

การประชุมเสนอผลงานบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมเครื่องกล  
ครั้งที่ 1 ปีการศึกษา 2551

3 กุมภาพันธ์ 2552 ณ ห้องประชุมสำนักวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



School of Mechanical Engineering  
Institute of Engineering  
Suranaree University of Technology

PeepThong  
Radermacheraigne (Kurz) Steenis

กำหนด

การเข้าร่วมงานการประชุมเสนอผลงานบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมเครื่องกล มทส.

ครั้งที่ 1 ปีการศึกษา 2551 วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2552

ณ ห้องประชุมสำนักวิทยาศาสตร์ อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เวลา	กำหนดการ
08.00 - 08.30 น.	ลงทะเบียนเข้าร่วมสัมมนา
08.30 - 09.00 น.	ประธานกล่าวเปิดงาน
09.00 - 10.00 น.	การนำเสนอผลงานของบัณฑิตศึกษาช่วงที่ 1
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- นายจิตติศักดิ์ ภูศรีเมือง : การศึกษาระบบอัดไอแบบแคสเคดเพื่อการประหยัดพลังงานสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์</li> <li>- นายชัยวัฒน์ แสงเพ็ง : แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรส์นม</li> </ul>
10.00 - 10.30 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
10.30 - 12.00 น.	บรรยายพิเศษ โดย รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร
13.00 - 15.00 น.	การนำเสนอผลงานของบัณฑิตศึกษาช่วงที่ 2
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- นางสาวจิตติมา วระกุล : การตรวจสอบเชิงมองเห็นแบบอัดโนมิตีสำหรับกระบวนการควบคุมคุณภาพฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ</li> <li>- นางสาวพิจิตรา เอื้องไพโรจน์ : การจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ความเค้นเฉือนที่ผนังจากการไหลของของไหลที่ไหลเป็นจังหวะในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น</li> <li>- นายประสิทธิ์ ศรีนคร : การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน</li> <li>- นางสาวลักขณา ชัยวินี : การพัฒนาอุปกรณ์เบรียบวัดค่า Gram load สำหรับเครื่องวัด Gram load</li> <li>- นายนิติพงศ์ พรหมรักษ์ : เครื่องค้นแบบการตรวจสอบความเสียหายของสกรูที่ใช้ระบบการมองด้วยคอมพิวเตอร์</li> <li>- นายวิโรจน์ แบบพิมาย : เทคโนโลยีพลังงานลม</li> </ul>
15.00 - 15.30 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
15.30 - 16.30 น.	การนำเสนอผลงานของบัณฑิตศึกษาช่วงที่ 3
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- นายสุพจน์ ปลั่งพิมาย : การควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดโดยใช้ MRAS</li> <li>- นางสาวฐวิสณี ปัทมประดิษฐ์ : การศึกษาอายุการใช้งานของหวีเนื่องจากการเสียหายทางกล</li> </ul>
16.30 - 17.00 น.	ประธานกล่าวปิดงาน

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
- การศึกษาระบบอัดไอแบบแอสเทคเพื่อการประหยัดพลังงานสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์	1
- แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรส์นม	5
- การตรวจสอบเชิงมองเห็นแบบอัตโนมัติสำหรับกระบวนการควบคุมคุณภาพฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	11
- การจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ความเค้นเฉือนที่ผนังจากการไหลของของไหลที่ไหลเป็นจังหวะ ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น	14
- การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน	20
- การพัฒนาอุปกรณ์เบรียวัดค่า Gram load สำหรับเครื่องวัด Gram load	27
- เครื่องต้นแบบการตรวจสอบความเสียหายของสกรูที่ใช้ระบบการมองด้วยคอมพิวเตอร์	31
- เทคโนโลยีพลังงานลม	36
- การควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดโดยใช้ MRAS	37
- การศึกษาอายุการใช้งานของหวีเนื่องจากการเสียหายทางกล	46



การประชุมเสนอผลงานบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมเครื่องกล มทส. ครั้งที่ 1 ปีการศึกษา 2551  
3 กุมภาพันธ์ 2552 ณ ห้องประชุมสำนักวิทยาศาสตร์ อาคารวิชาการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## การศึกษาระบบอัดไอแบบแคสเคดเพื่อการประหยัดพลังงาน สำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์

### A study of Cascade Vapor Compression System for Energy Saving in Milk Pasteurizing Process

จิตติศักดิ์ ภูศรีเมือง<sup>1\*</sup> ชีระชาติ พรพิบูลย์<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทร 044 224 498 โทรสาร 044 224 613 \*อีเมล jittisak\_poo@yahoo.com

Jittisak Poosrimuang<sup>1\*</sup> Teerachart Pornpibul<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand Tel: 044 224 498 Fax: 044 224 613 \*Email: jittisak\_poo@yahoo.com

#### บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบอัดไอแบบแคสเคดเพื่อการประหยัดพลังงาน สำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์ของการทำความเย็นและการทำความร้อนในกระบวนการผลิตนม ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์จะใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในขั้นตอนการพาสเจอร์ไรส์ และมีการทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำในขั้นตอนการเก็บรักษาคุณภาพของน้ำนมดิบเพื่อรอทำการผลิตและขั้นตอนการลดอุณหภูมิให้น้ำนมหลังจากการพาสเจอร์ไรส์ โดยทั่วไปปัจจุบันโรงงานผลิตนมพาสเจอร์ไรส์นิยมใช้ระบบอัดไอแบบสเตจเดียวซึ่งเรียกว่า ซิลเลอร์ เพื่อใช้ในการทำความเย็น และเครื่องทำความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าเพื่อใช้ในการทำความร้อน ซึ่งทั้งระบบการทำความเย็นและระบบการทำความร้อนเป็นระบบที่มีความต้องการการใช้พลังงานที่สูง ตลอดจนปัจจุบันยังขาดการจัดการการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพและความคุ้มค่าเท่าที่ควร

ดังนั้นบทความนี้จึงเน้นหนักด้านการประหยัดพลังงานในการทำความเย็นและการทำความร้อนสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์ โดยประยุกต์ระบบอัดไอแบบแคสเคดที่สามารถทำความเย็นและทำความร้อนได้ในเวลาเดียวกันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เพื่อเสริมหรือทดแทนระบบซิลเลอร์และระบบทำความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าที่ใช้เดิมในปัจจุบัน

คำสำคัญ: ทำความเย็น/ทำความร้อน/ระบบอัดไอ/ระบบแคสเคด/ประหยัดพลังงาน

#### Abstract

This research studies of Cascade Vapor compression system for Energy Saving. Generally, that using of Heating and Refrigerating in milk pasteurizing process. For Heating at high temperature used for a process of pasteurizing. For Refrigerating at low temperature used for maintained raw milk quality in the first process and decreased milk temperature in the end of process. Nowadays, a Single Stage Vapor compression system is commonly applied for Cooling process and used an Electric Heater for Heating process. But the Single Stage Vapor compression system is inefficiency for Energy Saving.

Therefore, this paper emphasize on Energy Saving of Refrigerating and Heating in milk pasteurizing process. A Cascade Vapor compression system is applied for Cooling process as Refrigerator and applied for Heating process as Heat pump. From the study of Cascade Vapor compression system in milk pasteurizing application in a dairy with capacity 3 tons per day of Raw milk in Nakhon Ratchasima. As a result, this study is clearly represented that the Cascade Vapor compression system requires energy less than the original system for the same operating conditions.

Keyword; Refrigerating/Heating/Vapor compression System/ Cascade System/Energy Saving

1. บทนำ

เนื่องจากพลังงานเป็นปัจจัยที่สำคัญของกระบวนการผลิต การใช้พลังงานอย่างไม่เหมาะสม จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงกว่าที่ควรจะเป็น ตั้งแต่เกิดวิกฤตการณ์พลังงาน ทำให้ราคาน้ำมันดิบเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจนมีราคาเพิ่มขึ้นหลายเท่าตัวเพียงเวลาไม่กี่ปี การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของราคาน้ำมันดิบทำให้ค่าพลังงานเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงกับค่าพลังงานที่โรงงานอุตสาหกรรมจะต้องจ่ายเพิ่มขึ้น ทำให้ราคาของผลิตภัณฑ์แพงตามไปด้วย เพื่อให้สามารถแข่งขันอยู่ได้โรงงานต่างๆจึงต้องหาแนวทางลดต้นทุนการผลิต โดยมุ่งเน้นการจัดการการใช้พลังงาน การใช้เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงเป็นแรงผลักดันให้เกิดการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในกระบวนการผลิตต่างๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่ผลิตนมพาสเจอร์ไรส์ มีความจำเป็นต้องทำความเข้าใจและความร้อนในกระบวนการผลิต โดยทั่วไปนิยมจะใช้เครื่องทำความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าสำหรับการทำความร้อนให้น้ำมันมีอุณหภูมิ 85 °C ในกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ และการทำความเย็นที่อุณหภูมิ 4 °C ใช้ในการลดอุณหภูมิให้นมและเก็บรักษาน้ำมันที่มาจากฟาร์ม เพื่อรอเข้ากระบวนการผลิตและลดอุณหภูมิหลังจากขั้นตอนการพาสเจอร์ไรส์ที่ผ่านการคายความร้อนให้กับน้ำประปาที่อุณหภูมิ 55 °C ซึ่งในปัจจุบันความเย็นที่ใช้ในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์นั้น จะใช้ระบบอัดไอแบบสเตจเดียว

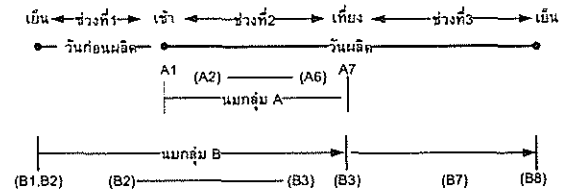
จากที่กล่าวมาในข้างต้นจะพบว่ากระบวนการพาสเจอร์ไรส์ต้องการอุณหภูมิสูงในการทำความร้อน และต้องการอุณหภูมิต่ำในการทำความเย็นมีความแตกต่างกันมาก จึงทำให้การอัดไอโดยวัฏจักรอัดไอแบบสเตจเดียวไม่เหมาะสมด้วยเหตุผลหลัก 2 ประการคือ ประการที่ 1. ขีดความสามารถในการอัดของเครื่องอัดไอที่ผลิตขึ้นในปัจจุบันไม่สามารถอัดสารทำความเย็นเพื่อทำให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นมีอุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิสูงสุดตามต้องการได้สำหรับกระบวนการอัดไอเพียงกระบวนการเดียว ส่วนประการที่ 2. การอัดไอแบบสเตจเดียวในช่วงอุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิสูงสุดมีช่วงกว้างมากๆ จะทำให้วัฏจักรอัดไอต้องการพลังงานเนื่องจากการอัดที่ค่อนข้างมากซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น

ดังนั้นบทความนี้เป็นการศึกษาวิจัยในการประยุกต์ระบบอัดไอแบบแคสเคดเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยเน้นหนักการวิเคราะห์การประยุกต์ระบบอัดไอแบบแคสเคดในการทำความเย็นและการทำความร้อนเปรียบเทียบกับระบบเดิมที่ใช้ในปัจจุบัน สำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์ที่กำลังการผลิต 3 ตันน้ำมันต่อวัน

2. กระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์

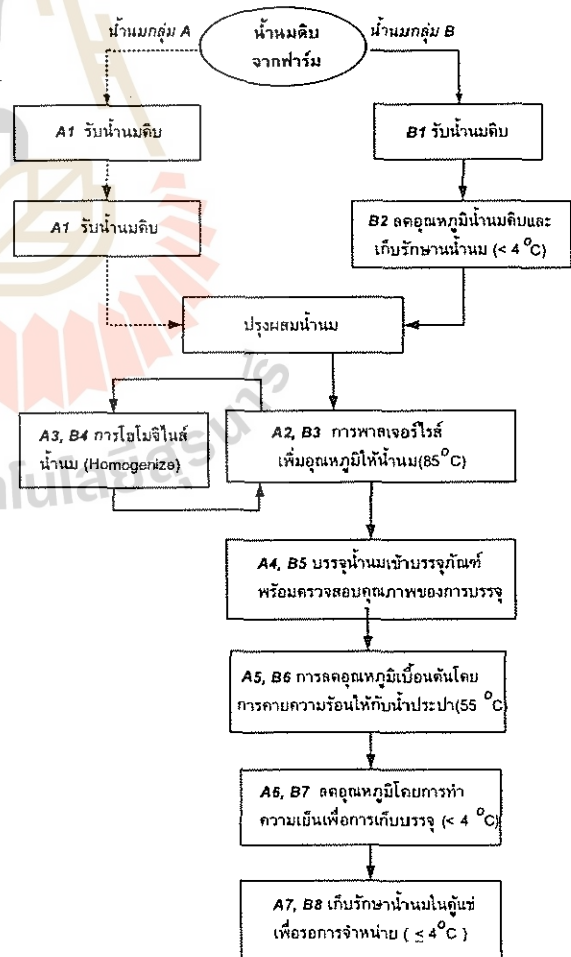
กระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์โดยทั่วไปของโรงงานผู้ผลิตผลิตภัณฑ์จากนม ส่วนมากมีขั้นตอนของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์จากนม จะมีขั้นตอนของกระบวนการผลิตที่เพิ่มขึ้นมาหนึ่งขั้นตอน กล่าวคือขั้นตอนการรับน้ำมันดิบจากฟาร์มโคนมเข้าสู่โรงงานผลิตนม แสดงดังรูปที่ 2. กล่าวคือ โรงงานที่ผลิตผลิตภัณฑ์จากนมโค จะมีการรับน้ำมันดิบเข้าสู่โรงงานผลิตนมในแต่ละวัน

ประมาณ 2 ชั่วโมง คือรับน้ำมันดิบเข้าสู่โรงงานช่วงเช้าและช่วงบ่ายของวันผลิต โดยน้ำมันดิบที่เข้ามาทั้งสองเวลานั้นจะแบ่งการพิจารณาน้ำมันดิบแต่ละกลุ่มได้ดังนี้



รูปที่ 1. แสดงขั้นตอนของน้ำมันกลุ่ม A และน้ำมันกลุ่ม B เทียบต่อช่วงเวลาของกระบวนการผลิตนมของโรงงานในแต่ละวันของการผลิต

น้ำมันกลุ่ม A หมายถึง น้ำมันดิบที่โรงงานผลิตได้รับในช่วงเวลาเช้าของวันผลิตและจะทำการผลิตทันทีในช่วงเช้านั้นและสามารถสรุปขั้นตอนของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์เป็น 7 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2 น้ำมันกลุ่ม B หมายถึง น้ำมันดิบที่โรงงานผลิตได้รับในช่วงเวลาบ่ายจากนั้นทำการลดอุณหภูมิให้นมดิบและทำการเก็บรักษาน้ำมันที่ต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอทำการผลิตในบ่ายของวันรุ่งขึ้นและสรุปขั้นตอนกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์เป็น 8 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2

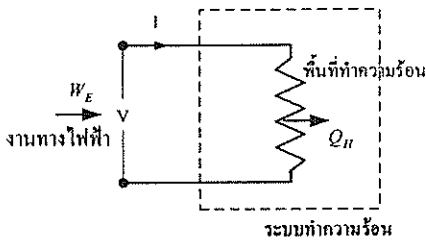


รูปที่ 2. ขั้นตอนกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์

3. การวิเคราะห์ระบบทำความเย็นและทำความร้อน

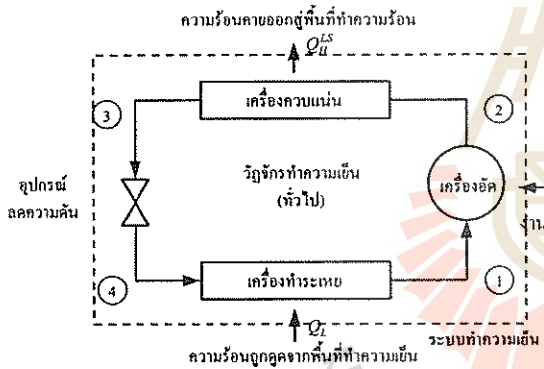
3.1 ระบบทำความเย็นและระบบทำความร้อนปัจจุบัน

ระบบทำความร้อนที่ใช้ในปัจจุบัน ส่วนมากนิยมใช้เครื่องทำความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าสำหรับทำความร้อน และสามารถวิเคราะห์พลังงานได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3. ระบบทำความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า

ระบบทำความเย็นที่ใช้ในปัจจุบันใช้เป็นระบบการทำความเย็นแบบวัฏจักรอัดไอสเตจเดี่ยว (Single Stage) ที่ใช้หลักการของระบบอัดไอที่อาศัยของไหลทำงาน (Working Fluid) ไหลเวียนในระบบเป็นวัฏจักร ซึ่งอาศัยการดูดความร้อนของสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหยของวัฏจักรในการทำความเย็น ดังรูปที่ 4.

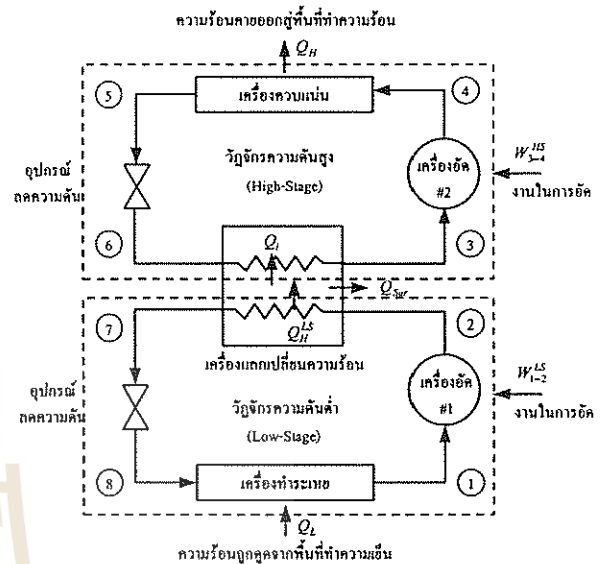


รูปที่ 4 .การทำความเย็นแบบวัฏจักรอัดไอสเตจเดี่ยว (Single Stage)

3.2 ระบบอัดไอแบบแคสเคด (Cascade Vapor Compression System)

ระบบอัดไอแบบแคสเคดเป็นระบบที่ทำการศึกษาวิจัยนี้ และเป็นระบบการทำความเย็นและทำความร้อนชนิดหนึ่ง ที่นำระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ 2 วัฏจักรมาเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม เพื่ออัดสารทำงานให้มีสถานะความดันสูงและอุณหภูมิสูงแบบเป็นขั้นได้ตามความต้องการและเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานกับระบบต่าง ๆ ได้ เพื่อการทำความเย็นและการทำความร้อนในเวลาเดียวกัน ที่อาศัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องระเหยของวัฏจักรความดันสูง (High stage cycle) และเป็นเครื่องควบแน่นของวัฏจักรความดันต่ำ (Low stage cycle) ดังรูปที่ 5 โดยทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อนระหว่างจากวัฏจักรความดันต่ำไปยังวัฏจักรความดันสูง เพื่อให้ได้ความเย็นและความร้อนจากการทำงานในระบบอัดไอแบบแคสเคดที่

ทำการศึกษาวิจัยนี้ โดยอาศัยการดูดความร้อนที่เครื่องทำระเหยของวัฏจักรความดันต่ำในการทำความเย็น และโดยอาศัยการคายความร้อนที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักรความดันสูงในการทำความร้อน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ระบบการทำความเย็นและการทำความร้อนของระบบอัดไอแบบแคสเคด

4. การดำเนินการศึกษา

จากการทำกรณีศึกษาของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์แห่งหนึ่งที่จังหวัดนครราชสีมา มีกำลังการผลิตน้ำนมดิบ 3 ตันน้ำนมดิบต่อวัน ซึ่งมีภาระการทำความเย็นสูงสุดในช่วงเวลา 14.30 น.- 15.30 น. ที่ขนาดการทำความเย็น 39.92 kW และภาระการทำความร้อนสูงสุดในช่วงเวลา 12.30 น.-18.30 น. ที่ขนาดการทำความร้อนสูงสุด 23.40 kW ตลอดทั้งวันของการผลิตน้ำนมดังรูปที่ 6

ในปัจจุบันใช้ระบบอัดไอแบบสเตจเดี่ยว (Single Stage) ในการทำความเย็น และใช้เครื่องทำความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าในการทำความร้อน (Heater) ดังนั้นจะทำการประยุกต์ระบบอัดไอแบบแคสเคดในการทำความเย็นและการทำความร้อน ซึ่งมีอุปกรณ์ทำความร้อนเสริมเราเรียกว่าอุปกรณ์นี้ว่า อุปกรณ์ทำความร้อนเสริม (Auxiliary Heater) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำนมให้เหมาะสมตามความต้องการตามกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์

ระบบอัดไอแบบแคสเคดที่ทำการศึกษานี้จะวิเคราะห์พลังงานที่ให้กับระบบในการทำความเย็นและทำความร้อนเพื่อทำการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในปัจจุบัน โดยพิจารณาภาระระบบอัดไอแบบสเตจเดี่ยวทำการวิเคราะห์เหมือนระบบวัฏจักรความดันต่ำในระบบอัดไอแบบแคสเคด และระบบอัดไอแบบแคสเคดมีเงื่อนไขการพิจารณาแบบนี้

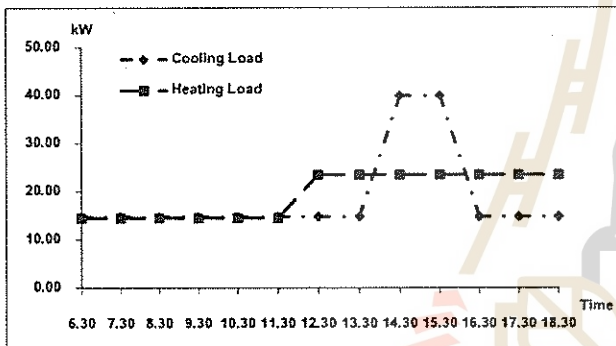
- 1.ขนาดการทำความเย็นสูงสุดที่ 40 kW และขนาดการทำความร้อนสูงสุดที่ 24 kW
- 2.สารทำงานที่ใช้ในระบบวัฏจักรความดันสูงและระบบวัฏจักรความดันต่ำเป็นสารทำความเย็นชนิด R143a

3. อุณหภูมิของวัฏจักรความดันต่ำที่เครื่องทำระเหย  $-5^{\circ}\text{C}$  ขนาดความดัน 240 kpa เครื่องควบแน่น  $35^{\circ}\text{C}$  ที่ความดัน 900 kpa และอัตราการไหลของสารทำความเย็นสูงสุด 0.27 kg/s

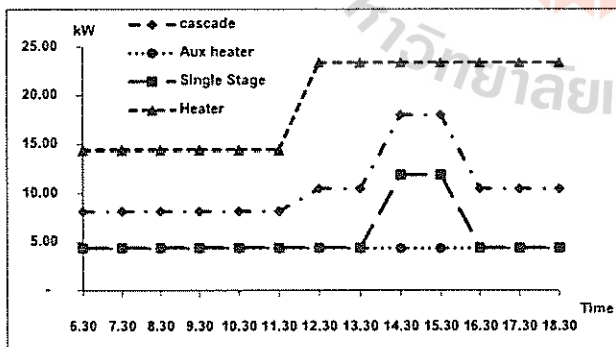
4. อุณหภูมิของวัฏจักรความดันสูงที่เครื่องทำระเหย  $15^{\circ}\text{C}$  ขนาดความดัน 480 kpa และเครื่องควบแน่น  $80^{\circ}\text{C}$  ที่ความดัน 2633 kpa และอัตราการไหลของสารทำความเย็นสูงสุด 0.19 kg/s

## 5. ผลการศึกษา

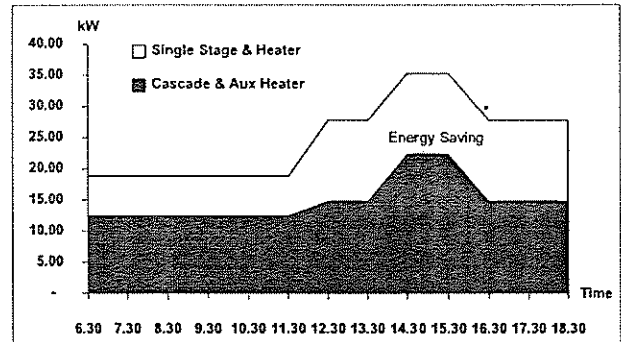
จากการศึกษาการใช้พลังงานกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์เราสามารถวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของการใช้พลังงานในการทำความเย็นและการทำความร้อนของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์ได้ดังรูปที่ 7 จะพบว่าระบบที่ใช้ระบบอัดไอแบบแคสเคด ร่วมกับอุปกรณ์ทำความร้อนเสริม(Auxiliary heater) จะมีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าระบบการทำความเย็นจากระบบอัดไอแบบสเตจเดี่ยวร่วมกับเครื่องทำความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า(heater) ตามช่วงเวลาดังนี้ ช่วงเวลา 6.30น.-11.30น. มีค่าเท่ากับ 6.36 kW และในช่วงเวลา 12.30น.-18.30 น.มีค่าเท่ากับ 12.96 kW ดังรูปที่ 8



รูปที่ 6 ภาระการทำความเย็นและภาระการทำความร้อนของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์ที่กำลังการผลิต 3 ตันน้ำนมต่อวัน



รูปที่ 7 ความสิ้นเปลืองของการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบการทำความเย็นและระบบการทำความร้อนแบบต่างๆ



รูปที่ 8. ความสิ้นเปลืองของการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบการทำความเย็นและระบบการทำความร้อนของระบบเดิมในปัจจุบันเทียบกับระบบอัดไอแบบแคสเคด (ระบบที่ทำการศึกษาวิจัย)

## 6. สรุปผลการศึกษา

จากกรณีศึกษาการประยุกต์ระบบอัดไอแบบแคสเคดร่วมกับอุปกรณ์ทำความร้อนเสริมในอุตสาหกรรมผลิตนมพาสเจอร์ไรส์ ซึ่งมีขนาดกำลังการผลิตนม 3 ตันน้ำนมดิบต่อวัน พบว่ามีความสิ้นเปลืองของการใช้พลังงานในระบบทำความเย็นและระบบทำความร้อนน้อยกว่าระบบเดิมในปัจจุบันประมาณ 39% ซึ่งถือว่าระบบที่ทำการศึกษาวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางหนึ่งในการประหยัดพลังงานสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์ และยังนำไปสู่แนวคิดของการประยุกต์ระบบอัดไอแบบแคสเคดในการศึกษาวิจัยนี้ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆได้อีกด้วย

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัทแตรี่โฮมจำกัด และโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย(ITAP) เครือข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้ให้ข้อมูลทำการศึกษาวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ASHRAE.(2003). ASHRAE Handbook Fundamental. American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers. Inc.New York
- [2] Carrier Air Condition company.(1965).Handbook of Air Conditioning System Design. Inc.New York: McGraw -Hill.
- [3] Giovanni Di Nicola, Giuliano Giuliani (2004). Blende of carbon dioxide and HFCs as working fluids for the Low-temperature circuit in cascade refrigeration system. International Journal of Refrigeration 31: 45-54.
- [4] H.M. Getu, P.K. Bansal (2007).Thermodynamic analysis of an R744-R717 cascade Refrigeration System.International Journal of Refrigeration 31: 45-54.
- [5] Wilbert F. Stoecker, Jerold W.jones (1982). Refrigeration & Air Conditioning: McGraw -Hill International edition.

การประชุมเสนอผลงานบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ครั้งที่ 1 ปีการศึกษา 2551  
3 กุมภาพันธ์ 2552 ณ ห้องประชุมสำนักวิทยาศาสตร์ อาคารวิชาการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำนมเย็น แบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นม

### Thermodynamics Modeling for Two Stage Vapor Compression System in Milk Pasteurizing Process

ชัยวัฒน์ แสงเพ็ง<sup>1\*</sup> วีระชาติ พรพิบูลย์<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทร 044 224 498 โทรสาร 044 224 613

Chaiwat Seangpeng<sup>1\*</sup> Teerachart Pornpibul<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Tel: 044 224 498 Fax: 044 224 613 \*Corresponding author: Chaiwat\_sut@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำนมเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน โดยระบบที่ทำการศึกษานี้ประกอบด้วย 1.วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนแบบอาศัยแฟลชแทงก์และ 2.วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการสร้างสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิของระบบการทำนมเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน ซึ่งแนวโน้มที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังกล่าวจะทำให้ทราบถึงสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด

#### Abstract

This research presents a Thermodynamics Modeling for Two Stage Vapor compression system in a Hot-filled milk pasteurizing process. The system can be classified to 1.the Two Stage Vapor compression cycle with a Flash Tank system and 2.a Cascade Vapor compression cycle. This paper has purposes to present the derivation of Thermodynamics modeling method and analyze this modeling in the form of the net power consumption of Two Stage Vapor compression system with auxiliary heater. As the results, will be receive the Thermodynamics optimization of refrigerant.

#### 1.บทนำ

กระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อนมีความต้องการทำความร้อนที่อุณหภูมิสูงและความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปจะนำระบบการทำนมเย็นแบบอัดไอขั้นตอนเดียวมาประยุกต์ใช้ โดยอาศัยกระบวนการดูดความร้อนเพื่อทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำเป็นหลักและอาศัยขดลวดความร้อนเพื่อการทำความร้อน บทความนี้จะนำเสนอแนวทางการนำความร้อนจากกระบวนการคายความร้อนของระบบอัดไอในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์เพื่อการประหยัดพลังงาน เนื่องจากอุณหภูมิน้ำมันสูงสุดที่ต้องการในการทำความร้อนและอุณหภูมิน้ำมันต่ำสุดที่ต้องการในการทำความเย็นมีความแตกต่างกันมาก จึงทำให้ระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียวไม่เหมาะสมด้วยเหตุผล 2 ประการคือ 1.ขีดความสามารถในการอัดของเครื่องอัดไอในปัจจุบัน และ 2.ในช่วงอุณหภูมิของสารทำความเย็นต่ำสุดและอุณหภูมิของสารทำความเย็นสูงสุดมีช่วงอุณหภูมิกว้างมาก จะทำให้เครื่องอัดไอต้องการพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่ค่อนข้างมาก ซึ่งสามารถแก้ปัญหาโดยการประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วย 1.วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนแบบอาศัยแฟลชแทงก์และ 2.วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการสร้างสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิของระบบการทำนมเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน ซึ่งแนวโน้มของแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์



ดังกล่าวจะทำให้ทราบถึงสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด

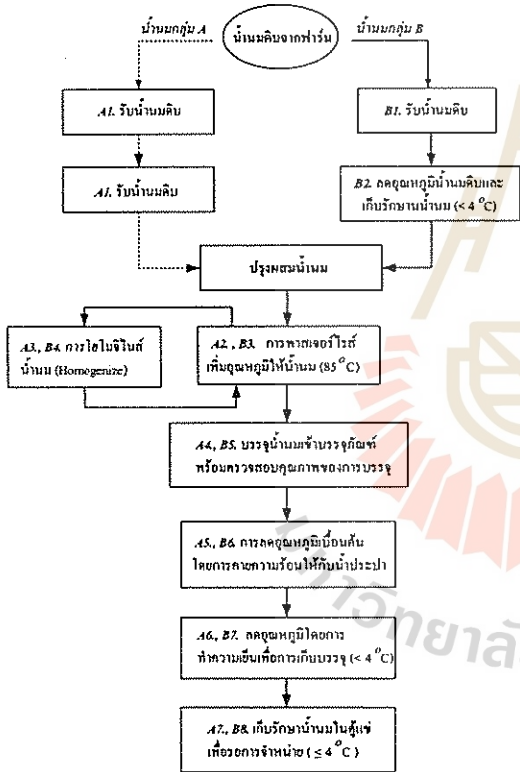
2. ขั้นตอนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน

ขั้นตอนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อนที่ทำการศึกษ [1] เริ่มต้นจากโรงงานได้รับน้ำนมดิบบางส่วนในช่วงบ่ายของวันก่อนผลิต และจะต้องรอทำการผลิตในช่วงบ่ายของวันผลิต ส่วนน้ำนมดิบบางส่วนจะได้รับในช่วงเช้าของวันผลิต และทำการผลิตในทันทีในช่วงเช้า ดังนั้นจึงสามารถแบ่งพิจารณาได้เป็น 2 กลุ่มคือ

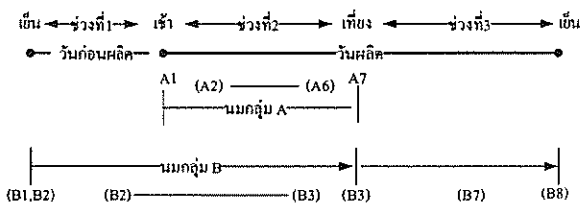
น้ำนมกลุ่ม A หมายถึง น้ำนมที่โรงงานได้รับในช่วงเช้า และดำเนินการผลิตทันที

น้ำนมกลุ่ม B หมายถึง น้ำนมที่โรงงานได้รับในช่วงบ่ายและทำการเก็บรักษาด้วยการทำความเย็นและทำการผลิตในช่วงบ่ายของวันรุ่งขึ้น

จากขั้นตอนการผลิตของน้ำนมทั้งสองกลุ่มพบว่ากระบวนการทำความเย็นและกระบวนการทำความร้อนเป็นกระบวนการที่เป็นปัจจัยสำคัญของการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต กล่าวคือ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน



รูปที่ 2 ขั้นตอนการผลิตนมกลุ่ม A และ B เทียบต่อช่วงเวลาของกระบวนการผลิตในแต่ละวันของการผลิตนม

กระบวนการทำความเย็นของน้ำนมทั้งสองกลุ่มประกอบด้วยกระบวนการดังต่อไปนี้

1. การเก็บรักษาน้ำนมด้วยวิธีการทำความเย็น (กระบวนการ B2) คือ จากอุณหภูมิน้ำนมเริ่มต้นประมาณ  $35^{\circ}\text{C}$  เป็น  $4^{\circ}\text{C}$  และเก็บรักษาที่อุณหภูมิคงที่  $4^{\circ}\text{C}$

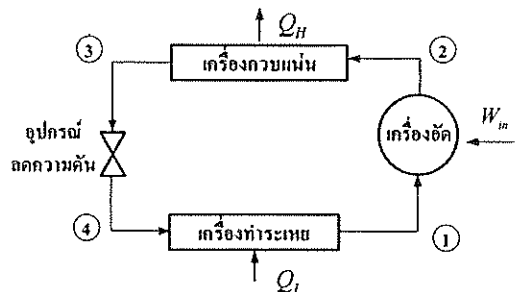
2. การทำความเย็นเพื่อการเก็บบรรจุ (กระบวนการ A6 และ B7) คือ การทำความเย็นภายหลังจากการลดอุณหภูมิเบื้องต้น (กระบวนการ A5 และ B6) ทำความเย็นจากอุณหภูมิน้ำนมเริ่มต้นประมาณ  $55^{\circ}\text{C}$  เป็น  $4^{\circ}\text{C}$  และจัดเก็บรักษาในตู้แช่เพื่อการรอจำหน่าย

กระบวนการทำความร้อนของน้ำนมทั้งสองกลุ่มคือ กระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ (กระบวนการ A2 และ B3) โดยทำความร้อนให้กับน้ำนมให้มีอุณหภูมิประมาณ  $85^{\circ}\text{C}$

3. ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอขั้นตอนเดียว

Soylemez [2] นำเสนอแบบจำลองทางความร้อนและเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอขั้นตอนเดียว ทำงานร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีเจนและขดลวดความร้อนในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุเย็นเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม โดยแบบจำลองทางความร้อนและเศรษฐศาสตร์ที่ได้แสดงในรูปแบบของค่าใช้จ่ายสุทธิของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอขั้นตอนเดียวทำงานร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีเจนและขดลวดความร้อน

สำหรับการกระบวนการผลิตพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อนโดยทั่วไปจะนำระบบการทำความเย็นแบบอัดไอขั้นตอนเดียวมาประยุกต์ใช้ โดยอาศัยกระบวนการดูดความร้อนเพื่อทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำเป็นหลักและอาศัยขดลวดความร้อนเพื่อทำความร้อน เนื่องจากอุณหภูมิน้ำนมสูงสุดที่ต้องการในการทำความร้อนและอุณหภูมิน้ำนมต่ำสุดที่ต้องการในการทำความเย็นมีความแตกต่างกันมาก จึงทำให้ระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียวไม่เหมาะสมด้วยเหตุผล 2 ประการคือ 1. ขีดความสามารถในการอัดของเครื่องอัดไอในปัจจุบัน และ 2. ในช่วงอุณหภูมิของสารทำความเย็นต่ำสุดและอุณหภูมิของสารทำความเย็นสูงสุดมีช่วงอุณหภูมิกว้างมาก จะทำให้เครื่องอัดไอต้องการพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่ค่อนข้างมาก



รูปที่ 3 ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอขั้นตอนเดียว

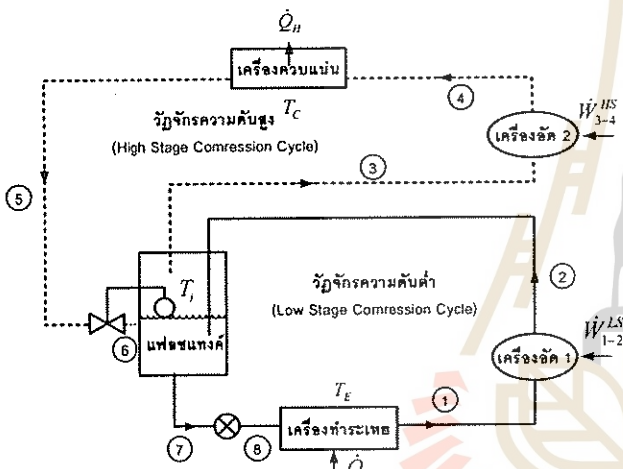
4.ระบบการทำคามเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน

จากข้อจำกัดของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียวดังกล่าวข้างต้นสามารถแก้ปัญหาโดยการประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วย 1.วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนแบบอาศัยแฟลชแทงค์และ 2.วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด

J.U.R. Khan และ S.M. Zubair [3] นำเสนอแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนเพื่อการแจกแจงพื้นที่การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นที่เหมาะสมโดยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังกล่าวแสดงในรูปแบบของสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น

5.วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนแบบอาศัยแฟลชแทงค์

วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนแบบอาศัยแฟลชแทงค์ เพื่อทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แยกสารทำความเย็นในสถานะของเหลวอิ่มตัวที่ความดันความดันสูงให้กับวัฏจักรความดันต่ำและสารทำความเย็นในสถานะไออิ่มตัวที่ความดันต่ำให้กับวัฏจักรความดันสูง



รูปที่ 4 วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนแบบอาศัยแฟลชแทงค์

6.วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด

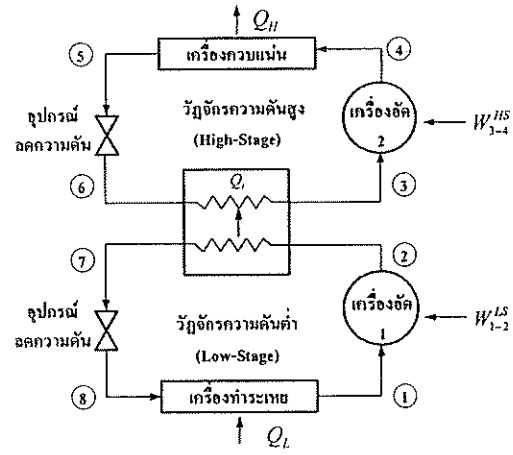
วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดที่จะทำการศึกษามีประกอบด้วย 1.วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดในอุดมคติและ 2.วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง

6.1 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดในอุดมคติ

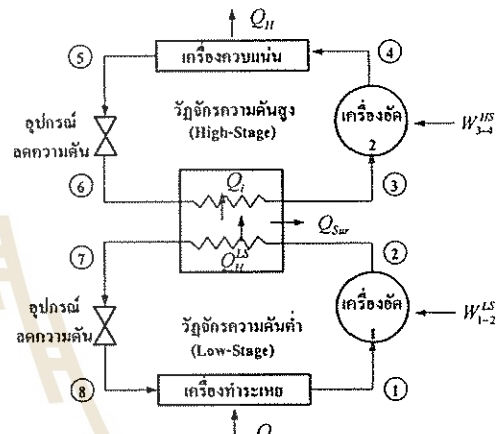
วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดในอุดมคติ จะอาศัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรระหว่างสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงและสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ

6.2 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง

วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง จะอาศัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นที่อุณหภูมิระเหยในวัฏจักรความดันสูงและสารทำความเย็นที่อุณหภูมิควบแน่นในวัฏจักรความดันต่ำ



รูปที่ 5 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดในอุดมคติ



รูปที่ 6 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง

7.สมการความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์

สมการความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ในรูปแบบของอุณหภูมิของสารทำความเย็นชนิด R 134a เพื่อแสดงในแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์มีที่มาดังนี้

7.1 ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการดูดความร้อนที่ความดันคงที่

ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการดูดความร้อนที่ความดันคงที่จากเครื่องทำระเหย [4,5] สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบของอุณหภูมิระเหยและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นได้ดังนี้

$$q_E = q_E(T_E, T_I) \tag{1}$$

เมื่อ  $q_E$  แทน ความร้อนหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการดูดความร้อนที่ความดันคงที่, kJ/kg  
 $T_E$  แทน อุณหภูมิระเหย, °C  
 $T_I$  แทน อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร, °C

7.2 ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่

ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่จากเครื่องควบแน่น สามารถแสดง

ความสัมพันธ์ในรูปแบบของอุณหภูมิควบแน่นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นได้ดังนี้

$$q_c = q_c(T_c, T_i) \quad (2)$$

เมื่อ  $q_c$  แทน ความร้อนหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่, kJ/kg

$T_c$  แทน อุณหภูมิควบแน่น, °C

### 7.3 คุณภาพไอภายในแฟลชแทงค์

คุณภาพไอภายในแฟลชแทงค์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบของอุณหภูมิควบแน่นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นได้ดังนี้

$$x = x(T_c, T_i) \quad (3)$$

เมื่อ  $x$  แทน คุณภาพไอ

### 7.4 สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ

Jeffrey M. Gordon และ Kim Choon Ng [6] นำเสนอแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นในรูปแบบของอุณหภูมิควบแน่น อุณหภูมิควบแน่นของสารทำความเย็นและอัตราการดูดกลืนความร้อนของเครื่องทำระเหยดังนี้

$$\frac{1}{COP_R} = -1 + \frac{T_c}{T_e} + \frac{\left[ \frac{-A_2 T_c + A_0 + A_1 T_c}{T_e} \right]}{\dot{Q}_e} \quad (4)$$

เมื่อ  $COP_R$  แทน สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น

$\dot{Q}_e$  แทน อัตราการดูดกลืนความร้อนของเครื่องทำระเหย, kW

$A_0, A_1$  และ  $A_2$  แทน ค่าคงที่อื่นเนื่องจากปัจจัยการย้อนกลับไม่ได้ของเครื่องอัดไอ

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อนในรูปแบบสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นดังนี้

$$COP_{HP} = 1 + COP_R \quad (5)$$

เมื่อ  $COP_{HP}$  แทน สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน

## 8. แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน

การศึกษาวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการสร้างสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน

จากการวิเคราะห์ความต้องการพลังงานสุทธิของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อนภายในปริมาตรควบคุมได้ดังนี้

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_{1-2}^{LS} + \dot{W}_{3-4}^{HS} + \dot{W}_{heater} \quad (6)$$

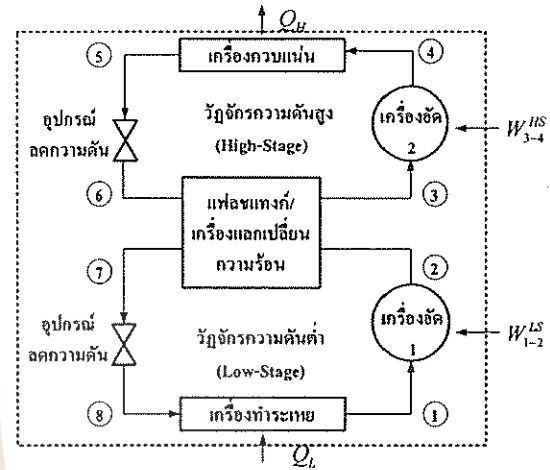
เมื่อ  $\dot{W}_{total}$  แทน ความต้องการพลังงานสุทธิของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อน

ของขดลวดความร้อน, kW

$\dot{W}_{1-2}^{LS}$  แทน งานเนื่องจากการอัดในวัฏจักรความดันต่ำ, kW

$\dot{W}_{3-4}^{HS}$  แทน งานเนื่องจากการอัดในวัฏจักรความดันสูง, kW

$\dot{W}_{heater}$  แทน งานทางไฟฟ้าของขดลวดความร้อน, kW



รูปที่ 7 ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน

จากสมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบปิดและนิยามของสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ แทนในสมการที่ (6) ได้ดังนี้

$$\dot{W}_{total} = \frac{\dot{Q}_e}{COP_R} + \frac{\dot{Q}_c}{COP_{HP}} + \dot{W}_{heater}$$

$$\dot{W}_{total} = \frac{\dot{m}_L q_E}{COP_R} + \frac{\dot{m}_H q_C}{COP_{HP}} + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \quad (7)$$

เมื่อ  $\dot{Q}_c$  แทน อัตราการคายความร้อนของเครื่องควบแน่น, kW

$\dot{m}_L$  แทน อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ, kg/s

$\dot{m}_H$  แทน อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง, kg/s

$\dot{m}_m$  แทน อัตราการไหลโดยมวลของนม, kg/s

$C_p$  แทน ความร้อนจำเพาะ, kJ/kg.K

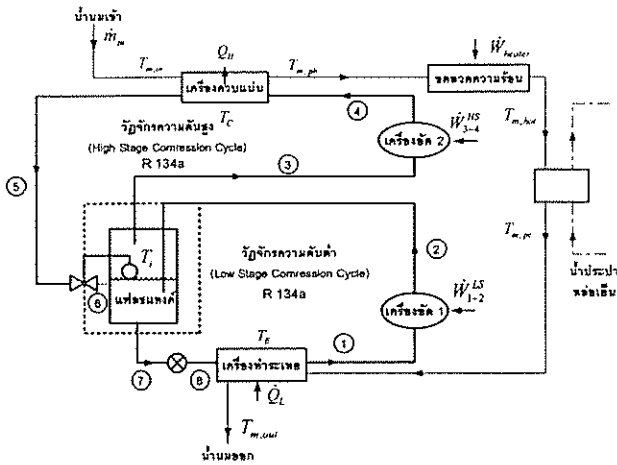
$T_{m,hot}$  แทน อุณหภูมิของนมร้อน, °C

$T_{m,ph}$  แทน อุณหภูมิของนมทำความเย็นเบื้องต้น, °C

### 8.1 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนแบบอาศัยแฟลชแทงค์

จากสมการสมดุลมวลความสัมพันธ์ระหว่างมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงภายในปริมาตรควบคุมแสดงได้ดังนี้

$$\dot{m}_H = \frac{\dot{m}_L}{(1-x)} \quad (8)$$



รูปที่ 8 วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนแบบอาศัยแฟลชแชนจ์ ในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน

จากสมการอนุรักษ์พลังงาน สำหรับกระบวนการทำความเย็นนม พาสเจอร์ไรซ์จากเครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ แสดงได้ดังนี้

$$\dot{m}_L q_E = \dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})$$

$$\dot{m}_L = \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E} \quad (9)$$

เมื่อ  $T_{m,pc}$  แทน อุณหภูมิของนมจากการลดอุณหภูมิเบื้องต้น, °C  
 $T_{m,out}$  แทน อุณหภูมิของนมเย็น, °C

แทนสมการที่ (8) และสมการที่ (9) ในสมการที่ (7) ดังนั้นความต้องการพลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนแบบอาศัยแฟลชแชนจ์และพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

$$\dot{W}_{total} = \dot{m}_L \left\{ \frac{q_E}{COP_R} + \frac{q_C}{COP_{HP}} \cdot \left( \frac{x}{1-x} \right) \right\} + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \quad (10)$$

เมื่อ  $\dot{m}_L = \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E}$

### 8.2 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดในอุดมคติ

จากสมการอนุรักษ์พลังงาน ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงภายในแฟลชแชนจ์ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\dot{m}_L q_C^{LS} = \dot{m}_H q_E^{HS}$$

$$\dot{m}_L q_E \left( \frac{1}{COP_R} + 1 \right) = \dot{m}_H q_C \left( 1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right)$$

$$\dot{m}_H = \dot{m}_L \cdot \left\{ q_E \left( \frac{1}{COP_R} + 1 \right) / q_C \left( 1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right) \right\} \quad (11)$$

จากสมการอนุรักษ์พลังงาน สำหรับกระบวนการทำความเย็นนม พาสเจอร์ไรซ์จากเครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ แสดงได้ดังนี้

$$\dot{m}_L q_E = \dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})$$

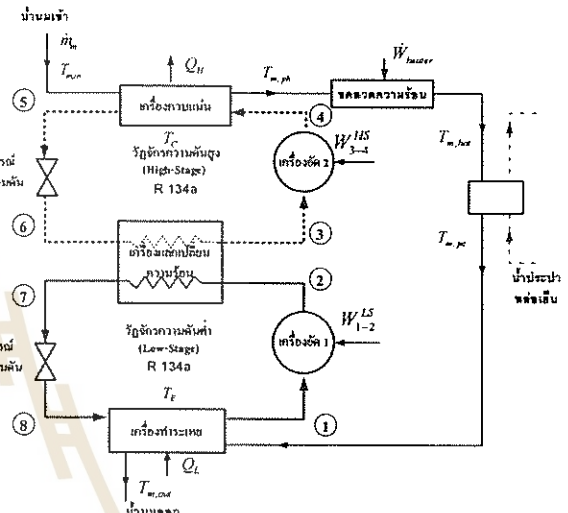
$$\dot{m}_L = \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E} \quad (12)$$

แทนสมการที่ (6) และสมการที่ (7) ในสมการที่ (2) ดังนั้นความต้องการพลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดในอุดมคติและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

$$\dot{W}_{total} = \frac{\dot{m}_L q_E}{COP_R} + \frac{\dot{m}_H q_C}{COP_{HP}} + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \quad (13)$$

เมื่อ  $\dot{m}_H = \dot{m}_L \cdot \left\{ q_E \left( \frac{1}{COP_R} + 1 \right) / q_C \left( 1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right) \right\}$

$$\dot{m}_L = \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E}$$



รูปที่ 9 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน

### 8.3 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัฏจักรความดันสูงและวัฏจักรความดันต่ำของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงนั้น มีความจำเป็นต้องมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่สามารถบอกค่าได้ของอุณหภูมิระเหยในวัฏจักรความดันสูงและอุณหภูมิควบแน่นในวัฏจักรความดันต่ำเพื่อเป็นกลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัฏจักรทั้งสอง

ด้วยวิธีการเดียวกันกับการวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดในอุดมคติ ดังนั้นความต้องการพลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

$$\dot{W}_{total} = \frac{\dot{m}_L q_E (T_c + T_i + \Delta T')}{COP_R^{LS}} + \left( \frac{1}{COP_{HP}^{HS}} - 1 \right) (\dot{m}_H q_C (T_c + \Delta T'')) + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \quad (14)$$

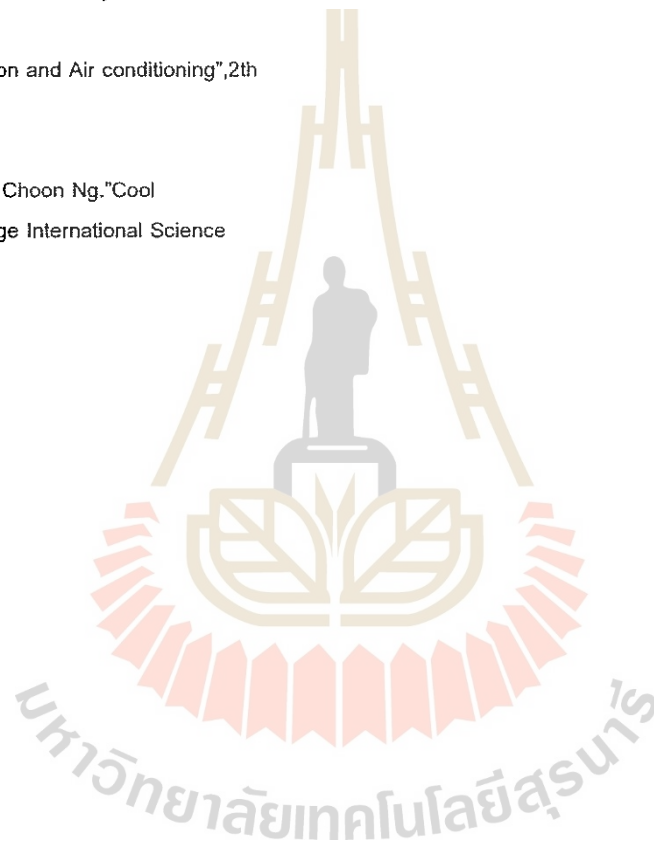
เมื่อ  $T_c + \Delta T'$  แทน อุณหภูมิควบแน่นในวัฏจักรความดันต่ำ, °C

$T_c + \Delta T''$  แทน อุณหภูมิควบแน่นในวัฏจักรความ

ตันสูง, °C

เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระชาติ พรพิบูลย์ และคณะ, "รายงานความก้าวหน้าโครงการ ครั้งที่ 1 การออกแบบระบบอัดไอสำหรับอุตสาหกรรมนม", มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2551
- [2] Soylemez, M.S., "Optimum heat pump in milk pasteurizing for dairy", *Journal of Food Engineering*, 546-551, 2005
- [3] J.U.R. Khan and S.M. Zubair. "Thermodynamic optimization of finite time vapor compression refrigeration systems". *Energy Conversion and Management* 42: 1457-1475, 2000
- [4] Stoecker, W.F., "Design and Thermal systems", 3th edition, McGrawHill, 1989
- [5] Stoecker, W.F., "Refrigeration and Air conditioning", 2th edition, McGrawHill, 1982
- [6] Jeffrey M. Gordon and Kim Choon Ng. "Cool Thermodynamics". Cambridge International Science Publishing. 2000



การประชุมเสนอผลงานบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ครั้งที่ 1 ปีการศึกษา 2551  
3 กุมภาพันธ์ 2552 ณ ห้องประชุมสำนักวิทยาศาสตร์

## การตรวจสอบเชิงมองเห็นแบบอัตโนมัติสำหรับกระบวนการควบคุมคุณภาพ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

### Automated Visual Inspection for HDD QC Process

จิตติมา วระกุล<sup>1</sup> กนต์ธร ชำนิประศาสน์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000  
โทร 0-4422-4290 โทรสาร 0-4422-4587 อีเมล sai.june@hotmail.com

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000  
โทร 0-4422-4286 โทรสาร 0-4422-4220 อีเมล kontorn@sut.ac.th

Jittima varagul<sup>1</sup> Kontorn Chamniprasart<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Tel: 0-4422-4290, Fax: 0-4422-4587, E-mail: sai.june@hotmail.com

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Tel: 0-4422-4286, Fax: 0-4422-4220, E-mail: kontorn@sut.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนากระบวนการควบคุมคุณภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเป็นขั้นตอนการตรวจสอบก่อนที่จะส่งไดรฟ์ไปยังขั้นตอนการบรรจุกล่อง การตรวจสอบดังกล่าวยังมีการใช้แรงงานคนในสังเกตข้อผิดพลาดเชิงกายภาพที่เกิดขึ้นบนตัวไดรฟ์ด้วยสายตา เช่นมีการขันสกรูครบหรือไม่ การติดป้ายต่างๆ อยู่ในแนวที่กำหนดหรือไม่ มีการบิดงอของขาอุปกรณ์หรือไม่ มีรอยบุบบนตัวไดรฟ์หรือไม่ เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดการตรวจสอบต่างๆ นั้นพนักงานตรวจสอบจะได้รับจากการเข้าอบรม ทางคณะผู้วิจัยได้สังเกตเห็นว่าการตรวจสอบดังกล่าวนี้สามารถทดแทนได้ด้วยเครื่องจักรระบบอัตโนมัติเพื่อลดความผิดพลาดจากแรงงานคนให้ได้มากที่สุด และยังรวมไปถึงลดเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบอีกด้วย ซึ่งหลักการตรวจสอบโดยการสังเกตด้วยสายตานั้นสามารถทดแทนได้ด้วยระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง โดยจะได้ทำการออกแบบรายละเอียดอัลกอริทึมการตรวจสอบต่างๆ ด้วยภาพ ไม่ว่าจะเป็นการตัดแยก การคัดแยกและการจัดจํารูปแบบ ให้ได้ตามข้อกำหนดที่ทางผู้ผลิตไดรฟ์ตั้งเอาไว้ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปสู่การพัฒนาสร้างระบบตรวจสอบอัตโนมัติแบบเต็มระบบต่อไป

#### Abstract

The objective of this research project is to design and develop potential vision techniques for visual inspection in HDD

QC process. HDDs that pass from this inspection are sent to packaging process. Currently, manual labor is still deployed to visually inspect physical appearances of the drive, for examples, number of screws, label alignment, twisted pins, dented or scratched mark, etc. Expertise of such inspection can be obtained from specific training process. The concept of this inspection can be replaced by automated visual inspection system. This kind of system can reduce error from human labor and decrease time of inspection. There are various kinds of vision techniques that are suitable for this inspection which depends on each detail of inspection conditions. By using proper segmentation, pattern classification and recognition, this visual inspection can be achieved efficiently leading to implementation of a full-scale automated visual inspection.

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันมีการตรวจสอบควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในเกือบจะทุกขั้นตอนของการผลิต แม้แต่ขั้นตอนก่อนการบรรจุกล่องก็ได้มีการตรวจสอบสภาพต่างๆ ของไดรฟ์ด้วยสายตา โดยขั้นตอนการตรวจสอบด้วยสายตานั้นยังมีการใช้แรงงานคน ซึ่งต้องผ่านการอบรมรายละเอียดการตรวจสอบการควบคุมคุณภาพด้วยสายตามาแล้ว อย่างไรก็ตามขั้นตอนดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ปริมาณแรงงานที่

ค่อนข้างมาก และเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบเองยังมีผลต่อคุณภาพของการตรวจสอบ ไม่ว่าจะเป็นสมมติและการลำตัวของสายตาของผู้ตรวจสอบที่ลดน้อยลงเมื่อเวลาในการทำงานผ่านลွ่งไป รายละเอียดการตรวจสอบควบคุมคุณภาพของไดร์ฟเฟืองนั้นยังมีปริมาณที่ค่อนข้างมาก และต้องใช้เวลาในการอบรมค่อนข้างนานเพื่อให้ผู้ตรวจสอบมีความเชี่ยวชาญต่องาน ระบบการตรวจสอบด้วยสายตาดังกล่าวจึงควรจะถูกทดแทนด้วยเครื่องมือที่มีความเชื่อถือได้เท่าเทียมกับการตรวจสอบด้วยสายตา

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ คือออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมในการตรวจสอบคุณภาพไดร์ฟด้วยการใช้ภาพตามเงื่อนไขที่กำหนดโดยทางผู้ผลิต

2. แนวทางการแก้ปัญหา

นำองค์ความรู้ทางด้าน การประมวลผลภาพและการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ มาออกแบบและพัฒนาสร้างอัลกอริทึมในการตรวจสอบควบคุมคุณภาพฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะนำมาใช้คือโปรแกรม LabVIEW ซึ่งรายละเอียดจะเป็นไปตามคุณสมบัติข้อกำหนดการตรวจสอบของผู้ผลิต

3. การทบทวนความรู้ ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

3.1 พื้นฐานโปรแกรม LabVIEW

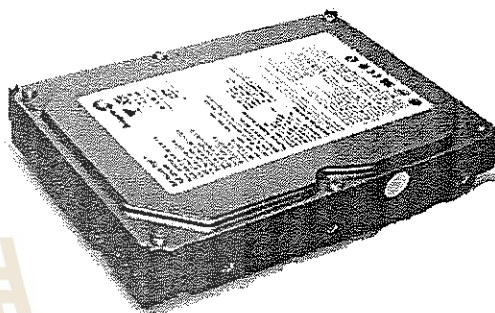
LabVIEW ย่อมาจาก (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) ซึ่งหมายความว่า เป็นโปรแกรมที่สร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม เป็น Software ที่พัฒนาขึ้นโดย บริษัท National Instruments หรือ NI โดย LabVIEW จัดเป็น Software ประเภทภาษารูปภาพ (Graphical Programming Language) คือจะใช้บล็อกฟังก์ชัน ซึ่งแทนด้วยรูปไอคอน (Icon) แทนการเขียนด้วยตัวอักษร (Text-based Program) และใช้เส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อกฟังก์ชันแทนการไหลของข้อมูลระหว่างโปรแกรมย่อยคล้ายกับการเขียน Flow chart ของโปรแกรมแต่ไม่เหมือนกับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา (Compiler) อื่นๆ เช่น C, Pascal ซึ่งเป็นการเขียนลักษณะ Text mode โดยส่วนมากต้องคำนึงถึงชนิดของข้อมูลที่รับส่งระหว่างโปรแกรมย่อยๆ เช่น real, Integer เป็นต้น การเขียนโปรแกรมด้วย LabVIEW สามารถลดเวลาในการพัฒนาโปรแกรมลงได้อย่างมาก เมื่อเทียบกับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาอื่นที่ใช้ตัวอักษร สิ่งที่ทำให้โปรแกรม LabVIEW แตกต่างจาก Software อื่นก็คือ ความสามารถในการใช้งานด้านงานวัด และการควบคุมอัตโนมัติ โดยมีเครื่องมือ (Tools) ต่างๆ ที่สนับสนุนการใช้งานด้านนี้ไว้อย่างมากมาย และให้ผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบของเครื่องมือเสมือนจริง (Virtual Instrument หรือ VI) และยังสามารถแยกความแตกต่างของรูปภาพซึ่งคือสิ่งที่เราต้องการในโครงการวิจัยนี้ โดยใน LabVIEW จะมีไลบรารีหรือเครื่องมือกับงานด้านนี้คือ IMAQ Vision ซึ่งช่วยพัฒนาโปรแกรมทางด้าน การประมวลผลภาพ มีหลักการคือการเปลี่ยนภาพให้เป็นภาพขาวดำและแปลงให้เป็นภาพ Binary (เป็นภาพขาวและดำเท่านั้น) เพื่อทำการนับเม็ดขาว-ดำ ของ Pixel ภาพจากกล้อง ซึ่ง Pixel คือจุดเล็กๆ บนจอภาพ ซึ่งก่อให้เกิดภาพขึ้นบนจอภาพนั้น จุดเหล่านี้เป็นจุดที่เล็กที่สุด

ที่จอภาพจะสามารถควบคุมได้ จากนั้นจะนำไป Detect หาตัวอักษรหรือตัวเลขเพื่อการแสดงผลต่อไป

3.2 กระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์ที่ต้องการตรวจสอบ

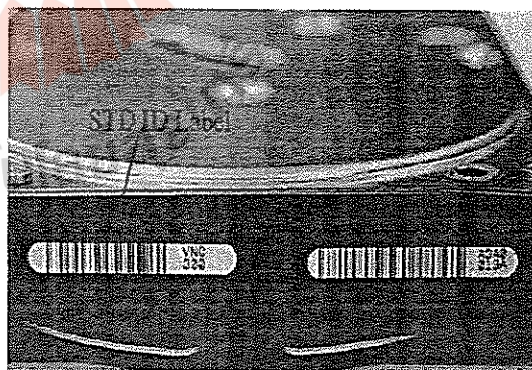
การประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟนั้นมีหลายขั้นตอนและประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆ แต่ในโครงการวิจัยต้องการตรวจสอบคุณภาพ หลังจากกระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟก่อนที่จะส่งไปบรรจุกล่องเพื่อให้แน่ใจว่า ฮาร์ดดิสก์นั้นผ่านการประกอบอย่างถูกต้องสมบูรณ์พร้อมที่จะส่งให้ลูกค้าแล้ว โดยสิ่งต้องการตรวจสอบเบื้องต้นคือ

1. ตำแหน่งที่มี Screw Hole นั้นได้รับการขัน Screw ครบทุกตำแหน่งหรือไม่ ดังในรูปที่ 1



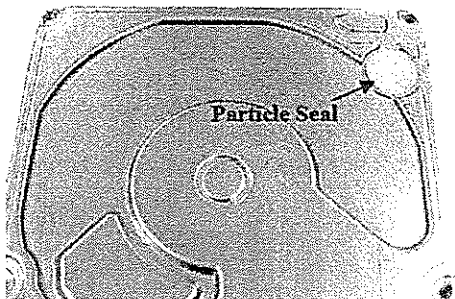
รูปที่ 1 ตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้ว

2. BARCODE LABEL สำหรับกำหนดรุ่นผลิตภัณฑ์และประวัติข้อมูลการประกอบที่ติดตั้งจุดต่างๆของของ Hard Disk Drive นั้น ติดครบและถูกต้องตามตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ดังในรูปที่ 2

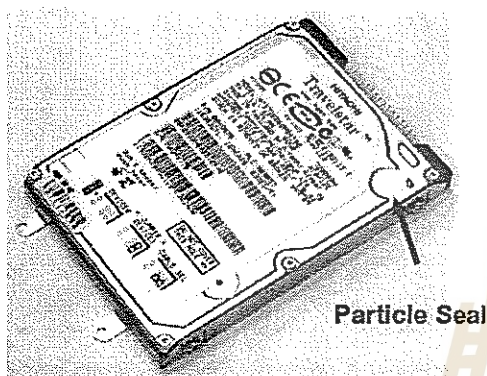


รูปที่ 2 ตัวอย่างตำแหน่งการติด BARCODE LABEL

3. PARTICLE SEAL มีหน้าที่ป้องกันฝุ่นและอากาศภายนอกไม่ให้ผ่านเข้าไปใน Hard Disk Drive ดังในรูปที่ 3



(a)



(b)

รูปที่ 3(a) ตัวอย่างตำแหน่งที่ติด Particle Seal

3(b) ตัวอย่างตำแหน่งที่ติด Particle Seal ที่ต้องตรวจสอบ  
หลังจากประกอบเสร็จแล้ว

\*หมายเหตุ: ตำแหน่งต่างๆ ของ Screw Hole, BARCODE LABEL และ PARTICLE SEAL ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แต่ละรุ่นนั้นแตกต่างกัน แต่กระบวนการในการตรวจสอบนั้นเหมือนกัน โดยเปลี่ยนค่าที่กำหนดในการประมวลผลภาพของแต่ละรุ่น ในโปรแกรม LabVIEW

### 3.3 ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. ศึกษาและวิเคราะห์ข้อกำหนดการตรวจสอบควบคุมคุณภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (จากเอกสารควบคุมของบริษัท ฮิตาชิ โกลบอล สตอเรจ เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด)
2. ออกแบบอัลกอริทึมการตรวจสอบด้วยภาพสำหรับข้อกำหนดต่างๆ
3. ทดสอบและปรับแก้อัลกอริทึมต่างๆ
4. จัดทำเอกสารและรายงานการวิจัย

### 4. เป้าหมายของโครงการ

1. ลดความผิดพลาดในการตรวจสอบการควบคุมคุณภาพของไดรฟ์ด้วยแรงงานคน

2. ลดเวลาในการตรวจสอบการควบคุมคุณภาพของไดรฟ์
3. ค้นแบบระบบตรวจสอบด้วยภาพแบบอัตโนมัติ

### 5. ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

#### 5.1 ด้านเศรษฐศาสตร์/เชิงพาณิชย์

1. ช่วยลดเวลา
2. ค่าใช้จ่าย
3. เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

#### 5.2 ด้านสังคม

อุตสาหกรรมทางด้าน HDD จะได้ประโยชน์จากการที่มีบุคลากรทางการพัฒนาและวิจัยในระดับสูงเพิ่มมากขึ้น เพื่อเป็นกำลังในการเพิ่มผลผลิตต่อไป

#### 5.3 ด้านวิชาการ

สร้างองค์ความรู้ด้านการทดสอบส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ ให้กับภาคอุตสาหกรรม HDD

### 6. การพัฒนาเทคโนโลยี/นวัตกรรมของโครงการ

เทคโนโลยีหลักที่จะได้จากการพัฒนาโครงการวิจัยนี้คือ เทคโนโลยีตรวจสอบด้วยภาพอย่างอัตโนมัติ (Automated Visual Inspection) เทคโนโลยีการใช้ภาพดังกล่าวกำลังได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้ตรวจสอบชิ้นงานในรูปแบบต่างๆ อันจะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต ลดการสูญเสียและลดเวลาในการผลิตชิ้นงานได้

### 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัท ฮิตาชิ โกลบอล สตอเรจ เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย และขอขอบคุณศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านการผลิตขั้นสูงในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ภายใต้โครงการวิจัยเพื่อการศึกษาระดับปริญญาตรี โท และเอก

### 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] กนต์ธร ชำนิประศาสน์, การวัดเชิงกลด้วย LabVIEW, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [2] National Instruments. (2005). NI-IMAQ for USB Cameras (online). Available: [http://www.csun.edu/~rd436460/Labview/NI-IMAQ\\_for\\_USB\\_Cameras\\_User\\_Guide.pdf](http://www.csun.edu/~rd436460/Labview/NI-IMAQ_for_USB_Cameras_User_Guide.pdf)
- [3] National Instruments. (2005). NI Vision Concepts Manual (online). Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372916e.pdf>
- [4] National Instruments. (2007). NI Vision Assistant Tutorial (online). Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372228h.pdf>



การประชุมเสนอผลงานบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ครั้งที่ 1 ปีการศึกษา 2551  
3 กุมภาพันธ์ 2552 ณ ห้องประชุมสำนักวิทยาศาสตร์  
อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## NUMERICAL SIMULATION AND WALL SHEAR STRESS ANALYSIS OF PULSED FLOW IN PLATE HEAT EXCHANGER

การจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ความเค้นเฉือนที่ผนังจากการไหลของของไหลที่  
ไหลเป็นจังหวะในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

Pichitra Uangpairoj and Kontorn Chamniprasart

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

### Abstract

Wall shear stress is one parameter of cleaning enhancement in cleaning in place (CIP) system. In this study, the shear stresses that are generated by various type of pulsed flow at the wall of plate heat exchangers will be investigated by using finite volume method of the commercial computational fluid dynamics code (FLUENT®). The expected results might be useful for the cleaning in place enhancement in plate heat exchanger which is normally used in dairy process.

In program testing step, wall shear stresses that were generated by turbulent steady flow and turbulent pulsating flow were investigated in straight pipe (2D). According to simulation results, there is no difference of wall shear stress analysis between steady flow and pulsed flow. These simulation results are not related to the experimental analysis. Consequently, program testing and learning are continued for future work.

**Keywords:** wall shear stress, CFD, pulsed flow

### 1. Introduction

During thermal treatment in dairy industry, there is an undesired build-up of deposits on the surfaces of pipes and equipment especially heat exchangers. The undesired deposits, fouling, can be created when protein in milk is denatured and deposited on the heat transfer surface. Build-up of fouling reduces heat transfer because an insulated property of the fouling increases the heat resistance at the heat transfer surface. It also increases the pressure drop due to the increase in surface roughness and the decrease in cross section area of the flow channels. For safety impact, fouling is the source of

contamination in dairy product because of the accumulation of microorganisms. Fouling is used to protect microorganisms from cleaning, especially thermophile microorganism [6]. Because of these problems, there are many researchers who try to understand the fouling formation on the plate heat exchanger surface. Grijpsperdt et al. (2003) [5] used 2D and 3D computational fluid dynamics (CFD) to investigate flow pattern of milk between two corrugated plates. The calculations identified the influence of corrugation shape on fouling. Because of the angle of corrugation shape, the reverse flow regions are created. The longer heating time of fluid particle causes more fouling in the reverse flow regions. As same as Bonis and Ruocco (2006)[3], they used CFD simulation (COMSOL Multiphysics v.3.2a) to study the deposit of  $\beta$ -lactoglobulin on the plate heat exchanger surface. They found that the temperature and velocity distribution can be used to explain the fouling distribution. The stagnation regions and the regions where the fluid is slowed down are the weak spots with respect to fouling, because the contact time between fluid and heating wall is longer than other regions. At the same time, the outlet channel where the fluid temperature increases from 60 °C to 97 °C, the most of the fouling is created due to  $\beta$ -lactoglobulin denaturation. These outcomes led to the new plate heat exchanger system, designed for the uniformity of flow distribution. The new system could reduce the deposited mass to 1/10, compare to the current system [7] Although, plate heat exchanger can be modified to reduce the deposit on the surface, the regular cleaning of the plant is still necessary. Cleaning in place (CIP) is one part of cleaning systems which is used in large-scale production. In the CIP system, substrates are circulated to remove the deposits

from the surfaces. The cleaning efficiency is affected by chemical concentration, temperature and fluid flow. Therefore, one way to enhance the cleaning is fluid flow adjustment. Gillham et al. (2000) [4] studied the effect of pulsed flow on cleaning enhancement of whey protein soil in the tube. Pulsed flows of 0.5% (w/w) NaOH were generated by a bellow unit and a piston device which generated pulse frequency less than 2 Hz (low frequency) and the magnitude of pulsed amplitude were greater than steady flow velocity. The results of this study show that pulsing both increased the rate of cleaning and changed the cleaning rate behavior, especially in decay stage. Because reverse flow, generated by pulsed flow, can increase wall shear stress. Pulsed flow cleaning is most effective when the amplitude of pulsed flow is greater than the steady flow velocity. There is another study that relate to Gilham's study. Blel et al. (2009) [2] studied the effect of turbulent pulsating flows to the bacteria removal in straight pipe. Pulsatile flows were generated by solenoid valve in pulsation generator system. The range of amplitude and frequency of pulsed flow were 0-0.81 m/s and 0-2.86 Hz, respectively. The study shows that pulsed flow can reduce the number of bacteria more than steady flow. The bacteria removal enhancement is control by the combination of amplitude and frequency effects. For *Bacillus cereus* spores removal, the optimal amplitude and frequency are 0.73 m/s and 2.5 Hz, respectively. Moreover, the recirculation that is generated when the amplitude of pulsations is higher than the average velocity induces high fluctuating shear rate at the wall. This effect can enhance deposit removal as Gilham's study.

Besides, there is the research of wall shear stress in the corrugated wall. Nishimura and Matsune (1998) [9] used finite element method to study the behavior of vortices generated by pulsed flow in asymmetric and symmetric channel. The study shows that there is rotating vortex in furrow of channel. The channel geometry affects on the behavior of vortices. The vortex expands in each furrow during deceleration phase and shrinks during the acceleration phase. The frequency of pulsed flow affects on the vortex strength. An increment of frequency leads to promote vortex strength, causes higher wall shear stress. Metwally and Manglik (2004) [8] investigated the laminar steady flow of viscous liquids in sinusoidal corrugated parallel-plate channels. Their results related to the study of Nishimura and

Matsune that the channel geometry affects on the behavior of flow field. With increasing corrugation aspect ratio, the furrow of the channel is deeper, swirl flows are generated in the corrugation troughs. Meanwhile, the increment of Reynolds produces similar effect as the increasing of corrugation aspect ratio.

In this research, the shear stresses that are generated by various type of pulsed flow at the wall of plate heat exchanger will be investigated by numerical simulation. The expected results might be useful for the cleaning in place enhancement in plate heat exchanger which is normally used in dairy process. In program testing step, wall shear stresses that are generated by turbulent steady flow and turbulent pulsating flow are investigated in straight pipe (2D). These simulated results will be used to compare with the experimental analysis.

## 2. Research Procedure

In the commercial computational fluid dynamics code (FLUENT<sup>®</sup>) testing step, wall shear stresses that are generated by turbulent steady flow and turbulent pulsating flow are investigated in straight pipe (2D). These simulated results will be used to compare with the experimental analysis.

### 2.1. Experimental analysis

To investigate wall shear stress of turbulent flow, the electrolytic solution was flowed in a straight pipe (2.3 cm in inner diameter, 25 cm length) made of stainless steel (2B Bright Annealed Finish; average absolute roughness  $0.3 \pm 0.05 \mu\text{m}$ ) and was placed downstream the pulsations generator after an establishment length of the flow equal to  $30xD$ . The tested pipe submitted to pulsatile flow generated by a pulsation system as shown in figure.1, was obtained by an electrochemical technique [1]. This technique was used to measure the limiting diffusional current given by a redox reaction of electrolytic solution (a mixture of potassium ferricyanide, potassium ferrocyanide and sodium hydroxide, The density of this solution is  $1028 \text{ kg/m}^3$  and its dynamic viscosity is  $0.985 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$  at  $22^\circ\text{C}$ ). The diffusional current was sensed by microelectrodes which were place inside the tested pipe. And the limiting current was converted into the average local wall shear stress.

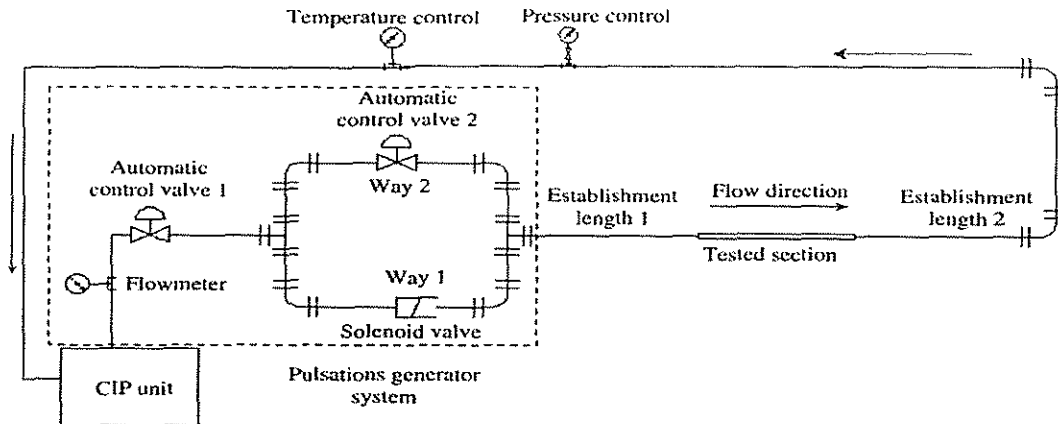


Figure.1 Schematic diagram of the pulsation generation system and the tested section.

## 2.2. Numerical analysis

To investigate wall shear stress of turbulent flow, CFD code (FLUENT<sup>®</sup>) was used to simulate the electrolytic solution flow in pipe (2.3 cm in inner diameter, 1m length). Uniform mesh was generated using GAMBIT. Steady and unsteady conditions are assumed for turbulent steady flow and turbulent pulsating flow, respectively. The velocity inlet could set as a constant and a sine function (eq.1) for steady flow and pulsating flow, respectively.

$$u(t) = \bar{u} + u_p \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

Assumption:

- The fluid was constant object property and incompressible fluid;
- Pipe was laid on horizon level, the effect of gravitation could be ignored;
- The fluid-solid contact surface was non-slip boundary;
- The fluid was axisymmetrical two-dimensional flow

The numerical model is based on solving conservation of mass, momentum with the standard k-epsilon turbulence model as shown in following equation:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) + \nabla P - \nabla \cdot \left( \bar{\tau} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\text{where } \bar{\tau} = \mu \left( (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) - (2/3) \nabla \cdot \bar{u} I \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \quad (6)$$

$$\text{where } C_{1\varepsilon} = 1.44; C_{2\varepsilon} = 1.92; C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3$$

## 3. Results and analysis

### 3.1. Experimental analysis

There are ten conditions of pulsating flow generated by the pulsation system (figure.1). Table.1 gives pulsations parameters corresponding to each condition, with Reynolds numbers  $Re_{max}$ ,  $Re_p$  and  $Re_n$  respectively based on the maximum velocity,  $u_{max}$ ; the amplitude of the pulsation,  $u_p$  and the average velocity,  $u_s$ . The velocity can be represented by a sinusoidal oscillation around a periodically time-averaged value of the mean velocity and can be formulated as in eq. 1.

Table.1 Hydrodynamic parameters for each pulsation condition

No.	Pulsation condition	Mean velocity (m/s)	Amplitude of the pulsations(m/s)	Frequency of the pulsations (Hz)	$Re_{max}$	$Re_p$	$Re_n$
(a)	500-500ms(1600-2600 L/h) <sup>a</sup>	1.54	0.48	1	48210	11525	36690
(b)	100-300ms(1600-2600 L/h)	1.47	0.40	2.5	44430	9530	35000
(c)	100-500ms(1600-2600 L/h)	1.27	0.61	1.66	44790	14540	30250
(d)	50-300ms(1600-2600 L/h)	1.27	0.40	2.86	39730	9500	30250
(e)	100-300ms(1200-2600 L/h)	1.21	0.73	2.5	46170	17390	28770
(f)	50-300ms(1200-2600 L/h)	1.03	0.60	2.86	38970	14450	24520
(g)	100-500ms(1200-2600 L/h)	1.02	0.81	1.66	43550	19270	24280
(h)	100-300ms(600-2200 L/h)	0.78	0.73	2.5	35850	17320	18530
(i)	100-300ms(300-1500 L/h)	0.59	0.69	2.5	30510	16500	14020
(j)	Steady (2200 L/h)	1.47	0	0	0	0	35000

<sup>a</sup> opening time-closing time (minimum flow rate – maximum flow rate)

Mean wall shear stresses that were sensed by microelectrode for different flow conditions are shown in figure.2

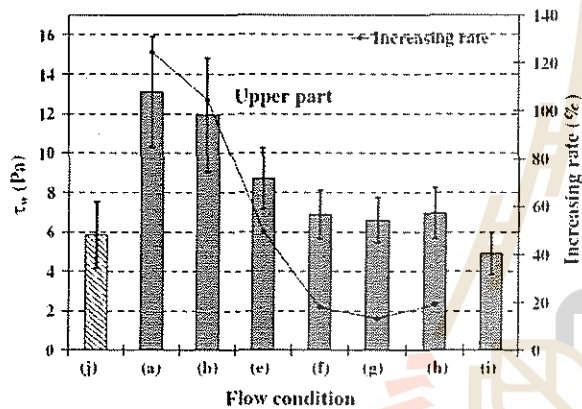


Figure.2 Comparison of mean wall shear stresses between the tested flow conditions and increasing rates compared to the steady flow. (Increasing rate = 100 x (pulsating value – steady value)/steady value).

Figure.2 shows that mean velocity, amplitude and frequency of the pulsations affect to mean wall shear stress. Mean wall shear stresses increase with mean velocity of the pulsations as the comparison among condition (a), (b) and (e). With the same level of mean velocity, the effect of amplitude and frequency of the pulsations can increase wall shear stress as the comparison among condition (a), (b), (e), (f), (g) and (j). Although the mean velocity in condition (h) is two times lower than steady flow (condition (j)), but mean wall shear stress of condition (h) is higher than steady flow. Because the amplitude of pulsation is close to the mean velocity, it nearly induces recirculation in pipe. Therefore, wall shear stress of turbulent flow can be increased by the combination effect of amplitude and frequency of the pulsations. Because the effect of amplitude and frequency can increase mass transfer due to the electrochemical reaction at the boundary layer.

### 3.2. Numerical analysis

In CFD code testing step, wall shear stresses profile along the axial position of pipe were investigated. In entrance region, the boundary layer grow in order to retard the axial flow at the wall. It makes axial velocity to adjust slightly until fully developed flow occurs. Due to the relationship between axial velocity and wall shear stress, the local wall shear stresses in first part of pipe (0-0.6 m) are vary as shown in the numerical results. Figure.3 shows the comparison of upper wall shear stress between turbulent steady flow and turbulent pulsating flow. There is no difference of upper wall shear stress of steady and pulsed flow. This result indicates that the above numerical model responds the same to the different flow conditions. However, the different mean wall shear stress between steady and pulsed flow was detected in the experimental analysis (condition (b) and (j)).

The upper wall shear stress comparison of turbulent steady flow between numerical and experimental solution is shown in Figure.4. The numerical solution is close to the experimental result. Meanwhile, the numerical solution is totally different from the experimental result for pulsating flow in pipe as shown in figure.5. Therefore, these numerical models of CFD code are more effective to predict wall shear stress of turbulent steady flow than turbulent pulsating flow. It's possible that the numerical models don't include energy equation and the suitable turbulence model for pulsed flow simulation.

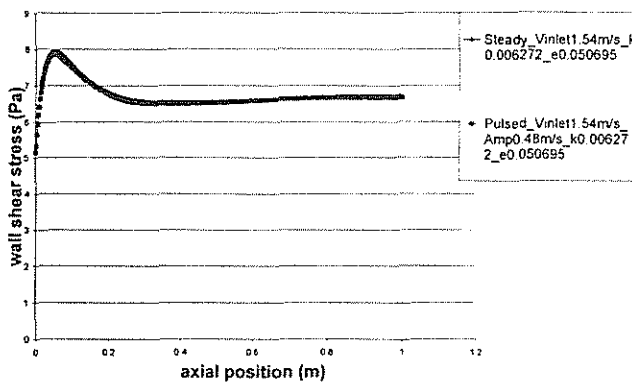


Figure.3 Upper wall shear stress along the pipe of turbulent steady flow and turbulent pulsating flow (velocity inlet of steady flow = 1.54 m/s, velocity of pulsed flow =  $1.54 + 0.48 \sin(2\pi ft)$ ).

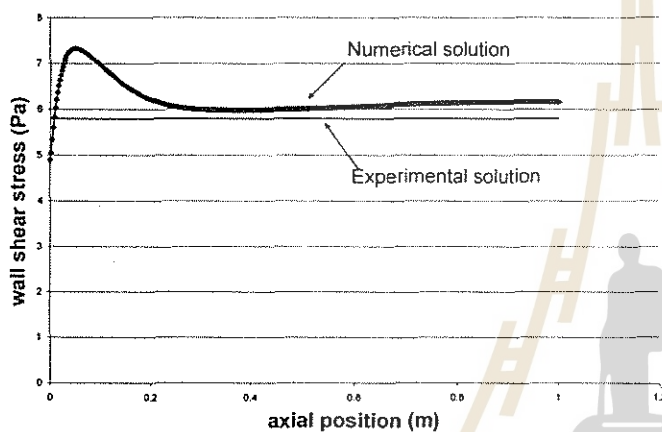


Figure.4 Comparison between upper wall shear stress along the pipe of turbulent steady flow and experimental result (velocity inlet = 1.47 m/s).

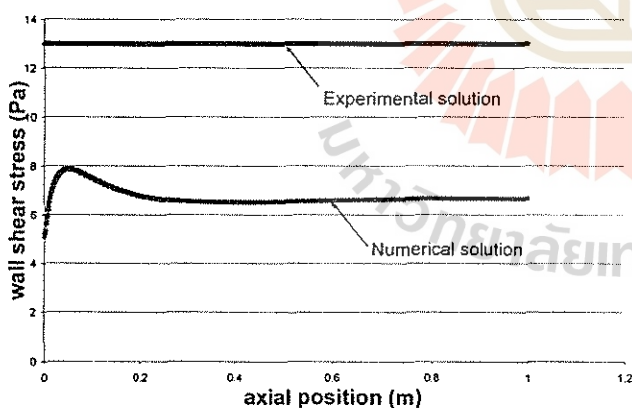


Figure.5 Comparison between upper wall shear stress along the pipe of turbulent pulsating flow and experimental result (velocity of pulsed flow =  $1.54 + 0.48 \sin(2\pi ft)$ ).

#### 4. Conclusion

Wall shear stresses of turbulent steady flow and turbulent pulsed flow are investigated by experimental and numerical analysis. In experimental analysis, mean wall shear stresses increase with mean velocity of the pulsations. And wall shear

stress of turbulent flow can be increased by the combination effect of amplitude and frequency of the pulsations. Meanwhile, the numerical model, is based on solving conservation of mass, momentum with the standard k-epsilon turbulence model, can not discriminate wall shear stress between steady and pulsed flow. However, these numerical models of CFD code are more effective to predict wall shear stress of turbulent steady flow than turbulent pulsating flow.

In future works, energy equation and other turbulence models will be employed to predict wall shear stresses, in order to find the suitable numerical model for pulsating flow simulation. Then, wall shear stress of various type of pulsed flow in straight pipe and plate heat exchanger will be investigate.

#### 5. References

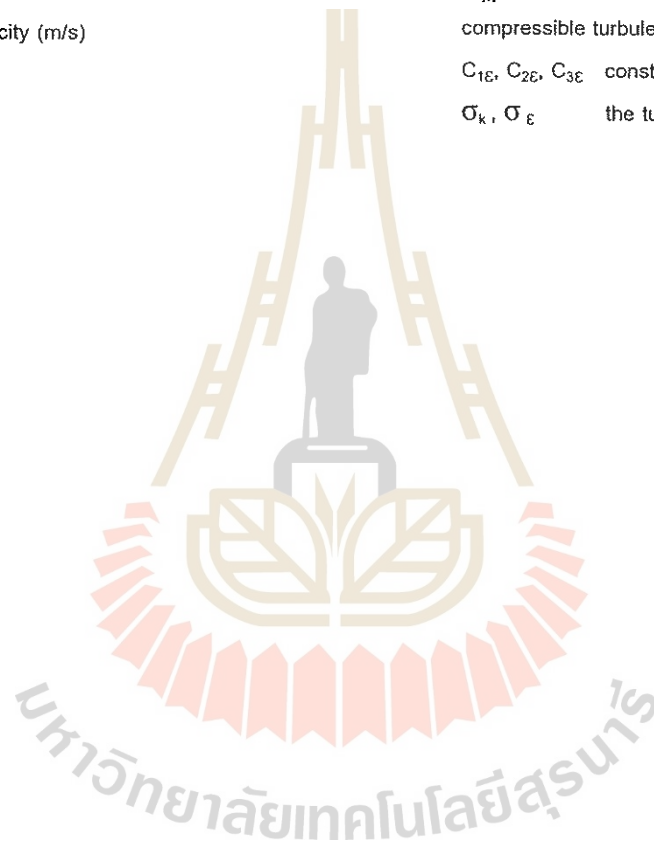
- [1] Blel, W., Gentil-Lelievre, C.L., Benezech, T., Legrand, J. and Legentilhomme, P. (2009). Application of turbulent pulsating flows to the bacterial removal during a cleaning in place procedure. Part 1: Experimental analysis of wall shear stress in a cylindrical pipe 90:422-432.
- [2] Blel, W., Gentil-Lelievre, C.L., Benezech, T., Legrand, J. and Legentilhomme, P. (2009). Application of turbulent pulsating flows to the bacterial removal during a cleaning in place procedure. Part 2: Effects on cleaning efficiency. *Journal of Food engineering* 90: 433-440.
- [3] Bonis, M. V. D. and Ruocco, G. (2006). Fouling of heat exchangers in the dairy industry by coupling and kinetics modeling. *COMSOL Users Conference*.
- [4] Gillham, C. R., P.J., Hasting, A.P.M. and Wilson, D.I. (2000). Enhanced cleaning of whey protein soils using pulsed flows. *Journal of Food Engineering* 46: 199-209.
- [5] Grijspeerdt, K., B. Hazarika and D. Vucinic (2003). Application of computational fluid dynamics to model the hydrodynamics of plate heat exchangers for milk processing. *Journal of Food Engineering* 57(237-242).
- [6] Hinton, A. R., Trinh, K.T., Brooks, J.D. and Manderson, G.J. (2002). Thermophile survival in milk fouling and on stainless steel during cleaning. *Trans IChemE* 80: 299-304.
- [7] Jun, S. and Puri, V. M. (2005). 3D milk-fouling model of plate heat exchangers using computational fluid dynamics. *International Journal of Dairy Technology* 58(4): 214-224.

- [8] Metwally, H. M. and Manglik, R.M. (2004). Enhanced heat transfer due to curvature-induced lateral vortices in laminar flows in sinusoidal. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47: 2283-2292.
- [9] Nishimura, T. and Matsune, S. (1998). Vortices and wall shear stresses in asymmetric and symmetric channels with sinusoidal wavy walls for pulsatile flow at low Reynolds numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 19: 583-593.

#### 6. Nomenclature

$u(t)$	instantaneous velocity (m/s)
$\bar{u}$	average velocity (m/s)
$u_p$	amplitude velocity (m/s)
$f$	frequency (Hz)
$t$	times (s)
$I$	unit tensor

$\vec{u}$	local instantaneous velocity vector (m/s)
$P$	pressure (Pa)
$\mu$	dynamic viscosity (kg/m.s)
$\rho$	density (kg/m <sup>3</sup> )
$\tau$	stress tensor (N/m <sup>2</sup> )
$k$	turbulence kinetic energy
$\varepsilon$	rate of dissipation
$G_k$	the generation of turbulence kinetic energy due to the mean velocity gradients
$G_b$	the generation of turbulence kinetic energy due to buoyancy
$Y_M$	the contribution of the fluctuating dilatation in compressible turbulence to the overall dissipation rate
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	constants
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	the turbulent Prandtl numbers



การประชุมเสนอผลงานบัณฑิตศึกษาศึกษาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ครั้งที่ 1 ปีการศึกษา 2551  
3 กุมภาพันธ์ 2552 ณ ห้องประชุมสำนักวิทยาศาสตร์  
อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยกระบวนการย่อยสลาย  
แบบไร้ออกซิเจน**  
**BIOGAS PRODUCTION FROM SHRIMP CULTURE POND SEDIMENT  
BY ANAEROBIC DIGESTION**

ประสิทธิ์ ศรีนคร , กนต์ธร ชำนิประศาสน์ , จิระพล ศรีเสริฐผล  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทร 0-4422-4410 โทรสาร 0-4422-4613  
E-mail : sr\_prasit@hotmail.com

Prasit Srinakorn , Kontorn Chamniprasart , Jiraphon Srisertpol  
School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakorn Ratchasima 30000 Thailand Tel : 0-4422-4410 Fax : 0-4422-4613  
E-mail : sr\_prasit@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

ปัจจุบันนี้การเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลในประเทศไทยได้มีการขยายตัวเพิ่มขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคกุ้งทะเล การเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลดังกล่าวทำให้เกิดปัญหาตามมา เนื่องจากตะกอนเลนที่เกิดขึ้นในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นมลพิษที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ของเสียที่มีปริมาณมากเหล่านี้ทำให้เกิดมลภาวะทั้งภายในฟาร์มและระบบนิเวศป่าชายเลนใกล้เคียง ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะจัดการกับตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) เพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน และสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังจะสามารถได้ก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นแสงสว่างภายในฟาร์มและใช้ทดแทนเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง, ก๊าซหุงต้ม (LPG) และก๊าซธรรมชาติ (NGV) เป็นต้น และเป็นการผลิตพลังงานทดแทนขึ้นมาใช้ในประเทศอีกทางหนึ่ง

**1) บทนำ**

การเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลมีในประเทศไทยมากกว่า 70 ปีแล้ว โดยเริ่มต้นเลี้ยงในภาคกลางบริเวณ 3 สมุทรของไทย คือ สมุทรสาคร สมุทรสงคราม และสมุทรปราการซึ่งมีอาณาเขตติดต่อกับอ่าวไทยตอนบน การเลี้ยงในระยะเริ่มแรกเป็นระบบการเลี้ยงแบบธรรมชาติ ในช่วงเวลานั้นได้มีการพัฒนาระบบการเลี้ยงมาเป็นแบบพัฒนาและมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกุ้งเป็นที่ต้องการของตลาดต่างประเทศ ต่อมาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลบริเวณอ่าวไทยตอนบนล่มสลายลง เนื่องจากมีการเพาะเลี้ยงอย่าง

หนาแน่นมากเกินไป ทำให้คุณภาพของน้ำไม่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยง เกิดโรคระบาด

ราคากุ้งตกต่ำและไม่มีห้องเย็นรองรับ การเพาะเลี้ยงกุ้งจึงขยายไปยังจังหวัดภาคตะวันออก คือ จันทบุรี ระยองและตราด ซึ่งในขณะนั้นน้ำทะเลยังคงมีคุณภาพดี แล้วจึงได้ขยายพื้นที่การเพาะเลี้ยงออกไปยังภาคใต้ฝั่งอ่าวไทยและขยายต่อไปยังภาคใต้ฝั่งทะเลอันดามัน (รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2543 : 76,77)

จากสถิติการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลในปี พ.ศ. 2529 ประเทศไทยสามารถผลิตกุ้งทะเลจากการเพาะเลี้ยงได้ 13,900 ตัน และผลผลิตการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในปี พ.ศ. 2539 ประเทศไทยสามารถผลิตกุ้งทะเลจากการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้นเป็น 241,000 ตัน คิดเป็นมูลค่า 31,132.5 ล้านบาท และมีการขยายพื้นที่ของการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลเพิ่มขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยมีฟาร์มเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล 33,444 ฟาร์ม พื้นที่การเพาะเลี้ยง 448,908 ไร่ สามารถผลิตกุ้งทะเลได้ทั้งหมด 401,300 ตัน คิดเป็นมูลค่า 46,634.9 ล้านบาท (กรมประมง สถิติการประมง, 2542, 2548 : 18, 24, 39)

## 2) ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมื่อการขยายตัวเพิ่มขึ้นของกลุ่มเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งทะเล ได้มีผู้ที่เกี่ยวข้องทำการศึกษาดังผลกระทบบนจากการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล พบว่าการเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดมลพิษทางสภาพแวดล้อมชายฝั่ง โดยผ่านทางน้ำและ ตะกอนเลนที่ปล่อยทิ้งออกมาจากบ่อ (สำเนียง โยบายน และ แผนสิ่งแวดล้อม, 2540 : 152) เกษตรกรมักปล่อยตะกอนเลนออกจากบ่อระหว่างการเลี้ยงหรือดูดเลนเมื่อต้องการจะเตรียมบ่อใหม่ ตะกอนเลนดังกล่าวเป็นของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้ง ประกอบด้วยซากแพลงก์ตอน เศษอาหาร รวมถึงมูลกุ้ง ซึ่งของเสียดังกล่าวมีปริมาณแอมโมเนียที่สูงและส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำโดยตรง จึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบ นิเวศป่าชายเลนเกิดมลภาวะและดินเขิน (คณิต ไซยาคำ และ ยงยุทธ ปริดาลัมพะบุตร, 2537 : 3)

### 2.1 ผลกระทบจากการเลี้ยงกุ้งทะเล

สถานการณ์ทรัพยากรชายฝั่งทะเลและมหาสมุทรในปัจจุบันยังคงอยู่ในสภาวะที่น่าเป็นห่วง ทรัพยากรเหล่านั้นประสบปัญหาความเสื่อมโทรมและมีแนวโน้มว่าจะเสื่อมโทรมลงเรื่อยๆ ไม่ว่าจะเป็นทรัพยากรประมง คุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง ป่าชายเลน ชายหาดและชายฝั่ง แหล่งหญ้า ทะเลและปะการัง ซึ่งความเสื่อมโทรมของทรัพยากรเหล่านี้ย่อมส่งผลไปถึงสัตว์น้ำต่างๆ ที่อาศัยอยู่ในระบบนิเวศทะเล และชายฝั่งด้วย เช่น พะยูน นกชนิดต่างๆ และเต่าทะเล ส่วนสาเหตุของความเสื่อมโทรมก็ยังคงเป็นสาเหตุมาจากการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล ดังนั้นทุกๆ ฝ่ายไม่ว่าจะเป็นภาครัฐ เอกชนหรือเกษตรกรผู้ประกอบการอาชีพทางด้าน การเลี้ยงกุ้งทะเล จึงควรตระหนักถึงความสำคัญต่อทรัพยากรชายฝั่งและมหาสมุทรให้มากขึ้นและร่วมมือกันในการที่จะดูแลรักษาอย่างจริงจังต่อไป (รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2543 : 79)

### 2.2 ของเสียจากการเลี้ยงกุ้งทะเล



ภาพที่ 1 ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้งทะเล

### 2.3 การขนย้ายตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งออกจากบ่อ

ในขั้นตอนของการเตรียมบ่อ เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งจะต้องเอาตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งของเก่าออกก่อนจึงจะดำเนินการเลี้ยงในครั้งต่อไปได้ ปัจจุบันการนำเอาตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งออกจากบ่อได้กระทำกันอยู่ 2 แบบคือ ดักตะกอนเลนออกจากบ่อและดูดตะกอนเลนออกจากบ่อ ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นจะมีขั้นตอนที่แตกต่างกัน ดังนั้นไม่ว่าจะขนย้ายตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งออกด้วยแบบใดก็ตาม ปัญหาที่ตามมาคือตะกอนเลนนั้นก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศป่าชายเลน

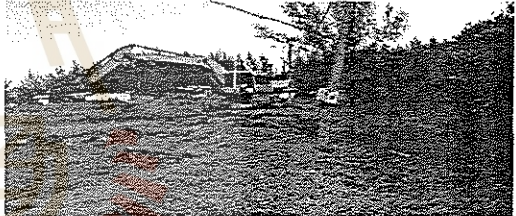
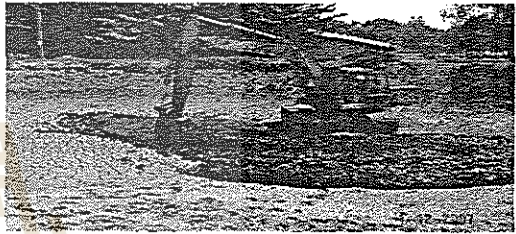
### 2.3.1 การดักตะกอนเลนออกจากบ่อ

- หลังจากจับกุ้งจำหน่ายแล้วจะต้องตากบ่อทิ้งไว้ประมาณ 10-20 วัน (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ) เพื่อให้ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งและดินพื้นบ่อแห้ง



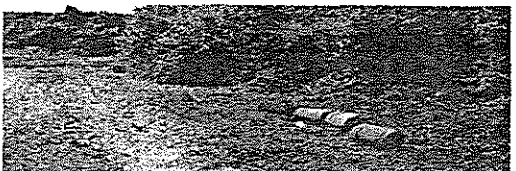
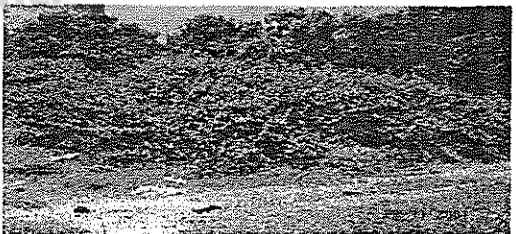
ภาพที่ 2 การตากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งและดินพื้นบ่อ

- ใช้เครื่องจักรกลกวาดและดักตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งออกจากบ่อโดยนำไปกองหรือขุดฝังกลบไว้ที่ขอบคันบ่อของแต่ละบ่อ



ภาพที่ 3 กวาดและดักตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งออกจากบ่อ

- สภาพของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ดักออกจากบ่อ นำมากองไว้ที่บริเวณขอบคันบ่อสะสมไว้เป็นเวลานานทำให้พื้นที่ใช้สอยลดน้อยลงไปและเมื่อเลี้ยงกุ้งในครั้งต่อไปก็จะทำให้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4 ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ดักออกมากองไว้บริเวณคันบ่อ



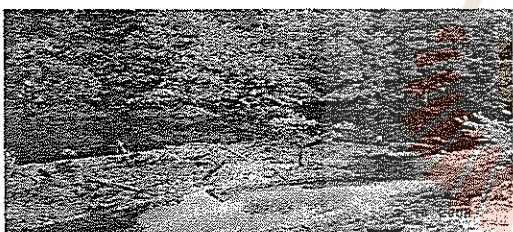
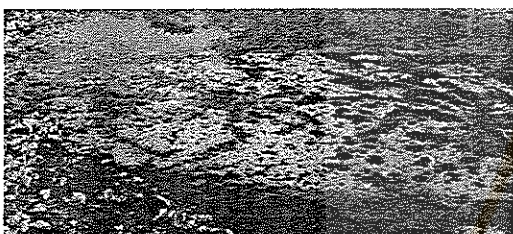
### 2.3.2 การดูตะกอนเลนออกจากบ่อ

- หลังจากจับกุ้งจำหน่ายแล้วภายในระยะเวลา 1-2 วัน จะต้องดูตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งออกทันที (หากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งแห้งจะยากต่อการดูออก) และขณะดูตะกอนเลนนั้นจะต้องใช้น้ำฉีดช่วยละลายกอง ตะกอนเลนเพื่อให้ง่ายต่อการดูและไหลไปตามท่อส่งไปยังบ่อเก็บตะกอนเลน



ภาพที่ 5 การดูตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งออกจากบ่อ

- ตะกอนเลนที่ดูออกจากบ่อก็จะอยู่ในบ่อเก็บ ส่วนที่เป็นน้ำเหลวก็จะล้นออกจากบ่อเก็บไหลลงสู่คลอง ธรรมชาติในป่าชายเลน (ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมของระบบนิเวศป่าชายเลน)



ภาพที่ 6 บ่อเก็บตะกอนเลนและส่วนที่เป็นน้ำเหลวล้นออกจากบ่อเก็บไหลลงสู่คลองธรรมชาติ



ภาพที่ 7 บ่อเก็บตะกอนเลนเมื่อสะสมไว้เป็นเวลานาน

จากสภาพปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงเกิดแนวคิดที่จะจัดการกับตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ซึ่งเป็นของเสียและส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมของระบบนิเวศป่าชายเลน มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยการนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) เพื่อนำไปใช้ร่วมกันหรือใช้ทดแทนเชื้อเพลิงชนิด

อื่นๆ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง, ก๊าซหุงต้ม (LPG) และก๊าซธรรมชาติ (NGV) เป็นต้น และเป็นการผลิตพลังงานทดแทนขึ้นมาใช้ในประเทศอีกทางหนึ่ง

### 2.4 คำจำกัดความของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

“ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง” หมายถึงซากแพลงก์ตอนพืช, ซากแพลงก์ตอนสัตว์, สิ่งขับถ่ายจากตัวกุ้ง (มูลกุ้ง), ตะกอนน้ำ, ตะกอนดิน, ปูนขาวหรือสารแขวนลอยอื่นๆ ทั้งหมดรวมกันแล้วเป็นของเสียที่อยู่ในบ่อเลี้ยงกุ้ง ซึ่งจะกองรวมกันอยู่ตรงกลางบริเวณพื้นบ่อ มีลักษณะเป็นโคลนเหลว (Sludge) สีดำเข้มมีกลิ่นเหม็นเล็กน้อย

### 3) ปรัชศัณวรณ์กรรมที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนเอกสาร สิทธิบัตร และการผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศไทยพบว่ายังไม่มีการนำเอาตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งมาใช้ในการผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ และจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศไทยพบว่างานวิจัยในปัจจุบันจะเป็นการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม, เศษอาหาร, เศษผัก, เศษผลไม้, มูลสุกรและมูลวัวดังนี้

สุรพล สุวคนธ์, 2526 ศึกษาวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพจากการหมักมูลวัวแบบกึ่งต่อเนื่องในสภาพไร้ออกซิเจน โดยใช้ขวดหมักขนาด 2.75 ลิตร และใช้ไม้ไผ่เป็นตัวกลาง ที่ระยะเวลาการหมัก 50 วัน พบว่า มี ปริ มา ณ ก๊าซ มี เเทน อยู่ ประมาณ 60.3% และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ประมาณ 36.1%

สนั่น ตั้งสถิตย์, 2538 ศึกษาการบำบัดของเสียและผลิตพลังงานจากมูลสุกรโดยกระบวนการแอนแอโรบิกแบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์จากมูลสุกรด้วยถังหมักที่มีการกวน ดังมีปริมาตร 6.04 ลิตร และขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบครึ่งฟิล์ม ดังมีปริมาตร 2.54 ลิตร มีการใช้ตัวกลางโพลีเอไมด์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเส้นด้าย เพื่อให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ การป้อนอาหารของถังผลิตกรดอินทรีย์และถังผลิตก๊าซชีวภาพเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง และทำการป้อนอาหารทางด้านบนของถังหมัก จากผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีค่า 0.95 ลิตรต่อวัน ซึ่งมีก๊าซมีเทนอยู่ 72%

จิรวัดณ์ ชาลีวรรณ, 2546 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดสารอินทรีย์ของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง โดยใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนชนิดขั้นตอนเดียว ใช้ถังหมักปริมาตร 250 ลิตร และมีใบกวนอยู่ภายในถัง ผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บกัก 60 วัน ได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของระบบ 157 ลิตรต่อวัน มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ย 51.4%

อาริยา วิวัชรกุล, 2546 ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบ 2 ชั้นตอนในระดับห้องปฏิบัติการ ระบบประกอบด้วยถังหมักกรดมีปริมาตรการหมัก 27.73 ลิตร และถังหมักก๊าซมีปริมาตรการหมัก 52.83 ลิตร และมีการกวนผสมกันอย่างสมบูรณ์ทั้งสองถัง ผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 วัน ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น 54.35 ลิตรต่อวัน โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน 61.26%

### 3.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักและย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยเชื้อจุลินทรีย์ (สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมาก) เชื้อจุลินทรีย์นี้สามารถมีชีวิตอยู่ได้โดยไม่ต้องอาศัยออกซิเจน (Anaerobic Digestion) ในขณะที่ทำการย่อยสลายจะเกิดก๊าซขึ้นมากลุ่มหนึ่งประกอบด้วยมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) เป็นหลัก รองลงมาคือคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), ไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ), ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) และก๊าซอื่นๆ อีกเล็กน้อยเช่นแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ), ออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ก๊าซมีเทนมีมากที่สุด มีคุณสมบัติติดไฟได้และไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เมื่อเผาไหม้ร่วมกับอากาศจะได้เปลวไฟสีน้ำเงิน

### 3.2 วัตถุประสงค์ที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ

สารอินทรีย์ทุกชนิดที่นำเปื่อยได้สามารถนำมาหมักเพื่อผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ทั้งสิ้น แต่จะได้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากหรือน้อยและจะเกิดก๊าซชีวภาพยากหรือง่ายจะขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์นั้นว่าเป็นชนิดใด เช่น

#### 3.2.1 มูลสัตว์

สามารถเกิดก๊าซชีวภาพได้ง่าย เนื่องจากมูลสัตว์ถูกย่อยมาแล้วครั้งหนึ่งจากกระเพาะอาหารทำให้มีขนาดเล็กลง เชื้อจุลินทรีย์สามารถกัดกินย่อยสลายได้ง่าย

#### 3.2.2 ขยะจากชุมชน

เช่นเศษผัก, เศษผลไม้, เศษอาหาร ฯลฯ การใช้ของสดจะต้องลดขนาดโดยการสับหรือบดแล้วทิ้งไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ เพื่อลดปริมาณน้ำในของสดลงก่อน

#### 3.2.3 น้ำเสีย

เช่นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ, น้ำเสีย จากโรงฆ่าสัตว์, น้ำเสียจาก ชุมชน ฯลฯ

#### 3.2.4 กากตะกอน

เช่นกากตะกอนที่แยกออกจากน้ำเสีย, กากตะกอนที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยกระบวนการ ทางชีวภาพและเคมี และกากตะกอนที่เกิดในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล

### 3.3 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

การหมักแบบไร้ออกซิเจนมีแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 ชนิด คือแบคทีเรียที่สร้างกรดและแบคทีเรียที่สร้างมีเทน หลักการของการหมักแบบนี้คือ แบคทีเรียจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ไปเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงเรื่อยๆ เซลล์ของแบคทีเรียก็จะถูกออกซิไดส์หลายครั้งจน

มีผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน การหมักแบบไร้ออกซิเจนจะมีกระบวนการเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน ดังนี้

#### 3.3.1 ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากระบวนการแตกสลายโพลิเมอร์ (Polymer Break-down) ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต, โปรตีน และไขมัน จะถูกทำให้ละลายน้ำ โดยไฮโดรไลติกเอนไซม์ (Hydrolytic Enzymes) ที่ขับออกมาจากเซลล์แบคทีเรีย ผลของกระบวนการนี้จะได้สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ซับซ้อนและละลายน้ำเช่น กลูโคส, กรดอะมิโน, กรดไขมัน เป็นต้น

#### 3.3.2 ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis)

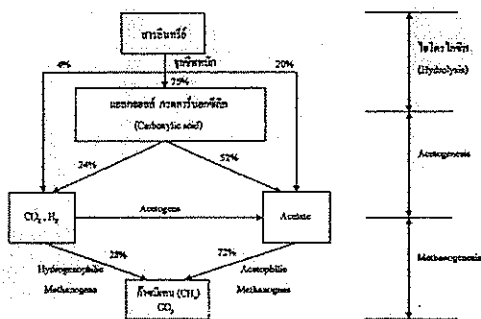
สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ซับซ้อนและละลายน้ำ ได้จากขั้นตอนที่ 1 จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดเปลี่ยนเป็นกรดโวลลาไทล์มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่นกรดอะซิติก, กรดไพรูโวนิก, กรดบิวไทริก, กรดวาเลอริก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์และสภาพแวดล้อมของปฏิกิริยา หลังจากนั้นกรดโวลลาไทล์จะถูกเปลี่ยนโดยแบคทีเรียโฮโมอะซิโตเจเนติก (Homoacetogenic Bacteria) ให้เป็นอะซิเตท, ฟอร์มเมท, ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจเรียกว่าแบคทีเรียสร้างไฮโดรเจน

#### 3.3.3 ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

ไฮโดรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์, กรดฟอร์มิกและกรดอะซิติก ซึ่งเป็นผลปฏิกิริยาของแบคทีเรียที่สร้างกรดและไฮโดรเจนจะถูกใช้โดยแบคทีเรียอีกประเภทหนึ่งเพื่อสร้างมีเทน แบคทีเรียประเภทนี้เรียกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนแบคทีเรียพวกที่สร้างกรดจะทนต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช, อุณหภูมิ และมีอัตราการเจริญเติบโตที่เร็วกว่าแบคทีเรียที่สร้างมีเทนมาก ความแตกต่างของอัตราการเจริญเติบโตนี้ทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นตัวหลักในการควบคุมปฏิกิริยาทั้งหมดในถังหมัก

เชื้อแบคทีเรียทั้ง 3 กลุ่มจะต้องมีปริมาณสัมพันธ์กันเพราะถ้าหากสารอาหารมีมากเกินไป แบคทีเรียกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 จะผลิตกรดออกมามาก จนกระทั่งแบคทีเรียกลุ่มที่ 3 หยุดทำงาน (ก๊าซไม่เกิด) หากสารอาหารมีน้อยเกินไปแบคทีเรียก็จะเจริญเติบโตช้า (ผลิตก๊าซได้น้อย) เนื่องจากขบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นผลการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดเกี่ยวข้องกัน การที่จะทำให้แบคทีเรียผลิตก๊าซไดดีนั้นจะต้องสร้างสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เพราะถ้าหากสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมจะทำให้การผลิตก๊าซได้ผลลดลง ปัจจัยสำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพคือจะต้องทำให้บ่อหมักอยู่ในสภาพที่ไม่มีก๊าซ

ออกซิเจนอยู่เลย หากมีก๊าซออกซิเจนอยู่ก็จะทำให้แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนหยุดการเจริญเติบโต นั่นหมายความว่าไม่มีการผลิตก๊าซมีเทน ดังนั้นบ่อหมักก๊าซชีวภาพถ้ามีรอยรั่วหรือปิดไม่สนิทก็จะทำให้การผลิตก๊าซมีเทนหยุดชะงักไป



ภาพที่ 8 การย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งสามขั้นตอน แบบแสดงปริมาณสารที่เกิดขึ้น

3.4 การใช้ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพในรูปพลังงานทดแทน

พลังงานจากก๊าซชีวภาพที่สามารถผลิตขึ้นใช้เองได้อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ จะสามารถชดเชยหรือทดแทนการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ กับอุปกรณ์ที่ต้องการความร้อนจากเชื้อเพลิงได้ เป็นอย่างดี เช่นทดแทนการใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) ในครัวเรือน, เครื่องกกลูกสุกร, เครื่องอบแห้ง, หม้อต้มไอน้ำ และระบบทำความเย็น ฯลฯ รวมถึงการใช้ในรูปแสงสว่างกับตะเกียง, ใช้กับเครื่องยนต์งานเกษตรหรืองานฟาร์มและผลิตกระแสไฟฟ้าใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ภายในฟาร์ม ก๊าซชีวภาพปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร

- ใช้กับตะเกียงก๊าซขนาด 60-100 วัตต์ ลูกใหม่ได้ 5-6 ชั่วโมง
- ใช้กับเครื่องยนต์ขนาด 2 แรงม้า ได้นาน 1 ชั่วโมง
- ใช้กับครอบครัวขนาด 4 คน สามารถหุงต้มได้ 3 มื้อ
- มีค่าความร้อนเทียบเท่า : ทดแทน (แสดงดังตาราง)

ตารางที่ 1 แสดงค่าความร้อนเทียบเท่า : ทดแทน ของก๊าซชีวภาพ

ค่าความร้อนเทียบเท่า :	ปริมาณ	หน่วย
ทดแทน		
ก๊าซหุงต้ม (LPG)	0.46	กิโลกรัม
น้ำมันเบนซิน	0.67	ลิตร
น้ำมันดีเซล	0.60	ลิตร
ฟืนไม้	1.50	กิโลกรัม
ถ่านไม้	0.74	กิโลกรัม
ไฟฟ้า	1.20	กิโลวัตต์ - ชั่วโมง

[ที่มา : สถานเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่]

3.5 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้นั้นจะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ปริมาณ %
มีเทน (CH <sub>4</sub> )	50-75
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	25-50
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	0-8
ไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	0-1
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S)	0-3
แอมโมเนีย (NH <sub>3</sub> )	เล็กน้อย
ออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	เล็กน้อย

[ที่มา : สถานเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่]

4) วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการและขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)
2. เพื่อออกแบบชุดผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ให้เหมาะสมกับการใช้งานในภาคครัวเรือนขนาดเล็กและขนาดกลาง
3. เพื่อศึกษาปริมาณ อัตราการเกิดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

5) ขอบเขตงานวิจัย

1. ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่นำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้มาจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกรหรือฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยวิทยาเขตตรัง
2. ออกแบบและสร้างชุดต้นแบบผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง
3. ศึกษาปริมาณ อัตราการเกิดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

6) วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับมลพิษที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้งทะเลและทฤษฎีเกี่ยวกับการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)
2. สร้างชุดต้นแบบผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง
3. ดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งด้วยชุดต้นแบบที่สร้างขึ้น
4. วิเคราะห์แยกองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยหาปริมาณของมีเทน (CH<sub>4</sub>), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>), ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>), ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S)
5. วิเคราะห์ข้อดี ข้อเสียและแนวทางปรับปรุงแก้ไขของชุดผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

### 7) สถานที่ทำงานวิจัย

1. อาคารศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2. หน่วยปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. ฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

### 8) เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. โปรแกรม AutoCAD ใช้ในการเขียนแบบและออกแบบชุดผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง
2. ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง
3. เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างชุดผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง
4. เครื่องมือวิเคราะห์แยกองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ Gas Chromatography (GC)

### 9) ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดต้นแบบผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)
2. สามารถนำตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสภาพแวดล้อมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการผลิตก๊าซชีวภาพใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนเชื้อเพลิงอื่นๆ
3. ลดปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งทะเล
4. สอดคล้องกับนโยบายเศรษฐกิจของรัฐบาลเรื่องพลังงาน
5. สอดคล้องกับนโยบายยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติกลุ่มเรื่องการพัฒนาพลังงานทดแทน

### 10) เอกสารอ้างอิง

1. สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม (2543). <http://www.onep.go.th>
2. กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, สถิติการประมง (2542, 2548). <http://www.fisheries.go.th/fish/web1/hotnews.php>
3. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน (2543). <http://www.dede.go.th/dede>
4. เครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย, ฐานข้อมูลเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ <http://teenet.chiangmai.ac.th>
5. ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตรและคณิต ไชยาคำ (2537). ผลกระทบของน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดสงขลา, กรมประมง

6. ดุสิต ต้นวิไล, คณิต ไชยาคำ, ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร และเชาว์ ศรีวิชัย (2537). การตรวจและติดตาม

### คุณภาพ

- น้ำและดินจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งกุลาดำจังหวัดปัตตานี. รายงานสัมมนาวิชาการประจำปี 2537 กรมประมง
7. ชรินทร์ แสงรุ่งเรือง (2540). ผลกระทบของน้ำทิ้งจากนาุ้งต่อคุณภาพดินและตะกอนในบริเวณอำควั่งกระเบน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
  8. สุรพล สุคนธ์ (2526). การปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพให้องค์ปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาการสอนเคมี, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
  9. สนั่น ตั้งสถิต (2538). การบำบัดของเสียและผลิตพลังงานจากมูลสุกรโดยกระบวนการแอนแอโรบิกแบบ 2 ขั้นตอน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
  10. จิรวัดณ์ ชาลีวรรณ (2546). ผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพในการหมักแบบไร้ออกซิเจนอัตรา
- การย่อยสูงของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
11. อาริยา วิรัชวรกุล (2546). การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยา ภาควิชาจุลชีววิทยา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
  12. สุนทร โคตรบรรเทา (2535). แก๊สมูลสัตว์. กรุงเทพมหานคร
  13. นิติ สุวรรณบุญจกุล (2544). การออกแบบและก่อสร้างบ่อก๊าซชีวภาพ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กรุงเทพมหานคร. 100p.
  14. เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2543). วิศวกรรมการบำบัดน้ำเสีย เล่มที่ 4. พิมพ์ครั้งที่ 1 มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพมหานคร. 645p.
  15. เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2547). วิศวกรรมการบำบัดน้ำเสีย เล่มที่ 5. พิมพ์ครั้งที่ 1 มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพมหานคร. 673p.

- 16 จักรกฤษณ์ ทิวะเดชาเทพและคณะ (2545). ประมวล  
สาระชุดวิชาการจัดการคุณภาพน้ำในโรงงาน  
อุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช. 557p.
- 17 Dieter Dcublein and Angelika Steinhauser (2008).  
**Biogas from Waste and Renewable Resources.**  
443p.



การประชุมเสนอผลงานบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมเครื่องกลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ครั้งที่ 1 ปีการศึกษา 2551  
3 กุมภาพันธ์ 2552 จังหวัด-นครราชสีมา

## การพัฒนาอุปกรณ์เปรียบเทียบวัดค่า Gram load สำหรับเครื่องวัด Gram load Develop new Gram load calibrator for Gram load tester calibration measurement

ลักษณา ชัยวินี<sup>1</sup> และ สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000  
โทร 08-2136-0931 อีเมล nong\_pong5@hotmail.com

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000  
โทร 0-4422-4236 โทรสาร 0-4422-4613 อีเมล somsaksi@sut.ac.th

Laksana Chaiwinee<sup>1</sup>, Somsak Siwadamrongpong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Tel: 08-2136-0931, E-mail: nong\_pong5@hotmail.com

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Tel: 0-4422-4236, Fax: 0-4422-4613, E-mail: somsaksi@sut.ac.th

### บทคัดย่อ

ในกระบวนการประกอบชุดหัวอ่าน หลังจากผ่านกระบวนการยิงบอลเพื่อยึด suspension กับ Arm แล้วจะมีการทดสอบค่าพารามิเตอร์ เช่น Gram load, Pitch/Roll เป็นต้น ซึ่งการผลิตในระดับอุตสาหกรรมเครื่องวัดต่างๆจะต้องได้รับเปรียบวัดอย่างสม่ำเสมอ

สำหรับเครื่องวัด Gram load ในปัจจุบันการเปรียบวัดจะทำโดยนำ HSA (Head Stack Assembly) ที่ผลิตมาโดยควบคุมค่า Gram load ให้อยู่ช่วงที่ต้องการ ซึ่งเรียก HSA นี้ว่า Golden Unit มาทำการเปรียบวัดเครื่องวัดที่ใช้งานในกระบวนการผลิต และจะต้องทำการเปรียบวัดความถูกต้องแม่นยำของเครื่องวัดทุกกะการทำงาน แต่เนื่องจาก Golden Unit ดังกล่าวมีอายุการใช้งานสั้นจึงจำเป็นต้องผลิตออกมาเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาออกแบบ ปรับปรุงต้นแบบ Golden Unit และปรับเปลี่ยนกระบวนการใช้งาน เพื่อลดต้นทุนการผลิต

### Abstract

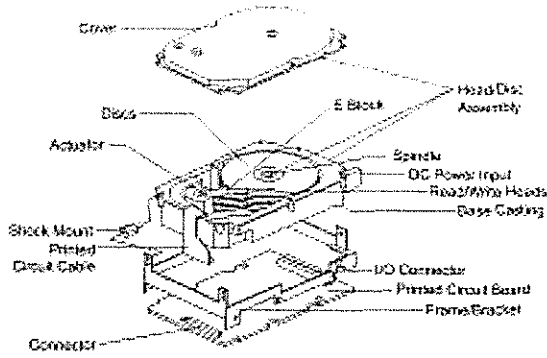
After swaging process in HSA assembly processes, the HSA will be passed through parameter testing step such as Gram load and Pitch/Roll. In mass manufacturing, tester must be calibrated over the correct period. The gram load tester is calibrated by well-gram load controlled HSA, so call Golden Unit, every shift

changing. Due to very short life of the golden unit, many of them are necessary to produce to support mass production of HDD. This study aim to design, develop and built the prototype of golden unit including Calibration process revising to reduce the manufacturing cost.

### 1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยนั้น เป็นฐานการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่สำคัญ และมีการแข่งขันในระดับประเทศเพื่อที่จะจูงใจให้เกิดการลงทุนในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยให้ประเทศของตนเป็นฐานการผลิต ซึ่งจะช่วยให้มีรายได้เข้าสู่ประเทศ ดังนั้น จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ เพื่อลดต้นทุนในการผลิต และดึงดูดเงินลงทุนรวมถึงเทคโนโลยีจากผู้ผลิตมาสู่ประเทศไทย

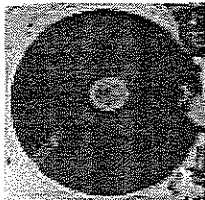
โครงสร้างของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Head Disk Drive: HDD) ดังแสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HDD)

ส่วนประกอบที่สำคัญของ HDD

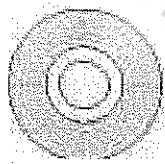
1. Platter: หรือ Disk หรือเรียกอีกอย่างว่า Media มีลักษณะเป็นแผ่นกลมบางและเรียบเคลือบด้วยสารเคมีทั้งสองด้าน (ดังรูปที่ 2 ก. และ ข.) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลมีขนาดตั้งแต่ 5.25, 3.5, 2.5 และ 1 นิ้ว Platter จะถูกแบ่งเป็น tracks ซึ่งจะตีเป็นลูกกลมซ้อนกันรอบ Platter (ดังรูปที่ 2 ค.) แต่ละด้านของ Platter จะมีชุดหัวอ่าน (Head Stack Assembly: HSA) บินอยู่เหนือผิวของ Platter โดยไม่สัมผัสกัน การบินจะใช้หลัก Aerodynamics ซึ่งเกิดจากการหมุน Platter ด้วย Spindle Motor ทำให้เกิดแรงยกที่หัวอ่าน ถ้า Motor หยุดหมุนหัวอ่านจะตกลงบน Landing and Parking Zone (บริเวณที่เมื่อ Motor หยุดหมุนชุดหัวอ่านจะยกออกจาก Platter ไปไว้บน Plastic "Ramps" ใกล้กับขอบนอกของ Platter) ดังแสดงในรูปที่ 3



ก.



ข.



ค.

รูปที่ 2 แสดงลักษณะของ Platter



รูปที่ 3 แสดงลักษณะของ Ramp

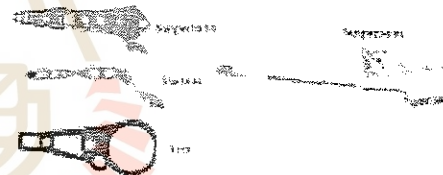
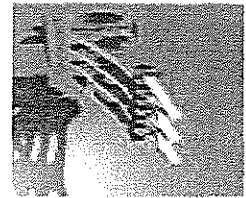
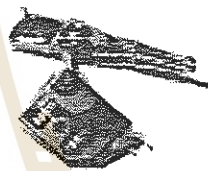
2. Voice Coil Actuator: ใช้ในการกำหนดการเคลื่อนที่ HSA ไปที่จุดต่างๆ ของ Platter และใช้ Closed-Loop Feedback System ที่เรียกว่า Servo System เพื่อควบคุมให้ HSA ไปที่ tracks ที่ต้องการ Voice Coil Actuator ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงลักษณะของ Stepper Motor

3. ชุดหัวอ่าน (Head Stack Assembly: HSA)

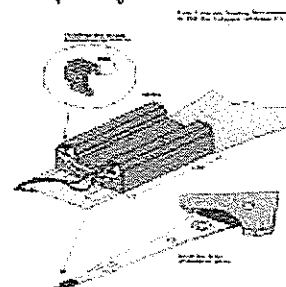
ชุดหัวอ่านจะมีการอ่านและบันทึกโดยใช้ read/write heads (ดังแสดงในรูปที่ 5) ติดตั้งด้านบนและล่างของผิว Platter แต่ละตัว ซึ่งจะตั้งวางอยู่ตำแหน่งที่แม่นยำเหนือผิว Platter และต้องสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทุกจุดบนผิว Platter



รูปที่ 5 ชุดหัวอ่าน (Head Stack Assembly: HAS)

4. หัวอ่าน/เขียนข้อมูล (Read/Write Head)

Read/Write Head (หัวอ่าน/เขียน) (ดังแสดงในรูปที่ 6) เป็นเครื่องมือที่ใช้เชื่อมโยงข้อมูลที่บรรจุอยู่ใน disk กับอุปกรณ์อื่นๆ ใน Head Disk มีการทำงานโดยทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นข้อมูล หรือเปลี่ยนข้อมูลเป็นสัญญาณไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับว่าเป็นกระบวนการอ่านหรือเขียนข้อมูล ในการทำงาน หัวอ่าน/เขียน จะลอยอยู่เหนือ disk ด้วยระยะที่กำหนด (Flying Height) ปัจจุบันกำหนดอยู่ประมาณ 5-20 nm ตามรุ่นและผู้ผลิต



รูปที่ 6 แสดงลักษณะของ Read/Write Head (หัวอ่าน/เขียน)

ซึ่งในกระบวนการประกอบชุดหัวอ่าน และประกอบฮาร์ดดิสก์ จะมี การทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นระยะทุกขั้นตอนเพื่อให้เกิดความ มั่นใจว่าชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงมีคุณลักษณะทางเทคนิคที่ ต้องการ เช่น Gram load, Pitch/Roll, Balancing เป็นต้น ซึ่งใน ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กล่าวมานี้ Gram load เป็นค่าพารามิเตอร์หนึ่งที่ สำคัญเนื่องจากจะมีผลต่อระยะ Flying Height ซึ่งจะมีการวัดทั้งใน ระดับ HGA (Head Gimble Assembly) และ HSA สำหรับเครื่องวัด Gram load ในระดับ HSA ในปัจจุบันการเปรียบวัดจะทำโดยนำ HSA ที่ผลิตมาโดยควบคุมค่า Gram load ให้อยู่ช่วงที่ต้องการซึ่งจะเรียก HSA นี้ว่า Golden Unit

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นการวัดค่า Gram Load จึงมีความสำคัญ และ เนื่องด้วยในปัจจุบันในการเปรียบวัด ตัวเครื่องวัด Gram Load ต้องใช้ ชุดหัวอ่าน (Head Stack Assembly: HSA) หรือที่เรียกว่า Golden Unit ที่ผลิตมาโดยเฉพาะภายใต้การควบคุมที่เชื่อถือได้ ซึ่งจะมีราคาสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาออกแบบ ปรับปรุงต้นแบบ Golden Unit และปรับเปลี่ยนกระบวนการใช้งาน เพื่อลดต้นทุนการผลิต

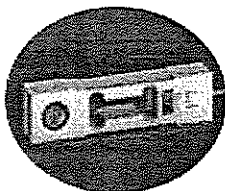
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวัดค่า Gram Load

ค่า Gram load เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของการทำงานของ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่มีผลกระทบต่อความสูงของหัวอ่านหัวเขียนเหนือ แผ่นดิสก์ (Fly Height) จากการเข้าสำรวจข้อมูลการทำงานและกลไก การทดสอบ Gram load ที่โรงงานพบว่าหัวอ่านในปัจจุบันจะมีค่า Gram load ที่ดีที่สุดในช่วงค่าที่กำหนดซึ่งมีค่าในระดับ 1.5-3.0 Gram ขึ้นกับรุ่นชิ้นงาน ซึ่งค่า Gram load ที่อยู่นอกเหนือจากช่วงที่ กำหนดจะส่งผลให้การอ่านของหัวอ่านหัวเขียนไม่มีประสิทธิภาพ และ เกิดการชำรุดได้เร็ว การวัดค่า Gram load คือการวัดค่าความยืดหยุ่น ทางกล (Stiffness) ของชุดหัวอ่านว่าแต่ละแขนจับยึด (suspension) มี ค่า stiffness เป็นเท่าไร โดยวัดในรูปของค่าแรงที่ใช้ในการทำให้แขน จับยึดเกิด deflection ในระดับที่กำหนด

2.2 Load Cell

Load Cell ประกอบขึ้นจากแท่งโลหะที่มีการติดตั้งสเตรนเกจดัง แสดงในรูปที่ 7 ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจรู้แรง (Force Sensor) โดยเฉพาะ ทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ชนิดของ Load Cell ที่ใช้เป็นแบบ Shear Beam ซึ่งค่าที่อ่านได้จะไม่คลาดเคลื่อนไปเนื่องจากการตั้งไม่ ตรง



รูปที่ 7 แสดงลักษณะของ Load Cell

2.3 แผ่นเหล็กสปริง (Spring Steel)

เหล็กสปริง เป็นเหล็กกล้าผสมซึ่งมีคุณสมบัติยืดหยุ่น รับการ ลั่นสะเทือนได้ดี มีความต้านทานแรงดึงสูง ทนต่อการสึกหรอ ทนต่อ แรงกระแทก มีขีดจำกัดความยืดหยุ่นสูง (Elastic limit) สูง โดยได้จาก การที่มีความเค้นครากสูง มีคุณภาพผิวดี นั่นคือ วัสดุที่นำมาผลิต เหล็กสปริง ซึ่งบริเวณผิวจะต้องไม่มีสารฝังในของโลหะ รอยสนิม รอย ผิวสะเก็ด เพราะจะทำให้เกิดการหักงาย เนื่องจากความไวต่อการหัก จากตำหนิบนผิวจะเพิ่มขึ้น เมื่อวัสดุมีความเค้นสูงขึ้น เหล็กสปริงที่ใช้ งานรับแรงกระแทกต้องมีการเจือแมงกานีสเสมอ เหล็กชนิดนี้จะต้องชุบ แข็งด้วยน้ำหรือน้ำมัน โดยจะเกิดเป็นโครงสร้างจุลภาคเป็นมาร์เทน ไซด์ทั้งหมด และในการอบคืนตัวจะต้องให้มีคุณสมบัติทางกลลดลง ขึ้นงาน

ประเภทของเหล็กสปริงมี 4 ประเภท คือ

1. สปริงกด (Compression Spring)
2. สปริงบิด (Torsion)
3. สปริงยืด (Extension Spring)
4. สปริงลวด (Wire Form Spring)

3. แผนการดำเนินการ

ศึกษาวัสดุที่ใช้ผลิตและเครื่องวัด Gram Load โดยการขึ้นรูป ชิ้นส่วนด้วยโปรแกรม Solid Work แล้วทำ Simulation ด้วยโปรแกรม Solid Work Cosmos สร้างต้นแบบและทำการทดสอบ โดยการนำไป ทดสอบที่ บริษัท Hitachi Global Storage Technology (Thailand) จำกัด และทำการแก้ไขปรับปรุง

4. ผลการปฏิบัติงาน

ขณะนี้อยู่ในการขึ้นรูปเครื่องวัด Gram load ด้วยโปรแกรม Solid Work เพื่อศึกษาถึงขีดจำกัดของตัวเครื่องที่จะต้องใช้ในการวัดค่า Gram load ได้ทำการศึกษากลไกในการวัด Gram load ไปได้บางส่วน แล้ว

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

ได้ทำการขึ้นรูปตัวเครื่อง Gram load ได้ประมาณ 80% ซึ่งยังติด ปัญหาในการอ่านแบบในภาคอุตสาหกรรมบางส่วนอยู่

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัท Hitachi Global Storage Technology (Thailand) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนต้นอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำ วิจัย และขอขอบคุณศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านการผลิตขั้นสูงใน อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้



## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] วิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ, (2545). วิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตตาก, pp. 153-154
- [2] ไพโรจน์ คักดิ์ชัชวาล, เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต, "การศึกษามัจฉัยค่า ระยะเมื่อที่มีผลต่อค่ากรมไหลในชิ้นส่วนหัวอ่านคอมพิวเตอร์" ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, (2551).
- [3] Mettler Toledo.  
[http://th.mt.com/th/th/home/products/Industrial\\_Weighing\\_Solutions/load\\_cells\\_and\\_weigh\\_modules.html?sem=08010123](http://th.mt.com/th/th/home/products/Industrial_Weighing_Solutions/load_cells_and_weigh_modules.html?sem=08010123)



การประชุมเสนอผลงานบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ครั้งที่ 1 ปีการศึกษา 2551  
3 กุมภาพันธ์ 2552 ณ ห้องประชุมสำนักวิทยาศาสตร์  
อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## เครื่องต้นแบบการตรวจสอบความเสียหายของสกรูที่ใช้ระบบการมองด้วยคอมพิวเตอร์ DAMAGE SCREW INSPECTION BY COMPUTER VISION PROTOTYPE MACHINE

นิติพงศ์ พรหมรักษ์ , กนต์ธร ชำนิประศาสน์  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000  
โทร 0-4422-4410 โทรสาร 0-4422-4411 อีเมลล์ p.nitipong@hotmail.com

Nitipong Prommarak , Kontorn Chamniprasart  
School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand  
Tel: 0-4422-4410, Fax: 0-4422-4411 E-mail: p.nitipong@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องจักรต้นแบบเพื่อตรวจสอบความเสียหายของสกรูที่ใช้ระบบการมองด้วยคอมพิวเตอร์ โดยจัดทำขึ้นมาเพื่อลดการใช้แรงงานคนและเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดแยกลักษณะของหัวสกรูที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว เครื่องต้นแบบดังกล่าวจะมีรูปแบบการทำงานที่เป็นแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะต้องใช้ระบบควบคุม (Control System) รวมถึงการเขียนโปรแกรมประกอบการใช้ งานที่ต้องการความละเอียดและแม่นยำสูงในการทำงาน และมีระบบประมวลผลภาพ (Image Processing) โดยการนำเอารูปภาพจากกล้อง มาวิเคราะห์และสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ ตามที่ต้องการซึ่งจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW เพื่อการตรวจสอบและคัดแยกชิ้นส่วนวัสดุด้วยภาพดิจิทัล

### Abstract

This research was to design and develop a prototype machine for automatically detection damage of the screw reuse by computer vision. The object for research is decrease using human labor and increase efficiency of sorting out characteristic of the screw head. This prototype machine is automatic that mean nonessential to control it all time which use the image processing system, by capture the picture from digital camera and link to LabVIEW program for analyze and synthetic with mathematics algorithm. Moreover, the research shed some that involved high precision , lots of details and applicable the knowledge from education use in manufactory for industries working.

### 1. บทนำ

เนื่องจากสภาวะของโลกในปัจจุบันนี้ ทรัพยากรมีอยู่อย่างจำกัด เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการขาดแคลนในสินค้าและบริการที่จะผลิตมาสนองความต้องการของมนุษย์ ดังนั้นเราจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างประหยัดและก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งในกระบวนการผลิต ฮาร์ดดิสก์ไดร์ (HDD) ของบริษัท ฮิตาชิ โกลบอล สตอเรจ (ประเทศไทย) จำกัด (HGST) จึงได้มีแนวคิดที่จะนำชิ้นส่วนที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว กลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (Reuse) สกรูก็ถือเป็นอีกชิ้นส่วนหนึ่งที่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ และยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญโดยจะถูกนำมาใช้เป็นจำนวนมากในอุตสาหกรรมผลิตและประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ แต่ก่อนที่จะนำสกรูที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนั้นกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้งจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบความเรียบร้อย ความสมบูรณ์และความเสียหายของหัวสกรู ซึ่งเวลานี้ยังใช้มนุษย์ในการตรวจสอบความเสียหายดังกล่าวอยู่นั้นอยู่ ทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ หลายข้อ อาทิเช่น ความผิดพลาด (Error) ในขั้นตอนการตรวจสอบของพนักงานเนื่องจากตาของมนุษย์ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา พนักงานอาจเกิดความเหนื่อยล้าเนื่องจากต้องทำงานโดยใช้สายตาของผู้ตรวจเองในการมองหาความเสียหายของหัวสกรูที่ละตัว ทำให้สิ้นเปลืองเวลาและเกิดผลกระทบต่อสุขภาพทางสายตาของพนักงานได้ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้เสนอแนวทางวิจัยที่จะสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อตรวจสอบหัวสกรูโดยใช้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะเป็นการสร้างเครื่องจักรที่สามารถตรวจสอบความเสียหายของหัวสกรูได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และรวดเร็วเพื่อที่จะลดเวลาในกระบวนการผลิต มีระบบคัดแยกสกรูที่สามารถนำกลับไปใช้งานได้ออกจากสกรูที่ไม่สามารถนำไปใช้ต่อได้ ทั้งหมดนี้ก็เพื่อเป็นการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ (HDD) ให้กับบริษัท HGST

2. ทฤษฎี

2.1 การประมวลผลภาพ

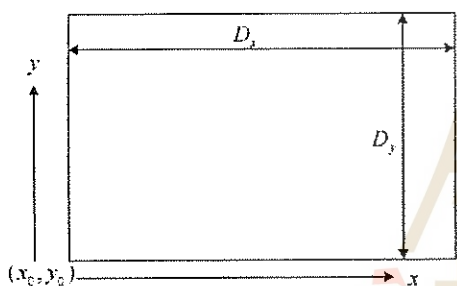
การประมวลผลภาพเป็นการแปลงภาพวัตถุเป้าหมายที่กล้องจับภาพไว้เป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นจะดำเนินการทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบกับสัญญาณดังกล่าวเพื่อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของวัตถุเป้าหมาย เช่น พื้นที่ ความยาว ปริมาณ และตำแหน่ง และส่งเอาต์พุตของผลลัพธ์จากการจำแนกความแตกต่างไปประมวลผลภาพต่อไป

2.2 พื้นฐานของภาพ

จากรูปที่ 1 จุดกำเนิดของภาพจะอยู่มุมล่างซ้าย แต่จุดกำเนิดของพิกเซลจะอยู่ที่มุมบนซ้าย ซึ่งจะเป็นลักษณะการประมวลผลภาพในกราฟฟิกของคอมพิวเตอร์

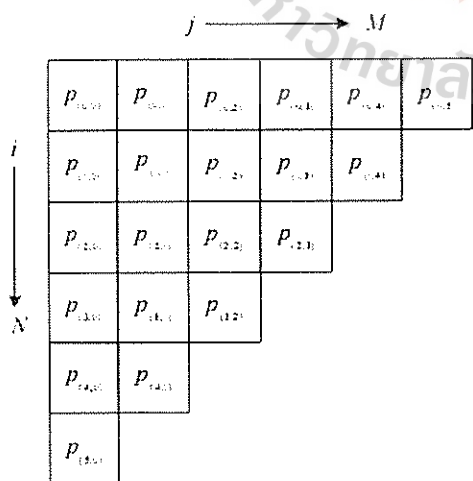
- เมื่อ  $N$  คือ จำนวนสูงสุดของพิกเซลในแนวตั้ง
- $M$  คือ จำนวนสูงสุดของพิกเซลในแนวนอน
- $x$  คือ พิกเซลในแนวตั้ง
- $y$  คือ พิกเซลในแนวนอน

กล่าวคือ  $i = x$  เมื่อ  $1 \leq i \leq N$   
 $i = (M - y)$  เมื่อ  $1 \leq j \leq M$



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของภาพโดยทั่วไปกับพิกเซลเมตริกซ์

เมื่อ  $x = Dx / N$  และ  $y = Dy / M$  จะได้จุดต่าง ๆ บนเมตริกซ์เป็น  $P_{(x,y)}$  ได้ ๆ ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตำแหน่งของพิกเซลในเมตริกซ์

ค่าของพิกเซลหรือฟังก์ชัน  $P_{(x,y)}$  ณ จุดใดๆ จะแสดงได้ด้วยค่าของความเข้มแสงซึ่งอาจแบ่งได้หลายระดับ ถ้ามี 2 ระดับก็จะเป็น 0 กับ 1

2.3 การแปลงภาพ Gray Level เป็นภาพ 2 ระดับ (Thresholding)

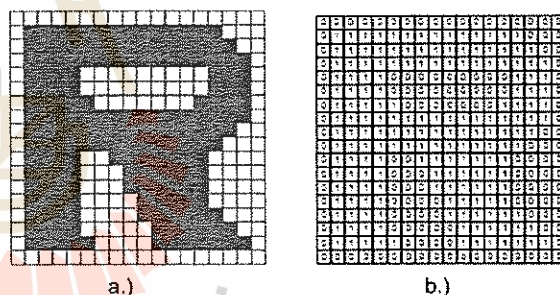
เนื่องจากภาพที่ได้รับจากกล้องดิจิทัลทั่วไปนั้น จะมีลักษณะเป็นข้อมูล 8 บิต ต่อ พิกเซล ดังนั้นระดับสีเทา (Gray Level) โดยจะมีค่าเท่ากับ  $2^8$  เท่ากับ 256 ระดับ ดังนั้นสามารถแปลงสัญญาณจากรดับสีเทาให้เป็น Binary image ได้จากสมการที่ 1

$$g(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) < \text{Threshold} \\ 1, & f(x, y) \geq \text{Threshold} \end{cases} \quad (1)$$

เมื่อ  $g(x, y)$  คือ ระดับสีเทาที่จุด  $(x, y)$  ใด ๆ ของภาพ  
 $f(x, y)$  คือ เป็นค่าความสว่างของจุด  $(x, y)$   
 $\text{Threshold}$  คือ ระดับสีเทาที่ใช้ยังอิงการแปลงข้อมูล

เมื่อทำการแปลงเป็น Binary image แล้วภาพใหม่ที่ได้มาจะมีระดับสีเทาอยู่ 2 ค่า คือ 0 กับ 1 นั่นคือ สีขาวกับสีดำ ค่าเทรชโลดจากค่าเฉลี่ยเลขคณิตหาได้จากสมการที่ 2

$$\text{Thr} = \frac{\sum g_{i(x,y)}}{M \times N} \quad (2)$$

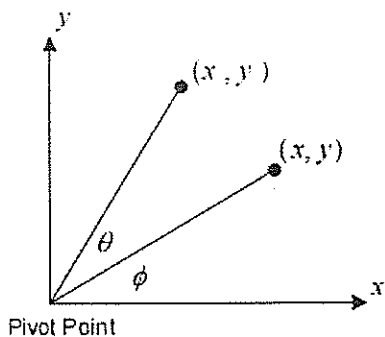


รูปที่ 3 a.) ตัวอักษร R ในลักษณะไฟล์ BITMAP ที่ถูกขยาย  
 b.) ตัวอักษร R ในลักษณะไฟล์ไบนารี

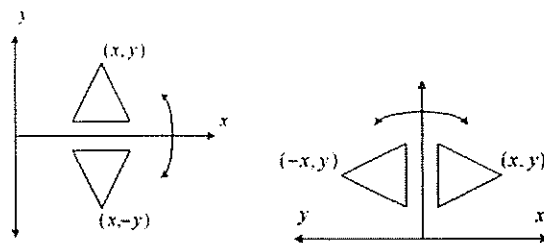
2.4 การแปลงข้อมูลภาพในสองมิติ (Transformation)

คือการแปลงข้อมูลภาพในสองมิติเท่านั้น การแปลงภาพเพื่อนำข้อมูลมาผ่านกระบวนการ Digital Image Processing ซึ่งเป็นกระบวนการวิเคราะห์ภาพ (Digital Image Analysis)

- 1) การเลื่อนภาพ (Translation) เป็นการเลื่อนตำแหน่งของภาพตามระยะการจัดทางแนวแกน  $x (T_x)$  และตามแนวแกน  $y (T_y)$  เมื่อกำหนดให้พิกัดเดิมคือ  $(x, y)$  และพิกัดใหม่คือ  $(x', y')$
- 2) การหมุนภาพ (Rotation) เป็นการหมุนตำแหน่งของภาพในระนาบ  $xy$  รอบจุด Pivot Point



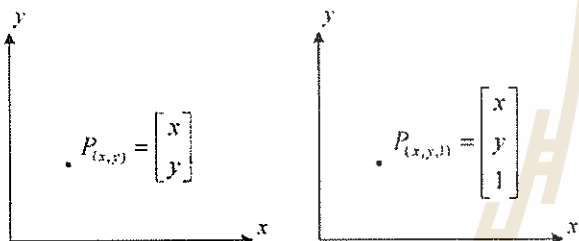
รูปที่ 4 การหมุนโดยอ้างอิงระนาบ xy



รูปที่ 6 การสะท้อนตามแกน x และการสะท้อนตามแกน y

3) การย่อและขยายภาพ (Scaling) สามารถทำได้โดยการใช้ Scaling factor ได้แก่  $S_x$  และ  $S_y$  ซึ่งใช้สำหรับการย่อและการขยายภาพโดยใช้เมตริกซ์จะมีลักษณะดังนี้ คือ  $P' = S \cdot P$

4) Homogeneous Coordinate เพื่อให้ผลลัพธ์ของการแปลงภาพอยู่ในรูปของการคูณกันของเมตริกซ์ทั้งหมด จะทำให้ง่ายต่อการคำนวณจึงกำหนดให้มีโคออดิเนตแบบ Homogeneous ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงโคออดิเนตแบบ Homogeneous

ดังนั้นเมตริกซ์ของการแปลงแบบต่าง ๆ จะมีลักษณะเป็นดังนี้ การเลื่อนภาพ

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + T_x \\ y + T_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

การหมุนภาพ

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

การย่อและขยายภาพ

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (5)$$

5) การสะท้อนของภาพ การสะท้อนของภาพสามารถเกิดขึ้นได้ ดังนี้ คือ การสะท้อนตามแกน x และการสะท้อนตามแกน y

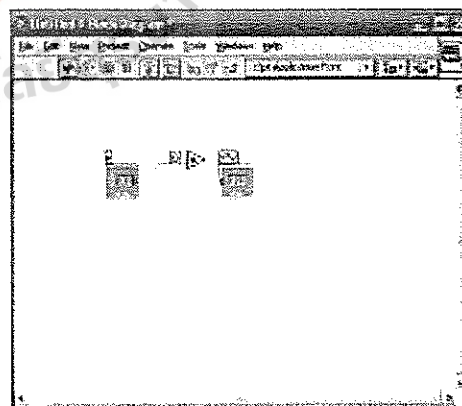
### 2.5 LabVIEW Program



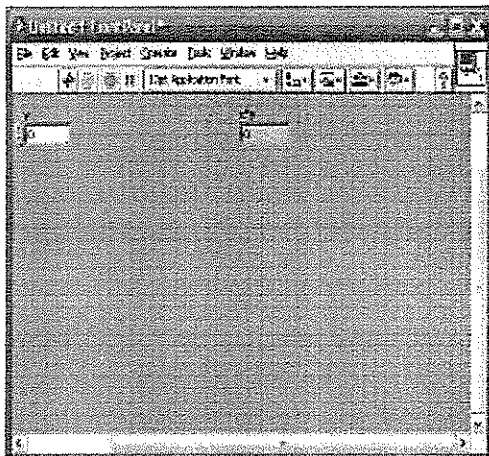
LabVIEW หรือ Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench คือ เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา Application (โปรแกรมประยุกต์) ชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับ Visual Basic, Visual C++ แต่จะเป็นการเขียนโปรแกรมโดยใช้รูปในการพัฒนา (Graphic-based Programming) ซึ่งจะแตกต่างจากแนวคิด Text based Programming เช่น Text-based จะทำงานจากบนลงล่าง แต่ LabVIEW จะทำงานแบบ Dataflow โดยสามารถเขียนเป็นสมการต่าง ๆ ที่ซับซ้อนได้เหมือน Text-Based เช่น ภาษา C โดยใช้ Formula Node ในการทำงานของ LabVIEW เน้นทางการติดต่อกับเครื่องมือ หรือทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ที่ใช้วัดสัญญาณทางกายภาพต่าง ๆ ภายนอก ในบางครั้งเราจึงเรียก LabVIEW ว่าเครื่องมือวัดเสมือนและนอกจากนี้สามารถนำประโยชน์จาก Computer Technology และ Network Technology มาประยุกต์ใช้งาน เช่น การเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูล (Database) หรือส่งผ่านข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต ทำให้ในหลายอุตสาหกรรมได้นำเอา LabVIEW มาประยุกต์ใช้งานกับงานวัดควบคุมและระบบอัตโนมัติ (Automation)

พื้นฐานของโปรแกรม หน้าต่างในการทำงานของโปรแกรม แบ่งเป็น 2 หน้าต่างหลัก ๆ ดังนี้

ส่วนของหน้าต่าง



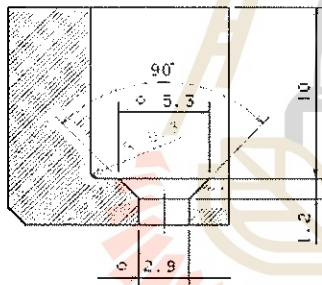
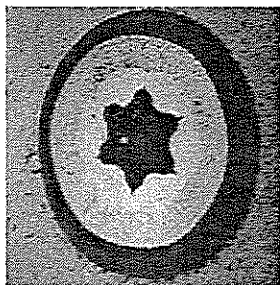
รูปที่ 7 หน้าต่าง Block Diagram ใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างความสัมพันธ์ของคำสั่งหมวด Control ต่าง ๆ โดยเราใช้หน้าต่างนี้ในการเขียนและพัฒนาโปรแกรม



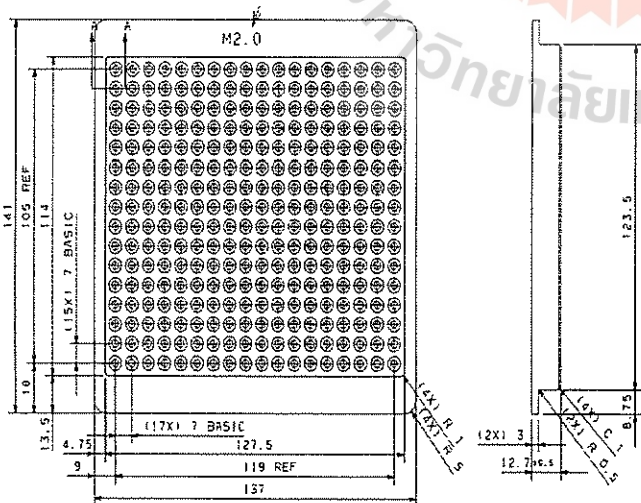
รูปที่ 8 หน้าต่าง Front Panel ใช้แสดงผลการทำงานของโปรแกรมซึ่งสามารถแสดงผลในรูปแบบ Real-time โดยใช้ร่วมกับคำสั่งหมวด Function ต่าง ๆ

3 การออกแบบ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยก็คือ ออกแบบและสร้างเครื่องจักรอัตโนมัติเพื่อตรวจสอบและคัดแยกความเสียหายของหัวสกรู ที่มีความสามารถในการแยกสกรูดี ที่จะนำกลับไปใช้งานใหม่ในกระบวนการผลิตออกจากสกรูที่เสียหาย โดยที่หัวสกรูที่จะทำการตรวจสอบและคัดแยกจะมีลักษณะ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงลักษณะของหัวสกรูที่จะนำมาตรวจสอบและคัดแยก

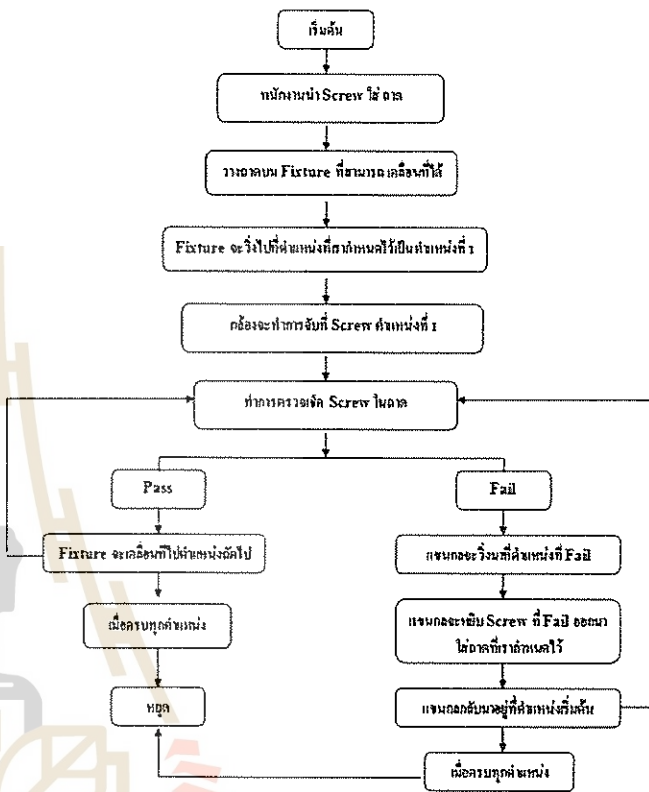


รูปที่ 10 แสดงลักษณะของถาดสำหรับใส่สกรูที่จะนำมาตรวจสอบ

3.1 ขั้นตอนการทำงานของระบบ

เราจะใช้ Vision ใน National instrument LabView สำหรับตรวจสอบความแตกต่างของหัวสกรู ระหว่างสกรูที่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง กับสกรูที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ อีก ส่วนการเคลื่อนที่ของ Fixture และการควบคุมการทำงานของแขนกลรวมถึง x-y Table จะใช้ Motion ใน National instrument LabView เป็นตัว Control

Flow Chart



3.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

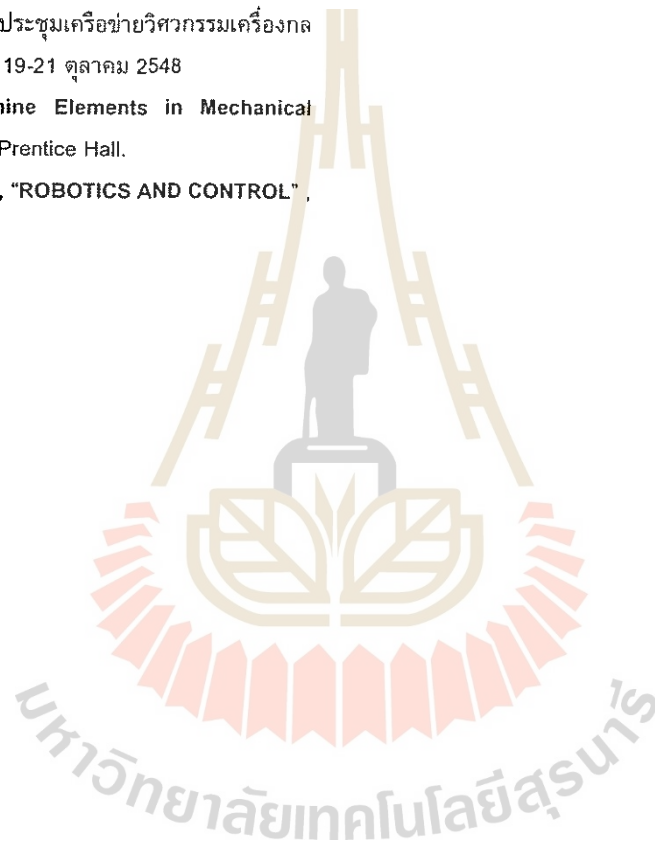
เครื่องจักรต้นแบบที่ทำงานด้วยระบบอัตโนมัติสามารถที่จะตรวจสอบความเสียหายและคัดแยกระหว่างสกรูดี ที่สามารถนำกลับไปใช้งานใหม่ในกระบวนการผลิต กับ สกรูตัวที่เสียหายออกจากกันได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว และแม่นยำสามารถลดต้นทุนการผลิต ลดเวลาและลดความผิดพลาดในการตรวจสอบความเสียหายของหัวสกรูสำหรับกระบวนการผลิต HDD และสร้างองค์ความรู้ในด้านการสร้างเครื่องจักรกลและระบบควบคุมต่าง ๆ ที่ใช้การประกอบชิ้นส่วนขนาดเล็กที่ต้องการความละเอียดและแม่นยำสูง รวมถึงวิธีการของระบบการมองภาพด้วยคอมพิวเตอร์ (Machine Vision) ในการตรวจสอบและคัดแยกวัตถุอีกด้วย

5 กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้การสนับสนุนทุนในการดำเนินงานวิจัย และ บริษัทอิตาซี โกลบอล สตรอเรจ (ประเทศไทย) ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านของบุคลากร , ข้อมูลทางด้านงานวิจัย , เครื่องมือและสถานที่ ในการดำเนินงานวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

1. Ramesh Jain, Rangachar Kasturi and Brian G. Schunck, "Machine Vision", McGraw-Hill, 1995
2. C. Gonzalez and E. Woods, "Digital Image Processing", 2<sup>nd</sup> Edition. Prentice Hall. 2001
3. กนต์ธร ชานีประศาสน์, "การวัดเชิงกล ด้วย LabVIEW", สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
4. ปกรณ์ เสรีกิจการกุล , วรากร แซ่ตั้ง และโกสินทร์ จำนงไทย, "การตรวจสอบการเคลื่อนไหวสำหรับหุ่นยนต์เล่นฟุตบอล", วารสารสมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 เมษายน 2547, หน้า 28-56
5. สาทิสส์ ทรงชน , สดภาพร ลักษณะเจริญ, "แขนหุ่นยนต์เลียนแบบแขนคน", การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, 19-21 ตุลาคม 2548
6. Robert L. Mott, "Machine Elements in Mechanical Design", Fourth Edition, Prentice Hall.
7. R K Mittal & I J Nagrath , "ROBOTICS AND CONTROL" , McGraw-Hill



การประชุมเสนอผลงานบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ครั้งที่ 1 ปีการศึกษา 2551  
3 กุมภาพันธ์ 2552 ณ ห้องประชุมสำนักวิทยาศาสตร์  
อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## เทคโนโลยีพลังงานลม Wind Energy Technology

วิโรจน์ แบบพิมาย

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000  
โทร (044) 224410 โทรสาร (044) 224411, E-Mail: w.babpimai@hotmail.com

Wirot Beabpimai

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology  
111 University Ave., Muang District, Nakorn Ratchasima, Thailand 30000  
Tel: 044-224410, Fax: 044-224411, Email: w.babpimai@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอเทคโนโลยีพลังงานลม ว่ามีประวัติความเป็นมาอย่างไร เทคโนโลยีในปัจจุบัน ศักยภาพของพลังงานลมในประเทศไทย เทคโนโลยีกังหันลมในประเทศไทย ส่วนประกอบหลักของกังหันลม และผลกระทบของการใช้งานกังหันลมผลิตไฟฟ้า ซึ่งสิ่งที่นำเสนอในบทความนี้น่าจะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์และทำให้ทุกคนหันมาให้ความสำคัญกับพลังงานจากลมมากขึ้น ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้ากันมากขึ้น โดยเฉพาะประเทศแถบยุโรปและอเมริกาเหนือ สามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานลมในการผลิตไฟฟ้าได้ในขนาดระดับกิกวัตต์ ทุกวันนี้แต่ละประเทศทั่วโลกให้ความสำคัญกับพลังงานทางเลือกมากขึ้น เนื่องด้วยในอนาคตการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลจะลดลง เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สัดส่วนการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน อาทิ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล หรือแม้แต่พลังงานลมจะสูงขึ้น สำหรับประเทศไทยนั้นเริ่มที่จะให้ความสำคัญกับพลังงานลมมากขึ้น แต่ยังมีความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีพลังงานลมน้อยมาก จำเป็นอย่างยิ่ง ที่เราจะต้องหันมาให้ความสนใจเทคโนโลยีพลังงานลม ถึงแม้ว่าจะมีศักยภาพไม่สูงนักหากเปรียบเทียบกับในต่างประเทศ แต่ก็สามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในขนาดกิกวัตต์ได้ หากเราเริ่มวิจัยและพัฒนาตั้งแต่วันนี้ ในอนาคตประเทศเราจะได้มีเทคโนโลยีด้านพลังงานลมเป็นของตัวเอง

### Abstract

This paper presents the history of wind energy technology, present technology, wind energy potential in Thailand, wind turbine generator technology in Thailand, main components, and wind turbine impact. The information in this paper would benefit and attract the interest of Thai people to realize the importance of wind energy. During last 10 years, it has more research and development of wind energy technology; especially, in Europe and North America zone can be useful form wind energy to produce an electricity in the megawatt scale. Today, many countries attract more renewable energy because the energy from fossil fuel will be decreased in the future because of environmental impact. The ratio of renewable energy use such as solar energy, hydropower, biomass and wind energy will be increased. In Thailand, current knowledge about wind energy technology is still limited and there is not much high potential of wind energy when compared to other countries. However, wind energy could produce an electricity in the kilowatt scale. Today, if we begin to do research and development on this technology, we may be able to produce wind energy in the future by ourselves

การประชุมเสนอผลงานบัณฑิตศึกษาคณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ครั้งที่ 1 ปีการศึกษา 2551  
3 กุมภาพันธ์ 2552 ณ ห้องประชุมสำนักวิทยาศาสตร์  
อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## การควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดโดยใช้ MRAS Temperature Control of Infrared Oven Process Using MRAS

สุพจน์ ปลั่งพิมาย\* จิระพล ศรีเสริฐผล และ ชาญยุทธ ขจรไตรเดช  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000  
โทร 0-4422-4760 \*อีเมล pot\_140127@hotmail.com

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันกระบวนการเตาอบเป็นกระบวนการที่สำคัญของการผลิตชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเป็นกระบวนการทำความร้อนให้กับกาวที่ใช้ในการยึดติดระหว่างชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้หลอดอินฟราเรด ซึ่งมีระบบการควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับ (Feedback Control) และมีตัวควบคุมแบบพีไอดี กระบวนการควบคุมอุณหภูมิดังกล่าว มักทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงเกินความต้องการและส่งผลให้เกิดความเสียหายในกระบวนการผลิต ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นคาดว่ามีส่วนสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของกระบวนการเตาอบอินฟราเรด จึงทำให้ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิไม่เป็นไปตามความต้องการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิเคราะห์การตอบสนองของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีความเหมาะสม การใช้วิธีการควบคุมปรับตัวอัตโนมัติเชิงแบบจำลอง (Model Reference Adaptive System) [10] ในการควบคุมกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด สามารถควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดทุกเครื่อง ให้มีการตอบสนองเป็นไปตามความต้องการ ผลที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

**คำสำคัญ:** การถ่ายเทความร้อน, ทฤษฎีควบคุม, การประมาณค่าตัวแปร, การตอบสนองเหมาะสมที่สุด

### Abstract

Oven process is one of significant step for hard disk drive manufacturing process nowadays. It processes by heating the hard disk component adhesive using infrared wave. Oven temperature is controlled using PID feedback control system. However, this type of control system often cause temperature over rising and lead in product damaging. The over temperature

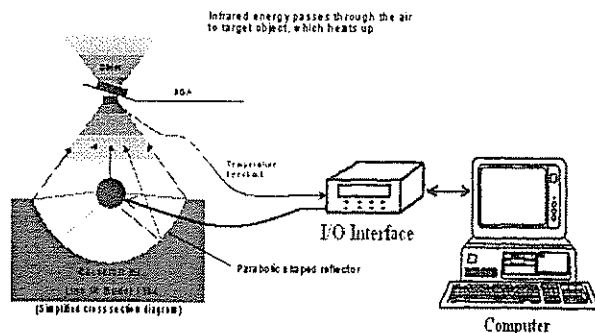
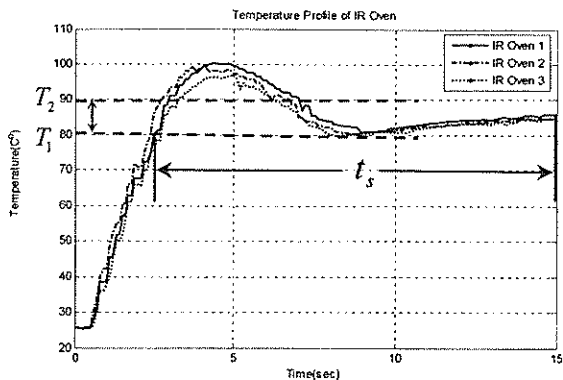
problem is suspect to be taken from physical changing of oven. This change makes PID control parameters not appropriate to that new condition and result in low efficiency of its control system. This paper therefore presents infrared oven identification technique to evaluate mathematical model coefficients. Enhanced data are used in analyzing temperature output responses. And then appropriate PID control parameters are designed in order to control temperature to be within specification. Model reference adaptive system can be applied to control the temperature of infrared oven process in the case of difference machine. The result will be useful for infrared oven controller developing in the future.

**Keywords:** Heat Transfer, Control Theory, Parameter Estimation, Response optimization

### 1. บทนำ

กระบวนการผลิตชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งมีกระบวนการประกอบชิ้นงาน โดยใช้กาวเพื่อยึดติด และมีการอบกาวให้แห้งโดยใช้เตาอบแบบหลอดอินฟราเรด ซึ่งในการควบคุมอุณหภูมิของการอบให้อยู่ในช่วง  $T_1 - T_2$  °C และระยะเวลาในการอบเป็นเวลา  $t_u$  วินาที พบว่ากระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่ไม่มีประสิทธิภาพ จะทำให้เกิดอุณหภูมิที่เกินตามที่กำหนด ส่งผลให้เกิดความเสียหายเกิดขึ้นกับตัวชิ้นงาน จากข้อมูลการวัดอุณหภูมิของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดที่ใช้อยู่ในสายการผลิตจำนวน 3 เครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าอุณหภูมิของเตาอบทุกเครื่องมีค่าออกนอกช่วงที่ต้องการ อันเนื่องมาจากการพุ่งเกินของอุณหภูมิประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นมาจากการใช้ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิไม่เป็นไปตามความต้องการ สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบ และออกแบบค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มี





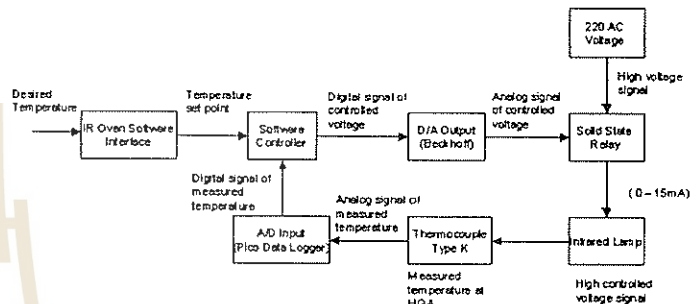
รูปที่ 2. แผนภาพแสดงเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

รูปที่ 1 ข้อมูลการวัดอุณหภูมิของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด 3 เครื่อง

ความเหมาะสม เพื่อใช้เป็น Model Reference และนำวิธีการควบคุมปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง (Model Reference Adaptive System) ในการควบคุมกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดทุกเครื่อง ให้สามารถทำงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์ Choi J.Y. และ Do, H.M.[1] ได้ศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของกระบวนการทำงานของเตาอบที่มีหลอด Tungsten-Halogen เป็นตัวให้ความร้อน Lord, H. A. [2] ได้วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่ศึกษาเกี่ยวกับการพาความร้อน, การนำความร้อน และ การแผ่รังสีที่เกิดขึ้นในกระบวนการเตาอบ งานวิจัยของ Wonhui Cho.[3] ได้ศึกษาการตอบสนองทางความร้อนของระบบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบการควบคุมกระบวนการเตาอบ Cho Wonhui Cho, Thomas F. Edgar และ Jietae Lee.[4] ได้เสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบแบบป้อนกลับ (Closed-loop Identification) ในการตอบสนองทางความร้อนของตัว wafer โดยใช้วิธีการ Nonlinear least squares เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอด Tungsten-Halogen นอกจากนี้ได้มีการใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับดังกล่าว งานวิจัยของ Yeo, Y K., Kwon, T. I., Lee, K. W. [5] และ Pramod, S.,Chidambaram, M [6] สำหรับงานวิจัยของ Lin, C. A. and Jan, Y. K.[7] ได้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมในกระบวนการเตาอบ Choi, J. Y., Do, H. M. และ Choi, H. S.[8] เสนอการใช้ควบคุมแบบปรับตัวได้มาใช้ในการควบคุมและ Stephen, A. Norman,[9] ได้เสนอเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการควบคุมกระบวนการเตาอบ

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

กระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดมีขนาด 30 x 19.6 x 62.5 นิ้ว มีชุดควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหลอดอินฟราเรดภายในเตาอบมีเทอร์โมคัปเปิลทำหน้าที่วัดอุณหภูมิ และชุดควบคุมกระบวนการเตาอบ แสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากกระบวนการเตาอบเป็นกระบวนการควบคุมอุณหภูมิแบบปิด สามารถเขียนแผนภาพกระบวนการเตาอบได้ดังรูปที่ 3



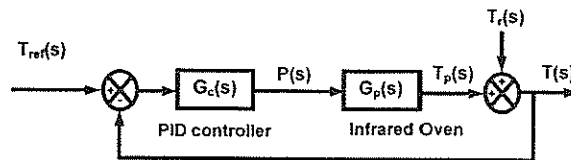
รูปที่ 3 แผนภาพระบบควบคุมแบบปิดของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

เมื่อ  $G(s)$  ในสมการที่ (1) คือฟังก์ชันถ่ายโอนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของชิ้นงาน และพลังงานที่ตัวชิ้นงานได้รับ  $P(s)$  [3] แต่กระบวนการเตาอบเป็นกระบวนการที่มีเวลาไว้ผลตอบสนอง (Delay time) รวมอยู่ ดังนั้นเราประมาณได้

$$G_p(s) = G(s)e^{-ds} = \frac{Ke^{-ds}}{(\tau s + 1)} \tag{1}$$

- เมื่อ  $K$  คือ อัตราขยาย (Gain)
- $\tau$  คือ ค่าคงตัวเวลา (Time constant)
- และ  $d$  คือ ค่าเวลาไว้ผลตอบสนอง

3. การระบุเอกลักษณ์ของระบบกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด



รูปที่ 4. แผนภาพระบบควบคุมของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดในระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ

สำหรับการระบุเอกลักษณ์ของระบบกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด จะใช้สำหรับระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ [4] ดังแสดงในรูปที่ 4.

โดยที่  $G_p(s) = \frac{Ke^{-ds}}{\tau s + 1}$

ตัวควบคุมแบบพีไอคือ  $G_c(s) = \left( \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \right)$

ในการประมาณค่าตัวแปรของกระบวนการในระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยใช้วิธีการ Nonlinear least squares สำหรับการประมาณค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดจากผลการทดลองของการตอบสนองของระบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

$$T(t) = L^{-1} \left( \left( \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} \right) T_{ref}(s) + \left( \frac{1}{1 + G_c G_p} \right) T_r(s) \right) \quad (2)$$

$L^{-1}(\bullet)$  – Inverse Laplace Transform

โดยให้  $\hat{T}(t)$  คือ ชุดข้อมูลของอุณหภูมิจากการวัด

การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการที่ (2) โดยวิธี Nonlinear least square [11] เพื่อประมาณค่าตัวแปร  $K, \tau$  และ  $d$  โดยตัวแปรที่เหมาะสมจะต้องทำให้  $T(t) - \hat{T}(t)$  ผลต่างกำลังสองน้อยที่สุด (least square error: LSE)

$$LSE = \sum_{i=1}^n \left( T(t_i) - \hat{T}(t_i) \right)^2 \quad (3)$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนข้อมูลของอุณหภูมิจากการวัด จากสมการที่ (3) เราจะได้

$$\text{Minimize } f(K, \tau, d) = \sum_{i=1}^n \left( T_i - \hat{T}_i \right)^2$$

ให้  $z = [K \ \tau \ d]^T$  นั่นคือ Minimize  $f(z)$

$$z_k = [K_k \ \tau_k \ d_k]^T$$

โดยที่  $k$  คือจำนวนรอบของการคำนวณ

ที่  $k=0$  จะได้  $z_0 = [K_0 \ \tau_0 \ d_0]^T$  และ  $B_0 = I$

เมื่อ  $z_0$  คือค่าตัวแปรเริ่มต้นที่ต้องกำหนดให้สำหรับการคำนวณ

$$p_k = -[B_k]^{-1} \nabla f(z_k) \quad (4)$$

$$F(\lambda_k) = f(z_k + \lambda_k p_k)$$

โดยที่  $\lambda_k > 0$  จากสมการ (18) จะได้ค่า  $\lambda_k$  จะได้

$$z_{k+1} = z_k + \lambda_k p_k$$

$$s_k = z_{k+1} - z_k$$

$$B_{k+1} = B_k - \frac{(B_k s_k)(B_k s_k)^T}{s_k^T B_k s_k} + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k}$$

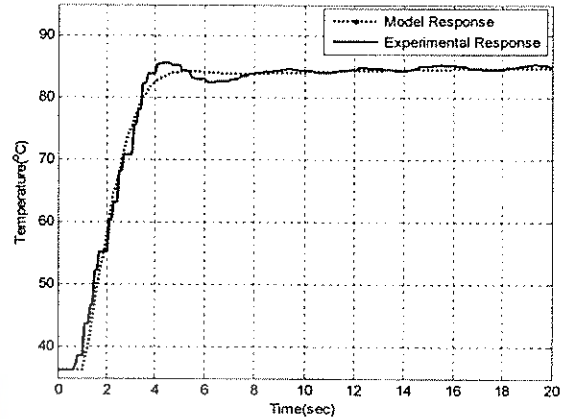
ตรวจสอบ  $\|\nabla f(z_{k+1})\| < \epsilon$  เมื่อ  $\epsilon$  คือค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

ถ้า  $\|\nabla f(z_{k+1})\| > \epsilon$  ให้อนรอบของการคำนวณจนกว่า

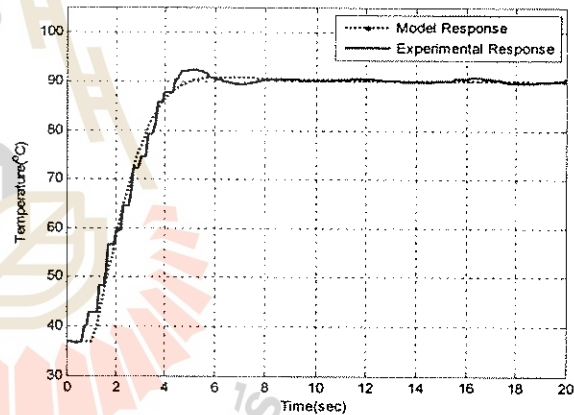
$\|\nabla f(z_{k+1})\| < \epsilon$  ซึ่งทำให้ได้  $z_{k+1}$  ของรอบการคำนวณนั้นเป็นผลเฉลยของค่าตัวแปร  $K, \tau$  และ  $d$  สำหรับการวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการ Nonlinear least squares ของโปรแกรม MATLAB

4. ผลของการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

การระบุเอกลักษณ์สำหรับระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ ในการทดลองจะพิจารณาอุณหภูมิที่ 85 และ 90 °C โดยที่แต่ละอุณหภูมิจะมีการปรับค่าตัวแปรพีไอที่แตกต่างกัน 2 แบบ



รูปที่ 5. ผลการตอบสนองของระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี แบบ Run1 ที่อุณหภูมิ 85 °C



รูปที่ 6. ผลการตอบสนองของระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี แบบ Run2 ที่อุณหภูมิ 90 °C

เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของอุณหภูมิที่ต่างกันในแต่ละค่าของอุณหภูมิที่ต้องการตั้งผลที่แสดงในรูป 5 และ 6 และผลการประมาณค่าตัวแปรของระบบที่อุณหภูมิ 85 และ 90 °C ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1. ผลของการระบุเอกลักษณ์ ที่อุณหภูมิ 85 °C

Test number	PID control parameters			Parameters of Identification Model		
	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$K$	$\tau$	$d$
Run 1	0.25	0.04	0.015	10.049	5.3149	1.05
Run 2	0.3	0.06	0.02	9.914	5.9888	1.15
Mean				9.982	5.6519	1.10

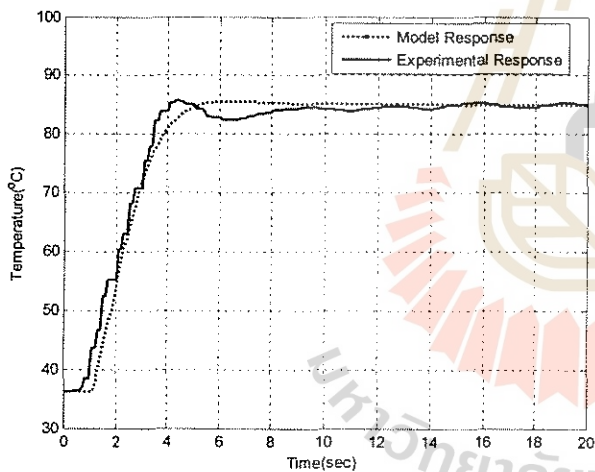
ตารางที่ 2. ผลของการระบุเอกลักษณ์ ที่อุณหภูมิ 90 C°

Test number	PID control parameters			Parameters of Identification Model		
	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K	τ	d
Run 1	0.25	0.04	0.015	10.924	6.3841	1.075
Run 2	0.3	0.06	0.02	10.388	6.9088	1.15
Mean				10.656	6.6465	1.113

เราจะพิจารณาค่าตัวแปรที่ได้จากผลการทดลองทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 3. เพื่อแทนค่าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบ จากนั้นเปรียบเทียบผลการตอบสนองระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ออกอุณหภูมิที่วัดได้ ที่มีต่ออินพุทแบบขั้นบันได ที่ 85 C° ดังแสดงในรูปที่ 7

ตารางที่ 3. ค่าเฉลี่ยของตัวแปรของระบบ

PID control parameters			Parameters of Identification Model		
K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K	τ	d
0.25	0.04	0.015	10.319	6.149	1.106

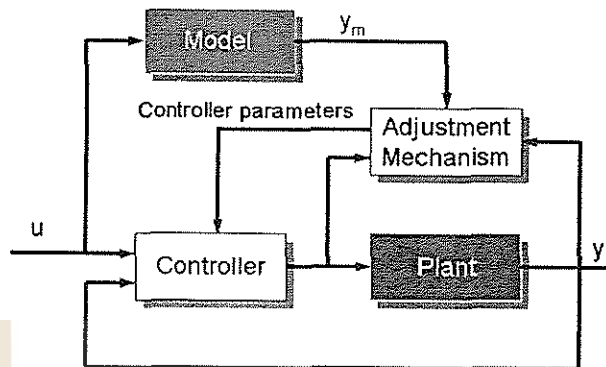


รูปที่ 7 การตอบสนองของระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้ค่าเฉลี่ยตัวแปรของระบบ สำหรับอินพุทแบบขั้นบันได ที่ 85 C°

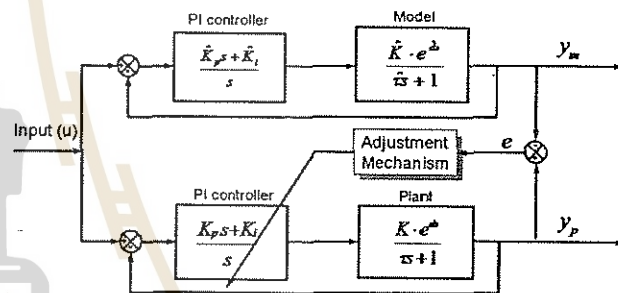
5. ระบบควบคุมปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง (model reference adaptive system or MRAS)

ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดจะใช้วิธีการ Lyapunov's Direct Method เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองของอุณหภูมิเป็นไปตามที่ต้องการโดยอ้างอิงแบบจำลอง ดังรูปที่ 8 ที่แสดงหลักการการทำงานของ MRAS ซึ่งตัว Adjustment เป็นอัลกอริทึมที่รับค่า output ของ Model (y<sub>m</sub>), ค่า output ของ Plant (y<sub>p</sub>) และ สัญญาณควบคุม (u) เพื่อทำหน้าที่ปรับตัวควบคุมแบบพีไอของระบบมีการตอบสนองเช่นเดียวกับ model

สำหรับโครงสร้างของระบบควบคุมปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งมีระบบการควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับและมีตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 8 แผนภาพหลักการการทำงานของ MRAS



รูปที่ 9 แผนภาพโครงสร้างของระบบควบคุมปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

กำหนดให้การประมาณค่า delay time ดังนี้

$$e^{ds} = 1 - ds \text{ และ } e^{-ds} = 1 - d's$$

Transfer function ของ Plant คือ

$$\frac{Y_p(s)}{U(s)} = \frac{K(-K_p ds^2 + (K_p - dK_i)s + K_i)}{(\tau - KK_p d)s^2 + (1 + KK_p - KdK_i)s + KK_i} \tag{5}$$

Transfer function ของ Model คือ

$$\frac{Y_m(s)}{U(s)} = \frac{\hat{K}(-\hat{K}_p d's^2 + (\hat{K}_p - d'\hat{K}_i)s + \hat{K}_i)}{(\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p d')s^2 + (1 + \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}d'\hat{K}_i)s + \hat{K}\hat{K}_i} \tag{6}$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (5) และ (6) ให้อยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับสองได้ดังสมการที่(7)และ(8)

$$(\tau - KK_p d)\ddot{y}_p + (1 + KK_p - bdK_i)\dot{y}_p + KK_i y_p = K(-K_p d\ddot{u} + (K_p - dK_i)\dot{u} + K_i u) \tag{7}$$

และ

$$\begin{aligned} & (\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})\ddot{y}_m + (1 + \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{d}\hat{K}_i)\dot{y}_m + \hat{K}\hat{K}_i y_m \\ & = \hat{K}(-\hat{K}_p\hat{d}\ddot{u} + (\hat{K}_p - \hat{d}\hat{K}_i)\dot{u} + \hat{K}_i u) \end{aligned} \quad (8)$$

สมการที่ (7) ลดด้วยสมการที่ (8) จะได้

$$\begin{aligned} & ((\tau - KK_p d)\ddot{y}_p + (1 + KK_p - KdK_i)\dot{y}_p + KK_i y_p) \\ & - ((\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})\ddot{y}_m + (1 + \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{d}\hat{K}_i)\dot{y}_m + \hat{K}\hat{K}_i y_m) \\ & = K(-K_p d\ddot{u} + (K_p - dK_i)\dot{u} + K_i u) \\ & - \hat{K}(-\hat{K}_p\hat{d}\ddot{u} + (\hat{K}_p - \hat{d}\hat{K}_i)\dot{u} + \hat{K}_i u) \end{aligned}$$

สามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$\begin{aligned} & (\tau - KK_p d)\ddot{y}_p - (\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})\ddot{y}_p + (\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})\ddot{y}_p \\ & - (\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})\ddot{y}_m + (1 + KK_p - KdK_i)\dot{y}_p \\ & - (1 + \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{d}\hat{K}_i)\dot{y}_p + (1 + \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{d}\hat{K}_i)\dot{y}_p \\ & - (1 + \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{d}\hat{K}_i)\dot{y}_m + KK_i y_p - \hat{K}\hat{K}_i y_p + \hat{K}\hat{K}_i y_p - \hat{K}\hat{K}_i y_m \\ & = K(-K_p d\ddot{u} + (K_p - dK_i)\dot{u} + K_i u) \\ & - \hat{K}(-\hat{K}_p\hat{d}\ddot{u} + (\hat{K}_p - \hat{d}\hat{K}_i)\dot{u} + \hat{K}_i u) \end{aligned}$$

สมมติให้  $\tau \approx \hat{\tau}$ ,  $K \approx \hat{K}$  และ  $d \approx \hat{d}$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} & (\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})\ddot{e} + (1 + \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{d}\hat{K}_i)\dot{e} + (\hat{K}\hat{K}_i)e = \\ & \hat{K}\hat{d}(K_p - \hat{K}_p)\ddot{y}_p - \hat{K}(K_p - \hat{K}_p)\dot{y}_p \\ & + \hat{K}\hat{d}(K_i - \hat{K}_i)\dot{y}_p - \hat{K}(K_i - \hat{K}_i)y_p \\ & + \hat{K}(-\hat{d}(K_p - \hat{K}_p)\ddot{u} + (K_p - \hat{K}_p)\dot{u}) \\ & + \hat{K}(-\hat{d}(K_i - \hat{K}_i)\dot{u} + (K_i - \hat{K}_i)u) \end{aligned} \quad (9)$$

เมื่อ

$$\ddot{e} = \ddot{y}_p - \ddot{y}_m, \dot{e} = \dot{y}_p - \dot{y}_m, e = y_p - y_m$$

สมการที่ (9) สามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$\begin{aligned} \ddot{e} = & \frac{1}{(\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})} \left\{ -(1 + \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{d}\hat{K}_i)\dot{e} - (\hat{K}\hat{K}_i)e + \right. \\ & \hat{K}\hat{d}(K_p - \hat{K}_p)\dot{y}_p - \hat{K}(K_p - \hat{K}_p)\dot{y}_p \\ & + \hat{K}\hat{d}(K_i - \hat{K}_i)\dot{y}_p - \hat{K}(K_i - \hat{K}_i)y_p \\ & + \hat{K}(-\hat{d}(K_p - \hat{K}_p)\ddot{u} + (K_p - \hat{K}_p)\dot{u}) \\ & \left. + \hat{K}(-\hat{d}(K_i - \hat{K}_i)\dot{u} + (K_i - \hat{K}_i)u) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

จากสมการที่ (10) กำหนดให้ Lyapunov Function คือ

$$\begin{aligned} V(e, \dot{e}, K_p, K_i) = & \frac{1}{2} \left\{ \frac{\hat{K}\hat{K}_i e^2}{(\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})} + \dot{e}^2 + \frac{1}{\gamma_1} (K_p - \hat{K}_p)^2 \right. \\ & \left. + \frac{1}{\gamma_2} (K_i - \hat{K}_i)^2 \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

โดยที่  $\gamma_1$  และ  $\gamma_2$  คือ อัตราการปรับตัว

พิจารณาอนุพันธ์ของ Lyapunov Function

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & \frac{\hat{K}\hat{K}_i e^2}{(\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})} \dot{e} + \dot{e}\dot{e} + \frac{1}{\gamma_1} (K_p - \hat{K}_p)\dot{K}_p \\ & + \frac{1}{\gamma_2} (K_i - \hat{K}_i)\dot{K}_i \end{aligned} \quad (12)$$

แทนค่าสมการที่ (10) ในสมการที่ (12) และจัดรูปจะได้

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & -\frac{(1 + \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{d}\hat{K}_i)}{(\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})} \dot{e}^2 \\ & + \frac{1}{\gamma_1} (K_p - \hat{K}_p) \left\{ \dot{K}_p + \frac{\gamma_1 \hat{K}}{(\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})} (\hat{d}\dot{y}_p - \dot{y}_p - \hat{d}\dot{u} + \dot{u}) \dot{e} \right\} \\ & + \frac{1}{\gamma_2} (K_i - \hat{K}_i) \left\{ \dot{K}_i + \frac{\gamma_2 \hat{K}}{(\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})} (\hat{d}\dot{y}_p - \dot{y}_p - \hat{d}\dot{u} + \dot{u}) \dot{e} \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

ได้

$$\dot{K}_p = -\frac{\gamma_1 \hat{K}}{(\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})} (\hat{d}\dot{y}_p - \dot{y}_p - \hat{d}\dot{u} + \dot{u}) \dot{e} \quad (14)$$

$$\therefore K_p = -\int_0^t \frac{\gamma_1 \hat{K}}{(\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})} (\hat{d}\dot{y}_p - \dot{y}_p - \hat{d}\dot{u} + \dot{u}) \dot{e} dt + K_p(0) \quad (15)$$

$$\dot{K}_i = -\frac{\gamma_2 \hat{K}}{(\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})} (\hat{d}\dot{y}_p - \dot{y}_p - \hat{d}\dot{u} + \dot{u}) \dot{e} \quad (16)$$

$$\therefore K_i = -\int_0^t \frac{\gamma_2 \hat{K}}{(\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})} (\hat{d}\dot{y}_p - \dot{y}_p - \hat{d}\dot{u} + \dot{u}) \dot{e} dt + K_i(0) \quad (17)$$

จากสมการที่ (14) และ (16) จะได้

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{(1 + \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{d}\hat{K}_i)}{(\hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p\hat{d})} \dot{e}^2 \quad (18)$$

จากสมการที่ (18) จะทำให้อนุพันธ์ของ Lyapunov Function เป็น

Negative Semi-Definite ระบบที่สร้างขึ้นจะมีเสถียรภาพแบบ Global Stability

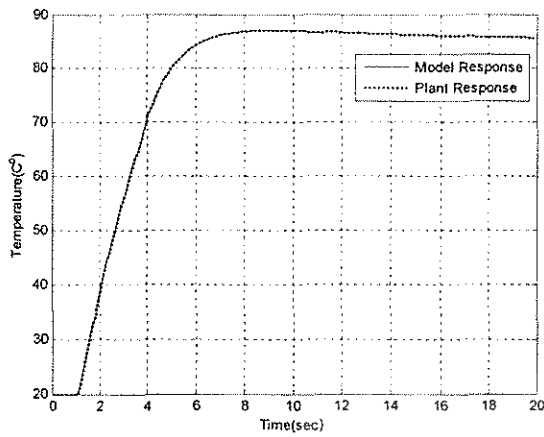
## 6. ผลการจำลองสถานการณ์

ในการจำลองสถานการณ์ของระบบควบคุมปรับตัวได้นั้นคืออ้างอิงแบบจำลอง ของกระบวนการเดาอบแบบหลอดอินฟราเรดโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้อัลกอริทึมที่เป็นวิธีการของ Lyapunov's Direct Method ในการทำหน้าที่ปรับตัวควบคุมแบบพีไอของระบบ เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิงซึ่งเป็นรูปแบบการตอบสนองที่ต้องการ ผลการจำลองสถานการณ์การตอบสนองของระบบต่ออินพุตเป็นขั้นบันได (Step input) ที่อุณหภูมิ 85°C โดยพิจารณาการปรับค่าของตัวควบคุมแบบพีไอและการตอบสนองของพลาเน็ตตามกรณี โดยแต่ละกรณีกำหนดอัตราการปรับตัว  $\gamma_1 = 0.00025$  และ  $\gamma_2 = 0.0001$  ดังนี้

กรณีที่ 1 ระบบ (Plant) มีค่าเริ่มต้นของสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอเท่ากับศูนย์  $K_p = 0, K_i = 0$  ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างแบบจำลองของพลาเน็ตกับโมเดลมีค่าเท่ากัน โดย

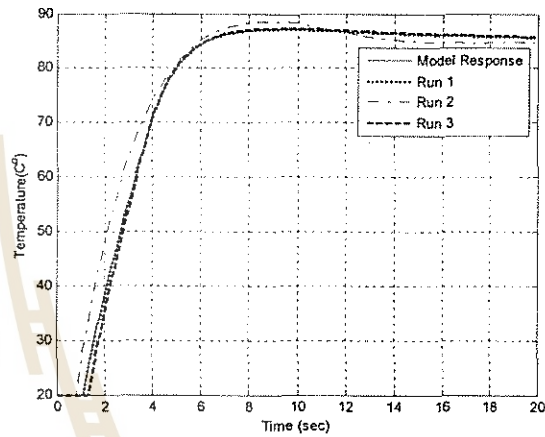
$K = \hat{K} = 10.319, \tau = \hat{\tau} = 6.149 \text{ sec.}, d = \hat{d} = 1.1 \text{ sec.}$   
 สัมประสิทธิ์ ตัวควบคุมแบบพีไอของโมเดลคือ  $\hat{K}_p = 0.37, \hat{K}_i = 0.048$

ตารางที่ 4. ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างแบบจำลองของพลานต์และโมเดลและผลของค่าพีไอของพลานต์หลังการปรับตัว

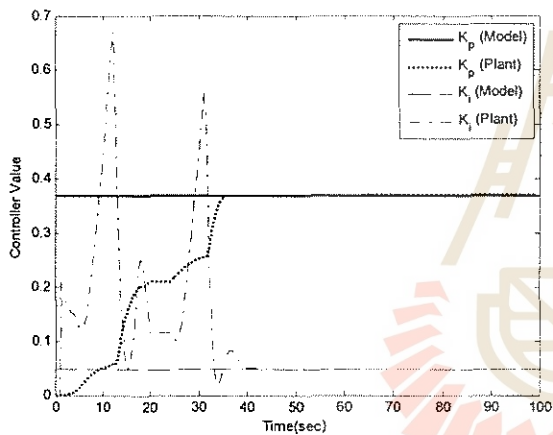


รูปที่ 10 แผนภาพแสดงการตอบสนองของอุณหภูมิของพลานต์เทียบกับโมเดล

Test	Parameters of Transfer function			PI Controller	
	$K$	$\tau$	$d$	$K_p$	$K_i$
Model	10.319	6.149	1.1	0.370	0.048
Plant	Run 1	10.319	6.149	0.368	0.048
	Run 2	9	4	0.171	0.0628
	Run 3	12	7	0.363	0.042

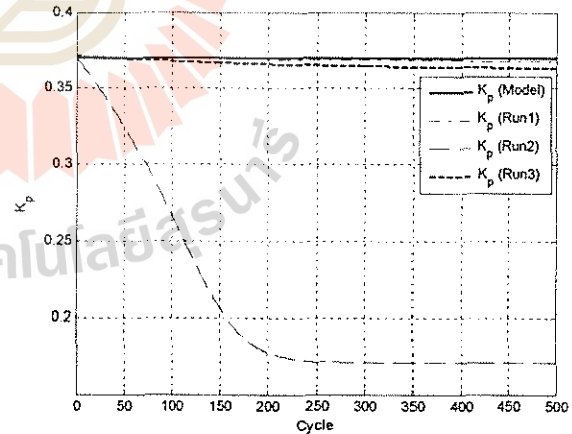


รูปที่ 12 แผนภาพแสดงการตอบสนองของอุณหภูมิของพลานต์เทียบกับโมเดล



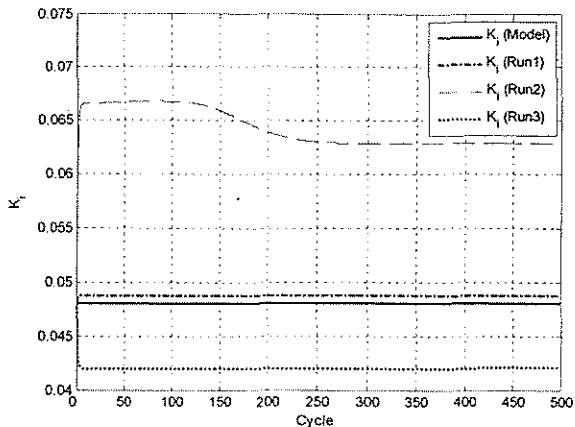
รูปที่ 11 แผนภาพแสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอของพลานต์เทียบกับโมเดล

ผลการตอบสนองพบว่า ตัวควบคุมพีและไอของพลานต์มีการปรับตัวดังรูปที่ 12 เพื่อให้การตอบสนองของพลานต์มีการตอบสนองเช่นเดียวกันกับโมเดล ดังรูปที่ 11 ค่าพีไอของพลานต์หลังการปรับตัวเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 100 sec. ได้  $K_p = 0.370, K_i = 0.048$  ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าพีไอของโมเดล และ การตอบสนองของพลานต์เหมือนกับโมเดล



รูปที่ 13 แผนภาพแสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีของพลานต์ เทียบกับโมเดล

กรณีที่ 2 ระบบ (Plant) มีการกำหนดค่าเริ่มต้นของสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอเท่ากับ  $K_p(0) = 0.37, K_i(0) = 0.048$  ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างแบบจำลองของพลานต์กำหนดให้มีความแตกต่างกัน 3 แบบ และโมเดล ดังตารางที่ 4. ผลของค่าพีไอของพลานต์หลังการปรับตัวดังนี้



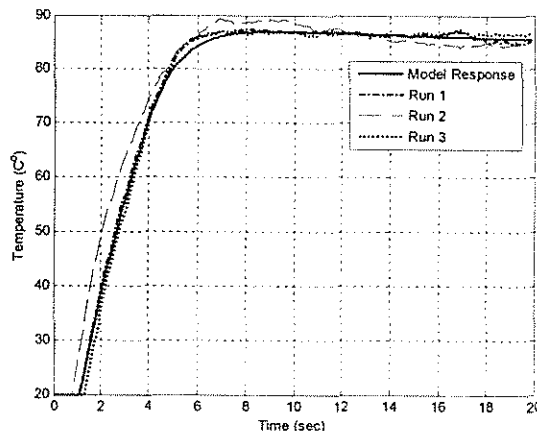
รูปที่ 14 แผนภาพแสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอของพลาเน็ตเทียบกับโมเดล

ผลการตอบสนองพบว่า ตัวควบคุมพีและไอของพลาเน็ตที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างแบบจำลองแตกต่างกัน 3 แบบนั้นตัวควบคุมมีการปรับตัวเพื่อทำให้การตอบสนองของพลาเน็ตมีลักษณะใกล้เคียงกับโมเดล ดังรูปที่ 12 การปรับตัวของตัวควบคุมพีและไอของพลาเน็ต ดังรูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ การปรับตัวแสดงถึงที่เวลา 500 Cycles. โดย 1 Cycle คือ คาบเวลาในการทำงานแต่ละรอบ ซึ่งใช้เวลา 20 วินาทีต่อ 1 Cycle

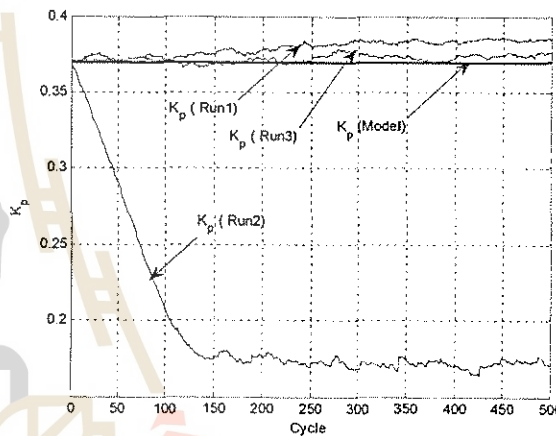
กรณีนี้ 3 ระบบ (Plant) มีค่าเริ่มต้นของสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอเท่ากับ  $K_p(0) = 0.37, K_i(0) = 0.048$  ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างแบบจำลองของพลาเน็ตกำหนดให้มีความแตกต่างกัน 3 แบบและโมเดล ดังตารางที่ 5. แต่ให้ระบบได้รับผลกระทบจากอูณหภูมิรบกวน และผลของค่าพีไอของพลาเน็ตหลังการปรับตัวดังนี้

ตารางที่ 5. ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างแบบจำลองของพลาเน็ตและโมเดลและผลของค่าพีไอของพลาเน็ตหลังการปรับตัว

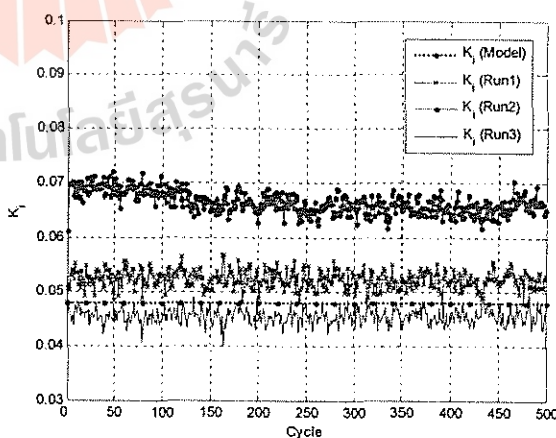
Test	Parameters of Transfer function			PI Controller		
	$K$	$\tau$	$d$	$K_p$	$K_i$	
Model	10.319	6.149	1.1	0.370	0.048	
Plant	Run 1	10.319	6.149	1.1	0.384	0.051
	Run 2	9	4	0.8	0.170	0.065
	Run 3	12	7	1.3	0.377	0.045



รูปที่ 15 แผนภาพแสดงการตอบสนองของอุณหภูมิของพลาเน็ตเทียบกับโมเดล



รูปที่ 16 แผนภาพแสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีของพลาเน็ตเทียบกับโมเดล



รูปที่ 17 แผนภาพแสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอของพลาเน็ตเทียบกับโมเดล

ผลการตอบสนองพบว่า ตัวควบคุมพีและไอมีการปรับตัวเพื่อทำให้การตอบสนองของพลาเน็ตที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างแบบจำลองแตกต่างกัน 3 แบบ ให้มีลักษณะการตอบสนองใกล้เคียงกับโมเดลแม้ระบบได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิรบกวน ดังรูปที่ 15 การปรับตัวของตัวควบคุมพีและไอของพลาเน็ต ดังรูปที่ 16 และ 17 ตามลำดับ

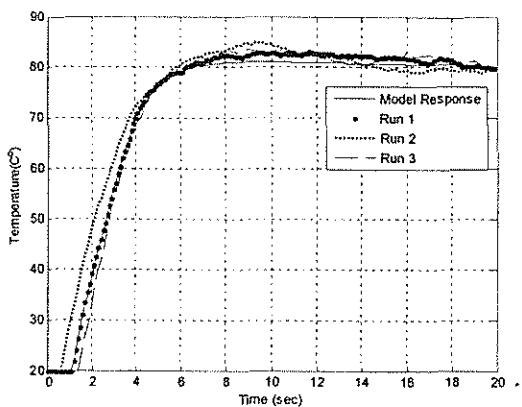
กรณีนี้ 4 ระบบ (Plant) มีค่าเริ่มต้นของสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอเท่ากับ  $K_p(0)=0.37, K_i(0)=0.048$  ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างแบบจำลองของพลาเน็ตกำหนดให้มีความแตกต่างกัน 3 แบบ และโมเดล ดังตารางที่ 6. และ 7. ให้ระบบได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิรบกวน และเปลี่ยนอินพุตเป็นขั้นบันได (Step input) ที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}, 90^{\circ}$  ผลของค่าพีไอของพลาเน็ตหลังการปรับตัวดังนี้

ตารางที่ 6. ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างแบบจำลองของพลาเน็ตและโมเดลและผลของค่าพีไอของพลาเน็ตหลังการปรับตัวที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}$

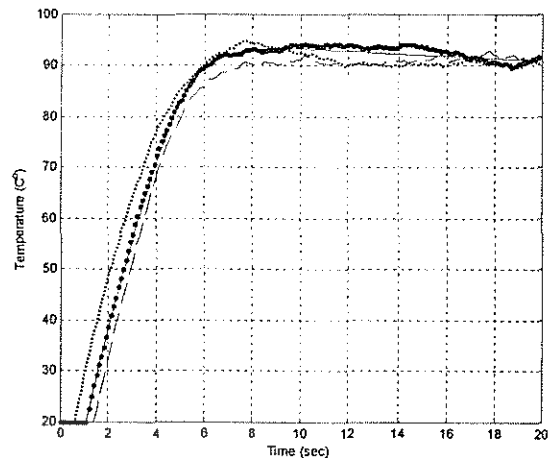
Test	Parameters of Transfer function			PI Controller		
	$K$	$\tau$	$d$	$K_p$	$K_i$	
Model	10.319	6.149	1.1	0.370	0.048	
Plant	Run 1	10.319	6.149	1.1	0.337	0.056
	Run 2	9	5	0.6	0.228	0.074
	Run 3	11	6.58	1.4	0.355	0.048

ตารางที่ 7. ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างแบบจำลองของพลาเน็ตและโมเดลและผลของค่าพีไอของพลาเน็ตหลังการปรับตัวที่อุณหภูมิ  $90^{\circ}$

Test	Parameters of Transfer function			PI Controller		
	$K$	$\tau$	$d$	$K_p$	$K_i$	
Model	10.319	6.149	1.1	0.370	0.048	
Plant	Run 1	10.319	6.149	1.1	0.436	0.053
	Run 2	9	5	0.6	0.246	0.062
	Run 3	14	6.58	1.4	0.429	0.040



รูปที่ 18 แผนภาพแสดงการตอบสนองของอุณหภูมิของพลาเน็ตเทียบกับโมเดล ที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}$



รูปที่ 19 แผนภาพแสดงการตอบสนองของอุณหภูมิของพลาเน็ตเทียบกับโมเดล ที่อุณหภูมิ  $90^{\circ}$

ผลการตอบสนองพบว่า ตัวควบคุมพีและไอมีการปรับตัว ดังตารางที่ 6 และ 7 เพื่อทำให้การตอบสนองของพลาเน็ตที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างแบบจำลองแตกต่างกัน 3 แบบ ให้มีลักษณะการตอบสนองใกล้เคียงกับโมเดลแม้ระบบได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิรบกวน และการเปลี่ยนอินพุตเป็นขั้นบันได (Step input) ที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}, 90^{\circ}$  ดังรูปที่ 18 และ 19 ตามลำดับ

### 7.สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการเอาแบบหล่ออินฟราเรดโดยวิเคราะห์การตอบสนองของแบบจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองในระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอโดยใช้วิธีการ Nonlinear least squares ในการหาค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบเพื่อหาค่าตัวแปร ซึ่งค่าตัวแปรที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์นั้นเป็นค่าตัวแปรโดยประมาณ กระบวนการเอาแบบหล่ออินฟราเรดได้ใช้งานเป็นเวลานาน ทำให้ระบบมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ได้ออกแบบมาตั้งแต่เริ่มต้นจึงไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเอาแบบหล่ออินฟราเรด ณ ปัจจุบัน

ในการจำลองสถานการณ์ของระบบควบคุมปรับตัวได้นี้ได้อ้างอิงแบบจำลอง (MRAS) ของกระบวนการเอาแบบหล่ออินฟราเรดโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้อัลกอริทึมแบบปรับตัวได้จากวิธีการของ Lyapunov's Direct Method ทำหน้าที่ปรับตัวควบคุมแบบพีไอของระบบเพื่อให้ระบบมีการตอบสนองเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิงซึ่งในรูปแบบการตอบสนองที่ต้องการ ผลการจำลองสถานการณ์ ตัวควบคุมพีและไอมีการปรับตัว เพื่อทำให้การตอบสนองของพลาเน็ตที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างแบบจำลองแตกต่างกัน ให้มีลักษณะการตอบสนองใกล้เคียงกับโมเดล แม้ระบบได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิรบกวน และการปรับเปลี่ยนอินพุตขั้นบันได หากนำวิธีการการควบคุม

ที่ปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง ในการควบคุมกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด สามารถใช้ควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดทุกเครื่อง ให้มีการตอบสนองเป็นไปตามความต้องการ

#### 8.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านการผลิตขั้นสูงในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และขอขอบคุณ ศ.นท.ดร. สรวุฒิ สุจิตจร ที่ให้คำแนะนำในการวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Choi, J.Y. and Do, H.M., 2001. A leaning approach of wafer temperature control in a rapid thermal processing system. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol.14, No. 1, pp. 1-10.
- [2] Lord, H. A., 1988. Thermal and stress analysis of semiconductor wafers in a rapid thermal processing oven. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 1, No. 3, pp. 105-114.
- [3] Wonhui Cho., 2005. Temperature control and modeling of the rapid thermal processing chamber. PhD Dissertation, University of Texas at Austin, pp. 1-264.
- [4] Wonhui Cho., Thomas F. Edgar and Jietae Lee., 2006. Closed loop identification of wafer temperature dynamics in a rapid thermal process. Korean J. Chem. Eng., Vol. 23, No. 2, pp. 171-175.
- [5] Yeo, Y.K., Kwon, T. I. and Lee, K. W., 2004. An energy effective PID tuning method for the control of polybutadiene latex reactor based on closed-loop identification. Korean J. Chem. Eng., Vol. 21, No. 5, pp. 935-941.
- [6] Pramod, S. and Chidambaram, M., 2000. Closed Loop Identification of Transfer Function Model for Unstable Bioreactors for Tuning PID Controllers. Bioprocess Eng., Vol. 22, No. 2, pp. 185-188.
- [7] Lin, C. A. and Jan, Y. K., 2001. Control system design for a rapid thermal processing system. IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 9, pp. 122-129.
- [8] Choi, J.Y., Do, H. M. and Choi, H. S., 2003. Adaptive control approach of rapid thermal processing. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 16, pp. 621-632.
- [9] Stephen, A. Norman, 1991. Optimization of wafer temperature uniformity in rapid thermal processing. IEEE Transactions on Electronics Devices, pp.1-46.
- [10] Karl J. Astrom and Bjorn Wittenmark, 1995. Adaptive Control. (2<sup>nd</sup> Edition), USA, Addison Wesley.
- [11] ษัตถชัย กุลวรวาณิชพงษ์. 2550. เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.



การประชุมเสนอผลงานบัณฑิตศึกษาคณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ครั้งที่ 1 ปีการศึกษา 2551  
3 กุมภาพันธ์ 2552 ณ ห้องประชุมสำนักวิทยาศาสตร์

## การศึกษาอายุการใช้งานของหวีเนื่องจากการเสียหายทางกล Study of comb lift time due to mechanical failure

ฐวิสิทธิ์ ปัทมประดิษฐ์<sup>1</sup> เฉลิมชัย ไชยธรรตน์<sup>2</sup> และ สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์<sup>3</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000  
โทร 0-4422-4290 โทรสาร 0-4422-4613 อีเมล cassiopia\_wawa@hotmail.com

Thawisanee Pattamapradit<sup>1</sup>, Chalermchi Chaitongrat<sup>2</sup>, and Somsak Siwadamrongpong<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Tel: 0-4422-4290, Fax: 0-4422-4613, \* E-mail: cassiopia\_wawa@hotmail.com

### บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตชุดหัวอ่าน Head Stack Assembly(HSA) การเคลื่อนย้ายชุดหัวอ่านจะต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอน หวี (Comb) จะถูกสวมเข้ากับชุดหัวอ่านอาร์ตติสก์(HSA) เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการกระแทกให้กับชุดหัวอ่าน จึงถูกถอดเข้า-ออกหลายครั้ง และถูกเคลื่อนย้ายไปพร้อมกับชุดหัวอ่านจนสิ้นสุดกระบวนการผลิต เมื่อนำหวีกลับมาใช้ใหม่จะพบว่าหวีบางชิ้นเกิดความเสียหายจนไม่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ สาเหตุหลักที่คาดว่าทำให้หวีเกิดความเสียหายได้แก่ แรงสั่นสะเทือน แรงเสียดทาน แรงกระแทกขณะเคลื่อนย้าย สารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาด อุณหภูมิในกระบวนการล้าง เป็นต้น ซึ่งก่อนที่จะทำการผลิตในครั้งต่อไปพนักงานต้องทำการคัดแยกหวีที่เสียหายออกและคัดเลือกหวีที่ยังมีสภาพดีอยู่นำไปใช้ในกระบวนการผลิต ในขั้นตอนนี้หากสามารถทราบอายุการใช้งานของหวีก็จะสามารถลดเวลาในการคัดแยกและลดความเสียหายที่อาจเกิดจากหวีที่หมดสภาพไปแล้วได้ โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาอายุการใช้งานของหวีโดยเน้นผลกระทบทางกล(Mechanical Factor) เช่น การสั่นสะเทือน การเสียดสี การกระแทก ที่มีผลต่ออายุการใช้งานโดยใช้ทฤษฎีความน่าเชื่อถือ(Reliability) เพื่อทำนายอายุการใช้งานเฉลี่ยของหวี ซึ่งคาดว่าจะสามารถทำนายอายุการใช้งานของหวีและช่วยลดความสูญเสียกำลังคนและเวลาในการตรวจสอบหวีได้

### Abstract

HSA process is one of critical HDD manufacturing processes that comb will be inserted to HSA and removed for many times along the processes. The comb will be transferred together with HSA unit through the end of process. One cycle of manufacturing HSA and comb will pass several environments such as

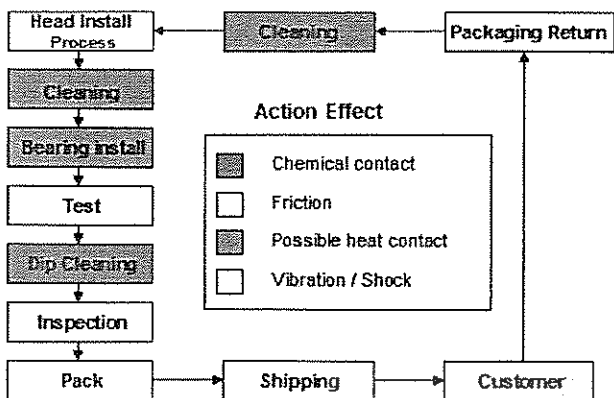
mechanical force, vibration, chemical contact and possible heat contact that might cause comb damage. Therefore, eyewitness checking was employed to classify reused comb before next manufacturing cycle. The reused comb will be taken into the processes repeatedly without knowing the remaining life of comb. It should be advantage in the view of labor cost saving and damage cost reducing from mistaken eyewitness, if comb life time is known. Therefore, the project was aimed to study comb life time focus on the mechanical factor such as vibration, friction, fatigue to comb life time by using mechanical reliability concept.

### 1. บทนำ

#### 1.1 กระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับชุดหัวอ่านและหวี

ในกระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์ กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการผลิตชุดหัวอ่าน HSA (Head Stack Assembly) ถือเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญกระบวนการหนึ่ง การผลิตชุดหัวอ่านอาร์ตติสก์ใดโรพีประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ได้แก่ การประกอบชิ้นส่วน การล้างทำความสะอาด การติดตั้งแบร์ริง การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงาน กระทั่งการขนส่งผลิตภัณฑ์ให้กับกระบวนการถัดไป ในการลำเลียงชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการผลิตเหล่านี้หลังจากที่ชุดหัวอ่านถูกประกอบขึ้นมาแล้วหวีจะถูกนำไปสวมเข้ากับชุดหัวอ่านเพื่อป้องกันไม่ให้หัวอ่าน/เขียนที่อยู่ตรงปลายของชุดหัวอ่านเสียหายทั้งจากการกระทบกันเองหรือกับสิ่งอื่น ดังนั้นหวีจึงถูกถอดเข้า-ออกหลายครั้งตลอดกระบวนการประกอบในรอบการผลิตแต่ละรอบชุดหัวอ่านกับหวีจะสวมติดกันไปตลอดเวลา ดังนั้นหวีจึงต้องผ่านกระบวนการต่างๆ ไปด้วย เช่น การล้าง การทำให้แห้ง และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนกระทั่ง HSA ถูกประกอบเข้ากับแผ่นดิสก์หวีจึงจะถูกถอดออกอย่างถาวร เพื่อรอกลับเข้าสู่รอบ

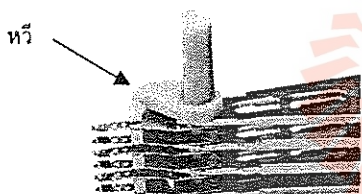
การผลิตรอบใหม่ซึ่งหรีทุกตัวจะต้องผ่านการล้างทำความสะอาด และตรวจเช็คคัดแยกด้วยสายดาก่อนนำกลับเข้าสู่การผลิตรอบใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การผลิตชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์

จากข้อมูลที่ได้รับจากทางโรงงาน พบว่าสาเหตุหลักที่มีความเป็นไปได้ที่ทำให้เกิดความเสียหายกับหรีมากที่สุดได้แก่ปัจจัยทางกล เช่น การสั่นสะเทือน การกระแทก การเสียดสี เป็นต้น ซึ่งจะมีผลทำให้หรีเกิดการเสียดรูป สึกหรอ หรือแตกหักจนไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

1.2 Comb ที่ใช้ในกระบวนการผลิต



รูปที่ 2 หรี

หรี หรือ Comb (ดังแสดงในรูปที่ 2) เป็นชิ้นส่วนที่หัวจากพลาสติกถูกนำมาสวมเข้ากับชุดหัวอ่านบริเวณใกล้กับ Slider ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ Slider ของชุดหัวอ่านกระทบกันเอง ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนย้ายในแต่ละกระบวนการ อีกทั้งป้องกันไม่ปล่อยให้ Slider สัมผัสกับแผ่นดิสก์เก็บข้อมูล(Platters) ในขณะที่ประกอบก่อนที่จะทำการผลิตในครั้งต่อไป จะต้องทำการคัดแยกหรีที่เสียหายออกและคัดเลือกหรีที่ยังมีสภาพดีอยู่ต่อไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งการนำหรีมาใช้ในกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับชุดหัวอ่านยังไม่มีการศึกษาอายุการใช้งานของหรีอย่างเป็นระบบจึงไม่สามารถมีเกณฑ์ในการตัดสินใจเปลี่ยนหรีชุดใหม่เข้าสู่กระบวนการผลิตแต่ใช้วิธีเสริมจำนวนหรีเข้าไปทดแทนหรีที่ถูกต้องคัดแยกออกเท่านั้น ดังนั้นหากสามารถทราบหรือทำนายอายุการใช้งานของหรีในระดับความน่าเชื่อถือที่ต้องการได้ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุนแรงงานในการคัดแยกได้อีกด้วย

2. แนวทางในการวิเคราะห์ความเสียหายเนื่องจากปัจจัยทางกล

การวิเคราะห์ความเสียหายเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบว่าเหตุใดชิ้นส่วน อุปกรณ์จึงเกิดความเสียหายและเกิดขึ้นได้อย่างไร ความเสียหายอาจเกิดขึ้นเนื่องจากแรงทางกล อุณหภูมิหรือปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้น การวิเคราะห์ความเสียหายจึงเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการออกแบบและวิศวกรรมให้สูงขึ้นและเป็นประโยชน์ในการป้องกันไม่ให้เกิดหรือลดการเกิดความเสียหายในอนาคต ดังนั้นการนำตัวอย่างหรี (Comb) มาทำการทดสอบโดยเน้นความเสียหายเนื่องจากแรงทางกล(Mechanical Force Test) ซึ่งได้แก่แรงสั่นสะเทือน แรงเสียดทาน แรงกระแทก เป็นต้น จึงต้องเข้าใจถึงทฤษฎีคุณสมบัติทางกลของวัสดุ(Mechanical Properties) การวิเคราะห์ค่าความเค้นซึ่งทำให้มีผลต่อการใช้งานหรีซึ่งการวิเคราะห์มีได้หลายวิธีเช่น โดยภาระแบบคงที่(Static Load) ภาระแบบพลวัต(Dynamic Load) และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite Element Method) แล้วจึงนำมาประยุกต์เข้ากับการทดลองเพื่อทำนายอายุการใช้งานของหรีโดยเฉลี่ย นอกจากนี้ยังสามารถใช้การทดสอบชิ้นงานในสภาวะเร่ง(Accelerated Testing) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบทางกลที่สำคัญวิธีหนึ่งเพื่อเร่งให้หรี(comb) เกิดความเสียหายเร็วขึ้นโดยการเพิ่มภาระให้กับชิ้นงาน เช่น เพิ่มความเค้น เพิ่มอุณหภูมิ เพิ่มความเข้มข้น จากนั้นจึงนำข้อมูลช่วงเวลาก่อนเกิดความเสียหาย(Time-to-failure Data) ที่ได้จากการทดสอบเร่งไปประเมินอายุของหรีที่สภาวะการใช้งานปกติโดยอาศัยทฤษฎีทางสถิติและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่ระดับความน่าเชื่อถือ(reliability) ที่ต้องการ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เมื่อวัสดุถูกแรงซึ่งต่ำกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด(Ultimate Strength) มากกระทำกลับปกลับไปมาซ้ำ ๆ กันอาจทำให้เกิดการแตกหักขึ้นได้เนื่องจากความล้า(Fatigue) ขึ้นซึ่งความล้าที่เกิดขึ้นนี้เป็นสาเหตุหนึ่งของการเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรต่างๆ ความล้าเกิดขึ้นได้ 2 ระยะ คือ ระยะแรกจะเกิดรอยแตกขึ้น เมื่อมีความเค้นหนาแน่น (Stress Concentration) ในบริเวณนั้นและเมื่อเวลาผ่านไปจะเข้าสู่ระยะที่สอง เมื่อมีความเค้นเข้าไปซ้ำมารอยแตกก็จะโตขึ้นเรื่อยๆ จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลงจนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดวัสดุก็จะแตกหักจากกัน

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite Element Method) หรือ FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมอย่างกว้างขวางซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเค้นของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล วิธี Finite Element นอกจากจะใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิติศาสตร์แล้วยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ เช่น การรับแรงกระแทกและการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ในการทำนายอายุการใช้งานของหรีโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงต้องทราบคุณสมบัติความล้า(Fatigue Strength) ของวัสดุที่ใช้ทำหรี ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะการมีแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยเรียกว่า เอลิเมนต์ (element) และเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดต่อ(node) แล้วจึงนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์

เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมนจากนั้นจึงแก้ระบบสมการดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยโดยประมาณที่จุดต่อบนโดเมน

- ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.) แบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์
- 2.) สร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์จากสมการควบคุม
- 3.) นำสมการจากทุกเอลิเมนต์มารวมเป็นระบบสมการไฟไนต์-เอลิเมนต์ซึ่งเป็นระบบสมการเชิงเส้น
- 4.) ให้เงื่อนไขขอบเขต
- 5.) แก้ระบบสมการ ซึ่งจะได้ผลเฉลยที่จุดต่อบนโดเมน

#### 4. วิธีการดำเนินการ

- 1.) วัดขนาดมิติของหัวเพื่อให้ทราบขนาดที่มีความสำคัญต่อการใช้งานเพื่อเป็นเกณฑ์ในการบ่งบอกอายุของหัวในกระบวนการทดลอง
- 2.) สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการศึกษากลไกการวิเคราะห้กระจายตัวของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน
- 3.) ทำการทดสอบหาจำนวนรอบอายุการใช้งานของหัวด้วยเครื่องทดสอบความล้า (Fatigue test) เครื่องทดสอบแรงกระแทกและแรงเสียดสี เครื่องทดสอบการสั่นสะเทือน(Vibration Test)

#### 5. สิ่งที่เราคาดว่าจะได้รับ

ในการทำนายอายุการใช้งานของหัวโดยศึกษาปัจจัยทางกลที่ส่งผลต่อความเสียหายของหัวด้วยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และทำการทดสอบด้วยด้วยเครื่องทดสอบแรงทางกลจะช่วยลดความสูญเสียกำลังคนและเวลาในการตรวจสอบหัวและสามารถนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาปรับปรุงและออกแบบหัวให้มีประสิทธิภาพการใช้งานดียิ่งขึ้น

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำวิจัยขอขอบคุณบริษัท Seagate Technology(Thailand) จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูลและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] เทวิน พันภัย,ธีระ เจียรพิทพงษ์กุล, 2550. "การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ Actuator Arm ในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยการใช้ LDV", วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 34 ฉบับที่ 4 (477 - 488) กรกฎาคม - สิงหาคม
- [2] Bao Jun SHI, Shao WANG, 2004. Power Spectrum Analysis of the Excitation Pulse Effects in Drop Test Simulation of Hard Disk Drives, Asia-Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC'04), Seoul, Korea, August 16-19.
- [3] B. Gu, D. W. Shu, J. Luo and B. J. Shi, 2006. FEA Simulation of Linear and Rotary Drop Test for Small Form Factor HDD, International Conference on Mechatronics and Automation.

Luoyang, China, June 25-28.

- [4] Interlaminar fatigue crack growth of cross-ply composites under thermal cycles, N. Raman jans et. al., Composite Structure, 85 (2008), 175-187
- [5] Nasser Fard, Chenhua Li, Optimal simple step stress accelerated life test design for reliability prediction. [http:// www.elsevier.com/locate/jspi](http://www.elsevier.com/locate/jspi)