

การผลิตแผ่นฉนวนความร้อนหุ้มไฟจากเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติ

Manufacture of Flame Retardant and Insulation Sheets From Water Orchid Fiber and Natural Rubber

คำนำ

การเกิดอุบัติเหตุเพลิงไหม้หลายครั้งสร้างความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สิน ความรุนแรงและอัตราการลามไฟนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และปัจจัยหนึ่งที่มีผลก็คือชนิดของวัสดุที่ใช้ โดยเฉพาะภายในบ้านเรือนที่อยู่อาศัยทั่วไป ส่วนมากจะตกแต่งด้วยวัสดุติดไฟ และไม้หุ้มไฟ เช่น ฟองน้ำ ไม้อัด แผ่นโฟม เป็นต้น วัสดุที่ใช้ตกแต่งภายในถ้าเลือกได้ควรเป็นวัสดุที่เป็นทั้งฉนวนความร้อนและหุ้มไฟ ในยุคปัจจุบันฉนวนความร้อนถือเป็นวัสดุจำเป็นที่ใช้ในอาคาร บ้านพักอาศัยและโรงงาน ฉนวนความร้อนที่เป็นที่แพร่หลายในปัจจุบันได้แก่ ฉนวนใยแก้วและโฟมใยแก้วนั้น มีผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อร่างกายทั้งขณะติดตั้ง และหลังการติดตั้ง ส่วนโฟมนั้นนอกจากติดไฟแล้วยังย่อยสลายได้ยากตามธรรมชาติอีกด้วย

ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาวัสดุที่เป็นทั้งฉนวนกันความร้อนและหุ้มไฟ เพื่อประโยชน์ในการใช้เป็นวัสดุตกแต่งภายในที่อยู่อาศัย หรือจะประยุกต์เป็นอย่างอื่นก็แล้วแต่ความเหมาะสม วัสดุดิบตัวหนึ่งที่น่าสนใจก็คือผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติ เนื่องจากผักตบชวาเป็นเส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติคล้ายหญ้าแฝกตอนที่เคยมีผู้วิจัยทำแผ่นฉนวนกันความร้อนด้วยการผสมกับน้ำยางธรรมชาติมาแล้ว ส่วนการวิจัยนี้จะวิจัยเพิ่มในส่วนของคุณสมบัติการหุ้มไฟ เนื่องจากในประเทศไทยมีผักตบชวาเป็นจำนวนมากและเป็นปัญหาแก่ระบบชลประทานจึงเหมาะที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม

วัตถุประสงค์

การศึกษาการผลิตแผ่นฉนวนความร้อนห่อหุ้มไฟจากเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติ มีวัตถุประสงค์ต่อไปนี้

1. เพื่อผลิตแผ่นฉนวนความร้อนที่มีคุณสมบัติห่อหุ้มไฟ สำหรับการใช้งานด้านความปลอดภัย
2. เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมผักตบชวาให้มีลักษณะเป็นเส้นใยที่เหมาะสมเพื่อนำไปทำปฏิกิริยากับสารห่อหุ้มไฟเพื่อผลิตเป็นแผ่นฉนวนความร้อนห่อหุ้มไฟ
3. เพื่อศึกษาชนิดและอัตราส่วนของสารเคมีห่อหุ้มไฟที่เหมาะสมที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเส้นใยผักตบชวาเพื่อผลิตแผ่นฉนวนความร้อนห่อหุ้มไฟ
4. เพื่อศึกษาชนิดและอัตราส่วนของสารเคมีห่อหุ้มไฟที่เหมาะสมที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับน้ำยางธรรมชาติสูตรเบ้ายางเพื่อผลิตแผ่นฉนวนความร้อนห่อหุ้มไฟ
5. เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยผักตบชวาที่ผสมสารห่อหุ้มไฟแล้วกับน้ำยางธรรมชาติที่ผสมสารห่อหุ้มไฟแล้ว เพื่อใช้ในการผลิตแผ่นฉนวนความร้อนห่อหุ้มไฟตลอดจนอิทธิพลของความหนาแน่นของแผ่นฉนวนความร้อนห่อหุ้มไฟที่ผลิตได้ต่ออัตราการลามไฟ
6. เพื่อศึกษาคุณสมบัติอัตราการลามไฟตามมาตรฐาน ASTM D635-98 และค่าการนำความร้อนของแผ่นฉนวนความร้อนห่อหุ้มไฟที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวา และน้ำยางธรรมชาติเทียบกับฉนวนใยแก้ว

ขอบเขตของการวิจัย

การผลิตนวนก้นความร้อนชนิดแห้งไฟจากเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติ ในขั้นตอนแรกจะมีการปรับปรุงเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติเพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมในการผลิตเป็นแผ่น จากนั้นจะมีการปรับปรุงเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติเพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมในการผลิตเป็นแผ่นนวนก้นความร้อนแห้งไฟ ซึ่งในส่วนของการผักตบชวานั้นจะทำการวิจัยเพื่อหาสภาวะการเตรียมเส้นใยที่เหมาะสมและลดอัตราการลามไฟด้วยสารหน่วงไฟ ส่วนน้ำยางธรรมชาติทำโดยลดปริมาณเนื้อยางธรรมชาติในการทำแผ่นนวนก้นความร้อน และลดอัตราการลามไฟด้วยการผสมหน่วงไฟเช่นกัน จากนั้นจึงทำการขึ้นรูปแผ่นนวนด้วยวิธีโรยเส้นใยผักตบชวาแล้วพ่นละอองฝอยด้วยน้ำยางที่ผสมสารหน่วงไฟสลับกันไปจนได้ความหนาที่ต้องการ และนำแผ่นนวนที่ได้มาทดสอบหาอัตราการลามไฟตามมาตรฐาน ASTM D635-98 และสมบัติการนำความร้อนเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนของนวนใยแก้ว เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาความเหมาะสมในการผลิตเพื่อการพาณิชย์ต่อไป

การวิจัยนี้จะใช้จำนวนชิ้นงานในการทดสอบหาอัตราการลามไฟและสมบัติการนำความร้อนทั้งหมด 16 ชิ้นงาน เนื่องจากข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่ายในการทดสอบชิ้นงาน

การตรวจเอกสาร

ผู้วิจัยได้รวบรวมทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ดังต่อไปนี้

1. ทฤษฎีการเกิดเพลิงไหม้
2. ทฤษฎีเรื่องน้ำยางธรรมชาติ
3. ทฤษฎีเรื่องผักตบชวา
4. ทฤษฎีเรื่องสารหน่วงไฟ
5. ทฤษฎีเส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ
6. ทฤษฎีการสร้างสมมติฐาน ทดสอบสมมติฐาน
7. ทฤษฎีการวิเคราะห์ความแปรปรวน
8. มาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีการเกิดเพลิงไหม้

1. ธรรมชาติของไฟ

สุภัทร (2542) ไฟหรือการเผาไหม้สันดาป เป็นปฏิกิริยาเคมีในการเติมออกซิเจนของสารใดสารหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างมากมาย มีแสงสว่าง และสภาพการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ เกิดขึ้นด้วยจะเห็นว่าไฟจะเกิดขึ้นได้ต้องประกอบด้วยองค์ประกอบสามอย่างตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สามเหลี่ยมองค์ประกอบของการเกิดไฟ

ที่มา: สุภัทร (2542)

1.1 เชื้อเพลิง ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะเช่นใด เช่นเป็นวัตถุเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงเหลว หรือก๊าซ (ภายใต้ความดัน) ต้องเปลี่ยนจากสถานะเดิมเป็นไอหรือก๊าซก่อน

ความร้อนที่ทำให้เชื้อเพลิงเปลี่ยนสถานะเป็นไอ หรือก๊าซ เข้าผสมกับอากาศอย่างได้สัดส่วน และพร้อมที่จะลุกไหม้ได้ เรียกว่า ความร้อนถึงจุดวาบไฟ (Flash Point) ตัวอย่างจุดวาบไฟของเชื้อเพลิงต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างจุดวาบไฟของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

เชื้อเพลิง	จุดวาบไฟ (°F)
เบนซิน	-45
น้ำมันก๊าด	100
น้ำมันหมู	39
กระดาษ	150 - 300
ไม้	350 - 400

ที่มา: สุภัทร (2542)

1.2 ความร้อน ความร้อนที่จะเป็นต้นเหตุแห่งการติดไฟต้องสูงพอที่จะยกอุณหภูมิของสิ่งที่เป็นเชื้อเพลิงให้จุดไฟติด (Ignition Temperature) เชื้อเพลิงนั้น ๆ ความร้อนถึงจุดไฟติดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นไฟและการเผาไหม้ขึ้น จุดไฟติดของเชื้อเพลิงต่าง ๆ จะสูงกว่าจุดวาบไฟมากหรือน้อยแล้วแต่ลักษณะทางสารสมบัติของเชื้อเพลิงนั้น

1.3 อากาศ(ออกซิเจน) ได้แก่ อากาศในบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่ในอัตราประมาณร้อยละ 21 ออกซิเจนเป็นก๊าซที่ช่วยให้ไฟติด อัตราส่วนของออกซิเจนถ้าลดต่ำกว่าร้อยละ 15 แล้วไฟจะไหม้ช้าลงหรือดับมอด อย่างไรก็ตามก็ดีแม้ว่าออกซิเจนจะมีส่วนช่วยอย่างสำคัญในการเผาไหม้ แต่ต้องมีส่วนผสมกับไอหรือก๊าซของเชื้อเพลิงแต่ละอย่างในระหว่างร้อยละ 1.4 ถึง 7.6 หมายความว่า

1.3.1 โอน้ำมันต้องไม่น้อยกว่า 1.4 และมีอากาศไม่มากกว่า 98.6 โดยประมาณ

1.3.2 โอน้ำมันต้องไม่มากกว่า 7.6 และมีอากาศไม่น้อยกว่า 92.4 มิฉะนั้นจะไม่สามารถจุดติดได้ เพราะโอน้ำมันอาจเจือจางไปหรือหนาแน่นมากเกินไป

2. กระบวนการเผาไหม้

2.1 เชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้มี 3 ชนิด

2.1.1 ของแข็ง

2.1.2 ของเหลว

2.1.3 แก๊ส

โดยอาศัยออกซิเจนในอากาศปกติ เชื้อเพลิง ของแข็งและของเหลวจะเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สก่อนจึงเกิดการเผาไหม้

2.2 เปลวไฟจากการเผาไหม้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

2.2.1 แบบผสมเสร็จ (Pre-Mixed) เชื้อเพลิงแก๊สและออกซิเจน จะผสมคลุกเคล้ากัน ก่อนเกิดการจุดระเบิด (Ignition) เช่น การเผาไหม้ในกระบอกลูกสูบเครื่องยนต์ เป็นต้น

2.2.2 แบบผสมภายหลัง (Diffusive) การเผาไหม้เกิดในพื้นที่ที่มีเชื้อเพลิงและออกซิเจนทั่วไป เช่น การเผาไหม้ของเปลวเทียน เป็นต้น

ถ้าเกิดการเผาไหม้แบบผสมเสร็จในปริมาตรที่จำกัด เช่น ถ้าเก็บห้องปิดขนาดเล็ก จะเกิดการเพิ่มแรงดันอย่างรวดเร็วและรุนแรงเป็นแรงระเบิดได้

3. ผลของการเผาไหม้

ผลของการเผาไหม้จะทำให้เกิดความร้อน และบางครั้งอาจทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องได้ การเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเกิดมาจากการที่ส่งกลับมาจากไฟสู่เชื้อเพลิง ทำให้เชื้อเพลิงนั้นลุกไหม้อย่างต่อเนื่องความร้อนที่ส่งกลับมานั้นเกิดขึ้นโดยกระบวนการส่งผ่านความร้อน (Heat Transfer) และจากการสัมผัสโดยตรงของเปลวไฟ (Direct Flame Contact)

3.1 การส่งผ่านความร้อน (Heat Transfer) เป็นกระบวนการอย่างหนึ่งในอัตราการลามไฟ (Fire Spread) จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ประกอบด้วย

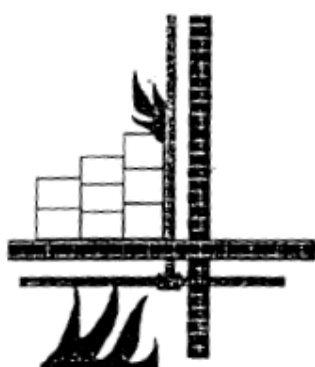
3.1.1 การนำความร้อน (Conduction) เป็นการส่งผ่านความร้อนจากการสัมผัสโดยตรงของสิ่งหนึ่งกับอีกสิ่งหนึ่ง

ตารางที่ 2 แสดงค่าความสามารถในการนำความร้อนของสารบางชนิด

Material	Thermal Conductivity (W/m.K)	Relative Conductivity
Copper	0.92	4842
Steel	0.11	579
Lead	0.80	421
Fibre Glass	0.03-0.04	23.4
Concrete	0.0022	11.6
Brick	0.0015	7.9
Cement	0.0007	3.7
Wood	0.0003	1.6

ที่มา: สุภัทร (2542)

จะเห็นว่าพวกโลหะนำความร้อนได้ดีกว่าอโลหะ โดยเฉพาะทองแดงนั้นมีค่านำความร้อนสูงมาก ดังนั้นจึงใช้เป็นตัวนำความร้อนที่ดีเหมาะสำหรับทำสายไฟ เหล็กนำความร้อนได้ดีกว่าอิฐ ซีเมนต์ และคอนกรีต ส่วนไม้เป็นตัวนำความร้อนที่เลวและลูกไหม้ช้า ดังนั้นคนจึงใช้ไม้เนื้อแข็งมาทำประตู เพื่อประโยชน์ในการป้องกันไฟ ตัวอย่างการนำความร้อนดังแสดงในภาพที่ 2

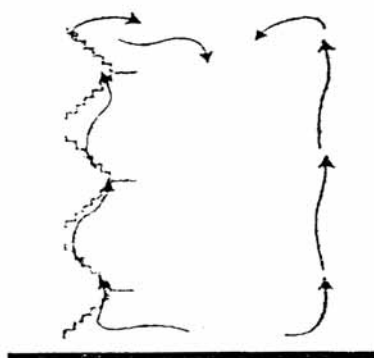


ภาพที่ 2 แสดงการส่งผ่านความร้อนโดยการนำความร้อน

ที่มา: สุภัทร (2542)

เป็นภาพเพลิงลุกไหม้ขึ้นที่ชั้นล่าง ท่อโลหะที่เดินพาดผ่านจากชั้นล่างขึ้นไปชั้นบนจะเป็นตัวนำความร้อนไปทำให้วัสดุที่ลุกติดไฟได้ง่ายซึ่งวางอยู่ใกล้กับท่อโลหะบนชั้นที่ 2 ลุกไหม้ขึ้นอีกจุดหนึ่ง

3.1.2 การพาความร้อน (Convection) เป็นการเคลื่อนตัวของความร้อนโดยมีอากาศเป็นตัวกลางในการพาความร้อนเคลื่อนที่โดยจะเกิดการหมุนเวียนของอากาศร้อนกับอากาศที่เป็นผลผลิตของการเผาไหม้ เนื่องจากก๊าซที่ร้อนจะมีคุณสมบัติเบากว่าอากาศที่อยู่รอบ ๆ ดังนั้นความร้อนจึงแพร่ขึ้นทางด้านบนออกไปตามช่องต่าง ๆ เช่น หน้าต่าง ประตู ช่องระบายอากาศ ท่อแอร์ ช่องบันได ปล่องไฟ ฯลฯ และเป็นสาเหตุให้เกิดเพลิงลุกไหม้ในห้องอื่นหรือชั้นอื่น ๆ ด้วย ตัวอย่างการพาความร้อนดังแสดงในภาพที่ 3

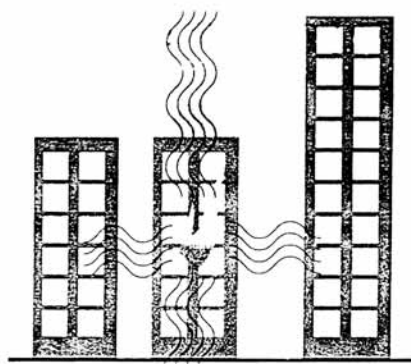


ภาพที่ 3 แสดงการส่งผ่านความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยการพาความร้อน

ที่มา: สุภัทร (2542)

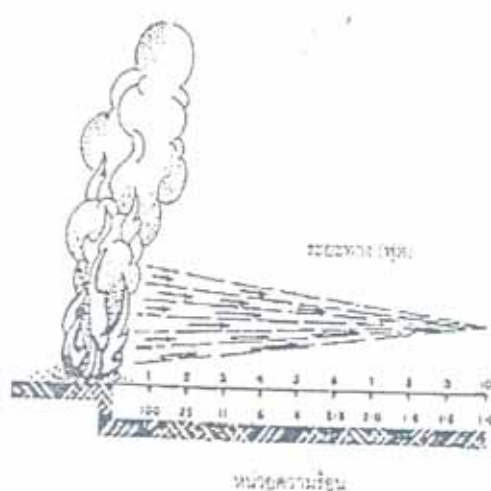
3.1.3 การแผ่รังสี (Radiation) เป็นรูปแบบของการส่งผ่านความร้อน ซึ่งเป็นการเดินทางของพลังงานผ่านช่องว่างหรือวัตถุด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น แสง คลื่นเสียง หรือเอกซเรย์ เป็นต้น ตัวอย่างลักษณะการส่งผ่านความร้อนโดยการแผ่รังสี เช่น การที่เราใช้มือไปอังไฟที่ดวงเทียนด้านข้างจะมีความรู้สึกว่ามีอุ่นหรือร้อนนั้น ทั้งนี้เนื่องจากการส่งผ่านความร้อนโดยการแผ่รังสี โดยที่ความร้อนจากดวงเทียนจะกระจายตัวไปโดยรอบเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้สิ่งที่อยู่ใกล้เคียงได้รับความร้อน ซึ่งความร้อนที่วัตถุได้รับจากการแผ่รังสีความร้อน จะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนกับวัตถุ ปริมาณความร้อนที่วัตถุได้รับจะเป็นปฏิกิริยาผกผันกับกำลังสอง

ของระยะทาง 100 หน่วย วัตถุที่อยู่ห่างออกไป 2 ฟุต จากไฟจะรับปริมาณความร้อนได้เพียง 25 หน่วย และถ้าเชื้อเพลิงอยู่ห่างออกไป 10 ฟุต จะรับปริมาณความร้อนได้เพียง 1 หน่วย โดยที่จำนวนหน่วยความร้อนที่วัตถุได้รับจะแปรผันตามความรุนแรงของแหล่งกำเนิดความร้อนแต่อัตราการลดลงของปริมาณความร้อนจะเป็นไปในอัตราเดียวกัน ตัวอย่างการแผ่รังสีดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5



ภาพที่ 4 แสดงการส่งผ่านความร้อนโดยการแผ่รังสี ซึ่งจะเกิดขึ้นทุกทิศทุกทาง

ที่มา: สุภัทร (2542)



ภาพที่ 5 แสดงผลของระยะทางในการแผ่รังสีความร้อนที่มีต่อปริมาณความร้อน

ที่มา: สุภัทร (2542)

ตัวอย่างการลุกไหม้อย่างต่อเนื่องที่เกิดจากความร้อนที่ส่งกลับมา โดยกระบวนการส่งผ่านความร้อน (Heat Transfer) เช่น กรณีของการจุดเทียนเมื่อเทียนติดไฟแล้วความร้อนจากการแผ่รังสีโดยรอบของเปลวไฟ และจากการนำความร้อนของไส้เทียนไข ทำให้ไขของเทียนละลายกลายเป็นไอเมื่อไฟลอยขึ้นไปถูกกับเปลวไฟของเทียน จะทำให้มีการลุกไหม้เกิดเป็นเปลวไฟขึ้นแล้วเปลวไฟนั้นก็แผ่รังสีลดลงมา ทำให้ไขของเทียนละลายกลายเป็นไอลอยขึ้นไปถูกกับเปลวไฟของเทียนวนเวียนอยู่เช่นนี้จนกระทั่งเทียนหมดแท่ง

3.2 การสัมผัสโดยตรงของเปลวไฟ (Direct Flame Contact) หมายถึง การที่เปลวไฟไปสัมผัสกับเชื้อเพลิงนั้นโดยตรง และสร้างให้เกิดไอออกมาแล้วก็ถูกจุดโดยเปลวไฟที่กระทบนั้น ตัวอย่างของการลุกไหม้อย่างต่อเนื่องในลักษณะของ Direct Flame Contact นี้ เช่น การที่เพลิงไหม้เสาไม้เปลวไฟจากเสาไม้จะไปสัมผัสกับส่วนที่อยู่ถัดขึ้นไป จะทำให้ไม้ส่วนนั้นสร้างไอออกมา เมื่อไอนั้นถูกกลับเปลวไฟที่ไปสัมผัสก็เกิดลุกไหม้ขึ้นอย่างต่อเนื่องไปจนกระทั่งเพลิงไหม้เสาหมดทั้งต้น

4. ลำดับการลุกไหม้ (Fire Sequence)

ในลักษณะการลุกไหม้ที่ปกติ ไฟที่เกิดขึ้นภายในห้องหรือภายในพื้นที่ที่จำกัด จะพัฒนาตัวเองในรูปแบบที่สามารถคาดเดาได้ ซึ่งสามารถจัดลำดับการลุกไหม้ออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

4.1 Incipient Stage เป็นช่วงเริ่มต้นของการลุกไหม้ ซึ่งระยะเวลาในช่วงนี้อาจเกิดขึ้นได้ตั้งแต่เศษส่วนของวินาทีไปจนถึงชั่วโมง หรือเป็นวันขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง และแหล่งความร้อนที่ทำให้เกิดเพลิงไหม้ ตัวอย่างเช่น ช่วงเวลาเริ่มต้นที่น้ำมันเชื้อเพลิงนั้นถูกกับเปลวไฟแล้วลุกไหม้จะสั้นกว่าช่วงเวลาเริ่มต้นของการลุกไหม้ที่เกิดเองโดยไม่ได้มีการกระตุ้น (Spontaneous)

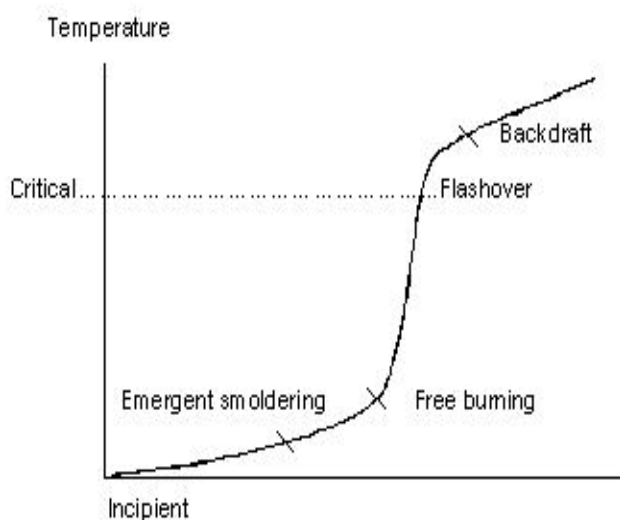
ผลผลิตจากการลุกไหม้ในช่วงนี้จะไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาของมนุษย์ ต้องใช้เครื่อง Ionization Detector ตรวจสอบจึงจะทราบถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพเคมีของบรรยากาศในห้องหรือบริเวณจุดต้นเพลิง พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ยังไม่มีผลต่ออุณหภูมิห้องและสภาพแวดล้อมรอบ ๆ

4.2 Emergent Smoldering ในช่วงนี้ผลผลิตของการลุกไหม้จะเห็นได้ชัดเจน มีทั้งไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ รวมถึงพวกเศษชิ้นส่วนเล็ก ๆ ของเชื้อเพลิงที่ไหม้ไฟ ซึ่งอาจจะรับรู้ได้จากกลิ่น ในช่วงปริมาณของออกซิเจนยังคงอยู่ในระดับปกติอุณหภูมิในห้องและสภาพแวดล้อมอาจสูงขึ้นเล็กน้อย ก๊าซร้อนที่เป็นผลผลิตของไฟจะเริ่มลอยตัวขึ้นไปยังส่วนบนของห้องโดยกระบวนการพาความร้อน ในขณะที่เดียวกันออกซิเจนจะถูกกดให้อยู่ในส่วนต่ำ ถ้ามีเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งอยู่เหนือเปลวไฟของแข็งนั้น จะถูกความร้อนจากกระบวนการพาความร้อนและสัมผัสไฟโดยตรง (Direct Flame Contact) ทำให้ของแข็งนั้นเริ่มเกิดการเป็นเถ้าถ่าน การลุกไหม้ในช่วงนี้จะเป็นลักษณะเชื้อเพลิงควบคุมการไหม้นั้นคือ ไม่เพียงแต่ออกซิเจนเท่านั้นที่ควบคุมไฟให้ลุกไหม้ แต่เชื้อเพลิงซึ่งประกอบไปด้วยจำนวน รูปทรง และมวลสารจะเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญต่อการลุกไหม้ ถ้าเชื้อเพลิงไม่เหมาะสมด้วยสภาวะใดก็ตาม จะมีผลต่อการลุกไหม้ทันที และรวมถึงการที่ไฟดับลงด้วย

4.3 Free Burning Stage (Development) ในขั้นตอนนี้ เชื้อเพลิงถูกใช้มากขึ้น ไฟทวีความรุนแรงขึ้น โดยความเข้มของเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าทุกครั้งที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส ความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากจุดต้นเพลิงจะแผ่ขยายสู่ส่วนบน โดยกระบวนการพาความร้อนและสัมผัสไฟโดยตรง (Direct Flame Contact) ก๊าซร้อนจำนวนมากรวมกลุ่มกันอย่างหนาแน่นที่ระดับส่วนบน ๆ ของห้อง และเริ่มแผ่รังสีความร้อนลงมายังข้างล่าง ก๊าซร้อนในระดับบนนั้นนอกจากเขม่าแล้ว ยังมีแก๊สพิษ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนไซยาไนด์ ไฮโดรเจนคลอไรด์ อะโครลีน และอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย มาถึงช่วงนี้อุณหภูมิในระดับบนหรือในระดับเพดานจะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ไฟจะลุกไหม้และเพิ่มความรุนแรงขึ้นเรื่อย ๆ ระดับของเขม่าและก๊าซร้อนจะขยายตัวลงมาในระดับต่ำ เขม่า และก๊าซร้อน ยังคงสะสมมากขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิในระดับบนถึงจุดติดไฟ (Ignition Temperature) ของก๊าซตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวในระดับบนนั้น จะเกิดการลุกไหม้ของก๊าซที่อยู่ในระดับบนด้วย ซึ่งก็จะส่งผลให้อุณหภูมิในระดับเพดานจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเพิ่มการแผ่รังสีความร้อนลงสู่พื้นมากขึ้น ความร้อนที่แผ่รังสีลงมาเหล่านี้จะถูกสิ่งของที่อยู่ด้านล่างดูดกลืน (Absorb) เข้าไป ซึ่งทำให้ผิวส่วนบนของสิ่งของเกิด Pyrolysis เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดติดไฟ (Ignition Temperature) ของสิ่งเหล่านั้นก็จะเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้เอง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Flashover”

ตามปกติเมื่อระดับบนของห้องมีอุณหภูมิประมาณ 1,100 องศาฟาเรนไฮด์ (593.3 องศาเซลเซียส) ระดับอุณหภูมินี้เพียงพอที่จะทำให้เกิด Flashover ได้ เมื่อเกิด Flashover ขึ้น โอกาสรอดของชีวิตคนที่อยู่ในห้องนั้นเป็นไปได้ยากเพราะอุณหภูมิระดับพื้นห้องจะสูงมากกว่า 1,100 องศาฟาเรนไฮด์ (593.3 องศาเซลเซียส)

4.4 Oxygen – Regulated Smoldering เมื่อเชื้อเพลิงที่ถูกลุกลไหม้ค่อย ๆ หมดไป การลุกลไหม้ก็จะค่อยลดความรุนแรงลงไป กรณีที่ไฟเกิดขึ้นภายในหรือที่ใดก็ตามที่มีเชื้อเพลิง แต่ถ้าระดับออกซิเจนลดลงต่ำกว่าร้อยละ 15 ถึง 16 เปลวไฟก็จะดับลง การลุกลไหม้จะเปลี่ยนรูปเป็นการลุกลไหม้ที่ไม่เป็นเปลว ซึ่งจะเรียกสภาวะนี้ว่า Oxygen – Regulated Smoldering ซึ่งสภาวะดังกล่าวอุณหภูมิในห้องยังคงสูงกว่า 1,100 ฟาเรนไฮด์ มีควัน เขม่า และก๊าซร้อนสะสมอยู่ปริมาณมากเพียงแต่ขาดออกซิเจนควบคุมการลุกลไหม้ ซึ่งถ้าเกิดมีออกซิเจนเข้ามาสนับสนุนทันทีทันใด เขม่าและก๊าซร้อนที่สะสมอยู่จะลุกติดไฟขึ้นมาทันทีและทำให้เกิดการระเบิด การระเบิดในลักษณะนี้เรียกว่า “Back draft” ความดันที่เกิดจาก Back Draft นั้นเพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างพังลงได้ และเป็นอันตรายกับสิ่งมีชีวิต ตัวอย่าง stage การเกิดไฟดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 Stage การเกิดไฟ

ที่มา: สุภัทร (2542)

5. การเผาไหม้กับการระบายอากาศ

ในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศที่ดีและต่อเนื่อง การลุกไหม้จะเกิดอย่างต่อเนื่อง และมีควันน้อย ในทางกลับกันพื้นที่ที่มีอับอากาศถ้ามีการลุกไหม้จะเกิดควันมาก และมีก๊าซที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์คงเหลือ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

ในพื้นที่ระบายอากาศดีจะมีผลให้เกิดอุณหภูมิการลุกไหม้สูงกว่า และมีผลให้เกิดอัตราเร่งในการลุกไหม้ต่อเนื่อง

สรุปประเด็นเกี่ยวกับการเผาไหม้

5.1 ออกซิเจน เชื้อเพลิง และอุณหภูมิหรือความร้อน คือ องค์ประกอบของการติดไฟ

5.2 เชื้อเพลิงจะลุกไหม้ต่อเนื่องได้เมื่อได้รับความร้อนในระดับหนึ่ง

5.3 ความต่อเนื่องของการลุกไหม้ ขึ้นอยู่กับความร้อนที่ไหลย้อนกลับมาเพิ่มอัตราการเปลี่ยนเป็นไอของเชื้อเพลิง

5.4 การลุกไหม้จะต่อเนื่องจนกระทั่ง เชื้อเพลิงหมดไป หรือ สัดส่วนของออกซิเจนกับเชื้อเพลิงไม่เหมาะสม หรือ ความร้อนที่เผาไหม้ไม่สามารถย้อนกลับมาเพิ่มอัตราเร่งของการลุกไหม้

ทฤษฎีน้ำยางธรรมชาติ

1. น้ำยาง

สุพล (2533) น้ำยาง (Latex) เป็นของเหลวที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงของต้นยางพารา มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Rubber Content) และส่วนที่เป็นตัวกลางหรือส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง (Non Rubber Content) โดยส่วนที่เป็นเนื้อยางมีความหนาแน่นประมาณ 0.92 กรัม/มิลลิลิตร มีรูปร่างของเม็ดยางเป็นรูปกลมและรูปกลมรีคล้ายลูกแพร์เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.02-3.0 ไมครอน ไม่ละลายน้ำฝักรอบนอกห่อหุ้มด้วยชั้นของสารพวก

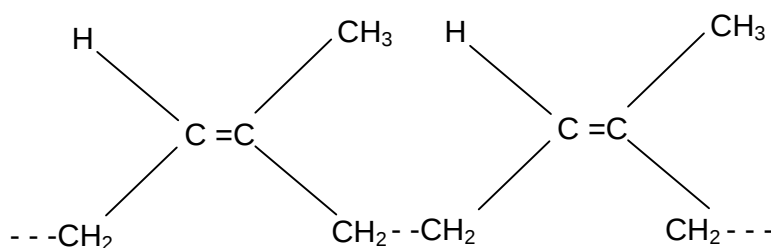
โปรตีน และไขมัน มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ จึงมีผลให้เมล็ดยางเกิดการผลักกันแขวนลอยกระจัดกระจายคงสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้ปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางธรรมชาติในสภาพน้ำยางสดไม่แน่นอนคือตั้งแต่ 20 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าน้ำยางสดผ่านกรรมวิธีการปั่นเหวี่ยงจะได้น้ำยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของเนื้อยางแห้งเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ จะเรียกว่าน้ำยางข้นสำหรับส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางเป็นส่วนที่มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัม/มิลลิลิตร ซึ่งเรียกว่า “Serum” ส่วนประกอบต่าง ๆ ในน้ำยางมีอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์ส่วนประกอบต่าง ๆ ในน้ำยาง

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC)	22 - 48
ปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC)	20 - 45
สารพวกโปรตีน	1.8
สารพวกเรซิน	2
อินทรีย์สาร	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือ

ที่มา: วีระศักดิ์ (2543)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า Cis-1, 4 Polyisoprene มีสูตรโมเลกุลคือ $(C_5H_8)_n$ โดยมีอะตอมของไอโซพรีนที่มีสูตรเคมีเป็น C_5H_8 ต่อกันเป็นจำนวนมากดังที่แสดงในภาพที่ 7 โดยปกติยางธรรมชาติจะมีค่า n ตั้งแต่ 15 ถึง 20,000 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000,000 มีการเชื่อมต่อแบบ Cis-Configuration อนุภาคของยางมีพื้นฐานรูปร่างกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.02 - 3.0 ไมครอน เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในสารละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน และเฮกเซน เป็นต้น ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ Cis 1,4 Polyisoprene

ที่มา: วีระศักดิ์ (2543)

การที่ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นเนื่องจากยางธรรมชาติมีการเรียงตัวแบบอสัณฐาน (Amorphous) โดยมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุลไอโซพรีน เมื่อมีการให้แรงดึงก็จะทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการยืดตัว และเมื่อปลดแรงดึงออกสายโซ่โมเลกุลของยางก็จะพยายามปรับตัวให้กลับสู่สภาพเดิมทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติในการยืดหยุ่นที่ดีเมื่อใช้น้ำยางธรรมชาติเป็นตัวประสาน ในฉนวนกันความร้อนจะได้ฉนวนกันความร้อนที่มีสมบัติในการยืดหยุ่นและการคงรูปที่ดี

2. น้ำยางข้น

วรารักษ์ (2545) น้ำยางสดจากต้นยางมีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 20 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ หรือโดยเฉลี่ย 35 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การผสมสารเคมีเพื่อทำการปรับเปลี่ยนสมบัติของน้ำยางเพื่อใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จำเป็นต้องใช้น้ำยางที่มีความเข้มข้นของเนื้อยางแห้งไม่ต่ำกว่าร้อยละ 60 จึงจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนให้น้ำยางมีความเข้มข้นที่เพียงพอ และยังเป็นการลดการสิ้นเปลืองในการขนถ่ายน้ำยางสดไปสู่โรงงานที่อยู่ไกล ๆ วิธีการที่สำคัญสำหรับการผลิตยางข้นมีด้วยกันทั้งสิ้น 4 วิธี คือ วิธีการระเหยน้ำ (Evaporation) วิธีการทำให้เกิดครีม (Creaming) วิธีการปั่น (Centrifuging) และวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า (Electro Decantation) ซึ่งวิธีการที่สำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลายในกว่า 90% ในการผลิตน้ำยางข้นคือวิธีการปั่น ซึ่งมีหลักการและกระบวนการผลิตดังต่อไปนี้

โดยปรกติธรรมชาติไม่ว่าจะอยู่ในสถานะสด (Fresh Latex) หรือในสถานะที่มี การใส่สารเคมีรักษาน้ำยาง (Preserved Latex) ประกอบด้วยระบบของสารคอลลอยด์แบบอิมัลชัน (Colloidal Emulsion) ของอนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในเซรัม (Serum) อนุภาคของยางที่แขวนลอย อยู่ในเซรัมจะเคลื่อนไหวแบบ บราวเนียน (Brownian) คือการคือการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง อย่างไม่เป็นระเบียบ การเคลื่อนของอนุภาคในน้ำยางสดจะเร็วกว่าของน้ำยางที่ใส่น้ำยารักษา สภาพ เนื่องจากอนุภาคของยางเบาบางกว่าของเซรัม ดังนั้นอนุภาคเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะลอยขึ้นมาสู่ผิวหน้า ของน้ำยางได้ โดยสามารถคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามกฎของ Stoke ตามสมการที่ 1 ได้ดังนี้

$$V = \frac{2}{9} g \left[\frac{d - d_1}{\eta} \right] r^2 \quad (1)$$

V	=	อัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาง (มม./วินาที)
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (ชม./วินาที ²)
d	=	ความหนาแน่นของเซรัม (1.012 กรัม/ชม. ³)
d ₁	=	ความหนาแน่นของอนุภาคยาง (0.91 กรัม/ชม. ³)
r	=	รัศมีอนุภาคยาง (เฉลี่ย 0.5 ไมครอน)
η	=	ความหนืดของเซรัม (ประมาณ 0.02 Poise)

จากสูตรคำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาง จะเห็นได้ว่าอัตราการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับ แรงดึงดูดของโลก ดังนั้นการปั่นซึ่งจะสามารถเพิ่มแรงดึงดูดได้เป็น 2,000 ถึง 3,000 เท่าของ แรงดึงดูดของโลก จึงสามารถเร่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคยางได้ จากหลักการดังกล่าวนี้จึงถูกนำมา ใช้สร้างเครื่องปั่นน้ำยางเพื่อการผลิตน้ำยางข้น หรือเพื่อเป็นการแยกส่วนที่เป็นเนื้อยางออกจาก เซรัม การปั่นด้วยความเร็วสูงน้ำยางจะถูกแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนของเนื้อยาง จะลอยตัวไหลออกตามทางออก ซึ่งอยู่ด้านบนสู่ถังเก็บน้ำยางข้นซึ่งน้ำยางที่ได้มีความเข้มข้น ประมาณ 60% อีกส่วนหนึ่งของน้ำยางจะถูกแยกเป็นหางน้ำยาง (Skim Latex) ไหลสู่ถังเก็บ หางน้ำยาง

3. สารเคมีที่ใช้ในการรักษาสภาพน้ำยาง

เสาวนีย์ (2543) สารเคมีที่ใช้เก็บรักษาน้ำยางให้อยู่ในสภาพของเหลวหรือคอลลอยด์ มีผู้คิดค้นมานานแล้ว กล่าวคือ

พ.ศ. 2314 A.F. Foureroy ได้ค้นพบว่าสารประเภทด่างสามารถเก็บรักษาน้ำยางได้

พ.ศ. 2347 Foureroy และ Nicholson ได้เสนอให้มีการเก็บรักษาน้ำยางด้วยด่าง โดยให้มีการจัดส่งน้ำยางซึ่งเก็บรักษาด้วยด่างในระยะทางไกล คือ ประเทศฝรั่งเศส แต่ด่างที่ใช้ในระยะแรกนี้เป็นด่างแก่ (KOH) จึงไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน

พ.ศ. 2396 W. Johnson ได้พบการเก็บรักษาน้ำยางด้วยแอมโมเนีย และเริ่มมีการใช้สารเคมีนี้เก็บรักษาน้ำยางอย่างจริงจังในปี พ.ศ. 2443 จนถึงปัจจุบัน

พ.ศ. 2393 – 2518 มีการคิดค้นสารเคมีเก็บรักษาน้ำยางมากกว่า 160 ชนิด โดยมีการรวบรวมไว้ในหนังสือ “Review and Classification of Rubber Latex Preservatives” แต่สารเคมีที่นำมาใช้เก็บรักษาน้ำยางจริง ๆ มีเพียงไม่กี่ชนิด เนื่องจากว่าสารเคมีที่ค้นพบส่วนใหญ่มีราคาแพง หาได้ยากเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ และไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ เป็นต้น

น้ำยางสดที่ได้มาจากต้นยางพารานั้น มีส่วนที่ไม่ใช่ยางหลายชนิดที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ อันได้แก่ กลูโคส และ ฟรุคโทส เมื่อกรีดน้ำยางจากต้นยางจุลินทรีย์ในอากาศจะปะปนในน้ำยาง เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดการทำลายชั้นห่อหุ้มอนุภาคยางเป็นเหตุให้ยางจับตัวกันเป็นก้อนเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่า “การจับตัวที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ” (Natural or Spontaneous Coagulation) โดยการเกิดในลักษณะนี้จะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความเสถียรของน้ำยาง พันธุ์ยาง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อป้องกันการจับตัวของน้ำยางก่อนเวลาที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องเติมสารรักษาสภาพน้ำยาง

สารเคมีที่นิยมในการใช้เพื่อการรักษาสภาพน้ำยางข้นคือแอมโมเนีย เนื่องจากแอมโมเนียเป็นตัวทำลายแบคทีเรีย และแอมโมเนียสามารถรวมตัวกับแมกนีเซียมอออนที่อยู่ในน้ำยาง แมกนีเซียมอออนนี้เป็นตัวกลางทำให้น้ำยางเสียสถานะ การเป็นน้ำยาง เมื่อแอมโมเนียรวมตัวกับแมกนีเซียมอออนแล้วจะกลายเป็นแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟส ตกตะกอนออกจากน้ำยาง ได้ดังสมการที่ 2



แอมโมเนียเป็นสารที่สามารถที่จะกำจัดได้ง่าย จึงเป็นข้อได้เปรียบในกระบวนการผลิตที่จำเป็นต้องกำจัดแอมโมเนียออกก่อนการใช้งาน ข้อดีอีกประการหนึ่ง คือ เมื่อแอมโมเนียระเหยออกจากน้ำยางแล้วจะไม่มีอะไรตกค้างอยู่ในเนื้อยาง เมื่อเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปอย่างไรก็ตาม

แอมโมเนียก็มีข้อเสีย คือ การที่มีกลิ่นฉุนและในบางกระบวนการมีความจำเป็นต้องลดปริมาณของแอมโมเนีย เช่น การผลิตยางฟองน้ำจำเป็นต้องลดแอมโมเนียให้เหลือประมาณ 0.2% ของน้ำยางเพื่อช่วยในการเกิดเจล (Gelation) จนทำให้เกิดการคิดค้นที่จะลดปริมาณของแอมโมเนียในการรักษาสภาพยาง (จากปริมาณปกติ 0.7% ของน้ำยาง) ให้น้อยลงพร้อมกับหาสารเคมีอื่น ๆ ช่วยรักษาสภาพน้ำยางข้น น้ำยางข้นที่รักษาสภาพไว้โดยใช้ปริมาณแอมโมเนียสูง (0.7%) เรียกว่า High Ammonia Latex Concentrate (HA) ส่วนน้ำยางที่ใช้แอมโมเนียน้อย ๆ (0.2%) เรียกว่า Low Ammonia Latex Concentrate (LA) การใช้ปริมาณแอมโมเนียน้อย มักใช้ร่วมกับสารเคมีอื่น ๆ ซึ่งเรียกสารเคมีเหล่านี้ว่า Secondary Conservative ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ คือ โซเดียมเพนตะคลอโรฟีนเตต (Sodium Pentachlorophenate, SPP) กรดบอริก (Boric Acid) กรดลูริก (Luric Acid) และเตตระเมทิลไทยูเรมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram Disulphide) เป็นต้น

4. น้ำยางคงรูปหรือน้ำยางวัลคาไนซ์ (Vulcanize)

วิภา (2545) การใช้ยางธรรมชาติในการผลิตฉนวนกันความร้อนจำเป็นต้องใช้น้ำยางที่ผ่านการผสมสารเคมี เมื่อผ่านการอบให้ความร้อนแก่น้ำยางจะเกิดพันธะเคมี (Chemical Crosslink) เรียกว่า ยางวัลคาไนซ์ ส่วนน้ำยางที่ได้ผ่านการผสมสารเคมีที่จำเป็นเพื่อให้เกิดยางวัลคาไนซ์ เรียกว่าน้ำยางวัลคาไนซ์ หรือน้ำยางพรีวัลคาไนซ์

น้ำยางผสมสารเคมี (Compounded Latex) หมายถึง น้ำยางที่ได้ผสมสารเคมีต่าง ๆ โดยส่วนมากจะใช้สารเคมีช่วยให้ยางคงรูป (Accelerator) พวกไดทีโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate) อยู่ด้วย โดยปกติจะทำบ่มหรือเก็บน้ำยางที่ผสมสารเคมีแล้ว (Maturation) ก่อนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากที่น้ำยางผสมสารเคมีส่วนใหญ่จะผสมสารทำให้ยางคงรูปไว้แล้ว ดังนั้นขณะการบ่มหรือเก็บน้ำยางจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาของยางในยาง ซึ่งการเกิดยางคงรูปจะมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะการเก็บน้ำยางและความว่องไวของสารช่วยเร่งน้ำยางคงรูป สำหรับการทำน้ำยางให้คงรูป หรือน้ำยางวัลคาไนซ์มีบทบาทสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางประเภทจุ่มแบบพิมพ์ (Dipping) และประเภทหล่อเป่าพิมพ์ (Casting) เพราะน้ำยางคงรูปมีข้อได้เปรียบ สามารถมีการจับตัวกันโดยไม่ต้องใช้ความร้อนที่สูงเข้าช่วยและยังสามารถมีการเติมสารเคมีได้อีกเล็กน้อย เช่น สารป้องกันยางเสื่อม หรือพวกสีต่าง ๆ

วิธีการผลิตน้ำยางคงรูปมีหลักการที่สำคัญ คือ ผสมสารเคมีที่จำเป็นในการเกิดยางคงรูปกับน้ำยางที่ได้ผ่านการเติมสารช่วยความคงตัวที่เป็นของเหลว แล้วให้ความร้อนประมาณ 50 - 70 องศาเซลเซียส หรืออาจทำน้ำยางคงรูปโดยไม่ใช้สารซัลเฟอร์ ดังส่วนผสมในตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 ตัวอย่างสูตรการทำน้ำยางคงรูปโดยใช้ซัลเฟอร์

ส่วนผสม	น้ำหนัก (กรัม)
น้ำยางข้น 60% รักษาด้วยแอมโมเนียความเข้มข้นสูง	167
ซิงค์ออกไซด์ + ซิงค์ไดเอททิลไดไทโอคาบาเมต + ซัลเฟอร์	8
โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (10%)	3
สารช่วยคงตัว (10%)	2

ที่มา: วิภา (2545)

ตารางที่ 5 ตัวอย่างสูตรการทำน้ำยางคงรูปโดยไม่ใช้ซิลิเฟอร์

ส่วนผสม	น้ำหนัก (กรัม)
น้ำยางข้น 60% รักษาด้วยแอมโมเนียความเข้มข้นสูง	167
สารละลายเคซีน (Casein) (10%)	5
สารช่วยความคงตัว (25%)	2
โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (10%)	2.5
ซิงค์ออกไซด์ (50%)	2
เตตระเมทิลไทูเรมไดซัลไฟด์ (TMTD) (33%)	9
ซิงค์ไดบิลทิลไดไทโอคาร์บาเมต (50%)	2
สารละลายไทโอยูเรีย (10%)	10

ที่มา: วิภา (2545)

ทฤษฎีชีววิทยาของผักตบชวา

ฝ่ายจัดสรรน้ำ กรมชลประทาน (2548) ผักตบชวาเริ่มเข้ามาในเมืองไทยตั้งแต่สมัยรัชกาลที่ 5 คือ ในปี พ.ศ. 2444 โดยครั้งนั้นเจ้านายฝ่ายในตามเสด็จประพาสที่เกาะชวา (อินโดนีเซีย) ได้เห็นพืชชนิดนี้ออกดอกสวยงามทั่วไป จึงได้แยกต้นกลับมาปลูกในประเทศไทย และเพิ่มจำนวนมากขึ้น จนกระทั่งน้ำท่วมวังสระปทุม ทำให้น้ำตบชวาล่องลอยกระจายไปตามแม่น้ำลำคลองทั่วไป และแพร่พันธุ์จำนวนมากอันเป็นปัญหาอุปสรรคต่อการคมนาคมทางน้ำ และการชลประทาน คนไทยมีความคุ้นเคยกับผักตบชวา แต่เดิมนั้นเป็นเพียงวัชพืชที่ไม่มีคุณค่าแต่อย่างใดลำต้นนำมาหมักเป็นปุ๋ยหมักเท่านั้น นอกจากนั้นยังกีดขวางการสัญจรทางน้ำ ดังนั้นจึงมีผู้คิดค้นนำผักตบชวามาทำให้เกิดประโยชน์ โดยคิดแปลงเป็นของใช้ชนิดต่าง ๆ เช่น ตะกร้า กระเป๋า หมวก รองเท้า เป็นต้น ลักษณะและคุณสมบัติของผักตบชวา แสดงไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ลักษณะและคุณสมบัติของผักตบชวา

รายการ	ลักษณะ คุณสมบัติ
ชื่อไทย	ผักตบชวา หรือ ผักปองสวะ
ชื่อสามัญ	Water Hyacinth
ชื่อวิทยาศาสตร์	Water Orchid Pontederiaceae Eichornia Crassipes (Mart.) Solms-Laub
ชื่อวงศ์	Pontederiaceae
ลักษณะทั่วไป	ไม้น้ำมีไหลทอดเลื้อยไปตามผิวน้ำ ต้นอวบน้ำ ใบรูปไข่ค่อนข้างกลม สีเขียวเป็นมัน ก้านใบพองออก เพื่อช่วยให้ลอยน้ำได้ ดอกออกเป็นช่อที่ปลายยอด กลีบดอกบาง 6 กลีบ สีฟ้าอมม่วง กลีบบน ขนาดใหญ่
ลักษณะเส้นใย	เป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลสมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน มีโครงสร้างประกอบด้วยชั้นพื้นฐานซึ่งเรียกว่า Anhydro-d-glucose ($C_6H_{10}O_5$) ต่อกันเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาว
ขยายพันธุ์	แยกต้นอ่อนที่ปลายไหลไปปลูก
การบริโภค	ดอกอ่อนและก้านใบอ่อนกินเป็นผักลวกจิ้มน้ำพริกหรือทำแกงส้ม
สรรพคุณน้ำ	ช่วยระบายความร้อนในร่างกายช่อดอกผักตบชวาล้างกับดอกไฮยาซินธ์

ที่มา: ฝ่ายจัดสรรน้ำ กรมชลประทาน (2548)



ภาพที่ 8 ผักตบชวา

ที่มา: ฝ่ายจัดสรรน้ำ กรมชลประทาน (2548)

มีพืชน้ำหลายชนิดที่มีการศึกษาว่า สามารถบำบัดน้ำเสียได้ ตัวอย่างเช่น ผักตบชวา (Water Orchid) ธูปฤาษี (*Typha latifolia*) ผักเป็ดน้ำ (*Alternanthera Philoxeroides*) อ้อ (*Phragmites Connumis*) แหน (*Lemna Spp.*) คีปี่น้ำ (*Potamogeton Crispus*) และกก (*Scirpus Lacustris*) ในบรรดาพืชน้ำดังกล่าว ผักตบชวาได้รับความสนใจมาศึกษาอย่างกว้างขวาง ผักตบชวา มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Eichloria Crassipes* Solms ชื่อสามัญว่า Water Hyacinth อยู่ในวงศ์ Pontederiaceae เป็นพืชน้ำประเภทใบเลี้ยงเดี่ยวลอยน้ำได้โดยไม่ต้องมีที่ยึดเกาะ สามารถแพร่พันธุ์ได้รวดเร็วมาก แผ่นใบคล้ายรูปหัวใจเป็นมันหนา ก้านใบพองออกตรงช่องกลาง ภายในมีลักษณะเป็นรูพรุน ช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้ ผักตบชวาสามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งในน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เจริญเติบโตได้ดีที่ pH 4 – 10 และอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34°C และในดินพีชจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณร้อยละ 95 (ในใบร้อยละ 89 และในก้านใบร้อยละ 96.7) ผักตบชวาช่วยในการบำบัดน้ำเสีย โดยอาศัยคุณสมบัติทำหน้าที่เป็นตัวกรอง ผักตบชวาที่ขึ้นอยู่อย่างหนาแน่นเปรียบได้กับการบรรจุวัสดุพรุน ซึ่งกรองน้ำที่ไหลผ่านกอผักตบชวาอย่างช้า ๆ จึงทำให้ของแข็งแขวนลอยต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในน้ำถูกสกัดกั้น นอกจากนั้นระบบรากที่มีจำนวนมาก ช่วยกรองสารอินทรีย์ที่ละเอียด และจุลินทรีย์ที่อาศัยเกาะอยู่ที่รากช่วยดูดสารอินทรีย์ได้ด้วยอีกทางหนึ่ง รากผักตบชวาจะดูดสารอาหารที่อยู่ในน้ำลำเลียงไปยังใบเพื่อสังเคราะห์แสง ในโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสีย จึงถูกกำจัดไป อย่างไรก็ตามไนโตรเจนในน้ำเสียนั้น ส่วนมากจะอยู่ในรูปสารประกอบทางเคมี เช่น สารอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน พบว่า ผักตบชวาสามารถดูดไนโตรเจนได้ทั้ง 3 ชนิด แต่ในปริมาณที่แตกต่างกันคือ ผักตบชวาสามารถดูดอินทรีย์

ไนโตรเจนได้สูงกว่าไนโตรเจนในรูปอื่น ๆ คือ ประมาณร้อยละ 95 ขณะที่ไนเตรทไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนจะลดลงประมาณร้อยละ 80 และร้อยละ 77 ตามลำดับ แต่การใช้ ผักตบชวาบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง จะส่งผลให้ผักตบชวาเจริญเร็วขึ้น และปกคลุมพื้นที่ผิวน้ำมากขึ้น จึงควรมีการดูแลระบบเก็บต้นที่เจริญเต็มที่ขึ้นจากน้ำอย่างสม่ำเสมอ ไม่เช่นนั้นเมื่อผักตบชวาทาย จะเน่าอยู่ในน้ำ ทำให้น้ำเสียนั้นมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นอีก นอกจากนี้รากของผักตบชวามีแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนแแกรมลบ คือ *Azospirillum* และมีคุณสมบัติ พิเศษสามารถตรึงไนโตรเจนได้ประมาณ 2.5 กิโลกรัม/เฮกเตอร์/วัน ผักตบชวาขึ้นได้ในทุกสภาพน้ำ และสามารถบำบัดน้ำเสียได้โดยตรง แต่ถ้ามีสารมลพิษอยู่ปริมาณสูงหรือน้ำเสียมีปริมาณ มาก การใช้ผักตบชวาบำบัดน้ำเสียจะให้ผลช้า และน้ำอาจเน่าเสียได้ จึงควรที่จะใช้ผักตบชวาร่วม กับการบำบัดน้ำเสียระบบอื่นด้วย จึงจะให้ผลดี

ทฤษฎีเรื่องสารหน่วงไฟ

Horrock and Price (2001) การใช้งานฉนวนกันความร้อนในบ้านเรือนนั้น สมบัติในการ ด้านทานอัตราการลามไฟก็เป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของฉนวนกันความร้อนที่ควรมี คือ สมบัติในการต้านทานอัตราการลามไฟ เพื่อปรับปรุงสมบัติในอัตราการลามไฟของฉนวนกัน ความร้อน จึงจำเป็นในการเติมสารหน่วงไฟ โดยที่สารหน่วงไฟคือ สารที่มีความสามารถในการ ยับยั้งหรือแม้กระทั่งหยุดกระบวนการเผาไหม้ โดยสารหน่วงไฟจะแสดงสมบัติในการต้านทาน อัตราการลามไฟตามลักษณะโดยธรรมชาติของสารนั้น ๆ ในทางด้านกายภาพ หรือทางด้านเคมี ในรูปของของแข็งของเหลว หรือ ก๊าซ

1. คุณสมบัติทางด้านกายภาพ

สารหน่วงไฟประเภทนี้สามารถแสดงความสามารถในการหน่วงไฟในกระบวนการการเผาไหม้ ได้ดังนี้

1.1 โดยการสร้างชั้นขึ้นมาปกคลุม ชั้นที่สามารถติดไฟของวัตถุ จะถูกปกคลุมด้วยชั้นของ ก๊าซที่มีการก่อตัวขึ้น ทำให้ก๊าซออกซิเจนที่จำเป็นในการเผาไหม้ไม่สามารถเข้าไปได้จึงสามารถ ที่จะหน่วงไฟจนกระทั่งทำให้ไฟดับได้ สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ สารประกอบของ ฟอสฟอรัส และ โบรอน (Phosphorous and Boron Compounds) โดยที่สารประกอบของโบรอน คือ Borax และ

Zinc Borate เป็นสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีหลักฐานรายงานว่า การใช้ Borax (Sodium Borate) ทำปฏิกิริยากับเส้นใย Cellulose จะได้ Flame-Retard Cellulosics และ Zinc borate ซึ่งเป็นสารหน่วงไฟ

1.2 โดยการให้ความเย็น สารหน่วงไฟชนิดนี้จะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนขึ้นเมื่อมีการเผาไหม้ทำให้ความเย็นเข้าสู่ชิ้นวัตถุ ทำให้วัตถุมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ ตัวอย่างของสารหน่วงไฟจำพวกนี้เช่น อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium Hydroxide)

1.3 โดยการเจือจาง เกิดจากการที่เติมสารที่เติมเข้าไป เมื่อเกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดก๊าซเฉื่อยเกิดขึ้น ซึ่งก๊าซเฉื่อยเหล่านี้จะไปทำการเจือจางเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปของแข็งหรือก๊าซ ทำให้กระบวนการเผาไหม้ลดลง สารหน่วงไฟจำพวกนี้เช่น อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminum Hydroxide)

2. คุณสมบัติทางด้านเคมี

สารหน่วงไฟที่แสดงสมบัติการหน่วงไฟทางด้านเคมี ซึ่งสารเคมีเหล่านี้มักจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเผาไหม้ในส่วนที่เป็นแข็งและก๊าซดังนี้

2.1 ปฏิกิริยาในรูปก๊าซ ส่วนที่เป็นอนุมูลอิสระที่ติดไฟได้ในรูปของก๊าซจะถูกรบกวนโดยสารหน่วงไฟ ทำให้ปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้หยุดชะงัก ระบบการเผาไหม้เย็นตัวลงปริมาณของก๊าซที่ติดไฟได้ลดลงทำให้เกิดการหน่วงของ สารหน่วงไฟจำพวกนี้ได้แก่ สารจำพวกฮาโลเจน (Halogenated Flame Retardant)

2.2 ปฏิกิริยาในรูปของแข็ง สารหน่วงไฟสามารถที่จะทำให้เกิดชั้นของคาร์บอนบนผิวของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ เช่น สารหน่วงไฟทำให้เกิดปฏิกิริยาคายน้ำ (Dehydration) ทำให้เกิดชั้นของไอน้ำเป็นเหตุให้เกิดการหน่วงไฟ โดยสารหน่วงไฟประเภทนี้คือพวกสารประกอบฟอสฟอรัส (Phosphorus Compounds) สารประกอบบางชนิดของโบรอน เป็นต้น

สารหน่วงไฟที่ใช้ในการศึกษาและวิจัยในการวิจัยนี้คือ Borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ใช้เป็นสารหน่วงไฟในเส้นใยผักตบชวา และ Zinc Borate ($2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ในการเป็นสารหน่วงไฟในน้ำยางธรรมชาติ โดยที่สารหน่วงไฟทั้งสองชนิดนี้ต่างเป็นสารประกอบของโบรอน สารหน่วงไฟที่มีสารประกอบของโบรอนจะแสดงผลได้ดีเมื่อมีความเข้มข้นที่สูง Borax นิยมใช้เป็นสารหน่วงไฟในเซลลูโลส และ Zinc Borate ใช้เป็นสารหน่วงไฟในพอลิเมอร์ และพลาสติกในเชิงวิศวกรรม

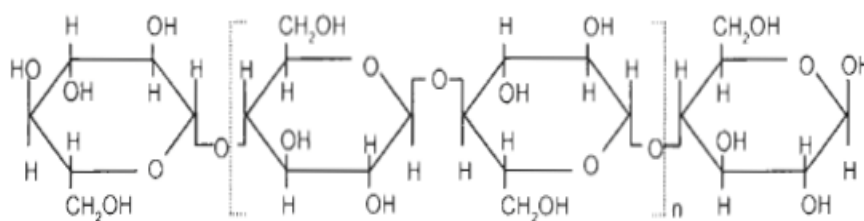
Borax เมื่อมีการเผาไหม้จะทำหน้าที่เหมือนปฏิกิริยาการดูดความร้อน โดยจะมีการให้น้ำออกมา เกิดเป็นฟิล์มที่ผิวของวัตถุอีกทั้งยังสามารถเกิดชั้นฟิล์ม B_2O_3 ส่วน Zinc Borate เมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดชั้นฟิล์มของ Zn^{2+} และ B_2O_3 ปกคลุมที่ผิวของวัตถุทำให้สามารถในการต้านทานอัตราการลามไฟได้

ทฤษฎีเส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ

วีระศักดิ์ (2543) เส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจัดเป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยธาตุหลัก คือ คาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% มีโครงสร้างประกอบด้วยขั้นพื้นฐานซึ่งเรียกว่า Anhydro-d-glucose ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) ต่อกันเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาว ดังแสดงในภาพที่ 9 แต่ละหน่วยของกลูโคสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน (เป็น primary group 1 หมู่ และ secondary group 2 หมู่) ซึ่งเหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาลทั่วไป แต่เนื่องจากโมเลกุลต่อกันยาวเป็นลูกโซ่ทำให้ไม่ละลายน้ำเหมือนกับที่เกิดกับน้ำตาล โครงสร้างทางเคมีนับว่ามีบทบาทอย่างยิ่งต่อการกำหนดสมบัติของเส้นใย กล่าวคือ หมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) จะเป็นตัวดึงดูดน้ำ ทำให้มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดี อีกทั้งเป็นจุดก่อให้เกิดปฏิกิริยากับกรดแอซิดิกได้เป็นเซลลูโลสแอซิเตต หรือเส้นใยประดิษฐ์ชนิดแอซิเตตนั่นเอง

1. คุณสมบัติเส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ (Natural Cellulose Fibers)

ลักษณะการเรียงโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใยเซลลูโลสจะเรียงตัวเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวที่มีความแข็งแรงสูง ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลส

ที่มา: วีระศักดิ์ (2543)

ลูกโซ่โมเลกุลยาวของกลูโคสที่กล่าวมา สามารถทำการตรวจวิเคราะห์ได้โดยดูจากค่าของน้ำหนักโมเลกุล ในกรณีของฝ้ายมีค่าตั้งแต่ 100,000 จนถึง 1-2 ล้านของลินิน ป่าน ปอ อาจมีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 6 ล้าน เส้นใยเรยอนที่เป็นเส้นใยประดิษฐ์อยู่ในช่วง 20,000 – 230,000 หรือเยื่อกระดาษมีน้ำหนักโมเลกุลเพียงประมาณ 4,000 เท่านั้น น้ำหนักโมเลกุลนี้โดยทั่วไปคำนวณในลักษณะของค่าเฉลี่ยจากหน่วยย่อยที่เป็นกลูโคสแล้วคูณด้วยจำนวนหน่วยย่อยที่ซ้ำกัน ทำให้เขียนสูตรทางเคมีทั่วไปของเซลลูโลสได้เป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ โดย n คือค่าระดับขั้นของการเกิดพอลิเมอร์ ค่า n ยิ่งมากน้ำหนักโมเลกุลยิ่งสูง ถึงแม้เส้นใยเซลลูโลสมียู่หลายชนิดก็ตาม แต่เนื่องจากทุกชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีในหน่วยย่อยที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงทำให้สมบัติของเส้นใยกลุ่มนี้มีความคล้ายกัน ส่งผลสะท้อนไปยังสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญต่อผู้ใช้ ดังสรุปในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สมบัติที่เหมือนกันของเซลลูโลสธรรมชาติ

สมบัติ	ความสำคัญต่อผู้ใช้
การดูดซึมความชื้นดี	ใส่สบาย เหมาะกับการทำเป็นผ้าเช็ดตัว ผ้าอ้อม
นำความร้อนได้ดี	ทำให้ผู้ใส่เย็นสบายในหน้าร้อน
ความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูง	ดัมผ้าในหม้ออบได้ เพื่อการทำความสะดวกฆ่าเชื้อโรค รีดผ้าด้วยความร้อนสูงได้
การคืนตัวจากแรงอัดต่ำ	ผ้ายับง่าย
เส้นใยสามารถเกาะกันแน่นในขณะปั่นด้าย	สามารถทอเป็นผ้าที่มีโครงสร้างแน่น ถี ก้นลมดี
เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี	ไม่สะสมประจุไฟฟ้า

ตารางที่ 7 (ต่อ)

สมบัติ	ความสำคัญต่อผู้ใช้
ความหนาแน่นสูง (1.5+, 1.5-)	ผ้าทอมีน้ำหนักดี เทียบกับที่ทอด้วยเส้นใยอื่น ๆ
ถูกทำลายได้ด้วยกรด จำพวกกรดแร่ (Mineral acid) แต่มีผลเล็กน้อย เนื่องจากกรดอินทรีย์	รอยเปื้อนจากผลไม้จะต้องรีบกำจัดทิ้งทันทีก่อนที่จะติดผ่านานจนล้างไม่ออก
ทนต่อแมลง	ง่ายต่อการเก็บรักษา
ถูกทำลายด้วยรา	ผ้าสกปรกควรจะระวังอย่าให้ขึ้น
จุดติดไฟ	เส้นใยเซลลูโลสติดไฟได้รวดเร็ว

ที่มา: วีระศักดิ์ (2543)

ในธรรมชาติ จะพบเส้นใยเซลลูโลสจากส่วนต่าง ๆ ของพืชแตกต่างกันได้หลากหลาย บางประเภทเป็นเส้นใยที่ได้จากเมล็ด บางประเภทเป็นเส้นใยจากลำต้น เส้นใย จากใบหรือแม้กระทั่งจากเส้นใยจากผลตามที่แสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เส้นใยเซลลูโลสในธรรมชาติที่ได้จากส่วนต่างๆของพืช

ที่มา: วีระศักดิ์ (2543)

ภาพที่ 9 เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบรวมกับลิกนิน เพนโตแซนกัน แทนนิน ไขมัน และสารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล ถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมากและโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิการหลอมตัวจึงสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ เซลลูโลสธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกล ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงลดลง

2. ลินิน

ลินิน หรือ Flax เป็นเส้นใยที่ได้จากลำต้นของต้น Flax นับได้ว่าเป็นเส้นใยที่เก่าแก่ที่สุด ที่มนุษย์รู้จักใช้ คาดว่าเป็นเวลากว่า 4,500 ปีมาแล้ว จากการใช้พันศพโบราณ คือ พวกมัมมี่ เส้นใยลินินในธรรมชาติเกาะติดกันแน่นด้วยสารประกอบจำพวกเปคติน ไซ และยาง วิธีการในการกำจัดหรือแยกเส้นใยให้เป็นอิสระจากกันเป็นวิธีที่เรียกว่า Retting (การแช่ให้เปื่อยในน้ำโดยอาศัยแบคทีเรียได้) ประเทศที่มีชื่อเสียงในการผลิตผ้าลินินมีหลายประเทศด้วยกัน เช่น เบลเยียม ไอร์แลนด์ เป็นต้น

2.1 การใช้งานของลินิน

ลินินสามารถทอเป็นผ้าโครงสร้างต่าง ๆ ได้หลากหลาย ทนต่อแรงดึงได้ดี มีน้ำหนักเบา มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดี และแห้งได้เร็วกว่าผ้าฝ้าย ทำให้สวมใส่ได้ดี มีน้ำหนักเบา มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดี และแห้งได้เร็วกว่าผ้าฝ้าย ทำให้สวมใส่สบาย และไม่เกิดขุย ย้อมสีได้ดีแม้จะไม่ดีเท่าฝ้ายก็ตาม ผ้าลินินสามารถซักได้ทุกชนิด ทั้งซักเปียกและซักแห้งขึ้นกับชนิดของสีย้อม การตกแต่งสำเร็จและการออกแบบโครงสร้างผ้าสามารถทนทานต่อความร้อนได้สูง ทนต่ออุณหภูมิของเตารีดถึงระดับ 450-500° F (232-260 °C) และเนื่องจากยับง่ายผ้าลินินจึงค่อนข้างมีปัญหาในการรีดที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง

2.2 สมบัติทางกายภาพ

2.2.1 ลักษณะภายนอก หากดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเส้นใยเล็ก ๆ มากมายเกาะกันเป็นมัดตามความยาวมีข้อหรือปล้องเป็นระยะ ๆ คล้ายหน่อไม้ และพื้นที่หน้าตัดมีท่อส่งน้ำอยู่ตรงกลางโดยมีขอบเป็นรูปหลายเหลี่ยมมุมมน

2.2.2 ความยาว อยู่ในช่วง 6-40 นิ้ว (150-1,000 มิลลิเมตร) และไม่ควรวางสั้นกว่า 12 นิ้ว (300 มม) เส้นใยยาวเป็นพวกที่มีคุณภาพดีเรียกว่า Line ในขณะที่เส้นใยสั้นเรียกว่า Tow

2.2.3 สี โดยทั่วไปมีสีเนื้อออกเหลืองไปจนถึงสีเทา

2.2.4 ความมัน เส้นใยลินินมีความมันดีกว่าฝ้าย

2.2.5 ความแข็งแรง เป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง ในบรรดาเส้นใยธรรมชาติด้วยกัน ลินินมีความแข็งแรงรองจากไหมเท่านั้น เมื่อเทียบกับฝ้ายจะมีความแข็งแรงถึง 2-3 เท่าของฝ้าย ความแข็งแรงถึง ณ จุดขาด ในขณะที่แห้งมีค่า 5.5 gpd และในขณะที่เปียกดีขึ้นเป็น 6.5 gpd

2.2.6 การยืดตัว ไม่ค่อยดี มีการคืนตัวจากแรงยืดได้เพียง 2.5 -3.3% ภายหลังการยืดดึงออก 2% ของความยาวเดิม

2.2.7 การยืดตัวจากแรงอัด ก่อนข้างต่ำ เกิดรอยยับย่นได้ง่าย ซึ่งสามารถแก้ไขหรือปรับปรุงให้เป็นผ้าชนิดทนต่อการยับได้ด้วยการตกแต่งสำเร็จ

2.2.8 ความสามารถในการดูดซึมความชื้นดีกว่าฝ้าย โดยในภาวะมาตรฐานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65% อุณหภูมิ 70°F (21°C) มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นประมาณ 10-12% นับเป็นสมบัติที่เด่นข้อหนึ่งของลินินทำให้สวมสบายดูดซับเหงื่อได้ดี แห้งเร็ว เมื่อถูกน้ำเส้นใยเกิดการพองตัวคล้ายฝ้ายทำให้มีการหดตัวตามความยาวบ้าง แต่ก็สามารถแก้ไขด้วยการตกแต่งสำเร็จเช่นกัน

2.2.9 ความร้อน ทนต่ออุณหภูมิได้สูงเช่นเดียวกับฝ้าย (400-450° F หรือ 204-323° C) ในการรีดผ้าลินินจำเป็นต้องใช้ความร้อนในระดับสูง แต่ความร้อนที่สูงเกินไปจะก่อผลเสียทำให้เปลี่ยนสี และเสื่อมสภาพได้

2.2.10 การดัดไฟ ดัดไฟและเผาไหม้อย่างรวดเร็ว

2.2.11 การนำไฟฟ้า ก่อนข้างด้าแต่่นำความร้อนได้ดี

2.2.12 ความถ่วงจำเพาะ 1.50 ใกล้เคียงกับเส้นใยเซลลูโลสทั่วไป

2.3 สมบัติทางเคมี

2.3.1 กรด มีผลคล้ายกับฝ้าย อันเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นเซลลูโลสทนทานได้บ้างกับกรดเจือจางที่เย็น แต่ถูกทำลายได้ง่ายหากถูกกรดเจือจางที่ร้อน หรือกรดเข้มข้นที่เย็น

2.3.2 ด่าง ทนต่อด่างได้ดี สามารถซักล้างได้ด้วยด่างแก่ โดยไม่เกิดความเสียหาย และยังสามารถทำการเมอร์เซอร์ไรส์ได้ด้วย

2.3.3 สารละลายอินทรีย์ ลินินสามารถทำการซักแห้งได้ ทนต่อสารละลายอินทรีย์ได้ดี

2.3.4 สารซักฟอก ซักฟอกได้ยากกว่าฝ้าย เนื่องจากความสกปรกตามธรรมชาติที่ติดมา มีความอ่อนไหวต่อสารซักฟอกประเภทไฮโปคลอไรท์ แต่สามารถใช้ประเภทโซเดียมเปอร์บอเรทที่ให้ผลดีกว่าและปลอดภัย

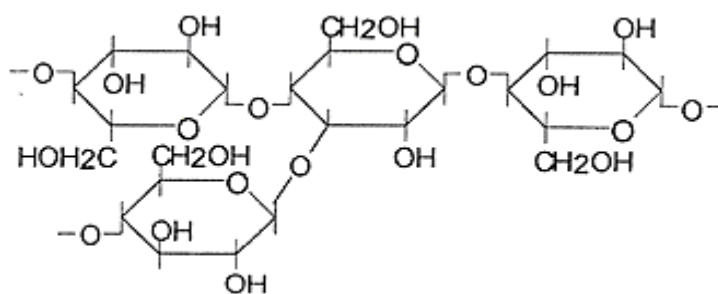
2.3.5 ราและแมลง คล้ายฝ้าย คือ อาจมีปัญหาบ้างจากรา แต่โดยปกติถ้ารักษาความสะอาดให้ดีก็จะมีปัญหาเกี่ยวกับราและแมลง

2.3.6 แสงแดด ทนทานต่อแสงได้ดีกว่าฝ้าย แต่ถ้าหากถูกแสงเป็นเวลานาน ก็จะทำให้เกิดสภาพของออกซิเซลลูโลสขึ้น ความแข็งแรงลดลง

2.3.7 การย้อมสี เช่นเดียวกับฝ้าย ปกติย้อมด้วยสีประเภทไคเรก รีแอคทีฟ และแวท แต่ติดสีไม่ดีเท่าฝ้าย

3. เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายเซลลูโลสแต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส ไซโลส อะราบิโนส รวมทั้งกรดคลูโรนิก และกาแลกทูโรนิก เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ พบมากใน แกลบ ชังข้าวโพดเป็นต้นมีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$ และมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: วีระศักดิ์ (2543)

พืชแต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของพืช โดยพืชที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งแรงสูง และในพืชชนิดเดียวกันต้นที่มีอายุน้อยจะมีปริมาณลิกนินมากตามไปด้วย

ในการจัดเตรียมเส้นใยที่ได้จากผักตบชวานั้น จำเป็นต้องผ่านการปั่นกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเป็นการกำจัดลิกนิน (Delignification) ทำให้ได้เส้นใยเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์และความอ่อนนุ่มที่มากขึ้น อีกทั้งเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสทำให้สามารถเกาะเกี่ยวกับตัวประสานได้ดีขึ้น

ทฤษฎีการสร้างสมมติฐาน ทดสอบสมมติฐาน

มัลลิกา (2544) การทดสอบสมมติฐานเป็นการอ้างอิงทางสถิติที่สำคัญ เป็นการเปรียบเทียบเพื่อนำไปสู่การตัดสินใจ การทดสอบสมมติฐานในวิทยานิพนธ์นี้อาศัยข้อมูลจากตัวอย่างเพื่อทำการอ้างอิงไปสู่ค่าพารามิเตอร์ในประชากร การลงข้อสรุปผู้ทำการตัดสินใจต้องการความมั่นใจมากที่สุดเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ถูกต้อง

1. สมมติฐานทางสถิติ (Statistical Hypotheses)

ในการทดสอบสมมติฐาน จะต้องระบุสมมติฐาน 2 ชนิด คือ

1.1 สมมติฐานที่ต้องการทดสอบ (Null Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์ H_0 มักจะให้สิ่งที่เชื่อมั่นว่าจะไม่เป็นจริง หรือกล่าวอ้างว่าไม่เป็นจริง หรือไม่เคยเป็นมาในอดีตเป็นสมมติฐานที่ต้องการทดสอบ และเช่นเดียวกับการพิจารณาคดี คนที่ถูกกล่าวหาว่ากระทำผิดจะยังถือว่าเป็นคนบริสุทธิ์ (ไม่ผิด) จนกว่าศาลจะตัดสินว่ากระทำผิด ในการทดสอบสมมติฐานก็เช่นกัน เราจะถือว่าค่าที่เราต้องการทดสอบในสมมติฐานที่ต้องการทดสอบนี้เป็นจริงหรือถูกต้องจนกว่าจะมีการพิสูจน์ หรือมีข้อบ่งชี้ที่ชัดเจนว่าไม่เป็นจริง เราจึงปฏิเสธ (Reject) H_0

1.2 สมมติฐานแย้ง (Alternative Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์ H_1 คือ การระบุค่าที่ตรงกันข้ามหรือแตกต่างจากค่าในสมมติฐานที่ต้องการทดสอบ เช่นถ้าต้องการทดสอบสมมติฐาน

$H_0 : \mu = 10$ จะได้สมมติฐานแย้งคือ $H_1 : \mu \neq 10$ เป็นต้น ดังนั้นถ้าปฏิเสธ H_0 ก็แสดงว่ายอมรับ (Accept) H_1 นั่นเอง

2. ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

2.1 กำหนดสมมติฐานที่ต้องการทดสอบ (H_0) และสมมติฐานแย้ง (H_1) ให้เหมาะสมกับสิ่งที่ต้องการจะทดสอบ เพื่อให้ได้คำตอบแทนที่ครบถ้วน และสมบูรณ์

2.2 กำหนดระดับนัยสำคัญหรือค่าวิกฤตในรูปของค่า α คือค่าความน่าจะเป็นที่จะปฏิเสธสมมติฐานที่เป็นจริง ซึ่งเป็นความผิดพลาดชนิดที่ 1

2.3 เลือกตัวสถิติสำหรับการทดสอบให้เหมาะสม

2.4 สร้างขอบเขตในการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานที่ต้องการทดสอบ (H_0)

2.5 กำหนดค่าตัวสถิติ

2.6 สรุปผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าสถิติที่คำนวณได้จากขั้นที่ 5 กับค่าวิกฤตที่ได้จากขั้นที่ 2 ถ้าค่าตัวสถิติอยู่ในขอบเขตที่จะปฏิเสธสมมติฐานก็จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (เท่ากับยอมรับ H_1) และถ้าค่าตัวสถิติอยู่ในขอบเขตที่จะยอมรับสมมติฐานก็จะยอมรับ H_0 (เท่ากับปฏิเสธ H_1)

การกำหนดสมมติฐานที่ต้องการทดสอบ

โดยทั่วไปเราจะกำหนดสมมติฐานที่ต้องการทดสอบ (H_0) ว่าไม่มีความแตกต่างและภายใต้ข้อสมมติที่ว่า ค่าที่กำหนดในสมมติฐานที่ต้องการทดสอบ (H_0) ถูกต้อง เราจึงนำค่านี้ไปคำนวณค่าตัวสถิติสำหรับการทดสอบ ดังนั้น ค่าที่กำหนดในสมมติฐานเพื่อการทดสอบ (H_0) จะต้องมีเครื่องหมายเท่ากับ (=) อยู่ด้วยเสมอ

ส่วนใหญ่แล้วเราสนใจที่จะทดสอบสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 ตัว คือ ค่าเฉลี่ย ค่าสัดส่วน และค่าความแปรปรวน สำหรับประชากรเดียว ถ้าเป็นสองประชากร ก็จะสนใจทดสอบเกี่ยวกับความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ถ้าให้ θ เป็นค่าพารามิเตอร์ใด ๆ ที่เราสนใจจะทดสอบ ดังนั้น การตั้งสมมติฐานอาจจะอยู่ในรูปใดรูปหนึ่งใน 3 แบบตามตารางที่ 8 9 และ 10 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 8 การตั้งสมมติฐานกรณีทดสอบแบบสองด้าน

ลักษณะประชากร	การทดสอบแบบสองด้าน
ประชากรเดียว	$H_0 : \theta = \theta_0$, $H_1 : \theta \neq \theta_0$
สองประชากร	$H_0 : \theta = \theta_0$, $H_1 : \theta \neq \theta_0$ หรือ $H_0 : \theta_1 - \theta_2 = 0$, $H_1 : \theta_1 - \theta_2 \neq 0$

ที่มา: มัลลิกา (2544)

เราจะตั้งสมมติฐานดังกรณีที่ 1 นี้ เมื่อต้องการทดสอบ “ความเท่า” หรือ “ความไม่แตกต่างกัน” กล่าวคือ เราต้องการทดสอบว่าค่าพารามิเตอร์ θ มีค่าเท่ากับ ค่าใดค่าหนึ่ง ในที่นี้กำหนด $= \theta_0$ สำหรับประชากรเดียว ในกรณีที่มีสองประชากรจะเป็นการทดสอบว่า ไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ θ_1 และ θ_2

ตารางที่ 9 การตั้งสมมติฐานกรณีทดสอบแบบด้านเดียวทางขวา

ลักษณะประชากร	การทดสอบแบบด้านเดียวทางขวา
ประชากรเดียว	$H_0 : \theta \leq \theta_0$, $H_1 : \theta > \theta_0$
สองประชากร	$H_0 : \theta_1 \leq \theta_2$, $H_1 : \theta_1 > \theta_2$ หรือ $H_0 : \theta_1 - \theta_2 \leq 0$, $H_1 : \theta_1 - \theta_2 > 0$

ที่มา: มัลลิกา (2544)

เราจะตั้งสมมติฐานดังกรณีที่ 2 นี้ เมื่อต้องการทดสอบว่า “มากกว่า” หรือ “ไม่มากกว่า” หรือ “ไม่เกิน”

ตารางที่ 10 การตั้งสมมติฐานกรณีทดสอบแบบด้านทางซ้าย

ลักษณะประชากร	การทดสอบแบบด้านเดียวทางซ้าย
ประชากรเดียว	$H_0 : \theta \geq \theta_0$, $H_1 : \theta < \theta_0$
สองประชากร	$H_0 : \theta_1 \geq \theta_2$, $H_1 : \theta_1 < \theta_2$ หรือ $H_0 : \theta_1 - \theta_2 \geq 0$, $H_1 : \theta_1 - \theta_2 < 0$

ที่มา: มัลลิกา (2544)

เราจะตั้งสมมติฐานดั่งกรณีนี้ 2 นี้ เมื่อต้องการทดสอบว่า “น้อยกว่า” หรือ “ไม่น้อยกว่า”

การกำหนดระดับนัยสำคัญ

ในการทดสอบสมมติฐานอาจจะเกิดการผิดพลาดได้ 2 ประเภท คือ ปฏิเสธ H_0 เมื่อ H_0 เป็นจริง เรียกว่าความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) หรือ ไม่ปฏิเสธ H_0 เมื่อ H_0 ไม่เป็นจริง เรียกว่าความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) ดังนั้น เพื่อให้ทราบโอกาสที่จะผิดพลาดมีมากน้อยเพียงไร เราจึงกำหนดระดับนัยสำคัญ (Significant Level) หรือ ค่าวิกฤต (Critical Value) ในรูปของความผิดพลาดประเภทที่ 1 คือ ค่า α ค่า α ที่นิยมใช้กัน คือ .05 และไม่ควรกำหนดให้ค่า α มีค่าเกิน .10 เพราะจะทำให้ผลที่ได้มีความเชื่อถือได้น้อย

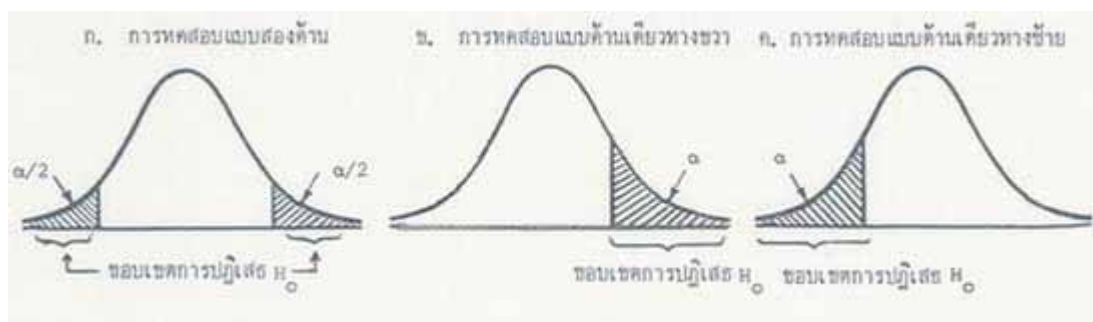
การเลือกตัวสถิติสำหรับการทดสอบ

การเลือกตัวสถิติสำหรับการทดสอบสมมติฐานนั้น ขึ้นอยู่กับว่าจะทดสอบเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ตัวใด และมีข้อจำกัดอย่างไร เช่น ถ้าทดสอบเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยเมื่อทราบค่าแปรปรวนใช้ตัวสถิติ Z แต่เมื่อไม่ทราบค่าแปรปรวนและตัวอย่างขนาดเล็ก ใช้ตัวสถิติ t การทดสอบเกี่ยวกับค่าสัดส่วนใช้ตัวสถิติ Z ถ้าทดสอบเกี่ยวกับความแปรปรวนในประชากรเดียวใช้ตัวสถิติ X^2 ถ้าทดสอบเกี่ยวกับความแปรปรวนในสองประชากรขึ้นไปให้ใช้ตัวสถิติ F เป็นต้น

การสร้างขอบเขตที่จะปฏิเสธสมมติฐาน

การสร้างขอบเขตการตัดสินใจ ก็คือการกำหนดเกณฑ์ที่จะปฏิเสธหรือยอมรับสมมติฐานที่ทำการทดสอบ (H_0) เมื่อเลือกตัวสถิติสำหรับการทดสอบและกำหนดค่า α แล้ว จะสามารถหาขอบเขตที่จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ได้จากตารางการแจกแจงที่สอดคล้องตัวสถิตินั้น ๆ เช่น ถ้าใช้ตัวสถิติ Z จะหาค่าขอบเขตที่จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ได้จากตารางการแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน ถ้าใช้ตัวสถิติ F จะหาค่าขอบเขตที่จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ได้จากตารางการแจกแจงแบบเอฟ เป็นต้น ขอบเขตที่จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมมติฐานแย้ง (H_1) กล่าวคือ ถ้าสมมติฐานแย้ง (H_1) ทดสอบความไม่เท่ากัน หรือความแตกต่างกัน ขอบเขตที่จะปฏิเสธสมมติฐานจะอยู่ทางด้านปลายทั้งสองข้างของโค้ง ภาพที่ 12 ก เรียกว่า การทดสอบแบบสองด้าน (Two-tailed test) ถ้าสมมติฐานแย้ง (H_1) ทดสอบความมากกว่า ขอบเขตที่จะปฏิเสธสมมติฐานจะอยู่ทาง

ด้านขวาของโค้ง ภาพที่ 12 ข เรียกว่าการทดสอบแบบด้านเดียวทางขวา ถ้าสมมติฐานแย้ง (H_1) ทดสอบความน้อยกว่า ขอบเขตที่จะปฏิเสธสมมติฐานจะอยู่ทางด้านซ้ายของโค้ง ภาพที่ 12 ค เรียกว่า การทดสอบแบบด้านเดียวทางซ้าย ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ขอบเขตที่จะปฏิเสธสมมติฐานที่ต้องการทดสอบ (H_0)

ที่มา: มัลลิกา (2544)

การคำนวณค่า

แทนค่าข้อมูลที่รวบรวมได้จากตัวอย่าง ลงในสูตรคำนวณตัวสถิติสำหรับการทดสอบ
ที่เลือกไว้ในขั้นที่ 3

การสรุปผลการทดสอบ

โดยเปรียบเทียบค่าสถิติที่คำนวณได้จากขั้นที่ 5 กับขอบเขตที่จะปฏิเสธสมมติฐานที่ได้จาก
ขั้นที่ 4 ถ้าค่าตัวสถิติที่คำนวณได้ตกอยู่นอกขอบเขตที่จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ก็จะยอมรับสมมติฐาน
 H_0 (เท่ากับปฏิเสธ H_1)

3. การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของประชากรเดียว

3.1 กรณีทราบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของประชากรเดียว เมื่อทราบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) และต้องการทดสอบสมมติฐาน

$$H_0 : \mu = \mu_0 \quad , \quad H_1 : \mu \neq \mu_0$$

$$\text{หรือ} \quad H_0 : \mu \leq \mu_0 \quad , \quad H_1 : \mu > \mu_0$$

$$H_0 : \mu \geq \mu_0 \quad , \quad H_1 : \mu < \mu_0$$

ใช้ตัวสถิติสำหรับการทดสอบ คือ

$$Z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma_{\bar{x}}} \quad (3)$$

$$\text{หรือ} \quad Z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}$$

โดยที่ $\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ยตัวอย่างขนาด n ที่สุ่มมาจากประชากรซึ่งมีการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ย μ และความแปรปรวน σ

μ_0 = ค่าเฉลี่ยประชากรที่ต้องการทดสอบ

σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากประชากร

$\sigma_{\bar{x}}$ = ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของ $\bar{x}$ จากประชากร

$$= \sigma/\sqrt{n}$$

3.2 กรณีไม่ทราบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอย่างเล็ก

เมื่อไม่ทราบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสุ่มตัวอย่างขนาดเล็กจากประชากรที่มีการแจกแจงแบบปกติ $\frac{\bar{x} - \mu}{S/\sqrt{n}}$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสุ่ม $\bar{x}$ และ S จะมีการแจกแจงเป็นแบบที่มีองศาอิสระเท่ากับ $(n-1)$ ดังนั้นตัวสถิติสำหรับการทดสอบเมื่อไม่ทราบค่า σ และตัวอย่างเล็กคือ

$$t_{(n-1)} = \frac{\bar{x} - \mu_0}{S/\sqrt{n}} \quad (4)$$

3.3 สรุปเกณฑ์การเลือกตัวสถิติเพื่อการทดสอบ

เมื่อประชากรที่สุ่มตัวอย่างมา มีการแจกแจงแบบปกติ เกณฑ์การเลือกตัวสถิติเพื่อการทดสอบ คือ

3.3.1 ใช้ตัวสถิติ Z ในการทดสอบ เมื่อ

3.3.1.1 ทราบค่า σ

3.3.1.2 ไม่ทราบค่า σ แต่ $n \geq 30$

3.3.2 ใช้ตัวสถิติ t ในการทดสอบ เมื่อไม่ทราบค่า σ และขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 30

ทฤษฎีการวิเคราะห์ความแปรปรวน

มัลลิกา (2544) การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ย ค่าสัดส่วน หรือค่าแปรปรวน สำหรับประชากร 2 ประชากร โดยทำการสุ่มตัวอย่าง 2 ชุดที่เป็นอิสระกันจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ แต่ถ้าต้องการ เปรียบเทียบประชากรมากกว่า 2 ชุดจะเกิดปัญหาไม่สามารถเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยหลายๆ ค่าพร้อมกันได้ นักสถิติได้เสนอแนะวิธีที่จะใช้วิเคราะห์ปัญหาเช่นนี้ให้ได้ผลดี เรียกว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งสามารถทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยหลายๆ ค่าพร้อมกันได้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนยังช่วยให้สามารถแยกส่วน (Partition) ความแปรปรวน

ทั้งหมดออกเป็นส่วนๆ ตามสาเหตุของความแปรปรวนและยังบอกให้ทราบด้วยว่าเป็นส่วนที่เกิดขึ้นเนื่องจากโอกาส (By Chance) มากน้อยเพียงใด

1. ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้น จำต้องมีข้อสมมติดังนี้

1.1 ประชากรที่สุ่มตัวอย่างมาจะต้องมีการกระจายแบบปกติ

1.2 และมีความแปรปรวนเท่ากัน (σ^2)

ถ้าไม่แน่ใจในข้อสมมติข้อนี้แล้ว ไม่ควรใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน แต่ควรจะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบสถิติที่ไม่ใช่พารามิเตอร์

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว (One-Factor Analysis)

2.1 ตัวแบบ (Model) สมมติว่าเราสนใจที่จะเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากร k ชุด จึงสุ่มตัวอย่างจากประชากร k ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยค่าสังเกต n_i ค่า ($i = 1, 2, \dots, k$) เรียกตัวอย่างแต่ละชุดว่าทรีตเมนต์ (Treatment) จะได้ตัวแบบสำหรับค่าสังเกต Y_{ij} ซึ่งค่าสังเกตตัวที่ j ในทรีตเมนต์หรือตัวอย่างชุดที่ i ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} Y_{ij} &= \mu + T_i + \varepsilon_{ij} \\ i &= 1, 2, \dots, k \\ j &= 1, 2, \dots, n_i \end{aligned} \quad (5)$$

ซึ่งหมายความว่า ค่าสังเกตแต่ละตัวประกอบด้วยส่วนประกอบ (Component) 3 ส่วน คือ

2.1.1 μ = ค่าเฉลี่ย รวมทุกประชากร (Grand Mean)

2.1.2 T_i = อิทธิพลหรือผลของทรีทเมนต์ (Treatment Effect) ของประชากรที่ i

2.1.3 ε_{ij} = อิทธิพลของหน่วยวิจัยที่ j ของทรีทเมนต์ i เรียกว่าความคลาดเคลื่อนเชิงสุ่ม (Random Error)

$$\text{โดยที่} \quad \mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} = \mu + T_i \quad (6)$$

$$\mu = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mu_i \quad (7)$$

$$T_i = \mu_i - \mu \quad (8)$$

$$\varepsilon_{ij} = Y_{ij} - \mu_i = Y_{ij} - \mu - T_i \quad (9)$$

ดังนั้น จึงเขียนตัวแบบสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวได้อีกรูปแบบหนึ่ง คือ

$$Y_{ij} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

ในเมื่อ μ_{ij} = ค่าเฉลี่ยของประชากรที่ i

2.2 ข้อสมมติ

2.2.1 μ เป็นค่าพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

2.2.2 T_i อาจมีข้อสมมติได้เป็น 2 อย่างคือ

2.2.2.1 ตัวแบบคงที่ (Fixed Model หรือ Model I) ใช้ในกรณีที่ทริทเมนต์ k ทริทเมนต์ในการวิจัยของเรา ประกอบเป็นประชากรทั้งหมดที่เราสนใจศึกษา ดังนั้น T_i จะเป็นค่าคงที่ และ

$$\sum_{i=1}^k T_i = 0 \quad (10)$$

2.2.2.2 ตัวแบบเชิงสุ่ม (Random Model หรือ model II) ใช้ในกรณีที่ทริทเมนต์ k ทริทเมนต์ในการวิจัยของเราเป็นเพียงส่วนหนึ่งหรือถูกสุ่มมาจากประชากรทั้งหมดที่เราสนใจ ดังนั้น T_i จะเป็นตัวแปรสุ่มที่เป็นอิสระและมีการแจกแจงแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และความแปรปรวนเป็น σ_T^2

2.3 มีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระ มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และความแปรปรวนเป็น σ_e^2

3. การตั้งสมมติฐาน

จากจุดประสงค์ที่ต้องการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของประชากร k ชุด เราเขียนเป็นสมมติฐานที่ต้องการทดสอบ คือ

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ (อย่างน้อย 1 ค่า)}$$

ถ้าสมมติฐานเป็นจริง คือ ค่าเฉลี่ยเหล่านี้เท่ากัน ค่าเฉลี่ย μ_i แต่ละตัวจะมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยรวม (μ) แสดงว่าไม่มีผลหรืออิทธิพลของทริทเมนต์ นั่นคือ $T_i = 0$ จึงสามารถเขียนสมมติฐานที่ต้องการทดสอบได้อีกรูปหนึ่งคือ

$$H_0 : T_1 = T_2 = \dots = T_k = 0$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อย } T \text{ หนึ่งตัว } \neq 0$$

4. การสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว

สมมติข้อที่รวบรวมมาได้แสดงไว้ในตารางที่ 11 ซึ่งมีทริทเมนต์ (ตัวอย่าง) k ชุด ตัวอย่างแต่ละชุดประกอบด้วยค่าสังเกต n_i ค่า

ตารางที่ 11 ข้อมูลปัจจัยเดียวสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ทริทเมนต์				
1	2	3		k
Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}		Y_{k1}
Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}		Y_{k2}
.	.	.		.
.	.	.		.
.	.	.		.
Y_{1n}	Y_{2n}	Y_{3n}		Y_{kn}
ยอดรวม				
Y_1	Y_2	Y_3		Y_k

ที่มา: มัลลิกา (2544)

ให้ Y_{ij} = ค่าสังเกตตัวที่ j ในทริทเมนต์ที่ i

ถ้าให้เครื่องหมายจุด (.) แสดงถึงการรวมค่าทุกค่าในแถวตั้งหรือแถวนอน จะได้

$$Y_{i.} = \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij} \quad (11)$$

$$\overline{Y_{i.}} = \frac{Y_{i.}}{n_i} \quad (12)$$

$$Y_{..} = \sum_{i=1}^k Y_{i.} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij} \quad (13)$$

$$\bar{Y}_{..} = \frac{Y_{..}}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (14)$$

ความแปรปรวนจากตัวอย่างของข้อมูลทั้งหมดคือรวมตัวอย่าง k ชุด เข้าด้วยกัน หาได้ในทำนองเดียวกับการหาความแปรปรวนจากตัวอย่างของตัวแปร Y_i คือ

$$S^2_{\text{รวม}} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2}{\sum_{i=1}^k n_i - 1} \quad (15)$$

ตัวเศษคือค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of Squares) ใช้ตัวย่อ SS ของค่าสังเกตแต่ละค่าที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวม เรียกว่า SS (รวม) คำนวณได้จากสูตร

$$SS \text{ (รวม)} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 \quad (16)$$

ส่วนตัวส่วน คือ จำนวนองศาอิสระรวม ซึ่งเท่ากับจำนวนค่าสังเกตทั้งหมดลบหนึ่งจากค่า SS (รวม) เราสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน ตามสาเหตุของความแปรปรวน คือ

ส่วนที่หนึ่ง คือความผันแปรระหว่างทริทเมนต์ ซึ่งคือผลบวกกำลังสองของค่าเฉลี่ยของทริทเมนต์ ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวม เรียกว่า SS (ระหว่างทริทเมนต์) คำนวณได้จากสูตร

$$SS \text{ (ระหว่างทริทเมนต์)} = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2 \quad (17)$$

ซึ่งจะมีจำนวนองศาอิสระ $= k - 1$ เพราะมีตัวอย่างหรือทริทเมนต์อยู่ k ทริทเมนต์

ส่วนที่สอง คือ ความผันแปรภายในทริทเมนต์ซึ่งคือ ผลรวมกำลังสองของค่าสังเกตแต่ละค่าภายในทริทเมนต์ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของทริทเมนต์ เรียกว่า SS (ภายในทริทเมนต์) คำนวณได้จากสูตร

$$SS \text{ (ภายในทรีทเมนต์)} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2 \quad (18)$$

ซึ่งมีจำนวนองศาอิสระ = $\sum_{i=1}^k (n_i - 1)$ ทั้งนี้เพราะว่าในแต่ละทรีทเมนต์มี n_i ค่า ซึ่งมี
ความเป็นอิสระอยู่ $(n_i - 1)$ ตัว แต่มีทรีทเมนต์ทั้งหมด k ทรีทเมนต์ ดังนั้นจะได้จำนวนองศา
อิสระ = $\sum_{i=1}^k (n_i - 1)$

การแบ่ง SS (รวม) ออกตามสาเหตุของความแปรปรวนนี้ จะต้องทำให้ $SS \text{ (รวม)} = SS \text{ (ระหว่างทรีทเมนต์)} + SS \text{ (ภายในทรีทเมนต์)}$

และในทำนองเดียวกัน องศาอิสระของ SS (รวม) จะเท่ากับองศาอิสระของ SS
(ระหว่างทรีทเมนต์) รวมกับองศาอิสระ ของ SS (ภายในทรีทเมนต์) นั่นคือ $df \text{ ของ SS (รวม)}$
 $= df \text{ ของ SS (ระหว่างทรีทเมนต์)} + df \text{ ของ SS (ภายในทรีทเมนต์)}$

เมื่อจำนวนค่าสังเกตในแต่ละทรีทเมนต์เท่ากัน จะได้

$$(kn - 1) = (k - 1) + k(n - 1)$$

เมื่อจำนวนค่าสังเกตในแต่ละทรีทเมนต์ไม่เท่ากัน จะได้

$$\sum_{i=1}^k n_i - 1 = (k - 1) + \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \quad (19)$$

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับข้อมูลจากตาราง 11 ด้านบนสรุปได้ ตามตารางที่ 12
และ 13 ดังนี้

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว เมื่อจำนวนค่าสังเกตในแต่ละทรีทเมนต์ไม่เท่ากัน

สาเหตุของความแปรปรวน	องศาอิสระ (df)	ผลรวมกำลังสอง (SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (MS)
ระหว่างทรีทเมนต์	$k - 1$	$\sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2$	SS (ระหว่างทรีทเมนต์)
ภายในทรีทเมนต์	$\sum_{i=1}^k (n_i - 1)$	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2$	SS (ภายในทรีทเมนต์) / $\sum_{i=1}^k (n_i - 1)$
รวม	$\sum_{i=1}^k n_i - 1$	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2$	

ที่มา: มัลลิกา (2544)

มีบ่อยครั้งที่ค่าสังเกตในแต่ละทรีทเมนต์ หรือตัวอย่างมีจำนวนเท่ากัน ในกรณีเช่นนี้ เราให้ n คือจำนวนค่าสังเกตในแต่ละทรีทเมนต์ (นั่นคือ $n_i = n$ สำหรับ $i = 1, 2, \dots, k$) จะได้ตารางสรุปการคำนวณที่ง่ายกว่า ในกรณีที่จำนวนค่าสังเกตในแต่ละทรีทเมนต์ไม่เท่ากัน ดังนี้

ตารางที่ 13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปัจจัยเดียวเมื่อจำนวนค่าสังเกตในแต่ละทรีทเมนต์เท่ากัน

สาเหตุของความแปรปรวน	องศาอิสระ (df)	ผลรวมกำลังสอง (SS)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (MS)
ระหว่างทรีทเมนต์	$k - 1$	$n \sum_{i=1}^k (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2$	SS (ระหว่างทรีทเมนต์) / $k - 1$
ภายในทรีทเมนต์	$k(n - 1)$	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2$	SS (ภายในทรีทเมนต์) / $k(n - 1)$
รวม	$kn - 1$	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2$	

ที่มา: มัลลิกา (2544)

5. สูตรการคำนวณอย่างง่ายสำหรับข้อมูลที่มีปัจจัยเดียว

สูตรในตารางที่ 12 และตารางที่ 13 เป็นสูตรที่แสดงเพื่อให้มีความเข้าใจในแนวคิดของการทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน แต่เพื่อให้ง่ายและสะดวกในการคำนวณหาค่าผลรวมกำลังสองควรใช้สูตรต่อไปนี้

$$C.F. = \text{ค่าปรับสำหรับค่าเฉลี่ย} = \frac{(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij})^2}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (20)$$

$$\text{หรือ} = \frac{Y_{..}^2}{n.} \quad (21)$$

ในทางปฏิบัติค่า SS (ภายในทรีทเมนต์) มักจะคำนวณได้จาก

$$SS \text{ (ภายในทรีทเมนต์)} = SS \text{ (รวม)} - SS \text{ (ระหว่างทรีทเมนต์)}$$

6. การทดสอบความเท่ากันของค่าเฉลี่ยโดยใช้ F-Test

สมมติฐาน

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_0 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \text{ (อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่า)}$$

$$\text{หรือ } H_0 : T_1 = T_2 = T_3 = 0 \text{ หรือ } T_i = 0; i = 1, 2, 3$$

$$H_1 : \text{อย่างน้อยมี } T_i \text{ หนึ่งตัวที่ไม่เท่ากับ 0}$$

และในการทดสอบทำได้โดยอาศัย F-Test คือ อัตราส่วนระหว่าง ผลรวมกำลังสองเฉลี่ยของระหว่างทรีทเมนต์ กับ ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย ของภายในทรีทเมนต์

$$F = \frac{MS \text{ (ระหว่างทรีทเมนต์)}}{MS \text{ (ภายในทรีทเมนต์)}} \quad (22)$$

ถ้าสมมติฐานเป็นจริง ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย ทั้ง 2 ตัวนี้ก็ต่างเป็นตัวประมาณ σ^2 ดังนั้น อัตราส่วนนี้จะมีค่าเท่ากับ 1 แต่ถ้าค่าเฉลี่ยไม่เท่ากัน หรือ T_i ทุกตัวไม่เป็น 0 ค่าผลรวมกำลังสองเฉลี่ยของระหว่างทริทเมนต์ จะใหญ่กว่าผลรวมกำลังสองเฉลี่ยของภายในทริทเมนต์ ดังนั้น เราจึงปฏิเสธ H_0 ถ้า F ที่คำนวณได้มากกว่า F ที่ $\alpha = 0.05$ ให้ปฏิเสธสมมติฐาน H_0

งานวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

1. งานวิจัยที่ใช้เส้นใยธรรมชาติในการประยุกต์ด้านต่างๆ

ศกุนธิ และ รุ่งอรุณ (2545) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตถนนวนกันความร้อนจากเส้นใยหญ้าแฝกค่อนและน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้เส้นใยหญ้าแฝกค่อน (*Vetveria Nemorallis*) ผ่านการปั่นกววนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และพบว่าสภาวะในการเตรียมเส้นใยหญ้าแฝกที่เหมาะสมคือ ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย NaOH 15% wt ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยเส้นใยหญ้าแฝกที่ได้จะมี Aspect ratio เท่ากับ 58.48 ที่มีความอ่อนนุ่มเหมาะสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแผ่นถนนวนกับน้ำยางธรรมชาติ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (Aspect Ratio) จะส่งผลต่อการเกาะเกี่ยวกันของเส้นใยในการขึ้นรูปแผ่นถนนวน

อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของเส้นใยหญ้าแฝกจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

1. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
2. อุณหภูมิในการปั่นกววน (องศาเซลเซียส)
3. เวลาที่ใช้ในการปั่นกววนเส้นใย (นาที)
4. อุณหภูมิอบที่ (องศาเซลเซียส)
5. เวลาในการอบที่ (ชม.)

เฉลิมพล และ สกุล (2537) ได้ทำการศึกษาเส้นใยเซลลูโลส ได้แก่หญ้าสลาบลหวง (*Typha Angustifolia*) ใช้เป็นสารเสริมแรงในโพลิโพรพิลีน (Polypropylene) โดยผสมเส้นใยแก้วและสาร Silane เพื่อเป็นสารเชื่อมโยง (Coupling Agent) จากการวิจัยพบว่า เส้นใยจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุผสม แต่มีแนวโน้มที่จะลดค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่จุดขาด นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาปรับปรุงสมบัติและการใช้งานอื่น ๆ เช่น ใช้ในการทำแผ่น MDF (Medium Density Fiber Board) และใช้ พลาสติกจำพวก Thermoset เป็นตัวประสาน

Joseph (1993) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางด้านความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile properties) ของวัสดุผสมระหว่างโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) และเส้นใยป่านสรนารายน์ (Sisal Fiber) โดยใช้เครื่องฉีดพลาสติก พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ได้แก่กระบวนการผสมเส้นใยกับโพลิเมอร์ โดยการผสมโพลิเมอร์กับเส้นใยหลอมเหลว (Melt Mixing) ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยลงไปจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของวัสดุผสมเพิ่มขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent Elongation) ลดลง และเมื่อนำวัสดุผสมมาฉีดขึ้นรูปใหม่จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่ฉีด ทั้งนี้เนื่องจากผลของความร้อนในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปจะทำให้เกิดการสลายตัวที่พื้นผิวของเส้นใย จึงสามารถยึดติดกับโพลิเอทิลีนได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้พบว่าการจัดเรียงตัวของเส้นใยของวัสดุผสมที่เป็นไปตามแนวแรง จะทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงดีกว่าวัสดุผสมที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่ตั้งฉากกับแนวแรง และเส้นใยที่มีความยาว 3 มม. จะทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงสุด

2. การนำเอาข้อมูลธรรมชาติมาเป็นตัวประสานในการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อน

ศกุนธิ และ รุ่งอรุณ (2545) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยหญ้าแฝกคองและน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้ข้อมูลสูตรเบ้าอย่างที่มีส่วนประกอบของสารเคมีดังนี้

ส่วนประกอบของสารเคมีในน้ำยางธรรมชาติสูตรเบ้าอย่าง มีรายละเอียดดังนี้

1. โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์	3	กรัม
2. โปแตสเซียมลอเรท	1	กรัม
3. ซัลเฟอร์	4	กรัม

4. ซิงค์ไดเอททิลไดทีโอคาร์บอเนต	2	กรัม
5. วิงสเตย์แอล	2	กรัม
6. ซิงค์ออกไซด์	1.5	กรัม
7. น้ำยางธรรมชาติ	167	กรัม

โดยการปั่นไล่แอมโมเนียในน้ำยางที่ใช้รักษาน้ำยางชั้นให้ระเหยออกไป ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 นาที โดยความเร็วรอบในการกวนประมาณ 30 รอบต่อนาที จากนั้นจึงใส่สารเคมีดังกล่าวลงในน้ำยางธรรมชาติตามลำดับ และทำการปั่นกวนน้ำยางธรรมชาติต่อไปอีกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้สารเคมีกระจายในน้ำยางได้อย่างทั่วถึง

3. ผลงานวิจัยที่ใช้ Borax และ Zinc Borate ต่อการลดอัตราการลามไฟ

Levan and Tran (1998) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ Borax (Borax) เป็นสารหน่วงไฟ (Flame Retardant) ในไม้เพื่อลดอัตราการลามไฟ และผลของ Borax ที่มีต่อสมบัติทางกลของไม้ โดย Borax เมื่อถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาก่อตัวของสารประกอบโบรอนเป็นผิวเคลือบ (Glassy film) ซึ่งสามารถยับยั้งการถ่ายเทมวลสาร (อากาศ) ในการเผาไหม้ ทำให้สามารถลดการแพร่กระจายของเปลวไฟ ซึ่งทำการวิจัยโดยศึกษาปริมาณของสารละลายบอริกซ์เอซิด (Boric acid) ในช่วง 1 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ทดสอบในไม้สองชนิดคือ เคลียวูด (Clear wood) และ โพลีวูด (Poly wood) จากการศึกษาพบว่า 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ Borax สามารถทำให้ไม้มีความสามารถรับแรงในขณะเผาไหม้ได้มากที่สุดคือ 3 lb/ft^3 (48 kg/m^3) ตามมาตรฐาน ASTM E 84

Pandey and Gurjar (2000) ได้ทำการศึกษาผลของสารหน่วงไฟในปาร์ติเคิลบอร์ดที่ผลิตจากเมล็ดฝ้ายโดยสารหน่วงไฟที่ใช้คือ 1) 70% Borax 30% กรดบอริก 2) 60% Borax 25% กรดบอริก และ 15% แอมโมเนียม ไดไฮโดรเจน เพื่อวิจัยหาระยะเวลาการเผาไหม้ ระยะที่เป็นถ่าน และเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไป พร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางกล จากการศึกษาพบว่าสมบัติต้านทานอัตราการลามไฟ การต้านทานน้ำ เปอร์เซ็นต์การบวมตัวดีขึ้น แต่ความแข็งแรงในการดัดงอลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารหน่วงไฟ

Giúdice and Benítez (1996) ได้ทำการศึกษา Zinc Borate ที่มีผลต่อสมบัติของยางสังเคราะห์ที่เติมคลอรีน โดยใช้ Zinc Borate ที่มีสูตรทางเคมี $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ และ $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 7.5\text{H}_2\text{O}$ เพื่อใช้แทนแอนติโมนีไตรออกไซด์ (antimony trioxide) ในการเป็นชั้นเคลือบในการต้านอัตราการลามไฟ ผลการศึกษาได้บ่งชี้ว่าชั้นเคลือบนี้สามารถทำหน้าที่ในการต้านทานอัตราการลามไฟได้อย่างดี

4. มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

มาตรฐาน ASTM D 635-98: Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in Horizontal Position

มาตรฐาน ASTM C177-97: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guardes-Hot-Plate apparatus

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นพริกแห้ง



ภาพที่ 13 เครื่องปั่นพริกแห้ง

2. หม้อสแตนเลส



ภาพที่ 14 หม้อสแตนเลส

3. นาฬิกาจับเวลา



ภาพที่ 15 นาฬิกาจับเวลา

4. ตู้อบ



ภาพที่ 16 ตู้อบ

5. เครื่องปั่นกวนน้ำยาง



ภาพที่ 17 เครื่องปั่นกวนน้ำยาง

6. หม้อบดบอลมิล (Ball Mill)



ภาพที่ 18 หม้อบดบอลมิล (Ball Mill)

7. เครื่องหมุนกลึงหม้อบดบอลมิล



ภาพที่ 19 เครื่องหมุนบดบอลมิล (Ball Mill)

8. เครื่องชั่งดิจิตอล (สำหรับชั่งน้ำยางธรรมชาติ)



ภาพที่ 20 เครื่องชั่งดิจิตอล

9. ถาดอลูมิเนียมขนาด 15x18x1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร



ภาพที่ 21 ถาดอลูมิเนียมขนาด 15x18x1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

10. ชุดจับชิ้นงานทดสอบสมบัติอัตราการลามไฟ



ภาพที่ 22 ชุดทดสอบสมบัติอัตราการลามไฟ

11. เครื่องทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity Tester)



ภาพที่ 23 เครื่องทดสอบค่าการนำความร้อน

12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)



ภาพที่ 24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

วิธีการ

การผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนชนิดหุ้มไฟจากเส้นใยผักตบชวา และน้ำยางธรรมชาติ มีขั้นตอนการวิจัยดังนี้

1. การเตรียมเส้นใยผักตบชวาจากก้านผักตบชวาแห้งโดยการหั่นและปั่นด้วยเครื่องปั่นพริกแห้ง

ผักตบชวตากแห้งปกติจะมีขนาดใหญ่และแข็งกระด้าง ทำให้เป็นการยากที่จะนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนได้ จึงต้องทำการปรับปรุงผักตบชวาให้กลายเป็นเส้นใยขนาดเล็กลงและมีความอ่อนนุ่มมากขึ้นโดย

1.1 หั่นด้วยมีดให้ได้ความยาวประมาณ 1 นิ้ว



ภาพที่ 25 ลักษณะผักตบชวาแห้งที่หั่นแล้ว

1.2 นำผักตบชวาที่หั่นแล้วมาปั่นด้วยเครื่องปั่นพริกแห้งเพื่อให้เป็นฝอย



ภาพที่ 26 การปั่นผักตบชวาด้วยเครื่องปั่นพริกแห้งให้เป็นฝอย

2. การหาสถานะในการเตรียมเส้นใยผักตบชวาโดยทำการปรับปรุงให้มีสมบัติที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นฉนวน

โดยการนำเส้นใยผักตบชวาที่ได้จากการปั่นในขั้นตอนที่ 1 ไปปั่นกวนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อให้ได้เส้นใยที่เหมาะสมก็มีความอ่อนนุ่มเป็นเส้นเรียวยาว (อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (Aspect Ratio) มาก)



ภาพที่ 27 การกวนเส้นใยผักตบชวาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โดยพิจารณาพื้นฐานของเส้นใยผักตบชวา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) จะส่งผลต่อการเกาะเกี่ยวกันของเส้นใยในการขึ้นรูปแผ่นฉนวน โดยทดลองตามปัจจัยต่อไปนี้

1. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (5, 10, 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
2. อุณหภูมิในการปั่นกว (100, อุณหภูมิห้อง องศาเซลเซียส)
3. เวลาที่ใช้ในการปั่นกวเส้นใย (5, 10, 15 นาที)
4. อุณหภูมิอบที่ 80 องศาเซลเซียส
5. เวลาในการอบที่ 6 ชม.

โดยเริ่มทดลองความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการปั่นกวที่ 5, 10 และ 15 นาทีทุกความเข้มข้น อุณหภูมิในการปั่นกวเส้นใยคือ 100 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำเส้นใยไปล้างด้วยน้ำจนสะอาด แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3. การเตรียมน้ำยางธรรมชาติสูตรเบ้ายางเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การต้านทานเชื้อรา การต้านทานการเสื่อมสภาพจากแสงแดด

งานวิจัยนี้เลือกน้ำยางธรรมชาติ เพื่อใช้เป็นตัวประสานให้เส้นใยผักตบชวาเกาะเกี่ยวกันได้ดี โดยเติมสารเคมีตามสูตรข้างล่างนี้ลงในน้ำยางธรรมชาติเพื่อให้ได้น้ำยางธรรมชาติสูตรเบ้ายางเตรียมนำไปขึ้นรูปแผ่นฉนวน ให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การต้านทานเชื้อรา การต้านทานการเสื่อมสภาพจากแสงแดด เป็นต้น

ส่วนประกอบของสารเคมี (สูตรเบ้ายาง) ที่เติมลงในน้ำยางธรรมชาติ มีดังนี้

1. โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์	3	กรัม
2. โปแตสเซียมลอเรท	1	กรัม
3. ซัลเฟอร์	4	กรัม
4. ซิงค์ไดเอทิลไดทีโอคาร์บอเนต	2	กรัม
5. วิงสเตย์แอล	2	กรัม
6. ซิงค์ออกไซด์	1.5	กรัม
7. น้ำยางธรรมชาติ	167	กรัม

ขั้นตอนการเตรียม

1. เริ่มจากเทน้ำยางชั้นลงในภาชนะบรรจุและทำการปั่นไล่แอมโมเนียที่ใช้รักษาน้ำยางชั้นให้ระเหยออกไป ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 นาที โดยความเร็วรอบในการกวนประมาณ 30 รอบต่อนาที จะได้น้ำยางธรรมชาติ

2. จากนั้นจึงใส่สารเคมีดังกล่าวลงในน้ำยางธรรมชาติตามลำดับและทำการปั่นกวนน้ำยางธรรมชาติต่อไปอีกเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้สารเคมีกระจายในน้ำยางได้อย่างทั่วถึง ดังแสดงในภาพที่ 33



ก



จ



ค



ง

ภาพที่ 28 การเตรียมน้ำยางธรรมชาติสูตรเบ้ายาง

4. ทำการหาสถานะและอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฉนวนก่อนเติมสารหน่วงไฟ ด้วยวิธีฟั่นละอองฝอย (ทดลองขึ้นรูปเป็นแผ่นก่อนโดยไม่เติมสารหน่วงไฟ)

4.1 เริ่มจากการนำเส้นใยผักตบชวามาโรยเป็นชั้นบางๆ บนถาด

4.2 แล้วใช้อุปกรณ์ฟั่นน้ำยางธรรมชาติ(กระปุกฟั่น Foggy) ลงบนเส้นใยผักตบชวา โดยปรับให้มีละอองแบบฝอยเพื่อเคลือบเส้นใยให้ทั่วถึง

4.3 หลังจากนั้นโรยเส้นใยผักตบชวาทับลงไปหนึ่งชั้น ฟั่นน้ำยางธรรมชาติทับแล้วกดด้วยแผ่นไม้ระนาบ เพื่อให้แผ่นฉนวนแน่นขึ้นเป็นการไล่อากาศออกจากแผ่นฉนวนทำซ้ำเช่นนี้จนได้ความหนาตามต้องการ (หนา 1.5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C177-97)

4.4 แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ น้ำยางธรรมชาติเกิดการคงรูปจับยึดเส้นใย ผักตบชวาเป็นแผ่น

4.5 และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที (สูตรสถาบันวิจัยยาง สำหรับน้ำยางสูตรเบ้ายาง) เพื่อให้ น้ำยางคงรูปอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงขั้นตอนในภาพที่ 34



ก



ข



ค



ง



จ



ฉ

ภาพที่ 29 ขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นฉนวนด้วยวิธีการ ฟ่นละอองฝอย

การขึ้นรูปแผ่นฉนวนจากเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติ โดยวิธีการ ฟ่นละอองฝอย ที่อัตราส่วนของเส้นใยผักตบชวาต่อน้ำยางธรรมชาติต่าง ๆ กันนั้น ทำให้ลักษณะทางกายภาพของ แผ่นฉนวนที่ได้มีลักษณะที่แตกต่างกัน การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่ อัตราส่วนเส้นใยผักตบชวาต่อน้ำยางธรรมชาตินั้นเราจะพยายามใช้ปริมาณของน้ำยางธรรมชาติให้ น้อยที่สุดแต่ต้องสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ด้วย โดยเริ่มทดลองที่อัตราส่วนเส้นใยผักตบชวาต่อ น้ำยางธรรมชาติที่ 1:4 1:3 และ 1:2 และคำนึงถึงความสามารถในการเกาะเกี่ยวของเส้นใย และน้ำหนักของแผ่นฉนวนที่ได้

5. การลดอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนโดยลดปริมาณเนื้อยางด้วยการเจือจางด้วยน้ำ

ทำการลดปริมาณเนื้อยางธรรมชาติในฉนวนทำ โดยเจือจางน้ำยางธรรมชาติด้วยน้ำ เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่เมื่อติดไฟแล้ว สามารถดับได้ยากอีกทั้งปริมาณเนื้อยางธรรมชาติในแผ่นฉนวนยังคงมีปริมาณมาก เพื่อการลดปริมาณเนื้อยางจึงทดลองโดยการเจือจางด้วยน้ำ

ในการลดปริมาณยางแห้งในแผ่นฉนวนทำได้ โดยการเจือจางน้ำยางธรรมชาติด้วยน้ำ โดยเริ่มทดลองในอัตราส่วนของน้ำยางธรรมชาติต่อน้ำที่ 2:1 1:1 1:2 1:3 1:4 และ 1:5 โดยน้ำหนักตามลำดับ จากนั้นนำน้ำยางธรรมชาติที่ได้เจือจางแล้วไปทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนโดยคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฉนวนที่ได้และความเป็นไปได้ในการผลิตและการใช้งาน

6. การลดอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนโดยปรับปรุงเส้นใยผักตบชวาด้วยการเติมสารหน่วงไฟ

สารละลาย Borax มีคุณสมบัติเหมาะสม ที่จะนำมาลดอัตราการลามไฟของเส้นใยเซลลูโลส เส้นใยผักตบชวาเป็นเส้นใยธรรมชาติและเป็นเส้นใยเซลลูโลสซึ่งสามารถติดไฟได้ง่าย ดังนั้นการนำเส้นใยผักตบชวามาผลิตเป็นแผ่นฉนวนนั้น จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติการต้านทานอัตราการลามไฟ โดยนำเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการเตรียมตามขั้นตอนที่ 2 มาแช่ในสารละลาย Borax

ในการทดลองหาจุดที่เหมาะสมของการใช้ปริมาณ Borax (% wt) สำหรับทำปฏิกิริยากับเส้นใยผักตบชวานั้นเราใช้แบบลองถูกลองผิดโดยการแปรผัน %Borax โดยเริ่มจาก 0% 5% และ 10% ใช้เวลาในการกวนแช่ประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นนำเส้นใยผักตบชวาไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง แล้วทดลองขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนตามขั้นตอนที่ 4 ว่าสามารถขึ้นรูปได้หรือไม่ และนำแผ่นฉนวนนั้นไปทดสอบค่าอัตราการลามไฟ แล้วนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์และประมวลผลแบบ ANOVA ด้วยโปรแกรม Minitab Release 13.20

ขั้นตอนการวิเคราะห์และประมวลผลมีดังนี้

6.1 ทดสอบเงื่อนไข (Assumption) เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย ANOVA ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนดังนี้

6.1.1 ข้อมูลอัตราการลามไฟของแต่ละกลุ่มการทดลอง (ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของ Borax) นั้นต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

6.1.2 และค่าความแปรปรวนของอัตราการลามไฟของประชากรแต่ละกลุ่ม (ที่เปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ ของ Borax) นั้นต้องมีค่าเท่ากัน

6.2 ตั้งสมมติฐาน (Hypothesis) ในการวิจัยนี้เบื้องต้นเรายังไม่ทราบว่าค่า % Borax ที่ 0% 5% และ 10% จะให้ค่า Burn Rate ที่แตกต่างกันหรือไม่ ดังนั้นเราจึงต้องตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

เมื่อ μ_1 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate จากการทดลอง Borax ที่ 0%
 μ_2 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate จากการทดลอง Borax ที่ 5%
 μ_3 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate จากการทดลอง Borax ที่ 10%

6.3 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

ขั้นต่อไปเป็นการเลือกตัวสถิติในการทดสอบ ในการวิจัยนี้เราเลือกใช้แบบ F-test, $\alpha = 0.05$ แล้วใช้โปรแกรม Minitab เพื่อวิเคราะห์ ANOVA โดยดูค่า p-value เทียบกับค่า $\alpha (=0.05)$ ถ้าค่า p-value มากกว่า α เราจะยอมรับ H_0 ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยของอัตราการลามไฟ (ของสารละลาย Borax ต่างกัน) เท่ากันทุกค่า แต่ถ้าค่า p-value น้อยกว่า α เราจะปฏิเสธ H_0 ซึ่งหมายถึงมีค่าเฉลี่ยของอัตราการลามไฟอย่างน้อย 1 คู่ไม่เท่ากันหรือต่างกัน แต่ที่มีความแตกต่างกัน ก็ยังไม่ทราบว่าอัตราการลามไฟคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน

ฉะนั้นกรณีที่ปฏิเสธ H_0 ในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลอัตราการลามไฟแต่ละคู่ จะดำเนินการเปรียบเทียบด้วยวิธี “การเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparison Test)” Fisher’s pairwise comparison และการเปรียบเทียบนี้ผู้วิจัยจะทำภายหลังจากการทดลองได้เสร็จสิ้นแล้ว

ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Minitab Release 13.20 สำหรับการวิจัยในหัวข้อนี้ถูกกล่าวไว้พร้อมทั้งแสดงผลในส่วนภาคผนวก

7. การลดอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนโดยปรับปรุงน้ำยางธรรมชาติด้วยการเติมสารหน่วงไฟ

ในขั้นตอนนี้เราจะนำน้ำยางธรรมชาติเจือจางที่ผสมน้ำที่อัตราส่วนน้ำยางต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 3 ดังที่กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 5 มาผสมสารหน่วงไฟโดยสารหน่วงไฟที่ใช้ทดลองผสมในน้ำยางธรรมชาติ คือ Borax และ Zinc Borate แต่ขั้นตอนแรกต้องมีการเตรียมสารแขวนลอยของสารหน่วงไฟก่อนที่จะใช้ เพื่อการปรับปรุงสมบัติการต้านทานอัตราการลามไฟ เพื่อเพิ่มการกระจายตัวในน้ำยางโดยมีขั้นตอนดังนี้

7.1 การเตรียมสารแขวนลอยของสารหน่วงไฟ

การผสมสารหน่วงไฟในน้ำยางธรรมดานั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำให้สารหน่วงไฟอยู่ในรูปของสารแขวนลอย เพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของสารหน่วงไฟในน้ำยางธรรมชาติ

ส่วนประกอบของสารแขวนลอยหน่วงไฟที่จะเติมในน้ำยางมีดังนี้

สารหน่วงไฟ (BoraxหรือZinc Borate)	100	กรัม
วัลตามอน (Vultamol)	2	กรัม
เบนโทไนต์ (Bentonite)	2	กรัม
น้ำ	96	กรัม

นำสารเคมีดังกล่าว ผสมลงในหม้อบดบอลมิลที่เป็นหม้อกระเบื้องเคลือบปิดฝาสนิท ภายในบรรจุลูกอะลูมินาทรงกลมตันเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25, 0.5 และ 1 นิ้ว

นำหม้อบดวางบนเครื่องหมุนกลิ้ง ใช้เวลาในการบด 24 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 30



(ก)



(ข)

ภาพที่ 30 การเตรียมสารหน่วงไฟในรูปของสารแขวนลอย

รอบการหมุนของเครื่องหมุนกลิ้งคงที่ประมาณ 30 รอบต่อนาที ส่วนเวลาในการหมุนหม้อบอลลิลประมาณ 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐานศูนย์วิจัยยาง การพิสูจน์สารแขวนลอยว่าถูกบดได้หรือไม่ นั้นโดยดูว่าต้องเนื้อเดียวและเมื่อหยดลงในน้ำต้องกระจายตัวดีในน้ำไม่จับกันตัวตกตะกอนเป็นก้อน

7.2 การผสมสารแขวนลอยของสารหน่วงไฟในน้ำยางธรรมชาติ

ในการผสมสารแขวนลอยของสารหน่วงไฟลงในน้ำยางธรรมชาตินั้น จะใช้สารแขวนลอยที่เตรียมจากขั้นตอน 7.1 โดยผสมลงในน้ำยางธรรมชาติและทำการปั่นกวนให้สารแขวนลอยกระจายตัวในน้ำยางธรรมชาติอย่างทั่วถึง โดยใช้สัดส่วนของสารแขวนลอยของสารหน่วงไฟเท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อนำไปเตรียมตัวอย่างในการทดสอบหาอัตราการลามไฟของน้ำยางธรรมชาติต่อไป

7.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาอัตราการลามไฟของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติในสถานะของเหลวไม่สามารถทดสอบหาอัตราการลามไฟได้ จึงต้องขึ้นรูปเป็นแผ่น โดยชั่งน้ำยางที่ผสมสารหน่วงไฟแล้ว จำนวน 80 กรัม เทลงในถาดแต่ละช่องที่มีขนาด 10x10x3 ลูกบาศก์มิลลิเมตรตามมาตรฐานสถาบันวิจัยยาง ระหว่างการเทนั้นควรระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศในชิ้นงานเพราะเมื่อน้ำยางคงรูปแล้วจะทำให้ฟองอากาศติดอยู่ในชิ้นงาน โดยตั้งน้ำยางทิ้งไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน เพื่อให้ให้น้ำในน้ำยางธรรมชาติค่อยๆ ระเหยออกจากชิ้นงาน แล้วจึงอบที่ 100 องศาเซลเซียสนาน 15 นาทีตามสูตรสถาบันวิจัยยาง เพื่อให้ยางคงรูปได้เป็นชิ้นงานตัวอย่าง

การที่ไม่สามารถอบน้ำยางทันทีหลังจากการเทขึ้นรูปนั้น เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนขณะที่ปริมาณน้ำในน้ำยางยังมีมากอยู่ จะทำให้น้ำยางบวมและแตกออก เป็นผลให้ชิ้นงานที่ได้มีผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ยางแผ่นที่ใช้เป็นชิ้นงานตัวอย่าง

8. ทำการหาสถานะและอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฉนวนหลังเติมสารหน่วงไฟด้วยวิธี ฟันละอองฝอย

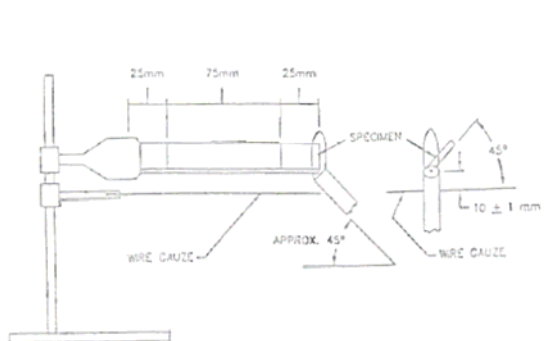
การวิจัยขั้นตอนนี้จะดำเนินการเหมือนขั้นตอนที่ 4 (การขึ้นรูปแผ่นฉนวนโดยไม่ใช้สารหน่วงไฟ) แตกต่างกันตรงที่ใช้เส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านการเติมสารหน่วงไฟมาทดลอง ผสมกันที่อัตราส่วนเดียวกันกับขั้นตอนที่ 4 แต่เพิ่มการกดแผ่นฉนวนด้วยแผ่นไม้ระแนบหลังการโรยเส้นใยผักตบชวาหน่วงไฟทุกครั้ง เพื่อลดโพรงอากาศที่เป็นปัจจัยทำให้อัตราการลามไฟเพิ่มขึ้น จากนั้นก็นำไปทดสอบค่าอัตราการลามไฟในขั้นตอนที่ 9 ต่อไป

9. การทดสอบหาค่าอัตราการลามไฟโดยใช้ชิ้นงานตัวอย่างสองชนิด คือ ยางแผ่นที่ผสม Zinc Borate และแผ่นฉนวนที่ผลิตได้

ทดสอบโดยใช้ชิ้นงานตัวอย่างสองชนิด คือ แผ่นยางและแผ่นฉนวน ซึ่งดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 635-98 โดยชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด กว้าง 13 มิลลิเมตร ยาว 125 มิลลิเมตร และมีความหนาในช่วง 3-15 มิลลิเมตร โดย

1. ชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นแผ่นยางจะมีความหนา 3 มิลลิเมตร
2. และชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นแผ่นฉนวน จะมีความหนา 15 มิลลิเมตร

การทดสอบแต่ละครั้งใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 16 ชิ้น โดยแต่ละชิ้นจะทำการทดสอบภายในห้องทดสอบ ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 23-25 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์ 50-55 เปอร์เซ็นต์ ใช้ก๊าซหุงต้ม (C_3H_8) เป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบโดยเริ่มจ่อเปลวไฟที่ปลายชิ้นงานตัวอย่างเป็นเวลา 30 วินาที แล้วจึงเริ่มทำการจับเวลาและดึงเปลวไฟออก ปล่อยให้เปลวไฟลามไปบนชิ้นงานตัวอย่าง และหยุดทำการจับเวลาเมื่อเหลือชิ้นงานตัวอย่าง 25 มิลลิเมตร นับจากปลายอีกข้างหนึ่งของชิ้นงาน หรือจนกว่าไฟดับ ดังแสดงในภาพที่ 32 จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ ANOVA ด้วยโปรแกรม Minitab Release 13.20 (เหมือนขั้นตอนที่ 6)



ภาพที่ 32 วิธีการทดสอบหาอัตราการลามไฟของชิ้นงานแผ่นฉนวนทดสอบ

10. การหาค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของแผ่นฉนวนที่ผลิตได้

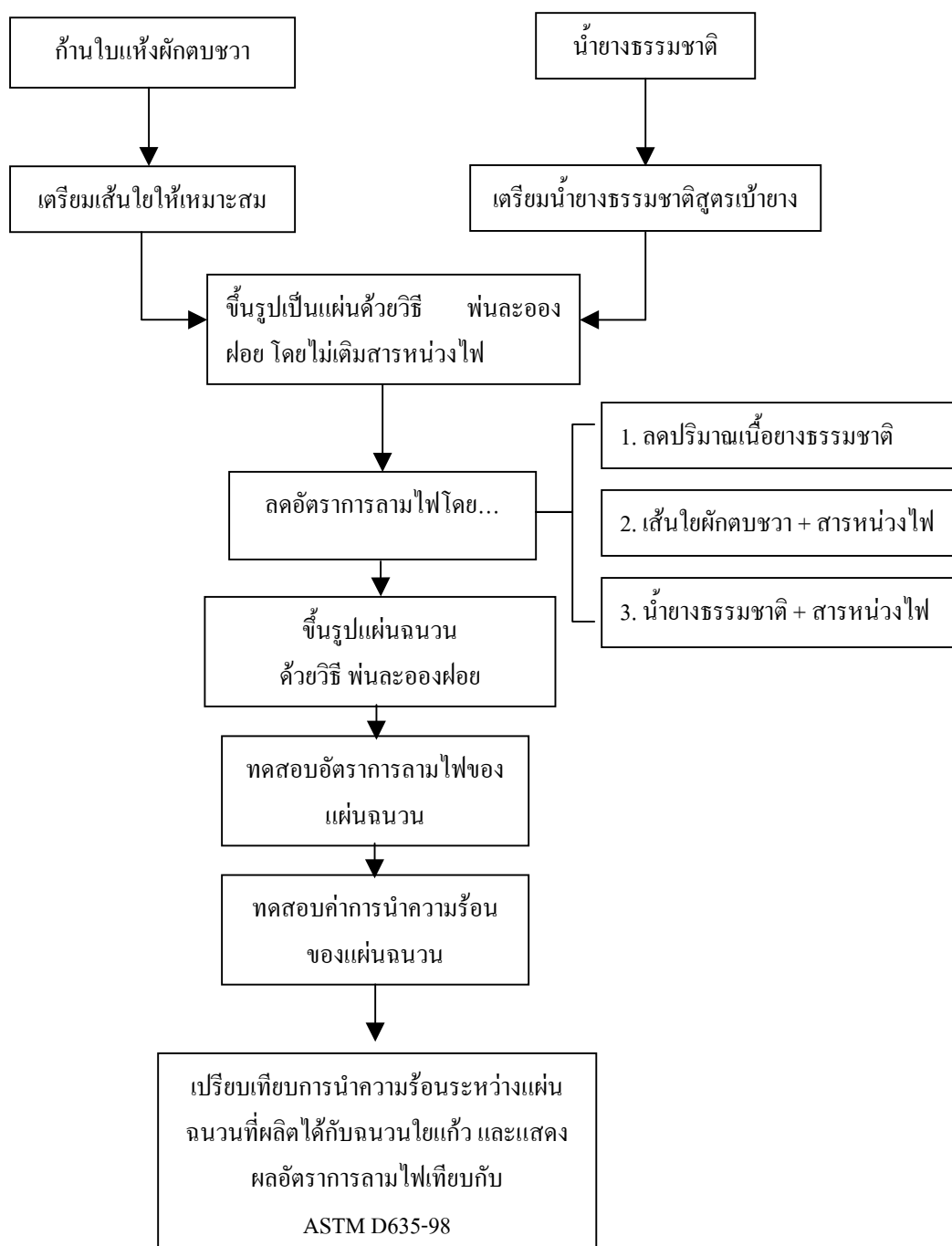
ทำการทดสอบการนำความร้อนของแผ่นฉนวนโดยยึดตามมาตรฐาน ASTM C177-97 ซึ่งใช้ Hot Plate และ Cold plate ทำจากทองแดง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว หนา 0.125 นิ้ว ให้อุณหภูมิของ Hot Plate เท่ากับ 37.7 องศาเซลเซียส และให้อุณหภูมิของ Cold plate เท่ากับ 10.0 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิภายในห้องทดสอบขณะทำการทดสอบเท่ากับ 28.5 องศาเซลเซียส ใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตรและหนา 1.5 เซนติเมตรตามลำดับ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบได้แสดงในภาพที่ 33



ภาพที่ 33 เครื่องทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity Tester)

11. แสดงกราฟอัตราการลามไฟและเปรียบเทียบการนำความร้อนระหว่างแผ่นฉนวนที่ผลิตกับฉนวนใยแก้ว

แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าอัตราการลามไฟ และเปรียบเทียบการนำความร้อนของแผ่นฉนวนที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติกับฉนวนใยแก้ว เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานนำไปสู่การพิจารณาถึงความเหมาะสม ในการผลิตเพื่อการพาณิชย์ต่อไป



ภาพที่ 34 สรุปขั้นตอนหลักของการวิจัย

ผลและวิจารณ์

การวิเคราะห์ผลการวิจัยนี้แบ่งเป็นส่วน ๆ ดังนี้คือ ส่วนที่หนึ่งการเตรียมวัตถุดิบโดยการหาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติสูตรเข้ายาง เพื่อให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนและการใช้งาน เช่น การต้านทานเชื้อรา การต้านทานการเสื่อมสภาพจากแสงแดด จากนั้นทำการลดอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนโดยลดปริมาณเนื้อยางธรรมชาติด้วยการเจือจางด้วยน้ำ ทำการลดอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนโดยปรับปรุงเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติด้วยการเติมสารหน่วงไฟ ทำการหาสถานะและอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฉนวนหลังเติมสารหน่วงไฟด้วยวิธี พ่นละอองฝอย ส่วนที่สองการผลิตโดยเริ่มจากการนำวัตถุดิบทั้งสองที่ผ่านการเติมสารหน่วงไฟที่เหมาะสม มาทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนและส่วนที่สามซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายทำการทดสอบหาค่าอัตราการลามไฟตามมาตรฐาน STM D635-98 โดยค่าอัตราการลามไฟยิ่งน้อยถือว่าการหน่วงไฟยิ่งดี และหาค่าการนำความร้อนของแผ่นฉนวนที่ผลิตได้เทียบกับฉนวนใยแก้วในท้องตลาด

1. ผลการศึกษาการหาสถานะในการเตรียมเส้นใยผักตบชวา โดยทำการปรับปรุงให้มีสมบัติที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นฉนวนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

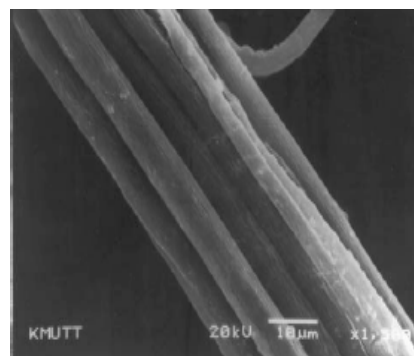
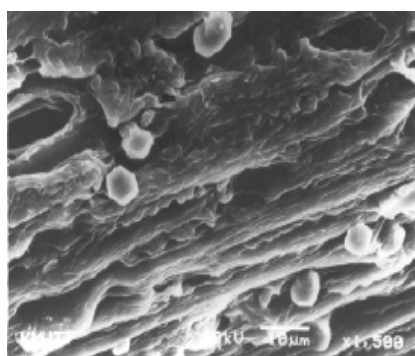
พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของเส้นใยผักตบชวา ที่ได้จากการเตรียมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้น ประกอบด้วย ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการปั่นกวน ทั้ง 3 ปัจจัยนี้ มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของเส้นใย ได้แก่ ความอ่อนนุ่ม และอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Aspect Ratio) ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติในการเป็นตัวประสานของแผ่นฉนวนความร้อนหน่วงไฟ

จากการวิจัยพบว่า เมื่อปั่นกวนเส้นใยผักตบชวากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ทุกความเข้มข้นเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เส้นใยที่ได้มีลักษณะสั้นแข็งกระด้างและเกาะตัวกันเป็นก้อน ไม่สามารถแยกเส้นใยออกเพื่อนำไปผลิตได้

เมื่อทดลองเปลี่ยนเฉพาะตัวปัจจัยอุณหภูมิโดยลดลงมาเป็น อุณหภูมิห้อง พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทุกเวลาที่ใช้ในการปั่นกวนเส้นใยที่ได้มีลักษณะใหญ่และแข็งแรงกระด้าง ซึ่งทำให้ความสามารถในการเกาะเกี่ยวกันของเส้นใยในแผ่นจนวนนั้นลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้เวลาในการปั่นกวนที่ 5 และ 10 นาที พบว่าเส้นใยที่ได้ยังมีลักษณะใหญ่และแข็งแรงกระด้าง ซึ่งทำให้ความสามารถในการเกาะเกี่ยวกันของเส้นใยในแผ่นจนวนนั้นลดลงเช่นกัน

เมื่อเพิ่มเวลาการปั่นกวนไปที่ 15 นาทีที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยที่ได้มีลักษณะเรียวยาวเล็กและอ่อนนุ่ม และมีอัตราส่วนของ Aspect Ratio เท่ากับ 35.28 ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยก่อนการปั่นกวนที่มีค่าเท่ากับ 12.13 ซึ่งการที่เส้นใยมี Aspect Ratio เพิ่มขึ้นนั้น แสดงว่าเส้นใยที่ได้มีลักษณะเรียวยาวเล็กยิ่งขึ้นซึ่งช่วยทำให้มีสมบัติการเกาะเกี่ยวดีขึ้น แต่จากการทดลองถ้าค่า Aspect ratio มากกว่านี้จะทำให้ลักษณะของเส้นใยเล็กและเป็นฝอยไม่เป็นเส้น ทำให้ไม่สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นจนวนได้

เมื่อพิจารณาพื้นฐานของเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการทดลอง ที่ปัจจัยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักอุณหภูมิในการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง และเวลาการปั่นกวนที่ 15 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าทำปฏิกิริยาละลายลิกนินออกจากผิวของเส้นใยผักตบชวา ทำให้พื้นผิวของเส้นใยผักตบชวา มีลักษณะเป็นร่องมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งช่วยทำให้มีสมบัติการเกาะเกี่ยวดีขึ้นดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 พื้นฐานของเส้นใยผักตบชวา (ก) ก่อนการเตรียมเส้นใย (ข) หลังการเตรียมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

ดังนั้นจึงเลือกใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง นาน 15 นาที จากนั้นนำเส้นใยไปล้างด้วยน้ำจนสะอาด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อเตรียมเส้นใยสำหรับขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนต่อไป

2. ผลการหาสถานะและอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฉนวนด้วยวิธี ฟันละอองฝอย ก่อนเติมสารหน่วงไฟ

การวิจัยขึ้นรูปแผ่นฉนวนโดยวิธี ฟันละอองฝอย นั้นวิธีการขึ้นรูปได้ถูกกล่าวไว้แล้วในหัวข้อ วิธีวิจัย ขั้นตอนที่ 4 โดยทดลองใช้ อัตราส่วนของเส้นใยผักตบชวาต่อน้ำยางธรรมชาติ 1 : 4, 1 : 3 และ 1 : 2 ดังแสดงในตารางที่ 14 พบว่าลักษณะทางกายภาพของแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ใช้อัตราส่วน 1 : 4 สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนกันความร้อนได้ เส้นใยผักตบชวาเกาะเกี่ยวกันได้ดี มีความยืดหยุ่น สามารถม้วนงอได้ จากนั้นลดอัตราส่วนของน้ำยางธรรมชาติลงมาที่ 1 : 3 พบว่ายังสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนกันความร้อนได้เช่นกัน และแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ได้มีน้ำหนักเบากว่าเมื่อเทียบกับแผ่นฉนวนกันความร้อนที่อัตราส่วน 1 : 4 ขณะที่อัตราส่วน 1 : 2 พบว่าเส้นใยผักตบชวาในแผ่นฉนวนกันความร้อนไม่สามารถยึดเกาะกันได้ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่ใช้เป็นตัวประสานนั้นน้อยเกินไป

ตารางที่ 14 ผลการขึ้นรูปแผ่นฉนวน (แบบไม่เติมสารหน่วงไฟ)

เส้นใยผักตบชวา : น้ำยางธรรมชาติ	การขึ้นรูป
1 : 4	ได้
1 : 3	ได้
1 : 2	ไม่ได้

เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติเป็นตัวติดไฟ และการวิจัยนี้เราพยายามลดปริมาณน้ำยางธรรมชาติ เพื่อลดอัตราการลามไฟ แต่ต้องสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราส่วนของเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติที่ 1 : 3 ในการขึ้นรูปแผ่นฉนวน

3. ผลอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนจากการลดปริมาณเนื้อยางธรรมชาติโดยการเจือจางด้วยน้ำ

คุณสมบัติของเนื้อยางแห้งจะติดไฟ ดังนั้นในการวิจัยเราจึงพยายามลดปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางโดยการเจือจางน้ำยางธรรมชาติด้วยน้ำ ก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปกับเส้นใยผักตบชวา

ตารางที่ 15 ความหนาแน่นของแผ่นฉนวนที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติผสมน้ำ

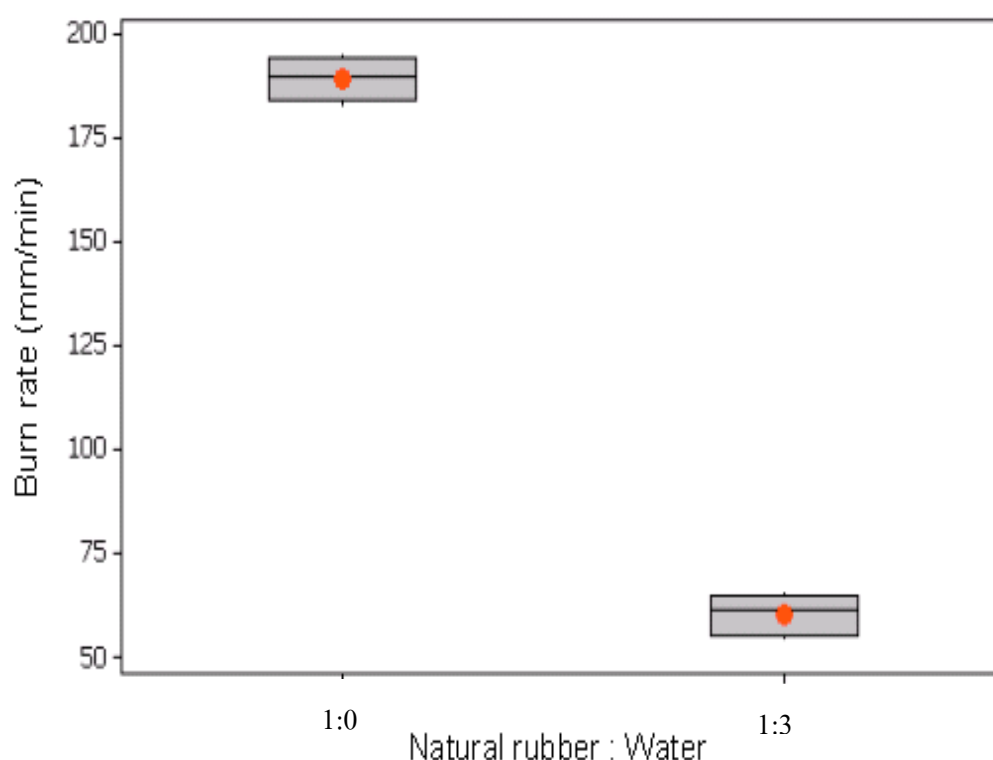
น้ำยางธรรมชาติ : น้ำ	ความหนาแน่น (kg/m^3)
1 : 0	161.67
2 : 1	154.88
1 : 1	134.45
1 : 2	105.67
1 : 3	98.66
1 : 4	96.36

เมื่อพิจารณาถึงความยืดหยุ่นของแผ่นฉนวนที่ขึ้นรูปได้ พบว่าแผ่นฉนวนที่มีอัตราส่วนของน้ำยางธรรมชาติต่อน้ำที่ 1:0 2:1 1:1 1:2 และ 1:3 มีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถม้วนงอได้ ขณะที่อัตราส่วน 1:4 และ 1:5 นั้น แผ่นฉนวนที่ได้มีความยืดหยุ่นที่น้อยมาก โดยเมื่อม้วนงอแผ่นฉนวนจะพบว่าแผ่นฉนวนเกิดการขาดออกจากกันดังแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 แสดงลักษณะของแผ่นฉนวนที่ได้จากการผสมน้ำยางด้วยน้ำ (โดยน้ำหนัก)

น้ำยางธรรมชาติ	น้ำ	ลักษณะแผ่นฉนวนที่ได้
1	0	มีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถม้วนงอได้
2	1	มีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถม้วนงอได้
1	1	มีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถม้วนงอได้
1	2	มีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถม้วนงอได้
1	3	มีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถม้วนงอได้
1	4	มีความยืดหยุ่นน้อยมาก
1	5	มีความยืดหยุ่นน้อยมาก

เมื่อทำการลดปริมาณเนื้อยางธรรมชาติในการทำแผ่นฉนวนเรียบรื้อแล้วนำไปทดสอบหาอัตราการลามไฟ โดยเปรียบเทียบกับแผ่นฉนวนที่ขึ้นรูปด้วยน้ำยางธรรมชาติที่ไม่ได้เจือจางด้วยน้ำ พบว่าอัตราการลามไฟมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเนื้อยางธรรมชาติในแผ่นฉนวนลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของยางธรรมชาติในการเผาไหม้นั้นลดลง ดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 36 อัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนปกติเทียบกับแผ่นฉนวนที่ลดปริมาณเนื้อยาง

สรุปอัตราส่วนผสมของน้ำยางธรรมชาติต่อน้ำที่เหมาะสม ในการขึ้นรูปแผ่นฉนวนคือ อัตราส่วนที่ประกอบด้วยปริมาณเนื้อยางแห้งน้อยๆแต่ต้องสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ นั่นคืออัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนักต่อไปนี้เราจะเรียกว่า “น้ำยางธรรมชาติเจือจาง” ซึ่งทำให้แผ่นฉนวนที่ได้มีลักษณะยืดหยุ่นดี ไม่ขาดออกจากกันเมื่อเกิดการม้วนงอและอัตราการลามไฟมีค่าต่ำสุดและเหมาะสมที่สุด แผ่นฉนวนที่ได้มีความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ 98.66 kg/m³

4. อัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนจากการปรับปรุงเส้นใยผักตบชวาด้วยสารละลายBorax

ผลการวิจัยการขึ้นรูปของเส้นใยผักตบชวาที่แช่ด้วยสารละลาย Borax ที่ความเข้มข้นต่างๆ กันแสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ผลการขึ้นรูปของเส้นใยผักตบชวาที่แช่ด้วยสารละลายBoraxที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นของสารละลาย Borax ที่ใช้แช่เส้นใยผักตบชวา	ผลการขึ้นรูป
5	ได้
10	ได้
15	แข็งแกร่ง นึกขาดได้ง่าย

พบว่าเส้นใยผักตบชวาที่แชในสารละลายBoraxที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีลักษณะที่กรอบและแข็งกระด้าง ทำให้เมื่อนำมาขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่ได้มีลักษณะแข็งแกร่งและ นึกขาดได้ง่าย ในขณะที่เส้นใยผักตบชวาที่แชในสารละลาย Borax ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่พบปัญหาดังกล่าว

ดังนั้นจึงทดสอบค่าอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนเฉพาะที่ขึ้นรูปจากเส้นใยผักตบชวา ที่แชในสารละลาย Borax ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับแผ่นฉนวน ที่ขึ้นรูปจากเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการแช่สารละลาย Borax พบว่าอัตราการลามไฟที่ได้มีค่า ลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายBoraxที่ใช้แช่เส้นใยผักตบชวาเพิ่มขึ้น

การวิเคราะห์ผลค่าอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนที่ได้จากการทดสอบสารละลาย Borax ที่ความเข้มข้น 0% 5% และ 10% โดยน้ำหนักที่ใช้แช่เส้นใยผักตบชวา ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลแบบ ANOVA จากโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab Release 13.20 ได้ผลตามตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ตาราง ANOVA แสดงความแปรปรวนของอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวน

	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P - Value
% Borax	2	126451.5	63225.8	1063.49	0.000
Error	45	2675.3	59.5		
Total	47	129126.8			

วิเคราะห์ผล ANOVA โดยดูค่า P-value เทียบกับค่า $\alpha (=0.05)$ ได้ค่า P-value = 0.000 น้อยกว่า α ดังนั้นเราจึงปฏิเสธ H_0 ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยของอัตราการลามไฟอย่างน้อย 1 คู่ (ของสารละลาย Borax ต่างกัน) ที่มีความแตกต่างกัน แต่ก็ยังไม่ทราบว่าอัตราการลามไฟคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน

ในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลอัตราการลามไฟแต่ละคู่ จะดำเนินการเปรียบเทียบด้วยวิธี “การเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparison Test)” ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 19 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวน

% Borax	Intervals for (Column Level Mean) – (Row Level Mean)	
	0	5
5	23.75 – 34.73	-
10	115.02 – 126.00	85.79 – 96.77

สรุปผลพบว่าเส้นใยผักตบชวาที่แช่ในสารละลาย Borax เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการกวนแช่ประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นนำเส้นใยผักตบชวาไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 6 ชั่วโมงซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า “เส้นใยผักตบชวาหน่วงไฟ” ส่งผลให้แผ่นฉนวนที่ขึ้นรูปได้มีอัตราการลามไฟต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับแผ่นฉนวนที่ขึ้นรูปจากเส้นใยผักตบชวาที่แช่ด้วยสารละลาย Borax เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเส้นใยผักตบชวาปกติ ตามลำดับ (อัตราการลามไฟสูงเมื่อ % Borax ต่ำ) ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยผักตบชวาที่แช่สารในสารละลาย Borax ที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีปริมาณ Borax เคลือบผิวเส้นใยมากกว่า เมื่อเกิดการเผาไหม้

จึงสลายตัวให้อิออนน้ำและก๊าซ B_2O_3 ที่สามารถปกคลุมเส้นใยผักตบชวาได้มากกว่า ทำให้ก๊าซออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาเผาไหม้ได้ยากกว่า

5. ผลการลดอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนโดยปรับปรุงน้ำยางธรรมชาติด้วยสารหน่วงไฟ

5.1 เติมด้วย Borax

ผลของการหาความเข้มข้นของ Borax ที่ผสมในน้ำยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทานอัตราการลามไฟ ทำได้โดยผสมสารแขวนลอยของ Borax ที่ความเข้มข้น 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในน้ำยางธรรมชาติจะได้ผลจากการวิเคราะห์ด้วย Program Minitab Release 13.20 ดังนี้

ตารางที่ 20 ANOVA แสดงความแปรปรวนของอัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติ

	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P - Value
% Borax	4	110.5	27.6	0.4	0.810
Error	75	5206.6	69.4		
Total	79	5371.6			

วิเคราะห์ผล ANOVA โดยดูค่า P-value เทียบกับค่า $\alpha (=0.05)$ ได้ค่า P-value = 0.810 มากกว่า α ดังนั้นเราจึงยอมรับ H_0 ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยของอัตราการลามไฟของแผ่นยางแต่ละคู่ (ของสารละลาย Borax ต่างกัน) มีค่าไม่ต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสม Borax ที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparison Test) ด้วยวิธีทดสอบแบบ Fisher's pairwise comparisons ที่มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ ดังข้อมูลในตารางที่ 21 พบว่า Borax ที่ผสมในยางธรรมชาตินั้นไม่มีผลต่ออัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติ แสดงว่าสารละลาย Borax ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในน้ำยางธรรมชาติเพื่อลดอัตราการลามไฟ

ตารางที่ 21 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของอัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมBorax

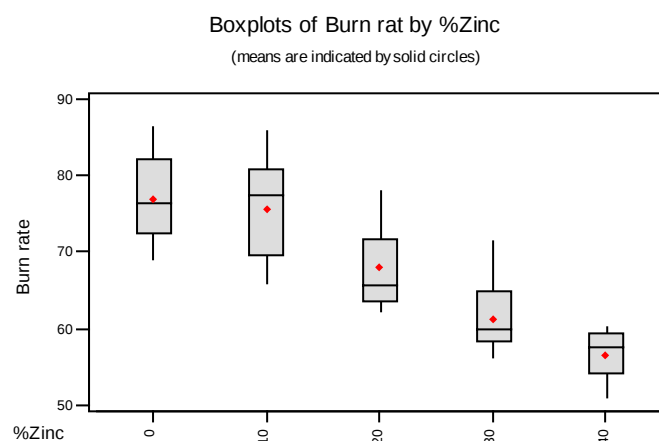
% Borax	Intervals for (Coulmn Level Mean) – (Row Level Mean)			
	0	10	20	30
10	-4.231			
	7.505	-	-	-
20	-3.594	-5.231		
	8.142	6.505	-	-
30	-2.761	-4.399	-5.035	
	8.975	7.337	6.701	-
40	-2.650	-4.288	-4.924	-5.757
	9.086	7.448	6.812	5.979

จะเห็นได้ว่าค่าในตารางที่ 21 จากช่วงความเชื่อมั่นที่กำหนด ค่าเฉลี่ยผลต่างของทุกคู่จะมีค่า 0 อยู่ทุกคู่ แสดงว่าโดยเฉลี่ยค่าของอัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมสารBorax แต่ละความเข้มข้นนั้นไม่ต่างกัน

สรุปทำให้เราตัดสินใจได้ว่าสารBorax ไม่สามารถลดอัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติได้ เราจึงไม่เลือกสารBoraxเป็นสารหน่วงไฟในน้ำยางธรรมชาติ

5.2 เติมด้วยZinc Borate

ผลของการหาความเข้มข้นของZinc Borateที่ผสมในน้ำยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทานอัตราการลามไฟ ทำได้โดยผสมสารแขวนลอยของZinc Borateที่ความเข้มข้น 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในน้ำยางธรรมชาติได้ผลการวิเคราะห์ด้วย Program Minitab Release 13.20 ดัง Boxplots แสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 37 อัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสม Zinc Borate เปอร์เซ็นต์ต่างๆ

และค่าความแปรปรวนของอัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสม Zinc Borate ดังแสดงในตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ANOVA แสดงความแปรปรวนของอัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสม Zinc Borate

	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P - Value
% Zinc Borate	4	4951.9	1238.0	50.64	0.000
Error	75	1833.4	24.4		
Total	79	6785.2			

ผล ANOVA ให้ค่า P-value(0.000) น้อยกว่า α (0.05) เราจึงปฏิเสธ H_0 หมายถึงค่าเฉลี่ยของอัตราการลามไฟอย่างน้อย 1 คู่ (ของสารละลาย Zinc Borate ต่างกัน) ที่มีความแตกต่างกัน แต่ก็ยังไม่ทราบว่าอัตราการลามไฟคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน เราจึงต้องวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลอัตราการลามไฟแต่ละคู่ ซึ่งดำเนินการเปรียบเทียบด้วยวิธี “การเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparison Test)” Fisher’s pairwise comparisons ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 23 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของอัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสม Zinc Borate

% Zinc Borate	Intervals for (Coulumn Level Mean) – (Row Level Mean)			
	0	10	20	30
10	-1.995			
	4.969	-	-	-
20	5.381	3.894		
	12.345	10.858	-	-
30	12.153	10.666	3.290	
	19.117	17.631	10.255	-
40	16.847	15.360	7.984	1.212
	23.811	22.324	14.948	8.176

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสม Zinc Borate ที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยทำการเปรียบเทียบด้วยวิธีเชิงซ้อนทดสอบแบบ Fisher's pairwise comparisons ที่มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 5 เปอร์เซนต์ ดังข้อมูลในตารางที่ 23 พบว่าความเข้มข้นของ Zinc Borate ที่ผสมในยางธรรมชาตินั้นมีผลต่ออัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติโดยที่อัตราการลามไฟที่แต่ละ % Zinc Borate ที่ 0% และ 10% ไม่ต่างกันเนื่องจากค่าตัวเลขในตารางวิเคราะห์แบบ Fisher's pairwise comparison นั้นมีค่าอยู่ระหว่างลบถึงบวก (รวมศูนย์ด้วย) แสดงว่ามีบางค่าอัตราการลามไฟของแผ่นยางเท่ากัน แต่ค่าอัตราการลามไฟของแผ่นยางที่ความเข้มข้น Zinc Borate 20% มากกว่าที่ 30% และมากกว่าที่ 40%

การที่ Zinc Borate ที่เข้มข้น 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถลดอัตราการลามไฟได้นั้นเนื่องจาก Zinc Borate อาจมีปริมาณไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาหน่วงไฟได้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Zinc Borate เป็น 20 30 และ 40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก พบว่า อัตราการลามไฟลดลงเนื่องจากมีปริมาณ Zinc Borate มากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาหน่วงไฟได้ โดย Zinc Borate เมื่อถูกเผาไหม้จะสลายตัวให้ก๊าซ B_2O_3 ซึ่งเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจึงปกคลุมที่ผิวของยางธรรมชาติ ทำให้ก๊าซออกซิเจนไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาเผาไหม้ได้และยางที่ผสม Zinc Borate เข้มข้น 40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก มีอัตราการลามไฟต่ำกว่ายางที่ผสม Zinc Borate เข้มข้น 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักเนื่องจากมีตะกอน Zinc Borate กระจายติดกับผิวของยางธรรมชาติมากกว่าจึงทำให้อัตราการลาม

ไฟลด์ลงแต่เมื่อทดลองใช้ Zinc Borate ที่ 50 % จะเกิดการตกตะกอนของน้ำยางธรรมชาติ เนื่องจาก Zinc Borate มีสารประกอบของซิงค์ (Zinc) ซึ่งซิงค์สามารถทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงพันธะ (Cross linked) กับสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติได้ดี เป็นผลให้น้ำยางธรรมชาติเกิดการคงรูปเร็วเกินไป ทำให้ไม่สามารถนำไปพ่นเพื่อการขึ้นรูปแผ่นฉนวนกันไฟได้ ส่วนสารละลาย Zinc Borate เข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ผสมลงในน้ำยางธรรมชาติ เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยเทใส่ถาด แล้วตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 3 วัน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที จะได้แผ่นยางที่มีอัตราการลามไฟที่ต่ำที่สุด

สรุปเราจึงเลือก Zinc Borate เข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักใช้ในการผสมลงในน้ำยางธรรมชาติเพื่อเตรียมสำหรับการขึ้นรูปแผ่นฉนวนต่อไป

6. ผลการหาสถานะและอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฉนวนด้วยวิธี พ่นละอองฝอย หลังเติมสารหน่วงไฟ

การวิจัยขึ้นรูปแผ่นฉนวนโดยวิธีพ่นละอองฝอย นั้นวิธีการเหมือนในขั้นตอนที่ 4 ของวิธีวิจัย ต่างกันตรงที่ในขั้นตอนนี้จะใช้ อัตราส่วนของ “เส้นใยผักตบชวาหน่วงไฟ” ที่ผ่านการเติมสารหน่วงไฟ ตามขั้นตอนที่ 6 ต่อน้ำยางธรรมชาติเจือจางตามขั้นตอนที่ 5 ที่รวมกับ Zinc Borate 40% โดยน้ำหนัก ตามขั้นตอนที่ 7 ซึ่งต่อไปเราจะเรียกว่า “น้ำยางธรรมชาติหน่วงไฟ” เท่ากับ 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก ผลดังแสดงในตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ผลการขึ้นรูปแผ่นฉนวนของใยผักตบชวาหน่วงไฟต่อน้ำยางธรรมชาติหน่วงไฟ

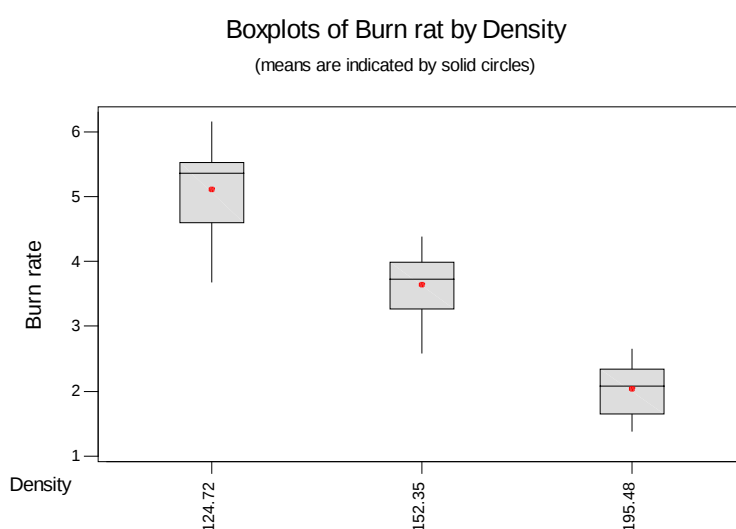
เส้นใยผักตบชวาหน่วงไฟ : น้ำยางธรรมชาติหน่วงไฟ	การขึ้นรูปของแผ่นฉนวน
1 : 4	ได้
1 : 3	ได้
1 : 2	ไม่ได้

พบว่าลักษณะทางกายภาพของแผ่นฉนวนที่ใช้อัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนักสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนได้ เส้นใยผักตบชวาเกาะเกี่ยวกันได้ดี มีความยืดหยุ่นสามารถม้วนงอได้เหมาะสมที่สุด และเนื่องจากน้ำยางธรรมชาติเป็นตัวติดไฟ การวิจัยนี้จึงพยายามลดปริมาณน้ำยางธรรมชาติเพื่อลดอัตราการลามไฟแต่ต้องสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ด้วย และขณะทำการขึ้นรูปแผ่นฉนวนจะใช้แผ่นไม้กั้นครีตาอากาศแต่ละชั้นเพื่อลดโพรงอากาศที่เป็นปัจจัยการลามไฟ

สรุปเราจึงเลือกใช้อัตราส่วนของเส้นใยผักตบชวาหน่วงไฟ และน้ำยางธรรมชาติหน่วงไฟที่ 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนักในการขึ้นรูปแผ่นฉนวน โดยผลิตแผ่นฉนวนที่มีความหนาแน่นที่ 124.72 kg/m³ 152.35 kg/m³ และ 195.48 kg/m³ อย่างละ 16 ชิ้นเพื่อทดสอบหาอัตราการลามไฟต่อไป

7. ผลการทดสอบคุณสมบัติการหน่วงไฟ (ดูค่าอัตราการลามไฟ) โดยใช้ชิ้นงานทดสอบสองชนิด คือ ยางแผ่นที่ผสม ชิงค์บอเรท และ แผ่นฉนวนที่ผลิตได้

การทดสอบหาอัตราการลามไฟของยางแผ่นที่ผสม ชิงค์บอเรทและแผ่นฉนวนที่ขึ้นรูปจากเส้นใยผักตบชวาหน่วงไฟกับน้ำยางธรรมชาติหน่วงไฟตามขั้นตอนที่ 8 ของวิธีวิจัยและทำการขึ้นรูปแผ่นฉนวน โดยปรับลดปริมาณช่องอากาศพบว่าอัตราการลามไฟมีค่าลดลงเมื่อปริมาณช่องอากาศภายในแผ่นฉนวนลดลง เนื่องจากปริมาณอากาศภายในฉนวนที่เข้าไปการเผาไหม้นั้นลดลง เป็นผลให้อัตราการลามไฟของฉนวนลดลงดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 อัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนที่มีความหนาแน่นต่างกัน

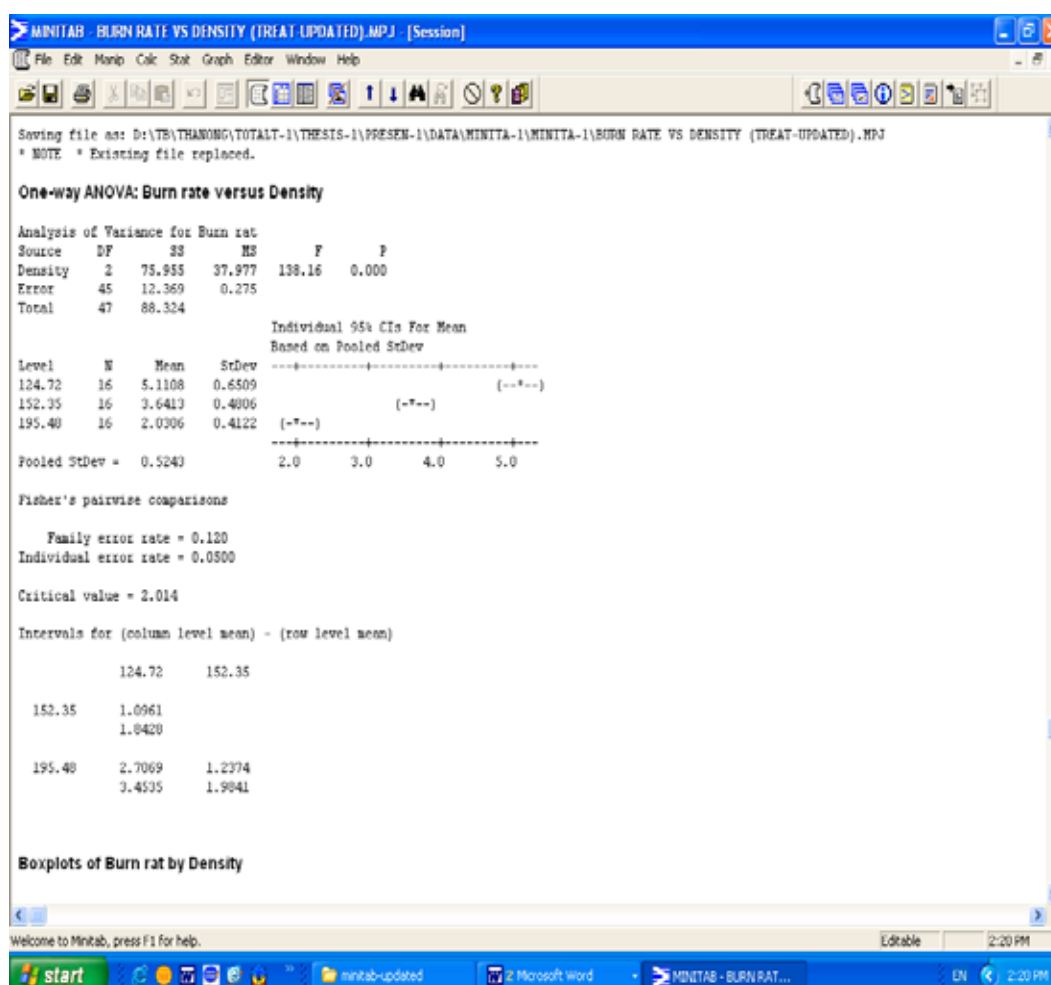
ในการทำการทดลองนี้เบื้องต้นเรายังไม่ทราบว่าคุณค่าความหนาแน่นของแผ่นฉนวนที่ต่างกัน จะให้ค่า Burn rate ที่แตกต่างกันหรือไม่ ดังนั้นเราจึงต้องตั้งสมมติฐาน (Hypothesis) ว่า

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

เมื่อ μ_1 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate ของแผ่นฉนวนที่มีความหนาแน่น 124.72 kg/m³
 μ_2 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate ของแผ่นฉนวนที่มีความหนาแน่น 152.35 kg/m³
 μ_3 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate ของแผ่นฉนวนที่มีความหนาแน่น 195.48 kg/m³

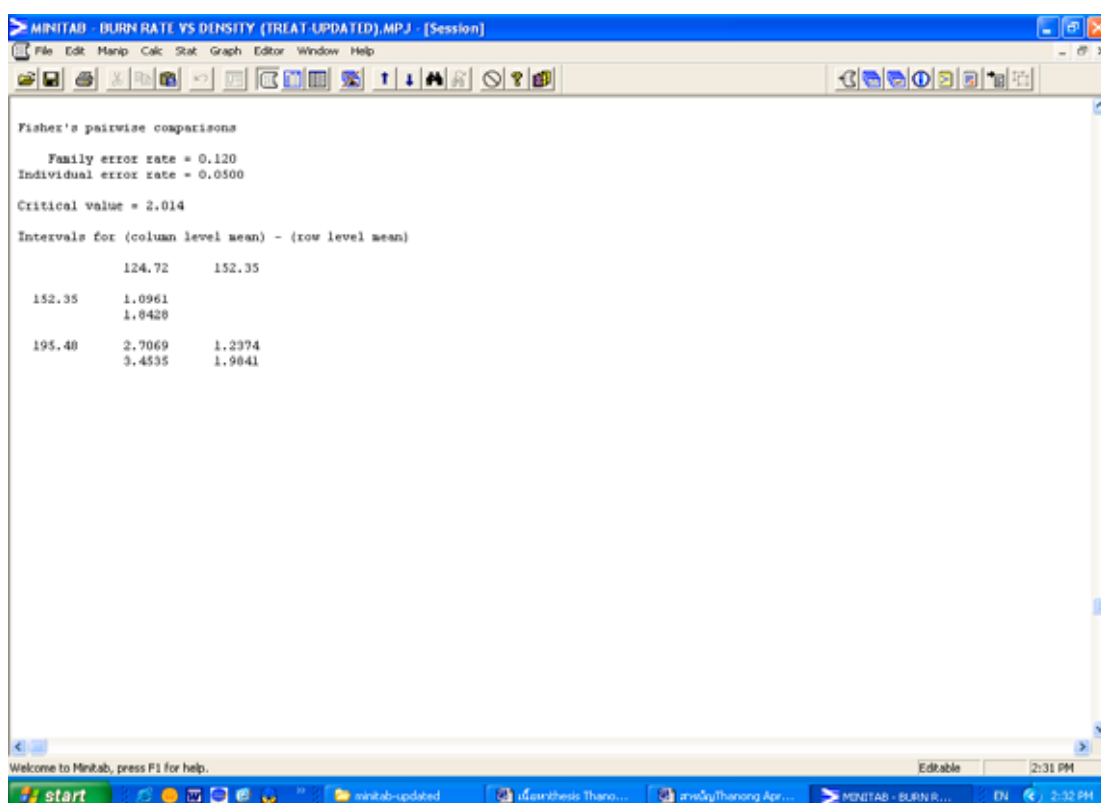
ผลการทดสอบ ANOVA เป็นดังนี้



ภาพที่ 39 ผล ANOVA ของอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนที่มีความหนาแน่นต่างๆกัน

ผลการทดสอบสมมติฐานโดยใช้วิธี One-way ANOVAพบว่าค่า P-value (0.000) น้อยกว่า $\alpha (=0.05)$ ซึ่งปฏิเสธ H_0 หมายถึงปริมาณช่องอากาศในแผ่นฉนวนมีผลต่ออัตราการลามไฟของแผ่นฉนวน แผ่นฉนวนที่มีปริมาณช่องอากาศที่แตกต่างกันนั้นจะมีอัตราการลามไฟที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

8. ผลการทดสอบแบบ Multiple Comparison Test (Fisher's Pairwise)



ภาพที่ 40 ผลการทดสอบแบบ Multiple Comparison Test ของแผ่นฉนวนที่ความหนาแน่นต่างๆ กัน

ตารางที่ 25 เปรียบเทียบอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ แบบ Multiple Comparison Test

Density	Intervals for (Coulun Leve Mean) – (Row Level Mean)	
	124.72	152.35
152.35	1.0961 – 1.8428	-
195.48	2.7069 – 3.4535	1.2374 – 1.9841

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparison Test) ด้วยวิธีทดสอบแบบ Fisher's Pairwise comparisons ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความหนาแน่นของแผ่นฉนวนเพิ่มขึ้น (ปริมาณช่องอากาศของแผ่นฉนวนลดลง) จะส่งผลให้อัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนลดลง เนื่องจากช่องว่างภายในของแผ่นฉนวนที่ลดลง จึงทำให้ก๊าซออกซิเจนในอากาศภายในแผ่นฉนวนที่เข้าทำปฏิกิริยาเผาไหม้ลดลงเป็นผลให้อัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนลดลงด้วย

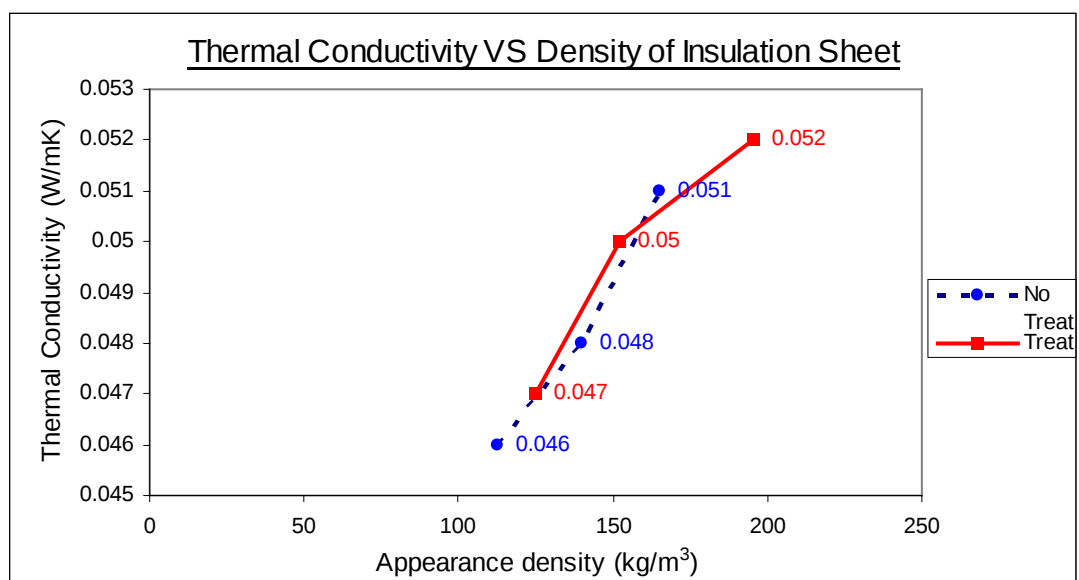
สรุปผลพบว่าแผ่นฉนวนที่มีความหนาแน่นเฉลี่ย 195.48 kg/m³ มีอัตราการลามไฟน้อยที่สุด

9. การหาค่าการนำความร้อน(Thermal Conductivity) ของแผ่นฉนวนที่ผลิตได้

ผลทำการทดสอบการนำความร้อนของแผ่นฉนวนทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C177-97 โดยใช้ Hot plate และ Cold plate ทำจากทองแดง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว หนา 0.125 นิ้ว ให้อุณหภูมิของ Hot plate เท่ากับ 37.7 องศาเซลเซียส และให้อุณหภูมิของ Cold plate เท่ากับ 10.0 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิภายในห้องขณะทำการทดสอบเท่ากับ 28.5 C° ชิ้นงานทดสอบมีขนาดกว้าง 20 cm ยาว 20 cm และหนา 1.5 cm ตามลำดับผลการทดสอบตามตารางที่ 26 และ ภาพที่ 40

ตารางที่ 26 แสดงผลค่าการนำความร้อนของแผ่นฉนวนแบบไม่เติมและเติมสารหน่วงไฟกับ
แผ่นฉนวนใยแก้ว

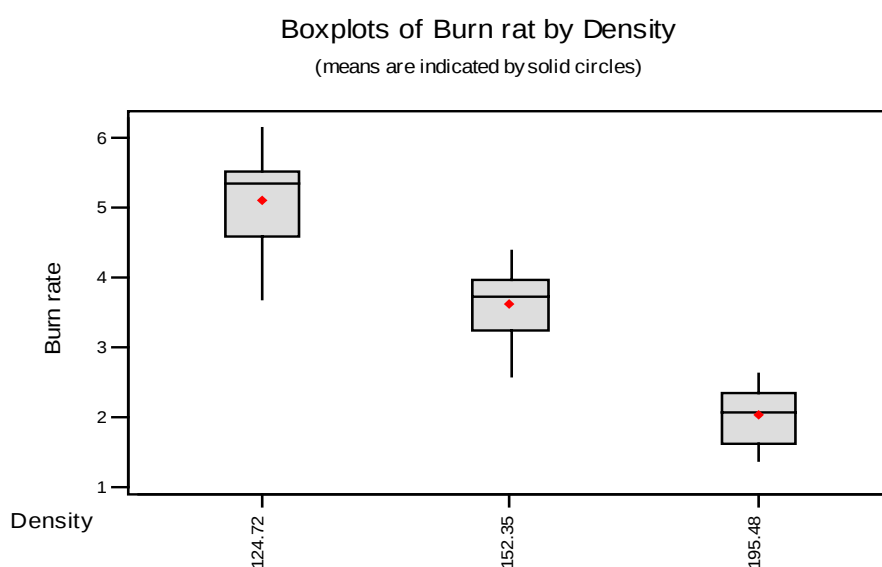
	Appearance Density (kg/m ³)	Thermal Conductivity(W/mK)
แผ่นฉนวนแบบไม่เติม	112.61	0.046
สารหน่วงไฟ(No Treat)	139.74	0.048
	165.45	0.051
แผ่นฉนวนแบบเติม	124.72	0.047
สารหน่วงไฟ(Treat)	152.35	0.050
	195.48	0.052
แผ่นฉนวนใยแก้ว	-	0.03-0.04



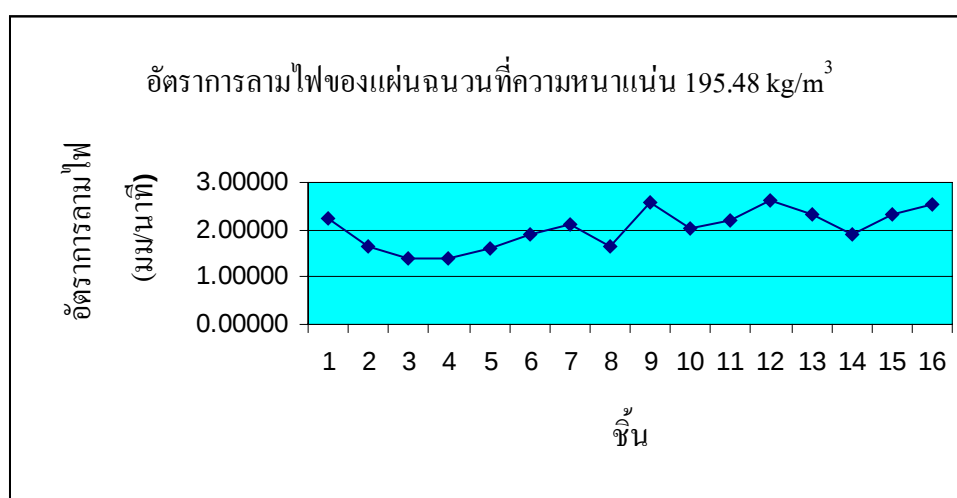
ภาพที่ 41 กราฟผลค่าการนำความร้อนของแผ่นฉนวนแบบไม่เติมและเติมสารหน่วงไฟ

จากผลการทดลองพบว่าทั้งแผ่นฉนวนที่ไม่ผสมและผสมสารหน่วงไฟจะมีค่าการนำความร้อนสูงขึ้นเมื่อความหนาแน่นของแผ่นฉนวนสูงขึ้น โดยความหนาแน่นที่เหมาะสมจากการทดลองคือ 195.48 kg/m^3 และจากชิ้นงานทดสอบ 16 ชิ้นได้ค่าการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.052 W/mK

10. กราฟแสดงอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนที่ผลิตได้ที่ค่าความหนาแน่นต่างๆ



ภาพที่ 42 กราฟแสดงอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนที่ผลิตได้ที่ค่าความหนาแน่นต่างๆ



ภาพที่ 43 กราฟแสดงอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนที่ผลิตได้ที่ค่าความหนาแน่น 195.48 kg/m^3

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนที่ผลิตได้มีแนวโน้มลดลง เมื่อความหนาแน่นของแผ่นฉนวนเพิ่มขึ้น(ปริมาณช่องอากาศภายในฉนวนลดลง) ดังแสดงในภาพที่ 45 การลดลงของอัตราการลามไฟที่ความหนาแน่นแผ่นฉนวนเพิ่มขึ้นนั้นลดลงมากอย่างเห็นได้ชัดได้อัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนอยู่ที่ช่วงระหว่าง 1 ถึง 3 มม ต่อ นาที ดังนั้นการลดปริมาณของช่องอากาศจึงมีผลน้อยมากต่อการเพิ่มค่าการนำความร้อนของแผ่นฉนวนเมื่อเทียบกับอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนซึ่งมีค่าลดลงมากกว่า

เมื่อพิจารณาการนำความร้อนของแผ่นฉนวนที่ผลิตจากสารหน่วงไฟ และไม่ใช้สารหน่วงไฟ ที่ความหนาแน่นแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 44 พบว่าการนำความร้อนของแผ่นฉนวนที่เติมสารหน่วงไฟให้ค่าการนำความร้อนสูงกว่าแผ่นฉนวนที่ไม่เติมสารหน่วงไฟ และค่าการนำความร้อนทั้งสองกรณีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความหนาแน่นของแผ่นฉนวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณช่องอากาศที่เป็นตัวกั้นความร้อนลดลงจึงทำให้ความร้อนสามารถผ่านฉนวนกันความร้อนได้ดียิ่งขึ้น แต่เนื่องจากสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีของเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติจึงทำให้การนำความร้อนของแผ่นฉนวนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยและผลการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการทางสถิติ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparison Test) สามารถสรุปได้ว่าแผ่นฉนวนความร้อนหน้าต่างไฟที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาตินั้น ให้ค่าอัตราการลามไฟอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM D635-98 และค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับแผ่นฉนวนใยแก้ว โดยการวิจัยนี้ได้ทดลองตามเงื่อนไขที่สรุปได้ดังนี้

1. การเตรียมเส้นใยผักตบชวาเบื้องต้นต้องปั่นกวนเส้นใยผักตบชวาเข้ากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที ล้างด้วยน้ำสะอาด อบที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียสประมาณ 6 ชั่วโมงเพื่อกำจัดสารที่เคลือบเส้นใยออกแล้วจะได้เส้นใยที่เหมาะสม เพื่อนำไปทำปฏิกิริยากับสารหน่วงไฟในขั้นตอนการผลิตต่อไป
2. การปรับเส้นใยผักตบชวาให้มีอัตราการลามไฟต่ำสุดทำโดยนำเส้นใยผักตบชวากวนแช่ในสารละลายBorax เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนานประมาณ 30 นาที แล้วอบที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียสประมาณ 6 ชั่วโมง
3. การปรับน้ำยางธรรมชาติให้มีอัตราการลามไฟต่ำสุดทำโดยนำน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมีสูตรเบ้าตามมาตรฐานศูนย์วิจัยยางเพื่อให้ได้น้ำยางธรรมชาติสูตรเบ้า

ส่วนประกอบของสารเคมีในน้ำยางธรรมชาติสูตรเบ้ามีดังนี้

1) โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์	3	กรัม
2) โปแตสเซียมลอเรท	1	กรัม
3) ซัลเฟอร์	4	กรัม
4) ซิงค์ไดเอทิลไดทิลโอคาร์บอนเนท	2	กรัม
5) วิงสเตย์แอล	2	กรัม
6) ซิงค์ออกไซด์	1.5	กรัม
7) น้ำยางธรรมชาติ	167	กรัม

แล้วเจือจางน้ำยางธรรมชาติสูตรเบ้ายางที่ได้ด้วยน้ำ ด้วยอัตราส่วนผสมของน้ำยางธรรมชาติต่อน้ำที่ 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก ผสมสารหน่วงไฟเชิงคัลบอเรทเข้มข้น 40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เพื่อให้ได้น้ำยางหน่วงไฟสำหรับขึ้นรูปแผ่นฉนวนหน่วงไฟ

4. อัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยผักตบชวาที่ผสมสารหน่วงไฟแล้วกับน้ำยางธรรมชาติที่ผสมสารหน่วงไฟแล้ว ที่เหมาะสมที่ใช้ในการผลิตแผ่นฉนวนความร้อนหน่วงไฟที่มีอัตราการลามไฟต่ำที่สุด คือ 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนักและได้ความหนาแน่นที่ 195.48 kg/m^3

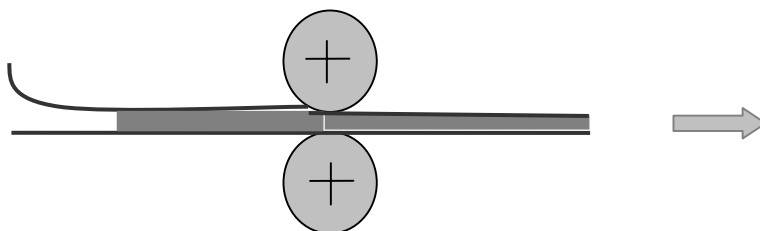
5. คุณสมบัติการหน่วงไฟ (ดูที่อัตราการลามไฟ) จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 635-98 จำนวนชิ้นทดสอบ 16 ชิ้นที่ความหนาแน่น 195.48 kg/m^3 มีอัตราการลามไฟโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.03058 mm/min และ ปรากฏว่าระยะลุกลามไฟของชิ้นงานทดสอบนั้นน้อยกว่า 25 มิลลิเมตร จึงสรุปได้ว่าแผ่นฉนวนมีคุณสมบัติหน่วงไฟ ส่วนค่าการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.052 W/mK เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฉนวนใยแก้วพบค่าการนำความร้อนมากกว่าฉนวนใยแก้ว 0.012 W/mK

6. จะได้แผ่นฉนวนความร้อนหน่วงไฟที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร ความหนาแน่นประมาณ 195.48 kg/m^3 สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตฉนวนกันความร้อนบนเพดานหรือสำหรับผลิตที่นอนที่มีคุณสมบัติหน่วงไฟ แต่ต้องการการพัฒนาในขั้นสูงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเชิงกลตามต้องการ

ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับการพัฒนาในขั้นสูงขึ้นเราอาจนำเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย Borax นำไปปั่นให้อยู่ในลักษณะที่มีความละเอียดมากกว่าที่ทำในการวิจัยนี้แล้วนำไปปั่นรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับสารหน่วงไฟแล้ว เพื่อการนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนในทีเดียวก่อนการขึ้นรูปแบบฟองลอยเป็นชั้น ๆ อย่างที่ทำในการวิจัยนี้ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือลดโครงการอากาศที่เป็นปัจจัยเพิ่มอัตราการลามไฟ

2. หรืออาจนำเอาผลผลิตจากการปั่น(เส้นใยผักตบชวาหน่วงไฟ กับ น้ำยางธรรมชาติหน่วงไฟ) ในข้อเสนอนี้ข้อ 1. ไปเข้ากระบวนการผลิตแบบลามิเนต (laminated) ผ่านลูกรีด (Roller) ด้วยแผ่นพลาสติกทั้งกระดาษหรือแผ่นยางประกบบนและล่าง ซึ่งช่วยทำให้เป็นแผ่นและง่ายต่อการม้วนหรือขึ้นรูปเมื่อใช้งาน



ภาพที่ 44 กระบวนการผลิตแบบลามิเนต

3. การเผาไหม้ของชิ้นงาน เนื่องจากโดยปกติสารไฮโดรคาร์บอนเมื่อเผาไหม้แล้วจะให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นพิษต่อมนุษย์อยู่แล้ว แต่จากการวิจัยนี้ในตัวชิ้นงานทดสอบจะมีสารสองชนิดเพิ่มเข้ามาคือ Borax และ Zinc Borate ผู้วิจัยยังไม่ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมว่าเป็นอันตรายต่อมนุษย์หรือไม่ มากน้อยเพียงใด แต่จากการทดสอบอัตราการลามไฟพบว่าตัวอย่างชิ้นงานทดสอบนั้นมีอัตราการลามไฟที่ต่ำ ตัวชิ้นงานทดสอบสามารถหน่วงไฟทำให้ไฟดับลงได้ภายในเวลาไม่ถึง 2 นาที ในเบื้องต้นผู้วิจัยมีความเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้(อัตราการลามไฟต่ำ) นั้นมีประโยชน์มากกว่าผลเสียที่เกิดจากก๊าซพิษที่ได้จากการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามถ้าท่านใดสนใจที่จะศึกษาประเด็นก๊าซพิษที่เกิดขึ้นก็ถือว่าเป็นสิ่งที่น่าสนใจมาก

4. งานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้ Zinc Borate ที่ความเข้มข้น 40 % โดยน้ำหนักเพื่ออัตราการลามไฟที่ต่ำสุดของแผ่นฉนวน แต่เนื่องจากราคาต้นทุน Zinc Borate ค่อนข้างสูง ดังนั้น Zinc Borate ที่ความเข้มข้น 30 % อาจเป็นทางเลือกถ้าต้องการผลิตโดยพิจารณาลดราคาต้นทุนแต่ต้องบรรลุวัตถุประสงค์อัตราการลามไฟที่ต้องการด้วยเช่นกัน

5. เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติและเส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติเป็นสารอินทรีย์ที่มีอายุการใช้งาน ดังนั้นการศึกษาอายุของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงว่าวิจัยต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ฝ่ายจัดสรรน้ำ กรมชลประทาน. 2548. **ชีววิทยาของผักตบชวา**. Available Source:

<http://www.irrigation.rid.go.th/rid15/ppn/om/Water%20Hyacinth.htm>, 14 Mar 1999.

มัลลิกา บุญนาค. 2544. **สถิติเพื่อการตัดสินใจ**. ภาควิชาสถิติ คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2545. **เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรเทคโนโลยียางแห้ง เรื่อง กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง**. ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง, กรมวิชาการ เกษตร.

วิภา เสวตกนิษฐ์. 2545. **เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรเทคโนโลยียางแห้ง เรื่องสารเคมี สำหรับยาง**. ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง, กรมวิชาการ เกษตร.

วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2543. **วิทยาศาสตร์เส้นใย (Fiber Science)**. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศกุนธิ สมบูรณ์วิทย์, รุ่งอรุณ ประเสริฐศักดิ์. 2545. **การผลิตจนวนความร้อนจากเส้นใยแฟกและ น้ำยางธรรมชาติ**. ปรินูญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุพล ธนุรักษ์. 2533. **เอกสารวิชาการเรื่อง น้ำยางสดและการผลิตยางดิบ**. กลุ่มการยางพารา กอง ส่งเสริมพืชพันธุ์, กรมส่งเสริมการเกษตร.

สุภัทร สันติภิรมย์กุล. 2542. **เอกสารประกอบการบรรยาย โครงการอบรม “ผู้บริหารความปลอดภัยด้านอภัย”**. บริษัท ฟิวชั่น คอนซัลแตนท์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี. 2543. การผลิตยางธรรมชาติ (**Natural Rubber Production**). ภาควิชาเทคโนโลยีการยางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี.

Bruner and John. 2003. **Fire in the Operating Room**. American Society of Anesthesiologists. USA. Available Source: <http://www.csmc.edu/images/371590>, 23 May 2004.

Giúdice, C. A. and J.C. Benítez. 1996. Available Source: <http://www.chemicaland21.com/arokorhi/industrialchem/inorganic/ZINC%20BORATE.htm>

Horrocks, A.R. and D. Price. 2001. **Fire retardant materials**. Woodhead Publishing Limited Cambridge, England.

Jürgen, H. Troitzsch. 1998. **Overview of Flame Retardants Fire and Fire Safety**. Markets and Applications, Mode of Action and Main Families, Published in *Chimica Oggi / Chemistry Today*, Volume 16, January / February 1998. Role in Fire Gases and Residues, Fire & Environment Protection Service Rheinstrasse 21 D-65185 Wiesbaden, Germany.

Pandey, S.N. and R.M. Gurjar. 2000. Available Source: <http://www.indianfibresociety.com/ach.html#w>

Susan, L.L. and H.C. Tran. 1998. Available Source: http://www.albemarle.com/saytexfr_elastomr.htm

U.S. Borax Inc. May. 2000. **Material Safety Data Sheet of Borax Decahydrate**. 26877 Tourney Road Valencia, CA 91355-1847.

ภาคผนวก

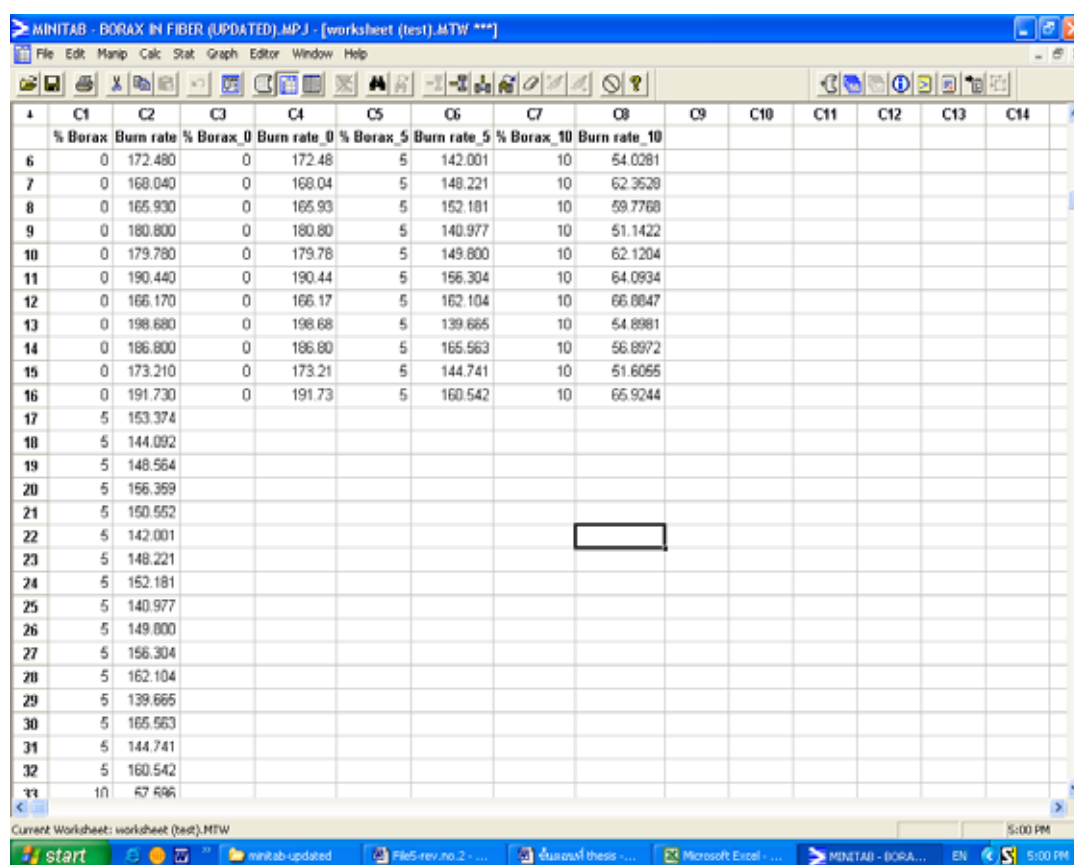
ภาคผนวก ก

การประเมินผลอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนจากการปรับปรุงเส้นใยผักตบชวา
ด้วยสารละลาย Borax โดยการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ ANOVA
จากโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab Release 13.20

การประเมินผลอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนจากการปรับปรุงเส้นใยผักตบชวาด้วยสารละลาย Borax โดยการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ ANOVA จากโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab Release 13.20

การทดสอบค่าอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนเฉพาะที่ขึ้นรูปจากเส้นใยผักตบชวาที่แช่ในสารละลาย Borax ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับแผ่นฉนวนที่ขึ้นรูปจากเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการแช่สารละลาย Borax ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ ANOVA จากโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab Release 13.20 มีขั้นตอนดังนี้

1. Key ข้อมูล ความเข้มข้นบอแรกซ์ (% Borax) และอัตราการลามไฟ (Burn rate) ลงใน Worksheet ของ Program Minitab



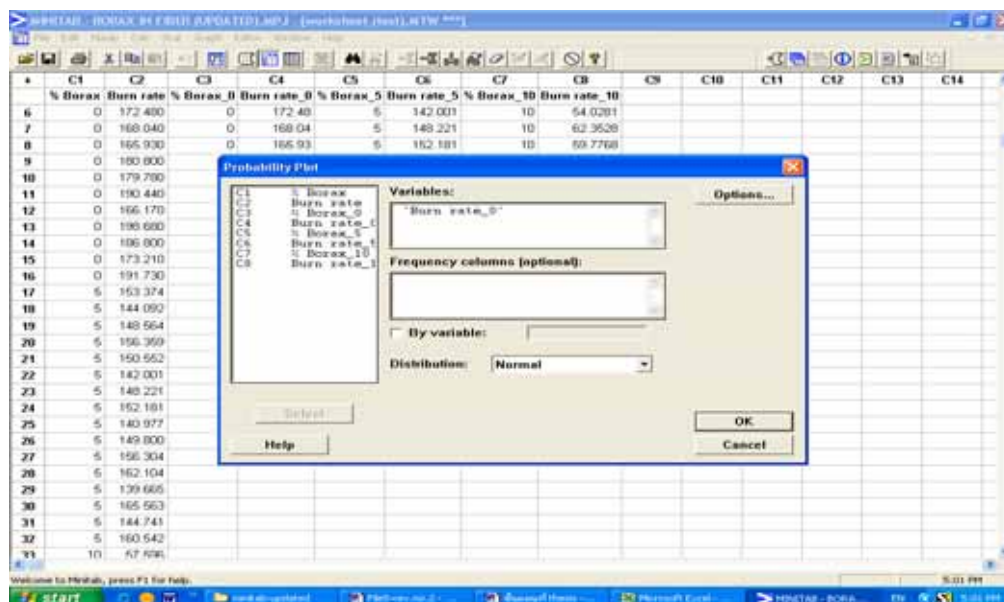
The screenshot shows a Minitab worksheet titled 'MINITAB - BORAX IN FIBER (UPDATED).MPJ - [worksheet (test).MTW ***]'. The worksheet contains data for two factors: % Borax and Burn rate. The data is organized into columns C1 through C14. The first two columns (C1, C2) represent the % Borax concentration (0, 5, 10) and the Burn rate. The subsequent columns (C3, C4) represent the % Borax concentration (0, 5, 10) and the Burn rate. The data is as follows:

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
	% Borax	Burn rate	% Borax_0	Burn rate_0	% Borax_5	Burn rate_5	% Borax_10	Burn rate_10						
6	0	172.480	0	172.48	5	142.001	10	54.0281						
7	0	168.040	0	168.04	5	148.221	10	62.3528						
8	0	165.930	0	165.93	5	152.181	10	59.7768						
9	0	180.800	0	180.80	5	140.977	10	51.1422						
10	0	179.780	0	179.78	5	149.800	10	62.1204						
11	0	190.440	0	190.44	5	156.304	10	64.0934						
12	0	166.170	0	166.17	5	162.104	10	66.8847						
13	0	198.680	0	198.68	5	139.665	10	54.8981						
14	0	186.800	0	186.80	5	165.563	10	56.8972						
15	0	173.210	0	173.21	5	144.741	10	51.6055						
16	0	191.730	0	191.73	5	160.542	10	65.9244						
17	5	153.374												
18	5	144.092												
19	5	148.564												
20	5	156.359												
21	5	150.552												
22	5	142.001												
23	5	148.221												
24	5	152.181												
25	5	140.977												
26	5	149.800												
27	5	156.304												
28	5	162.104												
29	5	139.665												
30	5	165.563												
31	5	144.741												
32	5	160.542												
33	10	67.636												

ภาพผนวกที่ ก1 การ Key ข้อมูลเปอร์เซ็นต์บอแรกซ์และอัตราการลามไฟใน Minitab Worksheet

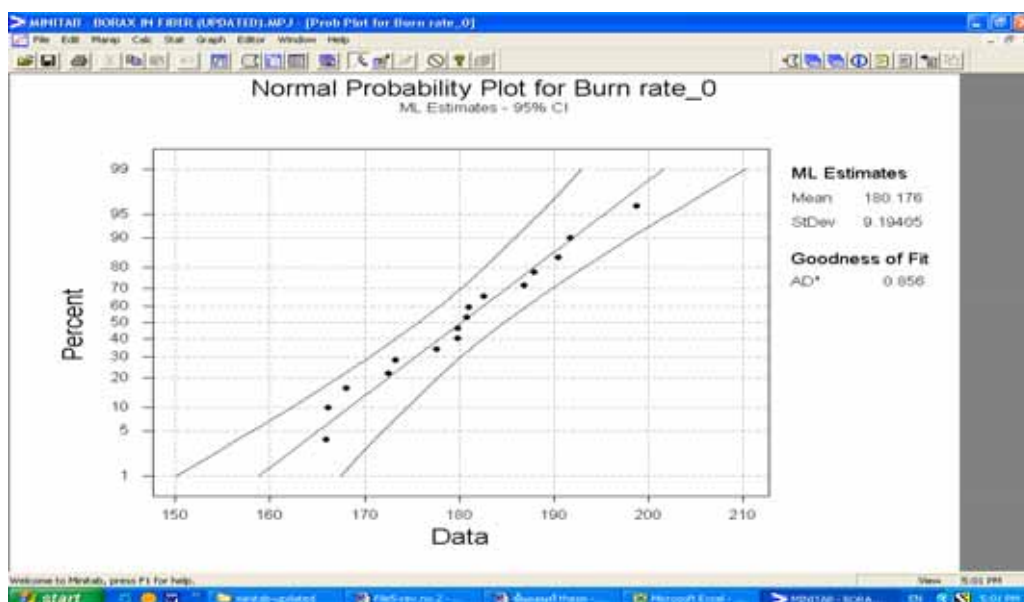
2. เลือกเมนู Graph/Probability Plot...

For Burn rate at Borax 0%



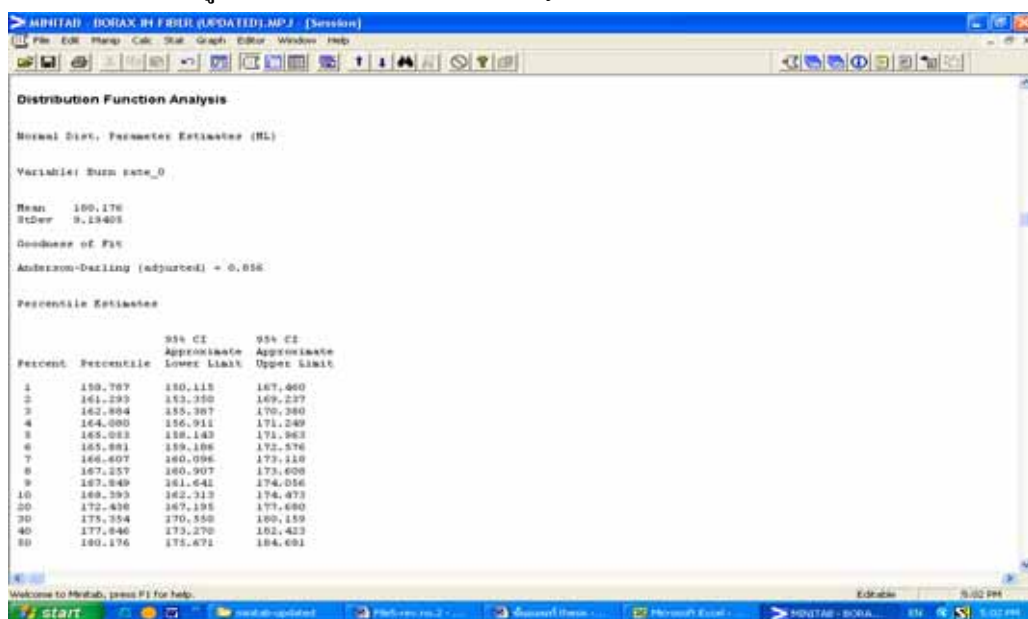
ภาพผนวกที่ ก2 การเลือกเมนู Graph/Probability Plot...ของ % BoraxและBurnrate

3. จะได้กราฟดังภาพด้านล่าง



ภาพผนวกที่ ก3 แสดงกราฟ Normal Probability Plot for Burn rate at Borax 0 %

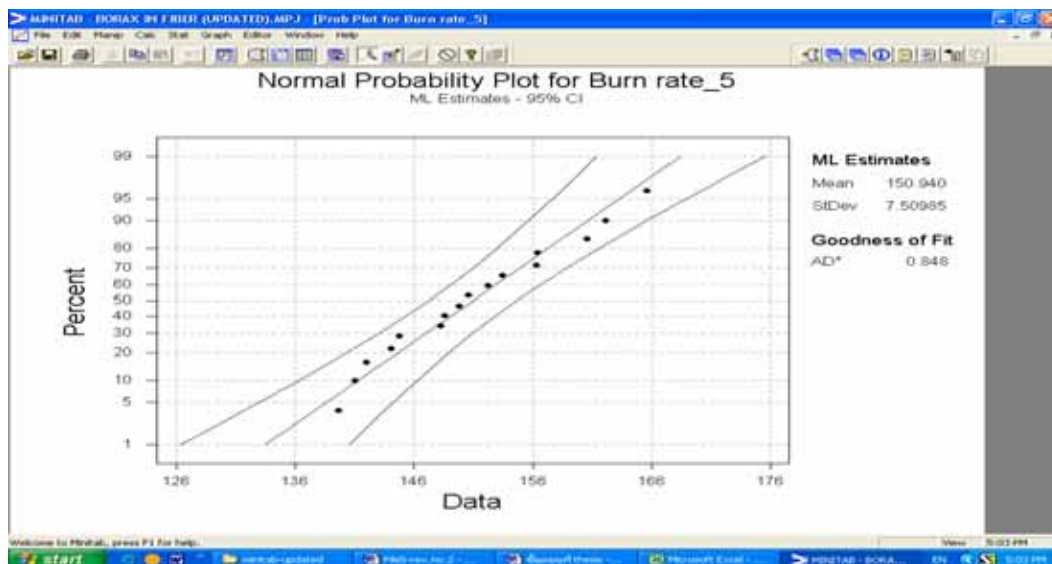
4. แสดงข้อมูล Distribution Function Analysis



ภาพผนวกที่ ๓ แสดงข้อมูล Distribution Function Analysis for Burn rate at Borax 0 %

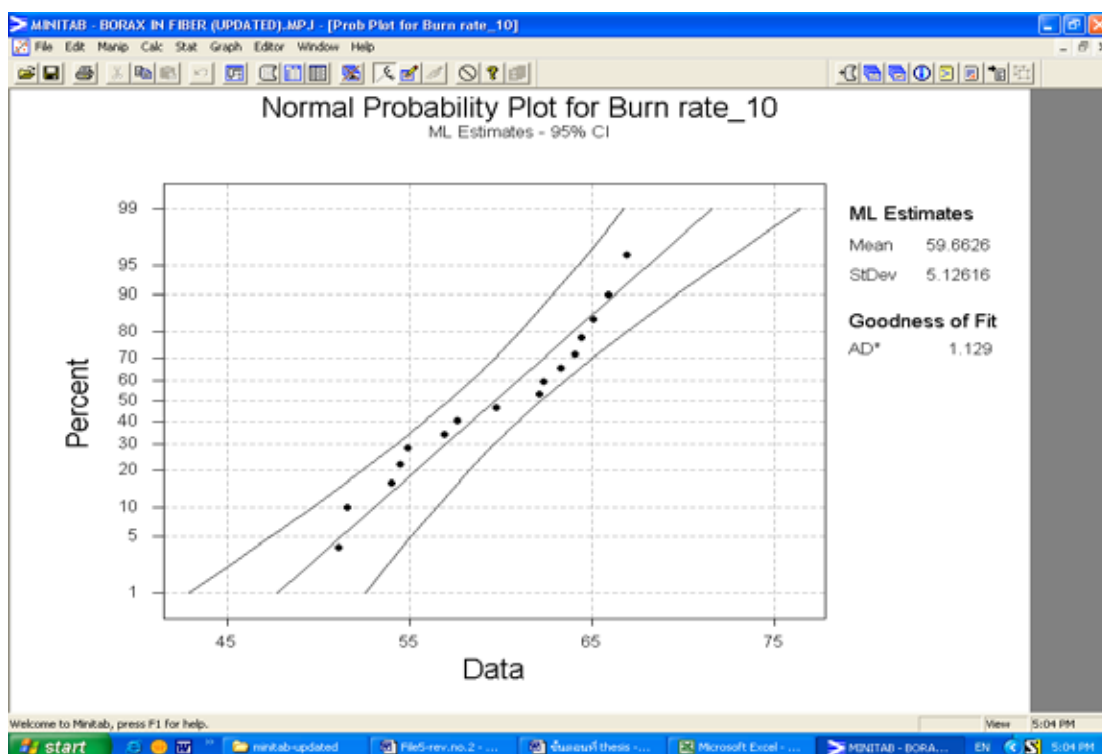
5. ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 สำหรับ %Borax ที่ 5 และ 10

For Burn rate at Borax 5%



ภาพผนวกที่ ๓ แสดงกราฟ Normal Probability Plot for Burn rate at Borax 5 %

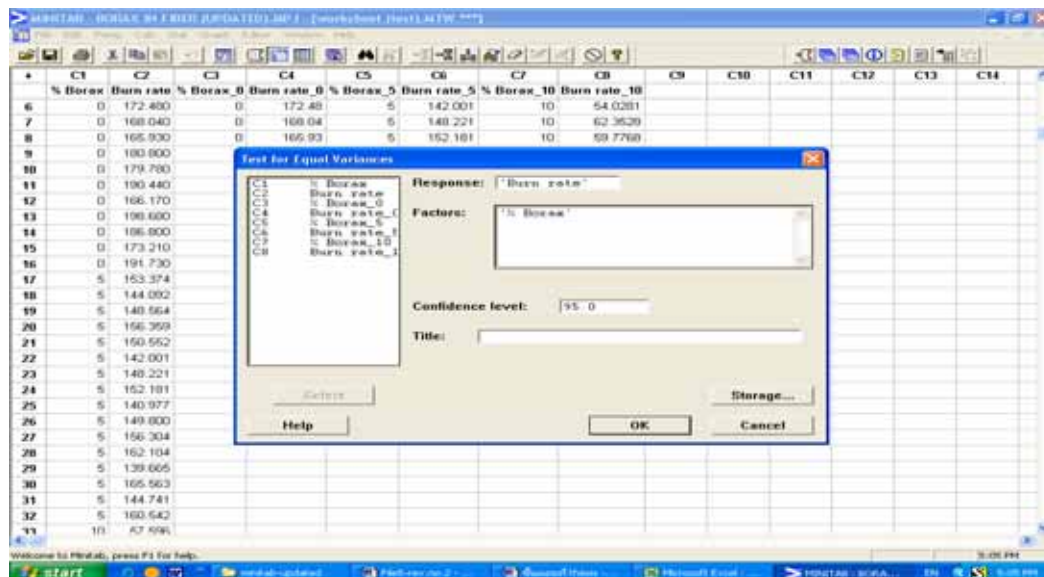
For Burn rate at Borax 10%



ภาพผนวกที่ 6 แสดงกราฟ Normal Probability Plot for Burn rate at Borax 10 %

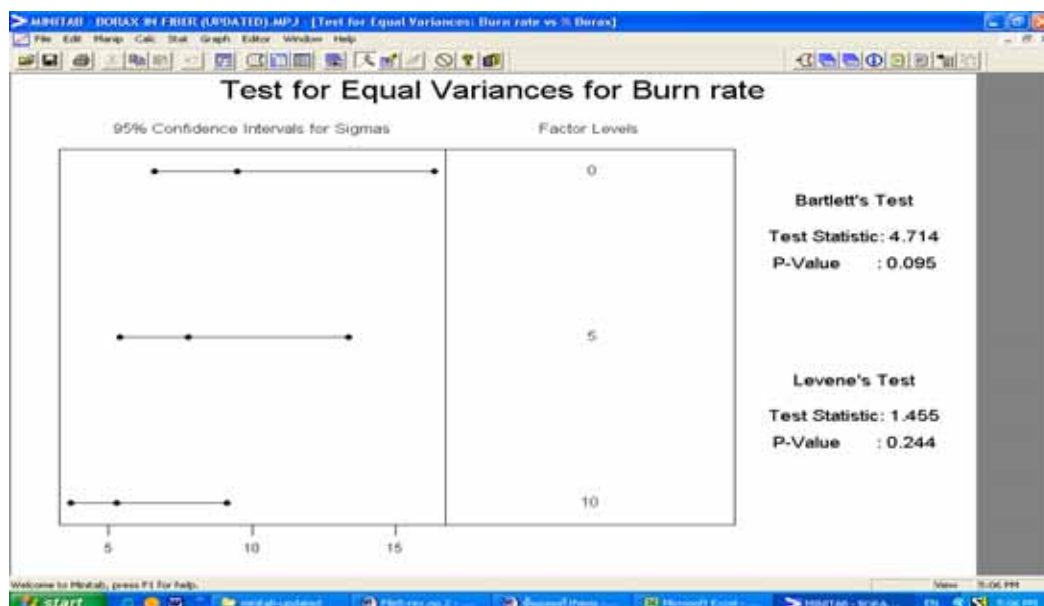
สรุปจะเห็นได้ว่ากราฟ Normal Probability Plot ของ Burn rate ที่ % Borax 0, 5, 10 จุดทุกจุดอยู่ในรั้ว (Fence) แสดงว่าการกระจายของข้อมูลอัตราการลามไฟ (Burn rate) ของแต่ละความเข้มข้นของบอแรกซ์ (%Borax) นั้นมีการกระจายแบบปกติ

6. ทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของประชากรแต่ละกลุ่ม โดยเลือกเมนู
Stat/ANOVA/Test for Equal Variances...



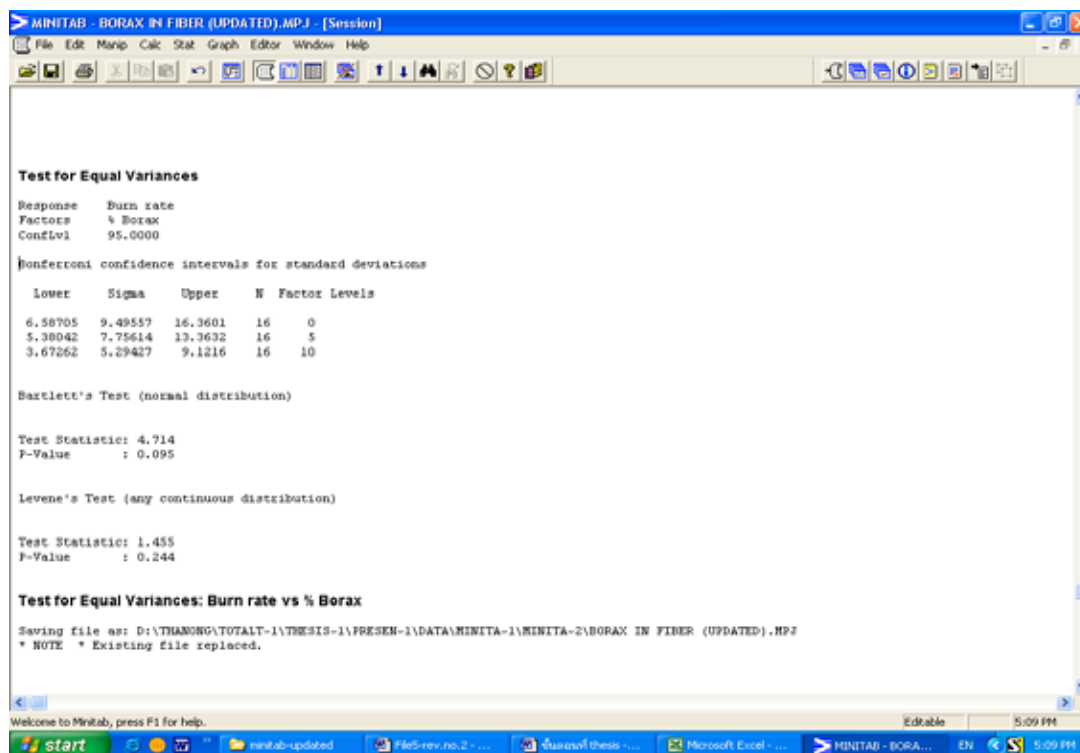
ภาพผนวกที่ ๖7 ทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของประชากร Burnrate แต่ละกลุ่ม

7. จะได้ผล Test for Equal Variances for Burn rate ดังนี้



ภาพผนวกที่ ๖8 แสดงผล Test for Equal Variances for Burn rate จากการใส่สาร Borax

8. Session of Test Equal Variances



ภาพผนวกที่ ๑๑ แสดง Session of Test Equal Variances for Burn rate จากการใส่สาร Borax

สรุปจากผลการทดสอบการแจกแจงและค่าความแปรปรวน ของประชากรในแต่ละกลุ่ม พบว่าประชากร(อัตราการลามไฟที่ค่าความเข้มข้นของบอเร็กซ์ต่างกัน) แต่ละกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติและค่าความแปรปรวนไม่ต่างกัน(เท่ากัน) จึงสามารถใช้การวิเคราะห์ด้วย ANOVA ในขั้นตอนต่อไปได้

9. ในการทำการทดลองนี้เบื้องต้นเรายังไม่ทราบว่าค่า % Borax ที่ 0% %5 และ 10% จะให้ค่า Burn rate ที่แตกต่างกันหรือไม่ ดังนั้นเราจึงต้องตั้งสมมติฐาน (Hypothesis) ว่า

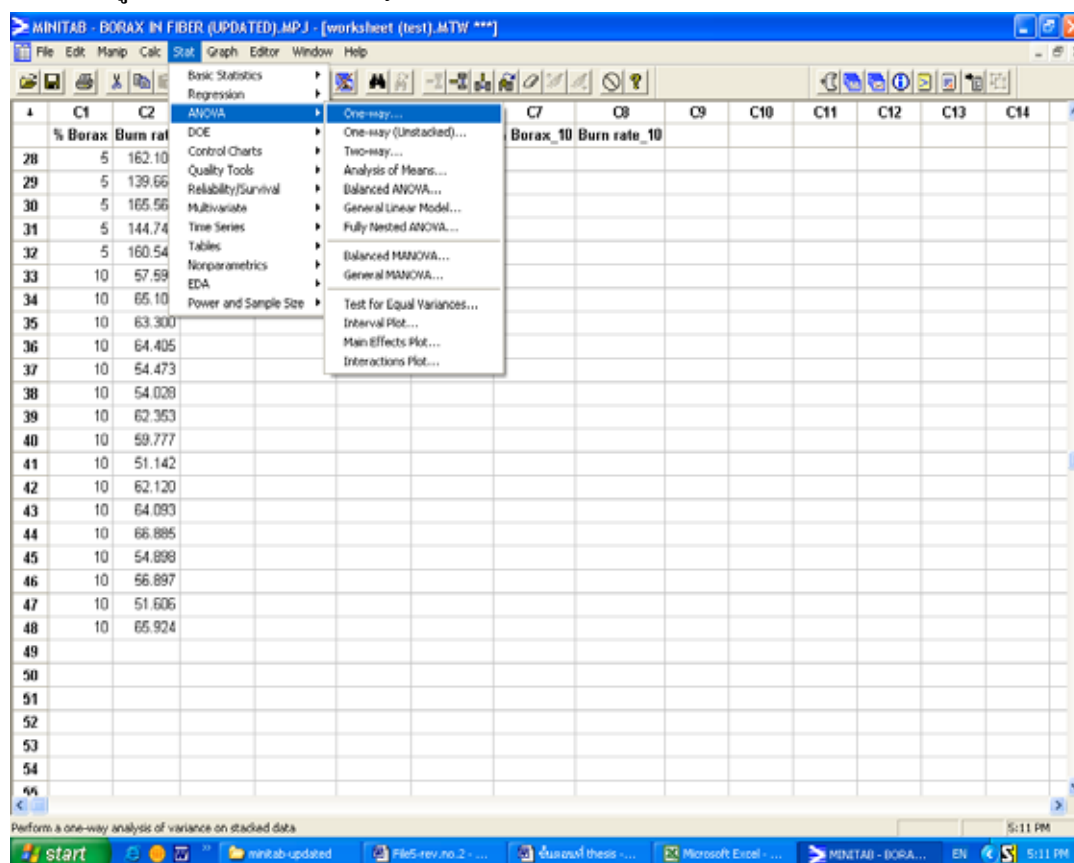
$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

เมื่อ μ_1 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate จากการทดลอง Borax ที่ 0%
 μ_2 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate จากการทดลอง Borax ที่ 5%
 μ_3 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate จากการทดลอง Borax ที่ 10%

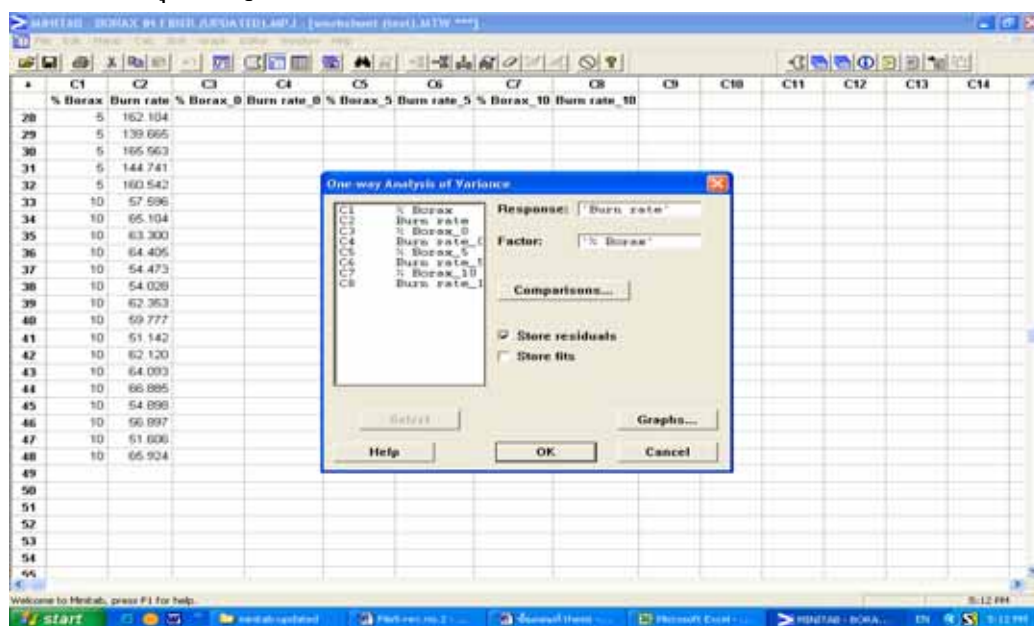
ขั้นตอนต่อไปเป็นการเลือกตัวสถิติในการทดสอบ โดยในขั้นตอนนี้เราเลือกใช้แบบ F-test, $\alpha = 0.05$ แล้วใช้โปรแกรม Minitab เพื่อวิเคราะห์ ANOVA ตามขั้นตอนต่อไปนี้

9.1 จาก Work sheet ที่มีการจัดเรียงข้อมูล %Borax และ Burn rate ในข้อ 1 เรียบร้อยแล้ว ให้เลือกเมนู Stat/ANOVA/One way...



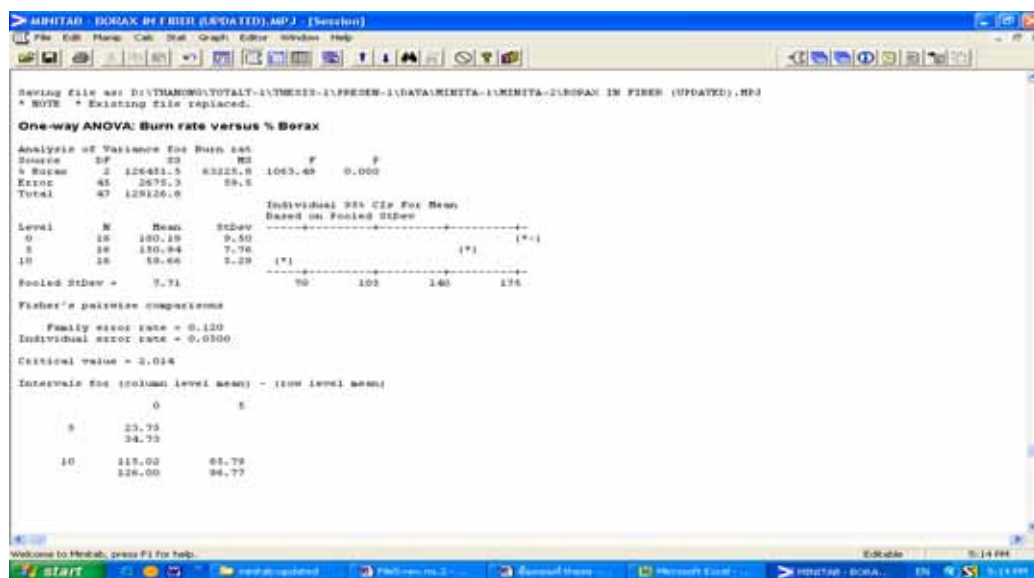
ภาพผนวกที่ ก10 การเลือกเมนู Stat/ANOVA/One way จากข้อมูล Burn rate เมื่อใช้สาร Borax

9.2 ระบุค่า Response และค่า Factor



ภาพผนวกที่ ก11 การระบุค่า Response และค่า Factor จากข้อมูล Burn rate เมื่อใช้สาร Borax

9.3 ได้ค่า Session of ANOVA ดังนี้



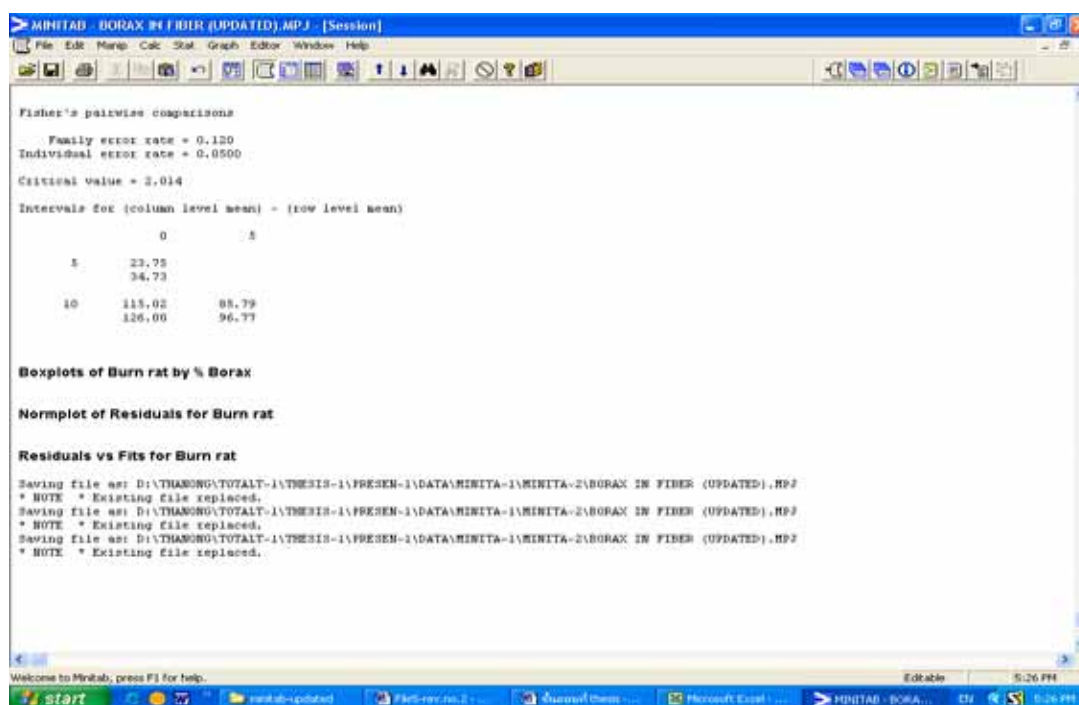
ภาพผนวกที่ ก12 แสดงค่า Session of ANOVA ของข้อมูล Burn rate เมื่อใช้สาร Borax

ตารางผนวกที่ ก1 ตาราง ANOVA แสดงความแปรปรวนของอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวน

	Degree of freedom	Sum of square	Mean square	F	P-Value
% Borax	2	126451.5	63225.8	1063.49	0.000
Error	45	2675.3	59.5		
Total	47	129126.8			

วิเคราะห์ผล ANOVA โดยดูค่า P-value เทียบกับค่า $\alpha (=0.05)$ ได้ค่า P-value = 0.000 น้อยกว่า α ดังนั้นเราจึงปฏิเสธ H_0 ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยของอัตราการลามไฟอย่างน้อย 1 คู่ (ของสารละลาย Borax ต่างกัน) ที่มีความแตกต่างกัน แต่ก็ยังไม่ทราบว่าอัตราการลามไฟคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน

ในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลอัตราการลามไฟแต่ละคู่ จะดำเนินการเปรียบเทียบด้วยวิธี “การเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparison Test)” ได้ผลดังนี้



ภาพผนวกที่ ก13 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนระหว่าง %Borax และ Burn rate

ตารางผนวกที่ ก2 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวน

% Borax	Intervals for (column level mean) - (row level mean)	
	0	5
5	23.75 to 34.73	-
10	115.02 to 126.00	85.79 to 96.77

สรุปผล พบว่าเส้นใยผักตบชวาที่แช่ในสารละลายBorax เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า “เส้นใยผักตบชวาหน่วงไฟ” ส่งผลให้แผ่นฉนวนที่ขึ้นรูปได้มีอัตราการลามไฟต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับแผ่นฉนวนที่ขึ้นรูปจากเส้นใยผักตบชวาที่แช่ด้วยสารละลาย Borax เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเส้นใยผักตบชวาปกติ ตามลำดับ (อัตราการลามไฟ: $0 > 5 > 10$ % Borax) ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยผักตบชวาที่แช่สารในสารละลายBoraxที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะมีปริมาณBoraxเคลือบผิวเส้นใยมากกว่า เมื่อเกิดการเผาไหม้จึงสลายตัวให้อิออนน้ำและก๊าซ B_2O_3 ที่สามารถปกคลุมเส้นใยผักตบชวาได้มากกว่า ทำให้ก๊าซออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาเผาไหม้ได้ยากกว่า

ภาคผนวก ข

**การประเมินผลอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนจากการปรับปรุงน้ำยางธรรมชาติ
ด้วยสารละลายซิงค์บอเรทโดยการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ ANOVA
จากโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab Release 13.20**

การประเมินผลอัตราการลามไฟของแผ่นฉนวนจากการปรับปรุงน้ำยางธรรมชาติด้วยสารละลาย
ซิงค์บอเรทโดยการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ ANOVA จากโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab Release 13.20

การหาความเข้มข้นของซิงค์บอเรทที่ผสมในน้ำยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทาน
อัตราการลามไฟ(ลดอัตราการลามไฟ) ทำได้โดยผสมสารแขวนลอยของซิงค์บอเรทที่ความเข้มข้น
0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในน้ำยางธรรมชาติจะได้ผลจากการวิเคราะห์ด้วย
Program Minitab Release 13.20 ดังนี้

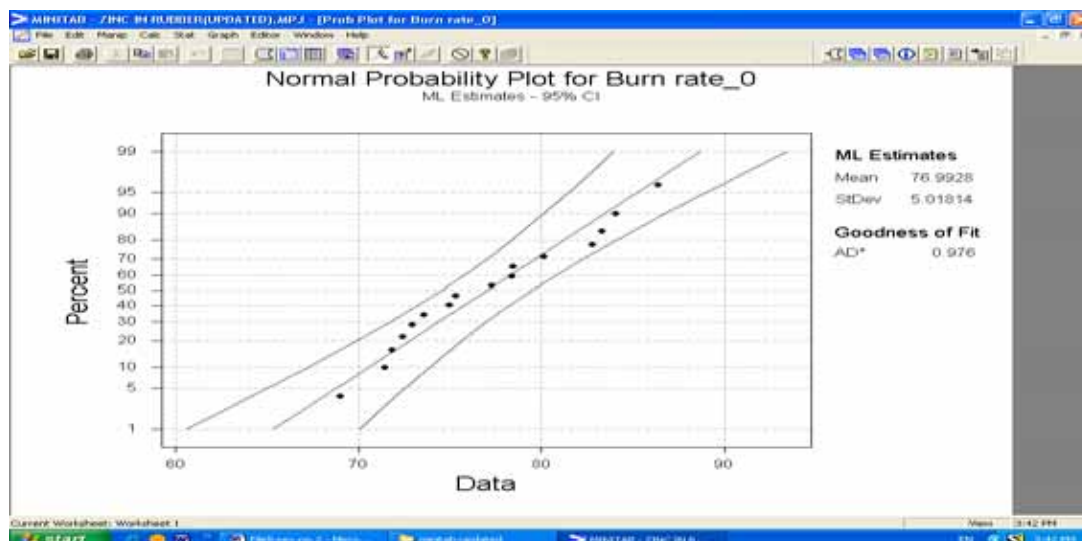
1. Key ข้อมูล ความเข้มข้นซิงค์บอเรท (% ซิงค์บอเรท) และอัตราการลามไฟ (Burn rate)
ลงใน Worksheet ของ Program Minitab

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
	%Zinc	Burn rate	%Zinc_0	Burn rate_0	%Zinc_10	Burn rate_10	%Zinc_20	Burn rate_20	%Zinc_30	Burn rate_30	%Zinc_40	Burn rate_40		
1	0	77.2798	0	77.2798	10	85.8287	20	64.5717	30	63.0871	40	52.1195		
2	0	73.5655	0	73.5655	10	76.8574	20	63.4786	30	57.2665	40	53.8471		
3	0	75.3012	0	75.3012	10	77.9006	20	63.2467	30	58.9237	40	59.5396		
4	0	74.9625	0	74.9625	10	81.1396	20	69.9083	30	71.5649	40	58.2751		
5	0	71.8047	0	71.8047	10	82.0719	20	71.6789	30	66.3228	40	55.0190		
6	0	71.3946	0	71.3946	10	73.4334	20	77.4393	30	61.9323	40	60.1443		
7	0	72.9099	0	72.9099	10	80.2425	20	77.9491	30	68.2977	40	57.4786		
8	0	72.3822	0	72.3822	10	71.1238	20	71.5308	30	60.2571	40	55.5144		
9	0	78.3426	0	78.3426	10	66.8350	20	65.2079	30	58.6014	40	59.3903		
10	0	86.3392	0	86.3392	10	78.8229	20	62.1719	30	67.8528	40	57.7738		
11	0	82.7510	0	82.7510	10	82.2970	20	73.5534	30	57.6268	40	59.5238		
12	0	78.4245	0	78.4245	10	78.0302	20	65.6264	30	60.2652	40	59.1794		
13	0	68.9761	0	68.9761	10	71.1013	20	71.5763	30	59.7768	40	59.3746		
14	0	80.0997	0	80.0997	10	69.2841	20	65.5594	30	68.3506	40	56.1027		
15	0	84.0493	0	84.0493	10	67.2948	20	62.5087	30	65.4260	40	51.1131		
16	0	83.3025	0	83.3025	10	65.8280	20	64.0752	30	56.1728	40	52.2284		
17	10	85.8287												
18	10	76.8574												
19	10	77.9006												
20	10	81.1396												
21	10	82.0719												
22	10	73.4334												
23	10	80.2425												
24	10	71.1238												
25	10	66.8350												
26	10	78.8229												
27	10	82.2970												
28	10	78.0302												

ภาพผนวกที่ ข1 การ Key ข้อมูล % ซิงค์บอเรทและ Burnrate ใน Minitab Worksheet

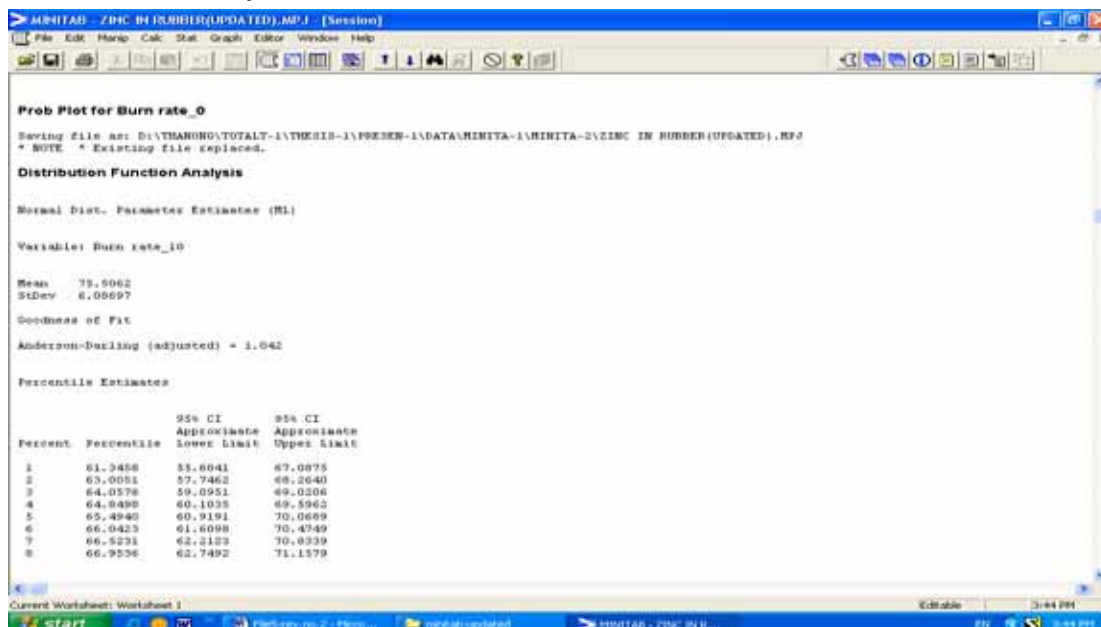
2. เลือกเมนู Graph/Probability Plot...

For Burn rate at Zinc Borate 0%



ภาพผนวกที่ ข2 แสดงกราฟ Normal Probability Plot for Burn rate at Zinc Borate 0 %

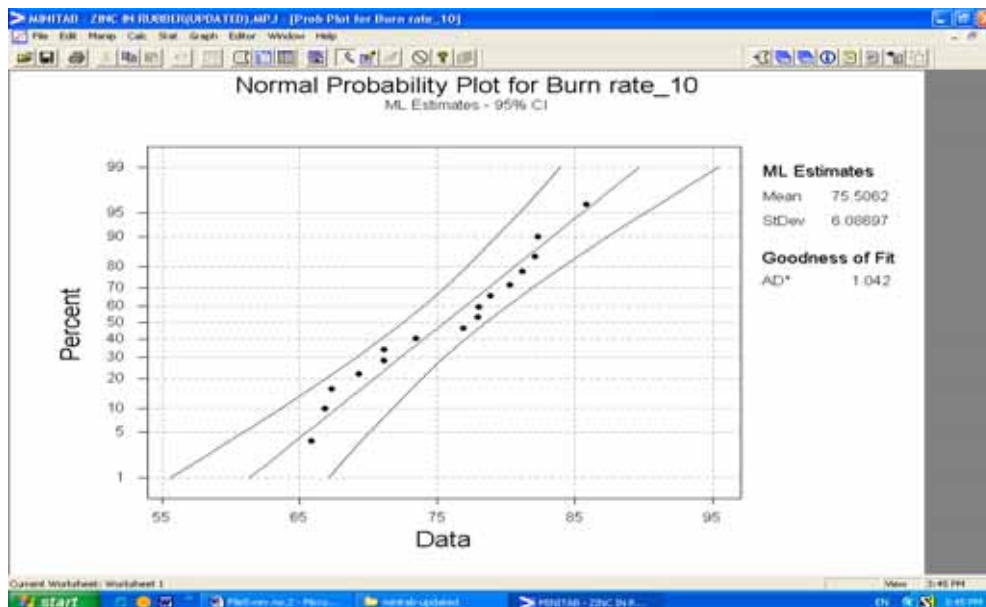
3. แสดงข้อมูล Distribution Function Analysis



ภาพผนวกที่ ข3 ข้อมูล Distribution Function Analysis for Burn rate at Zinc Borate 0 %

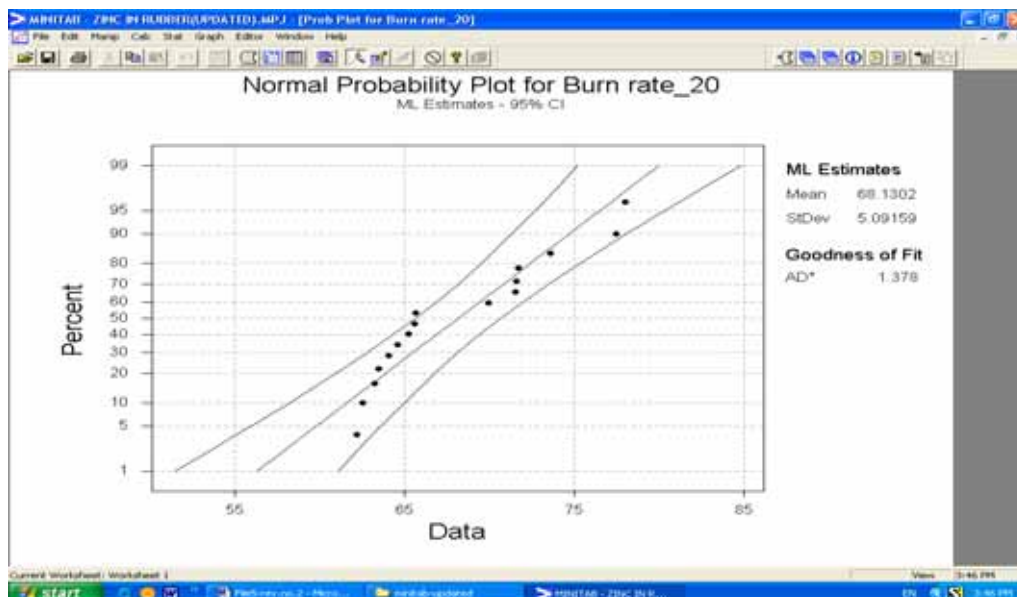
4. ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 สำหรับ % Zinc Borate ที่ 10, 20, 30 และ 40

For Burn rate at Zinc Borate 10%



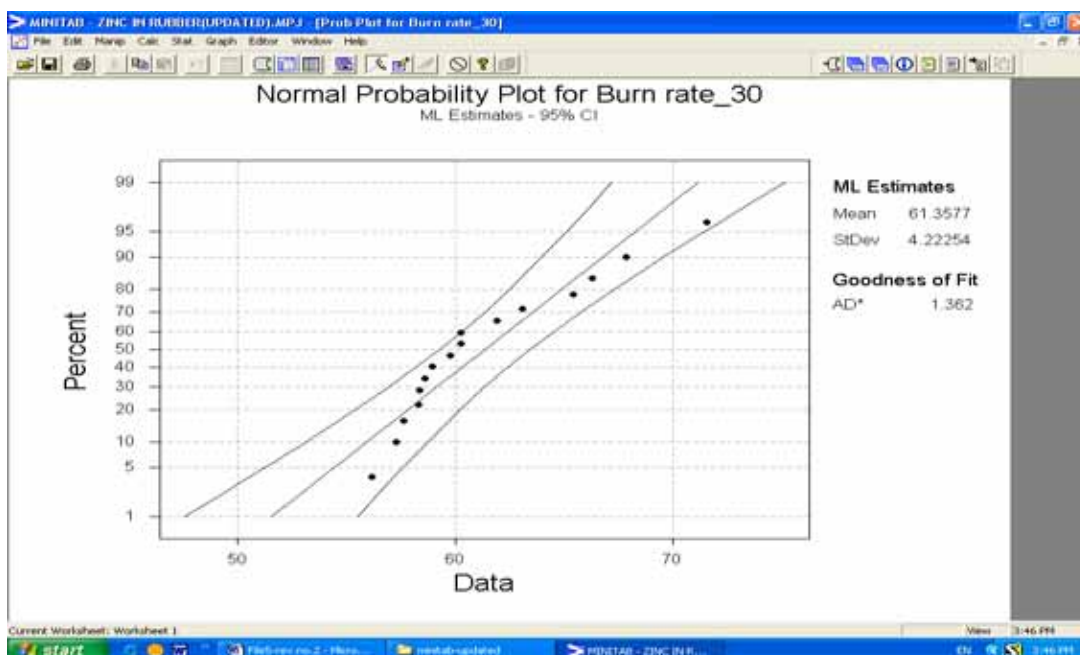
ภาพผนวกที่ ข4 แสดงกราฟ Normal Probability Plot for Burn rate at Zinc Borate 10 %

For Burn rate at Zinc Borate 20%



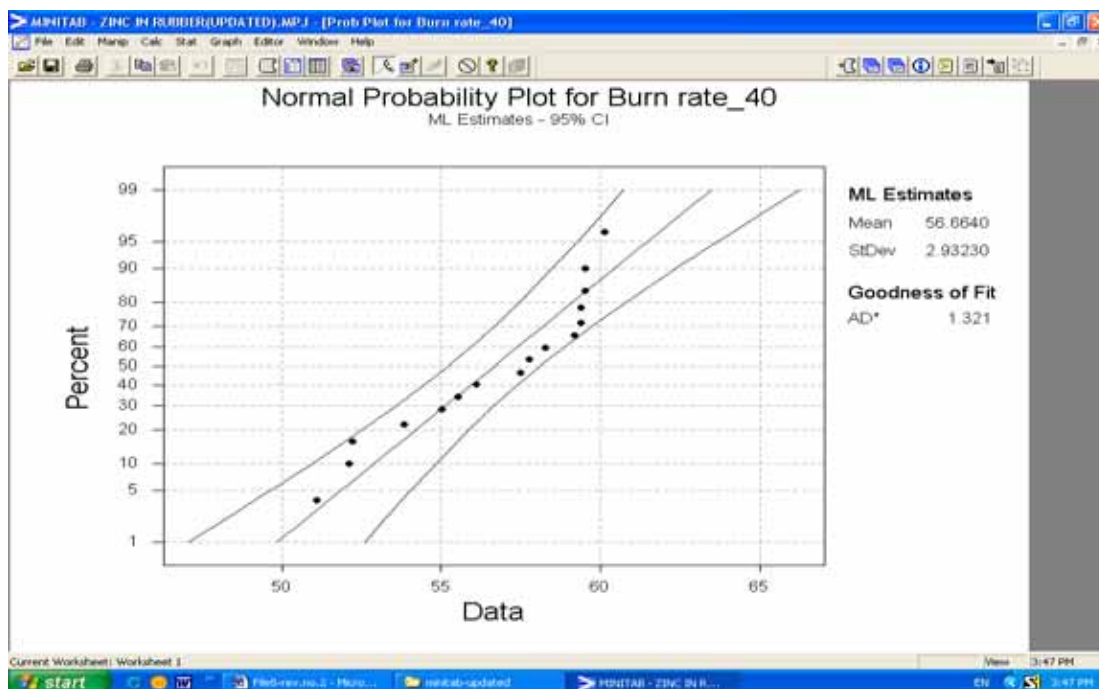
ภาพผนวกที่ ข5 แสดงกราฟ Normal Probability Plot for Burn rate at Zinc Borate 20 %

For Burn rate at Zinc Borate 30%



ภาพผนวกที่ ข6 แสดงกราฟ Normal Probability Plot for Burn rate at Zinc Borate 30 %

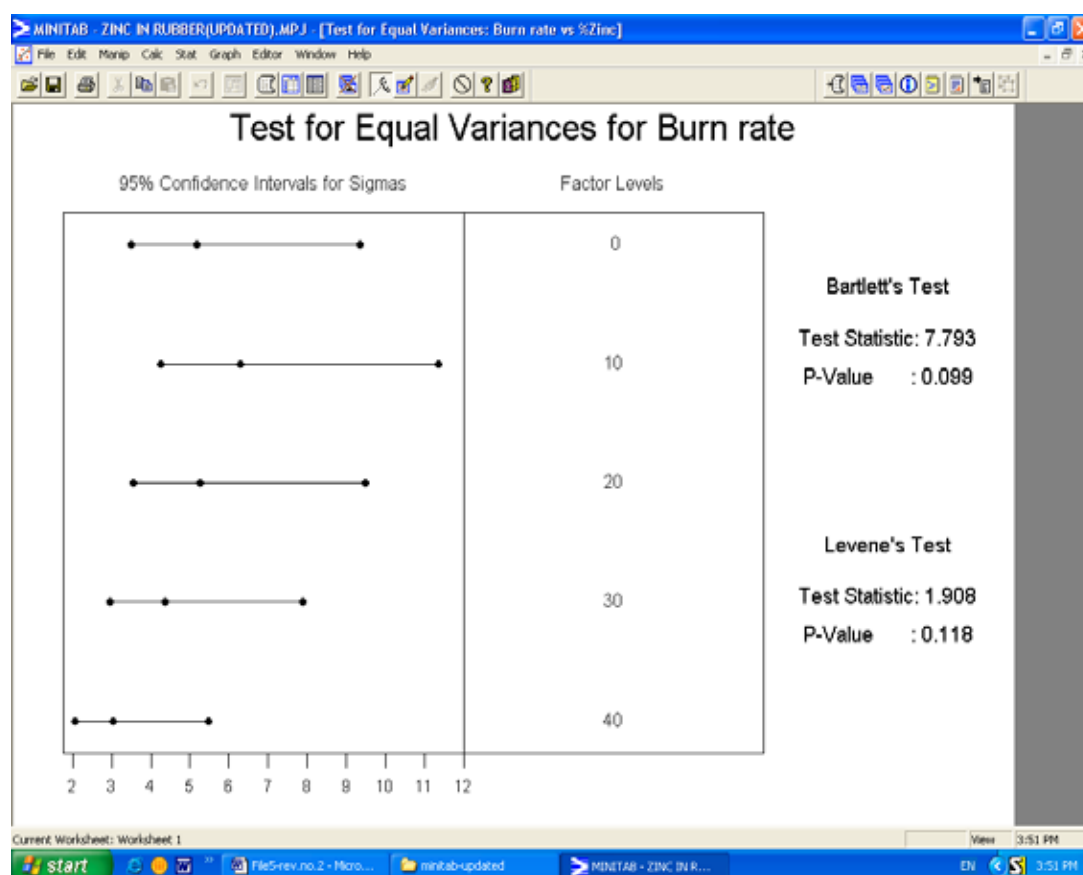
For Burn rate at Zinc Borate 40%



ภาพผนวกที่ ข7 แสดงกราฟ Normal Probability Plot for Burn rate at Zinc Borate 40 %

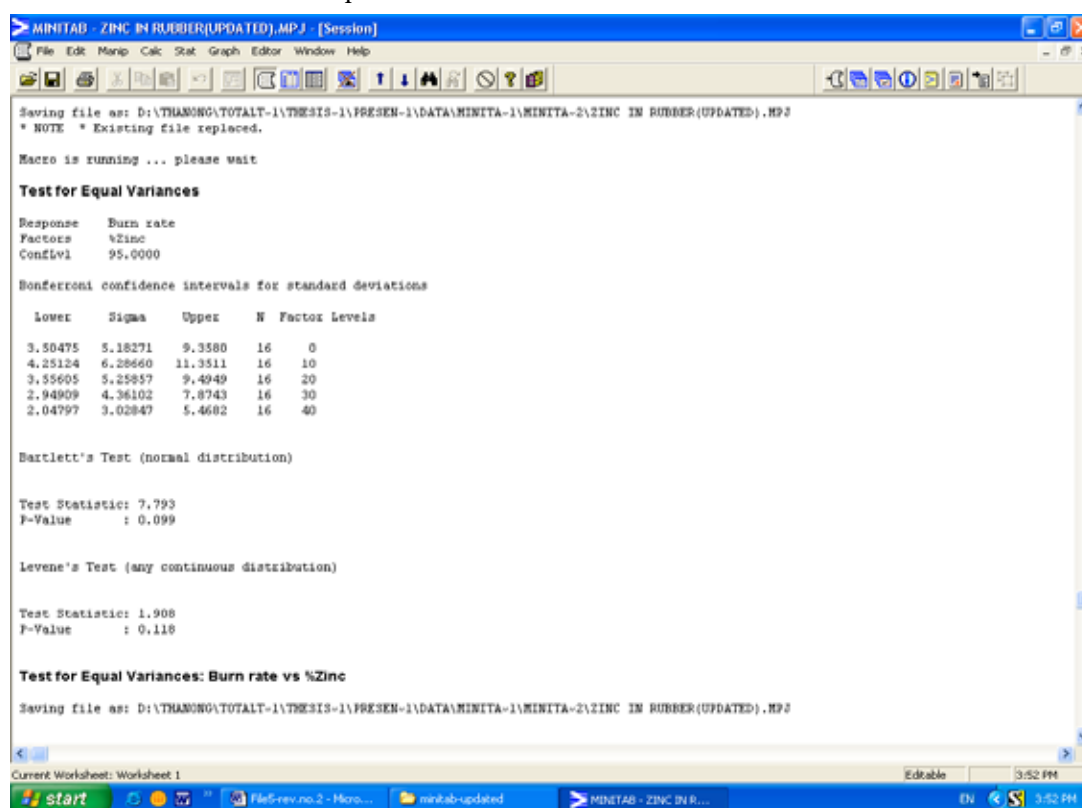
สรุปจะเห็นได้ว่ากราฟ Normal Probability Plot ของ Burn rate ที่ % Zinc Borate 0, 10, 20, 30 และ 40 จุดทุกจุดอยู่ในรั้ว (Fence) แสดงว่าการกระจายของข้อมูลอัตราการลามไฟ (Burn rate) ของแผ่นยางที่แต่ละความเข้มข้นของ Zinc Borate (% Zinc Borate) นั้นมีการกระจายแบบปกติ

5. ทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของประชากรแต่ละกลุ่ม โดยเลือกเมนู Stat/ANOVA/Test for Equal Variances... จะได้ผล Test for Equal Variances for Burn rate ดังนี้



ภาพผนวกที่ ข แสดงผล Test for Equal Variances for Burn rate จากการใช้สาร Zinc Borate

6. Session of Test Equal Variances



ภาพผนวกที่ ๗ Session of Test Equal Variances of for Burn rateจากการใช้สารZinc Borate

สรุปจากผลการทดสอบการแจกแจงและค่าความแปรปรวนของประชากรในแต่ละกลุ่มพบว่าประชากร (อัตราการลามไฟของแผ่นยางที่ค่าความเข้มข้นของ Zinc Borate ต่างกัน) แต่ละกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติและค่าความแปรปรวนไม่ต่างกัน (เท่ากัน) จึงสามารถใช้การวิเคราะห์ด้วย ANOVA ในขั้นตอนต่อไปได้

7. ในการทำการทดลองนี้เบื้องต้นเรายังไม่ทราบว่าค่า % Zinc Borate ที่ 0% %10, 20%, 30% และ 40% จะให้ค่า Burn rate ที่แตกต่างกันหรือไม่ ดังนั้นเราจึงต้องตั้งสมมติฐาน(Hypothesis)ว่า

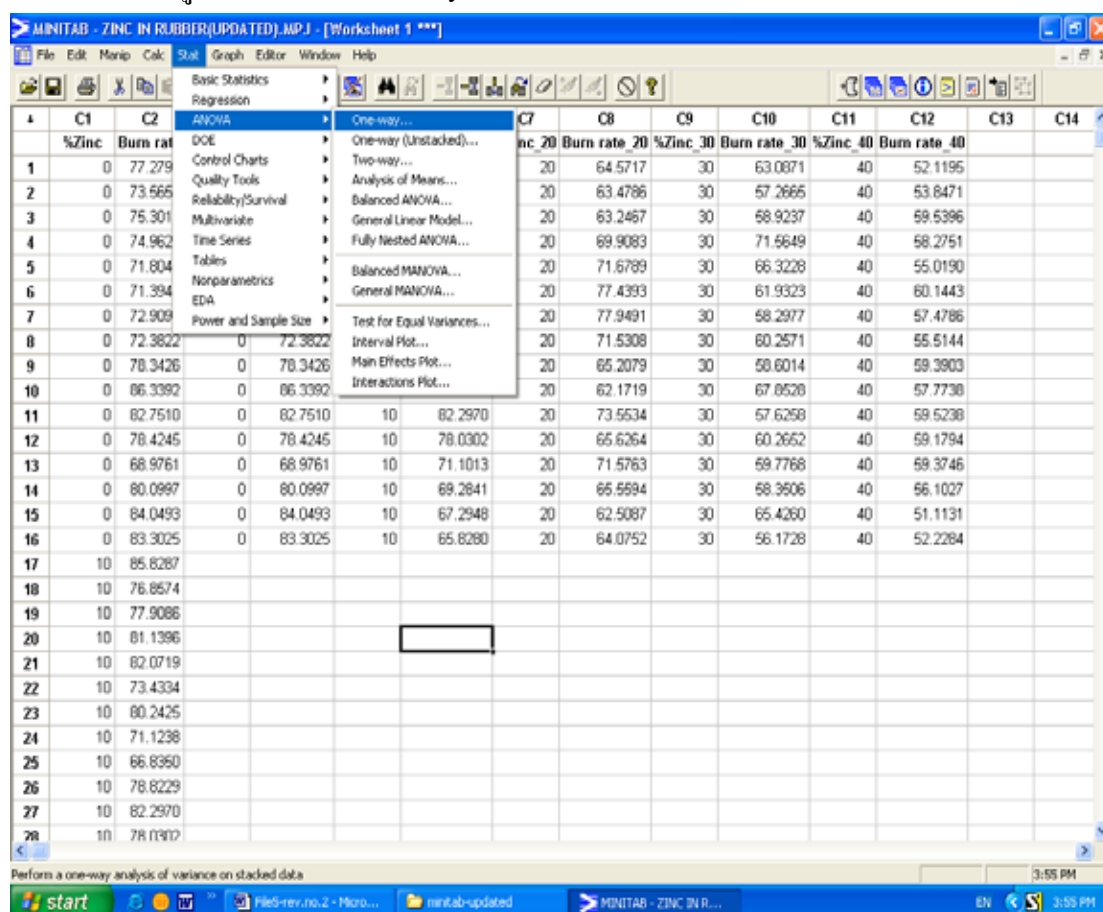
$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5$$

- เมื่อ μ_1 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate จากการทดลอง Zinc Borate ที่ 0%
 μ_2 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate จากการทดลอง Zinc Borate ที่ 10%
 μ_3 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate จากการทดลอง Zinc Borate ที่ 20%
 μ_4 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate จากการทดลอง Zinc Borate ที่ 30%
 μ_5 : ค่าเฉลี่ยของ Burn rate จากการทดลอง Zinc Borate ที่ 40%

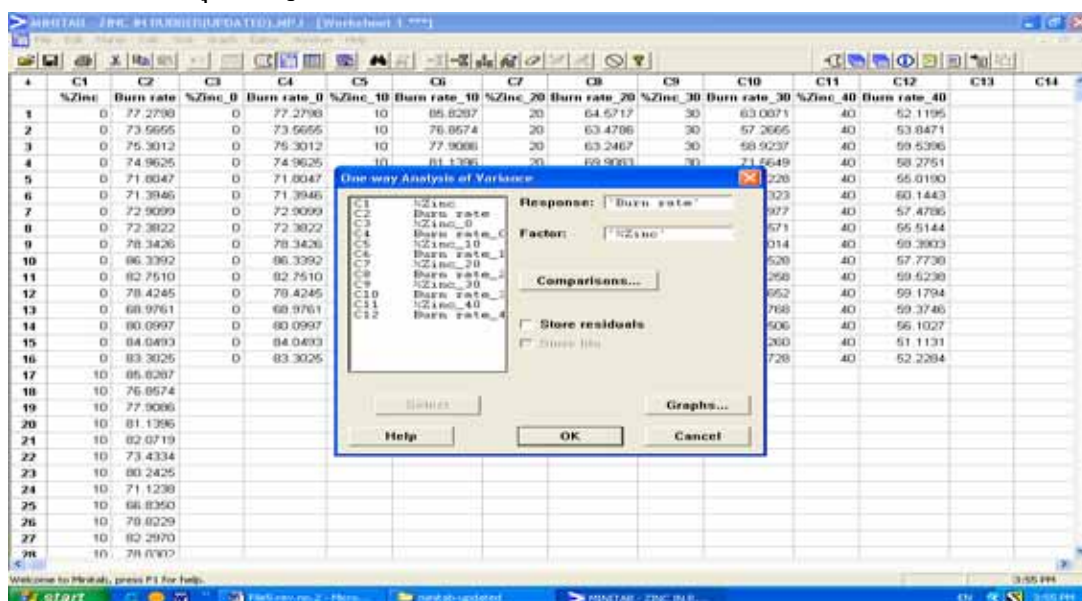
ขั้นตอนต่อไปเป็นการเลือกตัวสถิติในการทดสอบ โดยในขั้นตอนนี้เราเลือกใช้แบบ F-test, $\alpha = 0.05$ แล้วใช้โปรแกรม Minitab เพื่อวิเคราะห์ ANOVA ตามขั้นตอนต่อไปนี้

7.1 จาก Work sheet ที่มีการจัดเรียงข้อมูล % Zinc Borate และ Burn rate ในข้อ 1 เรียบร้อยแล้วให้เลือกเมนู Stat/ANOVA/One way...



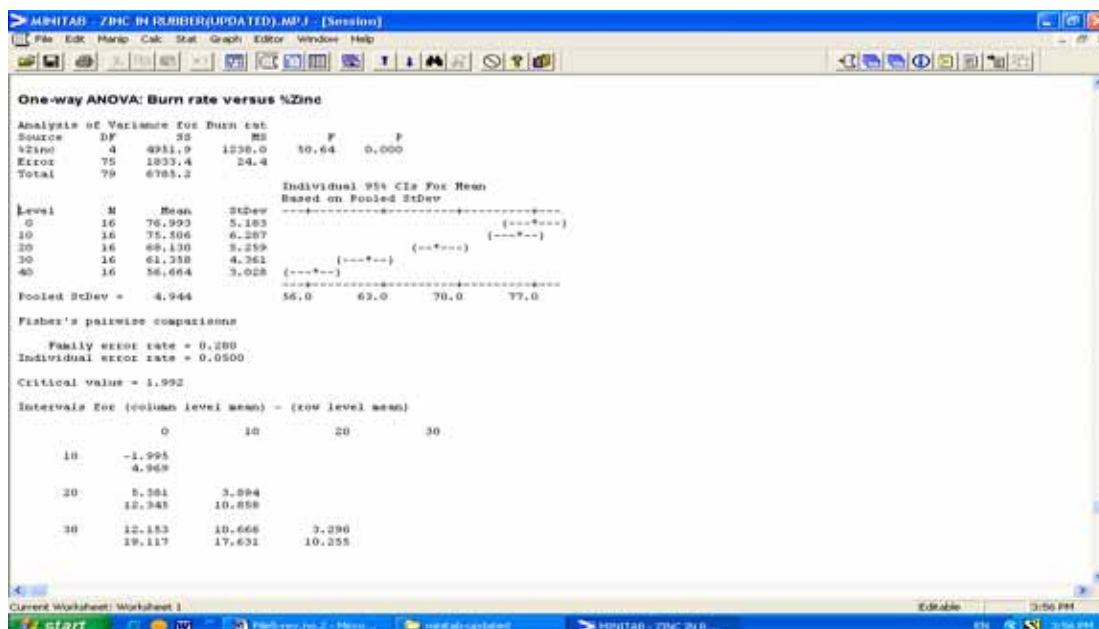
ภาพผนวกที่ ข10 เลือกเมนู Stat/ANOVA/One way จากข้อมูลBurn rateเมื่อใช้สารZinc Borate

7.2 ระบุค่า Response และค่า Factor



ภาพผนวกที่ ข11 การระบุค่า Response และค่า Factor จากข้อมูล Burn rate เมื่อใช้สาร Zinc Borate

7.3 ได้ค่า Session of ANOVA ดังนี้



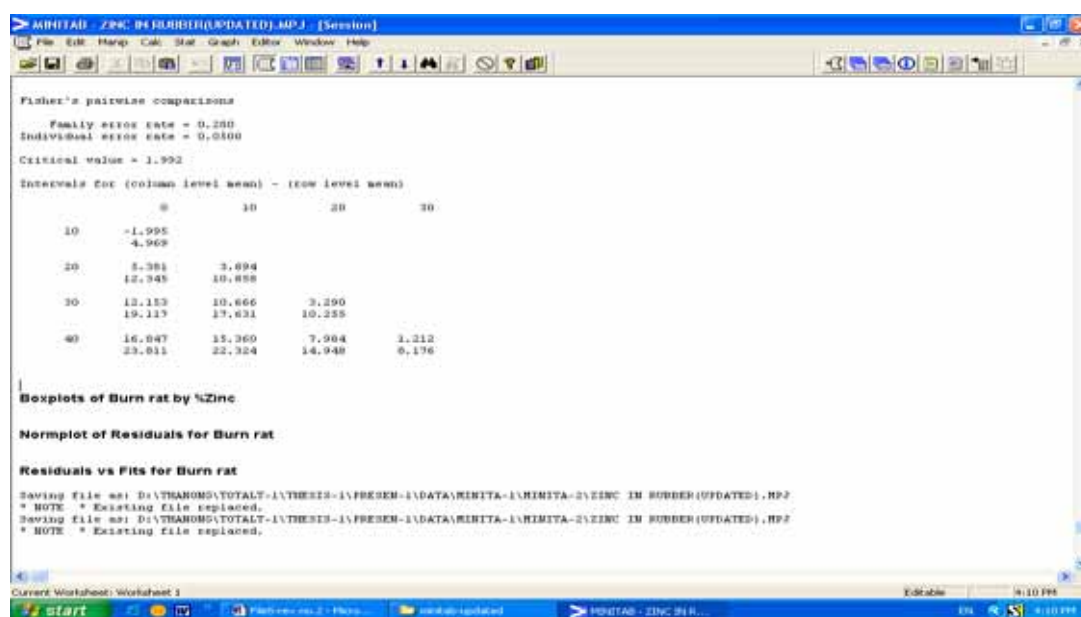
ภาพผนวกที่ ข12 แสดงค่า Session of ANOVA ของข้อมูล Burn rate เมื่อใช้สาร Zinc Borate

ตารางผนวกที่ ข1 ANOVA แสดงความแปรปรวนของอัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติ

	Degree of freedom	Sum of square	Mean square	F	P-Value
% Zinc Borate	4	4951.9	1238.0	50.64	0.000
Error	75	1833.4	24.4		
Total	79	6785.2			

วิเคราะห์ผล ANOVA โดยดูค่า P-value เทียบกับค่า $\alpha (=0.05)$ ได้ค่า P-value = 0.000 น้อยกว่า α ดังนั้นเราจึงปฏิเสธ H_0 ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยของอัตราการลามไฟอย่างน้อย 1 คู่ (ของสารละลาย Zinc Borate ต่างกัน) ที่มีความแตกต่างกัน แต่ก็ยังไม่ทราบว่าอัตราการลามไฟคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน

ในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลอัตราการลามไฟแต่ละคู่ จะดำเนินการเปรียบเทียบด้วยวิธี “การเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparison Test) และทดสอบด้วย Fisher’s pairwise comparisons” ได้ผลดังนี้



ภาพผนวกที่ ข13 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนระหว่าง %Zinc Borate และ Burn rate

ตารางผนวกที่ ข2 เปรียบเทียบเชิงซ้อนค่า Burn rate ของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสม Zinc Borate

% Zinc Borate	Intervals for (column level mean) - (row level mean)			
	0	10	20	30
10	-1.995 4.969			
20	5.381 12.345	3.894 10.858		
30	12.153 19.117	10.666 17.631	3.290 10.255	
40	16.847 23.811	15.360 22.324	7.984 14.948	1.212 8.176

เมื่อเปรียบเทียบ อัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสม Zinc Borate ที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparison Test) ด้วยวิธีทดสอบแบบ Fisher's pairwise comparisons ที่มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ ดัง ข้อมูลในตารางผนวกที่ ข 1 พบว่าความเข้มข้นของ Zinc Borate ที่ผสมในยางธรรมชาติ นั้นมีผลต่ออัตราการลามไฟของแผ่นยางธรรมชาติโดยที่อัตราการลามไฟในแต่ละ % Zinc Borate ที่ 0% และ 10% ไม่ต่างกันเนื่องจากค่าตัวเลขในตารางวิเคราะห์แบบ Fisher's pairwise comparison นั้นมีค่าอยู่ระหว่างลบถึงบวก (รวมศูนย์ด้วย) แสดงว่ามีบางค่าอัตราการลามไฟของแผ่นยางเท่ากัน แต่ค่าอัตราการลามไฟของแผ่นยางที่ความเข้มข้น Zinc Borate 20% มากกว่าที่ 30% และมากกว่าที่ 40%

การที่ Zinc Borate ที่เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถลดอัตราการลามไฟได้นั้น เนื่องจาก Zinc Borate อาจมีปริมาณไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาหน่วงไฟได้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Zinc Borate เป็น 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า อัตราการลามไฟลดลงเนื่องจากมีปริมาณ Zinc Borate มากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาหน่วงไฟได้ โดย Zinc Borate เมื่อถูกเผาไหม้จะสลายตัวให้ก๊าซ B_2O_3 ซึ่งเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจึงปกคลุมที่ผิวของยางธรรมชาติทำให้ก๊าซออกซิเจนไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาเผาไหม้ได้และยางที่ผสม Zinc Borate เข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีอัตราการลามไฟต่ำกว่ายางที่ผสม Zinc Borate เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีตะกอน

Zinc Borate กระจายติดกับผิวของยางธรรมชาติมากกว่าจึงทำให้อัตราการลามไฟลดลงแต่เมื่อทดลองใช้ Zinc Borate ที่ 50 % จะเกิดการตกตะกอนของน้ำยางธรรมชาติ เนื่องจาก Zinc Borate มีสารประกอบของซิงค์ (Zinc) ซึ่งซิงค์สามารถทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงพันธะ (Cross linked) กับสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติได้ดี เป็นผลให้น้ำยางธรรมชาติเกิดการคงรูปเร็วเกินไป ทำให้ไม่สามารถนำไปพ่นเพื่อการขึ้นรูปแผ่นฉนวนกันไฟได้

สรุปเราจึงเลือก Zinc Borate เข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักใช้ในการผสมลงในน้ำยางธรรมชาติเพื่อที่จะได้อัตราการลามไฟที่ต่ำที่สุด

ภาคผนวก ค

Material Safety Data Sheet (MSDS) of Borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$):
Sodium tetraborate decahydrate, disodium tetraborate decahydrate,
borax decahydrate, Borax 10 Mol

This product contains greater than 99 percent (%) Sodium tetraborate decahydrate, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, which is hazardous under the OSHA Hazard Communication Standard and under the Canadian Controlled Products Regulations of the Hazardous Products Act (WHMIS), based on animal chronic toxicity studies. Refer to Sections 3 and 11 for details on hazards.

®

®

Borax Decahydrate

product and company identification

Emergency overview

Borax is a white, odorless, powder substance that is not flammable, combustible, or explosive and has low acute oral and dermal toxicity.

Potential ecological effects

Large amounts of Borax can be harmful to plants and other species. Therefore, releases to the environment should be minimized.

Potential health effects

Routes of exposure: Inhalation is the most significant route of exposure in occupational and other settings. Dermal exposure is not usually a concern because Borax is poorly absorbed through intact skin.

Inhalation: Occasional mild irritation effects to the nose and throat may occur from inhalation of Borax dust at levels greater than 10 mg/m³.

Eye contact: Borax is non-irritating to the eyes in normal industrial use.

Skin contact: Borax does not cause irritation to intact skin.

Ingestion: Products containing Borax are not intended for ingestion. Borax has a low acute toxicity. Small amounts (e.g., a teaspoon) swallowed accidentally are not likely to cause effects; swallowing amounts larger than that may cause gastrointestinal symptoms.

Cancer: Borax is not a known carcinogen.

Reproductive/developmental: Animal ingestion studies in several species, at high doses, indicate that borates cause reproductive and developmental effects. A human study of occupational exposure to borate dust showed no adverse effect on reproduction.

Target organs: No target organ has been identified in humans. High dose, animal ingestion studies indicate the testes are the target organs in male animals.

Signs and symptoms of exposure: Symptoms of accidental over-exposure to Borax might include nausea, vomiting and diarrhea, with delayed effects of skin redness and peeling. These symptoms have been associated with the accidental overexposure to the chemically related substance boric acid. Refer to Section 11 for details on Toxicological data.

Inhalation: If symptoms such as nose or throat irritation are observed, remove person to fresh air.

Eye contact: Use eye wash fountain or fresh water to cleanse the eye. If irritation persists for more than 30 minutes, seek medical attention.

Skin contact: No treatment necessary because non-irritating.

Ingestion: Swallowing small quantities (one teaspoon) will cause no harm to healthy adults. If larger amounts are swallowed, give two glasses of water to drink and seek medical attention.

Note to physicians: Observation only is required for adult ingestion in the range of 4-8 grams of Borax. For ingestion of larger amounts, maintain adequate kidney function and force fluids. Gastric lavage is recommended for symptomatic patients only. Hemodialysis should be reserved for massive acute ingestion or patients with renal failure. Boron analyses of urine or blood are only useful for documenting exposure and should not be used to evaluate severity of poisoning or to guide treatment¹. Refer to Section 11 for details. US-US-BX

1 of 4

Material Safety Data Sheet

DATE OF ISSUE May 2000

Supersedes November 1999 Version

Product name: Borax**Grade:** Technical, NF, SQ**Product use:** Industrial manufacturing**Chemical formula:** $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ **Chemical name/synonyms:** Sodium tetraborate decahydrate, disodium tetraborate decahydrate, borax decahydrate, Borax 10 Mol**Chemical family:** Inorganic borates**CAS registry number:** 1303-96-4

(Refer to Section 15 for TSCA/DSL Chemical inventory listing)

MANUFACTURER:**U.S. Borax Inc.**

26877 Tourney Road

Valencia, CA 91355-1847

EMERGENCY PHONE NUMBERS:

24 Hr. Medical Info. Service . . . (661) 284-5200

Chemtrec (Spills): (800) 424-9300

measures**Borax****General hazard:** None, because Borax is not flammable, combustible or explosive. The product is itself a flame retardant.**Extinguishing media:** Any fire extinguishing media may be used on nearby fires.**Flammability classification (29 CFR 1910.1200):** Nonflammable solid.**General:** Borax is a water-soluble white powder that may, at high concentrations, cause damage to trees or vegetation by root absorption. (Refer to Ecological information, Section 12, for specific information.)

Land spill: Vacuum, shovel or sweep up Borax and place in containers for disposal in accordance with applicable local regulations. Avoid contamination of water bodies during cleanup and disposal. Personal protective equipment is not needed to cleanup land spills.**Spillage into water:** Where possible, remove any intact containers from the water. Advise local water authority that none of the affected water should be used for irrigation or for the abstraction of potable water until natural dilution returns the boron value to its normal environmental background level. (Refer to Sections 12, 13 and 15 for additional information.) Borax is a non-hazardous waste when spilled or disposed of, as defined in the Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) regulations (40 CFR 261). (Refer to Regulatory information, Section 15, for additional references.) **General:** No special handling precautions are required, but dry, indoor storage is recommended. To maintain package integrity and to minimize caking of the product, bags should be handled on a first-in, first-out basis. Good housekeeping procedures should be followed to minimize dust generation and accumulation.**Storage temperature:** Ambient**Storage pressure:** Atmospheric**Special sensitivity:** Moisture (caking)**Engineering controls:** Use local exhaust ventilation to keep airborne concentrations of Borax dust below permissible exposure levels.

Personal protection: Where airborne concentrations are expected to exceed exposure limits, NIOSH/MSHA certified respirators should be used. Eye goggles and gloves are not required for normal industrial exposures, but may be warranted if environment is excessively dusty.

Occupational exposure limits: Sodium tetraborate decahydrate (Borax) is regulated by OSHA, Cal OSHA and ACGIH.

ACGIH/TLV: 5 mg/m³

Cal OSHA/PEL: 5 mg/m³

OSHA/PEL (total dust): 10 mg/m³

Appearance: White, odorless, crystalline solid

Specific gravity: 1.71

Vapor pressure: Negligible @ 20°C

Solubility in water: 4.71% @ 20°C; 65.64% @ 100°C

Melting point: 62°C (144°F) (heated in closed space)

pH @ 20°C: 9.3 (0.1% solution); 9.2 (1.0% solution); 9.3 (4.7% solution)

Molecular weight: 381.37

©1996 U.S. Borax Inc.

General: Borax is a stable product, but when heated it loses water, eventually forming anhydrous borax (Na₂B₄O₇).

Incompatible materials and conditions to avoid: Reaction with strong reducing agents, such as metal hydrides or alkali metals, will generate hydrogen gas, which could create an explosive hazard.

Hazardous decomposition: None.

US-US-BX

2 of 4 measures

and reactivity

Acute toxicity

Ingestion: Low acute oral toxicity; LD₅₀ in rats is 4,500 to 5,000 mg/kg of body weight.

Skin/dermal: Low acute dermal toxicity; LD₅₀ in rabbits is greater than 10,000 mg/kg of body weight. Borax is poorly absorbed through intact skin.

Inhalation: Low acute inhalation toxicity; LC₅₀ in rats is greater than 2.0 mg/L (or g/m³).

Skin irritation: Non-irritant.

Eye irritation: Draize test in rabbits produced eye irritation effects. Fifty years of occupational exposure to Borax indicates no adverse effects on human eye. Therefore, Borax is not considered to be a human eye irritant in normal industrial use. **Sensitization:** Borax is not a skin sensitizer.

Other

Reproductive/developmental toxicity: Animal feeding studies in rat, mouse and dog, at high doses, have demonstrated effects on fertility and testes². Studies with the chemically related boric acid in the rat, mouse and rabbit, at high doses, demonstrate developmental effects on the fetus, including fetal weight loss and minor skeletal variations^{3, 4}. The doses administered were many times in excess of those to which humans would normally be exposed⁵.

Carcinogenicity/mutagenicity: No evidence of carcinogenicity in mice⁶. No mutagenic activity was observed for boric acid in a battery of short-term mutagenicity assays.

Human data: Human epidemiological studies show no increase in pulmonary disease in occupational populations with chronic exposures to boric acid dust and sodium borate dust. A recent epidemiology study under the conditions of normal occupational exposure to borate dusts indicated no effect on fertility⁷.

Ecotoxicity data

General: Boron (B) is the element in sodium tetraborate decahydrate (Borax) which is used by convention to report

borate product ecological effects. It occurs naturally in seawater at an average concentration of 5 mg B/L and generally occurs in fresh water at concentrations up to 1 mg B/L. In dilute aqueous

solutions the predominant boron species present is undissociated boric acid. To convert sodium tetraborate decahydrate into the equivalent boron (B) content, multiply by 0.1134.

Phytotoxicity: Boron is an essential micronutrient for healthy growth of plants; however, it can be harmful to boron sensitive plants in high quantities. Care should be taken to minimize the amount of Borax released to the environment.

Algal toxicity:

Green algae, *Scenedesmus subspicatus*

96-hr EC10 = 24 mg B/L†

Invertebrate toxicity8:

Daphnids, *Daphnia magna straus*

24-hr EC50 = 242 mg B/L†

Test substance: † sodium tetraborate

Fish toxicity:

Sea-water9:

Dab, *Limanda limanda*

96-hr LC50 = 74 mg B/L†

Fresh water10:

Rainbow trout, *S. gairdneri* (embryo-larval stage)

24-day LC50 = 88 mg B/L†

32-day LC50 = 54 mg B/L†

Goldfish, *Carassius auratus* (embryo-larval stage)

7-day LC50 = 65 mg B/L†

3-day LC50 = 71 mg B/L†

Environmental fate data

Persistence/degradation: Boron is naturally occurring and ubiquitous in the environment.

Borax decomposes in the environment to natural borate.

Octanol/water partition coefficient: No value. In aqueous solution Sodium tetraborate decahydrate is converted substantially into undissociated boric acid.

Soil mobility: Borax is soluble in water and is leachable through normal soil.

Disposal guidance: Small quantities of Borax can usually be disposed of at landfill sites. No special disposal treatment is required, but local authorities should be consulted about any specific local requirements. Tonnage quantities of product should, if possible, be used for an appropriate application.

RCRA (40 CFR 261): Borax is not listed under any sections of the Federal Resource Conservation and Recovery Act (RCRA).

NPRI (Canada): Borax is not listed on the Canadian National Pollutant Release Inventory. Refer to Section 15 for additional regulatory information.

Borax

©1996 U.S. Borax Inc.

DOT hazardous classification: Sodium tetraborate decahydrate (Borax) is not regulated by the U.S. Department of Transportation (DOT) and is therefore not considered a hazardous material/substance.

TDG Canadian transportation: Sodium tetraborate decahydrate (Borax) is not regulated under Transportation of Dangerous Goods (TDG).

International transportation: Sodium tetraborate decahydrate (Borax) has no UN Number, and is not regulated under international rail, road, water or air transport regulations.

US-US-BX

3 of 4

Transport information

OSHA/Cal OSHA: This MSDS document meets the requirements of both OSHA (29 CFR 1910.1200) and Cal OSHA

(Title 8 CCR 5194 (g)) hazard communication standards. Refer to Section 8 for regulatory exposure limits.

WHMIS classification: Sodium tetraborate decahydrate (Borax) is classified as Class D-Division 2A under Canadian WHMIS guidelines.

Chemical inventory listing: Sodium tetraborate decahydrate (Borax), 1303-96-4, appears on several chemical inventory lists (including the EPA TSCA inventory, Canadian DSL, European EINECS, Japanese MITI, Australian and Korean lists) under the CAS No. representing this inorganic salt.

U.S. EPA TSCA Inventory 1303-96-4

Canadian DSL 1303-96-4

EINECS 215-540-4

South Korea 9212-848

Japanese MITI (1)-69

RCRA: Sodium tetraborate decahydrate is not listed as a hazardous waste under any sections of the Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) or regulations (40 CFR 261 *et seq.*).

Superfund: CERCLA/SARA. Sodium tetraborate decahydrate is not listed under CERCLA or its 1986 amendments, SARA, including substances listed under Section 313 of SARA, Toxic Chemicals, 42 USC 11023, 40 CFR 372.65, Section 302 of SARA, Extremely Hazardous Substances, 42 USC 11002, 40 CFR 355, or the CERCLA Hazardous Substances list, 42 USC 9604, 40 CFR 302.

Safe Drinking Water Act (SDWA): Sodium tetraborate decahydrate is not regulated under the SDWA, 42 USC 300g-1, 40 CFR 141 *et seq.* Consult state and local regulations for possible water quality advisories regarding boron compounds.

Clean Water Act (CWA) (Federal Water Pollution Control

Act): 33 USC 1251 *et seq.*

a) Sodium tetraborate decahydrate (Borax) is not itself a discharge covered by any water quality criteria of

Section 304 of the CWA, 33 USC 1314.

b) It is not on the Section 307 List of Priority Pollutants, 33 USC 1317, 40 CFR 129.

c) It is not on the Section 311 List of Hazardous Substances, 33 USC 1321, 40 CFR 116.

Canadian drinking water guideline: An "Interim Maximum Acceptable Concentration" (IMAC) for boron is currently set at 5 mg B/L.

IARC: The International Agency for Research on Cancer (IARC) (a unit of the World Health Organization) does not list or categorize Sodium tetraborate decahydrate as a carcinogen.

NTP Biennial Report on Carcinogens: Sodium tetraborate decahydrate is not listed.

OSHA carcinogen: Sodium tetraborate decahydrate is not listed.

California Proposition 65: Sodium tetraborate decahydrate (Borax) is not listed on the Proposition 65 list of carcinogens or reproductive toxicants.

Federal Food, Drug and Cosmetic Act: Pursuant to 21 CFR 175.105, 176.180 and 181.30, Borax is approved by the FDA for use in adhesive components of packaging materials, as a component of paper coatings on such materials, or for use in the manufacture thereof, which materials are expected to come in contact with dry food products.

Clean Air Act (Montreal Protocol): Borax was not manufactured with and does not contain any Class I or Class II

ozone depleting substances. ©1996 U.S. Borax Inc.

Borax

References

1) Litovitz T L, Norman S A, Veltri J C, Annual Report of the American Association of Poison Control Centers Data Collection System. Am.

J. Emerg. Med. 4: 427-458 (1986).

2) Weir R J, Fisher R S, Toxicol. Appl. Pharmacol. 23: 351-364 (1972).

3) Fail *et al.*, Fund. Appl. Toxicol. 17: 225-239 (1991).

- 4) Price *et al.*, J. Am. Coll. Toxicol. **14**: (2), 173 (Abst. P-17) (1995).
- 5) Murray F J, Regul. Toxicol. Pharmacol. (Dec. 1995).
- 6) National Toxicology Program (NTP)—Toxicology and carcinogenesis studies of boric acid in B6C3F1 mice, Tech. Report Ser. No. 324, U.S. Dept. of Health and Human Services. NIH Publ. No. 88-2580 (1987).
- 7) Whorton *et al.*, Occup. Environ. Med. **51**: 761-767 (1994).
- 8) Schöberl *et al.*, Tenside Surfactants Detergents **25**: 99-107 (1988).
- 9) Hugman S J, Mance G, Water Research Centre Report 616-M (1983).
- 10) Butterwick L, de Oude N, Raymond K, Ecotoxicol. Environ. Safety **17**: 339-371 (1989). For general information on the toxicology of inorganic borates, see Patty's Industrial Hygiene and Toxicology, 4th Ed. Vol. II, (1994), Chap. 42, Boron; ECETOC Tech. Report No. 63 (1995).

Product label text hazard information*:

- Do not ingest.
- Ingestion may cause reproductive harm or birth defects based on animal data.
- Avoid contamination of food or feed.
- Not for use in food, drugs or pesticides+.
- Refer to MSDS.
- KEEP OUT OF REACH OF CHILDREN.

*The WHMIS panel format is used for Canadian product.

+Except for NF (pharmaceutical grade) products.

National Fire Protection Assoc. (NFPA) Classification:

Health 0

Flammability 0

Reactivity 0

Hazardous Materials Information Systems (HMIS):

Red: (Flammability) 0

Yellow: (Reactivity) 0

Blue: (Acute Health) 1*

*Chronic Effects

For further information contact:

U.S. Borax Inc.

Occupational Health & Product Safety Department

(661) 287-6050

US-US-BX

4 of 4

information

ภาคผนวก ง

มาตรฐาน ASTM D 635-98



Designation: D 635 – 98

Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position¹

This standard is issued under the fixed designation D 635; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope *

1.1 This fire-test-response test method covers a small-scale laboratory screening procedure for comparing the relative linear rate of burning or extent and time of burning, or both, of plastics in the form of bars, molded or cut from sheets, plates, or panels, and tested in the horizontal position.

NOTE 1—This test method, Clause 8 of IEC Draft 695-11-10 and Method A of ISO 1210-1992 are technically equivalent.

NOTE 2—For additional information on materials which do not burn to the first reference mark by this test, see Test Method D 3801.

1.2 This test method was developed for polymeric materials used for parts in devices and appliances. The results are intended to serve as a preliminary indication of their acceptability with respect to flammability for a particular application. The final acceptance of the material is dependent upon its use in complete equipment that conforms with the standard applicable to such equipment.

1.3 The classification system described in the appendix is intended for quality assurance and the preselection of component materials for products.

1.4 The test method is not intended to cover plastics when used as materials for building construction or furnishing.

1.5 *This test method should be used to measure and describe the response of materials, products, or assemblies to heat and flame under controlled laboratory conditions and should not be used to describe or appraise the fire hazard for fire risk of materials, products, or assemblies under actual fire conditions. However, results of this test method may be used as elements of a fire risk assessment that takes into account all of the factors that are pertinent to an assessment of the fire hazard of a particular end use.*

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. For specific hazards statements, see 9.2.1.*

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.30 on Thermal Properties (Section D20.30.03).

Current edition approved July 10, 1998. Published January 1999. Originally published as D 635 – 41. Last previous edition D 635 – 97.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 648 Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load²

D 883 Terminology Relating to Plastics²

D 3801 Test Method for Measuring the Comparative Burning Characteristics of Solid Plastics in a Vertical Position³

D 5025 Specification for a Laboratory Burner Used for Small-Scale Burning Tests on Plastic Materials⁴

D 5207 Practice for Calibration of 20 and 125-mm Test Flames for Small-Scale Burning Tests on Plastic Materials⁴

E 176 Terminology of Fire Standards⁵

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁶

2.2 IEC Standards:

IEC 695-11-10 Determination of the Burning Behavior of Horizontal and Vertical Specimens in Contact with a 50 W Nominal Ignition Source⁷

2.3 ISO Standards:

ISO 1210-1992 Plastics—Determination of the Burning Behavior of Horizontal and Vertical Specimens in Contact with a Small-Flame Ignition Source⁷

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 Definitions used in this test method are in accordance with Terminology D 883, unless otherwise specified. For terms relating to fire, the definitions used in this test method are in accordance with Terminology E 176.

4. Summary of Test Method

4.1 A bar specimen of the material to be tested is supported horizontally at one end. The free end is exposed to a specified gas flame for 30 s. Time and extent of burning are measured

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.07.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

⁷ Publications of the International Electrotechnical Commission (IEC) and International Organization for Standardization (ISO) are available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., New York, NY 10036.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

D 635

and reported if the specimen does not burn 100 mm. An average burning rate is reported for a material if it burns to the 100 mm mark from the ignited end.

5. Significance and Use

5.1 Tests made on a material under conditions herein prescribed are of value in comparing the rate of burning or extent and time of burning characteristics, or both, of different materials, in controlling manufacturing processes, or as a measure of deterioration or change in these burning characteristics prior to or during use. Correlation with flammability under actual use conditions is not implied.

5.2 The rate of burning and other burning phenomena will be affected by such factors as density, pigments, any anisotropy of the material and the thickness of the specimen. Test data shall be compared only for specimens of similar thickness, whether comparisons are being made with the same or different materials. The rate of burning and other burning phenomena will vary with thickness.

5.3 It is feasible that sheet materials that have been stretched during processing will relax during burning and give erratic results unless they are first heated above their deflection temperature, in accordance with Test Method D 648, for a time sufficient to permit complete relaxation.

5.4 Burning tests require that certain variables be arbitrarily fixed, for example, specimen size, energy source and application time, and end points. Materials will be found that are unusually sensitive to one or more of the conditions chosen for this method leading to highly variable results. Additional burning characterization by other methods is highly desirable in such cases (see Note 2).

5.5 In this procedure, the specimens are subjected to specific laboratory test conditions. If different test conditions are substituted or the end-use conditions are changed, it will not always be possible by or from this test to predict changes in the fire-test-response characteristics measured. Therefore, the results are valid only for the fire-test-exposure conditions described in this procedure.

6. Apparatus

6.1 *Test Chamber*; enclosed laboratory hood, or chamber free of induced or forced draft during test, having an inside

volume of at least 0.5 m³. An enclosed laboratory hood with a heat-resistant glass window for observing the test and an exhaust fan for removing the products of combustion after the tests is recommended. The atmosphere in and around the test chamber shall be maintained between 15 to 35°C and 45 to 75 % relative humidity.

NOTE 3—The amount of oxygen available to support combustion is naturally important for the conduct of these fire-test-response tests. For tests conducted by this test method when burning times are protracted, chamber sizes less than 1 m³ may not provide accurate results.

NOTE 4—Some laboratory hoods have induced drafts even with the exhaust fan off. A positive-closing damper is recommended.

NOTE 5—A mirror in the chamber, to provide a rear view of the specimen, has been found useful in some enclosures.

6.2 *Test Fixture*, A laboratory ring stand or test fixture equipped with a means of holding a 125 mm² wire gauze horizontal and a small clamp permitting the specimen to be held with its longitudinal axis horizontal and its transverse axis inclined at 45 ± 2° angle as illustrated in Fig. 1.

NOTE 6—A pan of water may be placed on the floor of the hood in position to catch any burning particles that may drop during the test.

6.3 *Laboratory Burner*; constructed in accordance with Specification D 5025.

6.4 *Gas Supply*, a supply of technical-grade methane gas with suitable regulator and meter for uniform gas flow. Natural gas mixtures having an energy density of approximately 37 MJ/m³ have been found to provide similar results. However, technical-grade methane gas shall be used as the referee in cases of dispute.

6.5 *Wire Gauze*, 20-mesh (approximately 20 openings per 25 mm), made with 0.43 ± 0.03 mm diameter iron wire cut to approximately 125 mm², to sustain burning or glowing particles falling from the specimens.

6.6 *Timing Device*, accurate to 0.5 s.

6.7 *Scale*, graduated in millimeters.

6.8 *Micrometer*, accurate to 0.05 mm.

6.9 *Conditioning Room or Chamber*, capable of being maintained at 23 ± 2°C and 50 ± 5 % relative humidity.

6.10 *Flexible Specimen Support Fixture*, used to facilitate the testing of specimens that sag and touch the wire gauze. (See 9.4 and Fig. 2.)

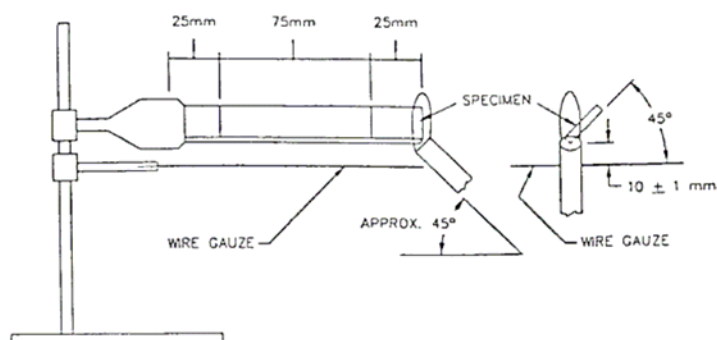
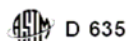


FIG. 1 Test Fixture



D 635

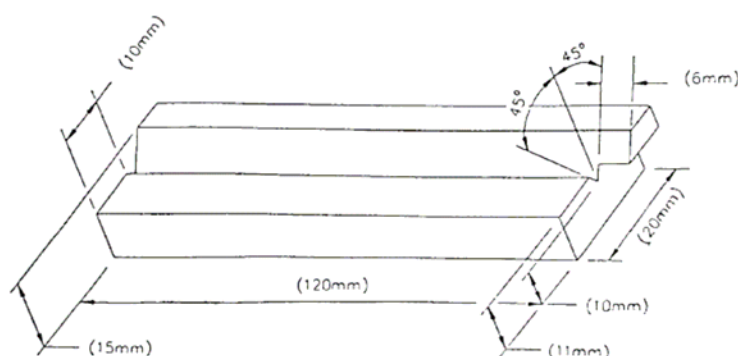


FIG. 2 Flexible Specimen Support Fixture

7. Test Specimens

7.1 All test specimens shall be cut from a representative sample of the material (sheet or end products), or shall be cast or injection-, compression-, transfer- or pultrusion-molded to the necessary form. After any cutting operation, care shall be taken to remove all dust and any particles from the surface; cut edges shall be fine sanded to have a smooth finish. Unless otherwise agreed, fabrication of test specimens shall be in accordance with the specifications of the material being tested.

7.2 Specimens shall be 125 ± 5 mm long by 13.0 ± 0.5 mm wide, and provided in the minimum thickness and in the $3.0 (-0.0 + 0.2)$ mm thickness. The 3.0 mm thick specimens are not necessary if the minimum thickness is greater than 3.0 mm, or the maximum thickness is less than 3.0 mm. The maximum thickness shall not exceed 13 mm. The maximum width shall not exceed 13.5 mm. The edges shall be smooth, and the radius on the corners shall not exceed 1.3 mm.

8. Conditioning

8.1 Condition ten bar specimens for each material and thickness to be tested in accordance with Test Method D 618 at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ and $50 \pm 5\%$ relative humidity for a minimum of 48 h. Once removed from the conditioning atmosphere test the specimens within 1 h.

8.2 Conduct testing in a laboratory atmosphere of 15 to 35°C and 45 to 75 % relative humidity.

9. Procedure

9.1 Prepare at least ten bar specimens. After measuring and recording the specimen thickness, mark each specimen with two lines perpendicular to the longitudinal axis of the bar, 25 ± 1 and 100 ± 1 mm from the end that is to be ignited.

9.2 Conduct the burning test in a chamber, enclosure, or laboratory hood free of induced or forced draft.

NOTE 7—Warning: Products of combustion may be toxic. An enclosed laboratory hood and an exhaust fan for removing the products of combustion after the tests are recommended. The exhaust fan is turned off during the test and turned on immediately following the test in order to remove products of combustion.

9.3 Clamp the specimen at the end farthest from the 25 mm reference mark, in a support with its longitudinal axis horizon-

tal and its transverse axis inclined at $45 \pm 2^\circ$ as illustrated in Fig. 1. Clamp the wire gauze horizontally beneath the specimen, with a distance of 10 ± 1 mm between the lowest edge of the specimen and the wire gauze, and with the free end of the specimen even with the edge of the gauze. Any material remaining on the wire gauze from the previous test must be burned off or a new section of wire gauze used for each test.

9.4 If the specimen sags at its free end during the initial set up and is not able to maintain the distance of 10 ± 1 mm as specified in 9.2, the flexible specimen support fixture illustrated in Fig. 2 shall be used. Position the support fixture under the specimen with the small extending portion of the support fixture at least 20 mm from the free end of the specimen. Provide enough clearance at the clamped end of the specimen so that the support fixture can be moved freely sideways. As the flame front progresses along the specimen, withdraw the support fixture at the same approximate rate, preventing the flame front from contacting the flexible specimen support fixture, so that there is no effect on the test flame or on the burning of the specimen.

9.5 With the central axis of the burner tuber in the vertical position, place the burner remote from the specimen, ignite, and adjust it to produce a blue flame 20 mm high. Adjust the gas supply and the air ports of the burner until a 20-mm yellow-tipped blue flame is produced, and then increase the air supply until the yellow tip just disappears. Measure the height of the flame. If the flame height is not 20 ± 2 mm, adjust the burner gas supply to give the proper flame height. Once the flame has been properly set to a height of 20 ± 2 mm wait for at least 5 min to allow the burner conditions to reach equilibrium.

NOTE 8—See Practice D 5207 for recommended back pressure and flow rate for the gas supply and calibration procedure for the 20 mm flame.

9.6 Place the burner so that the test flame impinges on the free end of the test specimen to a depth of approximately 6 mm starting the timing device simultaneously. The central axis of the burner tube is to be in the same vertical plane as the longitudinal bottom edge of the specimen and inclined toward the end of the specimen at an angle of approximately 45 ± 2 degrees to the horizontal. See Fig. 1. Apply the flame for 30 ± 1 s without changing its position. If the test specimen



shrinks from the applied flame without ignition, the material is not suitable for evaluation by these test methods. Excessive distortion of the specimen during the test will invalidate the results. Withdraw the test flame sufficiently from the specimen (see Note 9) so that there is no effect on the specimen after 30 ± 1 s or as soon as the flame front of the specimen reaches the 25 mm mark (if less than 30 s). Restart the timing device when the flame front reaches the 25 mm reference mark.

NOTE 9—Withdrawing the burner a distance of 150 mm from the specimen has been found satisfactory.

9.7 If the specimen continues to burn, with a flame or glowing combustion (visible glow without flame), after removal of the test flame, record the elapsed time (t), in seconds, for the flame front to travel from the 25 mm reference mark to the 100 mm reference mark and record the burned length (L), as 75 mm. If the flame front passes the 25 mm reference mark but does not reach the 100 mm reference mark, record the elapsed time (t), in seconds, and the burned length (L), in millimeters between the 25 mm reference mark and where the flame front stopped.

9.8 Repeat the test procedure (9.1-9.7) until three specimens have burned to or beyond the 100 mm reference mark, or ten specimens have been tested.

NOTE 10—For classification purposes, if only one specimen does not comply with the criteria, test an additional set of specimens. See X1.3.

10. Calculation

10.1 Calculate the linear burning rate (V), in millimeters per minute, for each specimen where the flame front reaches the 100 mm reference mark using the equation:

$$V = 60L/t$$

where:

L = the burned length, in millimetres, as defined in 9.7; and

t = the time, in seconds, as defined in 9.7.

NOTE 11—If the flame front reached the 100-mm reference mark, $L = 75$.

NOTE 12—The SI units of the linear burning rate is metre per second. In practice, the unit millimeter per minute is used.

NOTE 13—It is acceptable to report the results in cm/min by using the method prescribed in 10.1 and then dividing the obtained rate by ten.

10.2 Calculate the average linear burning rate or classify the

material in accordance with the appendix.

11. Report

11.1 Include the following in the complete report:

11.1.1 *Material Identification*—Include generic description, manufacturer, commercial designation, lot number, and color.

11.1.2 The thickness, as measured with a micrometer to the nearest 0.1 mm, of the test specimen.

11.1.3 The nominal apparent density (rigid cellular materials only).

11.1.4 The direction of any anisotropy relative to the test specimen dimensions.

11.1.5 Conditioning treatment.

11.1.6 Any prior treatment before testing, other than cutting, trimming and conditioning.

11.1.7 Whether or not the specimen continued to burn (with or without visible flame) after application of test flame.

11.1.8 Whether or not the flame front reached the 25 and 100 mm reference marks.

11.1.9 For specimens with which the flame front does not reach or pass the 25 mm reference mark, a statement that indicates the flame front did not reach or pass the 25 mm reference mark. Do not report an elapsed time (t) and burned length (L).

11.1.10 For specimens with which the flame front passed the 25 mm reference mark but did not reach the 100 mm reference mark, the elapsed time (t) and burned length (L).

11.1.11 If a specimen does not burn to the 100 mm mark because of dripping, flowing, or falling burning particles, the report must so indicate.

11.1.12 If a specimen is reignited by burning material on the gauze, the report must so state.

11.1.13 For specimens with which the flame front reached the 100 mm reference mark, the average linear burning rate, (V).

11.1.14 Whether the flexible specimen support fixture was used.

11.1.15 The caveat contained in 1.5 herein shall be incorporated in its entirety in the test report issued.

11.1.16 *Optional*—Flame classification as determined from the appendix.

TABLE 1 Average Linear Burning Rate for Specimens Tested Without Flexible Specimen Support Fixture

Material	Nominal Specimen Thickness, mm	Rate of Linear Burning, mm/min				
		Average	S_r^A	S_R^B	t^C	R^D
Polyethylene (PE)	3.0	15.2	0.7	1.3	1.9	3.7
ABS	3.2	27.9	2.1	4.1	5.7	11.5
Acrylic	3.0	29.7	1.7	2.2	4.9	6.1

^A S_r is the within-laboratory standard deviation for the indicated material. It is obtained by pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories:

$$S_r = [((s_1)^2 + (s_2)^2 \dots + (s_n)^2)/n]^{1/2}$$

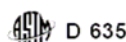
^B S_R is the between-laboratories reproducibility, expressed as stated deviation:

$$S_R = [S_r^2 + S_L^2]^{1/2}$$

where: S_L = the standard deviation of laboratory means.

^C t is the within-laboratory critical interval between two test results = $2.8 \times S_r$

^D R is the between-laboratories critical interval between two test results = $2.8 \times S_R$.



D 635

TABLE 2 Average Linear Burning Rate for Specimens Tested With Flexible Specimen Support Fixture

Material	Nominal Specimen Thickness, mm	Rate of Linear Burning, mm/min				
		Average	S_L^A	S_R^B	r^C	R^D
Polyurethane (PUR)	1.3	41.6	1.0	^E	2.9	^E
Polyurethane (PUR)	0.8	60.9	10.9	14.4	30.6	40.4
Polyurethane (PUR)	0.4	82.3	10.6	26.6	29.8	74.4
Polyethylene terephthalate (PET)	0.1	192.0	32.2	^E	123.7	^E

^A S_L = within-laboratory standard deviation for the indicated material. It is obtained by pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories, as follows:

$$S_L = [(s_1)^2 + (s_2)^2 \dots + (s_n)^2/n]^{1/2}$$

^B S_R = between-laboratories reproducibility, expressed as stated deviation, as follows:

$$S_R = [S_L^2 + S_L^2]^{1/2}$$

where S_L = the standard deviation of laboratory means.

^C r = within-laboratory critical interval between two test results = $2.8 \times S_L$.

^D R = between-laboratories critical interval between two test results = $2.8 \times S_R$.

^E The number of laboratories in the interlaboratory study reporting a linear burning rate was too small to establish a between-laboratory standard deviation.

12. Precision and Bias

12.1 Table 1 is based on a round robin completed in 1987⁸ in accordance with Practice E 691, involving three self-supporting materials tested by eleven laboratories. Each laboratory conditioned, at 23°C and 50 % relative humidity, the specimens that it tested. Each laboratory conducted the tests in a laboratory hood with the hood exhaust essentially turned off. All three materials were classified by the test as possessing an average burning rate. Each test result consisted of an average linear burning rate determined from three specimens. Each laboratory obtained three test results for each material.

12.2 Table 2 is based on a round robin completed in 1986⁹ in accordance with Practice 691, involving four materials that required use of the flexible specimen support fixture and tested by six different laboratories. For each material, all samples were provided by one source. The individual specimens were cut and distributed by one laboratory. Each laboratory conditioned, at 23°C and 50 % relative humidity, the specimens that it tested. Each test result consisted of an average linear burning rate determined from three specimens. Each laboratory obtained two average linear burning rates from a total six individual specimen test results for each material.

12.3 This test method does not contain a numerical precision and bias statement for the time of burning and extent of burning for specimens where the flame front passes the 25-mm reference mark, but does not reach the 100-mm reference mark, and therefore shall not be used as a referee test method for these two characteristics in case of dispute. Due to the rarity of materials which consistently produce this result, a numerical precision and bias statement for this type of test result is not being actively pursued at this time.

NOTE 14—Caution: The explanations of “ r ” and “ R ” given in 12.4.12.4.3 are only intended to present a meaningful way of considering the approximate precision of this test method. The data in Tables 1 and 2 shall not be rigorously applied to acceptance or rejection of material, as these data apply only to the materials tested in the round robin and are unlikely to be rigorously representative of other lots, formulations, conditions, materials or laboratories. Users of this test method shall apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their materials and laboratory (or between specific laboratories). The principles of 12.4-12.4.3 would then be valid for such data.

12.4 Concept of “ r ” and “ R ”—If S_L and S_R have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from testing three specimens for each test result, then:

12.4.1 Repeatability, r —Two test results obtained within one laboratory shall be judged not equivalent if they differ by more than the “ r ” value for the material. “ r ” is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day in the same laboratory.

12.4.2 Reproducibility, R —Two test results obtained from different laboratories shall be judged not equivalent if they differ by more than the “ R ” value for the material. “ R ” is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment in different laboratories.

12.4.3 Judgments in accordance with 12.4.1 and 12.4.2 have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

12.5 Bias—There are no recognized standards on which to base an estimate of bias for this test method.

13. Keywords

13.1 burning characteristics; combustion; extent of burning; flammability; HB; horizontal burning rate; plastics; rate of burning; small-scale burning test burning; time of burning

⁸ Supporting data for Table 1 are available from ASTM Headquarters. Request RR: D-20-1149.

⁹ Supporting data for Table 2 are available from ASTM Headquarters. Request RR: D-20-1146.



D 635

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. CLASSIFICATION SYSTEM FOR DETERMINING THE RELATIVE LINEAR RATE OF BURNING AND/OR EXTENT AND TIME OF BURNING OF PLASTICS

X1.1 General

X1.1.1 This appendix covers a classification system that shall be used to characterize the burning behavior of plastic materials, supported in a horizontal position, in response to a small-flame ignition source. The use of a category designation code is optional and is determined by examining the test results of materials tested by this method. Each category code represents a preferred range of performance levels that simplifies description in material designations or specifications and may assist certification bodies to determine compliance with applicable requirements.

X1.2 *Category Designation*—The behavior of specimens shall be classified HB (HB = horizontal burning) if,

X1.2.1 There is no visible signs of combustion after the ignition source is removed, or

X1.2.2 The flame front does not pass the 25 mm reference mark, or

X1.2.3 The flame front passes the 25 mm reference mark but does not reach the 100 mm reference mark, or

X1.2.4 The flame front reaches the 100 mm reference mark and the linear burning rate does not exceed 40 mm/min for specimens having a thickness between 3 and 13 mm or 75 mm/min for specimens having a thickness less than 3 mm.

X1.3 If only one specimen from the first set of specimens does not comply with the criteria indicated, another set of specimens is to be tested. All specimens from this second set shall comply with the criteria indicated in order for the material, of that thickness, to be classified as HB.

X1.4 Recording the category designation in the test report is optional.

SUMMARY OF CHANGES

Committee D-20 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue that may impact the use of this test method.

D 635 – 97:

- (1) Revisions were made to clarify the Scope.
- (2) An IEC/ISO equivalency statement was added.
- (3) Handling of specimens that are flexible was incorporated.
- (4) Permissive language was removed.
- (5) Specifications D 5207 for test-flame calibration was added.

(6) Calculations were updated.

(7) Precision and Bias information was clarified.

(8) The appendix was added.

D 635 – 98:

- (1) Revised 12.3 concerning precision and bias for specimens that do not burn to the 100-mm reference mark.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ภาคผนวก จ

มาตรฐาน ASTM C177-97



Designation: C 177 - 97

Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation C 177; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method establishes the criteria for the laboratory measurement of the steady-state heat flux through flat, homogeneous specimen(s) when their surfaces are in contact with solid, parallel boundaries held at constant temperatures using the guarded-hot-plate apparatus.

1.2 The test apparatus designed for this purpose is known as a guarded-hot-plate apparatus and is a primary (or absolute) method. This test method is comparable, but not identical, to ISO 8302.

1.3 This test method sets forth the general design requirements necessary to construct and operate a satisfactory guarded-hot-plate apparatus. It covers a wide variety of apparatus constructions, test conditions, and operating conditions. Detailed designs conforming to this test method are not given but must be developed within the constraints of the general requirements. Examples of analysis tools, concepts and procedures used in the design, construction, calibration and operation of a guarded-hot-plate apparatus are given in Refs (1-41).²

1.4 This test method encompasses both the single-sided and the double-sided modes of measurement. Both distributed and line source guarded heating plate designs are permitted. The user should consult the standard practices on the single-sided mode of operation, Practice C 1044, and on the line source apparatus, Practice C 1043, for further details on these heater designs.

1.5 The guarded-hot-plate apparatus can be operated with either vertical or horizontal heat flow. The user is cautioned however, since the test results from the two orientations may be different if convective heat flow occurs within the specimens.

1.6 Although no definitive upper limit can be given for the magnitude of specimen conductance that is measurable on a guarded-hot-plate, for practical reasons the specimen conductance should be less than 16 W/(m²K).

1.7 This test method is applicable to the measurement of a wide variety of specimens, ranging from opaque solids to porous or transparent materials, and a wide range of environmental conditions including measurements con-

ducted at extremes of temperature and with various gases and pressures.

1.8 Inhomogeneities normal to the heat flux direction, such as layered structures, can be successfully evaluated using this test method. However, testing specimens with inhomogeneities in the heat flux direction, such as an insulation system with thermal bridges, can yield results that are location specific and shall not be attempted with this type of apparatus. See Test Methods C 976 or C 236 for guidance in testing these systems.

1.9 Calculations of thermal transmission properties based upon measurements using this method shall be performed in conformance with Practice C 1045.

1.10 In order to ensure the level of precision and accuracy expected, persons applying this standard must possess a knowledge of the requirements of thermal measurements and testing practice and of the practical application of heat transfer theory relating to thermal insulation materials and systems. Detailed operating procedures, including design schematics and electrical drawings, should be available for each apparatus to ensure that tests are in accordance with this test method. In addition, automated data collecting and handling systems connected to the apparatus must be verified as to their accuracy. This can be done by calibration and inputting data sets, which have known results associated with them, into computer programs.

1.11 It is not practical for a test method of this type to establish details of design and construction and the procedures to cover all contingencies that might offer difficulties to a person without technical knowledge concerning theory of heat flow, temperature measurements and general testing practices. The user may also find it necessary, when repairing or modifying the apparatus, to become a designer or builder, or both, on whom the demands for fundamental understanding and careful experimental technique are even greater. Standardization of this test method is not intended to restrict in any way the future development of new or improved apparatus or procedures.

1.12 This test method does not specify all details necessary for the operation of the apparatus. Decisions on sampling, specimen selection, preconditioning, specimen mounting and positioning, the choice of test conditions, and the evaluation of test data shall follow applicable ASTM Test Methods, Guides, Practices or Product Specifications or governmental regulations. If no applicable standard exists, sound engineering judgment that reflects accepted heat transfer principles must be used and documented.

1.13 This test method allows a wide range of apparatus

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-16 on Thermal Insulation and is the direct responsibility of Subcommittee C16.30 on Thermal Measurement.

Current edition approved Feb. 10, 1997. Published June 1997. Originally published as C 177 - 42. Last previous edition C 177 - 85 (1993).

² The boldface numbers given in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

C 177

design and design accuracy to be used in order to satisfy the requirements of specific measurement problems. Compliance with this test method requires a statement of the uncertainty of each reported variable in the report. A discussion of the significant error factors involved is included.

1.14 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only. Either SI or Imperial units may be used in the report, unless otherwise specified.

1.15 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. Specific precautionary statements are given in Note 22.

1.16 Major sections within this test method are arranged as follows:

Section	Section
Scope	1
Referenced Documents	2
Terminology	3
Summary of Test Method	4
Significance and Use	5
Apparatus	6
Specimen Preparation and Conditioning	7
Procedure	8
Calculation of Results	9
Report	10
Precision and Bias	11
Keywords	12
Figures	
General Arrangement of the Mechanical Components of the Guarded-Hot-Plate Apparatus	Fig. 1
Illustration of Heat Flow in the Guarded-Hot-Plate Apparatus	Fig. 2
Example Report Form	Fig. 3
Annexes	
Importance of Thickness	A1.1
Measuring Thickness	A1.2
Limitations Due to Apparatus	A1.3
Limitations Due to Temperature	A1.4
Limitations Due to Specimen	A1.5
Random and Systematic Error Components	A1.6
Error Components for Variables	A1.7
Thermal Conductance or Thermal Resistance Error Analysis	A1.8
Thermal Conductivity or Thermal Resistivity Error Analysis	A1.9
Uncertainty Verification	A1.10

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- C 167 Test Methods for Thickness and Density of Blanket or Batt Thermal Insulations³
- C 168 Terminology Relating to Thermal Insulating Materials³
- C 236 Test Method for Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box³
- C 518 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus³
- C 687 Practice for Determination of Thermal Resistance of Loose-Fill Building Insulation³
- C 976 Test Method for Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Calibrated Hot Box³

C 1043 Practice for Guarded-Hot-Plate Design Using Circular Line-Heat Sources³

C 1044 Practice for Using the Guarded-Hot-Plate Apparatus in the One-Sided Mode to Measure Steady-State Heat Flux and Thermal Transmission Properties³

C 1045 Practice for Calculating Thermal Transmission Properties from Steady-State Heat Flux Measurements³

C 1058 Practice for Selecting Temperatures for Evaluating and Reporting Thermal Properties of Thermal Insulation³

E 230 Specification for Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples⁴

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁵

2.2 ISO Standard:

ISO 8302 Thermal Insulation—Determination of Steady-State Areal Thermal Resistance and Related Properties—Guarded-Hot-Plate Apparatus⁶

2.3 ASTM Adjuncts:

Table of Theoretical Maximum Thickness of Specimens and Associated Errors⁷

Descriptions of Three Guarded-Hot-Plate Designs⁷

Line-Heat-Source Guarded Hot-Plate Apparatus⁸

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 For definitions of terms and symbols used in this test method, refer to Terminology C 168 and the following subsections.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *auxiliary cold surface assembly, n*—the plate that provides an isothermal boundary at the outside surface of the auxiliary insulation.

3.2.2 *auxiliary insulation, n*—insulation placed on the back side of the hot-surface assembly, in place of a second test specimen, when the single sided mode of operation is used. (Synonym—backflow specimen.)

3.2.3 *cold surface assembly, n*—the plates that provide an isothermal boundary at the cold surfaces of the test specimen.

3.2.4 *controlled environment, n*—the environment in which an apparatus operates.

3.2.5 *guard, n*—promotes one-dimensional heat flow. Primary guards are planar, additional coplanar guards can be used and secondary or edge guards are axial.

3.2.6 *guarded-hot-plate apparatus, n*—an assembly, consisting of a hot surface assembly and two isothermal cold surface assemblies.

3.2.7 *guarded-hot-plate, n*—the inner (rectangular or circular) plate of the hot surface assembly, that provides the heat input to the metered section of the specimen(s).

3.2.8 *hot surface/assembly, n*—the complete center assembly providing heat to the specimen(s) and guarding for the meter section.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.03.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

⁶ Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.

⁷ Available from ASTM Headquarters, Request PCN No. 12-301770-00.

⁸ Available from ASTM Headquarters, Request PCN No. 12-310430-61.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.06.

3.2.9 *metered section, n*—the portion of the test specimen (or auxiliary insulation) through which the heat input to the guarded-hot-plate flows under ideal guarding conditions.

3.2.10 *mode, double-sided, n*—operation of the guarded-hot-plate apparatus for testing two specimens, each specimen placed on either side of the hot surface assembly.

3.2.11 *mode, single-sided, n*—operation of the guarded-hot-plate apparatus for testing one specimen, placed on one side of the hot-surface assembly.

3.2.12 *thermal transmission properties, n*—those properties of a material or system that define the ability of a material or system to transfer heat such as thermal resistance, thermal conductance, thermal conductivity and thermal resistivity, as defined by Terminology C 168.

3.3 *Symbols*—The symbols used in this test method have the following significance:

- 3.3.1 ρ_m —specimen metered section density, kg/m³.
- 3.3.2 ρ_s —specimen density, kg/m³.
- 3.3.3 λ —thermal conductivity, W/(m K).
- 3.3.4 σ —Stefan-Boltzmann constant, W/m² K⁴.
- 3.3.5 A —metered section area normal to heat flow, m².
- 3.3.6 A_g —area of the gap between the metered section and the primary guard, m².
- 3.3.7 A_m —area of the actual metered section, m².
- 3.3.8 A_s —area of the total specimen, m².
- 3.3.9 C —thermal conductance, W/(m² K).
- 3.3.10 C_i —the specific heat of the *i*th component of the metered section, J/(kg K).
- 3.3.11 dT/dt —potential or actual drift rate of the metered section, K/s.
- 3.3.12 λ_g —thermal conductivity of the material in the primary guard region, W/(m K).
- 3.3.13 L —in-situ specimen thickness, m.
- 3.3.14 m —mass of the specimen in the metered section, kg.
- 3.3.15 m_i —the mass of the *i*th component, kg.
- 3.3.16 m_s —mass of the specimen, kg.
- 3.3.17 Q —heat flow rate in the metered section, W.
- 3.3.18 q —heat flux (heat flow rate per unit area), Q , through area, A, W/m².
- 3.3.19 Q_{ge} —lateral edge heat flow rate between primary Guard and Controlled Environment, W.
- 3.3.20 Q_{gp} —lateral heat flow rate across the gap, W.
- 3.3.21 Q_{gs} —guard heat flow through Specimen, W.
- 3.3.22 Q_{se} —edge heat flow between Specimen and Controlled Environment, W.
- 3.3.23 R —thermal resistance, m² K/W.
- 3.3.24 ΔT —temperature difference across the specimen, $T_h - T_c$.
- 3.3.25 T_c —cold surface temperature, K.
- 3.3.26 T_h —hot surface temperature, K.
- 3.3.27 T_m —mean temperature, K, $(T_h + T_c)/2$.

4. Summary of Test Method

4.1 Figure 1 illustrates the main components of the idealized system: two isothermal cold surface assemblies and a guarded-hot-plate. The guarded-hot-plate is composed of a metered section thermally isolated from a concentric primary guard by a definite separation or gap. Some apparatus may have more than one guard. The test specimen is sandwiched between these three units as shown in Fig. 1. In

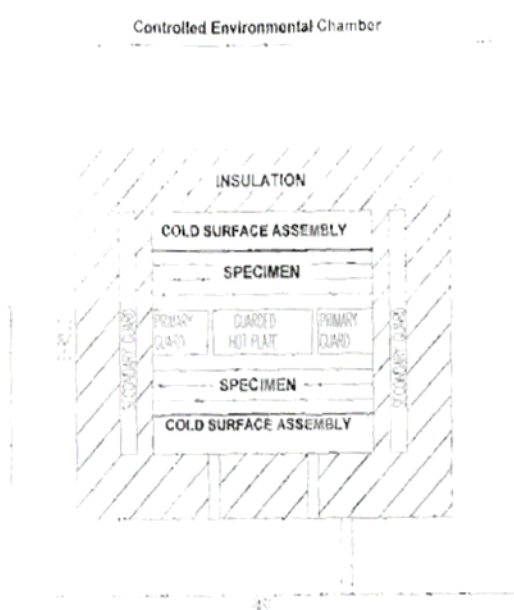


FIG. 1 General Arrangement of the Mechanical Components of the Guarded-Hot-Plate Apparatus

the double-sided mode of measurement, the specimen is actually composed of two pieces. The measurement in this case produces a result that is the average of the two pieces and therefore it is important that the two pieces be closely identical. For guidance in the use of the one-sided mode of measurement, the user is directed to Practice C 1044. For guidance in the use of a guarded-hot-plate incorporating the use of a line source heater, refer to Practice C 1043.

4.1.1 The guarded-hot-plate provides the power (heat flow per unit time) for the measurement and defines the actual test volume, that is, that portion of the specimen that is actually being measured. The function of the primary guard, and additional coplanar guard where applicable, of the guarded-hot-plate apparatus is to provide the proper thermal conditions within the test volume to reduce lateral heat flow within the apparatus. The proper (idealized) conditions are illustrated in Fig. 1 by the configuration of the isothermal surfaces and lines of constant heat flux within the specimen.

4.1.2 Deviations from the idealized configuration are caused by: specimen inhomogeneities, temperature differences between the metered section and the guard (gap imbalance), and temperature differences between the outer edge of the assembly and the surrounding controlled environment (edge imbalance). These experimental realities lead to heat flow measurements that are too small or too large because the power supplied to the metered section is not exactly equal to that which flows through the specimen in the metered section. The resulting qualitative heat flows are depicted in Fig. 2.

4.2 The three heating/cooling assemblies are designed to create isothermal surfaces on the faces of the specimens within the metered section. The two surfaces designated as the cold surface assemblies are adjusted to the same temperature for the double-sided mode of operation. In practice,

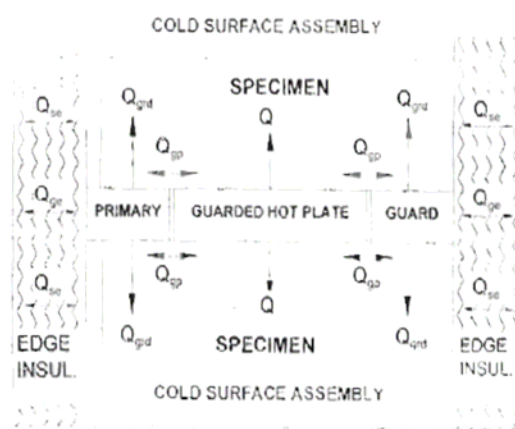


FIG. 2 Illustration of Idealized Heat Flow in a Guarded-Hot-Plate Apparatus

because the plates and specimens are of finite dimensions, and because the external controlled environment is often at a temperature different from the edge of the metered section, some lateral heat flow occurs. The primary guard for the guarded hot plate limits the magnitude of the lateral heat flow in the metered section. The effectiveness of the primary guard is determined, in part, by the ratio of its lateral dimension to that of the metered section and to the specimen thickness (6,7,8,20,31).

4.3 Compliance with this test method requires: the establishment of steady-state conditions, and the measurement of the unidirectional heat flow Q in the metered section, the metered section area A , the temperature gradient across the specimen, in terms of the temperature T_h of the hot surface and the temperature T_c of the cold surface, (or equivalently, the temperature T between the two surfaces), the thickness L_s and L_g of each specimen, and guard balance between the metered section and primary guard.

5. Significance and Use

5.1 This test method covers the measurement of heat flux and associated test conditions for flat specimens. The guarded-hot-plate apparatus is generally used to measure steady-state heat flux through materials having a "low" thermal conductivity and commonly denoted as "thermal insulators." Acceptable measurement accuracy requires a specimen geometry with a large ratio of area to thickness.

5.2 Two specimens are selected with their thickness, areas, and densities as identical as possible, and one specimen is placed on each side of the guarded-hot-plate. The faces of the specimens opposite the guarded-hot-plate and primary guard are placed in contact with the surfaces of the cold surface assemblies.

5.3 Steady-state heat transmission through thermal insulators is not easily measured, even at room temperature. This is because heat may be transmitted through a specimen by any or all of three separate modes of heat transfer (radiation, conduction, and convection); any inhomogeneity or anisotropy in the specimen may require special experimental precautions to measure that flow of heat; hours or even days may be required to achieve the thermal steady-state; no

guarding system can be constructed to force the metered heat to pass only through the test area of insulation specimen being measured; moisture content within the material may cause transient behaviour; and physical or chemical change in the material with time or environmental condition may permanently alter the specimen.

5.4 Application of this test method on different test insulations requires that the designer make choices in the design selection of materials of construction and measurement and control systems. Thus there may be different designs for the guarded-hot-plate apparatus when used at ambient versus cryogenic or high temperatures. Test thickness, temperature range, temperature difference range, ambient conditions and other system parameters must also be selected during the design phase. Annex A1 is referenced to the user, which addresses such issues as limitations of the apparatus, thickness measurement considerations and measurement uncertainties, all of which must be considered in the design and operation of the apparatus.

5.5 Apparatus constructed and operated in accordance with this test method should be capable of accurate measurements for its design range of application. Since this test method is applicable to a wide range of specimen characteristics, test conditions, and apparatus design, it is impractical to give an all-inclusive statement of precision and bias for the test method. Analysis of the specific apparatus used is required to specify a precision and bias for the reported results. For this reason, conformance with the test method requires that the user must estimate and report the uncertainty of the results under the reported test conditions.

5.6 Qualification of a new apparatus. When a new or modified design is developed, tests shall be conducted on at least two materials of known thermal stability and having verified or calibrated properties traceable to a national standards laboratory. Tests shall be conducted for at least two sets of temperature conditions that cover the operating range for the apparatus. If the differences between the test results and the national standards laboratory characterization are determined to be significant, then the source of the error shall, if possible, be identified. Only after successful comparison with the certified samples, can the apparatus claim conformance with this test method. It is recommended that checks be continued on a periodic basis to confirm continued conformance of the apparatus.

5.7 The thermal transmission properties of a specimen of material: may vary due to the composition of the material; may be affected by moisture or other environmental conditions; may change with time or temperature exposure; may change with thickness; may change with temperature difference across the specimen; or may change with mean temperature. It must be recognized, therefore, that the selection of a representative value of thermal transmission properties for a material must be based upon a consideration of these factors and an adequate amount of test information.

5.8 Since both heat flux and its uncertainty may be dependent upon environmental and apparatus test conditions, as well as intrinsic characteristics of the specimen, the report for this test method shall include a thorough description of the specimen and of the test conditions.

5.9 The results of comparative test methods such as Test Method C 518 depend on the quality of the heat flux

 C 177

reference standards. The apparatus in this test method is one of the absolute methods used for generation of the reference standards. The accuracy of any comparative method can be no better than that of the referenced procedure. While the precision of a comparative method such as Test Method C 518 may be comparable with that of this test method, Test Method C 518 cannot be more accurate. In cases of dispute, this test method is the recommended procedure.

6. Apparatus

6.1 A general arrangement of the mechanical components of such a guarded-hot-plate apparatus is illustrated in Fig. 1. This consists of a hot surface assembly comprised of a metered section and a primary guard, two cold surface assemblies, and secondary guarding in the form of edge insulation, a temperature-controlled secondary guard(s), and often an environmental chamber. Some of the components illustrated in Fig. 1 are omitted in systems designed for ambient conditions, although a controlled laboratory environment is still required; edge insulation and the secondary guard are typically used only at temperatures that are more than $\pm 10^{\circ}\text{C}$ (20°F) from ambient. At ambient conditions, the environmental chamber is recommended to help eliminate the effects of air movement within the laboratory and to help ensure that a dry environment is maintained.

6.1.1 The purpose of the hot surface assembly is to produce a steady-state, one-dimensional heat flux through the specimens. The purpose of the edge insulation, secondary guard, and environmental chamber is to restrict heat losses from the outer edge of the primary guard. The cold surface assemblies are isothermal heat sinks for removing the energy generated by the heating units; the cold surface assemblies are adjusted so they are at the same temperature.

6.2 *Design Criteria*—Establish specifications for the following specifications prior to the design. Various parameters influence the design of the apparatus and shall be considered throughout the design process, maximum specimen thickness; range of specimen thermal conductances; range of hot surface and cold surface temperatures; characteristics of the specimens (that is, rigidity, density, hardness); orientation of the apparatus (vertical or horizontal heat flow); and required accuracy.

6.3 *Hot Surface Assembly*—The hot surface assembly consists of a central metered section and a primary guard. The metered section consists of a metered section heater sandwiched between metered section surface plates. The primary guard is comprised of one or more guard heaters sandwiched between primary guard surface plates. The metered section and primary guard shall be thermally isolated from each other by means of a physical space or gap located between the sections. The hot surface assembly using a line-heat-source is covered in Practice C 1043.

NOTE 1—The primary guard, in some cases, is further divided into two concentric sections (double guard) with a gap separator to improve the guard effectiveness.

6.3.1 *Requirements*—The hot surface assembly shall be designed and constructed to satisfy the following minimum requirements during operation.

6.3.1.1 The maximum departure from a plane for any surface plate shall not exceed 0.025 % of the linear dimension of the metered section during operation.

NOTE 2—Planeness of the surface can be checked with a metal straightedge held against the surface and viewed at grazing incidence with a light source behind the straightedge. Departures as small as 2.5 μm are readily visible, and large departures can be measured using shim-stock, thickness gages or thin paper.

6.3.1.2 The average temperature difference between the metered section surface plate and the primary guard surface plate shall not exceed 0.2 K. In addition, the temperature difference across any surface plate in the lateral direction shall be less than 2 % of the temperature difference imposed across the specimen.

NOTE 3—When qualifying the apparatus, additional temperature sensors shall be applied to the surface plates of the metered section and primary guards that verify that the requirements of 6.3.1.2 are satisfied.

6.3.1.3 The surfaces of the metered and primary guard surface plates that are in contact with the test specimen shall be treated to maintain a total hemispherical emittance greater than 0.8 over the entire range of operating conditions.

NOTE 4—At high temperatures the importance of high emittance of the surfaces adjacent to the specimens cannot be stressed too strongly since radiative heat transfer predominates in many materials as the temperature increases.

6.3.1.4 The metered section and primary guard surface plates shall remain planar during the operation of the apparatus. See 6.3.1.1.

6.3.2 *Materials*—The materials used in the construction of the hot surface assembly shall be carefully chosen after considering the following material property criteria.

6.3.2.1 *Temperature Stability*—Materials are selected for the heaters and surface plates that are dimensionally and chemically stable and suitably strong to withstand warpage and distortion when a clamping force is applied. For modest temperatures, electric resistance heaters embedded in silicone have been successfully employed; at higher temperatures, heating elements sandwiched between mica sheets or inserted into a ceramic core have been used. Surface plates for hot surface assemblies used at modest temperatures have been fabricated from copper and aluminum. High purity nickel alloys have been used for higher temperature applications.

6.3.2.2 *Thermal Conductivity*—To reduce the lateral temperature differences across the metered and primary guard surface plates, fabricate these plates from materials that possess a high thermal conductivity for the temperature and environmental conditions of operation. Copper and aluminum are excellent choices for modest temperature applications; at higher temperatures consider using nickel, high purity alumina or aluminum nitride. These are examples of materials used and the operator must fully understand the thermal conductivity versus temperature dependency of the materials selected.

6.3.2.3 *Emittance*—To obtain a uniform and durable high surface emittance in the desired range, select a surface plate material or suitable surface treatment, or both. For modest temperature applications, high emittance paints may be employed. Aluminum can be anodized to provide the necessary high emittance. For high temperature applications, most ceramics will inherently satisfy this requirement while nickel surface plates can be treated with an oxide coating.

6.3.2.4 *Temperature Uniformity*—Select a heating ele-

ment design that will supply the necessary heat flux density for the range of specimen thermal conductivities to be investigated. The design of the heating element shall also consider the heat flux distribution of the surface of the heating element. Most apparatus incorporate the use of a distributed electric resistance heating element dispersed uniformly across the metered section and the primary guard. The surface plates and heating elements shall be clamped or bolted together in a uniform manner such that the temperature difference requirements specified in 6.3.1.2 are satisfied. Bolting the composite constructions together has been found satisfactory.

6.3.2.5 The insertion of insulating sheets between the heating elements and surface plates (that is, to mount a gap temperature imbalance detector) is allowed. To satisfy the requirements of 6.3.1.2, similar sheets shall be mounted between the heating element and the opposing surface plate.

6.3.2.6 *Hot Surface Assembly Size*—Design criteria established in 6.2 will determine the size of the apparatus. The size of the metered section shall be large enough so that the amount of specimen material in contact with the metered section (and therefore being measured) can be considered representative of the material being tested.

6.3.2.7 After determining the maximum specimen thickness that will be tested by this design, refer to Adjunct, Table of Theoretical Maximum Thickness of Specimens and Associated Errors, regarding associated errors attributable to combinations of metered section size, primary guard width, and specimen thickness.

NOTE 5—Typically the width of the primary guard equal to approximately one-half of the linear dimension of the metered section has been found to reduce edge heat loss to acceptable levels.

6.3.2.8 *Heat Capacitance*—The heat capacity of the hot surface assembly will impact the time required to achieve thermal equilibrium. Selecting materials with a low specific heat will increase the responsiveness of the apparatus. The thickness of the surface plates needs to be carefully considered; thick plates assist in reducing lateral temperature distributions but reduce responsiveness. A balance between these requirements is needed.

6.4 *The Gap*—The metered section and the primary guard shall be physically separated by a gap. The gap provides a lateral thermal resistance between these sections of the hot surface assembly. The area of the gap in the plane of the surface plates shall not be more than 5 % of the metered section area.

6.4.1 The heater windings from the metered section and primary guard heating elements shall be designed to create a uniform temperature along the gap perimeter.

6.4.2 The metered section area shall be determined by measurements to the center of the gap that surrounds this area, unless detailed calculations or tests are used to define this area more precisely.

6.4.3 Any connections between the metered section and the primary guard shall be designed to minimize heat flow across the gap. If a mechanical means is used to satisfy the requirements of 6.3.1.4, these connections shall be fabricated with materials having a high thermal resistance. Instrumentation or heater leads that cross the gap should be fabricated with fine-gage wire and traverse the gap at an oblique angle.

6.4.4 The gap may be filled with a fibrous insulation.

Packing the gap with this insulation has been found to maintain the metered section and primary guard surface plates planar. An additional benefit of this practice for high temperature applications is that the densely packed insulation reduces the amount of heat conducted across the gap spacing.

6.5 *Cold Surface Assembly*—The cold surface assembly consists of a single temperature controlled section and is comprised of a cold surface heater sandwiched between cold surface plates and a heat sink. It is recommended that the size of the cold surface assembly be identical to the hot surface assembly, including the primary guard. Cold surface assemblies may be constructed with a gap where operation of the apparatus is susceptible to edge loss effects. This design is the ideal design, however, this assembly has traditionally been constructed without a gap with great success.

NOTE 7—The temperature of the cold surface assembly may be maintained through the use of a temperature-controlled bath; in this instance, there is no need to install a cold surface heater. Care must be taken in this instance; the flow rate of the bath must be sufficient to satisfy the temperature uniformity requirements specified in 6.3.1.2 and 6.5.1.

6.5.1 *Requirements*—The cold surface assemblies shall be designed and constructed to satisfy all of the requirements of 6.3.1 except that, since only one surface plate of each cold surface assembly is in contact with the test specimens, the requirement that specifies the temperature difference between the surface plates shall not apply.

6.5.2 *Materials*—The criteria to select materials that will be used in the construction of the cold surface assemblies are identical to the hot surface assembly and are listed in 6.3.2.

6.5.3 *High Temperature Operation*—When the cold surface assemblies will be operated at high temperatures, several thin sheets of insulation may be inserted between the heat sink and cold surface heater. The addition of these insulation sheets will reduce the energy requirements to the cold surface heater and extend service life.

6.6 *Additional Edge Loss Protection*—Deviation from one-dimensional heat flow in the test specimen is due to non-adiabatic conditions at the edges of the hot surface assembly and the specimens. This deviation is greatly increased when the apparatus is used at temperatures other than ambient. When the guarded-hot-plate apparatus is operated at temperatures that deviate from ambient by more than 10°C (20°F), the apparatus shall be outfitted with additional components to reduce edge losses. These components are described in the following sections and shall be used if edge losses cannot be minimized.

NOTE 8—Another means of assessing whether edge insulation is required is to attach a temperature sensor to the mid-height of the exterior edge of the specimen. Sufficient edge insulation is present if the edge temperature, T_e , satisfies the following requirement.

$$(T_e - T_m)/\Delta T < 0.05 \quad (1)$$

6.6.1 *Secondary Guard*—To reduce heat exchange between the edges of the guarded-hot-plate and the environment, the guarded-hot-plate shall be outfitted with a co-axial temperature-controlled container referred to as the secondary guard. The secondary guard will be employed to adjust the ambient temperature to approximate the mean temperature of the test specimen.

6.6.1.1 *Size*—The secondary guard should have an inner dimension that is at least twice the dimension of the hot surface heater and the height should be equal to the thickness of the hot surface heater plus twice the thickness of the thickest specimen that will be tested.

6.6.1.2 *Materials*—The materials used in the construction of the secondary guard are not as critical as those selected for the hot and cold surface assemblies. However, the materials used in the design of the secondary guard shall be selected so that they are thermally stable over the intended temperature range, the heating element shall be capable of producing the necessary heat flux density to adjust the ambient temperature, and a means of cooling the secondary guard is required if the apparatus is intended for use at temperatures below the laboratory ambient. The use of high thermal conductivity metals is recommended for the construction since the secondary guard should be isothermal.

NOTE 9—Successful secondary guard designs consist of a sheathed heater wire or cable wrapped around an adequately-sized metal tube and pressed against the metal tube with another sheet of metal. For low-temperature operation, a cooling coil has been wrapped around the exterior surface of the secondary guard.

6.6.1.3 *Location*—The secondary guard shall be positioned around the hot surface assembly such that a uniform spacing is created between the components. The height of the secondary guard shall be adjusted such that the mid-height of the secondary guard is aligned with the center of the hot surface assembly thickness.

6.6.2 *Edge Insulation*—The interspace between the hot and cold surface assemblies, specimens and the secondary guard shall be filled with an insulating material. Due to the complex shapes of this interspace, a powder or fibrous insulation is recommended.

6.6.2.1 The selection of an edge insulation material will depend on the test conditions. Vermiculite is easy to use but should not be employed at temperatures above 540°C (1000°F) because its thermal conductivity increases dramatically with temperature.

NOTE 10—Avoid the use of vermiculite when the guarded-hot-plate is used to evaluate specimens in different gaseous environments; vermiculite is extremely hygroscopic and the system is difficult to evacuate when it is used.

NOTE 11—Care shall be taken to ensure that there are no voids, pockets, or other extraneous sources of radiative heat transfer occurring at or near the guarded-hot-plate.

6.6.3 *Enclosure*—The guarded-hot-plate shall be placed inside an enclosure when the apparatus is used in to maintain a gaseous environment that is different than the laboratory ambient.

6.6.3.1 For low-temperature operation, a dry gas environment shall be used to prevent condensation from occurring on the cold surface assemblies and specimens.

6.6.3.2 For high temperature operation, it may be desirable to protect the apparatus from severe degradation by using a non-oxidizing gas.

6.6.3.3 The enclosure can also be used for substituting different gaseous environments and control of the ambient pressure.

6.7 *Clamping Force*—A means shall be provided for imposing a reproducible constant clamping force on the guarded-hot-plate to promote good thermal contact between

the hot and cold surface assemblies and the specimens and to maintain accurate spacing between the hot and cold surface assemblies. It is unlikely that a force greater than 2.5 kPa (50 lb/ft²) will be required for the majority of insulating materials. In the case of compressible materials, a constant pressure arrangement is not needed and spacers between the plates may be necessary to maintain constant thickness.

6.7.1 A steady force, that will thrust the cold surface assemblies toward each other can be imposed by using constant-force springs or an equivalent method.

6.7.2 For compressible specimens, spacers are required if the test thickness can not be measured by other means. The spacers shall be small in cross-section and located near the exterior perimeter of the primary guard. Avoid placing spacers on surfaces where underlying sensors are being used to measure plate conditions.

NOTE 12—Because of the changes of specimen thickness possible as a result of temperature exposure, or compression by the plates, it is recommended that, when possible, specimen thickness be measured in the apparatus at the existing test temperature and compression conditions. Gaging points, or measuring studs along the outer perimeter of the cold surface assemblies, will serve for these measurements. The effective combined specimen thickness is determined by the average difference in the distance between the gaging points when the specimen is in place in the apparatus and when it is not in place.

6.8 Temperature Measurements:

6.8.1 *Imbalance Detectors*—A suitable means shall be provided to detect the average temperature imbalance between surface plates of the metering section and the primary guard.

6.8.1.1 *Sensors*—The gap region shall be instrumented with temperature sensors to monitor and control the average temperature imbalance across the gap. Fine-gage thermocouples connected as thermopiles are often used for this purpose, although other temperature control sensors, such as thermistors, have been used. Highly alloyed thermocouples, rather than pure metals, should be used to maximize the thermal resistance across the gap. Because of nonuniform heat flux within the surface plates, temperature imbalance is not always constant along the gap perimeter. It has been found that with proper design the thermal conductance of the wires crossing the gap can be made relatively small and, therefore, a large number of thermocouples can be used to increase the gap imbalance sensitivity. It is not uncommon to use ten or more sensing elements.

6.8.1.2 *Sensitivity*—The detection system shall be sufficiently sensitive to ensure that variation in measured properties due to gap temperature imbalance shall be restricted to not more than 0.5 % of the metered section power, as determined experimentally or analytically.

NOTE 13—The sensitivity of many temperature sensors is reduced drastically at temperatures below the laboratory ambient. Particular care must be used in designing thermopile measurement systems to operate under these conditions.

6.8.1.3 *Location*—When using only a minimum number of sensing elements along the gap, the most representative positions to detect the average balance for a square plate are those at a distance from the corners equal to one-fourth of the side of the metering area. The corners and the axes should be avoided. For a round plate, the sensors should be spaced equally around the gap.

6.8.1.4 Electrically isolated gap imbalance sensors should be placed on both surface plates of the guarded heating unit to average the imbalance on both faces of the heating unit.

6.8.1.5 Thermal junctions or other sensitive elements should each be located in similar areas of the hot surface assembly. It is suggested that all junctions should be located at points directly adjacent to the centers of the areas between heater windings. Any leads crossing the gap should be thermally anchored to the primary guard to provide a heat sink from external thermal variations. In some instances it may be desirable to provide a heat sink for these leads outside the primary guard to minimize any radial heat flow.

6.8.2 *Temperature Sensors*—Methods possessing adequate accuracy, such as thermistors, thermocouples, diodes and precision resistance thermometers may be used for the measurement of temperatures in the apparatus. Thermocouples are the most widely used detector due to their wide range of applicability and accuracy. The goal is to measure the temperature gradient within the specimen, and the method chosen (sensors mounted on the specimen surface, in grooves, or between interior layers) should be that which yields the highest accuracy in the measurement of the temperature gradient. A discussion of these alternatives is provided in 6.8.2.3 and 6.8.2.4.

6.8.2.1 *Use of Thermocouples*—Precautions should be used to minimize spurious voltages in temperature control and measuring circuits. Spurious voltages, due to wire inhomogeneities, generally increase as the temperature gradients within the measuring leads increase. For the same reason, junctions between dissimilar metal leads should not be made in the regions of appreciable temperature gradients. Low thermal emf switches should be used in the temperature measurement circuits. An insulated, isothermal box of heavy sheet metal can be used when joining leads of dissimilar metals in the thermocouple circuit. It is recommended that all connections of thermocouple wire to copper wire be accomplished within the isothermal box in order that the junctions are at the same temperature; then the copper, not the thermocouple, leads are connected to the needed switching devices and/or voltmeters.

6.8.2.2 *Accuracy*—Thermocouples whose outputs are used to calculate thermal transmission properties shall be fabricated from either calibrated thermocouple wire or wire that has been certified by the supplier, and shall have a standard limit of error equal to or less than the specifications of Tables E 230. The resulting error in temperature differences due to distortion of the heat flow around the sensor, to sensor drift, and other sensor characteristics shall be less than 1 %.

6.8.2.3 *Methods of Attachment*—The surface temperatures of the specimens are most often measured by means of permanently mounted thermocouples placed in grooves cut into the surface plates. Precautions shall be taken to ensure that the thermocouple is thermally anchored to the surface being measured. This method of instrumentation is employed when the contact resistance between the specimen and the surface plates is a small fraction of the specimen thermal resistance. The hot- and cold-surface assembly plate sensors on each side are sometimes connected differentially. Thermocouples mounted in this manner shall be made of wire not larger than 0.6 mm in diameter for large apparatus

and preferably not larger than 0.2 mm for small apparatus.

NOTE 14—This method of deploying thermocouples is traditionally used for compressible specimens and for rigid specimens possessing flat surfaces that have a thermal resistance of greater than $0.2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ($1 \text{ h ft}^2 \text{ F/Btu}$) at ambient conditions.

NOTE 15—For rigid specimens not satisfying the requirements of 6.8.2.2, two techniques for attaching temperature sensors are recommended. Small grooves may be cut into the surfaces of the specimens and thermocouples can be affixed into these grooves. As an alternative, thermocouples may be installed onto the surfaces of the specimen and thin sheets of a compressible homogeneous material interposed between the specimen and surface plates. In this latter case, an applied force should be used as indicated in 6.7 to ensure sufficient surface contact. For either of these applications, thermocouples shall be made of wire not larger than 0.2 mm in diameter.

6.8.2.4 *Electrical Isolation*—Temperature sensors can be either completely insulated electrically from the surface plates or grounded to the surface plate at one location. Consequently, thermocouples connected differentially can only have a single junction ground. Computations or experimental verifications, or both, shall be performed to confirm that other circuits do not affect the accuracy of the temperature measurements.

6.8.2.5 *Number of Sensors*—The number of temperature sensors on each side of the specimen in the metering area shall not be less than $10 \times \sqrt{A}$, or 2, whichever is greater.

NOTE 16—It is recommended that one temperature sensor be placed in the center of the metered section and that additional sensor be uniformly distributed radially.

6.9 *Thickness Measurements*—A means shall be provided for measuring the thickness of the specimen, preferably in the apparatus, to within 0.5 %.

6.10 *Metered Section Power Measurement*—Dc power is highly recommended for the metered section. Ac power may be used but the user should note that ac power determinations are more prone to error than dc measurements. The power to the metered section is determined with a wattmeter or from voltage and current measurements across the heater in the metered section. The voltage taps for this measurement should be placed to measure the voltage from the mid-point of the gap. The current can be determined from the voltage drop across a precision resistor placed in series with the metered section heater.

6.11 *Electrical Measurement System*—A measuring system having a sensitivity and accuracy of at least $\pm 0.1 \text{ K}$ shall be used for measurement of the output of all temperature and temperature difference detectors. The system shall have sufficient sensitivity to measure the gap imbalance to a level equal to 1 % of the imbalance detector output that satisfies the requirement of 6.8.1.2. Measurement of the power to the metered section shall be made to within 0.2 % over the entire operating range.

6.12 *Performance Checks*—When a new apparatus is commissioned or an apparatus has undergone significant refurbishment, a series of careful checks shall be performed before initiating routine testing.

6.12.1 *Planeness*—The planeness of each surface plate shall be measured. See 6.3.1.1.

6.12.2 *Temperature Measurements*—With specimens installed in the apparatus, the coolant supply to the cold surface assembly shut off, and no electrical power being

C 177

supplied to any of the heaters, mount the apparatus inside the enclosure. Allow the system sufficient time to come to thermal equilibrium. With no energy being supplied to the apparatus, note the output of all of the temperature sensors. The temperature sensors shall have an output that agrees to within the uncertainty prescribed in 6.8.2.2. The output of the imbalance detection circuit shall be within the noise level of the electrical measurement system.

6.12.3 Imbalance Detection—Determine the maximum imbalance that can be allowed that satisfies the requirements in 6.8.2.2. With the apparatus energized and operating normally, note the thermal resistance of a specimen and the imbalance detector output at equilibrium. Repeat the test at various levels of imbalance. Linearly fit the thermal resistance data as a function of bias. The slope of this relationship will define the maximum imbalance detector output that can be allowed during routine operation.

NOTE 17—The number of bias levels that need to be analyzed will depend on the quality of the curve fit; the scatter within the data set, as defined by twice the standard deviation, shall be less than the noise level of the electrical measurement system as defined in 6.11.

6.12.4 Edge Heat Losses—Edge heat losses give rise to the greatest measurement errors when the specimens approach the maximum specified thickness and thermal resistance. This series of experiments will determine which edge loss strategies must be employed to maintain edge losses to levels prescribed by this method.

6.12.4.1 Install specimens in the apparatus that approach the apparatus limits described above and instrument these specimens with the edge temperature sensors described in 6.6. Do not install any components described in 6.6 to reduce edge heat loss. While performing a test, verify that the difference between the specimen mean temperature and edge temperature satisfy the requirements of 6.6. Add additional edge loss apparatus components (edge insulation, secondary guard, enclosure) until the requirements of 6.6 are satisfied. These experiments will define the required levels of edge loss that shall be incorporated into the routine testing. In extreme cases, the secondary guard may have to be biased to satisfy these requirements; include these biases as part of the routine test procedure.

6.12.5 Emittance of Surface Plates—The emittance of the surfaces can be experimentally verified by testing an air gap, where the thickness of the air gap is limited to prevent the onset of convection. The heat flow rate per unit temperature difference is the sum of the thermal conductance of air and $4\sigma T_m^3 (2/\epsilon - 1)$. A best fit of the plot of the heat flow rate per unit temperature difference and the inverse of the air space thickness supplies both the thermal conductivity of the air and $4\sigma T_m^3 (2/\epsilon - 1)$. From this plot, the plate emittance can be verified (42).

6.12.6 Overall Design Verification—When all of the other checks have been successfully completed, tests shall be performed on specimens that are traceable to a national standards organization. These tests shall cover the range of temperatures for which the apparatus has been designed. Verification of the apparatus may be limited by the temperature range of available standards. See 5.7.

7. Specimen Preparation and Conditioning

7.1 Specimen Selection—Only those specimen selection

factors important to the performance of the apparatus are considered here. Factors related to the specimens' thermal properties are typically described in material specifications. When two specimens are required, the specimens should be selected to be as similar in thickness and thermal characteristics as possible. The use of Test Method C 518 can be used to check the similarity of the specimens' thermal characteristics.

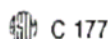
7.1.1 Thickness—The maximum specimen thickness that can be measured to a given accuracy depends on several parameters, including the size of the apparatus, thermal resistance of the specimen, and the accuracy desired. To maintain edge heat losses below approximately 0.5 %, for a guard width that is about one-half the linear dimension of the metered section, the recommended maximum thickness of the specimen is one-third the maximum linear dimension of the metered section. For more specific quantitative information on this limitation see Refs (1,5,7,8) and adjunct material given in this test method.

7.1.2 Size—The specimen shall be sized to cover the entire metered section and guard area when possible. It is desirable to cover the gap between the guarded-hot-plate and the primary guard when sample size is limited. The guard portion of the volume between the heating and cooling plates should be filled with material having similar thermal conductance characteristics as the specimen. When the specimen has a high lateral conductance such as a dense solid, a gap between the metered section and the primary guard shall be provided within the specimen. Refer to 7.2.3 for special precautions.

7.1.3 Homogeneity—Specimens exhibiting appreciable inhomogeneities in the heat flux direction shall not be tested with this method. There are two potential problems in attempting to determine the heat flux through highly inhomogeneous specimens. One is related to the interpretation and application of the resulting data, see Practice C 1045. The other is the degradation in the performance of the apparatus. If the specimen is highly inhomogeneous, that is, the heat flux varies appreciably over the metered section, several errors can be significantly increased. The plate temperature distribution can deviate appreciably from isothermal conditions which, in turn, can cause large uncertainties in the average temperature difference across the specimen. The increased plate temperature variations can also lead to increased gap and edge heat losses. The importance of measuring the plate or specimen surface temperatures at numerous points is greatly increased under such conditions.

7.2 Specimen Preparation—Prepare and condition the specimens in accordance with the appropriate material specification. Use the following guidelines when the material specification is unavailable. In general, the surfaces of the specimen should be prepared to ensure that they are parallel with and have uniform thermal contact with the heating and cooling plates.

7.2.1 Compressible Specimens—The surfaces of the uncompressed specimens may be comparatively uneven so long as surface undulations are removed under test compression. It may be necessary to smooth the specimen surfaces to achieve better plate-to-specimen contact. If the apparent thermal conductivity of the contact void is greater than that of the specimen, compressible or otherwise, the measured



heat flux will be greater than the heat flux that would be obtained if the voids were absent. This may often be the case at higher temperatures where radiant heat transfer predominates in the void. For the measurement of compressible specimens, the temperature sensors are often mounted directly in the plate surfaces. Also, plate spacers may be required for the measurement of compressible specimens.

7.2.2 Rigid and High Conductance Specimens—The measurement of rigid specimens or high conductance specimens requires careful surface preparation. First, the surfaces should be made flat and parallel to the same degree as the guarded-hot-plate. If the specimen has a thermal resistance that is sufficiently high compared to the specimen-to-plate interface resistance, temperature sensors mounted in the plates may be adequate. However, for materials such as plastics or ceramics, when the thermal conductivity of the material exceeds $0.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, the following techniques shall be used to ensure accurate surface temperature measurement.

7.2.2.1 In some cases it is necessary to mount the temperature sensors directly on the specimen surfaces or in grooves in the specimens. Under vacuum conditions, the slightest space between plate and specimen is essentially an infinite thermal resistance (except for radiative heat transfer). Under these conditions extreme heat flux nonuniformities will occur. In any event the user should always try to minimize the ratio of contact resistance to specimen resistance and to strive for a constant ratio over the entire surface.

7.2.2.2 Another potential solution (that must be used with caution) is to mount a compressible thin sheet (for example, a soft rubber or thin fibrous pad) between the plates and specimen to improve the uniformity of the thermal contact. When this procedure is used, temperature sensors shall be instrumented in or on the surface of the specimens to ensure accurate temperature measurement of the specimen surface. An applied force should be used as in 6.7 to ensure sufficient surface contact.

7.2.3 Anisotropic Specimens—Specimens that have a high lateral to axial conductance ratio require that a low conductance gap be created in the specimen directly in line with the gap between the metered section and the primary guard.

7.2.4 Loose-Fill Specimens—The measurement of loose-fill specimens requires special handling, conditioning, and measurement techniques. The user is directed to Practice C 687 for details.

7.3 Specimen Conditioning—Condition the specimens either as stated in the material specification or where no guideline is given, at $22 \pm 5^\circ\text{C}$ ($72 \pm 3^\circ\text{F}$) and $50 \pm 10\%$ relative humidity for a period of time until less than a 1 % mass change in 24 h is observed.

NOTE 18—Specimens can be conditioned at different conditions in order to determine the effect on the thermal properties of the specimens. Conditioning environments shall be reported with the test results.

8. Procedure

8.1 For a double sided test, select a pair of test specimens as outlined in Section 7.

8.2 Measure and record the specimen mass and dimensions. Also see 8.12.

8.3 Install the specimen into the apparatus at the desired test thickness.

8.4 Install the appropriate secondary guarding and an environmental chamber (as required).

8.5 If the test is to be conducted with gases other than air in the specimen-plate assembly, purge the environmental chamber and backfill with the desired gas. Care should be taken to limit the pressure of the fill-gas to below its condensation point at the lowest temperature expected within the chamber. Since the measured heat flux is dependent on both the type of fill gas and pressure, record both of these parameters.

8.6 Adjust the heating and cooling systems to establish the desired test conditions. For guidance in establishing test temperatures, refer to Practice C 1058. The ambient temperature should be the same as or slightly above the mean temperature of the test. This may require the use of a temperature controlled surrounding. This can be accomplished utilizing a controlled perimeter heater and insulation materials to aid in the control of the surrounding temperature.

8.7 Record the start time and date of the test. Begin data acquisition. The recorded data shall include: the date and time of data acquisition; power to the guarded-hot-plate; hot side guarded-hot-plate surface temperature; hot side guard temperatures; cold surface assembly temperatures; controlled environment ambient temperature and relative humidity; temperature difference or thermopile output across the gap between the guard and metered section; and calculated heat flux and estimated thermal property of interest.

NOTE 19—Thermal steady-state is the time required for the test apparatus to stabilize. This varies considerably with the apparatus design, specimen to be measured, and test conditions. Generally, however, the stabilization time is on the order of hours. Stabilization times generally increase with thick specimens, specimens with low thermal diffusivity and is dependent on the mass of the metered section area. Measurements in a vacuum and on microporous materials create small monotonic changes over a long period of time and may take longer to stabilize.

8.8 Thermal steady state must be achieved for this test method to be valid. To determine if steady state is achieved, the operator must document steady state by time averaging the data, computing the variation and performing the following tests on the data taken in Section 8.

8.8.1 Thermal steady state for the purpose of this test method is defined analytically as:

8.8.1.1 The temperatures of the hot and cold surfaces are stable within the capability of the equipment at the test conditions. Ideally an error analysis will determine the magnitude of the allowable differences, however the difference is usually less than 0.1 % of the temperature difference.

8.8.1.2 The power to the metering area is stable within the capability of the equipment. Ideally an error analysis will determine the magnitude of the allowable differences, however the difference is usually less than 0.2 % of the average result expected.

8.8.1.3 The required conditions above exist during at least four intervals 30 min in duration or four system time constants, whichever is longer.

NOTE 20—The thermal time constant of the system is the time required to come to within $1/e$ (37 %) of the fixed value after a step thermal disturbance of the system. The thermal time constant in the constant power mode is the time required to come to within 37 % of the final temperature. The thermal time constant in the constant tempera-

C 177

ture mode is the time required to come to within 37 % of the final power. The thermal time constant of a system can be approximated from the thermal diffusivities of the system components, but is generally determined experimentally.

8.9 After achievement of the desired steady-state as defined in 8.8.1, three successive repeat data acquisition runs shall be completed. These runs shall be conducted at intervals of at least 30 min and should not be less than the thermal time constant of the system (see Note 20). This combination of three runs shall be considered a valid test if each datum obtained for each measured variable meets the following criteria:

8.9.1 The data do not differ from the mean by no more than the uncertainty of that variable, see A1.5.

8.9.2 The data obtained does not change monotonically with time. This is determined by comparing the average result of the final three test periods to the averages of the previous four periods. Graphing of the test parameters versus time or monitoring the slope of the data are techniques for determining monotonic conditions.

8.9.3 If the data continues to drift, the test shall be considered incomplete and further data acquisition sets shall be conducted until thermal steady state is achieved. Drift, even at low levels, may indicate that either the specimen characteristics are changing or the system is not at steady-state. For further details see Refs (3,12,13).

8.10 Prior to terminating the test, measure and record the pressure of the chamber.

8.11 Upon completion of the thermal test outlined above, remove the specimen and examine the system components, such as temperature sensor mounting, for proper placement and operation.

8.12 Determine the specimen thickness and weight after the test to ensure that they have not changed from the initial condition. Record any changes in the physical characteristics of the specimen.

9. Calculation

9.1 The primary data required for this test method include electrical power, surface temperatures, area, and thickness. Of these, only thickness is generally a directly measured quantity. The others are either calculated from other more fundamental measurements or are converted by an electrical device. The manner in which these variables can be obtained is discussed in 8.9 and below.

9.2 *Heat Flow*—The heat flow to be reported is that which passes through each specimen. This is equal to the power generated by the metered section heater. For the double-sided mode of operation, only one-half the power generated by the heater flows through each specimen. Determine the power, Q , from emf, E , and current, I , and calculate as follows:

$$Q = E \times I \quad (2)$$

9.3 *Metered Section Area*—Determine the metered section area, A , from the area, A_m , of the guarded-hot-plate and the gap area, A_g . If there is no discontinuity in specimen characteristics in the gap region, the metered area is calculated as follows:

$$A = A_m + \frac{A_g}{2} \quad (3)$$

For high precision measurements, this assumption that the gap contributes half of its area to the effective metered section area, A , may need to be verified for the particular apparatus used. If there is a discontinuity between the specimen in the metered section and the guard region, this equation is modified slightly, as in ISO 8302, to include the effect of heat flux distortion in the gap region:

$$A = A_m + \frac{A_g \lambda_g}{2\lambda} \quad (4)$$

Where significant expansion, or contraction, of the guarded-hot-plate is known during a test, appropriate corrections to the area shall be made.

9.4 *Heat Flux*—The heat flux is obtained from the ratio of the heat flow, Q , and the total metered section area, A , and is calculated as follows:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

9.5 *Temperature*—Electrical readings from the temperature sensors are normally converted to temperature using a mathematical equation based on either the sensor's calibration curve or an appropriate reference such as a thermocouple voltage table.

9.6 *Density*—The metered section area specimen density, ρ_m , or the sample density, ρ_s , where metered section area density cannot be obtained, are to be reported as the average of the two pieces. The equation for density, is the following:

$$\rho_m = \frac{m}{A \times L} \quad (6)$$

or:

$$\rho_s = \frac{m_s}{A_s \times L}$$

9.7 *Thermal Transmission Properties*—These properties shall be reported only in accordance with the requirements and restrictions of Practice C 1045.

10. Report

10.1 To be in conformance with this test method, report the following:

10.1.1 The report shall be identified with a unique numbering system to allow traceability to the individual measurements taken during each test performed.

10.1.2 The average values as obtained from the test. Standard deviation about that average. The results may be reported in a form similar to that shown in Fig. 3.

10.1.2.1 Identification of the test organization, responsible person in charge, test operator (optional) and the test sponsor.

10.1.2.2 The generic name, or other identification required to provide a complete and detailed description of the tested material. For hygroscopic materials, such as concrete and wood, the moisture content should also be given.

NOTE 21—A generic description in addition to the brand name should be reported where possible.

10.1.2.3 Information regarding the specimen preconditioning.

10.1.2.4 Variables that effect thermal transmission prop-

C 177

Test Report

Date:	Test Report Number:
Operator:	Duration of Test:
Specimen Identification:	Product, name, manufacturers description.
Specimen Characteristics:	Unique characteristics such as degree of homogeneity or anisotropy, density (optional).
Specimen Conditioning:	Temperature, time, humidity.
Specimen Dimensions and Mass:	Before and after conditioning and after measurement.
Apparatus Description:	Size, shape and orientation of plates. Single or double-sided operation, description of secondary guarding, unique procedures.

Experimental Results

Variable	Measured Value	Uncertainty	
		Systematic	Random
Q, W			
T _h , K			
T _c , K			
T _m , K			
ΔT , K			
A, m ²			
L, m			
Fill gas pressure, Pa			
Other			

Derived thermal transmission properties including the applicable range of conditions shall be in conformance with Practice C 1045.

FIG. 3 Example Test Report Form

erties, such as fill-gas and pressure, shall be specified when applicable.

10.1.2.5 The dimensions of the metered section and guard(s) and their relationship to the overall specimen dimensions (m). The plate emittance,

10.1.2.6 Specimen orientation and the direction of heat transfer during the test,

10.1.2.7 The total area of the specimen (m²),

10.1.2.8 The specimen density of the metered section area or sample density where metered section area density cannot be obtained (kg/m³),

10.1.2.9 The thickness of the specimen(s) within the metered section (m),

10.1.2.10 The area averaged temperatures of both hot and cold specimen surfaces (K),

10.1.2.11 Net steady-state average heat flux through the specimen (W/m²),

10.1.2.12 Any thermal transmission properties calculated

and reported and their estimated error, and

10.1.2.13 The test date and time, the time required for steady temperature conditions, the time to reach steady-state, the data acquisition time period, frequency of data collection and the end date and time.

10.2 The following is optional information that may be included in the report:

10.2.1 Values for guard loss, back side energy loss and other losses included in the net energy calculation (W/m²), and

10.2.2 A full description (or references) of test procedures and data analysis techniques used.

10.3 When certification of the test results is required, include the date of the latest apparatus verification and a description of the procedures used. References for the verification report(s) shall also be included. Where applicable, include a statement of laboratory accreditation of the test facility used, including date of latest inspection.

 C 177

10.3.1 Where agreed upon between the customer and the test laboratory, less may be reported but the remainder of the results shall be made available.

NOTE 22: Caution—Where this test method might be specifically referenced in published test reports and published data claims, and where deviations from the specifics of the test method existed in the tests used to obtain said data, the following statement shall be required to accompany such published information: "This test did not fully comply with following the provisions of Test Method C 177." This statement shall be followed by a listing of specific deviations from this test method and any special test conditions that were applied.

11. Precision and Bias

11.1 This section on precision and bias for the guarded hot plate apparatus includes a discussion of: general statistical terms; statistical control; factors affecting test results; ruggedness tests; interlaboratory comparisons conducted by ASTM Committee C-16; proficiency testing conducted under the auspices of the National Voluntary Laboratory Accreditation Program (NVLAP); and error propagation formulae.

11.2 *General Statistical Terms*—The accuracy of a test result refers to the closeness of agreement between the observed value and an accepted reference value. When applied to a set of observed values, the accuracy includes a random component (imprecision) and a systematic component (bias). The variability associated with the set of observed values is an indication of the uncertainty of the test result. Additional information on statistical terminology is available in Terminology E 456.

11.3 *Statistical Control*—The user of the guarded-hot-plate apparatus shall demonstrate that the apparatus is capable of performing in a consistent manner over time (35). The use of control charts (see Manual 7 (34)) to monitor the operation of the guarded hot plate is one recommended way to monitor the control stability of the apparatus. When possible, it is recommended that a reference material traceable to a national standard laboratory be used as the control specimen. Ideally, the long-term variation should be no greater than the short-term variability.

11.4 *Factors Affecting Test Results*—Experiments and theoretical analyses have identified two principal (systematic) errors that affect the operation of an idealized guarded hot plate apparatus. These errors are edge heat flows at the periphery of the specimens; and, heat flow across the gap due to a thermal imbalance. Other errors studied include the effect of gap width on the heat flow; and, the proper determination of the metered section area. These errors and others are discussed in detail in A1.3.

11.4.1 *Edge Loss Errors*—These have been found to depend on the size (and type) of the guard, the specimen thermal conductivity and thickness, and ambient temperature (7,18,20,21,31,33). By using a sufficiently wide guard (see Section 6), appropriate levels of edge insulation, and proper selection of the ambient temperature (see Section 8), the edge loss error can be reduced to a negligible value relative to the specimen heat flow (see A4.2). There is only limited experience (at room temperature) with measurement of apparent conductivity at large thickness (above 30 cm), but errors may be expected to be above 2 %, especially if the user does not reduce the problems associated with long time constants and large lateral heat flows (31).

11.4.2 *Gap Imbalance Error*—These have been found to depend on several parameters including the temperature difference, the gap geometry, the structural support system, the wires crossing the gap (number, size, and type), the gap fill material (gas or insulation), the emittance of the gap surfaces, and the specimen material in the vicinity of the gap (5,6,8,18,22,36). The resulting heat flow due to a temperature imbalance can be obtained either by calculation based on the above parameters or empirical data. An empirical relationship for the gap heat flow can be determined by purposely introducing a temperature imbalance across the gap and measuring the resulting change in the specimen heat flow (see A1.4.3).

11.5 *Ruggedness Tests*—The results of one ruggedness study for a 200 mm² guarded hot plate and two materials having different thermal conductivity's have been reported (37). Matched pairs, 85 mm thick, of polyurethane foam and silicone rubber were measured at a mean temperature of 297 K and a temperature difference of 23 K. For each specimen, the width of edge insulation was set at one of five levels (0, 12.7, 25.4, 50.8, and 76.2 mm) while the ambient temperature was varied at one of three levels. The results indicate that the edge losses are reduced with edge insulation but only become zero when the ambient temperature is at one specific value. The optimum ambient temperature appears to be a function of specimen thickness and thermal conductivity, and edge insulation thickness.

NOTE 23—As noted in Section 8, the value of the ambient temperature is set to either the same value as the mean temperature of the test or a value slightly above the mean temperature. The user should determine the optimum value for their apparatus and test conditions by using the sensitivity analysis described in A4.2. This dependence may change appreciably for different specimens or apparatus conditions and, therefore, should be done under typical test conditions.

11.6 *Interlaboratory Tests*—The results of three published interlaboratory tests for guarded-hot-plate apparatus are discussed below. The results, where appropriate, state an index of precision (between laboratory) of two-standard deviation limits (2s). Certain aspects of the interlaboratory tests were not conducted completely in accordance with the requirements of Practice E 691, for example, the number of test laboratories was less than six in one study and none of the studies required replicates. Furthermore, a study involving a variety of materials is needed. Consequently, a general statement for the index of precision and bias that covers all conditions and materials is unavailable. In the interim, the user is directed to the interlaboratory tests if information on precision and bias is needed (see Practice C 687 for loose-fill materials).

11.6.1 In 1951, results of an interlaboratory comparison were reported (38) for 20 guarded-hot-plate apparatus from 17 laboratories. The plates ranged in size from 200 to 600 mm square. Different (numbered) pairs of corkboard (25 mm thick) were measured by each laboratory at a mean temperature from 266 to 322 K. The data from 15 of the 20 apparatus (75 %) were within ± 3 % of the mean value as determined by the National Bureau of Standards (now the National Institute of Standards and Technology). The maximum deviations were +13 and -16 %.

11.6.2 In 1985, results of a third round of interlaboratory comparisons were reported (41) for five large guarded-

TABLE 1 NVLAP Proficiency Tests for Guarded-Hot-Plate Apparatus Ref (39)

Material	Nominal Thickness, mm	Thermal Conductivity Group Mean, W/(m K)	Number of Labs	Coefficient of Variation, %	Round
Expanded polystyrene board	25	0.037	6	1.80	10
Foam Board, rigid	25	0.040	9	2.52	4
Glass-fiber batt	25	0.040	10	2.15	5
Glass-fiber batt	25	0.040 ^a	6 ^a	2.26 ^a	7 ^a
Glass-fiber batt	25	0.039 ^a	7 ^a	2.82 ^a	3B ^a
Glass-fiber batt	25	0.040	9	3.28	3A
Glass-fiber batt	25	0.040	7	3.43	7
Glass-fiber batt	25	0.040	9	4.66	3B
Glass-fiber batt, foil faced	25	0.032	9	0.98	6
Glass-fiber batt, foil-faced (stacked)	50	0.033	7	1.45	9
Glass-fiber batt, foil faced	25	0.032	8	1.95	8

^aRecalculation with one or more laboratories excluded from the group statistics because their test results deviated from the pre-characterized value by more than 6 %.

hot-plate apparatus ranging from 610 to 1219 mm² and 1016 mm diameter (the last apparatus mentioned being a circular line-heat-source guarded-hot-plate). The same specimens of fibrous-glass blanket (16 kg/m³) were circulated to each laboratory. Matched pairs were tested at 297 K and thicknesses of 25.4, 50.8, 76.2, and 101.6 mm. Imprecision of the data versus a semi-empirical model for a density range of 11 to 20 kg/m³ were 1.9, 2.3, 2.6, 2.9 % (2s level) at thicknesses of 25.4, 50.8, 76.2, 101.6 mm, respectively.

11.6.3 In 1988, results of an interlaboratory comparison were reported (30) for seven high-temperature guarded-hot-plate apparatus. The plates ranged in size from 203 to 406 mm in diameter and 300 to 610 mm². Different matched pairs of fibrous alumina-silica and calcium silicate were measured by each laboratory over a mean temperature range from 330 to 701 K. Reference equations based on NIST-Boulder corrections were fit to the data. Imprecision in the deviations from the model were 15 and 16 % (2s level) for fibrous alumina-silica and calcium silicate, respectively. It was established that a significant percentage of the standard deviation in this comparison was due to material variability and not apparatus error.

11.7 Proficiency Tests—In 1985, the results of a series of proficiency tests conducted for NVLAP over a four-year period were reported (39) for guarded-hot-plate apparatus (plate size not reported). Different specimens of four thermal insulation materials were distributed to each laboratory for testing. The materials were expanded polystyrene; foam board; low-density glass-fiber batt (8 to 16 kg/m³); and, high-density glass-fiber batt, foil-faced (64 kg/m³). Each laboratory reported a single test result, that is, no replicates

were conducted. Results of the proficiency tests are summarized in Table 1. The index of precision (between laboratory) is expressed as a percentage for the one-standard deviation limit(s) divided by the mean of the test result, or one-coefficient of variation (CV %).

11.8 Error Propagation—Several formulae are available (40) for determining the apparatus uncertainty by error propagation. For guidelines on using a standard procedure, the user is referred to ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (32). Strictly speaking, determining a statement of uncertainty for a test result requires treating random and systematic errors separately. A description of random and systematic errors and possible sources of error are discussed below.

11.8.1 Random Error, δ_r —In a measurement, random errors (imprecision) are considered to be the sum total of all the small (negligible) independent errors that are uncontrolled, for example small fluctuations in environmental conditions or plate temperatures. Random errors are assumed normally distributed, uncorrelated, and preferably small. In general, random errors are a function of the capabilities of the control system and, to a lesser extent, the measurement system.

11.8.2 Systematic Error, δ_s —A systematic error (bias) is a fixed deviation that is inherent in each and every measurement. If the magnitude and direction of the systematic error are known, the user can make appropriate correction(s) to the measured value. Under such circumstances a justification for the correction should be provided. In general, the magnitude of the error, $|\delta_s|$, is estimated by experience or judgment.

11.8.3 Statement of Uncertainty—The statement of uncertainty requires an expression having credible limits for its inaccuracy. Different traditions and usage have resulted in different expressions of uncertainty that may be summarized as follows: both imprecision and bias negligible; imprecision negligible, bias not negligible; neither imprecision nor bias negligible; and, imprecision not negligible, bias negligible.

11.8.4 Sources of Errors—The uncertainty of the apparatus as determined by propagation of errors should consider the error in each of the separate measurements used to determine the test result. For a guarded-hot-plate apparatus, these errors in measurements are the uncertainty in: heat flow δQ ; temperature difference, $\delta \Delta T$; metered section area, δA ; and specimen thickness, δL . These errors and an example are discussed in A1.3.

12. Keywords

12.1 error analysis; guarded-hot-plate; heat flow; heat flux; steady-state; thermal conductivity; thermal resistance; thermal transmission; thermal conductance; thermal testing

ANNEX

(Mandatory Information)

A1. THICKNESS MEASUREMENT, LIMITATIONS AND MEASUREMENT UNCERTAINTY

A1.1 *Importance of the Thickness of the Insulation Specimens in Guarded-Hot-Plate Measurements*—The thickness of the specimen as installed in the apparatus determines both the density of the material and the temperature gradient applied to it during the measurement of the thermal property. If the thickness of a specimen is changed from its room-temperature value by thermal effects (thermally reversible expansion or contraction, or thermally induced irreversible shrinkage or expansion of the specimen), or by compression, then use of the room-temperature thickness outside the apparatus will lead to error in the determination of the apparent conductivity (or resistivity) of the specimen. A given relative (percentage) error in the thickness leads to an equal relative error in the determination of the conductivity. For measurements of thermal properties at mean specimen temperatures near room temperature the error in neglecting any changes in thickness may be negligible, but this can be ascertained only by observation in the specific case at hand.

A1.2 *Suggested Ways to Measure Thickness of Incompressible Specimens*—In determining the thickness of a specimen, one assumes that it is properly shaped, so that the measured thickness is valid. However, two different situations may sometimes occur to affect the thickness measurement. The shape of the specimen may be distorted by warping or bowing at the time it is first installed in the apparatus. In this case, either the (flexible) specimen should be compressed enough to remove the distortion when installed, (or, preferably, a specimen of better quality should be selected). Independent of, the specimen may undergo a change of shape as it is subjected either to high mean temperatures or to large temperature gradients, due to chemical changes occurring in the specimen at high temperatures. In this case it is difficult to define what the thickness of the specimen actually is during the measurement. The thickness of the specimen should be measured both before and after the thermal transmission property is measured, to show whether such dimensional changes are occurring. Any warping or bowing of the specimen, before or during measurement of thermal properties, adds to the uncertainty in the value of thickness. Some materials such as polymers have large coefficients of expansion and the material tends to bow unless a small thickness and temperature difference across the specimen is used.

A1.2.1 The recommended procedure for measuring specimen thickness is to measure the thickness while installed in the apparatus. This is necessary if the correct temperature gradient actually applied to the specimen during the measurement of the thermal property is to be obtained. Rigid rods may be securely installed extending laterally from the outer edges of the metered area/primary guard assembly, at two or three equally spaced locations along the circumference of the plate. The portion of the rod extending from the plate should be smooth and parallel to the plane of the plate

surface. Alternatively, the plates may be machined with flat, horizontal plates extending from the circumference. Similar rods (or plates) are likewise located on each auxiliary heater plate, at the same circumferential positions, vertically (within 5° of arc) above or below the rods on the metered area/primary guard assembly.

A1.2.1.1 With no specimens installed, with the heater plates contacting each other in their usual order, and taking care not to change the plate separation, measure the separation between each vertical pair of rods on two adjacent plates with a vernier calliper. Compute the arithmetic mean of the plate separation for each pair of adjacent plates. Then, with specimens installed between the plates in the apparatus, and with the usual mechanical loading applied, measure the separation between the pairs of rods on adjacent plates, taking care not to change the plate separation. Compute the arithmetic mean. Subtract the mean separation obtained with no specimen from the mean separation with the specimen present, for corresponding pairs of plates, to obtain the as-installed thickness of each specimen. The standard deviation about the average of values from repeated measurements of the plate separation, starting from total disassembly, gives a statistical measure of the reproducibility. If contact cannot be made between the plates, standard spacers can be inserted between the plates. Bringing the plates in contact with the spacers can determine the adjustment in specimen measured thickness required.

A1.2.1.2 The accuracy of this procedure is equal to the imprecision with which the vernier can be read. The accuracy of this test method depends on the precision with which the rods are mounted in a true horizontal orientation, and on not changing the plate separation during the measurement. The standard deviation about the average of values from repeated measurements of the plate separation, starting from total disassembly, gives a statistical measure of the reproducibility.

A1.2.2 An alternative is to place the specimen on a flat surface and measure the thickness at various points across the specimen with a thickness gage mounted above the specimen. The zero is first established by resting the foot of the gage on the flat surface. The specimen is then measured. This procedure has the advantage that specimen flatness and warp can be measured. Thickness is measured typically in at least five different locations across the full specimen and within the metered section to establish the metered thickness within the apparatus. The thickness, when applicable, should be measured after the test to monitor any significant changes that may have effected the results.

A1.2.2.1 The accuracy of this test method is equal to the imprecision with which the gage can be read. The accuracy and reproducibility of this test method depends on the ability of the operator to reproduce the amount of force exerted on

 C 177

the specimen especially in the case of compressible specimens.

A1.2.3 Another alternative is to use a micrometer or vernier caliper. This assumes that the specimen is not bowed or warped, that should of course be ascertained. During a measurement of thickness with a calliper, prevent the narrow jaws of the measuring tool from penetrating into the surface of the specimen. Cut two small pieces of flat, rigid rectangular metal sheet, about 20 by 40 mm and 0.5 to 1.0 mm thick. Measure the combined thickness of the two metal rectangles; then measure the thickness of the specimen while holding one metal piece under each jaw, between the surface of the specimen and the jaws of the micrometer or calliper. Be sure to subtract the combined thickness of the two metal plates from the total thickness of specimen plus metal pieces, to obtain the net specimen thickness. By this method measure the thickness at eight different, equally spaced locations around the outer margin of the specimen.

A1.2.3.1 The accuracy of this procedure is equal to the precision with which the vernier (or micrometer) can be read. The accuracy and reproducibility of this test method is lower than that described above in A1.2.1 and A1.2.2, due to the variable pressure used by different people in measuring the specimen between the jaws of the micrometer or calliper.

A1.3 Limitations Due to Apparatus:

A1.3.1 *Limitations Due to Contact Resistances*—When testing a rigid specimen of high thermal conductance (that is, specimens of a material too hard and unyielding to be appreciably altered in shape by the pressure of the heating and cooling units), even small, non-uniformities of the surface of both the specimen and the apparatus (surfaces not perfectly flat) will allow contact resistances not uniformly distributed between the specimens and the plates of the heating and cooling units.

A1.3.1.1 These will cause nonuniform heat flow-rate distribution and thermal field distortions within the specimens; moreover, accurate surface temperature measurements will be difficult. For specimens having thermal resistances less than $0.1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$, special techniques for measuring surface temperatures will be required. Metal surfaces should be machined or cut flat and parallel and stress-relieved.

A1.3.2 Upper Limits for the Thermal Resistance:

A1.3.2.1 The upper limit of thermal resistance that can be measured is limited by the stability of the power supplied to the metered section, the ability of the instrumentation to measure power level and the extent of the heat losses or gains due to temperature imbalance errors between the central and guard sections of the specimens and of the metered section.

A1.4 Limits to Temperature Difference:

A1.4.1 Providing uniformity and stability of the temperature of the hot and cold surfaces of the plates, the noise, resolution and temperature measurements can be maintained within the limits outlined in Section 6, temperature differences as low as 5 K, when measured differentially, can be used. Lower temperature differences shall be reported as not complying with this standard. See Practice C 1058.

A1.4.2 If temperature measurements of each plate are made by means of thermocouples with independent reference junctions, the accuracy of the calibration of each thermocouple may be the limiting factor in the accuracy of

measured temperature differences. In this case, it is recommended that temperature differences of at least 10 K to 20 K are used in order to minimize temperature-difference measurement errors.

A1.4.3 Higher temperature differences are limited only by the capability of the apparatus to deliver enough power while maintaining required temperature uniformity.

A1.4.4 Maximum Specimen Thickness:

A1.4.4.1 The boundary conditions at the edges of the specimens due to the effects of edge insulation, of auxiliary guard heaters and of the surrounding ambient temperature will limit the maximum thickness of specimen for any one configuration, as described in Section 6. For composite or layered specimens, the mean measurable thermal conductivity of each layer should be less than twice that of any other layer.

A1.4.4.2 This is an approximation and the results do not necessarily imply the measurement of conductivity of each layer. The accuracy will remain close to that predictable for tests on homogeneous specimens. No guidelines can be supplied to assess measurement accuracy when the requirement of A1.4.4.1 is not met.

A1.4.5 Minimum Specimen Thickness:

A1.4.5.1 The minimum specimen thickness is limited by contact resistances given in A1.3.1. Where thermal conductivity or thermal resistivity is required, the minimum thickness is also limited by the accuracy of the instrumentation for measuring the specimen thickness.

A1.4.5.2 The metered area, that is, the area of the specimen traversed by the heat flow-rate fed by the metered section, is related to the specimen thickness and to the gap width. As the thickness tends to zero, the metered area tends to the area of the metered section, while for thick specimens the metered area is bounded by the line defining the centre of the primary guard gap. To avoid complex corrections, this definition can be retained, provided the thickness of the specimen is at least ten times the width of the gap.

A1.4.6 Maximum Operating Temperature:

A1.4.6.1 The maximum operating temperature of the heating and cooling units may be limited by oxidation, thermal stress or other factors that degrade the flatness and uniformity of the surface plate and by changes of electrical resistivity of electrical insulations which may affect accuracy of all electrical measurements.

A1.4.7 Vacuum Conditions:

A1.4.7.1 Care must be taken if a guarded hot plate is used for measurements under vacuum conditions. If a high vacuum is desired, the materials used in the design of the apparatus must be carefully selected to avoid excessive outgassing under such conditions. Under vacuum conditions, especially at lower temperatures, serious errors can arise if care is not taken when installing heater and temperature sensor leads so as to minimize extraneous heat flow-rates and temperature measurement errors.

A1.4.8 Apparatus Size:

A1.4.8.1 The overall size of a guarded hot plate will be governed by the specimen dimensions that typically range from 0.2 to 1 m diameter or square. Samples smaller than 0.3 m may not be representative of the bulk material, while specimens larger than 0.5 m may create considerable problems in maintaining the flatness of the specimens and plates,

temperature uniformity, equilibrium time and total cost within acceptable limits.

A1.5 Limitations Due to Specimen

A1.5.1 Thermal Resistance or Thermal Conductance:

A1.5.1.1 *Specimen Homogeneity*—In inhomogeneous specimens, the thermal flux density both within the specimen and over the faces of the metered section area may be neither unidirectional nor uniform. Thermal field distortions will be present within the specimen and can give rise to serious errors. The region in the specimen contiguous to the metered section area and especially near the edges of this area is most critical. It is hard to give reliable guidelines on the applicability of the method in such cases. The major risk is that the imbalance errors, edge heat loss errors, etc., now unpredictable, can vary in an unpredictable way when inhomogeneities take different relative positions within the specimen.

A1.5.1.2 One way to try to estimate the error is to compare the results for two specimens from the same sample, selected so that they have as widely different a structure near the edges or the metered section area. If the two extremes cannot be identified, a number of specimens may have to be tested.

A1.5.1.3 In some samples, the variation in structure may occur over small distances. This is true for many thermal insulations. In such cases, it may be possible to use a single specimen cut larger than the apparatus. This over-size specimen is tested twice, in each case with the specimen carefully positioned so that the edges of the test area are exposed to the two extremes in structure. The two results are then compared and the difference credited to distortion. The portion of the specimen(s) protruding from the apparatus should be well insulated in the two tests to reduce the possibility of the exposed section increasing edge losses. The size and thickness of the specimen affects the size of the variations in structure that can be accommodated. The larger the test area, the smaller the effect on the results. The effect of distortion may either increase or decrease with specimen thickness.

A1.5.1.4 Direct thermal short circuits may exist between the surfaces of the specimens in contact with the plates of the heating and cooling units. The largest effect occurs when sections of material which conduct heat readily, with extended surface area on each side of the specimen, are connected by a path of low thermal resistance relative to other paths. The effect can best be identified by breaking the thermal paths, especially when the collecting surfaces can be disconnected from the rest of the path. Sheets of thermally insulating materials can be used at the critical surfaces to provide the break. Sheets made of finely ground cork, or a similar material 2 mm or more thick, work well. The surfaces must be ground to the same degree of flatness as the heating unit. The thermal resistance of these sheets can be determined in separate measurements. The net change in thermal resistance of the specimen, due to thermal shorting, can thus be determined. If greater than 1 %, another measurement should be made with thicker sheets imposed.

A1.5.2 Temperature-Difference Correlation:

A1.5.2.1 Thermal resistance or thermal conductance are often a function of temperature differences across the specimen. In the report, the range of temperature differences that

apply to the reported values of the two properties must be defined, or it must be clearly stated that the reported value was determined at a single temperature difference.

A1.5.3 Mean Measurable Thermal Conductivity of a Specimen:

A1.5.3.1 In order to determine the mean measurable thermal conductivity (or thermal resistivity) of a specimen, the criteria of A1.3.1 shall be fulfilled. The specimen shall be homogeneous. Homogeneous porous specimens shall be such that any inhomogeneity has dimensions smaller than one-tenth of the specimen thickness. In addition, at any one mean temperature, the thermal resistance shall also be independent of the temperature difference established across the specimen.

A1.5.3.2 The thermal resistance of a material is known to depend on the relative magnitude of the heat transfer process involved. Heat conduction, radiation and convection are the primary mechanisms. However, the mechanisms can combine or couple to produce non-linear effects that are difficult to analyze or measure even though the basic mechanisms are well researched and understood.

A1.5.4 The magnitude of all heat transfer processes depends upon the temperature difference established across the specimen. For many materials, products and systems, a complex dependence may occur at temperature differences which are typical of use. In these cases, it is preferable to use a temperature difference typical of use and then to determine an approximate relationship for a range of temperature differences. The dependence can be linear for a wide range of temperature differences.

A1.5.5 Some specimens, while being homogeneous, are anisotropic in that the thermal conductivity measured in a direction parallel to the surfaces is different to that measured in a direction normal to the surfaces. For such specimens, this can result in larger imbalance and edge loss errors. If the ratio between these two measurable values is lower than two, reporting according to this method is still possible if imbalance and edge heat loss errors are determined separately with anisotropic specimens mounted in the apparatus.

A1.5.6 Thermal Conductivity or Thermal Resistivity of a Material:

A1.5.6.1 In order to determine the thermal conductivity or thermal resistivity of a material, the criteria of A1.3.2 shall be fulfilled. In addition, adequate sampling must be performed to ensure that the material is homogeneous or homogeneous porous, and that the measurements are representative of the whole material product or system. The thickness of the specimens must be greater than that for which the thermal conductivity of the material product or system does not change by more than 2 % with further increase in thickness.

NOTE A1.1—Results obtained on specimens where thermal conductivity is still changing with specimen thickness are only applicable at that specific test thickness.

A1.5.7 Dependence on Specimen Thickness:

A1.5.7.1 Of the processes involved, only conduction produces a heat flow-rate that is directly proportional to the thickness of a specimen. The others result in a more complex relationship. The thinner and less dense the material, the more likely that the resistance depends on processes other

than conduction. The result is a condition that does not satisfy the requirements of the definitions for thermal conductivity and thermal resistivity, both of which are intrinsic properties, since the transfer factor shows a dependence on the specimen thickness. For such materials, it may be desirable to determine the thermal resistance at conditions applicable to their use. There is believed to be a lower limiting thickness for all materials below which such a dependence occurs. Below this thickness, the specimen may have unique thermal transmission properties, but do not relate to the material. It remains, therefore, to establish this minimum thickness by measurements.

A1.5.7.2 Determination of minimum thickness above which thermal properties of the material may be defined.

A1.5.7.3 If the minimum thickness for which the thermal conductivity and resistivity can be defined is not known, it is necessary to estimate this thickness.

A1.5.7.4 In the absence of an established method, the procedure outlined below may be used to approximate the thickness and whether it occurs in the range of thickness in which a material is likely to be used.

A1.5.7.5 It is important to differentiate between added thermal resistance in measurements caused by the placement of the temperature sensors below the surfaces of the plates, added resistance caused by poor specimen surfaces, and added resistance caused by the coupling of the conduction and radiation modes of heat transfer in the specimens. All three can affect the measurements in the same way, and often the three may be additive.

A1.5.7.6 Select a sample uniform in density distribution, with the thickness L_s equal to the greatest thickness of the material to be characterized or equal to the maximum allowable thickness for the test apparatus.

A1.5.7.7 Cut five sets of specimens in approximately equal increments from the sample ranging in thickness from the smallest likely to be used in practice. The set of specimens shall be designated s_1 to s_5 according to their respective thickness L_1 to L_5 .

A1.5.7.8 For low density materials where heat is transferred by radiation and conduction mechanisms and where the absence of convection has been verified, the slope of a plot of thermal resistance versus thickness will very frequently diminish up to 1 to 2 cm and then will remain constant as the thickness increases. The reciprocal of this constant slope is the thermal conductivity to be assigned to high thickness specimens.

A1.5.7.9 Measure the thickness and thermal resistance of s_1 , s_3 , and s_5 at the same mean temperature and with the same temperature difference across the specimen. Plot the thermal resistance versus thickness. If these three values differ from a straight line relationship by less than $\pm 1\%$, the slope of the straight line shall be computed. If the three values differ by more than 1% , then similar measurements shall be made on s_2 and s_4 to check if there is a thickness above which the thermal resistance does not differ from a straight line by more than 1% .

A1.5.7.10 If this thickness exists, the slope of the straight line shall be determined to compute a thermal conductivity $\lambda_m = \Delta L / \Delta R$ defined as the ratio between the increments of thickness, ΔL , and increments of the thermal resistance, ΔR .

A1.5.7.11 The thickness at which this occurs will vary

according to the densities, types and forms of different materials, products and systems for different mean temperatures.

A1.5.7.12 Thermal conductivity and thermal resistivity then characterizes the material, product or system for thicknesses above which the transfer factor differs by less than 2% from λ_m .

A1.5.7.13 Allowance for experimental errors must be made in the interpretation of results. Least-square curve fitting of R versus L may also help. A larger number of specimens may be used where greater definition is required.

A1.5.7.14 Thickness dependence may be a function of temperature difference across the specimens. For the purposes of this test method, the above checks, if performed at typical operating temperature differences, shall be adequate to indicate the degree of thickness dependence.

A1.5.8 *Method of Determining Dependence on Temperature Difference*—If the temperature-difference dependence of the thermal properties is not known for a material, a minimum of three measurements shall be made. These are made with widely differing temperature differences. A second-order dependence can be revealed by these measurements. When a simple linear relationship is known to occur, only two measurements, that is, one extra, need be made. This establishes the linear dependence for that particular sample.

A1.5.9 *Warping*—Special care should be exercised with specimens with large coefficients of thermal expansion that warp excessively when subjected to a temperature gradient. The warping may damage the apparatus or may cause additional contact resistance that may lead to serious errors in the measurement. Specially designed apparatus may be necessary to measure such materials.

A1.6 *Measurement Uncertainty*—The uncertainty of the apparatus is based upon consideration of the random and systematic components of the following measurement uncertainties (32): uncertainty in heat flow, Q ; uncertainty in temperature difference, $T = (T_H - T_C)$; uncertainty in metered area, A ; and, uncertainty in specimen thickness, L .

A1.6.1 Other specimen characterization and test condition data may need to be reported. The precision and bias of these data are to be reported to the extent they have a direct bearing on the accuracy of the results. Prescribed precision and bias of the primary data are not mandated by this test method. However, it is required that the user assess and report the precision and bias of the data. The discussion below provides guidelines to assist the user in performing this uncertainty assessment. A variety of helpful performance checks are included in this discussion. In the following discussion both random and systematic errors are considered. The subscript s is used to denote systematic, and the subscript r is used for the random components.

A1.6.1.1 *Systematic Error, s* —Systematic error, s , is any component of error that remains fixed during the runs that constitute a successful test. To simplify the discussion, this does not include any components of error that are known both in magnitude and sign. Under such circumstances, the user should make appropriate corrections to the conductivity measurements and supply the justification for them. The user may check for the presence of unexpected errors by using a reference specimen or transfer standard available

from appropriate sources. If errors are discovered, their source should be identified and removed. A guarded hot plate cannot be calibrated. The task of estimating the remaining systematic errors is based on judgment and experience, including an awareness of the results of interlaboratory comparisons. The implications of such estimates is often that they are the maximum possible systematic errors. In this event the total maximum systematic error is the sum of the errors. It is, however, more likely that these estimates are probabilistic in nature and do not, in fact, represent the worst possible case. The total probable systematic errors are summed in the same manner as random errors, that is, the square root of the sum of squares. In the following discussion the latter approach is taken. However, the user must decide if the bias estimates are worst cases or probabilistic in nature, and sum them accordingly.

A1.6.1.2 Random Error, r .—Random error, r , is that component of error that may vary both in sign or magnitude during the runs that constitute a successful test. For simplicity, it is assumed that the variations are normally distributed and conventional statistical techniques are applicable. An estimate of random error components can be obtained by repeat measurements of each variable.

A1.6.1.3 It is important to distinguish between random and systematic errors for the following reason. The results reported in the test method are mean values derived from more than a single run. The uncertainties reported generally apply to these mean values. The uncertainty of a mean value due to the random error component decreases approximately as $1/n$ where n is the number of repeat runs. In contrast to this, the uncertainty of the mean value due to the systematic error component does not decrease with repeat runs. Thus, it is recommended that the error components be treated separately. The total uncertainty is expressed by reporting both components separately.

A1.7 Error Components.—In the following sections, the error components of each reported variable are discussed. The total random or systematic uncertainty for each variable is taken to be the square root of the sum of squares.

A1.7.1 Heat Flow, Q .—The objective of the test method is to establish and measure uniaxial heat flow through the metered area of the specimen. Any deviation from this objective represents error in the reported heat flow. The following sources of error should be considered:

A1.7.2 Edge Heat Loss, Q_{se} .—Edge heat loss, Q_{se} , is a systematic error as the conditions surrounding the plate-specimen stack remain constant throughout the test procedure. Although tests have been reported that shed some light on the magnitude of this error, the results generally are not proven to the point where corrections based on these results are universally accepted (1,4,6,7,18–22). However, the results are considered sufficiently valid for the basis of defining the maximum specimen thickness. The optimum environmental temperature to minimize this error is a small fraction of T above the mean test temperature. To determine the sensitivity of this error to test conditions, the user should determine the heat flux as a function of secondary guard temperature. This dependence may change appreciably with specimen and apparatus characteristics and, therefore, should be done under typical test conditions.

A1.7.3 Gap Heat Loss.—Gap heat loss is considered to be

composed of both systematic, Q_{sp} , and random, Q_{sr} , components. The systematic component can be, in part, due to the fact that there may be a finite number of locations along the gap at which the imbalance is measured; reducing the temperature difference between a finite number of points on opposite sides of the gap to zero may not necessarily ensure that there is zero net flow of heat across the gap. Improper position of the sensors will lead to systematic error. Spurious emfs within the circuitry will result in a systematic imbalance. The random component is due to short-term control fluctuations. After estimating the probable imbalance across the gap in terms of temperature (or sensor voltage) one needs to determine the effect of this imbalance on the measured heat flow through the metered area. This can be done by measuring the dependence of metered area power on intentionally introduced gap imbalance. A typical way of addressing this is to run three tests, one with the guard balanced and one each biased positive and negative. The results are plotted, lambda versus gap balance, and the zero intercept is determined. The imbalance introduced should be large enough to yield an easily measured change in Q , but small enough to remain in the region where the dependence of Q upon imbalance is approximately linear.

A1.7.3.1 It has been found that (3,15,16) the gap heat loss, Q_{sp} , is linearly dependent on temperature unbalance across the gap, T_g , that is, $Q_{sp} = BT_g$. The proportionality constant, B , is dependent on the wires crossing the gap (number, size, and type), gap geometry (width and cross-sectional shape), the gap fill material (gas, insulation), the emittance of the gap surfaces and the material in the vicinity of the gap between the hot and cold plates. A reasonable approximation of this heat flow can be calculated from this information. It is recommended that this be done to confirm the value measured by the procedure described in the previous paragraph.

A1.7.4 Effect of Drift of the Metered Area Heater.—A quasi-heat loss exists due to the changing heat content of the metered area heater as its temperature changes. Typical plates have a relatively high heat capacity and even for small drift rates can produce significant errors in measured heat flow. If the drift is monotonic, the error is systematic, Q_d ; if not, the error is exhibited as random error, Q_{dr} . Normally, the experiment is conducted so that there is no observable drift. Under this circumstance, the possible drift is determined by the detectability or control limit, dT/dt , of the system. One can compute the magnitude of this error, Q_d , in watts, from a knowledge of the maximum possible dT/dt and the specific heats and masses of the various components of the metered section of the plate as follows:

$$Q_d = dT/dt \sum C_p M_i \quad (A1.1)$$

The specimen heat capacity also contributes to the drift error, but for low-density insulations the heat capacity of the specimen is small compared to the plate. This error also can be determined by measuring the dependence of drift rate on measured heater power. Comparison of the calculated and measured results is advised to increase confidence in the reported result.

A1.7.5 Power determination error, composed of both systematic, Q_p , and random, Q_{pr} , components. With high quality instrumentation these errors can be reduced to an

insignificant level. The manufacturers' specifications on bias and precision will normally suffice to define these errors.

A1.7.6 Temperature and Temperature Difference—Temperature error is composed of systematic, ϵ_T , and random, σ_T , components. In addition, these errors are further subdivided according to the source of the error:

A1.7.6.1 Calibration error, ϵ_{T_c} , is entirely systematic as long as the same calibration is used. It is, however, not necessarily the same for each temperature sensor. In the case of thermocouples, calibration is frequently performed for each spool of wire, not for each piece of wire from that spool. Therefore, systematic differences can occur as one progresses through the spool. The calibration is frequently represented by an equation which approximates the experimental calibration data taken at selected temperatures. If a digital read-out device is used that yields temperature directly, the calibration formulation is built into the device and the same basis for error exists.

A1.7.6.2 Instrumentation measurement error, T_m , occurs when the sensor output is measured. This error contains both systematic and random components. Each component should be estimated from equipment manufacturer's specifications and from estimated spurious circuit effects. In addition, temperature errors are introduced by long and short-term control fluctuations. A helpful procedure to assess the magnitude of these errors is as follows. Place the guarded metered area and primary guard(s) in thermal contact with the adjacent cold plates (insert high conductance plates in place of the specimens if the plates cannot be placed physically together). Adjust the cold plates to the desired temperature; control this temperature until steady-state is reached. The metered area heater should be off. Periodically read the isothermal surface temperatures to detect systematic differences and random variations over an extended time.

A1.7.6.3 Sensor positioning, a potentially significant source of error in temperature measurement can be caused by improper positioning of the sensor or the disturbance caused by the presence of or finite size of the sensor itself. It is intended that the average temperature of each specimen surface be measured. If the sensor is mounted in the plate surface, thermal contact resistance between the plate and specimen is a source of error. If the sensor is mounted in the specimen surface, sensor separation (specimen thickness) is a source of error. If the specimen is inhomogeneous across the metered area, surface temperature variations exist and the indicated temperature will depend on its location on the surface. If heat flows along the sensor leads from the external environment, the measured temperature will be in error because of the presence of the sensor. For a single test on a given specimen, this source of error, ϵ_{T_m} , is systematic. A performance check that is helpful to determine the potential temperature error due to temperature nonuniformity is as follows: Assemble a multi-junction thermocouple and place it between the specimen and plate in question. Establish steady-state at the desired test condition. Determine the variation in temperature across the plate from the multi-junction thermocouple outputs.

A1.7.6.4 A helpful technique to estimate interface temperature errors is to mount sensors both within the plate and within the specimen surface. Then perform a test and calculate the difference between the two sets of data.

A1.7.6.5 Temperature difference error is also composed of systematic, ϵ_T , and random components, σ_T . Care must be exercised in estimating these components compared to the error components for temperature itself. The results can depend strongly on whether a differential measurement or two absolute measurements are performed. Because T is frequently small, large percentage errors can occur if care is not observed. For example, at a mean specimen temperature of 300 K, an error of 1 K in the mean temperature, that corresponds to an error of about 0.2 % in thermal resistance for typical insulations. However, this same error of 1 K in measurement of a specimen temperature difference of 25 K corresponds to a 4 % error in both T and in the value of the thermal resistance, independent of the mean temperature. The ad hoc experiment described in 9.5.1.3 is recommended to provide estimates of these error components.

A1.7.7 Specimen thickness error, ϵ_L , and meter area error, ϵ_A , are both systematic errors. The specimen thickness error is determined by the ability to measure the plate spacing (including variations of this thickness over the metered area) or, in the case of rigid specimens, the specimen thickness and the changes due to thermal expansion. The effect of bowing or warping at operating temperatures should be given attention. At relatively large thicknesses (above 5 cm) this error can be maintained below 0.5 %. At small thicknesses (below 0.5 cm) this error may become a dominating factor in the overall accuracy. The meter area error is usually small except for the assumption about what proportion of the gap area to include. This error is difficult to estimate for very thin specimens or when a discontinuity in the specimen occurs at the gap. The specimen thickness error will contain a random component, σ_L , due to assembly and disassembly.

A1.8 Thermal Conductance or Thermal Resistance—The relative uncertainty in thermal conductance, C , caused by either random errors or systematic errors of indeterminate sign, may be calculated from the following error propagation formula:

$$(\Delta C/C)^2 = (\Delta Q/Q)^2 + (\Delta T/T)^2 \quad (A1.2)$$

where Q/Q and T/T are the total relative uncertainties of heat flux and temperature difference, respectively. The same equation applies to thermal resistance. Included in the total relative uncertainties are those due to the measurement as well as those discussed in Practice C 1045. For example for fibrous glass insulation at 24°C mean temperature and a 40°F temperature difference across the specimen the following errors can be realized:

$$(\Delta C/C)^2 = (0.5)^2 + (0.25)^2 = 0.31 \quad (A1.3)$$

Therefore, the uncertainty in thermal conductance would be $\sqrt{0.31} = 0.56$ %.

A1.9 Thermal Conductivity or Thermal Resistivity—The relative uncertainty in thermal conductivity caused by either random or systematic errors may be calculated from the following error propagation formula:

$$\left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 = (\Delta Q/Q)^2 + (\Delta T/T)^2 + (\Delta A/A)^2 + (\Delta L/L)^2 \quad (A1.4)$$

where A/A and L/L are the total relative uncertainties of area and thickness, respectively. Again, the above total relative uncertainties include not only the measurement uncertainty,

but also the effect of material variability and deviations from the definitions as discussed in Practice C 1045. In addition, it should be noted that the temperature to which each measured property is assigned also contains a measurement error that affects the uncertainty of the final result. The effect of this error increases as the temperature dependence of the measured property increases.

A1.9.1 For example for fibrous glass insulation at 24°C mean temperature and a 22°C temperature difference across the specimen the following errors can be realized.

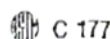
$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2 = (0.5)^2 + (0.25)^2 + (0.01)^2 + (0.1)^2 = 0.32 \quad (A1.5)$$

Therefore, the uncertainty in thermal conductivity would be $\sqrt{0.32} = 0.57\%$.

A1.10 It is recommended that the user periodically confirm these calculated uncertainties by measuring specimens of established standard reference materials or calibrated transfer specimens. Comparison of the measurement results with the accepted values will reveal whether the performance of the guarded hot plate is of acceptable quality. The results of such comparative measurements are not to be used to obtain an apparatus "calibration" or "correction" factor. For further information on this see Refs (23-29).

REFERENCES

- (1) Bankvall, C. G., "Mechanisms of Heat Transfer in Permeable Insulation and Their Investigation in a Special Guarded Hot Plate," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 34-48.
- (2) Brendeng, E., and Frivik, P. E., "New Development in Design of Equipment for Measuring Thermal Conductivity and Heat Flow," *ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 147-166.
- (3) Smith, D. R., Hust, J. G., and Van Poolen, L. J., "A Guarded-Hot-Plate Apparatus for Measuring Effective Thermal Conductivity of Insulations Between 80 K and 360 K," *NBSIR 81-1657*, 1982, 49 pp.
- (4) Pratt, A. W., Chapter 6: "Heat Transmission in Low Conductivity Materials," in *Thermal Conductivity*, Vol. I, R. P. Tye, Ed., Academic Press, 1969, pp. 301-405.
- (5) De Ponte, F., and Di Filippo, P., "Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 97-117.
- (6) Woodside, W., and Wilson, A. G., "Unbalance Errors in Guarded Hot Plate Measurements," *Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulations, ASTM STP 217*, 1956, pp. 32-48.
- (7) Woodside, W., "Analysis of Errors Due to Edge Heat Loss in Guarded Hot Plates," *Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulations, ASTM STP 217*, 1957, pp. 49-64.
- (8) Woodside, W., "Deviations from One-Dimensional Heat Flow in Guarded Hot Plate Measurements," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 28, 1957, pp. 1033-1037.
- (9) Hust, J. G., "Thermal Anchoring of Wires in Cryogenic Apparatus," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 41, No. 5, May 1970, pp. 622-624.
- (10) ASTM Subcommittee E20.04, *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, ASTM STP 470B*, 1981.
- (11) Sparks, L. L., Powell, R. L., and Hall, W. J., *Cryogenic Thermocouple Tables, NBS Report 9712*, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, 1968.
- (12) Bertasi, M., Bigolaro, G., and De Ponte, F., "Fibrous Insulating Materials as Standard Reference Materials at Low Temperatures," *Thermal Transmission Measurements of Insulation, ASTM STP 660*, R. P. Tye, Ed., 1978, pp. 30-49.
- (13) Shirliffe, C. J., "Establishing Steady-State Thermal Conditions in Flat Slab Specimens," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 13-33.
- (14) Bomberg, M., and Solvason, K. R., "Precision and Accuracy of Guarded Hot Plate Method," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 393-410.
- (15) Siu, M. C. L., "Comparison of Results of Measurements Made on a Line-Heat-Source and a Distributed Heat Source Guarded-Hot-Plate Apparatus," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 413-418.
- (16) Siu, M. C. L., and Bulik, C., "National Bureau of Standards Line-Heat-Source Guarded-Hot-Plate Apparatus," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 52(11), 1981, pp. 1709-1716.
- (17) Horlick, J., "National Voluntary Laboratory Accreditation Program, Proficiency Testing for Thermal Insulation Materials Laboratory Accreditation Program," *NBSIR 84-2890*, 1984.
- (18) Donaldson, I. G., "A Theory for the Square Guarded Hot Plate-A Solution of the Heat Conduction Equation for a Two Layer System," *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. XIX, 1961, pp. 205-219.
- (19) Donaldson, I. G., "Computer Errors for a Square Guarded Hot Plate for the Measurement of Thermal Conductivities of Insulating Materials," *British Journal of Applied Physics*, Vol. 13, 1962, pp. 598-602.
- (20) Pratt, A. W., "Analysis of Error Due to Edge Heat Loss in Measuring Thermal Conductivity by the Hot Plate Method," *Journal of Scientific Instruments*, Vol. 39, 1962, pp. 63-68.
- (21) Somers, E. V., and Cybers, J. A., "Analysis of Errors in Measuring Thermal Conductivity of Insulating Materials," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 22, 1951, pp. 583-586.
- (22) Troussart, L. R., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Guarded Hot Plate Apparatus and its Computer Implementation," *Journal of Thermal Insulation*, Vol. 4, 1981, pp. 225-254.
- (23) Pelanne, C. M., "The Development of Low Density Glass-Fiber Insulation as Thermal Transmission Reference Standards," *Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 763-776.
- (24) Renner, B. G., Jones, R. R., and Ober, D. G., "Development of Calibrated Transfer Specimens of Thick, Low-Density Insulations," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 419-426.
- (25) Shirliffe, C. J., "Effect of Thickness on the Thermal Properties of Thick Specimens of Low-Density Thermal Insulation," *Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718*, D. L. McElroy and R. P. Tye, Eds., 1980, pp. 36-50.
- (26) Siu, M. C. L., "Fibrous Glass Board as Standard Reference Material for Thermal Resistance Measurement Systems," *Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718*, D. L. McElroy and R. P. Tye, Eds., 1980, pp. 343-360.
- (27) Smith, D. R., and Hust, J. G., "Effective Thermal Conductivity of Glass-Fiber Board and Blanket Standard Reference Materials," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 483-496.
- (28) Smith, D. R., and Hust, J. G., "Measurement of Effective Thermal Conductivity of a Glass Fiberboard Standard Reference Material," *Cryogenics*, Vol. 21, No. 7, July 1981, pp. 408-410.
- (29) Smith, D. R., Hust, J. G., and Van Poolen, L. J., "Measurement of Effective Thermal Conductivity of Glass Fibreblanket Standard



C 177

- Reference Material," *Cryogenics*, Vol 21, No. 8, August 1981, pp. 460-462.
- (30) Hust, J. G., and Smith, D. R., "Round-Robin Measurements of the Apparent Thermal Conductivity of Two Refractory Insulation Materials, Using High Temperature Guarded-Hot-Plate Apparatus," *NBSIR 88-3087*, 28 pp., U.S. National Institute of Standards and Technology, April 1988.
- (31) Peavy, B. A., and Rennex, B. G., "Circular and Square Edge Effect Study for Guarded-Hot-Plate and Heat-Flow-Meter Apparatuses," *Journal of Thermal Insulation*, 9, 1986, pp. 254-300.
- (32) International Organization for Standardization (ISO), *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISBN 92-67-10188-9, 1993, First Edition.
- (33) Bode, K.-H., "Thermal Conductivity Measurements with the Plate Apparatus: Influence of the Guard Ring Width on the Accuracy of Measurements," *Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methodology*, ASTM STP 879, C. J. Shurtleff, and R. P. Tye, Eds., 1985, pp. 29-48.
- (34) ASTM, *Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis*, Manual 7, 6th Edition, 1991, Available from ASTM Headquarters, Request PCN:28-0070899-34.
- (35) Eisenhart, C., "Realistic Evaluation of the Precision and Accuracy of Instrument Calibration Systems," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol 67C, No. 2, April-June 1963, pp. 161-187.
- (36) Pham, Q. T., and Smith, C. G., "Thermal Imbalance Errors and Effective Area in Guarded Hot Plates," *Review of Scientific Instruments*, Vol 57(1), January 1986, pp. 99-105.
- (37) Orr, H. W., "A Study of the Effects of Edge Insulation and Ambient Temperature on Errors in Guarded-Hot-Plate Measurements," *Proceedings of the 7th Thermal Conductivity Conference*, D. R. Flynn, and B. A. Peavy, Eds., 1968, pp. 521-526.
- (38) Robinson, H. E., and Watson, T. W., "Interlaboratory Comparison of Thermal Conductivity Determinations with Guarded-Hot-Plates," *Symposium on Thermal Insulating Materials*, ASTM STP 119, Philadelphia, 1951, pp. 36-44.
- (39) Horlick, J., and Berger, H. W., "NVLAP and the Thermal Insulation Proficiency Testing Program," *Journal of Thermal Insulation*, Vol 8, April 1985, pp. 278-297.
- (40) Ku, H. H., "Notes on the Use of Propagation Error Formulas," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol 70C, No. 4, October-December 1966, pp. 263-273.
- (41) Hust, J. G., and Pelanne, C. M., "Round Robins on the Apparent Thermal Conductivity of Low Density Glass Fiber Insulations Using Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Apparatus," *NBSIR 85-3026*, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, 1985.
- (42) Pelanne, C. M., "Experiments on the Separation of Heat Transfer Mechanisms in Low-Density Fibrous Insulation," *8th Conference on Thermal Conductivity*, Plenum Press, 1969, pp. 897-911.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19380.

ภาคผนวก จ

นียบาสัพท

นิยามศัพท์

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้นิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ดังนี้

น้ำยางธรรมชาติ หมายถึง ของเหลวที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงของต้นยางพารา มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Rubber Content) และส่วนที่เป็นตัวกลาง หรือส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง (Non Rubber Content) โดยส่วนที่เป็นเนื้อยางมีความหนาแน่นประมาณ 0.92 กรัม/มิลลิลิตร มีรูปร่างของเม็ดยางเป็นรูปกลม และรูปกลมรีคล้ายลูกแก้วเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.02-3.0 ไมครอน ไม่ละลายน้ำฟิวรอนนอกห่อหุ้มด้วยชั้นของสารพอลิโปรตีน และไขมัน มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ

น้ำยางธรรมชาติสูตรเบ้ายาง หมายถึง น้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมีตามสูตรเบ้ายางของสถาบันวิจัยยางแห่งชาติ

สารหน่วงไฟ หมายถึง สารที่มีความสามารถในการยับยั้งหรือแม้กระทั่งหยุดกระบวนการเผาไหม้ โดยสารหน่วงไฟจะแสดงสมบัติในการต้านทานการลามไฟตามลักษณะโดยธรรมชาติของสารนั้นๆ ในทางด้านกายภาพ หรือ ทางด้านเคมี ในรูปของ ของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ

แผ่นฉนวน หมายถึง แผ่นฉนวนความร้อนหน่วงไฟจากเส้นใยผักตบชวาและน้ำยางธรรมชาติ

ฟ้นละอองฝอย หมายถึง การพ่นน้ำยางที่ผสมสารหน่วงไฟให้เป็นฝอยด้วยกระปุกพ่นแบบละอองลงบนเส้นใยผักตบชวาที่โรยเป็นชั้นบางๆ พ่นสลับกับชั้นเส้นใยผักตบชวาจนได้ความหนาที่ต้องการ

น้ำยางธรรมชาติเจือจาง หมายถึง น้ำยางธรรมชาติที่ผสมน้ำที่อัตราส่วนน้ำยางต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก

น้ำยางธรรมชาติหน่วงไฟ หมายถึง น้ำยางธรรมชาติที่ผสมน้ำที่อัตราส่วนน้ำยางต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนักแล้วเติมสารหน่วงไฟเชิงค์บอเรต 40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

เส้นใยผักตบชวาแห้งไฟ หมายถึง เส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการเติมสารแห้งไฟโดยการทำปฏิกิริยาในสารละลายบอแรกซ์เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Spontaneous หมายถึง การลุกไหม้ของเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นเองโดยไม่มีประกายไฟ

Ignition temperature หรือจุดไฟติด หมายถึง ระดับอุณหภูมิความร้อนที่ทำให้เชื้อเพลิงร้อนจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างรวดเร็วเกิดเป็นไฟและการเผาไหม้ขึ้นจุดไฟติดของเชื้อเพลิงต่าง ๆ จะสูงกว่าจุดวาบไฟมากหรือน้อยแล้วแต่ลักษณะทางสารสมบัติของเชื้อเพลิงนั้นติดไฟได้

Ionization Detector หมายถึง เครื่องตรวจสอบการลุกไหม้ในช่วงเริ่มต้น (Incipient Stage) ที่มนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องใช้เครื่องตรวจสอบนี้จึงจะทราบถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพเคมีของบรรยากาศในห้องหรือบริเวณจุดต้นเพลิง

Flashover หมายถึง การลุกติดไฟขึ้นมาโดยพร้อมเพรียงกันของเชื้อเพลิงในห้องที่เกิดเพลิงไหม้ ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิในระดับเพดานเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเพิ่มการแผ่รังสีความร้อนลงสู่พื้นมากขึ้น ความร้อนที่แผ่รังสีลงมาเหล่านี้จะถูกสิ่งของ (เชื้อเพลิง) ที่อยู่ด้านล่างดูดกลืน (Absorb) เข้าไป ซึ่งทำให้ผิวส่วนบนของสิ่งของ (เชื้อเพลิง) เกิด Pyrolysis เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดติดไฟ (Ignition Temperature) ของสิ่งเหล่านั้นก็จะเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้เอง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Flashover”

Back Draft เกิดจากสภาวะการลุกไหม้ที่ไม่เป็นเปลวเนื่องจากออกซิเจนถูกใช้หมด แต่อุณหภูมิในห้องสูงกว่า 1,100 ฟาเรนไฮต์ และมีควัน เหม่า และก๊าซร้อนสะสมอยู่ปริมาณมาก เพียงแต่ขาดออกซิเจนควบคุมการลุกไหม้ ซึ่งถ้าเกิดมีออกซิเจนเข้ามาสนับสนุนทันทีทันใด เหม่า และก๊าซร้อนที่สะสมอยู่จะลุกติดไฟขึ้นมาทันทีและทำให้เกิดการระเบิด การระเบิดในลักษณะนี้เรียกว่า “Back draft” ความดันที่เกิดจาก Back Draft นั้นอาจเพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างพังลงได้ และเป็นอันตรายกับสิ่งมีชีวิต

Flash Point หรือ จุดวาบไฟ ระดับอุณหภูมิความร้อนที่ทำให้เชื้อเพลิงเปลี่ยนสถานะเป็นไอหรือก๊าซ เข้าผสมกับอากาศอย่างได้สัดส่วน จนพร้อมที่จะลุกไหม้

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายทนง บุญมีมาพาสุข
เกิดวันที่	22 มีนาคม พศ. 2511
สถานที่เกิด	จังหวัด ปทุมธานี
ประวัติการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ตำแหน่งปัจจุบัน	1. Registered Lead Auditor of Quality Managemnt System and Occupational Health and Safety System 2. Certifier
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	TUV Rheinland (Thailand) Limited. Bangkok, Thailand