

แบบจำลองการใช้พลังงานของเครื่องหีบสกัดอ้อย

Applied Surrogate Model: Energy Consumption of a Sugar Milling Machine

ธวัชชัย สุวรรณเวียง (Thawatchai Suwanwiang)* ดร.สุจินต์ บุรีรัตน์ (Dr.Sujin Bureeet)**

กิตตินันท์ วันสาสือบ (Kittinan Wansasueb)^{1***}

(Received: September 3, 2020; Revised: November 6, 2020; Accepted: November 11, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์พลังงานของเครื่องหีบสกัดแบบต่อเนื่อง 5 ชุดในกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานน้ำตาลกุมภวาปี เพื่อเพิ่มศักยภาพของกระบวนการผลิตน้ำตาล ซึ่งประกอบด้วยการเพิ่มความแม่นยำและความรวดเร็ว หรือลดความซับซ้อนของขั้นตอนในการวิเคราะห์ เป็นต้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อระบุแบบจำลองที่เหมาะสมกับการทำนายพฤติกรรมการใช้พลังงานของเครื่องหีบสกัดอ้อยจากการปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานของเครื่อง เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการลดการใช้พลังงานของเครื่องหีบ โดยแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ คริกจิง (Kriging, KRG), การประมาณค่าในช่วงฐานแนวนรัศมี (Radial basis function, RBF) และ ขั้นตอนวิธีการเคเนียร์สเนเบอร์ฮูด (k-nearest neighborhood, KNN) และข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนจากโรงงานน้ำตาลจะถูกคัดกรองด้วยเทคนิคการจัดกลุ่มแบบเคมีน (k-mean clustering technique) ก่อนนำไปใช้สร้างแบบจำลอง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าแบบจำลองทั้งหมดสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการใช้พลังงานของเครื่องหีบอ้อยได้โดยมีความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองอยู่ในช่วง 4.9808-12.5044.

ABSTRACT

This article presents improvement of sugarcane milling machine energy consumption estimation. The case study is carried out at The Kumphawapi Sugar Co., Ltd. manufactory, Udonthani. This work is aimed at sufficiently accurate surrogate models, which can be used in practice for improving the rate of energy consumption for the sugarcane milling machines. Several surrogate models including radial basis function (RBF) interpolation, a Kriging (KRG) model, and a k-nearest neighborhood (KNN) method. A set of sampling points is collected from the plant operation data by using a k-mean clustering technique where input variables include, for instance, the milling machine parameter settings, and sugarcane properties. The results reveal that most of the implemented surrogate models can accurately predict the sugarcane milling machine energy consumption while the root mean square percentage errors range between 4.9808 and 12.5044.

คำสำคัญ: แบบจำลองกระบวนการหีบสกัด ค่าความสูญเสียของงานอ้อย พลังงานความร้อนต่อผลผลิต

Keywords: Surrogate models, Sugarcane milling machine energy consumption estimation, Consumption rate of milling machine

¹ Corresponding author: kittinan_w@kkumail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

อุตสาหกรรมน้ำตาลในประเทศไทย มีความต้องการพลังงานในการผลิตน้ำตาลทรายปริมาณเฉลี่ยสูงถึง 1,330 MJ/TCD ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสากล โดยมีค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานที่ 1028-1349 MJ/TCD [1] ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายนั้นจะประกอบด้วย กระบวนการหีบสกัด, กระบวนการต้ม, กระบวนการเคี้ยวและกระบวนการปั่น โดยในแต่ละกระบวนการนั้นมีความต้องการพลังงานจำนวนมาก ทั้งพลังงานความร้อนจากไอน้ำและพลังงานไฟฟ้า จากกระบวนการทั้งหมดของการผลิตน้ำตาลพบว่า กระบวนการหีบสกัดเป็นกระบวนการที่มีความต้องการพลังงานสูงที่สุด [2] โดยพลังงานที่ใช้ในกระบวนการหีบสกัดแทบทั้งหมดจะถูกใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรขนาดใหญ่ เช่น สายพานลำเลียง, ชุดหีบหรือเครื่องหีบสกัด และปั๊มน้ำ เป็นต้น เนื่องจากเครื่องหีบสกัดอ้อยเป็นเครื่องจักรที่มีความต้องการพลังงานในการขับเคลื่อนมากที่สุด โดยจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ อาทิเช่น ปริมาณอ้อยเข้าหีบต่อวัน, ค่าความสูญเสียของชานอ้อย, ร้อยละของการหีบสกัดอ้อย, ร้อยละของชานอ้อยในอ้อย และค่าแรงกดอัดของชุดหีบสกัด เป็นต้น การศึกษาปัจจัยต่างๆดังกล่าวจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการหีบอ้อยในโรงงาน

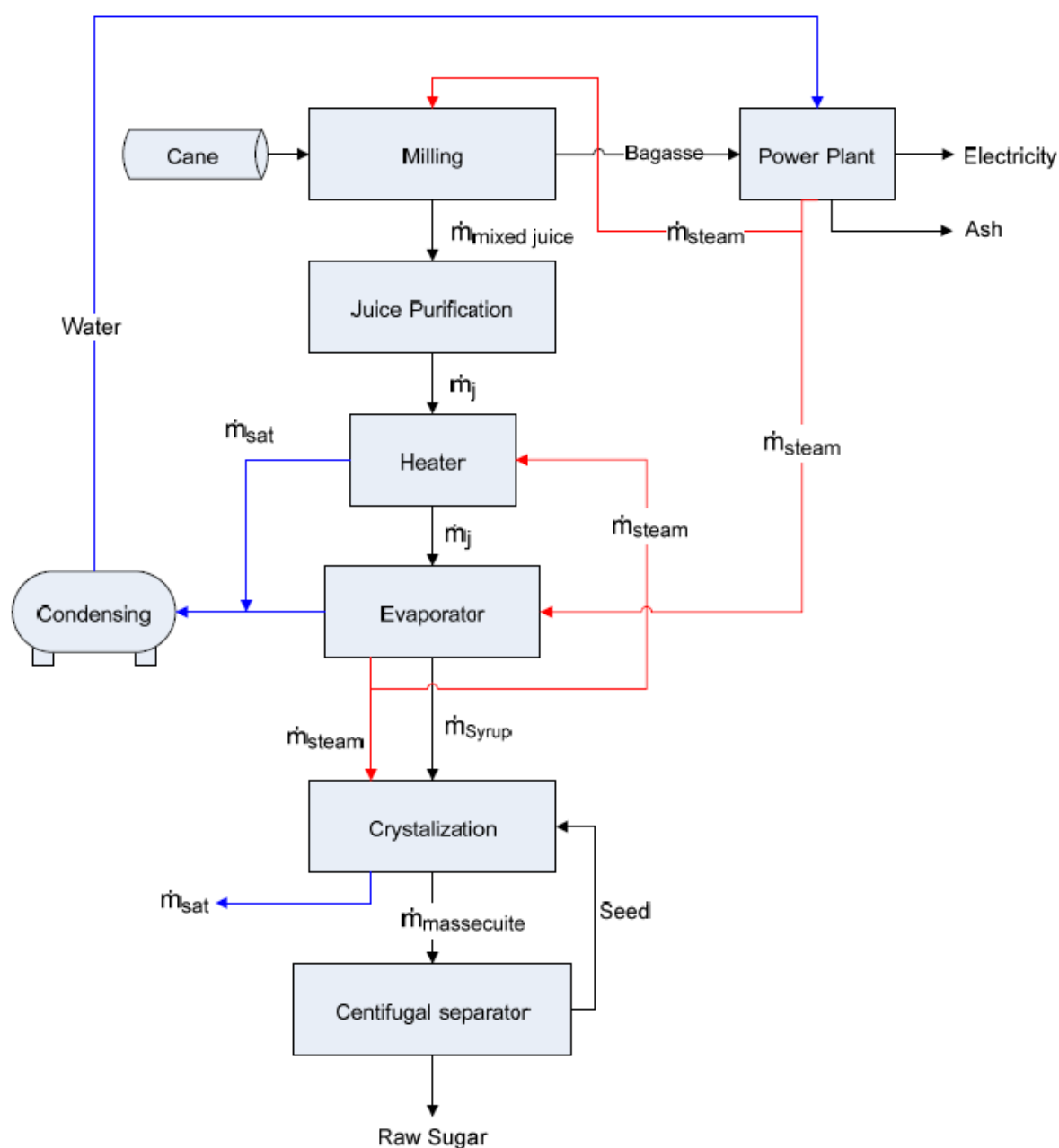
ในทางวิศวกรรม การตั้งค่าอุปกรณ์หรือเครื่องจักรต่างๆในโรงงานนั้นมีความสำคัญมาก ค่าตัวแปรต่างๆต้องมาจากการวิเคราะห์และคำนวณอย่างเป็นระบบ ซึ่งทั่วไปจะค่อนข้างใช้เวลานาน และในบางสถานการณ์อาจไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แบบจำลองตัวแทนจึงเข้ามามีบทบาทในงานเหล่านี้ และเริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้นเรื่อยๆ ในสายงานทางวิศวกรรม ตัวอย่างเช่น งานของไหลและแลกเปลี่ยนความร้อน [3-4] งานออกแบบโครงสร้าง [5] งานโลหิตวิทยา [6] ไปจนถึงงานออกแบบอากาศยาน [7] จะเห็นว่าแบบจำลองตัวแทนสามารถใช้วิเคราะห์ระบบต่างๆในทางวิศวกรรมได้อย่างหลากหลาย และเป็นประเด็นวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของการใช้พลังงานของเครื่องหีบสกัดอ้อยกับปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานดังกล่าว โดยจะเป็นการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาแบบจำลองทดแทน (Surrogate model) ที่มีประสิทธิภาพในการทำนายพฤติกรรมการใช้พลังงานของเครื่องหีบอ้อยสูงที่สุด โดยในงานวิจัยจะศึกษาแบบจำลองทั้งหมด 3 รูปแบบได้แก่ คริกจิง (Kriging, KRG), การประมาณค่าในช่วงฐานแนวรัศมี (Radial basis function, RBF) และ ขั้นตอนวิธีการเคเนียร์สเนเบอร์สุด (k-nearest neighborhood, KNN). ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนั้นจะเป็นข้อมูลการหีบอ้อยจากโรงงานผลิตน้ำตาลกุ่มกวาปี The Kumphawapi Sugar Co., Ltd. โดยจะคัดเลือกมาบางส่วนเพื่อใช้ในการสร้างและตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเพื่อใช้ระบุแบบจำลองทดแทนที่เหมาะสม ข้อมูลการหีบอ้อยดังกล่าวข้างต้นและวิธีการคัดเลือกข้อมูลจะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 2 และทฤษฎีการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้ทั้งหมดจะอยู่ในหัวข้อที่ 3 ในส่วนของผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองจะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 4 ส่วนหัวข้อสุดท้ายของบทความจะเป็นการสรุปผล

วิธีการคัดเลือกข้อมูลการหีบสกัดอ้อย

กระบวนการผลิตน้ำตาล

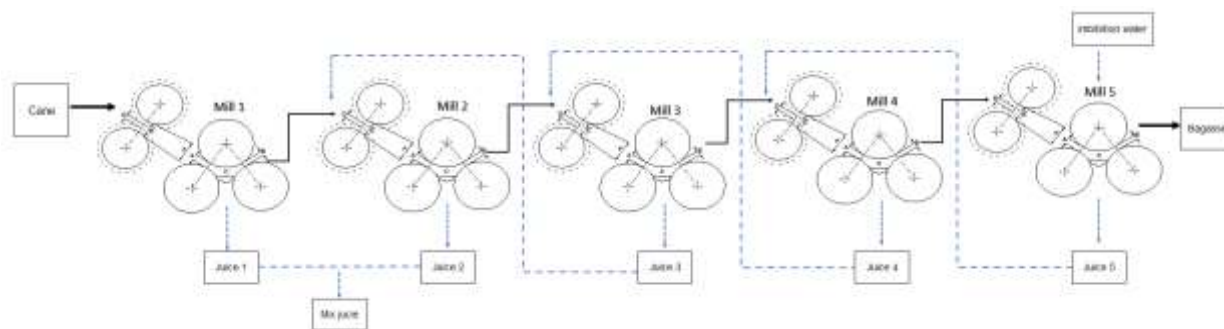
กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายในอุตสาหกรรมน้ำตาลประกอบไปด้วย กระบวนการหีบสกัด, กระบวนการทำใส, กระบวนการต้มระเหย, กระบวนการเคี้ยว และกระบวนการปั่นแยกผลึกน้ำตาล [8-9] ดังแสดงภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตน้ำตาล [10]

1. การหีบสกัดน้ำอ้อย (Mill)

โรงงานน้ำตาลทั่วไปจะใช้ชุดลูกหีบติดตั้งเป็นแถวต่อเนื่องกัน อาจประกอบด้วยชุดลูกหีบตั้งแต่ 4-5 ชุดขึ้นไป ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานไอน้ำ [11] ลูกหีบหนึ่งชุดประกอบไปด้วยลูกกลิ้ง 3 ลูกและลูกป้อน 2 ลูก เพื่อช่วยจับอ้อยที่ป้อนเข้ามาและคายออกไป และช่วยสกัดน้ำอ้อยระบายลงรางรับน้ำอ้อยให้ได้มากที่สุด ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลูกหีบสกัดแบบ 5 ชุด ของโรงงานน้ำตาลที่ทำการศึกษา

2. การเพิ่มอุณหภูมิและทำใส (Clarification)

การเพิ่มอุณหภูมิและทำใสเป็นการคัดแยกสิ่งเจือปนในน้ำอ้อยออกก่อนเข้าสู่กระบวนการคั้นน้ำเชื่อม โดยการผสมกับน้ำปูนขาวลงไปใต้น้ำอ้อยแล้วทำการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้าๆ จาก 45 องศาเซลเซียสไปอุณหภูมิถึง 105 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้เกิดการตกตะกอน

3. การต้มระเหยน้ำอ้อย (Evaporation)

น้ำอ้อยมีความใสต่ำกว่า 15 NTU จะเข้าสู่กระบวนการต้มระเหยโดยการต้มแบบหม้อต้ม Effect คือการต้มเรียงกันเป็นชุด โดยใน 1 ชุดมีหม้อต้ม 4-5 ใบ วิธีการนี้ใช้พลังงานไอน้ำเพื่อเพิ่มอุณหภูมิเฉพาะหม้อต้มลำดับที่ 1 เท่านั้น หลังจากนั้นจะใช้พลังงานความร้อนจากไอน้ำที่ได้จากการระเหยของน้ำอ้อยในหม้อลำดับก่อนหน้าและใช้กระบวนการเช่นนี้ไปจนถึงหม้อต้มสุดท้าย ซึ่งหม้อสุดท้ายจะเป็นการต้มระเหยแบบสูญญากาศเพื่อลดการสูญเสียพลังงานในระบบ

4. การเคี้ยว (Crystallization)

น้ำเชื่อมที่ได้จากกระบวนการการต้มระเหยจะถูกส่งเข้าไปยังถังพัก จากนั้นและถูกป้อนเข้าหม้อเคี้ยวโดยตรง ยกเว้นในกรณีที่ต้องการน้ำตาลทรายดิบคุณภาพสูงและเพื่อเพิ่มความสะดวกในการเคี้ยวและปั่น จะต้องมีการทำน้ำเชื่อมให้บริสุทธิ์ก่อน น้ำเชื่อมที่ได้จากการต้มจะถูกลำเรียงเข้าสู่หม้อเคี้ยวระบบสูญญากาศ (Vacuum pan) เพื่อเข้าสู่กระบวนการระเหยน้ำออกจนถึงจุดอิ่มตัว ที่จุดอิ่มตัวผลึกน้ำตาลจะเกิดขึ้นโดยที่ผลึกน้ำตาลและกากน้ำตาลที่ได้จากกระบวนการเคี้ยวนี้ เรียกว่า แมสคิท (Massecuite)

5. การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (Centrifuging)

แมสคิทที่ได้จากการเคี้ยวจะถูกนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาลโดยใช้เครื่องปั่น (Centrifugal) [12] กากน้ำตาลจะแยกตัวจากแมสคิท ผลึกน้ำตาลที่ได้จะเป็นน้ำตาลทรายดิบและถูกนำไปจัดเก็บ เพื่อจำหน่ายหรือทำน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลรีไฟน์ต่อไป

การหีบสกัดน้ำอ้อยและปัจจัยที่ส่งผลต่อการหีบสกัดอ้อย

โดยทั่วไป เครื่องจักรที่ใช้ในการหีบสกัดอ้อยนั้น จะเป็นเครื่องจักรที่ใช้กำลังขับเคลื่อนจากไอน้ำ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการซ่อมบำรุงและการดูแลรักษาตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งในกระบวนการหีบอ้อยจะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องและส่งผลต่อเครื่องหีบอ้อย ได้แก่ ปริมาณการหีบสกัด (Cane weight, ton/hr.), ร้อยละปริมาณเส้นใยในอ้อย, ร้อยละปริมาณน้ำพรอม (Imbibition Water % Cane), ร้อยละปริมาณขานอ้อย (Bagasse % Cane), ร้อยละปริมาณความชื้นในขานอ้อย (Bagasse Moisture), ค่าการหีบสกัด POL Extraction, ค่าแรงกดระหว่างลูกป้อนหีบของแต่ละชุดหีบสกัด(kg/m^3), ค่าแรง

กกระหว่างลูกหีบของแต่ละชุดหีบสกัด(kg/m^3) และค่าแรงกกระหว่างลูกหีบกับหัวของแต่ละชุดหีบสกัด(kg/m^3) โดยในกระบวนการผลิตจะดำเนินภายใต้ค่าควบคุมตามมาตรฐานดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าควบคุมมาตรฐานในการกระบวนการหีบสกัดอ้อย [13]

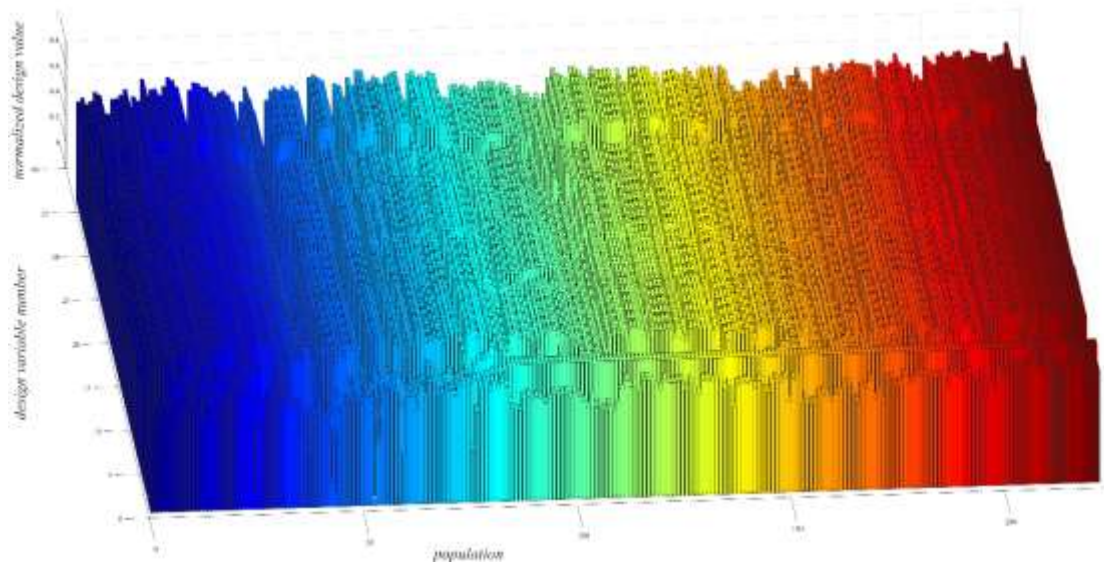
รายการ	ค่าที่ใช้ควบคุมมาตรฐาน
1. ค่าความสูญเสียของชานอ้อย	< 3.93
2. ร้อยละการหีบสกัดอ้อย	> 95
3. ร้อยละชานอ้อยในอ้อย	> 31
4. อัตราการหีบอ้อยต่อชั่วโมง	> 187.5
5. ร้อยละความชื้นในอ้อย	< 50
6. Milling Loss	< 4

ข้อมูลการหีบสกัดอ้อยและการคัดเลือกข้อมูล

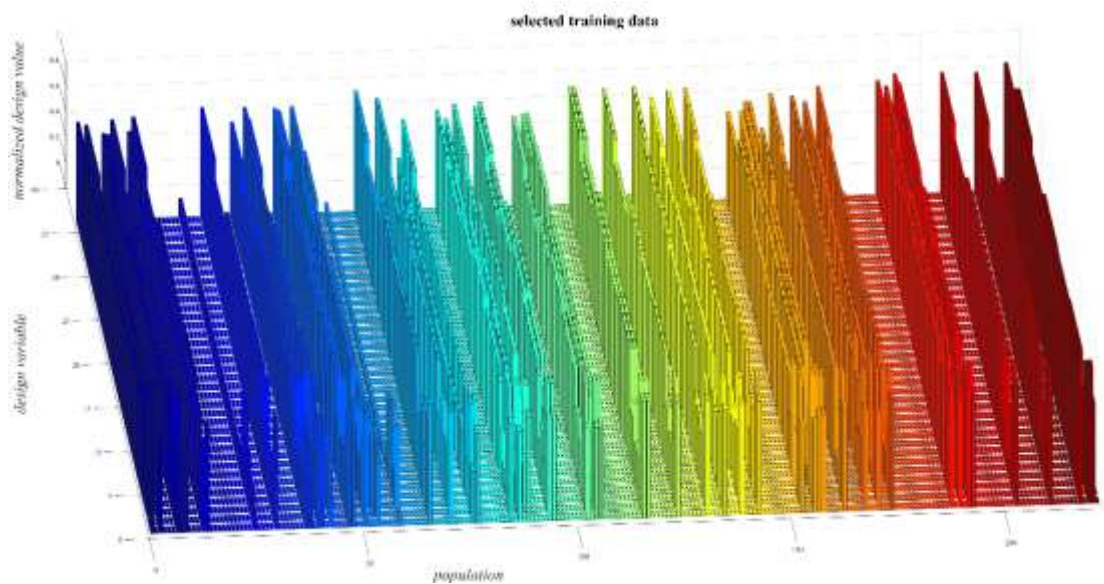
การศึกษานี้จะใช้ข้อมูลการหีบสกัดอ้อยของโรงงานผลิตน้ำตาลกลุ่มกวาปีระหว่างปีพุทธศักราช 2557 ถึงปี 2561 (ภาพที่ 3) โดยข้อมูลจะแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ข้อมูลคุณสมบัติของอ้อย, ข้อมูลค่าตัวแปรที่กำหนดของเครื่องหีบอ้อยทั้ง 5 เครื่อง และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการหีบอ้อย ซึ่งข้อดังกล่าวจะถูกคัดเลือกด้วยเทคนิคการจัดกลุ่มแบบเคมีน (K-means clustering technique) [14] เพื่อป้องกันการซ้ำกันของข้อมูลและเพื่อให้ข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างแบบจำลองมีการกระจายตัวครอบคลุมข้อมูลตัวอย่างอย่างทั่วถึง โดยจะทำการคัดข้อมูลมาเพื่อสร้างแบบจำลองทั้งหมด 25% จากข้อมูลตัวอย่างทั้งหมด (แสดงในภาพที่ 4) ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรต้นทั้งหมดได้ดังนี้

- x_1 คือ ปริมาณการหีบสกัด (Cane weight, ton/hr.)
- x_2 คือ ร้อยละปริมาณเส้นใยในอ้อย (% Fiber)
- x_3 คือ ร้อยละปริมาณน้ำพรอม (Imbibition Water % Cane)
- x_4 คือ ร้อยละปริมาณชานอ้อย (Bagasse % Cane)
- x_5 คือ ค่าการหีบสกัด (% POL Extraction)
- x_6 คือ ร้อยละปริมาตรความชื้นในชานอ้อย (Bagasse Moisture)
- $x_{7,13,19,25,31}$ คือ อัตราการบดอัดระหว่างลูกป้อน (Compaction P.F., kg/m^3) ของลูกหีบชุดที่ 1 ถึง 5
- $x_{8,14,20,26,32}$ คือ อัตราการบดอัดขาเข้าหัวของ (P.F. Compaction Entry, kg/m^3) ของลูกหีบชุดที่ 1 ถึง 5
- $x_{9,15,21,27,33}$ คือ อัตราการบดอัดขาออกหัวของ (P.F. Compaction Exit, kg/m^3) ของลูกหีบชุดที่ 1 ถึง 5
- $x_{10,16,22,28,34}$ คือ อัตราการบดอัดระหว่างลูกหีบบนกับหน้า (P.F. Compaction Feed, kg/m^3) ของลูกหีบชุดที่ 1 ถึง 5
- $x_{11,17,23,29,35}$ คือ อัตราการบดอัดระหว่างลูกหีบบนกับหลัง (P.F. Compaction Delivery, kg/m^3) ของลูกหีบชุดที่ 1 ถึง 5
- $x_{12,18,24,30,36}$ คือ อัตราการบดอัดระหว่างลูกหีบบนกับหัวกลาง (P.F. Compaction Trash Plate, kg/m^3) ของลูกหีบชุดที่ 1 ถึง 5

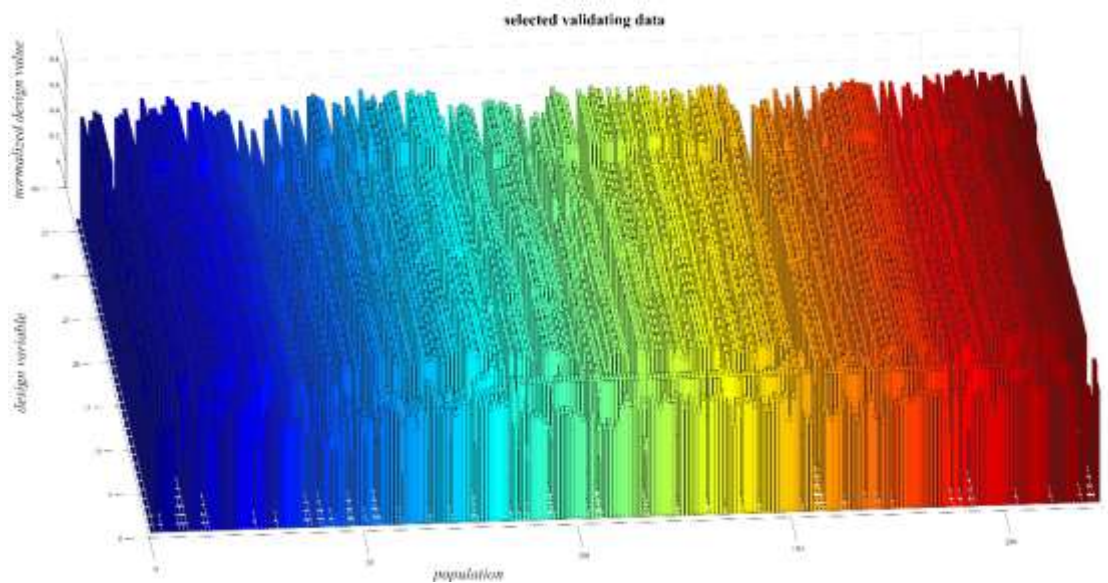
โดยทั้งหมดจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามคือพลังงานที่เครื่องหีบใช้ในการทำงาน (Total work, kW.) และส่วนข้อมูลที่เหลือจะถูกใช้เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองทดแทน โดยชุดข้อมูลถูกแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 3 ข้อมูลตัวแปรต้น (x) ทั้งหมดของเครื่องหีบอ้อย



ภาพที่ 4 ข้อมูลตัวแปรต้น (x) ของเครื่องหีบอ้อยที่ถูกคัดเลือกด้วยเทคนิคการจัดกลุ่มแบบเคมีน



ภาพที่ 5 ข้อมูลตัวแปรต้น (x) ของเครื่องหีบอ้อยที่ใช้เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง

ทฤษฎีแบบจำลองทดแทน

แบบจำลองทดแทน คือ รูปแบบของสมการคณิตศาสตร์ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ในงานทางวิศวกรรมเครื่องกล แบบจำลองตัวแทนที่เป็นที่นิยมใช้จะมีอยู่หลายแบบจำลอง ตัวอย่างเช่น คริกจิง, การประมาณค่าในช่วงฐานแนวรีสมิ, วิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (support vector machine, SVM), วิธีพื้นผิวตอบสนอง (polynomial response surface, PRS) [3] และ ขั้นตอนวิธีการเคเนียร์สเนเบอร์สุด เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ แบบจำลองที่ถูกยกมานำเสนอได้แก่ คริกจิง, การประมาณค่าในช่วงฐานแนวรีสมิ และ ขั้นตอนวิธีการเคเนียร์สเนเบอร์สุด.

คริกจิง

คริกจิง หรือวิธี Gaussian process regression คือวิธีการทำนายค่าเป้าหมายโดยอาศัยเทคนิค Wiener-Kolmogorov prediction พัฒนาโดย Norbert Wiener และ Andrey Kolmogorov ในปี ค.ศ.1960 [15] ปัจจุบันนี้แบบจำลอง Kriging ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยหนึ่งในแบบจำลองที่ถูกพัฒนามาในปัจจุบันได้แก่ parameters estimation via a meta-heuristic for Kriging [16] โดยเป็นการพัฒนาการใช้อัลกอริทึมในการหาค่าตัวแปรในสมการของ Kriging ดังสมการที่ 1 [17]

$$\hat{y} = \mu + \phi^T (U \setminus (U^T \setminus y - \{1\} \times \mu)) \quad (1)$$

เมื่อ

$$\phi = \exp \left(- \sum_{i=1}^n (\theta \times \text{abs}(x_i - x))^{1.99} \right)$$

$$\mu = \frac{\{1\} \times U (U^T \setminus y)}{\{1\} \times U (U^T \setminus \{1\})}$$

$$\theta = 10^9$$

โดยที่ค่า U และค่า θ จะถูกหาโดยอัลกอริทึม The hybrid grey wolf - adaptive differential evolution (GWADE) [16]

การประมาณค่าในช่วงฐานแนวกส์

การประมาณค่าในช่วงฐานแนวกส์ เป็นอีกหนึ่งในวิธีที่นิยมแพร่หลายมากเช่นเดียวกับ Kriging เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถปรับสมการควบคู่ (kernel function) ได้หลากหลาย รูปแบบ โดยสมการตั้งต้นของวิธีนี้แสดงดังสมการที่ 2 [18]

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(\|x - x_i\|) \quad (2)$$

เมื่อ

α_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันที่ต้องการหาค่า

$\|x - x_i\|$ คือ ขนานของระยะห่างของตัวแปรต้น

K คือ สมการควบคู่ (kernel function)

และสมการควบคู่ที่นำเสนอสามารถแบ่งออกเป็น 7 ประเภท ดังนี้ [4,19-22].

1. สมการเชิงเส้น (linear spline) : $K = \|x - x_i\|$
2. สมการลือกกำลังสอง (thin plate spline) : $K = \|x - x_i\|^2 \times \log(\|x - x_i\|)$
3. สมการกำลังสาม (cubic spline) : $K = \|x - x_i\|^3$
4. สมการ Gaussian : $K = \exp(-\varepsilon \times \|x - x_i\|) : \varepsilon = 1e - 5$
5. สมการ Multiquadric : $K = \sqrt{1 + (\varepsilon \times \|x - x_i\|^2)} : \varepsilon = 1e - 5$
6. สมการ Inverse Quadric : $K = \frac{1}{1 + (\varepsilon \times \|x - x_i\|^2)} : \varepsilon = 1e - 5$
7. สมการ Inverse Multiquadric : $K = \frac{1}{\sqrt{1 + (\varepsilon \times \|x - x_i\|^2)}} : \varepsilon = 1e - 5$

ขั้นตอนวิธีการเคเนียร์เสนเบอร์ฮูด

ขั้นตอนวิธีการเคเนียร์เสนเบอร์ฮูด คือ วิธีการทำนายค่าเป้าหมายโดยพิจารณาจากขนาดของระยะห่างของตัวแปรต้นที่พิจารณากับตัวแปรต้นชุดตัวอย่าง [23] แสดงในสมการที่ 3

$$D_i = \sum (x_i - x)^2 \quad (3)$$

แล้วค่าที่เป้าหมายที่ถูกประมาณจะถูกคำนวณจากค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามจากชุดตัวอย่าง โดยพิจารณาตัวที่มีระยะห่างใกล้กับ x ใหม่มากที่สุดและสามารถพิจารณาแบบจำกัดจำนวนเฉพาะที่สนใจได้ด้วยค่า k ดังสมการที่ 4

$$\hat{y} = \text{mean}(\{y_k\}) \quad (4)$$

เมื่อ $\{y_k\}$ คือค่าตัวแปรตามจากข้อมูลชุดตัวอย่างที่มีขนาดระยะห่างใกล้กับค่าตัวแปรต้น ณ ปัจจุบันที่สุดจำนวน k ค่า

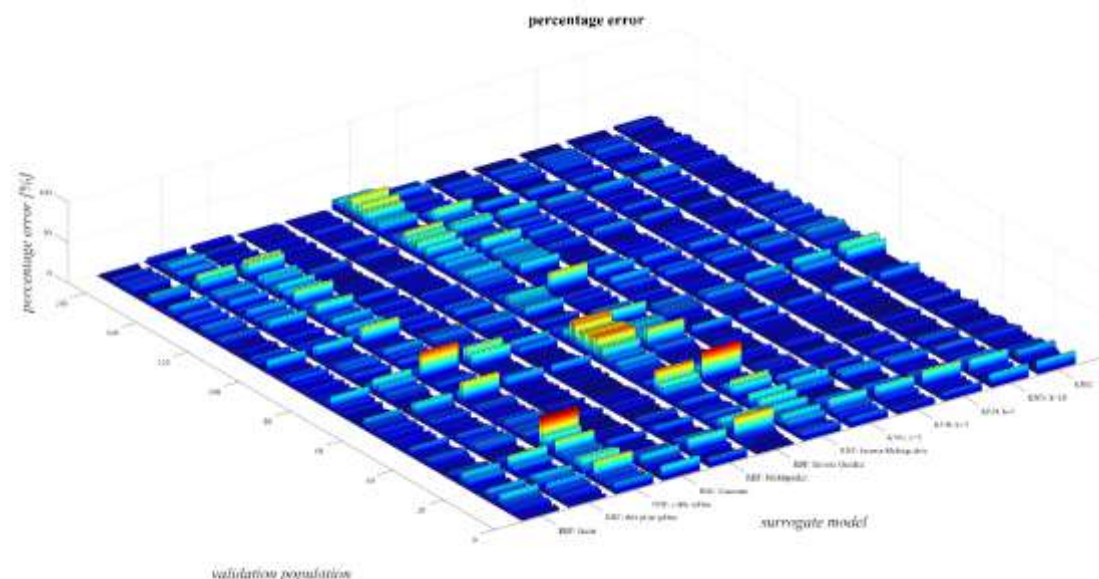
สุดท้ายนี้แบบจำลองทั้ง 3 แบบจะถูกนำมาทดสอบกับข้อมูลการใช้พลังงานของเครื่องหีบอ้อยข้างต้นเพื่อระบุหาแบบจำลองที่ให้ค่าทำนายที่แม่นยำที่สุด โดยแบบจำลองจะถูกสร้างจากชุดข้อมูลตัวอย่างที่ผ่านการคัดเลือกด้วย

เทคนิคการจัดกลุ่มแบบเคมีน แล้ว และข้อมูลส่วนที่เหลือจะถูกใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองแต่ละชนิด

ผลการทดลอง

การทดสอบถูกสร้างขึ้นทั้งหมด 12 รูปแบบ โดยสามารถจัดหมวดหมู่ได้เป็น 3 หมวดหลัก ได้แก่ ครึ่งจริง, การประมาณค่าในช่วงฐานแนวรีสมิและ ขั้นตอนวิธีการเคเนียร์เรนเบอร์สุด โดยวิธีการประมาณค่าในช่วงฐานแนวรีสมิ จะถูกแบ่งเป็น 7 แบบจำลองย่อยและขั้นตอนวิธีการเคเนียร์เรนเบอร์สุด แบ่งเป็น 4 แบบจำลองย่อย โดยมีข้อมูลตัวแปรต้น (x) จากภาพที่ 4 เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองทั้งหมด แล้วแบบจำลองที่ได้จะถูกใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลอีกชุดดังที่แสดงในภาพที่ 5 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายถูกแสดงในภาพที่ 6 ทำให้เห็นว่าแบบจำลองทุกตัวสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการบริโภคพลังงานของเครื่องหีบอ้อยได้โดยที่แต่ละแบบจำลองจะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่างกัน จากภาพที่ 6 จะเห็นว่าแบบจำลอง 8 รูปแบบนั้นมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองอยู่ระหว่าง 4.9808 และ 5.9168 (แสดงดังตารางที่ 2) ซึ่งแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการทำนายพฤติกรรมการบริโภคพลังงานของเครื่องหีบอ้อยของโรงงานน้ำตาลกุมภวาปีนี้คือแบบจำลองวิธีการประมาณค่าในช่วงฐานแนวรีสมิ ที่มีสมการควบคุมเป็นสมการ Multiquadric ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองอยู่ที่ 4.9808 โดยที่แบบจำลองวิธีการประมาณค่าในช่วงฐานแนวรีสมิ ที่มีสมการควบคุมเป็นสมการ Gaussian และขั้นตอนวิธีการเคเนียร์เรนเบอร์สุด ที่มีค่า k เท่ากับ 5 ให้ค่าการทำนายพฤติกรรมแม่นยำเป็นอันดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับและมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเรียงตามลำดับอยู่ที่ 5.2109 และ 5.2576 จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าแบบจำลองวิธีการประมาณค่าในช่วงฐานแนวรีสมิ นั้นมีประสิทธิภาพสูง หากแต่วิธีการประมาณค่าในช่วงฐานแนวรีสมิ ที่มีสมการควบคุมแบบ Inverse Quadric, สมการกำลังสาม, Inverse Multiquadric, และ สมการถ้อยกำลังสอง นั้นจะให้ค่าการทำนายที่แย่ที่สุดเช่นกันโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ 12.5044, 9.6739, 9.4758 และ 7.2284

ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษานี้คือ เมื่อเราได้แบบจำลองทดแทนที่มีความแม่นยำสูง เช่น แบบจำลอง RBF ที่ใช้ฟังก์ชันแบบ Multiquadric เราสามารถนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการหีบอ้อยแบบเหมาะสมที่สุด (optimal milling process) ได้ เมื่อมีการลำเลียงอ้อยเข้าสู่โรงงานเพื่อทำการหีบ โรงงานจะทำการทดสอบคุณสมบัติอ้อยด้วยรายละเอียดของตัวแปร $x_1 - x_6$ จากนั้นวิศวกรหรือผู้เกี่ยวข้องสามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแรงกดลูกหีบ ($x_7 - x_{36}$) โดยการหาค่าพลังงานต่ำที่สุดที่ใช้แบบจำลอง RBF ในการคำนวณค่าฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) วิธีปฏิบัตินี้สามารถปรับให้เป็นระบบอัตโนมัติได้ ซึ่งถ้าหากเทียบกับหลักการปฏิบัติที่ผ่านมา วิศวกรที่เกี่ยวข้องกับงานนี้จะใช้วิธีลองผิดลองถูกเพื่อปรับแรงกดลูกหีบ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือน้อย



ภาพที่ 6 กราฟความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของแบบจำลองทดแทน

ตารางที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของแบบจำลอง

แบบจำลอง	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง [%]
linear	5.9168
thin plate spline	7.2284
cubic spline	9.6739
RBF	
Gaussian	5.2109
Multiquadric	4.9808
Inverse Quadric	12.5044
Inverse Multiquadric	9.4758
KNN	
$k = 2$	5.8296
$k = 3$	5.3225
$k = 5$	5.2576
$k = 10$	5.3178
KRG	-
	5.4279

* หมายถึง ตัวอักษรตัวหนา (**Bold**) ใช้เพื่อบอกค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุด

สรุป

การศึกษานี้เป็นการศึกษาแบบจำลองเพื่อการทำนายพฤติกรรมการบริโภคพลังงานของเครื่องหีบอ้อยของโรงงานน้ำตาลกุมภวาปีโดยแบบจำลองที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ครีจจิง, การประมาณค่าในช่วงฐานแนวนรัศมี และขั้นตอนวิธีการเคเนียร์สเนเบอร์สุด จากการทดลองพบว่าแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพการทำนายพฤติกรรมการบริโภคพลังงานของเครื่องหีบอ้อยของโรงงานน้ำตาลกุมภวาปีสูงสุดคือ แบบจำลองวิธีการประมาณค่าในช่วงฐานแนวนรัศมี ที่มีสมการควบคุมเป็นสมการ Multiquadric ซึ่งให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 4.9808 โดย

ที่อันดับที่ 2 และ 3 ได้แก่แบบจำลองวิธีการประมาณค่าในช่วงฐานแนวรัศมี ที่มีสมการควบคุมเป็นสมการ Gaussian และขั้นตอนวิธีการเคเนียร์เรสเนเบอร์สุด ที่มีค่า k เท่ากับ 5 ในทางตรงกันข้ามแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพการทำนายแย่ที่สุดคือ วิธีการประมาณค่าในช่วงฐานแนวรัศมี ที่มีสมการควบคุมแบบ Inverse Quadric ซึ่งให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองที่สูงที่สุดอยู่ที่ 12.5044 อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพียง 3 รูปแบบเท่านั้นซึ่งในอนาคตสามารถขยายผลเพื่อการพัฒนาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น หรือสามารถใช้เพื่อนำร่องเพื่องานออกแบบระบบการส่งและใช้พลังงานแบบเหมาะสมสูงสุด (optimization) ของเครื่องหีบอ้อยในโรงงานน้ำตาลกุ่มกวาปีได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านข้อมูลการวิจัยจากโรงงานผลิตน้ำตาลกุ่มกวาปี The Kumphawapi Sugar Co., Ltd. เลขที่ 73 หมู่ 11 ตำบลกุ่มกวาปี อำเภอกุ่มกวาปี จังหวัดอุดรธานี, 41110.

เอกสารอ้างอิง

1. OCSB (Office of The Cane and Sugar Board). Sugar production efficiency report. Bangkok; 2001.
2. Buathong A. The Model Development of Energy Balance for a Sugar Mill. Kon Kean University; 2014.
3. Wansasueb K, Pholdee N, Bureerat S. Optimum radii and heights of U-shaped baffles in a square duct heat exchanger using surrogate-assisted optimization. Eng Appl Sci Res. 2017 Apr 1;44(2):84–89.
4. Parzlivand F, Shahrezaee A. The use of inverse quadratic radial basis functions for the solution of an inverse heat problem. undefined. 2016;
5. Watts S, Arrighi W, Kudo J, Tortorelli DA, White DA. Simple, accurate surrogate models of the elastic response of three-dimensional open truss micro-architectures with applications to multiscale topology design. Struct Multidiscip Optim [Internet]. 2019 Nov 1 [cited 2020 Dec 2];60(5):1887–1920. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02297-5>
6. Tosteson TD, Ware JH. Designing a logistic regression study using surrogate measures for exposure and outcome. Biometrika. 1990;77(1):11–21.
7. Wansaseub K, Slesongsom S, Panagant N, Pholdee N, Bureerat S. Surrogate-Assisted Reliability Optimisation of an Aircraft Wing with Static and Dynamic Aeroelastic Constraints. Int J Aeronaut Sp Sci [Internet]. 2020 [cited 2020 Jan 25];21(3):723–32. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42405-019-00246-6>
8. Hugot E. Handbook of cane sugar engineering. 3rd rev. ed. Amsterdam: Elsevier; 1986.
9. Rein P. Cane sugar engineering. Cane sugar Eng. 2016;(Ed. 2).
10. MOOLSIRI N. DEVELOPMENT OF MASS AND ENERGY BALANCE MODEL FOR STEAM UTILIZATION PLANNING IN SUGAR PROCESSING. Khon Kaen University; 2012.
11. Dogbe ES, Mandegari MA, Görgens JF. Exergetic diagnosis and performance analysis of a typical sugar mill based on Aspen Plus. Energy. 2018 Feb 15;145:614–625.
12. Thaval OP. Modelling the flow of cane constituents through the milling process of a raw sugar factory. 2012;



13. Pongkanpai S, Sookkumnerd C, Priprem S. Study of the effect of determining the conditions of raw sugar production on steam utilization rate. King Mongkut's University of Technology North Bangkok; 2009.
14. Li Y, Wu H. A Clustering Method Based on K-Means Algorithm. *Phys Procedia*. 2012 Jan 1;25:1104–1109.
15. Forrester AIJ, Sobester A, Keane AJ. *Engineering Design via Surrogate Modelling*. Wiley; 2008.
16. Panagant N, Bureerat S. Truss topology, shape and sizing optimization by fully stressed design based on hybrid grey wolf optimization and adaptive differential evolution. *Eng Optim*. 2018 Oct 3;50(10):1645–1661.
17. Gan G, Valdez EA. Ordinary Kriging. *Metamodeling Var Annu*. 2019;69–94.
18. Ghosh J, Nag A. An Overview of Radial Basis Function Networks. In *Physica, Heidelberg*; 2001 [cited 2020 Dec 2]. p. 1–36. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7908-1826-0_1
19. Wu Y, Wang H, Zhang B, Du K-L. Using Radial Basis Function Networks for Function Approximation and Classification. *ISRN Appl Math*. 2012;2012:1–34.
20. Schaback R. Radial Basis Functions Viewed From Cubic Splines. In: *Multivariate Approximation and Splines* [Internet]. Birkhäuser Basel; 1997 [cited 2020 Dec 2]. p. 245–258. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-0348-8871-4_20
21. Javaran SH, Khaji N. Inverse Multiquadric (IMQ) function as radial basis function for plane dynamic analysis using dual reciprocity boundary element method. 2012;
22. Sarra SA. Integrated multiquadric radial basis function approximation methods. *Comput Math with Appl*. 2006 Apr 1;51(8 SPEC. ISS.):1283–1296.
23. Zhang Z. Introduction to machine learning: K-nearest neighbors. *Ann Transl Med* [Internet]. 2016 Jun 1 [cited 2020 Dec 2];4(11). Available from: [/pmc/articles/PMC4916348/?report=abstract](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24916348/)