปไม่ได้เลย ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการวิจัยในเชิงการวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) บนพื้นฐานข้อมูลที่มีอยู่อย่างจำกัด อย่างไรก็ตามทฤษฎีทางสถิติวิศวกรรมและการวิเคราะห์ข้อมูลช่วยให้ผู้วิจัยวิเคราะห์และค้นหาปัจจัยที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดน้ำอ้อยเพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการกับโรงงานตัวอย่างได้ ดังมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การวิเคราะห์การกระจายของข้อมูล

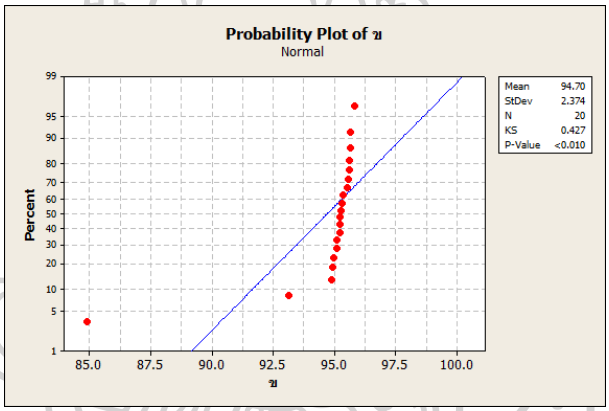
ข้อมูลแรกที่ต้องมีการวิเคราะห์ก่อนดำเนินการอย่างอื่นใด คือรูปแบบการกระจายของข้อมูลประสิทธิภาพของการสกัดน้ำอ้อย ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือก Pol Extraction เป็นตัวแปรตอบสนอง โดยเลือก Normality Test แบบ Kolmogorov-Smirnov Test ใน Minitab ซึ่งจะใช้ข้อมูล 20 ค่าสังเกต จากแต่ละโรงงานมาวิเคราะห์แยกกัน และแยกการวิเคราะห์ในแต่ละฤดูการผลิตเป็นฤดูการผลิตที่ 1 และฤดูการผลิตที่ 2 ซึ่งมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.1.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายของข้อมูลโรงงานในฤดูที่ 1

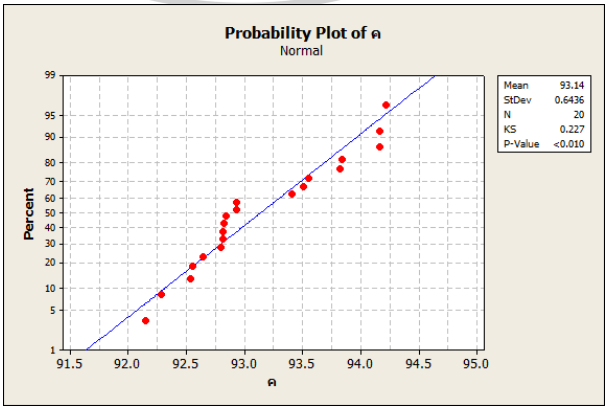
ข้อมูลสุ่มจากโรงงานทั้งสี่โรงแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งตัวแปรสุ่มที่สนใจในการศึกษาครั้งนี้คือ Pol Extraction ที่เป็นตัวบงชี้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยของชุดลูกหีบ อย่างไรก็ดีจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาว่ามีการกระจายแบบปกติหรือไม่ ซึ่งผลการวิเคราะห์โดยใช้ Minitab 16 และมีคำสั่ง Stat > Basic Statistics > Normality Test > Kolmogorov-Smirnov เป็นดังนี้



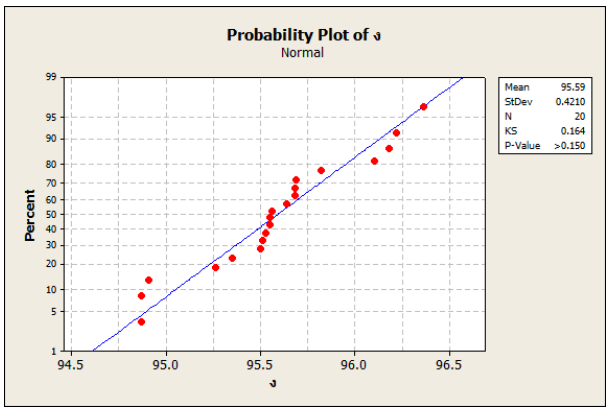
รูปที่ 18 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ก ในฤดูที่ 1



รูปที่ 19 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ข ในฤดูที่ 1



รูปที่ 20 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ค ในฤดูที่ 1

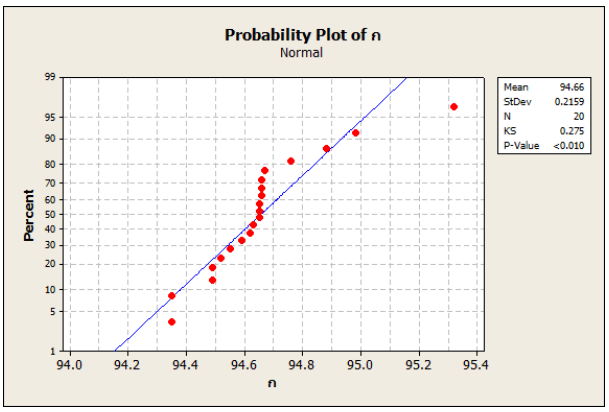


รูปที่ 21 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ง ในฤดูที่ 1

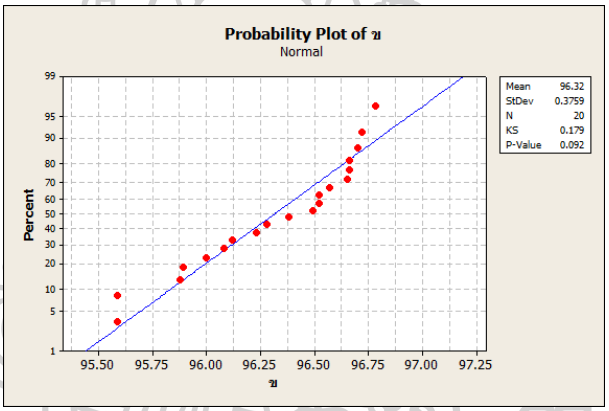
จากผลการทดสอบ พบว่าโรงงาน ก ข ค และ ง มีค่าเฉลี่ยของข้อมูล 20 ข้อมูลเท่ากับ 93.88, 94.70, 93.14, และ 95.59 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเท่ากับ 0.7552, 2.374, 0.6436, และ 0.4210 ตามลำดับ เป็นที่น่าสนใจว่าค่า p-value ของทั้งสี่กรณีคือ < 0.010, < 0.010, < 0.010, > 0.150 ตามลำดับ ซึ่งระดับนัยสำคัญของการทดสอบครั้งนี้คือ α =0.05 นั่นมีความหมายว่าเราปฏิเสธสมมติฐานหลักของข้อมูลที่มาจากโรงงาน ก ข และ ค นั่น ข้อมูลที่ได้มาจากทั้งสามโรงงานดังกล่าวมีการกระจายของข้อมูลไม่เป็นแบบปกติ ในขณะที่ข้อมูลที่มาจากโรงงาน ง ยอมรับสมมติฐานหลัก คือไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะปฏิเสธว่าข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกตินั่นเอง

4.1.2 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายของข้อมูลโรงงานในฤดูที่ 2

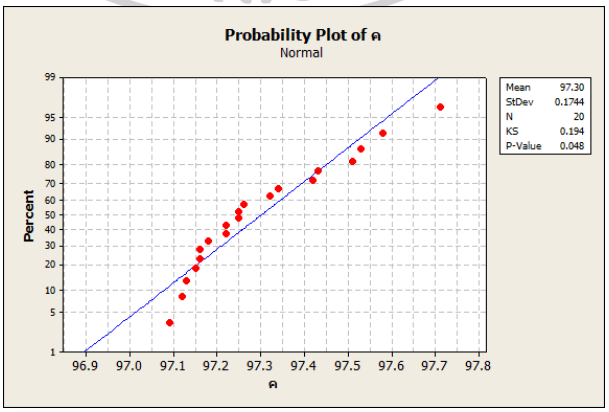
มีการเก็บข้อมูลอย่างสุ่มในฤดูที่ 2 ของการดำเนินการ ทั้งนี้แต่ละโรงงานมีความเป็นอิสระต่อกันและมีการปรับปรุงกระบวนการของแต่ละโรงงานอย่างเป็นอิสระต่อกันตามรอบการผลิต ดังนั้นปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลถึงประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อย อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างทั่วถึง ผลการทดสอบการกระจายของข้อมูลทั้งสี่โรงงานเป็นดังนี้



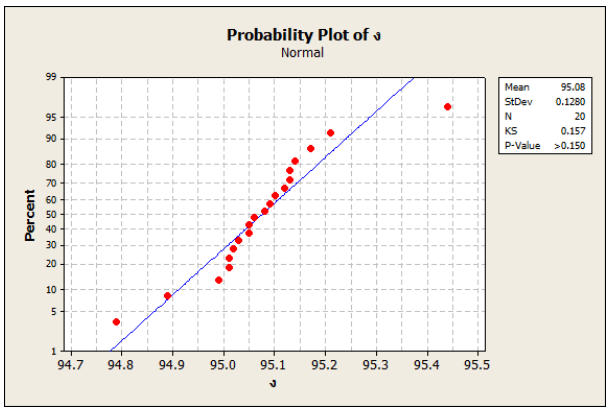
รูปที่ 22 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ก ในฤดูที่ 2



รูปที่ 23 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ข ในฤดูที่ 2



รูปที่ 24 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ค ในฤดูที่ 2



รูปที่ 25 ผลการทดสอบ KS ของโรงงาน ง ในฤดูที่ 2

จากผลการทดสอบ พบว่าโรงงาน ก ข ค และ ง มีค่าเฉลี่ยของข้อมูล 20 ข้อมูลเท่ากับ 94.66, 97.32, 97.30, และ 95.08 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเท่ากับ 0.2159, 0.3759, 0.1744 และ 0.1280 ตามลำดับ เป็นที่น่าสนใจว่าค่า p-value ของทั้งสี่กรณีคือ < 0.010, = 0.092, = 0.048, > 0.150 ตามลำดับ ซึ่งระดับนัยสำคัญของการทดสอบครั้งนี้คือ α =0.05 นั่นมีความหมายว่าเราปฏิเสธสมมติฐานหลักของข้อมูลที่มาจากโรงงาน ก และ ค นั่น ข้อมูลที่ได้มาจากทั้งสามโรงงานดังกล่าวมีการกระจายของข้อมูลไม่เป็นแบบปกติ ในขณะที่ข้อมูลที่มาจากโรงงาน ข และ ง ยอมรับสมมติฐานหลัก คือไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะปฏิเสธว่าข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ

อย่างไรก็ตามเพื่อให้การวิเคราะห์เป็นไปในทางเดียวกันทั้งสี่โรงงาน งานวิจัยครั้งนี้จึงดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลบนพื้นฐานว่าการกระจายของข้อมูลมิได้เป็นแบบปกติ ซึ่งเป็นผลให้ต้องใช้สถิติแบบไม่ใช้พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์อื่น ๆ ต่อไปในการวิจัยครั้งนี้

4.2 การทดสอบ Kruskal-Wallis Test

จากการทดสอบการกระจายในหัวข้อที่ผ่านมา สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นการวิเคราะห์แยกแยะสามารถในการผลิตของโรงงานทั้งสี่และการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลตัวแปรตอบสนองจึงต้องอาศัยสถิติแบบไม่ใช้พารามิเตอร์

ในหัวข้อนี้จะใช้การทดสอบ Kruskal-Wallis Test ในการทดสอบสมมติฐานว่าโรงงานทั้งสี่โรงมีประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยเหมือนกันหรือไม่ โดยอาศัยสมมติฐานที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.4.2 ดังนี้

H_0: $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = \eta_4$

H_1: $\eta_i \neq \eta_j$ อย่างน้อย 1 คู่ ของ i, j ที่ $i \neq j$

และกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ α = 0.05 ทั้งนี้จะทำการวิเคราะห์ค่า Pol Extraction ของโรงงานทั้งสี่แยกออกเป็น 2 ฤดู ซึ่งผลการวิเคราะห์โดยใช้ Minitab 16 และมีคำสั่ง Stat > Nonparametrics > Kruskal-Willis ของฤดูที่ 1 แสดงในรูปที่ 26

Kruskal-Wallis Test: Pol Extraction versus Plant

```
Kruskal-Wallis Test on Pol Extraction

Plant   N Median Ave Rank   Z
ก      20  94.21   28.4 -2.69
ข      20  95.24   52.4  2.64
ค      20  92.89   16.3 -5.38
ง      20  95.56   65.0  5.43
Overall 80        40.5

H = 54.57 DF = 3 P = 0.000
H = 54.58 DF = 3 P = 0.000 (adjusted for ties)
```

รูปที่ 26 ผลการทดสอบ Kruskal-Willis Test ฤดูที่ 1

จากรูปที่ 26 ค่ามัธยฐานของโรงงาน ก ข ค และ ง คือ 94.21, 95.24, 92.89, และ 95.56 ตามลำดับ ผมการทดสอบได้ค่า H = 54.58 (ค่า adjusted) และเมื่อสังเกตค่า p-value พบว่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งจะตกอยู่ในพื้นที่วิกฤต แสดงว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก ดังนั้นสรุปได้ว่าโรงงานทั้งสี่ให้ค่า Pol Extraction ไม่เท่ากัน (โดยมีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน)

ผลการทดสอบ Kruskal-Willis Test ของข้อมูลฤดูกาลที่ 2 ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานเบื้องต้นว่าเป็นข้อมูลที่เป็นอิสระจากข้อมูลจากฤดูกาลที่ 1 เพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์และทดสอบข้อมูล แต่ต้องตั้งข้อสังเกตวิธีการปฏิบัติงานคือ ในความเป็นจริงแล้วโรงงานจะมีการปรับปรุงกระบวนการจากฤดูหับก่อนหน้า โดยอาศัยข้อมูลที่มีและเป็นลักษณะ Trial and Error ทั้งนี้ผลการทดสอบ Kruskal-Willis Test ของฤดูที่ 2 แสดงดังรูปที่ 27

Kruskal-Wallis Test: Pol Extraction versus Plant

```
Kruskal-Wallis Test on Pol Extraction

Plant   N Median Ave Rank   Z
1      20  94.65   11.6 -6.42
2      20  96.44   50.5  2.22
3      20  97.25   70.5  6.67
4      20  95.07   29.4 -2.47
Overall 80        40.5

H = 72.53 DF = 3 P = 0.000
H = 72.55 DF = 3 P = 0.000 (adjusted for ties)
```

รูปที่ 27 ผลการทดสอบ Kruskal-Willis Test ฤดูที่ 2

จากรูปที่ 27 ค่ามัธยฐานของโรงงาน ก ข ค และ ง คือ 94.65, 96.44, 97.25, และ 95.07 ตามลำดับ ผมการทดสอบได้ค่า H = 72.55 (ค่า adjusted) และเมื่อสังเกตค่า p-value พบว่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งจะตกอยู่ในพื้นที่วิกฤต แสดงว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก ดังนั้นสรุปได้ว่าโรงงานทั้งสี่ให้ค่า Pol Extraction ไม่เท่ากัน (โดยมีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน)

จากผลการทดสอบของทั้งสองฤดูดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่าโรงงานทั้งสี่โรงมีประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (แบบไม่ใช้พารามิเตอร์) ทำให้ผู้วิจัยตั้งประเด็นคำถามต่อไปว่า โรงงานใดในสี่โรงงานนี้มีประสิทธิภาพดีที่สุดในกลุ่ม เพื่อตั้งเป็น Best practice ในการศึกษาปัจจัยและเป็นต้นแบบการปรับปรุงกระบวนการของโรงงานตัวอย่าง (โรงงาน ก) ต่อไป

การทดสอบดังกล่าวจะอาศัยเครื่องทดสอบ Mann-Whitney U Test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างข้อมูลสองกลุ่ม โดยทำการเปรียบเทียบแบบ Pairwise comparison คือจับคู่เทียบทีละคู่ ดังนั้นในข้อมูลแต่ละฤดูการผลิต จะต้องทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบทั้งหมดจำนวน 6 ครั้ง ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

4.3 การทดสอบ Mann-Whitney U Test

จากที่กล่าวมาแล้วเราจะทำทดสอบเปรียบเทียบข้อมูลแต่ละฤดูการผลิตเป็น Pairwise ทั้งหมด 6 ครั้งของการทดสอบด้วยกัน กล่าวคือ ครั้งที่ 1 ก-ข, ครั้งที่ 2 ก-ค, ครั้งที่ 3 ก-ง, ครั้งที่ 4 ข-ค, ครั้งที่ 5 ข-ง, และครั้งที่ 6 ค-ง ตามลำดับ โดยแต่ละครั้งการทดสอบจะใช้สมมติฐานหลักและรองดังที่แสดงในหัวข้อ 3.4.2

$$H_0\colon\ \eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = \eta_4$$

$$H_1\colon\ \eta_i \neq \eta_j$$

แต่มีการปรับเปลี่ยนสมมติฐานให้ใช้เครื่องหมายน้อยกว่าหรือมากกว่า (แล้วแต่กรณี) เพื่อให้การสรุปผลการทดสอบแข็งแรงยิ่งขึ้น เพราะพื้นที่วิกฤติของการทดสอบแบบด้านเดียวจะมีขนาด 0.05 นั่นเอง

4.3.1 การทดสอบ Mann-Whitney U Test ของฤดูที่ 1

การทดสอบครั้งนี้จะใช้ค่ามัธยฐานเป็นตัวแทนของข้อมูล และถ้าข้อมูลชุดแรกมีค่ามัธยฐานน้อยกว่าข้อมูลชุดที่สอง เราจะใช้เครื่องหมาย ‘ < ’ ในสมมติฐานรอง ในทางกลับกันถ้าข้อมูลชุดแรกมีค่ามัธยฐานมากกว่าข้อมูลชุดที่สอง เราจะใช้เครื่องหมาย ‘ > ’ ในสมมติฐานรอง ซึ่งผลการวิเคราะห์โดยใช้ Minitab 16 และมีคำสั่ง Stat > Nonparametrics > Mann-Whitney เป็นดังนี้

Mann-Whitney Test and CI: ก, ข

```
  N Median
ก 20 94.210
ข 20 95.240


Point estimate for ETA1-ETA2 is -1.200
95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-1.500,-0.910)
W = 252.0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 < ETA2 is significant at
0.0000
The test is significant at 0.0000 (adjusted for
ties)
```

รูปที่ 28 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ก และ ข ฤดูที่ 1

จากรูปที่ 28 ค่ามัธยฐานของ ก และ ข เท่ากับ 94.210 และ 95.240 ตามลำดับ เราจึงเลือกใช้เครื่องหมาย ‘ < ’ ในสมมติฐานรอง โดยการเลือกช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบที่ 95% และระดับนัยสำคัญ α = 0.05 สรุปได้ว่า ชุดข้อมูลของโรงงาน ก น้อยกว่าโรงงาน ข อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากนั้นเราจึงทดสอบชุดข้อมูลระหว่างโรงงาน ก และโรงงาน ค

Mann-Whitney Test and CI: ก, ค

```
  N Median
ก 20 94.210
ค 20 92.885

Point estimate for ETA1-ETA2 is 0.820
95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (0.320,1.400)
W = 522.5
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 > ETA2 is significant at
0.0012
The test is significant at 0.0012 (adjusted for
ties)
```

รูปที่ 29 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ก และ ค ฤดูที่ 1

จากรูปที่ 29 ค่ามัธยฐานของ ก และ ค เท่ากับ 94.210 และ 92.885 ตามลำดับ เราจึงเลือกใช้เครื่องหมาย ‘ > ’ ในสมมติฐานรอง โดยการเลือกช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบที่ 95% และระดับนัยสำคัญ α = 0.05 สรุปได้ว่า ชุดข้อมูลของโรงงาน ก มากกว่าโรงงาน ค อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากนั้นเราจึงทดสอบชุดข้อมูลระหว่างโรงงาน ก และโรงงาน ง

Mann-Whitney Test and CI: ก, ง

```
  N Median
ก 20 94.210
ง 20 95.555

Point estimate for ETA1-ETA2 is -1.485
95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-1.970,-1.300)
W = 213.0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 < ETA2 is significant at
0.0000
The test is significant at 0.0000 (adjusted for
ties)
```

รูปที่ 30 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ก และ ง ฤดูที่ 1

จากรูปที่ 30 ค่ามัธยฐานของ ก และ ง เท่ากับ 94.210 และ 95.555 ตามลำดับ เราจึงเลือกใช้เครื่องหมาย ‘ < ’ ในสมมติฐานรอง โดยการเลือกช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบที่ 95% และระดับนัยสำคัญ α = 0.05 สรุปได้ว่า ชุดข้อมูลของโรงงาน ก น้อยกว่าโรงงาน ง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากนั้นเราจึงทดสอบชุดข้อมูลระหว่างโรงงาน ข และโรงงาน ค

Mann-Whitney Test and CI: ข, ค

```
  N Median
ข 20 95.240
ค 20 92.885

Point estimate for ETA1-ETA2 is 2.180
95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (1.640,2.550)
W = 582.0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 > ETA2 is significant at
0.0000
The test is significant at 0.0000 (adjusted for
ties)
```

รูปที่ 31 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ข และ ค ฤดูที่ 1

จากรูปที่ 31 ค่ามัธยฐานของ ข และ ค เท่ากับ 95.240 และ 92.885 ตามลำดับ เราจึงเลือกใช้เครื่องหมาย ‘ > ’ ในสมมติฐานรอง โดยการเลือกช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบที่ 95% และระดับนัยสำคัญ α = 0.05 สรุปได้ว่า ชุดข้อมูลของโรงงาน ข มากกว่ากว่าโรงงาน ค อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากนั้นเราจึงทดสอบชุดข้อมูลระหว่างโรงงาน ข และโรงงาน ง

Mann-Whitney Test and CI: ข, ง

```
  N Median
ข 20 95.240
ง 20 95.555

Point estimate for ETA1-ETA2 is -0.340
95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-0.590,-0.040)
W = 318.0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 < ETA2 is significant at
0.0067
The test is significant at 0.0066 (adjusted for
ties)
```

รูปที่ 32 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ข และ ง ฤดูที่ 1

จากรูปที่ 32 ค่ามัธยฐานของ ข และ ง เท่ากับ 95.240 และ 95.555 ตามลำดับ เราจึงเลือกใช้เครื่องหมาย ‘ < ’ ในสมมติฐานรอง โดยการเลือกช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบที่ 95% และระดับนัยสำคัญ α = 0.05 สรุปได้ว่า ชุดข้อมูลของโรงงาน ข น้อยกว่าโรงงาน ง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากนั้นเราจึงทดสอบชุดข้อมูลระหว่างโรงงาน ค และโรงงาน ง

Mann-Whitney Test and CI: ค, ง

```
  N Median
ค 20 92.885
ง 20 95.555


Point estimate for ETA1-ETA2 is -2.595
95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-2.850,-2.060)
W = 210.0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 < ETA2 is significant at
0.0000
The test is significant at 0.0000 (adjusted for
ties)
```

รูปที่ 33 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ค และ ง ฤดูที่ 1

จากรูปที่ 33 ค่ามัธยฐานของ ค และ ง เท่ากับ 92.885 และ 95.555 ตามลำดับ เราจึงเลือกใช้เครื่องหมาย ‘ < ’ ในสมมติฐานรอง โดยการเลือกช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบที่ 95% และระดับนัยสำคัญ α = 0.05 สรุปได้ว่า ชุดข้อมูลของโรงงาน ค น้อยกว่าโรงงาน ง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากการทดสอบทั้งหมด 6 ครั้ง โดยการทำการทดสอบเปรียบเทียบทีละคู่พบว่าโรงงานแต่ละโรงมีประสิทธิภาพแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยหากเรียงลำดับค่ามัธยฐานแล้วสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การเรียงลำดับค่ามัธยฐานของข้อมูลในฤดูที่ 1

ลำดับที่	โรงงาน	ค่ามัธยฐาน
1	ง	95.555
2	ข	95.240
3	ก	94.210
4	ค	92.885

จากตารางพบว่าโรงงานที่มีประสิทธิภาพในการสกัดน้ำอ้อยมากที่สุดได้แก่โรงงาน ง ในขณะที่โรงงานที่มีประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยน้อยที่สุดในกลุ่มคือโรงงาน ค ในขณะที่โรงงานตัวอย่าง (โรงงาน ก) มีประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยเป็นอันดับที่สามในกลุ่มโรงงานทั้งหมด

4.3.2 การทดสอบ Mann-Whitney U Test ของฤดูที่ 2

ผู้วิจัยได้สนใจศึกษาข้อมูลในฤดูถัดมาเพื่อยืนยันข้อมูลและเพื่อให้การวิเคราะห์มีรายละเอียดเพียงพอต่อการตัดสินใจมากขึ้น โดยใช้สมมติฐานและสมมติฐานรองเช่นเดียวกับในฤดูกาลที่ 1 อย่างไรก็ตามแต่ละโรงงานมีการดำเนินงานที่เป็นอิสระต่อกัน สภาพการณ์ สภาวะแวดล้อม และการปรับปรุงกระบวนการเป็นอิสระต่อกัน ข้อมูลของฤดูที่ 1 อาจไม่สามารถนำไปเทียบได้กับฤดูที่ 2 ผลการทดสอบเป็นไปดังนี้

Mann-Whitney Test and CI: ก, ข

```
  N Median
ก 20 94.650
ข 20 96.435

Point estimate for ETA1-ETA2 is -1.730
95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-1.940,-1.460)
W = 210.0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 < ETA2 is significant at
0.0000
The test is significant at 0.0000 (adjusted for
ties)
```

รูปที่ 34 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ก และ ข ฤดูที่ 2

จากรูปที่ 34 ค่ามัธยฐานของ ก และ ข เท่ากับ 94.650 และ 96.435 ตามลำดับ เราจึงเลือกใช้เครื่องหมาย ‘ < ’ ในสมมติฐานรอง โดยการเลือกช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบที่ 95% และระดับนัยสำคัญ α = 0.05 สรุปได้ว่า ชุดข้อมูลของโรงงาน ก น้อยกว่าโรงงาน ข อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากนั้นเราจึงทดสอบชุดข้อมูลระหว่างโรงงาน ก และโรงงาน ค

Mann-Whitney Test and CI: ก, ค

```
  N Median
ก 20 94.650
ค 20 97.250

Point estimate for ETA1-ETA2 is -2.660
95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-2.770,-2.580)
W = 210.0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 < ETA2 is significant at
0.0000
The test is significant at 0.0000 (adjusted for
ties)
```

รูปที่ 35 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ก และ ค ฤดูที่ 2

จากรูปที่ 35 ค่ามัธยฐานของ ก และ ค เท่ากับ 94.650 และ 97.250 ตามลำดับ เราจึงเลือกใช้เครื่องหมาย ‘ < ’ ในสมมติฐานรอง โดยการเลือกช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบที่ 95% และระดับนัยสำคัญ α = 0.05 สรุปได้ว่า ชุดข้อมูลของโรงงาน ก น้อยกว่าโรงงาน ค อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากนั้นเราจึงทดสอบชุดข้อมูลระหว่างโรงงาน ก และโรงงาน ง

Mann-Whitney Test and CI: ก, ง

```
  N Median
ก 20 94.650
ง 20 95.070


Point estimate for ETA1-ETA2 is -0.440
95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-0.520,-0.370)
W = 232.0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 > ETA2

Cannot reject since W is < 410.0
```

รูปที่ 36 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ก และ ง ฤดูที่ 2

จากรูปที่ 36 ค่ามัธยฐานของ ก และ ง เท่ากับ 94.650 และ 95.070 ตามลำดับ เราจึงเลือกใช้เครื่องหมาย ‘ < ’ ในสมมติฐานรอง โดยการเลือกช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบที่ 95% และระดับนัยสำคัญ α = 0.05 สรุปได้ว่า ชุดข้อมูลของโรงงาน ก กับโรงงาน ง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากนั้นเราจึงทดสอบชุดข้อมูลระหว่างโรงงาน ข และโรงงาน ค

Mann-Whitney Test and CI: ข, ค

```
  N Median
ข 20 96.435
ค 20 97.250


Point estimate for ETA1-ETA2 is -0.905
95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-1.170,-0.730)
W = 210.0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 < ETA2 is significant at
0.0000
The test is significant at 0.0000 (adjusted for
ties)
```

รูปที่ 37 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ข และ ค ฤดูที่ 2

จากรูปที่ 37 ค่ามัธยฐานของ ข และ ค เท่ากับ 96.435 และ 97.250 ตามลำดับ เราจึงเลือกใช้เครื่องหมาย ‘ < ’ ในสมมติฐานรอง โดยการเลือกช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบที่ 95% และระดับนัยสำคัญ α = 0.05 สรุปได้ว่า ชุดข้อมูลของโรงงาน ข น้อยกว่ากว่าโรงงาน ค อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากนั้นเราจึงทดสอบชุดข้อมูลระหว่างโรงงาน ข และโรงงาน ง

Mann-Whitney Test and CI: ข, ง

```
  N Median
ข 20 96.435
ง 20 95.070


Point estimate for ETA1-ETA2 is 1.330
95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (1.060,1.510)
W = 610.0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 > ETA2 is significant at
0.0000
The test is significant at 0.0000 (adjusted for
ties)
```

รูปที่ 38 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ข และ ง ฤดูที่ 2

จากรูปที่ 38 ค่ามัธยฐานของ ข และ ง เท่ากับ 96.435 และ 95.070 ตามลำดับ เราจึงเลือกใช้เครื่องหมาย ‘ > ’ ในสมมติฐานรอง โดยการเลือกช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบที่ 95% และระดับนัยสำคัญ α = 0.05 สรุปได้ว่า ชุดข้อมูลของโรงงาน ข มากกว่าโรงงาน ง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากนั้นเราจึงทดสอบชุดข้อมูลระหว่างโรงงาน ค และโรงงาน ง

Mann-Whitney Test and CI: ค, ง

```
  N Median
ค 20 97.250
ง 20 95.070


Point estimate for ETA1-ETA2 is 2.215
95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (2.140,2.310)
W = 610.0
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 > ETA2 is significant at
0.0000
The test is significant at 0.0000 (adjusted for
ties)
```

รูปที่ 39 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างโรงงาน ค และ ง ฤดูที่ 2

จากรูปที่ 39 ค่ามัธยฐานของ ค และ ง เท่ากับ 97.250 และ 95.070 ตามลำดับ เราจึงเลือกใช้เครื่องหมาย ‘ > ’ ในสมมติฐานรอง โดยการเลือกช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบที่ 95% และระดับนัยสำคัญ α = 0.05 สรุปได้ว่า ชุดข้อมูลของโรงงาน ค มากกว่าโรงงาน ง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากการทดสอบทั้งหมด 6 ครั้ง โดยการทำการทดสอบเปรียบเทียบทีละคู่พบว่า โรงงานแต่ละโรงมีประสิทธิภาพแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยหากเรียงลำดับค่ามัธยฐานแล้วสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การเรียงลำดับค่ามัธยฐานของข้อมูลในฤดูที่ 2

ลำดับที่	โรงงาน	ค่ามัธยฐาน
1	ค	97.250
2	ข	96.435
3	ง	95.070
	ก	94.650

จากตารางพบว่าโรงงานที่มีประสิทธิภาพในการสกัดน้ำอ้อยมากที่สุดได้แก่โรงงาน ค ในขณะที่โรงงานที่มีประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยน้อยที่สุดในกลุ่มมีอยู่สองโรงงานด้วยกัน คือ โรงงาน ง และโรงงาน ก (โรงงานตัวอย่าง) ทั้งนี้ทั้งสองโรงงานนี้ถือว่ามีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงจัดให้อยู่ในกลุ่มมีประสิทธิภาพเท่ากันนั่นเอง

จากข้อมูลการวิเคราะห์เพื่อแยกแยะโรงงานที่ดำเนินการสกัดน้ำอ้อยในฤดูที่ 1 และ 2 พบว่าโรงงาน ก (โรงงานตัวอย่าง) เป็นโรงงานที่มีประสิทธิภาพต่ำในบรรดาโรงงานด้วยกัน โดยทั้งสองฤดูกาลมีค่ามัธยฐานของประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยไม่เกิน 95% และจากฤดูที่ 1 ไปฤดูที่ 2 ยังไม่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยที่ชัดเจน ในขณะที่โรงงาน ค ได้มีการปรับปรุงกระบวนการขึ้นอย่างชัดเจน โดยในฤดูที่ 1 มีค่ามัธยฐานเพียง 92.885 ในขณะที่ฤดูที่ 2 มีค่ามัธยฐาน 97.260 ทำให้โรงงาน ค มีความน่าสนใจในแง่ของการปรับปรุงกระบวนการและการใช้เป็น Best practice ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยครั้งนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ของโรงงาน ค ในฤดูที่ 2 เพื่อบ่งชี้ปัจจัยและระดับปัจจัยในการดำเนินการสกัดน้ำอ้อย

4.4 การวิเคราะห์การถดถอยของโรงงาน ค ในฤดูที่ 2

การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จะนำข้อมูลโรงงาน ค ซึ่งเป็นโรงงานที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในกลุ่มโรงงานทั้งหมดในฤดูที่ 2 มาวิเคราะห์หาความเชื่อมโยงกับตัวแปรตั้งต้นและเป็นตัวแปรสุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ในทางปฏิบัติหรืออาจกล่าวได้ว่าควบคุมได้แต่มีความยุ่งยากในเชิงการบริหารงานจริง ได้แก่ % Fiber cane, Pol % cane, C.C.S., Trash % cane และ % Burned cane ส่วนปัจจัยอื่นที่สามารถควบคุมได้และได้มีการเรียนรู้จากโรงงาน ค คือ จำนวนลูกหีบ แรงดันไฮดรอลิกลูกหีบบน ขนาดกระบอกไฮดรอลิก ความเร็วรอบลูกหีบ และอุณหภูมิน้ำพรม ดังแสดงในตารางที่ 11

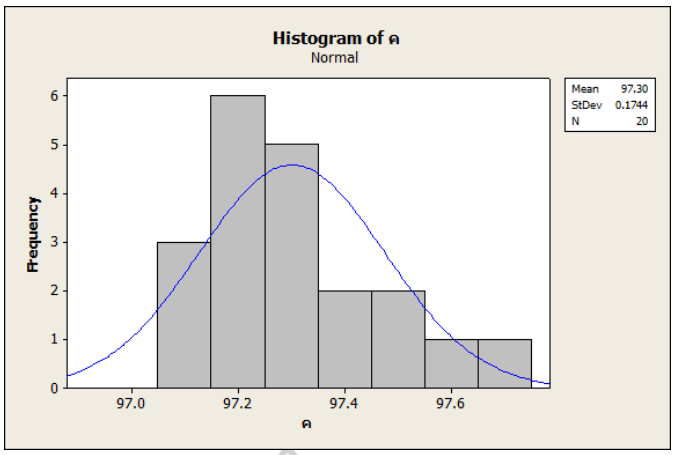
ตารางที่ 11 ข้อมูลทางเทคนิคชุดลูกหีบของกลุ่มโรงงาน

ชื่อโรงงาน	จำนวนลูกหีบ (ชุด)	แรงดันไฮดรอลิค (PSI) ที่ลูกหีบบน	Ø กระบอกไฮดรอลิค (เซนติเมตร)	ความเร็วรอบลูกหีบ (RPM)	อุณหภูมิน้ำพรม (℃)
โรงงาน ก	6	2,800 / 2,800 / 3,000	45.7	5.7,5.2,5.0	80
โรงงาน ข	5	2,500 – 2,800	43.2	5.5-6	70-80
โรงงาน ค	4	2,900 / 2,900 / 2,900 2,900	46	4,4,4,4	75-80
โรงงาน ง	5	2,500 / 2,200 / 2,200 / 2,200 / 3,200	51	5.5	70

จากข้อมูลในตารางที่ 11 เพื่อปรับกระบวนการสกัดน้ำอ้อยของโรงงานตัวอย่าง ปัจจัยที่สามารถทำได้และควรปรับตั้งให้สอดคล้องกับโรงงานที่ดีที่สุดในกลุ่มคือ แรงดันไฮดรอลิกลูกหีบบนให้เป็น 2,900 PSI ในทุกชุดลูกหีบ ปรับความเร็วรอบลูกหีบเป็น 4.0 RPM ในทุกชุด (อาจมีผลต่อกำลังการผลิต) ส่วนช่วงอุณหภูมิน้ำพรมนั้นถือว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างโรงงาน ก และโรงงาน ค

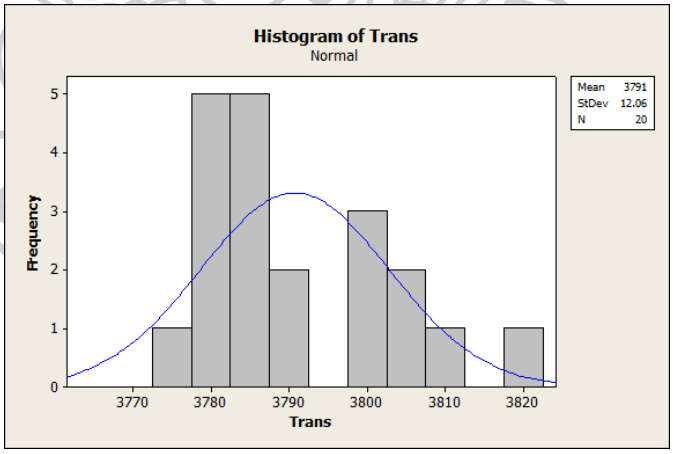
4.4.1 การแปลงค่าข้อมูลของโรงงาน ค ฤดูที่ 2

เนื่องจากข้อมูล Pol Extraction ของโรงงาน ค ที่ผู้วิจัยตั้งให้เป็น Best practice ของการวิจัยครั้งนี้ ไม่สามารถอธิบายด้วยการแจกแจงแบบปกติได้ จึงต้องมีการแปลงข้อมูลเพื่อให้อยู่ในรูปการกระจายแบบปกติ ดังที่กล่าวมาในบทที่ 2 ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงได้เลือกเทคนิค Box-Cox Method ในการ Transform ข้อมูล ก่อนอื่นเพื่อแสดงถึงการกระจายของข้อมูลโรงงาน ค ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภูมิแท่งดังแสดงในรูปที่ 40



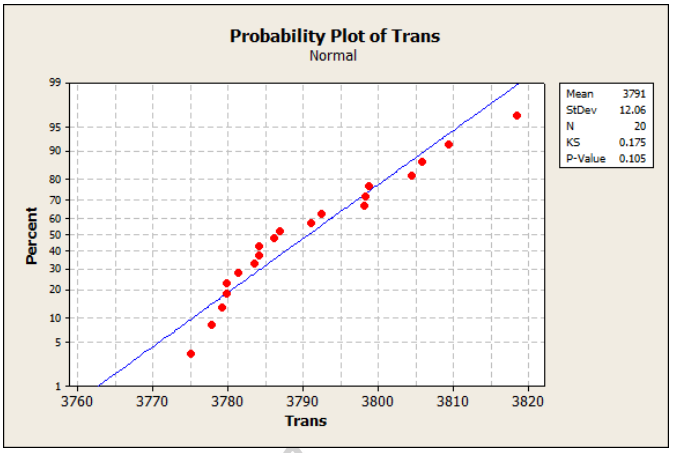
รูปที่ 40 แผนภูมิแท่งของข้อมูลโรงงาน ค ในฤดูที่ 2

จากรูปที่ 40 จะเห็นได้ว่าการกระจายข้อมูลของโรงงาน ค ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยการกระจายแบบปกติ ดังนั้นจึงเลือก Box-Cox Method โดยให้ค่า λ = 1.8 ซึ่งใช้ฟังก์ชั่นใน Minitab 16 ดังนี้ Stat > Control Charts > Box-Cox Transformation และเมื่อสร้างแผนภูมิแท่งของข้อมูลที่ได้มีการแปลงจาก Box-Cox Method แสดงดังรูปที่ 41



รูปที่ 41 แผนภูมิแท่งของข้อมูลที่แปลงโดยวิธีการ Box-Cox Method

จากรูปที่ 41 หากตรวจสอบด้วยลักษณะแผนภูมิแล้ว ข้อมูลเข้าใกล้การกระจายแบบปกติมากขึ้น แต่เพื่อให้มีหลักฐานทางสถิติ ผู้วิจัยจึงต้องตรวจสอบ Normality Test ด้วย Kolmogorov-Smirnov Test ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้มีการแปลงแสดงดังตารางที่ 12 และผลการทดสอบ Kolmogorov-Smirnov แสดงในรูปที่ 42



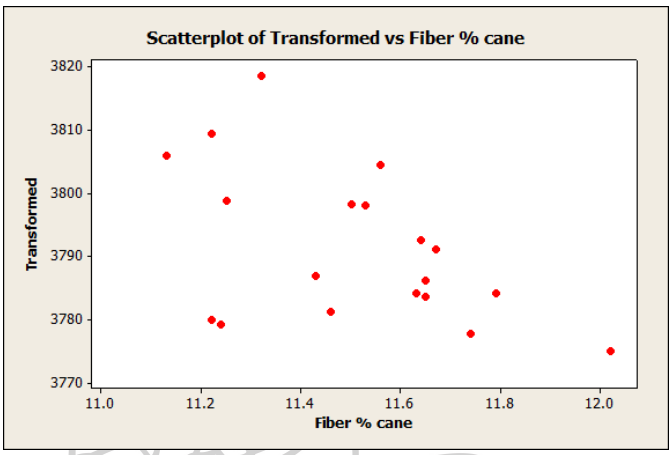
รูปที่ 42 ผลการทดสอบ KS ข้อมูลแปลงของโรงงาน ค ในฤดูที่ 2

ตารางที่ 12 ข้อมูลที่แปลงค่าด้วยวิธี Box-Cox Method

ข้อมูลที่	Pol Extraction	ข้อมูลแปลง
1	97.18	3781.276
2	97.09	3774.975
3	97.42	3798.102
4	97.32	3791.087
5	97.51	3804.420
6	97.15	3779.175
7	97.43	3798.804
8	97.16	3779.876
9	97.25	3786.180
10	97.25	3798.250
11	97.12	3783.500
12	97.22	3784.078
13	97.53	3805.825
14	97.22	3784.078
15	97.58	3809.338
16	97.26	3786.881
17	97.71	3818.477
18	97.13	3777.775
19	97.34	3792.490
20	97.43	3798.804

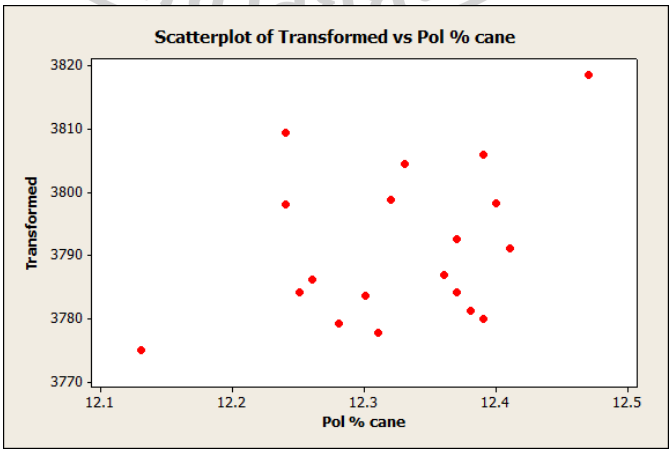
เมื่อได้ทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปที่การกระจายแบบปกติได้แล้ว ผู้วิจัยจึงสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและตัวแปรตอบสนอง (Pol Extraction) ได้ โดยใช้การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นตรง โดยเลือกฟังก์ชั่น Stat > Regression > Regression

ในเบื้องต้นผู้วิจัยต้องการตรวจสอบแผนภูมิการกระจายของข้อมูลที่มีตัวแปรต้น คือ Fiber % cane, Pol % cane, C.C.S., Trash % cane, และ % Burned cane และมีตัวแปรตามเป็นค่าที่ได้จากการแปลงข้อมูล Pol Extraction ซึ่ง แผนภูมิการกระจายแสดงดังรูปที่ 4.26 ถึง 4.30



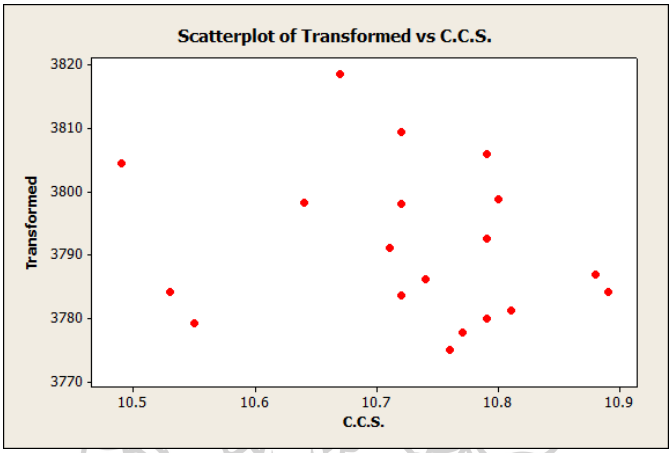
รูปที่ 43 แผนภูมิการกระจายระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ Fiber % cane

จากรูปที่ 43 ข้อมูลมีลักษณะแปรผกผันกัน กล่าวคือเมื่อ Fiber % cane มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่า Transformed Pol Extraction มีค่าลดลงอย่างสังเกตได้ อย่างไรก็ตามต้องมีการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยอีกครั้ง



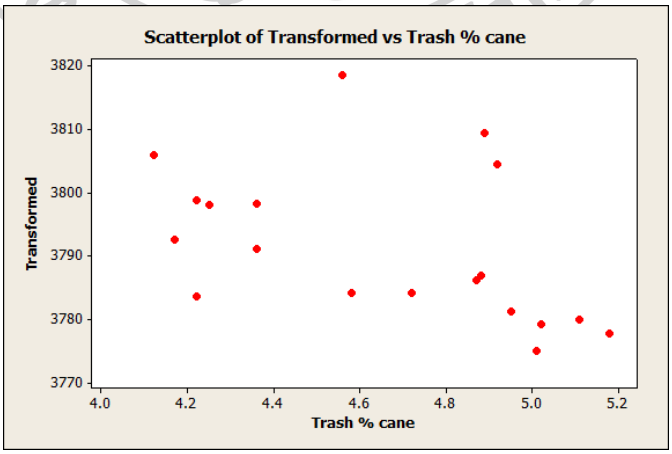
รูปที่ 44 แผนภูมิการกระจายระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ Pol % cane

รูปที่ 44 ลักษณะการกระจายของข้อมูลเป็นไปในลักษณะเมื่อ Pol % cane มีค่าเพิ่มขึ้น Transformed Pol Extraction ก็เพิ่มตามเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามมีช่วงข้อมูลค่า Pol % cane ระหว่าง 12.3 ถึง 12.4 ที่ค่า Transformed Pol Extraction มีการกระจายอย่างสุ่ม อาจสังเกตได้ว่าค่าความผิดพลาด (ε) มีความแปรปรวนไม่คงที่ในแต่ละช่วงของ Pol % cane



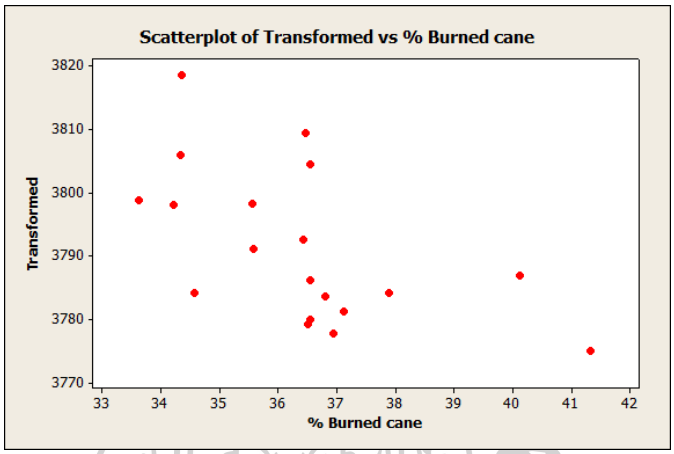
รูปที่ 45 แผนภูมิการกระจายระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ C.C.S.

จากรูปที่ 45 ค่า C.C.S. คือค่ามาตรฐานที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของวัตถุดิบ จากแผนภูมิการกระจายอยู่ในลักษณะความสัมพันธ์แปรผกผันกับ Transformed Pol Extraction อย่างไรก็ตามลักษณะข้องการถดถอยยังคงเป็นที่สังเกตว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งต้องมีการวิเคราะห์การถดถอยต่อไป



รูปที่ 46 แผนภูมิการกระจายระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ Trash % cane

รูปที่ 46 แสดงให้เห็นถึง Trash % cane ที่เมื่อมีค่ามากขึ้นแล้ว ค่า Transformed Pol Extraction จะมีค่าลดลง ซึ่งการกระจายของข้อมูลทำให้สงสัยได้ว่าการถดถอยนี้มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่



รูปที่ 47 แผนภูมิการกระจายระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ % Burned cane

รูปที่ 47 แสดงให้เห็นได้ค่อนข้างชัดเจนถึงการแปรผกผันระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ % Burned cane ความชัดเจนของการถดถอยแสดงได้ชัดในช่วงที่ % Burned cane มีค่าสูงขึ้น (38% ขึ้นไป) แต่ในช่วงกลาง ๆ ของค่า % Burned cane (35%-38%) ข้อมูลมีการกระจายค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์การถดถอยในทางสถิติต่อไป

Regression Analysis: Transformed versus Fiber % cane

The regression equation is
Transformed = 4093 - 26.2 Fiber % cane

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4092.8	117.3	34.90	0.000
Fiber % cane	-26.20	10.20	-2.57	0.019

S = 10.4599 R-Sq = 26.8% R-Sq(adj) = 22.8%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	721.9	721.9	6.60	0.019
Residual Error	18	1969.4	109.4		
Total	19	2691.3			

รูปที่ 48 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ Fiber % cane

จากรูปที่ 48 สมการถดถอยคือ Transformed = 4093 – 26.2 (Fiber % cane) ซึ่งเมื่อทดสอบ ANOVA กับตัวแบบการถดถอบแล้ว มีค่า p-value = 0.019 ซึ่งมีนัยสำคัญทางสถิติและสามารถสรุปได้ว่าตัวแบบนี้ใช้ได้ อย่างไรก็ตามตัวแบบถดถอยนี้มีค่า R-Sq (adj) = 22.8%

Regression Analysis: Transformed versus Pol % cane

```
The regression equation is
Transformed = 3096 + 56.4 Pol % cane


Predictor    Coef SE Coef    T    P
Constant   3095.9   411.3 7.53 0.000
Pol % cane  56.45   33.37 1.69 0.108


S = 11.3580   R-Sq = 13.7%   R-Sq(adj) = 8.9%


Analysis of Variance

Source      DF    SS    MS    F    P
Regression     1   369.2 369.2 2.86 0.108
Residual Error 18 2322.1 129.0
Total       19 2691.3
```

รูปที่ 49 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ Pol % cane

รูปที่ 49 แสดงให้เห็นว่าสมการการถดถอยคือ Transformed = 3096 + 56.4 (Pol % cane) อย่างไรก็ตามเมื่อถดสอบ ANOVA พบว่าค่า p-value = 0.108 ซึ่งมีค่ามากกว่า α = 0.05 ซึ่งเป็นระดับนัยสำคัญของการทดสอบครั้งนี้ จึงสรุปได้ว่าตัวแบบที่ได้ไม่สามารถอธิบายการถดถอยของตัวแปรทั้งสองได้

Regression Analysis: Transformed versus C.C.S.

```
The regression equation is
Transformed = 4003 - 19.7 C.C.S.


Predictor   Coef SE Coef    T    P
Constant  4002.6   275.2 14.54 0.000
C.C.S.    -19.67   25.65 -0.77 0.453


S = 12.0328   R-Sq = 3.2%   R-Sq(adj) = 0.0%


Analysis of Variance

Source      DF    SS    MS    F    P
Regression     1    85.1  85.1 0.59 0.453
Residual Error 18 2606.2 144.8
Total       19 2691.3
```

รูปที่ 50 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ C.C.S.

สมการการถดถอยที่แสดงในรูปที่ 50 คือ Transformed = 4003 – 19.7 (C.C.S.) ซึ่งเมื่อสำรวจค่า p-value ที่ได้จากการทดสอบ ANOVA แล้วพบว่าเท่ากับ 0.453 แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยนี้ไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามได้

Regression Analysis: Transformed versus Trash % cane

The regression equation is
Transformed = 3863 - 15.5 Trash % cane

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3863.23	31.80	121.49	0.000
Trash % cane	-15.455	6.848	-2.26	0.037

S = 10.7953 R-Sq = 22.1% R-Sq(adj) = 17.7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	593.6	593.6	5.09	0.037
Residual Error	18	2097.7	116.5		
Total	19	2691.3			

รูปที่ 51 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ Trash % cane

รูปที่ 51 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามคือ Transformed = 3863 – 15.5 (Trash % cane) ซึ่งหากสำรวจค่า p-value ที่ได้จากการทดสอบแล้วพบว่าเท่ากับ 0.037 นั่นคือมากกว่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่าตัวแบบการถดถอยครั้งนี้สามารถใช้อธิบายการถดถอยได้ และค่า R-Sq (adj) = 17.7%

Regression Analysis: Transformed versus % Burned cane

The regression equation is
Transformed = 3918 - 3.48 % Burned cane

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3917.98	41.89	93.53	0.000
% Burned cane	-3.484	1.154	-3.02	0.007

S = 9.96221 R-Sq = 33.6% R-Sq(adj) = 29.9%

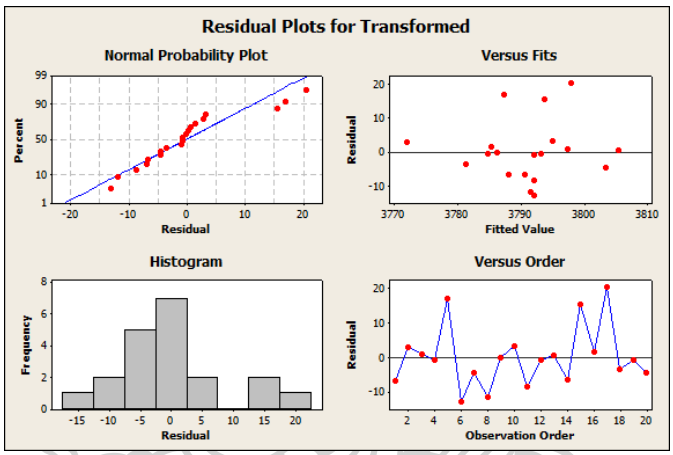
Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	904.88	904.88	9.12	0.007
Residual Error	18	1786.42	99.25		
Total	19	2691.29			

รูปที่ 52 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง Transformed Pol Extraction กับ % Burned cane

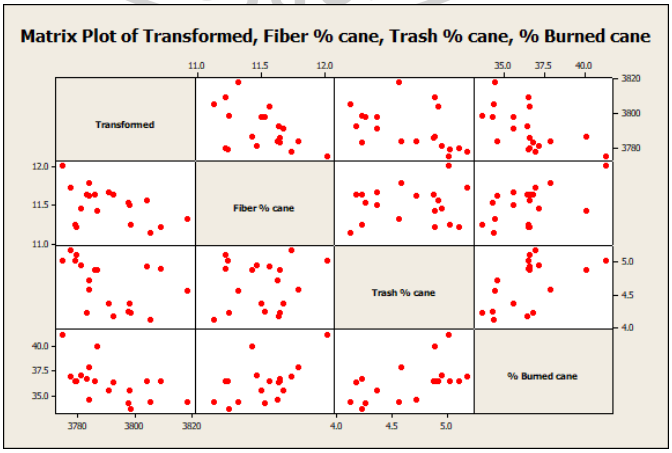
รูปที่ 52 แสดงสมการความสัมพันธ์ Transformed = 3918 – 3.48 (% Burned cane) ซึ่งมีค่า p-value = 0.007 แสดงว่าตัวแบบนี้สามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามได้ ทั้งนี้ค่า R-Sq (adj) = 29.9%

จากนั้นผู้วิจัยได้เลือกตัวแปรต้นทั้งสามตัวที่มีนัยสำคัญในการสร้างตัวแบบการถดถอยเมื่อแยกวิเคราะห์เป็นรายปัจจัยคือ Fiber % cane, Trash % cane, และ % Burned cane และนำข้อมูลมาวิเคราะห์ในลักษณะ Multiple Linear Regression Model แต่ก่อนการวิเคราะห์ขั้นต่อไปควรมีการยืนยันลักษณะการกระจายของข้อมูล ดังรูปที่ 53 – 54



รูปที่ 53 ลักษณะของข้อมูล Transformed Pol Extraction

รูปที่ 53 ยืนยันได้ว่าข้อมูล Transformed Pol Extraction มีลักษณะการกระจายแบบปกติและเป็นไปอย่างสุ่ม ไม่ได้มีลักษณะแนวโน้มหรือเบ้ไปด้านใดด้านหนึ่ง



รูปที่ 54 การกระจายของ Transformed Pol Extraction กับสามตัวแปรต้น

รูปที่ 54 เมื่อเทียบการกระจายของข้อมูล Transformed Pol Extraction กับ Fiber % cane, Trash % cane, และ % Burned cane จากนั้นจึงวิเคราะห์ Multiple Linear Regression ดังรูปที่ 55

Regression Analysis: Transformed versus Fiber % cane, Trash % cane, ...

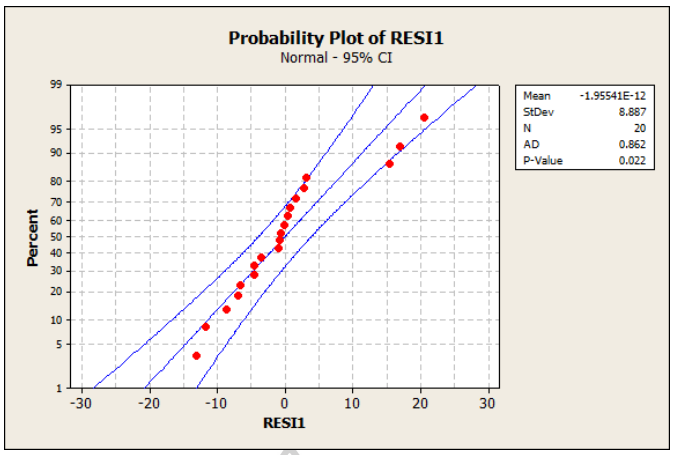
```
The regression equation is
Transformed = 4086 - 17.6 Fiber % cane - 9.34 Trash % cane
- 1.33 % Burned cane


Predictor      Coef SE Coef    T    P
Constant     4085.9  115.3 35.44 0.000
Fiber % cane  -17.63  11.67 -1.51 0.150
Trash % cane  -9.340  7.759 -1.20 0.246
% Burned cane -1.333  1.680 -0.79 0.439


S = 9.68419  R-Sq = 44.2%  R-Sq(adj) = 33.8%


Analysis of Variance

Source     DF    SS   MS    F    P
Regression    3 1190.76 396.92 4.23 0.022
Residual Error 16 1500.54  93.78
Total      19 2691.29


Source     DF Seq SS
Fiber % cane  1 721.92
Trash % cane  1 409.73
% Burned cane  1  59.10
```

รูปที่ 55 การวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง Transformed Pol Extraction กับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

รูปที่ 55 แสดงสมการความสัมพันธ์ดังนี้

Transformed = 4086 - 17.6 (Fiber % cane) - 9.34 (Trash % cane) - 1.33 (% Burned cane)

ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ ANOVA แล้วพบว่า p-value = 0.022 ซึ่งสรุปได้ว่าตัวแบบถดถอยนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามได้ ทั้งนี้ R-Sq (adj) = 33.8% อย่างไรก็ตามต้องมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมดังนี้



รูปที่ 56 Probability Plot ของค่า Residuals

รูปที่ 56 แสดงให้เห็นค่าเศษเหลือ (Residuals) ที่ผิดพลาดจากการพยากรณ์ด้วยตัวแบบถดถอยที่สร้างขึ้น เมื่อนำค่าเศษเหลือมาวิเคราะห์พบว่ามีการกระจายแบบปกติ โดยมีค่า p-value = 0.022 นั่นหมายความว่าตัวแบบถดถอยที่สร้างขึ้นและข้อมูลการกระจายมี ค่าผิดพลาด (ε) กระจายแบบปกติ ตามสมติฐานของทฤษฎีการถดถอยเชิงเส้น

4.5 การปรับปรุงและผลการปรับปรุงโรงงานตัวอย่าง

ข้อมูลของการดำเนินการของโรงงาน ค ซึ่งเมื่อวิเคราะห์แล้วถือเป็นโรงงานที่มีการปฏิบัติการที่ดีที่สุด (Best practice) ที่ต้องมีการศึกษาแนวทางการดำเนินงานที่ดีที่สุด และเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านเทคนิคและเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมและดำเนินการได้ในโรงงานตัวอย่าง (โรงงาน ก) คือ การปรับแรงดันไฮดรอลิกลูกหีบบนเป็น 2,900 PSI ในทุกชุดลูกหีบ และปรับความเร็วรอบของลูกหีบเป็น 4.0 RPM ส่วนอุณหภูมิน้ำพรมนั้นให้คงเดิมที่ 80 องศาเซลเซียสได้ นอกจากนั้นต้องควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบเข้าหีบในช่วงที่ทำการทดลองโดยพยายามควบคุมไม่ให้ Fiber % cane เกิน 12.00% ค่า Trash % cane ไม่เกิน 5.20% และ % Burned cane ไม่เกิน 41.50% โดยที่ค่าดังกล่าวมาจากขอบเขตข้อมูลค่ามากที่สุดของทั้งสามปัจจัยของโรงงาน ค ในฤดูที่ 2

อย่างไรก็ตาม ทั้งสามปัจจัยข้างต้นแม้ทางเทคนิคแล้วจะคือเป็นปัจจัยควบคุม แต่ในทางปฏิบัติแล้วอาจไม่สามารถทำได้สมบูรณ์นัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่รับเข้ามาในแต่ละวันของการดำเนินการหีบสกัดน้ำอ้อย แต่อย่างน้อยค่าดังกล่าวจะเป็นค่าเป้าหมาย (Target) ให้ผู้ควบคุมและดำเนินการหีบสกัดน้ำอ้อยคอยตรวจดูค่าปัจจัยดังกล่าวและอาจส่งสัญญาณเตือนกลับไปยังฝ่ายที่เกี่ยวข้องด้วยค่าเป้าหมายดังกล่าวนี้จะส่งผลให้การดำเนินการหีบสกัดน้ำอ้อยมีจุดคอยตรวจสอบและเตือน (Caution points) ปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยก่อนผลประสิทธิภาพจะเกิดขึ้นจริง

ลักษณะการบริหารงานแบบนี้จะเป็นส่งผลให้การบริหารจัดการหีบสกัดน้ำอ้อยจะดำเนินการอยู่บนพื้นฐานข้อมูลที่วิเคราะห์และคาดหมายได้นั่นเอง

ผลการดำเนินการทดลองในฤดูกาลล่าสุดและเก็บข้อมูลอย่างสุ่มจำนวน 15 ข้อมูลโดยเน้นไปที่ค่า Pol Extraction ของโรงงาน ก แสดงดังตารางที่ 13 ซึ่งข้อมูลอย่างสุ่มมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 95.28 และมีค่ามัธยฐานเท่ากับ 95.12 ซึ่งการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลการปรับปรุงระหว่างก่อน (ฤดูที่ 2) และหลังการปรับปรุงของโรงงาน ก ด้วย Mann-Whitney Test แสดงดังรูปที่ 57

ตารางที่ 13 ผลการดำเนินการปรับปรุงของโรงงานตัวอย่าง

ข้อมูลที่	Pol Extraction
1	94.58
2	95.12
3	94.89
4	94.66
5	95.79
6	95.88
7	95.12
8	94.99
9	95.63
10	95.08
11	95.79
12	95.53
13	96.07
14	94.92
15	95.17
ค่าเฉลี่ย	95.28
ค่ามัธยฐาน	95.12

Mann-Whitney Test and CI: ก, ก (after)

```
              N Median
ก             20 94.650
ก (after)     15 95.120


Point estimate for ETA1-ETA2 is -0.530
95.3 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-0.970,-0.330)
W = 239.5
Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 < ETA2 is significant at
0.0000
The test is significant at 0.0000 (adjusted for
ties)
```

รูปที่ 57 ผลการทดสอบ Mann-Whitney U Test ระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง

จากรูปที่ 57 ผลการทดสอบเป็นที่ชัดเจนว่าค่ามัธยฐานของโรงงาน ก ก่อนการปรับปรุงน้อยกว่าค่ามัธยฐานของโรงงานหลังการปรับปรุง ดังนั้นสรุปได้ว่าการปรับปรุงครั้งนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดน้ำอ้อยได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการปรับปรุงกระบวนการสกัดน้ำอ้อยของชุดลูกหีบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลของโรงงานผลิตน้ำตาลครั้งนี้ ได้เลือกกลุ่มโรงงานผลิตน้ำตาลเพื่อเปรียบเทียบหาโรงงานที่ดำเนินกระบวนการสกัดน้ำอ้อยได้ดีที่สุดในกลุ่ม โดยใช้ค่า Pol Extraction เป็นดัชนีชี้วัดและเก็บข้อมูลย้อนหลังไป 2 ฤดูกาลผลิต อย่างไรก็ตามข้อมูลที่มาจากการดำเนินการจริงอาจมีข้อผิดพลาดจากการเก็บข้อมูล การจดบันทึก หรือการไม่สามารถตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลได้มากนัก ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างระมัดระวังและอาศัยทฤษฎีการวิเคราะห์ที่หลากหลาย เช่น การตรวจสอบการกระจายปกติ การทดสอบสมมติฐานแบบไม่ใช้พารามิเตอร์ การแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปการกระจายแบบปกติ และการวิเคราะห์การถดถอย เป็นต้น ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผล

1. จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าข้อมูลประสิทธิภาพของโรงงานส่วนใหญ่ไม่ได้มีการกระจายแบบปกติ ทั้งนี้อาจมาจากหลายสาเหตุ จำนวนข้อมูลที่ไม่เพียงพอก็อาจเป็นหนึ่งสาเหตุจากหลาย ๆ สาเหตุ อย่างไรก็ดีเมื่อใช้การทดสอบสมมติฐานแบบไม่ใช้พารามิเตอร์ Kolmogorov-Smirnov Test สำหรับกลุ่ม และ Mann-Whitney U Test สำหรับทดสอบรายคู่ พบว่าในแต่ละฤดูการผลิตมีประสิทธิภาพการหีบสกัดน้ำอ้อยเป็นไปตามเป้าหมาย (95%) แต่โรงงาน ก ซึ่งเป็นโรงงานตัวอย่างยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเป้าหมายทั้งสองฤดูการผลิต แต่จากฤดูที่ 1 ไปฤดูที่ 2 พบว่า โรงงาน ค ได้มีการปรับปรุงในทางที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและมีการปรับตั้งปัจจัยที่ควบคุมได้ที่แตกต่างจากโรงงาน ก อย่างชัดเจน การวิจัยครั้งนี้จึงเลือกโรงงาน ค เป็นโรงงานที่ปฏิบัติงานได้ดีที่สุด (Best practice)

2. จากข้อที่ 1 เมื่อเลือกโรงงานที่ปฏิบัติงานได้ดีที่สุดแล้วจึงทำการศึกษาทั้งปัจจัยที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ในทางปฏิบัติ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอย แต่เนื่องจากข้อมูลประสิทธิภาพมิได้มีการแจกแจงแบบปกติ ผู้วิจัยจึงเลือกการแปลงของมูลแบบ Box-Cox Method และทำการตรวจสอบการกระจาย พบว่าสามารถอธิบายได้ด้วยการกระจายแบบปกติ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์การถดถอยทีละปัจจัยจนพบ 3 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญในทางสถิติ คือ Fiber % cane, Trash % cane, และ % Burned cane ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์การถดถอยพร้อมกันทั้งสามตัวแปรต้น Multi Linear Regression Analysis และพบว่าตัวแบบการถดถอยดังกล่าวสามารถอธิบาย

ความสัมพันธ์เชิงถดถอยได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีค่า R-Sq (adj) = 33.8% ซึ่งถือว่าพอใช้ได้ จากนั้นผู้วิจัยได้ตั้งค่าเป้าหมายของการดำเนินการหีบสกัดน้ำอ้อย โดยศึกษาจากข้อมูลโรงงาน ค และสรุปได้ดังนี้ ค่า Fiber % cane ไม่เกิน 12.00% ค่า Trash % cane ไม่เกิน 5.20% และ % Burned cane ไม่เกิน 41.50% ซึ่งถึงแม้ค่าดังกล่าวในทางปฏิบัติแล้วอาจไม่สามารถควบคุมได้ เนื่องจากเป็นค่าของวัตถุดิบที่ส่งเข้าสู่โรงงาน แต่ค่าดังกล่าวฝ่ายปฏิบัติการได้กำหนดไว้เพื่อเป็นค่าเป้าหมาย (Target) และจากการเก็บข้อมูลของฤดูการผลิตล่าสุดจำนวน 15 ค่า พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 95.28% และค่ามัธยฐานเท่ากับ 95.12 (ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายของการวิจัยครั้งนี้) และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลประสิทธิภาพของโรงงานตัวอย่างในฤดูก่อนหน้านั้นพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การใช้ผลการศึกษาครั้งต้องเป็นไปด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากยังมีปัจจัยอีกหลายปัจจัยที่อาจส่งผลถึงประสิทธิภาพการหีบสกัดน้ำอ้อย โดยเฉพาะประเด็นของวัตถุดิบที่เข้าสู่โรงงาน เช่น พันธุ์อ้อย ระยะเวลาตั้งแต่การตัดอ้อยจนถึงการส่งเข้าสู่โรงงาน เป็นต้น

2. ผลการศึกษาครั้งนี้ไม่สามารถใช้ได้กับโรงงานอื่น หรือโรงงานในลักษณะเดียวกัน แต่วิธีการศึกษา รวมถึงทฤษฎีและเทคนิคในการศึกษาครั้งนี้สามารถปรับใช้กับโรงงานอื่นในลักษณะเดียวกันได้

มหาวิทยาลัยศิลปากร

รายการอ้างอิง

กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. (2542). *สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 2*. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

ดำรง อินทรเสนา และ ศุภชัย ปทุมนากุล. (2554). *การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตน้ำตาล โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการบำรุงรักษาทวีผลแบบทุกคนมีส่วนร่วม กรณีศึกษา: บริษัทรวมเกษตรกรอุตสาหกรรม จำกัด (สาขามิตรภูเวียง)*. เข้าถึงเมื่อ 25 มกราคม 2563. เข้าถึงได้จาก https://so04.tci-thaijo.org/index.php/mbakkujournal/article/view/64706/ 53079.

ตฤษฐพร แก้วสุก. (2554). *การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลจากอ้อยในกระบวนการหีบสกัด*. เข้าถึงเมื่อ 25 มกราคม 2563. เข้าถึงได้จาก http://www.rdi.rmutsb.ac.th/.

เทคนิคสิ่งแวดล้อมไทย. (2561). *รายงานผลการปฏิบัติตามมาตรการด้านสิ่งแวดล้อม "โครงการโรงงานน้ำตาลกาฬสินธุ์ (ส่วนขยาย)"*. เข้าถึงเมื่อ มีนาคม 2564. เข้าถึงได้จาก http://eia.onep.go.th/images/monitor/1548772669.pdf.

ไทยชูการ์มิลเลอร์. (ม.ป.ป). *กระบวนการลิตน้ำตาทราย*. เข้าถึงเมื่อ มกราคม 2564. เข้าถึงได้จาก https://www.thaisugarmillers.com/tsmc-02-02.html.

นาถวุฒิ เสาสูง และ พัลธมาส เชตุพันธ. (2561). *เทคโนโลยีการผลิตน้ำตาลทราย*. (สื่อการสอน). เข้าถึงเมื่อ 25 มกราคม 2563. เข้าถึงได้จาก http://km.ocsb.go.th/Uploads/11092018-เทคโนโลยีน้ำตาลศอภ.๑%20KM.pdf

บริษัท เอนเนอจี 789 จำกัด. *เครื่องย่อยอเนกประสงค์*. เข้าถึงเมื่อ มีนาคม 2564 เข้าถึงได้จาก http.//www.mch789.com/th/galleries/70357-งานติดตั้งเครื่องสับย่อยอเนกประสงค์-จ.นครปฐม.

ประเทือง โชคประเสริฐ. (2542). *การเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลของโรงงานน้ำตาล. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต*. วิทยาศาสตร์ (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร), กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุภชัย นาทะพันธ์. (2547). *ความน่าจะเป็นและสถิติ*. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. (2553). *น้ำตาลซูโครส*. เข้าถึงเมื่อ มกราคม 2564. เข้าถึงได้จาก http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0978/sucrose-ซูโครส.

สมบัติ ขอทวีวัฒนา. (2546). *เทคโนโลยีน้ำตาล*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 70-76, 111-180.

สมบัติ ขอทวีวัฒนา, ไพศาล วุฒิจำนงค์ และ สิริวัฒนา จิตตรีพล. (ม.ป.ป). *รายงานโครงการศึกษาปรับปรุงประสิทธิภาพการสกัดน้ำตาลจากอ้อย*. กรุงเทพฯ: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สายชล สินสมบูรณ์ทอง. (2547). *สถิติวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ: จามจุรี โปรดักส์.

สำนักงานอาหารและยา. (2558). *น้ำตาลในเครื่องดื่ม*. เข้าถึงเมื่อ 25 มกราคม 2563. เข้าถึงได้จาก http://food.fda.moph.go.th/data/document/2558/CS_sugar.pdf.

สุทิน พลบูรณ์, รณฤทธิ จันทร์ศิริ, สรวินท์ ปูคะภาค, และ วิภา เหลืองบุตรนาค. (2561). *อิทธิพลความเร็วรอบของชุดหีบอ้อยที่มีต่อปริมาณน้ำอ้อยที่ได้จากเครื่องหีบอ้อย*. เข้าถึงเมื่อ มีนาคม 2564. เข้าถึงได้จาก https://tdc.thailis.or.th/tdc/dccheck.php?Int_code=52&RecId=35034&obj_id=20372.

ห้องปฏิบัติการค่าทางน้ำตาล และสารอนุพันธ์. (2562). *ชนิดของน้ำตาล*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. เข้าถึงเมื่อ มกราคม 2563. เข้าถึงได้จาก https://www.csdlabservices.com/2019/article-2/.

อัจฉริยา บัวทอง, สมหมาย ปรีเปรม, และ ชนกนันท์ สุขกำเนิด. (2557). *การพัฒนาแบบจำลองสมดุลมวลและพลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาล*. เข้าถึงได้จาก http://www.tsme.org/home/phocadownload/MENETT28/ETM/the%20model%20development%20of%20mass%20and%20energy%20balance%20for%20a%20sugar%20mill%20etm-90.pdf.

Medthai. (2557). *น้ำตาล สรรพคุณและประโยชน์ของน้ำตาล 14 (Sugar)*. เข้าถึงเมื่อ 25 มกราคม 2564. เข้าถึงได้จาก http://medthai.com/น้ำตาล/

Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2006). *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons.

ภาคผนวก

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 14 ก.1 ข้อมูลฤดูที่ 1

Pol Extraction				Fiber % cane				Pol % cane				C.C.S.				Trash % cane				% Burned cane			
ก	ข	ค	ง	ก	ข	ค	ง	ก	ข	ค	ง	ก	ข	ค	ง	ก	ข	ค	ง	ก	ข	ค	ง
95.20	95.21	92.80	96.22	13.12	13.51	13.71	13.77	10.67	11.10	8.09	13.98	9.28	9.67	11.15	12.30	15.49	5.84	5.43	12.60	65.47	51.86	40.43	55.92
94.01	93.13	94.22	96.10	13.17	13.56	13.72	13.77	10.92	11.52	8.11	13.56	9.36	9.66	11.08	12.60	15.76	5.77	5.44	12.62	60.23	53.62	40.44	57.36
94.25	95.35	93.51	95.50	13.13	13.55	13.65	13.81	10.55	10.95	8.13	14.01	9.42	9.60	11.13	12.61	15.83	5.63	5.35	12.66	60.23	61.32	45.39	59.42
93.71	95.22	93.84	95.35	13.11	13.21	13.70	13.76	10.43	11.43	8.24	14.08	9.25	9.32	11.20	12.52	15.76	5.55	5.42	12.56	60.43	61.92	43.29	49.46
94.21	95.11	92.93	95.26	13.17	13.33	13.77	13.72	10.21	11.44	8.11	14.00	9.13	9.56	11.16	12.47	15.82	5.63	5.94	12.28	61.53	70.46	45.00	69.23
94.05	95.63	92.81	95.51	13.13	13.55	13.59	13.77	10.45	11.50	8.45	13.92	9.25	9.43	11.25	12.56	15.34	5.87	6.01	12.61	68.00	69.06	46.34	61.23
94.28	95.52	93.55	95.68	13.05	13.56	13.60	13.72	10.65	11.46	8.23	13.92	9.33	9.50	11.22	12.60	15.19	5.92	5.64	12.42	67.66	69.45	50.92	63.45
93.30	94.98	92.84	94.87	13.23	13.49	13.72	13.71	10.56	11.43	8.14	13.94	9.28	9.62	11.15	12.43	15.22	5.64	5.66	12.22	68.93	70.89	55.63	59.23
92.78	84.89	92.28	94.87	13.13	13.55	13.80	13.70	10.67	11.56	8.15	13.93	9.40	9.63	11.08	12.33	15.36	5.32	5.47	12.52	70.59	70.93	54.66	58.22
94.41	95.80	94.16	95.56	13.09	13.62	13.71	13.70	10.94	11.08	8.26	13.50	9.36	9.43	11.30	12.66	15.35	5.45	5.35	12.32	70.86	71.55	51.22	60.91
94.22	95.55	92.82	95.68	13.15	13.52	13.75	13.75	11.02	10.87	8.15	13.94	9.45	9.22	11.25	12.60	15.86	5.66	5.32	12.43	70.66	71.23	55.13	65.21
93.25	95.61	92.93	96.18	13.17	13.38	13.68	13.79	10.94	11.50	8.13	14.05	9.32	9.23	11.13	12.37	15.94	5.67	5.64	12.62	70.65	70.56	49.12	65.24
92.25	95.32	93.41	95.69	13.13	13.55	13.65	13.79	10.86	11.55	8.25	14.00	9.55	9.25	11.21	12.62	15.82	5.64	5.85	12.33	70.94	71.95	55.23	63.00
94.36	95.65	92.55	95.82	13.17	13.65	13.70	13.78	10.78	11.52	8.16	14.08	9.60	9.35	11.19	12.66	15.88	5.65	5.64	12.35	71.08	71.92	45.39	77.89
94.21	95.61	94.16	95.55	13.18	13.56	13.70	13.73	10.69	11.53	8.13	14.12	9.32	9.36	11.20	12.57	15.78	5.69	5.66	12.55	71.43	71.59	46.55	70.23
94.11	95.23	92.15	94.91	13.18	13.55	13.77	13.71	10.82	11.46	8.19	13.95	9.34	9.65	11.17	12.49	15.85	5.69	5.95	12.56	71.55	71.66	54.33	71.22
92.22	94.91	92.54	95.53	13.19	13.26	13.71	13.72	11.05	11.34	8.20	13.96	9.33	9.60	11.23	12.53	15.34	5.67	5.43	12.56	71.43	71.92	54.78	79.52
94.38	94.86	92.64	96.36	13.13	13.49	13.70	13.78	11.12	11.61	8.25	13.87	9.36	9.56	11.25	12.50	15.35	5.35	5.23	12.60	70.46	71.93	54.65	80.00
94.21	95.25	92.81	95.64	13.13	13.56	13.75	13.65	11.05	11.50	8.23	13.88	9.32	9.72	11.22	12.62	15.65	5.74	5.45	12.61	70.45	71.05	55.32	78.22
94.21	95.10	93.82	95.55	13.21	13.60	13.77	13.79	10.87	11.56	8.17	13.86	9.32	9.64	11.24	12.49	15.73	5.77	5.63	12.53	71.65	71.66	55.43	72.00
Mean				Mean				Mean				Mean				Mean				Mean			
93.88	94.70	93.14	95.59	13.15	13.50	13.71	13.75	10.76	11.40	8.19	13.93	9.35	9.50	11.19	12.53	15.62	5.66	5.58	12.50	68.21	68.33	49.96	65.85
Median				Median				Median				Median				Median				Median			
94.21	95.24	92.89	95.56	13.14	13.55	13.71	13.76	10.80	11.48	8.17	13.95	9.33	9.56	11.20	12.55	15.75	5.67	5.55	12.56	70.53	70.99	51.07	64.33

ตารางที่ 15 ก.2 ข้อมูลฤดูที่ 2

Pol Extraction				Fiber % cane				Pol % cane				C.C.S.				Trash % cane				% Burned cane			
ก	ข	ค	ง	ก	ข	ค	ง	ก	ข	ค	ง	ก	ข	ค	ง	ก	ข	ค	ง	ก	ข	ค	ง
94.88	96.70	97.18	95.03	13.18	13.19	11.46	12.42	11.95	11.60	12.38	14.75	10.52	9.61	10.81	13.39	16.89	6.41	4.95	5.44	67.92	30.07	37.11	55.62
94.76	96.57	97.09	95.13	13.24	13.13	12.02	12.42	11.98	11.56	12.13	14.89	10.59	9.72	10.76	13.21	14.95	6.75	5.01	5.43	67.25	30.15	41.32	51.15
94.49	96.65	97.42	95.08	13.22	13.15	11.53	12.40	11.82	11.55	12.24	14.91	10.63	9.63	10.72	13.40	15.76	5.93	4.25	5.68	67.34	31.25	34.21	52.22
94.59	96.66	97.32	94.79	13.12	13.15	11.67	12.34	11.73	11.61	12.41	14.83	10.51	9.51	10.71	13.11	17.36	6.56	4.36	5.13	66.58	30.16	35.57	59.32
94.65	95.59	97.51	95.05	13.25	13.16	11.56	12.32	11.84	11.67	12.33	14.56	10.46	9.52	10.49	13.12	16.65	6.73	4.92	5.98	67.72	28.53	36.55	56.50
94.66	95.88	97.15	95.44	13.13	13.11	11.24	12.17	11.88	11.62	12.28	14.59	10.49	9.65	10.55	13.23	16.32	7.05	5.02	6.14	66.95	28.74	36.51	55.56
94.65	96.08	97.43	95.21	13.14	13.17	11.25	12.20	12.05	11.63	12.32	14.67	10.49	9.66	10.80	13.22	15.72	7.08	4.22	5.77	67.32	29.35	33.61	55.78
94.67	96.52	97.16	95.14	13.25	13.16	11.22	12.53	12.12	11.72	12.39	14.69	10.60	9.73	10.79	13.46	15.83	6.98	5.11	5.20	67.82	30.13	36.55	56.32
94.98	96.66	97.25	95.12	13.11	13.08	11.65	12.52	11.80	11.70	12.26	14.62	10.61	9.24	10.74	13.39	15.92	6.83	4.87	5.11	66.92	28.69	36.54	56.43
95.32	96.78	97.25	95.06	13.11	13.09	11.50	12.37	11.75	11.68	12.40	14.58	10.57	9.81	10.64	13.37	15.46	6.57	4.36	5.32	67.96	29.64	35.55	54.44
94.66	96.72	97.12	95.17	13.25	13.21	11.65	12.36	11.81	11.53	12.30	14.51	10.48	9.73	10.72	13.33	15.55	6.30	4.22	5.78	66.58	29.75	36.79	55.69
94.35	96.52	97.22	95.01	13.22	13.25	11.79	12.23	11.82	11.49	12.37	14.47	10.43	9.76	10.89	13.41	16.19	6.22	4.58	4.96	67.86	31.22	37.89	55.17
94.62	95.59	97.53	95.01	13.23	13.22	11.13	12.17	11.67	11.62	12.39	14.53	10.44	9.38	10.79	13.40	16.89	6.75	4.12	5.35	67.29	32.35	34.32	55.53
94.55	95.89	97.22	94.89	13.40	13.21	11.63	12.35	11.63	11.69	12.25	14.59	10.61	9.46	10.53	13.39	17.05	6.53	4.72	5.93	67.57	32.14	34.56	54.21
94.49	96.00	97.58	94.99	13.21	13.17	11.22	12.60	11.78	11.64	12.24	14.61	10.75	9.88	10.72	13.27	18.11	6.39	4.89	6.17	66.54	29.83	36.46	52.55
94.63	96.12	97.26	95.02	13.17	13.08	11.43	12.66	11.77	11.39	12.36	14.66	10.77	9.70	10.88	13.25	17.59	6.27	4.88	5.78	66.73	30.16	40.12	51.16
94.52	96.23	97.71	95.13	13.12	13.09	11.32	12.34	11.80	11.35	12.47	14.62	10.82	9.75	10.67	13.22	16.90	6.11	4.56	5.92	67.81	29.42	34.35	55.14
94.65	96.28	97.13	95.10	13.11	13.11	11.74	12.38	11.82	11.58	12.31	14.60	10.69	9.68	10.77	13.64	17.11	6.53	5.18	5.21	67.92	31.11	36.94	53.06
94.66	96.38	97.34	95.09	13.15	13.12	11.64	12.56	11.81	11.61	12.37	14.89	10.63	9.54	10.79	13.50	17.98	6.01	4.17	5.08	67.87	30.17	36.42	55.17
94.35	96.49	97.43	95.05	13.13	13.13	11.25	12.63	11.80	11.64	12.32	14.79	10.52	9.63	10.80	13.49	19.17	6.09	4.22	5.16	67.35	29.91	33.61	54.32
Mean				Mean				Mean				Mean				Mean				Mean			
94.66	96.32	97.32	95.08	13.19	13.15	11.50	12.40	11.83	11.59	12.33	14.67	10.58	9.63	10.73	13.34	16.67	6.50	4.63	5.53	67.37	30.14	36.25	54.77
Median				Median				Median				Median				Median				Median			
94.65	96.44	97.26	95.07	13.18	13.15	11.52	12.38	11.81	11.62	12.33	14.62	10.58	9.66	10.75	13.38	16.77	6.53	4.65	5.44	67.35	30.10	36.49	55.17

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวจุฑาทิพย์ ชาติชูศักดิ์
วัน เดือน ปี เกิด	19 พฤษภาคม 2535
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลศิริราช กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	- ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ม.3 โรงเรียนวัดเขมาภิรตาราม ปี 2547 เกรดเฉลี่ยสะสม 3.85 - ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ม.6 โรงเรียนวัดเขมาภิรตาราม ปี 2552 เกรดเฉลี่ยสะสม 3.70 - ระดับปริญญาตรี วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ปี 2556 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เกรดเฉลี่ยสะสม 2.88
ที่อยู่ปัจจุบัน	55/318 หมู่ 15 หมู่บ้าน ช.รุ่งเรือง 5 ถนนรัตนาธิเบศร์ ตำบลบางรักพัฒนา อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี รหัสไปรษณีย์ 11110

มหาวิทยาลัยศิลปากร