# มาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิต สำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

นายณัฐวุฒิ เพิ่มขุนทด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# PRODUCTION ENERGY EFFIICIENCY IMPROVEMENT MEASURES FOR GLASS INDUSTRY

Mr. Nattawut Permkhuntod

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

500949

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | มาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจก |
| โดย | นายณัฐวุฒิ เพิ่มขุนทด |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมอุตสาหการ |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ศาสตราจารย์ ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ อังศุมาลิน เสนจันทร์มิไชย)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศึก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณัฐวุฒิ เพิ่มขุนทด: มาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจก. (PRODUCTION ENERGY EFFIICIENCY IMPROVEMENT MEASURES FOR GLASS INDUSTRY) อ. ที่ปรึกษา : ศ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, 249 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหามาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจก เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่มีความเข้มพลังงานสูงและยังไม่มีหน่วยงานใดที่เข้ามาส่งเสริมหรือมีมาตรการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานอย่างเป็นรูปธรรม

ก่อนการหามาตรการจำเป็นต้องรู้เสียก่อนว่าประสิทธิภาพพลังงานของอุตสาหกรรมเป็นอย่างไร งานวิจัยนี้จึงใช้ค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption ; SEC) ซึ่งเป็นค่าชี้วัดการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิตมาประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก ได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตกระจก อุตสาหกรรมขวดแก้ว อุตสาหกรรมเครื่องแก้ว และอุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว โดยดำเนินการตรวจวัดการบริโภคพลังงานไฟฟ้า เชื้อเพลิงและรวบรวมข้อมูลด้านผลผลิต จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า SEC ของแต่ละกระบวนการผลิต แล้วนำมาเทียบเคียงพลังงานกับค่า SEC ที่มีประสิทธิภาพพลังงานเหมาะสม

ผลจากการเทียบเคียงพลังงานทำให้ได้ค่า SEC Benchmarking หรือค่าที่ใช้ในการอ้างอิงในการเทียบเคียงพลังงานงานดังนี้ อุตสาหกรรมกระจกมีค่าSECเท่ากับ 8.55 GJ/Ton (ที่ 20% Cullet, 600 Ton/Day) อุตสาหกรรมขวดแก้วมีค่าSECเท่ากับ6.48GJ/Ton(ที่ 70% Cullet, 300 Ton/Day) อุตสาหกรรมเครื่องแก้วมีค่าSECเท่ากับ 10.89 GJ/Ton (ที่ 0%Cullet, 100Ton/Day) และอุตสาหกรรมฉนวนใยแก้วมีค่าSECเท่ากับ 14.38 GJ/Ton (ที่ 100% Cullet, 50 Ton/Day)ซึ่งพบว่าค่า SEC ของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศไทยมีค่าสูงกว่า SEC Benchmarking แสดงว่าอุตสาหกรรมแก้วและกระจกของประเทศยังสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานเพื่อลดค่า SEC ให้ต่ำลงได้ โดยมาตรการที่นำเสนอคือ มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศสามารถลดการบริโภคไฟฟ้าในระบบอัดอากาศลดลงร้อยละ 10 - 20 มาตรการการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศสามารถลดการบริโภคพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งโรงงานลดลงร้อยละ 1 และมาตรการการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศสามารถลดการบริโภคพลังงานไฟฟ้าลงได้ 5.5 – 12.32 kWh/ton

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต ณัฐวุฒิ เพิ่มขุนทด

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

## 4970312221 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD : ENERGY EFFICIENCY / GLASS INDUSTRY

NATTAWUT PERMKHUNTOD : PRODUCTION ENERGY EFFIICIENCY IMPROVEMENT MEASURES FOR GLASS INDUSTRY.

THESIS ADVISOR : PROF. SIRICHAN THONGPRASERT, Ph.D, 249 pp.

The main purpose of this thesis, is to find the measures in improving the energy efficiency for the glass industry.

In finding the measures, the Specific Energy Consumption or SEC was used in measuring the energy efficiency for the glass production i.e. the flat glass industry, the press and blow glass industries, the container glass industry, and the fiberglass industry. The methodology were done by measuring the energy and fuel consumption corresponding to the production information. Then, the SEC values were calculated and taken to compare with the efficiency SEC

The result from the energy benchmarking provides the value so called "SEC Benchmarking". i.e. flat glass industry has SEC 8.55 GJ/Ton (20% Cullet, 600 Ton/Day), the container glass industry has SEC 6.48 GJ/Ton (70% Cullet, 300 Ton/Day), the press and blow glass industry has SEC 10.89 GJ/Ton (0% Cullet, 100 Ton/Day), and the fiberglass industry has SEC 14.38 GJ/Ton (100% Cullet, 50 Ton/Day). The result of SEC Benchmarking found that the energy efficiency of the glass industry in Thailand can be improved. The proposed measures are the improvement air compressor system which is expected to reduce the electric energy consumption about 10 – 20% of air compressor system, waste heat recovery to generate cool air through absorption chiller which is expected to reduce electric energy consumption over plant about 1% and waste heat recovery to lower inlet air temperature of air compressor system which is expected to reduce electric energy consumption over all of air compressor system about 5.5 – 12.32 kWh/ton.

Department.....INDUSTRIAL ENGINEERING Student's signature.....

Concentration....INDUSTRIAL ENGINEERING Advisor's signature.....

Academic year.....2007.....

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างยิ่งของศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และรองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ และคำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาของการทำวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ อาจารย์อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย และรองศาสตราจารย์สมชาย พวงเพิกศึก กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะที่ดีสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอน อบรมและให้ความรู้แก่ผู้วิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งทำให้ผู้วิจัยนำความรู้ ความสามารถที่ได้รับมาทำงานวิจัย และทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ นายธีรวัฒน์ เพิ่มขุนทดและนางกาญจนา เพิ่มขุนทด บิดามารดาและนายสมฤกษ์ เพิ่มขุนทดพี่ชาย ที่ได้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้ร่วมโครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมอโลหะทุกท่านและมิตรภาพของเพื่อนนิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ เพื่อนปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมเคมี และเพื่อนปวช. โยธา ที่ห่วงใยและช่วยเหลือกันเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ..... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย ..... 2

1.4 ขั้นตอนการวิจัย ..... 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 4

1.6 ภาพรวมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 5

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง ..... 10

2.1 ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency) ..... 10

2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพ ..... 16

2.3 ดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะ ..... 17

2.4 การเทียบเคียงสรรถนะ (Benchmarking) ..... 20

2.5 การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์ ..... 29

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 34

บทที่ 3 กระบวนการผลิตแก้วและกระจก ..... 53

3.1 ข้อมูลพื้นฐานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก ..... 53

3.2 ภาพรวมของกระบวนการผลิตแก้วและกระจก ..... 57

3.3 กระบวนการการเตรียมวัตถุดิบ ..... 60

3.4 กระบวนการหลอม ..... 64

หน้า

3.5 กระบวนการขึ้นรูป ..... 84
3.6 กระบวนการอบแก้วและการตกแต่ง ..... 95
3.7 การตรวจสอบและการบรรจุ ..... 101

บทที่ 4 การบริโภคพลังงานและการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงาน
ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก ..... 102
4.1 ความนำ ..... 102
4.2 การพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในต่างประเทศ ..... 103
4.3 ค่าดัชนีชี้วัดการบริโภคพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในต่างประเทศ ..... 109
4.4 ภาพรวมการบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศไทย ..... 114
4.5 การตรวจวัดและการรวบรวมข้อมูลการบริโภคพลังงานในโรงงานตัวอย่าง ..... 116
4.6 การเทียบเคียงและการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานในกระบวนการผลิต ..... 119
4.7 การเทียบเคียงและการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานของเตาหลอม ..... 119
4.8 การเทียบเคียงและการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานของกระบวนการอื่นๆ ..... 130

บทที่ 5 มาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก ..... 140
5.1 แนวทางการหามาตรการในการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน ..... 140
5.2 มาตรการต่างประเทศที่มีการดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน ..... 140
5.3 มาตรการด้านพลังงานที่มีการดำเนินการในปัจจุบันของโรงงานตัวอย่าง ..... 143
5.4 มาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานที่นำเสนอ ..... 145
5.5 มาตรการลดการรั่วไหลของอากาศอัด ..... 146
5.6 มาตรการใช้ VSD ควบคุมเพื่อเดินเครื่องเสริมการผลิตลมอัด ..... 149
5.7 มาตรการการลดอุณหภูมิอากาศเข้า ..... 152
5.8 มาตรการนำความร้อนทิ้งมาอุ่นเศษแก้ว (Cullet) ..... 167
5.9 ผลการอนุรักษ์พลังงาน ..... 169

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ ..... 172
6.1 สรุปผลการวิจัย ..... 172
6.2 ข้อเสนอแนะ ..... 177

หน้า

รายการอ้างอิง ..... 178
ภาคผนวก ก ..... 183
ภาคผนวก ข ..... 194
ภาคผนวก ค ..... 198
ภาคผนวก ง ..... 204
ภาคผนวก จ ..... 216
ภาคผนวก ฉ ..... 222
ภาคผนวก ช ..... 233
ภาคผนวก ซ ..... 238
ภาคผนวก ฌ ..... 242
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 249

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์คุณภาพพลังงานจากแหล่งกำเนิดพลังงานต่างๆ ..... 13
ตารางที่ 3.1 อุปสงค์และอุปทานกระจกภายในประเทศ ระหว่าง พ.ศ. 2538 – 2543 ..... 54
ตารางที่ 3.2 ปริมาณการผลิต การใช้ และการส่งออกกระจก ..... 54
ตารางที่ 3.3 มูลค่าการผลิต การใช้ และการส่งออกกระจก ..... 54
ตารางที่ 3.4 แนวโน้มและดัชนีความเชื่อมั่นภาคอุตสาหกรรมกระจก ..... 55
ตารางที่ 3.5 มูลค่าการส่งออกแก้วและกระจกของไทยไปยังตลาดโลก ..... 56
ตารางที่ 3.6 วัตถุดิบที่ทำให้เกิดสีต่างๆ ..... 62
ตารางที่ 4.1 พลังงานที่บริโภคในการหลอมแก้วทางทฤษฎี ..... 104
ตารางที่ 4.2 พลังงานที่บริโภคในการหลอมแก้วตามทฤษฎีโดยแยกตามผลิตภัณฑ์ ..... 104
ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างค่า SEC ของเตาหลอม ..... 107
ตารางที่ 4.4 สัดส่วนการใช้พลังงานของโรงงานผลิตกระจกแผ่น
ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ให้ค่า SEC Benchmarking (เบื้องต้น) ..... 110
ตารางที่ 4.5 ค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมกระจกแผ่น (เบื้องต้น) ..... 111
ตารางที่ 4.6 สัดส่วนการใช้พลังงานของโรงงานผลิตขวดแก้ว
ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ให้ค่า SEC Benchmarking (เบื้องต้น) ..... 111
ตารางที่ 4.7 ค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมขวดแก้ว (เบื้องต้น) ..... 112
ตารางที่ 4.8 สัดส่วนการใช้พลังงานของโรงงานผลิตเครื่องแก้ว
ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ให้ค่า SEC Benchmarking (เบื้องต้น) ..... 112
ตารางที่ 4.9 ค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมเครื่องแก้ว (เบื้องต้น) ..... 113
ตารางที่ 4.10 สัดส่วนการใช้พลังงานของโรงงานผลิตฉนวนใยแก้ว
ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ให้ค่า SEC Benchmarking (เบื้องต้น) ..... 113
ตารางที่ 4.11 ค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว (เบื้องต้น) ..... 114
ตารางที่ 4.12 สรุปค่า SEC จากโรงงานตัวอย่าง กับค่า SEC จากสมการ ..... 129
ตารางที่ 4.13 ผลการตรวจวัดพลังงานในกระบวนการเตรียมวัตถุดิบ ..... 131
ตารางที่ 4.14 ผลการตรวจวัดพลังงานในกระบวนการขึ้นรูป ..... 132
ตารางที่ 4.15 ผลการตรวจวัดพลังงานในกระบวนการหลังขึ้นรูป ..... 134

หน้า

ตารางที่ 4.16 สรุปค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก ..... 137
ตารางที่ 4.17 ตัวอย่างการเทียบเคียงพลังงานในแต่ละกระบวนการผลิตของโรงงาน
ผลิตขวดแก้ว ..... 138
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่วัดได้จากมอเตอร์ขนาด 250 kW กรณีไม่ใช้VSD ..... 150
ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดได้จากมอเตอร์ขนาด 250 kW กรณีใช้VSD ..... 151
ตารางที่ 5.3 มาตรการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โรงงาน ข1 ..... 153
ตารางที่ 5.4 มาตรการนำพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งใช้กับ Absorption Chiller
เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ ..... 164
ตารางที่ 5.5 มาตรการนำพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งใช้กับ Absorption Chiller
เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor ..... 164
ตารางที่ 5.6 มาตรการนำพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งใช้กับ Absorption Chiller
เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ ..... 165
ตารางที่ 5.7 สรุปผลการอนุรักษ์พลังงานจากมาตรการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน ..... 169
ตารางที่ 5.8 การอนุรักษ์พลังงานของโรงงานตัวอย่าง ..... 170
ตารางที่ 6.1 สรุปค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก ..... 175
ตารางที่ 6.2 สรุปมาตรการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงาน ..... 176

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การเรียงลำดับกระบวนการด้วยประสิทธิภาพความร้อนก่อน และหลังการปรับค่าด้วยคุณภาพพลังงาน ..... 13
รูปที่ 3.1 โครงสร้างอุตสาหกรรมแก้วและกระจก ..... 53
รูปที่ 3.2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์แก้วและกระจก ..... 58
รูปที่ 3.3 ภาพรวมของกระบวนการผลิตแก้วและกระจก ..... 59
รูปที่ 3.4 กระบวนการและเครื่องจักรในการเตรียมวัตถุดิบ ..... 63
รูปที่ 3.5 กระบวนการที่เกิดในเตาหลอม ..... 65
รูปที่ 3.6 รางน้ำแก้ว ..... 66
รูปที่ 3.7 ภายในเตาหลอม ..... 66
รูปที่ 3.8 เตาหลอมแบบไม่ต่อเนื่องชนิด Pot furnace ..... 67
รูปที่ 3.9 หลอมแบบไม่ต่อเนื่องชนิด Single Pot furnace (New type) ..... 68
รูปที่ 3.10 เตาหลอมแบบไม่ต่อเนื่องชนิด Parallel multi-pot furnace ..... 68
รูปที่ 3.11 ภายในของเตาหลอมแบบต่อเนื่องชนิดให้ความร้อนโดยตรง ..... 70
รูปที่ 3.12 เตาหลอมแบบต่อเนื่องชนิดให้ความร้อนโดยตรง ..... 70
รูปที่ 3.13 เตาหลอมแบบต่อเนื่องชนิด Recuperative Furnaces ..... 71
รูปที่ 3.14 วัสดุที่นำมาใช้ในเตาหลอมแบบ regenerative furnace ..... 73
รูปที่ 3.15 ด้านบนของเตาหลอมแบบ End-port regenerative ..... 74
รูปที่ 3.16 เตาหลอมชนิด End-port regenerative furnaces ..... 74
รูปที่ 3.17 เตาหลอมชนิด Side - port regenerative furnaces ..... 75
รูปที่ 3.18 ภายในของอ่างเตาหลอมแบบไฟฟ้า ..... 77
รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการประหยัดเชื้อเพลิงจากการใช้ก๊าซออกซิเจนในการสันดาป (Oxy – fuel firing) ที่เตาหลอมชนิดต่างๆกับอุณหภูมิที่ปล่อยออกมาจากปล่องที่ร้อยละของออกซิเจนที่ค่าต่างๆ ..... 78
รูปที่ 3.20 ส่วนประกอบของอิฐทนความไฟ(Refractory) ที่พื้นเตาหลอม ..... 80
รูปที่ 3.21 อุณหภูมิที่ชั้นต่างๆของอิฐทนไฟ (Refractory) ที่หลังคาเตาหลอม ..... 81
รูปที่ 3.22 ส่วนประกอบของอิฐทนไฟ (Refractory) ที่ผนังเตาหลอม ..... 82

หน้า

รูปที่ 3.23 ส่วนประกอบของอิฐทนไฟ (Refractory) ที่ผนังเตาหลอมเหนือน้ำแก้ว ..... 83
รูปที่ 3.24 การขึ้นรูปกระจกแผ่นเรียบที่อ่างดีบุก (Tin Bath) ..... 85
รูปที่ 3.25 กระบวนการขึ้นรูปกระจกแผ่นเรียบด้วยวิธีโฟลตกลาส (Float Glass Process) .... 86
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กระจก ..... 86
รูปที่ 3.27 วิธีขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Blow and Blow ..... 87
รูปที่ 3.28 วิธีขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Press and Blow ..... 88
รูปที่ 3.29 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์แก้วด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบต่างๆ ..... 88
รูปที่ 3.30 วิธีขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Press Forming ..... 89
รูปที่ 3.31 วิธีขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Spin Forming ..... 89
รูปที่ 3.32 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เครื่องแก้ว ..... 90
รูปที่ 3.33 การขึ้นรูปฉนวนใยแก้วด้วยวิธี Rotary spin fiberizing ..... 90
รูปที่ 3.34 การขึ้นรูปฉนวนใยแก้วด้วยวิธี Flame attenuation ..... 91
รูปที่ 3.35 การขึ้นรูปฉนวนใยแก้วด้วยวิธี steam and air injection ..... 92
รูปที่ 3.36 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ฉนวนใยแก้ว (Fiber glass) ..... 92
รูปที่ 3.37 วิธีขึ้นรูปหลอดไฟ ..... 93
รูปที่ 3.38 กระจกแปรรูปเทมเปอร์ (Temper) ..... 94
รูปที่ 3.39 กระจกแปรรูปลามิเนต (Laminate) ..... 94
รูปที่ 3.40 กระบวนการอบ (Annealing) กระจกแผ่นเรียบ ..... 96
รูปที่ 3.41 กระบวนการทำกระจกเทมเปอร์ (Temper) ..... 97
รูปที่ 3.42 กระบวนการการอบแก้วโดยใช้เตาอบ(Lehr) ..... 99
รูปที่ 3.43 กระบวนการอบของฉนวนใยแก้ว ..... 100
รูปที่ 3.44 การตรวจสอบผลิตภัณฑ์แก้วและกระจก ..... 101
รูปที่ 3.45 การบรรจุผลิตภัณฑ์แก้ว ..... 101
รูปที่ 4.1 พลังงานที่บริโภคในการหลอมแก้วตามทฤษฎี ..... 105
รูปที่ 4.2 Sankey ไดอะแกรม ..... 105
รูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยและสัดส่วนการใช้พลังงานที่เตาหลอมของอุตสาหกรรมขวดแก้ว
ในประเทศสหรัฐอเมริกา ..... 108
รูปที่ 4.4 สัดส่วนการบริโภคพลังงานในการกระบวนผลิตแก้วและกระจก ..... 115
รูปที่ 4.5 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงงานตัวอย่าง ..... 118

หน้า

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SEC ของเตาหลอมกับปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน ที่ 50% Cullet ..... 122
รูปที่ 4.7 แสดงปริมาณเศษแก้วที่ใช้ในการผสมในวัตถุดิบ (% Cullet) ..... 123
รูปที่ 4.8 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมแก้วที่ Cullet 20% ..... 124
รูปที่ 4.9 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมแก้วที่ Cullet 50% ..... 124
รูปที่ 4.10 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมแก้วที่ Cullet 60% ..... 125
รูปที่ 4.11 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมแก้วที่ Cullet 65% ..... 125
รูปที่ 4.12 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมแก้วที่ Cullet 75% ..... 126
รูปที่ 4.13 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมแก้วที่ Cullet 80% ..... 126
รูปที่ 4.14 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมกระจกที่ Cullet 18% ..... 127
รูปที่ 4.15 แสดงการเทียบเคียงพลังงานในกระบวนการเตรียมวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์แก้วและ กระจกในต่างประเทศกับโรงงานตัวอย่าง ..... 131
รูปที่ 4.16 แสดงการเทียบเคียงพลังงานในกระบวนการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์แก้วและกระจก ในต่างประเทศกับโรงงานตัวอย่าง ..... 133
รูปที่ 4.17 แสดงการเทียบเคียงพลังงานในการบริโภคพลังงานในกระบวนการหลังขึ้นรูป ของผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกในต่างประเทศกับโรงงานตัวอย่าง ..... 135
รูปที่ 4.18 ตัวอย่างการเทียบเคียงค่า SEC Benchmark กับค่า SEC โรงงานตัวอย่าง ..... 139
รูปที่ 5.1 เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดซึมชั้นเดียว ..... 153
รูปที่ 5.2 เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดซึมสองชั้น ..... 154
รูปที่ 5.3 การระเหย ..... 157
รูปที่ 5.4 การดูดซึม ..... 158
รูปที่ 5.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ..... 159
รูปที่ 5.6 Generator ..... 159
รูปที่ 5.7 การควบแน่น ..... 160
รูปที่ 5.8 วัฏจักรการทำงานของการดูดซึมแบบสองชั้น ..... 161
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบวัฏจักรการทำงานของการดูดซึมแบบชั้นเดียวและสองชั้น ..... 162
รูปที่ 5.10 ระบบความร้อนทิ้งที่นำมาแลกเปลี่ยนความร้อนใน Preheater ..... 168
รูปที่ 5.11 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบ SEC Benchmarking กับ SEC โรงงานตัวอย่าง ข1 ..... 171

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมแก้วและกระจกเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจไทย เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สร้างรายได้ให้กับประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท อีกทั้งมีแนวโน้มการขยายตัวอย่างต่อเนื่องทั้งในด้านการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก เนื่องจากยังมีความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในปริมาณที่สูง ปัจจัยดังกล่าวข้างต้นล้วนส่งผลให้อุตสาหกรรมแก้วและกระจกยังคงเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศที่รัฐบาลควรให้การส่งเสริมและสนับสนุนเพื่อให้มีศักยภาพที่สามารถแข่งขันกับต่างประเทศในเวทีการค้าโลกได้อย่างต่อเนื่องในระยะยาว อีกทั้งหากพิจารณาเพิ่มเติมในมิติด้านพลังงานอุตสาหกรรมแก้วและกระจกถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีการบริโภคพลังงานในปริมาณค่อนข้างสูงและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มระดับการใช้พลังงานต่อไปตามการขยายตัวของเศรษฐกิจ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาแนวทางที่จะส่งเสริมและสนับสนุนให้อุตสาหกรรมมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งนอกจากจะส่งผลในเรื่องพลังงานที่สามารถประหยัดได้แล้ว ยังเป็นการช่วยเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศในเวทีการค้าโลกอีกทางหนึ่งด้วย

อุตสาหกรรมแก้วและกระจก มีผู้ผลิตจำนวนไม่มากราย ส่วนใหญ่ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่และเป็นแบบสำเร็จรูป ซึ่งรับทั้ง Know – how และเครื่องจักรมาจากต่างประเทศ โดยใช้วัตถุดิบที่ผลิตได้ในประเทศเป็นหลัก แต่มีข้อจำกัดของเทคโนโลยีที่ไม่มีความยืดหยุ่นในการผลิตและเป็นอุตสาหกรรมที่อาศัยปัจจัยทางด้านพลังงานเป็นสำคัญเพราะต้องเดินเครื่องจักรตลอด 24 ชั่วโมง จึงมีการบริโภคพลังงานสูง โดยโครงสร้างต้นทุนการผลิตส่วนใหญ่เป็นค่าพลังงาน ซึ่งประกอบด้วยค่าไฟฟ้าและเชื้อเพลิง คิดเป็นประมาณร้อยละ 30 - 40 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด เมื่อพิจารณาถึงการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศไทยพบว่ายังไม่มีหน่วยงานใดที่เข้ามาส่งเสริมหรือมีมาตรการใดๆที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน อย่างเป็นรูปธรรม ดังนั้นจึงมีการหาแนวทางในการประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก เพื่อนำไปสู่การนำเสนอแนวทางการส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมดังกล่าวที่เป็นรูปธรรมและให้ภาคอุตสาหกรรมของประเทศมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะเป็นการช่วยยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันกับต่างประเทศ รวมทั้งสามารถรับมือกับสถานการณ์วิกฤติการณ์ด้านพลังงานทั้งในปัจจุบันและอนาคตได้

## 1.2 จุดประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหามาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ประเภทของกระบวนการผลิตที่จะนำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ ได้แก่

- กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมผลิตกระจก (Flat glass)
- กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมขวดแก้ว (Container glass)
- กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเครื่องแก้ว (Press glass)
- กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมผลิตฉนวนใยแก้ว (Fiber glass)

2. ประเภทของพลังงานที่จะนำมาพิจารณา คือ พลังงานไฟฟ้าและพลังงานเชื้อเพลิงเฉพาะในภาคการผลิตเท่านั้น ไม่รวมถึงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแผนกอื่นๆ เช่น สำนักงาน เป็นต้น

3. ข้อมูลปริมาณการผลิตและบริโภคพลังงานที่จะนำมาใช้หาแนวทางในการบริโภคพลังงานนั้นจะอาศัยข้อมูลที่ตรวจวัดและเก็บมาจากโรงงานอุตสาหกรรมแก้วและกระจกและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

## 1.4 ขั้นตอนและการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับภาพรวมของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก
2. ค้นหาและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในด้านพลังงานของระบบกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมแก้วและกระจกที่มีอยู่ในปัจจุบัน
3. กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขต
4. ศึกษาทฤษฎีและสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
5. เก็บและรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
6. นำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลเพื่อหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก
7. เสนอแนวทางการประหยัดพลังงานสำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจก
8. สรุปผลและจัดทำข้อเสนอแนะโดยอ้างอิงจากข้อมูลด้านเทคนิค
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## แผนการดำเนินงาน

| แผนดำเนินการ | พ.ศ. 2549 | | พ.ศ. 2550 | | | | | | | | | | | | พ.ศ. 2551 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. | มิ.ย. | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. |
| 1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับภาพรวมของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. ค้นหาและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในด้านพลังงานของระบบกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมแก้วและกระจกที่มีอยู่ในปัจจุบัน | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| 3. กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขต | | | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| 4. ศึกษาทฤษฎีและสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | |
| 5. เก็บและรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | |
| 6. นำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลเพื่อหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| 7. เสนอแนวทางการประหยัดพลังงานสำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจก | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | | | | | |
| 8. สรุปผลและจัดทำข้อเสนอแนะโดยอ้างอิงจากข้อมูลด้านเทคนิค | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | | | |
| 9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แนวทางในการแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก
2. สามารถช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมและอนุรักษ์การใช้พลังงานของกลุ่มอุตสาหกรรมแก้วและกระจกได้
3. สามารถนำหลักการมาประยุกต์ ตลอดจนวิธีการต่างๆที่ปรากฏในการวิจัยไปใช้ในการลดพลังงานในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมอื่นๆได้
4. สามารถนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไปได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**1.6 ภาพรวมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

อุตสาหกรรมแก้วและกระจกเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจไทย เพราะเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สร้างรายได้ให้กับประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท อีกทั้งมีแนวโน้มการขยายตัวอย่างต่อเนื่องทั้งในด้านการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก เนื่องจากยังมีความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในปริมาณที่สูง จากข้อมูลสถิติในปี พ.ศ. 2548 มีการส่งออกผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกรวมทั้งสิ้น 513,562 ตัน หรือคิดเป็นรายได้เข้าประเทศมูลค่ารวมกว่า 15,748 ล้านบาทและจัดเป็นสินค้าส่งออกที่สร้างรายได้มากเป็นอันดับที่ 46 ของประเทศเมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2547 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกเพิ่มขึ้นร้อยละ1.72 และ 2.13 ตามลำดับ *(โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมอโลหะ,2549)*

ในมิติด้านพลังงานอุตสาหกรรมแก้วและกระจกถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีการบริโภคพลังงานในปริมาณค่อนข้างสูงและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มระดับการใช้พลังงานต่อไปตามการขยายตัวของเศรษฐกิจ จากข้อมูลในปี พ.ศ. 2548 ระบุว่าโดยรวมมีการใช้พลังงานเทียบเท่า 866 ktoe ต้นทุนพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 30-40 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด *(โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมอโลหะ,2549)* จากปัจจัยดังกล่าวข้างต้นล้วนส่งผลให้อุตสาหกรรมแก้วและกระจกยังคงเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศที่รัฐบาลควรให้การส่งเสริมและสนับสนุนการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพที่เป็นรูปธรรม ทั้งในรูปแบบของเทคโนโลยีการผลิตและการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงมาตรการเชิงลึกด้านอนุรักษ์พลังงานที่มีประสิทธิภาพในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ภาคอุตสาหกรรมของประเทศมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะเป็นการช่วยยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันกับต่างประเทศ รวมทั้งสามารถรับมือกับสถานการณ์ด้านพลังงานทั้งในปัจจุบันและอนาคตได้

จากเหตุผลดังกล่าวจึงนำแนวคิดในการอนุรักษ์พลังงานซึ่งเป็นพลังงานเป็นทรัพยากรของโลกที่มีอยู่อย่างจำกัด มาทำให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุดนั่นคือ การนำแนวคิดแบบ Energy LAG มาใช้ *(มนัส วัฒนธรรม,2524)* ซึ่งเป็นคำที่รวมมาจาก

L = Loss หมายถึง การสูญเปล่าของพลังงานในการปล่อยความร้อนทิ้งหรือรั่วไหล

A = Allowance หมายถึง ความฟุ่มเฟือยในการใช้พลังงานไปในการผลิตเพื่อปริมาณ คุณภาพ และเวลาอันมีสาเหตุมาจากเงื่อนไขของการปฏิบัติงาน

G = Gap หมายถึง ช่องว่างในการออกแบบและเงื่อนไขการออกแบบและเงื่อนไขการใช้งาน โดยต้องคำนึงถึงปริมาณของภาระงานและประสิทธิภาพ

LAG จึงเป็นการรวมของข้อสูญเสียในการใช้พลังงานไปอย่างไร้ประสิทธิภาพ จากแนวคิดนี้ทำให้ทราบถึงที่มาของการสูญเสียของการใช้พลังงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ จึงเกิดแนวทางในการดำเนินงานเพื่อลดความสูญเสีย การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและการปรับปรุงการจัดการด้าน

พลังงานในกระบวนการผลิต *(เอกสิทธิ์ สุวรรณศรี,2543)* เพื่อให้อัตราการบริโภคพลังงานความร้อนต่อปริมาณผลผลิตลดลง เช่นการนำระบบสารสนเทศมาช่วยในการตัดสินใจในเรื่องการใช้พลังงานสำหรับผู้บริหาร คือมีการออกแบบและพัฒนาระบบฐานข้อมูลเพื่อให้สอดคล้องกับโปรแกรมรายงานการวิเคราะห์การใช้พลังงาน ทำให้ได้ต้นแบบระบบสารสนเทศสำหรับการวิเคราะห์การใช้พลังงานและสามารถนำมาใช้กับข้อมูลจากแบบส่งข้อมูลการผลิตการใช้พลังงานและการอนุรักษ์พลังงานของโรงงานควบคุม(บพร.)ได้ *(นฤมล กิตติสุนทรวงศ์,2544)* หรือการนำหลักของวิศวกรรมคุณค่ามาประยุกต์ใช้โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดต้นทุนอย่างเป็นระบบโดยคงคุณภาพไว้ *(พิศิษฏ์ จารุมณีโรจน,2548)*เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพพลังงานยังมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับผลิตภาพ(Productivity) โดย Gale A.Boyd & Joseph X. Pang(1999) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยวิธีการถดถอย (Regression analysis) ในโรงงานผลิตกระจกแผ่นเรียบและโรงงานผลิตขวดแก้ว เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังกล่าวโดยกำหนดตัวแปรคือ ปริมาณวัตถุดิบ จำนวนพนักงาน (คิดจากชั่วโมงการทำงานของพนักงานทั้งโรงงาน) ปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ และต้นทุนพลังงานเชื้อเพลิง วัตถุดิบ ผลจากการวิเคราะห์พบว่าการปรับปรุงให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ จะส่งผลให้มีการเพิ่มผลิตภาพ(Productivity) มากกว่าการปรับปรุงตัวแปรอื่น เพราะตัวแปรอื่นๆ มีผลต่อผลิตภาพน้อยกว่าตัวแปรทางพลังงาน

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการอนุรักษ์และปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมประเทศไทย เช่นการประหยัดพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า *(วีระพงษ์ ประสาทศิลป์,2541)* อุตสาหกรรมสิ่งทอมีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานในอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนต้นน้ำ โดยใช้ดัชนีดิวิเซีย (Divisia Index) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มพลังงาน(Energy Intensity) และการเปลี่ยนแปลงมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อนำไปใช้ในการจัดทำข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการจัดการด้านพลังงานได้ *(พิศิษฏ์ จารุมณีโรจน์,2548)* อุตสาหกรรมกระดาษมีการจัดแบ่งกลุ่มให้สะท้อนถึงสภาพการใช้พลังงานที่ถูกต้อง เหมาะสมและสามารถนำมาใช้กำหนดเป็นมาตรฐานการใช้พลังงาน รวมถึงสามารถนำมากำหนดมาตรการอนุรักษ์พลังงานสำหรับกลุ่มอุตสาหกรรม *(ศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและอาคารต่าง ๆ (SEC) อุตสาหกรรมกระดาษ,2549)* หรือในอุตสาหกรรมยางมีการมาตรการอนุรักษ์พลังงาน การจัดการด้านพลังงานและกรณีศึกษา เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มศักยภาพในการแข่งขัน *(คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมยาง,2535)*

สำหรับการอนุรักษ์พลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกพบว่าในปัจจุบันประเทศไทยก็มีแผนแม่บทของอุตสาหกรรมเซรามิก แก้วและกระจก เช่นโครงการโครงการพัฒนาระบบการจัดการขยะจากแก้วและกระจก โครงการพัฒนาเทคโนโลยีการออกแบบระดับสูงสำหรับ

ผลิตภัณฑ์แก้วและกระจก เป็นต้น แต่โครงการเหล่านี้ก็ไม่ได้ช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานเลยและรัฐบาลก็ไม่ได้ดำเนินการใดๆอย่างจริงจัง โรงงานแก้วและกระจกแต่ละแห่งก็อาศัยเพียงประสบการณ์ในการแก้ปัญหาในกระบวนการผลิต โดยไม่มีความรู้ความเข้าใจในอุปกรณ์และเครื่องจักรอย่างแท้จริง ในขณะที่ต่างประเทศเช่นสหภาพยุโรปหรือสหรัฐอเมริกาก็มีแผนแม่บทเพื่อใช้เป็นกลยุทธ์ในการดำเนินการต่อไปในอนาคต *(Keith Jamison,2002)* โดยมีการวิจัยและพัฒนาประสิทธิภาพพลังงาน โดยสหรัฐอเมริกาได้จัดให้อุตสาหกรรมแก้วและกระจกเป็น 1 ใน 8 ของอุตสาหกรรมสำหรับอนาคต *(Douglas W. Freitag,2003)* เพราะแก้วและกระจกสามารถนำกลับมารีไซเคิลโดยการนำมาหลอมใหม่ได้และมีอัตราความต้องการสูงขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยและพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานโดยผู้เชี่ยวชาญในอุตสาหกรรมและนักวิจัย รวมทั้งหน่วยงานต่างๆที่ให้การสนับสนุนเช่น กระทรวงพลังงานในประเทศสหรัฐอเมริกา*(U.S. Department of energy,2002)* ได้ดำเนินงานวิจัยในด้านต่างๆ เช่น การพัฒนาเทคโนโลยีของเตาหลอมและรูปแบบการหลอมรวมทั้งวัสดุทนไฟ *(Energetics,1994)* การพัฒนาเทคนิคในกระบวนการผลิตและการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพ การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและควบคุมการผลิต การนำเทคนิคแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตแบบใหม่ๆ การปรับปรุงระบบการปล่อยมลภาวะและการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ *(Charles Freeman & Johns Manville,2004)* การพัฒนาผลิตภัณฑ์แก้วแบบใหม่ๆเพื่อรองรับเทคโนโลยีอื่นๆในอนาคต การใช้ออกซิเจนในการสันดาปแทนอากาศ *(Sho Kobayashi, KT Wu and Leonard Switzer,2005)* รวมทั้งได้ร่วมมือกับประเทศญี่ปุ่นเพื่อสนับสนุนและพัฒนาเทคโนโลยีแก่ประเทศที่กำลังพัฒนา *(The Energy Conservation Center,1993)* เป็นต้น

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหามาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก โดยเบื้องต้นจะศึกษาประสิทธิภาพพลังงานของอุตสาหกรรมในประเทศก่อนว่าเป็นอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกับต่างประเทศ โดยทำการตรวจวัดการบริโภคพลังงานของโรงงานตัวอย่างในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกคือ อุตสาหกรรมกระจก อุตสาหกรรมขวดแก้ว อุตสาหกรรมเครื่องแก้วและอุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว โดยใช้ค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption ; SEC) ซึ่งเป็นค่าดัชนีสำหรับการเปรียบเทียบการใช้พลังงานในระดับกระบวนการผลิตมาเป็นตัวชี้วัดการบริโภคพลังงาน ซึ่งคำนวณจากปริมาณพลังงานที่โรงงานใช้ในเดือนนั้นต่อปริมาณผลผลิตในช่วงเดียวกัน *(อมรรัตน์,2548)* เขียนเป็นสูตรได้ดังนี้คือ

$$SEC = \frac{E}{P}$$

SEC = ค่าดัชนีชี้วัดการบริโภคพลังงานจำเพาะ

E = ปริมาณพลังงานที่โรงงานใช้ในเดือนนั้น

P = ปริมาณผลผลิตในช่วงเดียวกัน

ค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะนี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้ง การใช้พลังงานไฟฟ้า การใช้พลังงานความร้อนและของพลังงานรวม ขึ้นอยู่กับประเภทพลังงานที่นำมาคำนวณ สำหรับพลังงานไฟฟ้าจะใช้หน่วย kWh และพลังงานความร้อนใช้หน่วยเมกกะจูล (MJ)นอกจากนี้ยังใช้ในการควบคุมและติดตามการใช้พลังงาน ซึ่งยังสามารถสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานจากอดีตจนถึงปัจจุบันว่ามีการพัฒนาดีขึ้นหรือลดลง เมื่อได้ค่าSEC ในแต่ละกระบวนการผลิตแล้วสามารถนำมามาเทียบเคียง(Benchmark)พลังงานได้ ซึ่งการทำ Benchmarking เกิดในประเทศสหรัฐอเมริกา ตั้งแต่ปี 2523 ในการบริหารธุรกิจที่มีกลยุทธ์เฉพาะตัว ที่ได้จากการเรียนรู้จากผู้อื่น *(Spendolini,1992)* ซึ่งการทำ Benchmarking เป็นการวัดและเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ บริการและวิธีการปฏิบัติกับองค์กรที่สามารถทำได้ดีกว่า เพื่อนำผลของการเปรียบเทียบมาใช้ในการปรับปรุงองค์กรตนเองและมุ่งสู่ความเป็นเลิศ *(มาริษา ภู่ภิญโญกุล,2540)* การทำ Benchmarking จึงเป็นการสะท้อนให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างกัน เพื่อให้เห็นจุดแตกต่างหรือช่องว่าง (Gap) ระหว่างสภาพหรือความสามารถของตนเองกับผู้ที่เหนือกว่าหรือเก่งกว่านั่นเอง *(มาริษา ภู่ภิญโญกุล,2540)* การเทียบเคียงในปัจจุบันมีการดำเนินการทั้งในกลุ่มธุรกิจหรือในองค์กรต่างๆ และเริ่มมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเช่นอุตสาหกรรมพลาสติก *(โครงการศึกษาประสิทธิภาพพลังงานอุตสาหกรรมพลาสติก,2548)* อุตสาหกรรมเหล็ก *(เบญจมาศ ปุยอ๊อก,2548)* มีการนำมาเทียบเคียงในด้านพลังงาน เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพพลังงานของตนเองเมื่อเปรียบเทียบกับผู้อื่นหรือเทคโนโลยีที่ดีที่สุดในขณะนั้น สำหรับแนวทางการเทียบเคียงพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกนั้นจะนำค่า SEC ที่ได้จากการตรวจวัดในโรงงานตัวอย่างมาเทียบเคียงพลังงานกับอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในต่างประเทศซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลมาจากสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งมีการนำข้อมูลมาตีพิมพ์เผยแพร่ *(David M. Rue and Warren Wolf,2004)*

ผลจากการเทียบเคียงพลังงานสามารถนำมาใช้ในการกำหนดมาตรฐานการใช้พลังงานหรือ Energy Benchmarking ได้ แต่การเทียบเคียงพลังงานนั้นพบว่าเตาหลอมเป็นตัวแปรสำคัญในการบริโภคพลังงาน โดยคิดเป็นสัดส่วนพลังงานร้อยละ 70-80 ของพลังงานที่ใช้ในการผลิตทั้งหมดและขนาดของเตาหลอมที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีการบริโภคพลังงานที่แตกต่างกัน *(German VDI,1997)* ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบริโภคพลังงานของเตาหลอมคือปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอม (Pull ton/Day) และร้อยละเศษแก้วในวัตถุดิบ (% Cullet) ดังนั้นก่อนการเทียบเคียงพลังงานในกระบวนการหลอมจะต้องมีการปรับแก้ค่า SEC ที่เตาหลอมตามปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันและร้อยละเศษแก้ว ซึ่งค่าปรับแก้นี้มีงานวิจัยในอุตสาหกรรมอื่นๆเช่นอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์โดย G.A. Boyd(2006) ได้กำหนดรูปแบบจำลองการบริโภคพลังงานของโรงงานปูนซีเมนต์โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ กำลังการผลิต ชั่วโมงการทำงาน จำนวนเตาเผาปูนซีเมนต์

และร้อยละความชื้นในซีเมนต์ ผลจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงระดับสมรรถนะของพลังงานของอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และสามารถนำมาพัฒนาด้านสมรรถนะพลังงานได้ ส่วนในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกนั้นมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และฟิสิกส์มาใช้การออกแบบและสร้างแบบจำลองโดยศึกษาถึงมวลและพลังงานที่ใช้ในเตาหลอม ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีเตาหลอมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น *(Vishal Sardeshpande,2007)* จากแนวทางดังกล่าวได้นำมาประยุกต์ใช้ในการทำค่าปรับแก้โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้ในเตาหลอมต่อหน่วยผลผลิตหรือค่า SEC กับปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันและร้อยละเศษแก้ว โดยใช้เทคนิคทางสถิติคือการวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis)และการวิเคราะห์สหสมพัทธ์ (Correlation) ซึ่งเป็นการวิเคราะความสัมพันธ์และการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าของตัวแบบ โดยเรียกว่าเป็นการหาตัวแบบที่สอดคล้องกับข้อมูล *(วิรัชช พาณิชวงศ์,2545)* แบบจำลองดังกล่าวมีการนำมาใช้ในงานวิจัยต่างๆ เช่น การศึกษาความต้องการไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้า *(พงษ์ศักดิ์ พุทธวงศ์,2546)* โดยพยากรณ์ความต้องการพลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างปี พ.ศ. 2545–2551 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) หรือปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการป้องกันอุบัติเหตุของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ที่ได้รับบาดเจ็บ ณ ห้องฉุกเฉินและอุบัติเหตุโรงพยาบาลตำรวจ *(เฉลิมขวัญ ศรีสุวรรณ,2541)* การนำการถดถอยมาวิเคราะห์เพื่อดูแนวโน้มของมูลค่าการบริโภค การผลิต และการนำเข้าของอุตสาหกรรมยาของไทย*(วิโรจน์ โชติปฏิเวชกุล ,2541)*เป็นต้น

นอกจากนี้ผลจากการเทียบเคียงพลังงานทำให้ทราบถึงช่องว่าง(Gap) ระหว่างประสิทธิภาพพลังงานโดยใช้ค่า SEC เป็นตัวชี้วัด เพื่อนำมาพิจารณาว่าอุตสาหกรรมแก้วและกระจกของประเทศไทยยังมีช่องห่างของประสิทธิภาพพลังงานหรือไม่ ซึ่งถ้าพบว่ายังมีช่องห่างอยู่สามารถหามาตรการเพื่อเพิ่มและปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตให้ดีขึ้นได้ ซึ่งมาตรการนั้นนำมาจากการศึกษาจากโรงงานตัวอย่างที่ไปทำการตรวจวัดและกรณีศึกษาจากต่างประเทศ ที่มีการดำเนินการอยู่เช่นมาตรการการนำความร้อนทิ้งมาอุ่นวัตถุดิบ มาตรการปรับปรุงอิฐทนไฟที่มีคุณภาพมาใช้ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียความร้อนและไม่เกิดปัญหาในขณะที่ใช้งานเช่นทำให้เตาหลอมรั่ว มาตรการมาตรการปรับปรุงระบบควบคุมเพื่อให้ควบคุมระบบการสันดาปและการหลอมมีประสิทธิภาพสามารถลดการบริโภคพลังงานในการหลอมได้เพราะช่วยควบคุมปริมาณก๊าซ เชื้อเพลิง ความดัน และอุณหภูมิในเตาหลอมได้ มาตรการการพัฒนาหัวเผา (Burner) เพื่อให้การสันดาปมีประสิทธิภาพซึ่งจะช่วยลดการบริโภคพลังงานและลดการปล่อยก๊าซมลพิษลงได้มาก *(David M. Rue and Warren Wolf,2004)* มาตรการการหลอมแบบ SCM *(David Rue,2005)* เป็นต้น

# บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency)

วิกฤตการณ์ด้านพลังงานอันเนื่องจากราคาน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้น มีผลให้เกิดภาวะคุกคามด้านความมั่นคงทางเศรษฐกิจ โดยอาจทำให้เกิดการชะลอตัวของการเติบโตทางเศรษฐกิจ อัตราเงินเฟ้อที่เพิ่มสูงขึ้น การว่างงานมีอัตราเพิ่มขึ้น ฯลฯ ในฐานะผู้บริโภคพลังงาน 36% ของประเทศ อุตสาหกรรมมีความจำเป็นต้องหามาตรการในการลดการบริโภคพลังงานที่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เพื่อลดต้นทุนการผลิต และการแสวงหาแหล่งพลังงานอื่น เพื่อความมั่นคงของแหล่งพลังงานที่จำเป็นต่อการผลิต

ในฐานะส่วนหนึ่งของต้นทุนการผลิต การเพิ่มขึ้นของราคาพลังงานจะเป็นเหตุให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นด้วย การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยให้มีการลดการบริโภคพลังงานโดยไม่กระทบต่อผลผลิต แต่การที่จะหาวิธีการในการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ต้องทราบถึงลักษณะการบริโภคพลังงาน กล่าวคือ การบริโภคพลังงานจะเพิ่มขึ้นหรือลดตามปัจจัยใดในการผลิต ทั้งนี้เพื่อจะได้แสวงหาวิธีการในการควบคุมปัจจัยเหล่านั้นให้สามารถบริโภคพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการบริโภคพลังงาน จำเป็นต้องมีการกำหนดตัวชี้วัด (Indicators) เพื่อใช้เป็นฐานสำหรับการเปรียบเทียบ ซึ่งเรียกว่า ตัวชี้วัดประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency) นั้น ถูกหยิบยกขึ้นมาเป็นประเด็นหลักในการค้นคว้าวิจัยกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ทั้งนี้ส่วนหนึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความตื่นตัวของภาครัฐ และเอกชนซึ่งได้รับผลกระทบโดยตรงจากวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ทั้งนี้ผลลัพธ์ของการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับประเด็นดังกล่าวจะถูกนำไปเชื่อมโยงกับนโยบายทางด้านพลังงานของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เกิดการพัฒนาในทางที่ดีขึ้นต่อไปในอนาคต

ประโยชน์ของการศึกษาในประเด็นดังกล่าวมิได้หยุดอยู่ที่ผลประโยชน์เชิงพาณิชย์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น หากแต่ยังรวมไปถึงการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

ทั้งนี้คำว่า "ประสิทธิภาพพลังงาน" นี้ เป็นพจน์ที่มีความทั่วไปซึ่งหมายถึง ความสามารถเชิงพลังงานในการผลิตสินค้า หรือผลิตภัณฑ์หนึ่งๆ ออกมา ทั้งนี้หากเราสามารถลดพลังงานที่ใช้ในการผลิตสินค้าปริมาณเท่าเดิมลงได้ นั่นย่อมหมายความว่า เราสามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพพลังงานได้นั่นเอง โดยทั่วไปแล้วเราไม่สามารถประเมินค่าประสิทธิภาพพลังงานออกมาเป็น

ตัวเลขได้อย่างชัดแจ้ง หากแต่เราสามารถประเมินค่าดังกล่าวผ่านทางตัวชี้วัดประสิทธิภาพพลังงานแบบต่างๆ ซึ่งตัวชี้วัดส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสัดส่วนระหว่างผลลัพธ์ของกระบวนการที่เป็นประโยชน์ กับพลังงานนำเข้า

ในที่นี้เราสามารถแบ่งกลุ่มของตัวชี้วัดประสิทธิภาพพลังงานออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

1. *ตัวชี้วัดเชิงอุณหพลศาสตร์* (Thermodynamic Indicators) ตัวชี้วัดแบบแรกนี้ถูกสร้างขึ้นจากศาสตร์ด้านอุณหพลศาสตร์โดยตรง โดยจะมุ่งเน้นไปที่พลังงานเป็นหลักไม่ว่าจะเป็นส่วนของผลลัพธ์ หรือส่วนนำเข้าในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับตัวชี้วัดเชิงอุณหพลศาสตร์เพียงอย่างเดียว

2. *ตัวชี้วัดแบบกึ่งกายภาพ กึ่งอุณหพลศาสตร์* (Physical – Thermodynamic Indicators) ตัวชี้วัดแบบที่สองนี้เป็นตัวชี้วัดที่นำเอาหน่วยกายภาพไปใช้ในการกำหนดผลลัพธ์ เช่น ตันของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ในขณะที่ส่วนนำเข้ายังคงใช้หน่วยของศาสตร์ทางด้านอุณหพลศาสตร์อยู่

3. *ตัวชี้วัดแบบกึ่งเศรษฐศาสตร์ กึ่งอุณหพลศาสตร์* (Economic – Thermodynamic Indicators) ตัวชี้วัดชนิดนี้คล้ายกับตัวชี้วัดชนิดที่ 2 หากแต่มีความแตกต่างอยู่ที่ ส่วนผลลัพธ์ของตัวชี้วัดชนิดที่ 3 นี้จะถูกกำหนดให้อยู่ในรูป "มูลค่าเงิน" (มิได้กำหนดเป็นหน่วยทางกายภาพดังเช่นตัวชี้วัดชนิดที่ 2)

4. *ตัวชี้วัดเชิงเศรษฐศาสตร์* (Economic Indicators) ตัวชี้วัดเชิงเศรษฐศาสตร์นี้เป็นการมองเฉพาะมูลค่าของเงิน ทั้งในส่วนของผลลัพธ์ และส่วนนำเข้า โดยค่าดังกล่าวจะถูกประเมินขึ้นมาด้วยหลักการทางเศรษฐศาสตร์เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์

### 2.1.1 ตัวชี้วัดเชิงอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic Indicators)

คำว่า "อุณหพลศาสตร์" นี้ หมายถึง ศาสตร์ที่เกี่ยวเนื่องกับพลังงาน ซึ่งในที่นี้เราจะกล่าวถึงประสิทธิภาพพลังงานตามกฎข้อที่ 1 และ 2 ของอุณหพลศาสตร์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของตัวชี้วัดเชิงอุณหพลศาสตร์

#### 2.1.1.1 ประสิทธิภาพพลังงานของกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์

สำหรับกฎข้อที่ 1 นี้ จะมุ่งเน้นไปที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency หรือ Enthalpic Efficiency) โดยส่วนนำเข้า และส่วนของผลลัพธ์จะถูกวัดเป็นค่าของความร้อน หรือค่าของการเปลี่ยนแปลงความร้อน (Enthalpic Change, $\Delta H$) โดยสามารถเขียนสมการของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการใดๆ ได้ดังสมการที่ 2.1

$$E_{\Delta H} = \frac{\Delta H_{out}}{\Delta H_{in}} \qquad \text{สมการที่ 2.1}$$

โดยที่ $E_{\Delta H}$ หมายถึง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

$\Delta H_{in}$ หมายถึง ผลรวมส่วนนำเข้าของพลังงานความร้อนในกระบวนการที่ศึกษา

$\Delta H_{out}$ หมายถึง ผลรวมส่วนผลลัพธ์ของพลังงานความร้อนที่เป็นประโยชน์ในกระบวนการที่ศึกษา

สิ่งที่ต้องตระหนักถึงสำหรับการวัดประสิทธิภาพเชิงความร้อน คือ ผลลัพธ์ด้านพลังงานที่วัดได้นั้น วัดมาจากพลังงานที่เป็นประโยชน์เท่านั้น (Useful Output) ทั้งนี้พลังงานบางส่วนอาจสูญหายไป แต่ผลรวมของพลังงานจะต้องเท่าเดิมเสมอ ตามกฎอนุรักษ์พลังงานที่กล่าวไว้ว่า "พลังงานจะไม่สูญหาย หรือถูกสร้างขึ้น หากแต่จะมีการแปรเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่น "

ตัวอย่างเช่น หลอดไฟแบบไส้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 6% นั่นหมายความว่าพลังงานที่เป็นประโยชน์จะมีค่าเพียง 6 หน่วย หากพลังงานนำเข้าเป็น 100 หน่วย โดยพลังงานที่สูญหายไป 94 หน่วยนั้นอาจถูกแปรเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่น

จุดอ่อนประการหนึ่งของประสิทธิภาพเชิงความร้อน คือ การไม่คำนึงถึงคุณภาพของพลังงาน (Energy Quality) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในอุตสาหกรรมหนึ่งๆ อาจมีการใช้พลังงานมาจากหลายๆ แหล่ง ซึ่งให้ค่าความร้อนแตกต่างกันออกไป การรวมผลลัพธ์ที่ได้จากแหล่งกำเนิดความร้อนที่แตกต่างกันจึงอาจทำให้ผลของการศึกษามีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้

ปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพพลังงานนั้นเปรียบได้กับปัญหาการเปรียบเทียบบนความแตกต่าง ซึ่งผลของการเปรียบเทียบที่ได้ย่อมผิดเพี้ยน และไม่น่าเชื่อถือ สำหรับความผิดพลาดในประเด็นคุณภาพพลังงานนั้น ได้ถูกศึกษาโดยนักวิจัยหลายๆ ท่าน ซึ่งในที่นี้จะขอยกตัวอย่างขึ้นมาเพียง 1 ตัวอย่างเท่านั้น คือ การศึกษาประสิทธิภาพพลังงานของประเทศนิวซีแลนด์ ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของพลังงาน ต่อ ผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ (Energy : GDP Ratio) 2 วิธี โดยวิธีแรกนั้นจะไม่คำนึงถึงความแตกต่างด้านคุณภาพพลังงานอันเป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของแหล่งกำเนิดพลังงาน ส่วนอีกวิธีหนึ่งเป็นการคำนวณที่อ้างอิงค่าคุณภาพพลังงาน ผลของการศึกษาปรากฏว่า วิธีที่หนึ่งให้ค่าสัดส่วนดังกล่าวอยู่ที่ 15.45% (คำนวณจากช่วงเวลา ค.ศ. 1960 – ค.ศ. 1987) ส่วนวิธีหลังกลับให้ค่าสัดส่วนดังกล่าวมากถึง 20.26% เลยทีเดียว สำหรับผลต่างที่เกิดขึ้น 4.81% นั้น จะส่งผลกระทบอย่างใหญ่หลวงต่อการคำนวณดัชนีราคาผู้บริโภคใน

ระดับชาติ จากตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่าในการศึกษาระดับสูง หรือการศึกษาเชิงภาพรวม เราจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าคุณภาพของพลังงานด้วย

สำหรับการนำเอาค่าคุณภาพพลังงานมาปรับแต่งประสิทธิภาพความร้อนนี้ สามารถคำนวณได้จากการปรับแต่งค่าประสิทธิภาพความร้อนด้วยค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพพลังงาน โดยเราเรียกวิธีการดังกล่าวว่า วิธีการคุณภาพเทียบเท่า (Quality Equivalent Methodology หรือ QEM) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 นี้

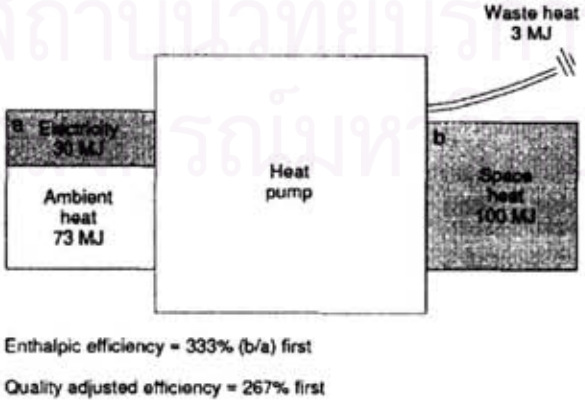
ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์คุณภาพพลังงานจากแหล่งกำเนิดพลังงานต่างๆ

| Process Input | | Process output | Relative efficiency |
|---|---|---|---|
| Hydroelectricity | → | Delivered electricity | $\Phi_1$ = 1.0000 |
| Delivered Gas | → | Delivered electricity | $\Phi_2$ = 0.7544 |
| Oil products | → | Delivered electricity | $\Phi_3$ = 0.3885 |
| Wellstream gas | → | Delivered gas | $\Phi_4$ = 1.0000 |
| Crude oil | → | Oil products | $\Phi_5$ = 1.0000 |
| Delivered electricity | → | Heat | $\Phi_6$ = 0.7652 |
| Delivered gas | → | Heat | $\Phi_7$ = 1.2879 |
| Oil products | → | Heat | $\Phi_8$ = 1.3224 |
| Delivered gas | → | Transport | $\Phi_9$ = 1.0725 |
| Oil products | → | Transport | $\Phi_{10}$ = 0.9950 |
| Delivered electricity | → | Lighting | $\Phi_{11}$ = 1.0000 |

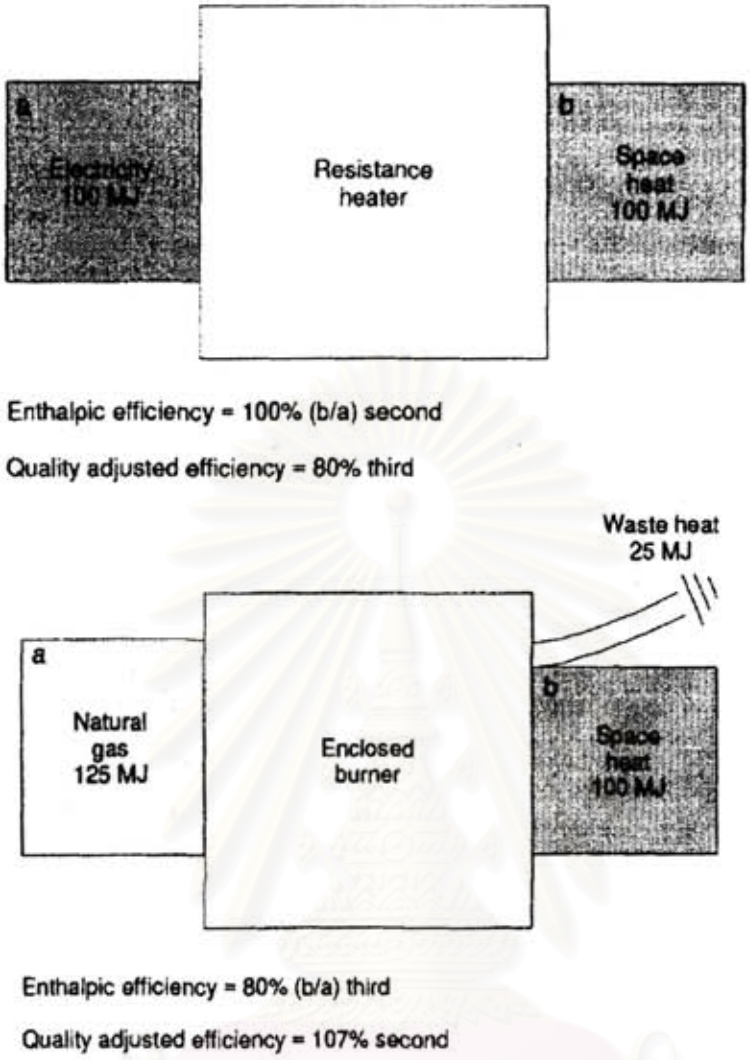
ต่อไปนี้จะขอกล่าวถึงตัวอย่างความผิดพลาดในการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพความร้อนโดยไม่คำนึงถึงคุณภาพพลังงาน

กำหนดให้ ในการสร้างความร้อนขนาดเท่าๆ กัน ผ่านทางกระบวนการที่แตกต่างกัน 3 กระบวนการ (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1) อันได้แก่

1. ใช้กระแสฟ้าสร้างความร้อนผ่านทางปั๊มความร้อน (Heat Pump)
2. ใช้กระแสไฟฟ้าสร้างความร้อนผ่านทางขดลวดความร้อน (Resistance Heater)
3. ใช้ก๊าซธรรมชาติสร้างความร้อนผ่านทางเตาความร้อนแบบปิด (Enclosed Burner)




รูปที่ 2.1 การเรียงลำดับกระบวนการด้วยประสิทธิภาพความร้อนก่อนและหลังการปรับค่าด้วยคุณภาพพลังงาน




รูปที่ 2.1 (ต่อ) การเรียงลำดับกระบวนการด้วยประสิทธิภาพ
ความร้อนก่อน และหลังการปรับค่าด้วยคุณภาพพลังงาน

ในการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน เราอาจกล่าวได้อย่างถูกต้องว่า กระบวนการที่ 1 นั้นมีประสิทธิภาพมากกว่ากระบวนการที่ 2 เพราะทั้งสองกระบวนการนั้นใช้แหล่งพลังงานเดียวกัน และได้ผลลัพธ์แบบเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม ในการเปรียบเทียบกระบวนการที่ 1 และ 2 กับกระบวนการที่ 3 นั้นจะไม่ถูกต้องหากเราพิจารณาแต่เพียงค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เป็นเพราะกระบวนการที่ 3 นั้นไม่ได้ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานเฉกเช่นกระบวนการที่ 1 และ 2 ดังนั้น เราจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าคุณภาพพลังงานเพื่อนำมาปรับค่าประสิทธิภาพพลังงานก่อนการเปรียบเทียบ ซึ่งผลของการปรับแต่งค่าพบว่า การใช้ก๊าซธรรมชาตินั้นกลับมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้กระแสฟ้าสร้างความร้อนผ่านทางขดลวดความร้อนเสียอีก

**2.1.2 ปัญหาทั่วไปจากการศึกษาตัวชี้วัดประสิทธิภาพพลังงาน**

1. การประเมินค่าผลลัพธ์ที่ต้องการในรูปแบบที่ไม่เหมาะสมอาจจะให้ผลบิดเบือนไปจากสภาวการณ์จริงได้ ซึ่งในประเด็นดังกล่าวเราจำต้องกำหนดรูปแบบผลลัพธ์ และตัวชี้วัดผลลัพธ์ที่เหมาะสม มิเช่นนั้นผลลัพธ์ของการศึกษาอาจถูกเบี่ยงเบนไปจากความจริง และอาจมีความถูกต้องได้

2. คุณภาพพลังงานเป็นประเด็นที่ส่งผลกระทบอย่างใหญ่หลวงต่อการศึกษาระบบในภาพรวม เช่น ศึกษาการใช้พลังงานประชาชาติ เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยเชิงรวมควรต้องใส่ใจประเด็นดังกล่าวเป็นพิเศษด้วย

3. ปัญหาที่เกี่ยวเนื่องกับพลังงานที่มิใช่พลังงานเชิงพาณิชย์ เช่น พลังงานจากไม้ หรือพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น พลังงานเหล่านี้จะไม่ถูกนำมาใช้เป็นฐานในการศึกษาประสิทธิภาพพลังงาน ทำให้ค่าประสิทธิภาพพลังงานมีความบิดเบือนไปจากความเป็นจริง

4. ปัญหาการแบ่งสัดส่วนที่มาของพลังงานในกรณีที่มีการใช้พลังงานในการผลิตสินค้าหลากหลายประเภท สำหรับประเด็นปัญหาการปันพลังงานนี้ เราอาจดำเนินการได้ 4 รูปแบบ คือ

1. การปันพลังงานทั้งหมดไปที่ผลิตภัณฑ์ที่สนใจเพียงตัวเดียว
2. การปันพลังงานโดยใช้สัดส่วนมูลค่าทางการเงินเป็นตัวปัน
3. การปันพลังงานโดยใช้หน่วยกายภาพที่สำคัญเป็นตัวปัน
4. การปันพลังงานโดยใช้สัดส่วนผลต่างพลังงานที่ประหยัดไปได้หากไม่ผลิตสินค้าดังกล่าวเป็นตัวปัน

วิธีการข้างต้นเป็นเพียงแนวทางในการศึกษาเท่านั้น ไม่มีวิธีการใดที่ถูกต้อง และให้ผลที่น่าเชื่อถืออย่างแน่นอน เพราะแต่ละวิธีนั้นมีความเหมาะสมแตกต่างกันออกไป

5. ปัญหาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และการเปลี่ยนแปลงด้านเทคโนโลยีการผลิต ตัวชี้วัดที่ผ่านมาไม่สามารถจับความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบได้ ทั้งนี้ส่วนหนึ่งเป็นเพราะตัวชี้วัดส่วนใหญ่เป็นตัวชี้วัดที่มีฐานการอ้างอิงคงที่ ไม่ได้มีการอ้างอิงแบบต่อเนื่องนั่นเอง

จากปัญหาต่างๆ ข้างต้นทำให้เกิดการศึกษาหาตัวชี้วัด และวิธีการศึกษาที่เหมาะสมเกี่ยวกับประสิทธิภาพพลังงาน ซึ่งจากการศึกษาผลงานในระดับนานาชาติ เราพบว่าตัวชี้วัดที่นิยมใช้กันมาก คือ คือ ความเข้มพลังงาน (Energy Intensity)

## 2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงาน

ในการอธิบายประสิทธิภาพพลังงาน มักจะประสบปัญหาว่า การใช้พลังงานในหน่วยงาน โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมมีความหลากหลายของชนิดพลังงานที่ใช้ มีคุณภาพพลังงาน (Energy Quality) ที่แตกต่างกัน ผลผลิตมีความหลากหลายและไม่คงที่ จึงจำเป็นต้องหาวิธีในการคำนวณวิเคราะห์เพื่ออธิบายถึงความหลากหลายของการใช้พลังงานที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการผลิต และเทคโนโลยีในการผลิต วิธีที่นิยมใช้คือ การแยกองค์ประกอบการใช้พลังงาน (Decomposity of Energy Consumption)ในการอธิบายการใช้พลังงานในอุตสาหกรรม มักจะอธิบายในลักษณะของการบริโภคพลังงาน (Energy Consumption) ความเข้มพลังงาน (Energy Intensity) และความยืดหยุ่น / สัมประสิทธิ์พลังงาน (Energy Elasticity / Coefficient)

การบริโภคพลังงาน เป็นการอธิบายว่า โรงงาน / อุตสาหกรรม / กลุ่มอุตสาหกรรม ใช้พลังงานไปเท่าไหร่ สำหรับทั้งการผลิตและการดำเนินการด้านอื่น ๆ หน่วยก็จะเป็นหน่วยของพลังงาน หรือ พลังงานเทียบเท่า

ความเข้มของพลังงาน ซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพพลังงานจะทำหน้าที่อธิบายว่าพลังงานที่ใส่ให้กับกระบวนการผลิตได้ผลผลิต / ปริมาณ / มูลค่าเท่าใด แสดงตัวอย่างตัวชี้วัดความเข้มพลังงานใน Sector ต่าง ๆ ของสหรัฐอเมริกา และตัวอย่างค่าความเข้มพลังงานของบาง Sector (S)

ความยืดหยุ่น / สัมประสิทธิ์พลังงาน เป็นการอธิบายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของผลผลิต ตัวชี้วัดนี้ไม่มีหน่วย

**การบริโภคพลังงาน**

ในอุตสาหกรรม อาจจำแนกการบริโภคพลังงานเป็นสองส่วน คือ การบริโภคพลังงานเพื่อการผลิต และการบริโภคพลังงานเพื่อการบริหารจัดการ ในขณะที่การบริโภคพลังงานสำหรับการบริหารจัดการจะเป็นเรื่องของการใช้พลังงานในส่วนของสำนักงาน ซึ่งไม่ค่อยจะสัมพันธ์โดยตรงกับกิจกรรมการผลิต ในส่วนของการบริโภคพลังงานเพื่อการผลิตจะมีความผันแปรของปริมาณพลังงานที่ใช้ตาม ระดับของการผลิต (Production Level) ซึ่งหมายถึง ปริมาณการผลิต ณ ช่วงเวลานั้น ๆ เมื่อผลิตมากก็ย่อมต้องการใช้พลังงานมาก นอกจากนั้นยังผันแปรตามโครงสร้างการผลิต (Production Structure / Product Mix) ซึ่งหมายถึงส่วนผสมของสินค้าที่ผลิต ทั้งนี้เพราะในแต่ละอุตสาหกรรมไม่ได้ผลิตสินค้าเพียงอย่างเดียว แต่ผลิตสินค้าหลายชนิด หลายรุ่น ซึ่งแต่ละชนิด/ รุ่น ต้องการปริมาณพลังงานในการผลิตไม่เท่ากัน และสุดท้ายปริมาณพลังงานยังผันแปรตามความเข้มพลังงาน ซึ่งเป็นผลมาจากประสิทธิภาพพลังงานของอุปกรณ์การผลิตและประสิทธิภาพการบริหารจัดการผลิต ดังนั้น ปัจจัยที่ทำให้เกิดความผันแปรของปริมาณการบริโภคพลังงานซึ่งประกอบด้วย

- ระดับการผลิต
- โครงสร้างการผลิต
- ความเข้มพลังงาน

เพื่อให้ทราบว่า การผันแปรของการบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรม ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ๆ เป็นผลหรืออิทธิพลมาจากปัจจัยตัวใด จึงควรมีการวิเคราะห์การบริโภคพลังงาน ซึ่งเป็นวิธีในการแยกส่วนของพลังงานออกตามปัจจัยทั้งสาม

## 2.3 ดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะ

การดำเนินงานเพื่อนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงงานนั้น จำเป็นต้องมีการประเมินการใช้พลังงานของโรงงานเสียก่อน โดยใช้ดัชนีชี้วัดการบริโภคพลังงานจำเพาะ SEC (Specific Energy Consumption ) ซึ่งเป็นค่าดัชนีสำหรับชี้วัดปริมาณการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิต ในระดับกระบวนการผลิต ซึ่งคำนวณจากปริมาณพลังงานที่โรงงานใช้ในเดือนนั้นต่อปริมาณผลผลิตในช่วงเดียวกัน สามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$SEC = E / P$$

SEC = ค่าดัชนีชี้วัดการใช้พลังงาน

E = ปริมาณพลังงานที่โรงงานใช้ในเดือนนั้น

P = ปริมาณผลผลิตในช่วงเดียวกัน

ได้แยกค่าดัชนีการใช้พลังงานเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้า (SEC) มีหน่วยเป็น kWh ต่อหน่วยผลผลิต และหน่วยร่วมเป็น MJ ต่อหน่วยผลผลิต
2. ค่าดัชนีการใช้พลังงานความร้อน (SEC) มีหน่วยเป็น MJ ต่อหน่วยผลผลิต
3. ค่าดัชนีการใช้พลังงานปฐมภูมิ (Primary SEC ) มีหน่วยเป็น MJ ต่อหน่วยผลผลิตหาจากการนำค่า SEC ความร้อนรวมกับค่า SEC พลังงานไฟฟ้าที่แปลงเป็นค่าพลังงานความร้อนแล้ว โดยการนำค่าพลังงานไฟฟ้าหารด้วยปริมาณผลผลิต (หน่วย kWh / Ton) จากนั้นนำไปคูณกับ 0.0036 GJ/Ton แล้วหารด้วย 0.45*

* หมายเหตุ ค่าประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนของประเทศไทย เท่ากับ 45%

### 2.3.1 ตัวอย่างการหาค่า SEC ปฐมภูมิ

ตัวอย่างการประเมินค่าดัชนีชี้วัดพลังงาน (SEC) ของโรงงานตัวอย่าง

โรงงานผลิตขวดแก้ว ก ต้องการวิเคราะห์ค่า SEC ในกระบวนการหลอม จึงมีการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์การใช้พลังงานต่อหน่วยเวลา ดังนี้

| ปริมาณผลผลิต (ตัน/วัน) | พลังงานที่ใช้ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | พลังงานไฟฟ้า (kWh/วัน) | SEC ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh/ตัน) | พลังงานความร้อน | | SEC ดัชนีการใช้พลังงานความร้อน(GJ/ตัน) | SEC ปฐมภูมิ (GJ/ตัน) |
| | | | น้ำมันเตา (ลิตร/วัน) | คิดเป็น GJ/วัน | | |
| 90 | 466 | 5.18 | 15,000 | 569.85 | 6.33 | 6.37 |

จากข้อมูลและการคำนวณ ค่า SEC ในกระบวนการหลอมของโรงงานตัวอย่าง

- มีค่า SEC พลังงานไฟฟ้า = 5.18 kWh / Ton หรือแปลงเป็นค่าพลังงานความร้อนได้เท่ากับ 5.18 kWh / Ton X 0.0036 GJ/Ton
- จากนั้นหารด้วย 0.45 จะได้เท่ากับ 0.041 GJ / Ton
- เมื่อนำมาบวกกับค่า SEC พลังงานความร้อนของน้ำมันเตาซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.33 GJ / Ton จะได้ค่า SECปฐมภูมิเท่ากับ 6.37 GJ / Ton

ค่าดัชนีการใช้พลังงานจะมีประโยชน์อย่างมากในการติดตาม และควบคุมการใช้พลังงาน ซึ่งโรงงานควรจะจัดทำและวิเคราะห์ค่าดังกล่าวทุกเดือน ค่าที่ได้นี้สามารถนำมาใช้ในการควบคุมและติดตามการใช้พลังงาน ซึ่งยังสามารถสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานจากอดีตจนถึงปัจจุบันว่ามีการพัฒนาดีขึ้นหรือลดลง และยังสามารถนำไปเทียบเคียงกับค่าดัชนีเทียบเคียงการใช้พลังงาน SEC Benchmarking เพื่อประเมินว่าโรงงานมีการใช้พลังงานอยู่ในระดับใดได้อีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.2 การนำผลการศึกษา SEC ไปใช้ประโยชน์

1) เป็นการประเมินพลังงานที่อุตสาหกรรมแก้วและกระจกแต่ละประเภทใช้ทั้งไฟฟ้าและเชื้อเพลิงซึ่งช่วยให้เห็นถึงกลุ่มอุตสาหกรรมที่มีการบริโภคพลังงานสูง

2) ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมแก้วและกระจกแต่ละประเภทสามารถนำค่า SECไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของตนเองเพื่อเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาการใช้ไฟฟ้าและพลังงานในการผลิต นอกจากนี้ยังสามารถนำไปศึกษาในแง่ของประสิทธิภาพการใช้พลังงานจากอดีตจนถึงปัจจุบันว่ามีการพัฒนาดีขึ้นหรือลดลงโดยสามารถอธิบายได้ว่าถ้าหากค่า SEC มีค่าต่ำแสดงว่าต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานมีค่าต่ำ ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการจัดวางนโยบายการใช้พลังงานในหน่วยงานทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการกำหนดมาตรการรักษาหรือปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ซึ่งอาจครอบคลุมถึงการปรับปรุงกระบวนการผลิตการใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่เข้าช่วย หรือการอบรมบุคลากรที่เกี่ยวข้องให้สามารถควบคุมจัดการการใช้ให้มีประสิทธิภาพ

3) สามารถนำข้อมูล SEC ในแต่ละปี ร่วมกับข้อมูลมูลค่าของพลังงาน และราคาวัตถุดิบราคาผลิตภัณฑ์ของเหล็กแต่ละกลุ่มไปวิเคราะห์ค่าEnergy Intensity และ Energy Elasticity

4) สามารถข้อมูล SEC, Energy Intensity และ Energy Elasticityนำไปใช้ประกอบการวางแนวทางการสนับสนุนและส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.4 การเทียบสมรรถนะ (Benchmarking)

Benchmarking แปลตามพจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถานว่า การเทียบสมรรถนะ หรือ การเทียบเคียงสมรรถนะ และ มีรากศัพท์มานักสำรวจทางธรณีวิทยา ในเรื่องการสำรวจพื้นที่เทียบเคียงกับเครื่องหมายที่ทำบนอาคาร หิน หรือ ผนัง และใช้เป็นจุดอ้างอิงในการวัดตำแหน่ง หรือ ความสูงของการสำรวจภูมิประเทศ

ในการบริหารงานธุรกิจสมัยใหม่พิจารณาการเทียบเคียงสมรรถนะว่าเป็นกระบวนการเปรียบเทียบวิธีปฏิบัติที่มากกว่าค้นหากระบวนการในการพัฒนาโดยการเปรียบเทียบเฉพาะสถิติ หรือ มาตรฐานที่กำหนด การเทียบเคียงเป็นการค้นหาตนเอง ค้นหาวิธีปฏิบัติที่ดีที่สุดจากหน่วยงานอื่นที่กระบวนการคล้ายกัน และนำวิธีปฏิบัติที่ดี (Best Practice) ของหน่วยงานอื่นมาประยุกต์ใช้ในหน่วยงานของตนเอง เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพและประสิทธิผล และการเทียบเคียงสมรรถนะจะเป็นกระบวนการต่อเนื่องไม่มีสิ้นสุด

ในการเทียบเคียงสมรรถนะจะมีตัววัด (Benchmark) ตัวบ่งชี้ ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ (Key Performance Indicator) เช่น การจัดอันดับความสามารถของการแข่งขันของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกที่จัดโดย IMD (IMD, 2004) ซึ่งประกอบด้วยดัชนีชี้วัด 4 กลุ่มด้วยกันคือ ผลลัพธ์ทางเศรษฐกิจ (Economic Performance) ประสิทธิภาพของภาครัฐ (Government Efficiency) ประสิทธิภาพของธุรกิจ (Business Efficiency) สาธารณูปโภคพื้นฐาน (Infrastructure) ซึ่งจากข้อมูลปี 2004 ประสิทธิภาพของภาครัฐในการแข่งขันของประเทศไทยอยู่ในลำดับที่ 20 (จาก 60 ประเทศ) ในปี พ.ศ. 2547 ตกจากปีที่แล้วสองระดับ (IMD, 2004)ในทางธุรกิจอาจจะเปรียบเทียบความเร็วในการให้บริการลูกค้า เช่น ธนาคาร A กำหนดเวลาในการให้บริการลูกค้านับจากเวลาที่ลูกค้าได้รับบัตรคิวไม่เกิน 30 นาที ในขณะที่อีกธนาคารหนึ่ง (B) กำหนดเวลาในการให้บริการลูกค้านับจากเวลาที่ลูกค้าได้รับบัตรคิวไม่เกิน 20 นาที แสดงว่า ธนาคาร B ให้บริการที่ดีกว่า เป็นต้น

### 2.4.1 ประเภทของการเทียบเคียงสมรรถนะ

ดังที่กล่าวในเบื้องต้นแล้วว่า การเทียบเคียงเป็นคำที่ใช้ในการเทียบเคียงสมรรถนะในกิจกรรมต่าง ๆ วิธีการง่ายที่สุดคือการนำข้อมูลมาเทียบเคียงสมรรถนะ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะชี้นำในการปรับปรุง ทั้งนี้การใช้ข้อมูลภายในองค์กรเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะชี้นำเพียงพอในการปรับปรุงสมรรถนะ

มีผู้แบ่งประเภทของการทำ Benchmarking ไว้มากมาย แตกต่างกันออกไป แต่โดยสรุปสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. แบ่งตามวัตถุประสงค์ของการทำ Benchmarking
2. แบ่งตามองค์กรเปรียบเทียบ (partner)

2.4.2 **แบ่งตามวัตถุประสงค์การทำ** Benchmarking

โดยคำนึงถึงลักษณะการทำ Benchmarking ว่ามีความต้องการจะเปรียบเทียบกับองค์กรอื่นในเรื่องอะไร เช่น ต้องการเปรียบเทียบเฉพาะตัววัดประสิทธิภาพ เปรียบเทียบกระบวนการทำงาน เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ หรือเปรียบเทียบกลยุทธ์องค์กรซึ่งสามารถแบ่งย่อยออกได้ดังนี้

- Performance Benchmarking หรือบางตำราเรียก Result Benchmarking โดยเปรียบเทียบเฉพาะผลการปฏิบัติงานหรือผลลัพธ์ของการทำงานในกระบวนการต่างๆ เช่น การเปรียบเทียบผลกำไร ยอดขาย ส่วนแบ่งการตลาด หรือถ้าเป็นองค์กรกรมควบคุมโรค ซึ่งเป็นองค์กรทางด้านวิชาการก็คงเป็นการเปรียบเทียบผลงานวิจัย การทำPerformance Benchmarking เป็นเพียงแค่การเปรียบเทียบตัวเลข เพื่อบอกภาพของสถานะองค์กรว่ามีจุดอ่อน จุดแข็งตรงไหน แต่ไม่ได้บอกว่าองค์กรอื่นที่ดีกว่านั้นสามารถทำได้อย่างไร
- Process Benchmarking คือการทำ Benchmarking โดยการเปรียบเทียบกระบวนการทำงานหรือวิธีการปฏิบัติงานระหว่างองค์กรเรากับองค์กรอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ โดยเน้นการเรียนรู้วิธีปฏิบัติที่ดีจากองค์กรอื่นเพื่อนำมาปรับปรุงองค์กรเรา ซึ่งเป็นที่มาของคำที่ว่า Best Practices หรือวิธีการปฏิบัติที่ดีที่สุด ที่กล่าวถึงมาแล้วในตอนต้น การทำ Benchmarking ด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมมากที่สุดในขณะนี้ เพราะจะก่อให้เกิดนวัตกรรมและการเปลี่ยนแปลงใหม่ๆ ถ้าจะเปรียบกับกรมควบคุมโรค ก็น่าจะเป็นการเปรียบเทียบการดำเนินงานการป้องกันหรือควบคุมโรคต่างๆ กับองค์กรอื่นที่มีภาระกิจแบบเรา แต่ทำงานได้สำเร็จกว่า เช่นกับ CDC ของอเมริกา เป็นต้น
- Product Benchmarking ตำราบางเล่มอาจเรียกว่าCustomer Satisfaction Benchmarking คือการเปรียบเทียบความพึงพอใจของลูกค้าต่อคุณลักษณะของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ขององค์กรนั้น เช่น การออกแบบผลิตภัณฑ์หรือรูปแบบการให้บริการ ส่วนใหญ่การทำ Product Benchmarking นิยมทำในสินค้ากลุ่มที่เป็นเทคโนโลยีหรือสินค้าบริการที่ต้องตามแฟชั่น
- Strategy Benchmarking เป็นการเปรียบเทียบ กลยุทธ์ระหว่างองค์กรเรากับองค์กรที่ประสบความสำเร็จในด้านการวางกลยุทธ์ ส่วนใหญ่จะเป็นองค์กรที่ประสบความสำเร็จอย่าง ชัดเจน และมีประวัติศาสตร์ขององค์กรยาวนาน การทำ Strategy Benchmarking ถือว่าเป็นการทำ Benchmarking ในระดับที่สูง ส่วนใหญ่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญเข้ามาช่วย ผลของการทำ Strategy

Benchmarking จะมีผลกระทบต่อองค์กรอย่างรุนแรง ซึ่งอาจหมายถึงการพลิกโฉมหน้าขององค์กรเลยก็ว่าได้ ตัวอย่างเด่นๆ (ในต่างประเทศ) ของ Strategy Benchmarking คือ กรณีของบริษัท Dell Computer ซึ่งได้มีการปรับเปลี่ยนกลยุทธ์จากเดิมที่เคยทำธุรกิจคอมพิวเตอร์แบบ Mass Production และส่งขายตามร้านคอมพิวเตอร์ ได้เปลี่ยนมาเป็นการรับคำสั่งซื้อสินค้าทางอินเตอร์เนตโดยตรง ผู้ซื้อสามารถเลือกอุปกรณ์ได้ตามต้องการและบริษัทใช้เวลาไม่เกิน 7 วัน ในการจัดส่งสินค้าถึงมือลูกค้า กลยุทธ์นี้ส่งผลให้ Dell ก้าวเป็นผู้นำระดับหน้าในด้านการผลิตคอมพิวเตอร์

**2.4.3 แบ่งตามองค์กรที่เปรียบเทียบ**

การแบ่งแบบนี้จะคำนึงถึงกลุ่มที่เป็นคู่เปรียบเทียบ (Partner) เป็นสำคัญว่าเป็นใครอยู่ในบริษัทเครือเดียวกัน บริษัทคู่แข่งหรือบริษัทที่อยู่ต่างธุรกิจ ซึ่งแบ่งเป็นประเภทย่อยๆ ได้คือ

- Internal Benchmarking เป็นการทำ Benchmarking เปรียบเทียบความสามารถการปฏิบัติงานกับผู้อยู่กลุ่มบริษัทในเครือเดียวกัน เป็นการเปรียบเทียบกันเองภายในกลุ่ม ซึ่งการหาข้อมูลมาเปรียบเทียบคงทำได้ไม่ยาก การทำก็ง่ายไม่ยุ่งยาก เพราะกระบวนการทำงานใกล้เคียงกัน การทำ Internal Benchmarking ส่วนใหญ่เพื่อนำไปสู่การสร้างมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Work standard) เนื่องจากทุกหน่วยงานจะเรียนรู้วิธีปฏิบัติจากผู้ที่เก่งกว่า และสร้างรูปแบบวิธีการปฏิบัติที่ดีที่สุด (Best Practices) ของกลุ่ม ซึ่งก็จะกลายเป็นมาตรฐานการปฏิบัติที่ทุกหน่วยงานต้องปฏิบัติตาม หลังจากนั้นจึงค่อยขยายไปเปรียบเทียบกับองค์กรนอกกลุ่มต่อไป การทำ Benchmarking วิธีนี้ประโยชน์จะมีจำกัดเนื่องจากเป็นการเรียนรู้ในวงแคบ จะไม่ก่อให้เกิดนวัตกรรมใหม่ๆแต่เหมาะสำหรับองค์กรที่ต้องการพัฒนาตัวเองในระยะเริ่มต้น ถ้าเปรียบเทียบกับกรมควบคุมโรคก็จะเป็นการทำ benchmarking ระหว่างสำนักงานป้องกันควบคุมโรคต่างๆ เขต 1 – 12 ในการปฏิบัติงานใดปฏิบัติงานหนึ่ง ซึ่งก็สามารถนำไปสู่มาตรฐานการปฏิบัติงานต่างๆ ตามที่ต้องการได้เหมือนกัน
- Competitive Benchmarking เป็นการทำ Benchmarking กับผู้ที่เป็นคู่แข่งของเราโดยตรง วิธีนี้ข้อมูลจะหายากกว่าแบบแรก ข้อมูลหลายอย่างจะเป็นความลับ การทำ Benchmarking อาจทำได้เพียงบางกระบวนการและอาจต้องอาศัยบุคคลที่สาม เข้าไปช่วยเก็บหรือวิเคราะห์ข้อมูล วิธีนี้มุ่งหวังในเชิงการแข่งขันทางธุรกิจมากกว่ามุ่งหวังที่จะค้นหาวิธีการปฏิบัติที่ดี ที่สามารถเรียนรู้ปรับปรุงตนเอง

- **Industry Benchmarking** คือการทำ Benchmarking โดยเปรียบเทียบกับผู้ที่อยู่ในอุตสาหกรรมที่คล้ายคลึงกัน แต่มิใช่เป็นคู่แข่งโดยตรง เช่น ในอุตสาหกรรมเครื่องไฟฟ้า : บริษัทผลิตโทรทัศน์สามารถทำ Benchmarking กับบริษัทผู้ผลิตเครื่องปรับอากาศ ในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง : บริษัทผลิตปลากระป๋องสามารถทำ Benchmarking กับบริษัทผลิตผลไม้กระป๋องได้ การทำ Benchmarking กับผู้ที่อยู่ในธุรกิจใกล้เคียงกับเรานี้ ช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาในการเก็บข้อมูลเพราะสามารถเก็บข้อมูลได้ง่ายกว่า และกระบวนธุรกิจก็มีความคล้ายคลึงกันในบางส่วนที่อาจเปรียบเทียบกันได้ แต่อย่างไรก็ตาม Industry Benchmarking ยังไม่ได้ทำให้เกิดนวัตกรรมใหม่ๆ มากนัก เมื่อเทียบกับการทำ Generic Benchmarking
- **Generic Benchmarking** หรือFunctional Benchmarking คือการทำ Benchmarking กับองค์กรที่มีความเป็นเลิศในกระบวนการทำงานนั้นๆ ซึ่งองค์กรนั้นอาจมีธุรกิจที่แตกต่างกับเราโดยสิ้นเชิง การทำ Generic Benchmarking เป็นกระบวนการค้นหาผู้ที่มีความเป็นเลิศ (Best Practices) จริงๆ ของกระบวนการนั้นๆ จากธุรกิจทั้งหมด แต่จะพบว่าการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบกับองค์กรที่ต่างธุรกิจกันจะทำได้ยาก ต้องอาศัยการวิเคราะห์ความคล้ายคลึงกันอย่างมีเหตุผล ซึ่งหลายเรื่องอาจจะเทียบกันไม่ได้เลย แต่จะพบว่า Benchmarking วิธีนี้จะค้นพบนวัตกรรมใหม่ๆ เกิดมุมมองใหม่ๆ ซึ่งจะไม่ได้จากการทำ Benchmarking วิธีอื่น ตัวอย่างที่ชัดเจนในธุรกิจใหญ่ๆ เช่น Federal Express ทำ Benchmarking กับ Domino Pizza ในเรื่องการรับใบสั่งซื้อและส่งสินค้าให้ลูกค้า หรือ First Chicago National Bank ทำ Benchmarking กับสายการบินในเรื่องการจัดการคิวลูกค้าเป็นต้นหรือกรณีโรงพยาบาล(เอกชน) อาจจะทำ Benchmarking กับโรงแรม (ระดับห้าดาว) ในเรื่องการบริหาร จัดการขณะอยู่โรงพยาบาลเพื่อสร้างความประทับใจให้กับผู้ป่วย (จนอยากอยู่นานๆ) ก็ย่อมได้เหมือนกัน

### 2.4.4 ขั้นตอนในการจัดทำ Benchmarking

1. การกำหนดหัวข้อที่จะทำ Benchmark (Determine What to Benchmark) การวางแผน และพิจารณากำหนดหัวข้อที่จะทำ Benchmark โดยเปรียบเทียบกระบวนการ ในองค์กรภายใน กับ Benchmark ที่ต้องการเปรียบเทียบ เช่น ผลิตภัณฑ์ การบริการ การดำเนินงาน การสนับสนุนการดำเนินการ และกลวิธี เป็นต้น
2. การสร้างทีมงาน (Benchmarking Team) การจัดทีมงานนั้น ควรจะต้องเลือกมาจากหลายๆ ส่วนในองค์กร โดยมีความเกี่ยวข้องต่อเนื่องกัน ที่จะเสริมให้ข้อมูล และสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้ โดยมาจากหลายองค์ความรู้ รวมเข้าเป็นทีมเดียวกัน มีการฝึกอบรม และวางแผนการทำBenchmark ร่วมกัน
3. ระบุผู้ร่วมทำ Benchmark (Identify Benchmarking Partners) โดยเริ่มจากค้นหาหน่วยงาน นอกองค์การที่สามารถเป็นตัวอย่างที่ดี หรือประสบผลสำเร็จในด้านที่จะทำ Benchmark ด้วย (Competitive Benchmarker) และพยายามหาเครือข่าย กับหน่วยงานอื่นๆ ที่มีแรงจูงใจเดียวกัน หรือกับองค์กรที่มีประสบการณ์ในการจัดทำ Benchmark (Functional Benchmarker) หรือแม้แต่การจำทำ Benchmark ในหน่วยงานเดียวกันเอง (Internal Benchmarker) โดยเปรียบเทียบกระบวนการ ในองค์ของเรา กับ Benchmark อันนั้น
4. การเก็บรวบรวม และวิเคราะห์ข้อมูล (Collecting and Analysing Benchmarking Information) ทำการเก็บข้อมูล และทำการวิจัย มีความจำเป็นที่ต้องทำ ก็คือ จะต้องวิเคราะห์และจดบันทึกกระบวนการภายในของเราเอง ที่เราจะเลือกทำ Benchmark กับผู้อื่น ซึ่งอาจใช้ข้อมูลจากเอกสารรายงาน Internet วารสารงานวิจัย การออกภาคสนาม การปรึกษาหารือ หรืออื่นๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบ การเก็บข้อมูลขององค์กรต่างๆ อาจไม่อยู่ในรูปเดียวกัน ไม่สามารถนำมาใช้ได้ทันที อาจต้องปรับให้มีฐานอย่างเดียวกันก่อน จึงเปรียบเทียบภาพได้ถูกต้อง แล้วจึงวิเคราะห์หาวิธีการใหม่ ที่จะทำให้กระบวนการใหม่ของตนเองดีกว่า Benchmark ที่ตั้งไว้
5. การปฏิบัติการ (Taking Action) ทำการลงมือปรับปรุงเปลี่ยนแปลงตามแผนใหม่ที่วางไว้ โดยทำการนำเสนอข้อมูลที่ค้นพบ และหาแนวทางดำเนินการ เพื่อปรับปรุงกลวิธีดำเนินการ เพื่อบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ และอาจต้องมีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงแผน ให้เข้ากับสถานการณ์ และให้เดินทางเข้าหา Benchmark ใหม่ที่เรากำหนดไว้ การติดตามประเมินผล อาจต้องใช้ตัววัดทั้งทางตรง และทางอ้อม

มีองค์ความรู้ในวิธีการดำเนินการเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงใหม่ การทำ Benchmark นี้เป็นการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงกระบวนการ อย่างต่อเนื่อง เพื่อคงอยู่ในระดับที่กำหนดไว้

ในทางปฏิบัติจำนวนขั้นตอนในการเทียบเคียงอาจมีแตกต่างกันบ้าง เช่นในระยะวางแผนอาจมีการแยกเป็นขั้นตอนย่อย ๆ เช่น กำหนดปัญหา กำหนดว่าต้องการเทียบเคียงอะไร เทียบเคียงอย่างไร และเทียบเคียงกับใคร

2.4.5 **ข้อดีของการทำ** Benchmarking

Benchmarking เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการปรับปรุงองค์กรที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากทำให้มีการปรับปรุงองค์กรอย่างก้าวกระโดดแต่สำหรับประเทศไทย Benchmarking ยังค่อนข้างเป็นเรื่องใหม่ เริ่มมีการนำเครื่อง มือนี้มาใช้ในการปรับปรุงองค์กรอย่างเป็นระบบในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา แต่ในต่างประเทศมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดย เฉพาะอย่างยิ่งประเทศสหรัฐอเมริกา การทำ Benchmarking ได้รับการยอมรับและนำมาใช้ในมากขึ้น เนื่องจาก

- เพื่อความยั่งยืนขององค์กร : สภาพการแข่งขันที่รุนแรงขึ้น การที่องค์กรจะยั่งยืนจำเป็นต้องรักษาและยกระดับ ความสามารถของตนเองเพื่อให้แข่งขันได้ จึงต้องมีการเรียน รู้และปรับปรุงตนเองอย่างต่อเนื่องโดยเครื่องมือหนึ่งที่นิยมใช้คือ Benchmarking
- เพื่อการปรับปรุงอย่างก้าวกระโดด : ความเร็วในการปรับปรุงตนเองเป็นเงื่อนไขสำคัญของความได้เปรียบในการแข่งขัน Benchmarking เป็นเครื่องมือที่ช่วยกระตุ้นนวัตกรรม (Innovation) ในองค์กร ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยน แปลงในเชิงปรับปรุงในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากเป็นการเรียนรู้วิธีปฏิบัติที่ดีที่สุดจากภายนอกองค์กร ทำให้สามารถก้าวทันองค์กรอื่น ๆ จึงเป็นการปรับปรุงแบบก้าวกระโดด
- เพื่อสนับสนุนรางวัลคุณภาพแห่งชาติ รางวัลเป็นแรงจูงใจให้เกิดการปรับปรุง ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาหลายประเทศ ริเริ่มให้มีรางวัลด้านการจัดการเพื่อเป็นแรงกระตุ้นให้เกิดการปรับปรุงคุณภาพด้านการจัดการ เช่น Malcolm Baldrige National Quality Award ในประเทศสหรัฐอเมริกา Singapore Quality Award ในสิงคโปร์ และ Thailand Quality Award ของประเทศไทย รางวัลเหล่านี้ใช้แนวทางของ Malcolm Baldrige เป็นหลักเกณฑ์ในการตัดสิน ซึ่งได้กำหนดให้องค์กรที่จะได้รับรางวัลต้องมีการดำเนินกระบวนการ Benchmarking

2.4.6 **กลวิธีหลักในการทำ** Benchmarking

1. ต้องชี้แนะให้ผู้บริหารระดับสูงรับทราบ และให้การสนับสนุนโครงการเสียก่อนให้ชัดเจน

2. สามารถทราบผลที่จะเกิดขึ้นอย่างชัดเจน

3. สามารถหาวิธีการทำงานต่างๆ ให้ดีขึ้น

4. สร้างทีมงาน ที่ทำให้ความรู้สึกเป็นเจ้าของโครงการ และกระบวนการที่จะพัฒนาให้ได้

5. พยายามหาข้อมูล เพื่อนำมาวิเคราะห์ทำ Benchmark จากแหล่งต่างๆ เท่าที่จะหาได้

6. วางเป้าประสงค์ให้ชัดเจน และสามารถลำดับความสำคัญของโครงงานได้

2.4.7 **ข้อควรระวังในการใช้** BENCHMARKING

1. อย่าเน้น BENCHMARKING เพียงแค่การวัดเปรียบเทียบ : ต้องเน้นผลจากการวัดเพื่อเรียนรู้และถ่ายทอดความรู้ เพื่อพัฒนากระบวนงาน หน่วยงาน/ องค์กร

2. อย่าลืมที่จะเตรียมความพร้อมด้านข้อมูลเนื่องจากการจะบรรลุการทำ BENCHMARKING ในขั้นแรกได้ ต้องรู้ว่าจะวัดสิ่งไหน ดังนั้น หากขาดข้อมูลเหล่านั้นไป ก็เป็นอันจบตั้งแต่เริ่ม จึงควรพิจารณา ความเป็นไปได้ของการได้มา และความคุ้มค่าของข้อมูลด้วย

3. อย่าลอกเลียนแบบการ BENCHMARKING ของคนอื่นเพราะกระบวนงาน/ หน่วยงาน/ องค์กรที่แตกต่างกัน มีจุดมุ่งหมาย/ พันธกิจ/ วิสัยทัศน์/ กลยุทธ์ที่ต่างกัน ย่อมมีการวัดเปรียบเทียบต่างกันด้วย ดังนั้น หากประสงค์จะทำ BENCHMARKING ตนเองพึงจะต้องพัฒนาด้วยตนเองเพื่อให้เหมาะกับตน

4. อย่าทำBENCHMARKINGโดยไม่ชัดเจนว่าจะทำไปเพื่ออะไรมิฉะนั้นการทำ BENCHMARKING ก็จะสูญเปล่ากลายเป็นอุปสรรคและภาระงานที่เพิ่มนอกจากนี้ยังทำให้เกิดการสูญเสียทรัพยากรโดยไม่จำเป็น

5. อย่าหวังว่า BENCHMARKING จะเสร็จได้รวดเร็วเพราะ BENCHMARKING เป็นงานที่ต้องทำอย่างต่อเนื่องใช่ว่าจะมีวันเสร็จสิ้น และไม่ต้องทำอีก ในขณะเดียวกัน แม้จะทำอย่างต่อเนื่อง ก็ใช่ว่า BENCHMARKING จะบรรลุผลในระยะเวลาอันสั้น

6. อย่าละเลยการเตรียมความพร้อมขององค์กร องค์กรเองก็ต้องมีการปรับตัวรับการทำ BENCHMARKING อยู่ไม่น้อย ไม่ว่าจะเป็นการปรับวัฒนธรรมองค์กรสู่องค์กรแห่งการเรียนรู้, การปรับลักษณะการบริหารแบบสั่งการควบคุมสู่การทำงานร่วมกัน-สนับสนุน-ให้คำแนะนำ (มากกว่าสั่งให้ทำ) การสร้างเครือข่าย-การแชร์ข้อมูลระหว่างพันธมิตร BENCHMARKING ขององค์กร

### 2.4.8 กระบวนการเทียบเคียงสมรรถนะเชิงพลังงานในอุตสาหกรรม

กระบวนการเทียบเคียงสมรรถนะ (Benchmarking) เป็นเครื่องมือพื้นฐานที่สำคัญ ในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างองค์กรต่างๆ และเป็นสิ่งสำคัญลำดับแรกๆที่จำเป็นต้องทำ สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยในการวัดค่าสมรรถนะนั้น จะวัดเทียบกับกลุ่มที่เหมาะสม และระยะห่างระหว่างสมรรถนะปัจจุบัน กับระดับสมรรถนะของวิธีปฏิบัติดีที่สุด (best practice) ซึ่งผลที่ได้จะสามารถนำมาตั้งเป้าหมายและวัตถุประสงค์ของการปรับปรุงการดำเนินงาน ทั้งยังได้แผนการดำเนินงานที่จะช่วยให้สามารถบรรลุเป้าหมายและวัตถุประสงค์อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม การเทียบเคียงสมรรถนะนี้ สามารถทำพร้อมกันได้ในหลายระดับ หลายทิศทาง และในมุมมองที่หลากหลายของการบริหารจัดการและการดำเนินงานของธุรกิจ ซึ่งในแต่ละบริษัท จะมีความต้องการข้อมูลที่ได้จากการเทียบเคียงสมรรถนะ เพื่อนำไปใช้ในการบริหารในระดับที่แตกต่างกันไป

การเริ่มต้นกระบวนการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ จำเป็นต้องประมาณการถึงสภาพความเป็นไปของทั้งภาคอุตสาหกรรม และประมาณการถึงสถานภาพของบริษัท เมื่อเปรียบเทียบกับทั้งภาคอุตสาหกรรมกันกับภายในภาคอุตสาหกรรมนั้น

ในการบริหารพลังงานจะต้องมีการจัดตั้งโครงสร้างการบริหารพลังงาน ซึ่งจะนำไปใช้ตั้งเป้าหมายต่างๆ และนำโครงสร้างดังกล่าวไปใช้งานจริงกับโครงการต่างๆ เพื่อให้บรรลุถึงเป้าหมายเหล่านั้น ซึ่งในแง่ของการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะแล้วจะเป็นเป้าหมายในการประหยัดค่าใช้จ่าย เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นตัวผลักดันในการลดต้นทุนนั่นเอง โดยสิ่งที่จะนำมาเป็นตัวชี้วัดนั้นจะต้องวัดได้ง่าย รวดเร็ว และแม่นยำ

### 2.4.9 แนวทางการเทียบเคียงสมรรถนะเชิงพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

การเทียบเคียงสมรรถนะสำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศไทย ในปัจจุบันยังไม่มีการจัดทำอย่างเต็มรูปแบบ แต่ก็มีบางหน่วยงานของภาครัฐ ที่ดำเนินโครงการการเทียบเคียงสมรรถนะ เช่นการเทียบเคียงสมรรถนะทางด้านการแข่งขัน (Competitive benchmarking) สำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจก ซึ่งจัดทำ โดยสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2548 และสถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ ได้จัดทำดัชนีชี้วัดกลางในการประเมินสถานประกอบการอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

ปัญหาหลักของการเทียบเคียงสมรรถนะเชิงพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกนั้นแบ่งเป็นหัวข้อหลักได้ดังนี้

1. ขาดศูนย์กลางในการแลกเปลี่ยนข้อมูล
2. ขาดมาตรฐานกลางในการเก็บข้อมูล
3. โรงงานมีจำนวนมาก ซึ่งแต่ละโรงงานมีขนาด ชนิด และสภาพเครื่องจักรแตกต่างกัน
4. ลักษณะการผลิต ปริมาณการผลิตและมูลค่าของสินค้าที่ผลิตแตกต่างกัน

สำหรับการเทียบเคียงสมรรถนะเชิงพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกนั้นจัดว่าเป็นเรื่องที่ยากพอสมควร เนื่องจากโรงงานมีจำนวนมาก ทั้งยังมีความหลากหลายของขนาดโรงงาน สภาพแวดล้อม ลักษณะ/เทคนิคการผลิต เครื่องจักร และเทคโนโลยีการผลิตที่แตกต่างกัน ซึ่งในส่วนของโรงงานขนาดใหญ่ หรือโรงงานที่อยู่ในเครือบริษัทขนาดใหญ่ คงไม่มีปัญหาสำหรับการสอบถามข้อมูล เนื่องจากน่าจะมีมาตรฐานในการเก็บข้อมูลและ มีการเก็บข้อมูลพื้นฐานในส่วนนี้ไว้บ้างแล้ว

ส่วนโรงงานขนาดกลางและเล็กนั้น อาจจะต้องเริ่มตั้งแต่การแนะนำวิธีการเก็บข้อมูลที่ถูกต้อง และชนิดของการเก็บข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ ซึ่งก็ต้องการทีมงานที่มีความรู้ความเข้าใจทั้งในเรื่องของการวัดสมรรถนะและการเทียบเคียงสมรรถนะเป็นอย่างดี (Performance measurement and benchmarking) เนื่องจาก ผู้บริหารโรงงานขนาดกลางและเล็กเหล่านี้ ส่วนใหญ่ยังมีความเชื่อเรื่องการเก็บข้อมูลต่างๆของบริษัทให้เป็นความลับ เพื่อที่จะไม่เสียเปรียบคู่แข่งขันรายอื่นๆ นอกจากนี้ข้อมูลที่นำมาเปิดเผยบางส่วนอาจทำให้เกิดผลกระทบทางด้านการเสียภาษีของเจ้าของโรงงานอีกด้วย

จากปัญหาที่กล่าวมา จึงจำเป็นต้องมีการจัดแบ่งกลุ่มการเทียบเคียงสมรรถนะให้เหมาะสม ให้ความรู้ความเข้าใจในกระบวนการเทียบเคียงสมรรถนะ และประโยชน์ที่จะได้รับจากการให้ความร่วมมือ ซึ่งหากจะว่าไป ต้นทุนด้านพลังงานในปัจจุบัน ก็จัดเป็นต้นทุนที่มีแนวโน้มจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งถ้าหากสามารถมีวิธีการที่จะช่วยให้โรงงานต่างๆ ลดต้นทุนในส่วนนี้ได้ ทางโรงงานต่างๆก็น่าที่จะให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

## 2.5 การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์ ( Regression and Correlation )

การวิเคราะห์การถดถอย คือการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหนึ่ง เรียกว่าตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนอง (dependent variable or response variable) และตัวแปรอื่นหนึ่งตัวหรือมากกว่าหนึ่งตัว เรียกว่า ตัวแปรอิสระหรือตัวพยากรณ์ (independent variable or predictor variable) มีวัตถุประสงค์ที่จะประมาณหรือพยากรณ์ค่าตัวแปรตามซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มจากตัวแปรอิสระ ซึ่งเป็นค่าที่ทราบค่าหรือค่าคงที่ (known or fixed values)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นระเบียบวิธีสำหรับการประมาณค่าตัวแปรตัวหนึ่ง จากการที่เราทราบค่าหรือสมมุติค่าของตัวแปรอีกตัวหนึ่งเพียงตัวเดียวหรือหลายตัว และวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณนั้น ส่วนการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ เป็นระเบียบวิธีที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงไร ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ อาจมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งเรียกว่า การถดถอยเชิงเส้น ( Linear Rregression ) หรือมีความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้ง ซึ่งเรียกว่า การถดถอยเชิงเส้นโค้ง (Non- Linear Regression) และเราอาจสนใจศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว เรียกว่า การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression) หรือ อาจจะสนใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรมากกว่า 2 ตัวขึ้นไป เรียกว่า การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression)

### 2.5.1 สมการถดถอยเชิงเส้น

เมื่อกำหนดให้ X เป็นตัวแปรอิสระ และ Y เป็นตัวแปรตาม ตัวแบบเชิงเส้น มีลักษณะดังนี้

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

$\beta_0$ หมายถึง จุดตัดแกน Y เมื่อ X เป็นศูนย์

$\beta_1$ หมายถึง ความชันของเส้นตรงเมื่อ X เปลี่ยนไป 1 หน่วยค่า Y จะเปลี่ยนไป $\beta_1$

$\varepsilon_i$ หมายถึง ความคลาดเคลื่อน ซึ่งมีข้อสมมติเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนดังนี้

1. $\varepsilon_i$ มีการแจกแจงปกติ
2. $E(\varepsilon) = 0$
3. ความคลาดเคลื่อนต้องเป็นอิสระต่อกัน
4. ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนจะต้องมีค่าเท่ากันในแต่ละค่าที่กำหนดของตัวแปร X

และสมการถดถอยอยู่ในรูป

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1 X_i$$

2.5.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์ $\beta_0$ และ $\beta_1$

$$b_0 = \bar{Y} - b_1\bar{X}$$

$$b_1 = \frac{n\sum_{i=1}^{n} X_i Y_i - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} Y_i\right)}{n\sum_{i=1}^{n} X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)^2}$$

2.5.3 **ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ**

ค่าประมาณ $\hat{Y}$ ที่ได้จากสมการถดถอยจะแตกต่างจากค่า Y ที่กำหนดค่า X เดียวกัน โดยสามารถวัดความแตกต่าง ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ ($S_{y.x}$) ถ้าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ มีค่าต่ำแสดงว่า ค่าประมาณมีค่าใกล้เคียงกับ Y

$$S_{y.x} = \sqrt{\frac{SST - SSR}{n-2}}$$

โดย $$SST = \sum_{i=1}^{n} Y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} Y_i\right)^2}{n}$$

$$SSR = b_1 \cdot \left[\sum_{i=1}^{n} X_i Y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} X\right)\left(\sum_{i=1}^{n} Y\right)}{n}\right]$$

2.5.4 **สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ**

นิยามสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( Coefficient of Determination: $r^2$ ) เป็นค่าที่ใช้ในการบอกว่าตัวแปรอิสระสามารถอธิบายตัวแปรตามได้ดีเพียงใด

$$r^2 = \frac{SSR}{SST}$$

นิยมทำให้อยู่ในรูปของ % หรือร้อยละ โดยการคูณด้วย 100

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**2.5.5 การทดสอบสมมติฐานค่าพารามิเตอร์ $\beta_0$**

เป็นการทดสอบว่าพารามิเตอร์ $\beta_0$ มีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดหรือไม่ โดยปกตินิยมทดสอบว่าเท่ากับ ศูนย์ นั่นคือกราฟเส้นตรงผ่านจุดกำเนิดหรือไม่ ซึ่งการทดสอบมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดสมมติฐาน

   $H_0 : \beta_0 = c$ และ

   $H_1 : \beta_0 > c$ หรือ

   $H_1 : \beta_0 < c$ หรือ

   $H_1 : \beta_0 \neq c$

2. กำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha$

3. คำนวณค่าสถิติทดสอบ

$$t = \frac{b_0 - c}{S_{b_0}}$$

$$\text{โดย } S_{b_0} = \sqrt{\frac{S^2_{y \cdot x} \sum_{i=1}^{n} X_i^2}{n\sum_{i=1}^{n} X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)^2}}$$

4. หาอาณาเขตวิกฤต ที่ d.f.= n-2

5. สรุปผล

**2.5.6 การทดสอบสมมติฐานค่าพารามิเตอร์ $\beta_1$**

เป็นการทดสอบว่าพารามิเตอร์ $\beta_1$ มีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดหรือไม่ โดยค่า $\beta_1$ จะเป็นค่าที่บอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ถ้า $\beta_1 = 0$ แสดงว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามไม่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งการทดสอบมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดสมมติฐาน

   $H_0 : \beta_1 = c$ และ

   $H_1 : \beta_1 > c$ หรือ

   $H_1 : \beta_1 < c$ หรือ

   $H_1 : \beta_1 \neq c$

2. กำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha$

3. คำนวณค่าสถิติทดสอบ

$$t = \frac{b_1 - c}{S_{b_1}}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย $S_{b_1} = \sqrt{\frac{S^2_{y.x}}{\sum_{i=1}^{n} X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)^2}{n}}}$

4. หาอาณาเขตวิกฤต ที่ d.f.= n-2

5. สรุปผล

ในกรณีที่ต้องการทดสอบว่า $H_0 : \beta_1 = 0$ สามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดสมมติฐาน

   $H_0 : \beta_1 = 0$ และ

   $H_1 : \beta_1 \neq 0$

2. กำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha$

3. คำนวณค่าสถิติทดสอบจากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ANOVA

| Source of Variation | Degree of Freedom | Sum of Squares | Mean Square | F |
|---|---|---|---|---|
| Regression | 1 | SSR | $MSR = \frac{SSR}{1}$ | $F = \frac{MSR}{MSE}$ |
| Error | n-2 | SSE | $MSE = \frac{SSE}{n-2}$ | |
| Total | n-1 | SST | | |

โดย $SST = \sum_{i=1}^{n} Y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} Y_i\right)^2}{n}$

$SSR = b_1 \cdot \left[ \sum_{i=1}^{n} X_i Y_i - \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i \sum_{i=1}^{n} Y_i}{n} \right]$

SSE = SST-SSR

4. อาณาเขตวิกฤต $F > F_{\alpha, 1, n-2}$

5. สรุปผล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**2.5.7 การประมาณค่าแบบช่วงของพารามิเตอร์ $\beta_0$ และ $\beta_1$**

ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับ $\beta_0$ และ $\beta_1$ สร้างได้โดยอาศัยการแจกแจงของ $b_0$ และ $b_1$ ตามลำดับ

ช่วงความเชื่อมั่น $(1-\alpha)100\%$ สำหรับ $\beta_0$ คือ

$$b_0 - t_{\alpha/2}S_{b_0} < \beta_0 < b_0 + t_{\alpha/2}S_{b_0} \quad \text{ที่ d.f.= n-2}$$

ช่วงความเชื่อมั่น $(1-\alpha)100\%$ สำหรับ $\beta_1$ คือ

$$b_1 - t_{\alpha/2}S_{b_1} < \beta_1 < b_1 + t_{\alpha/2}S_{b_1} \quad \text{ที่ d.f.= n-2}$$

**2.5.8 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์**

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์(Correlation Analysis) หมายถึงการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปร 2 ตัวใดๆ โดยไม่จำเป็นว่าจะต้องเป็นตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม ในการวัดระดับความสัมพันธ์จะใช้ค่าที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of Correlation) ใช้สัญลักษณ์ r คำนวณได้จาก

$$r = \frac{n\sum_{i=1}^{n} X_i Y_i - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} Y_i\right)}{\sqrt{\left[n\sum_{i=1}^{n} X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)^2\right]\left[n\sum_{i=1}^{n} Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} Y_i\right)^2\right]}}$$

ถ้า r มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงเส้นในทิศทางเดียวกัน

ถ้า r มีค่าเข้าใกล้ -1 แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงเส้นในทิศทางตรงข้ามกัน

ถ้า r มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันน้อย

ถ้า r มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่า X และ Y มีไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกัน

ในการทดสอบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรทั้งสองหรือไม่ มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนด $H_0$ และ $H_1$ โดย

   $H_0 : \rho = 0$ และ

   $H_1 : \rho \neq 0$

2. กำหนดระดับนัยสำคัญ

3. คำนวณค่าสถิติ

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

4. หาอาณาเขตวิกฤต

   $t < -t_{\alpha/2}$ และ $t > t_{\alpha/2}$ ที่ d.f. = n-2

5. สรุปผล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**งานวิจัยภาษาไทย**

**กรมโรงงานอุตสาหกรรม : อุตสาหกรรมยาง** (2535)

กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้จัดทำคู่มือการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทยาง ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลทั่วไปของอุตสาหกรรม กระบวนการผลิต ลักษณะการใช้พลังงาน การรวบรวมข้อมูลเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน มาตรการอนุรักษ์พลังงาน การจัดการด้านพลังงาน และกรณีศึกษา เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ประกอบการได้ตระหนักถึงศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน และนำไปปฏิบัติเพื่อก่อให้เกิดผลการอนุรักษ์พลังงานในสถานประกอบการของตนเอง ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันให้แก่ผู้ประกอบการเอง

**ศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและอาคารต่าง ๆ : อุตสาหกรรมกระดาษ** (2549)

วัตถุประสงค์ในการจัดแบ่งกลุ่มอุตสาหกรรมกระดาษสำหรับโครงการนี้ คือ จัดแบ่งกลุ่มให้สะท้อนถึงสภาพการใช้พลังงานที่ถูกต้อง เหมาะสมและสามารถนำมาใช้กำหนดเป็นมาตรฐานการใช้พลังงาน (Benchmark) ของอุตสาหกรรมกระดาษ 3 กลุ่มที่สนใจ ได้แก่ อุตสาหกรรมกระดาษขั้นต้น อุตสาหกรรมกระดาษขั้นกลาง และอุตสาหกรรมกระดาษขั้นปลาย รวมถึงให้สามารถนำมากำหนดมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เหมาะสม แผนการส่งเสริมและสนับสนุนการอนุรักษ์พลังงานสำหรับกลุ่มอุตสาหกรรม

*อุตสาหกรรมกระดาษขั้นต้น* ลักษณะของอุตสาหกรรมประเภทนี้ จะเกี่ยวข้องกับการผลิตเยื่อกระดาษเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์กระดาษอื่นๆ ซึ่งต้องใช้พลังงานความร้อนสูงมาก สำหรับอุตสาหกรรมประเภทนี้ได้แบ่งตามชนิดของวัตถุดิบ

*อุตสาหกรรมกระดาษขั้นกลาง* ลักษณะของอุตสาหกรรมประเภทนี้ จะเป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องจากอุตสาหกรรมขั้นต้น เป็นอุตสาหกรรมที่นำเยื่อกระดาษจากอุตสาหกรรมกระดาษขั้นต้นมาผลิตเป็นกระดาษประเภทต่างๆ สำหรับอุตสาหกรรมประเภทนี้ได้แบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ กระดาษคราฟท์ กระดาษพิมพ์เขียน กระดาษอนามัย กระดาษหนังสือพิมพ์

*อุตสาหกรรมกระดาษขั้นปลาย* ลักษณะของอุตสาหกรรมประเภทนี้ จะเป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องจากอุตสาหกรรมขั้นกลาง ได้แก่ โรงงานที่ประกอบกิจการผลิตบรรจุภัณฑ์ และสิ่งพิมพ์ สำหรับอุตสาหกรรมประเภทนี้ได้ทำการแบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์ ได้แก่

- กระดาษลูกฟูกชนิด 2 ชั้น (Single Faced Corrugated Board)
- กระดาษลูกฟูกชนิด 3 ชั้น (Single Wall or Double Faced Corrugated Board)
- กระดาษลูกฟูกชนิด 5 ชั้น (Double Wall Corrugated Board)

**โครงการศึกษาประสิทธิภาพพลังงาน : อุตสาหกรรมอโลหะ** (2549)

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ. ) ได้ริเริ่มให้มีโครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมอโลหะขึ้น โดยจะทำการศึกษาวิเคราะห์ค่าดัชนีมีการใช้พลังงานของกลุ่มอุตสาหกรรมดังกล่าวซึ่งมีสภาพการใช้พลังงานที่แตกต่างกันตามผลผลิตและกระบวนการผลิต ทั้งนี้เพื่อให้มีเกณฑ์การใช้พลังงานมาตรฐานของอุตสาหกรรมอโลหะในประเทศไทย ซึ่งทำให้ผู้ประกอบการทราบถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของตนเองและเปรียบเทียบกับผู้อื่น นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินถึงสถานสภาพการใช้พลังงานของอุตสาหกรรมดังกล่าวในภาพรวม รวมถึงทำการประเมินศักยภาพในการอนุรักษ์พลังงาน เพื่อนำไปสู่การนำเสนอแนวทางการส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมดังกล่าวที่เป็นรูปธรรม ทั้งในรูปแบบของเทคโนโลยีการผลิตและการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงมาตรการเชิงลึกด้านอนุรักษ์พลังงานที่มีประสิทธิภาพในรูปแบบต่างๆ ทั้งนี้เพื่อให้ภาคอุตสาหกรรมของประเทศมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะเป็นการช่วยยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันกับต่างประเทศ รวมทั้งสามารถรับมือกับสถานการณ์วิกฤติการณ์ด้านพลังงานทั้งในปัจจุบันและอนาคตได้

**เฉลิมขวัญ ศรีสุวรรณ** (2541)

เป็นการศึกษาปัจจัยจิตลักษณะ ปัจจัยความเชื่อด้านความปลอดภัยต่อพฤติกรรมการขับขี่ รถจักรยานยนต์ที่ปลอดภัยของวัยรุ่น วัตถุประสงค์คือศึกษาพฤติกรรมการขับขี่รถจักรยานยนต์ที่ปลอดภัยของวัยรุ่น ภายใต้กรอบแนวคิดการขับขี่ปลอดภัยและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยประชากร ปัจจัยจิตลักษณะ ปัจจัยความเชื่อด้านความปลอดภัยในการขับขี่ เพื่อกำหนดปัจจัยทำนายพฤติกรรมการขับขี่รถจักรยานยนต์ที่ปลอดภัยของวัยรุ่น

ผลการวิเคราะห์ตัวประกอบด้วยการสกัดปัจจัยโดยวิธีตัวประกอบหลักพบว่า พฤติกรรมการขับขี่รถจักรยานยนต์ที่ปลอดภัย ประกอบด้วย 3 ตัวประกอบหลักคือ ความตั้งใจในการขับขี่ ความระมัดระวังในการขับขี่ และความมีมารยาทหรือนิสัยที่ดีในการขับขี่ โดยทั้ง 3 ตัวประกอบนี้อธิบายพฤติกรรมการขับขี่ฯได้ ร้อยละ 62 และพบว่าส่วนใหญ่มีลักษณะมุ่งอนาคต-ควบคุมตนมาก มีความเชื่ออำนาจภายในตนมาก มีความเชื่ออำนาจภายนอกตนปานกลางและค่อนข้างแน่ใจว่าตนเองมีความสามารถด้านการปฏิบัติเพื่อความปลอดภัย มีบุคลิกภาพชนิดเอปานกลาง มีการรับรู้ประโยชน์ของการปฏิบัติตนเพื่อความปลอดภัยมาก และมีการรับรู้อุปสรรคของการปฏิบัติตนเพื่อความปลอดภัยมาก

ผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแบบถอยหลังพบว่า ตัวแปรอิสระที่ร่วมกันทำนายพฤติกรรมการขับขี่ฯ ด้านความตั้งใจฯคือ เพศ ลักษณะมุ่งอนาคต-ควบคุมตน และความเชื่อ

อำนาจภายในตน โดยร่วมกันทำนายพฤติกรรมการขับขี่ฯด้านความตั้งใจฯ ได้ร้อยละ 6.0 และตัวแปรที่มีความสัมพันธ์เชิงบวก คือ ลักษณะมุ่งอนาคต-ควบคุมตน และความเชื่ออำนาจภายในตน และเพศหญิงมีพฤติกรรมการขับขี่ฯ ด้านความตั้งใจฯ สูงกว่าเพศชาย ส่วนตัวแปรที่ไม่มีความสัมพันธ์เลยคือ การรับรู้อุปสรรคของการปฏิบัติตนเพื่อความปลอดภัย ระดับการศึกษา ความสามารถแห่งตน ด้านการปฏิบัติเพื่อความปลอดภัย ความเชื่ออำนาจภายนอกตน ด้านสุขภาพ การรับรู้ประโยชน์ของการปฏิบัติตนเพื่อความปลอดภัย และบุคลิกภาพซนิดเอ ส่วนตัวแปรที่ร่วมกันทำนายพฤติกรรมการขับขี่ฯ ด้านความระมัดระวังฯคือ การรับรู้อุปสรรคของการปฏิบัติตนเพื่อความปลอดภัย เพศ ลักษณะมุ่งอนาคต-ควบคุมตน ความสามารถแห่งตนด้านการปฏิบัติเพื่อความปลอดภัย ความเชื่อ อำนาจภายในตน และความเชื่ออำนาจภายนอกตน โดยร่วมกันทำนายพฤติกรรมการขับขี่ฯ ด้านความระมัดระวังฯได้ร้อยละ 42.2 และเพศชายมีพฤติกรรมการขับขี่ฯ ด้านความระมัดระวังฯสูงกว่าเพศหญิง และตัวแปรที่มีความสัมพันธ์เชิงบวก คือ ลักษณะมุ่งอนาคต-ควบคุมตน ความเชื่ออำนาจภายในตน ความสามารถแห่งตนด้านการปฏิบัติเพื่อความปลอดภัย และการรับรู้ อุปสรรคของการปฏิบัติตนเพื่อความปลอดภัย และตัวแปรที่มีความสัมพันธ์เชิงลบคือ ความเชื่ออำนาจภายนอกตน ส่วนตัวแปรที่ไม่มีความสัมพันธ์เลยคือ ระดับการศึกษา และบุคลิกภาพซนิดเอ

**ที่ปรึกษาตรวจสอบโรงงานควบคุมปีที่ 4. โครงการศึกษาประสิทธิภาพพลังงานอุตสาหกรรมพลาสติก** (2548)

โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกเป็นโครงการที่กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) จัดทำขึ้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการกำหนดเกณฑ์การใช้พลังงาน และสามารถนำมาใช้ในการกำหนดมาตรฐานการใช้พลังงาน หรือ Energy Benchmarking นอกจากนี้แล้ว ยังสามารถนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของดัชนีชี้วัดการอนุรักษ์พลังงานของแต่ละสถานประกอบการได้ โดยโครงการได้ศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมพลาสติกเพื่อประเมิน SEC ของโรงงานแล้วเปรียบเทียบกับ SEC ของกระบวนการผลิตเดียวกันในเอกสารเผยแพร่ ถ้า SEC ของโรงงานใกล้เคียงกับ SEC อ้างอิง แสดงถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงงานอยู่ที่ระดับดี ถ้าโรงงานต้องการประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานที่อาจดำเนินการได้ ให้โรงงานเปรียบเทียบ SEC ของโรงงานกับค่า SEC Benchmarking ถ้าผลการเปรียบเทียบ SEC ของโรงงานสูงกว่า แสดงว่า โรงงานมีศักยภาพในการอนุรักษ์พลังงานได้ ให้โรงงานพิจารณามาตรการอนุรักษ์พลังงานทั้งระยะสั้น ถึงระยะยาว ได้นำเสนอไว้ในรายงาน เพื่อนำไปปฏิบัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานสู่เป้าหมายค่า Energy Benchmarking

**นฤมล กิตติสุนทรวงศ์** (2544)

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงระบบสารสนเทศของกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานให้เป็นระบบสารสนเทศที่สามารถช่วยในการตัดสินใจในเรื่องการใช้พลังงานสำหรับผู้บริการ ซึ่งปัญหาที่พบก่อนทำการวิจัยคือ เรื่องระบบจัดการฐานข้อมูล พบว่าไม่สามารถพัฒนาโปรแกรมรายงานการวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยอ้างอิงจากฐานข้อมูลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบและพัฒนาระบบฐานข้อมูลขึ้นมาใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับโปรแกรมรายงานการวิเคราะห์การใช้พลังงาน ระบบสารสนเทศสำหรับการวิเคราะห์การใช้พลังงานนี้ประกอบด้วยโปรแกรมส่วนรับข้อมูล และโปรแกรมส่วนรายงานการวิเคราะห์การใช้พลังงาน โดยใช้ Developer 6i เป็นแอปพริเคชั่นในการพัฒนาและใช้ ระบบจัดการฐานข้อมูล Oracle 8i ซึ่งทำให้ได้ต้นแบบระบบสารสนเทศสำหรับการวิเคราะห์กาใช้พลังงาน และสามารถนำมาใช้กับข้อมูลจากแบบส่งข้อมูลการผลิต การใช้พลังงานและการอนุรักษ์พลังงานของโรงงานควบคุมปีที่ 4 จากการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศที่พัฒนาขึ้นนี้ พบว่าโปรแกรมรายงานการวิเคราะห์การใช้พลังงานสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์และการพัฒนาการใช้พลังงานในการผลิตของโรงงานต่อไปในอนาคต

**เบญจมาศ ปุยอ๊อก** (2548)

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาข้อมูลปริมาณพลังงานที่อุตสาหกรรมเหล็กใช้ต่อผลผลิต (Specific Energy Consumption)ของอุตสาหกรรมเหล็กไทย จากการพิจารณาโครงสร้างอุตสาหกรรมเหล็ก สามารถจัดประเภทกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าทั่วประเทศตามกระบวนการผลิตได้ 15 ประเภท โดยจัดทำแบบสอบถามส่งไปยังผู้ประกอบการและข้อมูลที่ทำการสำรวจจะเป็นการใช้พลังงานของกลุ่มผู้ผลิตเหล็กแต่ละประเภท ในช่วงปี 2542 –2547 จากการศึกษาพบว่าอุตสาหกรรมผลิตเหล็กลวดมีเตาหลอมจะใช้พลังงานในการผลิตต่อผลผลิตมากที่สุดเนื่องจาก เหล็กลวดจะใช้พลังงานไฟฟ้าในการรีดร้อนเป็นส่วนใหญ่ อีกทั้งมีเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็ก ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการรีดเพื่อลดขนาดเหล็กลวดจึงใช้พลังงานมาก ลำดับรองลงมาได้แก่อุตสาหกรรมเหล็กรูปพรรณรีดร้อนมีเตาหลอม ลำดับที่สามคืออุตสาหกรรมเหล็กเส้นมีเตาหลอม

**พงษ์ศักดิ์ พุทธวงศ์** (2546)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงศึกษา ความต้องการไฟฟ้าในอุตสาหกรรมผลิตโลหะ, อุตสาหกรรมผลิตปูนซิเมนต์และภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความต้องการพลังงานไฟฟ้าของภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้า การพยากรณ์ความต้องการพลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างปี พ.ศ. 2545 ถึง 2551 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์สมการพหุคูณ(Multiple Regression Analysis) โดยแบบจำลองทางสถิติ จากความสัมพันธ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางเศรษฐศาสตร์จะได้ว่า

$$D_{es} = a + bP_e + cP_f + dR + eQ_s + U$$

เมื่อกำหนดให้

$D_{es}$ = ปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าของอุตสาหกรรม

$P_e$ = ราคาไฟฟ้าเฉลี่ย

$P_f$ = ราคาก๊าซเฉลี่ย

$R$ = อัตราดอกเบี้ยเงินกู้เฉลี่ย

$Q_s$ = ปริมาณผลผลิตของอุตสาหกรรม

$U$ = ค่าความผิดพลาด(Disturbance Term)

$a$ = ค่าคงที่ (Constant)

$b,c,d,e$ = สัมประสิทธิของตัวแปรต่างๆ (Coefficients)

ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุปสงค์ความต้องการพลังงานไฟฟ้าของอุตสาหกรรมผลิตโลหะและปูนซิเมนต์ มีดังนี้ ราคาไฟฟ้าเฉลี่ย ราคาก๊าซเฉลี่ย และปริมาณผลผลิตของอุตสาหกรรม ได้ค่าความหยืดหยุ่นของอุปสงค์ต่อราคาไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ -1.565 ของอุตสหกรรมผลิตโลหะ และ -0.783 ของอุตสาหกรรมปูนซิเมนต์ ค่าความยืดหยุ่นของอุปสงค์ต่อผลผลิต มีค่าเท่ากับ 0.11 ของอุตสาหกรรมผลิตโลหะ และค่าความยืดหยุ่นของอุตสาหกรรมผลิตนซีเมนต์ มีค่าเท่ากับ 0.449 และค่าความยืดหยุ่นของอุปสงค์ต่อราคาก๊าซของอุตสาหกรรมผลิตโลหะและปูนซีเมนต์ มีค่าเท่ากับ 0.617 และ 0.332 ผลของการพยากรณ์ความต้องการพลังงานไฟฟ้าของภาคอุสาหกรรม อุตสาหกรรมผลิตโลหะและอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ในช่วง พ.ศ. 2545-2551 มีอัตราการขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 4.52, 3.90 และ 3.52 ต่อปีตามลำดับ ผลของการพยากรณ์ความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของภาคอุตสาหกรรม มีอัตราการขยายตัวเฉลี่ยประมาณ 500 เมกะวัตต์ต่อปี

**พิศิษฏ์ จารุมณีโรจน์** (2548)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์สำคัญอยู่ที่การศึกษา และวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานในอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนต้นน้ำของประเทศไทย โดยใช้ดัชนีดิวิเซีย (Divisia Index) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มพลังงาน (Energy Intensity) และการเปลี่ยนแปลงมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งผลของการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับจัดทำข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการจัดการด้านพลังงานของอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนต้นน้ำ สำหรับข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการจัดการด้านพลังงานนั้นถูกรวบรวมขึ้นมาจาก กรณีศึกษาโครงการด้านพลังงานที่สำคัญ และเทคนิคการจัดการด้านวิศวกรรมแบบต่างๆ ซึ่งเทคนิคหนึ่งที่นำมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานคือการใช้วิศวกรรมคุณค่าหรือการวิเคราะห์คุณค่า (Value Engineering, VE หรือ Value Analysis, VA) ได้ถูกนำไปใช้ในโครงการต่างๆ โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดต้นทุนอย่างเป็นระบบโดยคงคุณภาพไว้ แนวคิดหลักของวิศวกรรมคุณค่า คือ การมีจิตสำนึกเกี่ยวกับประโยชน์การใช้งาน และต้นทุน ซึ่งสามารถแสดงออกมาในรูปของคุณค่า และการอนุรักษ์พลังงานที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้เป็นค่าประเมินในการประเมินการอนุรักษ์พลังงานในส่วนของการวิเคราะห์สถานการณ์ต่อไป

**มนัส วัฒนธรรม** (2524)

จากวิทยานิพนธ์ เรื่อง การประหยัดพลังงานในโรงงานทอผ้า ได้กล่าวถึงพลังงานเป็นทรัพยากรของโลกที่มีอยู่อย่างจำกัด การใช้พลังงานจำเป็นต้องมีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในทางประหยัดและให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุดและในแนวคิดที่จะใช้ทรัพยากรทางพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดนั้นคือ แนววามคิด Energy LAG

LAG เป็นคำที่รวมมาจาก

L = Loss หมายถึง การสูญเปล่าของพลังงานในการปล่อยความร้อนทิ้งหรือรั่วไหล

A = Allowance หมายถึง ความฟุ่มเฟือยในการใช้พลังงานไปในการผลิตเพื่อปริมาณคุณภาพ และเวลาอันมีสาเหตุมาจากเงื่อนไขของการปฏิบัติงาน

G = Gap หมายถึง ช่องว่างในการออกแบบและเงื่อนไขการออกแบบและเงื่อนไขการใช้งาน โดยต้องคำนึงถึงปริมาณของ Load และประสิทธิภาพ

ดังนั้น LAG จึงเป็นการรวมของข้อสูญเสียในการใช้พลังงานไปอย่างไร้ประสิทธิภาพ

**มาริษา ภู่ภิญโญกุล** (2540)

ได้กล่าวถึงการ Benchmark ว่าเป็นการสะท้อนให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างกัน เพื่อให้เห็นจุดแตกต่าง หรือ ช่องว่าง (Gap) ระหว่างสภาพ/ ความสามารถของตนเอง กับผู้ที่เหนือกว่า หรือเก่งกว่านั่นเองอย่างไรก็ตาม ความสำคัญของ BENCHMARKING นั้นไม่ได้หยุดอยู่ที่การรับรู้ว่าตนเองอ่อนด้อย หรือห่างชั้นกว่าผู้ที่เก่งที่สุด (The Best) มากน้อยแค่ไหนเท่านั้น หากแต่ยังรวมไปถึงว่า The Best เหล่านั้นทำอย่างไร (How) จึงเก่งกาจเช่นนั้นได้ การเรียนรู้และพัฒนาจากผู้ที่เก่งกว่าเช่นนี้ จะทำให้ตนเองมีเป้าหมายที่ท้าทายและเป็นไปได้ (เพราะผู้ที่เก่งที่สุดเคยทำได้มาก่อน) ย่อมทำให้เกิดการพัฒนาอย่างก้าวกระโดด จึงพอสรุปได้ว่า BENCHMARKING เป็นเครื่องมือ/ กลไกในการพัฒนา และนำไปสู่การจัดการบริหารองค์กร หรือ หน่วยงานหรือกระบวนงาน เพื่อวัด-เปรียบเทียบสมรรถนะของตนกับผู้เก่งกว่าหรือเก่งที่สุด และเรียนรู้วิธีการเพื่อก้าวสู่ความเป็นที่สุด หรือเหนือกว่าในด้านนั้นๆ

**วิโรจน์ โชติปฏิเวชกุล** (2541)

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อวิเคราะห์ถึงความสามารถในการผลิตเพื่อทดแทนการนำเข้าของอุตสาหกรรมยาในประเทศไทย โดยข้อมูลส่วนใหญ่ได้มาจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข ในช่วงปี พ.ศ. 2528-2537 และได้ทำการวิเคราะห์ โดยใช้วิธีสมการถดถอยอย่างง่าย เพื่อดูแนวโน้มของมูลค่าการบริโภค การผลิต และการนำเข้า ของอุตสาหกรรมยาของไทย ในช่วงปี พ.ศ.2538-2552

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ามูลค่าการบริโภคยาภายในประเทศเพิ่มขึ้นจาก 18,245 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2538 เป็น 35,358 ล้านบาทในปี พ.ศ.2552 ในขณะที่การผลิตยาภายในประเทศเพิ่มขึ้นจาก 13,360 ล้านบาท ในปีพ.ศ. 2538 เป็น 25,583 ในปีพ.ศ.2552 ซึ่งมูลค่าการบริโภคยาภายในประเทศมากกว่ามูลค่ายาที่ผลิตขึ้นได้ภายในประเทศ ผลก็คือประเทศไทยต้องนำยาเข้าจากต่างประเทศ จาก 6,047 ล้านบาท ในปีพ.ศ. 2538 เพิ่มขึ้นเป็น 12,034 ล้านบาท ในปี 2552 โดยสรุปแล้วการศึกษานี้ทำให้ทราบว่าประเทศไทยยังไม่ประสบความสำเร็จอย่างน่าพอใจในการพัฒนาอุตสาหกรรมยาเพื่อทดแทนการนำเข้า อุตสาหกรรมยาของไทยยังคงต้องพึ่งพาการนำเข้าวัตถุดิบทางยาสำหรับการผลิตและยาสำเร็จรูปสำหรับการบริโภคเป็นจำนวนมากจากผู้ผลิตต่างประเทศต่อไปอีกนาน

**วีระพงษ์ ประสาทศิลป์** (2541)

ได้ศึกษาวิจัยเรื่อง การประหยัดพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า กรณีศึกษา โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมพระนครใต้ ชุดที่ 1 ได้ทำการสรุปว่า การใช้พลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้พลังงานเชื้อเพลิงต่อหน่วยผลิตไฟฟ้าให้น้อยลง โดยพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบกับสมรรถนะเป็นส่วนสำคัญ

ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของ กังหันก๊าซ คือ

1. ระดับความสูงที่ติดตั้งเครื่องจักร (Altitude)
2. ความดันไอเสีย (Exhaust Pressure)
3. การเสื่อมสภาพของกังหันก๊าซ (Gas Tubine Degradtion)
4. ความดันอากาศขาเข้า (Intet Pressure)
5. อุณหภูมิที่มีทางเข้าคอมเพรสเซอร์ (Air Inlet Temperature)
6. ความสะอาดของคอมเพรสเซอร์ (Cleanliness of Compressure)

การรักษาสมรรถนะของกังหันก๊าซโดยลงทุนน้อยที่สุดนั้นสามารถกำหนดได้โดยการรักษาความสะอาดของ คอมเพรสเซอร์ และทำ PM (Preventive Maintenance) โดยตรวจสอบสภาพเครื่องจักร กังหันก๊าซ ตามระยะเวลา ประจำวัน ประจำสัปดาห์และประจำเดือน เพื่อทำการแก้ไขก่อนเกิดความเสียหาย

**อมรรัตน์ แก้วประดับ และพิชัย นามประกาย** (2548)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์การใช้พลังงาน นำเสนอแนวทางการประหยัดพลังงาน และวิธีการหาค่า SEC ในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโลหะ ซึ่งหมายถึง ปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่อหนึ่งหน่วยของผลผลิตที่ได้จากกระบวนการผลิตนั้น ๆ ซึ่งอาจเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$SEC = \frac{E}{P}$$

SEC = ค่าดัชนีชี้วัดการใช้พลังงาน

E = ปริมาณพลังงานที่โรงงานใช้ในเดือนนั้น

P = ปริมาณผลผลิตในช่วงเดียวกัน

เนื่องจากเป็นโรงงานที่มีการใช้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับโรงงานประเภทอื่นๆได้ จากผลการศึกษาพบว่าลักษณะการใช้พลังงานภายในโรงงานประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ การใช้พลังงานไฟฟ้าและการใช้พลังงานความร้อน จากผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานในโรงงานดังกล่าวจึงนำเสนอมาตรการประหยัดพลังงานทางด้านไฟฟ้า ได้แก่ แนวทางการประหยัดพลังงานสำหรับเครื่องอัดอากาศ การลดค่า

ความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด การใช้บัลลาสต์ขดลวดชนิดที่มีการสูญเสียต่ำ การบำรุงรักษาเครื่องปรับอากาศและการแก้ไขค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ในระบบไฟฟ้าและทางด้านความร้อน ได้แก่ แนวทางการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์

**เอกสิทธิ์ สุวรรณศรี** (2543)

จากวิทยานิพนธ์ เรื่องการปรับปรุงการจัดการด้านพลังงานในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ได้ทำการสรุปว่า การดำเนินการปรับปรุงการจัดการด้านพลังงานในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะช่วยทำให้อัตราการใช้พลังงานความร้อนต่อปริมาณเม็ดปูน โดยมีวิธีการแนวทางการปรับปรุงการจัดการด้านพลังงานดังนี้

1. การกำหนดนโยบายจากผู้บริหารระดับสูงและกำหนดเป้าหมายในการดำเนินงาน
2. กำหนดแผนงานหลักในการดำเนินการปรับปรุงการจัดการด้านพลังงานและแผนในระดับแผนก
3. ปรับปรุงองค์กรดำเนินงานให้เข้าถึงทุกส่วนในกระบวนการผลิต
4. วางแผนการเดินเครื่องจักรในกระบวนการผลิตให้เหมาะสม โดยการควบคุมปริมาณความต้องการไฟฟ้าสูงสุด
5. ปรับปรุงระบบการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยจัดทำเอกสารมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบและทำการจัดตั้งทีมงานในการตรวจสอบการใช้พลังงานอย่างต่อเนื่อง
6. ปรับปรุงกระบวนการติดตามการปรับปรุงแก้ไขการดำเนินงานที่เกิดขึ้น

**วิรัชช พาณิชวงศ์** (2545)

ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์การถดถอย คือการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหนึ่งเรียกว่าตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนอง (dependent variable or response variable) และตัวแปรอื่นหนึ่งตัวหรือมากกว่าหนึ่งตัว เรียกว่า ตัวแปรอิสระหรือตัวพยากรณ์ (independent variable or predictor variable) มีวัตถุประสงค์ที่จะประมาณหรือพยากรณ์ค่าตัวแปรตามซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มจากตัวแปรอิสระ ซึ่งเป็นค่าที่ทราบค่าหรือค่าคงที่ (known or fixed values)

ตัวอย่าง นักเศรษฐศาสตร์การเกษตร สนใจที่จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตข้าวกับอุณหภูมิ , ปริมาณน้ำฝน, ปริมาณแสงอาทิตย์ และปุ๋ย การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบนี้อาจจะสามารถนำไปทำนายหรือพยากรณ์ผลผลิตเฉลี่ยของข้าวได้ เมื่อกำหนดตัวแปรอิสระต่างๆ มาให้

จากตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรหนึ่งตัวขึ้นกับตัวแปรอื่นๆ หนึ่งตัวหรือมากกว่าหนึ่งตัว ซึ่งอาจมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงหรือไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การวิเคราะห์ถดถอย คือวิธีการหนึ่งสำหรับหาฟังก์ชันพยากรณ์ เพื่อที่จะพยากรณ์ตัวแปรสุ่ม Y จากตัวพยากรณ์ X1, $X_2$,..., $X_k$ ฟังก์ชันที่ใช้พยากรณ์นี้เรียกว่า ฟังก์ชันถดถอย (regression function) ของ Y บน X1, $X_2$,..., $X_k$ อาจเขียนแทนด้วย $\mu_Y(X_1,\ldots,X_k)$ และกรณีตัวแปรอิสระมีตัวเดียวเขียนแทนด้วย $\mu_Y(X)$

*การถดถอยอย่างง่ายและการถดถอยพหุคูณ*

การถดถอยอย่างง่าย เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปร ส่วนการถดถอยพหุคูณ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง 3 ตัวขึ้นไป โดยที่ตัวแปรหนึ่งคือ ตัวแปรตาม ตัวแปรอื่นๆเป็นตัวแปรอิสระ ซึ่งมีจำนวนตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป และในกรณีที่ตัวแปรอิสระเหล่านี้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับตัวแปรตาม เรียกว่า การถดถอยเชิงพหุคูณ (multiple linear regressions)

*การถดถอยเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ (Regression VS Correlation)*

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับการวิเคราะห์การถดถอย แต่มีแนวคิด (concept) แตกต่างกันมาก การวิเคราะห์สหสัมพันธ์มีจุดประสงค์ที่จะวัดระดับหรือองศาของความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง ตัวแปร 2 ตัว ดัชนีที่ใช้วัดความสัมพันธ์นี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient)

การถดถอยและสหสัมพันธ์มีพื้นฐานบางสิ่งที่แตกต่างกัน ในการวิเคราะห์การถดถอย ตัวแปรตามจะเป็นตัวแปรสุ่ม (random or stochastic) จึงมีการแจกแจงความน่าจะเป็น ขณะที่ตัวแปรอิสระถูกสมมติให้มีค่าคงที่ (fixed values) สำหรับการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ เรากำหนดให้ตัวแปรทั้งสองสมมาตรกัน ไม่มีความแตกต่างระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ ตัวอย่างเช่น ความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนวิชาสถิติและวิชาอังกฤษจะเหมือนกับความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนวิชาอังกฤษและสถิติ นั่นคือตัวแปรทั้งสองถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรสุ่ม

**งานวิจัยภาษาอังกฤษ**

Andy Hrtley (2003)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมขวดแก้วโดยหาปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานที่เตาหลอม เพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการควบคุมเตาหลอมและใช้พลังงานเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาตามหลักทฤษฎีแล้วพบว่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมแก้วมี 3 องค์ประกอบ คือ

1. พลังงานความร้อนทางเคมีเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งใช้พลังงานประมาณ 155 kWh ต่อแก้ว1 ตัน
2. พลังงานความร้อนที่ใช้เพื่อให้วัตถุดิบเกิดการหลอมเป็นน้ำแก้ว ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เรียกพลังงานนี้ว่า " Sensible Heat " ซึ่งใช้พลังงานประมาณ 440 kWh ต่อแก้ว1 ตัน
3. พลังงานความร้อนที่ต้องใช้เพื่อทดแทนความร้อนที่สูญเสียออกไปจาก Waste heat ซึ่งใช้พลังงานประมาณ 170 kWh ต่อแก้ว1 ตัน

จากนั้นนำมาหาสมการการใช้พลังงานของเตาเผาได้สมการคือ

*Furnace Energy = Holding Heat + Cullet Glass x Constant + Virgin Glass x Constant*

โดย พลังงานที่เตาหลอมใช้นั้นไม่รวมพลังงานไฟฟ้า

และเมื่อพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานของเตาหลอม พบว่ามีปัจจัยดังนี้

- อุณหภูมิของเตาหลอม
- ความชื้นในวัตถุดิบและเศษแก้ว ( Cullet)
- อายุเตาหลอม

Charles Freeman & Johns Manville (2004)

งานวิจัยนี้กล่าวถึงภาพรวมของประสิทธิภาพการใช้พลังงานและความต้องการในอนาคตสำหรับกระบวนการหลอมและให้ความร้อนของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก ซึ่งในปัจจุบันค่า Specific Energy consumption ( SEC ) ของอุตสาหกรรมกลุ่มนี้มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจากในอดีต จึงเป็นการชี้ให้เห็นว่าอุตสาหกรรมแก้วและกระจกมีการปรับปรุงการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยค่า SEC ในกระบวนการหลอมแก้วตามทฤษฎีนั้นอยู่ที่ประมาณ 2.2 MMBTU/ton แต่ค่า SEC ในกระบวนการหลอมแก้วจริงอยู่ที่ประมาณ 3.8 – 10 MMBTU/ton ซึ่งค่าพลังงานเป็นต้นทุนในการผลิตประมาณ 15% โดย กระบวนการหลอมและขึ้นรูปคิดเป็น 7-10% ของต้นทุนทั้งหมด ส่วนอุปกรณ์และ Utility อื่นๆ คิดเป็น 5% ของต้นทุนทั้งหมด

แรงผลักดันที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกคือ

- ต้นทุนด้านพลังงานที่สูงขึ้น
- การควบคุมสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวดมากขึ้น
- การต่อต้านก๊าซเรือนกระจก
- การแข่งขันกับวัสดุประเภทอื่นที่สามารถนำมาทดแทนการใช้แก้วและกระจกได้
- การแข่งขันจากการลดต้นทุนในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

นอกจากนี้ยังได้เสนอกลยุทธ์เพื่อประหยัดพลังงาน ดังนี้

- พัฒนาฉนวนกันความร้อน
- พัฒนาประสิทธิภาพในการเผาไหม้
- นำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้กลับมาใช้ (Recycling)
- การพัฒนาเทคนิคในกระบวนการผลิตและการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพ
- การใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น Electric Boosting , Bubbling , Control เป็นต้น
- การนำเทคนิคแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตแบบใหม่ๆ
- การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและควบคุมการผลิต

David Rue (2005)

David Rue ได้ศึกษาเทคโนโลยีการหลอมแก้วแบบใหม่คือเทคโนโลยีการหลอมแก้วแบบ Submerged Combustion Melting (SCM) มีการหลอมแบบนี้คือผสมอากาศกับเชื้อเพลิงหรือออกซิเจนกับเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าไปในอ่างหลอม (Pool of hot melt) ก๊าซที่เกิดจากการสันดาปก่อตัวเป็นฟองอากาศขึ้นผ่านไปในอ่างหลอมทำให้มีการถ่ายเทความร้อนไปสู่วัตถุที่อยู่ในอ่าง (Bath material) ในอัตราที่สูงและเกิดการผสมแบบปั่นป่วน(Turbulent mixing) ทำให้วัตถุหลอมเหลวที่มีส่วนผสมของผลิตภัณฑ์เป็นเนื้อเดียวกันสามารถระบายออกจากวาล์ว(Tap) ที่อยู่ใกล้บริเวณก้นอ่าง ข้อดีของการหลอมแบบนี้คือลดการใช้พลังงานในกระบวนการหลอมลงมากกว่าร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับเตาหลอมประเภทอื่น การใช้อิฐทนไฟ(Refractory)ในเตาหลอมลดลง มากกว่าร้อยละ 80 ขนาดเตาหลอมลดลง ทำให้ราคาเตาหลอมลดลง เทคโนโลยีนี้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมฉนวนใยแก้วซึ่งเป็นเตาหลอมขนาดเล็ก ในปัจจุบันกำลังวิจัยและพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่มีเตาหลอมขนาดใหญ่เช่นอุตสาหกรรมขวดแก้ว อุตสาหกรรมกระจกแผ่น เป็นต้น

David M. Rue and Warren Wolf (2005)

David M. Rue and Warren Wolf ได้ทำการสำรวจการบริโภคพลังงานและเทคโนโลยีที่ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศสหรัฐอเมริกาทั้ง 4 อุตสาหกรรมหลักดังนี้ อุตสาหกรรมกระจก อุตสาหกรรมขวดแก้ว อุตสาหกรรมเครื่องแก้ว และอุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว โดยได้แบ่งการสำรวจสัดส่วนการบริโภคพลังงานในแต่ละกระบวนการผลิตคือ กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ กระบวนการหลอม กระบวนการขึ้นรูป และกระบวนหลังการขึ้นรูป จากการสำรวจพบว่ากระบวนการหลอมมีสัดส่วนการบริโภคพลังงานมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 60 – 80 โดย David M. Rue and Warren Wolf ยังได้ทำการสำรวจค่า SEC ของการหลอมแก้วทางทฤษฎี, เทคโนโลยีที่ดีที่สุดในปัจจุบัน, ค่าเฉลี่ยในแต่ละอุตสาหกรรม และแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดในแต่ละอุตสาหกรรมแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้เห็นภาพรวมของการบริโภคพลังงานและค่า SEC ที่จะสามารถลดลงได้ เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานได้ต่อไปและได้เสนอมาตรการที่เป็นแนวทางการอนุรักษ์พลังงานเช่น มาตรการใช้เศษแก้วในการหลอมวัตถุดิบ มาตรการอุ่นวัตถุดิบ มาตรการอุ่นเศษกระจก มาตรการการใช้ออกซิเจนในการสันดาป มาตรการมาตรการปรับปรุงระบบควบคุม เป็นต้น

นอกจากนี้ยังได้จัดทำแบบสอบในแต่ละอุตสาหกรรมถึงแนวทางการอนุรักษ์พลังงานในแต่ละกระบวนการผลิต พบว่าการนำความร้อนทิ้งจากเตาหลอมมาใช้ในการอุ่นวัตถุดิบและเศษแก้วมีความเป็นไปได้และสามารถอนุรักษ์พลังงานได้เหมาะสมที่สุด

Douglas W. Freitag (2003)

ประเทศสหรัฐอเมริกาได้พัฒนาและปรับปรุงด้านพลังงานและเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมภายในประเทศเพื่อเพิ่มผลิตภาพ(Productivities) เพิ่มศักยภาพในการแข่งขัน และสามารถลดปัญหาด้านมลพิษด้วย การดำเนินงานนี้มีกระทรวงพลังงานของประเทศเป็นผู้สนับสนุน โดยเน้นไปที่อุตสาหกรรมที่มีการใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบและบริโภคพลังงานสูงคิดเป็นร้อยละ 75 ของการบริโภคพลังงานทั้งหมดของอุตสาหกรรมในประเทศ ซึ่งมี 8 อุตสาหกรรมดังนี้คือ

- อุตสาหกรรมอะลูมินัม
- อุตสาหกรรมแก้วและกระจก
- อุตสาหกรรมปิโตรเลียมและการกลั่น
- อุตสาหกรรมเคมี
- อุตสาหกรรมโลหะ
- อุตสาหกรรมเหล็ก
- อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับป่าไม้
- อุตสาหกรรมแร่

การดำเนินงานนั้นได้มีการวางแผนกลยุทธ์ระยะยาวทั้งในงบประมาณด้านการพัฒนาและปรับปรุงเทคโนโลยี ทิศทางสำหรับการวิจัยและพัฒนาในอนาคต ความเสี่ยงในอุตสาหกรรม รวมทั้งทิศทางของอุตสาหกรรมในอนาคตด้วย อุตสาหกรรมแก้วและกระจกได้มีการศึกษาโดย Douglas W. Freitag ซึ่งได้กล่าวว่าอุตสาหกรรมแก้วและกระจกเป็นอุตสาหกรรมสำหรับในอนาคต เพราะแก้วและกระจกสามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้และสามารถนำมาทดแทนวัสดุอื่นๆได้เช่นใช้เป็นผนังแทนการก่อผนังอิฐ เป็นต้น ดังนั้นอุตสาหกรรมนี้จึงต้องมีการวางแผนและกลยุทธ์อย่างจริงจัง เพื่อรองรับกับความต้องการใช้วัสดุแก้วและกระจกและการเติบโตของเศรษฐกิจ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาภาพรวมของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก และมุ่งเน้นไปที่ทิศทางและโครการสำหรับการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในอุตสาหกรรมเช่น โครงการการพัฒนาการใช้ออกซิเจนในการสันดาปให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและนำมาใช้ในเตาหลอมแบบ End-Port ได้ โครงการพัฒนาและปรับปรุงระบบการเผาไหม้ โครงการพัฒนากระบวนการเคลือบผิวกระจก เป็นต้น

Energetics (1994)

ได้ทำการศึกษาการพัฒนาอิฐทนไฟ(Refractory) ของเตาหลอมในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก โดยเตาหลอมเป็นเครื่องจักรที่มีสัดส่วนการบริโภคพลังงานสูงที่สุด และพลังงานความร้อนเหล่านั้นมีบางส่วนที่สูญเสียความร้อนไปที่ผนังเตา ดังนั้จึงต้องควบคุมไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากจนเกินไป วัสดุที่ใช้ทำเป็นอิฐทนไฟของเตาต้องทำการศึกษาและเลือกใช้ให้เหมาะสม เพราะอาจเป็นสาเหตุให้อิฐทนไฟ (Refractory)เกิดการกัดกร่อน ทำให้อายุการใช้งานเตาหลอมลดลง และยังมีผลต่อคุณภาพของน้ำแก้วอีกด้วย ซึ่ง Energetics ได้ศึกษาชนิดของอิฐทนไฟที่นำมาใช้ในส่วนต่างๆของเตาหลอมดังนี้คือ ที่ด้านล่างของอ่างเตาหลอม ที่ผนังของเตาหลอม และที่หลังคาของเตาหลอมโดยพบว่าอิฐทนไฟที่มีคุณภาพดีต้องใช้วัสดุ Alumina-Zirconia- Silica ที่มีคุณภาพสูงจึงจะทำให้เตาหลอมมีอายุการใช้งานได้นาน การสูญเสียความร้อนผ่านอิฐทนไฟน้อยลงและป้องกันการกัดกร่อนของน้ำแก้วได้ดี นอกจากนี้ที่บริเวณข้อต่อระหว่างผนังเตาและหลังคาเตาควรใช้อิฐทนไฟที่มีส่วนประกอบของเซอคอน($ZrSiO_4$) เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของน้ำแก้วในมุมที่เป็นจุดอับทึบในเตาหลอม

G.A. Boyd (July 2006)

ได้เสนองานวิจัยเรื่องDevelopment of a Performance-Based Industrial Energy Efficiency Indicator for Cement Manufacturing Plants ในองค์กรที่เกี่ยวข้องกับการจัดการด้านพลังงาน โปรแกรมที่มีศักยภาพช่วยสนับสนุนในการประหยัดพลังงาน ถ้าโปรแกรมนั้นนำไปใช้อย่างเหมาะสม เป็นกุญแจสำคัญช่วยให้บรรลุผลในการประหยัดพลังงานสามารถคำนวณหาระดับสมรรถนะของพลังงานโดยการเปรียบเทียบกับสมรรถนะของโรงงาน โดยการจัดการการผลิตสามารถกำหนดเป้าหมายของประสิทธิภาพพลังงานโดยใช้สมรรถนะเป็นตัวชี้วัด EPA, Energy Star Program ได้มีการพัฒนาด้านสมรรถนะพลังงานในโรงงาน (EpI) ให้การสนับสนุน

ในงานวิจัยนี้อุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์หาระดับตัวชี้วัดประสิทธิภาพของพลังงานในแต่ละส่วนของการผลิตต่างๆในโรงงาน เช่น Including Portland cement และการผลิตปูนซีเมนต์ประเภทพิเศษอื่นๆ ใน USA. เมื่อพิจารณาสิ่งที่มีบทบาทตัวชี้วัดสมรรถนะเป็นพื้นฐานในการตัดสินใจ ขั้นตอนพัฒนาเครื่องมือชี้วัดรวมผลกระทบกับอุตสาหกรรม ข้อมูลที่น่าวางใจสำหรับตัวชี้วัดและการปฏิบัติจริงและใช้เป็นตัวชี้วัด เช่น พนักงานใน EPA มีความสมัครใจปรับปรุงการใช้พลังงานมีการถกเถียงอยู่เช่นกัน งานวิจัยนี้บรรยายถึงข้อมูลและวิธีการทางสถิติโดยใช้โครงสร้างของEPI for cement manufacturing plants โดยเฉพาะสมการที่แสดงโดยใช้เชื่อมโยงกับ Excel

Model Estimates

$$E_i = \beta_0 + \beta_1 \ln(\text{capacity}) + \beta_2 \ln(\text{labor hours}) + \beta_3 \ln(\text{total cement production}) + \beta_4 \ln(\text{number of kilns}) + \beta_5 \ln(\text{masonry}) + \beta_6 \ln(\%4 \text{ or other}) + \beta_7 \ln(\% \text{ wet}) + \varepsilon_i$$

Gale A.Boyd & Joseph X. Pang (1999)

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเชื่อมโยงระหว่างผลิตภาพ (Productivity) และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy efficiency) ในที่นี้หมายถึงความเข้มพลังงาน (Energy intensity) คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานต่อผลผลิต ของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกโดยศึกษาจากโรงงานตัวอย่าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 Segment คือ โรงงานผลิตกระจกแผ่นเรียบ และโรงงานผลิตขวด โดยนำข้อมูลจาก Census Bureau มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอย (Regression analysis) เพื่อวิเคราะห์หาความเชื่อมโยงดังกล่าว

นิยามเป็นสมการ คือ $Y = f(X)$

เมื่อกำหนดให้

Y = Output

X = Input คือ สิ่งที่ใส่เข้าไปในกระบวนการผลิต

โดย Input ที่กำหนดมีหลายตัวแปรดังนี้

K - Capital Stock

L - จำนวนพนักงาน (คิดจากชั่วโมงการทำงานของพนักงานทั้งโรงงาน)

E - ปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (หน่วย kWh)

F - ค่าต้นทุนพลังงานเชื้อเพลิง

M - ค่าต้นทุนวัตถุดิบ

จากผลการวิเคราะห์พบว่า Productivity มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับความเข้มพลังงาน ซึ่งอธิบายได้จากค่าสัมประสิทธิ์ที่เชื่อมโยงระหว่าง Productivity กับความเข้มพลังงาน โดยมีความสัมพันธ์กันคือถ้า Productivity เพิ่มขึ้น 1% แสดงว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นมากกว่า 1% ซึ่งค่านี้มีนัยสำคัญกับโรงงานผลิตกระจกแผ่นเรียบ แต่ไม่มีนัยสำคัญกับโรงงานผลิตขวด นอกจากนี้ตัวแปรที่เกี่ยวข้องทางด้านเศรษฐศาสตร์ ก็มีความเกี่ยวข้องอย่างมีนัยสำคัญกับ Productivity เหมือนกัน แต่เมื่อพิจารณาที่สัมประสิทธิ์ของตัวแปรพบว่าตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อ Productivity ไม่มากนัก โดยแต่ละ Segment มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นว่าการการปรับปรุงให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ จะส่งผลให้มีการเพิ่ม Productivity มากกว่าการปรับปรุงตัวแปรอื่น เพราะตัวแปรอื่นๆ มีผลต่อ Productivity น้อยกว่าตัวแปรทางพลังงาน

German VDI. (1997)

German ได้ศึกษาเกี่ยวกับการบริโภคพลังงานของเตาหลอมในอุตสาหกรรมต่างๆพบว่าในแต่ละอุตสาหกรรมต่างก็มีเทคโนโลยีและขนาดของเตาหลอมที่แตกต่างกันส่งผลให้มีการบริโภคพลังงานที่แตกต่างกัน

Keith Jamison, Jack Eisenhauer, and Julie Rash (2002)

Keith Jamison, Jack Eisenhauer, and Julie Rash ได้กล่าวถึงแผนแม่บท (Road Map) เพื่อใช้ในการกำหนดกลยุทธ์ทั้งในด้านเศรษฐกิจและการผลิตในอนาคตของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งจัดได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ ผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกสามารถนำมาใช้งานได้หลากหลายเช่น ใช้ในการบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม นำไปใช้ในอุตสาหกรรมการสื่อสาร นำไปใช้ในอุตสาหกรรมการขนส่ง หรือนำไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น ซึ่งแผนแม่บทนี้จัดทำขึ้นเพื่อปัจจัยหลัก 3 ประการคือ เพิ่มผลิตภาพ (Productivity) ลดการบริโภคพลังงาน และการพัฒนาสิ่งแวดล้อม โดยใช้กลยุทธ์ 4 แนวทางดังนี้

1. การพัฒนาการผลิตให้มีประสิทธิภาพ โดยเน้นไปที่การวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทั้งในด้านการผลิตและการแข่งขันด้วย
2. การพัฒนาด้านการบริโภคพลังงานให้มีประสิทธิภาพ โดยการส่งเสริมการวิจัยและการใช้เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยให้การบริโภคพลังงานของอุตสาหกรรมใกล้เคียงกับการบริโภคพลังงานทางทฤษฎี
3. การลดการสร้างมลภาวะ โดยการวางกลยุทธ์ให้มีการนำเศษแก้วมาหลอมใหม่ให้มากขึ้นเพื่อให้อุตสาหกรรมมีการปล่อยมลพิษเช่นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง
4. การนำนวัตกรรมใหม่ๆมาใช้โดยมีเป้าหมายคือการนำวัสดุอื่นๆมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก้วและกระจกแทนวัตถุดิบแบบเดิมโดยที่ยังคงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแบบแก้วและกระจกได้

Sho Kobayashi, KT Wu and Leonard Switzer (2005)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำความร้อนทิ้งจากเตาหลอมที่มีการสันดาปด้วยออกซิเจนกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งพบว่าปริมาณความร้อนทิ้งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 88% ในขณะที่ปริมาณความร้อนทิ้งจากระบบการเผาไหม้โดยใช้อากาศสันดาปสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 55% ซึ่งความร้อนทิ้งนี้สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก โดยมีแนวทางดังนี้คือ

1. นำมาใช้ในการอุ่นวัตถุดิบ / เศษกระจก
2. นำมาอุ่นอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้ในการสันดาป
3. นำมาอุ่นเชื้อเพลิงที่ใช้ในการสันดาป
4. นำมาใช้ใน Boiler เพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษานี้ได้เน้นไปที่การนำความร้อนทิ้งนำมาใช้ในการอุ่นวัตถุดิบ / เศษกระจก เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถอนุรักษ์พลังงานได้โดยที่ไม่มีผลต่อกระบวนการผลิตหรือเครื่องจักรใดๆ โดยเก็บข้อมูลจากโรงงานตัวอย่างที่ผลิตขวดแก้วซึ่งได้นำความร้อนทิ้งนำมาใช้ในเศษกระจก โรงงานมีเตาหลอมที่ใช้ระบบการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนสันดาป ขนาด450 ตันต่อวัน และใช้เศษแก้ว 50% พบว่าสามารถลดการบริโภคพลังงานโดยคิดจากค่า SEC ได้ถึง 37%

Spendolini MJ (1992)

Spendolini MJ ได้ให้ความหมายของ Benchmarking ว่าเป็นกระบวนการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงขององค์กร ในอันที่จะพิจารณาว่า มีสภาพใดบ้างที่จะสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นกว่าเดิม และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับองค์กรอื่น แล้วนำความรู้ที่ได้มาจัดการวางแผนการปรับปรุงองค์กรของเรา ให้มีประสิทธิภาพ และประสิทธิผลดีขึ้น หรืออาจมองว่า เป็นกระบวนการเปรียบเทียบองค์กรกับหน่วยงานอื่น ในด้านต่างๆ โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะปรับปรุงให้ใกล้เคียง เพื่อเป็นผู้นำที่คนอื่นจะต้องใช้เราเป็น Benchmark ต่อไป

การทำ Benchmarking เริ่มเกิดที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ตั้งแต่ปี 2523 โดยเป็นกระบวนการบริหารธุรกิจ ที่มีกลยุทธ์เฉพาะตัว Benchmarking เป็นกระบวนการที่ได้จากการเรียนรู้จากผู้อื่น โดยการเปรียบเทียบกับหน่วยงานอื่นๆ ในส่วนต่างๆ ได้ โดยเป็นกระบวนการต่อเนื่อง ที่ใช้ระยะเวลาดำเนินการระยะยาว อย่างมีระเบียบแบบแผน โดยมีตัววัดความก้าวหน้าในแต่ละระยะเวลาได้ Benchmarking process เป็นกลวิธีที่เป็นประโยชน์ ในการปรับปรุงองค์กรทุกประเภท ทั้งในภาครัฐ และภาคเอกชน

การทำ Benchmarking อาจเริ่มตั้งแต่การตั้งเป้าประสงค์ภายใน และหาวิธีการปรับปรุงกระบวนการให้ดีขึ้นโดยเทียบกับภายในองค์กรของตนเอง แต่การกระทำดังกล่าว ไม่อาจให้ได้ผลดีนักถ้าไม่มีการเปรียบเทียบกับหน่วยงานอื่นที่มีการพัฒนาใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพื่อเป็นการผลักดันตนเอง ให้ทัดเทียมกับคนอื่นหรือเท่ากับว่าเราได้เรียนรู้การทำงานจากคนอื่น

The Energy Conservation Center : Output of a Seminar on Energy Conservation in Glass Industry (1993)

UNIDO ได้ร่วมมือกับประเทศญี่ปุ่นส่งเสริมให้การสนับสนุนด้านการเงินแก่ประเทศกำลังพัฒนา โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาและปรับปรุงการใช้เทคโนโลยีเพื่อให้เกิดการอนุรักษ์พลังงานเพราะในปัจจุบันปัญหาเรื่องพลังงานราคาพลังงานที่สูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ประเทศกำลังพัฒนาจึงควรให้ความสนใจมากขึ้นถึงการใช้พลังงานที่ไม่มีประสิทธิภาพประเทศเหล่านี้จึงควรเริ่มตระหนักถึงการใช้พลังงานอย่างมีขอบเขตปริมาณที่หามาได้ และควรมีความรู้การประหยัดและการอนุรักษ์พลังงานซึ่งจะเกิดผลดีแก่วิศวกรและพนักงานเครื่องจักรในประเทศที่กำพัฒนาด้วย ซึ่งอุตสาหกรรมแก้วและกระจกก็เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่โครงการนี้ให้การสนับสนุนเพราะจัดเป็นอุตสาหกรรมที่มีการบริโภคพลังงานสูง โดยมีการดำเนินการดังนี้

1. สำรวจการใช้พลังงานและประสิทธิภาพพลังงานในโรงงานตัวอย่างในประเทศสหรัฐอเมริกา

2. จัดทำคู่มือการจัดการพลังงาน การอนุรักษ์พลังงานและเทคโนโลยีการอนุรักษ์พลังงานโดยสำรวจจากอุตสาหกรรม
3. เสนอและอภิปรายแก่หน่วยงานรัฐบาลที่เกี่ยวข้อง กระทรวงอุตสาหกรรมและตัวแทนจากกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมแก้วและกระจก
4. เผยแพร่คู่มือวิธีการให้แก่ประเทศกำลังพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

จากการสำรวจกระบวนการผลิตและเทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งงานวิจัยนี้ยังได้เสนอแนวทางการจัดการพลังงานเพื่อการอนุรักษ์พลังงานในกระบวนการอบแก้วดังนี้

- ติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่เตาอบ
- ป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกไหลเข้าไปในเตาอบ
- หลีกเลี่ยงการสูญเสียความร้อนจากการเปิดตู้อบโดยการใช้ระบบสายพานลำเลียง
- เลือกใช้สายพานที่ทำด้วยสแตนเลสเพื่อป้องกันการดูดความร้อนของสายพาน

U.S. Department of energy : Glass industry of the future (2002)

กระทรวงพลังงานของประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งเป็นผู้กำหนดนโยบายและสนับสนุนการส่งเสริมประสิทธิภาพพลังงานของอุตสาหกรรมในประเทศ ได้จัดให้อุตสาหกรรมแก้วและกระจกเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งสำหรับอนาคต จึงได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์ ด้านเทคโนโลยีในกระบวนการผลิต ด้านการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิต และด้านมลภาวะที่เกิดจากกระบวนการผลิต โดยได้แบ่งอุตสาหกรรมแก้วและกระจกออกเป็น 4 อุตสาหกรรมหลักคือ

1. อุตสาหกรรมกระจกแผ่น
2. อุตสาหกรรมขวดแก้ว
3. อุตสาหกรรมเครื่องแก้ว
4. อุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว

Vishal Sardeshpande (2007)

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองการบริโภคพลังงานของเตาหลอมในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกโดยใช้หลักทางเทอร์โมไดนามิกส์ในการศึกษาถึงหลักของสมดุลดังนี้

*สมดุลมวล* : อัตราการไหลของมวลอากาศ + อัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง + อัตราการไหลของมวลวัตถุดิบ = อัตราการไหลของมวลน้ำแก้ว + อัตราการไหลของก๊าซร้อนทิ้ง

*สมดุลพลังงาน* : อัตราการให้ความร้อนของเชื้อเพลิง + อัตราพลังงานจากการอุ่นอากาศ = อัตราการสูญเสียพลังงานผ่านผนังเตา + อัตราการสูญเสียพลังงานสำหรับใช้ในการทำปฏิกิริยาของน้ำแก้ว + อัตราการสูญเสียพลังงานที่ก๊าซร้อนทิ้ง + อัตราการสูญเสียความร้อนจากการรักษาอุณหภูมิน้ำแก้ว

จากหลักของสมดุลมวลและพลังงานนำมาสร้างจำลองการบริโภคพลังงานของเตาหลอมพบว่าการควบคุมเตาหลอมและการออกแบบเตาหลอมที่ต่างกันจะส่งผลให้การบริโภคพลังงานของเตาหลอมต่างกัน

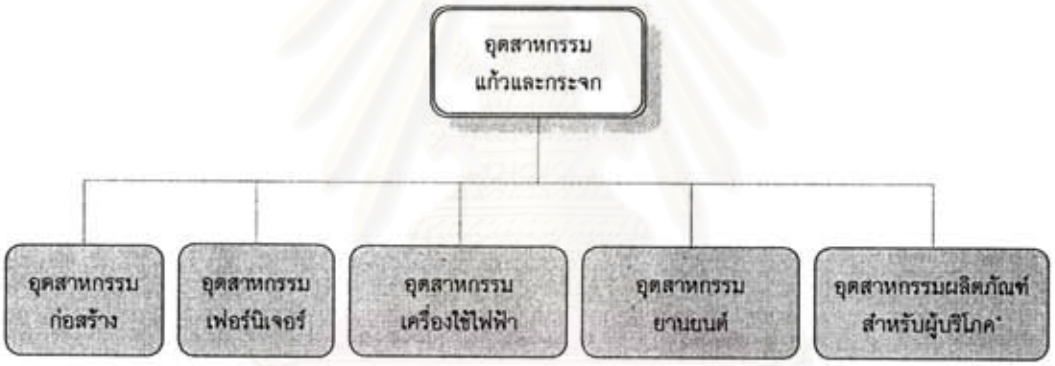
# บทที่ 3

# กระบวนการผลิตแก้วและกระจก

## 3.1 ข้อมูลพื้นฐานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

### 3.1.1 โครงสร้างของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

ภาคอุตสาหกรรมแก้วและกระจกของประเทศไทยมีจำนวนโรงงานที่ขึ้นทะเบียนกับกองควบคุมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรมทั้งสิ้น 109 โรง มีจำนวนแรงงานรวมทั้งสิ้น 14,814 คน และมีจำนวนเงินลงทุนรวมทั้งสิ้น 43,010 ล้านบาท (อ้างอิงข้อมูลปี พ.ศ. 2547) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมแก้วและกระจกจะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.1




หมายเหตุ * ผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภคเช่น เครื่องแก้วที่ใช้บนโต๊ะอาหาร ขวดแก้ว เป็นต้น

รูปที่ 3.1 โครงสร้างอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

### 3.1.2 ความเป็นมาของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

อุตสาหกรรมแก้วและกระจกเป็นอุตสาหกรรมที่มีในประเทศไทยมาเป็นเวลายาวนานแล้ว แบ่งออกเป็น 4 อุตสาหกรรม อันได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตกระจก อุตสาหกรรมขวดแก้ว อุตสาหกรรมเครื่องแก้วและอุตสาหกรรมฉนวนใย โดยสร้างรายได้เข้าประเทศเป็นมูลค่ามากกว่าปีละหมื่นล้านบาท และสินค้าที่มีมูลค่าสูงสุดคือ กระจกโฟลต (Float glass) และแก้วที่ขัดผิว

- **อุตสาหกรรมผลิตกระจก**ในประเทศไทยเริ่มมีขึ้นในปี พ.ศ. 2506 โดยมีบริษัท กระจกไทย จำกัด เป็นผู้ผลิตกระจกแผ่นชนิดกระจกซีท (sheet glass) แห่งแรก และแห่งเดียวในประเทศ ต่อมาได้ร่วมทุนกับบริษัท อาซาฮีกลาส จำกัด แห่งประเทศญี่ปุ่น จึงเปลี่ยนชื่อเป็น บริษัท กระจกไทย- อาซาฮี จำกัด และต่อมาได้มีการลงทุนนำเอาเทคโนโลยีการผลิตกระจกแผ่นแบบโฟลต (Float) ซึ่งมีคุณภาพดีทัดเทียมกับต่างประเทศ ส่งผลให้เกิดอุตสาหกรรมต่อเนื่องคือ อุตสาหกรรมผลิตกระจกนิรภัย ซึ่งได้แก่ กระจกเทมเปอร์ และ กระจกลามิเนต นอกจากนี้ยังมีการผลิตกระจกโค้งเพื่อใช้ในงานตกแต่งทางสถาปัตยกรรมเพิ่มเข้ามาอีกประเภทหนึ่ง

ตารางที่ 3.1 อุปสงค์และอุปทานกระจกภายในประเทศ ระหว่าง พ.ศ. 2538 – 2543

| ปี พ.ศ. | อุปสงค์ | | อุปทาน | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ปริมาณ | อัตราการเติบโต | ปริมาณการผลิต | นำเข้า | รวม |
| | (ตัน) | (ร้อยละ) | (ตัน) | (ตัน) | (ตัน) |
| 2538 | 320,625 | 14.0 | 537,750 | 53,190 | 590,940 |
| 2539 | 345,825 | 7.9 | 537,750 | 75,195 | 612,945 |
| 2540 | 302,355 | -12.6 | 655,740 | 51,750 | 707,490 |
| 2541 | 187,425 | -38.0 | 823,905 | 20,790 | 844,695 |
| 2542 | 208,575 | 11.3 | 641,385 | 30,825 | 672,210 |
| 2543 | 215,370 | 3.3 | 641,385 | 28,710 | 670,095 |

อ้างอิง : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์

อุตสาหกรรมกระจกมีผลผลิตเติบโตต่อเนื่องแสดงในตาราง 3.2 และ3.3ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ปริมาณการผลิต การใช้ และการส่งออกกระจก (หน่วย : เมตริกตัน)

| | 2542 | 2543 | 2544 | 2545 |
|---|---|---|---|---|
| การผลิต | 463,576 | 511,565 | 510,601 | 590,741 |
| การใช้ | 160,233 | 197,860 | 202,098 | 218,843 |
| การส่งออก | 289,651 | 279,897 | 289,202 | 360,724 |

อ้างอิง : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์

ตารางที่ 3.3 มูลค่าการผลิต การใช้ และการส่งออกกระจก (หน่วย : ล้านบาท)

| | 2542 | 2543 | 2544 | 2545 |
|---|---|---|---|---|
| การผลิต | 4,990.5 | 7,077.5 | 7671.7 | 5,761.6 |
| การใช้ | 2,039.3 | 2,839.5 | 3472.1 | 3,194.8 |
| การส่งออก | 2,951.2 | 4,238.0 | 41,996.0 | 2,566.8 |

อ้างอิง : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์

พิจารณาด้านความเชื่อมั่นปีพ.ศ. 2549 มีผลดังตารางที่3.4ดังนี้

ตารางที่ 3.4 แนวโน้มและดัชนีความเชื่อมั่นภาคอุตสาหกรรมกระจก

| อุตสาหกรรม | ปี 2549 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. | มิ.ย | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. |
| กระจก | 117.3 | 106.2 | 117.1 | 103.8 | 93.3 | 120.4 | 115.8 | 72.9 | 121.3 | 111.4 |

หมายเหตุ : อุตสาหกรรมมีค่าดัชนีอยู่ระดับที่ต่ำกว่า 100 แสดงว่าผู้ประกอบการมีความเห็นว่าสถานการณ์ด้านที่เกี่ยวกับกระจกจะไม่ดี

อ้างอิง : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์

- **อุตสาหกรรมขวดแก้วและเครื่องแก้ว**ได้เริ่มต้นขึ้นเมื่อมีการตั้งโรงงานทดลองงานเป่าแก้ว ในปี พ.ศ. 2489 สังกัดสำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหม ซึ่งต่อมาได้จัดตั้งเป็นรัฐวิสาหกิจคือ องค์การแก้ว ตามพระราชกฤษฎีกาจัดตั้งองค์การแก้วในปี พ.ศ. 2498 เนื่องจากภาวะการผลิตแก้วมีการเจริญเติบโตมากในปี พ.ศ. 2496 เอกชนจึงตั้งโรงงานผลิตแก้วรายแรกขึ้น มีชื่อว่า บริษัทอุตสาหกรรมทำเครื่องแก้วไทย จำกัด มหาชน ซึ่งเป็นการร่วมลงทุนกับบริษัทจากประเทศออสเตรเลีย ต่อมาเมื่ออุตสาหกรรมการผลิตขวดแก้วและบรรจุภัณฑ์แก้ว เติบโตอย่างต่อเนื่อง จึงได้มีการตั้งโรงงานผลิตแก้วขนาดใหญ่ขึ้นอีก 2 แห่ง คือ บริษัท บางกอกกลาส จำกัด โดยร่วมมือกับบริษัทผู้ผลิตขวดแก้วขนาดใหญ่ของเยอรมนี และ บริษัท สยามกลาสอินดัสตรี จำกัด โดยร่วมมือกับบริษัทผู้ผลิตเครื่องแก้วรายใหญ่ของญี่ปุ่น

- **อุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว**เริ่มมีขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2519-2530 โดยมีบริษัทไมโครไฟเบอร์อุตสาหกรรม จำกัด เป็นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ฉนวนใยแก้วทนความร้อนและป้องกันเสียง ทั้งชนิดม้วนและแผ่น ต่อมาได้พัฒนาแผ่นฝ้าเพดานใยแก้วสำหรับอุตสาหกรรมที่อยู่อาศัย และในปี พ.ศ. 2524ได้เริ่มมีการส่งออก ซึ่งตลาดส่งออกที่สำคัญคือ ประเทศมาเลเซีย สิงคโปร์ อินโดนีเซีย ฮ่องกง และศรีลังกา

ตารางที่ 3.5 มูลค่าการส่งออกแก้วและกระจกของไทยไปยังตลาดโลก

| ประเภทผลิตภัณฑ์ | | พ.ศ. 2539 | พ.ศ. 2540 | พ.ศ. 2541 | พ.ศ. 2542 | พ.ศ. 2543 | พ.ศ. 2544 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. โฟลตกลาสและแก้วที่ขัดผิว | มูลค่า (ล้านบาท) | 872.5 | 1,054.6 | 1,702 | 2,062.5 | 3,524.1 | 3,828.2 |
| | %การเปลี่ยนแปลง | | 20.9 | 61.4 | 21.2 | 70.9 | 8.6 |
| | สัดส่วน (ร้อยละ) | 16.4 | 18.3 | 22.6 | 26.3 | 30.0 | 33.4 |
| 2. กระเปาะแก้วและส่วนประกอบใช้ทำ | มูลค่า (ล้านบาท) | 2,233.9 | 1,891.7 | 2,513.6 | 2,016.6 | 2,355.8 | 1,357.4 |
| หลอดไฟฟ้า | %การเปลี่ยนแปลง | | -15.3 | 32.9 | -19.8 | 16.8 | -42.4 |
| | สัดส่วน (ร้อยละ) | 42.1 | 32.8 | 33.3 | 25.7 | 20.0 | 11.8 |
| 3. เครื่องใช้บนโต๊ะอาหารที่ทำด้วยแก้ว | มูลค่า (ล้านบาท) | 866.6 | 1,138.3 | 1,325 | 1,362.5 | 1,839.8 | 1,714.5 |
| | %การเปลี่ยนแปลง | | 31.4 | 16.4 | 2.8 | 35.0 | -6.8 |
| | สัดส่วน (ร้อยละ) | 16.3 | 19.7 | 17.6 | 17.4 | 15.6 | 15.0 |
| 4. กระจกนิรภัยและกระจกรถยนต์ | มูลค่า (ล้านบาท) | 449.8 | 526.9 | 684.6 | 1,102.1 | 1,597.0 | 1,616.3 |
| | %การเปลี่ยนแปลง | | 17.1 | 29.9 | 61.0 | 44.9 | 1.2 |
| | สัดส่วน (ร้อยละ) | 8.5 | 9.1 | 9.1 | 14.0 | 13.6 | 14.1 |
| 5. แก้วและกระจกอื่น ๆ | มูลค่า (ล้านบาท) | 886.50 | 1,152.30 | 1,313.7 | 1,307.8 | 2,446.8 | 2,951.8 |
| | %การเปลี่ยนแปลง | | 30.0 | 14 | -0.4 | 87.1 | 20.6 |
| | สัดส่วน (ร้อยละ) | 16.7 | 20.0 | 17.4 | 16.7 | 20.8 | 25.7 |
| รวม | มูลค่า (ล้านบาท) | 5,309.3 | 5,763.8 | 7,538.9 | 7,851.5 | 11,763.5 | 11,468.2 |
| | %การเปลี่ยนแปลง | | 8.6 | 30.8 | 4.1 | 49.8 | -2.5 |
| | สัดส่วน (ร้อยละ) | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |

อ้างอิง : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2 ภาพรวมของกระบวนการผลิตแก้วและกระจก

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก สามารถแบ่งกระบวนการผลิตออกได้เป็น 4 กระบวนการหลัก ดังนี้

1. กระบวนการผลิตกระจกแผ่น (Flat glass)
2. กระบวนการผลิตเครื่องแก้ว (Press glass)
3. กระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว(Container glass)
4. กระบวนการผลิตฉนวนใยแก้ว (Fiber glass)

ผลิตภัณฑ์ต่างๆเหล่านี้มีกระบวนการผลิตที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 ซึ่งประกอบด้วย

1. **การเตรียมวัตถุดิบ** (Raw Materials) เตรียมวัตถุดิบต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ทรายแก้ว โซดาแอช โซเดียมซัลเฟต หินโดโลไมท์ หินฟันม้าและอื่นๆ โดยวัตถุดิบเหล่านี้จะถูกนำไปเก็บไว้ในไซโลของอาคารเตรียมวัตถุดิบ

2. **การชั่งตวงวัตถุดิบ**(Weighing) ชั่งเพื่อเตรียมการผสมวัตถุดิบตามชนิดจองสูตรการผลิต โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม

3. **การผสมวัตถุดิบ**(Mixing) คือการผสมวัตถุดิบต่างๆให้เข้ากันในโม่ผสมโดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม วัตถุดิบที่ผสมเข้ากันดีแล้วเรียกว่า "ส่วนผสม" (Batch) จะถูกลำเลียงพร้อมด้วยเศษแก้ว(Cullet) เพื่อป้อนเข้าไปในเตาหลอม (Furnace)

4. **การหลอมแก้ว** (Melting) ส่วนผสมวัตถุดิบจะถูกหลอมละลายและเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เป็นเนื้อแก้วโดยใช้พลังงานความร้อนจากน้ำมันเตา ก๊าซธรรมชาติ หรือไฟฟ้า ที่อุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียส จากนั้นน้ำแก้วจะไหลออกจากเตาหลอม ผ่านคอเตาลอมไปยังรางน้ำแก้ว (Foreheart) ของสายการผลิตแต่ละเครื่อง ซึ่งมีการควบคุมและปรับแต่งอุณหภูมิของน้ำแก้วให้สม่ำเสมอ เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แก้วแต่ละชนิดที่ต้องการผลิตได้

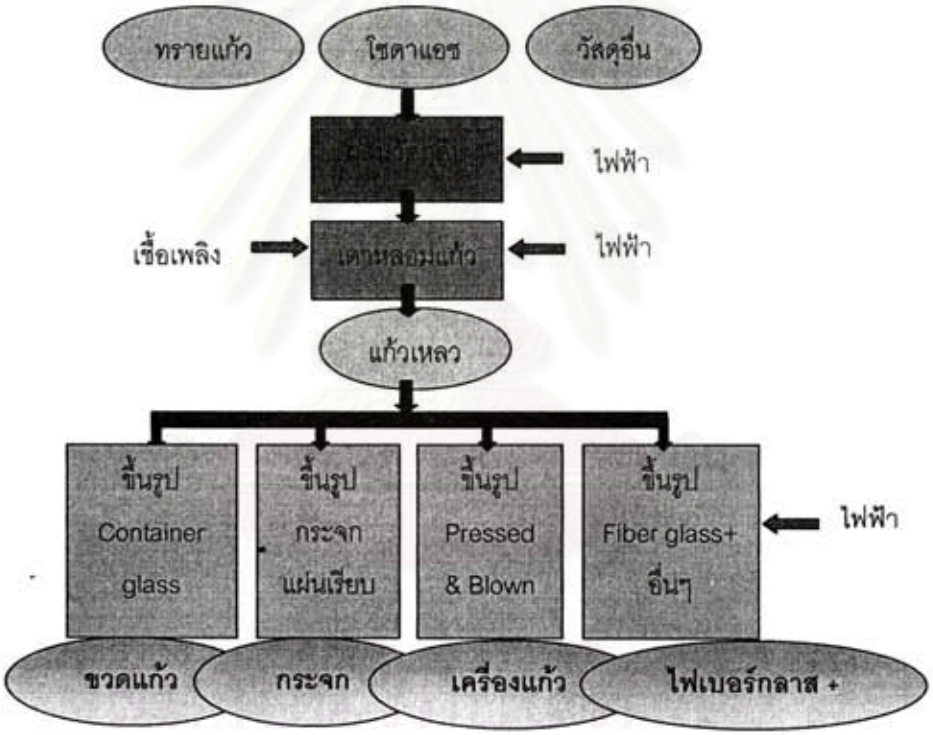
5. **การขึ้นรูป**(Forming) น้ำแก้วจะถูกตัดให้เป็นหยดน้ำแก้ว (Gobs) ตามขนาดและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก้วที่ต้องการ หยดแก้วนี้จะไหลผ่านแม่พิมพ์ (Molds) แล้วจะถูกเป่าขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูป(Forming Machine) หรือการขึ้นรูปโดยการดึงน้ำแก้วในการผลิตกระจกแผ่น

6. **การอบ** (Annealing (Lehr) ผลิตภัณฑ์แก้วที่ขึ้นรูปแล้วจะถูกเคลื่อนย้ายเข้ารางอบ (Annealing Lehr) อย่างอัตโนมัติด้วยสายพานลำเลียง เพื่อคลายความเครียดในเนื้อแก้วและทำให้ผลิตภัณฑ์แก้วแข็งแรงด้วยการค่อยๆปรับลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆจากประมาณ 500 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิปกติ หลังจากออกจากรางอบแล้ว ผลิตภัณฑ์แก้วจะถูกลำเลียงเข้าสู่สายพาน เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการตรวจสอบ

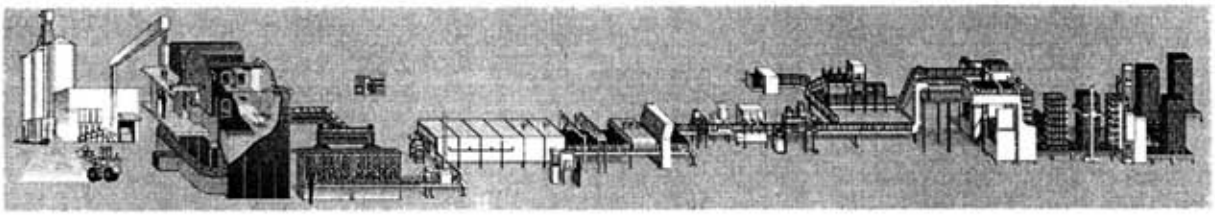
7. **การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพ** (Inspection and Quality Control) ขั้นตอนการตรวจสอบจะมี 3 ลักษณะคือ ใช้เครื่องตรวจสอบอิเลกทรอนิกส์ ตรวจสอบด้วยสายตา และการตรวจสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะตรวจสอบและควบคุมคุณภาพในเรื่อง

- ขนาดและรูปร่าง
- น้ำหนักและปริมาตร
- ทดสอบความทนทานความร้อน
- ทดสอบแรงดันภายใน

8. **การบรรจุ** (Packing) ใช้เครื่องอัตโนมัติ (Palletizer) ในการบรรจุตามชนิดของผลิตภัณฑ์ ก่อนนำไปเก็บในคลังสินค้าเพื่อรอจำหน่ายต่อไป




รูปที่ 3.2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์แก้วและกระจก



เตรียมวัตถุดิบ → หลอม → ขึ้นรูป → อบ → ตรวจสอบ → บรรจุ

(Batch & Mixing) (Melting) (Forming) (Annealing) (Inspection) (Packing)

รูปที่ 3.3 ภาพรวมของกระบวนการผลิตแก้วและกระจก

### 3.2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

สัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ซึ่งอาจจำแนกเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

| | |
|---|---|
| ทรายแก้ว | 43.3% |
| โซดาแอช | 10.8% |
| โดโลไมท์ | 9.8% |
| หินปูน | 2.5% |
| หินฟันม้า | 1.1% |
| โซเดียมซัลเฟต | 0.9% |
| เศษกระจก | 31.6% |

เหล็กออกไซด์และคาร์บอน มีเพียงเล็กน้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 **กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ**(Batch Preparation)

ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้วและกระจก มีวัตถุดิบที่ใช้หลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตว่าต้องการแก้วและกระจกแบบใด ซึ่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการหลอมแก้วนั้นจะต้องผ่านการตรวจสอบคุณภาพ โดยมีความชื้น ขนาดของวัตถุดิบ (Grain Size) และสิ่งเจือปนอื่นๆ เป็นที่ยอมรับได้ตามที่กำหนด โดยสามารถแบ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วได้เป็น 4 กลุ่ม คือ

**กลุ่มที่** 1. **วัตถุดิบที่ทำให้เกิดการหลอมเป็นน้ำแก้ว** (Formers)

1.1 **ทรายแก้ว** (Silica Sand) เป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตโดยมีซิลิก้าไดออกไซด์ ($SiO_2$) เป็นเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเกิดจากธรรมชาติ ผ่านการล้างและคัดขนาดให้เหมาะสม ทรายแก้วจะมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1,710 องศาเซลเซียส ทรายแก้วที่ดีจะต้องมีปริมาณเหล็กออกไซด์ต่ำและมีสารประกอบอื่นๆที่เป็น Impurity เจือปนน้อย เพื่อควบคุมคุณภาพแก้ว

1.2 **หินฟันม้า** (Feldspar) มีส่วนประกอบของ$Al_2O_3$ แก้วที่มีปริมาณ $Al_2O_3$ สูง จะทำให้แก้วนั้นมีความทนทานต่อการสึกกร่อนและสารเคมีได้ดีขึ้น มีบทบาทต่อเสถียรภาพและความคงทนของการป้องกันการเกิด Stain โดยที่อลูมิน่าจะยึดเหนี่ยวกับอะตอมของโซเดียม ทำให้อะตอมของโซเดียมไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวหน้าของกระจก เพื่อทำปฏิกิริยากับความชื้นได้ ทำให้ไม่เกิด NaOH นอกจากนี้ในหินฟันม้า (Feldspar) ยังมีส่วนประกอบของ $K_2O$ ที่ช่วยให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม

**กลุ่มที่** 2. **วัตถุดิบที่ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมแก้ว** (Fluxes)

2.1 **โซดาแอช** (Soda ash) มีส่วนประกอบของ $Na_2O$ แก้วที่มีปริมาณ $Na_2O$ สูง จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เปราะแตกง่าย และไม่ทนต่อสารเคมี ถ้ามีปริมาณ $Na_2O$ สูงมากๆ จะสามารถละลายน้ำได้เป็น Fluxing agent ที่ช่วยลดอุณหภูมิการหลอมเหลวของทรายแก้วให้ต่ำลง

2.2 **โซเดียมซัลเฟต** (Salt cake) อยู่ในกระจกในรูปซัลเฟต ($SO_3$) ซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับซิลิก้าที่อุณหภูมิสูง ป้องกันและลดการเกิด Silica Scum ของน้ำแก้ว และที่อุณหภูมิ 874 องศาเซลเซียส ซัลเฟตจะทำหน้าที่เป็น Wetting agent ที่ 1,450 องศาเซลเซียส ซัลเฟตจะแตกตัวเป็น $SO_2$และทำหน้าที่เป็น Refining agent ช่วยให้ก๊าซต่างๆที่เกิดจากการหลอมเหลวมีขนาดเล็ก สามารถละลายได้มากขึ้น ทำให้น้ำแก้วมีองค์ประกอบสม่ำเสมอและไม่มีฟองอากาศ

2.3 **คาร์บอน** (Carbon) เป็นตัวช่วยทำปฏิกิริยาในการหลอมเลวใช้ร่วมกับ Salt cake เพื่อเปลี่ยนเกลือ $SO_4$ ไปอยู่ในรูป $SO_3$ ซึ่งว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับซิลก้า

2.4 **สารประกอบของ**Lithium (Lithium compounds) วัตถุดิบประเภทนี้ได้แก่ Lithium carbonate , Lithium alumino silicate (Spodumane) ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้มาก เพราะช่วยลดอุณหภูมิการหลอมเหลวให้ต่ำลง ปรับปรุงคุณสมบัติของการขึ้นรูปให้ดีขึ้น ลดการเกิดDefects เป็นต้น

2.5 **โซเดียมไฮดรอกไซด์** (Coustic soda) ทำหน้าที่เป็นตัวประสานไม่ให้ส่วนผสมที่มีขนาดเล็กเกิดการฟุ้งกระจาย ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาการเกาะติดตามส่วนต่างๆของเตาหลอมได้

**กลุ่มที่** 3. **วัตถุดิบที่ช่วยรักษาสภาวะของน้ำแก้ว** (Stabilizers)

3.1 **หินปูน** (Limestone) ช่วยให้โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีกระจกมีความอยู่ตัวและทนทานต่อสภาพแวดล้อม Calcium จะทำให้กระจกมีความแข็งแรงและที่อุณหภูมิสูงทำให้น้ำแก้วไม่หนืดเกินไป มีความยืดหยุ่นทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูป นอกจากนี้ที่อุณหภูมิต่ำยังช่วยให้การแข็งตัวของกระจกเร็วขึ้น ทำให้การขึ้นรูปทำได้อย่างรวดเร็ว

3.2 **โดโลไมท์** (Dolomite) มีธาตุCaO, MgO หรือ BaO ช่วยในการขึ้นรูป ทำให้แก้วคงตัว (set) เร็วขึ้นเมื่อเย็นลง และเพิ่มความทนต่อสารเคมี แก้วที่มีปริมาณ MgO มากกว่า CaO จะทำให้ให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงามช่วยให้กระจกมีความแวววาวเป็นประกาย และช่วยป้องกันการเกิด Stain ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เกิดการณ์เกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างโซเดียมอิสระในเนื้อกระจกกับความชื้นในอากาศทำให้เกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งจะกัดกร่อนตัวกระจก หลังจากที่เก็บกระจกไว้ในที่ชื้นเป็นเวลานานๆ และยังช่วยลดอุณหภูมิในการ Annealing และแมกนีเซียมยังทำหน้าที่เป็น Fluxing agent เช่นเดียวกับ โซดาแอช รวมทั้งยังเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระจกด้วย

**กลุ่มที่** 4. **วัตถุดิบที่ทำให้เกิดสี** (Colorans)

4.1 **เหล็กออกไซด์** (Rouge) ผงเหล็กสีแดงเป็นส่วนผสมของกระจก 0.1 % เกิดสีเขียวขึ้นในเนื้อกระจกและเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติการยอมให้แสงเหนือม่วง (UV) ทะลุผ่าน ฉะนั้นจะต้องควบคุมสัดส่วนของ Rouge ให้คงที่ ถ้าปริมาณ Rouge มากเกินไปจะทำให้ยากต่อการหลอมเนื่องจาก Rouge จะไปดูดซับความร้อนจากการไหม้ ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง นอกจากนี้ ออกไซด์ อื่นๆ หากต้องการให้แก้ว หรือกระจกมีสีสันต่างๆ สามารถเติมสารนอกเหนือจากส่วนผสมข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว ดังนี้

ตารางที่ 3.6 วัตถุดิบที่ทำให้เกิดสีต่างๆ

| | |
|---|---|
| Chromium oxide (Cr2O3) | สีเขียว |
| Cobalt oxide (CoO) | สีน้ำเงิน |
| Urenium (U) | สีเหลือง |
| Nickle (Ni) | สีน้ำตาล |
| Carbon-Sulfur-Iron (C-S-Fe) | สีอำพัน |
| Manganese (Mn) | สีชมพู |

**กลุ่มที่ 5 เศษกระจก** (Cullet)

เกิดขึ้นในระหว่างการผลิต เช่น ตัดริม ตัดส่วนที่ไม่ได้ขนาด กระจกที่ไม่ได้คุณภาพ หรือซื้อมาจากแหล่งภายนอก โดย Cullet จะถูกนำมาผสมประมาณ 15 – 30% ของวัตถุดิบที่ใช้ ทำให้ช่วยลดจุดหลอมเหลวของแก้วให้ต่ำลง จึงเป็นการลดพลังงานในการหลอมได้ดีตามสัดส่วนที่ใช้เพิ่มขึ้น

สัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ซึ่งอาจจำแนกเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

ทรายแก้ว 43.3%

โซดาแอช 10.8%

โดโลไมท์ 9.8%

หินปูน 2.5%

หินฟันม้า 1.1%

โซเดียมซัลเฟต 0.9%

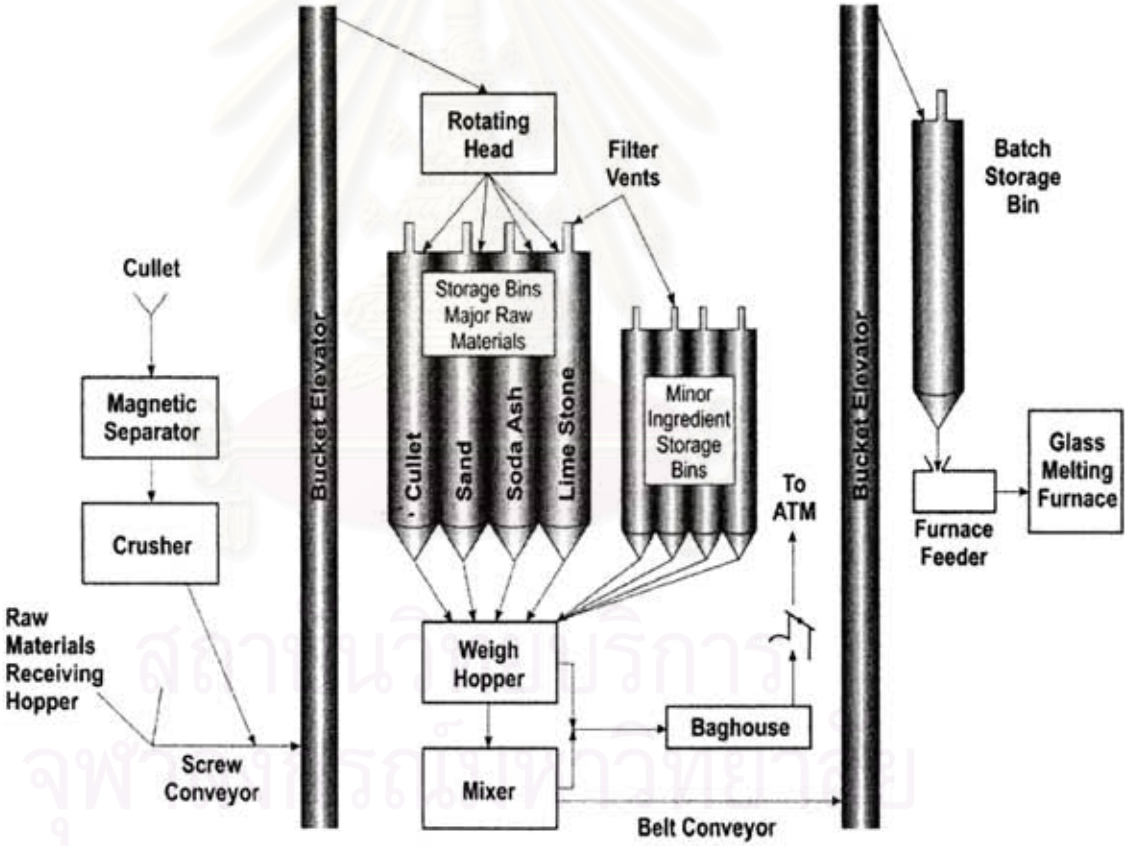
เศษกระจก 31.6%

เหล็กออกไซด์และคาร์บอน มีเพียงเล็กน้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**เครื่องจักรในกระบวนการเตรียมวัตถุดิบ**

การเตรียมวัตถุดิบ เป็นขั้นตอนการนำวัตถุดิบต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ทรายแก้ว, โซดาแอซ โซเดียมซัลเฟต, หินโดโลไมท์ ,หินฟันม้าและอื่นๆ โดยวัตถุดิบเหล่านี้หลังจากที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพแล้ว จะถูกนำไปเก็บไว้ในไซโลของอาคารเตรียมวัตถุดิบ โดยจะแยกตามชนิดของวัตถุดิบ หลังจากนั้นวัตถุดิบเหล่านี้จะถูกนำมาชั่งและนำมาผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมตามสูตรการผลิต โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม วัตถุดิบที่ผสมกันดีแล้วเรียกว่า ส่วนผสม (Batch) จากนั้นจะนำไปผสมกับเศษกระจก (Cullet) และถูกสายพานลำเลียงไปหลอมละลายในเตาหลอม (Furnace) ซึ่งพลังงานที่ใช้ในกระบวนการนี้คือพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนระบบต่างๆ เช่นมอเตอร์และสายพาน เช่น Bucket elevators , Pneumatic conveyors , Batch mixers หรือ Blenders เป็นต้น ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 4 ของพลังงานที่ใช้ในโรงงานทั้งหมด




รูปที่ 3.4 กระบวนการและเครื่องจักรในการเตรียมวัตถุดิบ

### 3.4 กระบวนการหลอม (Melting)

เมื่อวัตถุดิบถูกลำเลียงมาจากBatch house แล้วจะถูกป้อนเข้าสู่เตาหลอม ที่มีอุณหภูมิประมาณ 1,400 – 1,500 องศาเซลเซียส และเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดเป็นน้ำแก้ว ดังนี้

#### 3.4.1 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการหลอม

ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 550 – 600 องศาเซลเซียส โดยทรายแก้วจะถูกหลอมเพราะมีองค์ประกอบของโซดาแอช (Soda ash) ซึ่งเป็นFluxing agent ที่ช่วยลดอุณหภูมิการหลอมเหลวของทรายแก้วให้ต่ำลง โดยมีสมการเคมีคือ

$$Na_2CO_3 + SiO_2 \text{ à } Na_2Si_2O_5 + CO_2 \quad (550\ ^0C)$$

จากนั้นเมื่อเกิดอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจะทำให้เกิด Sodium meta-silicate ในผลึกของซิลิก้า (Silica grain) ซึ่งเรียกว่า Further Heating โดยมีสมการเคมีคือ

$$Na2SiO3 + SiO2 \text{ à } Na_2Si_2O_5 \quad (700\ ^0C)$$

จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นตั้งแต่ 760 $^0$C จะเกิดการผสมกันระหว่างโซเดียมซิลิเกตกับซิลิก้า เกิดเป็น Liquid Eutectic Mixture ในขณะเดียวกันก็เกิดปฏิกิริยาการหลอมตัวของคาร์บอเนตในLimestones เพื่อช่วยลดอุณหภูมิ(Flux) การหลอมเหลวของทรายแก้ว จนกระทั่งการหลอมเหลวถึงจุด Eutectic คือจุดที่สารประกอบเกิดการหลอมน้อยที่สุด โดยมีสมการเคมีคือ

Formation of Liquid Eutectic Mixture Reaction

$$3Na_2SiO_3 \cdot SiO_2 + SO_2 \quad (760\ ^0C+)$$

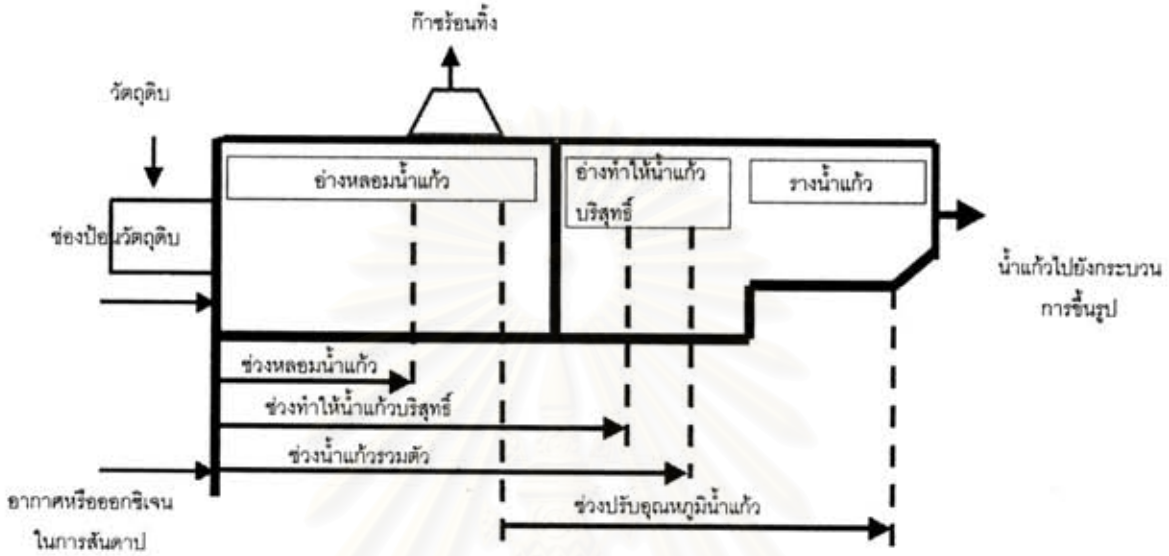
Carbonate in Limestone Decompose to Form Other Eutectic Glasses Reaction

$$CaCO_3 + nSiO_2 \text{ à } CaO \cdot nSiO_2 + CO_2 \quad (760\ ^0C+)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.4.2 กระบวนการในเตาหลอม

ในกระบวนการที่เกิดในเตาหลอม แบ่งออกเป็น 4 เฟสดังรูป คือ การหลอม (Melting), การทำให้น้ำแก้วบริสุทธิ์ (Refining) , การรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียว (Homogenizing) และการรักษาอุณหภูมิ (Thermal Conditioning) แสดงดังรูป 3.5 ซึ่งอธิบายแต่ละเฟสดังนี้



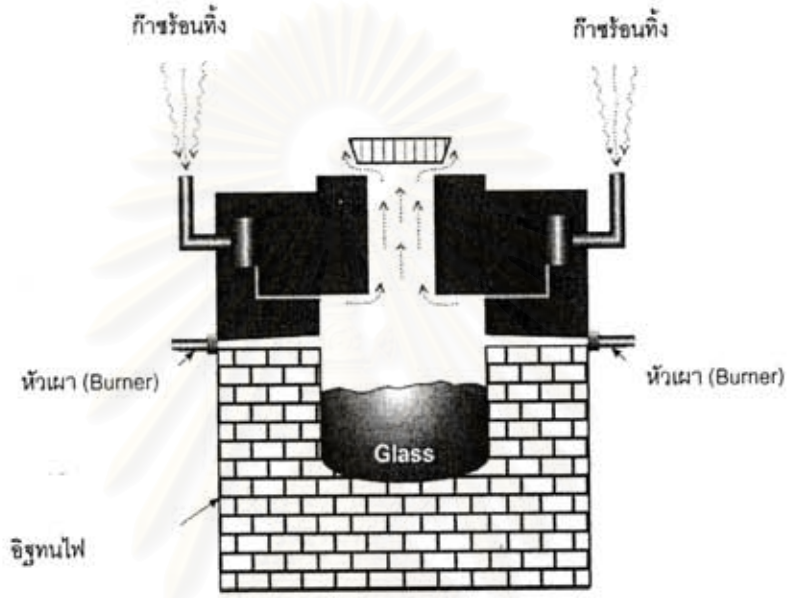

รูปที่ 3.5 กระบวนการที่เกิดในเตาหลอม

**ช่วงหลอมน้ำแก้ว** (Melting) คือช่วงที่ทำให้เกิดการหลอมของวัตถุดิบ ซึ่งอัตราการหลอมนั้นขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของเตาหลอม องค์ประกอบของส่วนผสม ขนาดของส่วนผสม(Grain size) ขนาดของ Cullet และความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสม

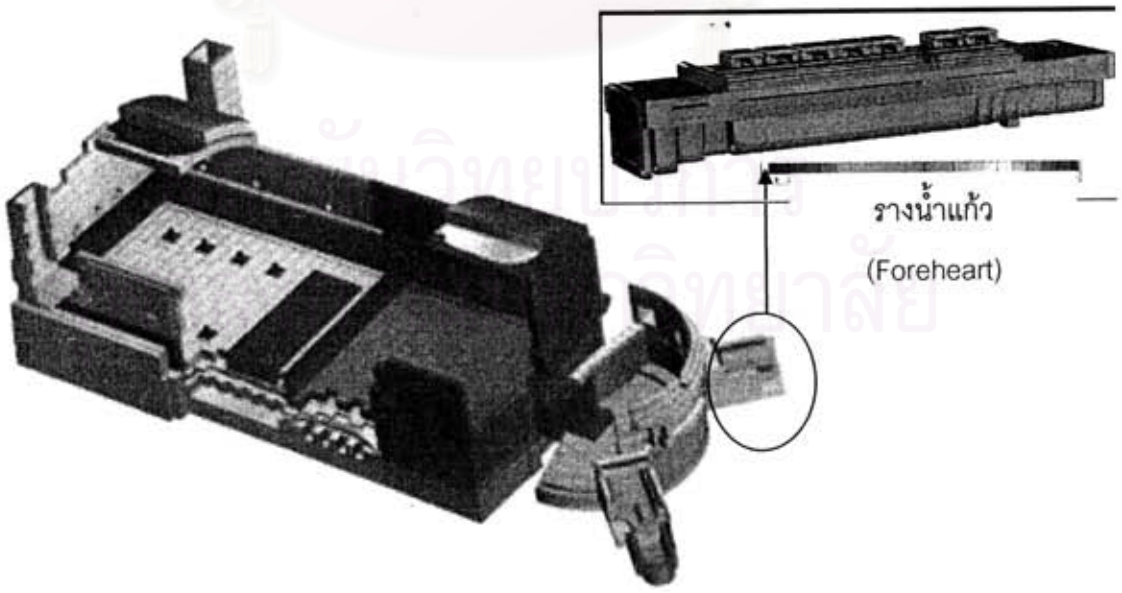
**ช่วงทำให้น้ำแก้วบริสุทธิ์** (Refining) เป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนหรือเรียกว่า Seed เช่น ออกซิเจน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ น้ำ และไนโตรเจน เป็นต้นเพื่อทำให้น้ำแก้วมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยจะมีสาร Refining agents ที่ช่วยในการกำจัดสิ่งปนเปื้อน เช่น โซเดียมซัลเฟต แบเรียมออกไซด์ กรดบอริก และแคลเซียมฟลูออไรด์ โดยการเติมตัว Agents จะขึ้นอยู่กับคุณภาพ และคุณสมบัติ ที่ผู้ผลิตต้องการ

**ช่วงน้ำแก้วรวมตัว** (Homogenizing) เป็นช่วงที่ทำให้น้ำแก้วรวมตัวกันได้ดีขึ้นหลังจากที่กำจัดสิ่งปนเปื้อนออกไปแล้วและยังช่วยรักษาคุณสมบัติต่างๆของแก้ว ซึ่งการรวมตัวของเนื้อแก้วขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการหลอม ระดับในการผสม องค์ประกอบของส่วนผสม และสมบัติทางกายภาพและเคมีของผนังเตาหลอม(Refractory)

**ช่วงปรับอุณหภูมิน้ำแก้ว** (Thermal Conditioning) เป็นช่วงที่ช่วยรักษาอุณหภูมิของน้ำแก้วโดยจะเกิดขึ้นหลังจากผ่านช่วงอ่างหลอมไปแล้วตามรูปที่ 3.6 และ3.7 โดยน้ำแก้วจะไหลไปตามรางหรือเรียกว่า Foreheart เพื่อปรับอุณหภูมิของน้ำแก้วตามต้องการโดยการให้ความร้อนหรือลดความร้อน ซึ่งจะใช้พลังงานเชื้อเพลิง หรือไฟฟ้าในการควบคุม ในบริเวณรางน้ำแก้วประกอบไปด้วย อิฐทนความไฟและหัวเผา (Burner) ซึ่งใช้พลังงานเชื้อเพลิงหรือพลังงานไฟฟ้าในการให้ควบคุมอุณหภูมิของน้ำแก้ว




รูปที่ 3.6 รางน้ำแก้ว




รูปที่ 3.7 ภายในเตาหลอม

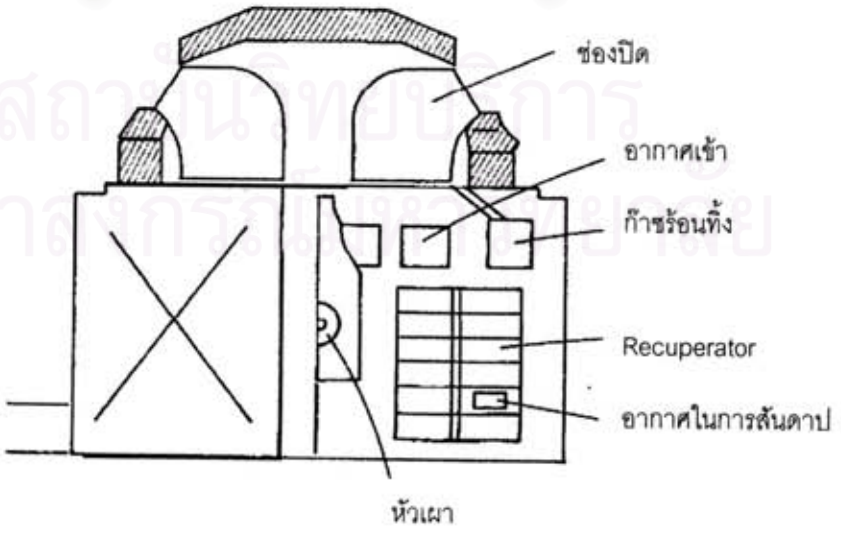
### 3.4.3 ประเภทของเตาหลอม

เตาหลอมที่ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

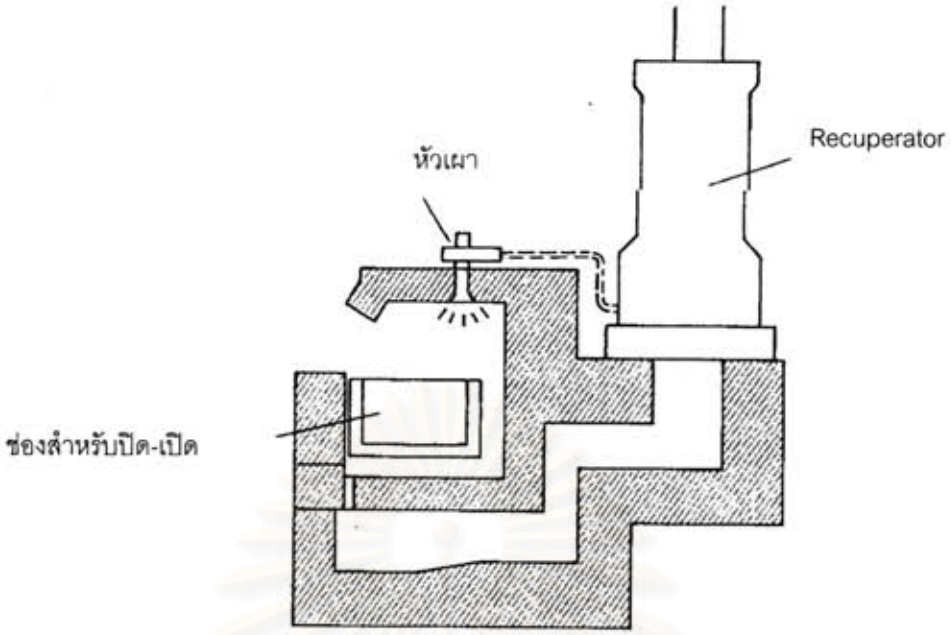
**1) เตาหลอมแบบไม่ต่อเนื่อง** (Discontinuous Furnaces)

เตาหลอมชนิดนี้ใช้ในกระบวนการหลอมแก้วและกระจกขนาดเล็กซึ่งมีกำลังผลิตในระดับที่ต่ำกว่า 5 ตันต่อวัน ส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตเครื่องถ้วยชามแก้วขนาดเล็กโดยการเป่าและกดอัด (blown and pressed tableware) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องแก้วที่มีสี และคริสตัล เป็นต้น เตาหลอมชนิดนี้จะเดินเครื่องในระยะเวลาสั้นๆ และมักจะสามารถทำงานได้ตลอดทั้งวัฏจักรของขั้นตอนการบรรจุ (charging) การหลอม (melting) และการดึงแก้วหลอมเหลวออก (removal of molten glass) ภายใน 1 วัน เตาหลอมแบบไม่ต่อเนื่องแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เตาหลอมแบบ pot furnace และเตาหลอมแบบ day tank แสดงดังรูป 3.8, 3.9และ3.10 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

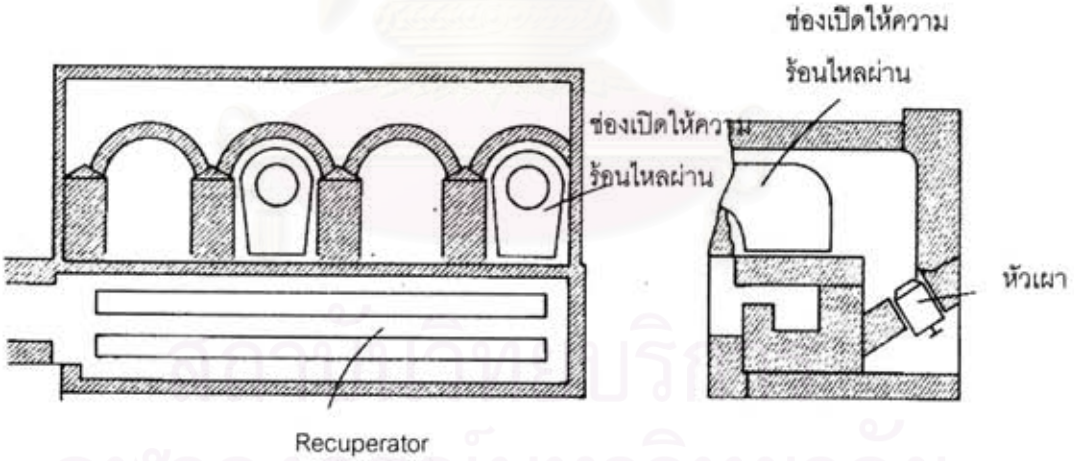
**1.1) เตาหลอมแบบไม่ต่อเนื่อง ชนิด** Pot furnace มีลักษณะดังรูป ในเตาหลอมชนิดนี้ แก้วจะถูกหลอมเหลวอยู่ภายในหม้อที่ทำด้วยวัสดุทนไฟ (refractory pot) และหม้อนี้จะถูกให้ความร้อนจากภายนอก เตาหลอมแบบ pot furnace อาจมีเพียง 1 หม้อหรือหลายหม้อก็ได้ และอาจเป็นแบบเปิดหรือปิดก็ได้เช่นกัน หม้อแบบเปิด (open pot) จะเปิดให้เปลวไฟและก๊าซต่างๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเข้าไปได้ โดยมีขนาดความจุตั้งแต่ 115 ถึง 450 kg ของแก้ว และจะต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันผสมอยู่ในปริมาณที่น้อยที่สุด ส่วนหม้อแบบปิด (closed pot) จะมีขนาดความจุตั้งแต่ 115 ถึง 900 kg ของแก้ว และใช้ในการหลอมพวกแก้วคริสตัลเป็นหลัก โดยทั่วไปแล้วเตาหลอมแบบ pot furnace จะใช้หลอมแก้วในตอนกลางคืน และดำเนินการผลิตแก้วในขั้นอื่นๆ ต่อไปในตอนกลางวัน ดังรปที่ 3.5




รูปที่ 3.8 เตาหลอมแบบไม่ต่อเนื่องชนิด Pot furnace




รูปที่ 3.9 เตาหลอมแบบไม่ต่อเนื่องชนิด Single Pot furnace (New type)




รูปที่ 3.10 เตาหลอมแบบไม่ต่อเนื่องชนิด Parallel multi-pot furnace

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2) **เตาหลอมแบบไม่ต่อเนื่อง ชนิด** Day tanks furnace เตาหลอมแบบ day tank มีขนาดเล็กซึ่งการใช้งานเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ และขั้นตอนการบรรจุ (charging) การหลอม (melting) และการนำออก (removal) จะดำเนินแบบซ้ำๆ ไปภายใน 1 วัน เตาหลอมชนิดนี้จะใช้หลอมแก้วชนิดพิเศษ (specialty glass) และพวกแก้วโอปอล (opal glass) แก้วทับทิม (ruby glass) แก้วคริสตัล (lead glass) และแก้วอ่อน (soda-lime glass) เวลาที่ใช้ในการหลอมของเตาชนิดนี้จะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของแก้วที่นำมาหลอม เช่น แก้วโอปอลและทับทิมชนิดอ่อนจะใช้เวลาในการหลอม 8 ถึง 10 ชั่วโมง ส่วนแก้วอ่อนจะใช้เวลาหลอมมากถึง 24 ชั่วโมง การควบคุมแบบอัตโนมัติจะช่วยรักษาอุณหภูมิในการหลอมให้คงที่ และจะต้องมีการสุ่มตรวจแก้วที่ถูกหลอมดูว่าขั้นตอนการหลอมสมบูรณ์แล้วหรือยัง

2) **เตาหลอมแบบต่อเนื่อง** (Continuous Furnaces)

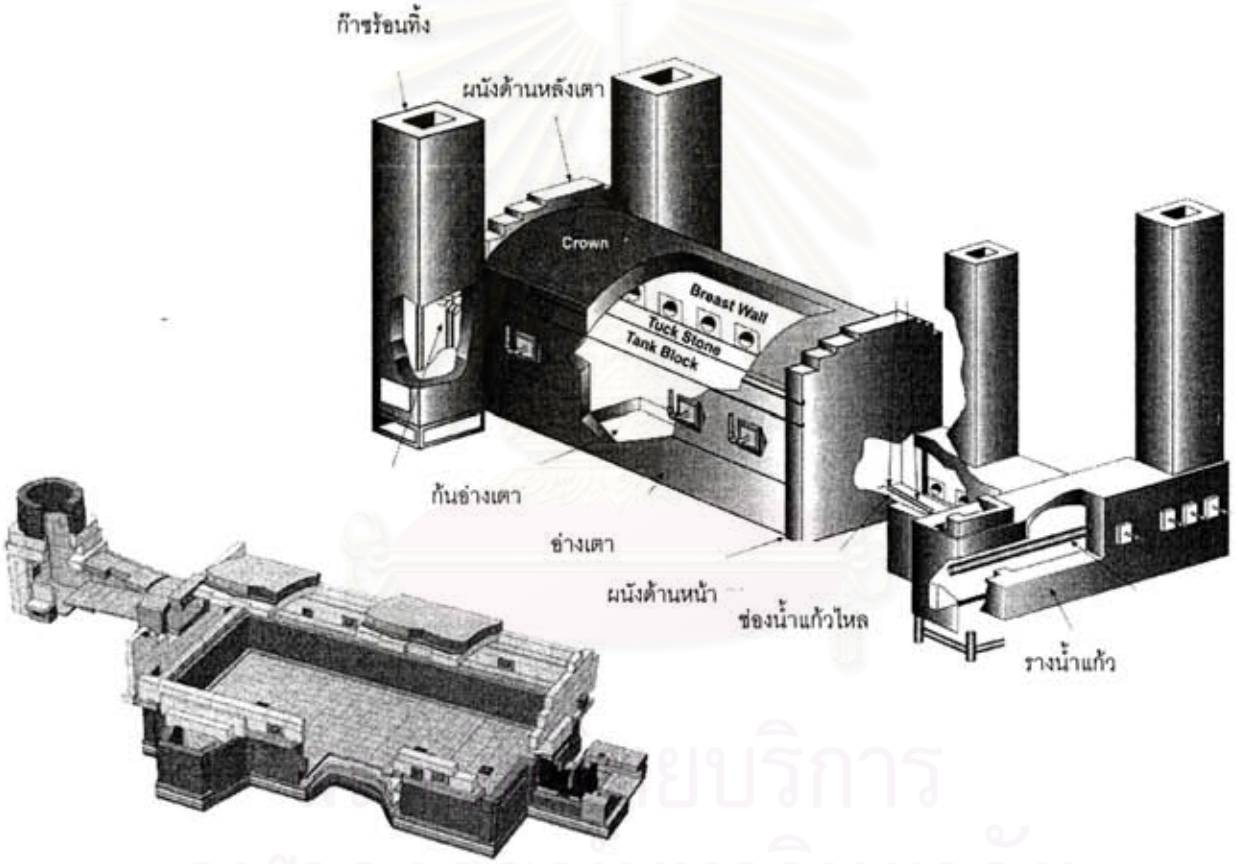
เตาหลอมประเภทนี้ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วที่มีกำลังการผลิตต่อวันสูง (ตั้งแต่ 10 ตันขึ้นไป) และมีการผลิตอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปีโดยไม่มีการหยุดเครื่องจักร เชื้อเพลิงที่ใช้กับเตาหลอมมีหลายชนิด เช่นแก๊สธรรมชาติ (Natural gas), ไฟฟ้า, น้ำมันเตา หรือใช้ทั้งพลังงานเชื้อเพลิงและพลังงานไฟฟ้า ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงนั้นจะมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดเป็นเปลวไฟที่ให้ความร้อนบริเวณผิวของน้ำแก้ว โดยอาศัยหลักการของการแผ่รังสี (Radiation) และการพาความร้อน (Convection) ส่วนเตาหลอมที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจะใช้อิเลคโทรดเพื่อทำให้เกิดความต่างศักย์ส่งผลให้เกิดความร้อนซึ่งเป็นการหลอมที่สัมผัสกับน้ำแก้วโดยตรง ซึ่งเตาหลอมแบบต่อเนื่องสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

2.1) **เตาหลอมแบบต่อเนื่องชนิดให้ความร้อนโดยตรง** (Direct-fired Furnaces)

เตาหลอมชนิดนี้ (บางครั้งเรียกว่า unit melter) เผาไหม้โดยใช้ก๊าซธรรมชาติ และมักใช้ในงานผลิตระดับเล็กซึ่งมีกำลังผลิต 20 ถึง 150 ตันต่อวัน ภายในเตาชนิดนี้ ก๊าซธรรมชาติจะเผาไหม้อย่างต่อเนื่องที่หัวเผา (burner) จำนวนมากที่ติดตั้งไว้ทั้ง 2 ข้างของเตา ซึ่งทำให้เกิดสภาวะอุณหภูมิที่มีเสถียรภาพ หัวเผาถูกควบคุมเพื่อสร้างกระแสความร้อน (convection current) ซึ่งระดับอุณหภูมิจะลดลงทีละน้อยตามยาว (longitudinal temperature gradient) ของเตาหลอมแก้ว ก๊าซสันดาปร้อนจะกระจายไปตามพื้นผิวแก้วหลอมเหลว และถูกปล่อยทิ้งไปตรงบริเวณปลายด้านบรรจุ (charging end) ของเตาหลอมผ่านทางช่องป้อนวัตถุดิบ ดังรูปที่ 3.11 และ 3.12 *ข้อดี* ของเตาชนิดนี้คือ ราคาของเตาต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณหลอมต่อพื้นที่(Melton / Area), อุณหภูมิภายในเตาคงที่ และเหมาะกับอุตสาหกรรมการผลิตแก้วที่มีกำลังการผลิตไม่สูงมาก

*ข้อเสีย* ของเตาชนิดนี้คือ ใช้พลังงานในการหลอมต่อตันน้ำแก้วมากกว่าแบบ Regenerative เพราะเตาชนิดนี่ไม่มี Regenerator ในการนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้กลับมาใช้ใหม่

เตาหลอมแบบ direct-fired furnace ถูกเลือกมาใช้งานเนื่องจากใช้เงินลงทุนต่ำกว่า มีเสถียรภาพด้านอุณหภูมิ และเมื่อปริมาณการผลิตต่ำเกินไปที่จะใช้เตาหลอมแบบ regenerative furnace เตาหลอมแบบ direct-fired furnace นี้ยังถูกนำไปใช้ในการผลิตแก้วชนิดพิเศษ (specialty glass) ที่มี borosilicate เป็นองค์ประกอบ ซึ่งอาจทำให้อิฐทนไฟ (refractory brick) ใน regenerator เกิดการอุดตันหรือเสื่อมสภาพ



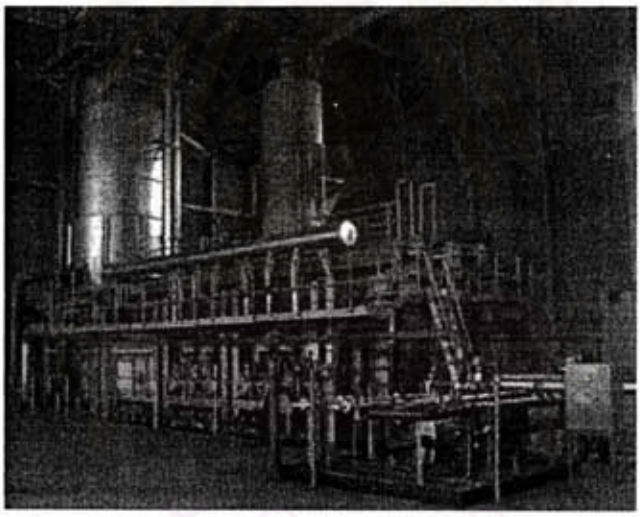

รูปที่ 3.11 ภายในของเตาหลอมแบบต่อเนื่องชนิดให้ความร้อนโดยตรง (Direct-fired Furnaces)

รูปที่ 3.12 เตาหลอมแบบต่อเนื่องชนิดให้ความร้อนโดยตรง (Direct-fired Furnaces)

2.2) **เตาหลอมแบบต่อเนื่องแบบ** Recuperative Furnaces

เตาหลอมชนิดนี้โดยพื้นฐานแล้วก็คือ เตาหลอมแบบ direct-fired furnace ที่มีการติดตั้งเครื่อง recuperator เพื่อนำความร้อนจากก๊าซที่ปล่อยทิ้งไปกลับคืนมา เตาชนิดนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในงานเล็กๆ เช่นในการผลิตสิ่งทอและเส้นใย เป็นหลัก และสามารถใช้ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันก็ได้ และบางเครื่องก็มีการติดตั้ง electric boost ไว้ด้วย

เตาหลอมชนิดนี้ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่อเนื่องในการนำความร้อนจากก๊าซไอเสีย (flue gas) กลับมาใช้ใหม่ และใช้ในการอุ่นอากาศที่จะใช้ในการสันดาปให้ขึ้นไปถึง 1,000 ถึง 1,500 องศาฟาเรนไฮต์ การแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถออกแบบให้มีลักษณะเป็น double shell หรือ tabular ก็ได้ และทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) หรือ Inconel เพื่อให้สามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนและมีอุณหภูมิสูง การนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่นี้ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหลอมเพิ่มขึ้นมาก โดยเพิ่มขึ้นได้มากถึง 25 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เตาหลอมแบบต่อเนื่องชนิด Recuperative Furnaces

2.3) **เตาหลอมแบบต่อเนื่องชนิดที่มี** Regenerative (Regenerative Furnaces)

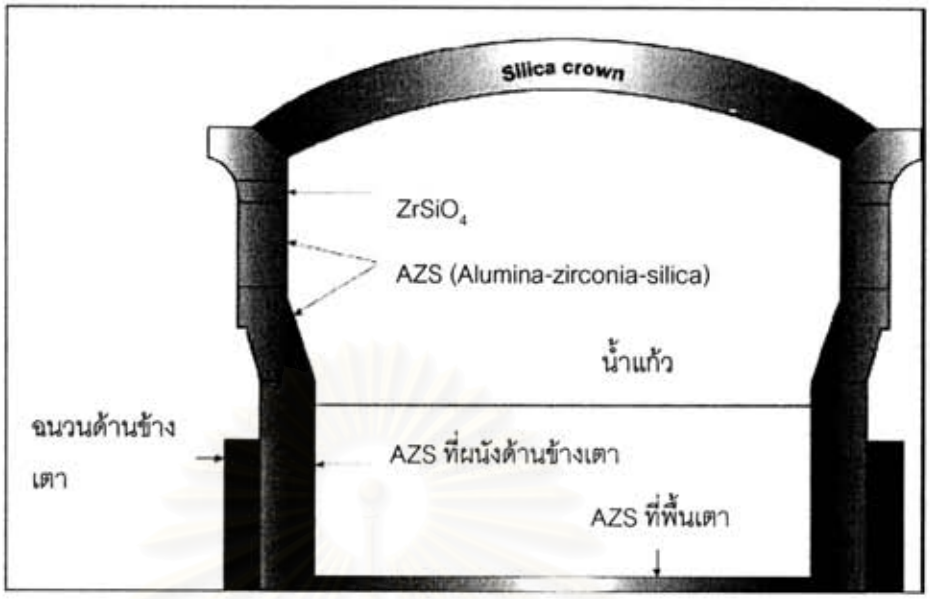
เตาหลอมชนิดนี้มีใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก โดยคิดเป็นร้อยละ 42 ของจำนวนเตาหลอมทั้งหมด และมีกำลังผลิตสูง (ตั้งแต่ 100 ถึง 1,000 ตันต่อวัน) โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงถึง 65 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเตาหลอมแบบ direct-fired furnace และ recuperative furnace นอกจากนี้ยังเผาไหม้โดยใช้ก๊าซธรรมชาติ หรือใช้ก๊าซร่วมกับ electric boost ก็ได้เช่นเดียวกับเตาหลอมแบบ recuperative furnace ความร้อนแฝงใน

เตาหลอมจะถูกเก็บไว้ใน regenerator และถูกนำไปใช้เพื่ออุ่นอากาศที่จะนำมาใช้ในการสันดาป ให้ขึ้นไปได้ถึง 2,300 องศาฟาเรนไฮต์ นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นอีกด้วย

อิฐตาราง (checker brick) ถูกจัดวางไว้ในห้องหลอมเหลว/ สันดาป ในระหว่างเดินเครื่อง อากาศขาเข้าจะรับความร้อนในขณะที่ผ่านเข้าไปยังระบบ hot checker อันแรก และจากนั้นจะไป รวมกับเชื้อเพลิงที่ช่องหัวเผา (burner port) เปลวไฟจะลุกไหม้เหนือพื้นผิวของแก้วภายในช่องว่าง ตรงใต้ส่วนบนสุดของเตาหลอม (combustion space) ก๊าซสันดาปจะออกไปจากบริเวณการ หลอมทาง burner port ฝั่งตรงข้ามและผ่านทาง exhausting regenerator chamber ซึ่งเป็นการ ให้ความร้อนแก่ checker brick เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 ถึง 20 นาที การไหลของอากาศจะ กลับทิศทาง ซึ่งจะเป็นการสลับ inlet และ exhaust port อุณหภูมิปล่อยออกของก๊าซสันดาปโดย เฉลี่ยของเตาหลอมมีค่าตั้งแต่ 1,000 ถึง 1,200 องศาฟาเรนไฮต์ เตาหลอมแบบ direct-fired air recuperative furnace อาจใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบโลหะผสมอุณหภูมิสูง (high temperature metallic alloy heat exchanger) ที่หลีกเลี่ยงความจำเป็นในการกลับทิศทางการ ไหลของอากาศอยู่เป็นประจำ

เตาหลอมแบบ regenerative นี้โดยทั่วไปแล้วจะใช้วัสดุทนไฟที่มีส่วนผสมของ zirconia-silica ประมาณ 33 ถึง 41 เปอร์เซ็นต์ มาทำเป็นผนังเตา ส่วนวัสดุทนไฟที่มีสาร chrome เป็น องค์ประกอบจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไฟเบอร์กลาสเนื่องจากมีความทนทานต่อการกัดกร่อน แต่เริ่มจะใช้น้อยลงเนื่องจากความตระหนักในผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ส่วนในอุตสาหกรรมผลิต กระจกเรียบ บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแก้ว หรือ พวก pressed/ blown glass นั้น จะไม่นำวัสดุทนไฟที่ มีสาร chrome เป็นองค์ประกอบมาใช้งาน เนื่องจากจะทำให้แก้วหรือกระจกเปลี่ยนสี โดยทั่วไปจะ มีการนำซิลิกามาใช้ทำเพดานโค้งด้านบน (crown) ของเตาหลอม หรือบางทีอาจใช้ mullite ใน กรณีที่มีการเผาไหม้แบบ oxy-fuel และเนื่องจากความเข้ากันไม่ได้ในเชิงเคมี จึงมักมีการนำชั้น ของ alumina-zirconia-silica มาเป็นกันชนระหว่าง crown กับกำแพงเตาด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.14

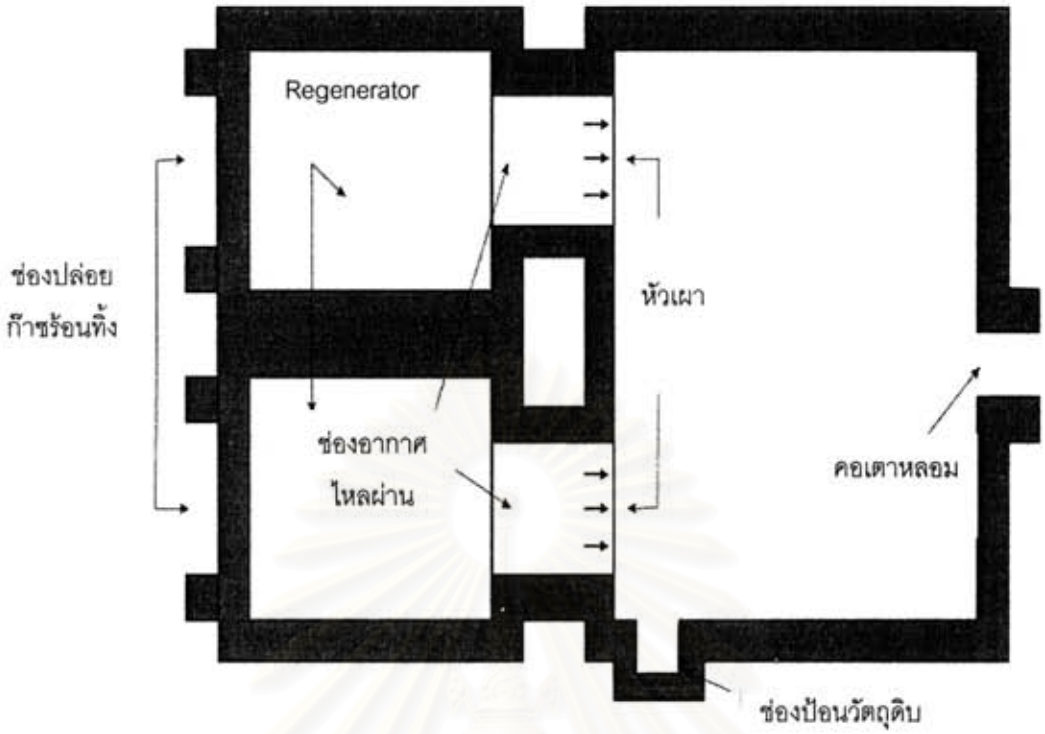
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



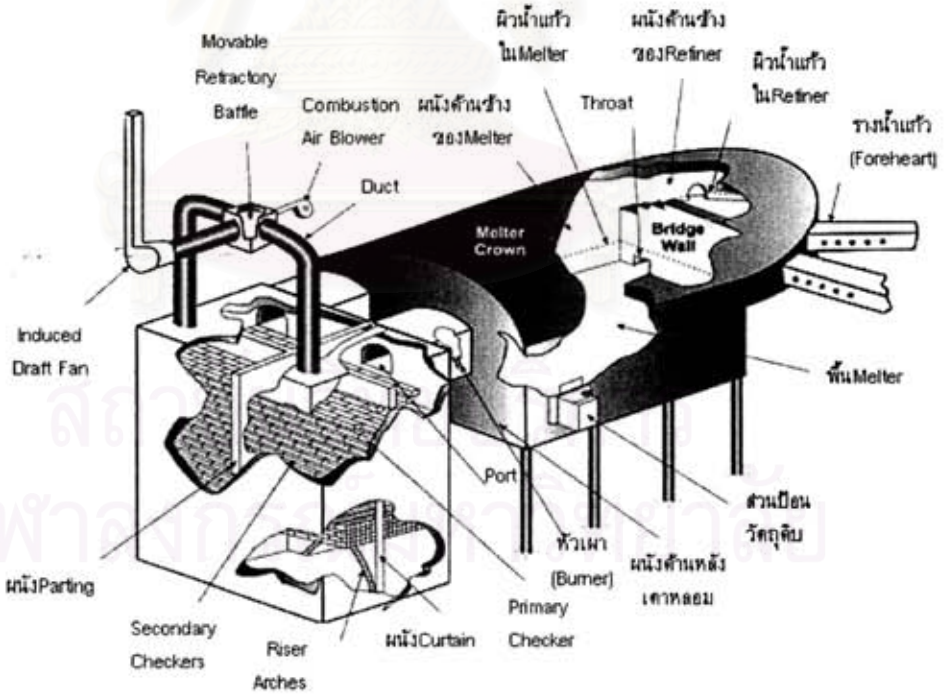

รูปที่ 3.14 วัสดุที่นำมาใช้ในเตาหลอมแบบ regenerative furnace

การหลอมในเตาหลอมมักจะควบคุมด้วยเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบ thermocouple ที่อยู่เหนือและใต้แก้วหลอม และด้วยการใช้สายตาเฝ้าสังเกตการทำงานของ nozzle ของ burner มีการหุ้ม thermocouple ด้วย alumina, mullite หรือ platinum coated alumina และต้องทำการเปลี่ยนทุกๆ 2 ถึง 3 เดือน เนื่องจากการสั่นสะเทือนเชิงความร้อน (thermal shock) หรือความเสียหายจากการกระแทก และกำลังมีการพัฒนาหัววัดแบบ fiber optic เพื่อให้สามารถเฝ้าดูอุณหภูมิของแก้วตลอดขั้นตอนการหลอม เตาหลอมแบบ regenerative furnace แบ่งออกเป็น 2 ชนิดย่อย คือ แบบ end-port และแบบ side-port โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งของหัวเผา (burner) และช่องระบายไอเสียทิ้ง (exhaust port) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1) End-port regenerative furnaces เตาหลอมชนิดนี้มี regenerator ที่มีช่องเปิดอยู่ข้างๆ กัน (side-by-side port) ตรงด้านหลังของเตาหลอม ลักษณะของเปลวไฟจะแผ่ออกเป็นรูปตัว U อากาศภายนอกที่ไหลเข้าเตาหลอมผ่านข้างหนึ่งของ regenerator รับความร้อนเมื่อไหลออกที่ช่องเปิด A เป็นลมร้อน ผ่านหัวเผาที่จ่ายเชื้อเพลิงได้เป็นเปลวไฟ มีเส้นทางการไหลรูปตัวยู (U-shape) ผ่านแก้วหลอม ผ่านช่องเปิด regenerator ถ่ายเทความร้อนให้ regenerator แล้วไหลออกจากเตา เมื่อระยะเวลาผ่านไปครบ regenerative time ที่ออกแบบไว้ (15 ถึง 20 นาที) baffle ปรับทิศทางให้อากาศภายนอกไหลผ่าน regenerator B และก๊าซร้อนไหลออกทาง regenerator B แทน แสดงดังรูปที่ 3.15 และ3.16

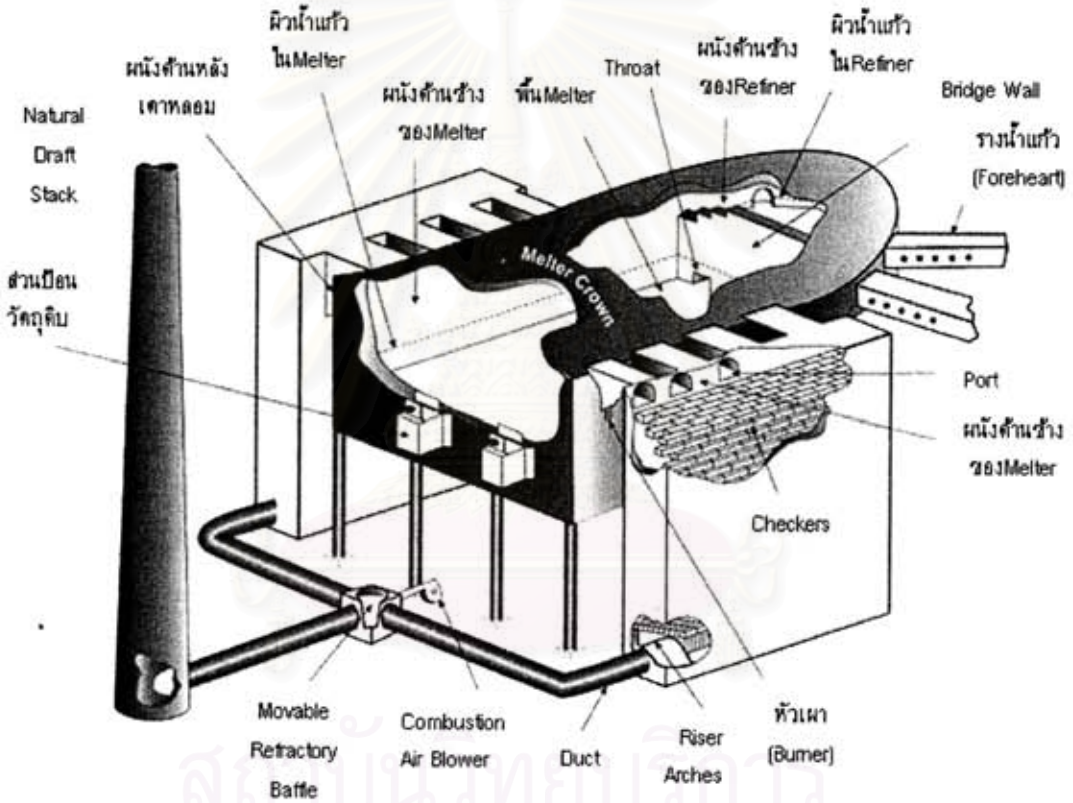



รูปที่ 3.15 ด้านบนของเตาหลอมแบบ End-port regenerative




รูปที่ 3.16 เตาหลอมชนิด End-port regenerative furnaces

2.3.2) Side-port regenerative furnaces มีลักษณะคือช่องระบายไอเสียทิ้ง (exhaust port) และหัวเผา (burner) จะถูกติดตั้งไว้อยู่คนละด้านของเตาหลอม คู่กันไปกับ regenerator ทั้งสองซึ่งติดตั้งไว้ด้านละเครื่อง (ดูรูปที่ 3.17 ประกอบ) เปลวไฟจะเดินทางจากด้านหนึ่งของเตาหลอมไปสู่อีกด้านหนึ่ง ส่วนใหญ่แล้วเตาหลอมชนิดนี้จะใช้ในการผลิตที่ต้องการปริมาณงาน (throughput) สูง เตาหลอมชนิดนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจกที่มีกำลังการผลิตมากกว่า 100 ตันต่อวันขึ้นไปและให้น้ำแก้วที่มีคุณภาพดี นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมกระจกแผ่นเรียบและอุตสาหกรรมผลิตขวดแก้วขนาดใหญ่



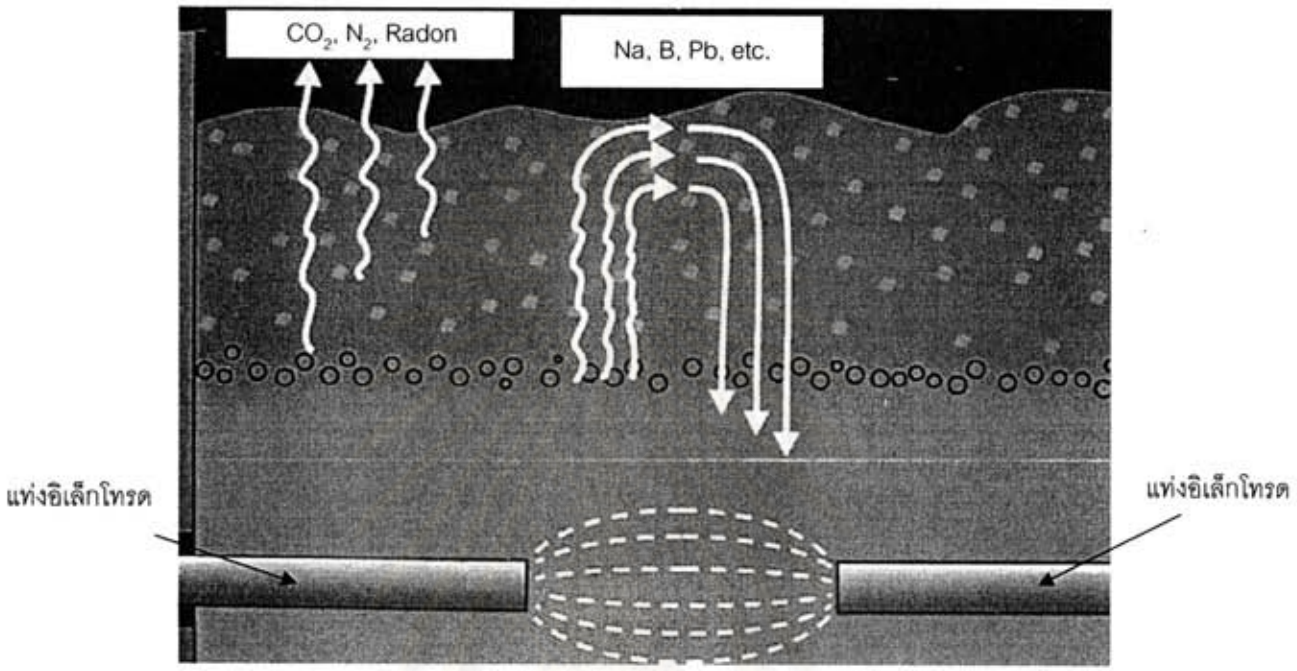

รูปที่ 3.17 เตาหลอมชนิด Side - port regenerative furnaces

3) **เตาหลอมไฟฟ้า** (All-electric melters or Electric boost)

เตาหลอมชนิดนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวหรือใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อช่วยในการหลอมแก้วมีลักษณะเหมือนกับเตาหลอมแบบต่อเนื่องชนิดที่มี Regenerative (Regenerative Furnaces)แต่เปลี่ยนจากการใช้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นพลังงานไฟฟ้าแทน ซึ่งเป็นเตาที่มีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนดีกว่า เพราะเป็นการให้ความร้อนโดยตรงกับน้ำแก้วโดยใช้โมลิบดินัมอิเล็กโทรด (Molybdenum electrodes)ซึ่งอยู่บริเวณใต้เตาหรือด้านข้างของเตา และปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านไปทางห้องทนไฟ (refractory chamber) เพื่อทำการหลอมเหลววัตถุดิบ เตาหลอมชนิดนี้ในขั้นแรกจะต้องทำความร้อนจากเชื้อเพลิงจากฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก่อนแล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิขึ้นต่อไปด้วยการหลอมทางไฟฟ้า (electrical melting) ในระหว่างกระบวนการหลอม batch layer จะทำหน้าที่เป็นฉนวนอยู่เหนือสุดของแก้วหลอม ซึ่งช่วยขจัดการสูญเสียพลังงานของแก้วหลอมเหลวจากการแผ่รังสีและการพาความร้อน แสดงดังรูป 3.18 ในขณะที่อุณหภูมิของแก้วหลอมอยู่ที่ประมาณ 2,600 องศาฟาเรนไฮต์ อุณหภูมิ ณ จุดบนสุดของ batch layer ซึ่งเป็นฉนวนที่มีความหนา 6 ถึง 9 นิ้ว มีค่าอยู่แค่ประมาณ 200 องศาฟาเรนไฮต์เท่านั้น ผลของการเป็นฉนวนที่เรียกว่า "cold top" นี้ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นได้ถึง 60 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ เตาหลอมแบบไฟฟ้าบางเครื่องจะใช้ก๊าซธรรมชาติมาช่วยในการทำความร้อน ซึ่งจะเรียกว่า เตาหลอมแบบ hot top เครื่อง bubbler มักจะนำมาใช้เพื่อปรับปรุงความเป็นเนื้อเดียวกันของแก้วหลอมและเพื่อให้แน่ใจว่าฟองอากาศจะถูกกำจัดไป

เตาหลอมไฟฟ้ายังมีข้อดีอีกหลายประการ เช่น เตาหลอมไฟฟ้าไม่ต้องใช้อากาศในการเผาไหม้ทำให้ลดปัญหาการเกิดมลพิษทางอากาศ เช่นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจก, ลดการปล่อยไอระเหย เช่น ฟลูออไรด์, ตะกั่วออกไซด์ , ใช้พื้นที่น้อยกว่า, การRebuilds เตาทำได้เร็วกว่าเตาชนิดอื่นและเตายังสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่ายกว่าการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลทำให้การผสมและการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันของน้ำแก้วดีขึ้นส่งผลให้คุณภาพของน้ำแก้วเป็นไปตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม หากว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 30 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์แล้ว ประสิทธิภาพโดยรวมของเตาหลอมแบบไฟฟ้านี้จะมีค่าต่ำกว่ามาก คือ อยู่ที่ประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ และค่าไฟฟ้าก็จะสูง ด้วยเหตุนี้เตาหลอมแบบไฟฟ้าจึงไม่มีความสามารถในการแข่งขันด้านต้นทุนสำหรับในหลายๆ งาน ขีดจำกัดด้านขนาดของเตาหลอมแบบไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงของ batch บางชนิด จะเป็นข้อจำกัดในการใช้งานของเตาหลอมชนิดนี้ อีกประเด็นหนึ่งคือ อายุการใช้งานที่สั้นลงของวัสดุทนไฟในเตาหลอมแบบไฟฟ้า ซึ่งจะนำไปสู่การซ่อมบำรุงเตาที่บ่อยครั้งขึ้น กำหนดเวลาในการซ่อมบำรุงเตาหลอมไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 2 ปี โดยแต่ละครั้งจะใช้เวลาประมาณ 2 สัปดาห์ เตาหลอมแบบไฟฟ้ามักใช้งานกับ batch ที่มีองค์ประกอบจำพวก borosilicate หรือ ฟลูออไรด์ (เช่น ไฟเบอร์กลาส) เพื่อลดการระเหยของสาร

ยึดเกาะ (binder) และเรซินให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ในกรณีของเตาหลอมแบบ gas-fired furnace อาจจะมีการระเหยเกิดขึ้นได้มากถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเตาหลอมแบบไฟฟ้านั้นการระเหยจะน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์

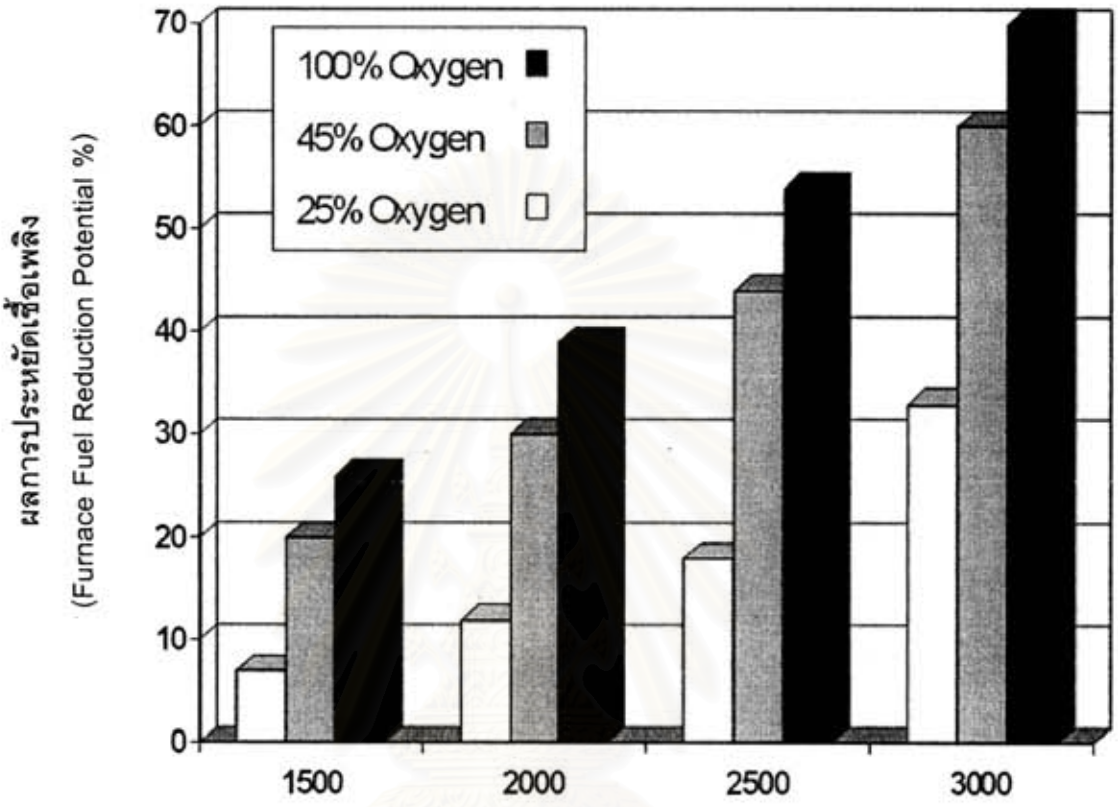



รูปที่ 3.18 ภายในของอ่างเตาหลอมแบบไฟฟ้า

### 3.4.4 การใช้ก๊าซออกซิเจนในการเผาไหม้ (Oxy – fuel firing)

ในปัจจุบันนี้มีการใช้เทคโนโลยีการใช้ก๊าซออกซิเจนในการเผาไหม้ (Oxy – fuel firing)อย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มการนำไปใช้สูงขึ้น เพราะช่วยลดพลังงานที่ใช้และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ในกระบวนการหลอมโดยทั่วไปนั้นจะใช้ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันเชื้อเพลิงในการเผาไหม้กับอากาศที่มีปริมาณก๊าซออกซิเจนอยู่ร้อยละ 21 และมีปริมาณก๊าซไนโตรเจนอยู่ 78% ซึ่งในกระบวนการการเผาไหม้นั้นจะใช้แต่ก๊าซออกซิเจนในการเผาไหม้แต่ในอากาศมีก๊าซไนโตรเจนปนอยู่ทำให้ต้องเสียเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ก๊าซไนโตรเจน จากนั้นก๊าซจะถูกปล่อยออกไปจากเตาหลอมที่อุณหภูมิสูง จึงเป็นสาเหตุให้เตาหลอมมีประสิทธิภาพต่ำ จึงมีการนำความร้อนที่จะปล่อยออกไป(Weste heat) กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเตาหลอมได้ 55-65% เนื่องจากความร้อนสูญเสียถูกปล่อยออกน้อยลง และการใช้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผาไหม้ทำให้ไม่มีก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในกระบวนการเผาไหม้ซึ่งเป็นการลดปริมาณก๊าซเสียและความร้อนสูญเสีย จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาและประหยัดเชื้อเพลิง แสดงดัง

รูปที่ 3.19 แต่การใช้ก๊าซออกซิเจนในการเผาไหม้นั้นมีข้อจำกัดอยู่ที่การหาแหล่งผลิตก๊าซออกซิเจน ถ้าโรงงานอยู่ไกลจากแหล่งผลิตจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่ง




| Furnace Type<br>(ชนิดเตาหลอม) | Potential Energy Savings<br>(ศักยภาพของเตาหลอมที่สามารถลดได้) |
|---|---|
| Direct Melter with No Heat Recovery | 40 % |
| Recupertive | 25 % |
| Regenerative | 15 – 20 % |

อ้างอิง : U.S. Department of energy (2002)

รูปที่ 3.19

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการประหยัดเชื้อเพลิงจากการใช้ก๊าซออกซิเจนในการสันดาป (Oxy – fuel firing)ที่เตาหลอมชนิดต่างๆ กับอุณหภูมิที่ปล่อยออกมาจากปล่องที่ร้อยละของออกซิเจนที่ค่าต่างๆ

3.4.5 **ขนาดเตาหลอมในอุตสาหกรรมแก้ว**

ในการพิจารณา ประเภทของเตาหลอม , ขนาดของเตาหลอมและลักษณะเฉพาะของเตาหลอมนั้นจะพิจารณาจาก ปริมาณการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

**อุตสาหกรรมกระจกแผ่นเรียบ** (Flat glass) ในอุตสาหกรรมนี้ใช้เตาหลอมประเภท Side- port regenerative furnaces ที่มีกำลังการผลิต(Capacity) 500 – 1000 ตันต่อวัน เป็นเตาหลอมขนาดใหญ่ ที่มีกำลังการผลิตสูงและให้คุณภาพของน้ำแก้วสูงด้วย เพราะในอุตสาหกรรมนี้ต้องการแผ่นกระจกที่มีคุณภาพสูง จึงต้องมีการทิ้ง(Reject) ถ้ากระจกมีฟองอากาศปนอยู่ในเนื้อกระจกเกินกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งเกณฑ์เหล่านี้ต้องมีฟองอากาศอยู่น้อยมากเมื่อเทียบกับการผลิตขวดหรือภาชนะแก้ว ทำให้น้ำแก้วอยู่ในเตาหลอมนานทำให้มี Residence สูง การผลิตกระจกแผ่นเรียบจึงต้องใช้พลังงานมากกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น

**อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์แก้ว** (Container glass) ในอุตสาหกรรมนี้ใช้เตาหลอมประเภท Side- port regenerative furnaces ที่มีกำลังการผลิต(Capacity)น้อยกว่า 500 ตันต่อวัน ในบางโรงงานมีการนำ Electric boost และใช้ก๊าซออกซิเจนในการเผาไหม้ (Oxy – fuel firing)มาใช้ในเตาหลอมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาด้วย

**อุตสาหกรรมใยแก้ว** (Fibrous glass) ในอุตสาหกรรมนี้ใช้เตาหลอมประเภท Electric melters หรือ Recuperative Furnaces เพราะเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังการผลิตไม่สูงมาก

**อุตสาหกรรมหลอดแก้ว** (Tube glass) ในอุตสาหกรรมนี้ใช้เตาหลอมประเภท Side-port regenerative furnaces ที่มีกำลังการผลิต(Capacity)น้อยกว่า 500 ตันต่อวัน ในบางโรงงานมีการนำ Electric boost และใช้ก๊าซออกซิเจนในการเผาไหม้ (Oxy – fuel firing)มาใช้ในเตาหลอมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.6 **ฉนวนทนความร้อน** (Insulation)

วัสดุที่ใช้ในโครงสร้างเตาหลอมเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการใช้พลังงาน เพราะมีการสูญเสียความร้อนไปที่ผนังเตา จึงต้องควบคุมไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากจนเกินไป วัสดุที่ใช้ทำเป็นฉนวนกันความร้อนของเตาต้องทำการศึกษาและเลือกใช้ให้เหมาะสม เพราะอาจเป็นสาเหตุให้อิฐทนไฟ (Refractory)เกิดการกัดกร่อน ทำให้อายุการใช้งานเตาหลอมลดลง และยังมีผลต่อคุณภาพของน้ำแก้วอีกด้วย

**1) ฉนวนที่ใต้อ่างของเตาหลอม** (Insulation for melting chamber bottom)

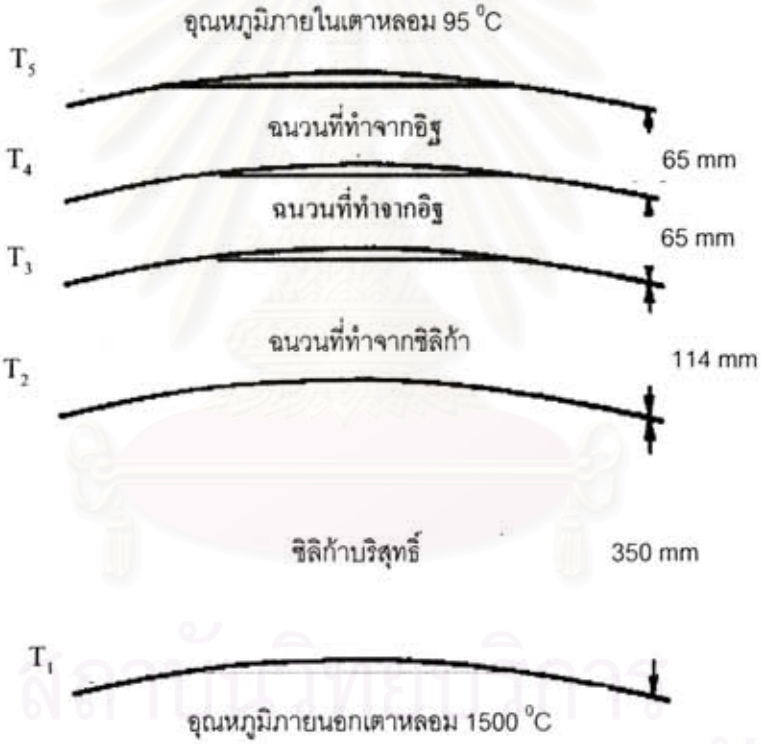
การปรับปรุงฉนวนใต้เตาส่งผลให้ใต้เตาหลอมมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้หลอมน้ำแก้วได้มากขึ้น (เพิ่ม Capacity) เป็นการเพิ่มผลผลิต นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยลดการสูญเสียความร้อน แสดงดังรูป ตัวอย่างของอิฐทนไฟ(Refractory) ของเตาหลอม และเมื่อเปรียบเทียบพบว่าการใช้ฉนวนกันความร้อนช่วยลดการสูญเสียความร้อนจาก 3240 Kcal / $M^2$h เป็น 1382 Kcal / $M^2$h หรือลดลงประมาณ 43% แสดงดังรูป 3.20

รูปที่3.20 ส่วนประกอบของอิฐทนความไฟ(Refractory) ที่พื้นเตาหลอม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) **ฉนวนที่หลังคาเตา** (Crown insulation)

อิฐทนความร้อนที่ใช้ทำหลังคาเตาหลอมประกอบด้วยซิลิก้า แต่ในปัจจุบันมีการพัฒนาอิฐทนไฟเรียกว่า Super-duty silica ซึ่งเป็นอิฐที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น มีส่วนประกอบของอัลคาไลน์ (Alkali) กับ อลูมินา(Alumina) เจือปนอยู่น้อยมาก อิฐทนความร้อนที่นิยมใช้คืออิฐชนิด AZS (Alumina-Zirconia- Silica) ซึ่งมีอุณหภูมิภายในของเตาหลอมประมาณ 1500 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิภายนอก 95 องศาเซลเซียส และมีการสูญเสียความร้อนประมาณ 810 Kcal / $M^2h$แต่ถ้าไม่มีการใช้ฉนวนกันความร้อนจะมีอุณหภูมิภายนอกถึง 300 – 400 องศาเซลเซียส แสดงดังรูป 3.21

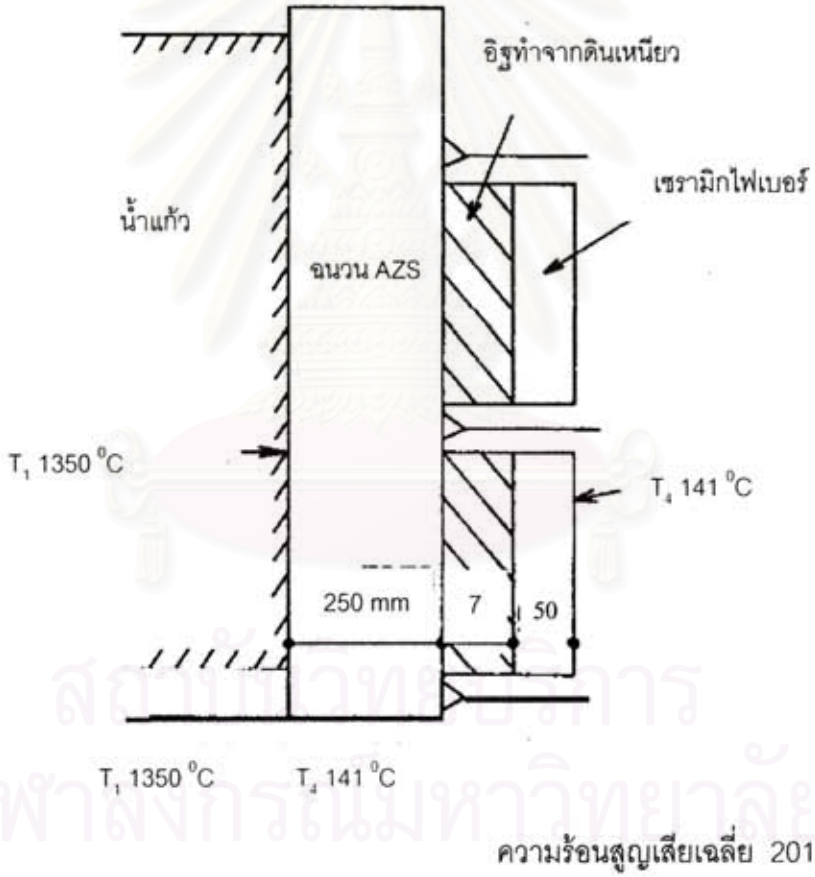



| $T_1$ °C | $T_2$ °C | $T_3$ °C | $T_4$ °C | $T_5$ °C | Q (Kcal / $M^2h$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1500 | 1343 | 1079 | 769 | 95 | 810 |
| 1600 | 1432 | 1150 | 820 | 100 | 865 |

รูปที่ 3.21 อุณหภูมิที่ชั้นต่างๆของอิฐทนไฟ (Refractory) ที่หลังคาเตาหลอม

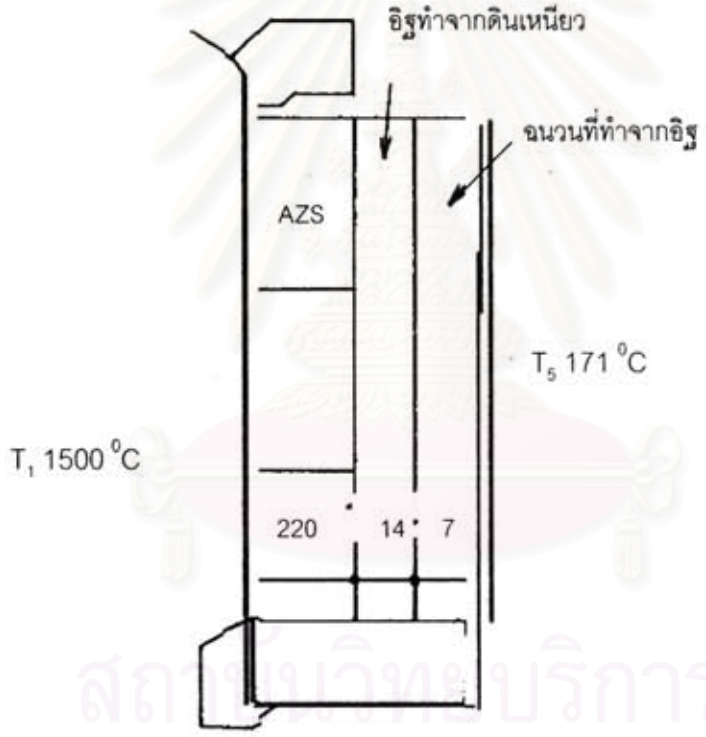
3) **ฉนวนที่ผนังเตาหลอม**

- **อิฐทนไฟ**(Refractory) **ที่ผนังเตาหลอม**ใช้วัสดุ Alumina-Zirconia- Silica **ที่มี**ตะกั่วเป็นส่วนประกอบ Fused AZS บริเวณนี้คือส่วนของเตาหลอมที่สัมผัสกับน้ำแก้ว ด้านในของผนังมีอุณหภูมิเฉลี่ย 1350 องศาเซลเซียส ด้านนอกของผนังมีอุณหภูมิเฉลี่ย 141 องศาเซลเซียส และมีการสูญเสียความร้อนเฉลี่ย 2017 Kcal / $M^2h$ แสดงดังรูป 3.22 แต่ถ้าไม่มีการใช้ฉนวนกันความร้อนจะมีอุณหภูมิผนังด้านนอกเฉลี่ย 232 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียความร้อนเฉลี่ย 6102 Kcal / $M^2h$




รูปที่ 3.22 ส่วนประกอบของอิฐทนไฟ (Refractory)ที่ผนังเตาหลอม

- **บริเวณผนังเตาด้านบนที่ไม่สัมผัสกับน้ำแก้ว** ใช้วัสดุ Alumina-Zirconia-Silica ที่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบ Fused AZS เหมือนกับผนังเตาหลอมส่วนที่สัมผัสกับน้ำแก้วแทนอิฐซิลิก้า ด้านในของผนังมีอุณหภูมิเฉลี่ย 1500 องศาเซลเซียส ด้านนอกของผนังมีอุณหภูมิเฉลี่ย 171 องศาเซลเซียส และมีการสูญเสียความร้อนเฉลี่ย 2088 Kcal / $M^2h$ แสดงดังรูป 3.23 แต่ถ้าไม่มีการใช้ฉนวนกันความร้อนจะมีอุณหภูมิผนังด้านนอกเฉลี่ย 304 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียความร้อนเฉลี่ย 6152 Kcal / $M^2h$




ความร้อนสูญเสียเฉลี่ย 2088 Kcal / $M^2h$

รูปที่ 3.23 ส่วนประกอบของอิฐทนไฟ (Refractory) ทีผนังเตาหลอมเหนือน้ำแก้ว

## 3.5 กระบวนการขึ้นรูป (Glass Forming)

จากการศึกษากระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกของประเทศไทยได้ทำการจัดกลุ่มอุตสาหกรรม โดยแบ่งตามประเภทของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

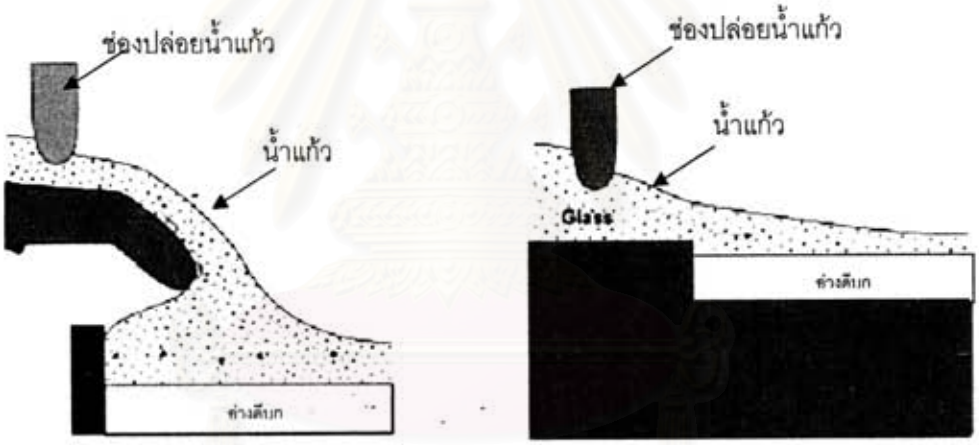
- ผลิตภัณฑ์กระจกแผ่นเรียบ
- ผลิตภัณฑ์เครื่องแก้ว
- ผลิตภัณฑ์ขวดแก้ว
- ผลิตภัณฑ์ฉนวนใยแก้ว
- ผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกประเภทอื่น ๆ (เช่น กระจกนิรภัย หลอดแก้ว ฯลฯ)

### 3.5.1 กระบวนการผลิตแก้วและกระจกตามประเภทของผลิตภัณฑ์

กระบวนการขึ้นรูปเป็นการนำน้ำแก้วที่ได้จากการหลอมแล้วผ่านรางน้ำแก้ว (Foreheart) ซึ่งมีการควบคุมและปรับอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูป จากนั้นนำน้ำแก้วมาเข้าเครื่องขึ้นรูปให้ได้ผลิตภัณฑ์แก้วตามที่ต้องการ การขึ้นรูปมีอยู่หลายวิธีตามรูปร่าง ขนาด และชนิดของผลิตภัณฑ์แก้ว โดยแบ่งการขึ้นรูปตามชนิดผลิตภัณฑ์ ดังนี้

3.5.2 **การขึ้นรูปกระจกแผ่นเรียบด้วยวิธีการโฟลตกลาส** (Float Glass Process)

วิธีการโฟลตกลาสนี้เริ่มมีการพัฒนาจากประเทศอังกฤษ ในปี 1950 โดย Pilkington จากนั้นประเทศสหรัฐอเมริกาได้นำไปพัฒนาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง การขึ้นรูปกระจกแผ่นเรียบด้วยวิธีโฟลตกลาสใช้พลังงานน้อยกว่าวิธีการขึ้นรูปแบบ Plate หรือ Sheet glass forming และให้แผ่นกระจกที่มีคุณภาพคือมีความเรียบและใสมากกว่า โดยนำน้ำแก้วที่ได้มาจากการหลอมแล้วผ่านรางน้ำแก้ว (Foreheart) มีอุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส จะไหลผ่านช่องปล่อยน้ำแก้ว Tweel ดังรูป 3.24 เพื่อลดความหนาของน้ำแก้ว จากนั้นจะถูกเทไปยังอ่างดีบุก(Tin bath) ด้วย Lip หรือ Spout ทำให้น้ำแก้วซึ่งมีคุณสมบัติไม่รวมตัวกับดีบุกลอยแยกชั้นอยู่บนดีบุก เมื่อน้ำแก้วมีอุณหภูมิลดลงจึงเกิดเป็นกระจกแผ่นเรียบ ส่วนอีกวิธีการหนึ่งซึ่งพัฒนาโดยPPG ในปี 1974 โดยการนำวัสดุที่ทนความร้อนและไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำแก้วมาใช้ในการเทน้ำแก้วที่ผ่าน Tweel แล้วแทน Lip หรือ Spout ซึ่งมีข้อดีคือช่วยลดขนาดของอ่างดีบุก(Tin bath) และทำให้เกิด Velocity ที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

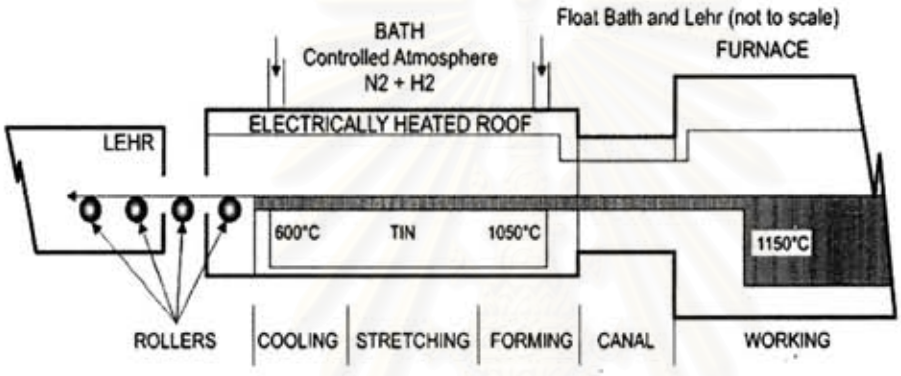



การขึ้นรูปแบบ PB Process

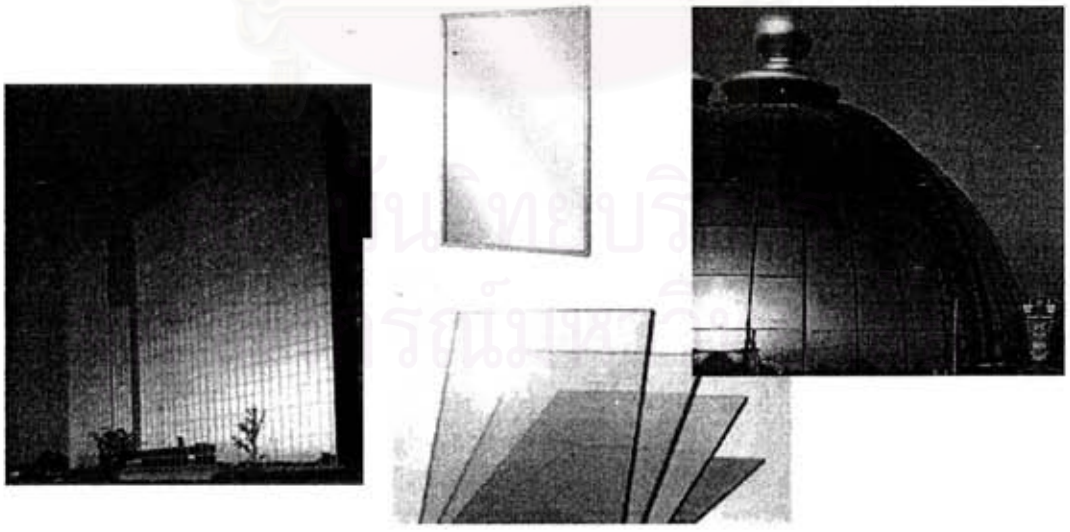
การขึ้นรูปแบบ PPG Process

รูปที่ 3.24 การขึ้นรูปกระจกแผ่นเรียบที่อ่างดีบุก (Tin Bath)

เมื่อน้ำแก้วอยู่ในอ่างดีบุก(Tin bath) แล้วจะถูกปรับความหนาด้วยการดึงน้ำแก้ว มีลักษณะเหมือนเฟืองหมุน ถ้าปรับความเร็วรอบเฟืองให้หมุนช้าจะได้กระจกแผ่นหนา แต่ถ้าปรับความเร็วรอบให้เฟืองหมุนเร็วก็จะได้กระจกแผ่นบาง โดยความหนาที่สามารถดึงน้ำแก้วได้นั้นมีความหนาตั้งแต่ 0.078 - 0.78 นิ้ว จากนั้นน้ำแก้วที่เป็นแผ่นเรียบจะถูกลดอุณหภูมิลงเรื่อยๆโดยใช้ลูกกลิ้ง (Roller) ที่ทำจากวัสดุอัลลอยด์ทนความร้อนในการลำเลียง จนกระทั่งกลายเป็นกระจกแผ่นเรียบ จนถึงตอนปลายของอ่างดีบุก(Tin bath) จะมีการตรวจสอบสิ่งเจือปนในเนื้อกระจกซึ่งจะถูกคัดแยกออกมาเพื่อนำกลับไปเป็น Cullet เพื่อนำไปหลอมใหม่ต่อไป ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 กระบวนการขึ้นรูปกระจกแผ่นเรียบด้วยวิธีโฟลตกลาส (Float Glass Process)



รูป 3.26 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กระจก

### 3.5.3 การขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แก้วด้วยแม่พิมพ์
(Glass Containers Are Formed Using Molds)

น้ำแก้วจะถูกขึ้นรูปเป็นภาชนะแก้วด้วยการนำน้ำแก้วที่ถูกตัดให้เป็นหยดน้ำแก้ว (Gob) ตามขนาดและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก้วที่ต้องการเข้าสู่แม่พิมพ์ (Molds) อุณหภูมิของหยดน้ำแก้ว (Gob) ประมาณ 950 – 1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิของหยดน้ำแก้ว (Gob) นี้มีความสำคัญต่อกระบวนการขึ้นรูปมาก เช่นถ้าหยดน้ำแก้ว (Gob) มีอุณหภูมิต่ำเกินไปจะส่งผลต่อคุณสมบัติของผลิตแก้วที่ผลิตได้ หรือระบบมีอุณหภูมิต่ำเกินไปทำให้เกิดการดึงความร้อนจากหยดน้ำแก้ว (Gob) ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิที่รางน้ำแก้ว (Foreheart) ให้เหมาะสม

เครื่องจักรที่ใช้ขึ้นรูปของบรรจุภัณฑ์แก้วในปัจจุบัน เรียกว่า IS (Individual section) คือ เครื่องจักรที่แยกออกมาเป็นส่วนตัว ไม่มีการเกี่ยวข้องใดๆกับเครื่องจักรอื่น เช่นถ้าเครื่องจักรในส่วนอื่นหยุดทำงานแต่ครื่องจักรส่วนนี้ยังสามารถทำงานต่อไปได้ โดยเครื่องจักรแบบ IS แต่ละเครื่องอาจมีรูปร่าง ลักษณะแม่พิมพ์(Mold) ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งมีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ และ Press and Blow

#### 3.5.3.1 วิธีขึ้นรูปแบบ Blow and Blow

การขึ้นรูปแบบ Blow and Blow ใช้ในการผลิตขวดปากแคบ (ปากขวดขนาดเล็กกว่า 48 มิลลิเมตร) โดยขั้นแรกจะนำน้ำแก้วที่มาจากการหลอมมาตัดหยดน้ำแก้ว (Gob) มาหยดลงแม่พิมพ์ จากนั้นเครื่องขึ้นรูปจะอัดอากาศให้หยดน้ำแก้วเกิดเป็นรูปร่างเหมือนแม่พิมพ์ จากนั้นนำแม่พิมพ์ออกแล้วนำขวดแก้วที่ขึ้นรูปแล้วไปอุ่น (Reheat) เพื่อปรับอุณหภูมิที่ผิวแก้ว แสดงดังรูปที่ 3.27

รูปที่ 3.27 วิธีขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Blow and Blow

3.5.3.2 **วิธีขึ้นรูปแบบ** Press and Blow

การขึ้นรูปแบบ Press and Blow ใช้ในการผลิตขวดปากกว้าง (ขนาดปากขวดเกินกว่า 48 มม.)โดยขั้นแรกจะนำหยดน้ำแก้ว(Gob)มาหยดลงแม่พิมพ์จากนั้นแท่งอัด(Plunger) จะถูกอัดเข้าไปในแม่พิมพ์ด้วยระบบลมจากคอมเพสเซอร์ จากนั้นนำแม่พิมพ์ออกแล้วนำไปอุ่น(Reheat) จากนั้นค่อยๆ ลดอุณหภูมิที่แก้วลง แสดงดังรูป 3.28

รูปที่ 3.28 วิธีขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Press and Blow

นอกจากนี้การขึ้นรูปแบบ Press and Blow ยังใช้สำหรับการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แก้วหรือเครื่องแก้วหลากลายชนิด รวมถึงงานเครื่องแก้วที่ทำด้วยมือ และงานขึ้นรูปที่ใช้เครื่องจักร เช่น ผลิตภัณฑ์แก้วที่ใช้บนโต๊ะอาหาร เครื่องครัว เครื่องแก้วที่ใช้สำหรับตกแต่ง หลอดไฟฟ้า หลอดไฟที่ใช้กับเครื่องอิเลกโทรนิกส์ หลอดภาพ และอุปกรณ์ทำจากแก้วสำหรับงานวิทยาศาสตร์ เป็นต้น

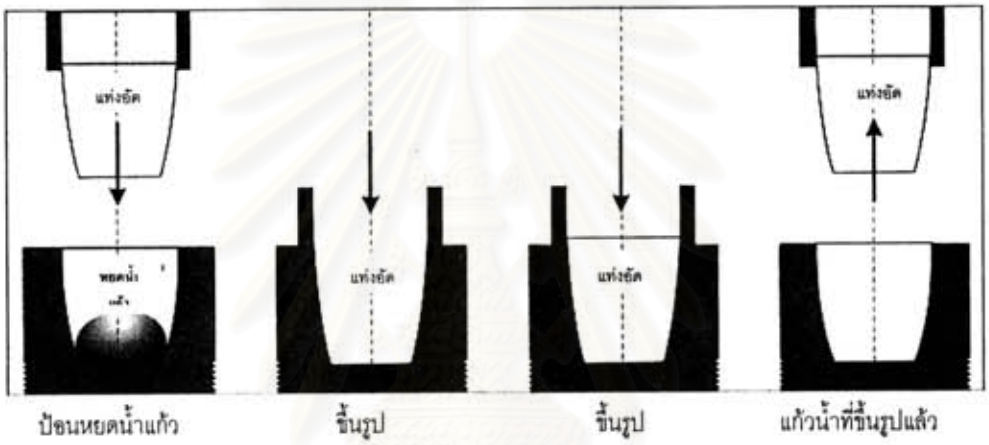
วิธีการขึ้นรูปแบบ Blow and Blow

วิธีการขึ้นรูปแบบ Press and Blow

รูปที่ 3.29 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์แก้วด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบต่างๆ

**3.5.4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แก้วที่ใช้บนโต๊ะอาหาร เครื่องครัว เครื่องแก้วที่ใช้สำหรับตกแต่ง**

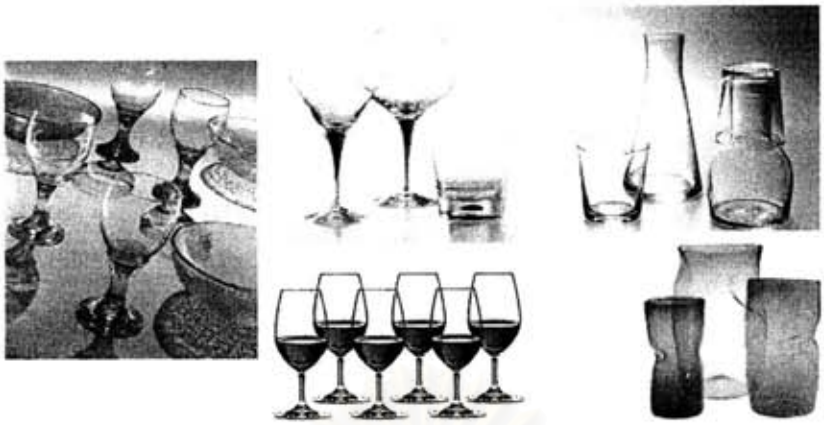
การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แก้วเหล่านี้ประมาณ 84% ใช้เครื่องจักรในการขึ้นรูป ด้วยวิธีการ Press- forming ลงแสดงดังรูป 3.30 โดยขั้นแรกจะนำหยดน้ำแก้ว(Gob) มาหยดลงแม่พิมพ์ จากนั้นแท่งอัด (Plunger) จะถูกอัดเข้าไปในแม่พิมพ์ด้วยระบบลมจากคอมเพสเซอร์ แม่พิมพ์ทำด้วยเหล็กหล่อ, แสตนเลสสตีล หรือวัสดุชนิดอื่นๆตามชนิดของผลิตภัณฑ์ เครื่องจักรที่ใช้ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์อัดอากาศผ่านลูกสูบทรงกระบอก สามารถผลิตได้ 10 – 60 ชิ้นต่อนาที ขึ้นอยู่กับการปรับตั้ง ส่วนแม่พิมพ์ที่ใช้ต้องควบคุมไม่ให้ร้อนจนเกินไป ส่วนแท่งอัด(Plunger)ต้องทำให้เย็นด้วยการใช้ละอองน้ำหรือน้ำมันหล่อลื่นอยู่ตลอดเวลาเพื่อป้องกันการติดกับแม่พิมพ์




รูปที่ 3.30 วิธีขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Press Forming

การขึ้นรูปด้วยวิธีSpining ใช้กับผลิตภัณฑ์แก้วที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลมหรือวงแหวน เช่น จานและชามตื้น(Plate) ลง แสดงดังรูป 3.31 โดยขั้นแรกจะนำหยดน้ำแก้ว(Gob) มาหยดลงแม่พิมพ์จากนั้นหมุนแม่พิมพ์ด้วยแรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางในขณะเดียวกับที่แท่งอัด (Plunger) กดลงที่แม่พิมพ์ จากนั้นใช้ลมเป่าเพื่อลดอุณหภูมิแก้ว แล้วส่งไปยังสายพานลำเลียงเพื่อเข้าตู้อบต่อไป

รูปที่ 3.31 วิธีขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Spin Forming

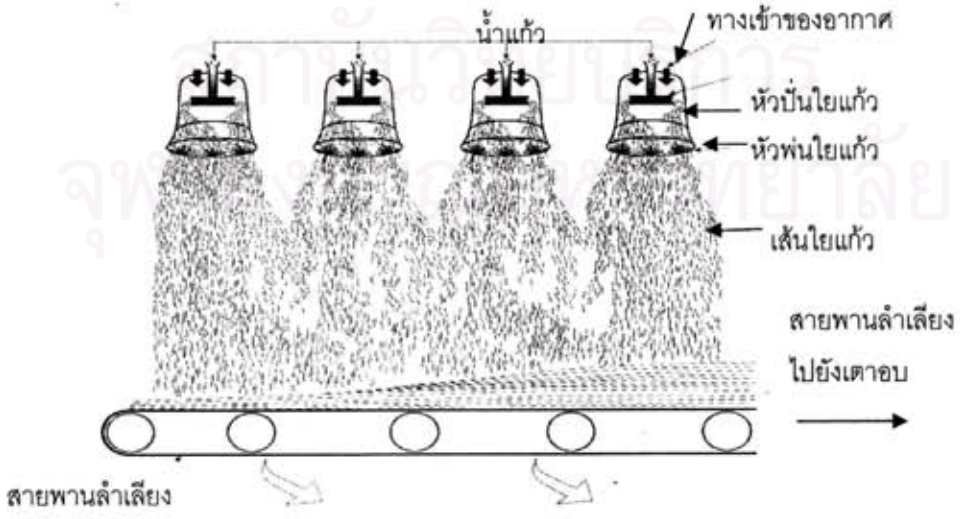


รูปที่ 3.32 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เครื่องแก้ว

3.5.5 **การขึ้นรูปฉนวนใยแก้ว** (Fiber Glass)

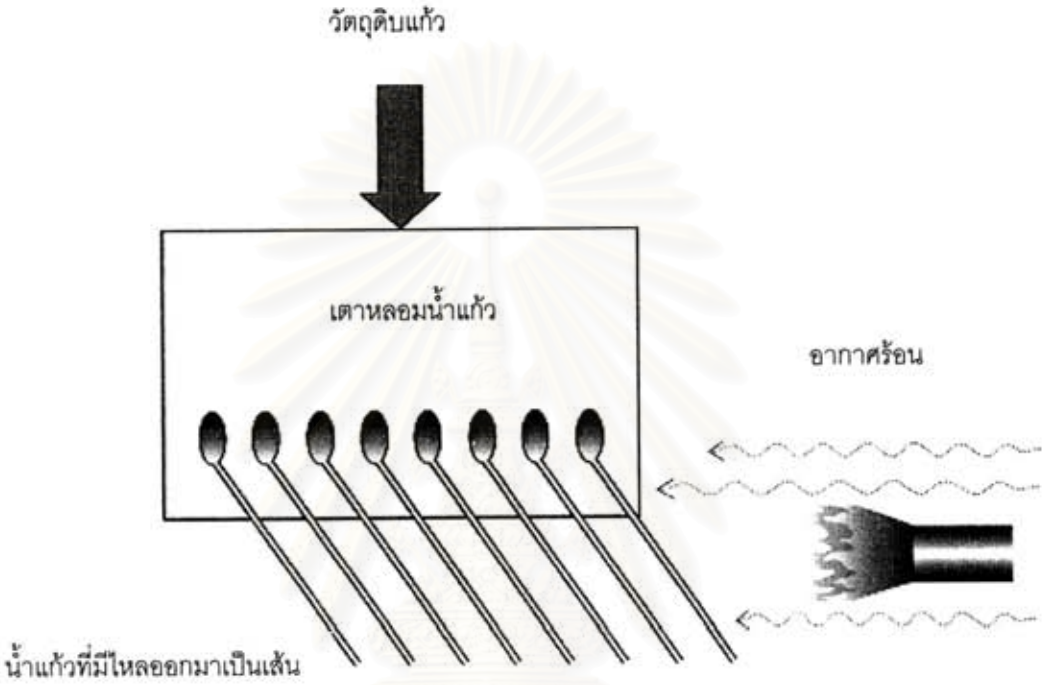
การขึ้นรูปฉนวนใยแก้วเป็นการขึ้นรูปโดยตรงจากน้ำแก้วที่มาจากจากรางน้ำแก้ว (Foreheart) การขึ้นรูปฉนวนใยแก้วมี 3 วิธีคือ การขึ้นรูปวิธีหมุนรอบ(Rotary spin fiberizing) การขึ้นรูปวิธีลดเปลวไฟ(Flame attenuation) และการพ่นไอน้ำและอากาศ ( steam and air injection ) ทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่มีความหนาหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 ถึง 10 ไมครอน

3.5.5.1 **การขึ้นรูปวิธีหมุนรอบ**(Rotary spin fiberizing) เป็นการขึ้นรูปด้วยการนำน้ำแก้วจากรางน้ำแก้ว(Foreheart) มาขึ้นรูปเป็นฉนวนใยแก้วที่อุณหภูมิสูง โดยเข้าเครื่องปั่นใยแก้วที่ความเร็วรอบ 2000 – 3000 ต่อนาที โดยน้ำแก้วจะถูกขับเคลื่อนผ่านช่องขนาดเล็กนับร้อยช่องที่หมุนด้วยความเร็วสู่ศูนย์กลาง(Centrifugal) ทำให้น้ำแก้วเกิดการกระจายตัวเป็นละอองฝอยออกมาจากช่องของเครื่องปั่นใยแก้ว เมื่อถูกอากาศร้อนทำให้เกิดเป็นเส้นใยแก้วแสดงดังรูปที่ 3.33




รูปที่ 3.33 การขึ้นรูปฉนวนใยแก้วด้วยวิธี Rotary spin fiberizing

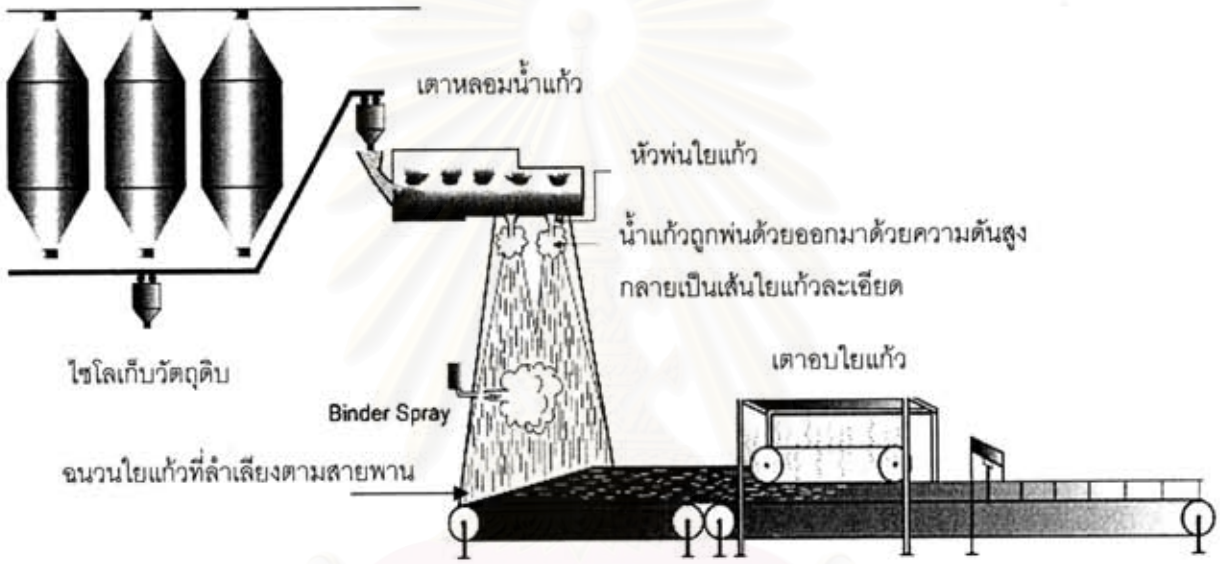
3.5.5.2 **การขึ้นรูปวิธีลดเปลวไฟ** (Flame attenuation) เป็นการขึ้นรูปโดยใช้เปลวไฟหรืออากาศร้อนในการขึ้นรูป โดยใช้น้ำแก้วที่ไหลตามแรงโน้มถ่วงจากรางน้ำแก้ว (Fore heart) ผ่านช่องขนาดเล็กมาก(Orifices) ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในสภาวะที่ความเร็วรอบสูงและที่อากาศร้อน การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ทำให้เกิดฉนวนใยแก้วที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ได้ประมาณ 30% แสดงดังรูป 3.34



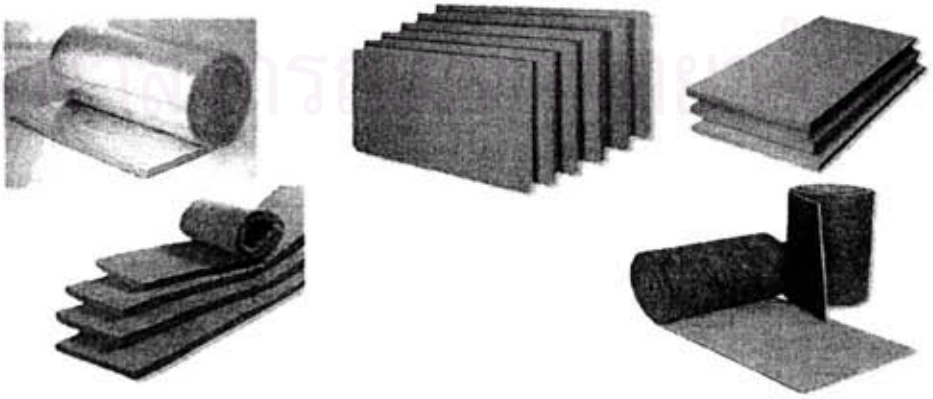

รูปที่ 3.34 การขึ้นรูปฉนวนใยแก้วด้วยวิธี Flame attenuation

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.5.3 **การขึ้นรูปวิธีพ่นไอน้ำและอากาศ** ( steam and air injection ) หลังจากที่น้ำแก้วผ่านเครื่องขึ้นรูปแล้วจะถูกพ่นออกมาด้วยแหวนแพลทตินัมอัลลอยด์เป็นละอองน้ำแก้วเมื่อถูกลมเป่าทำให้กลายเป็นเส้นใยเส้นเล็กๆที่มีความละเอียดมาก ซึ่งขนาดและความยาวของเส้นใยแก้วขึ้นอยู่กับแรงดันที่ฉีดพ่นเป็นละอองน้ำแก้ว และอุณหภูมิของน้ำแก้ว จากนั้นจะใยแก้วจะถูกผสมกับสารเคมี ที่ประกอบไปด้วย เรซิ่นฟีนอล-ฟอร์มาดีไฮด์ (Phenol-formaldehyde), น้ำ,ยูเรีย, ลิกนิน ไซลีน(Silane) ,อะลูมินา และอื่นๆตามผลิตภัณฑ์ที่ผลิต เมื่อผ่านกระบวนการผสมแล้วจะถูกขนส่งไปตามสายพานแสดงกระบวนการดังรูป3.35




รูปที่ 3.35 การขึ้นรูปฉนวนใยแก้วด้วยวิธี steam and air injection

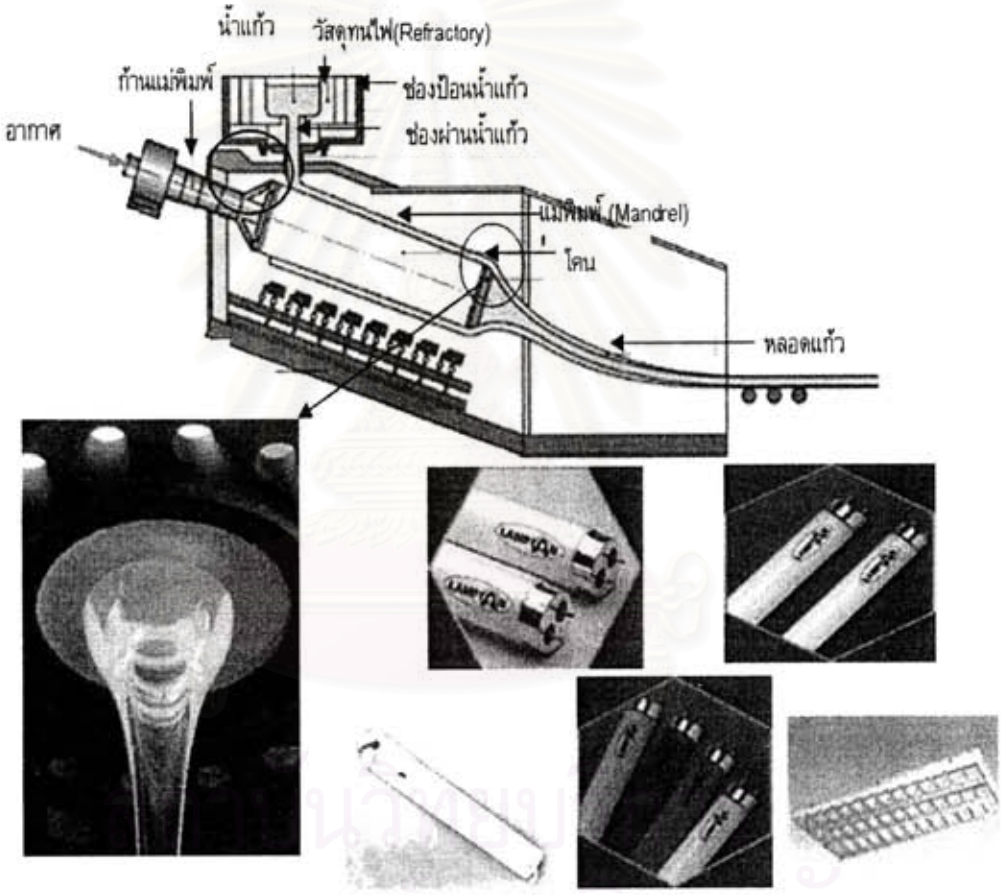


รูปที่ 3.36 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ฉนวนใยแก้ว (Fiber glass)

3.5.6 **ผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกประเภทอื่น ๆ**

3.5.6.1 **การขึ้นรูปหลอดไฟและหลอดแก้ว** (Tube glass)

การขึ้นรูปหลอดไฟและท่อแก้วโดยการนำน้ำแก้วจากการหลอมไหลลงไปบนพื้นผิวของแท่งแม่พิมพ์ (Mandrel) ที่กำลังหมุนอยู่ จากนั้นแก้วเหลวจะถูกดึงเป็นแท่งแก้วกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของหลอดแก้วขึ้นอยู่กับความเร็วของแม่พิมพ์ ภายในแท่งแก้วกลวงจะถูกเป่าด้วยอากาศจนกระทั่งแก้วแข็งตัว ซึ่งปริมาณและความเร็วลมที่เป่าในหลอดแก้วขึ้นอยู่กับขนาดของหลอดแก้ว แสดงดังรูปที่ 3.37



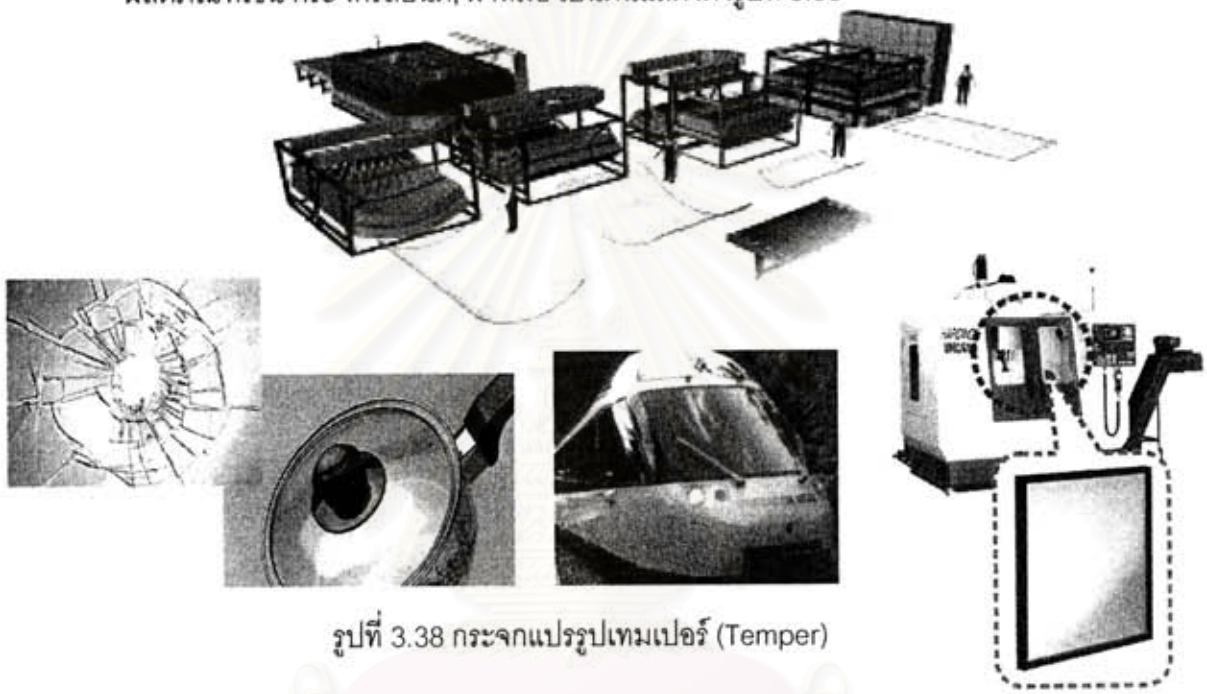

แม่พิมพ์ที่ดึงน้ำแก้วออกเป็นหลอดแก้ว ตัวอย่างผลิตภัณฑ์หลอดแก้ว

รูปที่ 3.37 วิธีขึ้นรูปหลอดไฟ

3.5.6.2 กระจกแปรรูป

- **กระจกเทมเปอร์** (Temper)

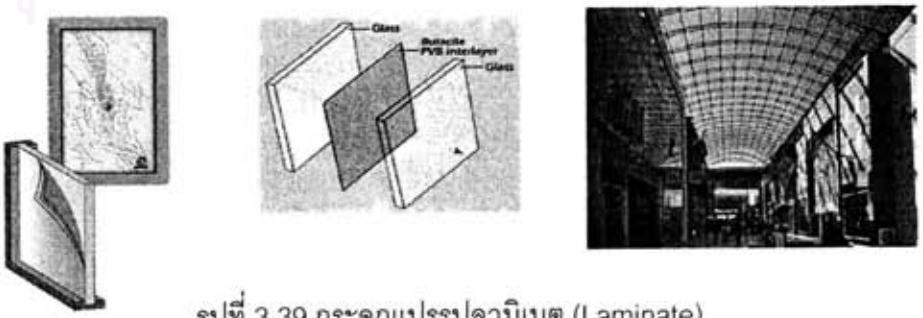
คือการนำกระจกแผ่นเรียบมาผ่านการอบที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 700 °C) แล้วทำให้เย็นตัวที่อัตราที่กำหนด กระจกมีความแข็งแรงทนทานมากขึ้น กระจกที่ผ่านกรรมวิธีแปรรูปนี้เป็นกระจกนิรภัยที่สามารถดัดโค้งได้และรับแรงกระแทกได้มากกว่ากระจกธรรมดา เมื่อเวลาแตกก็จะแตกตัวเป็นเม็ดข้าวโพดไม่มีความแหลมคมให้เป็นอันตรายได้ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เช่น กระจกรถยนต์, ฝาหม้อ เป็นต้นแสดงดังรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 กระจกแปรรูปเทมเปอร์ (Temper)

- **กระจกลามิเนต** (Laminate)

คือการนำแก้วหรือกระจกมาประกบซ้อนกัน 2 แผ่นหรือมากกว่า โดยใช้ฟิล์มกาวคั่นอยู่ตรงกลาง ทำให้ได้กระจกนิรภัยที่มีความปลอดภัยสูง คือมีความแข็งแรงทนทานมาก เมื่อแตกเศษกระจกก็จะไม่หลุดออกมาเป็นอันตราย และถ้าใช้ฟิล์มที่มีความเหนียวเป็นพิเศษคั่นกลางกระจกหลายๆ ชั้น ก็จะได้กระจกที่สามารถกันกระสุนได้ หรือใช้เป็นกระจกกันความร้อนในอาคารได้แสดงดังรูปที่ 3.39




รูปที่ 3.39 กระจกแปรรูปลามิเนต (Laminate)

3.6 **กระบวนการอบแก้วและการตกแต่ง** (Post – Forming and Finishing Operations)

หลังจากที่แก้วผ่านการขึ้นรูปแล้ว ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวภายนอกและภายในเนื้อแก้ว ส่งผลให้เกิดความเครียด(Strain)ในเนื้อแก้ว ทำให้แก้วเกิดรอยร้าวหรือแตกได้ ดังนั้นลดความเครียดในเนื้อแก้ว ซึ่งมีอยู่หลายวิธีตามชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต ดังนี้

- **การอบแห้ง** (Curing or drying) เป็นการอบด้วยเตาอบ(Oven) เพื่อให้สารเรซิน หรือสารประกอบอื่นๆที่เติมเข้าไปในแก้วแห้ง
- **การอุ่นแก้ว** (Annealing) เป็นการลดความเครียดในเนื้อแก้วด้วยการทำให้แก้วค่อยๆเย็นตัวลงอย่างช้าๆ เพราะหลังจากแก้วที่ขึ้นรูปแล้วถ้าปล่อยให้เย็นตัวลงโดยทันทีอาจทำให้เกิดการร้าวหรือแตกได้ ซึ่งมีผลมากกับผลิตภัณฑ์แก้วที่มีความหนา
- **การเทมเปอร์** (Tempering) เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เนื้อแก้ว ใช้มากในอุตสาหกรรมกระจกแผ่นเรียบ โดยอบแก้วจนกระทั่งแก้วเกิดการอ่อนตัว จากนั้นทำให้แก้วเย็นลงอย่างรวดเร็วด้วยลมเป่า ทำให้ที่พื้นผิวของแก้วเกิดการหดตัวและการลดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องทำให้โครงสร้างภายในของเนื้อแก้วมีการกระจายความเครียดไปทั่วเนื้อแก้ว จึงทำให้เกิดแรงต้านการหักและการร้าวของเนื้อแก้ว
- **การลามิเนต** (Laminating) เป็นการนำกระจกตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไปมาอัดติดกันโดยมีผ่นฟิล์มพลาสติกคั่นอยู่ระหว่างกลาง เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้ใช้งาน เช่นกระจกรถยนต์
- **การเคลือบ** (Coating) เป็นการใส่สารเติมแต่งลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางประการให้แก่แก้ว เช่นการใส่สารเมแต่งเพื่อให้กระจกละท้อนความร้อนได้มากขึ้น
- **อื่นๆ** เช่น การเพิ่มความเงาวาว (Polishing) หรือการตกแต่ง (Decorating) เพื่อเพิ่มสีสันและความสวยงามให้แก่แก้ว

- **การตัดแก้ว** เป็นการทำให้ผลิตภัณฑ์แก้วได้สัดส่วนและขนาดตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งการตัดสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

- การใช้เครื่องจักร (Mechanical cutting) เป็นการตัดโดยใช้เครื่องจักที่มีลักษณะเป็นล้อหมุนในการตัดแก้ว
- การใช้เปลวไฟ (Thermal cutting) เป็นการตัดในบริเวณที่มีส่วนแคบ ความร้อนจากเปลวไฟทำให้แก้วนิ่ม สามารถตัดส่วนที่เกินออกมาได้ รอยตัดที่ดีจะเรียบและคม
- การเจาะรู (Drilling holes) ใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทท่อแก้ว โดยนำท่อไปหมุนจากนั้นใช้ ทังสเตนคาร์ไบ หรือเพชร เจาะลงไปที่ผิวแก้วอย่างรวดเร็ว

### 3.6.1 กระบวนการอบและตกแต่งตามประเภทผลิตภัณฑ์แก้ว

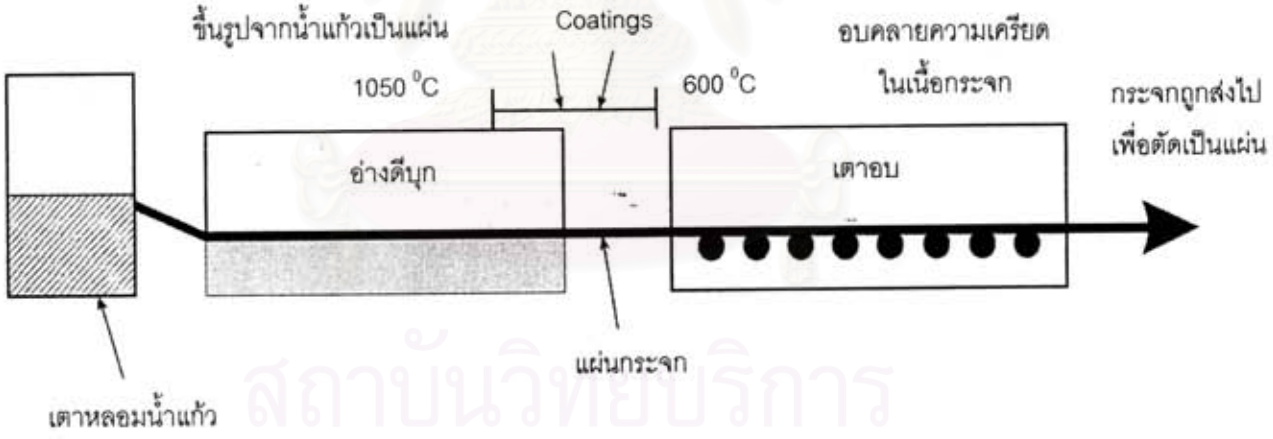
**1) กระจกแผ่นเรียบ**

หลังจากที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นกระจกแผ่นเรียบแล้ว จากนั้นนำมาอบ(Annealed) เพื่อรักษาอุณหภูมิของกระจกและมีการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ โดยใช้ตู้อบที่เรียกว่า แร (Lehr) แสดงดังรูป 3.40 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 นำแผ่นกระจกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป(มีอุณหภูมิ ประมาณ 550 – 560 องศาเซลเซียส ) ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจุด Annealing point จึงต้องมีการให้ความร้อนไว้เพื่อรักษาอุณหภูมิจนกระทั่งความเครียดภายในเนื้อกระจกลดลง

ขั้นที่ 2 ให้กระจกลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ โดยให้อุณหภูมิกระจก (Temperature gradient) ทั้งภายนอกและภายในมีอุณหภูมิไม่แตกต่างกัน

ขั้นที่ 3 รักษาอุณหภูมิกระจกให้มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิลดลงอย่างคงที่ จนกระทั่งกระจกออกจากตู้อบ

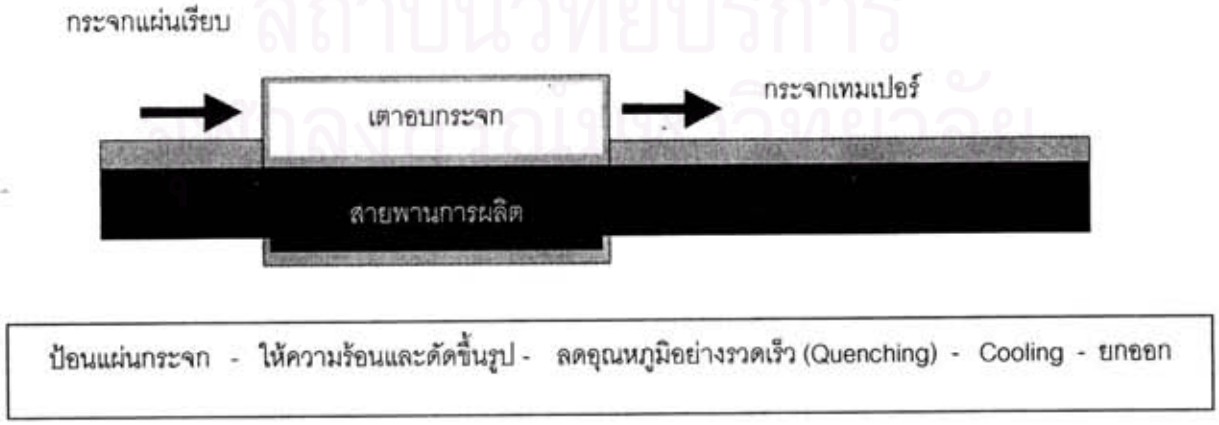



รูปที่ 3.40 กระบวนการอบ (Annealing) กระจกแผ่นเรียบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากนี้เมื่อนำแผ่นเรียบหรือกระจกโฟลตไปผ่านกระบวนการต่างๆจะได้ผลิตภัณฑ์กระจกดังนี้

- **กระจกเทมเปอร์** (Tempered glass) การTempering เป็นการเพิ่มความแข็งแรงต่อการแตกหัก จะใช้หลักการเดียวกับการทำ Prestressed concreat กล่าวคือ สร้างชั้น Compressive stress ขึ้นที่ผิวแก้วเพื่อต้านแรงแตกหักจาก Tensile stress ภายนอก หลักการTempering คือการให้ความร้อนกับกระจกที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดอ่อนตัว (Softening point) ของแก้วเล็กน้อยประมาณ 600 – 700 องศาเซลเซียส และทำให้ผิวกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยการใช้ลมเย็นเป่า (Air quenching ) ผลจากความแตกต่างจากผิวนอกและส่วนกลางของแผ่นกระจก จะทำให้เกิดเป็นชั้น Compressive stress ขึ้นที่ผิวนอกของแผ่นกระจกทั้งสองด้าน โดยจะประกบส่วนกลางซึ่งอยู่ในสภาวะ Tensile stress เหมือนลักษณะ Sandwich ชั้น Compressive stress ที่ผิวจะช่วยต้านแรงแตกหักจาก Tensile stress ภายนอก ทำให้ความแข็งแรงของแผ่นแก้วที่ Tempering แล้วเพิ่มขึ้นประมาณ 4 เท่าโดยที่กระจกก่อนทำ Tempering ต้องตัดให้ได้ขนาดที่ต้องการก่อน เพราะถ้าตัดหลังจากการทำ Tempering กระจกจะแตกทั้งแผ่น กระจก Temper จะมีลักษณะการแตกไม่เหมือนแก้วธรรมดา คือเมื่อแตกจะเป็นชิ้นเล็กๆซึ่งถือได้ว่าเป็น Safety glass ชนิดหนึ่ง จึงนิยมใช้กับยานพาหนะ ประตู หรือส่วนของอาคารที่รับแรงกระแทกอยู่เสมอ รวมถึงอาคารต่างๆ เป็นต้น กระบวนการเทมเปอร์ (Tempering) แสดงดังรูป 3.41




รูปที่ 3.41 กระบวนการทำกระจกเทมเปอร์ (Temper)

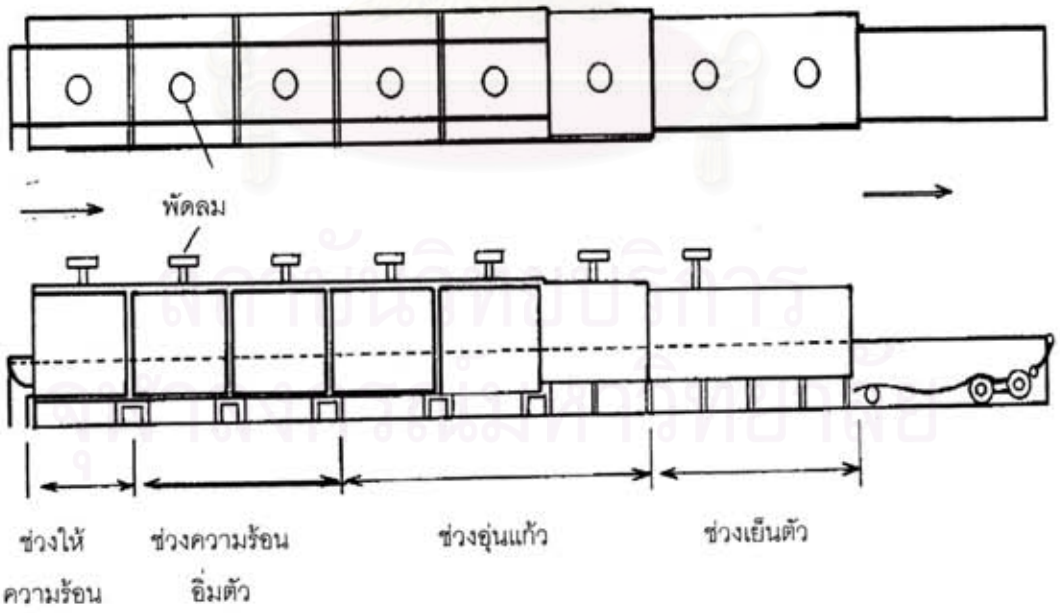
- **กระจกลามิเนต** (Laminated glass) เป็นกระจกที่ผลิตขึ้นมาเพื่อให้ความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ โดยการนำกระจกตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไปมาอัดติดกัน โดยมีแผ่นฟิล์ม PVB (Polyvinyl butyral) ที่เหนียวและแข็งแรงซ้อนอยู่ระหว่างกลาง ทำหน้าที่ยึดเกาะให้กระจกทั้งสองแผ่นติดกัน เมื่อกระจกชนิดนี้ถูกกระแทกจนแตก แผ่น PVB นี้จะช่วยยึดเกาะไม่ให้เศษกระจกกระเด็นออกมา ซึ่งจะมีเพียงรอยแตกหรือร้าวคล้ายใยแมงมุมเท่านั้น กระจกลามิเนตเป็นกระจกที่ให้ความปลอดภัยสูง จึงนิยมใช้เป็นกระจกบังลมรถยนต์โดยสารขนาดใหญ่ เช่น รถโดยสารประจำทาง หน้าต่างอาคารระฟ้า ประตูทางเข้าออกอาคาร รวมทั้งการป้องกันการโจรกรรมและรอบทำร้าย คือกระจกกันกระสุน ซึ่งใช้ฟิล์มหนายิ่งขึ้นและใช้กระจกหลายแผ่นซ้อนกันอยู่ สามารถนำไปประกอบร่วมกับการทำฉนวน (Insulated glass) กระจกกรองเสียง (Acoustic glass)
- **กระจกฉนวน** (Insulated glass) มีลักษณะเป็นกระจก 2 ชุดซึ่งสามารถนำกระจกโฟลตใส กระจกลามิเนต กระจกเทปเปอร์ หรือกระจกสะท้อนแสงมาวางคู่ขนานกัน โดยเว้นระยะห่างพอสมควรที่ขอบกระจกทุกด้าน โดยรอบเชื่อมไว้ด้วยสารจำพวกกาวที่มีสารดูดความชื้นบรรจุอยู่ เพื่อให้ช่องว่างระหว่างแผ่นกระจกทั้งสองชุดนี้เป็นอากาศแห้ง ส่วนกาวที่เคลือบรอบแผ่นกระจกจะช่วยให้กระจกทั้งคู่คงรูปและป้องกันไม่ให้เกิดความชื้นจากภายนอกรั่วซึมเข้าไปในช่องว่างนี้ กระจกฉนวนช่วยในด้านการประหยัดพลังงาน ป้องกันการถ่ายเทความร้อนระหว่างภายในและภายนอกอาคาร และยังสามารถกรองเสียงรบกวนจากภายนอก กระจกฉนวนนิยมใช้มากกับอาคารปรับอากาศ หรือตู้แช่เย็น
- **กระจกเงา** (Mirror) กระจกเงาผลิตจากกระจกโฟลตใส และกระจกสีคุณภาพสูง จึงให้ภาพที่ชัดเจนเหมือนจริง ไม่หลอกตา โดยผ่านขั้นตอนการเคลือบเงิน เคลือบทองแดงและเคลือบสี เพื่อการสะท้อนภาพที่สดใส นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับงานตกแต่งภายใน เพื่อเพิ่มพื้นที่ทางสายตาและลดความอึดอัดจากความแคบของห้องได้
- **กระจกสะท้อนแสง** (Reflective glass) เป็นกระจกที่เคลือบผิวด้วยแผ่นออกไซด์ของโลหะ ซึ่งมีคุณสมบัติด้านการสะท้อนแสง ทำให้สามารถสะท้อนพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่แผ่รังสีได้บางส่วน นอกจากนั้นกระจกที่เคลือบเป็นกระจกสี จะยิ่งช่วยทั้งด้านการสะท้อนและดูดพลังงานความร้อนที่จะผ่านเข้าในอาคารได้อย่างมาก กระจกสะท้อนแสงยังนิยมใช้กับอาคารขนาดใหญ่

2) **บรรจุภัณฑ์แก้ว**

บรรจุภัณฑ์แก้วเช่น แก้วน้ำ ขวดแก้ว หลังจากที่แก้วผ่านการขึ้นรูปแล้ว ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวภายนอกและภายในเนื้อแก้ว ส่งผลให้เกิดความเครียด(Strain)ในเนื้อแก้ว ซึ่งทำให้แก้วเกิดรอยร้าวหรือแตกได้ ดังนั้นจึงต้องมีการอบแก้วเพื่อลดความเครียดด้วยการอบแก้ว เป็นการทำให้แก้วค่อยๆเย็นตัวลงอย่างช้าๆแสดงดังรูป 3.42 การอบแก้วมีอยู่หลายวิธีตามชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต โดยการอบแก้วจะใช้ตู้อบที่เรียกว่า แร (Lehr) มีอยู่ 2 ชนิด คือ

- **เตาอบที่ใช้เปลวไฟสัมผัสกับแก้วโดยตรง** (Direct fired type) เตาอบชนิดนี้ใช้พลังงานเชื้อเพลิงน้ำมัน แก๊ส LPG หรือไฟฟ้า ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนสูงและควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย จึงนิยมใช้มากในอุตสาหกรรมแก้ว
- **เตาอบแบบมัฟเฟิล** (Muffle type) เป็นเตาอบที่ไม่ได้ใช้เปลวไฟสัมผัสกับแก้วโดยตรง เป็นการให้ความร้อนกับแก้วโดยใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังเนื้อแก้ว สามารใช้น้ำมันเตาซึ่งมีราคาถูก แต่ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนต่ำ

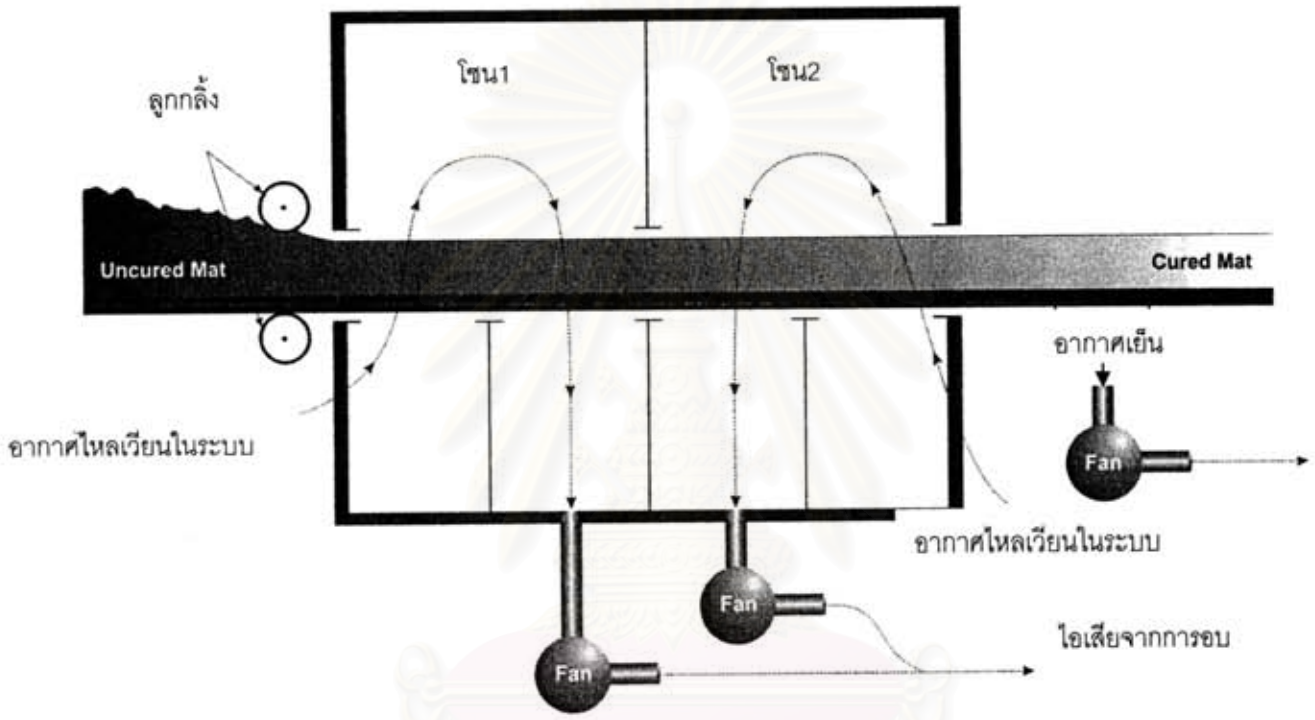
จากรูปที่ 3.42 แสดงถึงการอบแก้วโดยใช้แร(Lehr) ซึ่งใช้หลักการของการพาความร้อน ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง และใช้พัดลมในการให้อากาศภายในกระจายตัวภายในเตา การปรับปรุงประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนจะช่วยให้เวลาที่ใช้ในการอบแก้วสั้นลง




รูปที่ 3.42 กระบวนการการอบแก้วโดยใช้เตาอบ(Lehr)

3) **ฉนวนใยแก้ว** (Fibrous Glass)

หลังจากที่ฉนวนผ่านการขึ้นรูปจะถูกลำเลียงด้วยสายพานมาสู่กระบวนการอบเพื่อให้เส้นใยแห้ง ที่ตู้อบที่มีอุณหภูมิที่มีอุณหภูมิ 180 - 480 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับความหนาของฉนวน ภายในตู้อบจะมีอากาศไหลวนจากล่างขึ้นบน (แสดงดังรูป 3.43) ส่วนขอบของฉนวนที่เกินออกมาจะถูกตัดออกไป ฉนวนที่ผ่านการอบแล้วจะนำไปบรรจุต่อไป




รูปที่ 3.43 กระบวนการอบของฉนวนใยแก้ว

นอกจากนี้ยังมีการขัดหรือตกแต่งแก้ว ชนิดอื่นๆ

- **การพ่นทราย** เป็นการทำให้แก้วที่ได้จะมีความขุ่นมัว เพื่อการแกะสลักลายต่างๆ
- **การใช้ครีมกัดกระจก** เป็นการใช้สารเคมี ที่อาจมีส่วนผสมของกรดกัดแก้ว HF เพื่อการทำลวดลายบนแก้ว
- polishing เป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตพวกเลนส์ต่างๆ
- cutting เป็นการใช้ช่างฝีมือในการเจียระไนแก้วและคริสตัลต่างๆ
- laser เป็นการแกะสลักโดยใช้แสงเลเซอร์

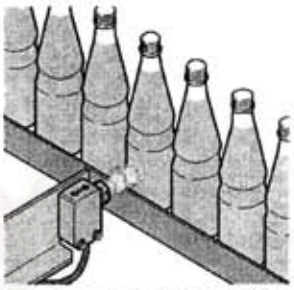
### 3.7 กระบวนการตรวจสอบและการบรรจุ

หลังจากที่ผลิตภัณฑ์แก้วผ่านกระบวนการอบ(Anealing) แล้วจะมีการนำผลิตภัณฑ์ไปตรวจสอบด้วยสายตา หรือใช้เครื่องจักรในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น รูปทรง, รอยร้าว, ความใส หรือข้อบกพร่องอื่นๆที่เกิดขึ้น ในผลิตภัณฑ์แก้วบางชนิดเช่นกระจกเทมเปอร์จะมีการทดสอบความแข็งแรงของกระจกด้วย เป็นต้น แสดงดังรูป 3.44 และ 3.45

เมื่อผ่านการตรวจสอบอย่างละเอียดแล้วผลิตภัณฑ์แก้วชิ้นไหนที่ไม่ผ่านการตรวจสอบ (ถูก Reject) จะถูกนำมาบดเป็นเศษกระจก(Cullet) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตต่อไปได้ ส่วนผลิตภัณฑ์แก้วที่ผ่านการตรวจสอบจะนำมาบรรจุห่อหรือกล่องเพื่อนำไปจัดจำหน่ายต่อไป

รูปที่ 3.44 การตรวจสอบผลิตภัณฑ์แก้วและกระจก

การตรวจสอบผลิตภัณฑ์กระจกโดยใช้เลเซอร์



การตรวจสอบผลิตภัณฑ์ขวดแก้ว

รูปที่ 3.45 การบรรจุผลิตภัณฑ์แก้ว

# บทที่ 4

# การบริโภคพลังงานและการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงาน ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

## 4.1 ความนำ

ก่อนการหามาตรการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกนั้น จำเป็นต้องพิจารณาประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศเสียก่อนว่าประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตเป็นอย่างไร โดยพิจารณาจากค่า SEC ซึ่งเป็นค่าชี้วัดการบริโภคพลังงานจำเพาะในระดับกระบวนการผลิตมาเทียบเคียงพลังงาน ถ้าผลการเทียบเคียงพลังงานพบว่าประสิทธิภาพพลังงานดีกว่าก็แสดงว่าไม่จำเป็นต้องดำเนินมาตรการใดๆแต่ถ้าประสิทธิภาพพลังงานแย่กว่าแสดงว่ายังมีความแตกต่างของประสิทธิภาพพลังงานอยู่ ซึ่งสามารถหามาตรการเพื่อลดความแตกต่างของประสิทธิภาพพลังงานดังกล่าวได้

การหามาตรการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานมีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

1. ศึกษาการบริโภคพลังงานและค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะ (SEC) ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกของต่างประเทศ

2. ดำเนินการตรวจวัดการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิตและระบบสนับสนุน (Utilities) รวมทั้งหามาตรการต่างๆที่อาจนำไปใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในโรงงานตัวอย่าง จำนวน 11 แห่ง

3. นำค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะในกระบวนการผลิตจากต่างประเทศมาเทียบเคียงพลังงาน (Benchmarking) กับประเทศไทยเพื่อทราบถึงความแตกต่างหรือช่องห่าง (Gap) ระหว่างการใช้พลังงานในประเทศเมื่อเปรียบเทียบกับต่างประเทศ และเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงาน นอกจากนี้ยังสามารถนำผลของการเทียบเคียงมากำหนดเป็นค่า SEC Benchmarking ได้

4. ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก จากแนวทางและกรณีศึกษาของต่างประเทศ

5. กำหนดมาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพการบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกโดยวิเคราะห์และศึกษาหามาตรการจากโรงงานตัวอย่าง นอกจากนี้ยังศึกษาจากมาตรการที่มีการศึกษาวิจัยและดำเนินการในปัจจุบันของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกทั่วโลก เพื่อให้ได้มาตรการที่ลดการบริโภคพลังงานและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงโดยส่วนนี้จะนำเสนอรายละเอียดในบทที่ 5

**4.2 การปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในต่างประเทศ**

อุตสาหกรรมแก้วและกระจกถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญในทุกประเทศทั่วโลก เพราะผลิตภัณฑ์แก้วละกระจกสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆได้ เช่น นำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมมีแนวโน้มการเติบโตอย่างต่อเนื่องจึงส่งผลให้การใช้พลังงานของอุตสาหกรรมสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ด้วยสถาการณ์ราคาเชื้อพลิงที่ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น และปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่หลายประเทศเริ่มตระหนักถึงความสำคัญเพราะก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อน จึงเป็นแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้ประเทศที่มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเช่นสหรัฐอเมริกาหรือสหภาพยุโรป มีการวิจัยและพัฒนาประสิทธิภาพพลังงาน โดยเฉพาะประเทศสหรัฐอเมริกาได้จัดให้อุตสาหกรรมแก้วและกระจกเป็น 1 ใน 8 ของอุตสาหกรรมสำหรับอนาคตเพราะแก้วและกระจกสามารถนำกลับมารีไซเคิลโดยการนำมาหลอมใหม่ได้ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยและพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานโดยผู้เชี่ยวชาญในอุตสาหกรรมและนักวิจัย รวมทั้งหน่วยงานต่างๆเช่น กระทรวงพลังงานในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นต้น ซึ่งมีงานวิจัยในด้านต่างๆ เช่น การพัฒนาเทคโนโลยีของเตาหลอมและรูปแบบการหลอมรวมทั้งวัสดุทนไฟ (Refractory) ด้วย การพัฒนาเทคนิคในกระบวนการผลิตและการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพ การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและควบคุมการผลิต การนำเทคนิคแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตแบบใหม่ๆ การปรับปรุงระบบการปล่อยมลภาวะและการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ การพัฒนาผลิตภัณฑ์แก้วแบบใหม่ๆเพื่อรองรับเทคโนโลยีอื่นๆในอนาคต เป็นต้น

ในประเทศสหรัฐอเมริกาและสหภาพยุโรปได้แบ่งอุตสาหกรรมแก้วและกระจกออกเป็น 4 อุตสาหกรรมตามประเภทผลิตภัณฑ์ ดังนี้ 1.อุตสาหกรรมกระจกแผ่น 2.อุตสาหกรรมขวดแก้ว 3. อุตสาหกรรมเครื่องแก้ว และ 4.อุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว การกำหนดค่า SEC Benchmarking ขึ้นมานั้นจึงต้องทำการศึกษาจากข้อมูลหลายๆส่วนเพื่อหาค่า SEC ที่เป็นไปได้และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกของประเทศได้ โดยศึกษาเบื้องต้นจากการบริโภคพลังงานในการหลอมแก้วทางทฤษฎี ซึ่งเป็นค่า SEC ที่ต่ำที่สุดที่สามารถเป็นไปได้ในการใช้พลังงานดังนี้

### 4.2.1 การบริโภคพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกทางทฤษฎีและจากงานวิจัยในต่างประเทศ

โดยทฤษฎีแล้วนั้น จะต้องพิจารณาในส่วนของพลังงานที่ต้องใช้ในขั้นตอนการหลอมแก้ว เพราะการบริโภคพลังงานส่วนมากอยู่ที่กระบวนการนี้ ซึ่งพลังงานสำหรับการหลอมแก้วนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภท ดังจะแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.1ตารางที่ 4.2 และรูปที่4.1 แสดงการเปรียบเทียบแต่ละผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าจากการคำนวณนั้นมีสมมติฐานว่า พลังงานความร้อนที่มีอยู่จะถูกใช้ทั้งหมด ซึ่งประกอบไปด้วยความร้อนสามส่วนดังต่อไปนี้

- พลังงานความร้อนของปฏิกิริยา ซึ่งใช้ในการหลอมแก้วเนื้อแก้วจากการเป็นวัตถุดิบ
- พลังงานความร้อนเอนทัลปี (enthalpy) เพื่อใช้เพิ่มอุณหภูมิของแก้วจาก20°Cถึง1500 °C
- พลังงานความร้อนในตัวของก๊าซ (คือ $CO_2$)ที่ถูกปล่อยออกมาระหว่างการหลอม

ตารางที่ 4.1 พลังงานที่บริโภคในการหลอมแก้วทางทฤษฎี

| ประเภทพลังงาน | Soda-Lime (Flat/Container Glass) GJ/ton | Borosilicate (8 % B2O3) GJ/ton | Crystal Glass (19 % PbO) GJ/ton |
|---|---|---|---|
| Heat of reaction | 0.49 | 0.41 | 0.40 |
| Enthalpy of glass | 1.89 | 1.70 | 1.69 |
| Enthalpy of gases emitted | 0.30 | 0.14 | 0.16 |
| พลังงานที่ต้องใช้ในทางทฤษฎี | 2.68 | 2.25 | 2.25 |

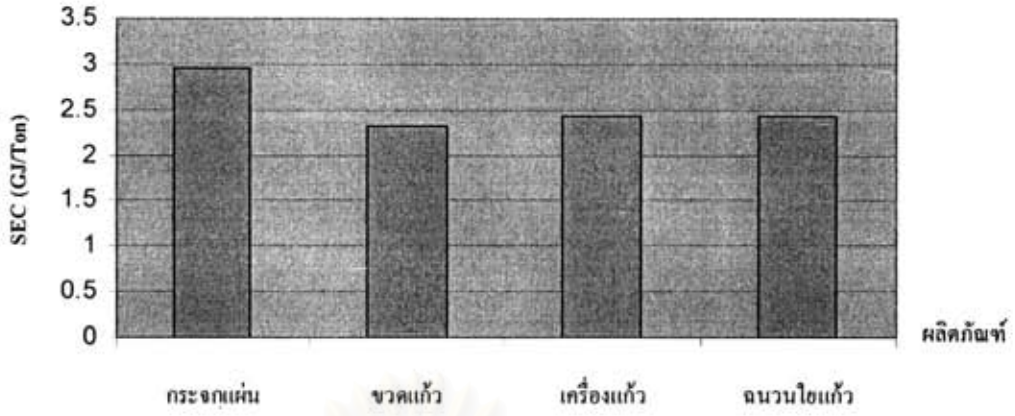
ข้างอิง : David M. Rue and Warren Wolf, 2006

จากการศึกษาพบว่าการหลอมแก้วและกระจกตามทฤษฎีมีการบริโภคพลังงานดังนี้

ตารางที่ 4.2 พลังงานที่บริโภคในการหลอมแก้วตามทฤษฎีโดยแยกตามผลิตภัณฑ์

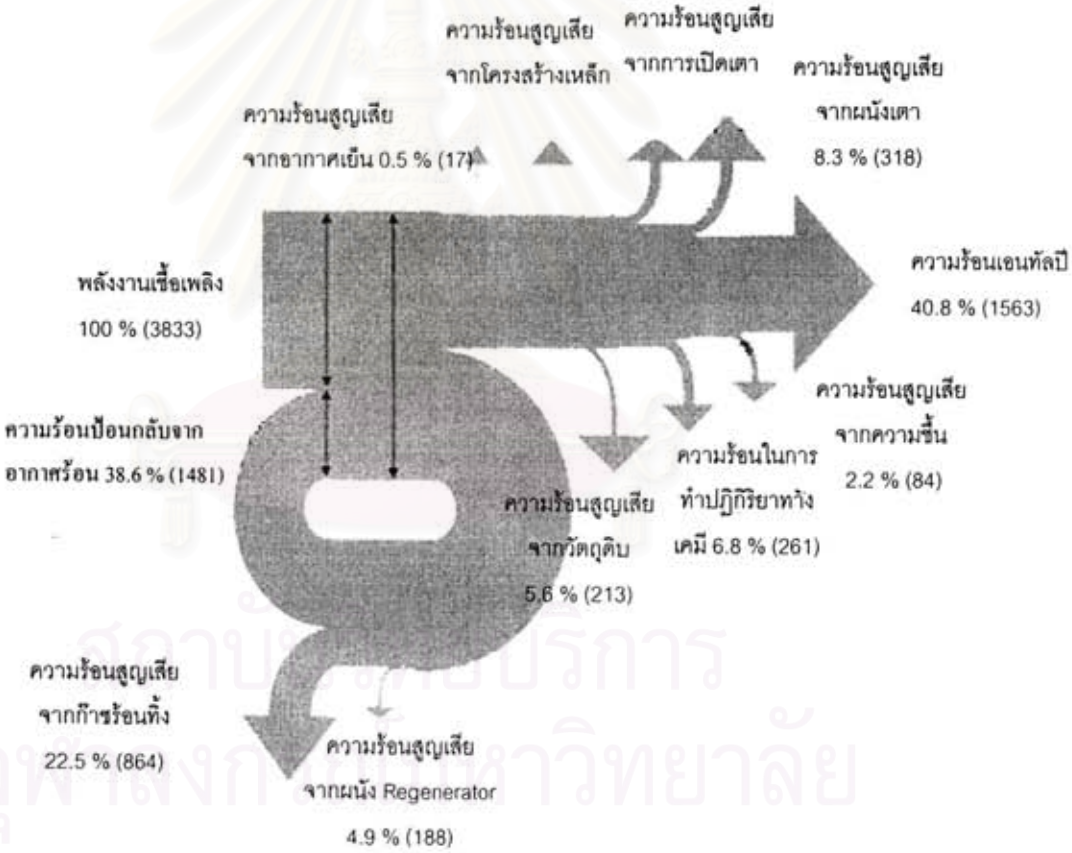
| ผลิตภัณฑ์ | พลังงานในการหลอมทางทฤษฎี (GJ/Ton) |
|---|---|
| กระจกแผ่น | 2.95 |
| ขวดแก้ว | 2.32 |
| เครื่องแก้ว | 2.43 |
| ฉนวนใยแก้ว | 2.43 |

ข้างอิง : David M. Rue and Warren Wolf, 2006




รูปที่ 4.1 พลังงานที่บริโภคในการหลอมแก้วตามทฤษฎี

มีการศึกษาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตแก้วและกระจกอย่างมากมาย ซึ่ง Sankey ได้มีการศึกษาถึงพลังงานที่สูญเสียในกระบวนการหลอม ซึ่งเรียกว่า Sankey diagram ดังรูปที่4.2




หมายเหตุ : ค่า X % และ ( Y )

โดยที่ X คือร้อยละของพลังงานที่ให้หรือสูญเสีย

Y คือปริมาณพลังงานที่ให้หรือสูญเสีย มีหน่วย MJ/Ton

อ้างอิง : David M. Rue and Warren Wolf, 2006

รูปที่ 4.2 Sankey ไดอะแกรม

แต่ในความเป็นจริงนั้น พลังงานที่ต้องการบริโภคในแต่ละผลิตภัณฑ์แก้วในกระบวนการผลิตนั้น จะแปรผันอยู่ในช่วงประมาณ 2.5 ถึงมากกว่า 4 GJ/Ton ซึ่งเกิดจากปัจจัยหลักเกี่ยวกับเทคโนโลยี ขนาด ของเตาหลอม ร้อยละเศษแก้วในวัตถุดิบ และวิธีการที่ใช้ในการดำเนินการ ซึ่งมากจาก โดยGerman VDI guideline,1997 ได้สรุปช่วงของค่าSEC ที่ใช้ในเตาหลอมแก้วรุ่นใหม่ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างค่า SEC ของเตาหลอม

| ประเภทเตาหลอม | ผลิตภัณฑ์ | พื้นที่การหลอม* | ความลึกของอ่างเตาหลอม | ปริมาณความจุของอ่างเตาหลอม | อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของอ่างเตาหลอม | อัตราการดึงน้ำแก้ว | อัตราการดึงน้ำแก้วจำเพาะ | ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ตารางเมตร | มิลลิเมตร | ตัน | - | ตันต่อวัน | Metric t/m$^2$d | GJ/Ton glass |
| Cross-fired furnace with regenerative air preheating | ขวดแก้ว | 15 – 155 | 1200 – 1700 | 50 – 500 | 1.9 – 3.0 : 1 | 40 – 500 | 2.5 – 4.0 | 4.2 |
| Regenerative end fired furnace | ขวดแก้ว | 15 – 140 | 1200 – 1700 | 50 – 500 | 1.9 – 2.5 : 1 | 40 – 450 | 2.5 – 4.0 | 3.8 |
| Recuperative furnace | ขวดแก้ว | up to 250 | 1100 – 1600 | 50 – 650 | 2.0 – 2.8 : 1 | 40 – 450 | 2.0 – 3.0 | 5.0 |
| Fuel-oxygen-fired furnace ***) | ขวดแก้ว | 110 – 154 | 1300 – 1700 | 390 – 600 | 2.0 – 2.4 : 1 | 350 – 425 | 2.3 – 3.5 | 3.05 – 3.5 |
| Cross-fired furnace with regenerative air preheating | กระจกแผ่น | 100 – 400 | 1200 – 1400 | 300 – 2500 | 2.1 – 2.8 : 1 | 150 – 900 | 2.3 – 2.7 | 6.3 |
| Cross-fired furnace with regenerative air preheating | หลอดแก้ว (หลอดโทรทัศน์) | 70 – 300 | 900 – 1100 | 160 – 700 | 2.0 . 3.0 : 1 | 100 – 500 | 1.1 – 1.8 | 8.3 |
| Furnace with recuperative air preheating | เครื่องแก้ว | 15 – 60 | 1100 – 1300 | 40 – 180 | 1.8 – 2.2 : 1 | 15 – 120 | 1.0 – 2.0 | 6.7 |
| Furnace with recuperative air preheating | ฉนวนใยแก้ว | 15 - 110 | 800 - 1500 | 50 - 200 | 2.8 : 1 | 30 - 350 | 3.4 | 4.3 |

หมายเหตุ * พื้นที่การหลอมในการหลอมและอุ่นแก้ว(melting and refining) ในกรณีเตาหลอมกระจกแผ่นวัดจากช่องป้อนวัตถุดิบ (doghouse) ถึงคอเตา(throat) เพราะไม่มีพื้นที่ในการปรับอุณหภูมิน้ำแก้ว

** - ค่าSECไม่รวมถึงช่วงลำเลียงน้ำแก้วในการขึ้นรูป(Working end)

- อายุเตาหลอมมีผลต่อประสิทธิภาพการหลอมร้อยละ 0.1-0.2 ต่อเดือน โดยไม่รวมถึงอุปกรณ์ตัวหลอมไฟฟ้า(electrical boosting) อุปกรณ์อุ่นอากาศและวัตถุดิบ

- ค่าอ้างอิงสำหรับผลิตภัณฑ์ขวดแก้วใช้เศษแก้วร้อยละ 70 ผลิตภัณฑ์กระจกแผ่นใช้เศษแก้วร้อยละ 20 ผลิตภัณฑ์หลอดแก้วและเครื่องแก้วใช้เศษแก้วร้อยละ 40

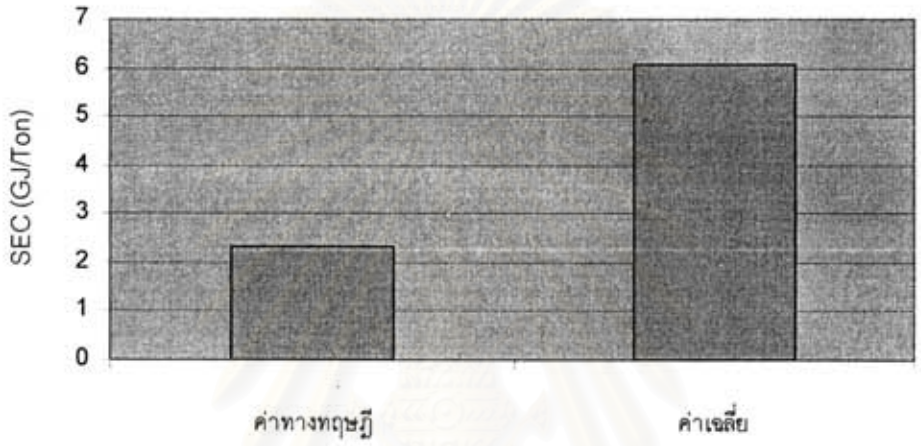
- การบริโภคพลังงานลดลงร้อยละ 0.1 – 0.3 เมื่อใช้เศษแก้วเพิ่งขึ้นร้อยละ10

- ค่า SEC ในตารางนี้เป็นค่าโดยประมาณสำหรับโรงงานที่มีเตาหลอมขนาดกลางและขนาดใหญ่ ซึ่งค่า SEC ขึ้นอยู่กับ ร้อยละเศษแก้ว อายุเตาหลอม ส่วนผสมของวัตถุ การอุ่นวัตถุดิบ ชนิดของฉนวนและอิฐทนไฟที่ใช้ และคุณภาพมาตรฐานของแก้วและกระจกที่ต้องการ

*** ข้อมูลอ้างอิงจากเตาหลอมที่ใช้เทคโนโลยี oxy-fuel จาก2โรงงานตัวอย่าง โดยพลังงานที่ใช้ไม่รวมถึงพลังงานที่ใช้ผลิตออกซิเจน

อ้างอิง : German VDI, 1997

จากตารางที่ 4.3 พบว่าในแต่ละอุตสาหกรรมต่างก็มีเทคโนโลยีและขนาดของเตาหลอมที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีการบริโภคพลังงานที่แตกต่างกัน เช่นในอุตสาหกรรมขวดแก้วที่สมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลสัดส่วนการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ขวดแก้วมีค่าเฉลี่ยและสัดส่วนการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิต ซึ่งปริมาณพลังงานที่เตาหลอมประมาณร้อยละ 67 ของปริมาณพลังงานรวม ซึ่งมีค่าSEC เท่ากับ 6.06 GJ/ton ดังรูปที่ 4.3




รูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยและสัดส่วนการใช้พลังงานที่เตาหลอมของอุตสาหกรรมขวดแก้ว ในประเทศสหรัฐอเมริกา

ข้างอิง : David M. Rue and Warren Wolf, 2006

เมื่อพิจารณาถึงการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศไทยพบว่ายังไม่มีหน่วยงานใดที่เข้ามาส่งเสริมหรือมีมาตรการใดๆที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน จึงเป็นการเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำแนวทางจากต่างประเทศมาประยุกต์ใช้ในประเทศไทย เพื่อให้การบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรมลดลง อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศ ลดการนำเข้าพลังงาน และยังช่วยแก้ปัญหามลพิษได้อีกทางหนึ่งด้วย

**4.3 ค่าดัชนีชี้วัดการบริโภคพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในต่างประเทศ**

การเทียบเคียงสมรรถนะพลังงาน เป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้ทราบถึงความแตกต่างหรือช่องห่าง(Gap) ระหว่างการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิตของโรงงานตัวอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับต่างประเทศ เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรการในการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงาน การวางแผนกลยุทธ์ทางด้านการจัดการพลังงาน และเพื่อให้โรงงานมีเป้าหมายที่ชัดเจนในการลดการบริโภคพลังงานให้มีค่า SEC ในกระบวนการผลิตของโรงงานตนเองใกล้เคียงกับค่า SEC Benchmarking มากที่สุด แต่การได้มาซึ่งค่าดังกล่าวไม่ใช่เรื่องง่าย ทั้งนี้เพราะการบริโภคพลังงานในแต่ละอุตสาหกรรมมีความผันแปรไปตามกระบวนการผลิตและเทคโนโลยีที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิต การปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตและเทคโนโลยีมักมีผลต่อผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรม ดังนั้นการปรับเปลี่ยนใด ๆ จะมีข้อจำกัดอาจเนื่องจากความต้องการผลิตภัณฑ์จากลูกค้า ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีความพยายามที่จะหาวิธีการกำหนดเกณฑ์ค่าเทียงเคียงสมรรถนะพลังงานที่น่าจะเหมาะสมกับอุตสาหกรรมแต่ละประเภท แต่ละกระบวนการผลิตและแต่ละเทคโนโลยี โดยมีแนวทางในการกำหนดดังนี้

**4.3.1 ขั้นตอนการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงาน** (SEC Benchmarking)

จากการศึกษาการบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก พบว่าพลังงานโดยประมาณร้อยละ 80 เกิดขึ้นที่กระบวนการผลิต ดังนั้นกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันย่อมมีค่า SECที่ต่างกัน แต่เนื่องจากประสิทธิภาพพลังงานไม่ได้ผันแปรตามกระบวนการผลิตแต่เพียงอย่างเดียว เทคโนโลยีการผลิตที่ต่างกัน ยังมีผลต่อการบริโภคพลังงานด้วย ดังนั้นเพื่อให้มีค่าเทียบคียงพลังงานที่เหมาะสม จึงเสนอให้ใช้แนวทางดังนี้

- จำแนกกลุ่มอุตสาหกรรมแต่ละกลุ่มออกตามกระบวนการผลิต
- นำค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะ(SEC) จากต่างประเทศมาเทียบเคียงพลังงานกับโรงงานตัวอย่างที่ทำการตรวจวัด
- กำหนดค่าปรับแก้ (Correction Factor) สำหรับแต่ละเทคโนโลยีที่ต่างจากค่าเทียบเคียงพลังงานที่อ้างอิง
- นำค่าที่เหมาะสมจากการเทียบเคียงมากำหนดเป็นค่า SEC Benchmarking

ในการกำหนดค่า SEC Benchmarking ขึ้นมานั้นต้องทำการศึกษาจากข้อมูลหลายๆส่วน เพื่อหาค่า SEC ที่เป็นไปได้และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศได้ โดยมีแนวทางการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานดังนี้

- การศึกษาจากการบริโภคพลังงานในการหลอมแก้วทางทฤษฎี ซึ่งเป็นค่า SEC ที่ต่ำที่สุดที่สามารถเป็นไปได้ในการบริโภคพลังงาน และศึกษาจากงานวิจัยในต่างประเทศ ซึ่งมีงานวิจัยที่ศึกษาการบริโภคพลังงานและการพัฒนาประสิทธิภาพการบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกโดยผู้เชี่ยวชาญในอุตสาหกรรมและนักวิจัย รวมทั้งหน่วยงานต่างๆเช่น กระทรวงพลังงานในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นต้น

### 4.3.2 ค่า SEC กระบวนการผลิตแก้วและกระจกในต่างประเทศ

สมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลสัดส่วนการบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรม กระจกแผ่น ขวดแก้ว เครื่องแก้ว และฉนวนใยแก้ว ได้ค่า SEC และสัดส่วนการบริโภค (David M. Rue and Warren Wolf, 2006) ดังนี้

#### 4.3.2.1 อุตสาหกรรมกระจกแผ่น (Flat Glass)

สมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลสัดส่วนการบริโภคพลังงานในแต่ละกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์กระจก โดยมีค่า SEC และสัดส่วนการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิตแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนการใช้พลังงานของโรงงานผลิตกระจกแผ่น ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ให้ค่า SEC Benchmarking (เบื้องต้น)

| กระบวนการย่อย | รวมปริมาณพลังงานที่ใช้ GJ/ton | ค่าทางทฤษฎี GJ/ton | สัดส่วนพลังงาน | |
|---|---|---|---|---|
| | | | ไฟฟ้า % | ความร้อน % |
| เตรียมวัถุดิบ | 0.72 | - | 100 | - |
| Melting/Refining | 6.87 | 2.95 | 2 | 98 |
| Forming | 1.57 | - | 100 | - |
| Post-Forming | 0.38 | - | 13 | 87 |
| รวม | 9.54 | - | - | - |

ตารางที่ 4.5 ค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมกระจกแผ่น (เบื้องต้น)

| กระบวนการผลิต | SEC Benchmarking | |
|---|---|---|
| | SEC, EE* (kWh/ton) | SEC,TH** (GJ/ton) |
| กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ | 64.46 | - |
| กระบวนการหลอมและรีไฟนิง(Melting/Refining) | 12.32 | 6.70 |
| กระบวนการขึ้นรูป(Forming) | 142.19 | - |
| กระบวนการหลังการขึ้นรูป(Post Forming) | 4.57 | 0.33 |
| รวม | 223.54 | 7.03 |
| SEC, total (GJ/ton) | 9.54 | |

*EE Electric, **Thermal

4.3.2.2 **อุตสาหกรรมขวดแก้ว** (Container Glass)

สมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลสัดส่วนการบริโภคพลังงานในแต่ละกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ขวดแก้ว โดยมีค่า SEC และสัดส่วนการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิตแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.6 สัดส่วนการใช้พลังงานของโรงงานผลิตขวดแก้ว
ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ให้ค่า SEC Benchmarking (เบื้องต้น)

| กระบวนการย่อย | รวมปริมาณพลังงานที่ใช้ GJ/ton | ค่าทางทฤษฎี GJ/ton | สัดส่วนพลังงาน | |
|---|---|---|---|---|
| | | | ไฟฟ้า % | ความร้อน % |
| เตรียมวัตถุดิบ | 0.72 | - | 100 | - |
| Melting/Refining | 3.90 | 2.32 | 2 | 98 |
| Forming | 1.98 | - | 100 | - |
| Post-Forming | 0.125 | - | 12 | 88 |
| รวม | 6.73 | - | - | - |

ตารางที่ 4.7 ค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมขวดแก้ว (เบื้องต้น)

| กระบวนการผลิต | SEC Benchmarking | |
|---|---|---|
| | SEC, EE (kWh/ton) | SEC,TH (GJ/ton) |
| กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ | 64.46 | - |
| กระบวนการหลอมและรีไฟนิง(Melting/Refining) | 9.85 | 3.82 |
| กระบวนการขึ้นรูป(Forming) | 176.30 | - |
| กระบวนการหลังการขึ้นรูป(Post Forming) | 2.40 | 0.11 |
| รวม | 253.01 | 3.93 |
| SEC, total (GJ/ton) | 6.73 | |

#### 4.3.2.3 อุตสาหกรรมเครื่องแก้ว

สมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลสัดส่วนการบริโภคพลังงานในแต่ละกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์เครื่องแก้ว โดยมีค่า SEC และสัดส่วนการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิตแสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.8 สัดส่วนการใช้พลังงานของโรงงานผลิตเครื่องแก้ว
ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ให้ค่า SEC Benchmarking (เบื้องต้น)

| กระบวนการย่อย | รวมปริมาณพลังงานที่ใช้ GJ/ton | ค่าทางทฤษฎี GJ/ton | สัดส่วนพลังงาน | |
|---|---|---|---|---|
| | | | ไฟฟ้า % | ความร้อน % |
| เตรียมวัตถุดิบ | 0.72 | - | 100 | - |
| Melting/Refining | 5.89 | 2.43 | 1 | 99 |
| Forming | 2.99 | - | 100 | - |
| Post-Forming | 2.88 | - | 45 | 55 |
| รวม | 12.48 | - | - | - |

ตารางที่ 4.9 ค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมเครื่องแก้ว (เบื้องต้น)

| กระบวนการผลิต | SEC Benchmarking | |
|---|---|---|
| | SEC, EE (kWh/ton) | SEC,TH (GJ/ton) |
| กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ* | 64.46 | - |
| กระบวนการหลอมและรีไฟนิง(Melting/Refining) | 6.23 | 5.82 |
| กระบวนการขึ้นรูป(Forming) | 270 | - |
| กระบวนการหลังการขึ้นรูป(Post Forming) | 117 | 1.58 |
| รวม | 457.70 | 7.40 |
| SEC, total (GJ/ton) | 12.48 | |

4.3.2.4 **อุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว**(Glass Fiber)

สมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลสัดส่วนการบริโภคพลังงานในแต่ละกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ฉนวนใยแก้ว โดยมีค่า SEC และสัดส่วนการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิตแสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.11

ตารางที่ 4.10 สัดส่วนการใช้พลังงานของโรงงานผลิตฉนวนใยแก้ว ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ให้ค่า SEC Benchmarking (เบื้องต้น)

| กระบวนการย่อย | รวมปริมาณพลังงานที่ใช้ GJ/ton | ค่าทางทฤษฎี GJ/ton | สัดส่วนพลังงาน | |
|---|---|---|---|---|
| | | | ไฟฟ้า % | ความร้อน % |
| เตรียมวัตถุดิบ | 0.72 | - | 100 | |
| Melting/Refining | 4.01 | 2.43 | 3 | 97 |
| Forming | 6.17 | - | 37 | 63 |
| Post-Forming | 2.10 | - | 95 | 5 |
| รวม | 13 | | | |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 ค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว (เบื้องต้น)

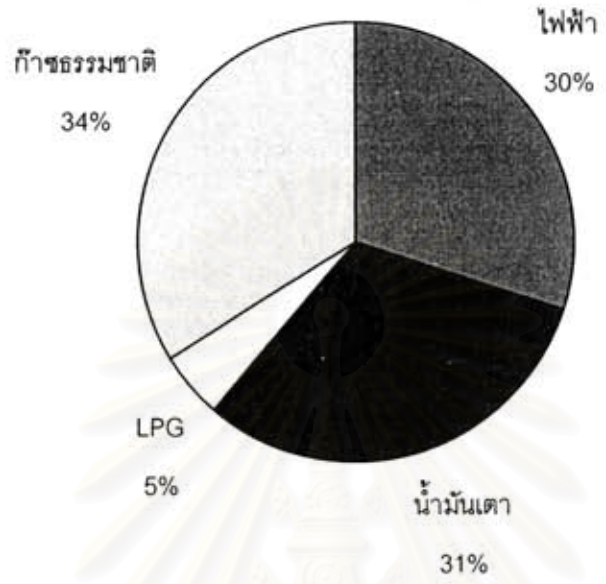
| กระบวนการผลิต | SEC Benchmarking | |
|---|---|---|
| | SEC, EE (kWh/ton) | SEC,TH (GJ/ton) |
| กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ* | 64.46 | - |
| กระบวนการหลอมและรีไฟนิง(Melting/Refining) | 10.86 | 3.89 |
| กระบวนการขึ้นรูป(Forming) | 206.98 | 3.88 |
| กระบวนการหลังการขึ้นรูป(Post Forming) | 180.07 | 0.11 |
| รวม | 462.37 | 7.88 |
| SEC, total (GJ/ton) | 13.00 | |

**4.4 ภาพรวมการบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศไทย**

อุตสาหกรรมแก้วและกระจก เป็นอุตสาหกรรมที่นำเทคโนโลยีส่วนใหญ่มาจากต่างประเทศและเป็นอุตสาหกรรมที่บริโภคพลังงานสูง (High Energy Intensive Industry) จากข้อมูล พศ.2548 พบว่าปริมาณการบริโภคพลังงานปฐมภูมิ (Primary Energy) ในอุตสาหกรรมนี้สูงถึง 22,796,442.45 GJ คิดเป็นมูลค่าพลังงาน 9,500 ล้านบาท เนื่องจากในกระบวนการผลิตแก้วและกระจกใช้อุณหภูมิสูงในการหลอมและต้องเดินเครื่องจักรตลอด 24 ชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต้นทุนพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 30-40 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด และสัดส่วนการบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกแสดงดังรูปที่ 4.4




รูปที่ 4.4 สัดส่วนการบริโภคพลังงานในการกระบวนผลิตแก้วและกระจก

อ้างอิง : แบบส่งข้อมูลการผลิตการบริโภคพลังงานและการอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานควบคุม (บพร.1) พศ. 2548

เพื่อให้เห็นถึงการบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก จึงได้ทำการแบ่งกลุ่มอุตสาหกรรมในประเทศตามผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้

1. กระจกแผ่น (Flat Glass)
2. ขวดแก้ว (Container glass)
3. เครื่องแก้ว (Press glass)
4. ฉนวนใยแก้ว (Fiber glass)

การบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิตประกอบด้วย (1) การเตรียมวัตถุดิบ (2) การหลอมวัตถุดิบเป็นน้ำแก้ว (3) การขึ้นรูป (4) การตกแต่ง การตรวจสอบและบรรจุ

**4.5 การตรวจวัดและการรวบรวมข้อมูลการบริโภคพลังงานในโรงงานตัวอย่าง**

การตรวจวัดและการรวบรวมข้อมูลเป็นสิ่งจำเป็นที่ทำให้ทราบถึงปริมาณการบริโภคพลังงานและประสิทธิภาพการบริโภคพลังงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ ซึ่งจำเป็นในการประเมินค่าดัชนีชี้วัดการบริโภคพลังงานจำเพาะ (SEC) เพื่อนำไปสู่การหาเทียบเคียงพลังงานและกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานได้(SEC Benchmarking) เพื่อนำไปสู่การหามาตรการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกได้

การประเมินการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิตนำข้อมูลมาจากการตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าและพลังงานเชื้อเพลิงของแต่ละขั้นตอนในกระบวนการผลิตตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบจนถึงขั้นตอนการบรรจุและฝ่ายสนับสนุน (Utility) ที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตเช่นระบบอากาศอัดและระบบหล่อเย็น เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวบรวมข้อมูลด้านผลผลิต การใช้พลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงในปี พ.ศ. 2547 2548 และ 2549 เพื่อทราบถึงปริมาณการบริโภคพลังงานและประสิทธิภาพการบริโภคพลังงานของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า SEC ของแต่ละกระบวนการผลิตในแต่ละโรงงานตัวอย่างที่ทำการตรวจวัด เพื่อเป็นแนวทางในการหามาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงาน การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน ตลอดจนการตรวจสอบติดตามผลการประหยัดที่เกิดขึ้นจริงหลังจากที่ได้ดำเนินการตามมาตรการประหยัดพลังงาน

**4.5.1 การบริโภคพลังงานในกระบวนการเตรียมวัตถุดิบ**

การผสมวัตถุดิบต่างๆ ทรายแก้ว ($SiO_2$) โซดาแอช ($Na_2O_3$) หินปูน ($CaCO_3$) เฟลด์สปาร์และสารอื่นๆตามสัดส่วนที่โรงงานกำหนดถูกนำมาบดและผสมเข้าด้วยกันกับเศษแก้ว(Cullet) ซึ่งการนำเศษแก้วผสมกับวัตถุดิบจะลดการบริโภคพลังงาน แต่โรงงานที่เน้นคุณภาพของผลิตภัณฑ์เช่นต้องการความใสและสิ่งเจือปนในเนื้อแก้วน้อย สัดส่วนการผสมเศษแก้วจะไม่สูงมาก เช่นไม่เกินร้อยละ20

**4.5.2 การบริโภคพลังงานในกระบวนการหลอม**

พลังงานร้อยละ 70 – 80 ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแก้วและกระจกเป็นพลังงานความร้อนที่เตาหลอม ซึ่งนำความร้อนเหล่านั้นไปใช้ในกระบวนการต่างๆดังนี้

- พลังงานความร้อนที่ให้แก่วัตถุดิบให้หลอมละลาย
- พลังงานความร้อนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีในการหลอมเป็นน้ำแก้ว
- พลังงานความร้อนที่สูญเสียให้กับผนังเตาหลอม
- พลังงานความร้อนที่สูญเสียให้กับก๊าซและเชื้อเพลิงในการสันดาป

พลังงานในการหลอมมาจากเชื้อเพลิงหรือไฟฟ้าหรือได้มาจากทั้ง 2 แหล่งขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของเตาหลอม โดยการหลอมใช้ก๊าซธรรมชาติ (NG) และน้ำมันเตาเป็นส่วนใหญ่ ส่วนการหลอมด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวนั้นยังไม่พบว่ามีการใช้ในประเทศไทย เนื่องจากการหลอมโดยใช้ไฟฟ้ามีต้นทุนสูงกว่าการหลอมโดยใช้เชื้อเพลิง ถึงแม้ว่าการใช้ไฟฟ้าจะให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่าการใช้เชื้อเพลิงเพราะไม่มีการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศระหว่างการสันดาปและ Regenerator แต่ในอุตสาหกรรมขวดแก้วมีการนำมาใช้ร่วมกับการหลอมด้วยเชื้อเพลิง เพื่อควบคุมคุณภาพของน้ำแก้ว นอกจากนี้ยังมีการนำเทคโนโลยีการใช้ก๊าซออกซิเจนในการสันดาปกับเชื้อเพลิง(Oxy-firing) แทนอากาศ เช่นในอุตสาหกรรมผลิตกระจก แต่เทคโนโลยีนี้ยังไม่มีการใช้ในประเทศไทยมากนักเนื่องมาจากราคาออกซิเจนที่สูงเกินไป ซึ่งไม่คุ้มค่ากับการลงทุนและนำมาใช้ (แสดงรายละเอียดในบทที่ 5)

เตาหลอมแบ่งออกเป็นสองส่วนคือช่วงหลอม(Melting section) คือช่วงที่หลอมวัตถุดิบและส่วนปรับสภาพเนื้อแก้ว(Refining section) แก้วหลอมจะไหลและอุณหภูมิจะลดเป็นลำดับแล้วไหลผ่านน้ำแก้ว(Forehearth) และกระบวนการขึ้นรูปต่อไป เตาหลอมในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกของโรงงานขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ในประเทศไทยจะใช้เตาหลอมแบบ Regenerative ที่อัตราการดึงน้ำแก้ว 200 – 600 ตันต่อวัน ส่วนโรงงานขนาดกำลังผลิตเล็กลงไปจะพบการใช้งานเตาแบบ Recuperative ซึ่งมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ตัวอย่างของเตาแบบ Regenerative และแบบแบบ Recuperative แสดงในบทที่3 เตาหลอมชนิดนี้มี Regenerator ที่มีช่องเปิดอยู่ข้างๆ กัน (side-by-side port) อยู่ตรงด้านหลังของเตาหลอม อากาศภายนอกที่ไหลเข้าเตาหลอมผ่านข้างหนึ่งของ Regenerator รับความร้อน เมื่อไหลออกที่ช่องเปิดข้าย เป็นลมร้อน ผ่านหัวเผาที่จ่ายเชื้อเพลิงได้เป็นเปลวไฟ มีเส้นทางการไหลรูปตัวยู (U-shape) ผ่านแก้วหลอม ผ่านช่องเปิด Regenerator ถ่ายเทความร้อนให้ Regenerator ตัวขวา แล้วไหลออกจากเตา เมื่อระยะเวลาผ่านไปครบ Regenerative time ที่ออกแบบไว้ (15 ถึง 20 นาที) Baffle ปรับทิศทางให้อากาศภายนอกไหลผ่าน Regenerator ตัวขวา และก๊าซร้อนไหลออกทาง regenerator ตัวซ้ายแทน การออกแบบดังกล่าวจะใช้ประโยชน์พลังงานจากก๊าซร้อนทิ้งเพื่อทำให้อากาศร้อนก่อนเข้าเตาหลอม

ตัวอย่างการประเมินค่า SEC ของโรงงานตัวอย่างที่ทำการตรวจวัด

โรงงานตัวอย่าง A

ปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน (Pull ton/ Day) 100 ตันต่อวัน จำนวนเตา 1 เตา ร้อยละเศษแก้วเท่ากับ12

| ขั้นตอนการผลิต | ปริมาณผลผลิต (Ton / Day) | พลังงานที่ใช้ | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | SEC พลังงานไฟฟ้า (kWh / Day) | SEC พลังงานไฟฟ้า (kWh / Ton) | พลังงานความร้อน (GJ / Day) | SEC พลังงานความร้อน (GJ / Ton) |
| เตรียมวัตถุดิบ | 85.85 | 457.20 | 5.326 | - | - |
| หลอม | 85.85 | 3,137.95 | 36.553 | 628.80 | 7.316 |
| ขึ้นรูป | 82.01 | 5,509.26 | 67.18 | - | - |
| อบแก้ว | 82.01 | 1,309.21 | 15.96 | 46.22 | 0.564 |

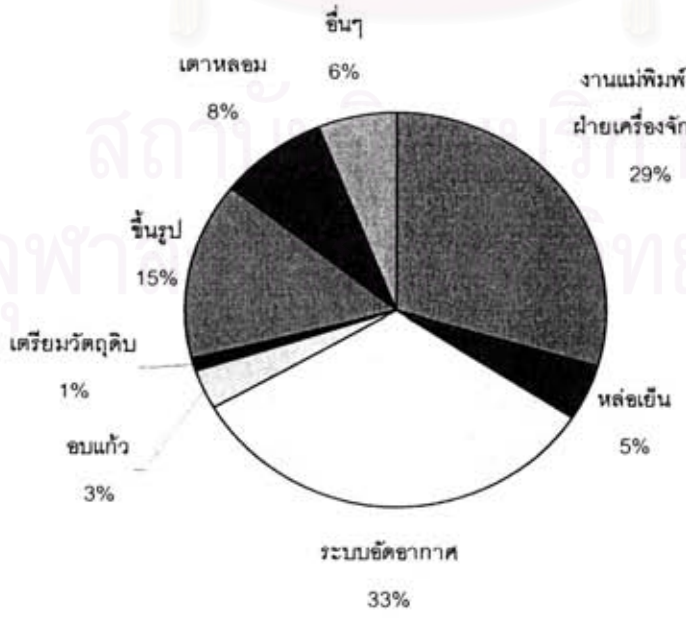
ระบบสนับสนุน (Utility) และอื่นๆ

| ระบบสนับสนุน | SEC พลังงานไฟฟ้า (kWh / Ton) |
|---|---|
| งานแม่พิมพ์และฝ่ายเครื่องจักรกล | 97.22 |
| ระบบหล่อเย็น | 20.49 |
| ระบบอากาศอัด | 143.53 |
| สำนักงานและอื่นๆ | 13.31 |

SEC พลังงานไฟฟ้า รวมทั้งโรงงาน 398.86 kWh / Ton

SEC พลังงานความร้อน รวมทั้งโรงงาน 7.854 GJ / Ton

SEC ปฐมภูมิ (พลังงานความร้อน + พลังงานไฟฟ้า รวมทั้งโรงงาน 11.04 GJ / Ton




รูปที่ 4.5 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงงานตัวอย่าง

**4.6 การเทียบเคียงและการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานในกระบวนการผลิต**

ในการเทียบเคียงพลังงานจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานขึ้นมาก่อนตั้งแต่กระบวนการเตรียมวัตถุดิบจนถึงกระบวนการหลังขึ้นรูปโดยใช้ค่า SEC ในการเทียบเคียงพลังงาน โดยมีแนวทางในการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานมีดังนี้

- กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ มีเทคโนโลยีการผลิตของแต่ละผลิตภัณฑ์เหมือนกัน จึงกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานจากค่าที่ต่ำที่สุดของแต่ละประเภทผลิตภัณฑ์

- กระบวนการหลอม เป็นกระบวนการที่มีสัดส่วนการบริโภคพลังงานสูงที่สุดในกระบวนการผลิต คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 70-80 ของพลังงานที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด โดยมีเครื่องจักรคือเตาหลอมซึ่งมีการบริโภคทั้งพลังงานเชื้อเพลิงและพลังงานไฟฟ้า แนวทางในการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานมีดังนี้

  - พลังงานเชื้อเพลิง พบว่าเตาหลอมที่มีปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอม (Pull -ton/Day) และร้อยละเศษแก้วในวัตถุดิบ (% Cullet) ต่างกันจะส่งผลให้การบริโภคพลังงานแตกต่างกันมาก ดังนั้น จึงต้องมีค่าปรับแก้ SEC ตามปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอมและร้อยละเศษแก้วในวัตถุดิบก่อนเทียบเคียงพลังงาน
  - พลังงานไฟฟ้า พบว่าการบริโภคพลังงานไม่ได้แปรผันตามปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอมและร้อยละเศษแก้วในวัตถุดิบจึงกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานจากค่า SEC ที่ต่ำที่สุดของแต่ละประเภทผลิตภัณฑ์

- กระบวนการขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทต่างก็มีเทคโนโลยีการผลิตเหมือนกัน จึงกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานจากค่า SEC ที่ต่ำที่สุดของแต่ละประเภทผลิตภัณฑ์

- กระบวนการหลังขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทต่างก็มีเทคโนโลยีการผลิตเหมือนกัน จึงกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานจากค่า SEC ที่ต่ำที่สุดของแต่ละประเภทผลิตภัณฑ์

**4.7 การเทียบเคียงและการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานของเตาหลอม**

สำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจก จะพบว่าเตาหลอมเป็นตัวแปรสำคัญในการบริโภคพลังงาน ซึ่งพลังงานที่ใช้คิดเป็นร้อยละ 70-80 ของพลังงานที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบริโภคพลังงานของเตาหลอมคือ

- **ปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอม** (Pull ton/Day) โดยเตาหลอมที่มีปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันมากหรือเตาขนาดใหญ่ จะบริโภคพลังงานต่อหน่วยต่ำกว่าเตาหลอมที่มีปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันน้อยหรือเตาขนาดเล็ก เพราะเตาหลอมทุกขนาดจะต้องใช้พลังงานที่ควบคุมให้เตาหลอมทำงานในสภาวะที่กำหนดหรือ Holding Heat ซึ่งเตาหลอม

ทุกขนาดจะมีค่า Holding Heat ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงทำให้เตาหลอมขนาดใหญ่มีการบริโภคพลังงานต่อหน่วยผลผลิตต่ำกว่าเตาหลอมขนาดเล็ก

- **ร้อยละเศษแก้วในวัตถุดิบ** (% Cullet) โดยโรงงานที่ผสมปริมาณเศษแก้วในวัตถุดิบมาก จะบริโภคพลังงานในการหลอมต่ำกว่าโรงงานที่ผสมปริมาณเศษแก้วในวัตถุดิบน้อย เพราะเศษแก้วมีอุณหภูมิของการหลอมละลายต่ำกว่าวัตถุดิบอื่นๆเช่นทรายแก้ว นอกจากนี้การใช้เศษแก้วในการหลอมยังลดการสูญเสียพลังงานจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีของวัตถุดิบด้วยเช่นปฏิกิริยา Further Heating, Formation of Liquid Eutectic Mixture Reaction เป็นต้น(รายละเอียดอยู่ในบทที่ 3) ดังนั้นถ้าผสมเศษแก้วลงในวัตถุดิบในสัดส่วนที่มากขึ้นจะมีผลทำให้วัตถุดิบมีอุณหภูมิในการหลอมละลายต่ำลง จึงใช้พลังงานในการหลอมต่ำลง

ดังนั้นก่อนการเทียบเคียงพลังงานจึงต้องมีการปรับแก้ค่า SEC Benchmarking ที่เตาหลอมแก้ว ตามปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน (Pull ton / Day) และร้อยละเศษแก้ว (% Cullet) ที่ใช้ โดยมีการกำหนดค่าปรับแก้ ดังนี้

### 4.7.1 การปรับแก้ค่าเทียบเคียงพลังงานของเตาหลอมแก้วโดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SEC ของเตาหลอมกับปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน

ในการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SECของเตาหลอมกับปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน จะใช้เทคนิคทางสถิติในการวิเคราะห์ซึ่งมี 2 วิธีดังนี้

1. การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis)
2. การวิเคราะห์สหสมพันธ์ (Correlation)

ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า SEC ของเตาหลอมเป็นตัวแปรตาม (Dependent Variable) ซึ่งกำหนดให้เป็นค่า Y และปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันเป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable)ซึ่งกำหนดให้เป็นค่า X จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆทำให้ทราบถึง

- ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด ถ้า X (ปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน)และ Y (SEC ของเตาหลอม) มีความสัมพันธ์กันมากแสดงว่าถ้าค่า X เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลกระทบต่อค่าของ Y อย่างมาก
- สามารถนำความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ได้มาประมาณค่าหรือพยากรณ์ค่า SEC ของเตาหลอมได้ เพื่อนำมาปรับแก้ค่าในกรณีที่ปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของโรงงานตัวอย่างกับที่อ้างอิงต่างกัน

**4.7.2 แบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่า SEC ของเตาหลอมกับปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน**

เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปร ที่มีความสัมพันธ์กันในรูปเชิงเส้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้นดังสมการที่ 4.1

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_i \quad \text{..... สมการที่ 4.1}$$

โดยที่ Y = ตัวแปรตาม(Dependent Variable) เนื่องจากค่าของ Y ขึ้นอยู่กับค่าของ X

X = ตัวแปรอิสระ(Independent Variable)

$\beta_0$ = ส่วนตัดแกน Y หรือค่าของ Y เมื่อ X มีค่าเป็นศูนย์

$\beta_1$ = ความชัน(Slope) ของเส้นตรง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เปลี่ยนไป 1หน่วยและจะเรียก $\beta_1$ ว่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Regression Coefficient)

$e_i$ = ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม(Random Error)

**4.7.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์**

วิธีการและขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แสดงในภาคผนวก ก และข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์แสดงในภาคผนวก ข ซึ่งเป็นข้อมูลการบริโภคพลังงานเตาหลอมที่ 50 % Cullet ในประเทศสหรัฐอเมริกาโดย Andy Hartley(2004) และ Beerkens, R.G.C.,H. Van Limpt. (2005) จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้คือ

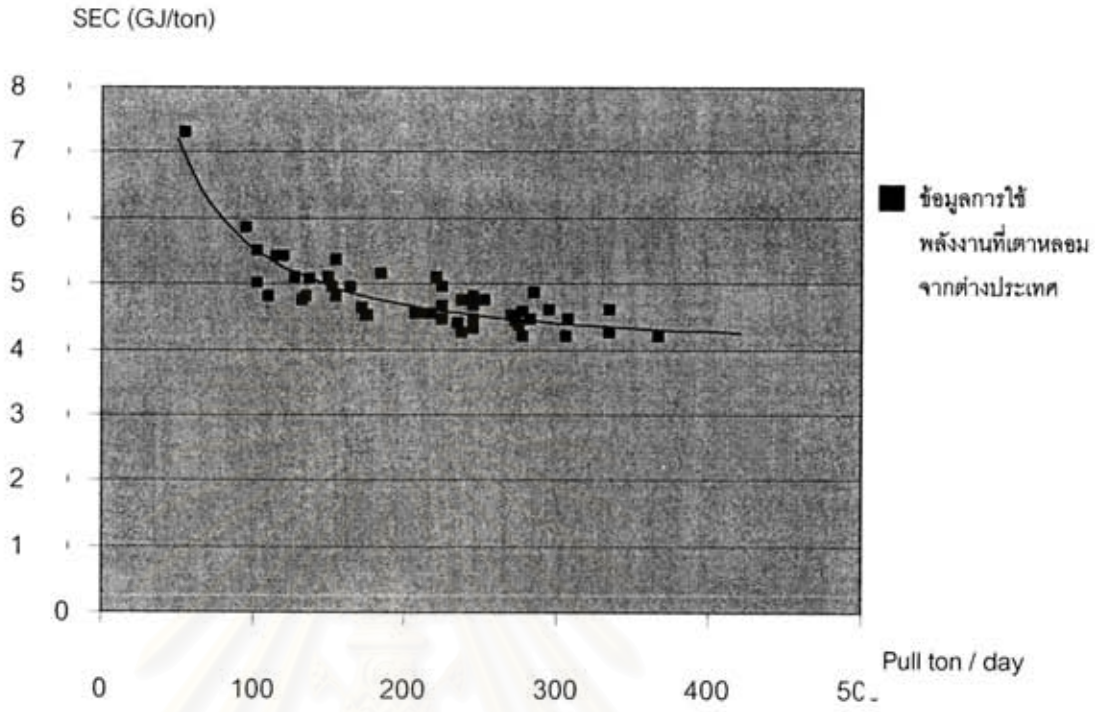
สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า SEC ของเตาหลอมกับปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันคือ

$$Y = 3.841 + 168.941 / X \quad \text{..... สมการที่ 4.2}$$

โดยที่ Y = ค่า SEC ของเตาหลอม ซึ่งเป็นค่าการใช้พลังงานความร้อนต่อการหลอมน้ำแก้ว 1 ตัน มีหน่วยเป็น GJ/Ton

X = ปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอมมีหน่วยเป็น ตันต่อวัน(Pull ton / day)

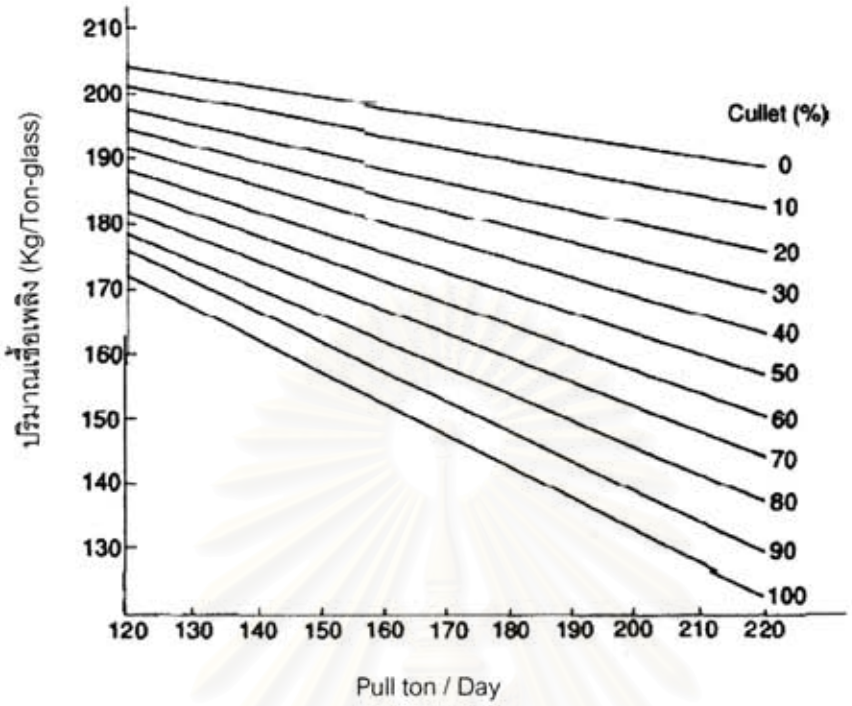
จากสมการที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่4.6




รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์
ระหว่างค่า SEC ของเตาหลอมกับปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน ที่ 50% Cullet

**4.7.4 ค่าปรับแก้ของเศษแก้ว** (Cullet)

เนื่องจากเศษแก้วก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการบริโภคพลังงานของเตาหลอม ดังนั้นจึงต้องมีค่าปรับแก้ค่า SEC ตามร้อยละเศษแก้ว (% Cullet) ที่โรงงานใช้ โดยทางทฤษฎีนั้นพบว่าค่า SEC จะลดลงร้อยละ 2.3 เมื่อมีการใช้เศษแก้วเพิ่มขึ้นทุกๆ ร้อยละ 10 และค่า SEC จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.3 เมื่อมีการใช้เศษแก้วลดลงทุกๆ ร้อยละ 10 เช่นกัน แสดงดังรูปที่ 4.7




รูปที่ 4.7 แสดงปริมาณเศษแก้วที่ใช้ในการผสมในวัตถุดิบ (% Cullet)
ซึ่งค่า SEC ของเตาหลอมจะลดลงร้อยละ 2.3 เมื่อมีการใช้เศษแก้วเพิ่มขึ้นทุกๆ ร้อยละ 10*

* The Energy Conservation Center : Output of a Seminar on Energy Conservation in Glass Industry, Unido and MITI (Japan), (1993)

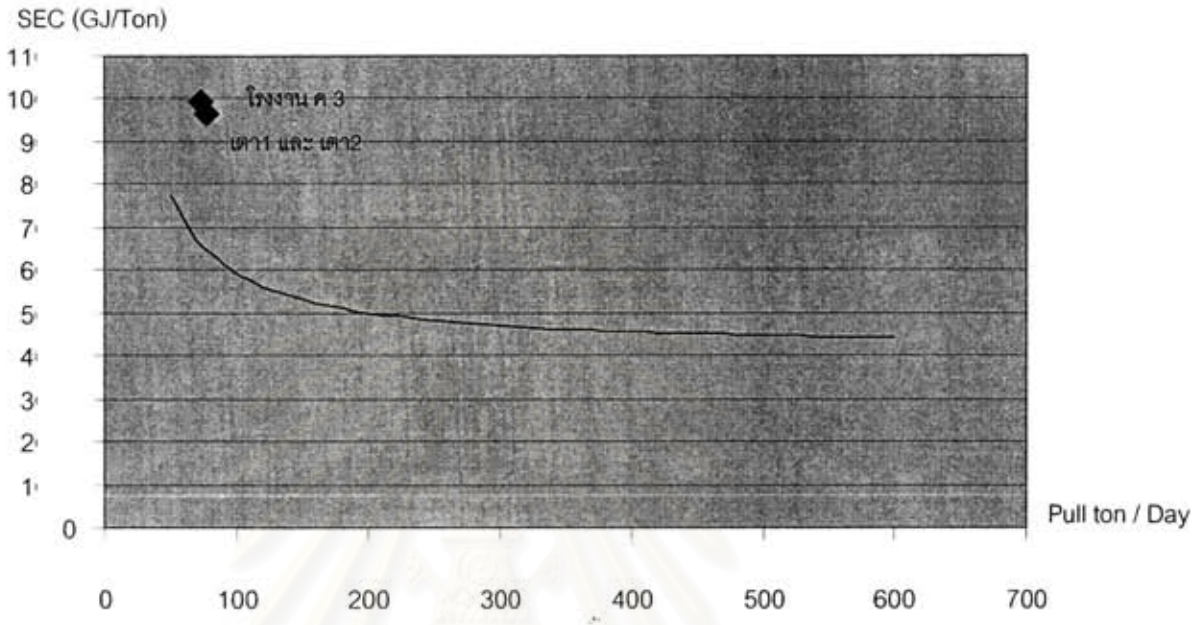
<u>ตัวอย่างการปรับแก้ค่า SEC</u>

*ตัวอย่างที่ 1.* โรงงานผลิตภัณฑ์ขวดแก้ว 1 มีปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอม 300 ตันต่อวัน และมีการใช้ % Cullet เท่ากับ 50% เมื่อแทนค่าลงไปในสมการที่ 4.2 จะได้ค่า SEC ของเตาหลอมเท่ากับ 4.404 GJ/Ton

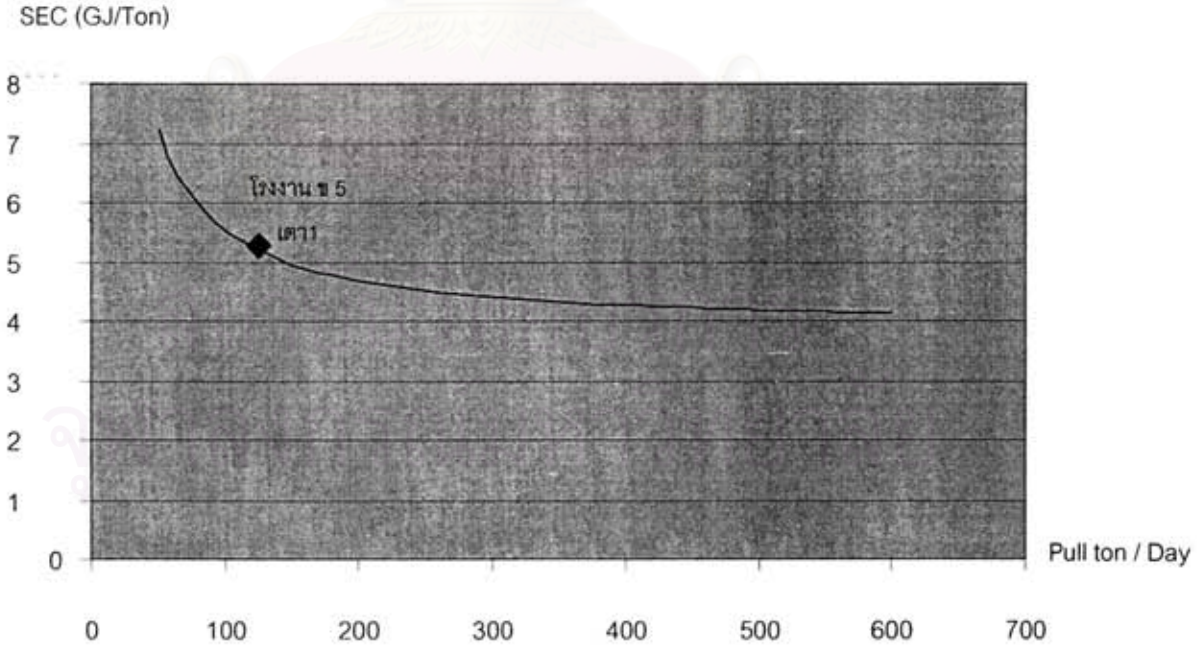
*ตัวอย่างที่ 2.* โรงงานผลิตภัณฑ์ขวดแก้ว 2 มีปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอม 300 ตันต่อวัน และมีการใช้ % Cullet เท่ากับ 60% เมื่อแทนค่าลงไปในสมการที่ 4.2 จะได้ค่า SEC ของเตาหลอมเท่ากับ 4.303 GJ/Ton(ค่า SEC ลดลงไป 2.3%) หรือถ้าโรงงานใช้ % Cullet เท่ากับ 40% จะได้ค่า SEC ของเตาหลอมเท่ากับ 4.506 GJ/Ton(ค่า SEC เพิ่มขึ้น 2.3%)

### 4.7.5 การทดสอบสมการปรับแก้ค่า SEC ของเตาหลอม

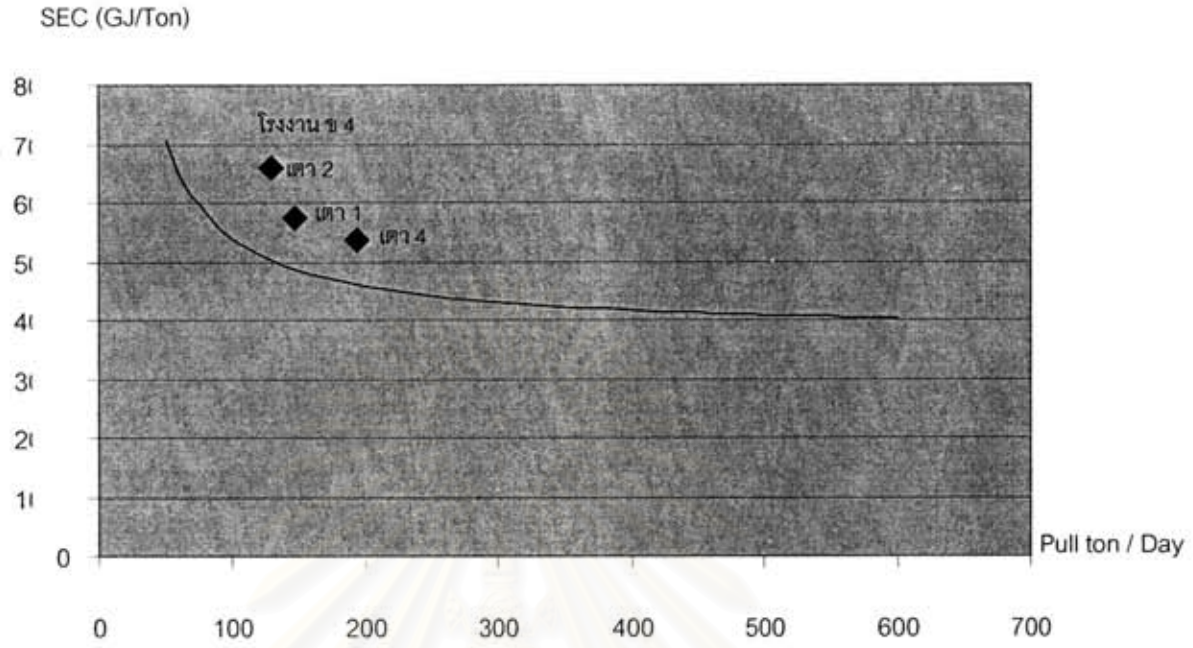
ข้อมูลในการทดสอบของโรงงานตัวอย่างที่ปรับแก้ค่าแล้วแสดงในภาคผนวก ข และผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8 – 4.13



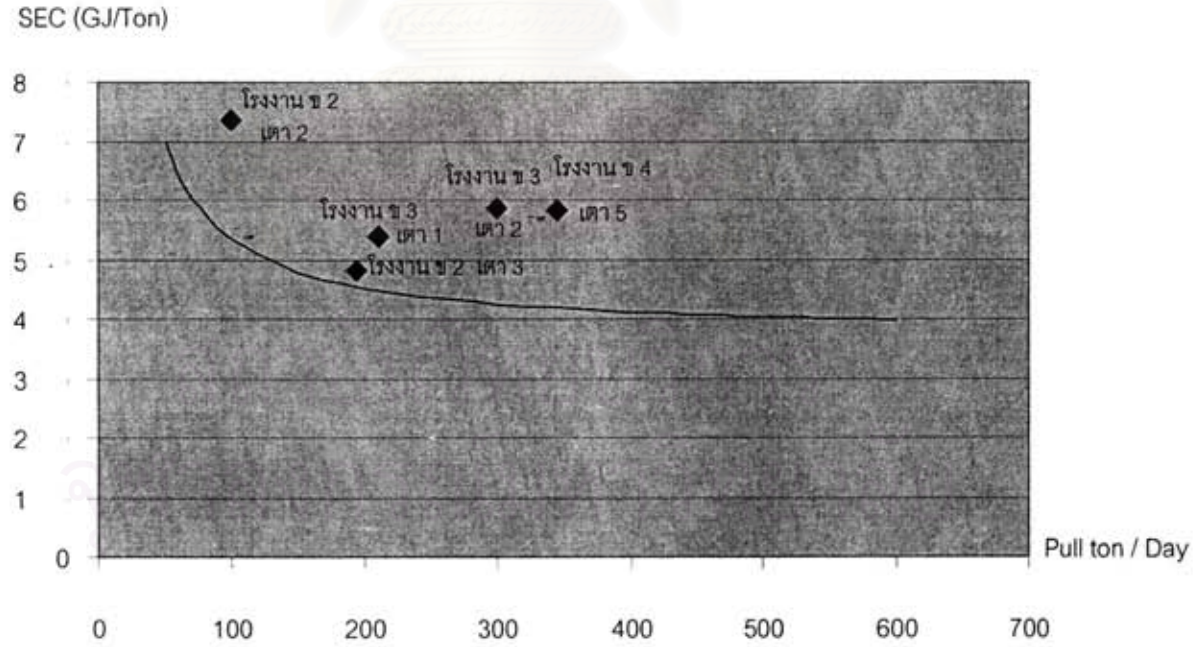

รูปที่ 4.8 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมแก้วที่ Cullet 20%



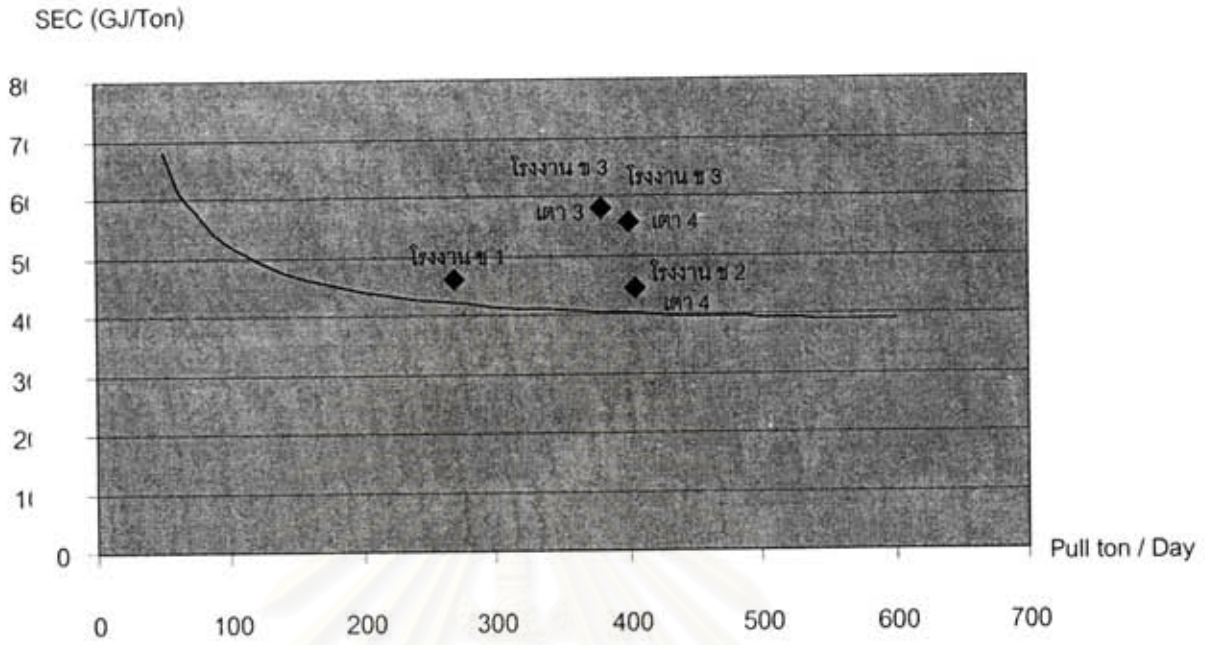

รูปที่ 4.9 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมแก้วที่ Cullet 50%



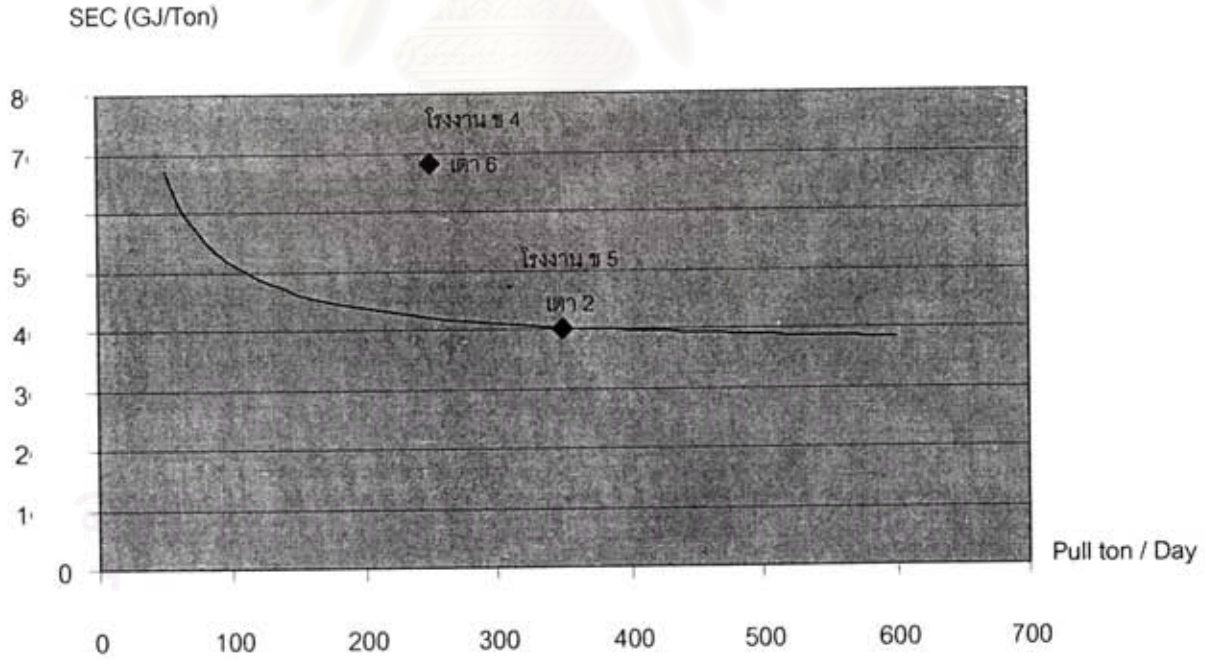

รูปที่ 4.10 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมแก้วที่ Cullet 60%




รูปที่ 4.11 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมแก้วที่ Cullet 65%



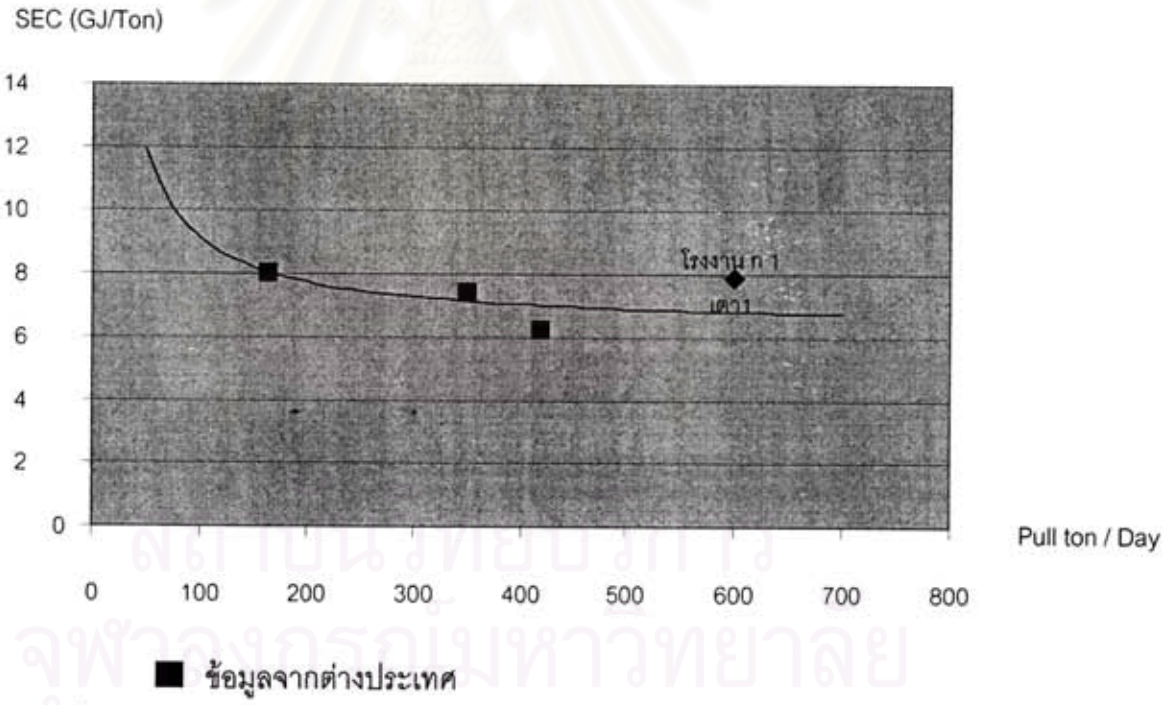

รูปที่ 4.12 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมแก้วที่ Cullet 75%




รูปที่ 4.13 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมแก้วที่ Cullet 80%

### 4.7.6 การนำค่าปรับแก้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

- **อุตสาหกรรมกระจกแผ่น** พบว่าอุตสาหกรรมผลิตกระจกแผ่นจะใช้เตาหลอมขนาดใหญ่ที่มีกำลังการผลิตต่อวันสูงจึงใช้เตาหลอมแบบ Regenerative Side Port และการผลิตกระจกแผ่นนั้นต้องการน้ำแก้วที่มีคุณภาพสูงเพราะกระจกแผ่นต้องการความใส ซึ่งต้องมีสิ่งเจือปนในน้ำแก้วน้อยมาก จึงต้องหลอมน้ำแก้วเป็นเวลานานขึ้น โดยปกติแล้วผลิตภัณฑ์แก้วชนิดอื่นๆจะใช้เวลาในการหลอมน้ำแก้ว (Residence Time)ประมาณ 3 ชั่วโมง แต่การหลอมน้ำแก้วของกระจกแผ่นจะใช้เวลาประมาณ 4.5-5 ซึ่งคิดเป็นเวลาที่ใช้มากกว่า 1.54 เท่าของการหลอมน้ำแก้วผลิตภัณฑ์แก้วชนิดอื่น ดังนั้นเมื่อต้องการหาค่า SEC Benchmarking ของเตาหลอมกระจกต้องคูณ 1.54 เข้าไปหลังจากที่ได้ค่า SEC Benchmarking จากสมการปรับแก้แล้ว ดังรูปที่ 4.14




รูปที่ 4.14 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้ค่าเตาหลอมกระจกที่ Cullet 18%

ตัวอย่างการหา SEC Benchmarking ที่เตาหลอมของผลิตภัณฑ์กระจกแผ่น

<u>โรงงานผลิตแผ่นกระจก ข.</u> มีกำลังการผลิต 400ตันต่อวัน มีเศษแก้วที่ใช้ในการผลิตเท่ากับร้อยละ 15

แทนค่า $X_i$ ในสมการที่ 4.2 จะได้ SEC ในกระบวนการหลอมจะได้ 4.264 GJ/Ton และโรงงานใช้%Cullet เท่ากับ 15 แสดงว่าค่า SEC Benchmarking เพิ่มขึ้นอีก 8.05% ซึ่งเท่ากับ 4.607 GJ/Ton จากนั้นคูณค่าที่ได้จากสมการด้วย 1.54 จะได้ SEC Benchmarking ในกระบวนการหลอม 7.094 GJ/Ton

- **อุตสาหกรรมขวดแก้ว** ในการกำหนดค่า SEC Benchmarking ของเตาหลอมผลิตภัณฑ์ขวดแก้วใช้วิธีเดียวกับที่ใช้กับกระจกแผ่น แต่กระบวนการหลอมแก้วเพื่อผลิตขวดแก้วไม่ต้องพิจารณาถึงค่า Residence time ทำให้สามารถหาค่า SEC Benchmarking ของการหลอมได้โดยตรงจากสมการปรับแก้ที่เตาหลอม

- **อุตสาหกรรมเครื่องแก้ว** ในการกำหนดค่า SEC Benchmarking ของเตาหลอมผลิตภัณฑ์เครื่องแก้วใช้วิธีเดียวกับที่ใช้กับกระจกแผ่น แต่กระบวนการหลอมแก้วเพื่อผลิตเครื่อวแก้วไม่ต้องพิจารณาถึงค่า Residence time ทำให้สามารถหาค่า SEC Benchmarking ของการหลอมได้โดยตรงจากสมการปรับแก้ที่เตาหลอม

- **อุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว** อุตสาหกรรมภายในประเทศที่ใช้เตาหลอมแก้วขนาดเล็กเพราะข้อจำกัดเรื่องการจำหน่ายผลผลิต ซึ่งในการกำหนดค่า SEC Benchmarking ของเตาหลอมผลิตภัณฑ์ฉนวนใยแก้วใช้วิธีเดียวกับที่ใช้กับกระจกแผ่น แต่กระบวนการหลอมแก้วเพื่อผลิตฉนวนใยแก้วไม่ต้องพิจารณาถึงค่า Residence time ทำให้สามารถหาค่า SEC Benchmarking ของการหลอมได้โดยตรงจากสมการปรับแก้ที่เตาหลอม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 สรุปค่า SEC จากโรงงานตัวอย่าง กับค่า SEC จากสมการ

| ร้อยละเศษแก้ว (% Cullet) | ขนาดเตา Pull ton / Day | ค่า SEC จากโรงงานตัวอย่าง (GJ / Ton) | ค่า SEC Benchmarking (GJ / Ton) |
|---|---|---|---|
| 20 | 95 | 10.02 | 6.01 |
| | 95 | 9.8 | 6.01 |
| 50 | 125 | 5.27 | 5.19 |
| 60 | 150 | 5.86 | 4.85 |
| | 140 | 6.86 | 4.93 |
| | 200 | 5.47 | 4.58 |
| 65 | 345 | 5.83 | 4.18 |
| | 210 | 5.41 | 4.49 |
| | 300 | 5.86 | 4.25 |
| | 100 | 7.37 | 5.34 |
| | 195 | 4.82 | 4.55 |
| 75 | 270 | 4.61 | 4.21 |
| | 380 | 5.79 | 4.04 |
| | 400 | 5.55 | 4.02 |
| | 405 | 4.43 | 4.02 |
| 80 | 250 | 6.81 | 4.21 |
| | 350 | 4.01 | 4.03 |

จากรูปที่ 4.8 – 4.14 แสดงการทดสอบสมการปรับแก้และตารางที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบค่า SEC ของเตาหลอมแก้วในประเทศไทยมีค่าสูงกว่าค่า SEC Benchmarking แสดงให้เห็นว่ายังมีความแตกต่างของประสิทธิภาพการใช้พลังงานงานที่เตาหลอมอยู่ สาเหตุเนื่องมาจาก

- ขาดบุคคลากรที่มีความรู้ความสามารถด้านเตาหลอมในอุตสาหกรรม และในอุตสาหกรรมเองก็ไม่มีการกำหนดมาตรการใดๆในการพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานของเตาหลอม
- กระบวนการผลิตแก้วและกระจกต้องผลิตแบบต่อเนื่องทำให้ยากต่อการตรวจสอบระบบและมีการสูญเสียพลังงานไปอย่างมาก
- มีข้อจำกัดด้านเงินทุนและไม่ประสงค์ที่จะรับความเสี่ยงในการลงทุน
- ให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพด้านเศรษฐกิจมากกว่าประสิทธิภาพด้านพลังงาน
- ขาดการสาธิตตัวอย่างเทคโนโลยีและโครงการประหยัดพลังงานที่ได้ผล

จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าเตาหลอมแก้วในประเทศไทยยังสามารถพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานได้ ดังนั้นจึงสามารถกำหนดมาตรการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานดังได้แสดงรายละเอียดในบทที่5 และเมื่อพิจารณาถึงการนำสมการปรับแก้ที่เตาหลอมมาใช้ในการ Benchmarking พบว่ามีความเป็นไปได้ เพราะข้อมูลที่นำมาใช้สร้างสมการเป็นข้อมูลการใช้พลังงานที่เตาหลอมจริงและเป็นค่าที่เป็นไปได้ในการตั้งเป้าหมายในการลดค่า SEC ให้ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่า SEC Benchmarking ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกของประเทศไทย

### 4.7.7 สรุปการนำค่าจากสมการไปใช้ในการเทียบเคียงสมรรถนะพลังงาน

เนื่องจากเตาหลอมของโรงงานที่ต้องการประเมินค่า SEC ในกระบวนการหลอม อาจมีปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน (Pull ton/Day) และ % Cullet แตกต่างจาก SEC Benchmarking ดังนั้นก่อนการเทียบเคียงพลังงานต้องมีสมการปรับแก้ค่า SEC Benchmarking ที่พลังงานเชื้อเพลิงในกระบวนการหลอม ตามปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน (Pull ton / Day) และ % Cullet ที่ใช้ ดังสมการที่ 4.2

## 4.8 การเทียบเคียงและการกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานของกระบวนการอื่น ๆ

จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมแก้วและกระจกที่ทำการตรวจวัดจำนวน 11 แห่ง โดยตรวจวัดการบริโภคพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตตั้งแต่กระบวนการเตรียมวัตถุดิบจนกระทั่งบรรจุ รวมทั้งส่วนของระบบสนับสนุน (Utilities) สำนักงาน และข้อมูลผลผลิต ข้อมูลการบริโภคพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงของปี พ.ศ. 2546 2547 และ 2548 โดยมีการสอบเทียบค่า SEC จากโรงงานตัวอย่างและค่า SEC จากสมาคมแก้วและกระจกในประเทศสหรัฐอเมริกา ของแต่ละกระบวนการผลิตดังนี้

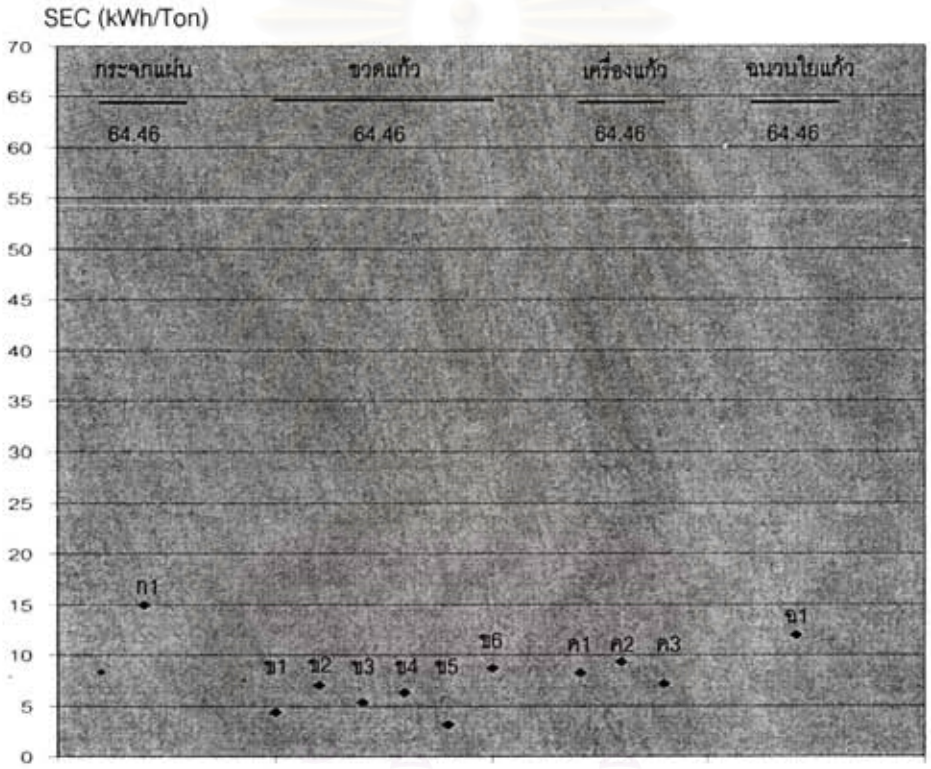
### 4.8.1 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ

สมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลสัดส่วนการบริโภคพลังงานในกระบวนการเตรียมวัตถุดิบพบว่ามีค่า SEC สูงกว่าข้อมูลในโรงงานตรวจวัดมาก เนื่องจากการเก็บข้อมูลการบริโภคพลังงานในกระบวนการเตรียมวัตถุดิบของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาเริ่มตั้งแต่กระบวนการขนส่งจากแหล่งวัตถุดิบจนถึงกระบวนการเตรียมวัตถุดิบในโรงงาน ดังนั้นจึงปรับแก้ค่าSEC ของกระบวนการเตรียมวัตถุดิบตามข้อมูลอุตสาหกรรมของประเทศที่เก็บข้อมูลเฉพาะการบริโภคพลังงานของเครื่องจักรในกระบวนการเตรียมวัตถุดิบเท่านั้น แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.13 ผลการตรวจวัดพลังงานในกระบวนการเตรียมวัตถุดิบ

| โรงงาน | ค่า SEC (kWh/Ton) |
|---|---|
| ก1 | 15.00 |
| ข1 | 4.40 |
| ข2 | 7.00 |
| ข3 | 5.30 |
| ข4 | 6.29 |
| ข5 | 3.14 |

| โรงงาน | ค่า SEC (kWh/Ton) |
|---|---|
| ข6 | 8.70 |
| ค1 | 8.15 |
| ค2 | 9.33 |
| ค3 | 7.10 |
| ฉ1 | 12.00 |




——— แสดงค่า SEC กระบวนการเตรียมวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกา

รูปที่ 4.15 แสดงการเทียบเคียงพลังงานในกระบวนการเตรียมวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกากับโรงงานตัวอย่าง

เนื่องจากกระบวนการเตรียมวัตถุดิบ มีเทคโนโลยีการผลิตของแต่ละผลิตภัณฑ์เหมือนกัน จึงมีค่า SEC ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงกำหนดค่าเทียบเคียงพลังงานจากค่า SEC ที่ต่ำที่สุดของแต่ละประเภทผลิตภัณฑ์แสดงดังตารางที่ 4.15

### 4.8.2 กระบวนการหลอม

เนื่องจากข้อมูลการบริโภคพลังงานจากสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาในหัวข้อ 4.3.2 นั้นไม่ได้กำหนดปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันและร้อยละเศษแก้วที่ใช้ในกระบวนการผลิต จึงไม่สามารถนำมาเทียบเคียงการบริโภคพลังงานได้ ดังนั้นจึงใช้ค่าปรับแก้จากสมการที่ 4.2 ก่อนแล้วจึงนำมาเทียบเคียงพลังงานที่กระบวนการหลอม ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.6

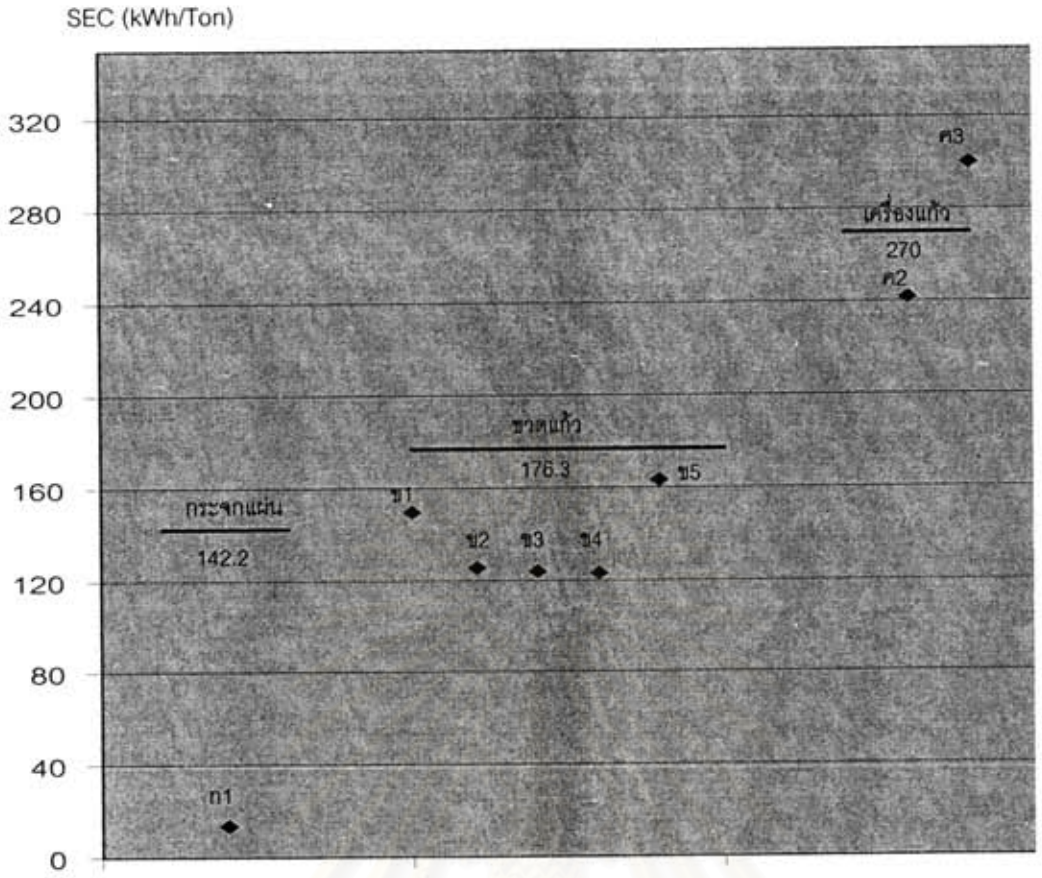
### 4.8.3 กระบวนการขึ้นรูป

สมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลสัดส่วนการบริโภคพลังงานในกระบวนการขึ้นรูป เมื่อนำมาสอบเทียบกับโรงงานตัวอย่างที่ตรวจวัด ได้ผลดังตารางที่ 4.14 และแสดงกราฟสอบเทียบดังรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.14 ผลการตรวจวัดพลังงานในกระบวนการขึ้นรูป

| โรงงาน | ค่า SEC (kWh/Ton) |
|---|---|
| ก1 | 13.71 |
| ข1 | 149.55 |
| ข2 | 125.28 |
| ข3 | 123.84 |
| ข4 | 123 |
| ข5 | 162.68 |
| ข6 | 474.52 |
| ค1 | 471.16 |
| ค2 | 241.79 |
| ค3 | 300 |
| ฉ1 | - |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




แสดงค่า SEC กระบวนการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกา

รูปที่ 4.16 แสดงการเทียบเคียงพลังงานในกระบวนการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกากับโรงงานตัวอย่าง

จากการเทียบเคียงพลังงานในรูปที่ 4.16 พบว่าค่า SEC ในกระบวนการขึ้นรูปของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกากับโรงงานตัวอย่างที่ทำการตรวจวัดในของผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกพบว่า

- อุตสาหกรรมกระจกแผ่น พบว่าโรงงานตัวอย่างมีค่า SEC ต่ำกว่าของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกา เพราะโรงงานมีเทคโนโลยีการผลิตเฉพาะของโรงงานเองที่ไม่ใช้พลังงานจากฮีทเตอร์ไฟฟ้าเหมือนอย่างกระบวนการผลิตกระจกแผ่นที่ใช้ทั่วไป ดังนั้นจึงกำหนดค่า SEC ของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกามาเป็น Benchmarking
- อุตสาหกรรมขวดแก้ว พบว่าค่า SEC ของโรงงานตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกับค่าของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาเพราะมีเทคโนโลยีการผลิตเหมือนกัน โดยโรงงานที่ ข 1 ผลิตขวดสีชา ขนาดเดียวกัน(ขวดบรรจุเครื่องดื่มชูกำลัง) โรงงานที่ ข2 ถึง ข5 ผลิตขวดเบียร์ น้ำอัดลมเป็นหลัก ทั้งขวดใส ขวดสี และรูปแบบผลิตภัณฑ์ไม่ค่อยเปลี่ยนหรือ

โรงงานผลิตรูปแบบผลิตภัณฑ์เดียวกันตลอด ค่า SEC จากโรงงานตัวอย่างที่ ข1 ถึง ข5 จึงมีค่าต่ำและเป็นไปในลักษณะเดียวกัน ส่วนโรงงานที่ ข6 ผลิตขวดขนาดเล็ก ขวดยา น้ำหอม ไม่นำมาพิจารณาในการทำ Benchmarking เพราะมีค่า SEC สูงถึง 474.52 kWh/Ton เนื่องจากรูปแบบผลิตภัณฑ์เปลี่ยนตามคำสั่งลูกค้าและขวดที่ผลิตเป็นขวดเล็ก มีน้ำหนักเบา ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่า SEC จากโรงงาน ข 4 ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดมาเป็น Benchmarking

- อุตสาหกรรมเครื่องแก้ว พบว่าโรงงานตัวอย่าง ค1และค3 มีค่า SEC สูงกว่าของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งค่า SEC ของโรงงาน ค1 ไม่นำมาพิจารณาในการทำ Benchmarking เพราะมีค่า SEC สูงถึง 471.16 kWh/Ton โดยโรงงานผลิตเครื่องแก้วคุณภาพสูง ที่มีความบางและมีน้ำหนักเบา จึงทำให้การบริโภคพลังงานต่อหน่วยผลผลิตของโรงงานสูง ส่วนโรงงาน ค 2 มีค่า SEC ต่ำกว่าในต่างประเทศ เพราะใช้เทคโนโลยีการขึ้นรูปแบบไฮดรอริก ซึ่งไม่นิยมใช้ในการขึ้นรูปเพราะมีอัตราการผลิตต่ำ ในขณะที่เทคโนโลยีการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์เครื่องแก้วในปัจจุบันเป็นแบบนิวเมติก ดังนั้นจึงกำหนดค่า SEC ของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกามาเป็น Benchmarking
- อุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว ไม่มีข้อมูลในกระบวนการขึ้นรูป เนื่องมาจากโรงงานตัวอย่าง ฉ1 รวมค่า SEC ในกระบวนการหลอมกับขึ้นรูปไว้ด้วยกัน ดังนั้นจึงกำหนดค่า SEC ของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกามาเป็น Benchmarking

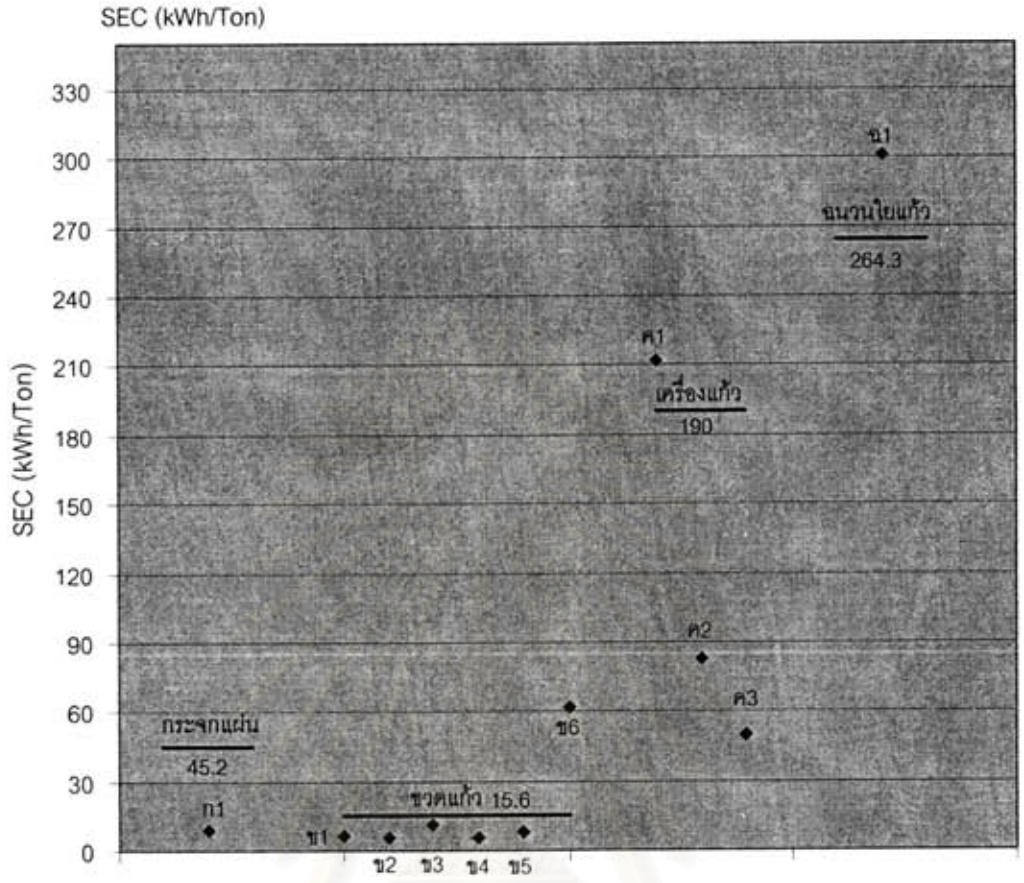
### 4.8.4 กระบวนการหลังขึ้นรูป

สมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลสัดส่วนการบริโภคพลังงานในกระบวนการหลังขึ้นรูป เมื่อนำมาสอบเทียบกับโรงงานตัวอย่างที่ตรวจวัด ได้ผลดังตารางที่ 4.15 และแสดงกราฟสอบเทียบดังรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.15 ผลการตรวจวัดพลังงานในกระบวนการหลังขึ้นรูป

| โรงงาน | ค่า SEC (kWh/Ton) |
|---|---|
| ก1 | 8.44 |
| ข1 | 6.54 |
| ข2 | 5.23 |
| ข3 | 11.13 |
| ข4 | 5.30 |
| ข5 | 7.73 |

| โรงงาน | ค่า SEC (kWh/Ton) |
|---|---|
| ข6 | 61.42 |
| ค1 | 211.85 |
| ค2 | 82.50 |
| ค3 | 50 |
| ฉ1 | 301 |




แสดงค่า SEC กระบวนการหลังขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกา

รูปที่ 4.17 แสดงการเทียบเคียงพลังงานในการบริโภคพลังงานในกระบวนการหลังขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกากับโรงงานตัวอย่าง

จากการเทียบเคียงการบริโภคพลังงานในรูปที่ 4.17 พบว่าค่า SEC ในกระบวนการหลังขึ้นรูปของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกากับโรงงานตัวอย่างที่ทำการตรวจวัดในของผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกพบว่า

- อุตสาหกรรมกระจกแผ่น พบว่าโรงงานตัวอย่างมีค่า SEC ต่ำกว่าของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกา เพราะโรงงานมีเทคโนโลยีการผลิตเฉพาะของโรงงานเอง ดังนั้นจึงกำหนดค่า SEC ของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกามาเป็น Benchmarking

- อุตสาหกรรมขวดแก้ว พบว่าค่า SEC ของโรงงานตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกับค่าของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาเพราะมีเทคโนโลยีการผลิตเหมือนกัน โดยโรงงานข1 ผลิตขวดสีชา ขนาดเดียวกัน(ขวดบรรจุเครื่องดื่มซูกำลัง)โรงงานที่ ข2 ถึง ข5 ผลิตขวดเบียร์ น้ำอัดลมเป็นหลัก ทั้งขวดใส ขวดสี และรูปแบบผลิตภัณฑ์ไม่ค่อยเปลี่ยนหรือโรงงานผลิตรูปแบบผลิตภัณฑ์เดียวกันตลอด ค่า SEC จากโรงงานตัวอย่างที่ ข1 ถึง ข5 จึงมีค่าต่ำและเป็นไปในลักษณะเดียวกัน ส่วนโรงงานที่ ข6 ผลิตขวดขนาดเล็ก ขวดยาน้ำหอม จึงไม่นำมาพิจารณาในการทำ Benchmarking เพราะมีค่า SEC สูงถึง 61.42 kWh/Ton เนื่องจากรูปแบบผลิตภัณฑ์เปลี่ยนตามคำสั่งลูกค้าและขวดที่ผลิตเป็นขวดเล็กมีน้ำหนักเบา ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่า SEC จากโรงงาน ข 2 ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดมาเป็น Benchmarking
- อุตสาหกรรมเครื่องแก้ว พบว่าโรงงานตัวอย่าง ค1 มีค่า SEC สูงกว่าของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกา เพราะผลิตเครื่องแก้วที่มีความบางและมีน้ำหนักเบาคุณภาพเนื้อแก้วสูง จึงทำให้การบริโภคพลังงานต่อหน่วยผลผลิตของโรงงานสูง ส่วนโรงงาน ค 2 มีค่า SEC ต่ำกว่าของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกา เพราะโรงงานใช้แม่พิมพ์ทำด้วยเหล็กไร้สนิม ผิวขัดมัน ชิ้นงานจึงมีผิวมันวาวจึงลดการใช้พลังงานความร้อน(LPG)ที่กระบวนการนี้ ซึ่งเป็นเทคนิคเฉพาะของทางโรงงานเองจึงไม่นำมาพิจารณาในการทำ Benchmarking ส่วนโรงงาน ค3 มีค่า SEC ต่ำกว่าของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกา เพราะโรงงานผลิตเครื่องแก้วที่ไม่มีลวดลาย จึงไม่ต้องใช้พลังงานความร้อนในกระบวนการนี้ ดังนั้นจึงกำหนดค่า SEC ของของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกามาเป็น Benchmarking
- อุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว พบว่าโรงงานตัวอย่าง ค1 มีค่า SEC สูงกว่าของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกา ดังนั้นจึงกำหนดค่า SEC ของสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกามาเป็น Benchmarking เพราะมีเทคโนโลยีการผลิตเหมือนกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 4.8.5 สรุปค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

จากการเทียบเคียงการบริโภคพลังงานตั้งแต่กระบวนการเตรียมวัตถุดิบจนถึงกระบวนการหลังการขึ้นรูป สามารถนำมากำหนดเป็นค่าเทียบเคียงพลังงาน(SEC Benchmarking) ที่เป็นค่ามาตรฐานได้ ซึ่งตัวแปรสำคัญที่มีผลในการบริโภคพลังงานของเตาหลอมคืออัตราการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอม (Pull ton/day) และร้อยละเศษแก้ว (%Cullet) ดังนั้นเมื่อกำหนดค่า SEC Benchmarking จะต้องกำหนดอัตราการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอมและร้อยละเศษแก้วประกอบด้วย โดยค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 สรุปค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

| ขั้นตอนการผลิต | กระจกแผ่น* | | ขวดแก้ว | | เครื่องแก้ว | | ฉนวนใยแก้ว | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | SEC ไฟฟ้า kWh / Ton | SEC เชื้อเพลิง GJ / Ton | SEC ไฟฟ้า kWh / Ton | SEC เชื้อเพลิง GJ / Ton | SEC ไฟฟ้า kWh / Ton | SEC เชื้อเพลิง GJ / Ton | SEC ไฟฟ้า kWh / Ton | SEC เชื้อเพลิง GJ / Ton |
| การเตรียมวัตถุดิบ | 15 | - | 3.14 | - | 7.1 | - | 12 | - |
| การหลอม | 17 | 6.79 | 10.50 | 4.20 | 15 | 6.04 | 28.12 | 6.40 |
| การขึ้นรูป | 142.20 | - | 123 | - | 270 | - | 207 | 3.88 |
| Post – forming | 4.57 | 0.33 | 5.23 | - | 117 | 1.58 | 250.56 | 0.11 |
| รวม | 178.77 | 7.12 | 141.87 | 4.20 | 409 | 7.62 | 497.68 | 10.40 |
| SEC ปฐมภูมิ GJ / Ton | 8.55 | | 6.48 | | 10.89 | | 14.38 | |
| %Cullet ** | 20 | | 70 | | 0 | | 100 | |
| ขนาดเตา (Ton/Day)*** | 600 | | 300 | | 100 | | 50 | |

หมายเหตุ * เฉพาะกระบวนการหลอมของกระจกแผ่น เมื่อได้ค่า SEC จากสมการที่ 2 แล้ว ต้องคูณด้วย 1.54 จึงจะได้ SEC Benchmarking ของเชื้อเพลิงที่กระบวนการหลอม

** *** ถ้าสภาวะของโรงงานไม่เป็นไปตามข้อมูลที่ใช้ในการอ้างอิงต้องทำการปรับแก้ค่า SEC เชื้อเพลิงของกระบวนการหลอมใหม่

### 4.8.6 ตัวอย่างการเทียบเคียงสมรรถนะพลังงาน (SEC Benchmarking)

โรงงานตัวอย่างคือ โรงงานผลิตขวดแก้ว ข1โดยมีขนาดเตาหลอม 270 Ton/day ใช้ cullet 75% มีอุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้ง 495 องศาเซลเซียส

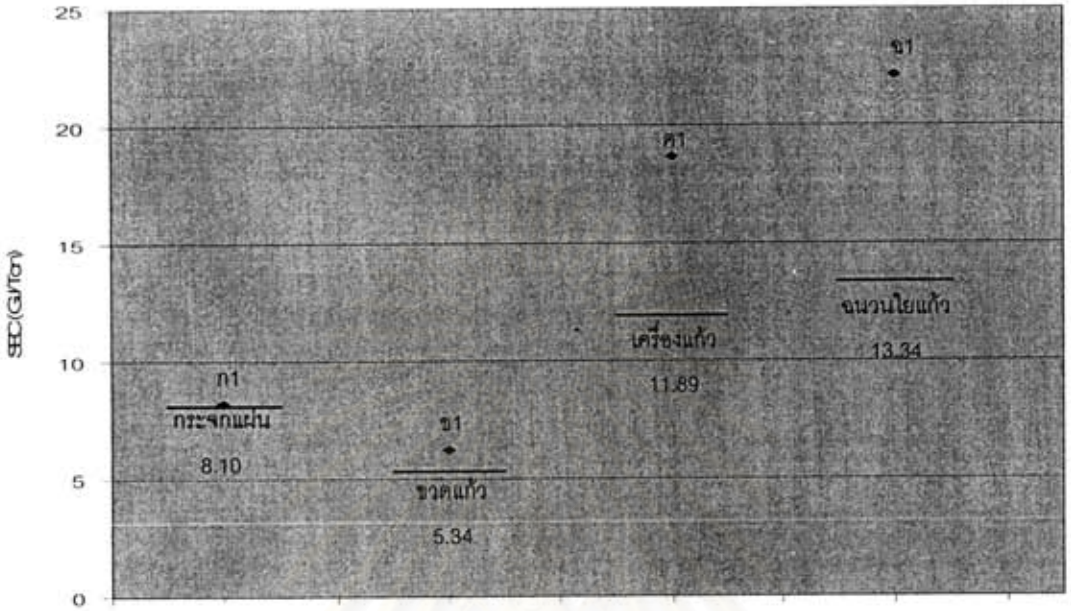
ตารางที่ 4.17 ตัวอย่างการเทียบเคียงพลังงานในแต่ละกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตขวดแก้ว

| โรงงานตัวอย่าง | โรงงาน ข1 | | | SEC Benchmarking | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| กระบวนการผลิต | SEC ไฟฟ้า kWh / Ton | SEC เชื้อเพลิง GJ / Ton | SEC, รวม GJ/Ton | SEC ไฟฟ้า kWh / Ton | SEC เชื้อเพลิง GJ / Ton | SEC, รวม GJ/Ton |
| กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ | 3.40 | - | | 3.14 | - | |
| กระบวนการหลอมและรีไฟนิง(Melting/Refining) | 12.31 | 4.61 | 4.71 | 10.50 | 4.21 | 4.29 |
| กระบวนการขึ้นรูป(Forming) | 149.55 | - | | 123 | - | |
| กระบวนการหลังการขึ้นรูป(Post Forming) | 6.54 | - | | 5.23 | - | |
| อื่นๆ | 34.5 | - | | - | - | |
| รวม | 206.3 | 4.610 | 6.26 | 141.87 | 4.21 | 5.34 |
| | ขนาดเตา 270 Pull ton/day cullet 75% | | | ขนาดเตา 270 Pull ton/day cullet 75% | | |

จากการเทียบเคียงพลังงานพบว่าการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิตของโรงงาน ข1 ยังสูงกว่าค่า SEC Benchmarking แสดงว่าโรงงานยังสามารถพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานได้ โดยนำมาตรการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานแสดงในบทที่ 5 มาใช้ เพื่อลดค่า SEC ในกระบวนการผลิตได้

### 4.8.7 การเทียบเคียงพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

จากค่า SEC Benchmarking ในตารางที่ 4.15 เมื่อนำมาเทียบเคียงพลังงานในกระบวนการผลิตรวมกับโรงงานตัวอย่างของแต่ละอุตสาหกรรม แสดงดังรูปที่




——— แสดงค่า SEC Benchmarking เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบของแต่ละอุตสาหกรรม

◆ แสดงค่า SEC ของโรงงานตัวอย่าง

รูปที่ 4.18 ตัวอย่างการเทียบเคียงค่า SEC Benchmark กับค่า SEC โรงงานตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.18 แสดงผลการตัวอย่างการเทียบเคียงการบริโภคพลังงานรวม พบว่าค่า SEC ของผลิตภัณฑ์กระจกแผ่นเรียบ ก1 มีค่า SEC ใกล้เคียงกับค่า SEC Benchmarking เนื่องมาจากโรงงานมีเทคโนโลยีการผลิตเฉพาะของโรงงานเองที่ทำให้การใช้พลังงานต่ำ เมื่อพิจารณาที่ผลิตภัณฑ์ขวดแก้ว ข1 พบว่าค่า SEC ของโรงงานมีค่าใกล้เคียงกับค่า SEC Benchmarking เนื่องมาจากโรงงานมีเทคโนโลยีการผลิตคล้ายกัน ขนาดเตาใกล้เคียงกันและยังใช้เปอร์เซ็นต์เศษแก้วใกล้เคียงกันด้วย เมื่อพิจารณาที่ผลิตภัณฑ์เครื่องแก้ว ค1 พบว่า ค่า SEC ของโรงงานตัวอย่างมีค่าแตกต่างกันมาก เนื่องมาจากแต่ละโรงงานมีเทคโนโลยีการผลิตที่แตกต่างกันและผลิตภัณฑ์ของโรงงานตัวอย่างที่ทำการตรวจวัด เป็นผลิตภัณฑ์แก้วน้ำที่มีความบางและมีน้ำหนักเบาคุณภาพเนื้อแก้วสูง เป็นผลให้พลังงานที่ใช้ต่อน้ำหนักผลผลิต (SEC) มีค่าสูงและเมื่อพิจารณาที่ผลิตภัณฑ์ฉนวนใยแก้ว ฉ1 พบว่าค่า SEC ของโรงงานตัวอย่างมีค่าสูงกว่าค่า SEC Benchmarking เนื่องจากเตาหลอมของโรงงานตัวอย่างมีขนาดเล็กจึงใช้พลังงานต่อหน่วยสูงกว่าเตาหลอมขนาดใหญ่ และมีอายุการใช้งานมานานจึงทำให้การใช้พลังงานสูง

ดังนั้นโรงงานแก้วและกระจกสามารถนำมาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานที่แสดงในบทที่ 5 ไปประยุกต์ใช้เพิ่มเติมในส่วนที่ยังไม่ได้ดำเนินการอาจจะทำให้ค่า SEC ต่ำลงได้

# บทที่ 5

# มาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

## 5.1 แนวทางในการหามาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงาน

แนวทางในการหามาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกนั้นจะพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการดำเนินมาตรการโดยมีหลักการพิจารณาแต่ละมาตรการดังนี้

- เป็นมาตรการที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่มีสัดส่วนการบริโภคพลังงานสูงในกระบวนการผลิต
- เป็นมาตรการที่สามารถดำเนินการได้โดยไม่ต้องอาศัยความรู้ความชำนาญมากนักและเป็นมาตรการที่ไม่ใช้เทคโนโลยีเฉพาะสำหรับโรงงานใดโรงงานหนึ่ง
- เป็นมาตรการที่ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลผลิต เช่น ปัญหาทางด้านเทคนิคทำให้เครื่องจักรหยุด ปัญหาทางด้านคุณภาพทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาไม่ตรงตามมาตรฐานที่กำหนด เป็นต้น ซึ่งปัญหาต่างๆ เหล่านี้จะต้องนำมาพิจารณาประกอบให้รอบคอบก่อนในการกำหนดแต่ละมาตรการ

## 5.2 มาตรการต่างประเทศที่มีการดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน

ในประเทศที่มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี เช่น สหรัฐอเมริกาหรือสหภาพยุโรป มีการศึกษาและวิจัยเทคโนโลยีและประสิทธิภาพการบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะสหรัฐอเมริกาที่มีการศึกษาอย่างจริงจังและมีแผนแม่บทสำหรับการพัฒนาอุตสาหกรรมนี้ต่อไปในอนาคต นอกจากนี้ยังมีมาตรการต่างๆที่ส่งเสริมประสิทธิภาพพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้จริง โดยมีมาตรการต่างๆที่ดำเนินการอยู่และบางมาตรการก็มีแผนในการดำเนินการในอนาคตดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.1 **มาตรการใช้เศษแก้วในการหลอมวัตถุดิบ**

การผสมเศษแก้วเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการหลอมมากจะช่วยลดการใช้พลังงานลงได้ ซึ่งเศษแก้วเหล่านี้นำมาจากแก้วที่ไม่ผ่านการตรวจสอบและจากการรีไซเคิลจากผู้บริโภค แต่การนำเศษแก้วมาผสมในวัตถุดิบในปริมาณมากจะก่อให้เกิดปัญหาต่อคุณภาพของแก้ว โดยเฉพาะอุตสาหกรรมกระจกแผ่นที่ต้องการความใส มาตรการนี้จึงสามารถใช้ได้ในบางผลิตภัณฑ์ เช่นขวดแก้ว ฉนวนใยแก้ว

5.2.2 **มาตรการอุ่นวัตถุดิบ**

การนำก๊าซร้อนทิ้งมาอุ่นวัตถุดิบเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถอนุรักษ์พลังงานได้ ซึ่งมีการนำมาทดลองในระดับห้องปฏิบัติการแต่มาตรการนี้มีข้อกัดที่วัตถุดิบบางชนิดเช่น โซดาแอซสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งอาจส่งผลต่ออิฐทนไฟที่ผนังเตา และวัตถุดิบเมื่อนำมาอุ่นแล้วมีน้ำหนักเบาทำให้เกิดการสะสมเป็นชั้นอยู่ในอุปกรณ์อุ่นวัตถุดิบทำให้เกิดการอุดตันได้

5.2.3 **มาตรการอุ่นเศษกระจก**

มาตรการนี้สามารถนำมาใช้ได้ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก เพราะเศษแก้วสามารถทนความร้อนได้ที่อุณหภูมิสูงและไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี มาตรการนี้จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ได้ในอุตสากรรมแก้วและกระจกของประเทศไทย

5.2.4 **มาตรการการใช้ออกซิเจนในการสันดาป**

มาตรการนี้เป็นการใช้ก๊าซออกซิเจนในการสันดาปแทนการใช้อากาศ ซึ่งเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของเปลวไฟ สามารถลดการบริโภคพลังงานลงได้ถึงร้อยละ 20 แต่มาตรการนี้ต้องมีการปรับปรุงโครงสร้างเตาใหม่และเปลี่ยนชนิดอิฐทนไฟให้สามารถทนความร้อนได้มากขึ้น มาตรการนี้ต้องมีการศึกษาอย่างละเอียดเพราะต้องใช้เงินลงทุนสูงมาก นอกจากนี้ยังต้องศึกษาราคาก๊าซออกซิเจนด้วยว่าคุ้มค่าในการลงทุนในมาตรการนี้หรือไม่

5.2.5 **มาตรการใช้หัวเผาที่มีประสิทธิภาพ**

หัวเผาเป็นปัจจัยสำคัญในระบบเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสามารถช่วยลดการบริโภคพลังงานและลดการปล่อยก๊าซมลพิษลงได้มาก แต่มาตรการนี้สามารถนำมาใช้ได้ในช่วงที่มีการปิดซ่อมเตาเท่านั้นและการนำหัวเผาแบบใหม่มาใช้อาจส่งผลต่อโครงสร้างของเตาหลอมและต้องมีการเปลี่ยนระบบควบคุมการใช้เชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งโรงงานอาจไม่มีความรู้และความชำนาญในการควบคุมการหลอม

5.2.6 **มาตรการปรับปรุงอิฐทนไฟที่มีคุณภาพมาใช้**

อิฐทนไฟที่ใช้ในเตาหลอมมีคุณสมบัติทนความร้อนได้ที่อุณหภูมิสูงและเมื่อใช้หลอมแก้วอิฐจะถูกกัดกร่อนลงเรื่อยๆจนไม่สามารถใช้งานได้ ระยะเวลาในการใช้งานขึ้นอยู่กับการดูแลรักษาและการนำไปใช้งาน ซึ่งอิฐทนไฟที่มีคุณภาพดีสามารถใช้งานได้งานและไม่เกิดปัญหาในขณะที่ใช้งานเช่นทำให้เตาหลอมรั่ว แต่มาตรการนี้มีข้อจำกัดที่สามารถใช้ได้เมื่อมีการสร้างหรือมีการปิดซ่อมเตาเท่านั้นและอิฐทนไฟคุณภาพสูงมีราคาสูงมาก ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาถึงต้นทุนด้วย

5.2.7 **มาตรการปรับปรุงระบบควบคุม**

ระบบควบคุมการสันดาปและการหลอมที่มีประสิทธิภาพสามารถลดการบริโภคพลังงานในการหลอมได้เพราะช่วยควบคุมปริมาณก๊าซ เชื้อเพลิง ความดัน และอื่นได้ แต่มาตรการนี้มีข้อจำกัดคือการเปลี่ยนระบบควบคุมต้องใช้งบประมาณการลงทุนสูง และการดำเนินการติดตั้งทำได้ยากในขณะที่ยังมีการเดินเครื่องจักรอยู่

5.2.8 **มาตรการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่**

รีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) เป็นอุปกรณ์ที่นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในการอุ่นอากาศในการสันดาปของเตาหลอม ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่สามารถนำความร้อนทิ้งมาผลิตเป็นไฟฟ้าได้ แต่เตาหลอมที่ใช้อากาศในการสันดาปยังมีข้อจำกัดในการนำความร้อนทิ้งมาผลิตกระแสไฟฟ้า เพราะก๊าซร้อนที่ปล่อยออกมามีอุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียสและปริมาตรอากาศไม่เพียงพอ แต่เทคโนโลยีนี้ใช้ได้กับเตาหลอมที่ใช้ก๊าซออกซิเจนในการสันดาป (Oxy-firing) เพราะมีปริมาตรของก๊าซร้อนทิ้งมากกว่าการสันดาปด้วยอากาศถึงร้อยละ 30 และก๊าซร้อนทิ้งมีอุณหภูมิถึง 900 – 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า อุ่นอากาศที่ใช้ในการสันดาป อุ่นวัตถุดิบ หรืออุ่นเศษแก้วได้ แต่การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเตาหลอมที่ใช้ออกซิเจนในการสันดาปยังไม่มีการนำมาใช้งานจริง จึงต้องมีการศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมทั้งในด้านการออกแบบเครื่องมือ และต้นทุนการผลิต แต่มาตรการนี้เป็นที่น่าสนใจในอนาคตเพราะราคาพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น

## 5.3 มาตรการด้านพลังงานที่มีการดำเนินการในปัจจุบันของโรงงานตัวอย่าง

### 5.3.1 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ

- ควบคุมขนาดเศษแก้วก่อนเข้าเตาหลอม
- ปรับปรุงระบบผสมและการลำเลียงวัตถุดิบเพื่อลดการทำงานของมอเตอร์

### 5.3.2 กระบวนการหลอม

- การควบคุมปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ในการอากาศสันดาปกับอากาศ

### 5.3.3 กระบวนการขึ้นรูป

- ลดการใช้พลังงานโดยการเปลี่ยนแปลงวิธีการให้ความร้อนของแก้วระหว่างทางที่ก่อนที่จะเข้าตู้อบ จากวิธีการหงายแก้วเป็นคว่ำแก้วเพื่อให้เปลวไฟยังอยู่ในแก้วและทำให้ความร้อนยังสะสมอยู่ได้
- การใช้แม่พิมพ์แบบสแตนเลส (เนื้อแม่พิมพ์มีลักษณะใสเหมือนแก้ว) เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงในการอบแก้วและทำให้แก้วใสขึ้น

### 5.3.4 กระบวนการอบถึงบรรจุ

- การเปลี่ยนและซ่อมแซมฮีตเตอร์ของเตาอบ

### 5.3.5 ฝ่ายสนับสนุนการผลิต (Utility)

- การเพิ่มอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์วีเอสดี(VSD : Vary Speed Drive) ที่มอเตอร์
- การใช้ระบบทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าระบบอากาศอัด
- การใช้ปั๊มลมเป็นแบบเทอร์โบ
- ปรับลดแรงดันเครื่องอัดอากาศให้เหมะสมกับการใช้งาน
- ซ่อมใหญ่(Overhaul) เครื่องอัดอากาศ
- การบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศ

5.3.6 **อื่นๆ เช่นสำนักงาน, อาคารและสถานที่**

- การใช้แสงสว่างจากแสงอาทิตย์โดยติดตั้งกระเบื้องโปร่งแสงบนหลังคาโรงงาน
- ให้แสงสว่างเฉพาะจุดในบริเวณที่ต้องการความสว่างมาก
- หลีกเลี่ยงการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้ามาก(On Peak) และเพิ่มการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อย(Off Peak) ทำให้ไม่ต้องเสียค่าความต้องการพลังไฟฟ้า
- ลดการใช้ไฟฟ้าโดยปิดไฟและเครื่องปรับอากาศในช่วงพักกลางวัน
- เปลี่ยนหลอดไฟแสงจันทร์เป็นหลอดเมทัล ฮาไลท์ หรือ หลอดฟลูออเรสเซนต์
- เปลี่ยนพัดลมเป็นพัดลมอุตสาหกรรม
- เปลี่ยนใบพัดของระบบหล่อเย็นจากโลหะเป็นไฟเบอร์กลาส
- การรณรงค์การปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศที่เหมาะสม
- เปลี่ยนการคิดค่าไฟฟ้าจากระบบ TOD เป็นระบบ TOU
- ปรับปรุงระบบการเดินพัดลมดูดฝุ่นในโรงงานให้สอดคล้องกับการผลิตเพื่อลดการเดินเครื่องโดยไม่จำเป็น

จากมาตรการด้านพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกของประเทศไทยจะเห็นได้ว่าโรงงานส่วนใหญ่มุ่งเน้นในเรื่องของการประหยัดพลังงานไฟฟ้า สำนักงานและเครื่องจักรเช่นปั๊มมอเตอร์ ที่ใช้พลังงานไม่ถึงร้อยละ 2 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมดในโรงงาน แต่กระบวนการที่บริโภคพลังงานมากที่สุดคือเตาหลอมซึ่งมีการปล่อยความร้อนทิ้งในปริมาณสูง แต่ยังไม่มีมาตรการในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ โดยมีสาเหตุเกิดจากไม่มีบุคลากรที่มีความรู้และความเชี่ยวชาญในกระบวนการผลิตแก้วและกระจกโดยเฉพาะ จึงไม่มีโรงงานใดเข้าไปปรับปรุงในกระบวนการผลิตมากนัก นอกจากนี้การลงทุนเครื่องจักรที่เกียวข้องกับกระบวนการผลิตเช่น เตาหลอม เครื่องอัดอากาศ มีค่าใช้จ่ายสูงมาก ซึ่งอาจต้องใช้ระยะเวลานานกว่าจะถึงจุดคุ้มทุนและอาจเกิดความเสี่ยงเช่นทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เสียหาย หรือเกิดผลกระทบต่อกระบวนการผลิต

ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดมาตรการที่มุ่งเน้นไปยังอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานหลักที่มีสัดส่วนการบริโภคพลังงานมากที่สุดในกระบวนการผลิตคือเตาหลอมแก้ว คิดเป็นสัดส่วนพลังงานความร้อนร้อยละ 70 – 80 ของการใช้พลังงานรวม และทางด้านการใช้พลังงานไฟฟ้ามีอุปกรณ์ที่ใช้เหมือนกันคือมอร์เตอร์ไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนระบบทำงานเช่น พัดลม เครื่องอัดอากาศ คิดเป็นร้อยละ 40 – 50 ของการบริโภคพลังงานไฟฟ้าในโรงงาน

## 5.4 มาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานที่นำเสนอ

จากการศึกษามาตรการที่มีการดำเนินการอยู่ในต่างประเทศพบว่ามีมาตรการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศ เช่นมาตรการการนำความร้อนทิ้งมาอุ่นวัตถุดิบ มาตรการการใช้ออกซิเจนในการสันดาปแทนอากาศ แต่มาตรการเหล่านี้ต้องใช้เงินลงทุนสูงและจำเป็นต้องมีผู้ชำนาญการและมีข้อมูลอย่างเพียงพอเพื่อนำมาพิจารณาในการนำมาตรการมาใช้ ดังนั้นมาตรการที่นำเสนอนี้จึงเป็นมาตรการที่สามารถดำเนินการได้โดยไม่ต้องอาศัยความรู้ความชำนาญมากนักและเป็นมาตรการที่ไม่ใช้เทคโนโลยีเฉพาะสำหรับโรงงานใดโรงงานหนึ่งและในบางมาตรการก็นำมาจากในโรงงานตัวอย่างที่มีการดำเนินการจริงและได้ผลในการอนุรักษ์พลังงานมาแล้ว

### 5.4.1 มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ

5.4.1.1 มาตรการอนุรักษ์พลังงาน ที่ระบบลมอัด ประกอบด้วยการลดลมรั่วที่สามารถอนุรักษ์พลังงานได้ร้อยละ 10 – 20 ของการใช้พลังงานของระบบผลิตลมอัด

5.4.1.2 มาตรการจัดการให้เครื่องที่มีสมรรถนะสูงเดินเป็น Base Load อุปกรณ์ที่เหลือใช้ VSD ควบคุมเพื่อเดินเครื่องเสริมการผลิตลมอัดให้เพียงพอกับความต้องการใช้งานผลการอนุรักษ์ขึ้นกับสมรรถนะของเครื่องผลิตลมอัดทุกตัวและการจัดการใช้งานของเครื่องผลิตลมอัด

5.4.2 **มาตรการลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ** ที่ประมาณ 5 $^{0}$C โดยใช้น้ำเย็นจากระบบ Absorption Cooling ที่ทำงานโดยใช้ไอน้ำที่ผลิตจากระบบที่ใช้ความร้อนทิ้งจากเตาหลอมแก้ว เนื่องจากเตาหลอมทำงานต่อเนื่องทำให้ได้พลังงานความร้อนทิ้งจากระบบคงที่ เมื่อนำไปใช้กับระบบ Absorption Cooling จะได้อากาศเย็น ซึ่งสามารถนำไปใช้ลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดลมและใช้ในระบบปรับอากาศในสำนักงานได้

5.4.3 **มาตรการนำลมร้อนทิ้งไปอุ่นเศษแก้วก่อนป้อนเข้าเตาหลอม** มาตรการนี้มีการนำไปใช้ในต่างประเทศ พบว่าทุก 100 °C ที่อุณหภูมิวัตถุดิบเพิ่มจะลดค่า SEC ในกระบวนการผลิตลงได้ 0.08 GJ/pull ton แต่สำหรับมาตรการนี้พบว่าโรงงานในประเทศยังไม่มีการนำมาใช้

## 5.5 มาตรการลดการรั่วไหลของอากาศอัด

โรงงานแก้วและกระจกต้องใช้อากาศอัดในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ จึงจำเป็นต้องใช้อากาศอัดแรงดันสูง ซึ่งต้องใช้เครื่องอัดอากาศขนาดใหญ่จึงบริโภคพลังงานสูงคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 30 – 40 ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในโรงงาน และต้องเดินเครื่องจักรตลอด 24ชั่วโมง จึงไม่สามารถตรวจเช็คและบำรุงรักษาระบบส่งจ่ายอากาศได้ จากการตรวจวัดในโรงงานตัวอย่างพบว่าบางโรงงานมีลมรั่วถึง 20% ทำให้สูญเสียพลังงานโดยไม่จำเป็น ซึ่งการรั่วมักจะเกิดขึ้นตามข้อต่อข้องอ ข้อต่อเข้าปืนลม วาล์วของปืนลม และข้อต่อเข้าอุปกรณ์ใช้ลม ดังนั้นทางโรงงานควรจะมีการตรวจสอบลมรั่วและซ่อมแซมทุกครั้งที่มีการ Shutdown ระบบการผลิตโดยปริมาณลมรั่วที่ยอมรับได้ไม่ควรเกินร้อยละ 5 ของการผลิตอากาศอัดทั้งหมด

### 5.5.1 การทดสอบลมรั่วของระบบอากาศอัดในโรงงานแก้วและกระจก

1. ทดสอบเมื่อไม่มีการใช้อากาศอัดในระบบ(Shutdown ระบบการผลิต)
2. ทดสอบเครื่องอัดอากาศที่มีพิกัดใหญ่สุดเพียงตัวเดียวเพราะเป็นเครื่องที่ใช้พลังงานมากที่สุดและเป็นอุปกรณ์หลักของกระบวนการผลิต
3. เปิดวาล์วอากาศอัดเข้าเครื่องจักรและระบบท่อลมทั้งหมดที่ต้องการทดสอบ

อุปกรณ์

1. นาฬิกาจับเวลา
2. Power meter วัด kW ในช่วง Loan และ Unload

ถ้าเครื่องเดินๆหยุดๆหรือรับภาระ(Load)และไร้ภาระ(Unload) สลับกันแสดงว่ามีลมรั่ว

ร้อยละลมรั่วหาได้จาก

$$\text{Power loss} = \left\{ \frac{Time_{onload}}{Time_{onload} + Time_{unload}} - 0.05 \right\} \times \left\{ P_{onload} - P_{unload} \right\}$$

Energy loss = Power loss x Working hour

| | | |
|---|---|---|
| Time on load | = | ช่วงเวลาที่เครื่องรับภาระ |
| Time unload | = | ช่วงเวลาที่ไร้ภาระ |
| P on load | = | กำลังในขณะที่เครื่องรับภาระ |
| P unload | = | กำลังในขณะที่เครื่องไร้ภาระ |

**มาตรการลดการรั่วไหลของอากาศอัดในโรงงานตัวอย่าง**

โรงงานผลิตขวดแก้ว ข1 ใช้เครื่องอากาศอัดขนาด 250 kW โรงงานต้องการตรวจหาจุดลมรั่ว จึงทดสอบโดยหยุดอุปกรณ์ทั้งหมดที่ต้องใช้อากาศอัดจากเครื่องดังกล่าว จากการทดสอบ 3 ครั้งได้ข้อมูลดังนี้

| Cycle | On load | | Unload | |
|---|---|---|---|---|
| | เวลา(sec) | Power(kW) | เวลา(sec) | Power(kW) |
| 1 | 120 | 206 | 525 | 102 |
| 2 | 119 | 201 | 543 | 101 |
| 3 | 133 | 210 | 549 | 104 |
| เฉลี่ย | 124 (T onload) | 205.67 (P onload) | 539 (T unload) | 102.33 (P unload) |

$$\text{Power loss} = \left\{ \frac{124}{124 + 539} - 0.05 \right\} \times \{ 205.67 - 102.33 \}$$

เมื่อทำการซ่อมจุดรั่วให้มีลมรั่วไม่เกินร้อยละ 5

คิดเป็นกำลังที่สูญเสีย (Power loss) = 14.16 %

คิดเป็นพลังงานที่สูญเสีย (Energy loss) = 14.16 x 24 x 365

= 124,000 kWh / ปี

คิดเป็นค่าใช้จ่าย* = 124,000 x 2.5 บาท/ หน่วย = 310,000 บาท/ ปี

ค่าใช้จ่ายในการแก้ไข = 65,000 บาท

ระยะเวลาคืนทุน = 0.2 ปี

**ราคาพลังงานไฟฟ้า 2.5 บาท/kWh

**5.5.2 วิธีการแก้ไข**

โดยหลักการแล้วลมรั่วที่เกิดจากอากาศอัดที่ไหลผ่านรูรั่วตรง หรือรูรั่วซึมจะทำให้เกิดคลื่นความถี่เสียงอัลตร้าโซนิค(Ultrasonic Sound) ซึ่งในบางจุดสามารถได้ยินเสียงลมที่รั่วออกมาได้ หรือใช้น้ำสบู่ชุบฟองน้ำทาบริเวณท่อหรือข้อต่อที่คาดว่าน่าจะมีลมรั่ว ถ้ามีฟองสบู่เกิดขึ้นแสดงว่าตรงจุดนั้นเกิดลมรั่ว สามารถแก้ไขลมรั่วได้โดยใช้เทปการสำหรับปิดลมรั่วซึม แต่ถ้าบางโรงงานที่ต้องการตรวจสอบลมรั่วแต่ไม่สามารถหยุดเครื่องจักรได้หรือโรงงานที่มีการเดินเครื่องจักรตลอด 24 ชั่วโมงจึงเกิดเสียงดังของเครื่องจักรอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นการยากที่หูของมนุษย์จะสามารถรับ

ฟังคลื่นความถี่เสียงนี้ได้ ดังนั้นการทำการสำรวจหรือตรวจวัดหาจุดรั่วไหลของอากาศอัดจะต้องอาศัยเครื่องมือวัดพิเศษเพื่อทำการตรวจวัด โดยเครื่องมือดังกล่าวมีคุณสมบัติในการตรวจจับความถี่เสียงในระดับ Ultrasonic Sound แล้วแปลงมาเป็นคลื่นความถี่เสียงที่มนุษย์สามารถที่จะฟังได้

เมื่อทราบปริมาณการรั่วไหลและค้นพบตำแหน่งของการรั่วแล้ว ควรมีการดำเนินมาตรการอย่างจริงจังในการลดการรั่วไหลของอากาศอัด โดยการตั้งเป้าหมายและตรวจสอบผลที่ได้รับจากการดำเนินการตามเป้าหมายที่ตั้งไว้อย่างจริงจัง นอกจากนี้ควรตรวจสอบบริเวณท่อส่งจ่ายและอุปกรณ์ที่ใช้อากาศอัด สายอ่อนและหัวต่อสายต่างๆว่าต่อกันแน่นเพียงพอที่ไม่ทำให้เกิดการรั่วไหลได้ หลังจากนั้นให้ตรวจอัตราการรั่วไหลอีกครั้งตามวิธีการตรวจสอบที่ได้กล่าวมาแล้วจนกระทั่งได้ผลตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ การดำเนินการตรวจสอบการรั่วไหลควรทำซ้ำอย่างน้อยทุกๆ 6 เดือน มิฉะนั้นปัญหาจะกลับคืนมาได้อีก

5.5.3 **ค่าใช้จ่ายในการลงทุน**

ในทางปฏิบัติการตรวจวัดในแต่ละครั้งอาจจะต้องใช้เวลาและกำลังคนเพื่อทำการสำรวจและแก้ไขปัญหา ซึ่งหากมองแบบผิวเผินอาจดูเหมือนปัญหาดังกล่าวไม่ใช่ปัญหาใหญ่ แต่หากพิจารณาจากผลที่เกิดขึ้นในระยะยาวแล้วการลงทุนแก้ไขปัญหาดังกล่าวนับว่าเป็นการลงทุนที่คุ้มค่าและสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายซึ่งเกิดจากค่าไฟฟ้าได้มาก

ค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบขึ้นอยู่กับขนาดความยาวและขนาดของระบบท่อในโรงงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**5.6 มาตรการใช้ VSD ควบคุมเครื่องผลิตอากาศอัดเสริม**

ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปมีการใช้เครื่องอัดอากาศอย่างแพร่หลายและในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกมีการบริโภคพลังงานที่เครื่องอัดอากาศสูงถึงร้อยละ 40-50 ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดในกระบวนการผลิต หากมีการควบคุมการใช้พลังงานเครื่องอัดอากาศให้มีประสิทธิภาพก็จะส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานได้

มาตรการประหยัดพลังงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานในการผลิตอากาศของเครื่องอัดอากาศแบบสกรู (Screw Compressor) โดยใช้เครื่องควบคุมความเร็วรอบ (Variable Speed Drive : VSD) ไปควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของเครื่องอัดอากาศให้เหมาะสมกับสภาวะของโหลดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอัดอากาศในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้เครื่องควบคุมความเร็วรอบยังสามารถนำไปใช้ได้กับระบบปั๊มน้ำ พัดลม และระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ นอกจากนี้การใช้อุปกรณ์ VSD ที่ใช้เทคโนโลยีแบบ Voltage Vector Control (VVC) จะทำให้ประสิทธิภาพการควบคุมไม่ให้มีการสูญเสียพลังงานความร้อนในตัวมอเตอร์ (Derating) และมีอุปกรณ์กำจัดสัญญาณรบกวน (Harmonics Filters) ที่เป็นอุปกรณ์มาตรฐานของเครื่องป้องกันการรบกวนสัญญาณควบคุมและยังส่งผลดีในการประหยัดพลังงานด้วย

หลักการทำงานคือเครื่องควบคุมความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศจะถูกต่อเข้ากับตัววัดความดันในระบบ ถ้าความดันในระบบลดลงต่ำกว่าที่กำหนดเครื่องควบคุมความเร็วรอบจะเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ของเครื่องอัดอากาศ ในทางกลับกันความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศจะถูกลดลงเมื่อความดันเพิ่มถึงระดับที่กำหนด

**ข้อดีของการใช้ VSD**

1. สามารถปรับความเร็วรอบมอเตอร์ได้จากเดิมซึ่งคงที่ ทำให้ได้ความเร็วรอบที่เหมาะสมตามความต้องการทำงานในแต่ละลักษณะ โดยมีการควบคุมแบบ Closed Loop Control เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพคงที่อยู่ตลอดเวลา
2. เพิ่มคุณภาพของชิ้นงานให้ถูกต้องตามความต้องการและลดต้นทุนในการผลิต
3. ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องจักรและป้องกันการสูญเสียของมอเตอร์ พัดลม
4. ลดการกระชากไฟฟ้าตอนเริ่มต้น ทำให้ลดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าโดยเฉพาะเครื่องอัดอากาศที่มีขนาดใหญ่
5. ประหยัดพลังงาน โดยใช้พลังงานตามความจำเป็นของโหลด

โรงงานผลิตขวดแก้ว ข5 ใช้เครื่องอากาศอัดขนาด 250 kW ปกติเปิด on-load ไว้24 ชั่วโมงต่อวัน ในกรณีที่ระบบความดันในระบบไม่เพียงพอ เครื่องนี้จะทำงานเสริม จากกรณีศึกษาจะเปรียบเทียบระหว่างกรณีการใช้ VSD และกรณีไม่ใช้ VSD ดังนี้

**กรณีไม่ใช้VSD กับมอเตอร์ขนาด 250 kW**

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่วัดได้จากมอเตอร์ขนาด 250 kW กรณีไม่ใช้VSD

| เวลา (ชั่วโมง) | แรงดันอินพุท ไลน์-ไลน์(V) | กระแสอินพุท ไลน์ (A) | กำลังไฟฟ้า (kW) |
|---|---|---|---|
| 1 | 397 | 310.0 | 189.0 |
| 2 | 397 | 310.0 | 190.0 |
| 3 | 397 | 306.0 | 187.0 |
| 4 | 398 | 307.0 | 188.0 |
| 5 | 398 | 308.0 | 188.0 |
| 6 | 392 | 311.0 | 189.0 |
| 7 | 393 | 310.0 | 189.0 |
| 8 | 398 | 307.0 | 188.0 |
| 9 | 398 | 308.0 | 188.0 |
| 10 | 392 | 311.0 | 189.0 |

การคำนวณพลังงานไฟฟ้ากรณีไม่ใช้VSD กับมอเตอร์ขนาด 250 kW

พลังงานเฉลี่ย ($p_{avg}$) = ผลรวมพลังงานที่วัด / เวลาที่วัด

= {(189.00 kW)+(190.00 kW)+(187.00 kW)+(188.00 kW)+(188.00 kW)
+(189.00 kW)+(189.00 kW)+(188.00 kW)+(188.00kW)+(189.00 kW) / 10

= 188.50 kW/hr

ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ต่อปี = 188.50 kW x 24 hr x 365 วัน. = 1,651,200 kWh/yr

คิดเป็นค่าใช้จ่าย* = 4,128,000 บาท/ปี

*ราคาพลังงานไฟฟ้า 2.5 บาท/kWh

**กรณีใช้VSD กับมอเตอร์ขนาด 250 kW**

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่วัดได้จากมอเตอร์ขนาด 250 kW กรณีใช้VSD

| เวลา (ชั่วโมง) | แรงดันอินพุท ไลน์-ไลน์(V) | กระแสอินพุท ไลน์ (A) | กำลังไฟฟ้า (kW) |
|---|---|---|---|
| 1 | 398 | 210.0 | 131.0 |
| 2 | 399 | 210.0 | 132.0 |
| 3 | 399 | 210.0 | 132.0 |
| 4 | 398 | 208.0 | 132.0 |
| 5 | 398 | 211.0 | 131.0 |
| 6 | 398 | 210.0 | 132.0 |
| 7 | 398 | 210.0 | 131.0 |
| 8 | 398 | 211.0 | 132.0 |
| 9 | 398 | 209.0 | 132.0 |
| 10 | 398 | 211.0 | 132.0 |

การคำนวณพลังงานไฟฟ้ากรณีไม่ใช้VSD กับมอเตอร์ขนาด 250 kW

พลังงานเฉลี่ย ($p_{avg}$) = ผลรวมพลังงานที่วัด / เวลาที่วัด

= {(131.00 kW)+(132.00 kW)+(132.00 kW)+(132.00kW)+(131.00kW) +

(132.00kW)+(131.00 kW)+(132.00kW)+(132.00 kW)+(132.00 kW)}/10

= 131.70 kW

ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ต่อปี = 131.70 kW x 24 hr x 365 วัน. = 1,153,700 kWh/yr

คิดเป็นค่าใช้จ่าย* = 2,885,000 บาท/ปี

*ราคาพลังงานไฟฟ้า 2.5 บาท/kWh

ความแตกต่างของพลังงานไฟฟ้าระหว่างการเลือกใช้VSDและกรณีไม่ใช้VSD

= 1,651,200 - 1,153,700 = 497,500 kWh/yr

คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลง = 4,128,000 - 2,885,000 = 1,243,000 บาท/ปี

ระยะเวลาคืนทุน = เงินลงทุน ( ราคา VSD + ตู้ control + ค่าติดตั้ง) / เงินค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี

= 900,000 / 1,243,000 = 0.7 ปี

ระยะเวลาคืนทุน = 0.7 x 12 = 9 เดือน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

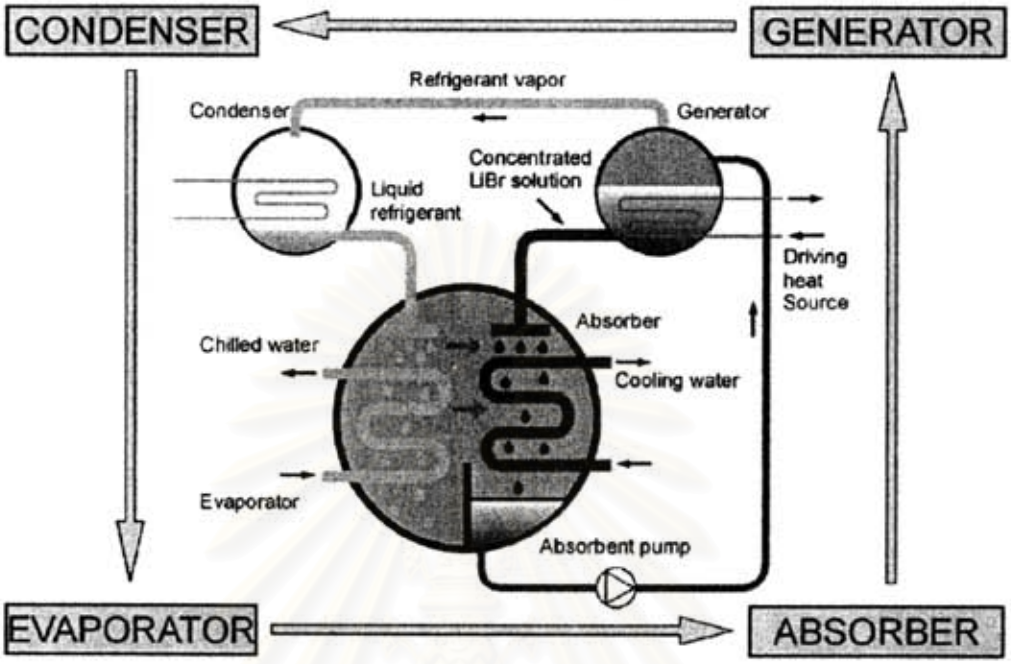
**5.7 มาตรการลดอุณหภูมิอากาศเข้าก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ**

การใช้อากาศที่มีอุณหภูมิในการอัดอากาศตามปกติจะมีอัตราการผลิตอากาศ(Free Air Delivery) ของเครื่องอัดอากาศที่สามารถทำได้จะมีการระบุสภาพอากาศอ้างอิง ซึ่งในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอัดอากาศจะทำที่อุณหภูมิที่ 20$^{0}$C แต่สภาพอากาศในประเทศไทยนั้นค่อนข้างจะมีอุณหภูมิสูงเล็กน้อยคือมีค่าประมาณ 30-40$^{0}$C ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการผลิตอากาศของเครื่องอย่างแน่นอน กล่าวคือทำให้เครื่องสามารถผลิตอากาศได้ในปริมาณน้อยลงเพราะอากาศที่อุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นถ้าต้องการอัดอากาศให้ได้ระดับความดันที่ต้องการต้องใช้อากาศที่เข้าเครื่องอัดอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำลงหรือในอากาศเย็น ซึ่งทำได้โดยจัดการระบายความร้อนในห้องเครื่องให้ดีขึ้นหรือเดินท่อนำอากาศเย็นจากภายนอกเข้ามายังเครื่องอัดอากาศจะใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงและอากาศที่นำเข้ามาต้องไม่มีความชื้นสูง

มาตรการนี้ทำอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศประมาณ 5 $^{0}$C โดยใช้น้ำเย็นจากระบบ Absorption Cooling ที่ทำงานโดยใช้ไอน้ำที่ผลิตจากระบบที่ใช้ความร้อนทิ้งจากเตาหลอมแก้ว เนื่องจากเตาหลอมทำงานต่อเนื่องทำให้ได้พลังงานความร้อนทิ้งจากระบบคงที่ ซึ่งอยู่ในรูปของลมร้อนที่มีอุณหภูมิ 300 – 350 $^{0}$C เมื่อนำไปใช้กับระบบ Absorption Cooling จะได้ความเย็น 200 – 250 ตัน สามารถนำไปใช้ลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ

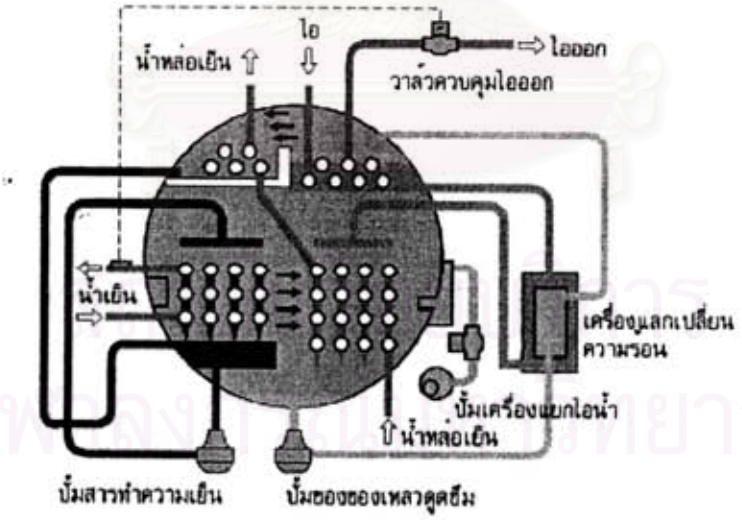
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.8.1 **วัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึม**( Absorption Refrigeration Unit )



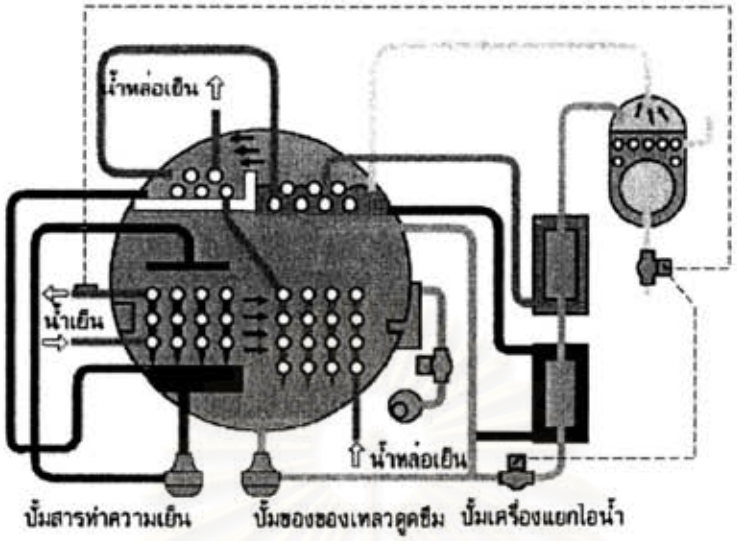

**วัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึม** (Absorption Refrigeration Unit)

1. เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดซึมชั้นเดียว (Single Effect Absorption Water Chilling Unit)



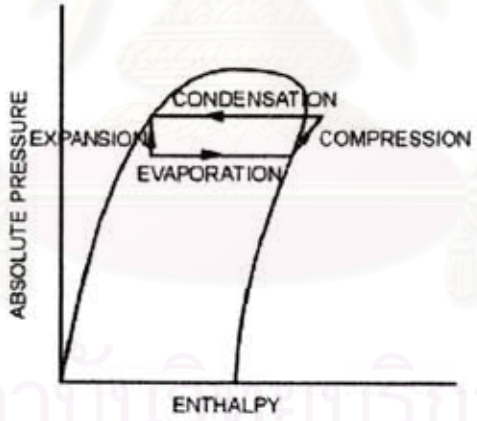

รูปที่ 5.1 เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดซึมชั้นเดียว

2. เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดซึมสองชั้น (Double Effect Absorption Water Chilling Unit)




รูปที่ 5.2 เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดซึมสองชั้น

**วัฏจักรการทำความเย็นแบบกดดันไอ** (Vapor Compression Refrigeration Cycle)




วัฏจักรการทำความเย็นแบบกดดันไอหรืออัดตัว ประกอบด้วย 4 กระบวนการดังต่อไปนี้

1. การอัด (Compression)
2. การควบแน่น (Condensation)
3. การขยายตัว (Expansion)
4. การระเหย (Evaporation)

1. การอัด (Compression)

เครื่องอัดสารทำความเย็นหรือ Compressor จะทำหน้าที่อัดสารทำความเย็นที่มีลักษณะเป็นไอหรือแก๊สไปยังเครื่องควบแน่นหรือ Condenser

2. การควบแน่น (Condensation)

ไอสารทำความเย็นที่มีความดันและอุณหภูมิสูงจากเครื่องอัดจะถูกเครื่องควบแน่นหรือ Condenser ระบายความร้อนเพื่อให้สารทำความเย็นควบแน่นเป็นของเหลว Condenser ขณะที่สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะจากไอไปเป็นของเหลว ความดันและอุณหภูมิของการควบแน่นจะคงที่

3. การขยายตัว (Expansion)

สารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิและความดันสูงจากเครื่องควบแน่นจะไหลผ่านอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับลดความดันของสารทำความเย็นเหลว โดยอุปกรณ์ลดแรงดันของสารทำความเย็นนี้ จะควบคุมอัตราการไหลของสารทำความเย็น เพื่อให้อุณหภูมิที่สูงกว่าจุดอิ่มตัวหรือร้อนยวดยิ่ง (Saturation or Superheat) ของไอสารทำความเย็นที่ออกจากกระบวนการการระเหยมีค่าคงที่ สารทำความเย็นที่ไหลผ่านอุปกรณ์ลดแรงดันแล้วจะมีอุณหภูมิและความดันลดลง และจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอสารทำความเย็นในกระบวนการระเหย

4. การระเหย (Evaporation)

ขดท่อความเย็น (Cooling Coil หรือ Evaporator) จะทำหน้าที่ดูดความร้อนจากอากาศหรือสารตัวกลางในการทำความเย็นที่อยู่รอบๆท่อหรืออากาศหรือสารตัวกลางในการทำความเย็นที่หมุนเวียนผ่านขดท่อความเย็น สารทำความเย็นเหลวจะค่อยๆระเหยเพื่อเพิ่มความร้อนแฝงของการกลายเป็นไปในขณะที่ไหลไปตามขดท่อ ขณะที่สารทำความเย็นเหลวระเหยภายในขดท่อความเย็นความดันและอุณหภูมิในการระเหยจะคงที่

**วัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึม** (Absorption Refrigeration Cycle)

เนื่องจากระบบการทำความเย็นแบบกดดันไอ หรืออัดไอต้องใช้พลังงานในรูปของพลังงานกล เพื่อไปขับเคลื่อนให้ระบบทำงานโดยผ่านเครื่องอัดสารทำความเย็น (Compressor) ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นวิธีการใหม่เพื่อลดการใช้พลังงานดังกล่าว เรียกระบบนี้ว่าระบบการทำความเย็นแบบดูดซึม (Absorption) พลังงานที่ต้องการใช้ในระบบเพื่อให้เกิดการทำงานจะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งการทำงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมอาศัย

หลักการทางธรรมชาติของน้ำ โดยจุดเดือดของน้ำจะแปรเปลี่ยนไปตามความดันหรือความกดอากาศที่ความดันบรรยากาศ จุดเดือดของน้ำจะอยู่ที่อุณหภูมิ 100°C (212°F) และน้ำจะเดือดที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่อความดันบรรยากาศลดลงโดยจุดเดือดของน้ำที่ความกดอากาศ 6 มม.ของปรอท(mmHg) จะอยู่ที่อุณหภูมิเพียง 3.7°C (38.6°F) ซึ่งเพียงพอต่อการทำน้ำเย็น(Chilled Water) ในระบบปรับอากาศ นอกจากนี้ยังมีสารละลายลิเธียมไบรไมด์(Lithium Bromide, LiBr) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ลิเธียมไบรไมด์(Lithium Bromide) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเกลือสามารถดูดซึมน้ำและละลายในน้ำได้เป็นอย่างดี ยิ่งสารละลายลิเธียมไบรไมด์เข้มข้นขึ้นเท่าใดปฏิกิริยาในการดูดซึมต่อน้ำก็จะยิ่งสูงขึ้นตาม ในทางกลับกันหากเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารละลายลิเธียมไบรไมด์ปฏิกิริยาในการละลายหรือจับตัวกับน้ำก็จะลดลง

อุปกรณ์ในระบบการทำความเย็นแบบดูดซึมประกอบด้วย

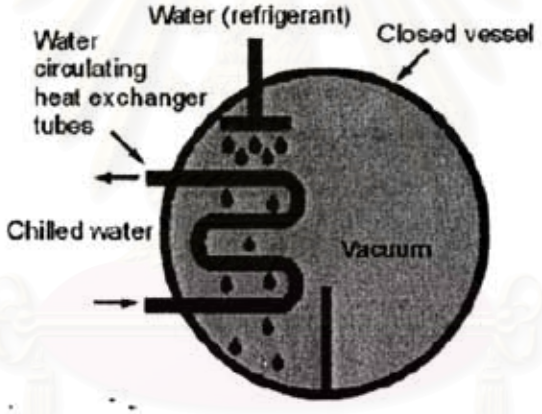
1. ตัวถัง (Shelf) ประกอบด้วย เครื่องดูดซึม (Absorber) และ Evaporator
2. ขดท่อความเย็น (Chilled Water Tube)
3. ขดท่อน้ำหล่อเย็น (Cooling Water Tube)
4. Generator
5. เครื่องควบแน่น (Condenser)
6. เครื่องสูบสารทำ ความเย็น (น้ำ)
7. เครื่องสูบสารละลาย (Absorbent Pump)
8. สารทำความเย็น (น้ำ)
9. สารละลายลิเธียมไบรไมด์ (LiBr)

หลักการทำงานเบื้องต้นของวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึม จะเริ่มต้นที่สารละลายลิเธียมไบรไมด์เข้มข้นและอุณหภูมิสูง(Concentrated Lithium Bromide) ที่ไหลลงมาจาก Generator จะถูกฉีดกระจายลงบนขดท่อน้ำหล่อเย็นที่มีน้ำหล่อเย็นหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลา เพื่อลดอุณหภูมิของสารละลายลิเธียมไบรไมด์ โดยสารละลายลิเธียมไบรไมด์นี้จะดูดซึมไอระเหยของสารทำความเย็น(น้ำ) จาก Evaporator ไปพร้อมๆกัน เมื่อสารละลายลิเธียมไบรไมด์ดูดซึมสารทำความเย็นและลดอุณหภูมิลงแล้ว ก็จะเปลี่ยนสภาพเป็นสารละลายลิเธียมไบรไมด์ที่เจือจาง และจะไหลมารวมกันบริเวณด้านล่างของตัวถัง เพื่อให้เครื่องสูบหมุนเวียนของสารละลายลิเธียมไบรไมด์สูบส่งไปยัง Generator เพื่อแยกสารทำความเย็น(น้ำ) ออกจากสารละลายลิเธียมไบรไมด์ด้วยการให้ความร้อน โดยความร้อนที่ให้กับ Generator เพื่อแยกสารทำความเย็นออกจากลิเธียมไบรไมด์ สามารถใช้แหล่งความร้อนจากภายนอกได้หลายแบบ เช่น ไอน้ำ ความดันต่ำ ไอเสีย

จากกระบวนการต่างๆ การเผาไหม้โดยตรง(Direct Fired) สารทำความเย็น(น้ำ) ที่แยกตัวออกจากสารละลายลิเธียมไบรไมด์จะไหลไปควบแน่นที่เครื่องควบแน่น(Condenser) และสารละลายลิเธียมไบรไมด์ใน Generator จะกลับเข้มข้นขึ้นมาใหม่และไหลไปที่ตัวถัง (Shelf) เพื่อดูดซึมน้ำเป็นวัฏจักรสารทำความเย็น(น้ำ) ที่ควบแน่นในเครื่องควบแน่น (Condenser) โดยมีน้ำหล่อเย็นช่วยในการลดอุณหภูมิของสารทำความเย็น(น้ำ) เมื่อควบแน่นแล้วสารทำความเย็นดังกล่าวจะไหลลงไปที่ Evaporator โดยฉีดกระจายผ่านขดท่อทำความเย็น(Cooling Coil) ซึ่งสารทำความเย็น(น้ำ) จะระเหยกลายเป็นไอภายใต้ความกดดันสูญญากาศที่ 6-7 มม.ของปรอท(mmHg) ซึ่งสารทำความเย็น(น้ำ)จะระเหยกลายเป็นไอและดูดความร้อนจากน้ำเย็นที่ไหลหมุนเวียนอยู่ในขดท่อความเย็น โดยจะลดอุณหภูมิของน้ำเย็นจาก 12°C (53.6°F) มาที่อุณหภูมิ 7°C (44.6°F)

โดยกระบวนการทำความเย็นมีอยู่ 5 กระบวนการดังต่อไปนี้

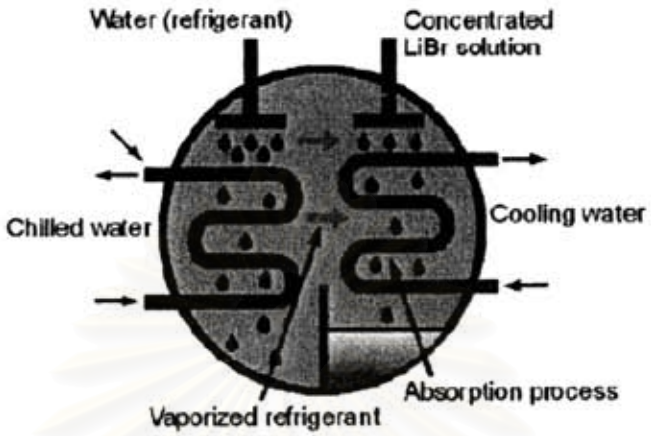
1. การระเหย (Evaporation)




รูปที่ 5.3 การระเหย

สารทำความเย็น(ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้น้ำ)ใน Evaporator จะถูกเครื่องสูบสารทำความเย็นซึ่งอยู่ด้านล่างของ Evaporator สูบและฉีดกระจายจ่ายลงบนขดท่อความเย็นที่มีน้ำเย็นหมุนเวียนไหลผ่านอย่างสม่ำเสมอเพื่อทำความเย็นสารทำความเย็น(น้ำ) จะระเหยกลายเป็นไอโดยดูดเอาความร้อนแฝงของการระเหยจากน้ำเย็นที่ไหลหมุนเวียนอยู่ในขดท่อความเย็น ไอน้ำที่ระเหยออกมานั้นจะถูกดูดเข้าไปในเครื่องดูดซึมที่ติดตั้งอยู่บริเวณส่วนล่างของ Evaporator ภายใน Evaporator จะต้องทำให้เป็นสูญญากาศที่ความดัน 6-7 มม.ของปรอท(mmHg) ซึ่งน้ำที่ใช้เป็นสารทำความเย็นจะระเหยที่อุณหภูมิประมาณ 5°C (41°F) โดยน้ำเย็นที่ไหลหมุนเวียนผ่านขดท่อความเย็นจะถูกลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิ 12°C (53.6°F) มาเป็น 7°C (44.6°F)

2. การดูดซึม (Absorption)

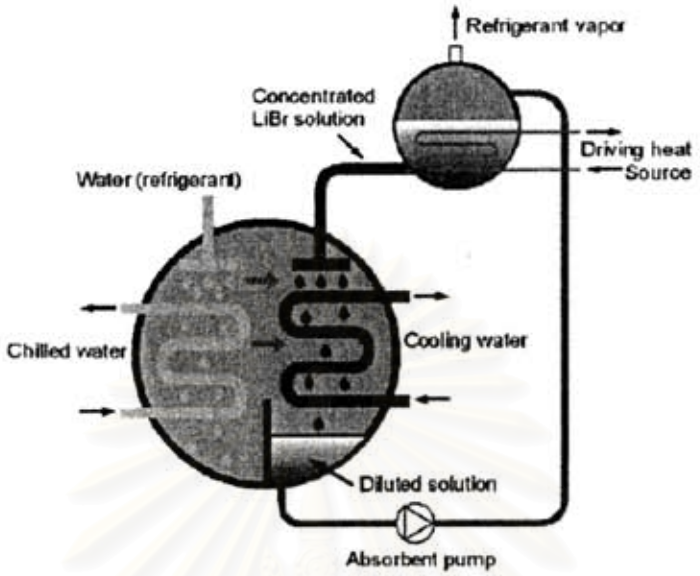



รูปที่ 5.4 การดูดซึม

ในเครื่องดูดซึม(Absorber) สารละลายเข้มข้นของลิเธียมไบรไมด์(Concentrated Lithium Bromide) จะถูกเครื่องสูบสารละลาย(Absorbent Pump) สูบและฉีดกระจายลงบนท่อน้ำหล่อเย็นซึ่งมีน้ำหล่อเย็นไหลหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลา โดยสารละลายเข้มข้นของลิเธียมไบรไมด์จะดูดซึมไอระเหยจากน้ำในกระบวนการการระเหยใน Evaporator ตลอดเวลาเพื่อรักษาสูญญากาศใน Evaporator ไว้ซึ่งในระหว่างกระบวนการนี้สารละลายลิเธียมไบรไมด์จะถูกเจือจางลงด้วยไอระเหยของน้ำและความร้อนของการดูดซึมจะระบายออกมา เครื่องดูดซึมที่ร้อนจากความร้อนของการดูดซึมจะถูกทำให้เย็นลงด้วยน้ำหล่อเย็นหมุนเวียน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

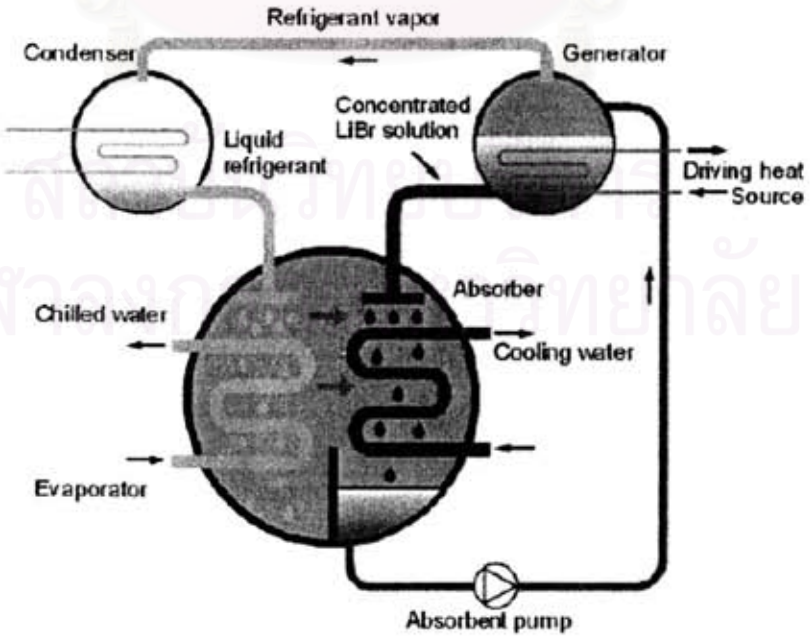
3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)




รูปที่ 5.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

สารละลายลิเธียมไบรไมด์ที่เจือจางภายในเครื่องดูดซึม จะถูกเครื่องสูบสารละลาย (Absorbent Pump)โดยสารละลายลิเธียมไบรไมด์เจือจางจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารละลายลิเธียมไบรไมด์เข้มข้นที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้สารละลายลิเธียมไบรไมด์เจือจางดังกล่าวร้อนขึ้น

4. Generator

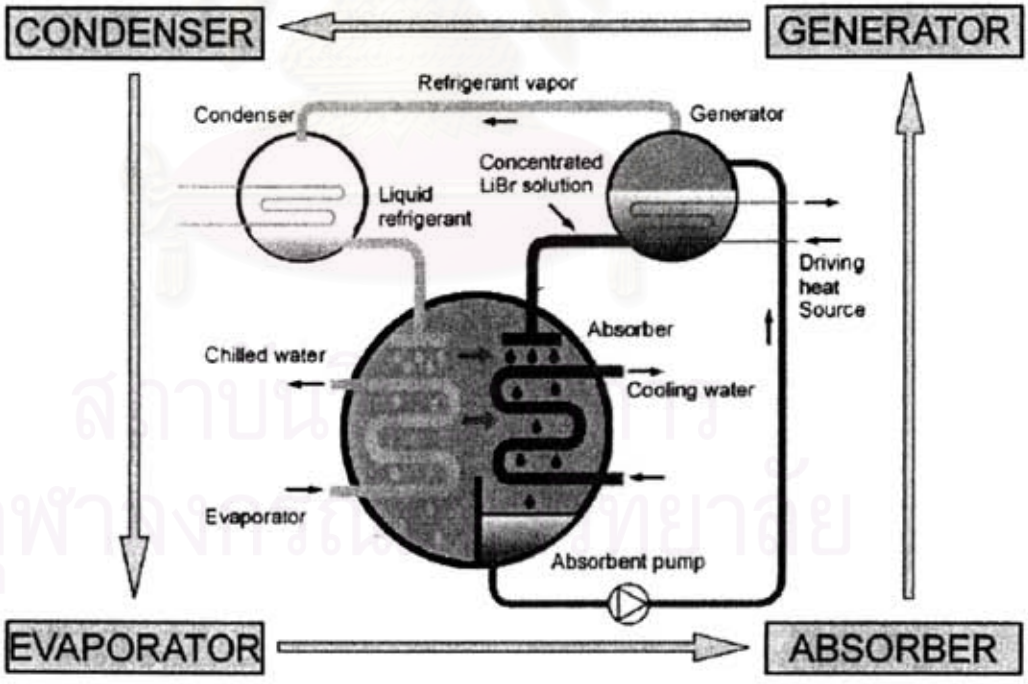



รูปที่ 5.6 Generator

สารละลายลิเธียมไบรไมด์ที่เจือจางจะสะสมอยู่บริเวณด้านล่างของ Generator ซึ่งติดตั้งอยู่เหนือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและจะถูกทำให้ร้อนโดยท่อทำความร้อนที่ติดตั้งอยู่ใน Generator เมื่อได้รับความร้อนสารทำความเย็น(น้ำ) ที่ผสมอยู่ในสารละลายลิเธียมไบรไมด์ที่เจือจางจะระเหยออกไป ทำให้สารละลายลิเธียมไบรไมด์ที่เจือจางจะเข้มข้นขึ้นมาอีกแหล่ง โดยให้ความร้อนที่ Generator อาจใช้ไอน้ำความดันต่ำหรือน้ำร้อนหรือไอเสียหรือแก๊สร้อนจากแหล่งให้ความร้อนภายนอก

สารละลายเข้มข้นของลิเธียมไบรไมด์จะไหลไปที่บริเวณของเครื่องดูดซึมผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยอาศัยความถ่วงและความแตกต่างของความดัน จากนั้นก็จะถูกเครื่องสูบสารละลายสูบให้หมุนเวียนเป็นวัฏจักรในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ความร้อนจะแลกเปลี่ยนระหว่างสารลิเธียมไบรไมด์ที่เข้มข้นและเจือจางที่เครื่องสูบสารละลายสูบเข้าไปเป็นการประหยัดความร้อนใน Generator ขณะเดียวกันอุณหภูมิของสารละลายลิเธียมไบรไมด์ที่เข้มข้นที่ถูกสูบเข้าไปในเครื่องดูดซึมก็จะลดลงซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

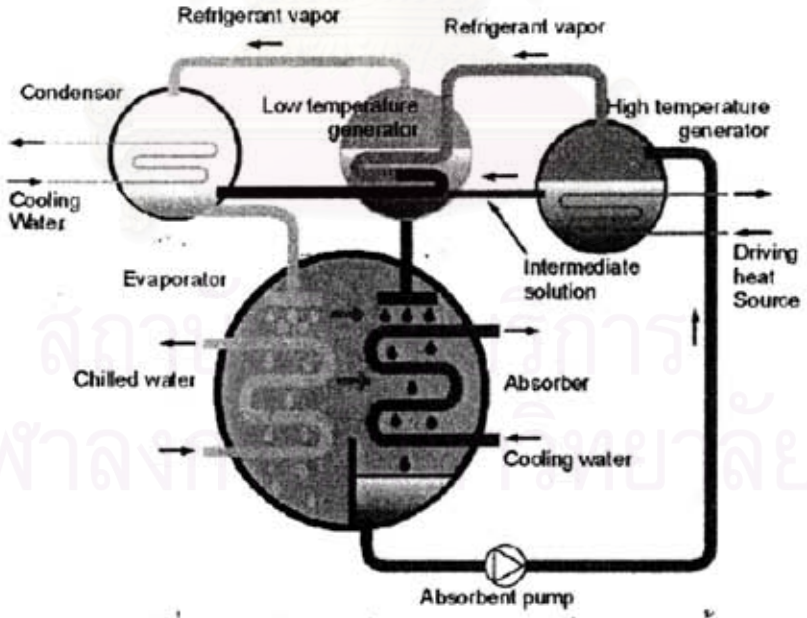
5. การควบแน่น (Condensation)



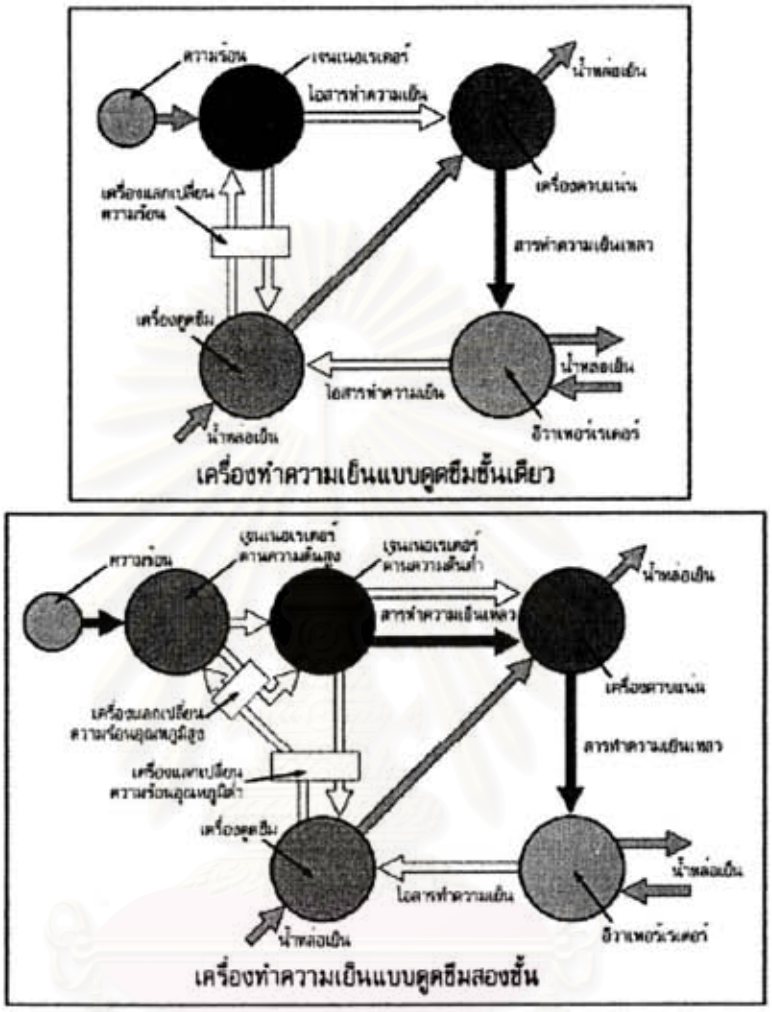

รูปที่ 5.7 การควบแน่น

ไอสารทำความเย็นที่ระเหยใน Generator จะถูกทำให้เย็นลงและควบแน่นโดยใช้น้ำหล่อเย็นไหลผ่านท่อในเครื่องควบแน่นซึ่งติดตั้งอยู่ส่วนบนของ Generator สารทำความเย็นที่ควบแน่นแล้วจะไหลกลับไปยังEvaporator โดยอาศัยความถ่วงและความแตกต่างของความดัน จากนั้นจะถูกเครื่องสูบสารทำความเย็นสูบให้หมุนเวียนเป็นวัฏจักร

ระบบการทำความเย็นแบบดูดซึมมี 2 แบบ คือแบบชั้นเดียว(Single Effect) ซึ่งมีหลักการทำงานตามที่อธิบายไว้ข้างต้นและแบบสองชั้น(Double Effect) ซึ่งจะอาศัยหลักการดูดซึม 2 ชั้น สำหรับทำความเย็นแบบดูดซึมชั้นเดียวไอสารทำความเย็นที่ระเหยออกมาจาก Generator จะกลายเป็นสารทำความเย็นเหลวหลังจากได้ระบายความร้อนให้กับน้ำหล่อเย็นในเครื่องควบแน่น ส่วนในระบบทำความเย็นแบบดูดซึม 2 ชั้น จะมีไอสารทำความเย็นที่ระเหยออกมาจาก Generator ซึ่งมีอุณหภูมิสูงจะถูกนำไปใช้สำหรับทำให้สารละลายลิเธียมไบรไมด์ในGenerator อุณหภูมิต่ำร้อนขึ้น ดังนั้นระบบนี้จึงมีความต้องการความร้อนหรือใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าในการแยกสารทำความเย็นออกจากสารละลายลิเธียมไบรไมด์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะดีขึ้นประมาณร้อยละ65ของระบบทำความเย็นแบบดูดซึมชั้นเดียว นอกจากนี้ระบบการทำความเย็นแบบดูดซึม 2 ชั้นยังต้องการปริมาณสารทำความเย็นที่ควบแน่นในเครื่องควบแน่นน้อยกว่า ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ระบายให้กับน้ำหล่อเย็นในเครื่องควบแน่นจะน้อยกว่าจึงใช้หล่อเย็นเล็กลง




รูปที่ 5.8 วัฏจักรการทำงานของการดูดซึมแบบสองชั้น




รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบวัฏจักรการทำงานของการดูดซึมแบบชั้นเดียวและสองชั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตัวอย่างการคำนวณมาตรการนำพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งใช้กับ Absorption Chiller จากโรงงานตัวอย่าง**

โรงงานตัวอย่างคือ โรงงานผลิตขวดแก้ว ข1โดยมีขนาดเตาหลอม 270 ton/day อุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้ง 495 องศาเซลเซียส โดยความร้อนทิ้งมาใช้ที่ระบบ Absorption Chiller เพื่อผลิตน้ำเย็นใช้สำหรับระบบปรับอากาศและใช้ลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าระบบอากาศอัดเพื่อลดการใช้พลังงานในระบบผลิตอากาศอัด โดยมีข้อมูลจากโรงงานตัวอย่างมาใช้ในการคำนวณดังตารางที่ 5.3 – 5.5 ดังนี้

ตารางที่ 5.3 มาตรการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ของโรงงาน ข1

| รายละเอียด | หน่วย | Value | สัญลักษณ์และสมการ |
|---|---|---|---|
| ขนาดเตา | Ton/day | 270 | |
| ชนิดเตา | - | End Port | |
| ชนิดเชื้อเพลิง | - | NG | |
| ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง | $MJ/m^3$ | 36.04 | HV |
| ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง | $m^3/hr$ | 1440 | $V_f$ |
| ความหนาแน่นเชื้อเพลิง | $kg/m^3$ | 0.67 | $d_f$ |
| อัตราอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ | $m^3/hr$ | 11664 | Va |
| อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ | °C | 35 | |
| เอนทาลปีอากาศ | kJ/kg | 298.62 | $h_a$ |
| ความหนาแน่นอากาศ | $kg/m^3$ | 1.13 | $d_a$ |
| อุณหภูมิอากาศทิ้งที่ปล่องเฉลี่ย | °C | 495 | $t_{exh}$ |
| อัตราการไหลก๊าซร้อนทิ้งโดยมวล | kg/hr | 14,145.12 | $m_{exh} = V_a \times d_a + V_f \times d_f$ |
| เอนทาลปีอากาศทิ้งที่ปล่อง | kJ/kg | 778.19 | $h_{exh}$ |
| ปริมาณความร้อนที่ทิ้งจากปล่อง | kJ/hr | 6,823,575.20 | $Q_{exh} = m_{exh}(h_{exh} - h_a)$ |

ตารางที่ 5.4 มาตรการนำพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งใช้กับ Absorption Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ

| รายละเอียด | หน่วย | Value | สัญลักษณ์และสมการ |
|---|---|---|---|
| EER(Energy Efficiency Rating) | kJ C/kJ H | 0.8 | EER |
| ปริมาณความร้อนที่ Input | GJ / hr | 3.72 | $Q_{inp}$ |
| Cooling Capacity( 1 TR = 12,000 BTU/hr ) | TR | 236.19 | TR = EER x Qinp x 79.365 |

ตารางที่ 5.5 มาตรการนำพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งใช้กับ Absorption Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor

| รายละเอียด | หน่วย | Value | สัญลักษณ์และสมการ |
|---|---|---|---|
| SEC ระบบ Air Compressor | kWh/ton pull | 110.14 | SEC,EE |
| สมรรถนะระบบอัดอากาศ(ชนิดScrew Type) | kW / litre /sec | 0.4 | Eff |
| ปริมาตรอากาศป้อนเข้าระบบอัดอากาศ | litre/sec | 3097.69 | V=SEC,EE x mrm /Eff |
| อุณหภูมิอากาศก่อนดำเนินมาตรการ | K | 308 | Ta(Before) |
| อุณหภูมิอากาศหลังดำเนินมาตรการ (โดยใช้ความเย็นจาก Abs. Chil. ลด Air Temp) | K | 278 | Ta(After) |
| ความดันสัมบูรณ์ของอากาศ | kPa / $m^2$ | 100 | Pa |
| Gas Constant | kJ / kg-K | 0.287 | |
| ความหนาแน่นอากาศก่อนดำเนินมาตรการ | kg / m3 | 1.131 | den. Air(before) = P/RTa(before) |
| มวลอากาศก่อนดำเนินมาตรการ | kg/sec | 3.504 | $m_{air}$(before)=V*den Air/1000 |
| ความหนาแน่นอากาศหลังดำเนินมาตรการ | kg / m3 | 1.253 | den Air(After)= P/RTa(after) |
| สัดส่วนของมวลอากาศเข้าระบบอัดอากาศเพิ่มขึ้น | | 1.108 | den Air(After)/den Air(before) |
| SEC ระบบอัดอากาศหลังมาตรการ | kWh/ton pull | 99.41 | |
| ผลการอนุรักษ์พลังงานที่ระบบอัดอากาศ | kWh/ton pull | 10.73 | |
| ปริมาณ TR ใช้เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าระบบอัดอากาศ (จาก 35 $^0$C ถึง 5 $^0$C) | TR,air comp | 30.04 | TR,air comp=$m_{air}$(before) x Cp x del Temp |

## การคำนวณค่าใช้จ่ายและผลการประหยัดมาตรการนำพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งใช้กับ Absorption Chiller จากโรงงานตัวอย่าง

### มาตรการนำพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งใช้กับ Absorption Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ

โรงงานใช้พลังงานไฟฟ้า 17,336,720 kWh / ปี การใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ คิดเป็นร้อยละ 1 ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดของโรงงาน (ข้อมูลการตรวจวัด) ดังนั้นการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง 173,000 kWh/ปี คิดเป็นราคาพลังงานไฟฟ้า 433,500 บาท/ปี

ใช้ Absorption Chiller ในระบบปรับอากาศขนาด 200 ตัน

### มาตรการนำพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งใช้กับ Absorption Chiller เพื่อใช้ในระบบอัดอากาศ

ตารางที่ 5.6 มาตรการนำพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งใช้กับ Absorption Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| โรงงาน ข1 ผลผลิต 66,819 ton/yr | | | | | | | |
| การใช้พลังงานที่ระบบลมอัด | 110.14 | - | การนำน้ำเย็นจาก Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าระบบอัดอากาศ | 10.73 | - | 717,000 | - |
| การใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศลดลง | | | ร้อยละ 9.7 | | | | |
| คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ | | | 1,800,000 บาท/ ปี | | | | |
| ต้องใช้ Absorption Chiller ขนาด 30 ตัน | | | | | | | |

หมายเหตุ : ราคาพลังงานไฟฟ้า 2.5 บาท / kWh

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**คำนวณขนาดของ Absorption Chiller ที่ใช้**

- ต้องใช้ Absorption Chiller ในระบบปรับอากาศและระบบอัดอากาศขนาดรวม 230 ตัน
- ราคาตันละ 15,000 บาท คิดเป็นราคาของ Absorption Chiller = 3,450,000 บาท
- ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและตู้ควบคุม ประมาณ 15 % ของราคา Absorption Chiller
  = 520,000 บาท
- ค่าใช้จ่ายในการลงทุนระบบ Absorption Chiller = 3,970,000 บาท
- การอนุรักษ์พลังงานในระบบปรับอากาศและระบบอัดอากาศ
  = 173,000 + 717,000 = 890,000 kWh/yr
  = 2,225,000 บาทต่อปี
- ระยะเวลาคืนทุน
  = เงินลงทุน (ราคา Absorption Chiller + ตู้ control + ค่าติดตั้ง) / เงินค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี
  = 3,970,000 / 2,225,000 = 1.8 ปี หรือ 22 เดือน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**5.8 มาตรการนำความร้อนทิ้งมาอุ่นเศษแก้ว** (Cullet)

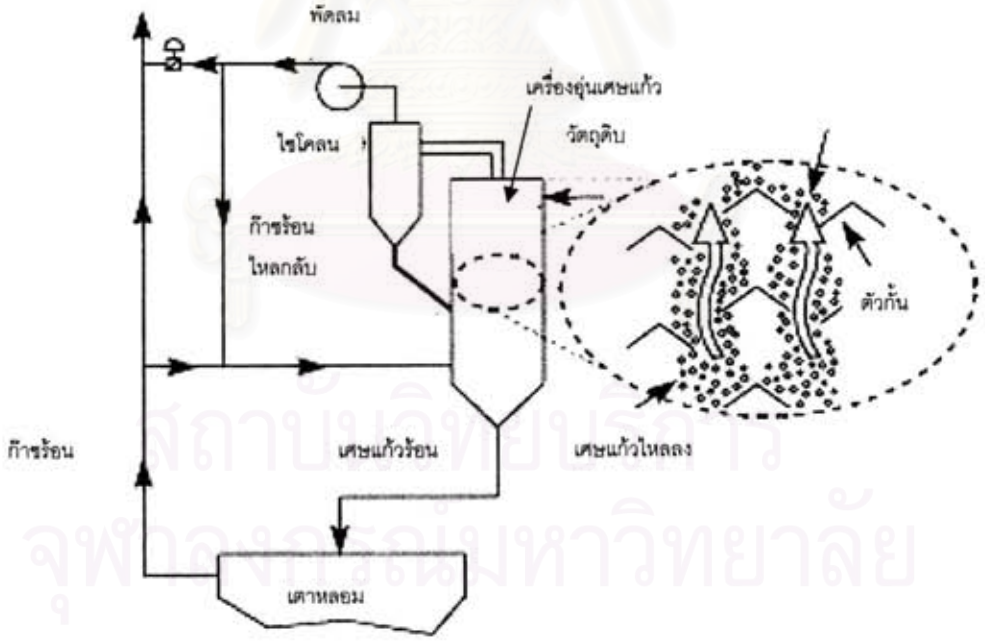
การอุ่นเศษแก้วก่อนเข้าเตาหลอม โดยใช้ความร้อนที่ยังค้างอยู่ในก๊าซที่ปล่อยทิ้ง ทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับเตาเผาที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเท่านั้น นอกจากการประยัดพลังงานได้ถึงร้อยละ 10-20 แล้วยังช่วยในเรื่องของสิ่งแวดล้อมอีกด้วย กล่าวคือลดการปล่อยก๊าซ $NO_x$ เนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงน้อยลงและอุณหภูมิในเตาหลอมลดลง นอกจากนี้หากเป็นการอุ่นทางตรง จะช่วยลดสารประกอบที่เป็นกรดอาทิ HF, $SO_x$, HCl โดยคิดเป็นร้อยละ 50, 60 และ 90 ตามลำดับ

การอุ่นแก้วแบ่งเป็นสามประเภทได้แก่ การอุ่นทางตรง(Direct preheating) การอุ่นทางอ้อม(Indirect preheating) และEdmeston EGB Filter โดยการอุ่นเศษแก้วทางตรงทำได้โดยการให้ก๊าซร้อน(Flue gas) สัมผัสโดยตรงกับเศษแก้วในลักษณะ Cross-counter flow ซึ่งเศษแก้วที่ได้จะมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 400 °C บริษัทผู้ผลิตและติดตั้งคือ Interprojekt (Formerly by GEA) และ Sorg ส่วนการอุ่นแก้วทางอ้อมนั้นก็เป็นลักษณะ Cross-counter flow เช่นกัน แต่จะเป็นการส่งความร้อนซึ่งเป็นการใช้ร่วมกันระหว่างก๊าซร้อนและก๊าซทิ้งโดยส่งไปสู่แผ่นซึ่งสัมผัสกับวัตถุดิบ ซึ่งทำให้วัตถุดิบมีความร้อนได้สูงถึงประมาณ 300°C บริษัทผู้ผลิตและติดตั้งคือ Zippe อีกวิธีการหนึ่งคือ Edmeston EGB Filter ซึ่งเป็นระบบที่ผสมผสานระหว่างElectrostatic precipitator ที่ใช้กับการกำจัดฝุ่นและการให้ความร้อนเศษแก้วโดยตรง ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิได้สูงถึง 400°C เช่นกัน นอกจากนี้การอุ่นเศษแก้วและวัตถุดิบตามทฤษฎีแล้วสามารถติดตั้งได้ในเตาหลอมแก้วทุกประเภท ซึ่งการอุ่นเฉพาะวัตถุดิบโดยไม่มีเศษแก้วผสมอยู่นั้น ยังคงเป็นปัญหาอยู่และยังต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อมารองรับอีกมาก

**ลักษณะทั่วไปของมาตรการ**

แก้วและกระจกเป็นวัสดุที่นำกลับมาหลอมใหม่ได้ 100% ถ้าโรงงานจัดการหาเศษแก้ว (Cullet)ที่คุณภาพตามที่โรงงานต้องการได้ แต่ในปัจจุบันยังไม่สามารถจัดหาเศษแก้วที่มีคุณภาพได้อย่างเพียงพอจึงต้องผสมวัตถุดิบใหม่เข้าไปด้วย แต่สำหรับโรงงานที่ผลิตขวดใสหรือกระจกใสจะคัดเลือกเศษแก้วใสที่ไม่มีเศษแก้วสีเจือปนเพราะต้องการเนื้อแก้วที่มีคุณภาพสูงและมีสิ่งเจือปนน้อยจึงผสมเศษแก้วได้ไม่สูงเหมือนโรงงานที่ผลิตขวดสีที่สามารถใช้เศษแก้วได้สูง เช่นโรงงาน ข1ที่ผลิตขวดแก้วสีชาใช้เศษแก้วร้อยละ75 ในขณะที่โรงงาน ก1 ที่ผลิตกระจกแผ่นใช้เศษแก้วร้อยละ 18 ซึ่งการใช้เศษแก้วจะลดการใช้สารเคมีและการบริโภคพลังงานในกระบวนการหลอม การผสมเศษแก้วในวัตถุดิบเพิ่มขึ้นทุกๆร้อยละ10 จะลดพลังงานในกระบวนการหลอมลงได้ร้อยละ2.3

หลักการของมาตรการนี้คือใช้อุณหภูมิแก๊สร้อนทิ้งจากเตาหลอม(ผ่าน Regenerator) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 400 - 550$^{0}$C ไปอุ่นเศษแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 5.10 โดยให้แก๊สร้อนไหลสวนทางกับเศษแก้วซึ่งตรงทางออกจะติดตั้ง Cyclone เพื่อดักฝุ่น จากนั้นจึงนำไปผสมกับวัตถุดิบแล้วเข้าเตาหลอม โดยมาตรการนี้ไม่ส่งผลต่อคุณภาพผลผลิต สำหรับโรงงานที่ปล่อยแก๊สร้อนที่ 400 $^{0}$C สามารถเพิ่มอุณหภูมิเศษแก้วได้ถึง 360 $^{0}$C ซึ่งลดการใช้เชื้อเพลิงที่เตาหลอมได้คิดเป็นการใช้พลังงานลดลง 0.12-0.30 GJ/ton แต่มาตรการนี้มีข้อจำกัดคือไม่สามารถนำมาอุ่นวัตถุดิบได้โดยตรงเพราะในวัตถุดิบมีสารเคมีเช่นโซดาแอชที่ผสมเข้าในวัตถุดิบ เมื่อได้รับความร้อนจะมีบางส่วนที่เป็นไอไหลเข้าไปในRegerator และเกิดการอุดตัน แต่เศษแก้วที่ป่นเมื่อได้รับความร้อนจะไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีใดๆและไม่เกิดการปลิวไปอุดตันในRegerator จึงสามารถนำมาตรการดังกล่าวมาใช้ได้ แต่โรงงานในประเทศยังไม่มีการนำมาตรการนี้มาใช้ จึงจัดให้เป็นมาตรการในอนาคตที่ควรนำมาศึกษาของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกได้




รูปที่5.10 ระบบความร้อนทิ้งที่นำมาแลกเปลี่ยนความร้อนใน Preheater กับเศษแก้ว

( Sho Kobayashi, KT Wu and Leonard Switzer, 2005)

## 5.9 ผลการอนุรักษ์พลังงาน

จากการเข้าตรวจวัดและการประเมินพบว่ามาตรการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานพบว่ามาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศสามารถอนุรักษ์พลังงานได้ร้อยละ 10 – 20 ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพเดิมของระบบอัดอากาศ ส่วนมาตรการนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบอัดอากาศและเพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศสามารถอนุรักษ์พลังงานได้แสดงดังตารางที่ 5.7 ซึ่งระดับการอนุรักษ์พลังงานขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนทิ้งที่มาจากเตาหลอม

ตารางที่ 5.7 สรุปผลการอนุรักษ์พลังงานจากมาตรการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน

| มาตรการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน | ผลการอนุรักษ์พลังงาน* | |
|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton |
| 1. มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ<br>- มาตรการลดลมรั่ว<br>- มาตรการใช้ VSD | การบริโภคพลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศลดลงร้อยละ 10 - 20 | - |
| 2. มาตรการนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | การบริโภคพลังงานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 1 ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดในโรงงาน | - |
| 3. มาตรการนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ | 5.5 – 12.32 | - |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

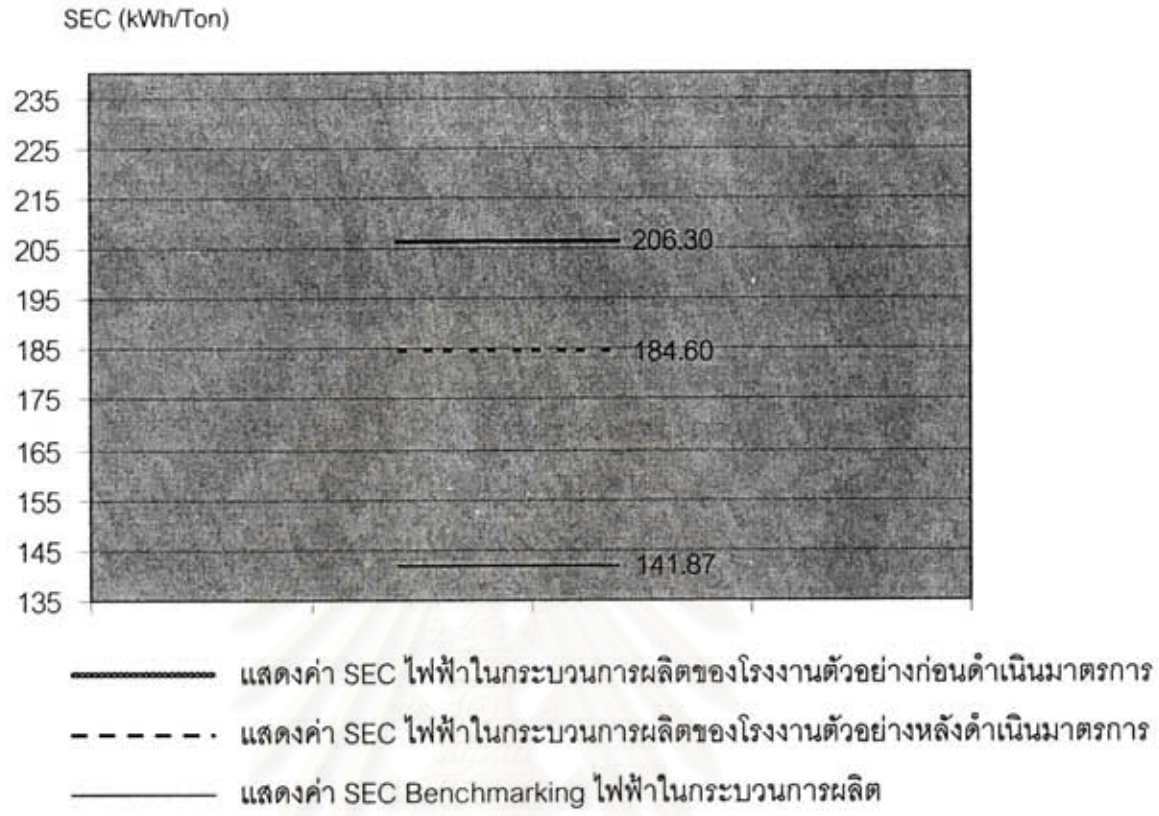
**ตัวอย่างการประเมินผลการอนุรักษ์พลังงาน**

โรงงานตัวอย่างคือ โรงงานผลิตขวดแก้ว ข1โดยมีขนาดเตาหลอม 270 ton/day ใช้ cullet 75% มีอุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้ง 495 องศาเซลเซียส ผลการอนุรักษ์พลังงานแสดงดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 การอนุรักษ์พลังงานของโรงงานตัวอย่าง

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| ผลผลิต 66,819 ton/yr | | | | | | | |
| กระบวนการผลิตรวม | 206.30 | 4.61 | | | | | |
| SEC Benchmarking | 141.87 | 4.21 | | | | | |
| การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ | - | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | 2.6 | - | 173,000 | - |
| การใช้พลังงานที่ระบบอากาศอัด | 110.14 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor | 10.73 | - | 717,000 | - |
| มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ | 110.14 | - | 1. การลดลมรั่วในระบบอากาศอัด<br>2. การติดตั้ง VSD | 11 | - | 735,000 | - |
| ผลการอนุรักษ์รวม | | | | 24.33 | - | 1,625,000 | - |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 5.11 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบ SEC Benchmarking กับ SEC โรงงานตัวอย่าง ข1

จากรูปที่ 5.11 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบในกระบวนการผลิตระหว่างSEC Benchmarking กับ SEC โรงงานตัวอย่าง พบว่ายังมีช่องห่าง (Gap) ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานได้ ถ้าโรงงานมีการดำเนินมาตรการตามที่เสนอไปแล้ว จะสามารถลดค่า SEC ในกระบวนการผลิตลงได้ใกล้เคียงกับ SEC Benchmarking มากขึ้นดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่ามาตรการที่นำเสนอนั้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตได้ ซึ่งสรุปผลการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้

- คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่อนุรักษ์ได้ 1,625,000 kWh/yr
  คิดเป็นร้อยละของพลังงานไฟฟ้าที่อนุรักษ์ได้ 10.5
- คิดเป็นมูลค่าพลังงานไฟฟ้า* 4,062,500 บาทต่อปี

หมายเหตุ : *ราคาพลังงานไฟฟ้า 2.5 บาท/kWh

# บทที่ 6

# สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 6.1 สรุปงานวิจัย

อุตสาหกรรมแก้วละกระจกเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจไทย สร้างรายได้ให้กับประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาทมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องทั้งในด้านการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก เนื่องจากยังมีความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในปริมาณที่สูง ปัจจัยดังกล่าวข้างต้นล้วนส่งผลให้อุตสาหกรรมแก้วและกระจกยังคงเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศ ที่รัฐบาลควรให้การส่งเสริมและสนับสนุนเพื่อให้มีศักยภาพที่สามารถแข่งขันกับต่างประเทศในเวทีการค้าโลกได้อย่างต่อเนื่องในระยะยาว

เมื่อพิจารณาในมิติด้านพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกพบว่าเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้เทคโนโลยีแบบสำเร็จรูป ซึ่งรับทั้ง Know – how และเครื่องจักรมาจากต่างประเทศ ซึ่งมีข้อจำกัดของเทคโนโลยีที่ไม่มีความยืดหยุ่นในการผลิตเพราะต้องเดินเครื่องจักรตลอด 24 ชั่วโมง จึงมีการบริโภคพลังงานสูง และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มระดับการใช้พลังงานต่อไปตามการขยายตัวของเศรษฐกิจ โดยโครงสร้างต้นทุนการผลิตทั้งหมดของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก พบว่าต้นทุนการผลิตส่วนใหญ่เป็นค่าพลังงาน ซึ่งประกอบด้วย ค่าไฟฟ้าและเชื้อเพลิง คิดเป็นประมาณร้อยละ 30-40 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด เมื่อพิจารณาถึงการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศไทยพบว่ายังไม่มีหน่วยงานใดที่เข้ามาส่งเสริมหรือมีมาตรการใดๆที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน อย่างเป็นรูปธรรม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้หามาตรการเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตโดยใช้ค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption ; SEC) มาเป็นตัวชี้วัดการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นค่าดัชนีสำหรับชี้วัดปริมาณการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิตในระดับกระบวนการผลิต โดยคำนวณจากปริมาณพลังงานที่โรงงานใช้ในช่วงเวลาหนึ่งวัฏจักรทำงานเช่น 1 เดือนต่อปริมาณผลผลิตในช่วงเดียวกัน สามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$SEC = \frac{\text{Energy Input (MJ, kWh)}}{\text{Product Output (ton)}}$$

โดยที่ SEC = ค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะ

Energy Input = ปริมาณพลังงานที่โรงงานใช้ในเดือนนั้น

Product Output = ปริมาณผลผลิตในช่วงเดียวกัน

จากการศึกษาพบว่าทั้ง 4 อุตสาหกรรมมีการบริโภคพลังงานที่แตกต่างกันตามประเภทผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยแบ่งกลุ่มอุตสาหกรรมแก้วและกระจกออกเป็น 4 กลุ่มตามประเภทผลิตภัณฑ์ดังนี้คือ

1. อุตสาหกรรมกระจกแผ่น
2. อุตสาหกรรมขวดแก้ว
3. อุตสาหกรรมเครื่องแก้ว
4. อุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว

ทั้ง 4 อุตสาหกรรมแก้วและกระจกมีกระบวนการผลิตย่อยที่เหมือนกันคือ

(1) กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ

(2) กระบวนการหลอมวัตถุดิบเป็นน้ำแก้ว

(3) กระบวนการการขึ้นรูป

(4) กระบวนการหลังการขึ้นรูป (การตกแต่ง การตรวจสอบและบรรจุ)

เพื่อนำไปสู่การหามาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานที่เหมาะสม จำเป็นต้องศึกษาการบริโภคพลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกก่อนว่าเป็นอย่างไร โดยงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตรวจวัดในโรงงานตัวอย่างทั้ง 4 อุตสาหกรรม จำนวน 11 แห่ง โดยตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าและพลังงานเชื้อเพลิงของแต่ละขั้นตอนในกระบวนการผลิตตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบจนถึงขั้นตอนการบรรจุและฝ่ายสนับสนุน (Utility) และรวบรวมข้อมูลด้านผลผลิต การบริโภคพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงในปี พ.ศ. 2547 2548 และ 2549 เพื่อให้ทราบถึงปริมาณการบริโภคพลังงานและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ จากนั้นนำข้อมูลมาหาค่า SEC ของแต่ละกระบวนการผลิตในแต่ละโรงงานตัวอย่างที่ทำการตรวจวัด แล้วนำมาเทียบเคียงพลังงาน (Benchmarking)กับค่า SEC ที่เป็นไปได้และมีประสิทธิภาพพลังงานเหมาะสม โดยนำข้อมูลมาจากสมาคมแก้วและกระจกประเทศสหรัฐอเมริกาที่ได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลการบริโภคพลังงานในแต่ละกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์แก้วและกระจกไว้ ซึ่งผลจากการเทียบเคียงทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพการบริโภคพลังงานและความแตกต่างหรือช่องห่าง (Gap) ระหว่างการบริโภคพลังงานในแต่ละกระบวนการผลิตเมื่อเปรียบเทียบกับต่างประเทศและนำมากำหนดเป็นค่า SEC Benchmarking เพื่อเป็นแนวทางในการหามาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานได้

จากการศึกษาพบว่า ทั้ง 4 อุตสาหกรรมมีสภาพการใช้พลังงานที่แตกต่างกันตามประเภทผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต โดยมีเตาหลอมเป็นตัวแปรสำคัญในการบริโภคพลังงาน โดยคิดเป็นสัดส่วนพลังงานร้อยละ 70-80 ของพลังงานที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบริโภคพลังงานของเตาหลอมคือ

- ปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอม (Pull ton/Day) โดยเตาที่มีปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันมากหรือเตาขนาดใหญ่ จะใช้พลังงานต่อหน่วยต่ำกว่าเตาที่มีปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันน้อยหรือเตาขนาดเล็ก
- ร้อยละเศษแก้วในวัตถุดิบ (% Cullet) โดยโรงงานที่ผสมปริมาณเศษแก้วในวัตถุดิบมากจะใช้พลังงานในการหลอมต่ำกว่าโรงงานที่ผสมปริมาณเศษแก้วในวัตถุดิบน้อย

ดังนั้นก่อนการเทียบเคียงพลังงานในกระบวนการหลอมจะต้องมีการปรับแก้ค่า SEC ที่เตาหลอมตามปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน (Pull ton / Day) และร้อยละเศษแก้ว (% Cullet) ซึ่งค่าปรับแก้นี้ได้มาจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SEC ของเตาหลอมกับปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน โดยนำข้อมูลการบริโภคพลังงานของเตาหลอมในประเทศสหรัฐอเมริกา มาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคทางสถิติ 2 วิธีในการวิเคราะห์ ดังนี้

1. การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis)
2. การวิเคราะห์สหสมพันธ์ (Correlation)

แบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่า SEC ของเตาหลอมกับปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน ที่มีความสัมพันธ์กันในรูปเชิงเส้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้นดังสมการ

$$Y = 3841.1543 + 168940.66 / X$$

โดยที่ Y = ค่า SEC ของเตาหลอม ซึ่งเป็นค่าการใช้พลังงานความร้อนต่อการหลอมน้ำแก้ว 1 ตัน มีหน่วยเป็น MJ/Ton melt

X = ปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอม มีหน่วยเป็นตันต่อวัน (Pull ton / day)

ส่วนค่าปรับแก้ของเศษแก้ว(Cullet) อ้างอิงจากทางทฤษฎีพบว่าค่า SEC จะลดลงร้อยละ 2.3 เมื่อมีการใช้เศษแก้วเพิ่มขึ้นทุกๆ ร้อยละ 10* และค่า SEC จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.3 เมื่อมีการใช้เศษแก้วลดลงทุกๆ ร้อยละ 10 เช่นกัน

สำหรับในการเทียบเคียงพลังงานกระบวนการผลิตอื่นๆคือกระบวนการเตรียมวัตถุดิบ กระบวนการการขึ้นรูป และกระบวนการหลังการขึ้นรูป (การตกแต่ง การตรวจสอบและบรรจุ) สามารถนำค่า SEC ของแต่ละกระบวนการผลิตจากโรงงานตัวอย่างและจากต่างประเทศมาเทียบเคียงได้เลยโดยไม่ต้องมีการปรับแก้ใดๆ เนื่องจากมีเทคโนโลยีเหมือนกันจึงมีค่า SEC ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะกำหนดค่า SEC Benchmarking จากค่า SEC ที่ต่ำที่สุดของแต่ละประเภทผลิตภัณฑ์แสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สรุปค่า SEC Benchmarking ของอุตสาหกรรมแก้วและกระจก

| ขั้นตอนการผลิต | กระจกแผ่น* | | ขวดแก้ว | | เครื่องแก้ว | | ฉนวนใยแก้ว | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | SEC ไฟฟ้า kWh / Ton | SEC เชื้อเพลิง GJ / Ton | SEC ไฟฟ้า kWh / Ton | SEC เชื้อเพลิง GJ / Ton | SEC ไฟฟ้า kWh / Ton | SEC เชื้อเพลิง GJ / Ton | SEC ไฟฟ้า kWh / Ton | SEC เชื้อเพลิง GJ / Ton |
| การเตรียมวัตถุดิบ | 15 | - | 3.14 | - | 7.1 | - | 12 | - |
| การหลอม | 17 | 6.79 | 10.50 | 4.20 | 15 | 6.04 | 28.12 | 6.40 |
| การขึ้นรูป | 142.20 | - | 123 | - | 270 | - | 207 | 3.88 |
| Post – forming | 4.57 | 0.33 | 5.23 | - | 117 | 1.58 | 250.56 | 0.11 |
| รวม | 178.77 | 7.12 | 141.87 | 4.20 | 409 | 7.62 | 497.68 | 10.40 |
| SEC ปฐมภูมิ GJ / Ton | 8.55 | | 6.48 | | 10.89 | | 14.38 | |
| %Cullet ** | 20 | | 70 | | 0 | | 100 | |
| ขนาดเตา (Ton/Day)*** | 600 | | 300 | | 100 | | 50 | |

หมายเหตุ * เฉพาะกระบวนการหลอมของกระจกแผ่น เมื่อได้ค่า SEC จากสมการปรับแก้แล้ว ต้องคูณด้วย 1.54 จึงจะได้ค่า SEC Benchmarking ของเชื้อเพลิงที่กระบวนการหลอม

** *** ถ้าสภาวะของโรงงานไม่เป็นไปตามข้อมูลที่ใช้ในการอ้างอิงต้องทำการปรับแก้ค่า SEC เชื้อเพลิงของกระบวนการหลอมใหม่

ผลการเทียบเคียงพลังงานพบว่าค่า SEC ในกระบวนการผลิตของอุตสาหรรมแก้วและกระจกในประเทศไทยมีสูงกว่า SEC Benchmarking แสดงว่าอุตสาหกรรมแก้วและกระจกของประเทศยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานเพื่อลดค่า SEC ให้ต่ำลงได้ และเมื่อสำรวจเกี่ยวกับมาตรการที่ด้านพลังงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกของประเทศไทยจะเห็นได้ว่า โรงงานส่วนใหญ่มุ่งเน้นในเรื่องของการประหยัดพลังงานไฟฟ้า สำนักงานและเครื่องจักรเช่นปั๊ม มอเตอร์ ที่ใช้พลังงานไม่ถึงร้อยละ 2 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมดในโรงงาน แต่กระบวนการที่บริโภคพลังงานมากที่สุดคือเตาหลอมซึ่งมีการปล่อยความร้อนทิ้งในปริมาณสูง แต่ยังไม่มีมาตรการในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ โดยมีสาเหตุมาจากไม่มีบุคลากรที่มีความรู้และความเชี่ยวชาญในกระบวนการผลิตแก้วและกระจกโดยเฉพาะ จึงไม่มีโรงงานใดเข้าไปปรับปรุงในกระบวนการผลิตมากนัก นอกจากนี้การลงทุนเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเช่น เตาหลอม เครื่องอัดอากาศ มีค่าใช้จ่ายสูงมาก ซึ่งอาจต้องใช้ระยะเวลานานกว่าจะถึงจุดคุ้มทุน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดมาตรการที่มุ่งเน้นไปยังอุปกรณ์ที่มีสัดส่วนการบริโภคพลังงานมากที่สุดในกระบวนการผลิตคือเตาหลอมแก้ว คิดเป็นสัดส่วนพลังงานความร้อนร้อยละ 70 – 80 ของการใช้พลังงานรวม ส่วนทางด้านการบริโภคพลังงานไฟฟ้ามีอุปกรณ์ที่ใช้เหมือนกันคือมอร์เตอร์ไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนระบบ

ทำงานเช่น พัดลม เครื่องอัดอากาศ คิดเป็นร้อยละ 40 – 50 ของการบริโภคพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในกระบวนการผลิต

งานวิจัยนี้ได้เสนอมาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจก ดังนี้

ตารางที่ 6.2 สรุปมาตรการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงาน

| มาตรการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน | ผลการอนุรักษ์พลังงาน* | |
|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton |
| 1. มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ<br>- มาตรการลดลมรั่ว<br>- มาตรการใช้ VSD | การบริโภคพลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศลดลงร้อยละ 10 - 20 | - |
| 2. การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | การบริโภคพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งโรงงานลดลงร้อยละ 1 | - |
| 3. มาตรการนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ | 5.5 – 12.32 | - |
| 4. มาตรการนำลมร้อนทิ้งไปอุ่นเศษแก้วก่อนป้อนเข้าเตาหลอม | - | - |

ดังนั้นถ้าโรงงานแก้วและกระจกนำมาตรการการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้เพิ่มเติมในส่วนที่ยังไม่ได้ดำเนินการอาจจะทำให้ค่า SEC ในกระบวนการผลิตต่ำลงได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

เนื่องจากจำนวนของโรงงานตัวอย่างของผลิตภัณฑ์กระจกแผ่นที่เข้าไปเก็บข้อมูล เป็นเพียงตัวแทนของแต่ละกลุ่มอุตสาหกรรมกระจกแผ่นเท่านั้น ข้อมูลของงานวิจัยนี้จึงไม่ครอบคลุมถึงกำลังการผลิตส่วนใหญ่ของอุตสาหกรรมกระจกแผ่นในประเทศ ดังนั้นค่า SEC Benchmarking ที่ใช้ในการเทียบเคียงพลังงานจึงมีขอบเขตเพียงโรงงานตัวอย่างเท่านั้น ซึ่งยังไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าค่า SEC Benchmarking สามารถนำมาเทียบเคียงพลังงานกับโรงงานกระจกอื่นๆ ได้หรือไม่ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

## 6.3 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1. ควรมีการนำข้อมูลจากโรงงานตัวอย่างอื่นๆมาวิเคราะห์เพิ่มเติม เพื่อให้ครอบคลุมถึงกำลังการผลิตส่วนใหญ่ของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกในประเทศ และเป็นการพิจารณาว่าค่า SEC Benchmarking จะสามารถนำมาเทียบเคียงพลังงานกับโรงงานแก้วและกระจกอื่นๆได้หรือไม่

2. ควรมีการปรับปรุงมาตรฐานการจัดเก็บข้อมูลของแบบส่งข้อมูลการผลิตการใช้พลังงานและการอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานควบคุม(บพร) รวมไปถึงข้อมูลที่ต้องจัดเก็บ เนื่องจากพบว่าค่า SEC ของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกนั้นขึ้นกับกระบวนการผลิตและเทคโนโลยี แต่การจัดเก็บตาม บพร. เดิมนั้นยังไม่ครอบคลุมในส่วนนี้ นอกจากนั้นหน่วยของผลิตภัณฑ์ที่จัดเก็บไม่เป็นมาตรฐาน เช่น บางโรงงานให้ข้อมูลขวดแก้วเป็นชิ้น บางโรงงานให้ข้อมูลเป็นหน่วยตัน เป็นต้น ซึ่งทำให้ยากต่อการนำข้อมูลมาใช้งานต่อไป

3. ในส่วนของการจัดเก็บข้อมูลอุตสาหกรรมของทั้งประเทศยังไม่มีการจัดเก็บอย่างเป็นระบบและต่อเนื่อง อีกทั้งยังไม่มีหน่วยงานเฉพาะในส่วนของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกที่ทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลเฉพาะของอุตสาหกรรม ด้วยเหตุนี้ทำให้ยากต่อการหาข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์อุตสาหกรรมและการที่จะพิจารณาในเรื่องของแนวโน้มของอุตสาหกรรม จึงควรมีการจัดตั้งหน่วยงานเฉพาะเพื่อทำหน้าที่ให้การเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลของภาคอุตสาหรรม

4. โรงงานในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกขาดความเชื่อมั่นในการปรับปรุงระบบการผลิตเนื่องจากขาดความรู้ ทางรัฐบาลหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรจัดให้มีผู้เชี่ยวชาญเพื่อให้คำแนะนำและสามารถแสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นเมื่อดำเนินการปรับปรุงระบบการผลิต

# รายการอ้างอิง

## ภาษาไทย


เฉลิมขวัญ ศรีสุวรรณ. 2541. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการป้องกันอุบัติเหตุของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ที่ได้รับบาดเจ็บ ณ ห้องฉุกเฉินและอุบัติเหตุ โรงพยาบาลตำรวจ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,สาขาวิชาสุขศึกษา. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ที่ปรึกษาตรวจสอบโรงงานควบคุมปีที่ 4. 2548. โครงการศึกษาประสิทธิภาพพลังงานอุตสาหกรรมพลาสติก. ศูนย์ระดับภูมิภาคทางวิศวกรรมระบบการผลิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นฤมล กิตติสุนทรวงศ์. 2544. การจัดการระบบสารสนเทศสำหรับการวิเคราะห์การใช้พลังงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เบญจมาศ ปุยอ๊อก และมิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล. 2548. การศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่1. สถาบันวิจัยพลังงาน. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พงษ์ศักดิ์ พุทธวงศ์. 2546. การศึกษาความต้องการพลังงานไฟฟ้าของภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน,กรม. 2549. ศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและอาคารต่าง ๆ (SEC) อุตสาหกรรมกระดาษ. กระทรวงพลังงาน.

พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน,กรม. 2549. โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมอโลหะ. กระทรวงพลังงาน. หน้า 6-18.

พิศิษฏ์ จารุมณีโรจน์. 2548. การศึกษาประสิทธิภาพพลังงานในอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนต้นน้ำ, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มนัส วัฒนธรรม. 2524. การประหยัดพลังงานในโรงงานทอผ้า. สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มาริษา ภู่ภิญโญกุล. 2540. การพัฒนาศักยภาพการบริหารองค์กรด้วยกลวิธีBenchmarking. สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม. กระทรวงสาธารณสุข. วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม ปีที่ 22. ฉบับที่ 3.

โรงงานอุตสาหกรรม,กรม. 2535. คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตภัณฑ์ยาง. โครงการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่นอกเหนือจากโรงงานควบคุมตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน. สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย. กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

วิรัชช พาณิชวงศ์. 2545. การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis). ศูนย์ผลิตตำราเรียนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. พิมพ์ครั้งที่3.

วิโรจน์ โชติปฏิเวชกุล. 2541. ความสามารถในการผลิตเพื่อทดแทนการนำเข้าของอุตสาหกรรมยาในประเทศไทย. คณะเศรษฐศาสตร์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาเศรษฐศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วีระพงษ์ ประสาทศิลป์. 2541. การประหยัดพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้ากรณีศึกษาโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมพระนครใต้. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อมรรัตน์ แก้วประดับ และพิชัย นามประกาย. 2548. การศึกษาค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะในอุตสาหกรรมประเภทโลหะ. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1. หน้า1-3.

เอกสิทธิ สุวรรณศรี 2543. การปรับปรุงการจัดการด้านพลังงานในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

## ภาษาอังกฤษ

Andy Hartley. 2004. A Study of the Balance between Furnace Operation Parameters and Recyaled Glass in Glass Melting Furnaces. CARBON TRUST. Glass Technology Services Ltd.

Beerkens, R.G.C.,H. Van Limpt. 2005. Energy Efficiency of Glass Furnaces. Presented at GMIC Workshop on Evolutionary and Revolutionary Strategies for Keeping Glass Viable through the 21st Century, September 14-16, 2005 in Parma, Italy.

Charles Freeman & Johns Manville. 2004. An Overview of Energy Efficiency and Future Needs for Glass Industry in Process Heating, October 19th, Washington, DC.

David Rue. 2005. Submerged Combustion Melter. Gas Technology Institute. Ohio Technology Showcase Cleveland, Ohio. ในscm

David M. Rue and Warren Wolf. 2006. Industrial Glass Bandwidth Analysis. Gas Technology Institute Energy Utilization Center. Mount Prospect Rd Des Plaines, IL 60018

Douglas W. Freitag. 1995. A Technology Vision and Research Agenda for America's Glass Industry. U.S. Department of Energy, Office of Industrial Technologies.

Energetics, Incorporated September 8. 1994. Materials Needs and Opportunities in the Glass Industry. Schuller International.

G.A. Boyd. 2006. Development of a Performance-Based Industrial Energy Efficiency Indicator for Cement Manufacturing Plants , Decision and Information Sciences Division, Argonne National Laboratory work sponsored by U.S. Environmental Protection : Agency Office of Atmospheric Programs.

Gale A.Boyd and Joseph X Pang. 1999. Estimating the linkage between energy efficiency and productivity. Energy Policy Volume 28, May 2000 : 289 – 296.

German VDI. 1997. Theoretical energy requirements for melting common glass formulations. Verein Deutscher Ingenieure Guidelines (VDI 2578) Emission Control Glassworks.

Keith Jamison, Jack Eisenhauer, and Julie Rash. 2002. Glass Industry Technology Roadmap. Glass Manufacturing Industry Council and Elliott Levine, Glass Team Leader for the Office of Industrial Technologies.

R.G.C. Beerkens and J. van der Schaaf. 2002. Advanced heating techniques for glass melting. Eindhoven, March 5th.

Sho Kobayashi, KT Wu and Leonard Switzer. 2005. Fuel Reduction by Combining Oxy-Fuel Firing with Batch/Cullet Preheating. Glass Problems Conference Energy Workshop, Praxair.

Spendolini MJ. 1992. The Benchmarking Book , American Management Association, New York.

The Energy Conservation Center. 1993. Output of a Seminar on Energy Conservation in Glass Industry, United Nation Industrial Development Organization(UNIDO) and Ministry of International Trade and Industry(MITI), Japan.

U.S. Department of energy. 2002. Glass industry of the future, Energy and Environmental Profile of the U.S. glass industry. Energetics, Incorporated Columbia, Maryland.

Vishal Sardeshpande, U.N. Gaitonde and Rangan Banerjee. 2007. Model based energy benchmarking for glass furnace. Department of Energy Systems Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ก
# ขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**1. ที่มาของข้อมูล**

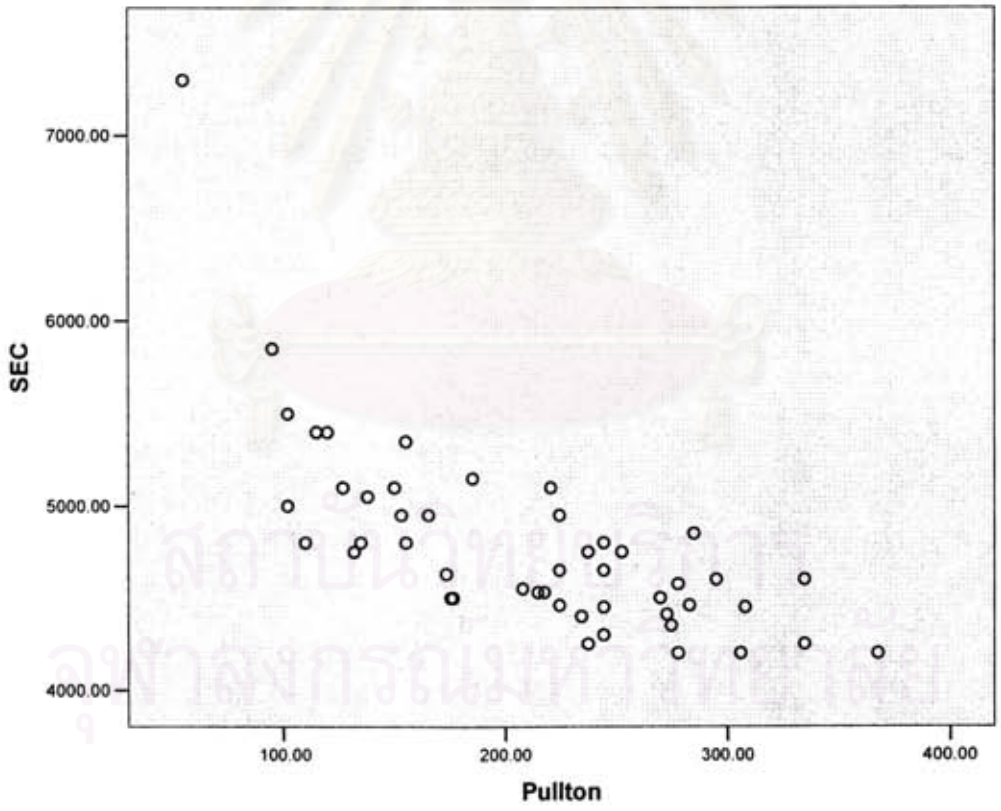
งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใช้ของเตาหลอมในการหลอมน้ำแก้ว 1 ตัน (SEC) ที่ปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน จากประเทศสหรัฐอเมริกาโดย Andy Hartley(2004) และ Beerkens, R.G.C.,H. Van Limpt. (2005) ข้อมูลแสดงในภาคผนวก ข

**2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ความถดถอย** (Regression analysis)

ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติคือ SPSS Version 13 โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

**ขั้นที่** 1 การตรวจสอบรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปร

ความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปรอาจมีหลายรูปแบบเช่นสัมพันธ์กันในรูปเชิงเส้น เส้นโค้ง หรือพาราโบลา เป็นต้น ดังนั้นควรมีการพิจารณาลักษณะการกระจายของข้อมูล ซึ่งสามารถทำได้โดยการทดสอบลักษณะของความสัมพันธ์ด้วยการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ ข.1




รูปที่ ก 1 แสดงความสัมพันธ์ของ X และ Y ในรูปเชิงเส้น ที่ 50 % Cullet

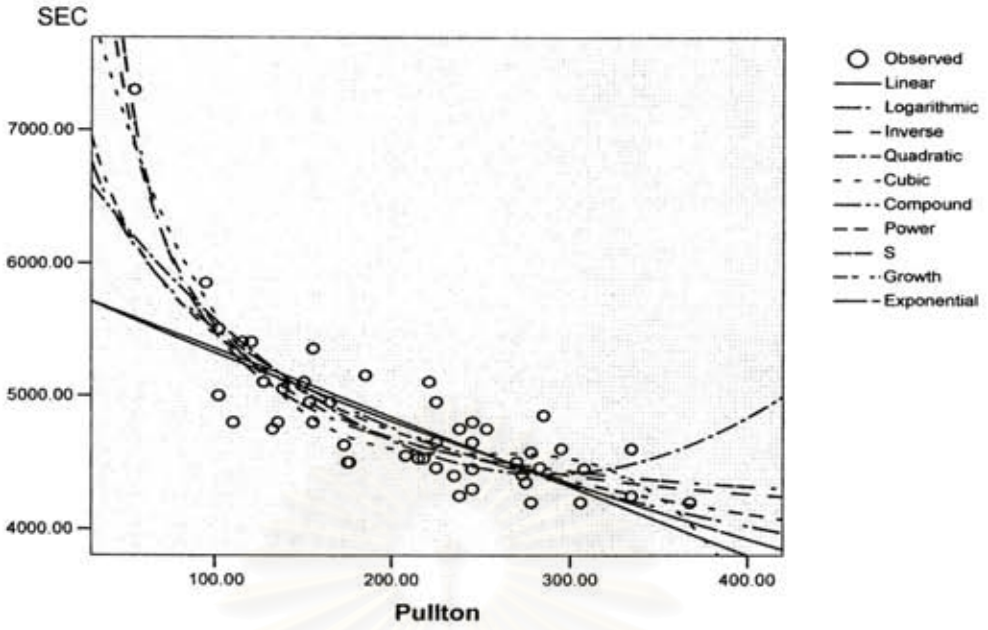
จากรูปที่ข1 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X และ Y ในทางทฤษฎีแล้วพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า SECของเตาหลอมกับปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน น่าจะมีความสัมพันธ์กันแบบไม่เชิงเส้น (Non - Linear) จึงต้องหารูปแบบความสัมพันธ์ที่เหมาะสมในขั้นตอนต่อไป

**ขั้นที่** 2 หารูปแบบความสัมพันธ์ที่เหมาะสม โดยการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปรในกรณีที่ไม่ได้อยู่ในรูปเชิงเส้นโดยการหารูปแบบความสัมพันธ์ในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบต่างๆดังนี้คือ

ตารางที่ ก 1 รูปแบบความสัมพันธ์แบบต่างๆ

| Model | สมการ | การแปลงให้อยู่ในรูปเชิงเส้น | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| 1.Linar | $Y=b_0 + b_1X$ | | 0.521 |
| 2.Logarithmic | $Y=b_0 + b_1Ln(X)$ | | 0.661 |
| 3.Inverse | $Y=b_0 + b_1(1/X)$ | | 0.782 |
| 4.Quadratic | $Y=b_0 + b_1X + b_2X_2$ | | 0.657 |
| 5.Cubic | $Y=b_0 + b_1X + b_2X_2 + b_3X_3$ | | 0.747 |
| 6.Compound | $Y = b_0(b_1)x$ | $\ln(Y) = \ln(b_0) + \{\ln(b_1)\}X$ | 0.561 |
| 7.Power | $Y = b_0(X)^{b1}$ | $\ln(Y) = \ln(b_0) + b_1LnX$ | 0.680 |
| 8.S | $Y = e^{(b0 + b1/X)}$ | $\ln(Y) = b_0 + b1/X$ | 0.759 |
| 9.Growth | $Y = e^{(b0 + b1X)}$ | $\ln(Y) = b_0 + b1X$ | 0.561 |
| 10.Exponential | $Y = b_0(e)^{b1X}$ | $\ln(Y) = \ln(b_0) + b_1X$ | 0.561 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

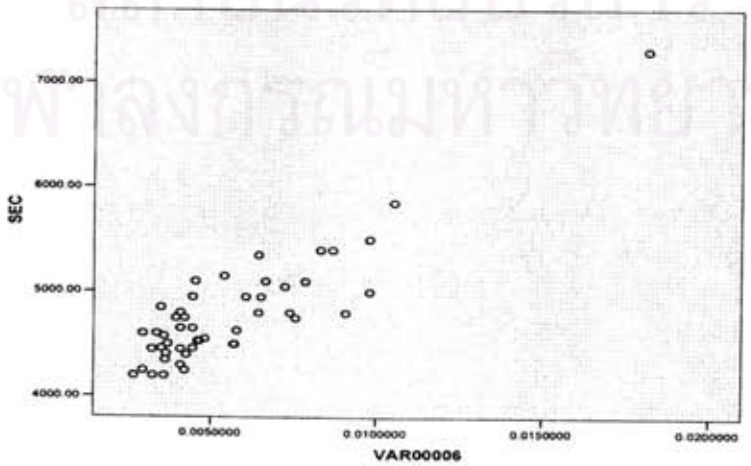



รูปที่ ก 2 กราฟความสัมพันธ์ของค่า X และ Y ที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบต่างๆ

เมื่อพิจาราณาค่า $R^2$ จากตารางที่ ข2 และรูปที่ ข2 พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นไปได้คือ Logarithmic, Inverse, Power, S และ Exponential ซึ่งทั้ง5 แบบนี้มีรูปแบบกราฟคล้ายกันแต่เมื่อพิจารณาที่ค่า $R^2$ พบว่าแบบ Inverse มีค่า $R^2$ สูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือกแบบจำลองนี้มาทดสอบในการสร้างความสมการความสัมพันธ์โดยต้องแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของเชิงเส้นเสียก่อน

**ขั้นที่** 3 หาสมการและทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปร

จากรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นตรง $\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X'$ ทำการแปลงสมการให้อยู่ในรูปของ Inverse เมื่อให้ $X' = 1/X$ โดยมีข้อมูลแสดงดังภาคผนวก ข จากนั้นนำข้อมูลที่ปรับแล้วมาทำตามขั้นตอนที่1จะได้กราฟดังรูปที่ ก 3




รูปที่ ก 3 แสดงความสัมพันธ์ของ X และ Y ในรูปเชิงเส้น

จากรูปที่ ก 3 เมื่อประมวลผลแล้วได้แล้วได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรดังตารางที่ ก 2

ตารางที่ ก 2 แสดงผลการหาค่า Coefficients[a]

| Model | | Unstandardized Coefficients | | Standardized Coefficients | t | Sig. | 95% Confidence Interval for B | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | B | Std. Error | Beta | | | Lower Bound | Upper Bound |
| 1 | (Constant) | 3841.15428 | 81.75540807 | | 46.98349 | 0.00 | 3676.589179 | 4005.719 |
| | Pullton | 168940.6665 | 13158.46174 | 0.884207744 | 12.83894 | 0.00 | 142454.0567 | 195427.276 |
| a. Dependent Variable: SEC | | | | | | | | |

จากตาราง ก 2 ได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์คือ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X$$

หรือ $Y = 3841.1543 + 168940.66\ X'$

โดยที่ $X' = 1/x$

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ ก 3 พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบเส้นตรงได้ชัดเจนขึ้น จากนั้นทำการทดสอบว่า การทดสอบสมมติฐานว่า ค่าคงที่ และค่าสัมประสิทธิ์ของ X ในสมการที่ได้นั้นเป็น 0 หรือไม่ เพื่อหาว่า X,Y มีความสัมพันธ์กันหรือไม่ โดยทดสอบด้วยความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ Sig = 0.95 โดยมีสมมติฐานคือ

<u>สมมติฐาน</u> $H_0 : \beta_1 = 0$ หรือ $H_0$: Y และ X ไม่มีความสัมพันธ์กัน

$H_1 : \beta_1 \neq 0$ หรือ $H_0$: Y และ X มีความสัมพันธ์กัน

ตารางที่ ก4 แสดงผลการทดสอบด้วย ANOVA[b] (ทดสอบที่Sig = 0.95)

| Model | | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Regression | 10190480.4 | 1 | 10190480 | 164.8383 | 0.00[a] |
| | Residual | 2843769.078 | 46 | 61821.07 | | |
| | Total | 13034249.48 | 47 | | | |

a. Predictors: (Constant), Pullton b. Dependent Variable: SEC

<u>สถิติทดสอบ</u> : F = 164.8383 และค่า Sig. ของสถิติทดสอบเป็น 0.00 จึงปฏิเสธ $H_0$ หรือสรุปว่า $\beta_1 \neq 0$ หรือค่า SEC ของเตาหลอมกับปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวัน มีความสัมพันธ์กัน

**ขั้นที่ 4** การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation)

จากการทดสอบในขั้นตอนที่ 3 เป็นเพียงการทดสอบว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์กันในรูปเชิงเส้นหรือไม่ ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อยเพียงใด จึงมีสถิติเพื่อวัดความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($\rho$) โดยที่ค่านี้จะไม่มีหน่วย จึงสามารถใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ได้ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด เนื่องจากค่า $\rho$ จะมีค่าสูงสุดเป็น 1 และต่ำสุดเป็น -1

กรณีที่ใช้ข้อมูลตัวอย่างจะประมาณค่า $\rho$ ด้วยค่า r โดยที่ r คือสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน(Pearson's Correlation Coefficient)

ความหมายของค่า r

1. ค่า r เป็นลบ แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม คือถ้าค่า X เพิ่มค่า Y จะลดลง แต่ถ้าค่า X ลดลงค่า Y จะเพิ่มขึ้น
2. ค่า r เป็นบวก แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน คือถ้าค่า X เพิ่มค่า Y จะเพิ่มด้วย แต่ถ้าค่า X ลดลงค่า Y จะลดลงด้วย
3. ค่า r มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์กันมาก
4. ค่า r มีค่าเข้าใกล้ -1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามและมีความสัมพันธ์กันมาก
5. ค่า r = 0 แสดงว่า X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กันเลย
6. ค่า r เข้าใกล้ 0 แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน

<u>สมมติฐาน</u> $H_0 : \rho = 0$ หรือ $H_0$ : X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กันในรูปเส้นตรง

$H_1 : \rho \neq 0$ หรือ $H_1$ : X และ Y มีความสัมพันธ์กันในรูปเส้นตรง

ตารางที่ ก5 ผลการทดสอบสหสัมพันธ์ (Correlations)

| | | SEC | Pullton |
|---|---|---|---|
| SEC | Pearson Correlation | 1 | 0.884** |
| | Sig. (2-tailed) | | 0.000 |
| | N | 48 | 48 |
| Pullton | Pearson Correlation | 0.884** | 1 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.000 | |
| | N | 48 | 48 |

** Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

<u>สถิติทดสอบ</u> จากตารางที่ ก5 มีค่า r เท่ากับ 0.884 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงค่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างมาก

**ขั้นที่ 4 พิสูจน์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ**(Coefficient of determination) **ใช้สัญญลักษณ์** $R^2$

หมายความว่าแม้จะได้สมการและผ่านการทดสอบสมมติฐานมาแล้วว่า Y, X มีความสัมพันธ์กัน แต่อาจจะมี Variation มากจนทำให้เมื่อนำสมการไปใช้จะไม่ได้ผลที่ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination) หมายถึงสัดส่วนที่ตัวแปร X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร Y ได้ ดังนั้นถ้าค่า $R^2$ มีค่ามากแสดงว่าตัวแปร X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า Y ได้มาก ซึ่งเป็นการช่วยยืนยันว่าจะสามารถยอมรับ Variation นั้นได้หรือไม่ หลักการก็คือหาอัตราส่วนระหว่าง Variation ที่สามารถอธิบายได้ว่าเหตุใดจึงเกิด(Sum square regression) กับ Variation ทั้งหมดที่เกิดขึ้น(Sum square total) จากผลการหาค่า $R^2$ แสดงดังตาราง ก 6

ตาราง ก6 แสดงผลการหาค่า $R^2$ , Model Summary[b]

| Model | R | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate | Durbin-Watson |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.884208[a] | 0.781823 | 0.77708 | 248.6384 | 1.49863 |

a. Predictors: (Constant), Pullton

b. Dependent Variable: SEC

ถ้า $R^2$ มาก แปลว่าสามารถยอมรับสมการนั้นได้มากด้วยเช่นกัน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นไม่มีข้อระบุว่ามากแค่ไหน ยอมรับได้น้อยแค่ไหนยอมรับได้ แต่สำหรับงานวิจัยนี้ยอมรับค่า $R^2$ ตั้งแต่ 0.7 ขึ้นไป เนื่องจากข้อมูลที่นำมาสร้างสมการความสัมพันธ์มีอยู่อย่างจำกัดและประสิทธิภาพของเตาหลอมมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ดังนั้นการบริโภคพลังงานจึงมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ส่งผลให้ตัวแปร Y มีการกระจายมาก จากผลการทดสอบของสมการนี้มีค่า $R^2$ เท่ากับ 0.7818 จึงถือว่ายอมรับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ขั้นที่** 5 ตรวจสอบเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยของเชิงเส้น

สมมติฐานหรือเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยมี 4 ข้อ ซึ่งเป็นเงื่อนไขเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนซึ่งก็คือผลที่ได้ค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการค่าจริงกับค่าที่คำนวณโดยสมการเกิดขึ้น โดยเรียกความแตกต่างนี้ว่า Residual หรือ Error ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการนำสมการนี้ไปใช้นั่นเอง การนำสมการไปประยุกต์ใช้ทั้งในแง่แสดงระดับและทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X และ Y หรือพยากรณ์ค่า Y เมื่อกำหนดค่า X จะต้องมีความมั่นใจในความถูกต้องของสมการ โดยจะต้องตรวจสอบเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเกี่ยวกับค่าคลาดเคลื่อนดังนี้

1. ค่าเฉลี่ยของค่าคาดเคลื่อน = 0 (E(e) = 0)
2. ค่าคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ
3. ค่าคลาดเคลื่อนต้องเป็นอิสระกัน
4. ค่าแปรปรวนของ e คือ $\sigma^2$ ซึ่งต้องคงที่ทุกค่าของ X

**ขั้นที่** 5.1 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าคาดเคลื่อน = 0

เงื่อนไขนี้อาจไม่จำเป็นต้องตวจสอบ เนื่องจากเมื่อใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดในการประมาณค่า $\beta_0$ และ $\beta_1$ จะทำให้ E(error) = 0 เสมอหรือถ้าต้องการทดสอบเพื่อความมั่นใจในการนำสมการไปใช้โดยทดสอบด้วย t – test ด้วยสมมติฐานคือ

<u>สมมติฐาน</u> $H_0$ : ค่าเฉลี่ยของ error = 0

$H_1$ : ค่าเฉลี่ยของ error $\neq$ 0

ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ ก 7

ตารางที่ ก7 ผลการการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าคาดเคลื่อน One-Sample Test

| | Test Value = 0 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | t | df | Sig. (2-tailed) | Mean Difference |
| Unstandardized Residual | 0.000 | 47 | 1.000 | .00000000 |

<u>สถิติทดสอบ</u> : ค่า Sig. ของสถิติทดสอบ t เป็น 1.00 จึงยอมรับ $H_0$ หรือสรุปว่าค่าเฉลี่ยของ error = 0

**ขั้นที่** 5.2 การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (Normality)

การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่นั้น เป็นการสรุปว่าข้อมูลที่เก็บมาวิเคราะห์นั้น มีการกระจายแบบปกติ(Normal) หรือไม่ ถ้าไม่เป็นแสดงว่าการทดสอบที่ผ่านมาทั้งหมดนั้นใช้ไม่ได้เพราะการวิเคราะห์การถดถอยจะใช้ ANOVA ในการวิเคราะห์ ซึ่งเงื่อนไขที่สำคัญของ ANOVA คือ ข้อมูลต้องเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) แต่เนื่องจากข้อมูลดิบเบื้องต้นไม่สามารถใช้กระบวนการทดสอบ Normality test ตามปกติได้จึงต้องทดสอบผ่านค่า Residual ซึ่งให้ผลได้ถูกต้องเช่นเดียวกัน การทดสอบค่าคลาดเคลื่อนว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่นั้นแสดงดังตารางที่ ก 8

<u>สมมติฐาน</u> $H_0$ : ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ

$H_1$ : ค่าคลาดเคลื่อนไม่ได้มีการแจกแจงปกติ

ตารางที่ ก8 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อน (Tests of Normality)

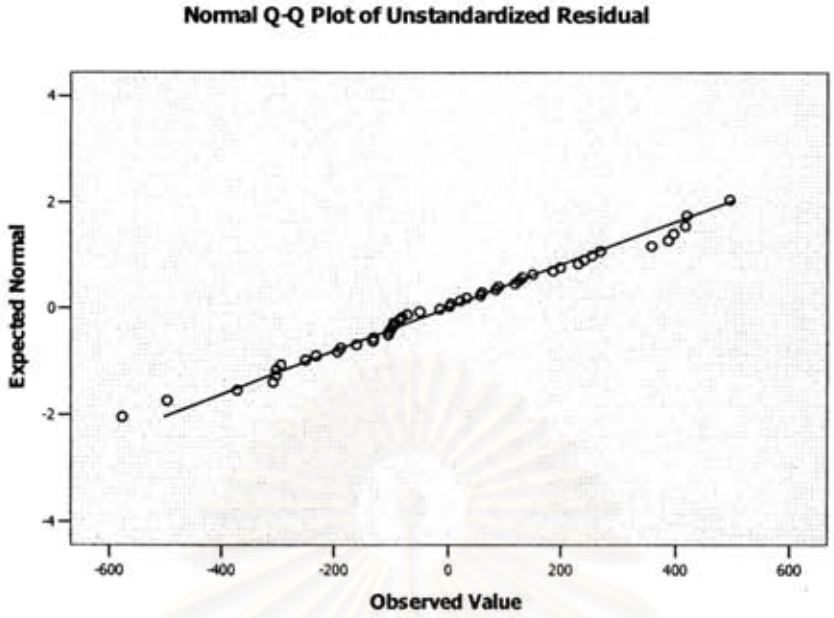
| | Kolmogorov-Smirnov* | | | Shapiro-Wilk | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Statistic | df | Sig. | Statistic | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | .073 | 48 | .200* | .986 | 48 | .846 |

* This is a lower bound of the true significance.

a Lilliefors Significance Correction

<u>สถิติทดสอบ</u> : จากตารางที่ ก8 ใช้การทดสอบด้วยวิธีของ Shapiro-Wilk Test เพราะขนาดตัวอย่างที่นำมาทดสอบน้อยกว่า 50 พบว่าค่า Sig. ของสถิติทดสอบ Shapiro-Wilk = 0.846 > 0.05 จึงยอมรับ $H_1$ หรือสรุปได้ว่าค่าคลาดเคื่อนมีการแจกแจงปกติ มีการพล็อตกราฟผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อนดังรูป ก 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ ก4 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อน

**ขั้นที่** 5.3 การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนต้องเป็นอิสระกัน

สมมติฐาน $H_0$ : ค่าคลาดเคลื่อน $e_i$ และ $e_j$ เป็นอิสระกัน

$H_1$ : ค่าคลาดเคลื่อน $e_i$ และ $e_j$ ไม่เป็นอิสระกัน

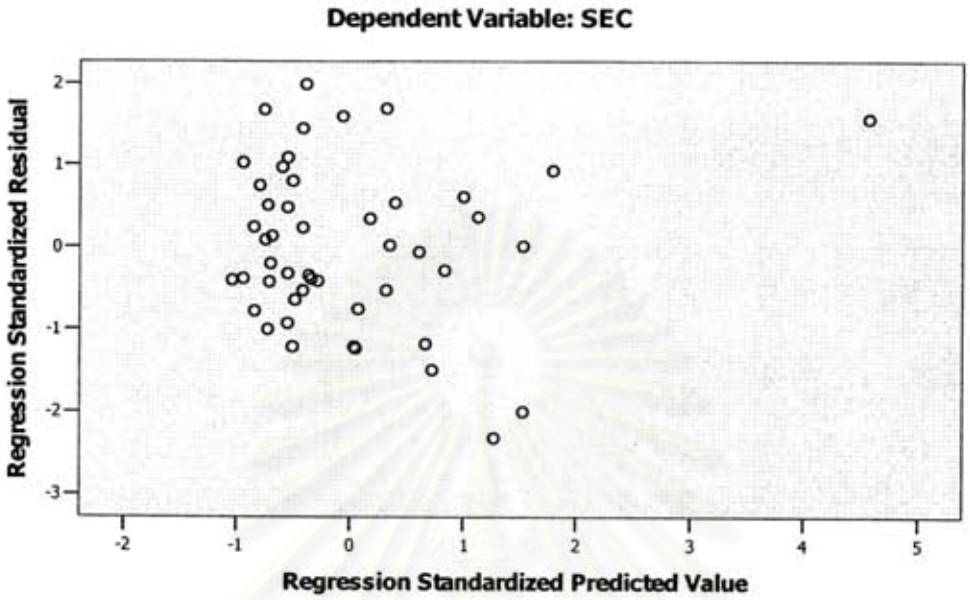
สถิติทดสอบ สถิติที่ใช้ทดสอบคือ Durbin-Watson ซึ่งได้จากตาราง ก5 ซึ่งพิจารณาดังนี้

- ถ้าค่า Durbin-Watson มีค่าใกล้ 2 (นั่นคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5) จะสรุปว่า $e_i$ และ $e_j$ เป็นอิสระกัน
- ถ้าค่า Durbin-Watson $< 1.5$ แสดงว่าความสัมพันธ์ของ $e_i$ และ $e_j$ อยู่ในทิศทางบวกและถ้าค่า Durbin-Watson มีค่าใกล้ศูนย์แสดงว่า $e_i$ และ $e_j$ มีความสัมพันธ์กันมาก
- ถ้าค่า Durbin-Watson $> 2.5$ แสดงว่าความสัมพันธ์ของ $e_i$ และ $e_j$ อยู่ในทิศทางลบ และถ้าค่า Durbin-Watson มีค่าใกล้ 4 แสดงว่า $e_i$ และ $e_j$ มีความสัมพันธ์กันมาก

ในการทดสอบสมมติฐานจะพิจารณาจากค่า Durbin-Watson ถ้าค่า Significance น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด จะปฏิเสธสมมติฐาน $H_0$ เมื่อพิจารณาค่า Durbin-Watson จากตาราง ก6 มีค่าเท่ากับ 1.498(หรือประมาณ 1.5) ซึ่งมีค่าใกล้ 2 หรืออยู่ระหว่าง 1.5 และ 2.5 จึงยอมรับ $H_0$ จึงสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อน $e_i$ และ $e_j$ เป็นอิสระกัน

**ขั้นที่** 5.4 การตรวจสอบค่าแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนต้องคงที่

การตรวจสอบความคงที่ของค่าแปรปรวนจะพิจารณาจากกราฟ X กับ e หรือกราฟของ Y ก็ได้




รูปที่ ก5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Standardized Residual

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวของรูปที่ ก5 พบว่าค่า e มีค่าอยู่ในช่วงใดช่วงหนึ่งแคบๆ ไม่ว่าค่า Standardized Predicted Value จะเปลี่ยนไปอย่างไร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ข
# ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข 1 ค่า SEC และปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอม (Pull ton)

| SEC(Y) | Pull ton(X) |
|---|---|
| 5500 | 102 |
| 5000 | 102 |
| 4800 | 110 |
| 4750 | 132 |
| 4800 | 135 |
| 5350 | 155 |
| 4950 | 153 |
| 4800 | 155 |
| 5150 | 185 |
| 4630 | 173 |
| 4500 | 175 |
| 4530 | 215 |
| 4530 | 218 |
| 4460 | 225 |
| 5100 | 221 |
| 4750 | 238 |
| 4650 | 245 |
| 4250 | 238 |
| 4300 | 245 |
| 4575 | 278 |
| 4200 | 278 |
| 4200 | 306 |
| 4450 | 308 |
| 4250 | 335 |
| 4200 | 368 |
| 5400 | 120 |
| 5100 | 127 |
| 5050 | 138 |
| 4500 | 176 |

| SEC(Y) | Pull ton(X) |
|---|---|
| 4550 | 208 |
| 4950 | 225 |
| 4800 | 245 |
| 4750 | 253 |
| 4400 | 235 |
| 4450 | 245 |
| 4850 | 285 |
| 4600 | 295 |
| 4410 | 273 |
| 4350 | 275 |
| 4600 | 335 |
| 7300 | 55 |
| 5400 | 115 |
| 4950 | 165 |
| 5850 | 95 |
| 4500 | 270 |
| 5100 | 150 |
| 4460 | 283 |
| 4650 | 225 |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข 2 ค่า SEC และปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอม (Pull ton)

| SEC(Y) | 1/ Pull ton (1/X) |
|---|---|
| 5500 | 102 |
| 5000 | 102 |
| 4800 | 110 |
| 4750 | 132 |
| 4800 | 135 |
| 5350 | 155 |
| 4950 | 153 |
| 4800 | 155 |
| 5150 | 185 |
| 4630 | 173 |
| 4500 | 175 |
| 4530 | 215 |
| 4530 | 218 |
| 4460 | 225 |
| 5100 | 221 |
| 4750 | 238 |
| 4650 | 245 |
| 4250 | 238 |
| 4300 | 245 |
| 4575 | 278 |
| 4200 | 278 |
| 4200 | 306 |
| 4450 | 308 |
| 4250 | 335 |
| 4200 | 368 |
| 5400 | 120 |
| 5100 | 127 |
| 5050 | 138 |
| 4500 | 176 |

| SEC(Y) | 1/ Pull ton (1/X) |
|---|---|
| 4550 | 208 |
| 4950 | 225 |
| 4800 | 245 |
| 4750 | 253 |
| 4400 | 235 |
| 4450 | 245 |
| 4850 | 285 |
| 4600 | 295 |
| 4410 | 273 |
| 4350 | 275 |
| 4600 | 335 |
| 7300 | 55 |
| 5400 | 115 |
| 4950 | 165 |
| 5850 | 95 |
| 4500 | 270 |
| 5100 | 150 |
| 4460 | 283 |
| 4650 | 225 |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข 3 ค่า SEC และปริมาณการดึงน้ำแก้วต่อวันของเตาหลอม (Pull ton) ที่ได้จากการแทนค่า X ในสมการ Y = 3841.1543 - 168940.66 X' โดยที่ X' = 1/x

| SEC(Y) | Pull ton(X) |
|---|---|
| 7219.968 | 50 |
| 6656.832 | 60 |
| 6254.592 | 70 |
| 5952.913 | 80 |
| 5718.273 | 90 |
| 5530.561 | 100 |
| 5248.993 | 120 |
| 5047.873 | 140 |
| 4897.033 | 160 |
| 4779.714 | 180 |
| 4685.858 | 200 |
| 4609.066 | 220 |
| 4545.074 | 240 |
| 4490.926 | 260 |
| 4444.514 | 280 |
| 4404.29 | 300 |
| 4369.094 | 320 |
| 4338.039 | 340 |
| 4310.434 | 360 |
| 4285.735 | 380 |
| 4263.506 | 400 |
| 4243.394 | 420 |
| 4225.11 | 440 |
| 4208.417 | 460 |
| 4193.114 | 480 |
| 4179.036 | 500 |
| 4166.04 | 520 |
| 4154.007 | 540 |
| 4142.834 | 560 |
| 4132.431 | 580 |
| 4122.722 | 600 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ค
# ผลการตรวจวัดพลังงานในโรงงานตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมแก้วและกระจกที่ทำการตรวจวัดจำนวน 11 แห่ง ซึ่งจะตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิต รวมทั้งส่วนของระบบสนับสนุน (Utilities) และสำนักงาน และขอข้อมูลผลผลิต การใช้พลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงของปี พ.ศ. 2546 2547 และ 2548

**อุตสาหกรรมกระจกแผ่น**

โรงงานตัวอย่างเข้าตรวจวัดจำนวน 1 แห่ง

ตารางที่ ค1 ค่าSEC อุตสาหกรรมกระจกแผ่นจากการตรวจวัดในโรงงานตัวอย่าง

| กระบวนการผลิต | บ. กระจกแผ่น ก1 | | |
|---|---|---|---|
| | SEC, EE kWh/ton | SEC,TH GJ/ton | SEC,total GJ/ton |
| กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ | 15 | - | |
| กระบวนการหลอมและรีไฟนิง(Melting/Refining) | 17 | 7.88 | |
| กระบวนการขึ้นรูป(Forming) | 13.71 | - | |
| กระบวนการหลังการขึ้นรูป(Post Forming) | 8.44 | - | |
| อื่นๆ | 61.80 | - | |
| รวม | 115.95 | 7.88 | 8.80 |
| ขนาดเตา 620 pull ton/day เตาหลอมแบบ Regenerative Side port cullet 17-18% | | | |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต้นฉบับไม่มีหน้านี้
NO THIS PAGE IN ORIGINAL

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค2(ต่อ) ค่าSEC อุตสาหกรรมขวดแก้วจากการตรวจวัดในโรงงานตัวอย่าง

| โรงงานตัวอย่าง | โรงงาน ข4 | | | โรงงาน ข5 | | | โรงงาน ข6 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| กระบวนการผลิต | SEC, EE kWh/ton,m | SEC,TH GJ/ton,m | SEC, total GJ/ton,m | SEC, EE kWh/ton | SEC,TH GJ/ton | SEC, total GJ/ton | SEC, EE kWh/ton | SEC,TH GJ/ton | SEC, total GJ/ton |
| กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ | 6.29 | - | | 3.14 | - | | 8.70 | - | |
| กระบวนการหลอมและรีไฟนิง(Melting/Refining) | 127.83 | 5.48 | | 40.56 | 4.92 | | 39.08 | 11.08 | |
| กระบวนการขึ้นรูป(Forming) | 123 | - | | 162.68 | - | | 474.52 | - | |
| กระบวนการหลังการขึ้นรูป(Post Forming) | 5.30 | - | | 7.73 | - | | 61.42 | 0.36 | |
| อื่นๆ(utilities) | 34.00 | - | | 34.2 | - | | 12.00 | - | |
| รวม | 296.42 | 5.48 | 7.85 | 248.31 | 4.92 | 6.90 | 595.72 | 11.44 | 16.20 |
| | ผลผลิตขวดใส และขวดสี<br>ขนาดเตา 125,350,410 pull ton/day<br>cullet= 50-80% | | | ผลผลิต ขวดใสและสี<br>ขนาดเตา 150,200,210,350 pull ton/day<br>cullet=60-80% | | | ขวดเครื่องสำอางค์ ยา อาหาร<br>ขนาดเตา 40 ton/day<br>cullet 40% | | |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**อุตสาหกรรมเครื่องแก้ว(Glassware)**

จำนวนโรงงานตัวอย่าง 3 แห่ง

ตารางที่ ค3 ค่าSEC อุตสาหกรรมเครื่องแก้วจากการตรวจวัดในโรงงานตัวอย่าง

| โรงงานตัวอย่าง | โรงงาน ค1 | | | โรงงาน ค2 | | | โรงงาน ค3 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| กระบวนการผลิต | SEC, EE kWh/ton | SEC,TH GJ/ton | SEC, total GJ/ton | SEC, EE kWh/ton | SEC,TH GJ/ton | SEC, total GJ/ton | SEC, EE kWh/ton | SEC,TH GJ/ton | SEC, total GJ/ton |
| กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ | 8.15 | - | | 9.33 | - | | 7.10 | - | |
| กระบวนการหลอมและรีไฟนิง(Melting/Refining) | 571.16 | 18.37 | | 36.55 | 7.316 | | 195.17 | 17.84 | |
| กระบวนการขึ้นรูป(Forming) | 471.16 | - | | 241.79 | - | | 300 | - | |
| กระบวนการหลังการขึ้นรูป(Post Forming) | 79.36 | 1.06 | | 15.25 | 0.538 | | 50 | - | |
| อื่นๆ(utilities) | 17.95 | - | | - | - | | 36.00 | - | |
| รวม | 1147.78 | 19.42 | 28.61 | 302.92 | 7.85 | 10.27 | 588.27 | 17.287 | 22.55 |
| | ผลผลิต เครื่องแก้ว ขนาดเตา 95, 95 poll ton/day cullet 20 % | | | ผลผลิต เครื่องแก้ว บางส่วนของการขึ้นรูปใช้ระบบ - Hydraulic แทน Pneumatic ขนาดเตา 100 pull ton/day cullet 12 % แม่พิมพ์ทำด้วยเหล็กไร้สนิมผิวขัดมัน ชิ้นงานจึงมีผิวมันวาว จึงลดการใช้ LPG ที่ Post-forming | | | ผลผลิตเครื่องแก้ว ขนาดเตา 40 ton/day จำนวน 2 เตา cullet 18% | | |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**อุตสาหกรรมฉนวนใยแก้ว**(Fiber glass)

จำนวนโรงงานตัวอย่าง 1 แห่ง

ตารางที่ ค4 ค่าSEC อุตสาหกรรมฉนวนแก้วจากการตรวจวัดในโรงงานตัวอย่าง

| โรงงานตัวอย่าง | โรงงาน ฉ1 | | |
|---|---|---|---|
| กระบวนการผลิต | SEC, EE kWh/ton | SEC,TH GJ/ton | SEC, total GJ/ton |
| กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ | 12.00 | - | |
| กระบวนการหลอมและรีไฟนิง(Melting/Refining)* | 466.48 | 15.42 | |
| กระบวนการขึ้นรูป(Forming)* | - | - | |
| กระบวนการหลังการขึ้นรูป(Post Forming) | 300.91 | - | |
| อื่นๆ | 49.92 | - | |
| รวม | 829.31 | 15.42 | 22.05 |
| *รวมการหลอม+รีไฟนิง+post forming | ใช้เตาหลอมแบบ recuperative<br>ขนาดเตา 23.23 ton/day<br>cullet 100% | | |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ง
# การอนุรักษ์พลังงานของโรงงานตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**อุตสาหกรรมกระจกแผ่น**

ตาราง ง1 ผลการอนุรักษ์พลังงานของโรงงาน ก1

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| **โรงงาน ก1** ผลผลิต 226,124 ton/yr | | | | | | | |
| กระบวนการผลิตรวม | 115.95 | 7.88 | | | | | |
| การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ* | 2.6 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | 2.6 | - | 588,000 | - |
| การใช้พลังงานที่ระบบอากาศอัด* | 13.34 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor | 5.4 | - | 1,221,100 | - |
| มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ** | 13.34 | - | 1. การลดลมรั่วในระบบอากาศอัด<br>2. การติดตั้ง VSD | 1.34 | - | 303,000 | - |
| ผลการอนุรักษ์รวม | | | | 9.34 | - | 2,112,100 | - |

หมายเหตุ : * ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

** ค่าที่ได้จากการประเมิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**อุตสาหกรรมขวดแก้ว**

ตาราง ง2 ผลการอนุรักษ์พลังงานของโรงงาน ข1

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| **โรงงาน ข1** ผลผลิต 66,819 ton/yr | | | | | | | |
| กระบวนการผลิตรวม | | | | | | | |
| การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ* | - | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | 2.6 | - | 173,000 | - |
| การใช้พลังงานที่ระบบอากาศอัด* | 110.14 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor | 10.73 | - | 717,000 | - |
| มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ** | 110.14 | - | 1. การลดลมรั่วในระบบอากาศอัด<br>2. การติดตั้ง VSD | 11 | - | 735,000 | - |
| ผลการอนุรักษ์รวม | | | | 24.33 | - | 1,625,000 | - |

หมายเหตุ : * ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

** ค่าที่ได้จากการประเมิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง3 ผลการอนุรักษ์พลังงานของโรงงาน ข2

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| **โรงงาน ข2** ผลผลิต 215,512 ton/yr | | | | | | | |
| กระบวนการผลิตรวม | | | | | | | |
| การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ* | 2.95 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | 2.95 | - | 636,000 | - |
| การใช้พลังงานที่ระบบอากาศอัด* | 93.14 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor | 6.52 | - | 1,405,100 | - |
| มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ** | 93.14 | - | 1. การลดลมรั่วในระบบอากาศอัด<br>2. การติดตั้ง VSD | 9.32 | - | 2,008,500 | - |
| ผลการอนุรักษ์รวม | | | | 18.79 | | 4,049,600 | - |

หมายเหตุ : * ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

** ค่าที่ได้จากการประเมิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง4 ผลการอนุรักษ์พลังงานของโรงงาน ข3

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| **โรงงาน ข3** ผลผลิต 362,792 ton/yr | | | | | | | |
| กระบวนการผลิตรวม | | | | | | | |
| การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ* | 2.53 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | 2.53 | - | 918,400 | - |
| การใช้พลังงานที่ระบบอากาศอัด* | 80 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor | 5.60 | - | 1,405,100 | - |
| มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ** | 80 | - | 1. การลดลมรั่วในระบบอากาศอัด<br>2. การติดตั้ง VSD | 8 | - | 1,724,000 | - |
| ผลการอนุรักษ์รวม | | | | 16.13 | - | 4,047,500 | - |

หมายเหตุ : * ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

** ค่าที่ได้จากการประเมิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง5 ผลการอนุรักษ์พลังงานของโรงงาน ข4

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| **โรงงาน ข4** ผลผลิต 301,905 ton/yr | | | | | | | |
| กระบวนการผลิตรวม | | | | | | | |
| การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ* | 3.75 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | 3.75 | - | 1,133,600 | - |
| การใช้พลังงานที่ระบบอากาศอัด* | 104.57 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor | 7.32 | - | 2,209,945 | - |
| มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ** | 104.57 | - | 1. การลดลมรั่วในระบบอากาศอัด<br>2. การติดตั้ง VSD | 10.46 | - | 3,157,926 | - |
| ผลการอนุรักษ์รวม | | | | 21.53 | - | 6,501,471 | - |

หมายเหตุ : * ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

** ค่าที่ได้จากการประเมิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง6 ผลการอนุรักษ์พลังงานของโรงงาน ข5

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| **โรงงาน ข5** ผลผลิต 269,893 ton/yr | | | | | | | |
| กระบวนการผลิตรวม | | | | | | | |
| การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ* | 3.24 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | 3.24 | - | 875,600 | - |
| การใช้พลังงานที่ระบบอากาศอัด* | 105 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor | 7.35 | - | 2,209,945 | - |
| มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ** | 105 | - | 1. การลดลมรั่วในระบบอากาศอัด<br>2. การติดตั้ง VSD | 10.50 | - | 3,157,926 | - |
| ผลการอนุรักษ์รวม | | | | 21.09 | - | 6,243,471 | - |

หมายเหตุ : * ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

** ค่าที่ได้จากการประเมิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง7 ผลการอนุรักษ์พลังงานของโรงงาน ข6

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| **โรงงาน ข6** ผลผลิต 11,537 ton/yr | | | | | | | |
| กระบวนการผลิตรวม | | | | | | | |
| การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ* | 13.52 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | 13.52 | - | 156,000 | - |
| การใช้พลังงานที่ระบบอากาศอัด* | 206.03 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor | 7.33 | - | 85,000 | - |
| มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ** | 206.03 | - | 1. การลดลมรั่วในระบบอากาศอัด<br>2. การติดตั้ง VSD | 20.60 | - | 238,000 | - |
| ผลการอนุรักษ์รวม | | | | 41.45 | - | 479,000 | - |

หมายเหตุ : * ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

** ค่าที่ได้จากการประเมิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**อุตสาหกรรมเครื่องแก้ว**

ตาราง ง8 ผลการอนุรักษ์พลังงานของโรงงาน ค1

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| **โรงงาน ค1** ผลผลิต 30,922 ton/yr | | | | | | | |
| กระบวนการผลิตรวม | | | | | | | |
| การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ* | 8.03 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | 8.03 | - | 248,400 | - |
| การใช้พลังงานที่ระบบอากาศอัด* | 292.13 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor | 20.45 | - | 632,355 | - |
| มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ** | 292.13 | - | 1. การลดลมรั่วในระบบอากาศอัด<br>2. การติดตั้ง VSD | 29.21 | - | 903,000 | - |
| ผลการอนุรักษ์รวม | | | | 57.69 | - | 1,783,755 | - |

หมายเหตุ : * ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

** ค่าที่ได้จากการประเมิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง9 ผลการอนุรักษ์พลังงานของโรงงาน ค2

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| **โรงงาน ค2** ผลผลิต 25,782 ton/yr | | | | | | | |
| กระบวนการผลิตรวม | | | | | | | |
| การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ* | 4.52 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | 4.52 | - | 116,500 | - |
| การใช้พลังงานที่ระบบอากาศอัด* | 157.21 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor | 10.05 | - | 259,100 | - |
| มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ** | 157.21 | - | 1. การลดลมรั่วในระบบอากาศอัด<br>2. การติดตั้ง VSD | 15.72 | - | 405,300 | - |
| ผลการอนุรักษ์รวม | | | | 30.29 | - | 780,900 | - |

หมายเหตุ : * ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

** ค่าที่ได้จากการประเมิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง10 ผลการอนุรักษ์พลังงานของโรงงาน ค3

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| **โรงงาน ค3** ผลผลิต 21,731 ton/yr | | | | | | | |
| กระบวนการผลิตรวม | | | | | | | |
| การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ* | 6.05 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | 6.05 | - | 131,400 | - |
| การใช้พลังงานที่ระบบอากาศอัด* | 175.9 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor | 12.32 | - | 267,700 | - |
| มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ** | 175.9 | - | 1. การลดลมรั่วในระบบอากาศอัด<br>2. การติดตั้ง VSD | 17.6 | - | 382,500 | - |
| ผลการอนุรักษ์รวม | | | | 35.97 | - | 781,600 | - |

หมายเหตุ : * ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

** ค่าที่ได้จากการประเมิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## อุตสาหกรรมฉนวนแก้ว

ตาราง ง11 ผลการอนุรักษ์พลังงานของโรงงาน ง1

| ประเภท | SEC | | มาตรการ | ผลการอนุรักษ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh/ton | GJ/ton | | kWh/ton | GJ/ton | kWh/yr | GJ/yr |
| **โรงงาน ง1** ผลผลิต 7,707 ton/yr | | | | | | | |
| กระบวนการผลิตรวม | | | | | | | |
| การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ* | 13.46 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ | 13.46 | - | 103,780 | - |
| การใช้พลังงานที่ระบบอากาศอัด* | 300.91 | - | การนำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเพื่อใช้ที่ Absorption water Chiller เพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้า Air Compressor | 21.06 | - | 162,300 | - |
| มาตรการเกี่ยวกับระบบอัดอากาศ** | 300.91 | - | 1. การลดลมรั่วในระบบอากาศอัด<br>2. การติดตั้ง VSD | 30.90 | - | 238,200 | - |
| ผลการอนุรักษ์รวม | | | | 65.42 | - | 504,280 | - |

หมายเหตุ : * ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

** ค่าที่ได้จากการประเมิน

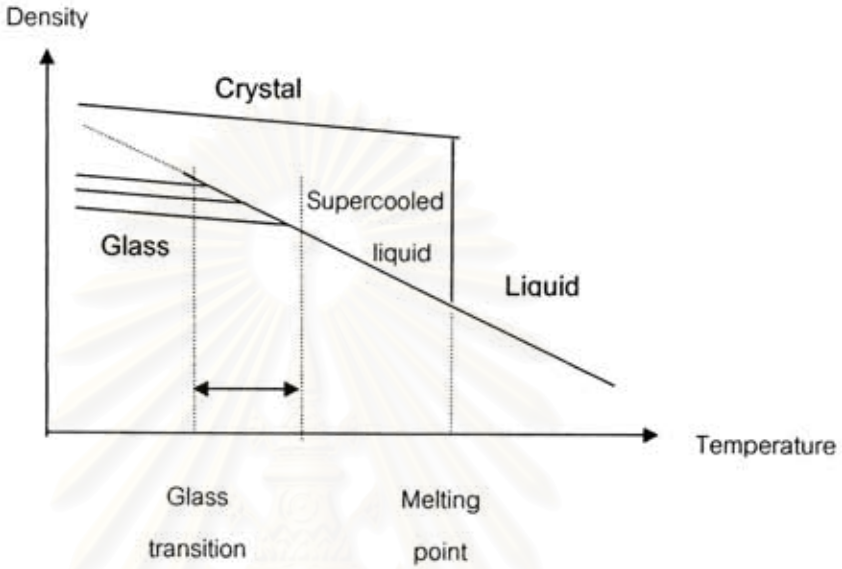
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก จ
# สมบัติของวัสดุแก้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**บทนำ**

สมบัติพื้นฐานของวัสดุอสัณฐานหรือแก้วคือ Glass transition temperature หรือ Tg จึงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอันหนึ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุอสัณฐานหรือแก้วหรือไม่




รูปที่ จ1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของวัสดุแก้วเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ จ1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เปรียบเทียบกันระหว่างวัสดุแก้วกับผลึก สำหรับผลึกนั้นเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของมันอย่างรวดเร็ว นั่นคือเกิดการหลอมละลายกลายเป็นของเหลวที่จุดหลอมเหลว หรือ Tm แต่สำหรับแก้วแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเพียงเล็กน้อยที่ Glass transition temperature หรือ Tg กลายเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงมาก เรียกว่า supercooled liquid ก่อนที่จะหลอมเหลวเป็นของเหลวต่อไป เนื่องจากแก้วเกิดจากของเหลวที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการตกผลึก แก้วจึงมีพฤติกรรมเหมือนของเหลวที่หนืดมากสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามแรงกระทำจากภายนอกได้ แต่ในความเป็นจริงการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยและจะเกิดขึ้นช้ามากจนไม่อาจสังเกตได้ สมบัติของวัสดุแก้วนั้นมักจะขึ้นอยู่กับสารชนิดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแก้ว ทำให้ลักษณะพันธะในแก้วเปลี่ยนแปลงไปซึ่งจะส่งผลไปยังลักษณะทางเคมีและกายภาพของแก้วนั้น

**1 สมบัติทางกลของวัสดุแก้ว**

1.1 Elasticity :

แก้วเป็น elastic material ที่สมบูรณ์แบบ คือมันจะไม่เปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร แต่มีความเปราะซึ่งหมายถึงมันจะแตกเมื่อได้รับความเค้น (stress) เพิ่มขึ้น

- Young's modulus, E เป็นค่าที่แสดงถึงแรงดึงตามทฤษฎีที่ใช้ในการทำให้แก้วยืดออกให้ยาวขึ้นเท่ากับความยาวเดิมของมัน หน่วยของมันจะมีค่าเป็นแรงต่อพื้นที่ สำหรับแก้วตามมาตรฐานยุโรปจะมีค่า E= 7 x 1010 Pa=70GPa
- Poisson's ratio : m (lateral contraction coefficient) เมื่อวัสดุถูดดึงด้วยแรงขนาดตามขวางของมันจะลดลง ค่า m คือความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยที่ลดลงตามทิศทางที่ตั้งฉากกับแรง กับหน่วยของความเครียด (strain) ตามทิศทางของแรง สำหรับแก้วในงานก่อสร้าง ค่า m=0.22

1.2 Compressive strength

แก้วมีค่า compressive strength สูงมาก คือ 1000N/mm2 หรือ 1000MPa นั่นหมายถึงในการทำให้แก้วขนาด 1 cm3 แตกละเอียดลงได้ต้องให้น้ำหนักถึง 10 ตัน

1.3 Tensilestrength

แก้วตามปกติจะมี tensile strength ประมาณ 40 MPa (N/mm2) และอาจทำให้เพิ่มสูงขึ้นถึง 120-200 MPa เมื่อผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงต่างๆ

**2 สมบัติทางกายภาพอื่นๆ ของวัสดุแก้ว**

2.1 Density

ความหนาแน่นของแก้วธรรมดาประมาณ 2.5 ซึ่งทำให้กระจกที่มีความหนา 1 มม. และขนาด 1 m2 มีน้ำหนัก 2.5 กก.

**3สมบัติทางความร้อนของวัสดุแก้ว**

3.1 Linear expansion

ค่า Linear expansion จะแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งวัดจากการยืดออกต่อหน่วยความยาวเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิทุก 1°C โดยทั่วไปค่านี้จะวัดที่อุณหภูมิในช่วง 20-300°C ค่าสัมประสิทธิ์ของ linear expansion ของแก้วคือ 9x10-6°C-1 เช่น แก้วความยาว 2 ม. เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 30°C จะยาวเพิ่มขึ้น = (2000mm.) x (9x10-6°C-1) x (30°C) = 0.54mm.

3.2 Thermal stress

เนื่องจากแก้วมีการนำความร้อนที่ต่ำ การทำให้แผ่นแก้วร้อนหรือเย็นเฉพาะที่จะทำให้เกิดความเค้นที่ทำให้แผ่นแก้วแตกได้ เช่นกระจกที่ใส่กรอบและทิ้งไว้ในที่มีแสงแดดจัด อุณหภูมิของขอบกระจกที่อยู่ในกรอกจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าส่วนอื่น จึงเป็นเรื่องจำเป็นในการคำนึงถึงคุณสมบัติข้อนี้ในการใช้งานกระจก การทำ heat treatment จะทำให้แก้วทนความต่างของอุณหภูมิได้ประมาณ 150-200°C

**4 สมบัติทางแสงของวัสดุแก้ว**

- Spectrophotometric characteristics

Radiation

เมื่อแสง (solar) ตกกระทบแก้วจะมีส่วนหนึ่งที่สะท้อนกลับ (reflected) ส่วนหนึ่งถูกดูดกลืน (absorbed) และส่องผ่านไป (re-transmitted) อัตราส่วนระหว่างความเข้มของแสงเหล่านี้กับแสงเริ่มต้น (incident solar radiation) จะบ่งบอกถึงสมบัติของแก้ว 3 ตัว คือ reflectance factor, absorptance factor และ transmittance factor ซึ่งเมื่อพล็อตสมบัติแต่ละชนิดที่ความยาวคลื่นต่างๆ กัน ก็จะได้กราฟในลักษณะของสเปคตรัมของแก้ว ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนเหล่านี้ได้แก่ สีของแก้ว ความหนา และสารเคลือบในกรณีที่แก้วนั้นมีการเคลือบด้วย

Solar factor

solar factor หรือค่า g ของแก้ว คือ เปอร์เซนต์ของพลังงานความร้อนรวมที่เกิดจากแสงที่ผ่านเข้ามาในห้องทางแก้วหรือกระจกนั้น ค่าพลังงานรวมได้จากแสงที่ผ่านเข้ามา โดยตรงกับพลังงานส่วนที่แก้วดูดกลืนไว้และส่งผ่านออกมาด้านในของห้อง

Light transmittance and reflectance factors

คือ อัตราส่วนของแสงในช่วงคลื่นที่มองเห็น (light) ที่ถูกส่องผ่านหรือสะท้อนกลับกับแสงเริ่มต้น สำหรับกระจกที่หนามากหรือมีการเคลือบหรือ laminated ถึงแม้จะไม่มีสี แต่อาจทำให้แสงที่ส่องผ่านมามีสีเขียวหรือสีฟ้าได้

- Natural light, daylight factor

สำหรับกระจกหนึ่งๆ daylight factor คืออัตราส่วนของแสงภายใน ณ จุดหนึ่ง เทียบกับแสงภายนอก วัดในแนวระนาบจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับช่วงเวลาในแต่ละวัน เช่น ในห้องที่มี daylight factor = 0.10 ณ ตำแหน่งที่ใกล้กับหน้าต่าง และ = 0.01 ณ ด้านหลังของห้อง (เป็นค่าเฉลี่ยของห้องปกติ), ที่ระดับความเข้มแสงภายนอก 5000 lux (วันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก) จะทำให้ทราบว่าภายในห้องบริเวณใกล้หน้าต่างจะมีแสงสว่าง 500 lux และด้านหลังห้อง 50 lux และถ้าความเข้มแสงภายนอก 20000 lux (วันที่ท้องฟ้าโปร่ง) จะมีแสงสว่างที่หน้าต่างและด้านหลังห้องเป็น 2000

และ 200 lux ตามลำดับ ซึ่ง factor เหล่านี้จะทำให้สามารถคำนวณเพื่อให้ทราบปริมาณแสงตามธรรมชาติและปริมาณแสงที่ต้องการในห้องหนึ่งๆ ได้

**5 สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุแก้ว**

- Dielectric constant ที่ความถี่ 1MHz, 20oC

**6 สมบัติทางเคมีของวัสดุแก้ว**

เมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่นๆ เช่น โลหะ และโพลิเมอร์ แก้วนับว่ามีความทนทานต่อสารเคมีมากกว่า จึงนิยมนำมาใช้เป็นภาชนะบรรจุต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามแก้วก็สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้

**6.1 ปฏิกิริยาของโครงสร้างแก้วกับความชื้น**

แก้วที่ทิ้งไว้นานอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีกับความชื้นได้ ดังต่อไปนี้

Si - O - Si = + H2O ---> = Si - OH + HO - Si =

สำหรับในสภาพที่เป็นด่าง จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับความชื้น

= Si - O - Si = + OH- ---> = Si - OH + -O - Si =

= Si - O- + H2O ---> = Si - OH + OH-

ปฏิกิริยาในสภาพที่เป็นกรด

= Si - O - Na = + OH- ---> = Si - OH + Na +

จะเห็นว่าในสภาพที่เป็นด่างจะเกิดปฏิกิริยาที่ต่อเนื่อง ซึ่งทำลายโครงสร้างของแก้วได้มากกว่าสภาพที่เป็นกรด

**6.2 ปฏิกิริยาของ Na2O กับความชื้น** โดยชั้นของแก้วที่มีปริมาณ $Na_2O$ มากอาจเกิดปฏิกิริยากับความชื้นได้ง่าย ดังต่อไปนี้

$Na_2O + H_2O$ ---> 2NaOH

NaOH ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับ $CO_2$ ในอากาศ

$2NaOH + CO_2$ ---> $Na_2CO_3 + H_2O$

เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Blooming โดย $Na_2CO_3$ มีลักษณะเป็นฝ้าขาวและจะหนาขึ้นเรื่อยๆ และ NaOH ซึ่งเป็นด่างจะกัดกร่อนชั้นซิลิกาด้วย การนำขวดเก่าไปล้างฝ้าขาวนี้ออกและนำไปบรรจุน้ำ อาจพบตะกอนของซิลิกาที่ก้นขวดหรือขวดที่ล้างแล้วเก็บไว้ ก็อาจพบว่ามีการตกสะเก็ดเป็นแผ่นๆ ขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Flaking

**7. การนำวัสดุแก้วไปใช้งาน**

วัสดุศาสตร์จะแบ่งชนิดของแก้วตามประเภทของการใช้งานดังต่อไปนี้

1. แก้วในงานก่อสร้าง (Constructions) เช่น กระจกแผ่น กระจกลาย อิฐแก้ว (Glass brock) เป็นต้น ต้องมีความแข็งแรง ความโปร่งใสสูง

2. แก้วบรรจุภัณฑ์ (Containers) เช่น ขวด แก้วน้ำ และภาชนะต่างๆ ควรจะมีความทนทานทางกายภาพและทางเคมีระดับในระดับหนึ่ง และควรสามารถนำกลับมาล้างใช้ได้ใหม่อย่างน้อย 50 ครั้ง

3. แก้วที่ผ่านการแปรรูป (Specialty glass) เช่น กระจกนิรภัยชนิดต่างๆ กระจกฉนวน กระจกเสริมลวด เป็นการนำกระจกแผ่นแบบ float มาอบ ดัด ตัดแต่ง ซึ่งจะทำให้ได้กระจกที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ มีความทนทานมากขึ้น กระจกนิรภัยจะช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากการแตกได้

4. แก้วเครื่องประดับ ตกแต่ง (Ornaments & Figurines) เช่น แก้วคริสตัล ของชำรวยต่างๆ แก้วสลัก เจียรไน มักเป็นแก้วพวก borosilicate ซึ่งสามารถนำมาเป่าขึ้นรูปได้ง่าย หรือแก้วผสมตะกั่ว ซึ่งจะทำให้แกะสลักและเจียระไนได้ง่าย

5. แก้วในอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics & Electrical Glass) เช่น Cathode-ray tubes, capacitors, resistors, computer components และ print circuits เป็นต้น แก้วที่ใช้จะต้องมีค่า dielectric ที่ดี มีการสูญเสียทางไฟฟ้าน้อยในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันสูง หน้าจอทีวีแก้วสำหรับการป้องกันการแผ่รังสี ก็ควรมีปริมาณตะกั่วที่สูง

6. แก้วในงานทางแสง (Optical glass) เช่น หลอดไฟ ต้องมีทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ส่วนเลนส์ ใยแก้วนำแสง ต้องใช้วัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูง

7. แก้วในงานอื่นๆ (Other Glass) เช่น ใยแก้ว โฟมแก้ว วัสดุคอมโพสิท ต้องสามารถใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อน ทนความร้อน และมีความต้านทานไฟฟ้าที่ดี ขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่จะนำไปใช้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ฉ
# ตัวอย่างนโยบายการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน
# ที่มีการเสนอแนะให้ประเทศกำลังพัฒนาดำเนินการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**บทนำ**

หลักสำคัญของนโยบายการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานอย่างได้ผลนั้น คือการหาจุดที่สมดุลระหว่างความยืดหยุ่นและความเข้มงวด ซึ่งสอดคล้องกับจุดมุ่งหมายของโครงการกลุ่มอุตสาหกรรมที่เป็นเป้าหมายและผลที่ได้รับจากโครงการ

เมื่อเริ่มประกาศการใช้โครงการนั้น ผู้จัดทำโครงการจำเป็นต้องเข้าใจด้วยว่าผู้ที่เข้าร่วมโครงการจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาอย่างน้อยหนึ่งปีในการที่จะเข้าใจ ยอมรับ และสามารถตอบสนองต่อโครงการได้ ซึ่งโดยส่วนมากแล้วผู้ที่เข้าร่วมต้องการระยะเวลาประมาณ 12-18 เดือน เพื่อดำเนินการโครงการเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านการใช้พลังงานโดยไม่รวมระยะเวลาในการประเมินความเป็นไปได้และการวางแผน เนื่องจากในการลงทุนนั้นจำเป็นต้องรอให้ถึงระยะเวลาของปีงบประมาณรอบใหม่เสียก่อน นอกจากนี้การเปลี่ยนพฤติกรรมองค์กรและการเปลี่ยนแปลงตลาดยังต้องใช้เวลานานอีกด้วย โดยทั่วไปกว่าองค์กรจะสามารถทำให้โครงการการพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานให้สมบูรณ์นั้นต้องใช้ระยะเวลาอย่างต่ำ 5 ปี ซึ่งในระยะเวลาดังกล่าวการปรับปรุงโครงการเพื่อให้สามารถช่วยเหลือองค์กรเหล่านั้นจะช่วยให้เกิดการพัฒนาขึ้นอย่างมาก แต่ไม่ควรเปลี่ยนแปลงโครงการไปจนทำให้จุดมุ่งหมายเดิมเบี่ยงเบนไป ส่วนองค์กรที่ไม่มีงบประมาณเพียงพอในการลงทุนเพื่อการปรับปรุงอย่างเต็มรูปแบบได้นั้น อาจจะเริ่มจากการจัดฝึกอบรมด้านการหาความเหมาะสมของระบบ เพื่อสร้างให้เกิดความชำนาญและจิตสำนึกในการลดการใช้พลังงานโดยทำตามจุดมุ่งหมายของข้อตกลงที่มีร่วมกันตามที่ได้ตกลงไว้กับโครงการ หรือการฝึกอบรมตามมาตรฐานเรื่องการบริหารจัดการทางด้านพลังงาน เพื่อให้เกิดการลดการใช้พลังงานลงอย่างยั่งยืน สำหรับส่วนประกอบอื่นๆ ที่จะช่วยให้โครงการประสบความสำเร็จนั้นคือการกำหนดกลุ่มเป้าหมายที่ชัดเจน

**1. การกำหนดเป้าหมายและข้อตกลง**

ในสหราชอาณาจักรเริ่มต้นด้วยการประมวลผลเพื่อตั้งเป้าหมายข้อตกลงการเปลี่ยนแปลงอากาศ (Climate Change Agreement) โดยการจับกลุ่มข้อมูลอุตสาหกรรมบนทิศทางของรัฐบาล เมื่อได้ข้อมูลรัฐจัดทำรายงานเกี่ยวกับอุตสาหกรรมที่มีการบริโภคพลังงานในปริมาณสูงและจัดทำเอกสารเผยแพร่ที่เป็นการให้ข้อมูลในโครงการวิธีปฏิบัติที่ดีที่สุดด้านประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Best Practices Program) เพื่อเป็นแนวทางประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรม ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ประสบความสำเร็จและเทคโนโลยีในการอนุรักษ์พลังงานโดย ETSU (AEA Energy & Environment) เป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ต้นทุนและเทคโนโลยีที่สามารถทำได้จริง หลังจากนั้นอุตสาหกรรมที่มีการบริโภคพลังงานถูกนำมาพิจารณาและแบ่งย่อยเป็นแต่ละบริษัทประมาณค่าการประหยัดพลังงานที่สามารถลดได้ โดยสามารถทำ

ได้บนพื้นฐานที่มีประสิทธิภาพ และสามารถเผยแพร่ข้อมูลแล้วบริษัทอื่นสามารถทำได้ จุดเริ่มต้นอุตสาหกรรมที่ได้รับการพิจารณาคือ การศึกษาปัจจัยที่น่าจะมีความเกี่ยวข้องและปัจจัยที่ควรถูกบรรจุในมาตรการที่ทำแล้วให้ผลคุ้มค่ามากที่สุดสำหรับงบประมาณทั้งหมดที่ถูกใช้และอยู่บนพื้นฐานของของมาตรการที่ผ่านมาในอดีต

ในประเทศเนเธอร์แลนด์ได้มีการทำข้อตกลงระหว่างรัฐบาลและภาคทางอุตสาหกรรม (Long-Term Agreements (LTAs)) ที่มีการบริโภคพลังงานมากกว่า 1 PJ ต่อปี ในปี พ.ศ.2532 ถึง พ.ศ.2543 โดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานระดับชาติทั้งหมดให้ลดลง 20 เปอร์เซ็นต์ แต่บางอุตสาหกรรมก็มีการตั้งเป้าหมายที่ต่างกันขึ้นอยู่กับศักยภาพของแต่ละอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการกลั่นปิโตรเลียมตั้งเป้าการลดการใช้ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่อุตสาหกรรมแสงสว่างอยู่ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ การประมวลผลเพื่อกำหนดเป้าหมายภาคทางอุตสาหกรรมในขั้นต้น เริ่มด้วยการประเมินศักยภาพประสิทธิภาพพลังงานของภาคอุตสาหกรรม เป้าหมายที่ถูกกำหนดในการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานอยู่บนพื้นฐานที่ส่งผลกระทบต่อเนื่องของการศึกษาในเวลานั้น แผนระยะยาว(Long-Term Plan) อธิบายความแตกต่างที่แต่ละอุตสาหกรรมจะตระหนักเป้าหมายนั้นอย่างไร แผนระยะยาวประกอบด้วยข้อตกลงของแต่ละอุตสาหกรรม เช่นการจัดเตรียมของแผนการประหยัดพลังงาน(ECP) หรือการพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานในประจำปี โดยใช้ดรรชนีประสิทธิภาพพลังงาน(EEI) เป็นตัวชี้วัด รัฐบาลประเทศเนเธอร์แลนด์ได้จัดทำฐานข้อมูลของมาตรการของบริษัทในแต่ละภาคอุตสาหกรรมที่ดำเนินการและอยู่บนพื้นฐานการกำหนดเป้าหมายเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงาน แผนระยะยาวในช่วงเวลา พ.ศ.2532 - 2543 ประสบความสำเร็จและผลในการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานสามารถลดได้โดยเฉลี่ย 22.3 เปอร์เซ็นต์

ในการติดตามผลของแผนระยะยาว รัฐบาลประเทศเนเธอร์แลนด์สร้างข้อตกลงการเทียบเคียงสมรรถนะด้านพลังงาน(Energy Benchmark) สำหรับอุตสาหกรรมที่มีการบริโภคระดับพลังงานที่มีปริมาณมาก โดยข้อตกลงการเทียบเคียงสมรรถนะด้านพลังงาน (Energy Benchmark) เกิดขึ้นในปี พ.ศ.2544 ใช้เพื่อเปรียบเทียบกับเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้ก่อนหน้า โดยรัฐบาลจะจ้างผู้เชี่ยวชาญเพื่อศึกษาเทคโนโลยี หรือวิธีระหว่างประเทศดีที่สุดเกี่ยวกับประสิทธิภาพพลังงานทั้งหมดของโรงงาน โดยการดำเนินนั้นจะทำ 1ครั้งต่อ 4 ปี แนวทางในการศึกษาเทคโนโลยีระหว่างประเทศดีที่สุด คือ

1) การเปรียบเทียบกับประเทศอื่นเกี่ยวกับขนาดและดำเนินการของโครงการ ซึ่งอาจเป็นมาตรฐานระหว่างประเทศที่ดีที่สุดของประสิทธิภาพของโรงงานที่เหมือนกัน พลังงานที่ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานระหว่างประเทศที่ดีที่สุด คือ ประสิทธิภาพพลังงานเฉลี่ย
2) กำหนดประสิทธิภาพพลังงานของโรงงาน พลังงานเหล่านี้จะถูกกำหนดตำแหน่งให้สอดคล้องกับระดับประสิทธิภาพพลังงานเฉลี่ยและวิธีการที่ดีที่สุดของโรงงานดำเนินการอนุรักษ์เกี่ยวกับประสิทธิภาพพลังงานจะถูกกำหนดและนำมาใช้

ถ้าการดำเนินการของการศึกษาในสองข้อที่ข้างต้น ไม่เป็นไปได้ตามประสิทธิภาพของโรงงานดำเนินการที่ดีที่สุดภาพนอกประเทศเนเธอร์แลนด์ พลังงานจะคงจะถูกกำหนดและจะถูกตั้งเป้าการลดประสิทธิภาพพลังงานลง 10 เปอร์เซ็นต์ บริษัทอาจใช้อัตราร้อยละแตกต่างในสถานการณ์ที่แตกต่างกันได้ โดยคณะทำงานจะกำหนดเป้าหมายอีกทีหลังจากที่ได้รับข้อมูลโดยอยู่บนพื้นฐานจากการศึกษาข้างต้น เพื่อมากำหนดเป็นเป้าหมายในการพัฒนาการอนุรักษ์พลังงานในภาพรวม โดยจะจ้างบริษัทที่มีความชำนาญมาตรวจสอบความถูกต้องในขั้นสุดท้ายอีกครั้ง

**2. การก่อตั้งมาตรฐานการจัดการด้านพลังงาน**

อย่างที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ว่ามีการใช้การจัดการพลังงานในปัจจุบัน และอยู่ในขั้นพัฒนาสู่มาตรฐานสากล มาตรฐานนี้เอื้อประโยชน์แก่การพัฒนาหลายประเทศอาจเลือกใช้มาตรฐานที่มีอยู่เพื่อพัฒนาประเทศของตน หรือปรับใช้ให้เหมาะกับประเทศนั้นๆ งานนี้อยู่ภายใต้การดำเนินงานของรัฐบาล ถึงแม้ว่า บริษัทจะตัดสินใจเปลี่ยนแปลงหรือปรับเปลี่ยนให้เข้ากับการจัดการ แต่ในที่ประชุมมีการแนะนำให้มีการวางรูปแบบเพื่อจะได้ประสานงานกับกระบวนการนี้ ผู้ที่จะให้คำแนะนำควรประกอบไปด้วยตัวแทนจากบริษัทอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดใหญ่ ซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญที่สุดในการเติบโตของเศรษฐกิจของประเทศ ในการหารือควรจะมีที่ปรึกษาอาวุโสทางด้านวิศวกร และบริษัทผู้ประกอบการที่มีประสบการณ์ในอุตสาหกรรม หากต้องการเห็นผลสมาชิกในกลุ่มควรจะมีไม่เกิน 15 คน จุดประสงค์ของการประชุมคือต้องการแน่ใจว่ามาตรฐานและการปรับใช้สามารถนำมาฝึกฝนหรือเอามาใช้ในอุตสาหกรรมแล้วมีมาตรฐานเดียวกัน ระยะเวลาและข้อมูลควรมาจากความต้องการของประเทศที่กำลังดำเนินการ อีกทั้งความเห็นนี้สามารถสร้างให้เกิดมาตรฐานอย่างเป็นทางการ แต่บริษัทอุตสาหกรรมจะไม่เปลี่ยนในทันทีดังนั้นควรจะกระจายข้อมูลเพื่อจะได้พัฒนาไปสู่ความสำเร็จ ในส่วนของมาตรฐานต้องมีความชัดเจนและการฝึกอบรมจะต้องนำไปสู่ใช้มาตรฐานอย่างยั่งยืน ผู้เชี่ยวชาญทางเทคนิคจะต้องช่วยในการพัฒนาโครงสร้างที่จำเป็นของบริษัท จากนั้นทำการระบุและพัฒนาโครงการพัฒนาประสิทธิภาพของพลังงาน เพื่อการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของการจัดการด้านพลังงานจะต้องมีอาสาสมัครของบริษัท

เข้าร่วมที่มีความต้องการที่จะใช้ มาตรฐานการจัดการพลังงาน และการนำมาตรฐานการจัดการด้านพลังงานไปใช้ให้มีประสิทธิภาพสิ่งแรกควรจะพิจารณาปรับโครงสร้างของบริษัทเพื่อพัฒนาโครงสร้างองค์กรหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะเกิดขึ้นในช่วงนำมาตรฐานไปปฏิบัติ

การฝึกอบรมมีความจำเป็นเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพื่อที่จะเตรียมกลุ่มอุตสาหกรรมเข้าสู่การจัดการด้านพลังงานให้มีมาตรฐาน และทำการอบรมให้เกิดผู้เชี่ยวชาญซึ่งเป็นอาสาสมัครของบริษัทเพื่อให้เข้าใจและเรียนรู้การนำมาตรฐานเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้

**3. การสร้างประสิทธิภาพในเรื่องของผู้เชี่ยวชาญในการฝึกอบรม และผู้จัดจำหน่าย**

โปรแกรมการฝึกอบรมจำเป็นต้องมีผู้เชี่ยวชาญที่สามารถพัฒนาระบบที่เหมาะสม และมีการวัดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพโดยที่มีประสิทธิผลสูงสุด ซึ่งแผนการฝึกอบรมต้องมีเป้าหมายที่ชัดเจนต่อโรงงานและวิศวกร

- การฝึกอบรมผู้เชี่ยวชาญมีจุดประสงค์ ดังนี้
  - ฝึกอบรมเพื่อให้เกิดการตระหนักในการพัฒนาโรงงานให้ดีขึ้น
  - ใช้เงินลงทุนที่เหมาะสมในการนำระบบมาใช้กับโรงงาน
  - สามารถทำงานในโครงการที่โรงงานนำเงินมาลงทุนเพื่อพัฒนาโรงงานได้
  - เตรียมกรณีศึกษาของโครงการที่ประสบความสำเร็จ โดยมีผลการดำเนินงานมาเสนอด้วย

ในทำนองเดียวกันการนำผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศที่มีทักษะสูงมาฝึกอบรม พนักงานที่จะนำมาฝึกอบรมต้องมีการคัดเลือกอย่างเข้มงวดโดยซึ่งต้องมีความรู้ทางด้านเทคนิคเพื่อให้การฝึกอบรมประสบความสำเร็จสูงสุด

- การฝึกอบรมผู้จัดจำหน่าย (Suppliers)

  การฝึกอบรมผู้จัดจำหน่าย (Suppliers) มีทิศทางไปในทางเดียวกันกับการฝึกอบรมผู้เชี่ยวชาญ โดยมีการแนะนำ และสอนการใช้เครื่องมือทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติ โดยการฝึกอบรมของผู้จัดจำหน่าย (Suppliers) มีจุดประสงค์ ดังนี้
  - มีส่วนผลักดันในการให้ความรู้แก่ลูกค้าในเรื่องของระบบมาตรฐาน
  - เสนอต่อลูกค้าในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนข้อกำหนดต่างๆ โดยอยู่ในระบบการบริการ

**4. การสร้างความตระหนักในอุตสาหกรรม**

สิ่งสำคัญของโครงการประสิทธิภาพพลังงานของทุกอุตสาหกรรมคือโครงการด้านสารสนเทศ ซึ่งโครงการต้องมีการแนะนำหลักการพื้นฐานของการจัดการด้านพลังงาน และระบบทางด้านอุตสาหกรรมที่เหมาะสมให้แก่อุตสาหกรรม ข้อความที่ใช้ในการรณรงค์ควรมีเนื้อหาสั้นๆ แต่ได้ใจความ น่าเชื่อถือ และในเนื้อหาควรกล่าวถึงการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพกับต้นทุนที่ลดได้

นโยบายการใช้พลังงานงานอย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมจะเป็นผลสำเร็จได้ โดยการจัดตั้งพันธมิตรเพื่อทำหน้าที่ดังนี้

- สร้างความพยายามให้เกิดมีการปรับเปลี่ยนวิธีการหรือการดำเนินการให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
- ผลักดันให้อุตสาหกรรมใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพอย่างจริงจัง โดยผ่านความสัมพันธ์ทางธุรกิจที่มีอยู่ เช่น ผู้จัดจำหน่าย และกลุ่มแลกเปลี่ยนซื้อขาย เป็นต้น
- พัฒนาความน่าเชื่อถือภายในกลุ่มอุตสาหกรรมนั้นๆ
- กำหนดจุดประสงค์ของนโยบายที่ดำเนินการให้ชัดเจนและให้สอดคล้องกับการดำเนินงานที่มีอยู่ในปัจจุบัน
- สนับสนุนทางด้านการเงิน และอธิบายให้เข้าใจถึงผลกำไรที่ได้จากการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน
- ฝึกฝนผู้ที่มีความสามารถเพื่อให้เป็นผู้เชี่ยวชาญที่สามารถฝึกอบรมเทคนิคของระบบที่เหมาะสมในแก่โรงงาน
- ดำเนินการจัดโครงการการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพให้เกิดผลสำเร็จ

มีหน่วยงานเฉพาะเพื่อที่สร้างความร่วมมือของพันธมิตรระหว่างประเทศ เช่น กลุ่มการค้าภายในอุตสาหกรรม กลุ่มวิศวกรผู้เชี่ยวชาญ กลุ่มจัดหาเครื่องมืออุตสาหกรรม บริษัทพลังงาน มหาวิทยาลัยที่ให้ความรู้ทางด้านเทคนิค และกองทุนทางด้านการเงิน

**5. แนวทางการส่งเสริมของต่างประเทศ**

การศึกษาแนวทางการส่งเสริมของต่างประเทศ สามารถสรุปได้เกี่ยวกับแรงจูงใจที่ทำให้อุตสาหกรรมดำเนินการตามมาตรการประหยัดพลังงาน ตัวอย่างของนโยบายรวมไปถึงโครงการส่งเสริมต่างๆ และข้อเสนอแนะให้ประเทศกำลังพัฒนานำไปดำเนินการ

5.1 แรงจูงให้อุตสาหกรรมดำเนินมาตรการประหยัดพลังงาน

- การลดค่าใช้จ่ายและลดปริมาณไอน้ำทิ้ง
- ปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบและควบคุม
- ปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์
- ความสามารถในการเพิ่มการผลิตโดยไม่มีการเพิ่มการใช้พลังงาน
- หลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่เป็นการลงทุน เช่น การปลูกสร้างอาคาร โดยเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่มีอยู่ให้ดียิ่งขึ้น
- เป็นบริษัทตัวอย่างแบบปฏิบัติการบริหารที่ได้ผล

**ตัวอย่างของนโยบายและโครงการส่งเสริม**

ตารางที่ ฉ1 โครงการจัดการด้านพลังงานโดยข้อตกลงอาสาสมัคร

| ประเทศที่เข้าร่วม | สมัครใจหรือข้อบังคับ | การส่งเสริมด้านการเงินสำหรับผู้ | ความช่วยเหลือด้านเทคนิค | ค่าปรับสำหรับผู้ไม่ร่วมมือ | โครงการแสดงให้เห็นคุณค่า | เชื่อมต่อถึงข้อตกลงอาสาสมัคร | การอบรมมาตรฐานการเข้าร่วม | การอบรมระบบในอุตสาหกรรม | การเผยแพร่กรณีศึกษา | โรงงานเป้าหมาย |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เดนมาร์ก | สมัครใจ | มี[1] | มี | มี[1] | มี | มี | มี | ไม่รู้ | มี | มี |
| ไอร์แลนด์ | สมัครใจ | มี | มี | ไม่มี | มี | มี | มี | จำกัด[4] | มี | มี |
| เนเธอร์แลนด์ | สมัครใจ | มี[2] | มี | มี[2] | มี | มี | มี | จำกัด[5] | มี | มี |
| สวีเดน | สมัครใจ | มี[3] | มี | มี[3] | มี | มี | ไม่มี | ไม่มี | วางแผน | มี |
| สหรัฐอเมริกา | สมัครใจ | ไม่มี | มี | ไม่มี | วางแผน | ไม่มี | วางแผน | มี | มี | มี |
| จีน | สมัครใจ | ยังไม่มีข้อมูล | | | | | | มี | | มี |

1 เดนมาร์กเริ่มมีภาษีคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ปี ค.ศ.1992 ซึ่งส่งผลต่ออุตสาหกรรม การลดภาษีมีความเชื่อมโยงในข้อตกลงอาสาสมัคร

2 ผู้เข้าร่วมข้อตกลงระยะยาวของเนเธอร์แลนด์ต้องพัฒนาแผนการจัดการด้านพลังงาน

3 สวีเดนเริ่มมีภาษีคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ปี ค.ศ.2005 การลดภาษีสำหรับกระบวนการไฟฟ้ามีความเชื่อมโยงในข้อตกลงอาสาสมัคร

4 ไอร์แลนด์วางแผนที่จะขยายข้อเสนอการฝึกอบรม

5 เนเธอร์แลนด์ฝึกอบรมเฉพาะบางหัวข้อ

เดนมาร์ก

ในประเทศเดนมาร์กมีการเริ่มใช้ภาษีคาร์บอนไดออกไซด์($CO_2$ tax) ตั้งแต่ปี พ.ศ.2535 ซึ่งการลดภาษีมีความเชื่อมโยงกับข้อตกลงอาสาสมัคร โดยมีส่วนลดภาษีสำหรับผู้ที่นำเอาแบบปฏิบัติการจัดการด้านพลังงานไปใช้และดำเนินการตรวจวัดประสิทธิภาพพลังงาน โดยโรงงานที่เข้าเกณฑ์จะต้องอยู่ในรายการของผู้เชี่ยวชาญด้านพลังงาน และจะต้องมีภาษีด้านพลังงานเกินกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่าเพิ่มในปีนั้นๆ

นโยบายที่นำมาใช้เพื่อให้อุตสาหกรรมมีการลงทุนในการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานและกิจกรรมการแลกเปลี่ยนข้อมูลด้านพลังงาน ได้แก่

- ข้อตกลงโดยสมัครใจ(Voluntary agreements)
- เงินช่วยเหลือ (Subsidies)
- กิจกรรมด้านสารสนเทศ (Information activities)

จากข้อมูลปี พ.ศ.2545 พบว่าครึ่งหนึ่งของโรงงานที่เข้าร่วมสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานได้ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ระบบบริหารจัดการด้านพลังงานให้ประโยชน์แก่โรงงานที่เข้าร่วม เช่น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้น เพิ่มกำลังการผลิต และเพิ่มการว่าจ้างแรงงาน เป็นต้น ในเดนมาร์กพบว่าความกระตือรือร้นในการจัดการด้านพลังงานมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับจำนวนแรงงาน ข้อตกลงด้านภาษีคาร์บอนไดออกไซด์ เงินช่วยเหลือ และความถี่ในการตรวจสอบด้านสิ่งแวดล้อมของรัฐบาล

ไอร์แลนด์

หน่วยงานสนับสนุนด้านพลังงานของไอร์แลนด์(SEI) ได้มีการกระตุ้นการใช้มาตรฐานการจัดการพลังงาน IS 393 ที่เริ่มใช้ในปี พ.ศ.2548 โดยมีหัวข้อในการฝึกอบรมด้านการจัดการพลังงาน เช่น

- เป้าหมายการจัดการด้านพลังงาน
- การเทียบเคียง (Benchmarking)
- การสร้างตัวชี้วัดสมรรถนะพลังงาน
- ภาพรวมของโอกาสในการปรับปรุงพลังงานโดยมุ่งเน้นในเรื่องของระบบการขับเคลื่อนเครื่องจักร

ได้มีการกระตุ้นโรงงานโดยให้เข้าร่วมเครือข่ายพลังงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่(LIEN) เพื่อแบ่งปันและเรียนรู้จากการนำมาตรฐานการจัดการพลังงานไปประยุกต์ใช้ และพื้นที่ที่มีความเข้มพลังงานในไอร์แลนด์ส่วนใหญ่เข้าร่วมในโครงการข้อตกลงด้านพลังงาน ซึ่งข้อกำหนดในการเข้าร่วมจะต้องมีการนำมาตรฐาน IS 393 ไปประยุกต์ใช้แต่ได้รับการรับรองจากหน่วยงานนอก

เนเธอร์แลนด์

สำหรับแนวทางในการจัดตั้งระบบการบริหารจัดการด้านพลังงานในประเทศเนเธอร์แลนด์นั้น จะจัดตั้งโดยอ้างอิงกับระบบการบริหารจัดการทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ระบุในมาตรฐาน ISO เพื่อให้เกิดข้อตกลงระยะยาว (Long-Term Agreement: LTA) ซึ่งได้เริ่มจัดทำข้อกำหนดของระบบการบริหารจัดการด้านพลังงานครั้งแรกในปี พ.ศ.2541 และเข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของกิจกรรมข้อตกลงระยะยาวในปี พ.ศ.2543 ซึ่งบริษัทที่เข้าร่วมข้อตกลงนี้จะมีข้อผูกมัดที่ต้องทำดารจัดทำระบบการจัดการพลังงานภายใน 2 ปี

บริษัทที่มีความเข้มพลังงานสูงกว่า 150 บริษัท ซึ่งมีอัตราการใช้พลังงานร้อยละ 70 ของพลังงานที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั้งหมด มีการทำสัญญาที่ชัดเจนกับทางภาครัฐในเรื่องของการเทียบเคียงสมรรถนะ ซึ่งบริษัทเหล่านี้ จำเป็นจะต้องติดอันดับ 10 เปอร์เซ็นต์ของบริษัทที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูงที่สุดในกลุ่มอุตสาหกรรมนั้นๆในระดับนานาชาติ โดยที่บริษัทเหล่านี้ส่วนมากได้ผ่านการรับรอง ISO 14001 แล้ว

สวีเดน

ในปี พ.ศ.2548 ประเทศสวีเดนจึงได้มีการกำหนดภาษีสัดส่วนของปริมาณการผลิตต่อปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ไป จึงทำให้มีการจัดตั้งโครงการสำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานสำหรับอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานสูง ซึ่งโดยโครงการเสนอการลดภาษีให้กับบริษัทที่เข้าร่วมโครงการ แต่บริษัทนั้นๆ ต้องได้รับใบรับรองทางด้านมาตรฐานของระบบบริหารจัดการทางด้านพลังงาน และมีสัญญาในเรื่องของการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยโครงการนี้มีระยะเวลา 5 ปี และต้องมีการส่งรายงานการดำเนินการในสิ้นปีที่สอง ซึ่งรายงานประกอบไปด้วย

- การจัดทำมาตรฐานระบบการบริหารจัดการทางด้านพลังงาน และได้รับเอกสารรับรองจากหน่วยงานรับรองมาตรฐานคุณภาพที่เชื่อถือได้
- การตรวจวัดประสิทธิภาพเชิงลึกทางด้านพลังงานแบบสมบูรณ์ การวิเคราะห์ปริมาณพลังงานที่ใช้เป็นฐานในการเปรียบเทียบ และการระบุโอกาสในการปรับปรุง รวมทั้งรายการการประมาณการโครงการพลังงาน ซึ่งมีระยะเวลาคืนทุนสามปีหรือต่ำกว่า โดยจะส่งให้ Swedish Energy Agency
- สร้างขั้นตอนการจัดซื้อเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง
- สร้างขั้นตอนการวางแผนและการดำเนินการ

เมื่อสิ้นสุดปีที่ 5 บริษัทที่เข้าร่วมโครงการจะต้องดำเนินการโครงการที่ได้นำเสนอไว้ มีการทำงานตามมาตรฐานระบบการบริหารจัดการทางด้านพลังงานอย่างต่อเนื่องและการจัดซื้อตามขั้นตอนที่เสนอไว้ รวมทั้งประเมินผลที่ได้จากขั้นตอนการวางแผน ซึ่งในเดือนมกราคม พ.ศ. 2550 ได้มีบริษัทขอเข้าร่วม 126 บริษัท ซึ่งรวมแล้วมีปริมานการใช้ไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 50 ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั้งหมด โดยในการเข้าร่วม บริษัทต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม กล่าวคือ ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิต และมีต้นทุนทางด้านพลังงานอย่างต่ำร้อยละ 3 ของมูลค่าการผลิต หรือมีการจ่ายอย่างต่ำร้อยละ 0.5 ของมูลค่าเพิ่มของสัดส่วนพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการจ่ายภาษี เพื่อที่จะได้รับเงินสนับสนุนในการกำเนินโครงการให้เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งทางภาครัฐได้ให้การช่วยเหลือบริษัทที่เข้าร่วมโครงการ โดยการตีพิมพ์คู่มือในด้านการบริหารจัดการทางด้านพลังงาน การตรวจวัดประสิทธิภาพและการวิเคราะห์พลังงาน แนวทางในการวางแผนและการจัดซื้อ รวมทั้งแม่แบบในการคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของโครงการ แต่ยังไม่มีการกำหนดหน้าที่ของการฝึกอบรมให้กับบริษัทที่เข้าร่วมโครงการอย่างชัดเจน

<u>สหรัฐอเมริกา</u>

ในปี พ.ศ.2543 Georgia Institute of Technology ได้จัดทำมาตรฐานของการบริหารจัดการทางด้านพลังงานสำหรับอุตสาหกรรม จากนั้น American National Standards Institute (ANSI) ได้นำมาทำการปรับปรุงแต่ไม่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้ในสหรัฐอเมริกา แต่กลับมีการพัฒนาเกี่ยวกับความสามารถทางด้านเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านพลังงานโดยเฉพาะระบบมอเตอร์ ระบบไอน้ำ และระบบการผลิตแบบใช้ความร้อน (Process heating systems)

ตั้งแต่ปี พ.ศ.2536 เป็นต้นมา ทางกระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกา ได้จัดทำข้อมูลสำหรับการฝึกอบรมพนักงานทางด้านเทคนิคและได้ตีพิมพ์เผยแพร่สู่อุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อช่วยให้อุตสาหกรรมมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ตามแนวทางของโครงการวิธีปฏิบัติที่ดีที่สุด (Best Practices) จนกระทั่งในปี พ.ศ.2548 ทางกระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกา ได้จัดทำโครงการ Energy Saving Assessment(ESA) สำหรับโรงงานกว่า 200 แห่งที่มีการใช้ระบบไอน้ำหรือระบบความร้อนในกระบวนการผลิตและมีการใช้พลังงานรายปีตั้งแต่ 1 ตันบีทียู(TBtu) ขึ้นไป ซึ่งหลังจากได้เริ่มโครงการไปเป็นระยะเวลา 8 เดือน ได้มีโรงงานจำนวน 134 โรงงานได้ส่งรายงานกลับเข้ามา และสามารถสรุปมูลค่าพลังงานที่ลดลงไปได้ถึง 222 ล้านดอลล่าสหรัฐฯ (เป็นมูลค่าที่รวบรวมจากทั้งโครงการที่เสร็จสิ้นแล้ว โครงการที่อยู่ในระหว่างการดำเนินการและโครงการที่อยู่ในช่วงการวางแผน) ซึ่งจากความสำเร็จนี้ทางกระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกา จึงได้มีการ

วางแผนสำหรับปี พ.ศ.2549 โดยจะขยายขอบเขตของโรงงานให้ครอบคลุมถึงโรงงานที่ใช้ระบบมอเตอร์อีกด้วย

ในปี พ.ศ.2545 องค์การการรักษาสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency: USEPA) ได้ริเริ่มโครงการความร่วมมือสำหรับการรับมือกับการแปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศของโลก ซึ่งเกิดจากปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มสูงขึ้น โดยมีบริษัทเข้าร่วม 59 บริษัท ซึ่งบริษัทเหล่านี้จะต้องมีการส่งรายงานเกี่ยวกับการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละปี และในปี พ.ศ.2546 องค์การการรักษาสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกาได้เสนอแนะข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางเกี่ยวกับการบริหารจัดการทางด้านพลังงานและการเทียบเคียงสมรรถนะ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ ENERGY STAR โดยโครงการนี้ได้มีการจัดทำตัวชี้วัดทางด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ซึ่งบริษัทเหล่านั้นสามารถนำไปใช้ในการเทียบเคียงสมรรถนะของตนเองเพื่อให้เกิดการพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

จากโครงการต่างๆที่ได้กล่าวไปนั้น เป็นการสนับสนุนบริษัทต่างๆในเรื่องของการบริหารจัดการพลังงาน แต่ไม่ใช่เป็นการสนับสนุนในด้านของการใช้มาตรฐานในด้านการบริหารจัดการพลังงาน แต่อย่างไรก็ดีกระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกาและองค์การการรักษาสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกาได้ร่วมกันจัดตั้งโครงการการออกใบรับรองให้กับโรงงานที่มีการใช้มาตรฐานในด้านการบริหารจัดการพลังงานเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นมาตรฐานที่อ้างอิงจากมาตรฐานในด้านการบริหารจัดการพลังงาน

<u>จีน</u>

หน่วยงานรับรองมาตรฐานของจีน(The China Standard Certification Center: CSC) เป็นหน่วยงานที่จัดตั้งโดยรัฐบายเพื่อพัฒนาอนุกรมมาตรฐานการจัดการด้านพลังงาน ซึ่งมีแผนการออกข้อกำหนดระบบมาตรฐานการจัดการด้านพลังงาน มาตรฐานการจัดการด้านพลังงาน และแนวทางการนำไปใช้และการตรวจติดตาม มาใช้ในเดือนมีนาคม พ.ศ.2551 รัฐบาลจีนได้เลือกบริษัทที่มีการบริโภคพลังงานใน 1,000 อันดับแรก เพื่อทำลดการใช้พลังงานให้ได้ตามเป้าหมายการลดพลังงานของประเทศ

# ภาคผนวก ช
# การประเมินการใช้พลังงานในโรงงานเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน และลดค่าใช้จ่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**บทนำ**

การประเมินการใช้พลังงานในโรงงาน Anchor Glass ที่ Warner Robins และ Jacksonville แสดงให้เห็นถึงโอกาสในการปรับปรุงการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ โดยจากการประเมินพบว่าโรงงานอาจสามารถประหยัดการใช้เชื้อเพลิงได้กว่าปีละ 220,000 ล้าน BTU อีกทั้งยังอาจลดปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าลงได้อีกถึงปีละ 4 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมงด้วย ทั้งนี้ต้นทุนดำเนินการสำหรับโครงการต่างๆ ในทั้งสองโรงงานมีค่าอยู่ที่ $800,000 และ $250,000 ตามลำดับ ซึ่งสามารถคืนทุนได้ในช่วงเวลา 1 – 2 ปีเท่านั้น

**ประวัติบริษัท**

Anchor Glass Container Corporation เป็นโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์แก้วที่ใหญ่เป็นอันดับ 3 ของอเมริกา และเนื่องจากการผลิตผลิตภัณฑ์แก้วนั้นจำเป็นต้องใช้พลังงานสูง การควบคุมต้นทุนพลังงานจึงเปรียบเสมือนเป็นภารกิจหลักที่ผู้บริหารจะต้องแก้ไข และใช้เป็นข้อได้เปรียบในการแข่งขันในตลาดการค้าแก้วซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ จากการประเมินที่ Warner Robins, Georgia และ Jacksonville, Florida พบว่าที่ Warner Robins มีเครื่องจักร และอุปกรณ์หลัก คือ เตาหลอม 2 เตา และเครื่องจักรขึ้นรูปขวด ซึ่งมีการผลิตจริงกว่าวันละ 4 ล้านขวด โดยมีพื้นที่ทั้งหมดของโรงงาน 860,000 ตารางฟุตถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนผลิตและบรรจุภัณฑ์ 336,000 ตารางฟุต ส่วนจัดเก็บ 500,000 ตารางฟุต ส่วนสนับสนุนการผลิต 12,400 ตารางฟุต และส่วนสำนักงาน 19,000 ตารางฟุต สำหรับการใช้พลังงานไฟฟ้า และก๊าซ อยู่ที่ 12.5 เมกกะวัตต์ชั่วโมง และ 4 ล้านลูกบาศก์ฟุตต่อวัน

ส่วนโรงงานที่ Jacksonville นั้นมีการใช้พลังงานเพียงครึ่งหนึ่งของโรงงานที่ Warner Robins เนื่องจากมีการลดขนาดลงในช่วงเวลาที่ผ่านมา แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ผลิตส่วนใหญ่ก็มีเป็นไปในลักษณะเดียวกัน

**ภาพรวมของการประเมิน**

เตาหลอมของบริษัทส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Gas – Fired ซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก และจากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของเตาหลอมนั้นจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบทำความร้อน ตลอดจนอุปกรณ์สนับสนุนอื่นๆ ซึ่งมีการสูญเสียพลังงานค่อนข้างมาก ดังนั้นเป้าหมายหลักของ Anchor น่าจะอยู่ที่การลดความสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยไม่ละเมิดข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว และกระจก (ส่วนใหญ่จะกล่าวถึงข้อกำหนดเกี่ยวกับการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตเป็นส่วนใหญ่) โดยมีเจ้าหน้าที่ที่ทำหน้าที่ประเมินโรงงานนั้นมาจากหลายส่วนงาน เป็นต้นว่า ตัวแทนของโรงงานทั้ง 2 แห่ง ตัวแทนจากบริษัทที่ปรึกษาด้าน

พลังงาน และตัวแทนจากภาครัฐในส่วนของสำนักงานเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Office of Industrial Technology) หน่วยงานพลังงานแห่งสหรัฐอเมริกา (The U.S. Department of Energy, DOE)

**การดำเนินการประเมินพลังงาน**

ทีมงานได้เข้าทำการตรวจสอบ และประเมินโรงงานทั้ง 2 โดยแบ่งรูปแบบของการตรวจประเมินออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. ส่วนนำเข้าพลังงานสู่โรงงาน
2. ส่วนการดำเนินการของโรงงาน
3. ส่วนผลลัพธ์ของกระบวนการ ซึ่งรวมถึงการจัดการของเสีย และความร้อน

จากการประเมินตามส่วนต่างๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้น ทีมงานตรวจประเมินสามารถสรุปแนวทางการปรับปรุงออกได้เป็น 6 แนวทาง คือ

1. ในส่วนของ Cogeneration ให้ทำการติดตั้ง Gas Turbine พร้อมด้วยระบบ Waste Recovery System
2. ในส่วนของ Waste Heat Recovery ให้ทำการติดตั้งระบบการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่
3. ในส่วนของมอเตอร์ขับเคลื่อน ให้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ใหม่ทั้งหมด
4. ในส่วนของระบบอากาศอัด ให้ทำการซ่อมบำรุงท่อขนส่งที่รั่ว และวางแนวการขนส่งอากาศอัดทั้งหมดให้มีความเหมาะสมมากขึ้น
5. ในส่วนของระบบแสงสว่าง ให้ทำการปรับปรุงระบบแสงสว่างใหม่ทั้งหมด
6. ในส่วนของการแปรภาระงาน ให้ทำการติดตั้ง VSD ในแต่ละกระบวนการตามความเหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ผลลัพธ์และข้อเสนอแนะ**

ผลลัพธ์ของการดำเนินการบางส่วนสามารถแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ ข1 ตารางค่าประเมินผลลัพธ์ที่ประหยัดได้จากการดำเนินการ

| มาตรการ | ผลการอนุรักษ์พลังงาน | | ระยะเวลาคืนทุน(ปี) |
|---|---|---|---|
| | MMBtu/yr | kWh/yr | |
| การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ | 220,388 | - | 1 |
| ปรับปรุงระบบอากาศอัด | - | 2,056,250 | 1.2 |
| ติดตั้ง VSD ที่ปั๊มของหอน้ำหล่อเย็น | - | 524,600 | 1.8 |
| ติดตั้ง VSD ที่ Air blower ของเตาหลอม | - | 808,400 | 1.7 |
| ติดตั้ง VSD ที่ Air blower ของเครื่องจักรต่างๆ | - | 560,720 | 1.8 |

หมายเหตุ ทั้งนี้ผลลัพธ์ในตารางที่ 1 เป็นเพียงตัวเลขที่ประเมินขึ้นเท่านั้น

**ภาพรวมของการดำเนินการ**

**การปรับปรุงประสิทธิภาพของรอบการทำความร้อน**

ในการหลอมแก้วนั้นจำเป็นต้องใช้พลังงานจำนวนมากซึ่งความร้อนส่วนใหญ่ที่โรงงานใช้ได้มากจาก 2 แหล่ง คือ

1. พลังงานความร้อนที่ได้มาจากเชื้อเพลิง ซึ่งแม้ว่ามีราคาถูก แต่กลับมีความสูญเสียค่อนข้างสูง โดยการสูญเสียความร้อนส่วนใหญ่กว่าร้อยละ 50 – 60 เกิดจากการ Over – Melted

2. พลังงานความร้อนที่ได้มาจากพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแม้ว่ามีราคาแพง แต่ก็แทบจะไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นเลย

จากการศึกษาพบว่า การใช้ความร้อนจากเชื้อเพลิงนั้นควรได้รับการปรับปรุงใหม่ โดยเราจำเป็นต้องจัดหาระบบการนำความร้อนที่สูญเสียไปกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งอาจดำเนินการได้หลายแนวทางเช่น การใช้ Checker Brick Regenerator ในการกักเก็บความร้อนส่วนเกิน เพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ หรือการปรับปรุงรอบการทำความร้อนให้เหมาะสม และมีประสิทธิภาพสูงสุด

**การปรับปรุงระบบอากาศอัด**

จากการศึกษาพบว่าความต้องใช้อากาศอัดของแต่ละกระบวนการนั้นมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ในบางจุดอาจมีความต้องการใช้สูงถึง 100 ปอนด์ต่อตารางฟุต ในขณะที่บางจุดกลับมีความต้องการใช้เพียง 50 ปอนด์ต่อตารางฟุตเท่านั้น

นอกจากนี้ยังพบอีกว่าความดันของอากาศมีความดันตกเกิดขึ้นบ่อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการรั่วไหลหรือประสิทธิภาพของระบบอากาศอัดเอง ดังนั้นในการปรับปรุงควรดำเนินการดังนี้

- ขจัดคอขวดของระบบอากาศอัด และจัดหาที่จัดเก็บอากาศอัดความดันสูงเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการที่ต้องการใช้อากาศอัดความดันต่ำ
- จัดหาระบบควบคุมอากาศอัดที่มีประสิทธิภาพ
- ลดปริมาณการรั่วไหลของอากาศอัดในระบบลง

**การจัดการมอเตอร์และอุปกรณ์ขับเคลื่อน**

ในการจัดการมอเตอร์ และอุปกรณ์ขับเคลื่อนนั้น สามารถดำเนินการได้โดย

- พิจารณาต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน แทนการซ่อมบำรุงมอเตอร์เก่าที่ใช้อยู่
- แทนที่มอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็นด้วยมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงที่มีขนาดเล็กตลอดจนพิจารณาการเปลี่ยนมอเตอร์ที่ใช้อยู่ให้เป็นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงแทน

**การติดตั้ง VSD ในปั๊ม และ Blower**

ปั๊ม และ Blower นั้นอาจใช้ไปในกิจกรรมที่แตกต่างกันออกไป แต่จากการสำรวจพบว่า ปั๊ม และ Blower ที่ใช้ในโรงงานทั้ง 2 แห่ง ถูกใช้ไปในการหล่อเย็นเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ปั๊ม และ Blower ที่มีอยู่ก็ไม่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วรอบได้ ทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายไปโดยเปล่าประโยชน์ สำหรับการปรับปรุงปั๊มและBlower นั้นสามารถทำได้โดยการพิจารณาติดตั้ง VSD เพื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหล และความดันของของไหลตามภาระงานที่เกิดขึ้นจริง

**การปรับปรุงระบบแสงสว่าง**

ในการปรับปรุงระบบแสงสว่างนั้น สามารถกระทำได้โดย

- การนำเอาแสงธรรมชาติเข้ามาทดแทนการใช้หลอดไฟฟ้า
- การติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวในบริเวณที่ไม่ค่อยมีกิจกรรม
- จัดหาระบบแสงสว่างที่มีประสิทธิภาพ และมีต้นทุนต่ำเข้ามาทดแทนระบบแสงสว่างที่มีอยู่ โดยคำนึงถึงความคุ้มค่าตลอดอายุการใช้งาน และความเหมาะสมเป็นหลักสำคัญ

**การจัดหาพลังงานที่เหมาะสม**

เนื่องจากปัจจุบัน ราคาของพลังงานนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ดังนั้นผู้บริหารจึงจำเป็นต้องพิจารณาหาแหล่งพลังงานทางเลือกอื่นที่มีความเหมาะสม และเข้ากับการดำเนินการขององค์กร เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากความผันผวนของราคาพลังงานลง

# ภาคผนวก ซ
# การปรับปรุงระบบอากาศอัดในอุตสาหกรรมผลิตกระจกรถยนต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**บทนำ**

ในปี ค.ศ. 2000 ที่ผ่านมา Visteon Corporation ได้ทำการปรับปรุงระบบอากาศอัดในโรงงานผลิตกระจกรถยนต์ที่ Nashville, Tennessee การปรับปรุงดังกล่าวประกอบไปด้วย การเปลี่ยนเครื่องอัดอากาศให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงรูปแบบของการขนส่งอากาศอัดใหม่ ส่งผลทำให้ลดค่าใช้จ่ายได้ถึงปีละ $711,000 โดยใช้เงินลงทุนเพียง $724,000 และสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลาเพียงปีเศษเท่านั้น

**ประวัติของโรงงาน**

Visteon Corporation เป็นบริษัทผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ซึ่งแยกตัวออกมาจากบริษัท Ford Motor Corporation ซึ่งมีพนักงานกว่า 81,000 คน โดยมีเครือข่ายอยู่ในประเทศต่างๆ กว่า 23 ประเทศทั่วโลก ผลิตภัณฑ์ของ Visteon Corporation นั้นมีอยู่ด้วยกันมากมาย หลากหลายชนิด แต่ผลิตภัณฑ์หลักของบริษัทมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด คือ Dynamics and Energy Conversion, Comfort, Communication and Safety และกระจกรถยนต์

สำหรับโรงงานผลิตกระจกรถยนต์ที่ Nashville, Tennessee นั้นเริ่มทำการผลิตมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1956 ซึ่งจวบจนปัจจุบันได้มีการปรับเปลี่ยน และขยายโรงงานมากว่า 10 ครั้งแล้ว ส่งผลทำให้มีพื้นที่กว่า 2 ล้านตารางฟุต ในขณะเดียวกัน ปริมาณการผลิตก็เพิ่มสูงขึ้นกว่า 2 เท่าของกำลังการผลิตเริ่มแรกเลยทีเดียว

**ระบบอัดอากาศในโรงงาน**

ระบบอัดอากาศนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตกระจกรถยนต์ เนื่องจากเราจำเป็นต้องใช้อากาศอัดในการบีบอัดแม่แบบ และยังจำเป็นต้องนำไปใช้ในกระบวนการอื่นๆ อีกมากมาย ทั้งนี้ก่อนการปรับปรุงทางโรงงานมีเครื่องอัดอากาศอยู่ทั้งสิ้น 5 เครื่อง โดย 4 เครื่องแรกเป็นแบบ Centrifugal Water – Cooled ขนาด 600 แรงม้า ส่วนอีกเครื่องที่เหลือเป็นแบบ Rotary Screw ขนาด 250 แรงม้า เครื่องอัดอากาศเหล่านี้มักเสียอยู่บ่อยครั้ง ทำให้ทางโรงงานจำเป็นต้องเสียค่าซ่อมบำรุงเป็นจำนวนมาก ทางโรงงานจึงได้ติดทำการปรับปรุงระบบอากาศอัดเสียใหม่

**ภาพรวมของการปรับปรุง**

ในปี ค.ศ. 1999 ทางโรงงานได้ทำการจัดจ้างผู้เชี่ยวชาญเข้ามาเพื่อทบทวนการบริหารจัดการอุปกรณ์สนับสนุนการผลิต โดยในรายงานได้ระบุถึงปัญหาสำคัญที่เกี่ยวข้องกับระบบอากาศอัดไว้ ดังนี้

- ปัญหาการรั่วไหลของท่อส่งอากาศอัด
- ปัญหาเรื่องความดันของอากาศอัดที่มากเกินกว่าความต้องการใช้งานของ เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ
- ปัญหาด้านระยะทาง ซึ่งพบว่าเครื่องอัดอากาศที่มีอยู่ถูกติดตั้งอยู่ในบริเวณ Powerhouse ที่อยู่ห่างไกลออกไปจากส่วนที่เหลือของโรงงานทำให้เกิดความดันตก และจำเป็นต้องสร้างอากาศอัดที่มีความดันสูงเกินความจำเป็น

จากการศึกษายังพบว่า ด้วยเครื่องอัดอากาศแบบ Centrifugal Water – Cooled เพียง 2 เครื่อง ก็เพียงพอต่อความต้องการใช้อากาศอัดของโรงงานแล้ว แต่เนื่องจากเครื่องอัดอากาศมีสภาพที่ย่ำแย่ จึงจำเป็นต้องมีเครื่องอัดอากาศหลายตัว และในกรณีที่เครื่องอัดอากาศไม่เพียงพอทางโรงงานก็จำเป็นต้องเช่าเครื่องอัดอากาศเข้ามา ซึ่งต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายถึงวันละ $1,000

**การปรับปรุงระบบอากาศอัด**

หลังจากที่ได้ทำการทบทวนการบริหารจัดการอุปกรณ์สนับสนุนแล้ว วิศวกร และผู้บริหารได้ตัดสินใจเปลี่ยนเครื่องอัดอากาศใหม่ทั้งหมด โดยหันมาใช้เครื่องอัดอากาศแบบ Lubricant Free, Rotary Screw หล่อเย็นแบบ Closed Loop ขนาด 450 แรงม้า และ 275 แรงม้า อย่างละ 2 และ 1 ตัวตามลำดับ โดยได้ทำการติดตั้งเครื่องอัดอากาศเหล่านี้ไว้ที่ศูนย์กลางของโรงงานแทน เพื่อลดปัญหาความดันตกที่เกิดขึ้น

นอกจากนี้ทางผู้บริหารยังได้กำหนดให้มีการซ่อมบำรุงท่อขนส่งอากาศอัดทั้งหมดใหม่ เพื่อลดการรั่วไหลของอากาศอัดที่เกิดขึ้น ซึ่งแต่เดิมเครื่องอัดอากาศต้องทำงานที่ความดัน 100 psi ภายหลังก็สามารถปรับปรุงลดค่าความดันดังกล่าวลงมาอยู่ที่ 90 +/- 2 psi ตามความต้องการใช้จริงได้ในที่สุด

**ผลลัพธ์**

ด้วยการปรับปรุงแบบใหม่ โรงงานสามารถเดินเครื่องอัดอากาศขนาด 450 แรงม้าเพียงเครื่องเดียว (จากเดิมที่ต้องใช้เครื่องอัดอากาศขนาด 600 แรงม้า ถึง 2 ตัว และเครื่องอัดอากาศขนาดเล็กในช่วงเวลา Peak) ส่งผลทำให้สามารถประหยัดไฟฟ้าไปได้ปีละกว่า 7.9 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง หรือคิดเป็นเงินกว่า $238,000 ต่อปี ซึ่งนอกเหนือไปจากค่าไฟฟ้าแล้วโรงงานยังสามารถลดค่าใช้จ่ายลงไปได้อีก

- $33,000 เนื่องจากการลดระยะทาง
- $40,000 เนื่องจากการลดระบบปั๊มน้ำที่ไม่จำเป็น (ส่งผลทำให้สามารถประหยัดน้ำลงไปได้อีก 1.5 ล้านแกลอนต่อปี)
- $400,000 เนื่องจากการซ่อมบำรุงที่ลดต่ำลง

กล่าวโดยสรุปแล้วโรงงานสามารถลดค่าใช้จ่ายลงไปได้รวม $711,000 ในขณะที่ต้นทุนการดำเนินการทั้งหมดอยู่ที่ $724,000 จึงทำให้สามารถคืนทุนได้ในระยะเวลาเพียง 1 ปีเศษเท่านั้น

**แนวคิดที่ได้รับ**

การจัดการระบบอากาศอัดที่ไม่เหมาะสมนั้นอาจทำให้ความสูญเปล่าทั้งในแง่ของพลังงาน และต้นทุนการผลิต ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบ และติดตั้งระบบอัดอากาศที่เหมาะสม ซึ่งไม่แปรเปลี่ยนไปตามปริมาณการผลิตมากจนเกินไป (นโยบายแบบ Level Strategy) นอกจากนี้ยังอาจประยุกต์เอาแนวทางการปรับปรุงเครื่องอัดอากาศที่เสนอไว้ในกรณีศึกษานี้ไปใช้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงสุดด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ฌ

## กรณีศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของโรงงานผลิตกระจก Corning Inc.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาพรวม**

ในปี ค.ศ. 2000 โรงงาน Corning glass ที่ Greenville, Ohio มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเกือบ 114 ล้าน kWh และก๊าซธรรมชาติเกือบ 308,000 ล้าน Btu ในกระบวนการผลิตกระจก คิดเป็นต้นทุนทั้งหมดประมาณ 6.4 ล้านเหรียญสหรัฐ การตรวจประเมินประสิทธิภาพพลังงาน การปล่อยก๊าซพิษและ ผลิตภาพ ของทั้งโรงงาน จัดดำเนินการขึ้นเพื่อค้นหาวิธีในการลดการใช้พลังงาน และต้นทุนต่างๆ และเพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลจากการตรวจประเมินแสดงให้เห็นว่า สามารถลดการใช้ก๊าซธรรมชาติและไฟฟ้าลงได้ร้อยละ 40 และ 60 ตามลำดับ หากมีการปรับเปลี่ยนบางประการในโรงงานและกระบวนการผลิต

**ประโยชน์ที่ได้รับ**

- ระบุว่ามีผลประหยัดด้านต้นทุนในการดำเนินการและพลังงาน ปีละประมาณ 26 ล้านเหรียญสหรัฐ
- ระบุถึงวิธีการต่างๆ สำหรับลดการใช้ก๊าซธรรมชาติและไฟฟ้าลงได้ปีละ 123,000 ล้าน Btu และ 72.2 ล้าน kWh ตามลำดับ และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงได้ปีละ 180 ล้านปอนด์
- มาตรการทั้งหมดที่เสนอแนะจากการตรวจประเมินมีระยะเวลาในการคืนทุนโดยฉลี่ย 5 เดือน

**การนำไปประยุกต์ใช้**

การผลิตกระจกใช้ก๊าซธรรมชาติและไฟฟ้าในปริมาณที่สูง และอาจปล่อยก๊าซเรือนกระจกอาทิ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อม การตรวจประเมินแสดงให้เห็นว่าในอุตสาหกรรมที่มีความเข้มพลังงานสูงเช่นนี้ สามารถลดต้นทุนต่างๆ และการใช้พลังงาน ตลอดจนการปล่อยก๊าซพิษ ลงได้อย่างมาก นอกจากนี้โครงการต่างๆ ที่ระบุไว้ยังสามารถนำไปใช้ดำเนินการกับโรงงานผลิตกระจก และอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้อีก

**ผู้มีส่วนร่วมในโครงการ**

โครงการเทคโนโลยีทางอุตสาหกรรม (ITP) สังกัดแผนกพลังงานแห่งสหรัฐอเมริกา (DOE) ได้ร่วมสนับสนุนการตรวจประเมินผ่านทางกระบวนการเชิงแข่งขัน (competitive process) DOE ได้สนับสนุนให้มีการตรวจประเมินประสิทธิภาพพลังงานทั้งโรงงาน อันจะนำไปสู่การปรับปรุงในด้านประสิทธิภาพพลังงาน ผลิตภาพ และความสามารถในการแข่งขันระดับโลกของอุตสาหกรรม รวมถึงการลดของเสียและการปล่อยของเสียต่างๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อม ในกรณีนี้ DOE ได้ให้เงินสนับสนุนจำนวน 100,000 เหรียญสหรัฐ จากต้นทุนในการตรวจประเมินทั้งหมด 218,000 เหรียญสหรัฐ

**ประวัติบริษัท**

Corning, Inc. เป็นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับการส่องสว่าง (lighting products) ที่มีอายุถึง 150 ปี และมีโรงงานอยู่หลายแห่งในอเมริกาเหนือ โรงงานที่ Greenville, Ohio สร้างขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1957 เพื่อผลิตไฟหน้ารถยนต์ โรงงานนี้ผลิตชิ้นส่วนกระจกสำหรับหลอดไฟที่มีโคมสะท้อนอลูมิเนียมทรงพาราโบล่า หลอดไฟชนิด (Ultra-High Precision หรือ UHP) และโคมไฟหน้าชนิด sealed-beam หลอดชนิด UHP นำไปใช้ในเครื่องโปรเจคเตอร์ และนำไปใช้ในงานในอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ตลาดของหลอดไฟเหล่านี้กำลังเติบโต แต่ตลาดของไฟหน้าแบบ sealed-beam กำลังถดถอยลง

โรงงานที่ Greenville ตั้งอยู่บนพื้นที่รวม 35 เอเคอร์ โดยแบ่งเป็นส่วนที่ใช้เป็นโกดังและส่วนที่ใช้ในการผลิตประมาณ 150,000 ตารางฟุต และ 250,000 ตามลำดับ และมีจำนวนพนักงานกว่า 350 คน โรงงานนี้เปิดทำการปีละ 50 สัปดาห์ ตลอด 7 วัน โดยแบ่งการทำงานออกเป็นวันละ 3 กะๆ ละ 8 ชั่วโมง มีเตาเผาอยู่ 2 เครื่อง แต่ละเครื่องมีกำลังการผลิต 100 ตันต่อวัน เตาเผาทั้งคู่มีการวัดค่าและควบคุมแบบ on-line เพื่อการเฝ้าติดตามอุณหภูมิและการปล่อยก๊าซ แบบต่อเนื่อง กระจกที่หลอมเหลว (โดยทั่วไปมักจะเป็นชนิด borosilicate) จะถูกป้อนเข้าสู่แม่พิมพ์แบบกดซึ่งมี 12 ช่อง ที่นิยมใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการตอกพิมพ์ (stamping operation) ผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (semi-finished product) จะผ่านเข้าสู่กระบวนการขั้นต่อๆ ไป และผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (heat treatment) พนักงานฝ่ายบรรจุภัณฑ์ จะตรวจสอบและเก็บรวบรวมผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย เข้าสู่ตู้บรรจุสินค้าเพื่อส่งต่อให้ลูกค้า

การผลิตกระจกเป็นกระบวนการที่มีค่าความเข้มพลังงานสูง เตาที่มีการแบ่งเป็นส่วน (zoned furnace) ทำงานโดยใช้พลังงานจากก๊าซธรรมชาติและไฟฟ้าเป็นสัดส่วนร้อยละ 30 และ 70 ตามลำดับ ในขณะที่เตาเครื่องที่สองใช้พลังงานจากไฟฟ้าทั้งหมดสำหรับการหลอมเหลว ยกเว้นในช่วงที่เริ่มเดินเครื่อง โรงงานแห่งนี้มีหม้อกำเนิดไอน้ำ (gas-fired boiler) จำนวน 3 เครื่อง เพื่อใช้ผลิตไอน้ำที่มีอัตราการไหล 5,000 ปอนด์ต่อชั่วโมง มีมอเตอร์ขนาด 450 ถึง 250 แรงม้า (ใช้แรงดันไฟฟ้า 2,300 โวลต์) จำนวน 5 เครื่อง และมอเตอร์ขนาด 300 ถึง 150 แรงม้า (ใช้แรงดันไฟฟ้า 480 โวลต์) เพื่อใช้ผลิตอากาศอัด (compressed air) ที่มีความดัน 50 ถึง 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ระบบแสงสว่างหลักภายในโรงงานนี้เป็นหลอดไฟชนิดไอโซเดียมความดันสูง (high-pressure sodium vapor lights) ขนาด 400 วัตต์ มีเครื่องปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ขนาด 25 แรงม้า จำนวน 5 เครื่อง ส่วนอุปกรณ์อื่นที่ใช้ไฟฟ้าในปริมาณที่สูงนั้นรวมถึง เครื่อง press จำนวน 12 เครื่องที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กระจก

**การตรวจวัดพลังงาน**

โรงงาน Greenville และ ศูนย์เทคโนโลยีวัสดุเอดิสัน (Edison Material Technology Center (EMTEC) ได้ร่วมกันดำเนินการตรวจประเมินทั่วทั้งโรงงาน EMTEC มีสมาชิกในภาคอุตสาหกรรมอยู่มากกว่า 140 ราย ซึ่งมีจำนวนหลายรายที่พัฒนาเทคโนโลยีที่ทันสมัยและเพิ่งเกิดขึ้นใหม่ ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพพลังงาน สำนักงานด้านประสิทธิภาพพลังงานแห่ง Ohio; Mid-West Building Diagnostics; D.L. Steiner; CSGI, Inc.; และ Dr. Kelly Kissock แห่งมหาวิทยาลัย Dayton เข้าร่วมตัวกันตั้งเป็นคณะตรวจประเมิน

การตรวจวัดมีจุดมุ่งหมายเพื่อค้นหาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานของโรงงาน ลดของเสียและสารมลพิษ และเพิ่มผลิตภาพ คณะตรวจวัดได้ตรวจอุปกรณ์และระบบทั้งหมดที่ใช้พลังงานสูง เพื่อหาผลประหยัดที่เป็นไปได้ มีการศึกษากระบวนการผลิตเพื่อพิจารณาดูว่ามีการปรับปรุงตามแนวทางของ lean manufacturing ใดที่สามารถนำมาดำเนินการได้บ้าง คณะตรวจวัดยังได้ทำการประเมินการจัดการพลังงานแบบ demand-side, best practice, การนำเทคโนโลยีที่เพิ่งเกิดขึ้นมาใช้งานจริง และทางเลือกแบบ supply-side เป้าหมายของโครงการนี้คือ 1) การปรับตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดการบูสต์ด้วยไฟฟ้า (electric boost) เพื่อลดการบริโภคพลังงานทั้งหมดลงร้อยละ 5.2) ลดต้นทุนการดำเนินงานลงร้อยละ 10.3) ปรับปรุงประสิทธภาพการผลิตขึ้นร้อยละ 1 ถึง 3.4) ลดเวลาการหยุดซ่อมเครื่อง press ลงร้อยละ 1 ถึง 3.5) ลดสัดส่วนของเสียลงร้อยละ1

ในงานแรกๆ ที่คณะตรวจประเมินดำเนินการเสร็จสมบูรณ์แล้วคือ บัญชีรายการของอุปกรณ์ที่ใช้ก๊าซ เครื่องอัดอากาศ เครื่องใช้ไฟฟ้า และชุดไฟ (lighting fixtures) คณะฯ ยังได้ติดตามการบริโภคไฟฟ้า ก๊าซธรรมชาติ น้ำ และระบบระบายสิ่งปฏิกูล ของโรงงานตลอดทั้งปีเพื่อช่วยให้เข้าใจถึงแนวโน้มการผลิตและต้นทุนการดำเนินงาน ท้ายที่สุด ระบบต่างๆ ดังต่อไปนี้ก็ได้รับการประเมินหาศักยภาพในการประหยัด

- ระบบไฟฟ้า: การทำงานแบบ 3 กะของโรงงานนี้ทำให้มีโอกาสที่จะโยกย้ายการทำงานที่ไม่ต่อเนื่องซึ่งมีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ไปอยู่ในช่วง off-peak ได้
- หม้อกำเนิดไอน้ำแบบ gas-fired: หม้อกำเนิดไอน้ำเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ทรัพยากรพลังงานส่วนใหญ่ และสามารถทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการเผาไหม้อย่างมีประสิทธิภาพ การลดพลังงานในการผลิตไอน้ำ การนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ การปล่อยอากาศทิ้ง และการลดของเสีย
- ระบบส่องสว่าง: การให้แสงสว่างภายโรงงานใช้หลอดไฟรุ่นเก่าแบบ T12 ซึ่งใช้บัล-ลาสต์แม่แหล็ก (magnetic ballast) เนื่องจากหลอดเหล่านี้เกิดชำรุด จึง

เปลี่ยนเป็นหลอดไฟแบบ T8 ซึ่งใช้บัลลาสต์ไฟฟ้า ทำให้ลดการใช้พลังงานลงได้ร้อยละ 3 แต่ได้ความสว่างเท่าเดิม

- ระบบมอเตอร์ขับ: การประหยัดพลังงานอาจทำได้โดยการใช้มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพดีเป็นพิเศษ ติดตั้งตัวปรับความเร็วรอบให้กับมอเตอร์ หรือใช้สายพานชนิดที่บากเป็นรูปตัววี (notched V-belt)
- เครื่องปั๊มสุญญากาศ: ตรวจระบบผลิตสุญญากาศ (vacuum system) เพื่อหาศักยภาพในการประหยัด โดยการลดการสูญเสียสภาพสุญญากาศ (vacuum loss) ในระบบการจ่าย (distribution system) การปรับตั้งปั๊มให้เหมาะสม และการใช้อากาศและน้ำหล่อเย็นอย่างมีประสิทธิภาพ
- เครื่องอัดอากาศ: ระบบเครื่องอัดอากาศ (Air compressor system) ได้รับการประเมินโดยใช้อากาศจากภายนอก การลดความดันในระบบ การลดการสูญเสียความดันในระบบการจ่าย การปรับตั้งเครื่องอัดอากาศให้เหมาะสม หรือการใช้อากาศและน้ำหล่อเย็นอย่างมีประสิทธิภาพ
- กระบวนการให้ความร้อน: ได้คำนึงถึงความเป็นไปได้ในการประหยัดในกระบวนการให้ความร้อน ซึ่งได้แก่ 1) การทำให้ระบบสันดาปของเตาเผา (furnace) และเตาอบความร้อน (heat treat oven) มีประสิทธิภาพและมีแบบที่ดีที่สุด 2) การนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งไป กลับมาใช้อุ่นกระจก, ใช้จ่ายให้กับเตาอบความร้อน หรือใช้อุ่นอากาศที่จะใช้ในการสันดาป 3) การปรับตั้งบูสต์ไฟฟ้า (electric boost) ให้เหมาะสม 4) การผลิตออกซิเจนอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับการทำ oxy-fuel firing 5) การใช้ระบบผลิตไฟฟ้าความร้อนร่วม และการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่(cogeneration and heat recovery) และ 6) การตรวจระบบควบคุมอากาศ (air handling) และการนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งกลับมาใช้ใหม่
- เครื่องจักร: มีการตรวจสอบเครื่อง press และเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง หัวดาย เพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีที่สุด

**ผลที่ได้รับ**

คณะตรวจประเมินได้ทำจัดข้อเสนอแนะจากการตรวจประเมิน (Assessment Recommendations หรือ AR) เป็นจำนวน 17 รายการ ซึ่งหากนำไปดำเนินการจริง จะสามารถลดพลังงานที่สูญเปล่า และต้นทุนดำเนินการของโรงงานแห่งนี้ได้ รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ ข1 ข้อเสนอแนะเหล่านี้ครอบคลุมการดำเนินการตั้งแต่การจัดตั้งสายธารคุณค่าแบบลีน (lean value

stream) สำหรับการดำเนินงานของทั้งโรงงาน (ข้อเสนอแนะที่ 1) ไปจนถึงติดตั้งตัวตรวจจับภาพ (photo sensor) ที่หลอดไฟภายนอก (ข้อเสนอแนะที่ 17)

ตารางที่ ฌ1 สรุปข้อเสนอแนะและแนวทางการปรับปรุง

| | | Projected Annual Savings | | | | Projected Economic Impact | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| No. | Assessment Recommendation | Natural Gas (MMBtu) | Electricity (kWh x $10^6$) | $CO_2$ (lb)[1] | Financial ($) | Capital Cost ($) | Payback Period (years) |
| 1 | Establish a Lean Value Stream[2] | N/A | 12.5 | 28,500,000 | 23,688,000 | 6,544,000 | 0.3 |
| 2 | Glass melter design options: rebuild zoned furnace with oxy-gas firing and 30% electric boost; batch preheated with waste heat from flue gases | 78,000 | 17.8 | 49,600,000 | 920,000 | 1,250,000 | 1.4 |
| 3 | Rebuild zoned furnace to use oxy-gas firing (no batch preheat) | 37,000 | 20.4 | 51,100,000 | 612,000 | 1,004,000 | 1.6 |
| 4 | Change electric furnace to use gas turbine to produce electricity for melter; recover heat from turbine exhaust to preheat glass batch and also supply heat to annealing lehrs (ovens) | 20,000 | 6.7 | 17,500,000 | 270,000 | 732,000 | 2.7 |
| 5 | Convert electric furnace from all-electric melting to combined electric melting with gas-fired glass batch preheater | -12,000 | 9.1 | 19,700,000 | 208,000 | 250,000 | 1.2 |
| 6 | Replace 11 drilled blowoff pipes with air knives | N/A[3] | 2.0 | 4,690,000 | 84,000 | 11,000 | 0.1 |
| 7 | Replace 24 copper-tube open jets with nozzles | N/A | 1.7 | 3,920,000 | 70,000 | 5,000 | 0.1 |
| 8 | Improve power factor | N/A | (7,000 kVAr)[4,5] | N/A | 20,000 | 65,000 | 3.2 |
| 9 | Install variable speed drive on mold cooling fan motor | N/A | 0.7 | 1,590,000 | 20,000 | 21,000 | 1.0 |
| 10 | Lower the 100-psi compressed air system pressure by 10 psi | N/A | 0.5 | 1,220,000 | 11,000 | N/A | 0 |
| 11 | Replace T12 lights with energy-efficient T8 lights | N/A | 0.2 | 436,000 | 8,000 | 5,000 | 0.6 |
| 12 | Install variable speed drive on tooling cooling loop motor | N/A | 0.2 | 502,000 | 8,000 | 10,000 | 1.2 |
| 13 | Replace and downsize existing motors that show a payback of ≤ 5 years | N/A | 0.1 | 204,000 | 3,000 | 13,000 | 3.7 |
| 14 | Use notched V-belts on belt-driven applications | N/A | 0.2 | 369,000 | 6,000 | N/A | 0 |
| 15 | Install variable speed drive on machine cooling loop motor | N/A | 0.1 | 332,000 | 5,000 | 15,000 | 2.8 |
| 16 | Reuse boiler blowdown to produce low-pressure steam | N/A | N/A | 51,000 | 3,000 | 5,000 | 1.8 |
| 17 | Install photo sensors on outside lights | N/A | N/A | 40,000 | N/A | N/A | 0 |
| | **Totals** | **123,000** | **72.20** | **179,754,000** | **25,936,000** | **9,930,000** | **0.4**[6] |

[1] Assumes (2.3 lb of $CO_2$ per kWh of electricity) + (11.3 lb $CO_2$ per 100 $ft^3$ of natural gas)
[2] Implementing a Lean Value Stream would require a five-phase project: (a) reduce inventory, (b) transport overseas shipments via air instead of sea, (c) institute a "pull system" of production scheduling, (d) increase quality yield of molded glass production, and (e) install a smaller furnace to decrease molten glass production.
[3] N/A = not applicable
[4] kVAr = kilovolt•ampere reactive
[5] This number is not included in the total electricity savings
[6] Aggregate average

ข้อเสนอที่ดีแต่ทำได้ยากคือ การเริ่มลงมือทำ lean value stream ภายในโรงงาน (ข้อเสนอแนะที่ 1) การวิเคราะห์ lean value stream (LSVA) ได้กำหนดแนวทางการกำจัดของเสียในขั้นตอนการทำงานของกระบวนการผลิตหลัก และเพิ่มการไหลของผลิตภัณฑ์หรือบริการไปสู่ลูกค้า ในกรณีนี้ การวิเคราะห์ฯ แสดงให้เห็นถึงโอกาสที่สำคัญๆ ที่จะเปลี่ยนแปลงการดำเนินธุรกิจของกระบวนการผลิตกระจกโดยตลอด เริ่มตั้งแต่การติดตั้งเตาขนาดเล็กลง ไปจนถึงวิธีการขนส่งผลิตภัณฑ์ไปยังต่างประเทศ การดำเนินการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดในข้อเสนอแนะที่ 1 สามารถให้ผลประหยัดปีละประมาณ 24 ล้านเหรียญสหรัฐ และลดการใช้ไฟฟ้าลงได้ปีละ 12.5 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง ใช้เงินลงทุนทั้งหมด 6.5 ล้านเหรียญสหรัฐ มีระยะเวลาการคืนทุนประมาณ 4 เดือน

อีกหนึ่งการปรับปรุง เกี่ยวข้องกับเตาหลอม 2 เครื่องที่ค่อนข้างเก่า โรงงานนี้จึงพิจารณาว่าจะสร้างขึ้นใหม่ และข้อเสนอแนะจำนวนมากได้มีการเสนอให้ทำการปรับปรุงสมรรถนะของเตาในระหว่างที่สร้างขึ้นใหม่ สำหรับแต่ละข้อเสนอแนะ ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์และระยะเวลาในการคืนทุน มีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับต้นทุนค่าก๊าซธรรมชาติ ไฟฟ้า และออกซิเจน ข้อเสนอแนะที่จะทำให้เกิดผลประหยัดได้มากที่สุด ในแง่ของการใช้ก๊าซธรรมชาติ และไฟฟ้า และผลประหยัดด้านการเงิน คือการสร้างเตาชนิดแบ่งเป็นส่วน (zoned furnace) ขึ้นมาใหม่ เพื่อใช้ oxy-natural gas firing โดยใช้การบูสต์ไฟฟ้าร้อยละ 30 และอุ่นกระจกด้วยความร้อนที่ปล่อยทิ้ง (waste heat) จากก๊าซต่างๆ ที่ได้จากการสันดาปในเตา ต้นทุนในการปรับปรุงระบบ รวมถึงการติดตั้งระบบ oxy-fuel, การปรับเปลี่ยนระบบไฟฟ้า, การสร้าง tank ขึ้นมาใหม่ด้วยวัสดุทนไฟที่มีคุณภาพสูงขึ้น และระบบอุ่นกระจก ระบบนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ regenerator และขนาดของอุปกรณ์ควบคุมการปล่อยทิ้ง (emission) ซึ่งก็คือ เครื่องดักจับฝุ่นผง (baghouse) จะลดลงอย่างมาก คณะฯ ได้ประเมินว่าผลประหยัดรายปีของโครงการนี้จะอยู่ที่ประมาณ 78,000 ล้าน Btu สำหรับก๊าซธรรมชาติ, 18 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมงสำหรับไฟฟ้า, ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดอ๊อกไซด์ออกสู่บรรยากาศลง 50 ล้านปอนด์ และประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 920,000 เหรียญสหรัฐ ระบบที่นำเสนอมีการเพิ่มมูลค่าให้การผลิตประมาณร้อยละ 15 ถึง 20 ใช้เงินลงทุน 1.25 ล้านเหรียญสหรัฐ และมีระยะเวลาคืนทุน 1.4 ปี

**สรุปผลการดำเนินงาน**

จากตารางที่ 1 แสดงข้อเสนอแนะทั้ง 17 รายการที่จัดทำขึ้นโดยคณะตรวจประเมิน การนำข้อเสนอแนะดังกล่าวไปลงมือปฏิบัติ จะช่วยประหยัดต้นทุนพลังงานและการดำเนินงานปีละประมาณ 26 ล้านเหรียญสหรัฐ และลดการใช้ก๊าซธรรมชาติและไฟฟ้าลงได้ปีละ 123,000 ล้าน Btu และ 72.2 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ ตลอดจนลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลง 180 ล้านปอนด์ต่อปี

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐวุฒิ เพิ่มขุนทด เกิดเมื่อวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมต้นจากโรงเรียนทวีธาภิเศก เข้าศึกษาต่อในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ(ปวช) สาขาก่อสร้างและงานไม้ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และเข้าศึกษาต่อจนสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในปีการศึกษา 2545 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย