

ภ. 30-03/รายงานฉบับที่ 2

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

การปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยางรัดของ :  
การทดลองอบยางรัดของในอุโมงค์ลมร้อน

โดย

เกศรา นุตาลัย

ศิลปชัย อรัญยะนาถ

วัชรวิทย์ มี่ชัน

บุญชัย ตระกูลมหชัย

ประวาลวรรณ สิทธิไตรย์

มนัส อาตยะพันธ์

บุญเชิด ประเสริฐวงศ์

เพิ่มสุข มาทะ

กรรณิการ์ สถาปิตานนท์

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย  
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



(ดร. สันหัตถ์ โรจนสุนทร)

ผู้ว่าการ

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



จท

โครงการวิจัยที่ ก.30-03  
โครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางพารา

รายงานฉบับที่ 2  
การปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยางรัดของ :  
การทดลองอบยางรัดของในอุณหภูมิร้อน

โดย  
เกศรา นุตาลัย  
ศิลาชัย อรัญยะนาถ  
วัชรรา มีสิน  
บุญชัย ตระกูลมหชัย  
ประवालวรรณ สิทธิไตรย์  
มนัส อาชยะพันธ์  
บุญเชิด ประเสริฐพงศ์  
เพิ่มสุข มาทะ  
กรรณิการ์ สถาปิตานนท์

บรรณาธิการ  
วัลย์ลดา หงส์ทอง  
นฤมล รื่นไวย์

วท., กรุงเทพฯ 2533  
สงวนลิขสิทธิ์

### กิตติกรรมประกาศ

คณะทำงานโครงการ การปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยางรัดของ ขอขอบคุณ ดร.มานะ รักวิทยาศาสตร์ และนายศึกษา รักวิทยาศาสตร์ ในการให้คำแนะนำปรึกษาและอนุเคราะห์เพื่อทดสอบตัวอย่างยาง, และขอบคุณโรงงาน บริษัทศรีเทพไทยการยางจำกัด ในการผลิตตัวอย่างเพื่อใช้สำหรับการทดลอง รวมถึงการให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ต่อโครงการนี้เป็นอย่างมาก.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	3
1.1 การใช้ระบบลมร้อนในการอบย่างritzของ	3
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 แผนการทดลอง	4
2. วัสดุ และอุปกรณ์	5
2.1 วัสดุสำหรับผลิตยางritzของ	5
2.2 สูตรยางritzของ	6
2.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับสร้างอุโมงค์ลมร้อน	7
3. วิธีการทดลองและผลการทดลอง	11
3.1 การทดลองอบตัวอย่างโดยแปรเปลี่ยนสภาวะของตัวอย่าง	11
3.2 การทดลองอบตัวอย่างโดยแปรเปลี่ยนเวลาการอบ	12
4. วิจัยารณ์	17
4.1 การทดลองอบตัวอย่างโดยแปรเปลี่ยนสภาวะของตัวอย่าง	17
4.2 การทดลองอบตัวอย่างโดยแปรเปลี่ยนเวลาการอบ	17
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	18
6. เอกสารอ้างอิง	20
ภาคผนวก	21
วิธีการคำนวณออกแบอุปกรณ์อุโมงค์ลมร้อนสำหรับอบตัวอย่างแบบต่อเนื่อง	

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1. ข้อแตกต่างของการใช้ระบบลมร้อนและระบบไอน้ำ ในการอบยางให้สุก	3
ตารางที่ 2. สูตรยางรัดของซึ่งใช้ในการทดลอง	6
ตารางที่ 3. รายการวัสดุและอุปกรณ์สำหรับสร้างอุโมงค์ลมร้อน	10
ตารางที่ 4. ผลการทดลองอบตัวอย่างรัดของ โดยการแปรเปลี่ยนสภาวะ ของตัวอย่าง	13
ตารางที่ 5. ผลการทดลองอบตัวอย่างรัดของ โดยการแปรเปลี่ยนเวลาการอบ	14

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1. อุโมงค์ลมร้อนก่อนการตัดแปลง	8
รูปที่ 2. อุโมงค์ลมร้อนหลังการตัดแปลง	9
รูปที่ 3. ตัวอย่างกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอุโมงค์ลมร้อนและขณะทำการทดลองที่ 1	15
รูปที่ 4. ตัวอย่างกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอุโมงค์ลมร้อนและขณะทำการทดลองที่ 3	16

**PROCESS IMPROVEMENT IN RUBBER BAND INDUSTRY :  
VULCANIZATION OF RUBBER BAND TUBE IN HOT AIR TUNNEL**

By Kesara Nutalaya, Silpachai Arunyanak, Vachara Meecheun,  
Boonchai Trakunmahachai, Prawalwan Sitthitrai, Manus Earthayapan,  
Booncherd Prasertpong, Permsuk Mata and Kannika Sthapitanonda

**ABSTRACT**

Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR) designed and constructed a hot air tunnel equipment for vulcanizing rubber band tube using data based on the laboratory equipment. The tunnel, 6-metre long, was equipped with chain roller conveying system. Air passing through a heating plate was circulated with an air blower and distributed at six outlets along the tunnel. Rubber tubes were experimentally vulcanized at 150°C for 10 minutes applying different conveying systems. Vulcanizing time was also varied. The resulting rubber tube was then tested for its tensile strength, elongation and tear strength. From the result it could be noted that rubber tubes were well vulcanized when applying both aluminium tube and supporting iron mesh with chain roller conveyor. The optimum condition was at 150°C for 10 minutes. The resulting rubber tube contained tensile and tear strength of 128-135 and 19-23 kg/cm<sup>2</sup> respectively and elongation at break of 600-700 percent. The hot air vulcanizing system and equipment should, however, be improved to obtain a better and consistent quality rubber band product using appropriate technique and economic consideration.



## การปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยางรักของ :

### การทดลองอบยางรักของในอุโมงค์ลมร้อน

โดย เกศรา บุคาลัย\* , ศิลปชัย อรัญยะนาท\* , วัชรวิทย์ มีชื่น\* , บุญชัย ตระกูลมหชัย\* ,  
ประวาลวรรณ สิทธิไตรย์<sup>+</sup> , มนต์ อาคณษะพันธ์\* , บุญเชิด ประเสริฐพงศ์\* , เหมสุข มาทะ\*  
และ กรรณิการ์ สถาปิตานนท์\*

### บทคัดย่อ

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.) ได้ทดลองออกแบบและสร้างอุปกรณ์ลมร้อนเพื่ออบตัวอย่าง ที่จะทำเป็นยางรักของ โดยใช้ข้อมูลซึ่งได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ. อุโมงค์ลมร้อนนี้มีความยาว 6 เมตร, ใช้ระบบลูกกลิ้งในการเคลื่อนตัวอย่าง และมีลมร้อนที่หมุนเวียนด้วยแรงดันของพัดลม ซึ่งถูกลมผ่านแผงความร้อน แล้วกระจายผ่านท่อลมเข้าสู่อุโมงค์เป็น 6 จุด ตลอดความยาวของอุโมงค์. ในการทดลองได้อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 150°C. เป็นเวลา 10 นาที โดยแปรเปลี่ยนสภาวะของตัวอย่าง และขณะเดียวกันก็ได้ทดลองแปรเปลี่ยนเวลาการอบด้วย. หลังจากนั้นได้วิเคราะห์หาค่าความต้านแรงดึง, ความยืดที่จุดขาดและความต้านแรงฉีกขาดของตัวอย่าง. จากการทดลองสรุปได้ว่า ตัวอย่างอบได้ดีเมื่อสวมไว้กับท่ออะลูมิเนียมและมีตะแกรงรองรับตัวอย่างขณะเคลื่อนที่ไปบนลูกกลิ้ง, โดยอบที่อุณหภูมิ 150°C. เป็นเวลา 10 นาที ซึ่งจะได้ตัวอย่างที่มีค่าความต้านแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาดเป็น 128-135 และ 19-23 กก./ซม.<sup>2</sup> ตามลำดับ, ส่วนค่าความยืดที่จุดขาดอยู่ระหว่างร้อยละ 600-700. อย่างไรก็ตามก็ ระบบและอุปกรณ์การใช้ลมร้อนเพื่ออบแบบนี้ยังต้องการการปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางรักของซึ่งมีคุณสมบัติสูงและสม่ำเสมอขึ้น โดยพิจารณาความเหมาะสมทั้งในทางเทคนิคและเศรษฐกิจ.

\* สว- อุตสาหกรรมเคมี, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

<sup>+</sup> คณะเภสัชศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต

## 1. บทนำ

### 1.1 การใช้ระบบลมร้อนในการอบยางรีคของ

การใช้ลมร้อนอบผลิตภัณฑ์ยางให้สุก จะดำเนินการโดยใช้ความดันหรือไม่ ให้พิจารณาจากความหนาของผลิตภัณฑ์. ถ้าผลิตภัณฑ์มีความหนามากก็ควรใช้ลมร้อนที่มีแรงดันด้วยเพื่อมิให้เกิดรูพรุนบนผิวของผลิตภัณฑ์. ในระหว่างการอบควรให้อุณหภูมิภายในเตาหรืออุปกรณ์ที่ใช้อบสูงถึงอุณหภูมิที่สามารถทำให้ยางสุกได้โดยเร็วที่สุด, และภายในเตาควรมีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้ง ซึ่งอาจทำได้โดยใช้ระบบขดลวดร้อนพร้อมวิธีการหมุนเวียนของลม. การใช้ระบบลมร้อนเพื่ออบยางให้สุกนั้นมีข้อแตกต่างจากการใช้ระบบไอน้ำ ซึ่งระบบหลังมีการใช้อย่างแพร่หลายกว่าดังสรุปได้ในตารางที่ 1.

ตารางที่ 1. ข้อแตกต่างของการใช้ระบบลมร้อนและระบบไอน้ำในการอบยางให้สุก

ลมร้อน	ไอน้ำ
<ol style="list-style-type: none"><li>1. การส่งผ่านความร้อนต่ำเพราะตัวกลางเป็นอากาศ เวลาในการทำให้ยางสุกจึงนานและต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณมากหรือใช้ระบบลมร้อนที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดเวลาในการทำให้ยางสุก</li><li>2. โมเลกุลยางเกิด oxidation ง่าย โดยเฉพาะเมื่อใช้ความดันสูง จะเกิด oxidative aging ทำให้ผิวยางอ่อนหรือแข็งกระด้างซึ่งขึ้นกับชนิดของยาง บางครั้งจึงต้องใช้สาร antioxidant เพิ่มขึ้นในสูตรยาง</li><li>3. อุณหภูมิภายในเตา และความดัน ไม่มี ความสัมพันธ์กัน</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. การส่งผ่านความร้อนดีกว่า เพราะตัวกลางเป็นไอน้ำ เวลาในการทำให้ยางสุกจึงน้อยกว่า</li><li>2. โมเลกุลยางเกิด oxidation ได้น้อยกว่า</li><li>3. อุณหภูมิ และความดันมีความสัมพันธ์กัน</li></ol>

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลมร้อน	ไอน้ำ
4. ยางเกิด porosity ได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่อไม่มีความดัน	4. ยางเกิด porosity ได้ยาก
5. ระบบการใช้ลมร้อนไม่ยุ่งยาก	5. ระบบไอน้ำมีความยุ่งยากในการใช้และการควบคุม

ที่มา: Hofmann (1967)

ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางซึ่งใช้ระบบ open cure โดยทั่วไปนั้น จะใช้ไอน้ำในการอบยางให้สุก เพราะเป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายน้อยและประหยัดกว่าวิธีอื่น. อย่างไรก็ตามการใช้ไอน้ำนี้จำเป็นต้องใช้หม้อต้มน้ำและเตาอบภายใต้ความดันรวมทั้งอุปกรณ์ควบคุมที่ค่อนข้างซับซ้อน. สำหรับผลิตภัณฑ์บางประเภทซึ่งมีความหนาไม่มาก และไม่จำเป็นต้องมีคุณภาพสูง เช่น ยางรัดของ ฯลฯ อาจนำลมร้อนมาใช้แทนไอน้ำ ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์ผลิตไอน้ำและตู้อบไอน้ำลงได้, อีกทั้งการใช้ระบบลมร้อนอย่างต่อเนื่องจะช่วยลดการใช้แรงงานและเวลาในการผลิตด้วย.

การใช้ลมร้อนเพื่ออบยางในการผลิตยางรัดของนั้น วท. ได้ทดลองในห้องปฏิบัติการพร้อมกับปรับปรุงสูตรยางตั้งแต่ปี 2531 (นุतालย์ และคณะ 2531). สำหรับการทดลองครั้งนี้ วท. ได้ออกแบบอุโมงค์ลมร้อนเป็นระบบต่อเนื่อง แล้วสร้างและทดลองอบตัวอย่างรัดของโดยใช้ข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการดังกล่าวเป็นแนวทาง.

**1-2 วัตถุประสงค์**

เพื่อทดลองใช้ระบบลมร้อนอย่างต่อเนื่องในการอบยางรัดของให้สุก โดยใช้อุปกรณ์อุโมงค์ลมร้อนซึ่งออกแบบโดย วท.

**1-3 แผนการทดลอง**

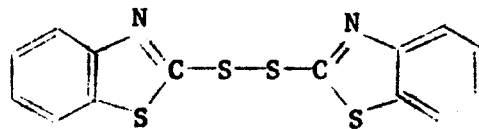
- ออกแบบอุโมงค์ลมร้อนระบบต่อเนื่อง โดยใช้ข้อมูลซึ่งได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ.
- จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์และสร้างอุโมงค์ลมร้อน
- ทดลองอบยางรัดของในลักษณะที่เป็นตัวอย่างในสภาวะต่าง ๆ

- ทดสอบคุณสมบัติของยางที่อบแล้วในด้านความต้านแรงดึง (tensile strength), ความยืดที่จุดขาด (% elongation) และความต้านแรงฉีกขาด (tear strength).
- วิเคราะห์และสรุปผล.

## 2. วัสดุ และ อุปกรณ์

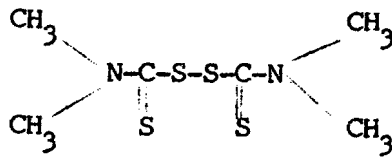
### 2.1 วัสดุสำหรับผลิตยางรีคของ

- 1) ยางธรรมชาติ : เป็นยางแผ่นขาวชนิดผึ่งแห้ง หรือที่เรียกว่า air dried sheet จากจังหวัดระยอง.
- 2) กำมะถัน (sulphur) : มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ผลิตจากบริษัทภายในประเทศเป็นชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางทั่วไป (commercial grade).
- 3) ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide : ZnO) : มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียดชนิด white seal ผลิตโดย บริษัทผาแดงอินดัสตรี จำกัด.
- 4) กรดสเตียริก (stearic acid :  $C_{17}H_{35}COOH$ ) : มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง (commercial grade).
- 5) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate :  $CaCO_3$ ) : ใช้เป็นสารตัวเติม มีลักษณะเป็นผงสีขาว ใช้ในอุตสาหกรรมยาง.
- 6) 2, 2-Dibenzothiazyl disulphide (MBTS) มีสูตรทางเคมีคือ:



มีลักษณะเป็นผงสีขาว ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางเป็น delayed action accelerator.

7) Tetramethylthiuram disulphide (TMTD) มีสูตรทางเคมีคือ :



มีลักษณะเป็น เม็ดสีขาว ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง เป็น very fast curing accelerator.

8) น้ำมัน (process oil) : เป็น plasticizer และ softener ช่วยในกระบวนการผลิต.

9) ทalcum (talcum) : มีลักษณะเป็นผงสีขาว ใช้โรยเพื่อป้องกันไม่ให้อย่างติดกัน.

## 2.2 สูตรยางรีดของ

ใช้สูตรดังแสดงในตารางที่ 2, ซึ่งเป็นสูตรที่ได้ทดลองในห้องปฏิบัติการ ท. มาแล้ว. ยางสูตรนี้จะสุกเมื่อผ่านการอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 150°C. เป็นเวลา 10 นาที มีค่าความต้านแรงดึงและค่าความยืดที่จุดขาดสูงสุดคือ 211-219 กก./ซม.<sup>2</sup> และร้อยละ 680-750 ตามลำดับ (นุตาลัย และคณะ 2531).

ตารางที่ 2. สูตรยางรีดของที่ใช้ในการทดลอง

สาร	น้ำหนัก (กก.)
ยางธรรมชาติ	16.13
กำมะถัน	0.32
ZnO	0.81
Stearic acid	0.16
CaCO <sub>3</sub>	1.62
MBTS	0.16
TMTD	0.88
น้ำมัน	0.72
รวม	20.00

### 2.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับสร้างอุโมงค์ลมร้อน

อุปกรณ์ที่จัดสร้างขึ้นนี้มีลักษณะเป็นอุโมงค์ยาว. ลมร้อนจะไหลหมุนเวียนอยู่ภายในอุโมงค์ ด้วยแรงผลักดันของพัดลมซึ่งพัดส่งลมผ่านแผงความร้อนและท่อส่งเข้าทางปลายอุโมงค์ด้านหนึ่ง และดูดลมร้อนออกจากอุโมงค์ทางท่อส่งที่บริเวณปลายอีกด้านหนึ่ง.

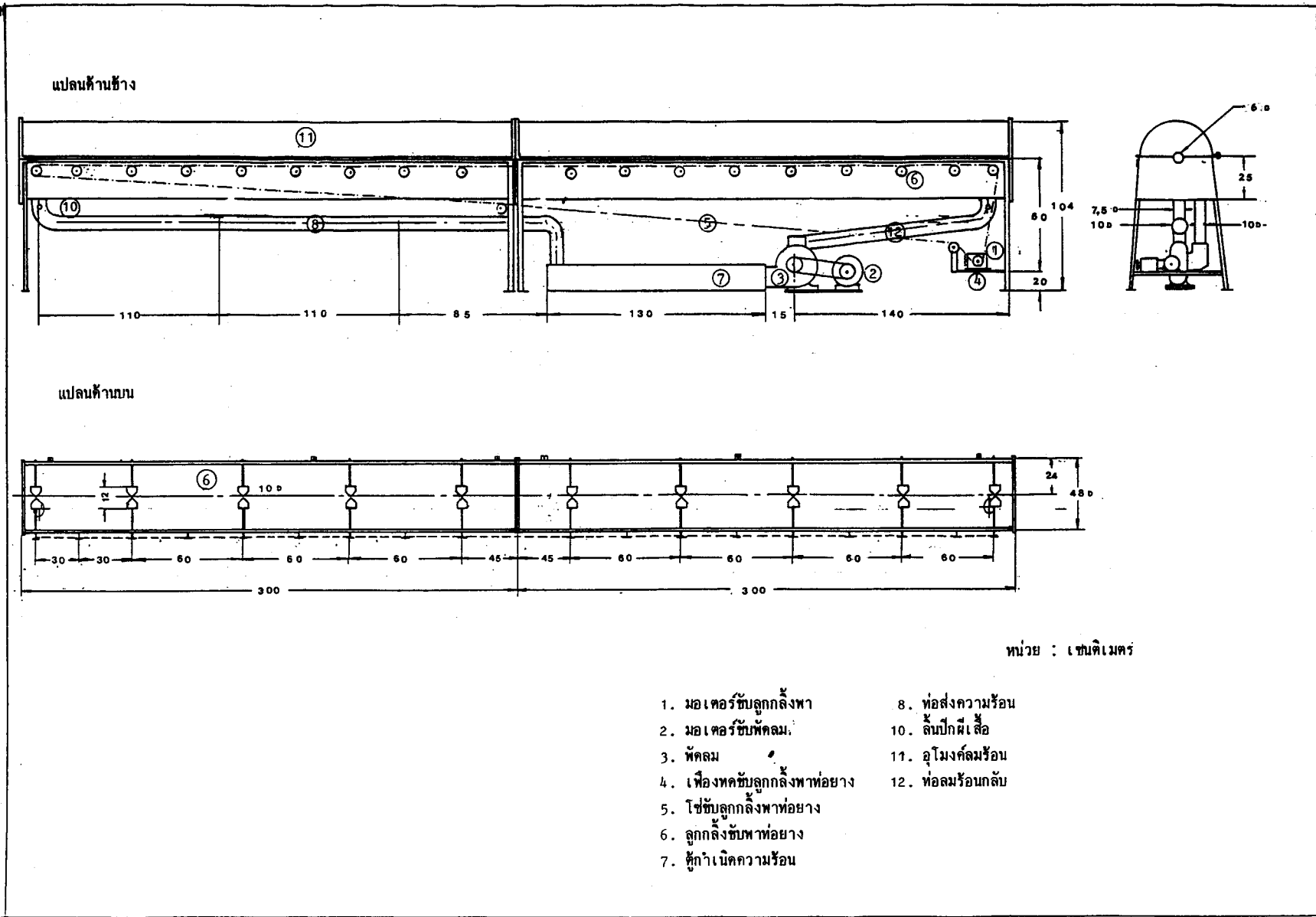
เนื่องจากอุโมงค์ลมร้อนเป็นระบบต่อเนื่อง ในการรอบท่ออย่างจึงต้องทำให้ท่ออย่างเคลื่อนที่เข้าสู่อุโมงค์แล้วเคลื่อนออกไปได้. ดังนั้นเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ดังกล่าว จึงได้ออกแบบและติดตั้งลูกกลิ้งไว้ภายในอุโมงค์ โดยใช้มอเตอร์ควบคุมการหมุนของลูกกลิ้ง, เมื่อวางท่อไว้บนลูกกลิ้งแล้วลูกกลิ้งหมุน ท่ออย่างก็จะเคลื่อนที่ออกไปข้างหน้าได้.

ในการออกแบบอุปกรณ์ ได้อาศัยผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ (บุตาลัย และคณะ 2531) มาพิจารณาเป็นข้อกำหนดหลักดังนี้ :

- ก. อัตราการเคลื่อนที่ของท่ออย่างประมาณ 3.0 ม./นาที เป็นเวลา 10 นาที.
- ข. อุณหภูมิของลมร้อนในอุโมงค์เป็น  $150^{\circ}\text{C}$ .

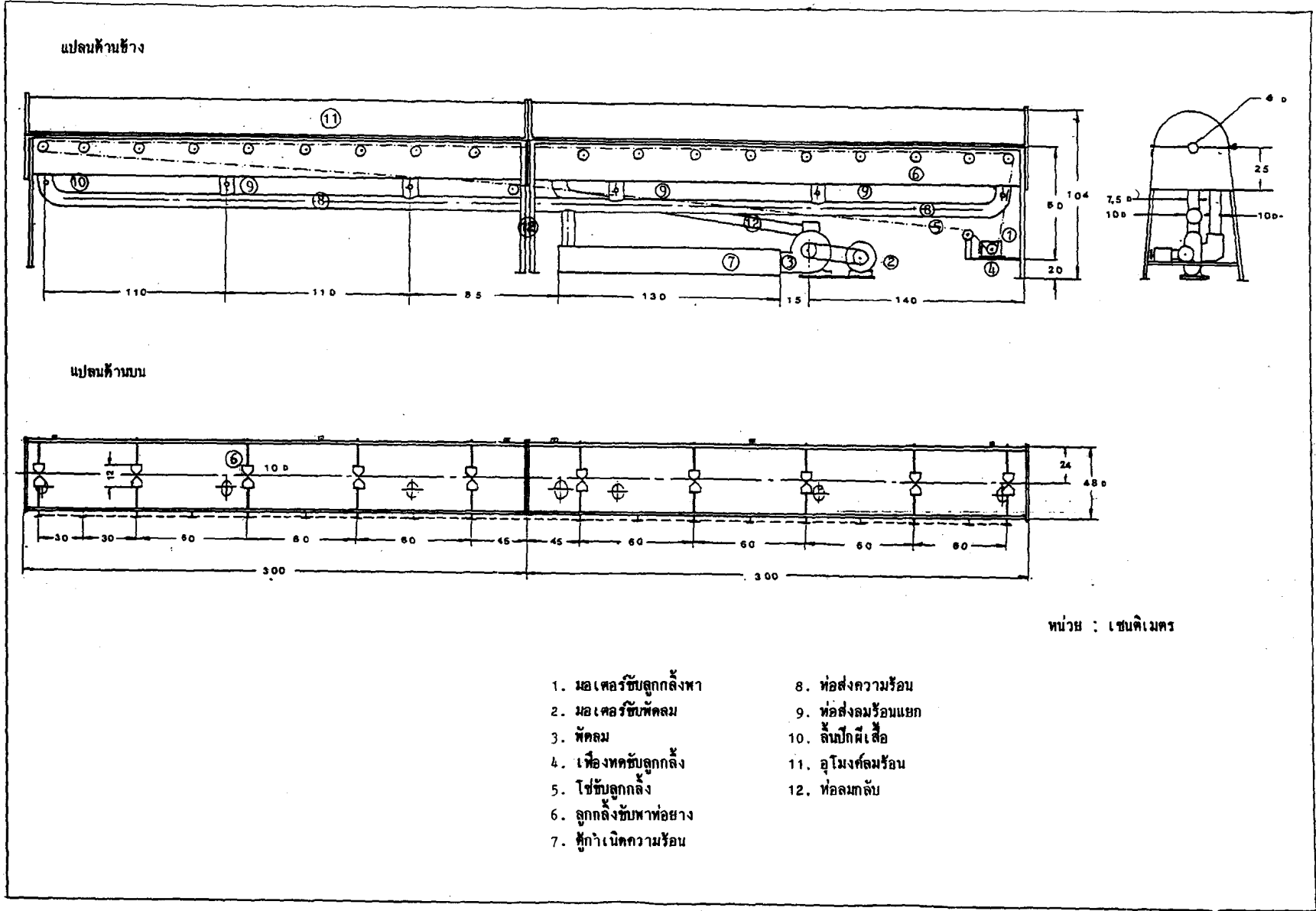
ฉะนั้น ในการรอบท่ออย่างต่อเนื่องจนสุดจะต้องทำให้ท่ออย่างเคลื่อนที่ผ่านอุโมงค์ลมร้อนยาวรวม 30 ม. อย่างไรก็ตาม ในการทดลองขั้นต้นนี้ ได้ออกแบบอุโมงค์ให้มีความยาวเพียง 6 ม. เพื่อทดลองใช้ และปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างประหยัด. วิธีการคำนวณออกแบบอุปกรณ์ แสดงไว้ในภาคผนวกที่ 1, และได้อุปกรณ์ตามแบบแปลนดังรูปที่ 1. สำหรับวัสดุและชิ้นส่วนต่าง ๆ นั้น แสดงไว้ในตารางที่ 3.

อนึ่ง หลังจากใช้อุโมงค์ลมร้อนดังกล่าวในการทดลองแล้ว ปรากฏว่าการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่  $150^{\circ}\text{C}$ . ตลอดอุโมงค์ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากการกระจายของลมร้อนที่เข้าสู่อุโมงค์ไม่สมบูรณ์, และการสูญเสียความร้อนตลอดอุโมงค์เป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ. ดังนั้นได้ทำการตัดแปลงอุโมงค์โดยการแยกท่อส่งลมเข้าสู่อุโมงค์เป็น 6 ท่อ และเข้าแต่ละช่วงตามความยาวของอุโมงค์ ดังแสดงแบบแปลนในรูปที่ 2, ซึ่งทำให้สามารถแก้ไขปัญหาในการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนภายในอุโมงค์ได้.



- |  |                    |
|--|--------------------|
| 1. มอเตอร์ขับเคลื่อนลูกกลิ้งพา         | 8. ท่อส่งความร้อน  |
| 2. มอเตอร์ขับเคลื่อนพัดลม              | 10. ลิ้นปีกผีเสื้อ |
| 3. พัดลม                               | 11. อุโมงค์ลมร้อน  |
| 4. เฟืองทดขับเคลื่อนลูกกลิ้งพาตัวอย่าง | 12. ท่อลมร้อนกลับ  |
| 5. โซ่ขับเคลื่อนลูกกลิ้งพาตัวอย่าง     |                    |
| 6. ลูกกลิ้งขับเคลื่อนพาตัวอย่าง        |                    |
| 7. ทุ่กำเนิดความร้อน                   |                    |

รูปที่ 1. อุโมงค์ลมร้อนก่อนการตัดแปลง.



รูปที่ 2. อุโมงค์ลมร้อนหลังการตัดแปลง.



ตารางที่ 3. รายการวัสดุและอุปกรณ์สำหรับสร้างอุโมงค์ลมร้อน

ลำดับที่	ชื่อชิ้นส่วน	รายละเอียด	จำนวน
1	มอเตอร์ขับลูกกลิ้งพา	3 เฟส 380 โวลต์ 3.6 แอมป์ 1,400 รอบต่อนาที 0.25 แรงม้า	1
2	มอเตอร์ขับพัดลม	3 เฟส 380 โวลต์ 3 แอมป์ 1,400 รอบต่อนาที 1 แรงม้า	1
3	พัดลม	พัดลมอัดอากาศแบบแรงเหวี่ยง ขนาด 350-750 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที	1
4	เฟืองทดขับลูกกลิ้งเพื่อพา ตัวอย่าง	อัตราทด 1 ต่อ 60 รอบ 1 แรงม้า	1
5	โซ่ขับลูกกลิ้ง เพื่อพาตัวอย่าง	ความยาวข้อโซ่ 1 นิ้ว วงรอบยาว 11 เมตร	1
6	ลูกกลิ้งขับพาตัวอย่าง	ทำด้วยเหล็กเหนียวทรงกรวย ยอดประกบกัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร วางห่างกัน 35 เซนติเมตร	18
7	ตุ้มน้ำความร้อน	ขดลวดความร้อนแข็งมีครีบริบาย ความร้อน	
		- ขนาด 1,000 วัตต์	2
		- ขนาด 1,200 วัตต์	1
8	ท่อส่งความร้อนประธาน	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ยาว 6 เมตร	1
9	ท่อส่งลมร้อนแยก	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 30 เซนติเมตร	5
10	ลัมปีกไฟเสื้อ	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว	5

ตารางที่ 3. (ต่อ)

ลำดับที่	ชื่อชิ้นส่วน	รายละเอียด	จำนวน
11	อุโมงค์ลมร้อน	ทำด้วยเหล็กเหนียว เป็นรูปทรงกระบอกประกบ 2 ผา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายใน 40 เซนติเมตร ยาว 6 เมตร หุ้มด้วย ฉนวนหนา 2 นิ้ว	1
12	ท่อลมกลับ	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ยาว 130 เซนติเมตร	1
13	แผงไฟฟ้า	ควบคุมการทำงาน ประกอบด้วย - วงจรควบคุมการขับพายาง - วงจรควบคุมความร้อน - วงจรควบคุมลม	

3. วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ในการอบตัวอย่าง ได้ดำเนินการดังนี้ :

3-1 การทดลองอบตัวอย่างโดยแปรเปลี่ยนสถานะของตัวอย่าง คือ:

- อบตัวอย่างที่ไม่สวมท่ออะลูมิเนียม มีตะแกรงรองรับขณะเคลื่อนที่ และไม่ปิดหัวท้ายท่อ.
  - อบตัวอย่างที่ไม่สวมท่ออะลูมิเนียม มีตะแกรงรองรับขณะเคลื่อนที่ และปิดหัวท้ายท่อ.
  - อบตัวอย่างที่สวมไว้กับท่ออะลูมิเนียม ไม่มีตะแกรงรองรับขณะเคลื่อนที่ และไม่ปิดหัวท้ายท่อ.
  - อบตัวอย่างที่สวมไว้กับท่ออะลูมิเนียม มีตะแกรงรองรับขณะเคลื่อนที่ และไม่ปิดหัวท้ายท่อ.
  - อบตัวอย่างที่สวมไว้กับท่ออะลูมิเนียม มีตะแกรงรองรับขณะเคลื่อนที่ และปิดหัวท้ายท่อ.
- ทุกการทดลองใช้อุณหภูมิ 150<sup>o</sup>ซ. และระยะเวลา 10 นาที.

ตัวอย่างที่ผ่านการอบแล้ว ได้นำมาหาค่า ความต้านทานแรงดึง, ความยืดที่จุดขาดและความต้านแรงฉีกขาด ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.

### 3.2 การทดลองอบตัวอย่างโดยแปรเปลี่ยนเวลาการอบ

คือ อบตัวอย่างที่สวมไว้กับท่ออะลูมิเนียม มีตะแกรงรองรับขณะเคลื่อนที่ และปิดหัวท้ายท่อ ใช้อุณหภูมิ 150°C. ทดลองตั้งแต่เวลา 10 นาที จนถึง 15 นาที, หลังจากนั้นให้นำตัวอย่างมาทดสอบคุณสมบัติเช่นเดียวกับข้อ 3.1 ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 5.

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวอย่างที่ยังไม่ได้อบให้สุกซึ่งโรงงานศรีเทพไทยการยางได้ทำการผลิตโดยใช้สูตรตามตารางที่ 2 และทดลองอบในอุโมงค์ลมร้อนในวันที่ผลิต. ตัวอย่างนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2.5 ซม. ความหนา 1-2 ซม. และยาวประมาณ 3 ม. ในการนำส่งจากโรงงานมาทดลองที่ วท. ได้สวมตัวอย่างไว้กับท่ออะลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม. ซึ่งอาจถอดตัวอย่างออกได้เมื่อต้องการจะทดลองในบางสภาวะ.

อุโมงค์ลมร้อนนี้ใช้ระบบการเคลื่อนที่ของตัวอย่างโดยลูกกลิ้ง (ดังรายงานในข้อ 2.3) และไม่มีตะแกรงหรือสายพานรองรับ. เมื่อตัวอย่างที่ยังไม่สุกเคลื่อนที่เข้าไปในอุโมงค์ ลมร้อนจะทำให้ตัวอย่างอ่อนตัวและหย่อนลง จึงต้องคัดแปลงโดยใช้ตะแกรงรองรับตัวอย่าง และบางครั้งใช้ท่ออะลูมิเนียมสวมในตัวอย่างด้วย.

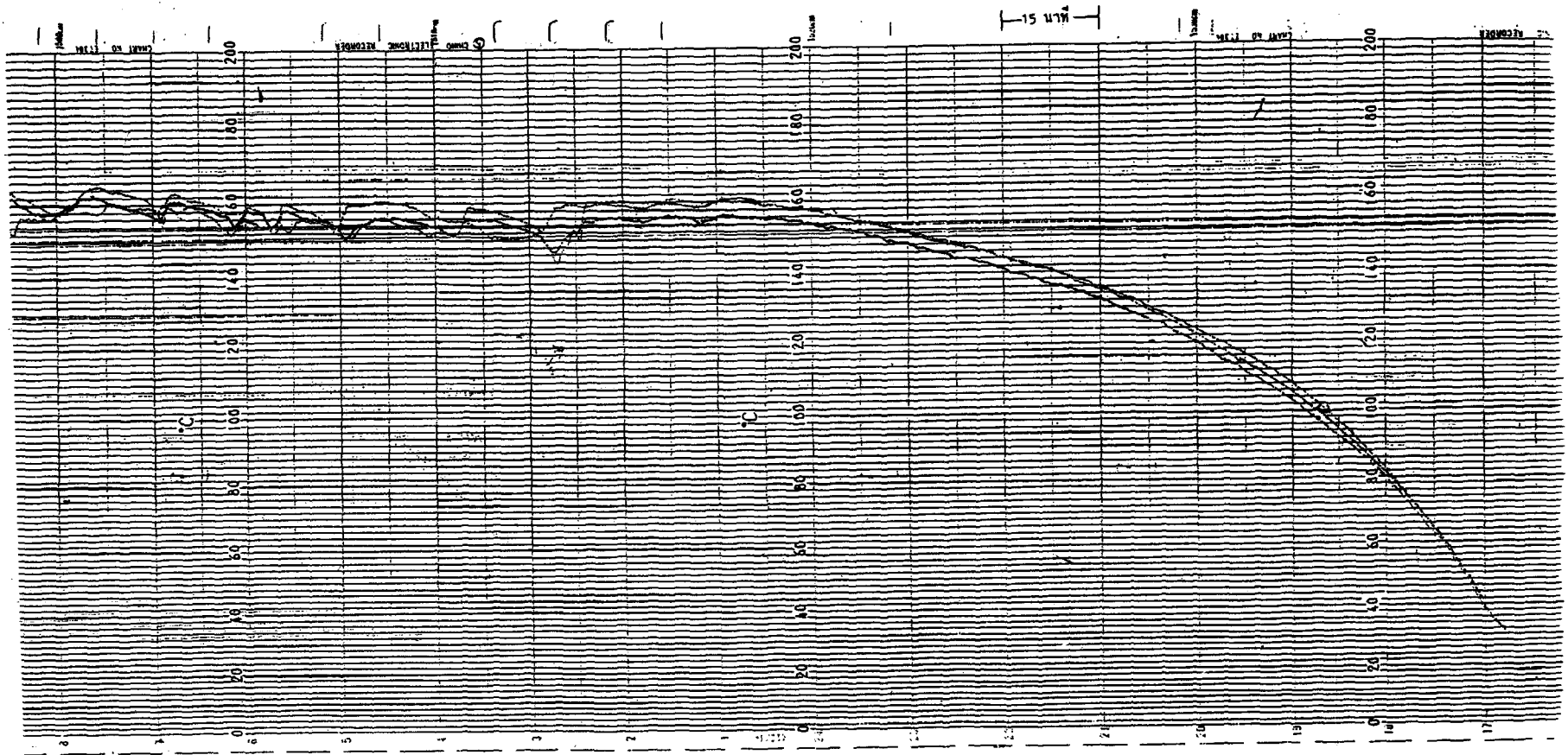
เนื่องจากอุโมงค์ลมร้อนที่ วท. สร้างขึ้นนั้น มีความยาวเพียง 6 ม. และอัตราการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งเป็น 3 ม./นาที, ในขณะที่ตัวอย่างตามสูตรที่ใช้จะสุกได้เมื่ออบที่ 150°C. เป็นเวลา 10 นาที. ดังนั้นในขณะอบตัวอย่างจึงต้องหยุดลูกกลิ้งไม่ให้เคลื่อนตัวอย่างเป็นครั้งคราวเพื่อชะลอให้ได้ระยะเวลาครบ 10 นาที ในการอบตลอดทั้งท่อ. สำหรับการเคลื่อนที่ครั้งแรกของลูกกลิ้งจะเริ่มเมื่อนำตัวอย่างเข้าไปในอุโมงค์และปิดรูทางเข้าแล้ว. การปิดรูดังกล่าวก็เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิภายในอุโมงค์ลดลงในระหว่างการทดลอง. ส่วนการนับเวลานั้นจะเริ่มตั้งแต่ตอนที่หัวตัวอย่างเข้าไปในอุโมงค์จนกระทั่งหัวตัวอย่างออกจากอุโมงค์. อุโมงค์นี้สามารถรักษาอุณหภูมิในช่วง 150-160°C. ได้เป็นอย่างดี. ดังตัวอย่างกราฟที่ได้จากเครื่องบันทึกในการทดลองที่ 1 และ 3 ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ, ทั้งนี้โดยการวัดอุณหภูมิที่ปลายอุโมงค์ทั้ง 2 ด้าน และที่ช่วงกลาง รวมเป็น 3 จุดด้วยกัน

ตารางที่ 4. ผลการทดลองอบตัวอย่างรัดของ โดยการแปรเปลี่ยนสภาวะของตัวอย่าง  
(อุณหภูมิ 150<sup>o</sup>ซ., เวลา 10 นาที)

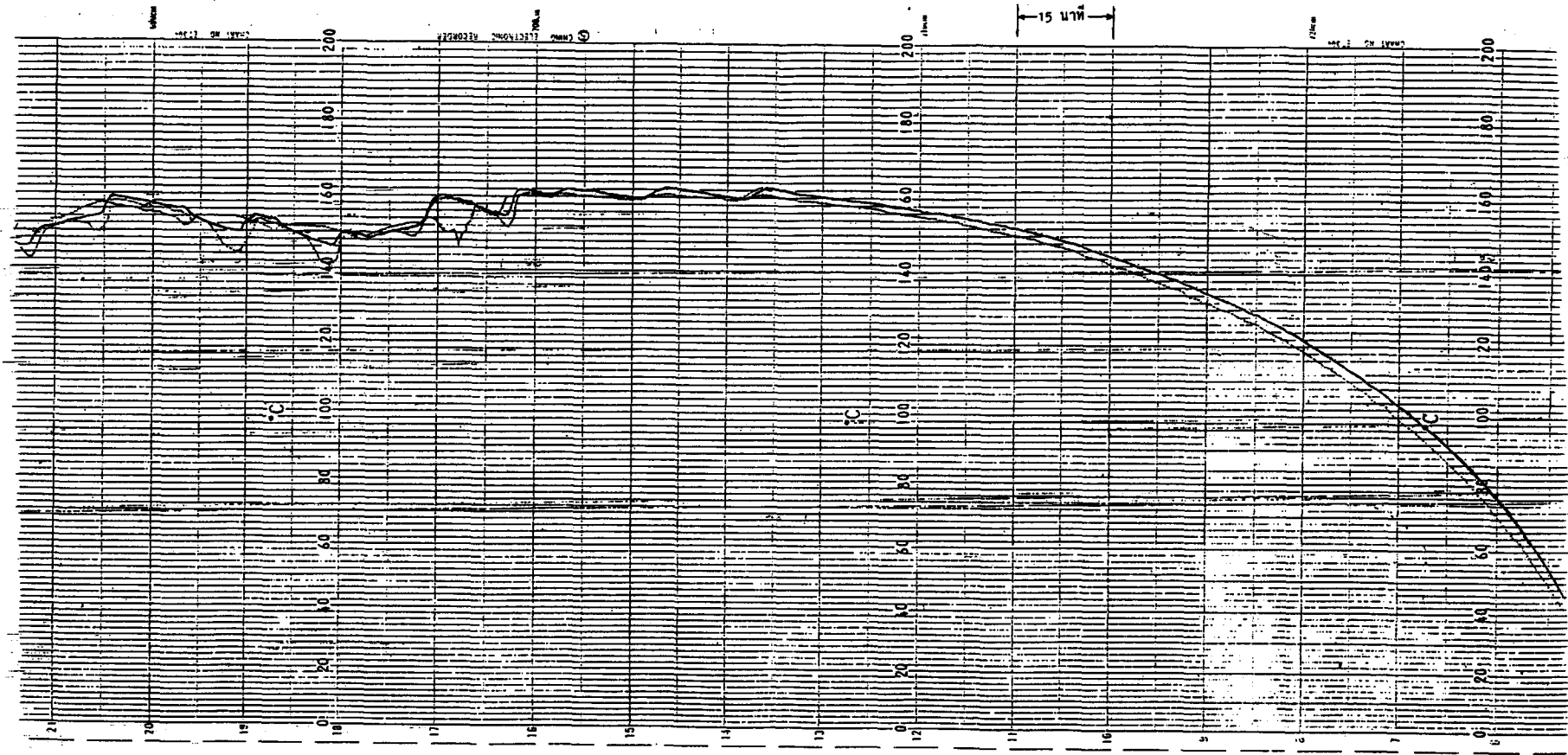
คุณสมบัติ	ความต้านแรงดึง (กก./ซม. <sup>2</sup> )				ความต้านแรง- ฉีกขาด (กก./ซม. <sup>2</sup> )				ความยืดที่จุดขาด (ร้อยละ)			
	การทดลองที่				การทดลองที่				การทดลองที่			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ไม่สวมท่อ, มีตะแกรง, ไม่ปิดหัวท้ายท่อ	55	48	45	58	-	-	11	13	620	670	610	620
ไม่สวมท่อ, มีตะแกรง, เป่าลมแล้วปิดหัวท้ายท่อ	84	81	81	62	15	16	15	11	650	591	630	795
สวมท่อ, ไม่มีตะแกรง, ไม่ปิดหัวท้ายท่อ	74	-	-	-	-	-	-	-	630	-	-	-
สวมท่อ, ไม่มีตะแกรง, ปิดหัวท้ายท่อ	83	117	-	-	17	22	-	-	600	590	-	-
สวมท่อ, มีตะแกรง, ไม่ปิดหัวท้ายท่อ	115	88	103	131	-	-	20	21	640	630	630	660
สวมท่อ, มีตะแกรง, ปิดหัวท้ายท่อ	128	135	128	-	21	19	23	-	581	695	650	-

ตารางที่ 5. ผลการทดลองอบตัวอย่างรัศของโดยการแปรเปลี่ยนเวลาการอบ (อุณหภูมิ 150<sup>o</sup>ซ., สวมท่อ, มีตะแกรงและปิดหัวท้ายท่อ)

คุณสมบัติ	ความต้านแรงดึง (กก./ซม. <sup>2</sup> )		ความต้านแรง- ฉีกขาด (กก./ซม. <sup>2</sup> )		ความยืดที่จุดขาด (ร้อยละ)	
	การทดลองที่		การทดลองที่		การทดลองที่	
	1	2	1	2	1	2
เวลา (นาที)						
10	135	128	19	23	695	650
12	96	94	16	16	765	745
15	105	-	16	-	745	-



รูปที่ 3. ตัวอย่างกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอุโมงค์ลมร้อนเมื่อ เปิดลมร้อนและขณะทำการทดลองที่ 1.  
หมายเหตุ : อุณหภูมิตกขณะทดลองเมื่อ เปิดรูอุโมงค์เพื่อนำน้ำอย่างเข้า.



รูปที่ 4. ตัวอย่างกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอุโมงค์ลมร้อนและขณะทำการทดลองที่ 3.  
หมายเหตุ : อุณหภูมิตกขณะทดลองเมื่อเปิดรูอุโมงค์เพื่อนำท่ออย่างเข้า.

## 4. วิจารณ์

### 4.1 การทดลองอบตัวอย่างโดยแปรเปลี่ยนสภาวะของตัวอย่าง

จากตารางที่ 4 กรณีไม่สวมท่ออะลูมิเนียม, ความต้านแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาดมีค่า 45-58 และ 11-13 กก./ซม.<sup>2</sup> เมื่อมีตะแกรงรองรับและไม่ปิดหัวท้ายท่อ, ในขณะที่เมื่อมีตะแกรงรองรับและปิดหัวท้ายท่อมีค่า 62-84 และ 11-16 กก./ซม.<sup>2</sup> ตามลำดับนั้น จะเห็นได้ว่าการปิดหัวท้ายท่อมีผลต่อคุณสมบัติของตัวอย่างไม่มาก โดยเฉพาะค่าความต้านแรงฉีกขาด, ดังนั้นหากไม่พิจารณาถึงการปิดหัวท้ายท่อด้วยแล้ว การสวมท่ออะลูมิเนียมโดยไม่มีตะแกรงรองรับซึ่งมีค่าความต้านแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาด 74-117 และ 17-22 กก./ซม.<sup>2</sup>, ในขณะที่มีตะแกรงรองรับมีค่า 128-135 และ 19-23 กก./ซม.<sup>2</sup> ตามลำดับนั้น พอจะพิจารณาสรุปได้ว่าการสวมท่ออะลูมิเนียมและมีตะแกรงรองรับจะช่วยให้อบตัวอย่างได้สุกดีขึ้น, ทั้งนี้เนื่องจากท่อและตะแกรงเป็นโลหะตัวกลางที่นำความร้อนได้ดีกว่าลมร้อน, นอกจากนั้นยังมีประโยชน์ในการช่วยทำให้ตัวอย่างไม่เสียรูปหรือยุบแบนติดกันด้วย.

### 4.2 การทดลองอบตัวอย่างโดยการแปรเปลี่ยนเวลาการอบ

ในขั้นต้น ท. ได้ทดลองอบตัวอย่างในอุโมงค์โดยใช้เวลาน้อยกว่า 10 นาที พบว่ายังไม่สุก, จึงได้ทดลองใช้เวลาตั้งแต่ 10 นาทีขึ้นไป. ตารางที่ 5 แสดงผลการทดลองอบตัวอย่างที่เวลา 10, 12 และ 15 นาที ตามลำดับ. การทดลองนี้เป็นการหาเวลาการอบที่เหมาะสมและศึกษาผลแตกต่างของเวลาซึ่งได้จากการอบในตู้อบของห้องปฏิบัติการและในอุโมงค์ลมร้อน. จากผลการทดลองพบว่าเวลาอบที่เหมาะสมคือ 10 นาที ซึ่งตรงกับผลการทดลองโดยใช้ตู้อบในห้องปฏิบัติการ. คุณสมบัติของตัวอย่างที่ผ่านการอบเป็นเวลา 10 นาที มีค่าความต้านแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาดเป็น 128-135 และ 19-23 กก./ซม.<sup>2</sup> ตามลำดับ, ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างที่อบที่ 12 และ 15 นาที. ส่วนค่าความยืดที่จุดขาดจะต่ำกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตามก็น่าสังเกตว่าค่าความยืดที่จุดขาดไม่แตกต่างกันมากนัก คือร้อยละ 600-750 ซึ่งเป็นที่ยอมรับทั่วไปสำหรับคุณสมบัติของยางรัดของ ตามมาตรฐาน JIS 1701-1976 (1980 revised), มาตรฐาน SLS 637:1984, มาตรฐาน MS 973: 1985 และร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) เรื่องยางรัดของ. ส่วนค่าความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาดที่ได้จากการทดลองนี้ค่อนข้างต่ำกว่าที่กำหนดในมาตรฐานบางประเทศ คือ MS และ มอก., และค่าที่ได้มีก็ต่ำกว่าที่เคยได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ (นุตาลัย และคณะ 2531). ความแตกต่างของค่าที่ได้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการทำให้ยางสุกที่แตกต่างกัน หรือเนื่องจากการเปลี่ยนวัตถุดิบ เช่น แหล่งและชนิดของยางดิบ, สารตัวเร่ง, และสารทำให้ยางสุก ฯลฯ เพราะสารเหล่านี้หากมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปแล้ว จะมีผลทำให้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย. นอกจากนี้ในการทดลองโดยใช้ระบบลมร้อนนี้ยังพบว่า เนื้อยางที่ผ่านการอบมีสภาพเป็นรูพรุนมากกว่า



ยางรัคของธรรมชาติซึ่งอบด้วยไอน้ำ ซึ่งรูพรุนนี้เกิดจากการอบโดยไม่ใช้ความดัน จึงไล่อากาศในยางออกไม่ได้.

## 5. สรุปและข้อเสนอแนะ

ท. ได้ทดลองออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุโมงค์ลมร้อนเพื่ออบตัวอย่างที่จะทำเป็นยางรัคของโดยใช้ข้อมูลเบื้องต้นซึ่งได้รับจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ. อุโมงค์ลมร้อนที่สร้างขึ้น มีความยาว 6 ม. ใช้ระบบลูกกลิ้งในการเคลื่อนตัวอย่าง และมีลมร้อนไหลหมุนเวียนด้วยแรงดันของพัคลมซึ่งควบคุมผ่านแผงความร้อนและกระจายส่งลมร้อนเข้าสู่อุโมงค์เป็น 6 จุดตามท่อต่าง ๆ ตลอดความยาวของอุโมงค์. อุปกรณ์นี้สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 150-160°C. ได้เป็นอย่างดี. ท. ได้ทดลองอบตัวอย่างซึ่งผลิตจากโรงงานศรีเทพไทยการยาง ที่อุณหภูมิ 150°C. เป็นเวลา 10 นาที โดยทดลองแปรเปลี่ยนสภาวะของตัวอย่าง ดังนี้ :

- อบตัวอย่างที่ไม่สวมท่ออะลูมิเนียม มีตะแกรงรองรับขณะเคลื่อนที่ และไม่ปิดหัวท้ายท่อ.
- อบตัวอย่างที่ไม่สวมท่ออะลูมิเนียม มีตะแกรงรองรับขณะเคลื่อนที่ และปิดหัวท้ายท่อ.
- อบตัวอย่างที่สวมไว้กับท่ออะลูมิเนียม ไม่มีตะแกรงรองรับขณะเคลื่อนที่และไม่ปิดหัวท้ายท่อ.
- อบตัวอย่างที่สวมไว้กับท่ออะลูมิเนียม มีตะแกรงรองรับขณะเคลื่อนที่และไม่ปิดหัวท้ายท่อ.
- อบตัวอย่างที่สวมไว้กับท่ออะลูมิเนียม มีตะแกรงรองรับขณะเคลื่อนที่และปิดหัวท้ายท่อ.

และแปรเปลี่ยนเวลาการอบโดยทดลองที่ 10, 12 และ 15 นาที. หลังจากนั้นได้ทดลองหาคุณสมบัติของตัวอย่างซึ่งผ่านการอบแล้ว คือ ค่าความต้านแรงดึง, ความยืดที่จุดขาด และความต้านแรงฉีกขาด.

จากผลการทดลองพบว่า คุณสมบัติของตัวอย่างจะดีที่สุดเมื่อใช้ระบบการอบโดยสวมไว้กับท่ออะลูมิเนียมและมีตะแกรงรองรับขณะเคลื่อนที่ไปบนลูกกลิ้ง. ตัวอย่างที่อบแล้วมีค่าความต้านแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาดเป็น 128-135 และ 19-23 กก./ซม.<sup>2</sup> ตามลำดับ, และมีค่าความยืดที่จุดขาดร้อยละ 600-700 สำหรับระยะเวลาที่ใช้ในการอบพบว่าใช้เวลา 10 นาที ที่ 150°C. จะให้คุณสมบัติที่ดีกว่าเวลา 12 และ 15 นาที. นอกจากนั้นสรุปได้ว่าการใช้ท่อและตะแกรงซึ่งเป็นโลหะจะช่วยให้เกิดการนำความร้อนดีกว่าการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวและมีประโยชน์ในการช่วยไม่ให้ตัวอย่างเสียรูประหว่างการอบด้วย.

อย่างไรก็ดี คุณสมบัติของท่ออย่างซึ่งได้จากการทดลองอบในอุโมงค์ลมร้อนนี้ต่ำกว่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ, ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างกันในระบบการทำยางให้สุกและการเปลี่ยนแปลงแหล่ง/ชนิดของวัตถุดิบ ซึ่งได้แก่ ยางดิบ, สารตัวเร่ง และสารทำให้ยางสุก ฯลฯ. นอกจากนี้ปรากฏว่าในเนื้อของยางสุกมีรูพรุนซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการที่ไม่สามารถไล่อากาศออกไปได้หมด, ดังนั้นระบบการใช้ลมร้อนเพื่ออบท่ออย่างที่จะใช้ทำยางรัคของนี้ จึงควรจะมีการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้เหมาะสมทั้งในทางเทคนิคและเศรษฐกิจต่อไปอีก.

## 6. เอกสารอ้างอิง

นุตาลัย, เกศรา; อรัญษะนาถ, ศิลปชัย; วงษ์พานิช, ประทุม; มีประเสริฐ, นันทนา; ประเสริฐพงศ์, บุญเชิด; มาทะ, เพิ่มสุข และ สถาปิตานนท์, กรรณิการ์. 2531. การปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยางรักของ : การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ระบบลมร้อนเพื่ออบยางในกระบวนการผลิตยางรักของ. ทท.: กรุงเทพฯ (รายงานฉบับที่ 1, การวิจัยลับเฉพาะที่ บ. 30-07.).

นุตาลัย, เกศรา; อรัญษะนาถ, ศิลปชัย; มีประเสริฐ, นันทนา; สถาปิตานนท์, กรรณิการ์ และ มาทะ, เพิ่มสุข. 2531. การปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยางรักของ : การสำรวจอุตสาหกรรมผลิตยางรักของ. ทท. : กรุงเทพฯ (รายงานฉบับที่ 1, โครงการวิจัยที่ ก. 30-03).

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม 2532. (ร่าง) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยางรักของ. (กรุงเทพฯ.)

Hofmann, W. 1967. Vulcanization and Vulcanizing Agents. pp. 51-55, Maclaren and Sons, Ltd.: London.

Japanese Standards Association. 1980. Japanese industrial standard testing method for rubber band for packaging. (JIS Z1701-1976, 1980 revised).

Malaysian Standard Specification. 1985. Malaysian standard specification for rubber bands. (MS 973:1985).

Sri Lanka Standard Specification. 1984. Sri Lanka standard specification for rubber bands. (SLS 637:1984).

ภาคผนวก

วิธีการคำนวณออกแบบอุปกรณ์โม่ผงสีมร่อนสำหรับบดตัวอย่างแบบต่อเนื่อง

1. การคำนวณออกแบบระบบการขับเคลื่อนตัวอย่าง

1.1 ความต้องการ : อัตราการเคลื่อนที่ของตัวอย่างไม่เกิน 3.0 ม./นาที เป็นเวลา 10 นาที

1.2 ข้อกำหนด : - ตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 25.4 มม. ทน 1 มม., หนัก 0.09 กก./ม.  
- มอเตอร์ความเร็วรอบ = 1420 rpm

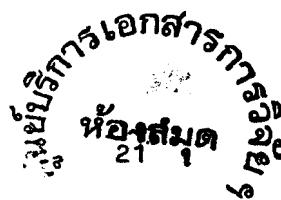
1.3 การคำนวณ :

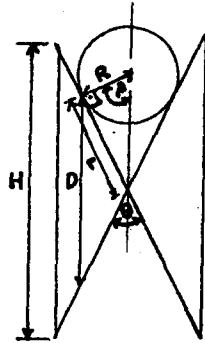
1.3.1 ขนาดกรวยบดตัวอย่าง :

- ใช้อุปกรณ์ทดรอบอัตราทด 1:60 โดยใช้เฟืองขับอุปกรณ์ทดรอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. และเฟืองขับโซ่ที่ติดกับอุปกรณ์ทดรอบขนาด 14 ฟัน
- เส้นผ่าศูนย์กลางพูลเล่ของมอเตอร์มีขนาด 60 มม.
- เฟืองลูกกลิ้งขับกรวยบดตัวอย่างขนาด 10 ฟัน

$$\text{ความเร็วรอบของกรวยบดตัวอย่าง} = \frac{1420 \times 60}{150} \times \frac{1}{60} \times \frac{14}{10} = 13.25 \text{ rpm}$$

- ให้ตัวอย่างเคลื่อนที่ 2.0 ม./นาที (ค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อเพิ่มระยะเวลาในการบด)





$$\begin{aligned} \therefore D (13.25) &= 2000 \\ \therefore D &= 48.05 \text{ mm} \\ \therefore D &= 2 L \sin \beta \\ \text{และ } L &= R \tan \beta \\ D &= 2 R \tan \beta \cdot \sin \beta \\ 48.05 &= 2 R \tan \beta \cdot \sin \beta \\ &= (25.4) (\tan \beta) (\sin \beta) \\ \therefore \beta &\approx 65^\circ \\ \therefore \beta &= 90 - \frac{\theta}{2} \\ \therefore \theta &= 2 (90 - \beta) = 2 (90 - 65) = 50^\circ \\ - \text{ให้ } H &= 1.5 D = (1.5) (48.05) = 72.08 \text{ mm} \\ \text{ขนาดกรวยฟ้าที่อย่าง คือ } H &= 72.08 \text{ mm}, \theta = 50^\circ \end{aligned}$$

### 1.3.2 ขนาดกำลังรับ :

- ใช้โซ่ความยาว 12 m ต่อช่วงอุโมงค์ 6 m โดยมีน้ำหนักเฉลี่ยของโซ่ 0.6 kg/m

จากสมการกำลังรับระบบสายพาน (สมการที่ 23, ใจจงกิจ 2524)

$$F_u = f_{ges} \cdot L \cdot \left( G_m + \frac{IG}{3600V} \right) + \frac{IG \cdot H}{3600V}$$

โดย

$$F_u = \text{แรงขับที่ไซ้} ; \text{ kN}$$

$$f_{ges} = \text{สัมประสิทธิ์แรงจذبรวม} = 0.5 \text{ (ตารางที่ 22, ใจจงกิจ 2524)}$$

$$G_m = \text{น้ำหนักของสายไซ้ + แขนหมุน + กรวยพา} ; \text{ kN/m}$$

$$= [(2) (0.6) + 1.0 + 1.5] (9.8) (10^{-3})$$

$$\text{kN/m} = 36.26 \times 10^{-3} \text{ kN/m}$$

$$I_G = \text{น้ำหนักปริมาณวัสดุขนถ่ายต่อชั่วโมง (รวมท่อเหล็กแกนท่อย่าง)} ;$$

$$\text{kN/hr} = (.09+1.6) (9.8) (10^{-3}) (2) (60) =$$

$$1987.44 \times 10^{-3} \text{ kN/hr}$$

$$V = \text{ความเร็วแล่นขนถ่าย} ; \text{ m/s} = \frac{2 \text{ m/sec}}{60} = 0.033 \text{ m/sec}$$

$$L = \text{ความยาวระบบขนถ่าย (แนวระนาบตรง)} ; \text{ m} = 6 \text{ m}$$

$$H = \text{ช่วงระดับต่างของการขนถ่าย} ; \text{ m} = 0 \text{ m}$$

$$\therefore F_u = (0.5) (6) (36.26 \times 10^{-3} + \frac{1987.44 \times 10^{-3}}{(3600)(0.033)} \pm 0$$

$$= 0.160 \text{ kN}$$

$$\therefore P_v = \frac{F_u \cdot V}{\eta_{ges}} \text{ (สมการที่ 26, ใจจงกิจ 2524)}$$

โดย

$$P_v = \text{กำลังขับที่พอดีการระเค็มที่} ; \text{ kW}$$

$$F_u = \text{แรงขับที่ไซ้, kN}$$

$$\eta_{ges} = \text{ประสิทธิภาพรวม} = 0.6$$

$$\therefore P_v = \frac{0.160 \times 0.033}{0.6} = 8.8 \times 10^{-3} \text{ kW} = 0.012 \text{ hp}$$

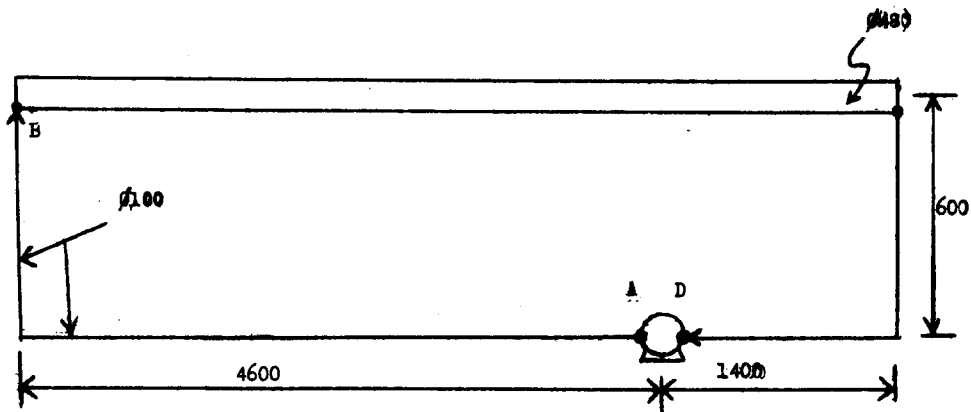
$\therefore$  ควรใช้กำลังของมอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด 0.25 hp

## 2. การคำนวณออกแบบระบบให้ความร้อน

2.1 ความต้องการ : อุณหภูมิของท่อภายในอุโมงค์เป็น  $150^\circ\text{C}$ .

2.2 วัสดุกำหนด :

- อุโมงค์กลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 480 มม. ยาว 6 ม.
- ท่อลมเข้าและออกจากอุโมงค์กลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. ความยาวระบุดังรูป.



หน่วย : mm

- อุโมงค์ลมและท่อส่งทำจากเหล็กเหนียว (mild steel) หนา 1 มม.
- อุโมงค์ลมและท่อส่งหุ้มด้วยฉนวนใยแก้ว (glass wool) หนา 1 นิ้ว

## 2.3 การคำนวณ :

### 2.3.1 ขนาดพัดลมและมอเตอร์ :

- เพื่อให้การกระจายอุณหภูมิภายในอุโมงค์เป็นไปอย่างทั่วถึง จึงกำหนดให้การหมุนเวียนของลมในอุโมงค์เป็นแบบ turbulent flow

$$\begin{aligned} \therefore Re_D &> 2000 \\ \text{ให้ } Re_D &= (2000)(10)^2 \\ \therefore Re_D &= \frac{VD\rho}{\mu_m} \quad (\text{สมการที่ 1 a บทที่ 7, Giles 1983}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } V &= \text{ความเร็วของลม ; ft/sec} \\ D &= \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ ; ft} = 480 \times 3.28 \times 10^{-3} \text{ ft} \\ \rho &= \text{ความหนาแน่นของอากาศที่ } 150^\circ\text{ซ. ; } 1 \text{ lbm/ft}^3 = 0.05 \text{ lbm/ft}^3 \\ \mu_m &= \text{dynamic viscosity ของอากาศที่ } 150^\circ\text{ซ. ; } 1 \text{ lbm/ft-sec} \\ &= 1.60 \times 10^{-5} \text{ lbm/ft-sec} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore V &= Re_D \cdot U_m / D \rho \\ &= \frac{(2000) (1.60) (10^{-5}) (10)^2}{(480) (3.281) (10^{-3}) (0.05)} = 4.1 \text{ ft/sec} \end{aligned}$$

$$Q = VA$$

โดย ;  $Q =$  อัตราการไหลของอากาศ ;  $\text{ft}^3/\text{sec}$   
 $A =$  พื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ ;  $\text{ft}^2$

$$\begin{aligned} Q &= \frac{(4.1) (\pi) (480 \times 3.281 \times 10^{-3})^2}{4} \text{ ft}^3/\text{sec} \\ &= \frac{(4.1) (\pi) (480 \times 3.281 \times 10^{-3})^2 (60)}{4} = 479.2 \text{ ft}^3/\text{min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{Lost head}_{AD} &= \text{Lost head}_{AB} + \text{Lost head}_{BC} + \text{Lost head}_{CD} \\ \text{Lost head} &= f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (\text{สมการที่ 11 บทที่ 7, Giles 1983}) \end{aligned}$$

โดย  $f =$  friction factor (diagram A-1, Giles 1983)  
 $L =$  equivalent length ของท่อส่ง ; m  
 $d =$  เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อส่ง ; m  
 $V =$  ความเร็วลมในท่อ ; m/sec  
 $g =$  ความเร่ง ;  $\text{m/sec}^2 = 9.81 \text{ m/sec}^2$

$$\text{Lost head}_{AB+CD} = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$f = .02$$

$$L = 7.2 \text{ m} + \text{equivalent length of } 2 \times 45^\circ - \text{Elbows}$$



โดย ∴ equivalent length =  $K(V^2/2g)$  (สมการที่ 18 บทที่ 7, Giles 1983)

$$K = 0.4 \text{ (ตารางที่ 4 ภาคผนวก, Giles, 1983)}$$

$$L = 7.2 + 2[0.4(28.8)^2/(2)(9.81)] = 41.0 \text{ m}$$

$$d = 0.1 \text{ m.}$$

$$V = \frac{(479.2)(28.32)(4)}{(1000)(60)(\pi)(0.1)^2} = 28.8 \text{ m/sec}$$

$$g = 9.81 \text{ m/sec}^2$$

$$\text{Lost head}_{AB+CD} = \frac{(0.2) \cdot (41.0)}{(0.1)} \cdot \frac{(28.8)^2}{(2)(9.81)} = 346.66 \text{ m}$$

$$\therefore \text{Lost head}_{BC} = \frac{f \cdot L}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$f = .02$$

$$L = 6 \text{ m}$$

$$d = 0.48 \text{ m}$$

$$v = (4.1)(.3048) = 1.25 \text{ m/sec}$$

$$g = 9.81 \text{ m/sec}^2$$

$$\therefore \text{Lost head}_{BC} = \frac{(0.02)(6)(1.25)^2}{(0.48)(2)(9.81)} = 0.02 \text{ m}$$

$$\therefore \text{Total lost head} = 346.66 + 0.02 = 346.68 \text{ m of air}$$

$$\therefore \text{Power} = \frac{\rho g Q H}{1000} \text{ kW (หน้า 74 บทที่ 6, Giles 1983)}$$

$$\rho = (0.05)(16.018) \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m/sec}^2$$

$$Q = (479.2)(28.32)/(1000)(60) = 0.226 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$H = 346.68 \text{ m}$$

$$\therefore \text{Power} = \frac{(0.05) (16.018) (9.81) (0.226) (346.68)}{1000} = 0.62 \text{ kW}$$

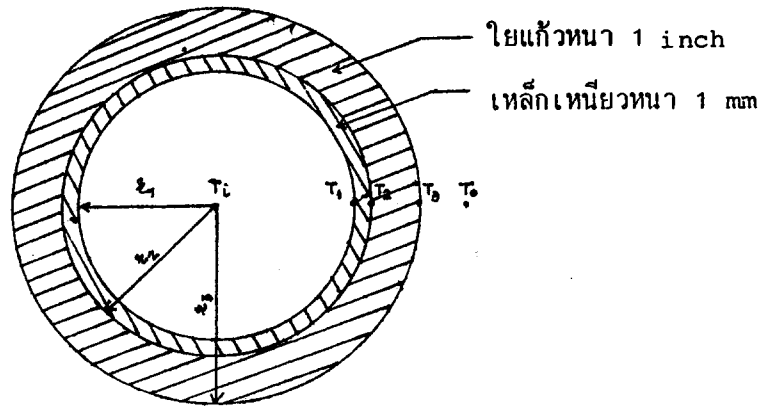
$$= (0.62) (1.3415) = 0.83 \text{ hp}$$

$\therefore$  ควรใช้พัดลมขนาด 480 ft<sup>3</sup>/min และมอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด 1 hp

### 2.3.2 ขนาดขดลวดความร้อน

ความร้อนที่ต้องการ = ความร้อนสูญเสียจากอุโมงค์ + ความร้อนสูญเสียจากท่อส่ง + ความร้อนที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิของท่ออย่าง เป็น 150°ซ.

ความร้อนสูญเสียจากอุโมงค์ ( $q_1$ ):



ค่ากำหนด :

$$L = \frac{6000}{(25.4) (12)} = 19.7 \text{ ft}$$

$$r_1 = \frac{(480)}{(25.4) (2)} = 9.45 \text{ inch} ; D_1 = 1.575 \text{ ft}$$

$$r_2 = \frac{(480+2)}{(25.4) (2)} = 9.49 \text{ inch} ; D_2 = 1.582 \text{ ft}$$

$$r_3 = 9.49 + 1 = 10.49 \text{ inch} ; D_3 = 1.748 \text{ ft}$$

$$T_i = 150^\circ\text{C} = 302^\circ\text{F} ; T_o = 25^\circ\text{C} = 77^\circ\text{F}$$

$$\begin{aligned}
 k \text{ mild steel} &= 25.5 \text{ Btu/hr-ft-}^\circ\text{F} = k_{1,2} \\
 k \text{ glass wool} &= 0.04 \text{ Btu/hr-ft-}^\circ\text{F} = k_{2,3} \\
 Re_D &= 2 \times 10^5
 \end{aligned}$$

ค่าสมมติ :

$$T_1 = 140^\circ\text{C} = 284^\circ\text{F}$$

จากตารางในภาคผนวกของเอกสาร Pitts and Sissom, 1983

$$\begin{aligned}
 \nu \text{ air, } 302^\circ\text{F} &= 29.36 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{sec} \\
 k \text{ air, } 302^\circ\text{F} &= 0.0204 \text{ Btu/hr-ft-}^\circ\text{F} \\
 U \text{ air, } 302^\circ\text{F} &= 1.598 \times 10^{-5} \text{ lbm/ft-sec} \\
 Pr \text{ air, } 302^\circ\text{F} &= 0.686 \\
 U \text{ air, } 284^\circ\text{F} &= 1.571 \times 10^{-5} \text{ lbm/ft-sec}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากการไหลของอากาศในอุโมงค์เป็น forced-turbulent flow ดังนั้นจึงใช้สมการของ Hausen ในกรณีของความร้อน ผ่านจากอากาศในอุโมงค์สู่ผิวอุโมงค์ด้านใน

$$\frac{\bar{h}_i D}{k} = (0.116) \left[ 1 + \left( \frac{D}{L} \right)^{2/3} \right] (Re_D^{2/3} - 125) Pr^{1/3} \left[ \frac{U_b D}{U_s L} \right]^{0.14}$$

(รูปที่ 8-11 บทที่ 8, Pitts and Sissom 1983)

$$\frac{\bar{h}_i (1.575)}{(0.0204)} = (0.116) \left[ 1 + \left( \frac{1.575}{19.7} \right)^{2/3} \right] (200000 - 125) (0.686)^{1/3} \left[ \frac{(1.598 \times 10^{-5})(1.575)}{(1.571 \times 10^{-5})(19.7)} \right]^{0.14}$$

$$\bar{h}_i = \frac{(0.0204) (0.116) (1.186) (3294.95) (0.88) (0.704)}{(1.575)} \text{ Btu/hr-ft}^2\text{-}^\circ\text{F}$$

$$= 3.64 \text{ Btu/hr-ft}^2\text{-}^\circ\text{F}$$

$$\therefore q = \bar{h}_i A (T_i - T_1) \text{ (สมการ 1.4 บทที่ 1, Pitts and Sissom 1983)}$$

$$q = (3.64) [(1.575)(19.7)] (302 - 284) \text{ Btu/hr}$$

$$q = 6386.61 \text{ Btu/hr}$$

ในกรณีความร้อนไหลผ่านอุโมงค์ลมตามแนวตั้งขวาง :

$$\therefore q = k_{1,2} \times (T_1 - T_2) = k_{1,2} \left[ \frac{2\pi L}{\ln(r_2/r_1)} \right] (T_1 - T_2) \quad (\text{สมการ 2.14 บทที่ 2, Pitts and Sissom 1983})$$

$$\begin{aligned} \therefore T_2 &= T_1 - \frac{(q) [\ln(r_2/r_1)]}{2\pi L k_{1,2}} \\ &= 284 - \frac{(6386.61) [\ln(9.49/9.45)]}{2\pi (19.7) (25.5)} \text{ } ^\circ\text{F} \\ &= 284 \text{ } ^\circ\text{F} \end{aligned}$$

ในกรณีความร้อนไหลผ่านฉนวนใยแก้ว :

$$\therefore q = k_{2,3} \times (T_2 - T_3) = k_{2,3} \left[ \frac{2\pi L}{\ln(r_3/r_2)} \right] (T_2 - T_3)$$

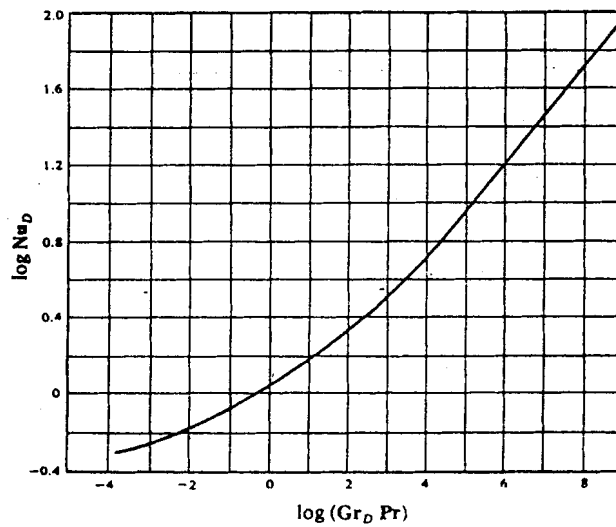
$$\begin{aligned} \therefore T_3 &= T_2 - \frac{(q) [\ln(r_3/r_2)]}{2\pi L k_{2,3}} \\ &= 284 - \frac{(6386.6) [\ln(10.49/9.49)]}{2\pi (19.7) (0.04)} \text{ } ^\circ\text{F} \\ &= 154.8 \text{ } ^\circ\text{F} \end{aligned}$$

ในกรณีความร้อนไหลผ่านจากผิวนอกใยแก้วสู่อากาศภายนอก :

$$\begin{aligned} q &= \bar{h}_o A (T_3 - T_o) \\ \therefore \bar{h}_o &= \frac{q}{A(T_3 - T_o)} \\ &= \frac{(6386.61)}{(\pi)(1.748)(19.7)(154.8-77)} \text{ Btu/hr-ft}^2\text{-}^\circ\text{F} \\ &= 0.759 \text{ Btu/hr-ft}^2\text{-}^\circ\text{F} \end{aligned}$$

ตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานโดยเปรียบเทียบค่า  $\bar{h}_o$  :

เนื่องจากการไหลของความร้อนจากผิวของฉนวนสู่บรรยากาศเป็นลักษณะ natural convection แบบ isothermal surface ของ horizontal cylinders ดังนั้นจึงใช้ความสัมพันธ์ของ  $\log \bar{N}_{uD}$  กับ  $\log (Gr_D \cdot Pr)$  ดังแสดงในรูป (รูป 8-6 บทที่ 8, Pitts and Sissom 1983)



$$Gr_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2}$$

(สมการ 8.1 บทที่ 8, Pitts and Sissom 1983)

โดย :  $g = 32.2 \text{ ft/sec}^2$   
 $T_s = T_3 = 154.8^\circ\text{F}$   
 $T_\infty = T_o = 77^\circ\text{F}$   
 $\beta = \frac{1}{T_f} \text{ โดย } T_f = \frac{(T_s + T)}{2} + 460 = 575.9^\circ\text{R}$

$$\therefore \beta = \frac{1}{575.9} = 1.736 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{R}^{-1}$$

$$k \text{ air, } 575.9 \text{ } ^\circ\text{R} = 0.016 \text{ Btu/hr-ft-}^\circ\text{F}$$

$$\nu \text{ air, } 575.9 \text{ } ^\circ\text{R} = 19.07 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{sec}$$

$$\text{Pr air, } 575.9 \text{ } ^\circ\text{R} = 0.7$$

$$L = D = 1.748 \text{ ft}$$

$$\therefore \text{Gr}_D = \frac{(32.2)(1.736 \times 10^{-3})(154.8 - 77)(1.748)^3}{(19.07 \times 10^{-5})^2}$$

$$= 6.387 \times 10^8$$

$$\therefore \log(\text{Gr}_D \cdot \text{Pr}) = \log(6.387 \times 10^8 \times 0.7) = 8.65$$

จากรูป เมื่อ  $\log(\text{Gr}_D \cdot \text{Pr}) = 8.65$  ใ้ค่า  $\log \bar{\text{Nu}}_D = 1.9$

$$\log \bar{\text{Nu}}_D = 1.9$$

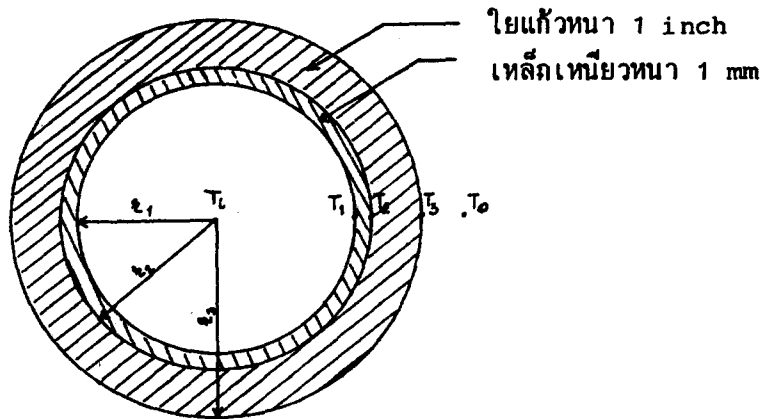
$$\therefore \bar{\text{Nu}}_D = \frac{\bar{h}L}{k} = 79.43$$

$$\therefore \bar{h} = \frac{(79.43)(0.016)}{(1.748)} = 0.73 \text{ Btu/hr-ft}^2\text{-}^\circ\text{F}$$

$\therefore$  ค่า  $\bar{h}$  และค่า  $\bar{h}_o$  มีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นสมมุติฐานที่กำหนดจึงใช้ในการคำนวณได้

$$\therefore q_1 = 6386.61 \text{ Btu/hr}$$

ความร้อนสูญเสียจากท่อส่ง ( $q_2$ ):



ค่ากำหนด :

$$L = \frac{6000}{(25.4)(12)} = 19.7 \text{ ft}$$

$$r_1 = \frac{(100)}{(25.4)(2)} = 1.97 \text{ inch; } D_1 = 0.33 \text{ ft}$$

$$r_2 = \frac{(100+2)}{(25.4)(2)} = 2.01 \text{ inch; } D_2 = 0.34 \text{ ft}$$

$$r_3 = 2.01 + 1 = 3.01 \text{ inch; } D_3 = 0.50 \text{ ft}$$

$$T_i = 150^\circ\text{C} = 302^\circ\text{F}; T_o = 25^\circ\text{C} = 77^\circ\text{F}$$

$$k \text{ mild steel} = 25.5 \text{ Btu/hr-ft-}^\circ\text{F} = k_{1,2}$$

$$k \text{ glass wool} = 0.04 \text{ Btu/hr-ft-}^\circ\text{F} = k_{2,3}$$

$$\therefore Re_D = \frac{VD\rho}{\mu_m}$$

$$\text{โดย } V = (28.8)(3.281) = 94.49 \text{ ft/sec}$$

$$D = 100 \times 3.281 \times 10^{-3} = 0.3281 \text{ ft}$$

$$\rho = 0.05 \text{ lbm/ft}^3$$

$$\mu_m = 1.60 \times 10^{-5} \text{ lbm/ft-sec}$$

$$\therefore Re_D = \frac{(94.49)(0.3281)(0.05)}{(1.60 \times 10^{-5})} = 9.7 \times 10^4$$

ค่าสมมุติ :

$$T_1 = 143^\circ\text{C} = 290^\circ\text{F}$$

จากตารางในภาคผนวกของเอกสาร Pitt and Sissom 1983

$$\mu_{\text{air}, 290^\circ\text{F}} = 1.58 \times 10^{-5} \text{ lbm/ft-sec}$$

เนื่องจากการไหลของอากาศในท่อส่งเป็นแบบ forced-turbulent flow ดังนั้นจึงใช้สมการของ Hausen ในการหาค่าความร้อนไหลผ่านจากอากาศในท่อส่งสู่ผิวท่อส่งด้านใน

$$\frac{\bar{h}_i D}{k} = (0.116) \left[ 1 + \left( \frac{D}{L} \right)^{2/3} \right] (Re_D^{2/3} - 125) Pr^{1/3} \left[ \frac{\mu_b D}{\mu_s L} \right]^{0.14}$$

$$\therefore \bar{h}_i = \frac{(0.0204)(0.116)}{(0.33)} \left[ 1 + \left( \frac{0.33}{19.7} \right)^{2/3} \right] (97000^{2/3} - 125) (0.686)^{1/3}$$

$$\left[ \frac{(1.598 \times 10^{-5})(0.33)}{(1.58 \times 10^{-5})(19.7)} \right]^{0.14}$$

$$\therefore \bar{h}_i = 7.56 \text{ Btu/hr-ft}^2\text{-}^\circ\text{F}$$

$$\therefore q = \bar{h}_i A (T_1 - T_2)$$

$$q = (7.56) [(\pi)(0.33)(19.7)] (302 - 290) \text{ Btu/hr}$$

$$q = 1853.23 \text{ Btu/hr}$$

ในการหาค่าความร้อนไหลผ่านท่อส่งตามแนวรัศมีวง :

$$\therefore q = k_{1,2} \times (T_1 - T_2) = k_{1,2} \left[ \frac{2\pi L}{\ln(r_2/r_1)} \right] (T_1 - T_2)$$

$$\therefore T_2 = 290 - \frac{(1853.23)[\ln(2.01/1.97)]}{2\pi(19.7)(25.5)} \text{ }^\circ\text{F}$$

$$= 290 \text{ }^\circ\text{F}$$

ในการหาค่าความร้อนไหลผ่านฉนวนใยแก้ว :

$$\therefore q = k_{2,3} \times (T_2 - T_3) = k_{2,3} \left[ \frac{2\pi L}{\ln(r_3/r_2)} \right] (T_2 - T_3)$$



$$\begin{aligned} \therefore T_3 &= 290 - \frac{(1853.23)[\ln(3.01/2.01)]}{(2\pi)(19.7)(0.04)} \text{ } ^\circ\text{F} \\ &= 138.84 \text{ } ^\circ\text{F} \end{aligned}$$

ในกรณีความร้อนไหลผ่านจากผิวนอกใยแก้วสู่อากาศภายนอก :

$$\begin{aligned} q &= \bar{h}_o A (T_3 - T_0) \\ \therefore \bar{h}_o &= \frac{(1853.23)}{(2\pi)(0.5)(19.7)(138.84-77)} \text{ Btu/hr-ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \\ &= 0.9684 \text{ Btu/hr-ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \end{aligned}$$

ตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานโดยเปรียบเทียบค่า  $\bar{h}_o$  :

เนื่องจากการไหลของความร้อนจากผิวของฉนวนสู่บรรยากาศเป็นลักษณะ natural convection แบบ isothermal surface ของ horizontal cylinders ดังนั้นจึงใช้ความสัมพันธ์ของ  $\log \bar{Nu}_D$  กับ  $\log (Gr_D Pr)$  ดังแสดงในรูปที่ผ่านมา.

$$Gr_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2}$$

$$\text{โดย } T_s = T_3 = 138.84 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$T_\infty = T_0 = 77 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\therefore \beta = \frac{1}{T_f} \text{ โดย } T_f = \frac{(T_s + T_\infty)}{2} + 460 = 567.92 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\therefore \beta = \frac{1}{567.92} = 1.76 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{R}^{-1}$$

$$\nu_{\text{air}, 567.92 \text{ } ^\circ\text{F}} = 1.859 \times 10^{-4} \text{ ft}^2/\text{sec}$$

$$Pr_{\text{air}, 567.92 \text{ } ^\circ\text{R}} = 0.7046$$

$$k_{\text{air}, 567.92 \text{ } ^\circ\text{R}} = 0.01584 \text{ Btu/hr-ft-}^\circ\text{F}$$

$$L = D = 0.5 \text{ ft}$$

$$\begin{aligned} \therefore Gr_D &= \frac{(32.2)(1.76 \times 10^{-3})(138.84-77)(0.5)^3}{(1.859 \times 10^{-4})^2} \\ &= 1.269 \times 10^7 \end{aligned}$$

$$\therefore \log (Gr_D \cdot Pr) = \log (1.269 \times 10^7 \times 0.7046) = 6.95$$

จากรูป 8.6, บทที่ 8 เอกสาร Pitts and Sissom 1983 เมื่อ  $\log(Gr_D \cdot Pr) = 6.95$  ได้ค่า  $\log \bar{Nu}_D = 1.48$

$$\log \bar{Nu}_D = 1.48$$

$$\therefore \bar{Nu}_D = \frac{\bar{h}L}{k} = 30.20$$

$$\therefore \bar{h} = \frac{(30.20)(0.01584)}{(0.5)} = 0.9567 \text{ Btu/hr-ft}^2\text{-}^\circ\text{F}$$

$\therefore$  ค่า  $\bar{h}$  และค่า  $\bar{h}_o$  มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสมมติฐานที่กำหนดจึงใช้ในการคำนวณได้

$$\therefore q_2 = 1853.23 \text{ Btu/hr}$$

ความร้อนที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิของท่ออย่างเป็น 150<sup>o</sup>ซ. ( $q_2$ ) :

ค่ากำหนด :

$$\begin{aligned} - \text{อัตราการเคลื่อนที่ของท่ออย่างเข้าสู่โมงค์} &= (2.0)(0.09) \text{ kg/min} \\ &= 0.18 \text{ kg/min} \end{aligned}$$

$$- \text{ค่าความร้อนจำเพาะของท่ออย่าง} = 0.50 \text{ Btu/lbm-}^\circ\text{F}$$

$$- \text{ระยะเวลาที่ทำให้ยางมีอุณหภูมิ 150<sup>o</sup>ซ.} = \text{min}$$

สมมติฐาน :

- การเพิ่มอุณหภูมิของเนื้อท่ออย่างในขณะที่ท่ออย่างเคลื่อนที่เข้าสู่โมงค์สมร้อนเป็นไปในลักษณะอัตราการเพิ่มขึ้นคงที่

$$\therefore Q = ms\Delta T \text{ (สมการ 1.15 บทที่ 1, Pitts and Sissom 1983)}$$

$$m = (0.18) (2) = 0.36 \text{ kg}$$

$$= (0.36) (2.2) = 0.792 \text{ lbm}$$

$$s = 0.50 \text{ Btu/lbm-}^\circ\text{F}$$

$$\Delta T = (302-77) = 225 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$\therefore Q = (0.792) (0.50) (225) = 89.1 \text{ Btu}$$

เนื่องจากสมมุติฐานที่กำหนดดังนี้

$$\text{ความร้อนเฉลี่ยที่ต้องการภายใน 1 hr} = \frac{(89.1)(60)}{(2)(2)} = 1336.5 \text{ Btu/hr}$$

$$\therefore q_3 = 1336.5 \text{ Btu/hr}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ความร้อนที่ต้องการรวม} &= q_1 + q_2 + q_3 \\ &= 6386.61 + 1853.23 + 1336.5 \text{ Btu/hr} \\ &= 9576.34 \text{ Btu/hr} \\ &= (9576.34)(293)(10^{-6}) = 2.8 \text{ kW} \end{aligned}$$

\therefore ควรเลือกใช้ชุดความร้อนไม่ต่ำกว่า 3 kW

#### อักษรย่อของหน่วย

m	=	เมตร
min	=	นาที
kg	=	กิโลกรัม
rpm	=	รอบต่อนาที
mm	=	มิลลิเมตร
kN	=	กิโลนิวตัน
hr	=	ชั่วโมง
sec	=	วินาที
kW	=	กิโลวัตต์
hp	=	แรงม้า
inch	=	นิ้ว
ft	=	ฟุต
lbm	=	ปาวด์
Btu	=	บีทียู
$^{\circ}\text{F}$	=	องศาฟาเรนไฮต์
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซนติเกรด
$^{\circ}\text{R}$	=	องศาแรงกิน

### เอกสารอ้างอิง

ใจจงกิจ, บุญศักดิ์. 2524. เครื่องกลขนถ่ายระบบขนถ่ายต่อเนื่อง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า. : กทม.

Giles, R.V. 1983. Theory and Problems of Fluid Mechanics and Hydraulics. SI. ed., McGraw-Hill International Book Company : Singapore.

Pitts, D.R. and Sissom, L.E. 1983. Theory and Problems of Heat Transfer. McGraw-Hill International Book Company : Singapore.